สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า

THE POWER ANALYSIS OF AN ELECTRIC TRAM

T 045959

โดย

นายศรายุทธ เนียมฤทธิ์

นายสมศักดิ์ บุญเที่ยง

นายสุเชาวน์ สีตะสิทธิ์

นายโอภาส อึ้งวิศิษฏ์วงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45959
วัน, เดือน, ปี 26 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2544

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า

THE POWER ANALYSIS OF AN ELECTRIC TRAM

โดย

นายศรายุทธ เนียมฤทธิ์

นายสมศักดิ์ บุญเที่ยง

นายสุเชาวน์ สีตะสิทธิ์

นายโอภาส อึ้งวิศิษฎ์วงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. วีระเชษฐ์ ขันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

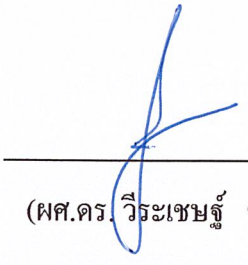
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า

The Power Analysis of an Electric Tram

ผู้จัดทำ

1. นายศรายุทธ เนียมฤทธิ์	รหัสประจำตัว	41014409
2. นายสมศักดิ์ บุญเที่ยง	รหัสประจำตัว	41014443
3. นายสุเชาวน์ สีตะสิทธิ์	รหัสประจำตัว	41014470
4. นายโอภาส อึ้งวิศิษฎ์วงศ์	รหัสประจำตัว	41014555



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. วีระเชษฐ์ ขันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า

นายศรายุทธ เนียมฤทธิ์
นายสมศักดิ์ บุญเที่ยง
นายสุเชาวน์ สีตะสิทธิ์
นายโอภาส อึ้งวิศิษฎ์วงศ์
ผศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นระบบขับเคลื่อนหลักของรถรางไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยดูผลกระทบด้านต่าง ๆ ที่มีต่อกำลังไฟฟ้าเมื่อภาระหรือรูปแบบการทำงานของรถรางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ และค่าตัวประกอบกำลัง นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและกระแส ที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกำลังไฟฟ้าซึ่งความผิดเพี้ยนเกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์ถึงความผิดเพี้ยน พร้อมทั้งศึกษาถึงประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของระบบรถรางไฟฟ้าทั้งนี้การศึกษาทั้งหมดจะศึกษาจากแบบจำลองรถรางไฟฟ้า ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 1.5 กิโลวัตต์ซึ่งทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม ขนาด 2 กิโลวัตต์ เป็นส่วนขับเคลื่อนหลัก โดยการศึกษาทั้งหมดทำในสภาวะคงตัวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE POWER ANALYSIS OF AN ELECTRIC TRAM

Sarayut Niamrit

Somsak Boonthieng

Suchow Seetahsith

Opas Ungvisitwong

Asst. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2001

ABSTRACT

This paper presents the power analysis of an electric tram and studies the effect on power that feed to induction motor when the load or operations of an electric tram is changed such as real power, reactive power, apparent power and power factor. In addition, this paper studies and analyses the distortion of voltage and current waveform that affect to the power distortion by Fourier method. These distortions occur using the PWM inverter with induction motor. This paper studies the overall efficiency of the electric tram system.

The analysis is experimented on the electric tram that its driving system is 1.5 kilowatts machine with 2 kilowatts commercial PWM inverter at the steady state operation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูปภาพ	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในโครงงาน	5
2.1 ทฤษฎีกำลังไฟฟ้า	5
2.2 ทฤษฎีของฮาร์โมนิค	8
2.3 ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	14
2.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	14
2.3.2 หลักการทำงาน	16
2.3.3 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	17
2.3.4 สลิป	18
2.3.5 กระแสของมอเตอร์	19
2.3.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์และกระแส	19
2.3.7 แรงบิดพิกัด	20
2.3.8 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์	21
2.3.9 การพิจารณาวิเคราะห์สมบัติของโหลด	21
2.4 ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์	23
2.4.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	23
2.4.2 การทำงานของภาคคอนเวอร์เตอร์	24
2.4.3 การทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์	25
2.4.4 รูปแบบ V/f และทอร์คบูส	30
2.4.5 การตั้งค่าทอร์กบูสต์	32
2.4.6 ข้อแตกต่างเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์	34
2.4.7 เหตุที่ต้องเปลี่ยนแรงดันเมื่อแปรความเร็วรอบ	34
2.4.8 แรงบิดของมอเตอร์ที่ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์	35
2.4.9 ประสิทธภาพของอินเวอร์เตอร์	35
2.4.10 เพาว์เวอร์แฟคเตอร์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.5 ทฤษฎีการส่งข้อมูลมาตรฐาน 485 38

2.7.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการส่งข้อมูลแบบ 485 และ 422 39

2.7.2 ปัญหาที่มักพบในการส่งข้อมูลแบบ 485 39

2.7.3 หลักการของ Unit Load 40

2.7.4 Cable Termination 41

บทที่ 3 การออกแบบวงจรเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน
และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 46

3.1 Zero Crossing Detector 46

3.1.1 Resistor Voltage Divider 47

3.1.2 Low Pass Filter 47

3.1.3 Comparator Amplifier 48

3.1.4 Opto Isolated 49

3.2 Speed Encoder 49

3.3 RS-485 Serial Data Transmission 50

3.4 วงจร Schmitt Trigger 51

3.5 ส่วนประมวลผล MCS51 และส่วนแสดงผล LCD 52

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 59

การทดลองที่ 1 การวัดค่าสัญญาณที่จุดต่างๆ ของเครื่องมือวัดความเร็ว
สนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 61

- ผลการทดลองที่ 1 65
- วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 1 72

การทดลองที่ 2 การทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็ว
สนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 74

- ผลการทดลองที่ 2 76
- วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 2 80

การทดลองที่ 3 การทดลองการใช้งาน Power Quality Analyzer (Fluke 43)
ร่วมกับโปรแกรม FlukeView 82

- ผลการทดลองที่ 3 84
- วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 3 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

การทดลองที่ 4 การหาคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถรางไฟฟ้า 89

- ผลการทดลองที่ 4 91
- อธิบายการทดลองที่ 4 98
- วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 4 99

การทดลองที่ 5 การศึกษากำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า 105

- ผลการทดลองที่ 5 109
- อธิบายการทดลองที่ 5 121
- วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 5 122

บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์ 124

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ประมวลภาพชิ้นงานและการทำงาน โครงงาน 1 และ โครงงาน 2

ภาคผนวก ข โปรแกรมคำนวณและแสดงค่าความเร็วรอบ, ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน, ค่าเปอร์เซ็นต์สลิป และเวลาที่ใช้ในการวัดของอินดักชั่นมอเตอร์

ภาคผนวก ค ผลการทดลองโดยละเอียดของการทดลองที่ 4

ภาคผนวก ง ผลการทดลองโดยละเอียดของการทดลองที่ 5

ภาคผนวก จ วิธีการใช้งานเครื่องมือวัด Power Quality Analyzer(FLUKE 43)

ภาคผนวก ฉ MCS-51 และ LCD Module

ภาคผนวก ช ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดตัวต้านทาน 6
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของสัญญาณกำลังไฟฟ้ารีแอคทีพของโหลดตัวเหนี่ยวนำ 7
รูปที่ 2.3 แสดงฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM 8
รูปที่ 2.4 แสดงฮาร์มอนิกที่ความถี่หลักมูลและที่องค์ประกอบลำดับที่ 3 และ 5 8
รูปที่ 2.5 แสดงรูปแรงดันและกระแส และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดัน และกรแส 11
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของสเตเตอร์ 14
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก 15
รูปที่ 2.8 แสดงภาพตัดของโครงสร้างภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 15
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 17
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์รหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดัน, โหลดและความเร็วรอบ 19
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงคุณสมบัติแบบต่างๆ 22
รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 23
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์ 24
รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 25
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแสดงกระแสและแรงดันขาออก 26
รูปที่ 2.16 วิธีการสร้างไฟสลับ 26
รูปที่ 2.17 รูปคลื่นกระแส 26
รูปที่ 2.18 รูปคลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz 27
รูปที่ 2.19 วิธีการแปรความถี่ 27
รูปที่ 2.20 แสดงวงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 28
รูปที่ 2.21 การสร้างไฟสลับ 3 เฟส 28
รูปที่ 2.22 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 29
รูปที่ 2.23 แสดงการเกิดรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ต่ำและสูง 30
รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 31
รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลย์กรณีไม่มีโหลด 32
รูปที่ 2.26 รูปแบบ v/f ในอุดมคติ 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.27 รูปแบบ v/f ที่ใช้งานจริง 32
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างแรงบิดขณะสตาร์ท 33
รูปที่ 2.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง %โหลดกับกระแสมอเตอร์ 33
รูปที่ 2.30 การทำงานของมอเตอร์แรงบิดคงที่และแรงดันคงที่ 35
รูปที่ 2.31 กำลังไฟฟ้าขาเข้าและออก 36
รูปที่ 2.32 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเปรียบเทียบ 37
รูปที่ 2.33 แสดงการทดสอบอินพุทของวงจรรับสัญญาณและการ plot กราฟ I/V 40
รูปที่ 2.34 แสดงวงจรการส่งข้อมูลแบบไม่มี Termination 41
รูปที่ 2.35 แสดงรูปสัญญาณของ output ของตัวขับสัญญาณ 42
รูปที่ 2.36 แสดงรูปสัญญาณของ input ของตัวขับสัญญาณ 42
รูปที่ 2.37 แสดงวงจรที่มีการต่อterminal แบบ parallel termination 43
รูปที่ 2.38 แสดงรูปสัญญาณของ output ของตัวขับสัญญาณที่มีการต่อ Termination แบบ parallel termination 44
รูปที่ 2.39 แสดงรูปสัญญาณของ input ของตัวขับสัญญาณที่มีการต่อ Termination แบบ parallel termination 44
รูปที่ 3.1 วงจร Zero Crossing Detector 46
รูปที่ 3.2 แสดงจร Comprator Amplifier 48
รูปที่ 3.3 Optical Interrupted Switch และการวางตำแหน่งของ Optical Interrupted 49
รูปที่ 3.4 วงจรการส่งข้อมูลแบบ RS-485 50
รูปที่ 3.5 วงจรการต่อ Schmitt Trigger 51
รูปที่ 3.6 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และ LCD 53
รูปที่ 4.1 Block diagram แสดงเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 61
รูปที่ 4.2 ภาพแสดงจุดวัดค่าสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร Zero Crossing Detector 62
รูปที่ 4.3 ภาพแสดงจุดวัดค่าสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร Encoder และ RS-485 transmission data 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.4 ภาพแสดงจุดวัดค่าสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นสัญญาณของ MCS-51 64
รูปที่ 4.5 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM(จุดที่1) 65
รูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณ PWM หลังผ่านการกรองฮาร์โมนิค(จุดที่ 2) 65
รูปที่ 4.7 แสดงรูปสัญญาณของรูปคลื่นไซน์ 50 HZ หลังผ่านวงจร Zero Crossing Detector(จุดที่ 3) 66
รูปที่ 4.8 แสดงรูปสัญญาณหลังผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออก (จุดที่ 4) 67
รูปที่ 4.9 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้า RS-485 Driver ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 5) 68
รูปที่ 4.10 แสดงรูปสัญญาณที่ออกจาก RS-485 Receiver ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 6) 68
รูปที่ 4.11 แสดงรูปสัญญาณขาออกของ Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 7) 69
รูปที่ 4.12 แสดงรูปสัญญาณที่ออกจาก RS-485 Receiver ของสัญญาณจาก Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 8) 69
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณก่อนเข้า Schmitt Trigger ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 9) 70
รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณขาออกจาก Schmitt Trigger ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 10) 70
รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณก่อนเข้า Schmitt Trigger ของสัญญาณ Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 11) 71
รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณขาออก Schmitt Trigger ของสัญญาณ Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 12) 71
รูปที่ 4.17 แสดงรูปการทดลอง 75
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน 76
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน (สภาวะรับภาระโหลด 2kg) 77
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน (สภาวะรับภาระโหลด 4 kg) 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.21 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบ และสนามแม่เหล็กหมุน (สภาวะรับภาระโหลด 6 kg) 79
รูปที่ 4.22 แสดงรูปการทดลอง 83
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz 84
รูปที่ 4.24 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz 85
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความแตกต่างหรือการแกว่งของการวัด 88
รูปที่ 4.26 Block diagram การทดลอง 90
รูปที่ 4.27 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อตั้งค่า torque Boost ไว้สูงแต่ขับโหลดเบา 101
รูปที่ 4.28 รางที่ใช้ในการทดสอบ 107
รูปที่ 4.29 Block Diagram ของการทดลอง 108
รูปที่ ก1 รูปวงจร Zero Crossing Detector และ วงจร Driver ก-1
รูปที่ ก2 รูปวงจร Board ใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C52 ก-1
รูปที่ ก3 รูปวงจร Receiver ก-2
รูปที่ ก4 รูปการต่อวงจรต่างๆร่วมกัน เพื่อทำการวัด ก-2
รูปที่ ก5 รูปวงจรสมบูรณ์ใช้ในการทดลองและเก็บค่า ก-3
รูปที่ ก6 รูปรางรถที่ใช้ในการทดลอง ก-3
รูปที่ ก7 การต่อOptical Interrupted Switch เพื่อส่งสัญญาณมาให้ ตัวประมวลผล ก-4
รูปที่ ก8.1 รูปวงจร Board ใช้งาน AT89C52 ต่อร่วมกับวงจร Driver และ Schmitt Trigger เมื่อบรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว ก-4
รูปที่ ก8.2 รูปวงจร Board ใช้งาน AT89C52 ต่อร่วมกับวงจร Driver และ Schmitt Trigger เมื่อบรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว ก-5
รูปที่ ก9 รูปวงจรส่วนของ Opto Interrupted Switch, Filter และ Driver เมื่อบรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว ก-5
รูปที่ ก10 รูปการติดตั้งแผ่น Encoder และ Opto Interrupted Switch ในการทดลองจริง ก-6
รูปที่ ก11 รูปหน้าจอแสดง Nr, Ns และ เปอร์เซ็นต์ Slip ขณะมอเตอร์หมุน ที่ความถี่ 50 Hz ก-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ ก12.1 รูปจานล้อบังคับทิศทางล้อหลังเบี้ยวเนื่องจากรับภาระโหลดมากเกินไป ก-7
รูปที่ ก12.2 รูปจานล้อบังคับทิศทางล้อหลังเบี้ยวเนื่องจากรับภาระโหลดมากเกินไป ก-7
รูปที่ ก13 รูปรถรางไฟฟ้าขณะบรรทุกแม่เหล็ก 180 kg. ก-8
รูปที่ ก14 รูปบรรยากาศการทำงานปกติของ The Power Analysis of an Electric Tram Group ก-8
รูปที่ ง1 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางตรง) ง-1
รูปที่ ง2 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางตรง) ง-2
รูปที่ ง3 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางโค้ง) ง-5
รูปที่ ง4 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางโค้ง) ง-6
รูปที่ ง5 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง) ง-9
รูปที่ ง6 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง) ง-10
รูปที่ ง7 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง) ง-13
รูปที่ ง8 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง) ง-14
รูปที่ ง9 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง) ง-17
รูปที่ ง10 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง) ง-18
รูปที่ ง11 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง) ง-21
รูปที่ ง12 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง) ง-22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ ง13 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง) ง-25
รูปที่ ง14 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง) ง-26
รูปที่ ง15 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง) ง-29
รูปที่ ง16 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง) ง-30
รูปที่ ง17 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง) ง-33
รูปที่ ง18 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง) ง-34
รูปที่ ง19 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง) ง-37
รูปที่ ง20 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง) ง-38
รูปที่ ง21 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางตรง) ง-41
รูปที่ ง22 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางตรง) ง-42
รูปที่ ง23 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางโค้ง) ง-45
รูปที่ ง24 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางโค้ง) ง-46
รูปที่ ง25 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง) ง-49
รูปที่ ง26 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง) ง-50
รูปที่ ง27 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง) ง-53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ ง28 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง) ง-54
รูปที่ ง29 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง) ง-57
รูปที่ ง30 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง) ง-58
รูปที่ ง31 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง) ง-61
รูปที่ ง32 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง) ง-62
รูปที่ ง33 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง) ง-65
รูปที่ ง34 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง) ง-66
รูปที่ ง35 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง) ง-69
รูปที่ ง36 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง) ง-70
รูปที่ ง37 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง) ง-71
รูปที่ ง38 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง) ง-74
รูปที่ ง39 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟ3ฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง) ง-77
รูปที่ ง40 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง) ง-78
รูปที่ จ1 แสดงหน้าจอของ Main Menu จ-2
รูปที่ จ2 การวัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบวาย จ-3
รูปที่ จ3 การวัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบเดลต้า จ-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ จ4 Dialog Box Instrument Connect จ-5
รูปที่ จ5 แสดง Tool-Bar ของโปรแกรม FlukeView จ-6
รูปที่ จ6 แสดงหน้าจอของเครื่องมือวัดบน PC จ-7
รูปที่ จ7 แสดง Transfer Mode Dialog จ-8
รูปที่ จ8 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของรูปคลื่น จ-8
รูปที่ จ9 ภาพตัวอย่าง Spectrum Window จ-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของโหลด 22
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการส่งข้อมูลแบบ 485 และ 422 39
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบการต่อ termination แบบ parallel termination และการไม่ต่อtermination 45
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 76
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยว นำในสภาวะมอเตอร์เดินตัวเปล่า 76
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 2 กิโลกรัม 77
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 2 กิโลกรัม 77
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 4 กิโลกรัม 78
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสภาวะรับภาระโหลด 4 กิโลกรัม 78
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 6 กิโลกรัม 78
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 6 กิโลกรัม 79
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมกระและแรงดันที่ความถี่ 30 Hz 86
ตารางที่ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมกระและแรงดันที่ความถี่ 50 Hz 86
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมกระและแรงดันที่ความถี่ 70 Hz 86
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43) 91
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

Fluke Viewer
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม 92
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ 93
ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้า Fluke43 ที่ความถี่ต่างๆ 109
ตารางที่ 4.17 แสดงค่าเฉลี่ยการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม 109
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม 109
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ 110
ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบ 110
ที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนาม
แม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ 4.21 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจาก Fluke43 ที่ความถี่ต่างๆ 111
ตารางที่ 4.22 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม 111
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.23 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม 111
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.24 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ 112
ตารางที่ 4.25 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่ 112
เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนาม
แม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ 4.26 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจาก Fluke43 ที่ความถี่ต่างๆ 113
ตารางที่ 4.27 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม 113
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.28 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม 113
Fluke Viewer
ตารางที่ 4.29 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ 114
ตารางที่ 4.30 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบ 114
ที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนาม
แม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 4.31 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer 115
ตารางที่ 4.32 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer 115
ตารางที่ 4.33 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer 115
ตารางที่ 4.34 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ 116
ตารางที่ 4.35 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 116
ตารางที่ ค1 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-1
ตารางที่ ค2 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-2
ตารางที่ ค3 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-2
ตารางที่ ค4 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-3
ตารางที่ ค5 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-4
ตารางที่ ค6 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-4
ตารางที่ ค7 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-5
ตารางที่ ค8 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-6
ตารางที่ ค9 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-6
ตารางที่ ค10 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-7
ตารางที่ ค11 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-8
ตารางที่ ค12 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-8
ตารางที่ ค13 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ ค14 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-10
ตารางที่ ค15 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-10
ตารางที่ ค16 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-11
ตารางที่ ค17 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-12
ตารางที่ ค18 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-12
ตารางที่ ค19 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-13
ตารางที่ ค20 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-14
ตารางที่ ค21 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-14
ตารางที่ ค22 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-15
ตารางที่ ค23 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-16
ตารางที่ ค24 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-16
ตารางที่ ค25 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-17
ตารางที่ ค26 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-18
ตารางที่ ค27 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-18
ตารางที่ ค28 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ค-19
ตารางที่ ค29 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-20
ตารางที่ ค30 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ค-20
ตารางที่ ง1 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ ง2 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-3
ตารางที่ ง3 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-3
ตารางที่ ง4 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-4
ตารางที่ ง5 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-7
ตารางที่ ง6 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-7
ตารางที่ ง7 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-7
ตารางที่ ง8 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-8
ตารางที่ ง9 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-11
ตารางที่ ง10 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-11
ตารางที่ ง11 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-11
ตารางที่ ง12 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-12
ตารางที่ ง13 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-15
ตารางที่ ง14 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-15
ตารางที่ ง15 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-15
ตารางที่ ง16 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา ง-16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ ง17 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-19
ตารางที่ ง18 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-19
ตารางที่ ง19 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-19
ตารางที่ ง20 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-20
ตารางที่ ง21 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-23
ตารางที่ ง22 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-23
ตารางที่ ง23 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-23
ตารางที่ ง24 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-24
ตารางที่ ง25 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-27
ตารางที่ ง26 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-27
ตารางที่ ง27 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-27
ตารางที่ ง28 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-28
ตารางที่ ง29 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-31
ตารางที่ ง30 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ ง31 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-31
ตารางที่ ง32 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-32
ตารางที่ ง33 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-35
ตารางที่ ง34 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-35
ตารางที่ ง35 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-35
ตารางที่ ง36 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-36
ตารางที่ ง37 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-39
ตารางที่ ง38 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-39
ตารางที่ ง39 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-39
ตารางที่ ง40 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-40
ตารางที่ ง41 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-43
ตารางที่ ง42 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-43
ตารางที่ ง43 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-43
ตารางที่ ง44 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-44
ตารางที่ ง45 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ ง46 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-47
ตารางที่ ง47 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-47
ตารางที่ ง48 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-48
ตารางที่ ง49 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-51
ตารางที่ ง50 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-51
ตารางที่ ง51 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-51
ตารางที่ ง52 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-52
ตารางที่ ง53 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-55
ตารางที่ ง54 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-55
ตารางที่ ง55 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-55
ตารางที่ ง56 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-56
ตารางที่ ง57 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-59
ตารางที่ ง58 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-59
ตารางที่ ง59 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-59
ตารางที่ ง60 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน ง-60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ ง61 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-63
ตารางที่ ง62 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม ง-63
Fluke Viewer
ตารางที่ ง63 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม ง-63
Fluke Viewer
ตารางที่ ง64 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา ง-64
รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน
และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ ง65 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-67
ตารางที่ ง66 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม ง-67
Fluke Viewer
ตารางที่ ง67 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม ง-67
Fluke Viewer
ตารางที่ ง68 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา ง-68
รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน
และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ ง69 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-71
ตารางที่ ง70 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม ง-71
Fluke Viewer
ตารางที่ ง71 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม ง-71
Fluke Viewer
ตารางที่ ง72 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา ง-72
รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน
และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ตารางที่ ง73 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-75
ตารางที่ ง74 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม ง-75
Fluke Viewer
ตารางที่ ง75 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม ง-75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

Fluke Viewer
ตารางที่ ง76 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-76
ตารางที่ ง77 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer ง-79
ตารางที่ ง78 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-79
ตารางที่ ง79 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer ง-79
ตารางที่ ง80 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลา รถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ง-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการปรับปรุงและพัฒนาระบบการขนส่งด้านต่างๆ ให้มีความรวดเร็วทันสมัยและประหยัดพลังงาน พร้อมทั้งส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด ซึ่งระบบการขนส่งที่ตอบสนองต่อความต้องการเหล่านี้คือ การนำระบบรถรางไฟฟ้าแทนการใช้เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงเพราะไฟฟ้าเป็นพลังงานสะอาดและระบบรถไฟฟ้ายังสามารถรองรับปริมาณผู้ใช้ในปริมาณมากได้ ทำให้มีความรวดเร็วในการขนส่ง ทั้งนี้ในประเทศไทยได้มีการนำระบบรถรางไฟฟ้าทั้งแบบรถรางลอยฟ้าและรถรางใต้ดินมาใช้ในระบบคมนาคมขนส่ง ซึ่งการใช้งานที่จะก่อให้เกิดการใช้พลังงานที่คุ้มค่าและประหยัดคือการสร้างระบบที่มีการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นการศึกษาถึงกระบวนการจัดการพลังงานในรถรางไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นต่อการนำไปเป็นแนวทางในการสร้างเทคโนโลยีระบบรถรางไฟฟ้าขึ้นมาใช้แทนการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

ในโครงงานนี้จะเน้นการศึกษาถึงกระบวนการส่งผ่านกำลังงานจากอินเวอร์เตอร์ไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะคงตัว เพราะระบบการขับเคลื่อนหลักในระบบรถรางไฟฟ้าคือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งการปรับความเร็วและแรงบิดจะกระทำโดยอินเวอร์เตอร์โดยใช้หลักการสวิตช์ชิ่งของอุปกรณ์อิเลกทรอนิคส์เป็นตัวควบคุม ทั้งนี้จากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งแรงดันที่มอเตอร์ได้รับนั้นจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์จึงส่งผลให้กระแสที่เกิดขึ้นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ด้วย โดยการผิดเพี้ยนของแรงดันและกระแสจะส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้าด้วยหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งการผิดเพี้ยนของแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าก็คือการเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบนั่นเอง โดยการเกิดฮาร์มอนิกนี้จะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าทั้งค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real power : P) ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีพ (Reactive power : Q) ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power: S) และค่าประกอบกำลัง (Power factor : p.f.) ที่จ่ายให้แก่ระบบ กล่าวคือในระบบสองระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าจริงในการทำงานเท่ากัน แต่ระบบแรกมีการสร้างฮาร์มอนิกมากกว่าในระบบที่ 2 จะพบว่าแนวโน้มของการเกิดค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีพในระบบแรกจะมากกว่าในระบบที่ 2 ซึ่งส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบแรกมากกว่าระบบที่ 2 และอาจส่งผลให้ค่าประกอบกำลังของระบบแรกมีค่าน้อยกว่าระบบที่ 2 ได้ โดยผลที่เกิดขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าปรากฏมากกว่าคือการบริโภคกระแสของระบบแรกจะมากกว่าระบบที่ 2 ทั้งที่กำลังงานที่ได้รับมีค่าเท่ากัน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบแรกมีค่าน้อยกว่าระบบที่ 2 และยังส่งผลให้อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบแรกต้องการพิกัดกระแสและกำลังมากกว่าในระบบที่ 2 ด้วย นอกจากนี้ในระบบที่มีการสร้างฮาร์มอนิกมากจะส่งผลกระทบต่อระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยรวม ซึ่งถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีระบบที่สร้างฮาร์มอนิกให้แก่ระบบใหญ่มากๆ อาจก่อให้เกิดปัญหาได้ เช่น การเกิดกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ไหลในสายนิวทรอล หรือการเกิดกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ไหลวนในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต่อแบบเดลต้า ซึ่งล้วนแต่ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้นในระบบทั้งสิ้น ดังนั้นการศึกษาถึงกำลังไฟฟ้าจึงมีความสำคัญทั้งต่อกระบวนการจัดการพลังงานในรถรางไฟฟ้าและต่อระบบการส่งจ่ายโดยรวม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและศึกษาถึงประสิทธิภาพของการจ่ายกำลังงานของรถรางไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและกระแส ที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกำลังไฟฟ้า ที่เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
3. เพื่อศึกษาและสร้างเครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ประกอบการทดลอง
4. เพื่อฝึกการทำงานเป็นกลุ่ม

1.3 เป้าหมาย

สามารถวิเคราะห์การจ่ายกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและวิเคราะห์ถึงความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและกระแส ที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกำลังไฟฟ้า ในสภาวะการทำงานของรถรางไฟฟ้ารูปแบบต่างๆได้ พร้อมทั้งสามารถสร้างเครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อใช้ประกอบการทดลองได้

1.4 ขอบเขตงานของกลุ่ม

1. ศึกษาและทดลองถึงกำลังไฟฟ้าและความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นต่างๆ ที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับในสภาวะคงตัว เมื่อภาระและความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงคือตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนกระทั่งรับโหลดเต็มที่และตั้งแต่ความเร็วที่รถรางสามารถออกตัวได้จนกระทั่งความเร็วสูงสุดในสภาวะโหลดค่าหนึ่งๆ โดยทดลอง 2 กรณีคือบนรางตรงและบนรางโค้ง
2. **เครื่องมือวัดความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ**

ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถแสดงผลค่าความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **Zero Crossing Detector**

เป็นส่วนประกอบในเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำหน้าที่สร้าสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4. **Speed Encoder**

เป็นส่วนประกอบในเครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

5. **RS-485 Serial Data Transmission**

ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากวงจร Zero Crossing Detector, Speed Encoder เพื่อส่งไปประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) ในระยะทางไกล

6. **Processing Unit**

ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่ส่งจาก RS-485 Serial Data Transmission ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการนำไปคำนวณหาค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้ Micro Controller เบอร์ AT89C52

1.5 แผนการทำโครงงาน

เดือนมิถุนายน - ประชุมตกลงแนวทางการทำโครงงานพร้อมทั้งออกแบบรูปแบบการทดลอง และระบบต่างๆของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า เหนี่ยวนำอย่างคร่าวๆ

เดือนกรกฎาคม - ศึกษาทฤษฎีการทำงานของอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกำลังไฟฟ้า

- ศึกษาและออกแบบเครื่องมือวัดความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- ออกแบบ สร้างและติดตั้งรางทางตรง
- ออกแบบและติดตั้งระบบจ่ายไฟบนรางทางตรงพร้อมทั้งทดสอบรถรางไฟฟ้า

เดือนสิงหาคม - ออกแบบ สร้างและติดตั้งระบบจ่ายไฟบนรางที่ประกอบด้วยทางตรงและทางโค้งพร้อมทั้งทดสอบการวิ่งของรถรางไฟฟ้าบนรางที่สร้างขึ้น

- สร้างวงจร Zero Crossing Detector, Speed Encoder, Direction Encoder และ RS-485 Serial Data Transmission

เดือนกันยายน - ศึกษา ออกแบบและเขียนโปรแกรมการคำนวณบน MCS-51 โดยแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย LCD

- ปรับปรุงรางและระบบรางจ่ายไฟของรถรางไฟฟ้า

เดือนตุลาคม - ประกอบวงจร Zero Crossing Detector, Speed Encoder, Direction Encoder, RS-485 Serial Data Transmission, Micro-controller และ LCD พร้อมทั้งทดสอบการทำงาน

- แก้ไขและปรับปรุงเกี่ยวกับความแม่นยำ ความถูกต้องและเสถียรภาพของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

- ศึกษาการใช้งาน The Power Quality Analyzer ของ FLUKE รุ่น 43B และทดสอบการเก็บผลการทดลองร่วมกับโปรแกรม FlukeViewer SW43W

เดือนพฤศจิกายน - ออกแบบการทดลองการวัดกำลังไฟฟ้าและความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน กระแส
และกำลังไฟฟ้า และทดลองใช้เครื่องมือวัดเก็บผลการทดลอง

เดือนธันวาคม - ทดลองและเก็บผลข้อมูลกำลังไฟฟ้าและความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าในสภาวะการทำงานต่างๆ ของรถรางไฟฟ้า

เดือนมกราคม - วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

- ทดลองเพิ่มเติมในกรณีข้อมูลจากการทดลองไม่เพียงพอ

เดือนกุมภาพันธ์ - สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

- ศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่ใช้ในโครงงาน

2.1 ทฤษฎีกำลังไฟฟ้า

2.1.1 กำลังไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ(Instantaneous Power)

กำลังไฟฟ้า ณ เวลาใดๆจะสามารถหาได้โดยผลคูณของแรงดันที่ตกคร่อมระบบ ณ เวลาใดๆ กับกระแสที่ไหลผ่านระบบ ณ เวลาใดๆ

$$p(t) = vi \tag{2.1}$$

โดยที่ v : ฟังก์ชันแรงดันที่ต กคร่อมระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

i : ฟังก์ชันกระแสที่ไหลผ่านระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้า ณ เวลาใดๆมักจะแสดงในรูปของกำลังไฟฟ้าจริงที่มีหน่วยเป็นวัตต์ โดยที่กำลังไฟฟ้าจริงสามารถเป็นได้ทั้งค่าบวก และค่าลบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เป็นบวกจะหมายถึงการที่กำลังไฟฟ้าไหลเข้าสู่ระบบ ในทางตรงกันข้าม ถ้ากำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบจะหมายถึงกำลังไฟฟ้าไหลออกจากระบบ

ทฤษฎีของสามเหลี่ยมกำลัง

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 องค์ประกอบได้แก่

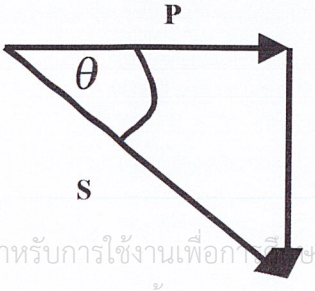
1. กำลังไฟฟ้าปรากฏ(Apparent Power) : S มีหน่วยเป็น โวลต์แอมป์(VA)
2. กำลังไฟฟ้าจริง(Real Power) : P มีหน่วยเป็นวัตต์(Watt)
3. กำลังไฟฟ้ารีแอคทีพ(Reactive Power) : Q มีหน่วยเป็นวาร์(VAR)

โดยจะมีความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทั้ง 3 เป็นดังสมการ

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{2.2}$$

โดยที่ $\theta = \cos^{-1}(\frac{P}{S})$

จากสมการเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปของสามเหลี่ยมกำลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Apparent power

กำลังไฟฟ้าจริงเป็นผลจากการคูณกันของขนาดของกระแส rms และ ขนาดของแรงดัน rms และมักจะใช้ในการบอกถึงพิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะสามารถแสดงค่าได้ตามสมการ

$$S = V_{rms} I_{rms} \tag{2.3}$$

สำหรับกำลังไฟฟ้าจริงของวงจรไฟฟ้า 3 เฟสจะเป็นค่าผลคูณของ 3 เท่าของแรงดันเฟส กับกระแสเฟส หรือ จะสามารถแสดงได้ดังสมการ

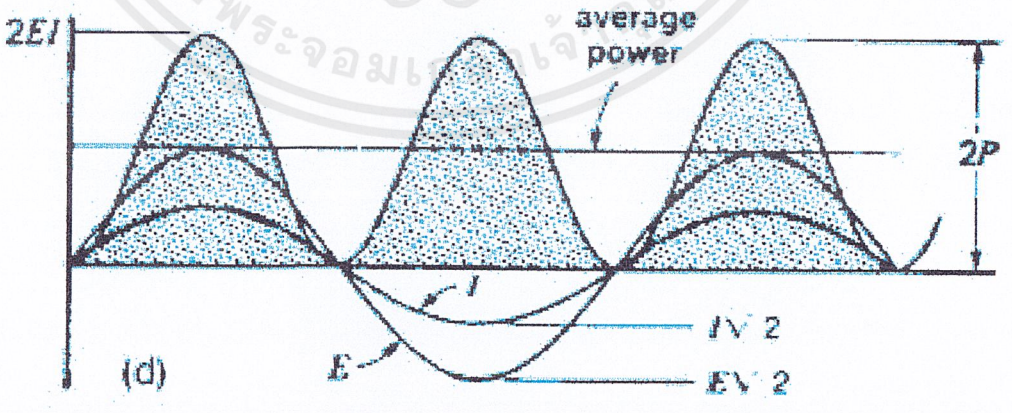
$$S_{3\phi} = 3V_{phase} I_{phase} \tag{2.4}$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_{line} I_{line} \tag{2.5}$$

Real Power

กำลังไฟฟ้าจริง โดยลักษณะของสัญญาณกำลังไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าจากศูนย์จนถึงค่าสูงสุด (maximum value) โดยค่าสูงสุดสามารถหาได้จาก $(\sqrt{2}E)\times(\sqrt{2}I) = 2EI = 2P$ watts

โดยความจริงที่ว่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเสมอเนื่องจากกำลังไฟฟ้าจะเกิดที่โหลดตัวต้านทานเท่านั้น ซึ่งกระแสและแรงดันจะมีเฟสตรงกัน (in-phase) ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงเป็นบวกซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 ซึ่งก็คือคุณลักษณะพื้นฐานอย่างหนึ่งของสิ่งที่เราเรียกว่าแอคทีพเพาว์เวอร์



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของสัญญาณกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าค่าเพาว์เวอร์จะมีค่าแกว่งระหว่างศูนย์กับค่าสูงสุดแต่ยังคงมีทิศทางการไหลไปในทิศทางเดิมเสมอ โดยค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าสามารถหาได้จาก $P = \frac{2EI}{2} = EI$ watts ซึ่งนี้ก็คือค่ากำลังไฟฟ้าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์

โดยจากระบบไฟฟ้า เจนเนอเรเตอร์จะทำหน้าที่เป็นแอคทีพซอร์ส (Active Source) และตัวต้านทานทำหน้าที่เป็นแอคทีพโหลด (Active Load) และสามารถหา Effective Value ได้จาก

$$P = IV\cos\theta \tag{2.6}$$

สำหรับค่า Effective Value ของระบบกำลังไฟฟ้าสามเฟสสามารถหาได้จาก

$$P = 3I_{phase}V_{phase}\cos\theta \tag{2.7}$$

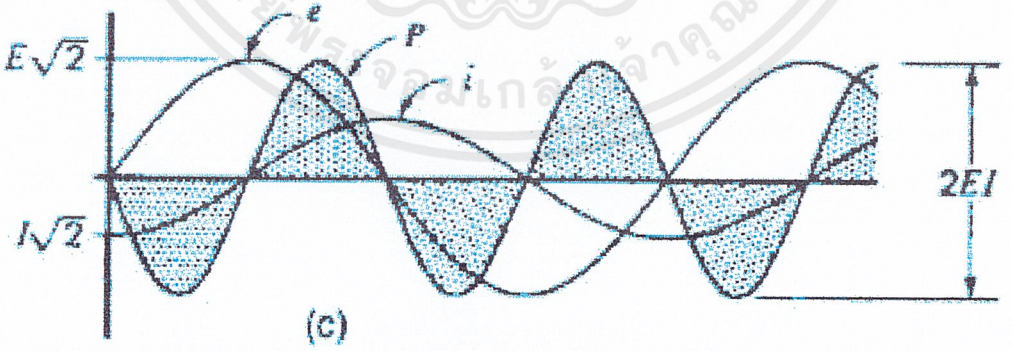
Reactive Power

ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีพเป็นพลังงานที่ถูกจ่ายกลับย้อนออกมาจากโหลดแบบ Capacitor หรือ Inductor เข้าสู่แหล่งจ่าย โดย Effective Value ของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีพเป็นผลคูณระหว่างค่ากระแส, แรงดันและค่า sinθ ตามสมการ

$$Q = IV\sin\theta \tag{2.8}$$

และค่า Effective Value ของรีแอคทีพเพาว์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสสามรถหาได้จาก

$$Q = 3I_{phase}V_{phase} \tag{2.9}$$

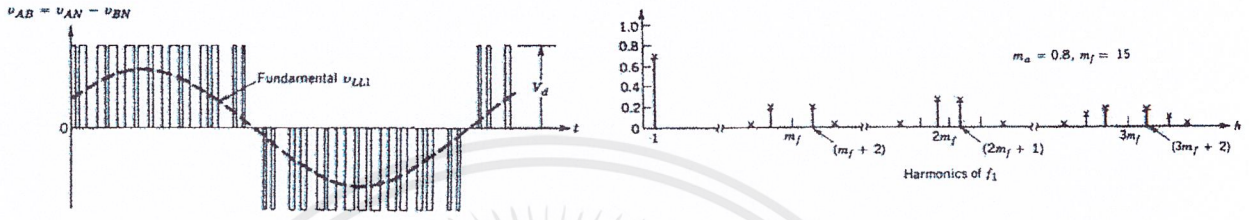


รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของสัญญาณกำลังไฟฟ้ารีแอคทีพของโหลดตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

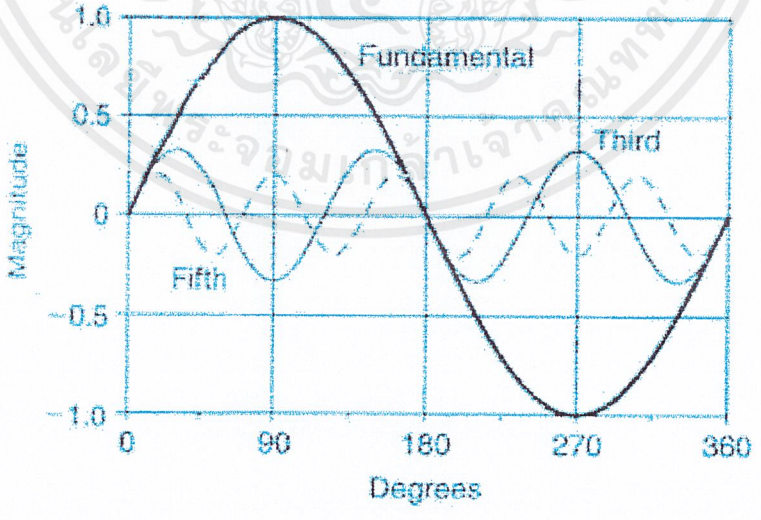
2.2 ทฤษฎีของฮาร์มอนิก(Harmonics)

เนื่องจากในการทำโครงงานจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ในการทดลอง และเกิดผลกระทบของฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้า ดังนั้นในการศึกษาจึงได้พิจารณาถึง ฮาร์มอนิก และ ผลรวมของความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก(Total Harmonic Distortion : THD)



รูปที่ 2.3 แสดงฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้ อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

ในทางทฤษฎี แรงดันและกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังควรมีค่าความถี่ที่ความถี่เดียว(เช่น 50 Hz ในระบบไฟฟ้าในประเทศไทย) แต่ในระบบไฟฟ้าจริงจะเกิดองค์ประกอบของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า ฮาร์มอนิก ที่จะมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่ของระบบไฟฟ้า หรือความถี่หลักมูล (fundamental frequency) โดยที่ค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 2 ของความถี่ระบบไฟฟ้า 50 Hz จะมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลโดยจะมีค่าเท่ากับ 100 Hz และค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 จะเท่ากับ 150 Hz



รูปที่ 2.4 แสดงฮาร์มอนิกที่ ความถี่หลักมูล และ ที่องค์ประกอบลำดับที่ 3 และ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 จะแสดงค่า 1 cycle ของคลื่นไซน์นูซอยด์ ที่มีค่ายอดเท่ากับ 1 .00 (จะถือว่าเป็นค่าความถี่หลักมูล) โดยที่จะเรียกค่าความถี่หลักมูลเป็นค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 และจะแสดงค่าสัญญาณที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่มีค่ายอดเท่ากับ 0.5 และลำดับที่ 5 ที่มีค่ายอดเท่ากับ 0.2 โดยที่ค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 จะมีค่าเป็น 3 cycle เมื่อ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 มีค่าครบรอบ 1 cycle และค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าครบรอบ 5 cycle โดยที่ค่าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆจะนำมารวมกัน โดยเปลี่ยนค่ามุมเฟสของแต่ละองค์ประกอบ ทำให้เกิดเป็นรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน โดยที่รูปคลื่นนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มไปเป็นรูปคลื่นพัลส์

ในการแยกองค์ประกอบของฮาร์มอนิกจะสามารถทำได้โดยการใช้สมการ อนุกรมฟูเรียร์ โดยจะสามารถหาค่าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกในรูปแบบอนุกรม เนื่องจากค่าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกจะมีค่าซ้ำกันทุกคาบ โดยที่รูปแบบสมการของอนุกรมฟูเรียร์จะสามารถแสดงได้ ดังนี้

$$f(t) = F_o + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{1}{2}A_o + \sum_{h=1}^{\infty} \left\{ A_h \cos(h\omega t) + B_h \sin(h\omega t) \right\} \tag{2.10}$$

F = ค่าRMS ของฟังก์ชันใด ๆ

F_0 = องค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลของฟังก์ชันใด ๆ

โดยที่ฟังก์ชันที่ได้จากการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ข้างต้นสามารถแทนได้ทั้งในรูปกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า และจากนิยามของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย(Root Mean Square : RMS) จะได้ว่า

$$F = \left(F_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.11}$$

จากคำจำกัดความของฮาร์มอนิกสามารถกำหนดค่า RMS ขององค์ประกอบที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนได้คือ

ผลรวมของความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก(Total Harmonic Distortion :THD)

ในการที่จะบ่งชี้ว่าลูกคลื่นมีความผิดเพี้ยนมากน้อยเพียงใดจะสามารถใช้สมการผลรวมของความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกหรือที่เรียกว่า Total Harmonic Distortion(THD) โดยค่า THD สามารถแสดงได้ 2ทาง โดยที่แบบแรกจะเป็นการแสดงค่า THD ที่แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มูล(THD_F) โดยที่ค่า THD แบบนี้จะใช้ในการนิยามของ IEEE และ นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเราสามารถแสดงค่า THD_F ได้ดังสมการ

$$F_{dis} = \left[F^2 - F_1^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\sum_{h=2}^{\infty} F_h^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.12}$$

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} \times 100\% \tag{2.13}$$

โดยที่เราสามารถคำนวณค่า RMS ของรูปคลื่นได้จากค่า RMS ของฮาร์มอนิกทุกองค์ประกอบ รวมทั้งค่าค่าองค์ประกอบหลักมูล

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h,rms}^2} \tag{2.14}$$

$$V_{RMS} = V_{1,rms}\sqrt{1 + \left(\frac{THD_F}{100\%}\right)^2} \tag{2.15}$$

$V_{h,rms}$ = ค่า rmsขององค์ประกอบของฮาร์มอนิกลำดับที่ h โดยที่ $h = 2,3,4,...$

$V_{1,rms}$ = ค่า rms ขององค์ประกอบหลักมูล

และแบบที่2จะเป็นการแสดงค่า THD ที่เป็นเปอร์เซ็นต์ของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (RMS)ของลูกคลื่น(THD_R) ซึ่งการนิยามค่า THD แบบนี้จะนิยมใช้ใน Canadian Standards Association และ IEC Standard โดยที่สามารถแสดงค่า THD_R ได้ดังสมการ

$$THD_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{h,rms}} \times 100\% \tag{2.16}$$

โดยค่า THD_R สามารถหาได้จากค่า THD_F โดยการคูณด้วยค่า $V_{1,rms}$ และ หารด้วย V_{rms}

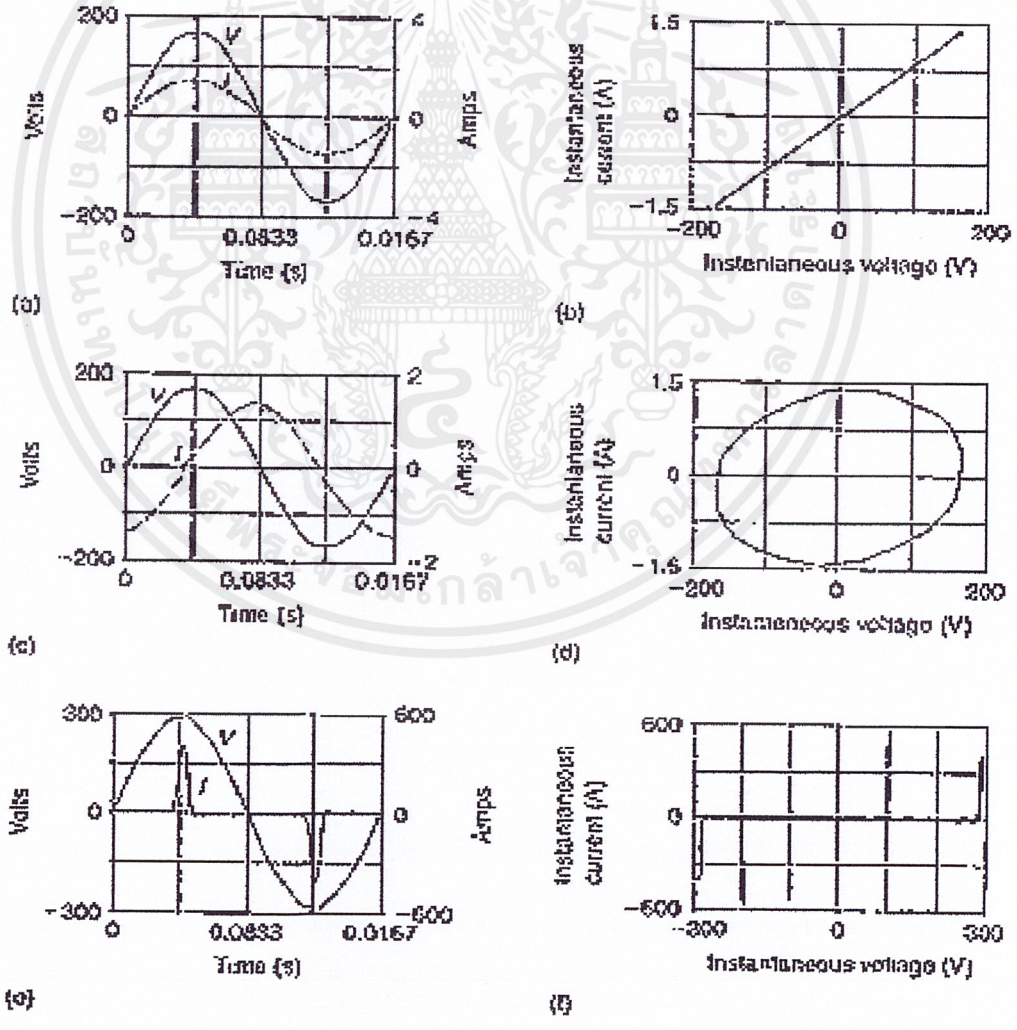
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$THD_R = THD_F \times \left(\frac{V_{1,rms}}{V_{rms}} \right) \tag{2.17}$$

เนื่องจากค่า THD_R และ THD_F จะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่า THD ทั้ง 2 จะมีค่าไม่เกิน 100% โดยค่า THD จะมีความสำคัญมากเนื่องจาก IEEE Standard 519 จะกำหนดค่าสูงสุดของ THD สำหรับค่า แรงดัน และกระแสไว้

สาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิก

โหลดทางไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และ แรงดัน ไม่เป็นแบบเชิงเส้น จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกของกระแสขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยถ้าจ่ายแรงดันและกระแสให้กับโหลดแบบตัวต้านทาน (Resistive Load)กระแสและแรงดันของโหลดแบบตัวต้านทาน(Resistive Load)จะมีเฟสที่ตรงกัน จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของวงจรเป็นเส้นตรง ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าตัวต้านทาน(Resistor)จะเป็นโหลดแบบ เชิงเส้น



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแรงดันและกระแส และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกรแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโหลดแบบขดลวดเหนี่ยวนำ(inductor) เมื่อจ่ายกระแสและแรงดันให้กับระบบจะได้ว่าค่ากระแสและแรงดันจะมีมุมเฟสที่ไม่ตรงกัน โดยที่กระแสจะมีมุมเฟสตามหลังแรงดัน 90 องศา โดยที่เมื่อค่ากระแสเป็นศูนย์ ในขณะที่แรงดันมีค่าสูงสุด จะทำให้สามารถวาดกราฟกระแสเปรียบเทียบกับแรงดันได้เป็นรูปวงรี(elliptical) โดยจะถือว่าเป็นโหลดแบบเชิงเส้น (โดยที่ถ้ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นรูปทรง วงกลม , วงรี , หรือเส้นตรงจะถือว่าโหลดนั้นเป็นแบบ เชิงเส้น)

สำหรับระบบ หรือวงจร ที่กระแสและแรงดันมีความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบ เชิงเส้น เช่น ในกรณีที่กระแสมีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์นูซอยด์ เช่นมีลักษณะกระแสเป็นอนุกรมของพัลส์ทั้งด้านบวก และด้านลบ จะสามารถวาดกราฟของกระแสเปรียบเทียบกับแรงดันได้ไม่เป็นแบบ เชิงเส้น

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อค่าตัวประกอบกำลังของระบบ

เมื่อเกิดฮาร์มอนิกจะทำให้ค่ากระแส rms มีค่าสูงขึ้นกว่าปกติที่จะมีเฉพาะค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จะทำให้ทราบว่า ค่าฮาร์มอนิกจะมีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังของระบบ โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังจะเป็นอัตราส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏตามสมการ

$$p.f. = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \cos\theta \tag{2.18}$$

ในกรณีที่ระบบมีค่าแรงดันเป็นรูปไซน์นูซอยดัล แต่กระแสมีค่าฮาร์มอนิกปนอยู่ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงจะเกิดจากการนำค่าแรงดันไฟคูณกับกระแสแต่ละองค์ประกอบของฮาร์มอนิก โดยที่กระแสที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าเป็นบวกเสมอและจะเป็นตัวสร้างกำลังไฟฟ้าปรากฏ ส่วนค่าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกของกระแสจะไม่ใช่ค่ากระแสที่สร้างกำลังไฟฟ้าปรากฏ ดังนั้นจะได้สมการ

$$p.f. = \frac{P}{V_{1,rms} I_{rms}} \tag{2.19}$$

โดยที่ จาก

$$I_{RMS} = I_{1,rms} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_F}{100\%} \right)^2} \tag{2.20}$$

จะได้

$$p.f. = \frac{P}{V_{1,rms} I_{1,rms} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_F}{100\%} \right)^2}} \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าตัวประกอบกำลังจะสามารถพิจารณาได้เป็น 2 องค์ประกอบโดยที่องค์ประกอบแรกจะเรียกว่า Displacement Power Factor (DPF)

$$DPF. = \frac{P}{V_{1,rms} I_{1,rms}} \tag{2.22}$$

ส่วนองค์ประกอบที่ 2 จะเรียกว่า Distortion Power Factor

$$p.f._{dist.} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{THD_F}{100\%}\right)^2}} \tag{2.23}$$

โดยถ้าแรงดันมีค่าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วยจะทำให้มีค่า Distortion Power Factor ของแรงดันรวมอยู่ในค่า Power Factor ด้วย

Crest Factor

Crest Factor เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่ายอด(Peak Value) และค่า Effective Value(RMS) ของฟังก์ชันใดๆ ดังแสดงได้ตามสมการ

$$CrestFactor = \frac{I_{peak}}{I_{rms}} \tag{2.24}$$

สำหรับในกรณีของรูปคลื่นไซน์นูซอยดัล (โดยที่ไม่มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น) ค่า Crest Factor จะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}$ โดยถ้าลูกคลื่นมีค่า Crest Factor มีค่าน้อยกว่า $\sqrt{2}$ รูปคลื่นจะมีลักษณะยอดคลื่นที่เรียบ (Flat-Topped) ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า Crest Factor มีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$ รูปคลื่นจะมีลักษณะยอดปลายแหลม (Pointy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

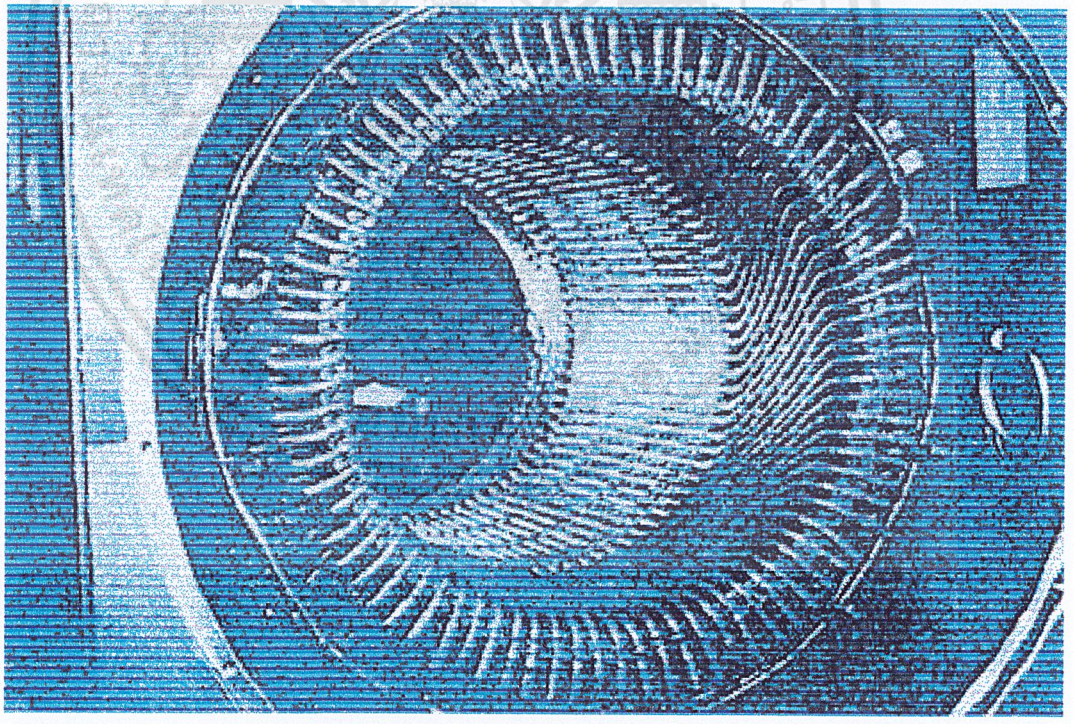
2.3 ทฤษฎีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สาเหตุที่เรียกเช่นนี้เพราะการหมุนของมอเตอร์ดังกล่าวเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์ มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพราะมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือความเร็วจากสภาวะไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่จะลดลงเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่ก็มีข้อเสียคือ

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ตัวประกอบกำลังต่ำและล้าหลัง (lagging)
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นมักจะสูงเป็น 5 เท่าหรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด (ขณะขับโหลดเต็มที่)

2.3.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction Motor Construction)

มอเตอรเหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor) โดยที่สเตเตอร์มีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์เมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในสล็อตทำด้วยแผ่นลามิเนทบาง ๆ อัดเป็นรูปทรง



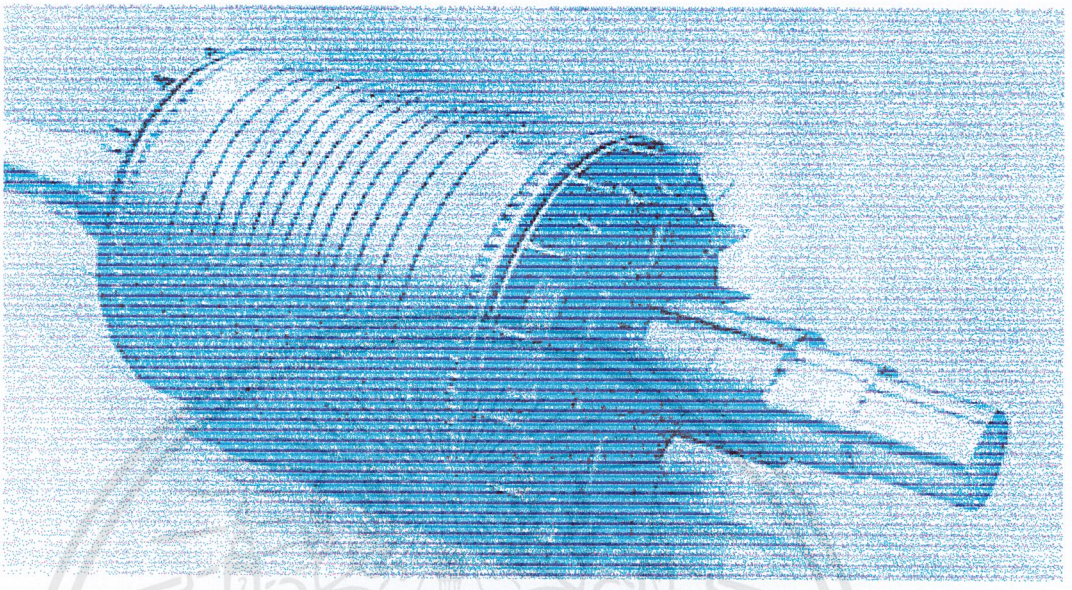
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของสเตเตอร์

โรเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1. แบบกรงกระรอก (squirrel cage) มีแท่งตัวนำ (rotor bar) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ภายในโรเตอร์ โดยที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำถูกลัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ดังรูปที่ 2.7 โดยแท่ง

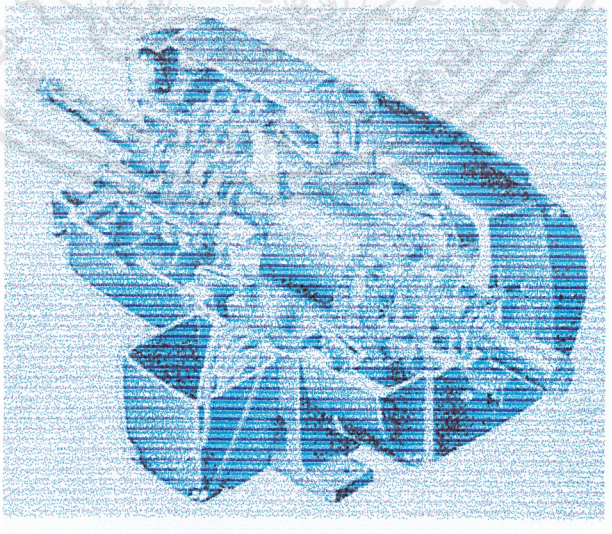
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำของโรเตอร์มักจะมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก (Magnetic Humming)



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

2. แบบขดลวดพันรอบมอเตอร์ (Wound Rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี่จะต่อกับสปริงซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ดังรูป 2.8 และมีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์



รูปที่ 2.8 แสดงภาพตัดของโครงสร้างภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำ และเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเกิดแรงบิด เป็นผลให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน กล่าวคือสนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส(N_s) ซึ่งหาค่าได้จาก

$$Ns = \frac{120f}{P} \tag{2.25}$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้มอเตอร์

P คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

สามารถหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวโรเตอร์ (E_{induce}) ได้ดังนี้

$$E_{induce} = (v \times B_s)l \tag{2.26}$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของโรเตอร์

B_s คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l คือ ความยาวของโรเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำของโรเตอร์ (B_R)และเกิดปฏิสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์จึงเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ (T) ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

$$T = k(B_R \times B_S) \tag{2.27}$$

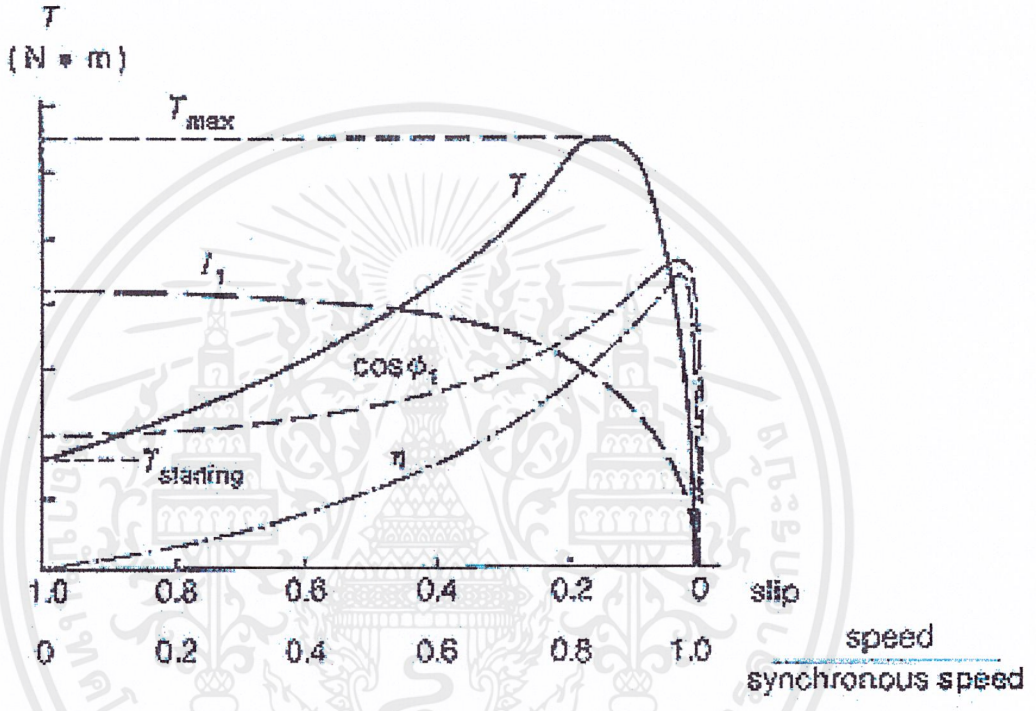
แรงบิด (T) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสค่า E_{induce} และ T จะเท่ากับศูนย์ โรเตอร์จึงหยุดหมุน ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำได้ง่าย ๆ โดยการสลับสายไฟคู่ใดคู่หนึ่งที่จ่ายให้กับขดลวดที่สเตเตอร์เท่านั้น วิธีการนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์หมุนกลับทิศทาง ซึ่งนี้ก็ถือเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของมอเตอร์ชนิดนี้

2.3.3 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ wound rotor ที่ปรับความเร็วได้จะใช้ความต้านทานที่ปรับค่าจากภายนอกได้ต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดโรเตอร์เพื่อปรับความเร็วหรือเพิ่มแรงบิดเริ่มต้นหมุน มอเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับโหลดที่ต้องเริ่มต้นหมุนบ่อย ๆ เช่น ปั้นจั่น เป็นต้น

ส่วนงานที่ต้องการกำลังกลค่อนข้างคงที่และเริ่มต้นหมุนไม่บ่อยนัก เช่น ใช้เป่าผม ใช้ขับปั๊มพัดลม เป็นต้น จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก

จากกราฟแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว (Torque-Speed Characteristic) ทำให้ทราบข้อมูลในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้น (developed torque) ที่ความเร็วซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
45959

2. กราฟของ Torque-Speed เกือบเป็นเส้นตรงระหว่าง no load torque กับ full load torque เราเรียกช่วงนี้ว่าย่านทำงานปกติ (normal operating range)
3. มีแรงบิดสูงสุด (maximum torque ; T_{max}) เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัด (rated torque)
4. มีแรงบิดเริ่มต้น (starting torque) มากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
5. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะหมุนกลับทิศทางนั้นมอเตอร์จะหยุดหมุนอย่างรวดเร็วก่อนเราเรียกว่า plugging ซึ่งเป็นการเบรคมอเตอร์ชนิดหนึ่ง
6. ถ้าโรเตอร์ถูกขับให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกลับทิศทางและมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3.4 สลิป (SLIP)

เมื่อมอเตอร์หมุนขับโหลด ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดต่ำลงจากความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อยขนาดความเร็วที่ลดลงมานี้เรียกว่าสลิป (slip) โดยสามารถคำนวณหาค่าสลิปได้ดังนี้

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \tag{2.29}$$

จากนิยามของสลิปจะได้ว่า

1. ในขณะสตาร์ท มอเตอร์หยุดนิ่งสลิปจะมีค่า 100% (S=1) และเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนความเร็วจะเพิ่มขึ้นค่าสลิปจะมีค่าลดลงจนมีค่าไม่กี่เปอร์เซ็นต์
2. ถ้าให้มอเตอร์ขับโหลดด้วยแรงบิดที่พิกัด ค่าสลิปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3-5 % ถ้าโหลดเพิ่มมากขึ้นค่าสลิปจะเพิ่มมากขึ้นและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะสูงมากขึ้นด้วย
3. เมื่อสลิปมีค่าเป็นลบหมายถึงความเร็วรอบของมอเตอร์สูงมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ($N_r > N_s$)

มอเตอร์จะผลิตแรงบิดให้เท่ากับโหลดเสมอ ดังนั้นแม้มอเตอร์จะมีขนาดใหญ่ เมื่อขับโหลดเบา ๆ ก็จะผลิตแรงบิดเบา ๆ เพื่อขับโหลด และจุดสมดุลย์นั้นจะกำหนดความเร็วของมอเตอร์ แต่ถ้าในขณะนั้นโหลดมีการเปลี่ยนแปลง มอเตอร์ก็จะต้องผลิตแรงบิดให้สมดุลย์กับแรงบิดของโหลดนั้น จึงทำให้ความเร็วรอบแตกต่างกันออกไปเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงเสมอ

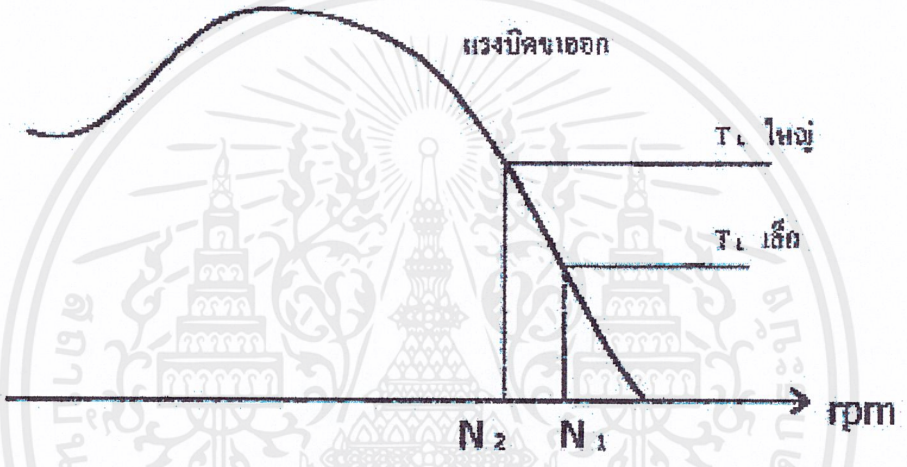
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 กระแสของมอเตอร์

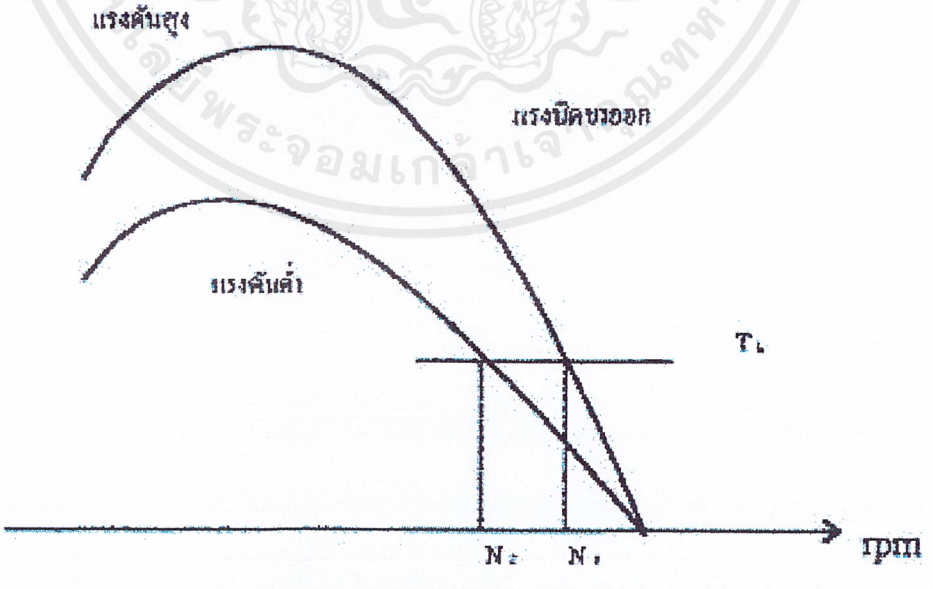
จากกราฟความเร็ว-กระแสในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วรอบต่ำ (สลิปมีค่ามาก) กระแสจะมีค่ามากด้วยและถ้าสลิปมีค่าใกล้ศูนย์กระแสจะมีค่าเท่ากันกับกระแสเมื่อไม่มีโหลด (No-load current) ในมอเตอร์ขนาดเล็กกระแสขณะไม่มีโหลดนี้จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของกระแสพิกัด

เมื่อแรงบิดมีค่าเป็นลบ มอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในสภาวะนี้จะมีพลังงานกลับคืนสู่แหล่งจ่ายไฟ กระแสที่คืนมาจะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสลิปในขณะนั้น

2.3.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์และกระแส



ก. การเปลี่ยนแปลงของโหลดและความเร็ว



ข. การเปลี่ยนแปลงแรงดันและความเร็วรอบ

รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดัน, โหลด และความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ จะอยู่ที่จุดสมดุลย์ระหว่างแรงบิดของโหลดและแรงบิดของมอเตอร์และจะได้ว่า

1. เมื่อแรงบิดของโหลดเปลี่ยนแปลงไป (แรงบิดของมอเตอร์คงที่) จากรูที่ จ ถ้าแรงบิดของโหลดมากขึ้นความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงเป็น N_2 แต่ถ้าโหลดลดลงความเร็วรอบก็จะเพิ่มขึ้นเป็น N_1 โหลดยิ่งเพิ่มมากเท่าใดกระแสของมอเตอร์ก็จะไหลมากขึ้นตามไปด้วย

2. เมื่อแรงดันป้อนมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป (โหลดคงที่) แรงบิดของมอเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันยกกำลังสองจากรูปที่ 10 ข. แรงดันของมอเตอร์ก็เปลี่ยนไปมีผลทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนไปด้วย โดยทั่วไปเมื่อแรงดันมีขนาดเพิ่มมากขึ้นกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ก็จะมีขนาดน้อยลง

2.3.7 แรงบิดพิกัด (Rated Torque)

แรงที่เพลาของมอเตอร์ที่ผลิตขึ้นมาเรียกว่า แรงบิด (Torque) ปกติแรงที่กระทำเชิงเส้นจะมีหน่วยเป็น นิวตัน (N) แต่แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ในขณะหมุนเป็นแรงที่กระทำเชิงหมุนมีหน่วยเป็น นิวตัน·เมตร (Nm) โดยเราสามารถคำนวณหาแรงบิดที่พิกัดของมอเตอร์ได้จากสูตรต่อไปนี้

$$T_M = \frac{P_{out}}{\omega} \tag{2.30}$$

โดยที่ T_M คือค่าแรงบิดที่พิกัด (Nm)

P_{out} คือพิกัดกำลังเอาท์พุท (Watt)

ω คือความเร็วเชิงมุมที่พิกัด (Rad / sec)

ความเร็วรอบพิกัด หมายถึง ความเร็วของมอเตอร์เมื่อป้อนแรงดันและความถี่พิกัดให้มอเตอร์และมอเตอร์ผลิตแรงบิดพิกัดให้โหลด

เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์นั้น การคำนวณหาแรงบิดพิกัดอาจใช้ความเร็วรอบซิงโครนัสมาใช้ในการคำนวณได้ แต่ถ้าต้องการคำนวณได้อย่างถูกต้องควรใช้ความเร็วรอบที่พิกัด

แรงบิดพิกัดของมอเตอร์มิได้หมายถึงแรงบิดที่มอเตอร์ผลิตขึ้น แต่หมายถึงแรงบิดของโหลดที่มอเตอร์สามารถขับได้เมื่อมอเตอร์หมุนต่อเนื่องที่ความเร็วรอบพิกัด จึงเป็นแรงที่เกิดจากการหมุนมีหน่วยเป็น Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์ (Rotor-Induced Voltage and Frequency)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วซิงโครนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นย่อมมีค่าสูงสุด และขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์ และสเตเตอร์ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r = 0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (ความถี่ของโรเตอร์) จะเท่ากับความถี่ของสาย กรณีนี้ค่าสลิปเท่ากับ 1 หรือ 100% และเมื่อโรเตอร์หมุนอัตราที่ฟลักซ์แม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำจะช้าลงค่าสลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_R = S \times E_{BR} \tag{2.31}$$

ในทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของสลิป ดังนั้น

$$f_r = S \times f_s \tag{2.32}$$

เมื่อ E_R = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ

E_{BR} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขอโรเตอร์ขณะอยู่กับที่ (Block Rotor Induce Voltage)

f_r = ความถี่ของโรเตอร์

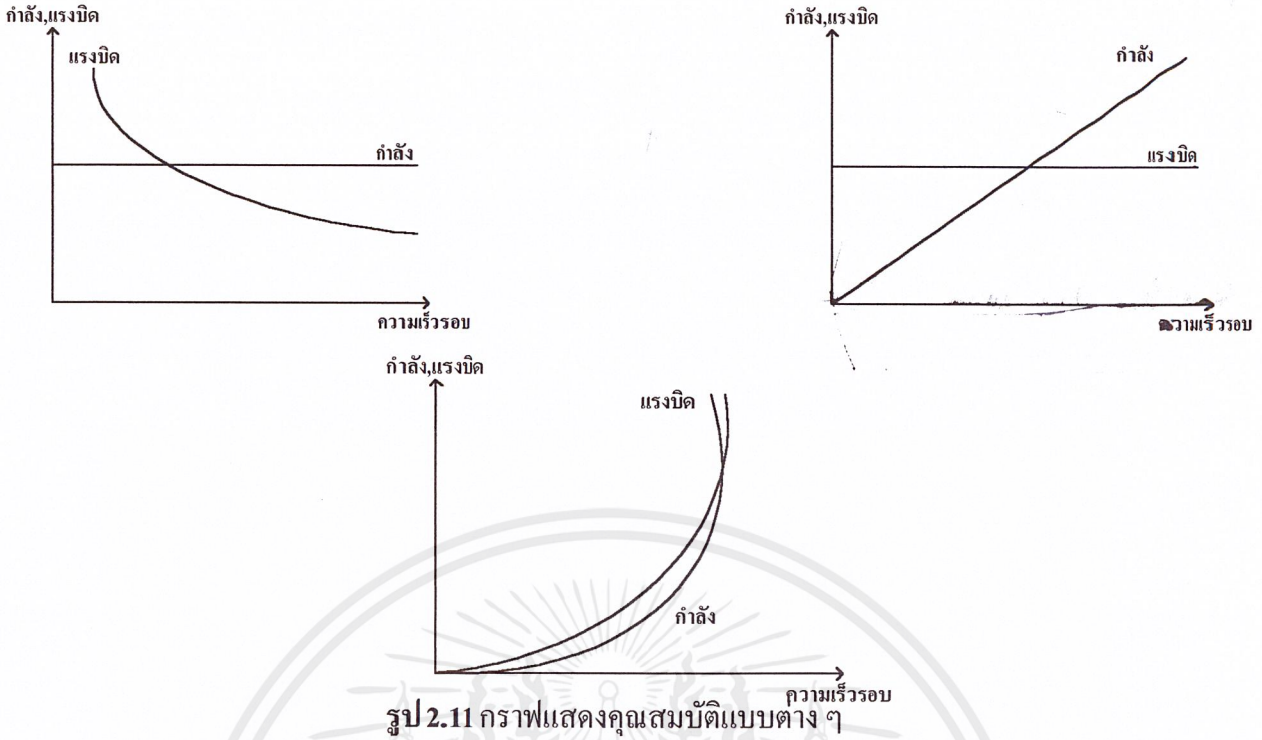
f_s = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

2.3.9 การพิจารณาวิเคราะห์สมบัติของโหลด

1) <u>สมบัติแรงบิด – ความเร็วรอบ</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของโหลดและแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดที่ความเร็วต่าง ๆ เรียกว่า สมบัติความสัมพันธ์ความเร็วรอบ-แรงบิดของโหลด เครื่องจักรโหลดมีสมบัติความเร็วรอบ-แรงบิด ตามสภาพเฉพาะของโครงสร้าง, สมบัติขณะเดินเครื่อง ฯลฯ ซึ่งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.11 กราฟแสดงคุณสมบัติแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของโหลด

สมบัติ	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด		ตัวอย่างโหลด
	เปรียบเทียบกับแรงบิด	เปรียบเทียบกับกำลัง	
โหลดกำลังคงที่	แรงบิดแปรผกผันกับความเร็วรอบ $T\alpha\frac{1}{n}$	กำลังคงที่ $P=$ คงที่	(โหลดแบบพิเศษ) ปั้นจั่น, เครื่องปั่นไฟแบบกำลังคงที่, เครื่องไสตัดเหล็ก
โหลดแรงบิดคงที่	แรงบิดคงที่ $T=$ คงที่	กำลังแปรตามความเร็วรอบ $P\alpha\ n$	(โหลดความฝืดต่าง ๆ ,โหลดแรงดึงดูดน้ำหนัก ฯลฯ) สายพานส่งของเครื่องพิมพ์, เครื่องทำกระดาษ, เครื่องปั่นด้าย, เครื่องกระทุ้งอัตโนมัติ, ปั๊มลูกสูบ
ขณะแปรตามกำลังสองของความเร็วรอบ เมื่อแรงบิดโหลดลดลง	แรงบิดแปรตามกำลังสองของความเร็วรอบ $T\alpha\ n^2$	กำลังแปรตามกำลังสามของความเร็วรอบ $P\alpha\ n^3$	(โหลดของไหล) โบลเวอร์ ปั๊มแรงเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถสร้างความถี่และแรงดันขนาดต่าง ๆ มาขับมอเตอร์ เพื่อให้หมุนด้วยความเร็วต่าง ๆ

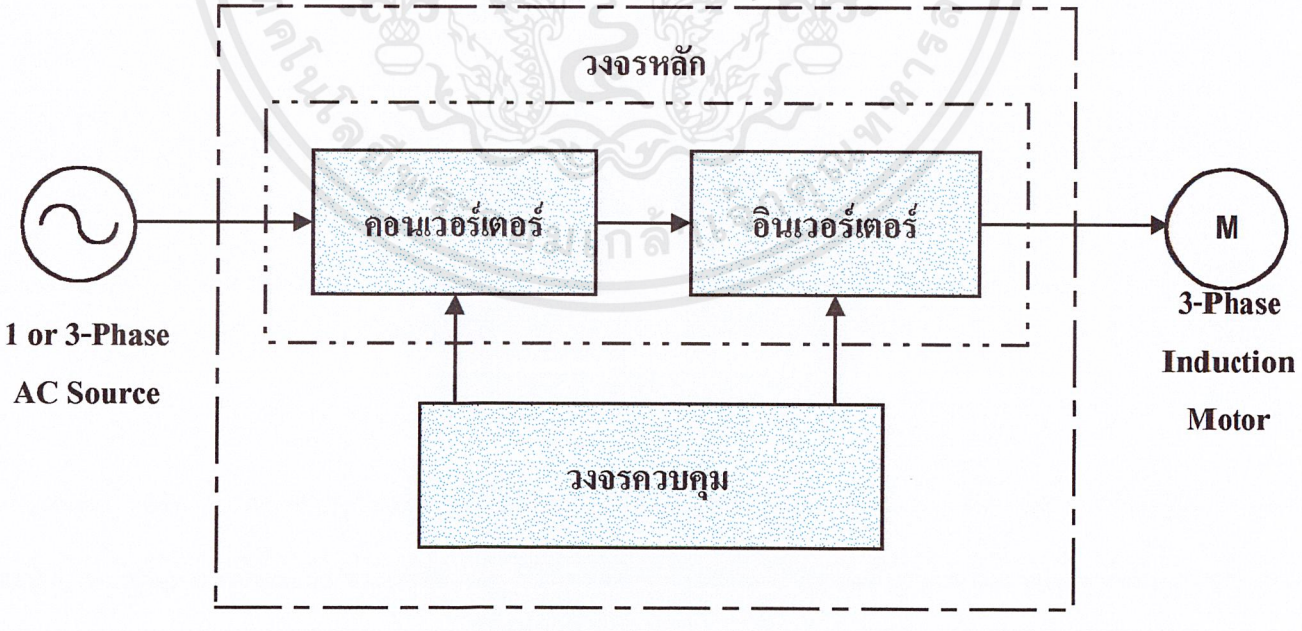
อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงไฟชนิดหนึ่งที่แปลงไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันคงที่ไปเป็นไฟสลับที่ความถี่และแรงดันขนาดต่าง ๆ แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนอินพุทของอินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟสลับทั่วไปที่เป็นรูปไซน์ แต่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์

จากหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะผลิตรูปคลื่นขาออกที่ผิดปกติซึ่งจะเกี่ยวพันไปถึงการเลือกมอเตอร์และอุปกรณ์รอบข้าง ดังนั้นการทำความเข้าใจต่อการทำงานของวงจรต่าง ๆ ในอินเวอร์เตอร์จึงเป็นเรื่องสำคัญ

<u>สิ่งที่ต้องทำความเข้าใจในหัวข้อนี้</u>

1. หลักการสร้างรูปคลื่นขาออก (แปรค่าแรงดัน และค่าความถี่ได้)
2. แนวความคิดเกี่ยวกับการตั้งค่าทอร์คบูสได้ (Torque Boost)
3. แนวความคิดเกี่ยวกับค่าเพาว์เวอร์แฟคเตอร์
4. การนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ควบคุมมอเตอร์

2.4.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

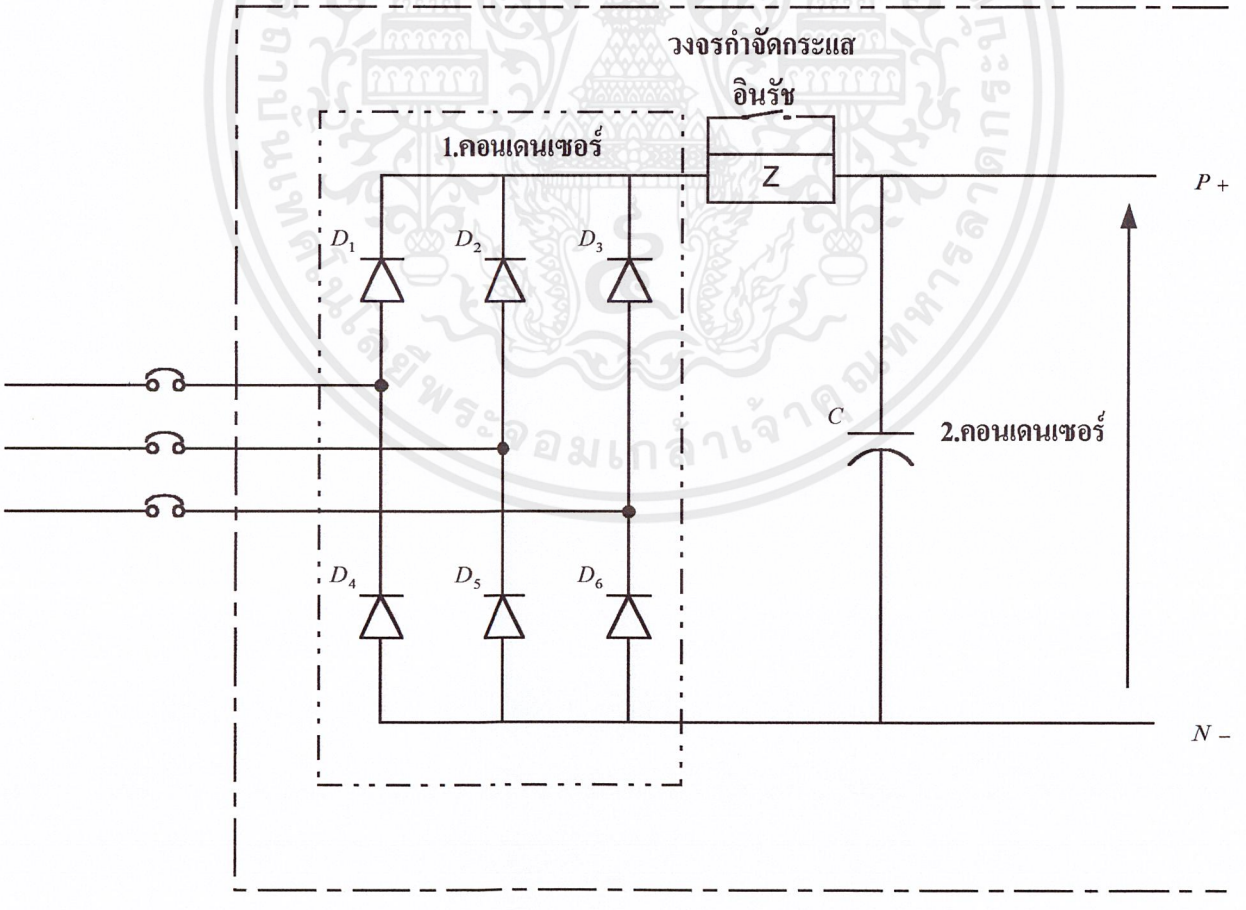
จากรูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟ (50 Hz หรือ 60 Hz) ไฟสลับนี้จะถูกแปลงเป็นไฟตรง โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter) จากนั้นไฟตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่สามารถแปรขนาดแรงดันและความถี่ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) วงจรทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่นและส่งผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนั้นยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนนั้น

อินเวอร์เตอร์ชนิดที่ใช้งานทั่วไป (General Purpose Inverter) จะประกอบด้วยส่วนคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์รวมอยู่ในเครื่องเดียวกันเสมอ

2.4.2 การทำงานของภาคคอนเวอร์เตอร์ (Converter)

วงจรส่วนนี้ทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟกระแสตรง ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ

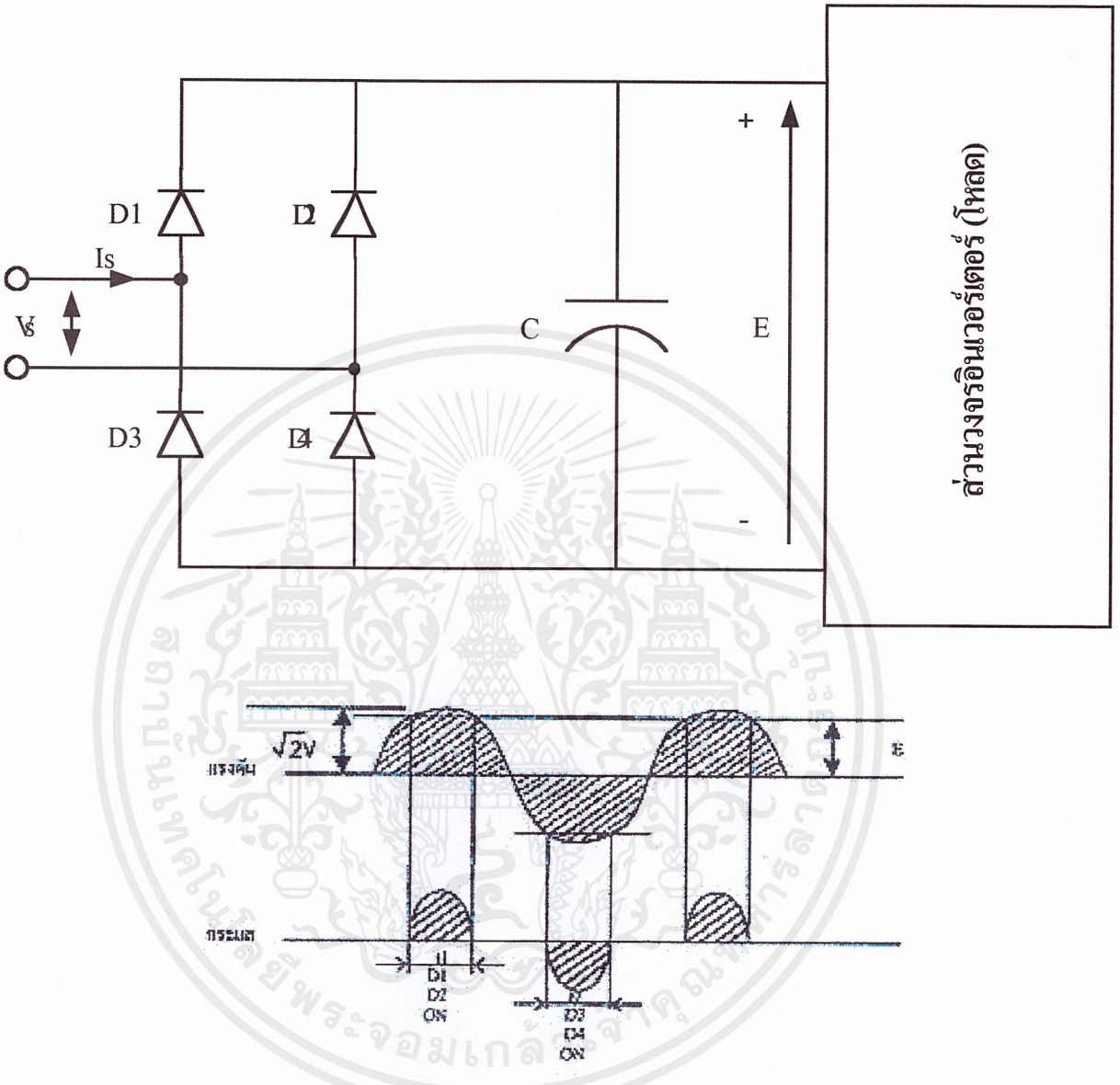
1. ส่วนคอนเวอร์เตอร์
2. คอนเดนเซอร์
3. วงจรกำจัดกระแสอินรัช (Inrush Current Suppression)



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

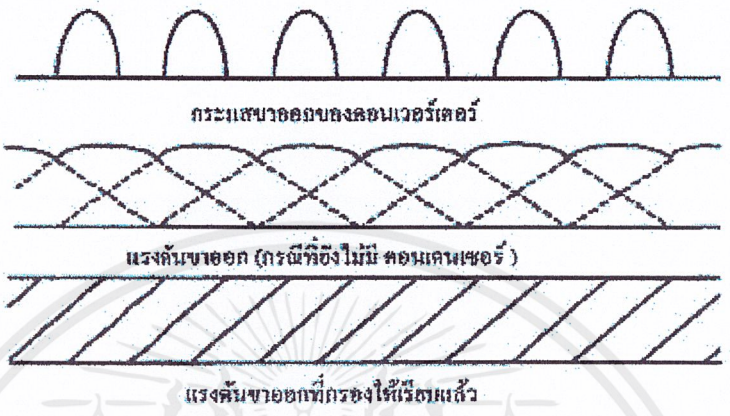
จากรูป 2.14 แสดงหลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งแปลงไฟสลับเฟสเดียวไปเป็นไฟตรง สามารถอธิบายถึงรูปคลื่นของกระแสไฟสลับขาเข้าได้ดังนี้

- อินพุทของคอนเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับรูปไซน์ซึ่งมีค่า $V_{\max} = \sqrt{2} \times V_{rms}$ ถ้าให้แรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ E จากรูป2.14 จะเห็นว่ามีส่วนของแรงดันไฟสลับที่ค่าแรงดันสูงกว่าระดับ E ซึ่งส่วนนี้มีค่าช่วงเวลาเท่ากับ t1 เป็นช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านไดโอด D1 และไหลกลับผ่าน D4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แรงดันไฟสลับส่วนที่เป็นลบ ช่วงเวลาที่แรงดันต่ำกว่าระดับแรงดัน $-E$ คือช่วงเวลา t2 ช่วงเวลานี้ กระแสจะไหลเข้าทางไดโอด D2 และไหลกลับผ่าน D3

จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์จะไม่เป็นรูปไซน์ แต่จะเพี้ยนจากรูปไซน์และมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกปนอยู่



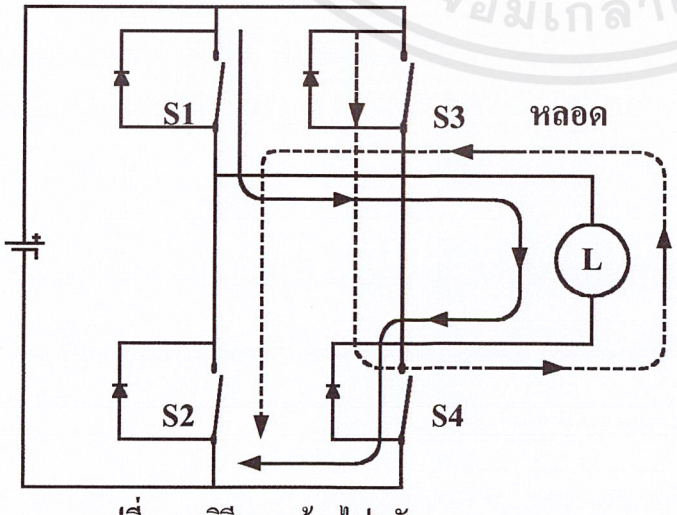
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแสดงกระแสและแรงดันขาออก

2.4.3 การทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

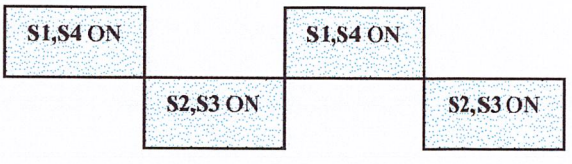
(1) วิธีการสร้างไฟสลับจากไฟกระแสตรง

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตไฟสลับได้จากแหล่งจ่ายไฟตรง การทำความเข้าใจกับหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ก็ควรเริ่มจากวงจรสร้างไฟสลับเฟสเดียวก่อน

รูปที่ 2.16 อธิบายหลักการเปลี่ยนไฟตรงเป็นไฟสลับ โดยเปลี่ยนโหลดจากมอเตอร์เป็นหลอดไฟเพื่อให้เข้าใจง่าย สวิตซ์ 4 ตัว S1, S2, S3 และ S4 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงและโหลดจะปิด-เปิดสลับกันเป็นจังหวะเพื่อสร้างไฟสลับจ่ายให้กับโหลดไฟ ตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 วิธีการสร้างไฟสลับ



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นกระแส

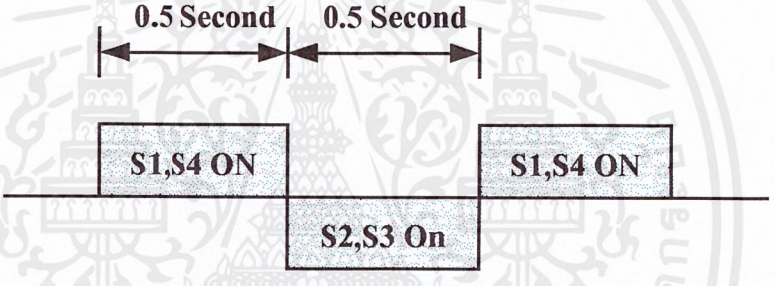
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อสวิตซ์ S1 และ S4 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านสวิตซ์และหลอดไฟตามทิศทาง A
- เมื่อสวิตซ์ S2 และ S3 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านสวิตซ์และหลอดไฟตามทิศทาง B ซึ่งตรงกันข้ามกับทิศทาง A

ดังนั้นถ้าให้สวิตซ์ S1 และ S4 เปิด-ปิด สลับกับสวิตซ์ S2 และ S3 ก็จะทำให้กระแสที่ไหลไปที่หลอดกลับทิศทางกัน สลับไปมาเป็นไฟสลับนั่นเอง

(2) วิธีการแปรความถี่

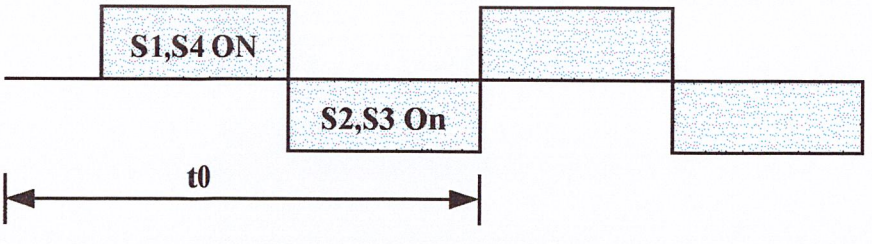
ถ้าควบคุมเวลาที่เปิด-ปิดสวิตซ์ S1-S4 ได้ ก็สามารถแปรความถี่ของไฟสลับได้ ตัวอย่างเช่น ให้สวิตซ์ S1 และ S4 ปิด 0.5 วินาที ต่อมาสวิตซ์ S2 และ S3 ปิด 0.5 วินาทีและทำการปิด-เปิดสลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นใน 1 วินาที ไฟสลับจะวิ่งไปกลับครบ 1 รอบหรือ 1 ไซเคิล ไฟสลับนี้จึงมีความถี่ 1 Hz นั่นเอง



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz

โดยทั่วไปช่วงเวลาที่ S1, S4 และ S2, S3 ปิดจะเท่ากัน เมื่อรวมเวลาที่สวิตซ์ทั้งสองชุดปิดเท่ากับ t0 วินาทีเป็น 1 ไซเคิล ความถี่จะเท่ากับ

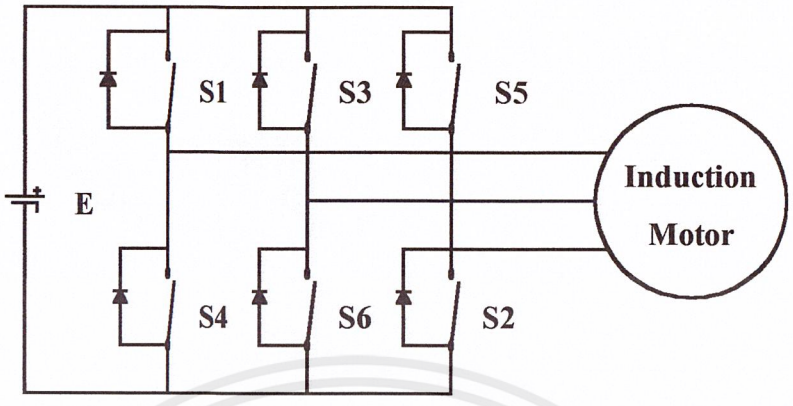
$$f = \frac{1}{t0} \quad \text{Hz}$$



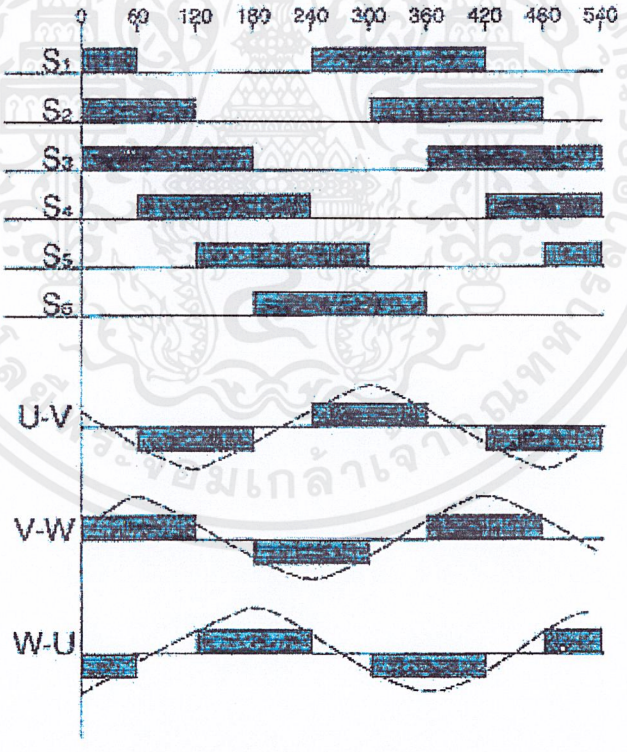
รูปที่ 2.19 วิธีการแปรความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) กรณีของไฟสามเฟส



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส



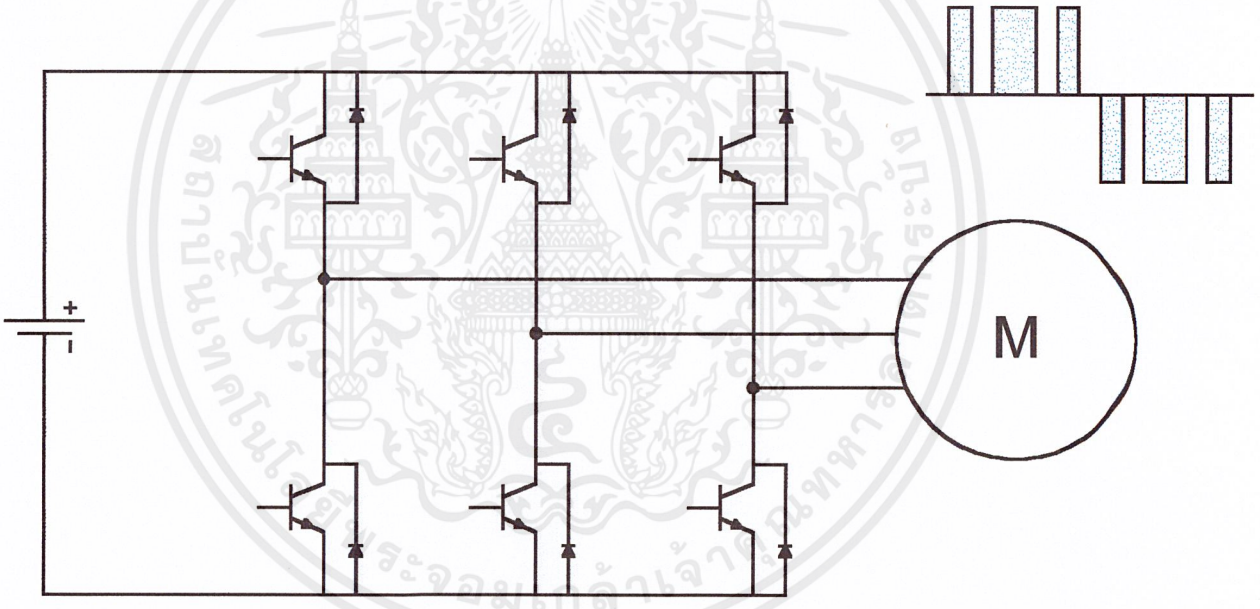
รูปที่ 2.21 การสร้างไฟสลับ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้สวิตซ์ S1 ถึง S6 ในวงจรเปิด-ปิด ตามจังหวะที่แสดงในรูปที่ 2.20 ก็จะมีกระแสไหลผ่านขั้ว U-V, V-W และ W-U ของมอเตอร์ ตามรูปคลื่นของกระแสในรูป 2.21 รูปคลื่นของกระแสนี้จะเป็นไฟสลับของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงกว้าง และช่วงห่างระหว่างคลื่นเท่ากัน ถ้าเปลี่ยนช่วงเวลาของการเปิด-ปิดสวิตซ์เหล่านี้ ก็จะทำให้ความถี่ของไฟสลับเปลี่ยนไปได้ และขนาดของแรงดันไฟสลับของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเปลี่ยนไปได้เช่นเดียวกัน

(4) โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตซ์ทั้ง 6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.22 เมื่อต่อเอาท์พุทเข้ามอเตอร์ 3 เฟสและควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ ON-OFF ตามจังหวะในรูป 2.22 ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนได้ และถ้าเปลี่ยนลำดับการ ON-OFF ของทรานซิสเตอร์ ก็สามารถบังคับให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางได้



รูปที่ 2.22 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

(5) วิธีเปลี่ยนขนาดแรงดัน

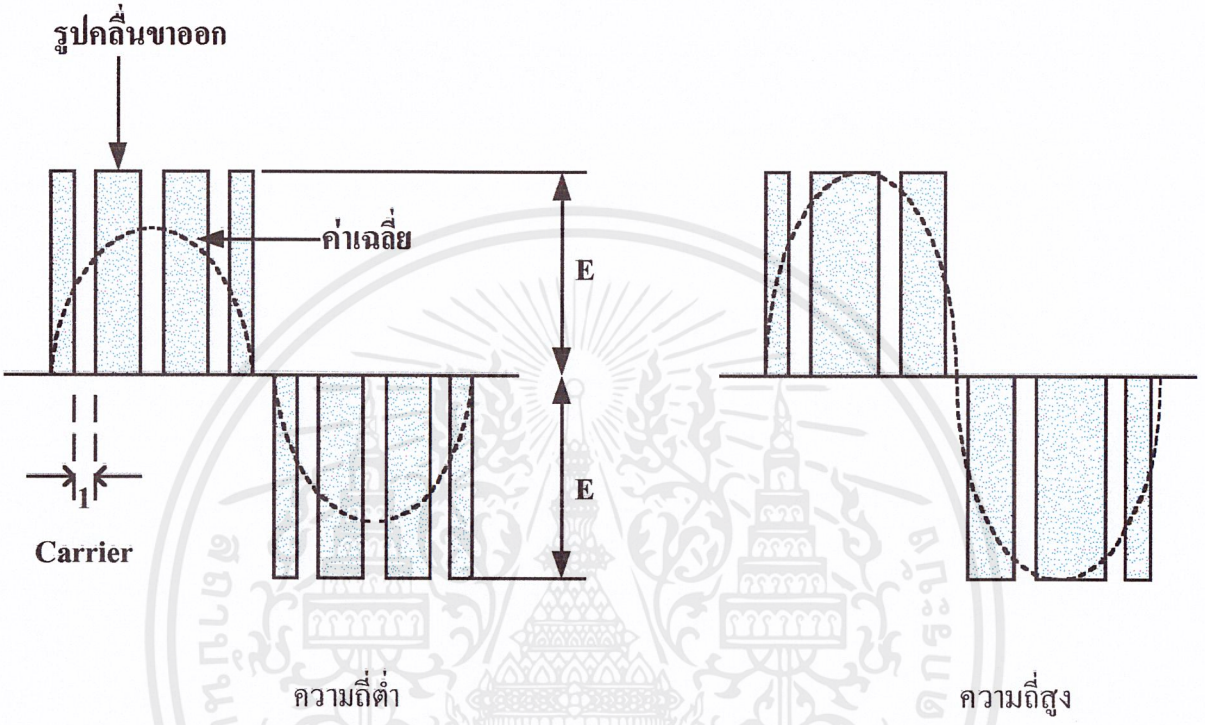
เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ นอกจากการแปรความถี่เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์แล้ว ยังต้องแปรขนาดแรงดันตามความถี่ที่เปลี่ยนไป เพื่อรักษาอัตราส่วน V/f ให้คงที่

การแปรขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์มีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันมากในอินเวอร์เตอร์ชนิดใช้งานทั่วไปคือ วิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันขาออกที่ป้อนให้มอเตอร์ การแปรรูปคลื่นแรงดันนี้ก็มีอยู่หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีด้วยกัน แต่ในโครงงานใช้อินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปที่ ใช้วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็นรูปไซน์ โดยการควบคุมความกว้างของพัลส์ให้แรงดันเฉลี่ยมีรูปคลื่นเป็นไซน์ จึงขอเสนอวิธีนี้วิธีเดียว

(6) วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็นรูปไซน์



รูปที่ 2.23 แสดงการเกิดรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ต่ำและสูง

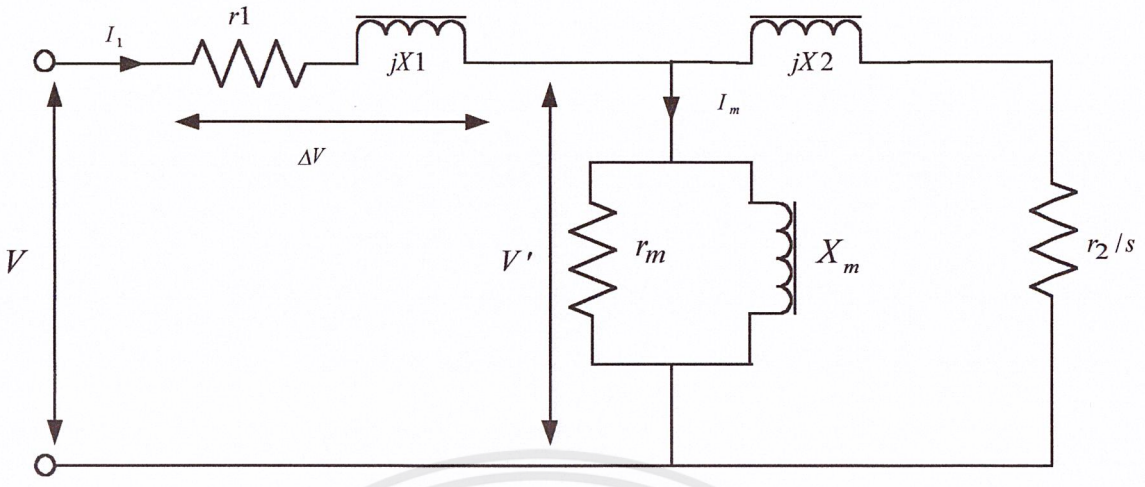
จุดเด่น

- เดินมอเตอร์ได้เรียบที่ความเร็วต่ำ
- ฮาร์มอนิกความถี่ต่ำมีขนาดเล็ก
- ไม่ได้ยินเสียงความถี่สูงจากการสวิทชิ่ง

2.4.4 รูปแบบ V/f และทอร์คบูส (Torque Boost)

ขนาดของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์จะแปรตามความถี่ ดังแสดงในรูป 2.23 เพื่อรักษาให้รูปแบบ V/f มีค่าคงที่ แต่จากรูป 2.24 เราจะเห็นว่าในขดลวดสเตเตอร์หรือขดลวดปฐมภูมิของมอเตอร์นั้นจะมีส่วนที่เป็นความต้านทาน และรีแอคแตนท์อยู่ (รวมเรียกว่า อิมพีแดนซ์) เมื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์จะมีแรงดันตกคร่อมอิมพิแดนซ์นี้ จึงทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีขนาดลดลง

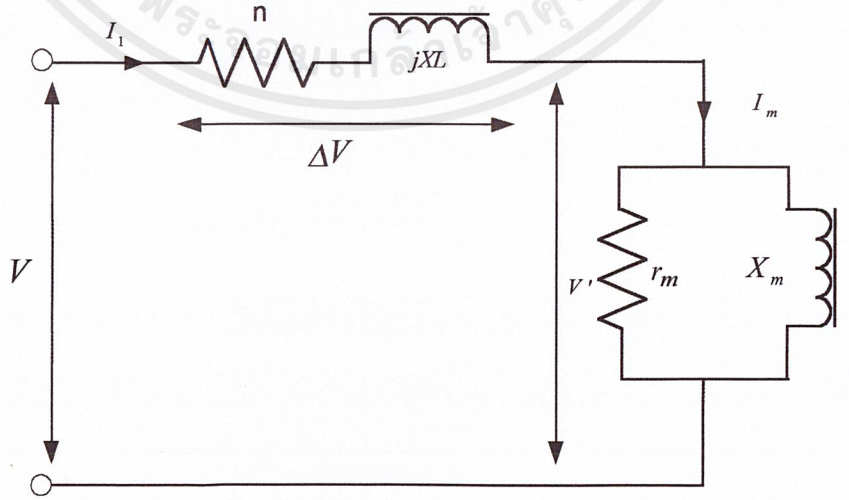
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

V : แรงดันปฐมภูมิ
V' : แรงดันเหนี่ยวนำปฐมภูมิ
R1 : ความต้านทานด้านปฐมภูมิ
R_m : ความต้านทานของแกนเหล็ก
X1 : รีแอคแตนซ์รั่วไหลปฐมภูมิ
S : สลิป
I1 : กระแสปฐมภูมิ
I2 : กระแสทุติยภูมิ
R2 : ความต้านทานทุติยภูมิ
X_m : รีแอคแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก
X_2 : รีแอคแตนซ์รั่วไหลทุติยภูมิ
I_m : กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

ในสภาพไม่มีโหลดวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ จะเป็นดังในรูป 2.25 ที่เปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลย์กรณีไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาเฉพาะแรงดันจะได้

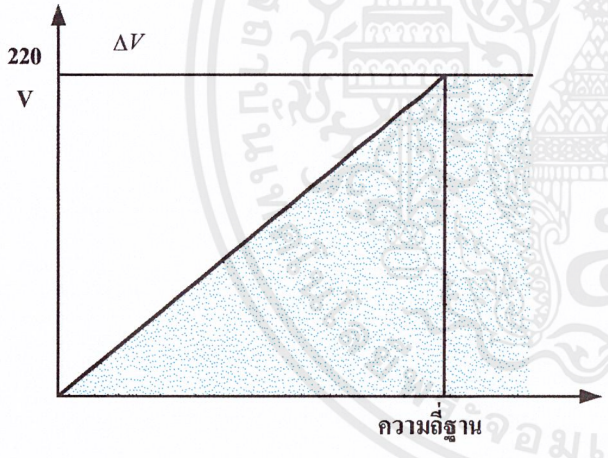
$$V' = V(jI_m)(R_1 + jX_1) \quad (2.33)$$

ถ้าให้ $\Delta V = (jI_m)(R_1 + jX_1)$ จะเหลือสมการ

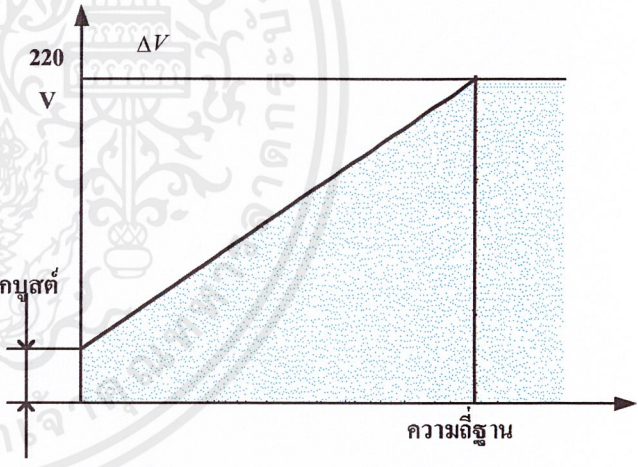
$$V' = V(\Delta V) \quad (2.34)$$

ในกรณีที่ต่อมอเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟ 50 Hz หรือ 60 Hz โดยตรงตัวมอเตอร์จะถูกออกแบบทางด้านขดลวดให้ชดเชยแรงดันตกคร่อมค่าอิมพิแดนซ์นี้แล้ว

แต่ในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์นั้น ขนาดแรงดันขาออกจะแปรตามความถี่ ปัญหาจะเกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่ำซึ่งแรงดันมีขนาดเล็ก แต่แรงดันตกคร่อมที่อิมพิแดนซ์ในสเตเตอร์มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับแรงดันที่ป้อนเข้ามาในมอเตอร์จึงทำให้แรงบิดของมอเตอร์ในขณะนั้นมีขนาดเล็ก เพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมอิมพิแดนซ์ในย่านความถี่ต่ำนี้ก็เพิ่มแรงดันตามสมการข้างต้น เพื่อให้ขนาดแรงดันมีขนาดใหญ่ขึ้น แก้ปัญหาแรงบิดในช่วงเริ่มต้นมีขนาดต่ำมาก รูป 2.27 แสดงแรงดันที่ชดเชยที่ความถี่ต่ำ การเพิ่มแรงดันนี้เราเรียกว่า ทอร์กบูส (Torque Boost)



รูปที่ 2.26 รูปแบบ V/f ในอุดมคติ



รูปที่ 2.27 รูปแบบ V/f ที่ใช้งานจริง

2.4.5 การตั้งค่าทอร์กบูสต์

เมื่อต้องการแรงบิดสตาร์ทขนาดใหญ่หรือต้องการแรงบิดเพิ่มอัตราเร่ง ก็ใช้วิธีปรับค่าทอร์กบูสนี้ก็สามารถปรับให้มอเตอร์เพิ่มแรงบิดที่ความถี่ต่ำได้สูงถึง 100-150 %

(1) การตั้งค่าทอร์กบูสของอินเวอร์เตอร์จากโรงงาน จะตั้งไว้สำหรับใช้กับมอเตอร์มาตรฐาน ในกรณีที่นำอินเวอร์เตอร์มาใช้กับมอเตอร์อื่นที่มีสเปคของขดลวดแตกต่างกันไป ก็ให้ปรับค่าทอร์กบูสนี้เพื่อให้มอเตอร์ทำงานตามที่ต้องการได้

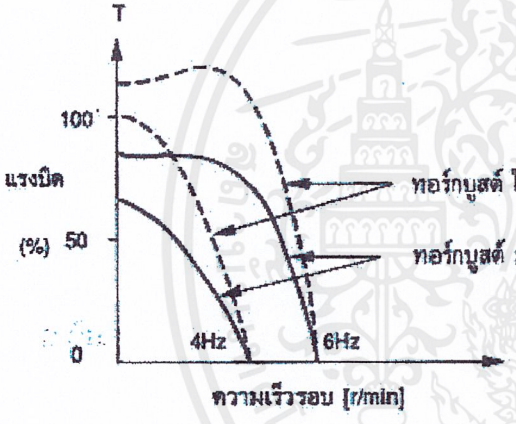
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ในกรณีที่โหลดเบาไม่ควรตั้งค่าทอร์กบูสให้มีค่าสูง เพราะจะทำให้กระแสไหลมาก อินเวอร์เตอร์อาจตัดเนื่องจากกระแสเกิน (Overcurrent Trip)

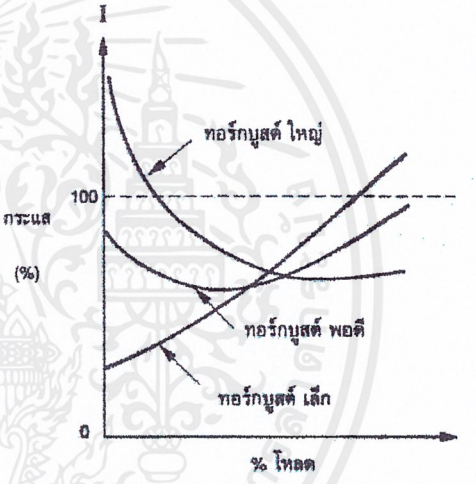
(3) ถ้าโหลดเบาควรตั้งค่าทอร์กบูสให้เล็ก จะทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูง

(4) ถ้ามีแรงดันตกคร่อมในสายไฟ ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับมอเตอร์ ก็ใช้วิธีปรับค่าทอร์กบูสเพื่อชดเชยได้

เมื่อเพิ่มแรงดันโดยการปรับค่าทอร์กบูส จะทำให้กราฟของแรงบิดและกระแสต่างไป ดังแสดงในรูป 2.28 โดยในอินเวอร์เตอร์จะมีการตั้งค่ากระแสเกินไว้ประมาณ 150% ของกระแสพิกัด การตั้งค่าทอร์กบูสเพื่อเพิ่มแรงบิด สตาร์ทจะต้องไม่ตั้งให้กระแสมอเตอร์สูงเกินกว่าค่ากระแสเกินขณะนี้ มิฉะนั้นอินเวอร์เตอร์จะตัดเนื่องจากกระแสเกินได้



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างแรงบิดขณะสตาร์ท



รูป 2.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง %โหลด กับกระแสมอเตอร์

ในกรณีที่ตั้งค่าทอร์กบูสไว้ใหญ่ กระแสจะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของโหลดดังนี้

(1) โหลดเบา ฟลั๊กซ์แม่เหล็กจะอิ่มตัวในแกนเหล็กของมอเตอร์ ทำให้กระแสไหลมาก จนบางครั้งฟังก์ชันการป้องกันกระแสเกินในอินเวอร์เตอร์จะทำงาน

(2) โหลดหนัก ตั้งค่าทอร์กบูสเพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมในสเตเตอร์สายไฟ ทำให้แรงบิดสตาร์ทใหญ่ขึ้น สลิปของมอเตอร์เล็กลง กระแสจะไหลน้อยกว่ากรณีของโหลดเบา

ตัวอย่างเช่น ถ้าตั้งค่าทอร์กบูสของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าใหญ่ กระแสมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับโหลด(โหลดหนักหรือเบา) การตั้งค่าทอร์กบูสให้ใหญ่จะทำให้กระแสไหลได้มากขึ้น แรงบิดสตาร์ทจะใหญ่ขึ้น ในกรณีของโหลดหนักเวลาเร่งความเร็วแรงบิดจะมากขึ้นทำให้สลิปเล็กลง มีผลให้กระแสเฉลี่ยของมอเตอร์ในขณะเร่งความเร็วมีขนาดเล็กลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าตั้งค่าทอร์กบูสสูงเกินไป กระแสมอเตอร์จะไหลมากเกินไปหลังจากสตาร์ทแล้ว ทำให้ฟังก์ชันป้องกันกระแสเกินในอินเวอร์เตอร์ทำงานได้

2.4.6 ข้อแตกต่างเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีต่อมอเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟกับการใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์จะทำให้กระแสไหลมากเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ผลิตออกมาจะไม่เป็นคลื่นไซน์ทีเดียวนัก ดังนั้นจะมีฮาร์มอนิกปนอยู่ ทำให้กระแสของมอเตอร์มีขนาดมากกว่ากรณีต่อกับแหล่งจ่ายไฟโดยตรงประมาณ 10 % และจะทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าด้วย ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากเรื่องนี้เลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับมอเตอร์ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

กระแสขาออกพิกัดของอินเวอร์เตอร์ $\geq$ (กระแสพิกัดของมอเตอร์ x 1.1)

2.4.7 เหตุที่ต้องเปลี่ยนแรงดันเมื่อแปรความเร็วรอบ

ในหัวข้อมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ผ่านมา ความเร็วรอบของมอเตอร์จะขึ้นกับความถี่เท่านั้น แต่เมื่อความถี่เปลี่ยนไปโดยให้ความเร็วรอบคงที่ เช่นลดความถี่ต่ำกว่า 50 Hz ในขณะที่แรงดันเป็น 380 V. จะทำให้ฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว กระแสก็จะเพิ่มมากขึ้นและมอเตอร์ก็จะร้อนขึ้นจนเสียหายได้

วิธีการแก้ปัญหานี้คือการรักษาฟลักซ์ให้มีค่าคงที่ ฟลักซ์จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันและจะแปรผกผันกับความถี่ เมื่อแปรความถี่ไปก็ควรแปรแรงดันตามไปด้วยเพื่อให้ค่าฟลักซ์คงที่ก็จะแก้ปัญหานี้ได้

ตัวอย่างเช่น ทดลองลดความถี่ลงจาก 60 Hz เป็น 30 Hz อัตราส่วน V/ f คงที่

$$\frac{V}{f} = \frac{220}{60} = \frac{110}{30} = \text{ฟลักซ์แม่เหล็ก} = \text{คงที่} \qquad (2.35)$$

แรงดันก็ควรจะลดลงเป็น 110 V ด้วย ในทางปฏิบัติค่าแรงดันจะสูงกว่านี้เล็กน้อยเพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมในมอเตอร์ (ทอร์กบูสนั่นเอง)

การแปรค่าแรงดันนี้เพื่อแก้ปัญหาความร้อนของมอเตอร์ แต่ต้องคิดถึงแรงบิดด้วยดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.8 แรงบิดของมอเตอร์ที่ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์

สูตรแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด T กับแรงดัน V และความถี่ f

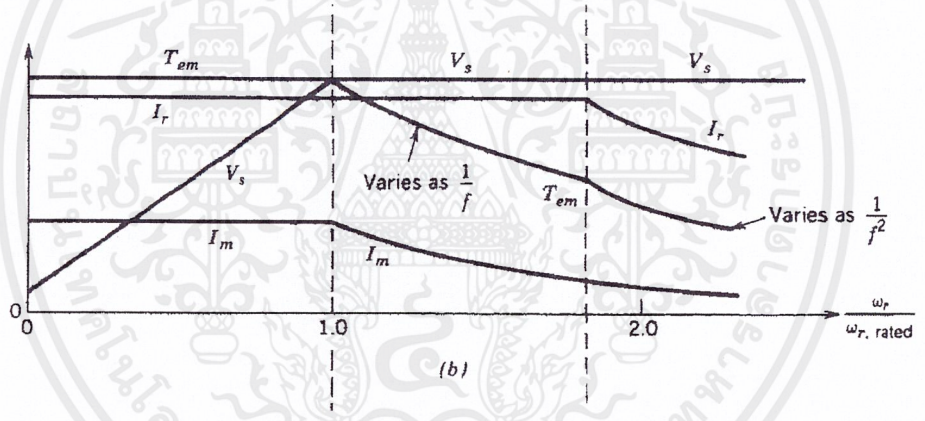
$$\text{แรงบิด } T = k \times \frac{V}{f} \times I \tag{2.36}$$

k : ค่าคงที่ , I : กระแส

ย่านการควบคุมโดยการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์มี 2 กรณี คือ

1. ถ้าอิมพิแดนซ์ส่วน V/f คงที่ ก็จะทำให้แรงบิด T คงที่ด้วยเรียกย่านนี้ว่า ย่านแรงบิดคงที่
2. ถ้าให้แรงดัน V คงที่และให้ความถี่ f แปรค่าไปเรียกย่านนี้ว่า ย่านกำลังคงที่

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

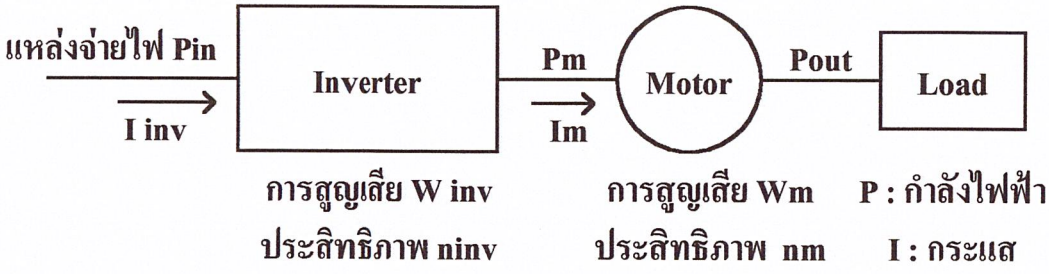


รูปที่ 2.30 การทำงานของมอเตอร์แรงบิดคงที่และแรงดันคงที่

2.4.9 ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงไฟ ซึ่งภายในประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์แปลงไฟสลับเป็นไฟตรง และส่วนอินเวอร์เตอร์ที่แปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ ในส่วนแปลงไฟเหล่านี้จะมีการสูญเสียพลังงานอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าอินเวอร์เตอร์จะช่วยประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสูตรกำลังไฟขาเข้ากับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 กำลังไฟขาเข้าและขาออก

$$efficiency = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \tag{2.37}$$

$$P_{in} = P_m + P_{loss(inverter)} \tag{2.38}$$

$$P_m = P_{out} + P_{loss(motor)} \tag{2.39}$$

$$P_{out} = T \times \omega \tag{2.40}$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะได้ว่า

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss(inverter)} + P_{loss(motor)} \tag{2.41}$$

$$= \frac{P_{out}}{\eta_{inverter+motor}}$$

$$\eta_{inverter+motor} = \eta_{inverter} \times \eta_{motor} \tag{2.42}$$

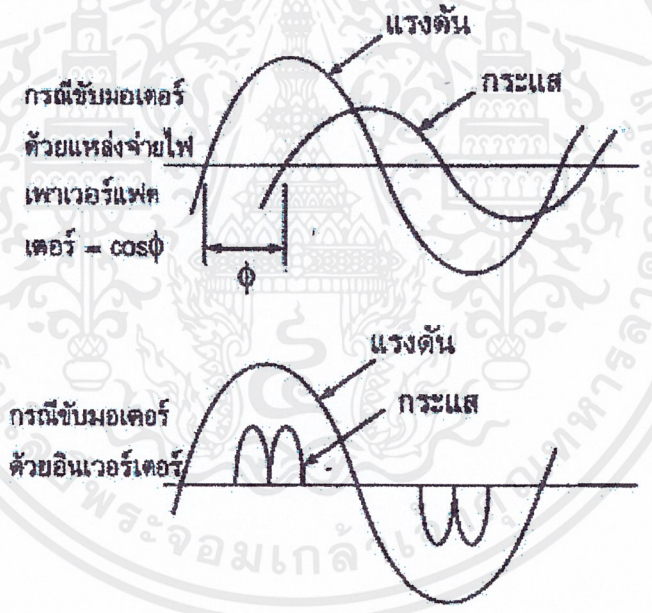
จากความสัมพันธ์ ข้างต้นจะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าขาเข้าทั้งหมดที่ป้อนให้มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์จะมากกว่ากรณีการขับมอเตอรีจากแหล่งจ่ายไฟโดยตรง เนื่องจากการสูญเสียของมอเตอร์เมื่อขับด้วยอินเวอร์เตอร์จะมีมากกว่า เพราะมีผลของฮาร์มอนิกและต้องเพิ่มการสูญเสียของอินเวอร์เตอร์เข้าไปด้วย แต่การขับด้วยอินเวอร์เตอร์สามารถลดความเร็วรอบของมอเตอร์ลงได้ ถ้าแรงบิดโหลดมีค่าคงที่การลดความเร็วรอบจะทำให้กำลังขาออกของมอเตอร์ลดลงได้ ส่วนนี้จะช่วยประหยัดพลังงานขาเข้าไปได้มาก โหลดที่ใช้เช่น พัดลมและปั๊มน้ำ ซึ่งทำงานแบบกำลังขาออกแปรตามรอบการหมุน การใช้อินเวอร์เตอร์จะช่วยลดกำลังไฟขาเข้าลงได้เป็นการประหยัดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.10 เพาว์เวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor)

ปกติเพาว์เวอร์แฟคเตอร์สามารถหาได้จาก ความแตกต่างเฟสระหว่างคลื่นแรงดันไฟและกระแส แต่ในกรณีของอินเวอร์เตอร์นั้น คลื่นกระแสขาเข้าจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์และมีองค์ประกอบคลื่นฮาร์มอนิกปนอยู่มาก จึงไม่สามารถใช้ความแตกต่างเฟสในการหาเพาว์เวอร์แฟคเตอร์ได้ (ถ้าใช้เพาว์เวอร์มิเตอร์วัดจะมีค่าประมาณ 1 เสมอ) เพาว์เวอร์แฟคเตอร์สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟจริง (Real Power : watt) กับกำลังไฟปรากฏ (Apparent Power : VA) ตามความสัมพันธ์

$$PowerFactor = \frac{\text{Re}\,alpower}{Appaerentpower} = \frac{P_{out(inverter)}}{VA_{out(inveretr)}} \qquad (2.43)$$



รูปที่ 2.32 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเปรียบเทียบในกรณีของแหล่งจ่ายไฟโดยตรงกับกรณีของการจ่ายโดยใช้อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีการส่งข้อมูลมาตรฐาน 485

ในวงจรเครื่องมือวัดความเร็วรอบของโรเตอร์ และวัดความเร็วรอบของสเตเตอร์ ของมอเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ได้มีการประยุกต์ใช้การส่งข้อมูลแบบ 485 เพื่อใช้ส่งค่าสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ซิงโครนัสของมอเตอร์ที่ออกจากวงจร zero crossing detector และสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการตรวจจับโดยใช้ Optical Encoder เพื่อนำไปคำนวณค่าความเร็วรอบของโรเตอร์ โดยที่เพื่อต้องการให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องและมีการผิดเพี้ยนน้อยที่สุด และสามารถส่งได้ในระยะทางไกลโดยไม่มีสัญญาณรบกวนจึงได้มีการนำการส่งข้อมูลแบบ 485 มาใช้

มาตรฐานการส่งข้อมูลแบบ 485 เป็นแบบแผนในการส่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณ ดิจิตอล ไปตามสายส่งที่มีระยะทางไกลๆ และมีสัญญาณรบกวนมาก โดยถ้าใช้การส่งข้อมูลแบบนี้จะทำให้สัญญาณไม่ผิดเพี้ยน ซึ่งการส่งข้อมูลมาตรฐาน 485 จะมีชื่อเป็นทางการว่า TIA/EIA – 485โดยจะมีปรับปรุงแก้ไขเนื้อหาเป็นระยะโดย TR-30.2 DTE-DCE Interfaces and Protocols Subcommittee สำหรับชื่อทางการของการส่งสัญญาณมาตรฐาน 485 จะใช้ชื่อว่า Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint System โดยที่ในระบบวงจรไฟฟ้า 5 V. ถ้าต้องการตัวขับสัญญาณ (Driver) มากกว่า 1 ตัวในวงจร จะนิยมใช้การส่งข้อมูลแบบ 485 โดยที่ในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งจะมีตัวขับสัญญาณ (Driver) เพียงตัวเดียวที่ทำการส่งข้อมูลเท่านั้น

สำหรับจุดเด่นของการส่งข้อมูลแบบมาตรฐาน 485 ที่เหนือกว่าการส่งข้อมูลแบบอื่นๆ (เช่น การส่งข้อมูลแบบ RS 232 หรือการส่งข้อมูลแบบ 422)คือ จะสามารถนำตัวรับส่งสัญญาณ (transceiver) ที่เป็นได้ทั้งตัวขับสัญญาณ (driver) หรือ ตัวรับสัญญาณ (receiver) หลายๆตัวมาต่อเข้าในระบบสายส่งได้ (Digital Multipoint System) โดยที่การส่งข้อมูลมาตรฐาน 422 จะสามารถต่อตัวขับสัญญาณได้เพียง 1 ตัวในระบบเท่านั้น โดยที่ในการส่งข้อมูลแบบ 485 ในการส่งแต่ละครั้งจะยินยอมให้มีตัวขับสัญญาณทำการส่งสัญญาณได้เพียงตัวเดียว(Half-duplex operation) เพราะถ้าตัวส่งสัญญาณหลายๆตัวทำงานพร้อมๆกัน อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการส่งสัญญาณ เช่น เกิดการลัดวงจรที่ขาออกของตัวขับสัญญาณ และทำให้สัญญาณที่ได้ออกมาที่ขาออกของตัวรับสัญญาณ มีลักษณะที่ผิดเพี้ยนได้ ตัวอย่างจากรูป ถ้าตัวขับสัญญาณ D1 ส่งสัญญาณไปที่ตัวรับสัญญาณ R2 ขณะที่ตัวขับสัญญาณ D3 ยังคงทำงานอยู่จะทำให้ข้อมูลที่มีค่าผิดเพี้ยนถูกส่งไปที่ตัวรับสัญญาณ R2 ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะเรียกว่า Line contention ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ 485 จะเหมือนกับการส่งข้อมูลแบบ 422 ดังนั้นจึงสามารถนำตัวรับส่งสัญญาณใช้แทนกันได้ คือสามารถนำตัวรับส่งสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณแบบ 422 มาใช้ในการส่งสัญญาณแบบ 485 ได้

การส่งข้อมูลมาตรฐาน 485 นี้จะกำหนดความยาวของสายส่งไว้ที่ระยะไม่เกิน 1200เมตร โดยที่สัญญาณรบกวนจะถูกนำมาพิจารณาในการกำหนดความยาวของสายส่งด้วย และเมื่อนำอัตราเร็วการส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลมาพิจารณาประกอบจะพบว่า ยิ่งสายส่งที่ระยะยาวมากขึ้นอัตราเร็วในการส่งข้อมูลก็จะลดลง กล่าวคืออัตราเร็วของการส่งข้อมูลจะเร็วในสายส่งระยะสั้นนั่นเอง

จาก Rule of Thumb จะพบว่า อัตราเร็วของการส่งข้อมูลในหน่วย bit per second คูณกับความยาวของสายส่งในหน่วยเมตร ไม่ควรจะมีค่าเกิน 10 ยกกำลัง 8 ตัวอย่างเช่นความยาวของสายส่ง 500 เมตร ไม่ควรส่งข้อมูลด้วยอัตราที่เร็วเกินกว่า 200 kbps โดยที่กฎนี้สามารถใช้ได้ทั้งในการส่งสัญญาณแบบ 422 และ 485

2.5.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการส่งข้อมูลแบบ 485 และ 422

ตัวแปรต่างๆ	485	422
จำนวนตัวรับส่งสัญญาณ	32 U.L.	1 driver และ 10 receivers
ความยาวสูงสุดของสายส่ง	1200 m.	1200 m.
อัตราการส่งข้อมูลสูงสุด	10 Mbps	10 Mbps
Input resistance ของ receiver	4 k-ohm	12 k-ohm
Receiver Sensitivity	$\pm$ 200 mV	$\pm$ 200 mV

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของการส่งข้อมูลแบบ 485 และ 422

2.5.2 ปัญหาที่มักพบในการส่งข้อมูลแบบ 485

1.)การเกิดการสับสนในการส่งสัญญาณเนื่องจากตัวขับสัญญาณ 2 ตัวหรือมากกว่าทำงานพร้อมกันในกรณีที่มีตัวขับสัญญาณมากกว่า 2 ตัวต่ออยู่ในสายส่งของระบบ

2.)เกิดการหยุดทำงานเนื่องจากผลของอุณหภูมิสูง(Thermal Shut down) โดยผลของอุณหภูมิจะทำให้ไม่มีสัญญาณออกจากตัวขับสัญญาณเมื่อเกิดอุณหภูมิสูง และจะสามารถคืนสภาพเดิมภายหลังจากอุณหภูมิของอุปกรณ์ลดต่ำลง

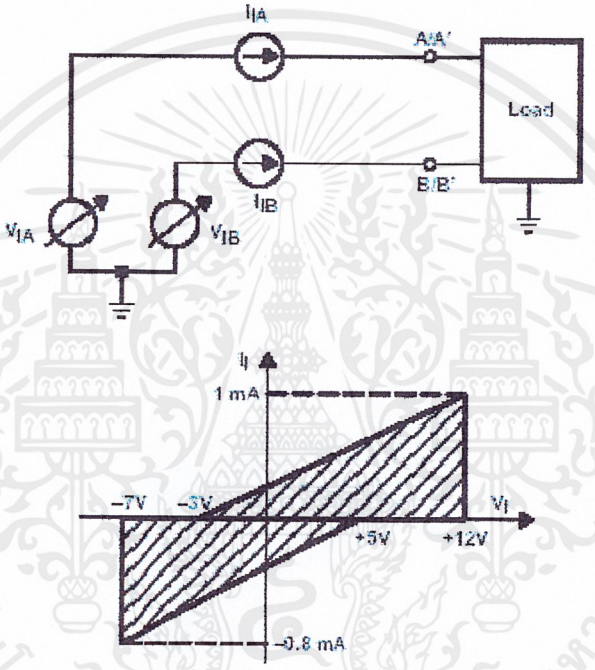
2.5.3 หลักการของ Unit Load

ในการต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณเข้าไปในระบบต้องคำนึงถึงคุณลักษณะของกระแสต่อแรงดัน โดยที่คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันจะเป็นตัวกำหนดจำนวนการต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณในระบบ

จากรูป ที่ค่าแรงดัน V_{IA} (V_{IB}) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง –7 ถึง 12 Volt ขณะที่ V_{IB}(V_{IA}) อยู่ในสภาวะการต่อลงดิน และทำให้ค่ากระแสขาเข้า I_A (I_B) อยู่ภายใต้กราฟที่แรเงา (-8 ถึง 1 มิลลิแอมแปร์) ทั้งในช่วงจ่ายพลังงาน และไม่จ่ายพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่มีคุณลักษณะทางด้านขาเข้าเป็นดังนี้จะถือว่ามีค่า 1 Unit Load (1 U.L.) โดยที่การส่งข้อมูลมาตรฐาน 485 จะกำหนดให้มีการต่ออุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับส่งสัญญาณที่สายส่งได้ไม่เกิน 32 Unit Load ใน 1ระบบ ที่จุดสูงสุด และต่ำสุดของกราฟจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 12 Kilo-ohm(12V/1mA หรือ –7V/0.8 mA) จากเหตุผลนี้การส่งข้อมูลแบบ 485 จะใช้มาตรฐาน Load ที่ 12 kilo-ohm เนื่องจากที่ค่ากระแสขาออกของตัวขับสัญญาณ จะขึ้นอยู่กับโหลด ดังนั้นในการออกแบบที่ต้องการต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณเข้ากับบัสของระบบเป็นจำนวนหลายตัว จึงต้องการค่าความต้านทานของโหลดให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อสามารถต่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณเข้ากับบัสของระบบจำนวนมากขึ้น ตัวอย่างเช่นถ้านำอุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่มีค่า Unit Load เท่ากับ 0.5 U.L. มาต่อเข้ากับระบบ จะสามารถนำมาต่อได้ทั้งหมดเป็นจำนวน 64 ตัวใน 1 บัสเลยทีเดียว



รูปที่ 2.33 แสดงการทดสอบ input ของวงจรรับสัญญาณ และการ plot กราฟ I/V

2.5.4 Cable Termination

การใช้ Matching Impedance หรือที่เรียกว่า Cable Termination จะเป็นจุดสำคัญในการลดปัญหาการสะท้อนของสัญญาณในสายส่งสัญญาณ โดยจะเป็นการนำเอา impedance ไปต่อเข้าที่ปลายของสายส่ง ซึ่งในการส่งแบบมาตรฐาน 485 นี้จะต้องทำการต่อ impedance เข้าที่ปลายทั้ง 2 ข้างของสายส่ง ซึ่งจะต่างจากการส่งข้อมูลมาตรฐาน 422 ที่จะต่อ impedance ที่ปลายก่อนเข้าตัวรับสัญญาณ (receiver) เท่านั้น ซึ่งการใส่ termination เข้าไปในวงจรจะเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการส่งข้อมูลให้มีมากขึ้น โดยที่ cable termination จะใช้กับการส่งข้อมูลที่อัตราเร็วสูงกว่า 200 kbps

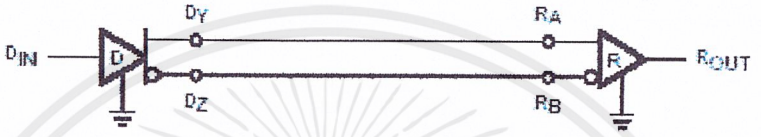
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cable termination นั้นจะมีรูปแบบต่ออยู่หลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ ราคา ค่าใช้จ่าย เป็นต้น

สำหรับค่าตัวต้านทานหรือตัวเก็บประจุจะมีค่าต่างกันไปขึ้นอยู่กับการต่อ termination ตัวอย่างเช่นค่า terminal resistor(Z_T) จะต้องไม่เกินค่า impedance ของสาย (Z_O) และจะมีค่าตั้งแต่ 90 ohm ถึง 120 ohm

การส่งข้อมูลแบบไม่มี Termination

จากรูปจะแสดงระบบที่ไม่มีการต่อ termination



รูปที่ 2.34 แสดงวงจรการส่งข้อมูลแบบไม่มี termination

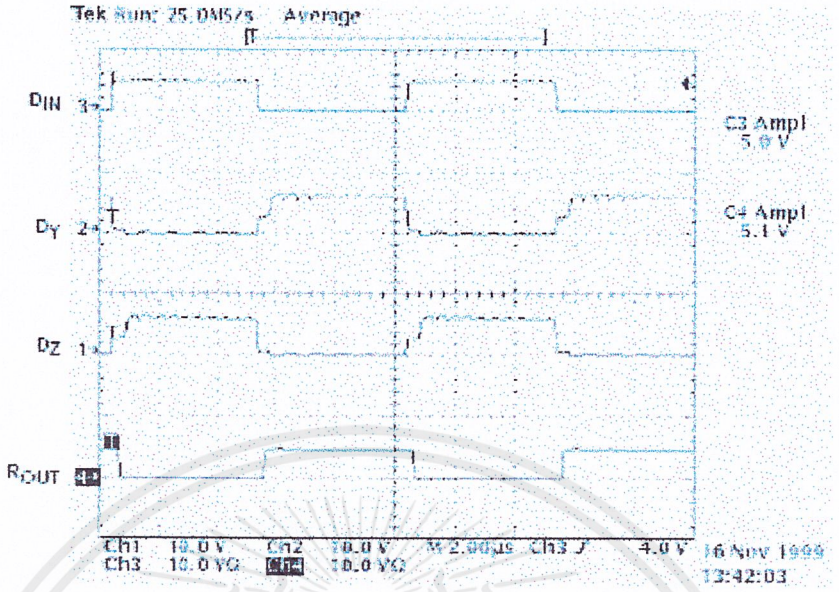
ข้อดี

1. ตัวขับสัญญาณจะใช้กระแสในการผลิตสัญญาณออกมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
2. พลังงานสูญเสียในการทำให้ตัวขับสัญญาณทำงานจะมีค่าน้อย
3. มั่นใจได้ว่าที่ขาออกของตัวรับสัญญาณจะมีค่าที่ถูกต้องในกรณีที่สายส่งปิดวงจรอยู่

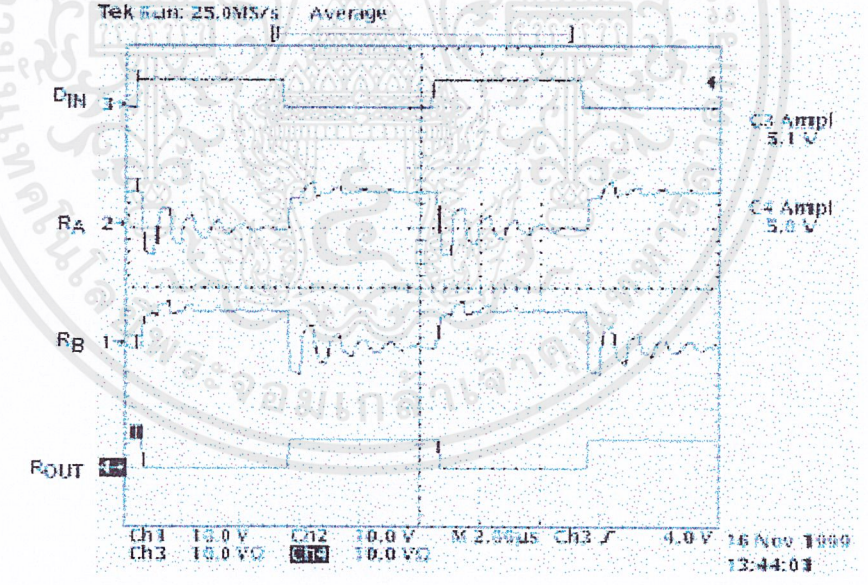
ข้อเสีย

1. อาจเกิดการสะท้อนของสัญญาณ ในสายส่ง ที่การส่งสัญญาณที่อัตราเร็วสูงๆ (การส่งข้อมูลแบบไม่มี termination จะใช้ที่อัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่า 200 kbps และการส่งข้อมูลระยะใกล้ๆ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 แสดงรูปสัญญาณของ output ของตัวขับสัญญาณ



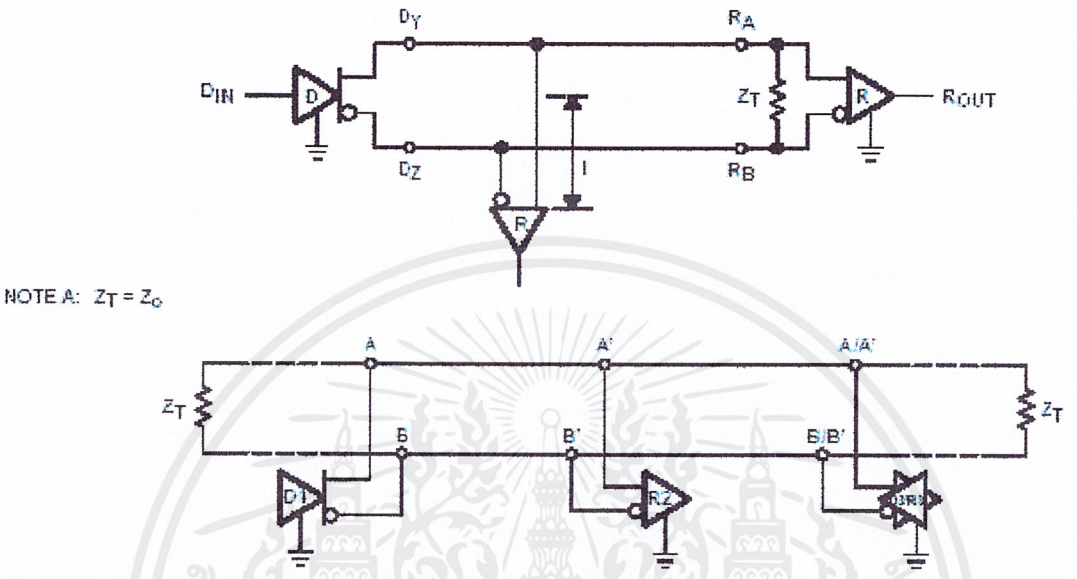
รูปที่ 2.36 แสดงรูปสัญญาณของ input ของตัวรับสัญญาณ

การส่งข้อมูลแบบ Parallel Termination

การต่อ termination แบบ parallel termination จะทำโดยการนำตัวต้านทาน (r) ไปต่อที่ระหว่าง input ของตัวรับสัญญาณ โดยที่ถ้าเป็นการส่งข้อมูลแบบ 485 จะต้องต่อตัวต้านทานทั้ง 2 ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายส่ง แต่ถ้าเป็นการส่งสัญญาณมาตรฐาน 422 จะต้องการตัวต้านทานเพียงตัวเดียวที่ด้านตัวรับสัญญาณเท่านั้น การต่อ termination แบบนี้จะช่วยกำจัดการสะท้อนของสัญญาณในสายส่งได้



รูปที่ 2.37 แสดงวงจรที่มีการต่อ terminal แบบ parallel termination

ข้อดี

1.) ช่วยกำจัดการสะท้อนของสัญญาณที่การส่งข้อมูลระยะทางไกลๆ และการส่งข้อมูลที่อัตราเร็วสูงๆได้

2.) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งแบบ multidrop ได้

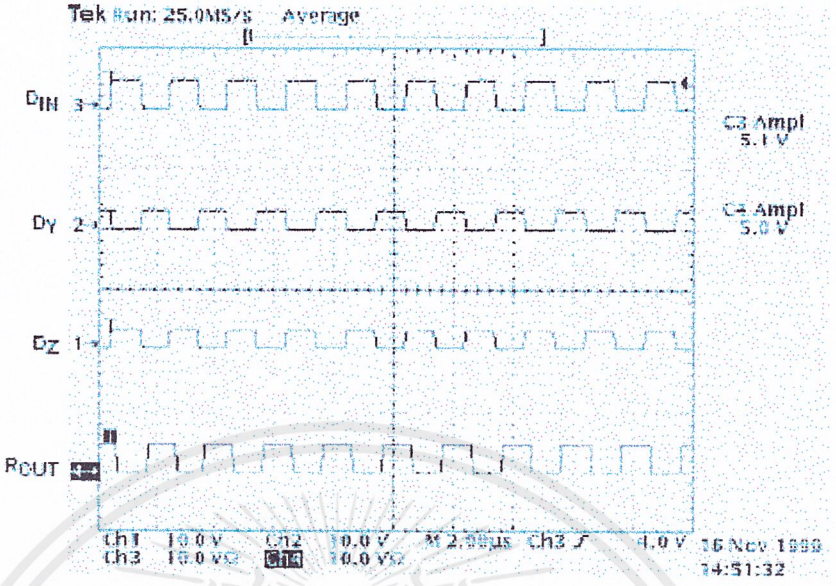
ข้อเสีย

1.) พลังงานสูญเสียในการทำให้ตัวขับสัญญาณทำงานจะมีค่ามาก(เมื่อเปรียบเทียบกับการส่งข้อมูลแบบไม่มี termination)

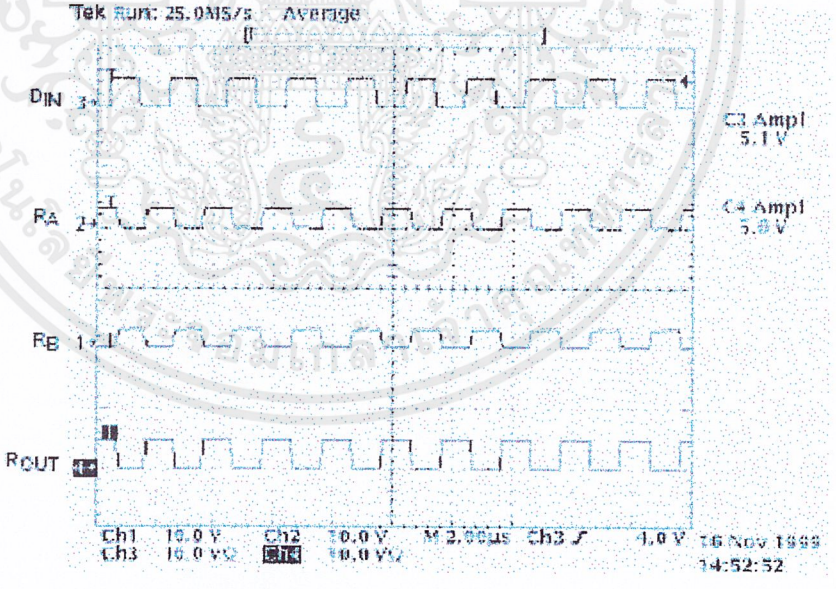
2.) สัญญาณที่ขาออกของตัวรับสัญญาณอาจมีค่าที่ผิดพลาดได้ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณเข้ามาหรือในสภาวะที่ impedance มีค่าสูงๆ (high impedance)

3.) ระยะที่ต่อจากสายส่งหลักที่ระหว่างทางไปยังตัวรับสัญญาณ ถ้ามีระยะทางไกลอาจจะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.38 แสดงรูปสัญญาณของ output ของตัวขับสัญญาณที่มีการต่อ termination แบบ parallel termination



รูปที่ 2.39 แสดงรูปสัญญาณ input ของ ตัวรับสัญญาณที่มีการต่อ termination แบบ parallel termination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบการต่อ termination และการไม่ต่อ termination

รูปแบบการต่อ	Power Dissipation	Open-line fail-safe	Short-line fail-safe	Speed	Signal Integrity
No termination	Low	Supported if it's available on receiver	Not supported	Low	Poor at high speed
Cable termination	Medium	Not supported	Not supported	High	Excellent

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบการต่อ termination แบบ parallel termination และการไม่ต่อ termination

สำหรับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลแบบ 485 จะมีหลายตัว โดยที่ในการออกแบบวงจรในโครงงานจะใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย และราคาไม่สูงเกินไปนัก โดยจะใช้ IC เบอร์ SN75173 และ SN75174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

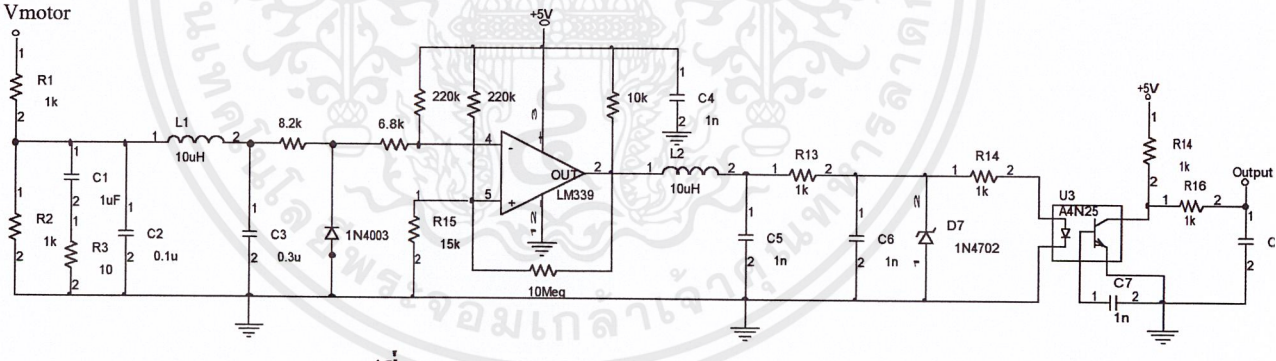
บทที่ 3
เงื่อนไขและการออกแบบวงจรเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนรับแรงดันจากอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีลักษณะเป็น PWM โดยเงื่อนไขของการทำงานในส่วนของวงจรที่สร้างขึ้นต้องสามารถหาความถี่หลักมูลที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้แก่มอเตอร์ โดยลักษณะสัญญาณที่ต้องการจากวงจรส่วนก่อนเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องมีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูลและสัญญาณมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

เครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนั้นมีเงื่อนไขในการสร้างคือ ต้องสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่เท่าใดก็ได้ แต่ควรจะมีความถี่ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อความละเอียดในการวัดที่มากที่สุด เพื่อนำสัญญาณนี้ไปประมวลผลหาความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ทั้งนี้สามารถแยกอธิบายเงื่อนไขย่อยและการออกแบบในแต่ละส่วนได้ดังนี้

3.1 Zero Crossing Detector



รูปที่ 3.1 วงจร Zero Crossing Detector

เงื่อนไขการออกแบบ

ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนมีความสัมพันธ์กับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์คือ

$$Ns = \frac{120f}{p} \tag{3.1}$$

ดังนั้นการวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ สามารถทำได้โดยการวัดความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ แต่แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่มอเตอร์มีลักษณะเป็น PWM ที่ประกอบด้วยความถี่ FundamentalและHarmonics ต่างๆ ซึ่งมีแอมปลิจูดประมาณ 310 โวลต์ จึงทำการลดระดับแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดันด้วยวงจรแบ่งแรงดันและผ่านวงจรกรองความถี่สูงเพื่อลดผลของ Harmonics ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจะเป็นรูปคลื่นไซน์ จากนั้นจึงผ่านวงจร Zero Crossing Detector ซึ่งใช้ Comparator เบอร์ LM339 เนื่องจากแรงดัน Input offset ต่ำ จะได้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่เท่ากับสัญญาณด้านเข้าของ Zero Crossing Detector แต่เนื่องจากผลของ EMI (Electromagnetic interference) ที่เกิดจากอุปกรณ์จึงต้องมีการแยกกราวน์ของสัญญาณที่ออกมา Zero Crossing Detector เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน

การออกแบบวงจร

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วเราจะสามารถแบ่งวงจรออกเป็นส่วนย่อยๆได้ดังนี้คือ

3.1.1 Resistor Voltage Divider

ด้วยเหตุที่แรงดันที่รับมาจากมอเตอร์นั้นมีขนาดสูงเกินไป (310 V_{peak}) ไม่สามารถนำมาใช้ในการประมวลผลได้ เราจึงต้องทำการลดระดับแรงดันนี้ลงมาเพื่อให้มีขนาดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการประมวลผล (4-10 V_{peak}) โดยมีขอบเขต 2 ด้าน คือแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของอินเวอร์เตอร์ คือ 310 และ 125 V_{peak} ตามลำดับ โดยตัวต้านที่เราเลือกมาใช้นี้จะใช้ตัวต้านทานวัตต์สูงแต่ค่าความต้านทานต้องไม่สูงมากนักเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสให้กับวงจรส่วนต่อไปได้อย่างเพียงพอ โดยค่าของตัวต้านทานทั้ง 2 ตัวนี้คำนวณได้จาก

$$\frac{310}{R_1 + R_2} \geq MinimumBiasCurrent \tag{3.2}$$

$$\frac{125 \times R_2}{R_1 + R_2} \geq 4 \qquad V_{peak} \tag{3.3}$$

$$\frac{310 \times R_2}{R_1 + R_2} \leq 10 \qquad V_{peak} \tag{3.4}$$

3.1.2 Low Pass Filter

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการลดระดับแรงดันนั้นยังคงเป็นสัญญาณ PWM ซึ่งมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงปะปนอยู่ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงเหล่านี้ออกไป โดยใช้วงจร Low Pass Filter ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ RC-Low Pass Filter, RL-Low Pass Filter และ LC-Low Pass Filter โดยในโครงงานนี้เลือกใช้วงจร LC- Low Pass Filter ซึ่งมีข้อดีคือ มีการลดทอนกำลังงานของสัญญาณน้อยกว่าอีก 2 แบบที่เหลือ

โดยที่การหาค่าความถี่คัทออฟของวงจร LC-Low Pass Filter สามารถหาได้จากความถี่ค่าที่ทำให้ ค่า อิมพิแดนซ์ของขดลวดเหนี่ยวนำ เท่ากับอิมพิแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_L = X_C \tag{3.5}$$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \tag{3.6}$$

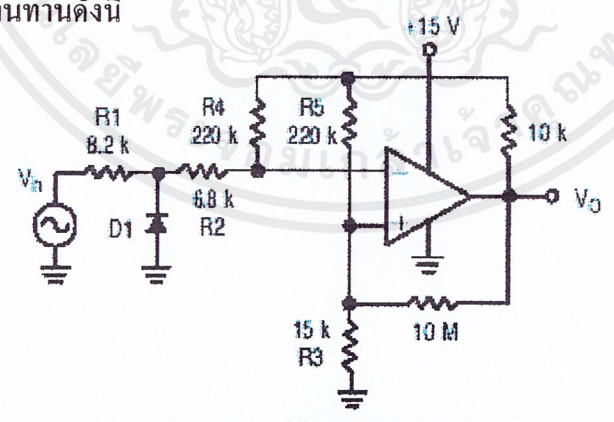
$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{Hz} \tag{3.7}$$

โดย : ความถี่คัทออฟ (เฮิรตซ์)
: ค่าอินดักแตนซ์ (เฮนรี่)
: ค่าคาปาซิแตนซ์ (ฟารัด)

3.1.3 Comparator Amplifier

สัญญาณผ่านการกรองแล้วนั้นจะมีรูปคลื่นเกือบเป็นไซน์ แต่สัญญาณที่นำไปประมวลผลได้นั้นจะต้องมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณไซน์ เราจึงจำเป็นต้องนำสัญญาณที่ได้มานี้ไป ผ่านวงจร Comparator Amplifier เพื่อทำหน้าที่ดังกล่าวโดยเราเลือกใช้ไอซีเบอร์ LM339 ซึ่งมีข้อดีคือ มีกำลังขยายสูง(High Gain), มีช่วงการทำงานกว้าง(Wide Band Width Characteristics), มีค่า Offset อินพุตต่ำทั้งกระแสและแรงดัน, สามารถทำงานร่วมกับไอซีทั้งตระกูล TTL และ CMOS ได้ดี

จากวงจรข้างต้นไดโอดที่ต่อคร่อมขา Inverting Input นั้นทำหน้าที่ป้องกันแรงดันลบที่จะเข้ามาซึ่งอาจทำให้การทำงานผิดพลาด รวมไปถึงอาจทำให้ไอซีเสียหายได้ ส่วนตัวต้านที่ต่ออยู่ที่ขา Noninverting Input ลงกราวด์นั้นทำหน้าที่เพื่อลดความทผิดพลาดที่เกิดจาก Zero Crossing โดยมีการออกแบบค่าความต้านทานดังนี้



D1 prevents input from going negative by more than 0.6 V.

$$R1 = R2 = R3$$

$$R3 \leq \frac{R5}{10} \text{ for small error in zero crossing}$$

รูปที่ 3.2 แสดงวงจร Comparator Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 Opto Isolated

เนื่องจากผลของสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่อาจจะยังหลงเหลืออยู่ซึ่งจะทำให้การ ทำงานของ CPU (Central Processing Unit) ผิดพลาดได้ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี ที่นิยมใช้คือ การใช้ Pulse Transformer และไอซี Opto Isolated ซึ่งเราจะเลือกใช้ไอซี Opto Isolated เนื่องจากมีขนาดเล็ก, ราคาถูก และเหมาะสมกับวงจรที่ไม่ต้องการกระแสมากนัก โดยเราจะใช้ Opto Isolated เบอร์ 4N25

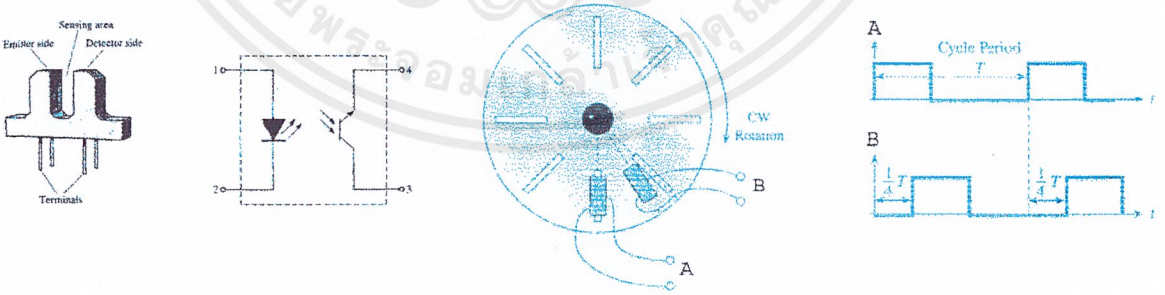
3.2 Speed Encoder

เงื่อนไขการออกแบบ

ในการที่เราจะวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้นั้นจะต้องทำการแปลงปริมาณทางกล ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าเสียก่อน ซึ่งก็มีอยู่ 2 ทางเลือกให้เราใช้งานก็คือใช้ Tacho Generator หรือ ใช้หลักการ Encoder ในโครงงานนี้เราจะเลือกใช้หลักการของ Encoder เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่าย, ราคาถูก และมีความน่าเชื่อถือในระดับที่น่าพอใจ โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของ แผ่น Encoder และ Optical Interrupted Switch เพื่อทำหน้าที่เป็น Transducer แปลงปริมาณทางกลเป็นปริมาณทางไฟฟ้า เพื่อนำไปประมวลผลคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อไป

การออกแบบวงจร

ในการออกแบบเครื่องมือวัดความเร็วรอบ(rotor speed)ของมอเตอร์ จะใช้หลักการของ encoder เข้ามาช่วยในการออกแบบ โดยที่จะทำแผ่น encoder มีจำนวนซี่ทั้งหมด 32 ซี่ และจะใช้ Optical interrupted switch เบอร์ H21B1 ซึ่งประกอบด้วย LED และ Phototransistor ดังรูป



รูปที่ 3.3 Optical interrupted switch และการวางตำแหน่งของ Optical interrupted switch

ซึ่งการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์จะทำโดยการนับรอบการหมุนของมอเตอร์ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยที่เมื่อนำจำนวนคลื่นสี่เหลี่ยมที่ออกจาก photo transistor ไปหารด้วยจำนวนซี่(หรือร่อง slot) ของ encoder จะได้เป็นค่าจำนวนรอบของมอเตอร์ที่หมุน และเมื่อนำค่าจำนวนรอบที่มอเตอร์หมุนที่คำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ไปหารด้วยช่วงคาบเวลาหนึ่งในหน่วยวินาที จะได้เป็นค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ในหน่วยรอบต่อนาที(round per second : rps) และเมื่อนำค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ในหน่วยรอบต่อวินาทีไปหารด้วย 60 จะได้เป็นค่าความเร็วรอบในหน่วย รอบต่อนาที(round per minute : rpm) โดยมีสูตรการทำงานดังนี้

$$\text{ความเร็วรอบมอเตอร์} = \frac{60 \times N}{32 \times T} \quad \text{rpm.} \tag{3.8}$$

โดยที่ N : จำนวนรูปคลื่น (ลูก)

T : ค่าเวลาที่เปิดรับสัญญาณ (วินาที)

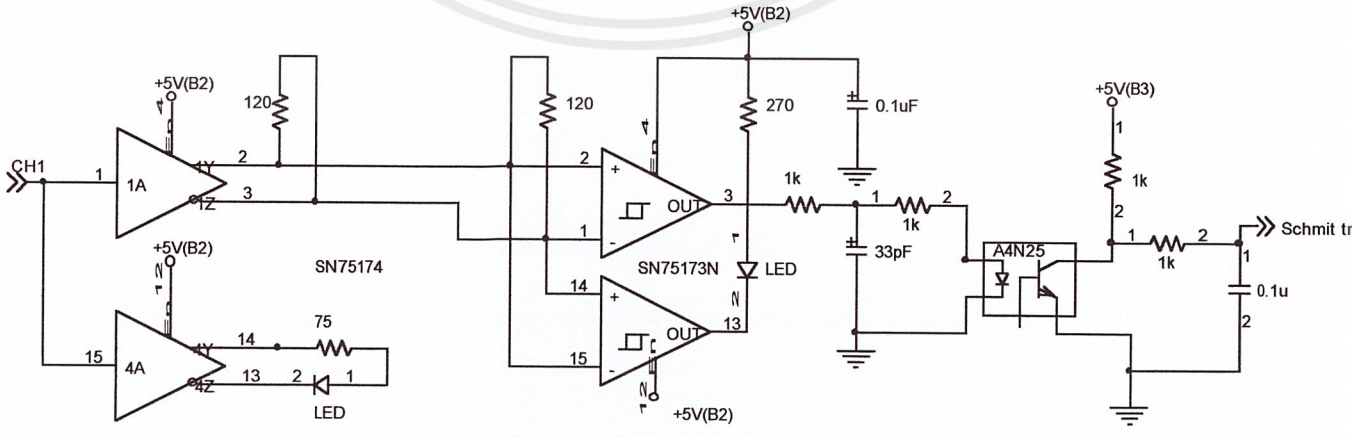
3.3 RS-485 Serial Data Transmission

เงื่อนไขการออกแบบ

ในการรับส่งข้อมูลแบบ Voltage Signal จะมีการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากค่า อิมพิแดนซ์ของสายส่งซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดของการส่งข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทางได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจร Driver และ Receiver มาช่วยในการรับ และ ส่งข้อมูล เพื่อแก้ปัญหาตรงจุดนี้ โดยมาตรฐานในการส่งข้อมูลที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ มาตรฐาน RS-232 และ RS-485

การออกแบบวงจร

เนื่องจากการส่งข้อมูลแบบ RS-485 มีข้อดีกว่าการส่งข้อมูลแบบ RS-232 ซึ่งตาม Data sheet จะบอกถึง Driver และ Receiver ที่เข้ากันได้ และสามารถหาซื้อได้ในประเทศไทยคือ SN75174 และ SN75173N ทั้งนี้การต่อวงจรจะใช้ Parallel Termination เพื่อลดผลการสะท้อนของสัญญาณ โดยที่ LED ของทั้ง Driver และ Receiver จะเป็นตัวบอกสถานะการส่งและการรับข้อมูลซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา



รูปที่ 3.4 วงจรการส่งข้อมูลแบบ RS-485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

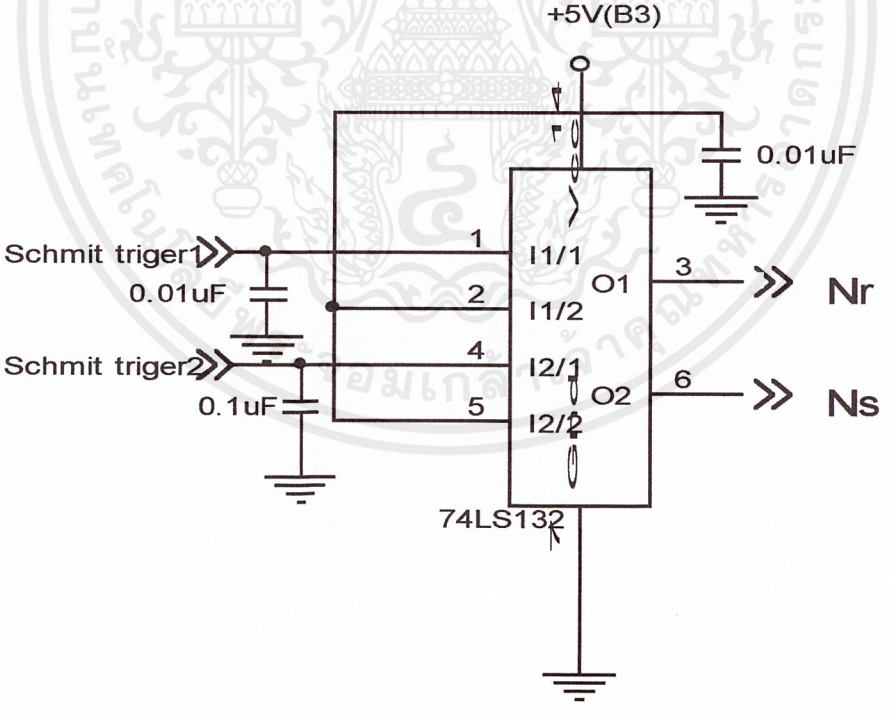
3.4 วงจร Schmitt Trigger

เงื่อนไขการออกแบบ

เนื่องจากสัญญาณที่รับมาจากวงจร Receiver นั้นยังมีความคมของสัญญาณยังไม่เพียงพอและมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงขี่มากับสัญญาณที่เราต้องการ ซึ่งถ้าเราเอาสัญญาณนี้ไปประมวลผลก็จะทำให้การคำนวณและการแสดงผลผิดพลาด ดังนั้นเราจึงใช้วงจร ที่ช่วยทำให้สัญญาณนั้นคมขึ้นและลดสัญญาณรบกวนความที่สูงที่ขี่มากับสัญญาณที่เราต้องการ

การออกแบบวงจร

จากเงื่อนไขข้างต้นวงจรที่เหมาะสมในการทำหน้าที่นี้ก็คือวงจร Schmitt Trigger โดย เลือกใช้ไอซีเบอร์ 74LS132 ซึ่งเป็น Schmitt Trigger แบบ Quad 2-Input Schmitt Trigger Nand Gate นำมาต่อร่วมกับ Filter Capacitor เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่สูง ที่ขา input ทั้ง2 ขา โดยขนาดของ Filter Capacitor แปรผกผันกับความถี่ของสัญญาณ (ใช้คุณสมบัติการเป็น High Pass Component ของ คาปาซิเตอร์) ซึ่งเมื่อผ่านวงจรนี้แล้ว จะทำให้รูปคลื่นที่จะส่งเข้า AT89C52 นั้นมีความคมและมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงมีค่าน้อยจนไม่สามารถรบกวนการทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรการต่อ Schmitt Trigger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ส่วนประมวลผล MCS51 และส่วนแสดงผล LCD

เงื่อนไขการออกแบบ

เนื่องจากสัญญาณที่จะใช้ในการประมวลผลมีดังนี้คือ สัญญาณจาก Speed Encoder ซึ่งใช้ในการคำนวณความเร็วรอบ สัญญาณจาก Zero Crossing Detector ซึ่งใช้ในการวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน อีกทั้งยังต้องนำไปแสดงผลให้สามารถอ่านค่าได้ทั้ง ความเร็วรอบของมอเตอร์, ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน, ค่าสลิป และเวลาที่ใช้ในการวัดแต่ละครั้ง ซึ่งสิ่งที่จะทำหน้าที่นี้ได้อย่างครบถ้วนดังข้างต้นคือการใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ร่วมกับ อุปกรณ์แสดงผล เช่น LED 7-Segment และ LCD Module

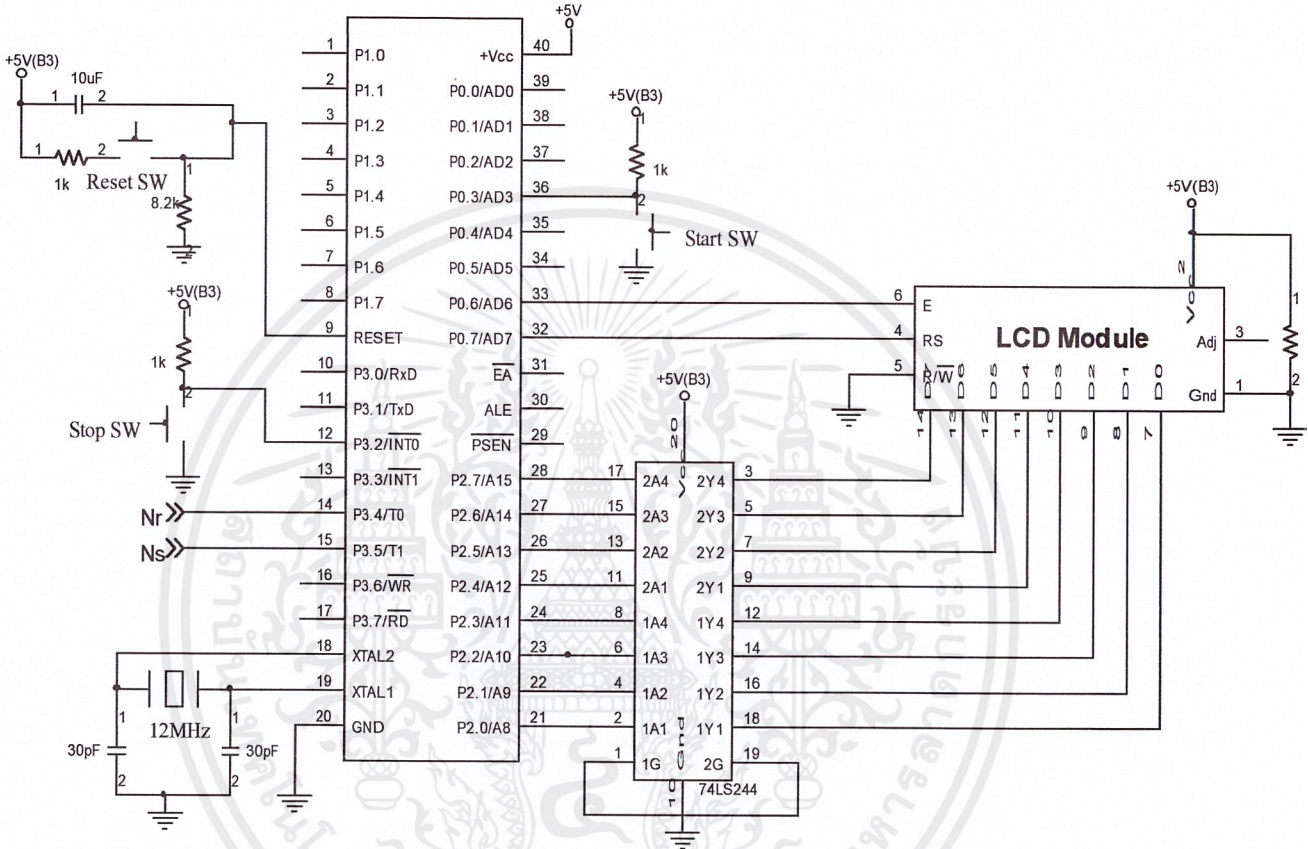
หลักการออกแบบวงจร

- เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C52 เป็นตัวประมวลผลกลาง เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไป, มีราคาไม่แพงมากนัก และมีสมรรถนะเพียงพอที่จะใช้คำนวณค่าความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน และ ควบคุมการแสดงผลของ LCD Module ได้ดี
- เลือกใช้ LCD Module ขนาด 16×2 แบบไม่มี Back-Light ซึ่งมีราคาถูกกว่าแบบมี Back-Light ควบคุมได้ง่ายกว่า LED 7-Segment และมีจำนวนตัวอักษรเพียงพอที่ใช้ในการแสดงผล
- ใช้สัญญาณนาฬิกา 12 MHz. เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเวลาต่างๆ โดยต่อคริสตอลที่ขา XTAL1และXTAL2 และต่อตัวเก็บประจุที่ขาทั้ง 2 ลงกราวด์ เพื่อลดผลของ EMI
- การนับพัลส์เพื่อนำมาคำนวณ ความเร็วรอบและความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะใช้ Timer0 (P3.4) นับจำนวนพัลส์ของความเร็วรอบ และ Timer1 (P3.5) นับจำนวนพัลส์ของคามเร็วสนามแม่เหล็กหมุน กำหนดให้ทำงานเป็นเคาต์เตอร์อยู่ในโหมด1(เคาต์เตอร์ขนาด 16 บิต)
- เพื่อคำนวณเวลารวมของการทำงานทั้งหมด เลือกใช้ Timer2 (P1.)โดยกำหนดให้ทำงานเป็นไทม์เมอร์อยู่ในโหมด 16 บิตแบบตั้งค่าการนับอัตโนมัติหรือออโต้รีโหลด
- P2.0 ถึง P2.7 ใช้ในการส่งข้อมูลคำสั่งหรือข้อมูลแสดงผลไป LCD ซึ่ง P0.7 จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังขา RS (Register selector) ของ LCD เพื่อเลือกรูปแบบของการส่ง โดยมี P0.6 เป็นตัวส่งสัญญาณอีนาเบิลไปยังขา E ของLCD
- P0.5และ P3.2 ใช้รับสัญญาณการกดสวิตซ์ Start และ Stop โดยโปรแกรมจะคอยแสกนบิต P0.5 นี้ก่อนที่เข้าสู่ส่วนของโปรแกรมหลักเพื่อตรวจสอบการกดสวิตซ์ และ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรอสัญญาณอินเทอร์รัปท์จาก P3.2 เพื่อจบการทำงาน
- ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ต่อยู่ที่ LCD-Module นั้นทำหน้าที่เป็น ตัวปรับความเข้ม-อ่อนของตัวอักษรที่จะแสดงขึ้นบนหน้าจอ LCD-Module
- เนื่องจากความสามารถในการจ่ายกระแสของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C52 นั้นไม่สูงมากนักดังนั้นในพอร์ตที่เราใช้ขับ LCD Module นั้นจะต้องทำการต่อไอซีบัฟเฟอร์เพื่อช่วยจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้เราเลือกใช้ไอซีบัฟเฟอร์เบอร์ 74LS244 เพราะสามารถหาซื้อง่ายกว่า และ ราคาถูกกว่าเบอร์อื่นๆ ในตระกูลเดียวกัน

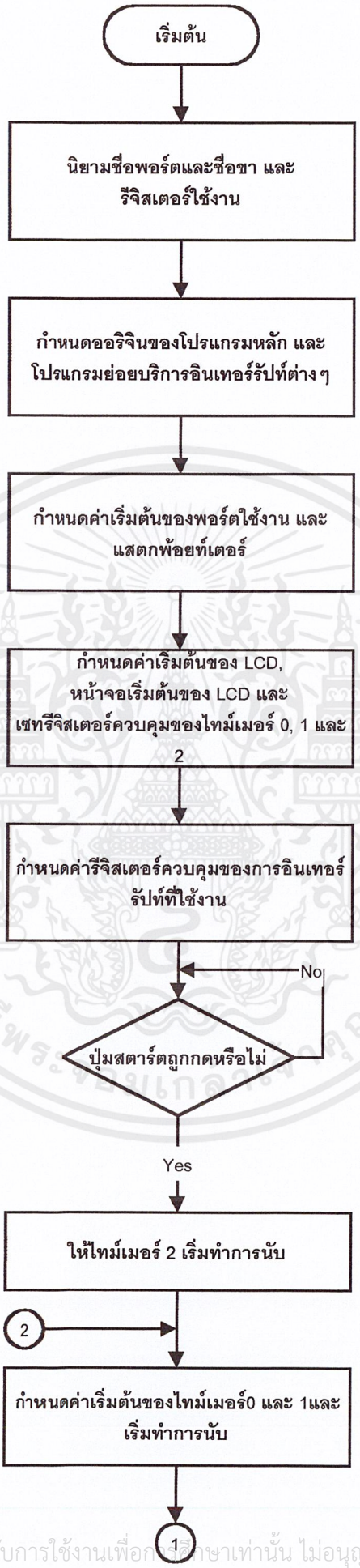
ซึ่งสามารถแสดงการต่อวงจรในส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์และ LCD module



รูปที่ 3.6 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และ LCD

และสามารถเขียน Flow chart การทำงานของโปรแกรมหลักได้ดังนี้

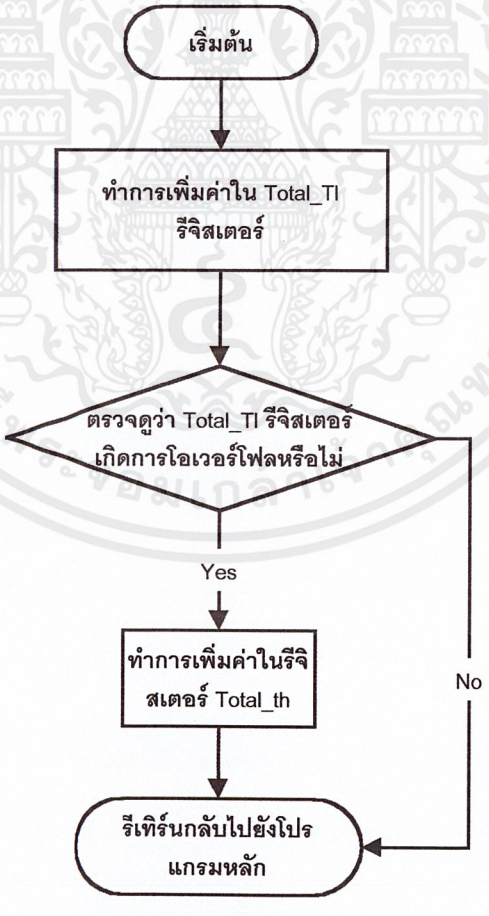
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

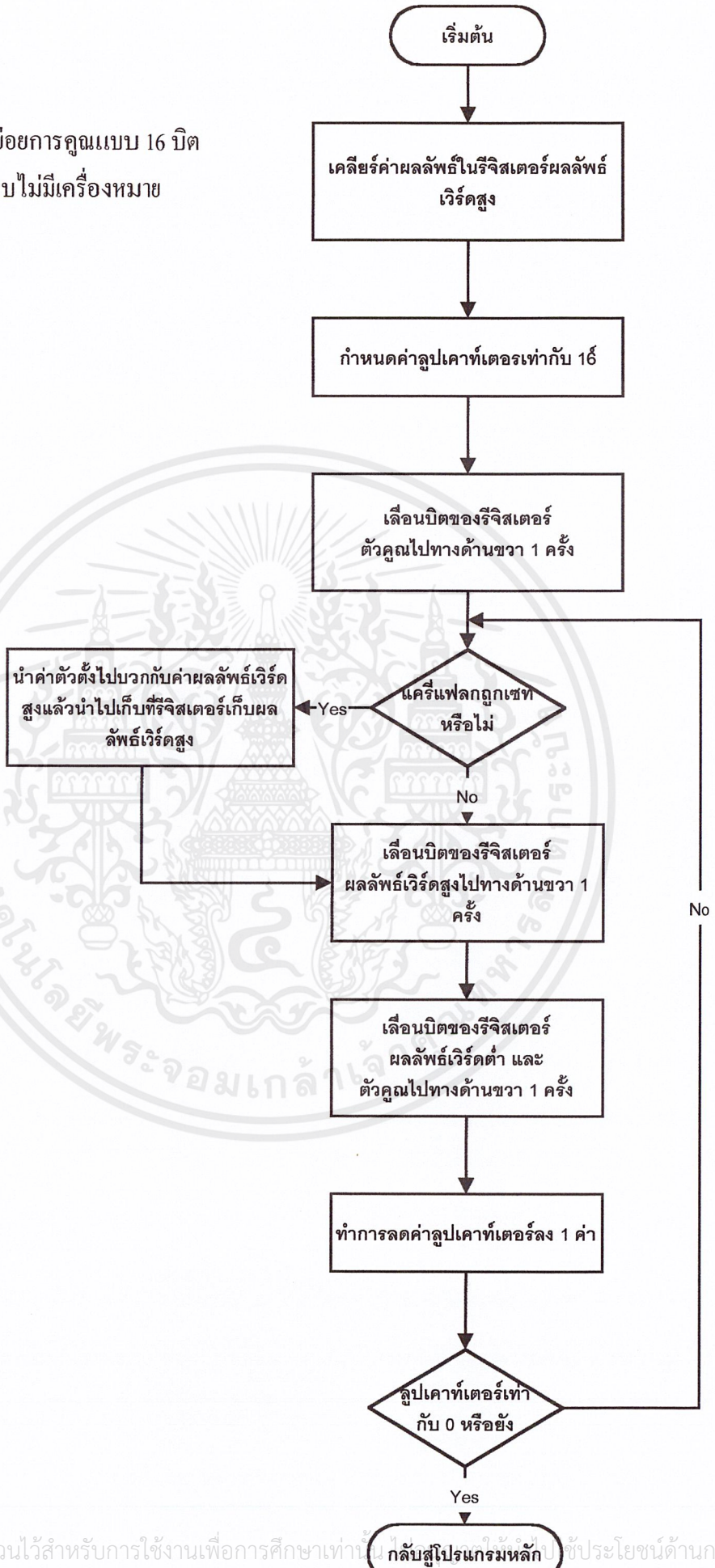
โฟลชาร์ทโปรแกรมบริการอินเทอร์รัปท์จากภายนอกที่ขา P3.2



โฟลชาร์ทโปรแกรมบริการอินเทอร์รัปท์เนื่องจากการโอเวอร์โฟลของไทม์เมอร์ 2

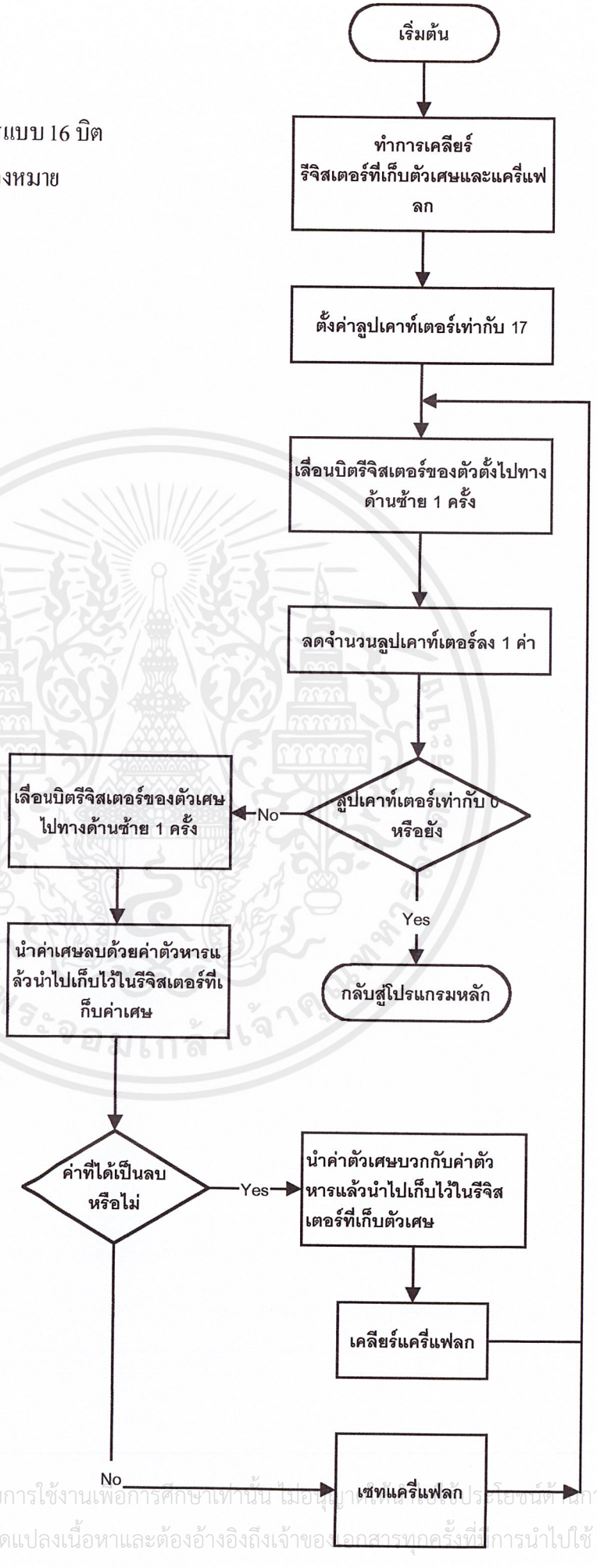
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟลชาร์ทโปรแกรมย่อยการคูณแบบ 16 บิต ได้ผลลัพธ์ 32 บิต แบบไม่มีเครื่องหมาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟลชาร์ทโปรแกรมย่อยการหารแบบ 16 บิต
ได้ผลลัพธ์ 16 บิต แบบไม่มีเครื่องหมาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ตารางการทดลอง

การทดลองที่	ชื่อเรื่อง	วัตถุประสงค์	อ้างอิง
1	การวัดค่าสัญญาณที่จุดต่างๆ ของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	เพื่อวัดและตรวจสอบสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่าเป็นไปตามทฤษฎีและตรงตามที่ออกแบบไว้หรือไม่	- รูปที่ 4.1-4.16
2	การทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	เพื่อทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่ามีค่าเบี่ยงเบนจาก Tacho Meter เท่าไร	- รูปที่ 4.17 – 4.21 - ตารางที่ 4.1-4.8
3	การทดลองการใช้งานPower Quality Analyzer (Fluke 43) ร่วมกับโปรแกรม Fluke Viewer	1.)เพื่อทำการศึกษาวิธีการทำงานของ Power Quality Analyzer (Fluke 43) ร่วมกับโปรแกรม Fluke Viewer 2.)เพื่อทำการหาข้อจำกัดของการทำงานร่วมกันระหว่าง Power Quality Analyzer (Fluke 43) ร่วมกับโปรแกรม Fluke Viewer	- รูปที่ 4.22 – 4.25 - ตารางที่ 4.9-4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	การหาคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถรางไฟฟ้า	1.)เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำรถรางไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ 2.)เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันซึ่งเกิดจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สภาวะต่างๆ	- รูปที่ 4.26 – 4.27 - ตารางที่ 4.12-4.15
5	การศึกษากำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า	1.)เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ 2.)เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันซึ่งเกิดจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สภาวะต่างๆ	- รูปที่ 4.28 – 4.29 - ตารางที่ 4.16-4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1

ชื่อเรื่อง การวัดค่าสัญญาณที่จุดต่างๆ ของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

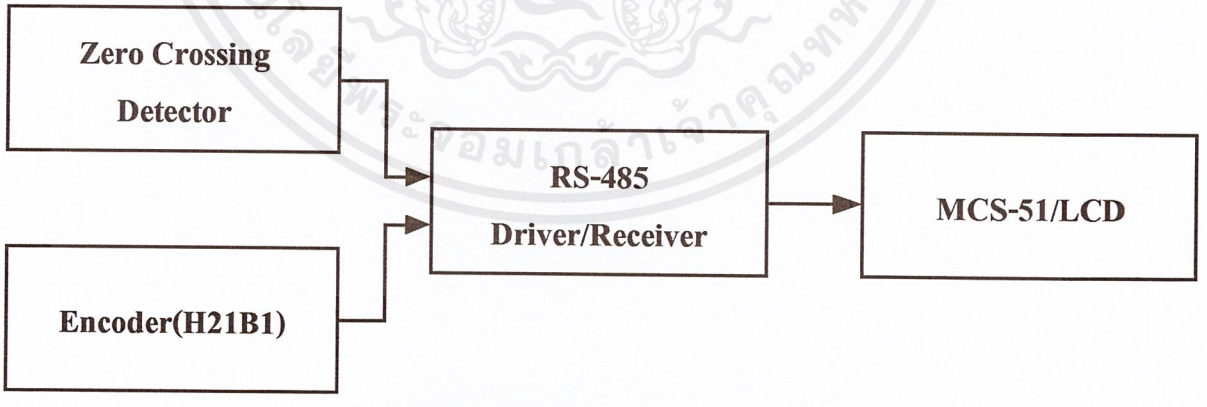
วัตถุประสงค์ เพื่อวัดและตรวจสอบสัญญาณที่จุดต่างๆ ของวงจรของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ว่าเป็นไปตามทฤษฎีและตรงตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

อุปกรณ์ที่ใช้

1. Fuji Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE ขนาด 1.5 kW
2. แหล่งจ่ายไฟคือ ไฟ 1 เฟส 220 V
3. รถรางไฟฟ้า (มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2 HP)
4. เครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
5. Oscilloscope รุ่น Infinium ของ HP
6. สายไฟ

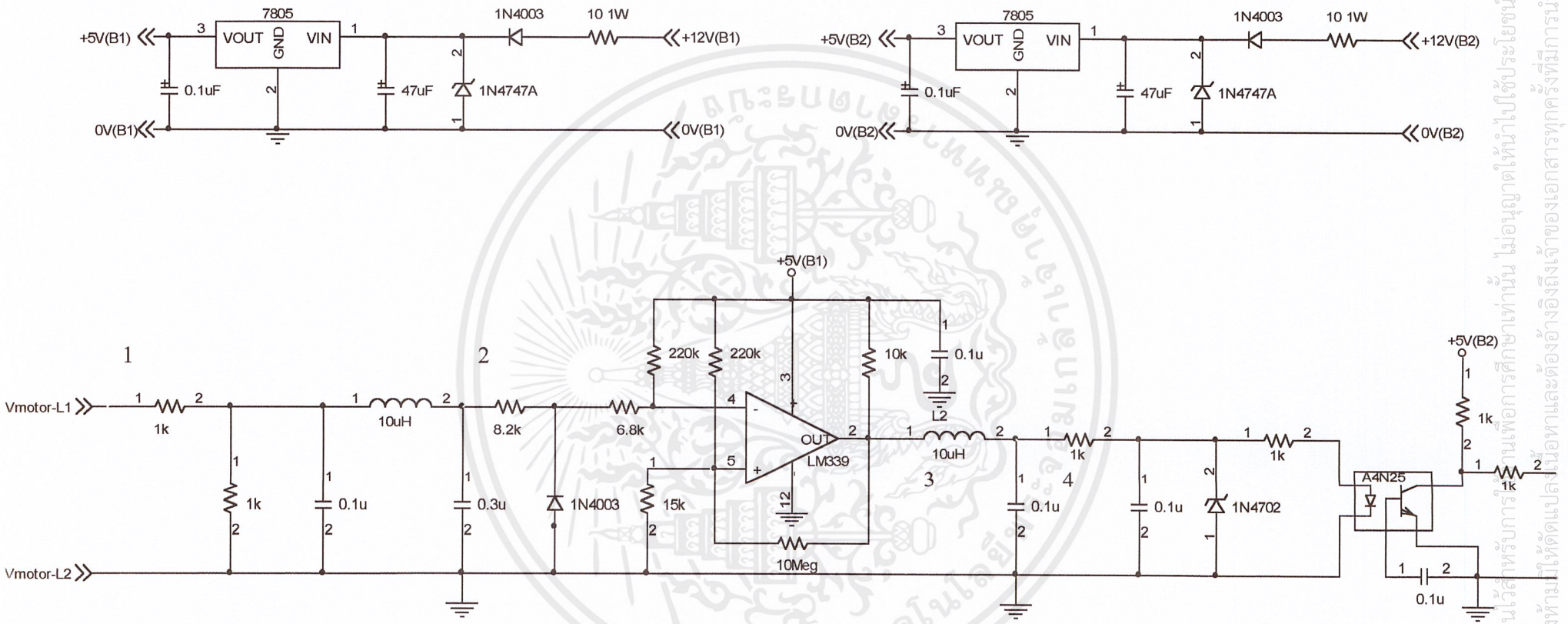
ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆ ตาม Block Diagram รูปที่ 4.1
2. ทำการแยกวัดค่าสัญญาณในแต่ละ Block โดยปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ที่ 50 Hz
3. ทำการวัดสัญญาณและเก็บค่าที่จุดต่างๆ ดังตำแหน่งในภาพที่แสดงไว้



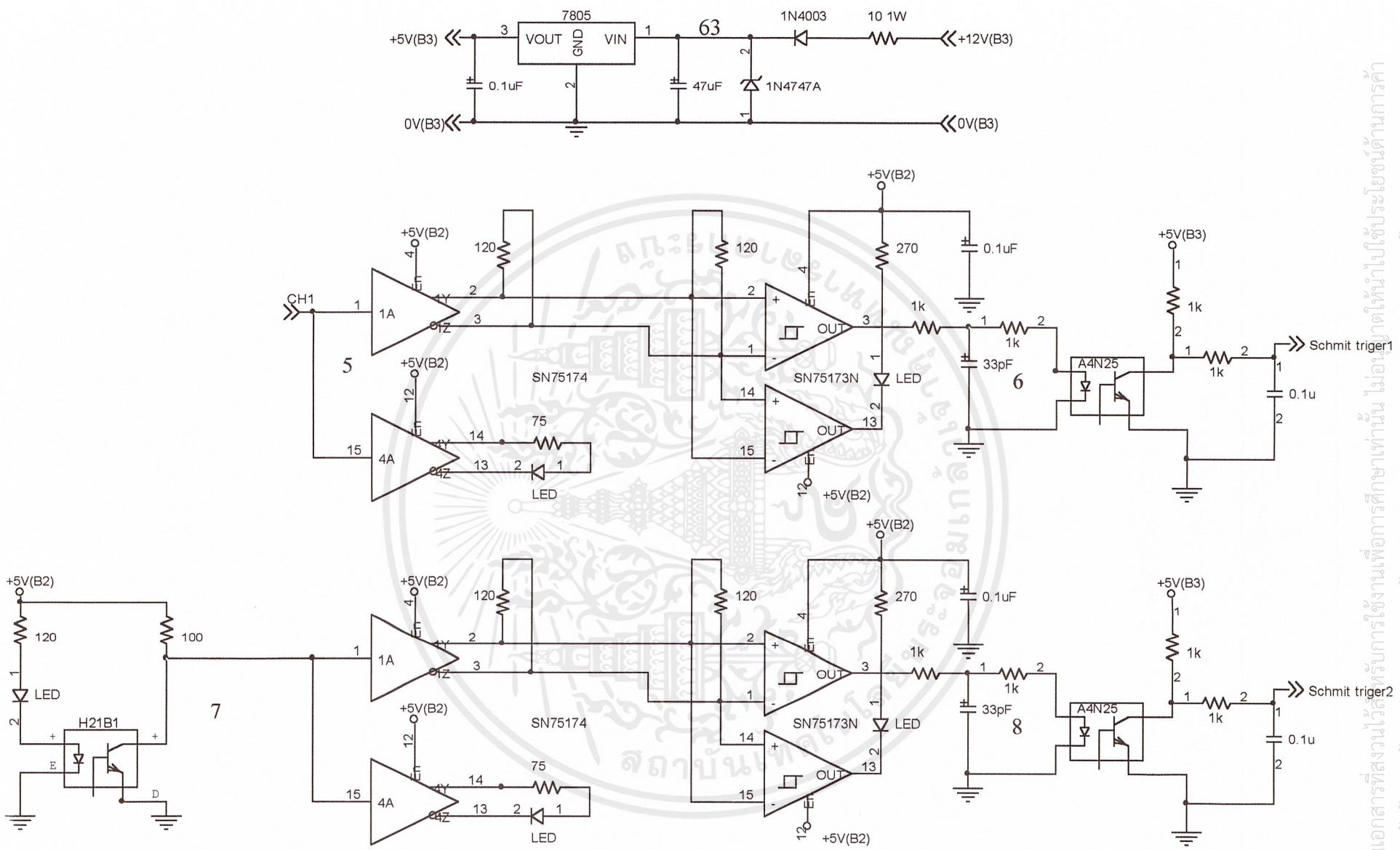
รูปที่ 4.1 Block Diagram แสดงเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



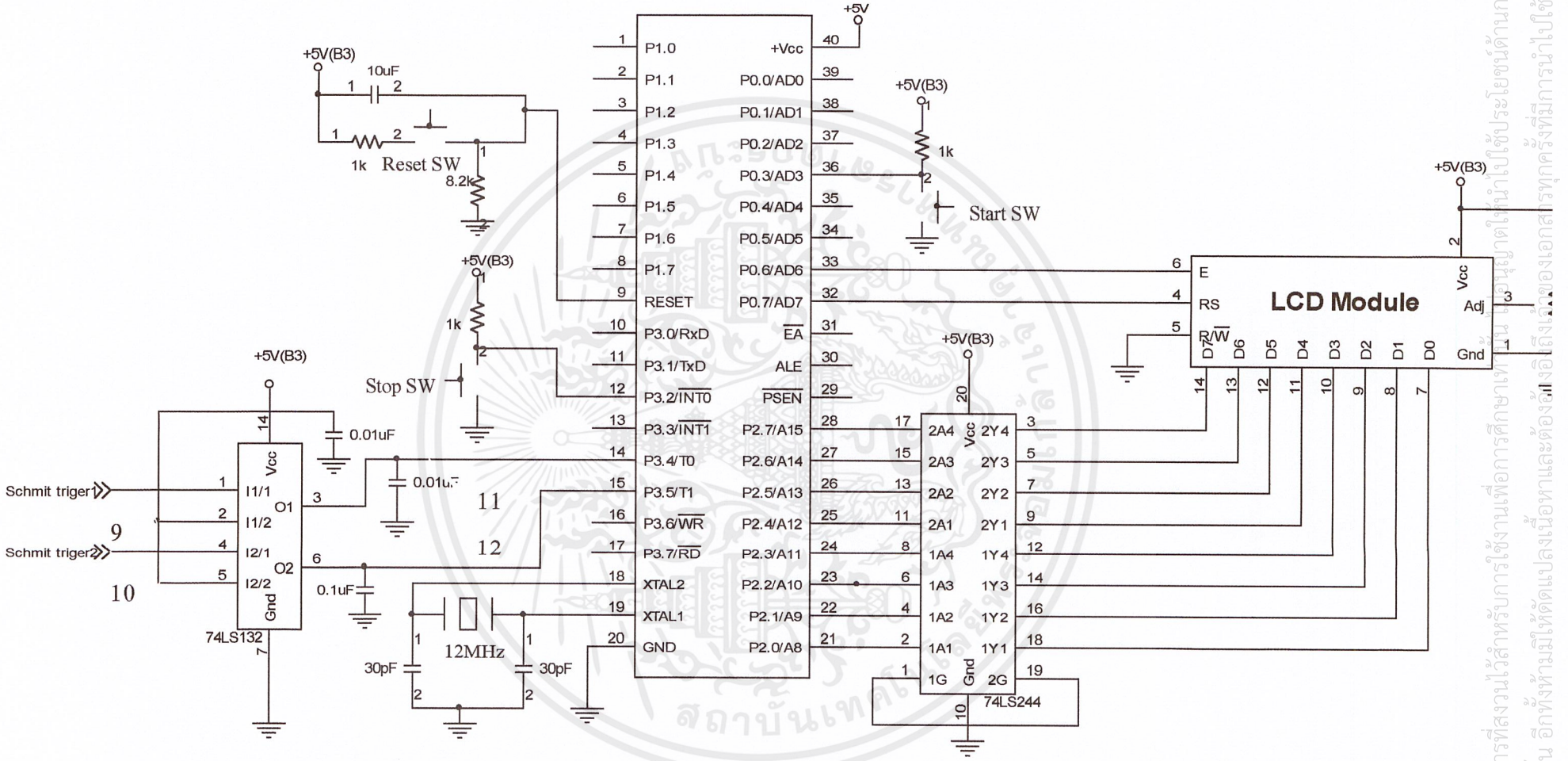
รูปที่ 4.2 ภาพแสดงจุดวัดค่าสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร Zero Crossing Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงจุดวัดค่าสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของวงจร Encoder และ RS-485 Transmission Data

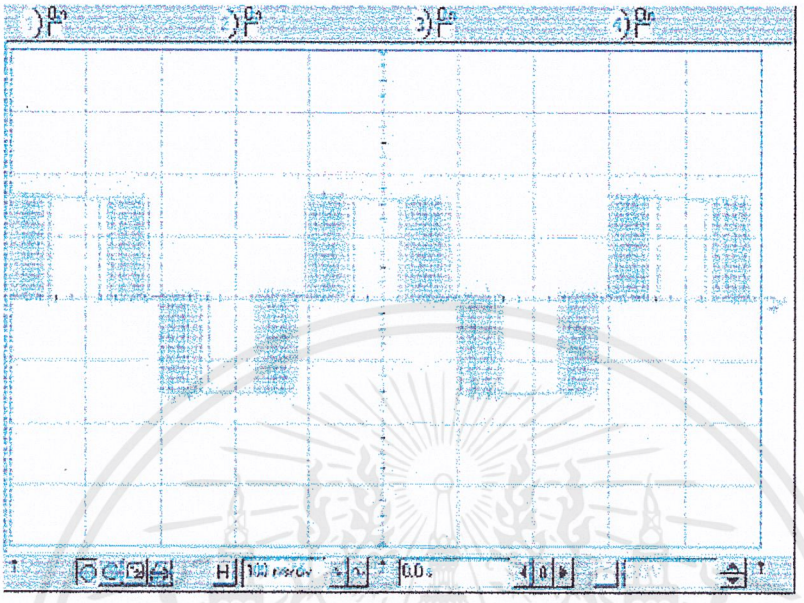
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



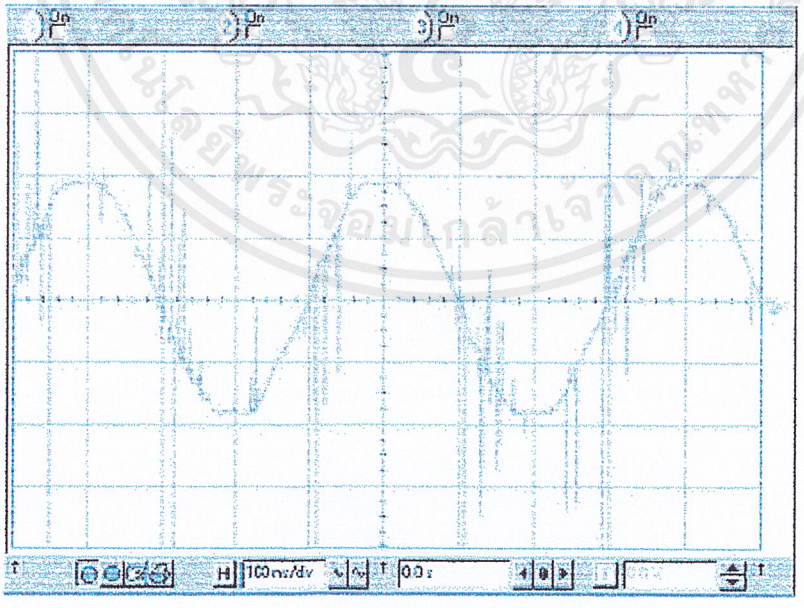
รูปที่ 4.4 ภาพแสดงจุดวัดค่าสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นสัญญาณข้อมูลของ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

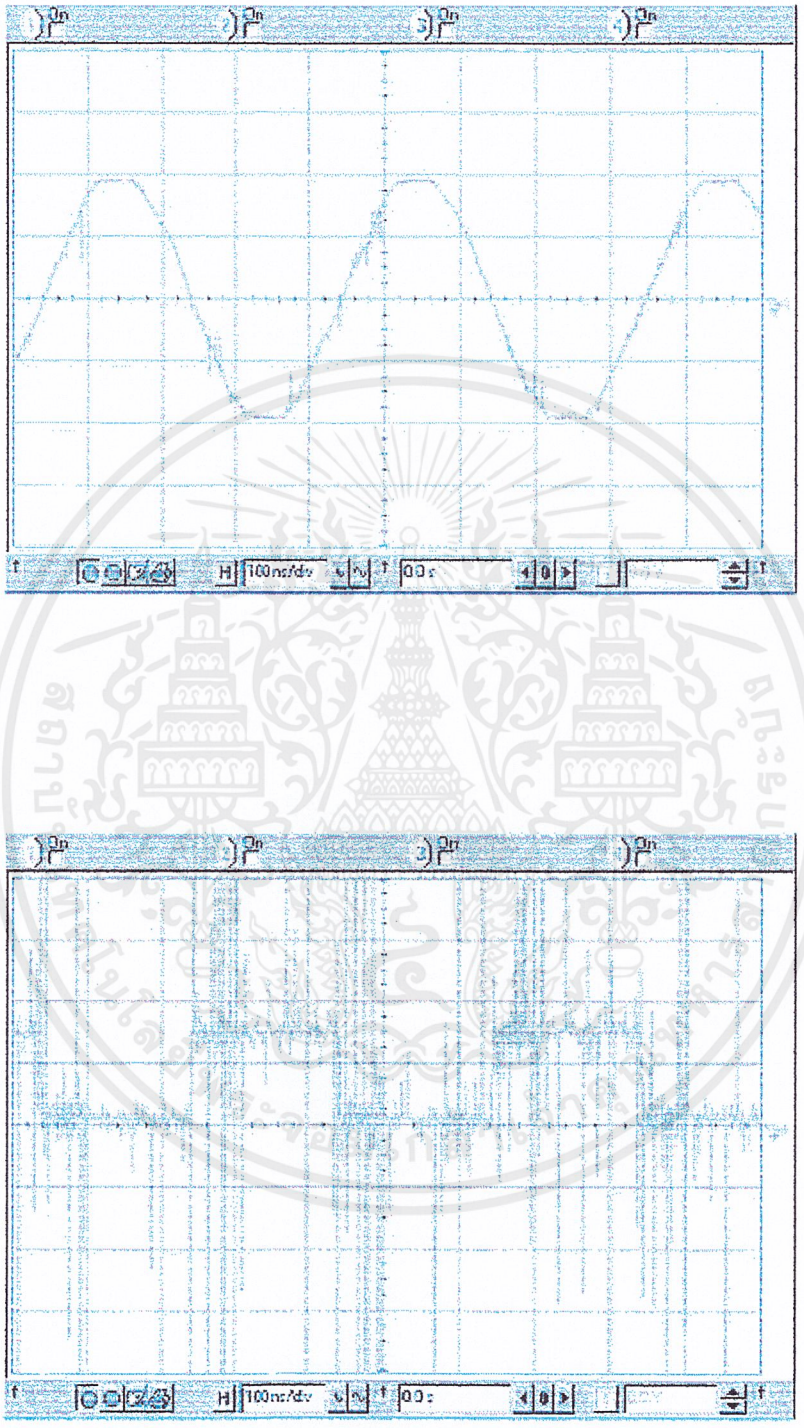


รูปที่ 4.5 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM(จุดที่1)



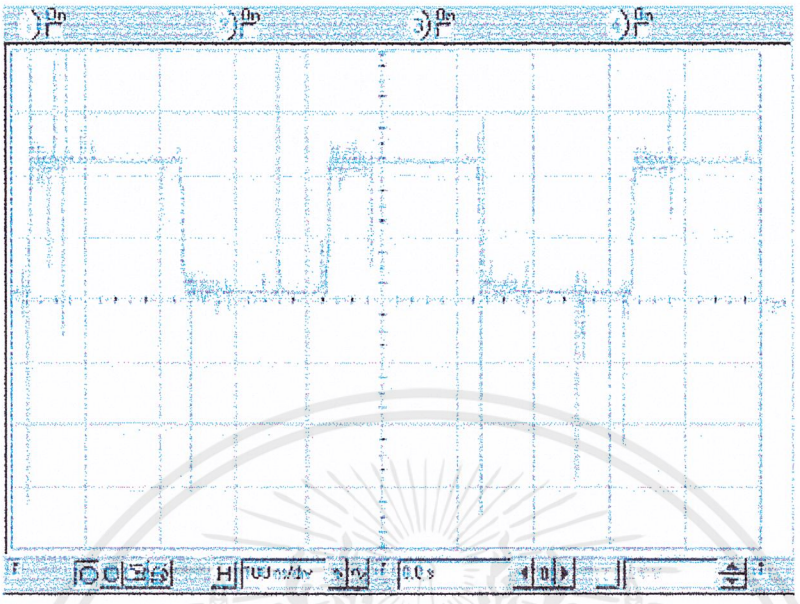
รูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณ PWM หลังผ่านการกรองฮาร์มอนิก(จุดที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



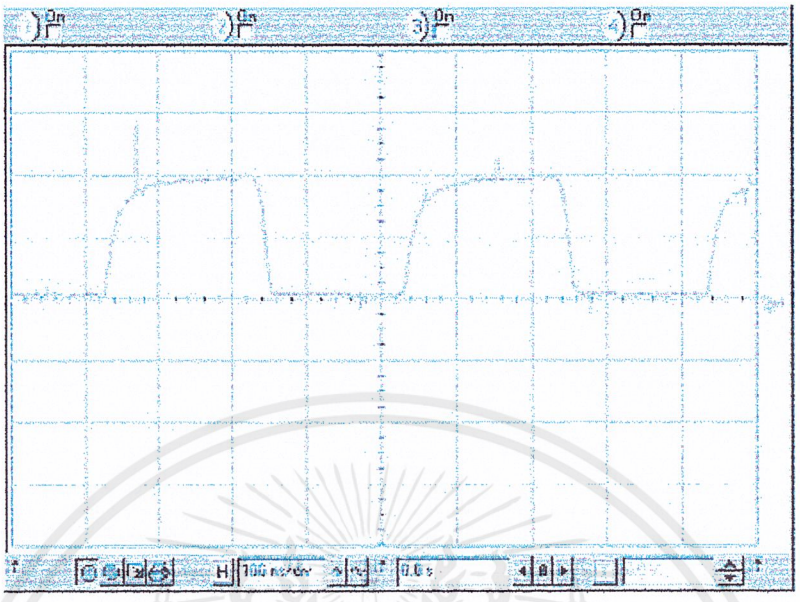
รูปที่ 4.7 แสดงรูปสัญญาณของรูปคลื่นไซน์ 50 HZ หลังผ่านวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

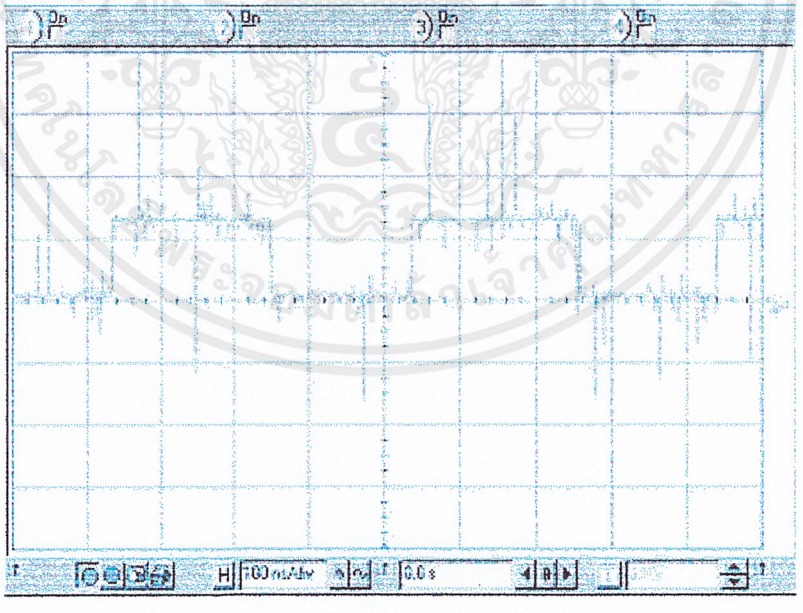


รูปที่ 4.8 แสดงรูปสัญญาณหลังผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออก (จุดที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

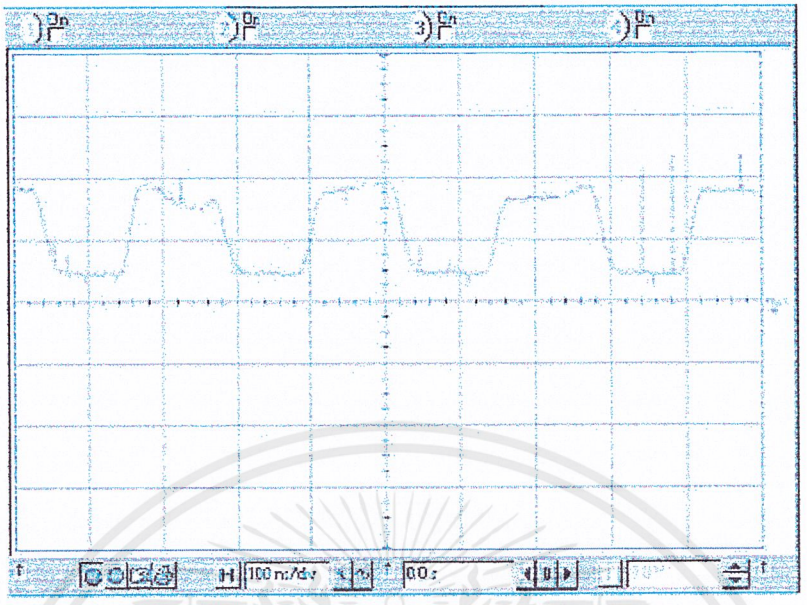


รูปที่ 4.9 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้า RS-485 Driver ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 5)

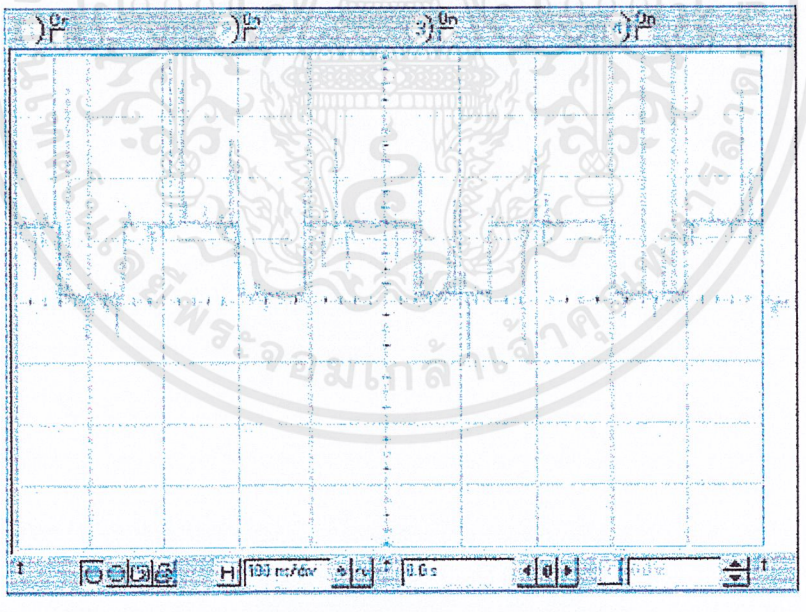


รูปที่ 4.10 แสดงรูปสัญญาณที่ออกจาก RS-485 Receiver ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

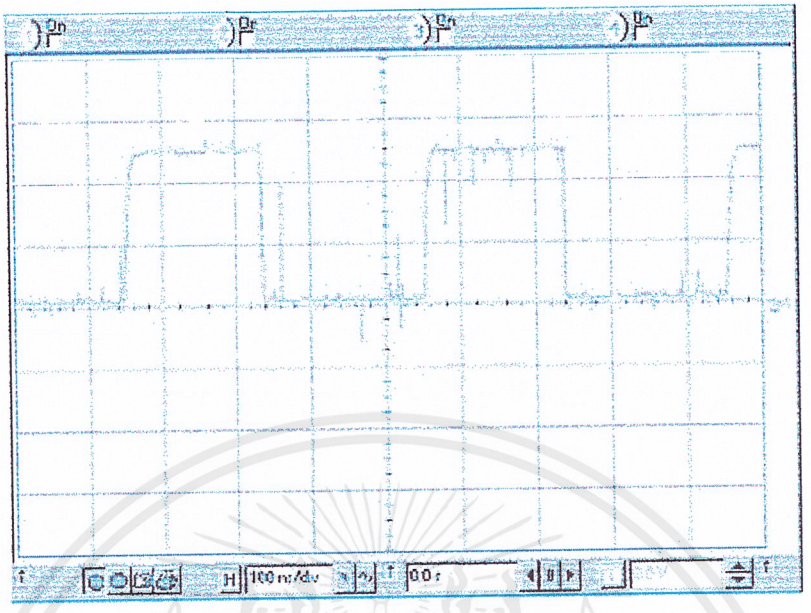


รูปที่ 4.11 แสดงรูปสัญญาณขาออกของ Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 7)

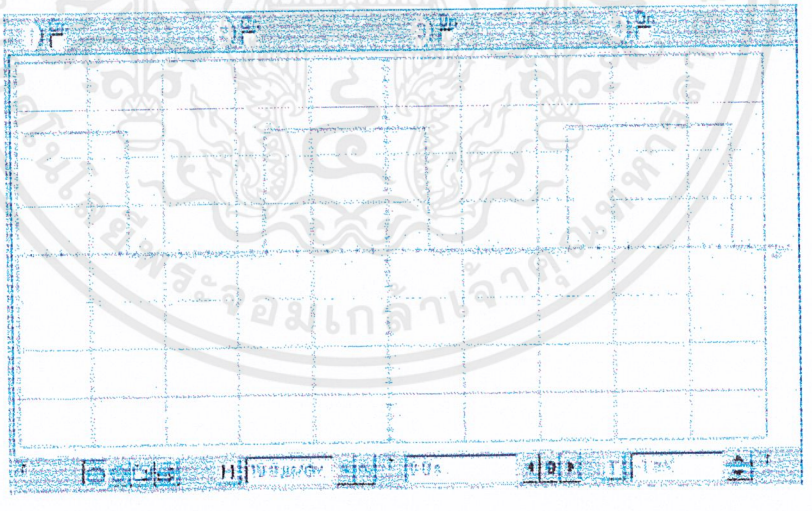


รูปที่ 4.12 แสดงรูปสัญญาณที่ออกจาก RS-485 Receiver ของสัญญาณจาก Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

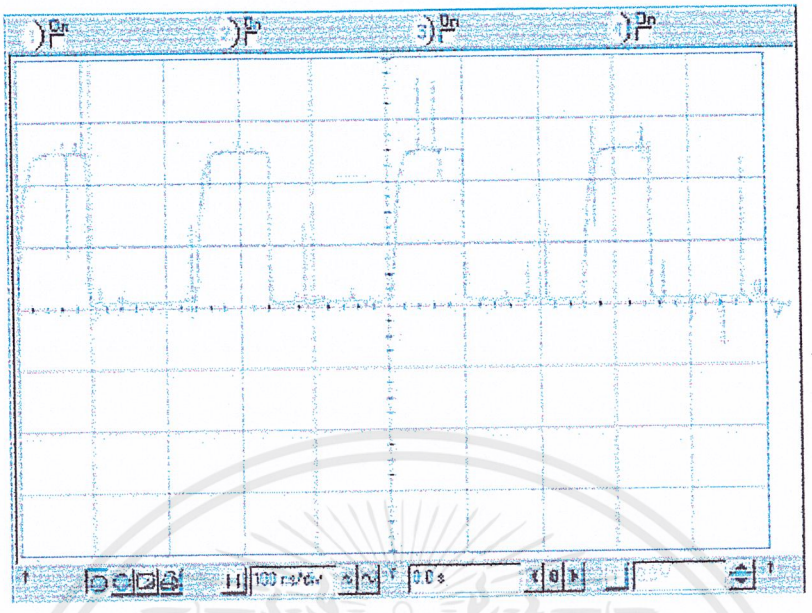


รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณก่อนเข้า Schmitt Trigger ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 9)

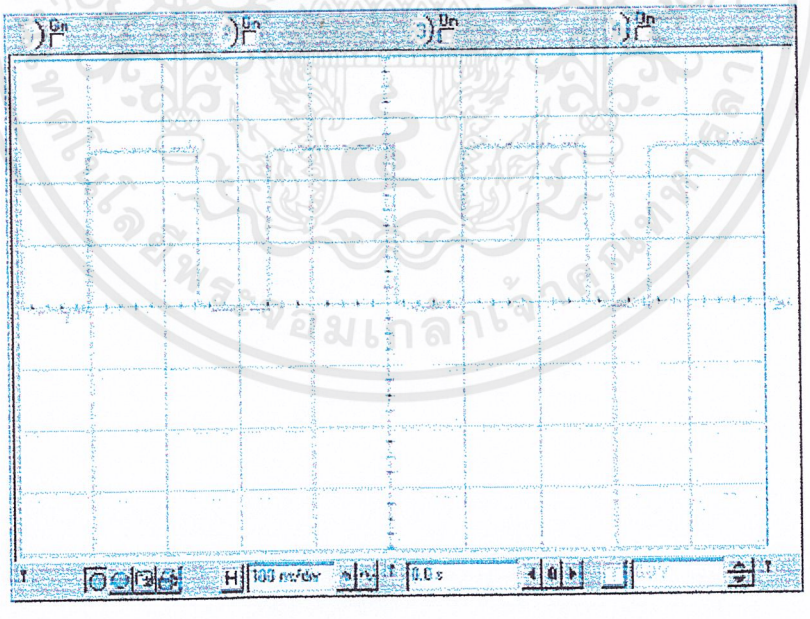


รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณขาออกจาก Schmitt Trigger ของสัญญาณจากวงจร Zero Crossing Detector (จุดที่ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณก่อนเข้า Schmitt Trigger ของสัญญาณ Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 11)



รูปที่ 4.16 แสดงสัญญาณขาออก Schmitt Trigger ของสัญญาณ Optical Interrupted Switch (H21B1) (จุดที่ 12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

- สัญญาณของเครื่องวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

1. สัญญาณขาเข้าของเครื่องวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนเป็นสัญญาณแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ จึงมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบ PWM ซึ่งเมื่อผ่านการกรองด้วย LC Filter จะพบว่าสัญญาณที่ออกมามีลักษณะเป็นสัญญาณรูปไซน์ แต่จากการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้สัญญาณไซน์นี้มีสัญญาณความถี่สูงปนเข้ามาด้วย จึงได้สัญญาณเป็นดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

2. สัญญาณไซน์ในข้อ 1 เมื่อผ่าน Comparator เบอร์ LM339 แล้วจะได้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งการใช้ Comparator เบอร์ LM339 ซึ่งมี Input Voltage Offset ที่ต่ำทำให้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้มีค่าของแรงดันต่ำสุดใกล้ศูนย์ แต่ทั้งนี้เนื่องจากยังมีผลของสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์จึงทำให้สัญญาณยังคงมีสัญญาณรบกวนปนอยู่มาก ดังแสดงในรูปที่ 4.7

3. เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากการ Comparator ยังมีการปนของสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์ ดังนั้นเพื่อลดผลจากสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์จึงต้องมีการแยกสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออก โดยใช้ Opto Isolated เป็นตัวแยกกราวน์ของสัญญาณออกจากกัน ซึ่งจะได้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีสัญญาณรบกวนลดน้อยลงดังสัญญาณในรูปที่ 4.8

4. เนื่องจากมีการส่งข้อมูลในระยะไกลดังนั้นสัญญาณขาออกจาก Receiver จึงยังมีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากมอเตอร์อยู่บ้างดังแสดงในรูปที่ 4.10 จึงต้องมีการแยกกราวน์อีกรอบเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนซึ่งจะได้สัญญาณที่แสดงดังรูปที่ 4.13

5. จากสัญญาณในรูปที่ 4.13 จะพบว่าสัญญาณขาดความคมของสัญญาณ ซึ่งเมื่อนำสัญญาณนี้ไปประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์อาจจะเกิดความผิดพลาดของการคำนวณได้ จึงต้องนำสัญญาณผ่าน Schmitt Trigger ก่อน ซึ่งสัญญาณหลังผ่าน Schmitt Trigger แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะพบว่าสัญญาณมีความคมมากขึ้น

- สัญญาณของเครื่องวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าฟ้าเหนี่ยวนำ

1. สัญญาณขาเข้าของเครื่องวัดความเร็วรอบมอเตอร์ นั้นมาจากการเปลี่ยนปริมาณทางกลเป็นปริมาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปที่ได้มีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมค่อนข้างมาก นั่นเป็นเพราะจากแผ่น Encoder ที่เราสร้างขึ้นนั้นเป็นงานแบบ Hand Made ซึ่งความแม่นยำและความเที่ยงตรงทางกลนั้นยังมีไม่มากพอแต่ก็ยังเพียงพอที่จะนำมาใช้ประมวณผลได้ ดังสัญญาณในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลังจากได้นำสัญญาณที่ได้จาก Optical Interrupted Switch ไปผ่านวงจร Driver-Receiver แล้วจะได้ว่าเกิด สัญญาณรบกวนขึ้นอันเนื่องจากผลของมอเตอร์ จึงต้องทำการแยกกราวน์เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนซึ่งจะได้สัญญาณก่อนแยกกราวด์และหลังแยกกราวด์ดังแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.15

3. จากสัญญาณในรูปที่ 4.15 จะพบว่าความคมของสัญญาณยังไม่มากนัก ซึ่งเมื่อนำสัญญาณนี้ไปประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ อาจจะเกิดความผิดพลาดของการคำนวณได้ จึงต้องนำสัญญาณผ่าน Schmitt Trigger ก่อน ซึ่งสัญญาณหลังผ่าน Schmitt Trigger แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งเมื่อเทียบสัญญาณก่อนเข้า Schmitt Trigger ดังรูปที่ 4.15 จะพบว่าสัญญาณมีความคมมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2

ชื่อเรื่อง การทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วัตถุประสงค์ เพื่อทำการทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำว่ามีค่าเบี่ยงเบนจาก Tacho Meter เท่าไร

อุปกรณ์ที่ใช้

1. Fuji Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE ขนาด 1.5 kW
2. แหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส 220 V
3. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่วนำ (Mitsubishi 0.5 HP 220/380 V 1410 rpm)
4. Tacho Meter
5. Flywheel เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร
6. ตุ้มเหล็กขนาด 2 กิโลกรัม 3 ชุด
7. ตราชั่งสปริง
8. terminal Box 1 ชุด
9. Fuse Box 1 เฟส 1 ชุด
10. สายไฟ

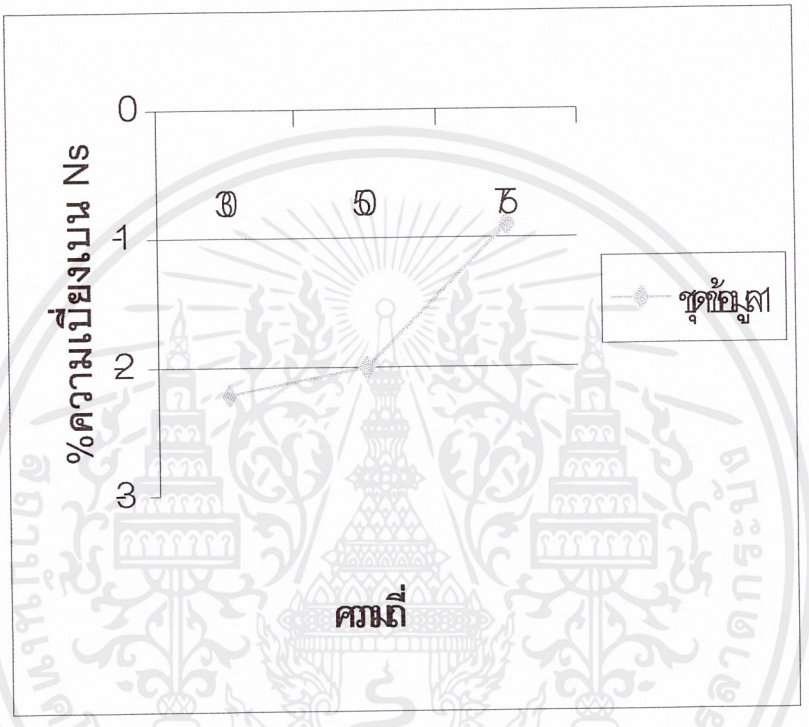
ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งมอเตอร์เข้ากับแท่น
2. ต่อการทดลองตามรูปที่ 4.17โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำการต่อแบบเดลต้า
3. ทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 10 Hz
4. ใส่ภาระโหลดโดยการเพิ่มน้ำหนักลูกตุ้มเหล็กทีละ 2 kg
5. ทำการวัดและบันทึกค่าความเร็วความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจาก Tacho Meter
6. ทำการวัดและบันทึกค่าความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น
7. ทำการวัดและบันทึกค่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น
8. ทำการเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์เป็น 30,50,75 และ 100 Hz และทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 4-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. คำนวณค่าเปอร์เซนต์ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเมื่อเทียบกับ Tacho Meter โดยใช้สูตร

% ความเบี่ยงเบน = (ค่าเฉลี่ยของเครื่องมือที่สร้างขึ้น- ค่าเฉลี่ยที่ได้จาก Tacho Meter) / ค่าเฉลี่ยที่ได้จาก Tacho Meter



รูปที่ 4.17 แสดงรูปการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

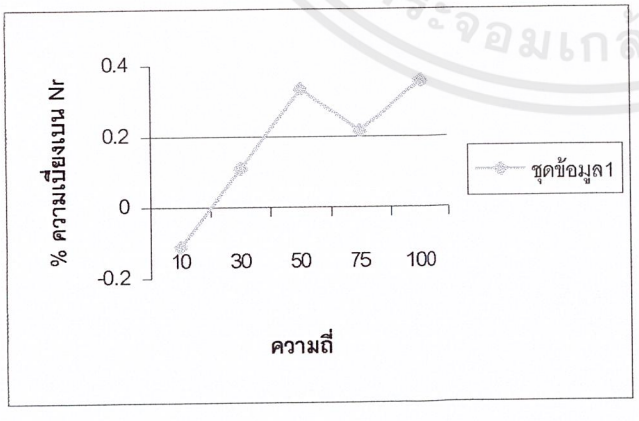
ผลการทดลอง

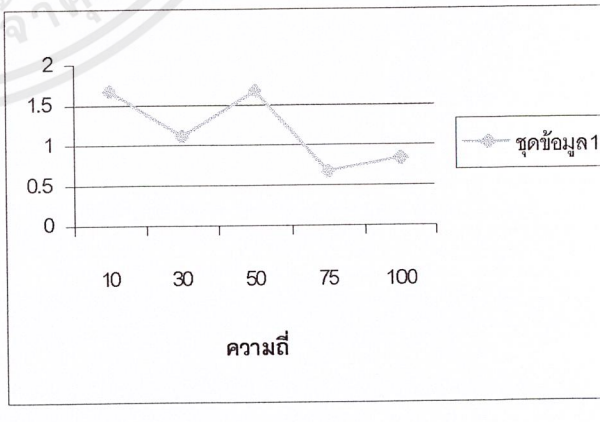
ตารางที่ 4.1. แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำใน สภาวะมอเตอร์เดินตัวเปล่า

ความถี่ (Hz)	Tacho Meter (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	300	301	300	300.3	300	300	300	300	-0.11
30	899	899	899	899	900	900	900	900	-0.11
50	1502	1502	1502	1502	1506	1506	1509	1507	0.33
75	2249	2249	2249	2249	2256	2256	2256	2256	0.21
100	3006	3007	3006	3006.3	3018	3018	3015	3017	0.35

ตารางที่ 4.2. แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะมอเตอร์เดินตัวเปล่า

ความถี่ (Hz)	ค่าจากการคำนวณ (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	300	300	315	300	305	1.67
30	900	915	900	915	910	1.11
50	1500	1515	1530	1530	1525	1.67
75	2250	2265	2265	2265	2265	0.67
100	3000	3015	3030	3030	3025	0.83





รูปที่ 4.18 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน

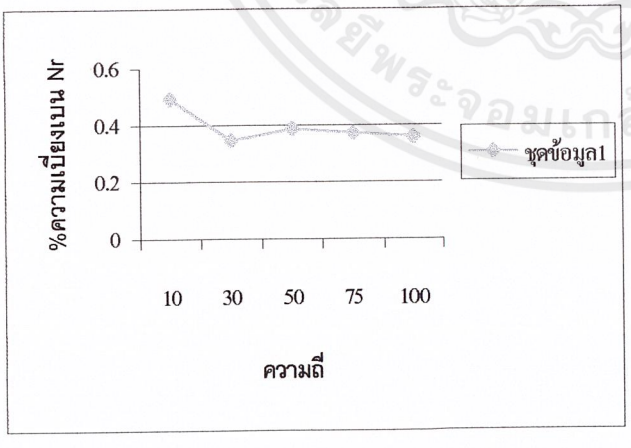
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

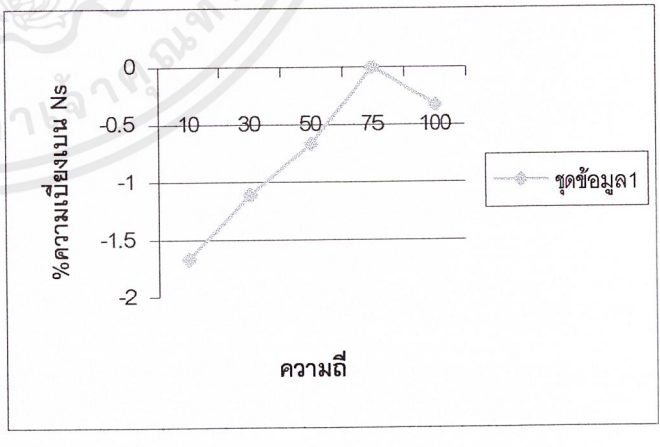
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 2 กิโลกรัม

ความถี่ (Hz)	Tacho Meter (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	270	270	269	269.67	273	270	270	271	0.49
30	865	865	865	865	867	870	867	868	0.34
50	1462	1462	1463	1462.33	1470	1467	1467	14687	0.39
75	2156	2156	2156	2156	2166	2163	2163	2164	0.37
100	2789	2789	2789	2789	2799	2799	2799	2799	0.36

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 2 กิโลกรัม

ความถี่ (Hz)	ค่าจากการคำนวณ (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	300	300	285	300	295	-1.67
30	900	885	885	900	890	-1.11
50	1500	1500	1485	1485	1490	-0.67
75	2250	2235	2250	2265	2250	0
100	3000	2985	2985	3000	2990	-0.33





รูปที่ 4.19 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน (สภาวะรับภาระโหลด 2kg)

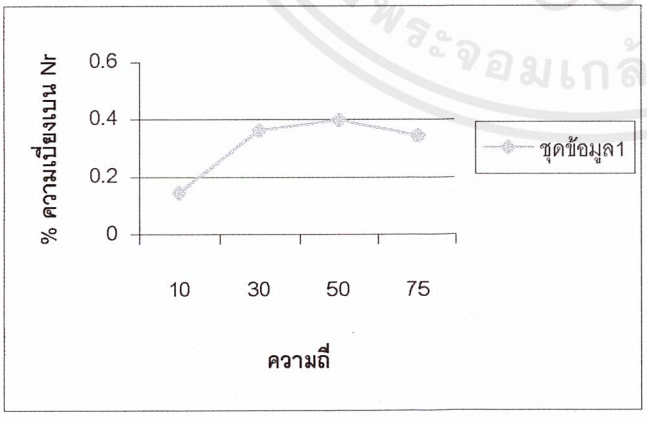
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

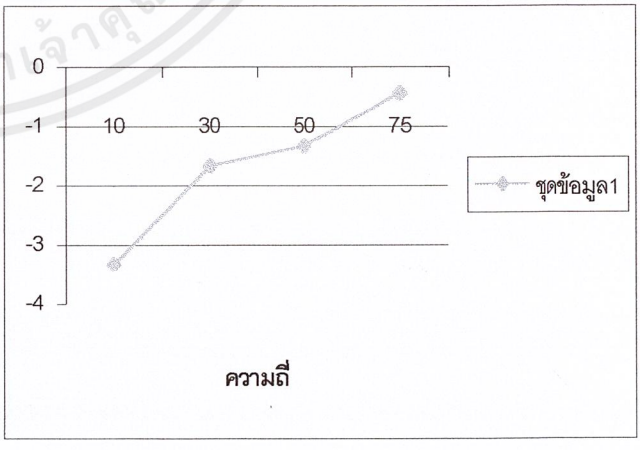
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 4 กิโลกรัม

ความถี่ (Hz)	Tacho Meter (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	230	230	229	229.67	231	231	228	230	0.15
30	828	828	828	828	831	831	831	831	0.36
50	1422	1423	1422	1422.33	1428	1428	1428	1428	0.40
75	2036	2036	2036	2036	2043	2043	2043	2043	0.34
100	มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลดที่ความถี่นี้ได้								

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในสภาวะรับภาระโหลด 4 กิโลกรัม

ความถี่ (Hz)	ค่าจากการคำนวณ (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	300	285	285	300	290	-3.33
30	900	885	885	885	885	-1.67
50	1500	1470	1485	1485	1480	-1.33
75	2250	2235	2235	2250	2240	-0.44
100	มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลดที่ความถี่นี้ได้					





รูปที่ 4.20 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน (สภาวะรับภาระโหลด 4 kg)

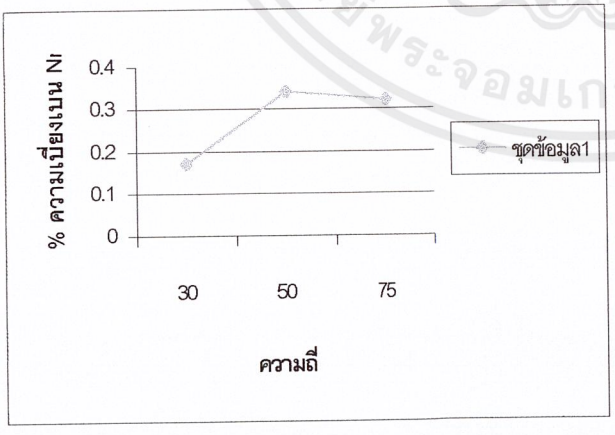
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

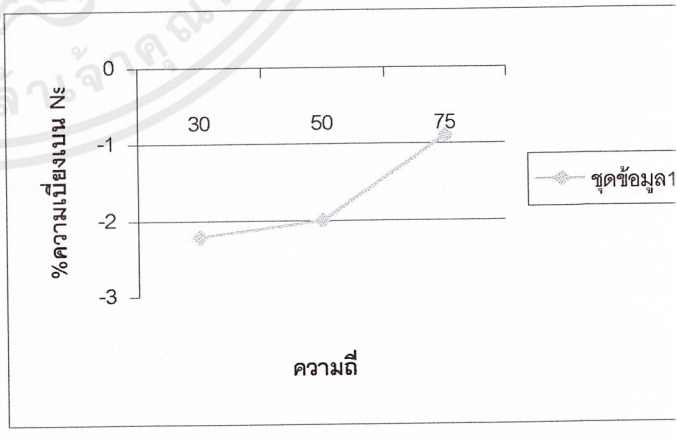
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 6 กิโลกรัม

ความถี่ (Hz)	Tacho Meter (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลดที่ความถี่นี้ได้								
30	779	780	780	779.67	783	780	780	781	0.17
50	1370	1371	1370	1370.33	1377	1374	1374	1375	0.34
75	1780	1765	1742	1762.33	1788	1773	1743	1768	0.32
100	มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลดที่ความถี่นี้ได้								

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะรับภาระโหลด 6 กิโลกรัม

ความถี่ (Hz)	ค่าจากการคำนวณ (rpm)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (rpm)			ค่าเฉลี่ย (rpm)	%ความเบี่ยงเบน
10	มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลดที่ความถี่นี้ได้					
30	900	885	885	870	880	-2.22
50	1500	1470	1470	1470	1470	-2.00
75	2250	2235	2235	2220	2230	-0.9
100	มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลดที่ความถี่นี้ได้					





รูปที่ 4.21 แสดงกราฟ %ความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความเร็วรอบและสนามแม่เหล็กหมุน (สภาวะรับภาระโหลด 6 kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

- จากผลการทดลองจะพบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะมีความใกล้เคียงเมื่อเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ได้จากการวัดโดยใช้ Tacho Meter โดยเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนจะพบว่ามีค่าน้อยมาก โดยค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ได้จากการวัดโดยใช้ Tacho Meter ณ ที่ภาระค่าต่างๆ และที่ค่าความถี่ค่าต่างๆจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าไม่เกิน 0.5%โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจะมีค่าประมาณ 0.49% และค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจะอยู่ที่ประมาณ –0.11%ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ สำหรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์บางค่าไม่สามารถวัดได้เนื่องจาก มอเตอร์ไม่สามารถรับภาระโหลด ณ ความถี่นั้นได้ ทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์ หลุดออดจากการซิงโครไนส์ (loss of synchronize) และหยุดหมุน สำหรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์จะมีการเพิ่ม ลดค่าทีละ 1 rpm โดยที่ค่าความเร็วรอบมอเตอร์จะสามารถหาได้จากสูตร $N_r = \frac{60 \times N}{32 \times T}$ โดย N คือ จำนวนลูกคลื่นที่เรานับได้เมื่อเปิดรับสัญญาณ T วินาที โดย T สำหรับการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เราใช้งานนั้นมีค่าเท่ากับ 1.875 วินาที จะขอยกตัวอย่างการคำนวณ เพื่อให้เห็นภาพดังนี้

เมื่อมีจำนวนลูกคลื่นเข้ามาที่controller 1200 ลูกจะได้ค่า $N_r = \frac{60 \times 1200}{32 \times 1.875} = 1200$ rpm

เมื่อมีจำนวนลูกคลื่นเข้ามาที่controller 1199 ลูกจะได้ค่า $N_r = \frac{60 \times 1199}{32 \times 1.875} = 1199$ rpm

ซึ่งจากตัวอย่างการคำนวณจะเห็นได้ว่าต่าความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงครั้งละ 1 rpm และจะ update ค่าทุกๆ 1.875 วินาที

- จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนกับค่าที่ได้จากการคำนวณ(จากสูตร $N_S = \frac{120f}{P}$) ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าตั้งแต่ 0% ถึง –3.33% ซึ่งจะเป็นค่าที่มากกว่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบของมอเตอร์เนื่องจากค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะมีการเพิ่มลดค่าทีละ 15 rpm โดยมีสาเหตุจากความถี่ที่เข้ามายังส่วนประมวลผลนั้นมีค่าต่ำ(มีค่าสูงสุดที่ 120 Hz) เมื่อนำมาคำนวณแล้วจะได้ค่าความละเอียดที่ไม่สูง โดยจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $N_s = \frac{120 \times N}{P \times T}$ โดย N คือ จำนวนลูกคลื่นที่เรานับได้เมื่อเปิดรับสัญญาณ T วินาที โดย T สำหรับการวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่เราใช้งานนั้นมีค่าเท่ากับ 2 วินาที และ P คือจำนวนขั้วของมอเตอร์ซึ่งในการทดลองใช้มอเตอร์ที่มี 4 ขั้ว จะขอยกตัวอย่างการคำนวณ เพื่อให้เห็นภาพดังนี้

เมื่อมีจำนวนลูกคลื่นเข้ามาที่ controllerในช่วงเวลา T (2วินาที)เท่ากับ 240 ลูกคลื่นแสดงว่าขณะนี้ความถี่อินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 120 Hz ดังนั้น $N_s = \frac{120 \times 240}{4 \times 2} = 3600$ rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีจำนวนลูกคลื่นเข้ามาที่ controllerในช่วงเวลา T (2วินาที)เท่ากับ 239 ลูกคลื่นแสดงว่าขณะนี้ความถี่อินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 119.5 Hz ดังนั้น $N_s = \frac{120 \times 239}{4 \times 2} = 3585$ rpm ซึ่งจากตัวอย่างการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะเปลี่ยนแปลงครั้งละ 15 rpm และจะ update ค่าทุกๆ 2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3

ชื่อเรื่อง การทดลองการใช้งาน Power Quality Analyzer (Fluke 43) ร่วมกับโปรแกรม Fluke Viewer

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการศึกษาวิธีการทำงานของ Power Quality Analyzer (Fluke 43) ร่วมกับโปรแกรม Fluke Viewer
2. เพื่อทำการหาข้อจำกัดของการทำงานร่วมกันระหว่าง Power Quality Analyzer (Fluke 43) ร่วมกับโปรแกรม Fluke Viewer

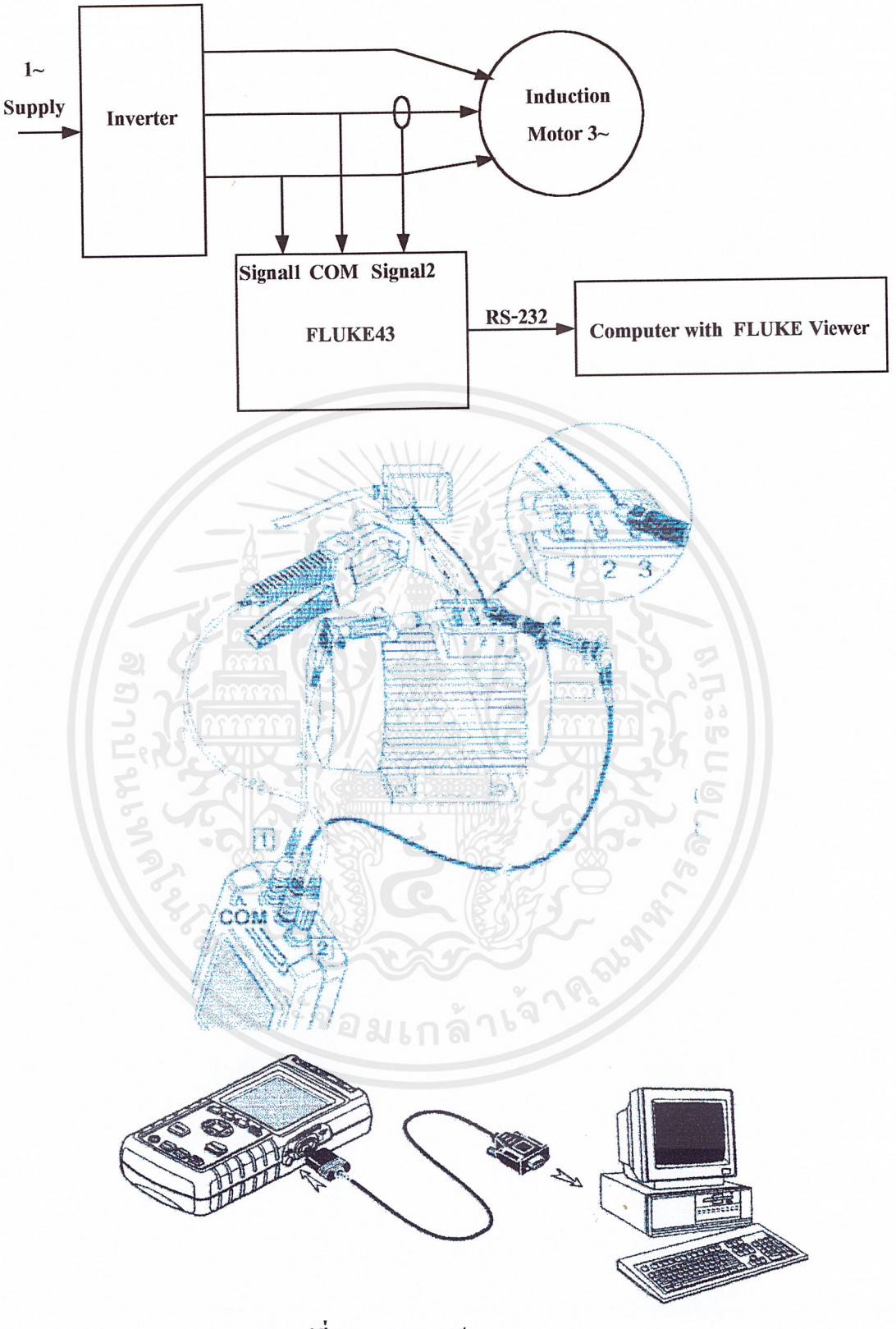
อุปกรณ์ที่ใช้

1. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
2. Fuji Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE ขนาด 1.5 kW
3. Power Quality Analyzer (Fluke 43)
4. Notebook ซึ่งบรรจุโปรแกรม Fluke Viewer
5. แหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส 220 V
6. สายไฟ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 4.22
2. ทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 30 Hz
3. ทำการวัดค่าของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Fluke 43 โดยใช้การวัดในโหมด Power (สามารถเลือกได้จาก Main Menu ของ fluke 43 หรือสามารถดูได้จากภาคผนวก)
4. ทำการโหลดรูปของกระแสและแรงดันเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม Fluke Viewer (การใช้งานโปรแกรม Fluke Viewer ได้อธิบายในภาคผนวก)
5. นำรูปของกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาทำการวิเคราะห์หาเสปคตรัมโดยใช้โปรแกรม Fluke Viewer
6. นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 5 ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากข้อ 3
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์เป็น 50 และ 70 Hz ตามลำดับ

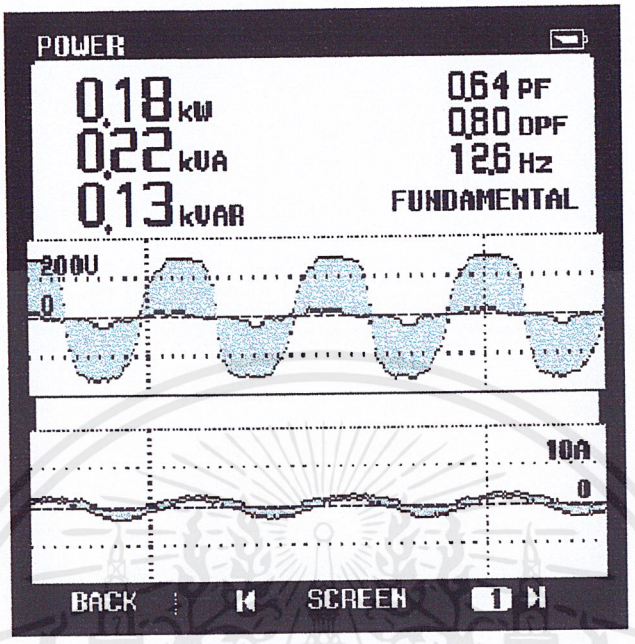
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

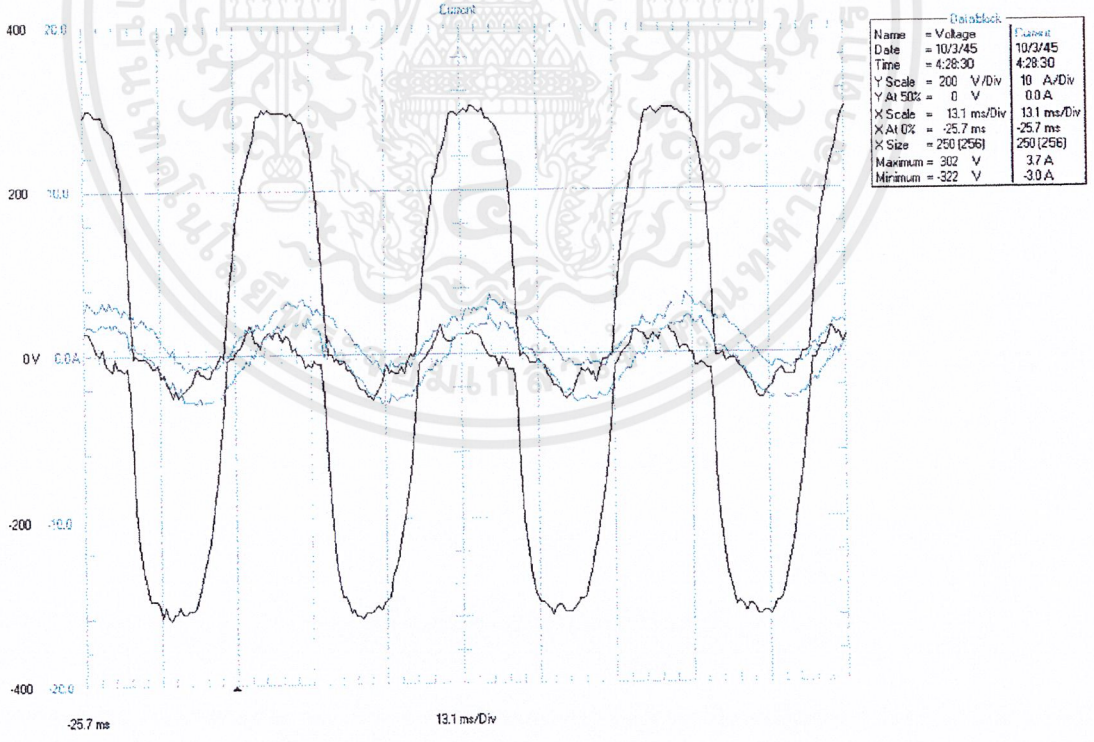


รูปที่ 4.22 แสดงรูปการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

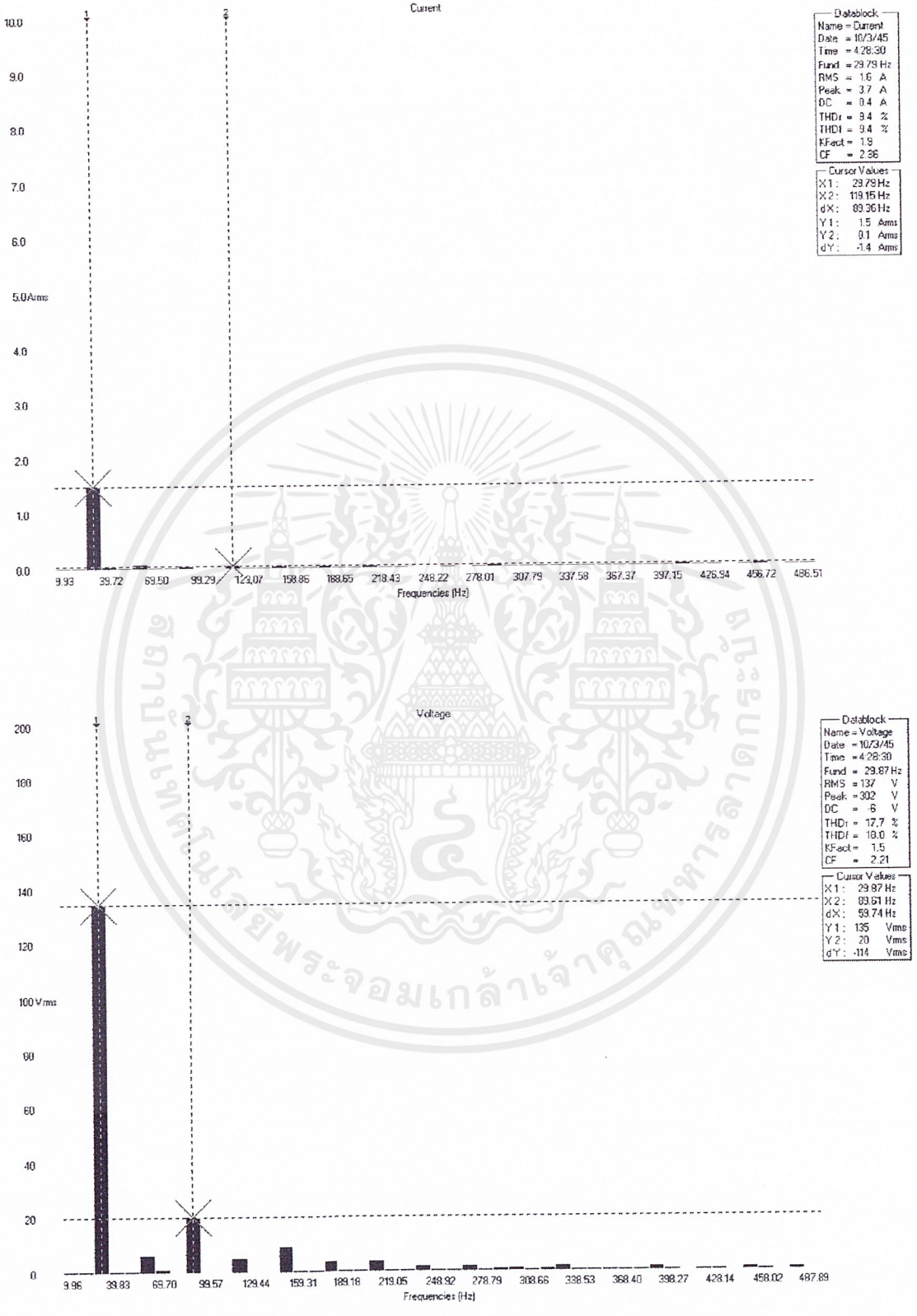
ผลการทดลอง





รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43) กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมกระและแรงดันที่ความถี่ 30 Hz

ครั้งที่	Fluke 43 (VA)	Fluke Viewer			ความแตกต่าง (VA)	%ความแตกต่าง
		V (V)	*I* (A)	*S* (VA)		
1	220	137	1.6	219.2	0.8	-0.36
2	220	136	1.6	217.6	2.4	-1.09
3	210	136	1.5	204	6	-2.86
เฉลี่ย	216.67	136.33	1.57	213.6	3.07	-1.44

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43) กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมกระและแรงดันที่ความถี่ 50 Hz

ครั้งที่	Fluke 43 (VA)	Fluke Viewer			ความแตกต่าง (VA)	%ความแตกต่าง
		V (V)	*I* (A)	*S* (VA)		
1	290	214	1.3	278.2	11.8	-4.07
2	300	215	1.3	279.5	20.5	-6.83
3	290	213	1.3	276.6	13.4	-4.62
เฉลี่ย	293.33	214	1.3	278.1	15.2	-5.17

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43) กับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมกระและแรงดันที่ความถี่ 70 Hz

ครั้งที่	Fluke 43 (VA)	Fluke Viewer			ความแตกต่าง (VA)	%ความแตกต่าง
		V (V)	*I* (A)	*S* (VA)		
1	180	216	0.85	184.5	4.46	2.48
2	180	216	0.82	176.7	3.31	-1.84
3	170	215	0.84	180.4	10.4	6.1
เฉลี่ย	176.67	215.67	0.84	180.5	6.05	2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การทดลอง

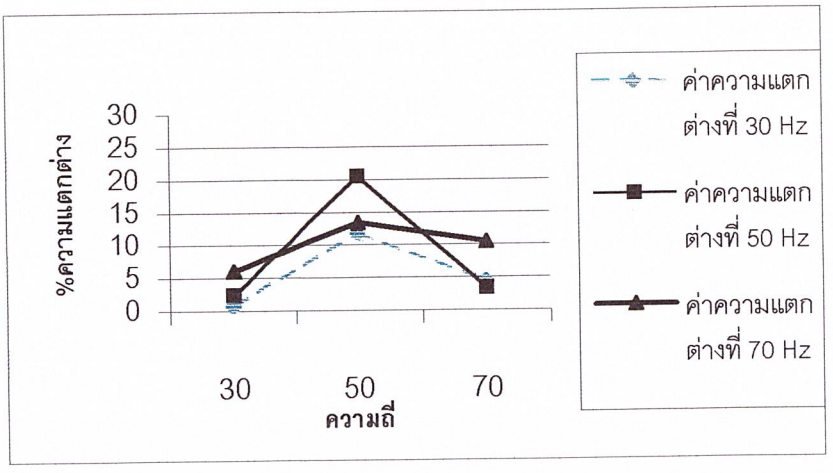
1. จากผลการทดลอง พบว่าการใช้งาน FLUKE43 ร่วมกับโปรแกรม FLUKE Viewer สามารถทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยโปรแกรม FLUKE Viewer นั้นไม่สามารถทำการวัดฮาร์โมนิคได้ แต่สามารถแสดงฮาร์มอนิกของทั้งกระแสและแรงดันได้จากการนำเอารูปคลื่นของแรงดันและกระแสมาทำ Fast Fourier Transform นอกจากนี้รูปคลื่นสัญญาณและฮาร์มอนิกแรงดันและกระแสที่แสดงผลบนโปรแกรม FLUKE Viewer สามารถแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขที่เทียบกับเวลาได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้กับโปรแกรมอื่นๆ ได้ เช่น Excel, Matlab หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อจัดการกับข้อมูลเหล่านี้

2. จากรูปฮาร์มอนิกของผลการทดลอง ตัวโปรแกรมสามารถปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ บนหน้าจอได้ดังนี้ (ไม่ได้แสดงตัวอย่างไว้) คือแกน X สามารถทำการเปลี่ยนค่าการแสดงผลได้ 2 อย่างคือ แสดงผลเป็นความถี่ทุกความถี่ที่เกิดขึ้น หรือแสดงผลเป็น Harmonics Number โดยให้Fundamental เป็น Number.1 ส่วนแกน Y สามารถเปลี่ยนการแสดงผลได้ 4 อย่างคือ แสดงผลเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ โดย Fundamental มีค่าเป็น 100% หรือแสดงผลเป็นค่า RMS ของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ มีหน่วยเป็น V_{rms} หรือ A_{rms} หรือแสดงผลเป็นค่า Logarithm ของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ มีหน่วยเป็น dB โดย Fundamental มีค่าเท่ากับ 0 dB หรือแสดงผลเป็นค่าแอมปลิจูดของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ มีหน่วยเป็น V และ A

3. นอกจากคุณสมบัติในข้อ 2 แล้ว รูปฮาร์มอนิกของผลการทดลองยังสามารถแสดงค่าต่างๆ ดังนี้คือ เวลาการทดลอง ความถี่ของ Fundamental ค่า RMS ของ Fundamental ค่า RMS ของรูปคลื่น ค่า Peak ของรูปคลื่น ค่า DC Component ค่าTHDr ค่า THD_f ค่า K-factor และค่า CF นอกจากนี้ยังมี Cursor ในการเลื่อนดูค่า Harmonics ค่าต่างๆ ด้วย

4. เนื่องจากการวัดค่ารูปสัญญาณกระแสและแรงดันโดยการส่งผ่านข้อมูลจาก Power Quality Analyzer (Fluke 43) มายังโปรแกรม Fluke Viewer นั้นต้องทำในโหมดการทำงานของ Power Quality Analyzer (Fluke 43) คือ Volt/Amp/Hertz Mode แต่ทั้งนี้การทดลองในโครงงานนี้ต้องทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ด้วย ซึ่งต้องทำการวัดโดยใช้ Power Quality Analyzer (Fluke 43) ในโหมดหารทำงาน Power Mode ดังนั้นข้อมูลที่ได้จะต้องทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าก่อน จึงจะสามารถส่งข้อมูลจาก Power Quality Analyzer (Fluke 43) มายังโปรแกรม Fluke Viewer ได้ ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะมีผลต่อการคลาดเคลื่อนในการวัดเมื่อความเร็วในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเร็วสูง ทั้งนี้จากผลการทดลองจะพบว่าที่ความถี่ต่ำๆ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสที่ Power Quality Analyzer (Fluke 43) ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่าของกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการคูณกันของกระแสและแรงดันที่ได้จากโปรแกรม Fluke Viewer นั้นมีการแกว่งหรือมีค่าแตกต่างกันต่ำกว่าที่ความถี่สูงๆ โดยสามารถแสดงได้จากกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความแตกต่างหรือการแกว่งของการวัด

5. เนื่องจากความเร็วสูงสุดในการรับส่งข้อมูลระหว่าง FLUKE43 กับโปรแกรม FLUKE Viewer คือ 4 วินาทีส่งผลให้การวัดค่าในช่วง Transient จึงไม่สามารถทำได้ ดังนั้นการใช้งาน FLUKE43 ร่วมกับโปรแกรม FLUKE Viewer จึงสามารถทำการวิเคราะห์ได้ในช่วง Steady state เท่านั้น และเนื่องจากการทำ Fast Fourier Transform ต้องใช้รูปคลื่นอย่างน้อย 1 คาบ ซึ่งเวลาสูงสุดที่ FLUKE Viewer เก็บค่าได้คือ 84 ms ดังนั้นที่สัญญาณความถี่น้อยกว่า 11 Hz จะไม่สามารถทำ Fast Fourier Transform ได้ และจะไม่สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำกว่า 11 Hz ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4

ชื่อเรื่อง การหาคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถรางไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำรถรางไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันซึ่งเกิดจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สภาวะต่างๆ

อุปกรณ์ที่ใช้

1. รถรางไฟฟ้า
2. Fuji Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE ขนาด 1.5 kW
3. Power Quality Analyzer (Fluke 43)
4. แหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส 220 V
5. สายไฟ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการยกล้อหลังของรถรางไฟฟ้าเพื่อไม่ให้ล้อสัมผัสกับราง
2. ทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆตาม Block Diagram รูปที่ 4.26
3. ทำการปรับอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 10 Hz
4. ทำการวัดและบันทึกค่าค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ Power Quality Analyzer(Fluke43) โดยทำการวัดในPower Mode แบบการวัดเดลต้า (ดูวิธีการวัดในภาคผนวก)
5. ทำการวัดและบันทึกค่ารูปสัญญาณกระแส และ แรงดันโดยการส่งข้อมูลจาก Power Quality Analyzer (Fluke43) มายังโปรแกรม Fluke Viewer
6. นำรูปสัญญาณกระแส และแรงดันที่ได้จากข้อ 5 มาหา spectrum ของสัญญาณโดยใช้โปรแกรม Fluke Viewer และทำการบันทึกค่า I_{Fund} I_{RMS} V_{Fund} V_{RMS} $\%THD_r$ $\%THD_f$ CF
7. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3 ถึงข้อ 6 โดยทำการเปลี่ยนความถี่เป็น 20 , 30 , 40,50,60,70 ,80, 90 และ 100 Hz

หมายเหตุ – การทดลองนี้ได้ทำการปรับ Torque Boost ของอินเวอร์เตอร์ที่ 13 ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสในช่วงความถี่ต่ำมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.26 Block diagram การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

1. **การทดลองที่ความถี่ 10 Hz**
2. **การทดลองที่ความถี่ 20 Hz**
3. **การทดลองที่ความถี่ 30 Hz**
4. **การทดลองที่ความถี่ 40 Hz**
5. **การทดลองที่ความถี่ 50 Hz**
6. **การทดลองที่ความถี่ 60 Hz**
7. **การทดลองที่ความถี่ 70 Hz**
8. **การทดลองที่ความถี่ 80 Hz**
9. **การทดลองที่ความถี่ 90 Hz**
10. **การทดลองที่ความถี่ 100 Hz**

หมายเหตุ – ผลการทดลองโดยละเอียดสามารถดูได้จาก ภาคผนวก จ

ค่าเฉลี่ยผลการทดลองที่ 10-100 Hz

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ความถี่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
10	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-
30	30.40	296.00	160.00	427.00	0.62
40	39.90	348.00	180.00	511.00	0.60
50	50.30	362.00	210.00	550.00	0.60
60	60.10	280.00	140.00	419.00	0.58
70	70.00	250.00	120.00	354.00	0.60
80	79.30	237.00	70.00	310.00	0.57
90	90.50	234.00	60.00	285.00	0.60
100	99.90	238.00	40.00	276.00	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.98	4.67	4.75	8.39	14.62	14.80	1.77
20	20.00	3.21	3.32	6.42	23.37	24.04	1.93
30	30.13	3.07	3.13	5.92	16.82	17.09	1.89
40	40.10	2.79	2.85	5.76	9.00	9.04	2.02
50	50.15	2.45	2.48	5.42	9.26	9.30	2.18
60	60.07	1.86	1.91	4.82	12.47	12.56	2.49
70	69.98	1.50	1.60	4.43	14.91	15.09	2.74
80	79.41	1.31	1.42	4.30	15.88	16.08	2.98
90	89.43	1.20	1.34	3.92	17.47	18.79	2.92
100	100.39	1.20	1.29	3.96	19.00	19.39	3.05

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
10	9.95	87.90	88.80	246.20	12.65	12.75
20	20.01	109.80	111.70	282.40	16.65	16.88
30	30.07	129.50	131.50	296.40	17.40	17.66
40	39.98	157.30	159.20	308.00	14.72	14.93
50	50.19	201.50	203.40	330.00	12.37	12.46
60	59.92	202.00	203.90	326.40	12.10	12.18
70	69.94	201.70	203.50	322.00	12.08	12.16
80	80.13	199.60	201.40	320.40	12.23	12.30
90	90.14	200.40	202.20	320.80	11.82	11.89
100	100.88	199.90	201.60	321.60	11.73	11.82

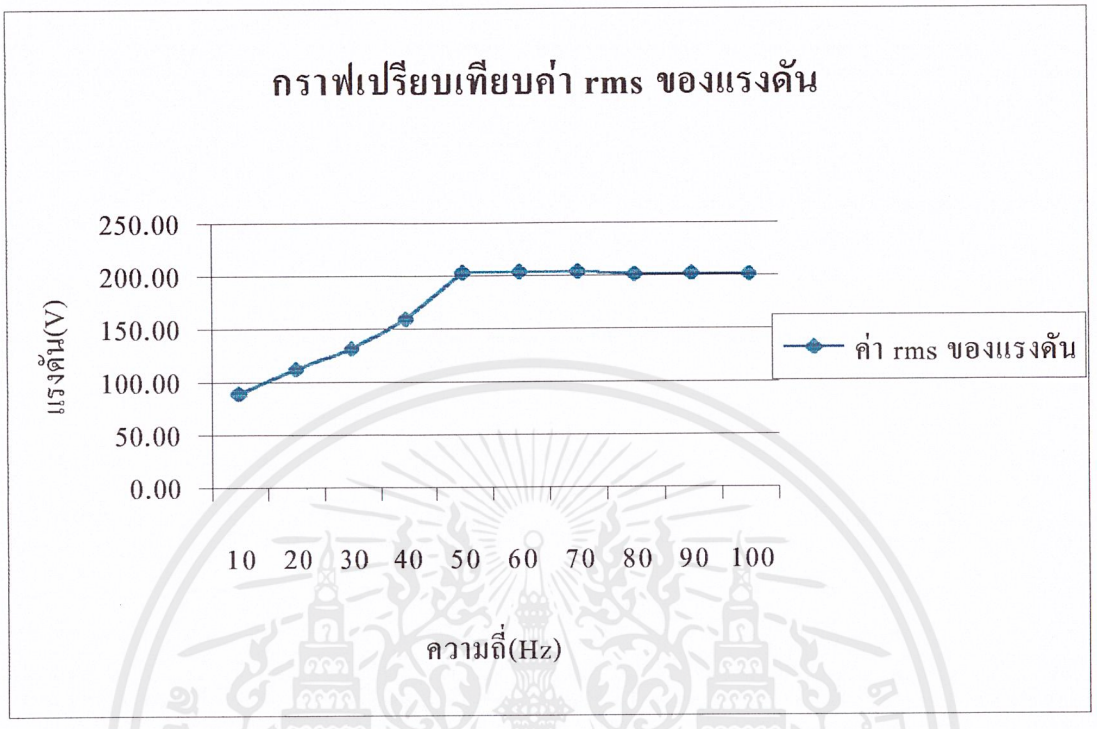
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

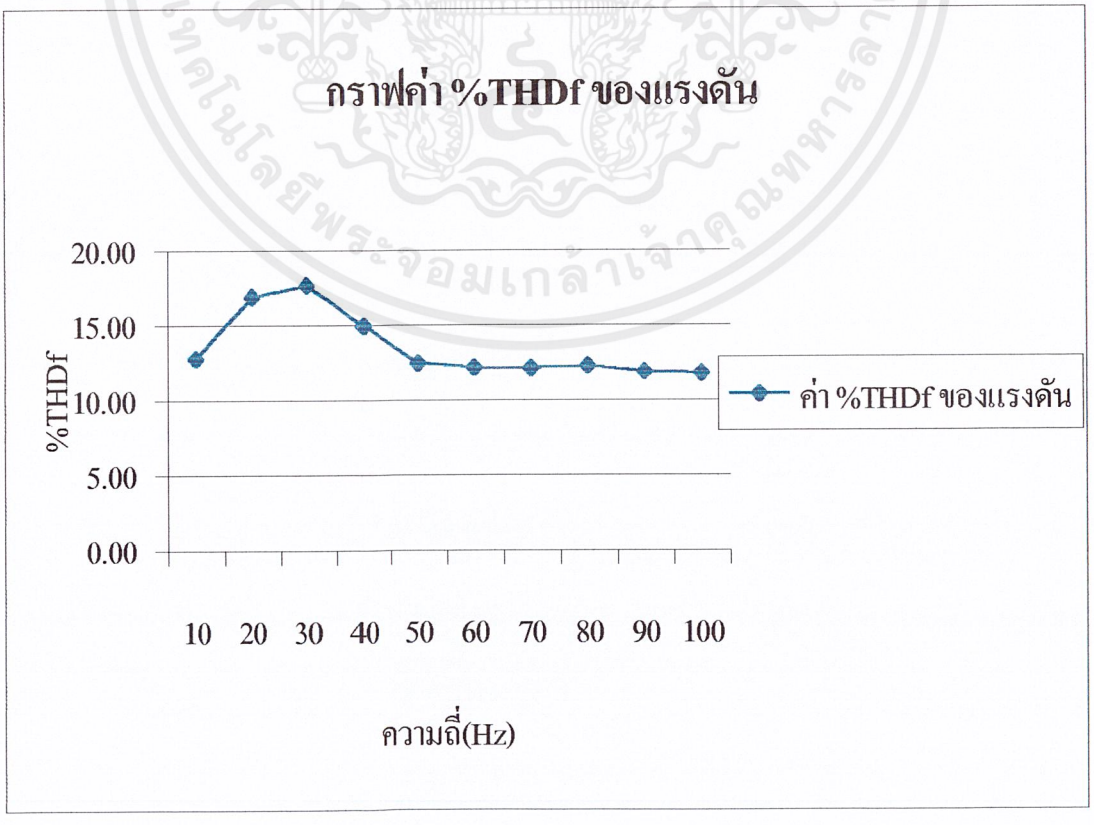
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

ความถี่	$V_{(fund)}$ **(V)**	$I_{(fund)}$ **(A)**	$p.f.$	S **(VA)**	P **(Watt)**	Q **(VAR)**
10	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
30	129.50	3.07	0.62	688.60	424.10	542.51
40	157.30	2.79	0.60	760.14	453.60	609.97
50	201.50	2.45	0.60	855.07	513.42	683.77
60	202.00	1.86	0.58	650.77	376.61	530.72
70	201.70	1.50	0.60	524.03	316.28	417.82
80	199.60	1.31	0.57	452.89	258.95	371.56
90	200.40	1.20	0.60	416.52	248.12	334.56
100	199.90	1.20	0.58	415.48	241.66	337.98

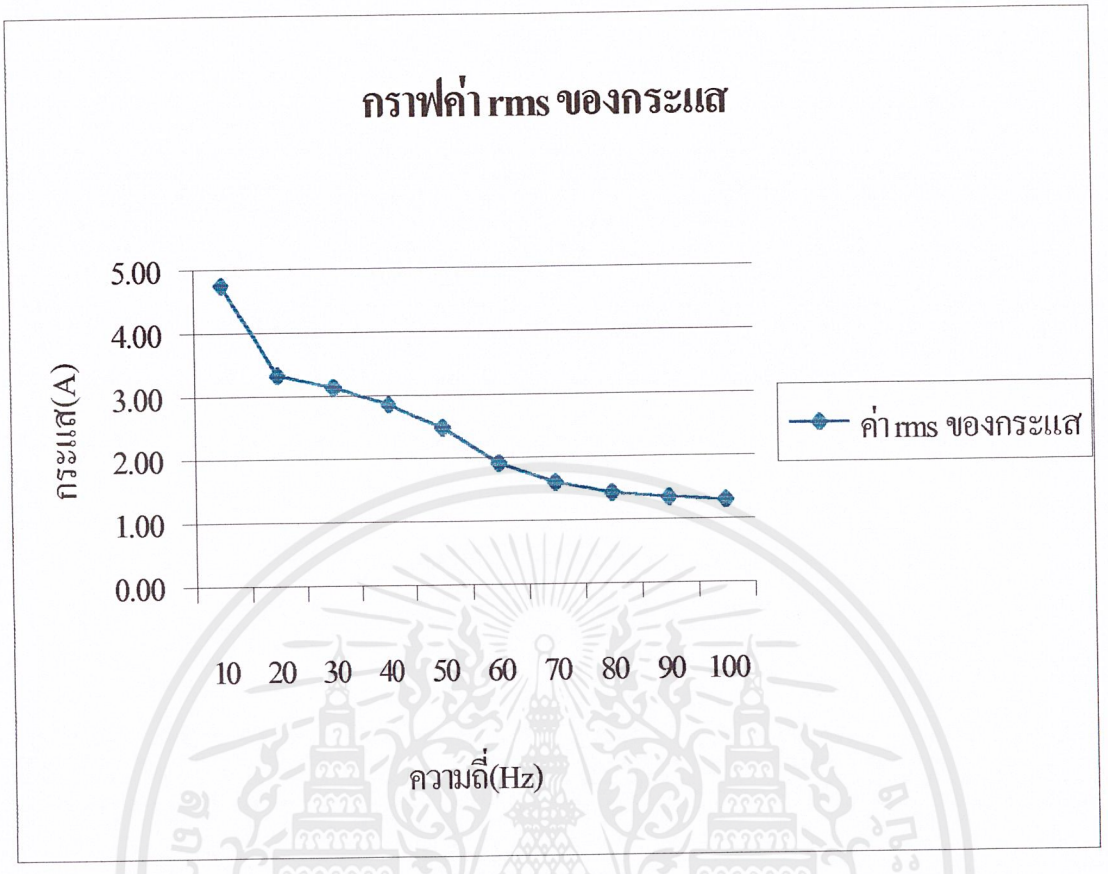
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถรางไฟฟ้าเมื่อทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์

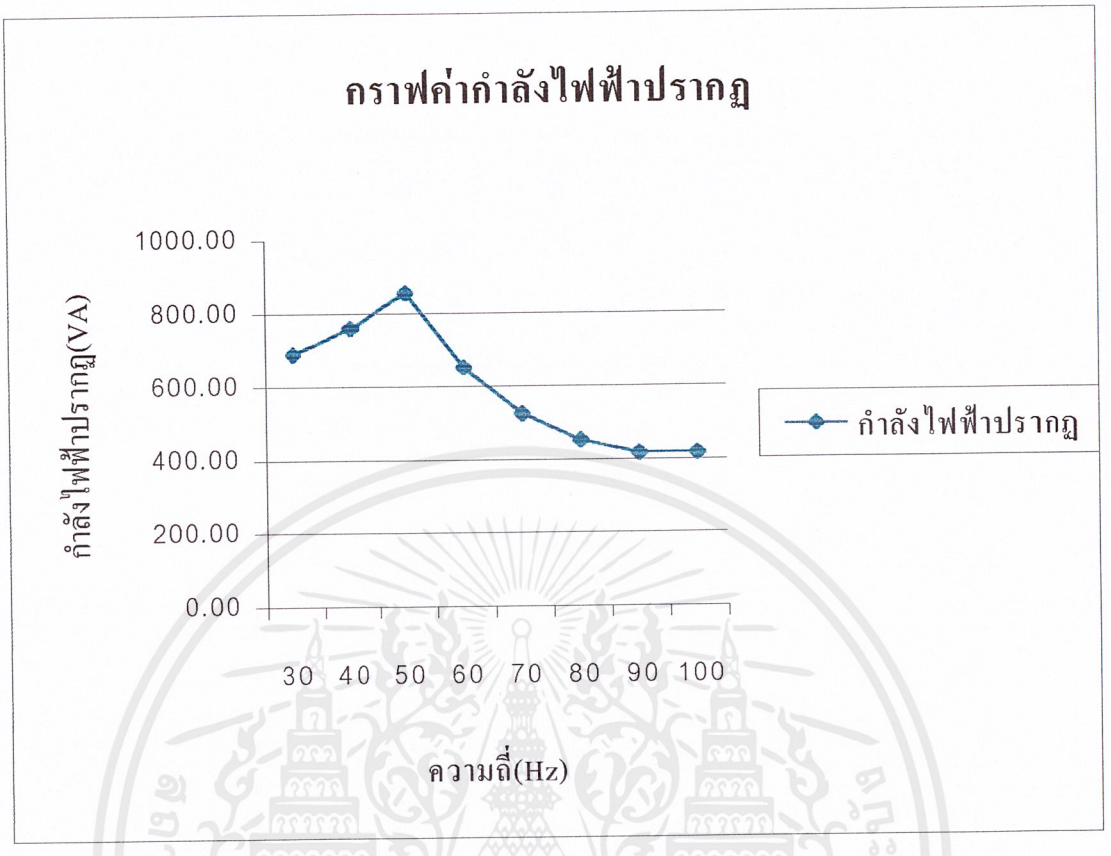


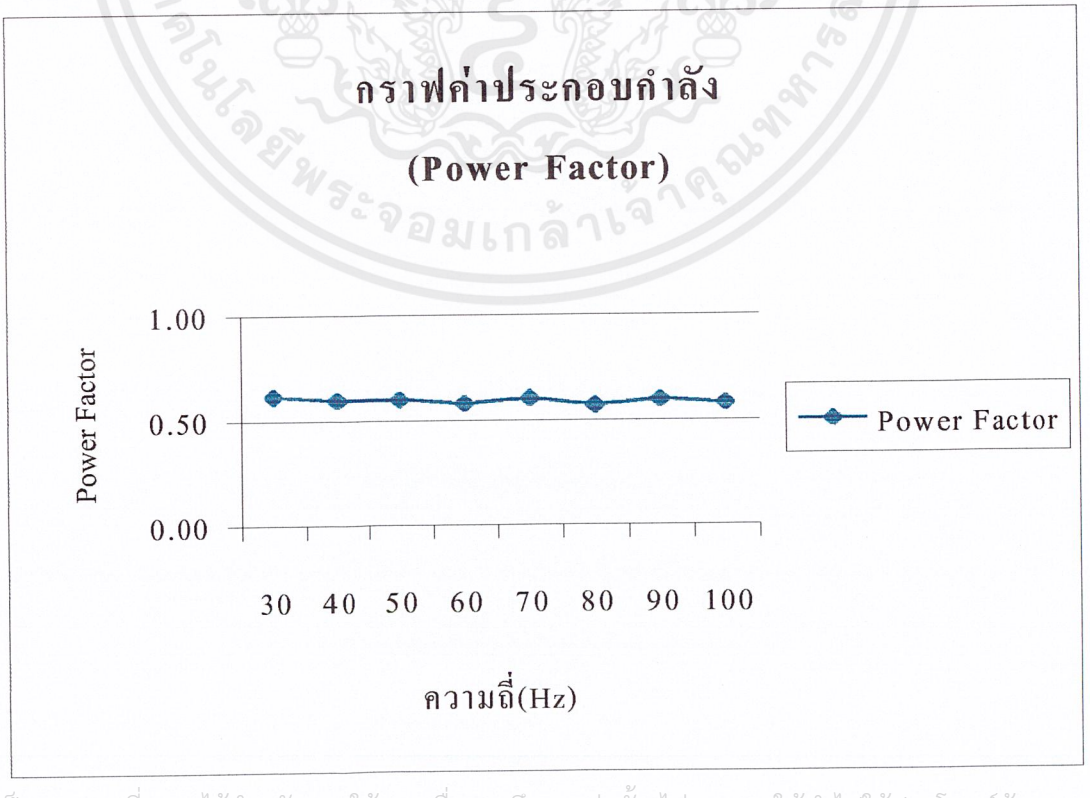


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

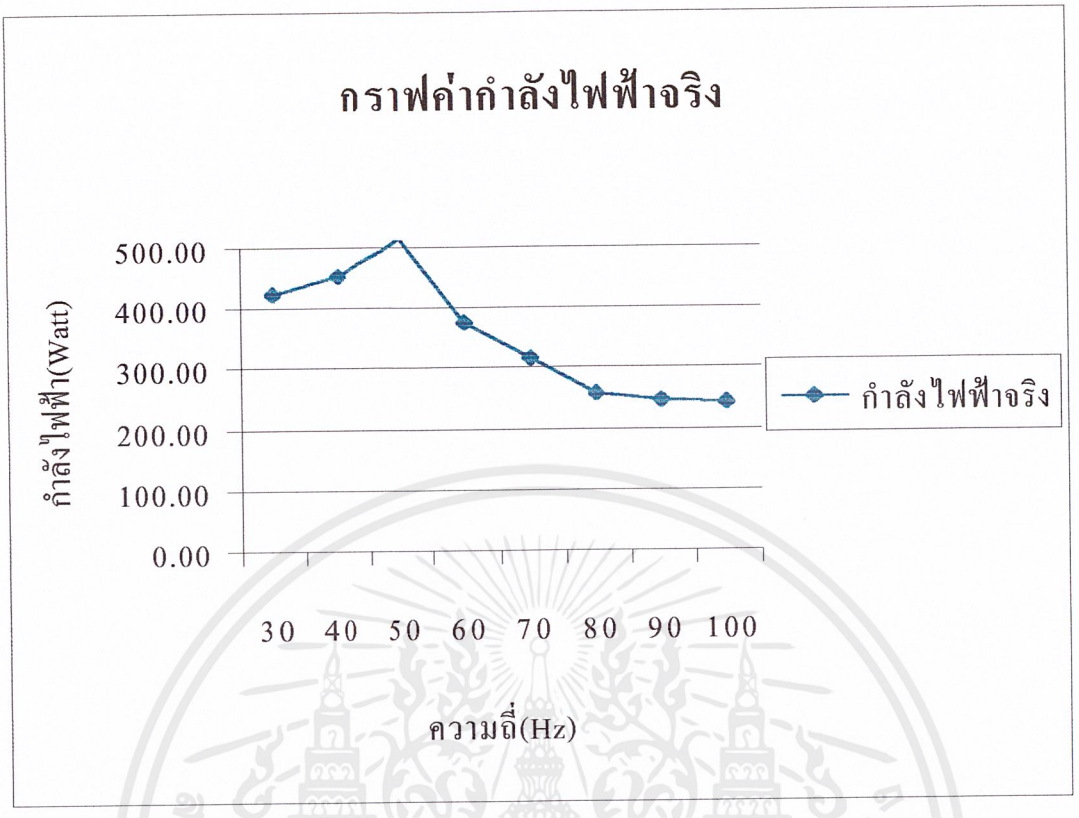


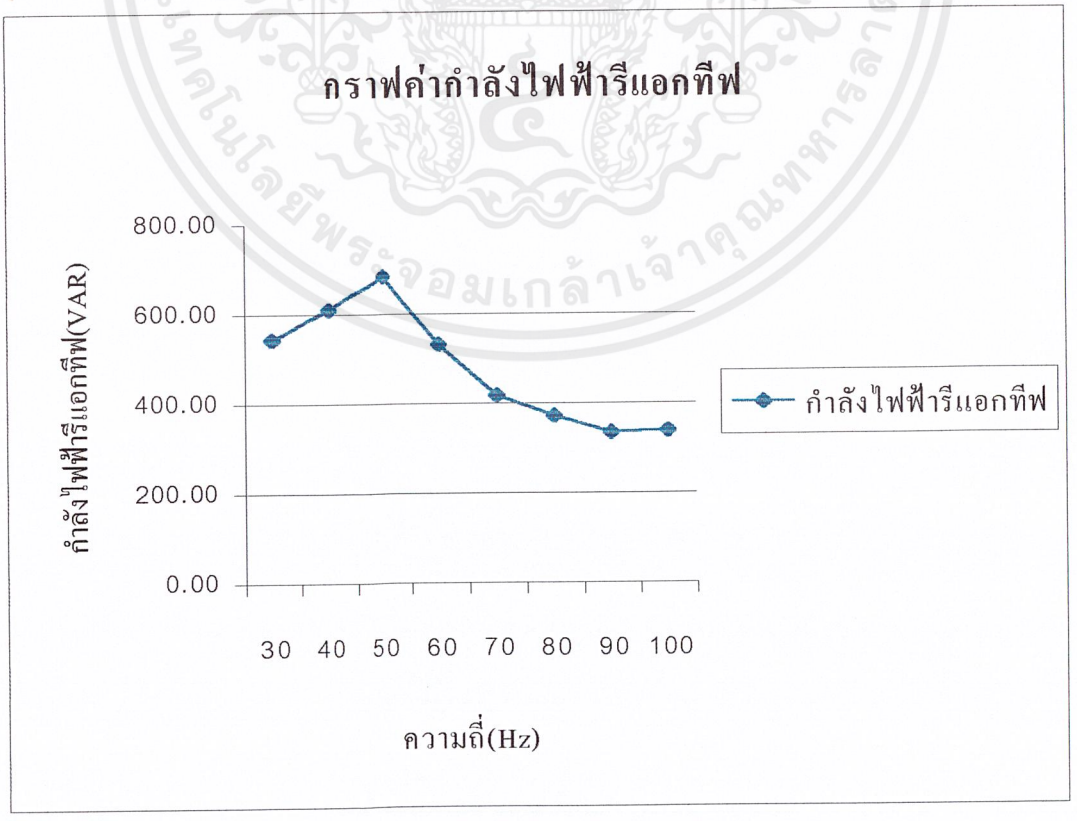
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายการทดลอง

1. การทดลองในการทดลองที่ 4 นี้เป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นการทดลองในสถาวะที่รถรางไฟฟ้าทำงานตัวเปล่า โดยคุณสมบัติที่ทำการหาในการทดลองแบ่งออกเป็น 6 อย่างคือ

- กราฟกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) ที่ความถี่ต่างๆ
- กราฟค่าประกอบกำลังที่ความถี่ต่างๆ
- ค่า rms ของกระแสที่ความถี่ต่างๆ
- ค่า $\%THD_f$ ของกระแสที่ความถี่ต่างๆ
- ค่า rms ของแรงดันที่ความถี่ต่างๆ
- ค่า $\%THD_f$ ของแรงดันที่ความถี่ต่างๆ

2. จากตารางการทดลองตารางที่ 1 ของทุกการทดลองเป็นการวัดเพื่อหาค่าประกอบกำลัง (Power Factor) โดยใช้ Power Quality Analyzer (Fluke 43) เป็นเครื่องมือวัด แต่ทั้งนี้ Fluke 43 มีข้อจำกัดในการวัดกำลังไฟฟ้า กล่าวคือ Fluke 43 สามารถวัดกำลังไฟฟ้าได้เพียงครั้งละ 1 เฟสเท่านั้น ดังนั้นในโหมดการวัดกำลังไฟฟ้า (Power Mode) จะสามารถทำการวัดกำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังได้เพียง 1 เฟสและการวัดต้องวัดเฟสเทียบกับนิวทรอลเท่านั้น จึงจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังที่ถูกต้อง แต่ทั้งนี้ในโครงงานเป็นการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีการต่อวงจรแบบเดลต้า ดังนั้นในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังจึงไม่สามารถทำได้โดยตรง ซึ่งก่อนการหาค่ากำลังไฟฟ้าของการต่อแบบเดลต้านั้น ต้องทำการหาค่าประกอบกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก่อน โดยขั้นตอนการหาค่าประกอบกำลังนั้นสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก จ ซึ่งค่าที่ใช้ในการหาค่าประกอบกำลังนั้นสามารถดูได้จากตารางแรกของทุกการทดลอง นอกจากนี้ Fluke43 ยังมีข้อจำกัดในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าคือ จากการทดสอบการวัดกำลังไฟฟ้าจะพบว่าความถี่ต่ำสุดที่ Fluke 43 สามารถทำการวัดได้คือที่ 30 Hz

3. ตารางที่ 2 และ 3 ของทุกการทดลองเป็นการวัดค่ากระแสและแรงดันเพื่อนำไปใช้ประกอบกับค่าประกอบกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า และเพื่อประโยชน์ในการนำกระแสและแรงดันที่ทำการวัดในแต่ละการทดลองไปใช้เพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดัน จึงต้องทำการวัดค่ากระแสและแรงดันด้วย Fluke43 แล้วทำการส่งข้อมูลของกระแสและแรงดันที่วัดได้ไปยังโปรแกรม Fluke Viewer ซึ่งการส่งผ่านข้อมูลจาก Fluke 43 ไปยังโปรแกรม Fluke Viewer สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก จ โดยเมื่อข้อมูลที่โปรแกรม Fluke Viewer ได้รับนั้นจะแสดงผลในรูปของรูปคลื่น (ดูตัวอย่างรูปคลื่นการวัดได้ในการทดลองที่ 3) ทั้งนี้รูปคลื่นที่แสดงบนโปรแกรม Fluke Viewer นั้นสามารถนำไปวิเคราะห์ผลทางฟูเรียร์ได้ดังนี้คือ ค่า rms ของสัญญาณ ค่า rms ของสัญญาณที่ความถี่หลักมูล ค่า $\%THD_f$ ค่า $\%THD_r$ โดยค่าที่ได้จากการแปลงเป็นฟูเรียร์สามารถดูได้จากตารางที่ 2 และ 3 ของทุกการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลอง ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันที่สภาวะการทำงานต่างๆ ได้

4. ผลการทดลองในข้อที่ 2 และ 3 จะนำมาใช้ประกอบในการหาค่ากำลังไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยค่า Apparent Power, Real Power และ Reactive Power โดยการหาค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากสูตรต่างๆ เหล่านี้

$$S = \sqrt{3} V_{L-L} I_{L-L}$$

$$P = \sqrt{3} V_{L-L} I_{L-L} \times p.f.$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ก่อนทำการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้านั้น ต้องทำการวิเคราะห์กระแสแรงดัน และค่าประกอบกำลัง (Power Factor)ที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับก่อน โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1.1 แรงดัน

จากกราฟค่า rms ของแรงดันจะพบว่าที่ความถี่ 10 – 50 Hz แรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ ทั้งนี้เมื่อพิจารณากราฟคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM โดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.30 จะพบว่าผลการทดลองและค่าจากทฤษฎีมีลักษณะคล้ายกัน

ทั้งนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่แรงดันเพิ่มตามความถี่ได้จากสมการ

$$\frac{V}{f} = 4.44 N \phi_{\max}$$

จากสมการจะพบว่าที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่หลักมูล (50 Hz) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็กของมอเตอร์จะต้องทำการคงค่า V/f ในมีค่าคงที่ ดังนั้นช่วงการทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่หลักมูลจะมีค่าเส้นแรงแม่เหล็กคงที่ และเรียกช่วงนี้ว่าช่วง V/f คงที่

พิจารณาความถี่ที่ 50 – 100 Hz จะพบว่าค่าแรงดันมีค่าคงที่ตลอดทั้งนี้เนื่องจากว่าค่าแรงดันที่มอเตอร์ควรจะได้รับต้องไม่เกินพิกัดแรงดันที่ Name Plate ซึ่งการต่อแบบเดลต้า พิกัดแรงดันอยู่ที่ 220 โวลต์ ซึ่งจากสมการข้างต้นจะพบว่าในช่วงนี้แรงดันคงที่แต่ค่าความถี่มีการเพิ่มขึ้น ดังนั้นในช่วงนี้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ในการทดลองได้มีการตั้ง Torque Boost ของอินเวอร์เตอร์ไว้ที่ 13 ซึ่งมีผลทำให้แรงดันที่ความถี่ 1 Hz มีค่าอยู่ที่ประมาณ 75 โวลต์ และจากกราฟจะพบว่าการตั้ง Torque Boost ที่ 13 มีผลตั้งแต่ความถี่ประมาณ 1- 40 Hz โดยดูจากที่ความชันของกราฟที่ 40-50 Hz มีค่าเท่ากับความชันที่ลากจากจุดกำเนิดผ่าจุดกราฟแรงดันที่ 40-50 Hz แต่ความชันที่ความถี่ 1-40 Hz จะมีความชันไม่เท่าแต่มีค่าความชันน้อยกว่า ซึ่งเหตุผลที่ต้องมีการตั้ง Torque Boost สามารถศึกษาได้จากบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4.5

1.2 กระแส

จากการทดลองในโครงงานนี้ค่ากระแสที่ทำการวัดเป็นกระแสที่ไหลเข้าที่สเตเตอร์ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_S = I_m + I_r$$

โดย I_S คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่สเตเตอร์

I_m คือ ค่า Magnetizing Current

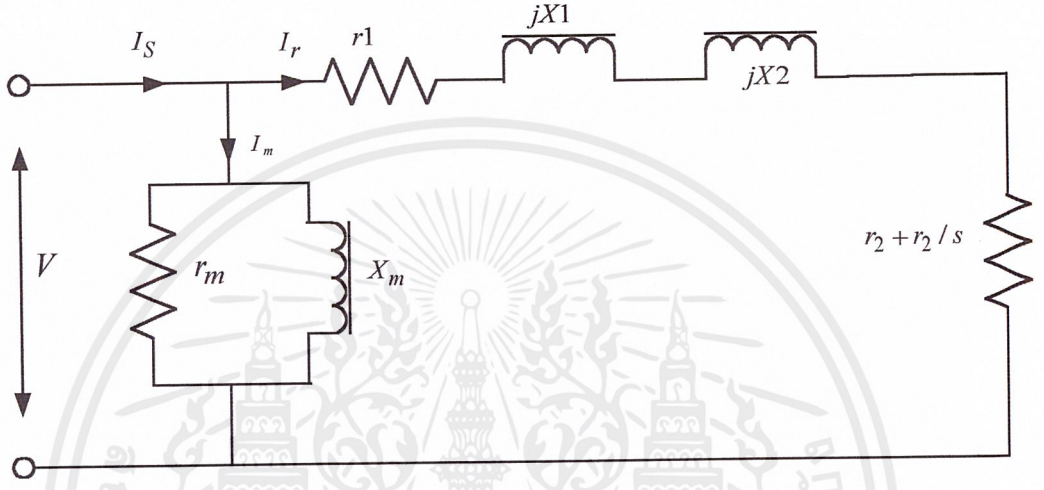
I_r คือ ค่ากระแสที่โรเตอร์หรือกระแสที่เกิดจากโหลด

แต่ทั้งนี้จากมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กซึ่งจะพบว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่ากระแสที่ไหลในสภาวะไร้โหลดเมื่อเทียบกับกระแสที่พิกัดคือประมาณ 50% โดยกระแสส่วนนี้จะมีส่วนหนึ่งที่นำไปสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งก็คือ I_m และกระแสส่วนที่เหลือเกิดจากภาระที่เป็นความสูญเสียเช่น Windage Loss ,Fiction Loss เป็นต้น ดังนั้นจะพบว่ากระแสที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กจะมีค่าอยู่ประมาณ 30% โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองมีพิกัดกระแสตาม Name Plate คือ 6 แอมป์ ดังนั้นกระแสที่นำไปใช้ในการกระตุ้นการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำน่าจะอยู่ที่ 1.8 แอมป์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 50 Hz จะพบว่ากระแส I_S มีค่าเท่ากับ 2.48 ซึ่งจะพบว่าค่ากระแส I_r ซึ่งเกิดจากโหลดมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่ากำลังที่สูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นจึงสามารถสรุปในส่วนนี้ได้ว่าพฤติกรรมของกระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์มีผลจาก Magnetizing Current มากกว่ากระแสที่โรเตอร์ ทำให้กราฟกระที่ไหลเข้าสเตเตอร์จะมีผลของ I_m ที่โดดเด่นกว่า

- พิจารณากราฟกระแสที่ความถี่ 10 – 50 Hz จะพบว่ากระแสมีค่าลดลงเรื่อยๆ และกระแสที่ความถี่ 10 Hz มีค่าสูงกว่ากระแสที่ความถี่อื่นๆ มาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่า Torque Boost เนื่องจากในการทดลองนี้ทำการตั้งค่า Torque Boost ไว้ที่ 13 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แต่โหลดที่ใช้ในการทดลองนั้นยังมีค่าน้อย (มอเตอร์มีการทดรอบเยอะ) ดังนั้นจากทฤษฎีการตั้งค่า Torque Boost และวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เราจะเห็นได้ว่าเมื่อตั้งค่า Torque Boost ไว้สูงแต่นำไปขับโหลดที่เบา ทำให้ค่าส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิปที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยส่งผลถึงกระแสที่ส่งไปทางด้านโรเตอร์ (I_r) มีค่าน้อย ($\frac{R_2}{s}$ มีค่าสูงมาก) ดังนั้น กระแสส่วนใหญ่จึงไหลใน Magnetizing Branch ประกอบกับด้วยการตั้ง Torque Boost นั้นทำให้ค่าแรงดันที่ความถี่ต่ำสูงกว่าค่าแรงดันปกติผลสุดท้ายก็คือทำให้กระแสขาเข้าสเตเตอร์ที่ความถี่ต่ำนั้นมีค่าสูงมาก



รูปที่ 4.27 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อตั้งค่า torque Boost ไว้สูงแต่ขับโหลดเบา

ซึ่งแสดงการคำนวณแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของกระแสเมื่อความถี่ต่ำลงกว่า 50 Hz โดยใช้ความถี่ 50 Hz เป็นจุดอ้างอิง

- ตัวอย่างแสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของกระแสที่ 50 และ 40 Hz

$$I_{40} = \frac{V_{40}}{X_{40}} = \frac{V_{40}}{2\pi f_{40} L}, \; I_{50} = \frac{V_{50}}{X_{50}} = \frac{V_{50}}{2\pi f_{50} L}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{I_{40}}{I_{50}} = \frac{V_{40}}{V_{50}} \times \frac{f_{50}}{f_{40}} = \frac{157.3}{201.5} \times \frac{50}{40} = 0.98$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่หลักมูล (Hz)	V_{RMS} (V)	I_{RMS} (A)	I_N/I_{50} (คำนวณ)	I_N/I_{50} (ที่วัดได้จริง)
40	157.3	2.79	0.98	1.14
30	129.5	3.07	1.07	1.25
20	109.8	3.21	1.36	1.31
10	87.9	4.67	2.18	1.91

จากตารางจะเห็นได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสไหลเข้าสเตเตอร์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่ยิ่งมีค่าต่ำๆ และผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริงเพียงเล็กน้อย

- พิจารณากระแสที่ความถี่ตั้งแต่ 50 Hz ถึง 100 Hz จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ากระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์มีค่าลดลงเรื่อยๆและเริ่มคงที่ ซึ่งกราฟลักษณะเป็นกราฟคุณลักษณะของ I_m นั่นเป็นเพราะว่าโหลดที่ใช้ในการทดลองนั้นมีค่าน้อยทำให้ I_r (Rotor Current) มีค่าน้อยลงไปด้วย ทำให้ I_m มีผลต่อกระแสขาเข้าสเตเตอร์มากกว่า ดังนั้นในการทดลองนี้กราฟของ I_S (Stator Current) คล้ายกับกราฟคุณสมบัติของ X_m โดยสาเหตุที่กระแสกระตุ้น(Magnetizing Current) ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 Hz นั้นเมื่อเรามองดูวงจรสมมูลย์โดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเห็นได้เมื่อ ความถี่สูงขึ้นค่า X_m (Magnetizing Reactance) จะสูงขึ้นตามค่าความถี่ ซึ่งก็จะส่งผลให้ค่ากระแสกระตุ้น ลดลงตามไปด้วย

1.3 ค่าประกอบกำลัง

จากการทดลองจะพบว่าค่าประกอบกำลังที่ความถี่ต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกล่าวคือค่าประกอบกำลังที่ทำการวัดได้มีค่าต่ำสุดที่ 0.58 และสูงสุดที่ 0.62 ซึ่งสามารถถือได้ว่ามีค่าประมาณเท่ากันที่ทุกความถี่ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าการทำงานในสภาวะการทดลองนี้โหลดที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำรับนั้นมีค่าน้อย ดังนั้นผลที่เกิดจากส่วน Magnetizing จึงมีผลมากกว่าส่วนที่เกิดจากโหลด ซึ่งเมื่อดูจากวงจรสมมูลย์จะพบว่าส่วนของ R_c และ X_m จะเป็นส่วนที่กำหนดค่าประกอบกำลัง แต่ทั้งนี้เนื่องจากค่า R_c มีค่ามากกว่าค่า X_m มาก ดังนั้นค่าประกอบกำลังจึงขึ้นอยู่กับค่า X_m ซึ่งค่า X_m เมื่อความถี่เปลี่ยนไปจะไม่ส่งผลต่อมุมระหว่างกระแสและแรงดันแต่จะมีผลต่อขนาดของกระแสเท่านั้น ดังนั้นค่าประกอบกำลังที่วัดได้ที่ความถี่ต่างๆ จึงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

2. การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า

2.1 จากกราฟแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) และ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive Power) จะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 อย่างมีแนวโน้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกันทั้ง 3 กราฟ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าประกอบกำลังที่ค่อนข้างคงที่ แม้ว่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากกราฟกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 กราฟ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

- ความถี่ที่ 30 – 50 Hz

จะพบว่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจากที่ได้เรียนมาว่า $S = \sqrt{3}V_{L-L}I_{L-L}$, $P = \sqrt{3}V_{L-L}I_{L-L} \times p.f.$ และ $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ จากสมการเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวคือ แรงดัน(V), กระแส(I) และ ค่าตัวประกอบกำลัง(p.f.) แต่จากการทดลองพบว่าค่าตัวประกอบกำลัง(p.f.)นั้นมีค่าค่อนข้างจะคงที่ทุกค่าความถี่ ดังนั้นในช่วงนี้ค่ากำลังไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรเพียง 2 ตัวคือ แรงดัน(V) และ กระแส(I) (ซึ่งส่วนมากเป็นกระแสกระตุ้น(Magnetizing Current)) ซึ่งจะสามารถแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าได้ดังตารางข้างล่างนี้

ความถี่หลักมูล	แรงดัน	กระแส	$\frac{V_N I_N}{V_{50} I_{50}}$	$\frac{S_N}{S_{50}}$	$\frac{P_N}{P_{50}}$	$\frac{Q_N}{Q_{50}}$
30	129.5	3.07	0.81	0.81	0.83	0.79
40	157.3	2.79	0.89	0.89	0.88	0.89
50	201.5	2.45	1.00	1.00	1.00	1.00

จากตารางข้างบนจะเห็นได้ว่าค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าจากการคำนวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองมาก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S), กำลังไฟฟ้าจริง(P) และ กำลังฟ้ารีแอกทีฟ (Q)

- ความถี่ที่ 50 – 100 Hz

ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 Hz ขึ้นไปจนถึง 100 Hz นั้นค่ากำลังไฟฟ้าจะลดลงในช่วงแรกและค่อยๆ คงที่ขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งถ้าเราสังเกตก็จะเห็นได้ว่ากราฟของกำลังไฟฟ้านั้นคล้ายคลึงกับกราฟคุณสมบัติของกระแสขาเข้าสเตเตอร์มาก (ซึ่งส่วนมากเป็นกระแสกระตุ้น(Magnetizing Current)) ซึ่งเราทราบแล้วว่า $S = \sqrt{3}V_{L-L}I_{L-L}$, $P = \sqrt{3}V_{L-L}I_{L-L} \times p.f.$ และ $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ เมื่อในช่วงนี้ค่าแรงดัน (V) และค่าตัวประกอบกำลัง (p.f.) มีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 อย่างนั้นจึงขึ้นอยู่กับตัวแปรเพียงตัวแปรเดียวคือค่ากระแสขาเข้าสเตเตอร์ นั่นเอง

3. การวิเคราะห์ค่า % THD_f ของกระแสและแรงดัน

การทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์แบบ PWM กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะพบว่าจากการที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับแรงดันขาเข้า ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบ PWM นั้นแรงดันที่มอเตอร์ได้รับจะมีลักษณะไม่ใช่ไซน์ แต่จะมีความถี่ส่วนอื่นที่เรียกว่าฮาร์โมนิคปนเข้ามาด้วย ทั้งนี้การที่จะดูว่าแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดันที่มอเตอร์ได้รับนั้นมีฮาร์โมนิคปนมาเท่าไรสามารถดูได้จากค่า % THD_f ` ของแรงดัน โดยค่าที่แสดงจะเป็นผลรวมของฮาร์โมนิคต่อค่าของแรงดันที่ความถี่หลักมูล ซึ่งถ้าค่า % THD_f มีค่ามากแสดงว่าเกิดฮาร์โมนิคมาก โดยการที่เกิดฮาร์โมนิคของแรงดันมากจะทำให้เกิดฮาร์โมนิคของกระแสมากตามไปด้วย ซึ่งการดูว่าค่าฮาร์โมนิคของกระแสมีค่ามากเท่าใดสามารถดูได้จากค่า % THD_f ของกระแส

จากการทดลองเราพบว่าค่า % THD_f ของแรงดันจะมีค่าต่ำสุดเมื่อความถี่ของอินเวอร์เตอร์มากกว่า50 Hz ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากว่าที่ความถี่ต่ำกว่า 50 Hz นั้นลักษณะแรงดันที่เป็นแบบ PWM จะก่อให้เกิดฮาร์โมนิคมากกว่า คือลักษณะแรงดันที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็น DC นานกว่าที่ความถี่สูงๆ จึงทำให้เกิดฮาร์โมนิคมากกว่า และที่ความถี่มากกว่า 50 Hz นั้นค่าแรงดันมีค่าคงที่ดังนั้นค่า % THD_f จึงมีค่าคงที่ด้วย ทั้งนี้ที่ความถี่ 10 -40 Hz ซึ่งมีผลมาจากทอร์กบูสต์จะไม่ขอนำมาพิจารณา

และจากการทดลองพบว่าค่า % THD_f ของกระแสที่ความถี่ 50 – 100 Hz นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อความถี่มากขึ้นค่ากระแสที่ทำการวัดได้มีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยสามารถดูแนวโน้มได้จากกราฟกระแส ซึ่งมีผลทำให้ค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลมีค่าลดลงด้วยที่ความถี่สูงขึ้น แต่เนื่องจากค่า % THD_f ของแรงดันค่อนข้างคงที่ดังนั้นผลของฮาร์โมนิคที่ความถี่ 50 – 100 Hz จึงมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นเมื่อเป็นการเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิคกับค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลซึ่งมีค่าลดลงเรื่อยๆ จึงส่งผลให้ค่า % THD_f ของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดนสามารถสังเกตได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงจะค่าคล้ายกับอัตราเปลี่ยนแปลงของกราฟกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 5

ชื่อเรื่อง การศึกษากำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันซึ่งเกิดจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สภาวะต่างๆ

อุปกรณ์ที่ใช้

1. รถรางไฟฟ้า
2. เครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
3. Fuji Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE ขนาด 1.5 kW
4. Power Quality Analyzer (Fluke 43)
5. Notebook ซึ่งบรรจุโปรแกรม Fluke Viewer
6. ภาระโหลด (ถุงน้ำหนักถุงละ 10 กิโลกรัม) 18 ถุง
7. แหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส 220 V
8. สายไฟ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งรถรางไฟฟ้าบนราง
2. ทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆตาม Block Diagram รูปที่ 4.28
3. ทำการปรับอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 10 Hz โดยทำการทดลองบนรางตรงในสภาวะไร้ภาระโหลด(240 กิโลกรัม)
4. ทำการวัดและบันทึกค่าค่ากำลังไฟฟ้า P1, P2 และ S โดยใช้ Power Quality Analyzer (Fluke43) โดยทำการวัดในPower Mode แบบการวัดเดลต้า (ดูวิธีการวัดในภาคผนวก)
5. นำค่าที่วัดได้มาทำการคำนวณหาค่าประกอบกำลัง (Power Factor)
6. ทำการวัดและบันทึกค่ารูปสัญญาณกระแส และ แรงดันโดยการส่งข้อมูลจาก Power Quality Analyzer (Fluke43) มายังโปรแกรม Fluke Viewer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการวัดและบันทึกค่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบของรถรางไฟฟ้า
8. นำรูปสัญญาณกระแส และแรงดันที่ได้จากข้อ 5 มาหา spectrum ของสัญญาณโดยใช้โปรแกรม Fluke Viewer และทำการบันทึกค่า I_{Fund} I_{RMS} V_{Fund} V_{RMS} $\%THD_r$ $\%THD_f$ CF
9. คำนวณค่า Real Power โดยใช้ค่า V_{RMS} , I_{RMS} ที่ได้จาก spectrum ของสัญญาณ และนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่า Real Power ที่ได้จาก Power Quality Analyzer(Fluke43)
10. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3 ถึงข้อ 8 บนรางโค้งในสภาวะไร้ภาระโหลด
11. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3 ถึงข้อ 8 บนรางตรง และ โค้ง ในสภาวะรับภาระโหลด(500 กิโลกรัม)
12. ทำการเปลี่ยนความถี่เป็น 30 , 50 , 70 , 90 Hz และทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3 ถึงข้อ 10

หมายเหตุ – การทดลองนี้ได้ทำการปรับ Torque Boost ของอินเวอร์เตอร์ที่ 13 ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสในช่วงความถี่ต่ำมีค่าสูง

ตอนที่ 1 การทดลองสภาวะไม่มีโหลด (240 kg) ทางตรง และ ทางโค้ง

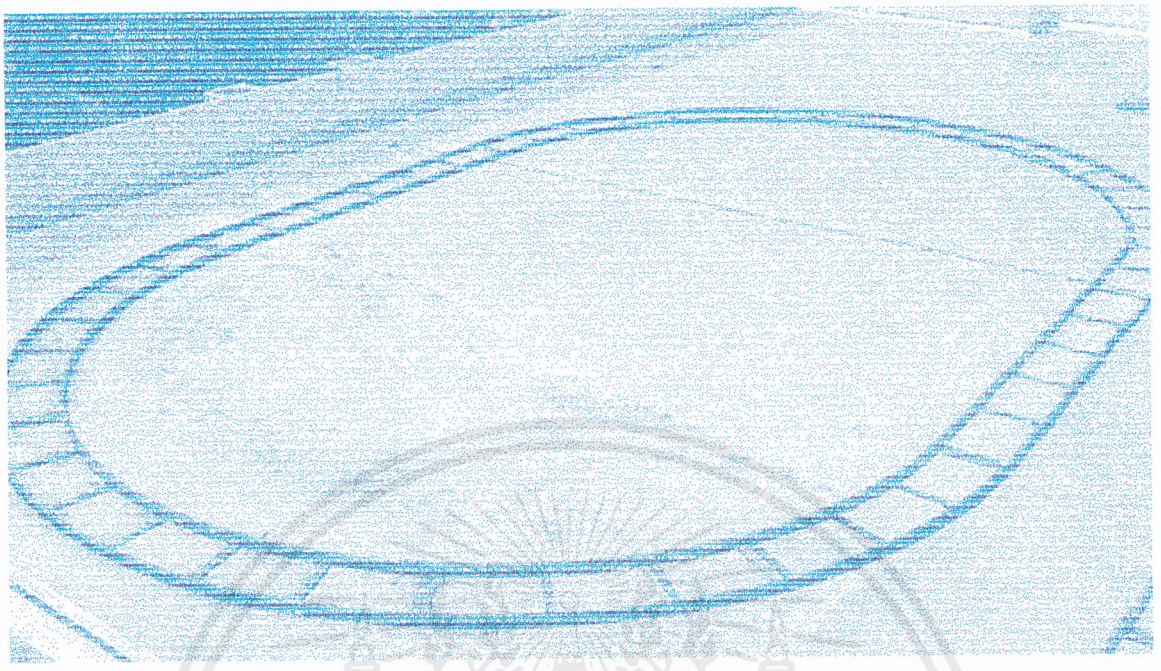
1. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 10 Hz
2. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 30 Hz
3. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz
4. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 70 Hz
5. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 90 Hz

ตอนที่ 2 การทดลองสภาวะรับโหลด (500 kg) ทางตรง และ ทางโค้ง

1. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 10 Hz
2. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 30 Hz
3. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz
4. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 70 Hz
5. การทดสอบการวัดกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 90 Hz

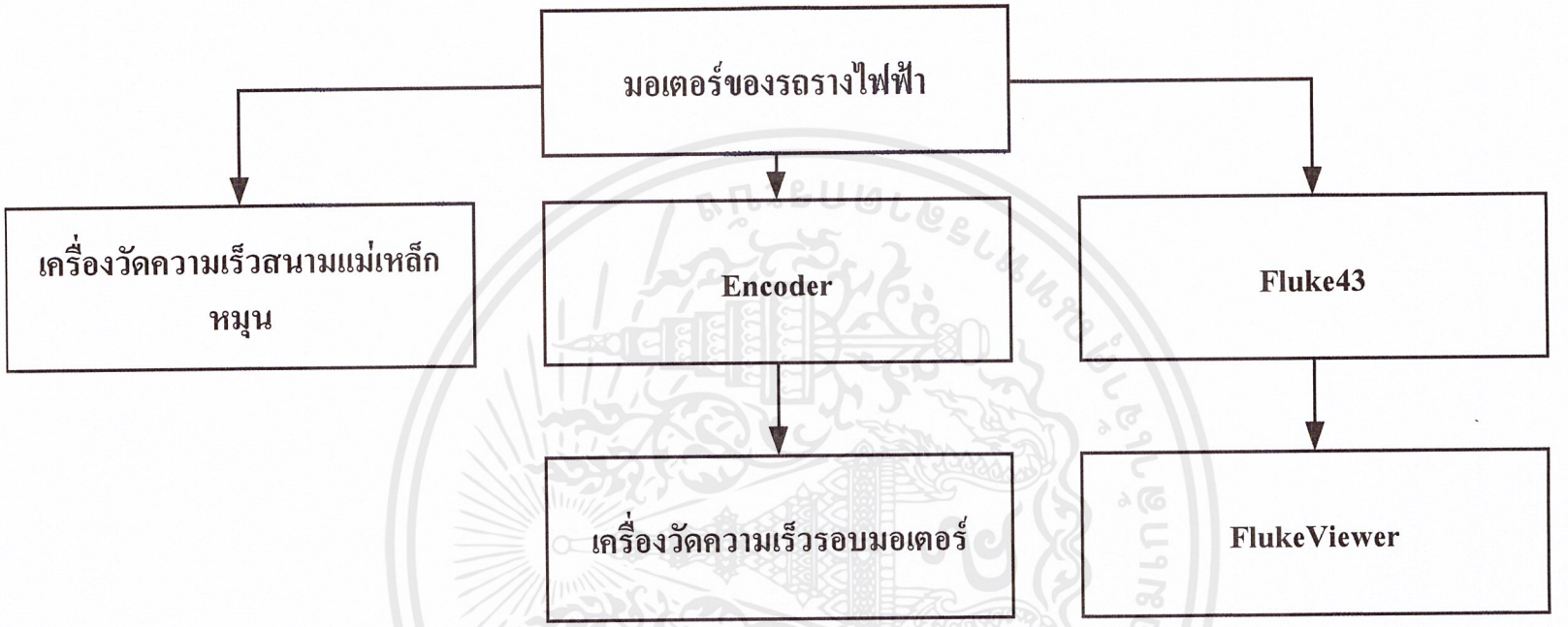
หมายเหตุ - ผลการทดลองโดยละเอียดสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ฉ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 รางที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 Block Diagram ของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเฉลี่ย

- ทางตรงไร้ภาระโหลด

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้า Fluke43 ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
10	-	-	-	-	-
30	29.9	353.33	140.00	460.00	0.62
50	-	440.00	220.00	623.33	0.61
70	-	356.67	80.00	413.33	0.61
90	90.5	393.33	40.00	420.00	0.60

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าเฉลี่ยการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.82	5.07	5.13	9.2	16.1	16.3	1.79
30	29.9	3.33	3.4	6.3	15.37	15.53	1.85
50	50.2	2.87	2.97	5.83	10.117	10.23	1.98
70	70.83	1.73	1.83	4.9	19.4	19.83	2.67
90	89.47	1.5	1.73	4.63	21.23	21.8	2.65

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.783	89	89.667	255	12.47	15.6	2.83
30	29.93	131.33	134.33	304.67	17.6	17.9	2.28
50	49.87	207.33	209.33	347.33	12.4	12.5	1.66
70	70.57	205.67	207.67	342	11.83	11.93	1.65
90	90.1	202.67	204.33	331.33	11.57	11.63	1.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

ความถี่	$V_{(fund)}$ **(V)**	$I_{(fund)}$ **(A)**	$p.f.$	S **(VA)**	P **(Watt)**	Q **(VAR)**
30	131.33	3.33	0.62	757.4759	469.64	594.313
50	207.33	2.87	0.61	1030.634	628.69	816.6739
70	205.67	1.73	0.61	616.2794	375.93	488.3411
90	202.67	1.5	0.6	526.5521	315.93	421.2426

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความถี่	**ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)**	**ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)**
10	300	291
30	903	893
50	1500	1497.33
70	2106	2098.67
90	2709	2690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ทางโค้งไร้ภาระโหลด**

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจาก Fluke43 ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
10	-	-	-	-	-
30	29.9	353.33	160.00	450.00	0.66
50	50.03	460.00	220.00	623.33	0.63
70	70.6	390.00	100.00	423.33	0.67
90	90.5	356.67	60.00	376.67	0.64

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.78	5	5.07	9.13	14.77	14.97	1.8
30	29.75	3.17	3.27	7.43	16.2	16.4	2.28
50	50.03	2.73	2.8	6.37	14.23	14.37	2.29
70	70.03	1.73	1.9	4.83	21.77	22.3	2.56
90	89.47	1.5	1.73	4.63	21.23	21.8	2.65

ตารางที่ 4.23 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.72	89	89.333	252.33	12.77	12.87	2.81
30	29.93	132.33	133.67	306	17.63	17.93	2.28
50	50.33	206.67	209	312.67	12.13	12.23	1.66
70	70.2	205.33	207.33	236.67	12.3	12.37	1.63
90	90.1	202.67	204.33	331.33	11.57	11.63	1.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.24 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

ความถี่	$V_{(fund)}$ **(V)**	$I_{(fund)}$ **(A)**	$p.f.$	S **(VA)**	P **(Watt)**	Q **(VAR)**
30	132.33	3.17	0.66	726.5712	479.54	545.8454
50	206.67	2.73	0.63	977.2388	615.66	758.9193
70	205.33	1.73	0.67	615.2606	412.22	456.7498
90	202.67	1.5	0.64	526.5521	336.99	404.5922

ตารางที่ 4.25 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความถี่	**ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)**	**ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)**
10	300	291.33
30	903	896.33
50	1500	1498.33
70	2106	2097.67
90	2700	2690.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ทางตรงรับภาระโหลด**

ตารางที่ 4.26 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจาก Fluke43 ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
10	-	-	-	-	-
30	29.97	370.00	170.00	456.67	0.68
50	49.97	456.67	210.00	623.33	0.62
70	70.0	416.67	100.00	466.67	0.64
90	90.5	406.67	40.00	420.00	0.61

ตารางที่ 4.27 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.73	4.93	5.03	9.07	15.87	16.07	1.8
30	29.82	3.23	3.33	7.43	18.13	18.47	2.25
50	49.57	2.73	2.77	6.37	13.17	13.27	2.3
70	69	1.97	2.07	5.1	20.4	20.9	2.45
90	93.5	1.67	1.87	4.63	21.4	21.8	2.49

ตารางที่ 4.28 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f	CF
10	9.78	88	89	251	12.47	12.57	2.82
30	29.69	131.67	134	310	17.47	17.73	2.32
50	49.9	207	209	350	11.77	11.83	1.68
70	70.53	204.33	207	332.67	11.37	11.43	1.61
90	90.73	202.67	204.67	326	11.73	11.83	1.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

ความถี่	V_{Fund}(V)	I_{Fund}(A)	PF	S(VA)	P (Watt)	Q(VAR)
30	131.67	3.23	0.68	736.631	500.91	540.1059
50	207	2.73	0.62	978.7992	606.86	767.9641
70	204.33	1.97	0.64	697.2026	446.21	535.7127
90	202.67	1.67	0.61	586.228	357.6	464.5272

ตารางที่ 4.30 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความถี่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
10	300	285
30	903	889.33
50	1500	1494.67
70	2106	2092.33
90	2709	2676

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทางโค้งรับภาระโหลด

ตารางที่ 4.31 แสดงค่าเฉลี่ยการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ความถี่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
10	-	-	-	-	-
30	29.87	363.33	200.00	460.00	0.71
50	50.3	570.00	230.00	690.00	0.67
70	-	443.33	120.00	470.00	0.69
90	90.45	510.00	50.00	513.33	0.63

ตารางที่ 4.32 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (Hz)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
10	9.63	4.8	4.9	9	15.17	15.33	1.84
30	30.02	3.2	3.27	6.63	15.93	16.17	2.03
50	50.13	2.97	3.07	5.9	16.73	16.97	1.91
70	72.83	1.93	2.2	5.43	19.37	19.87	2.47
90	92.17	2.23	2.47	5.57	18	18.27	2.26

ตารางที่ 4.33 แสดงค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ความถี่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (Hz)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
10	9.72	87.67	88.67	251	12.53	12.63	2.83
30	30	131.33	134	306	17.1	17.37	2.29
50	50.17	205.33	207.33	344.67	12.13	12.23	1.66
70	70.53	203.33	205	331.33	11.9	12	1.61
90	90.43	198.67	200.33	324.67	12.07	12.17	1.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 แสดงค่าต่างๆ ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ

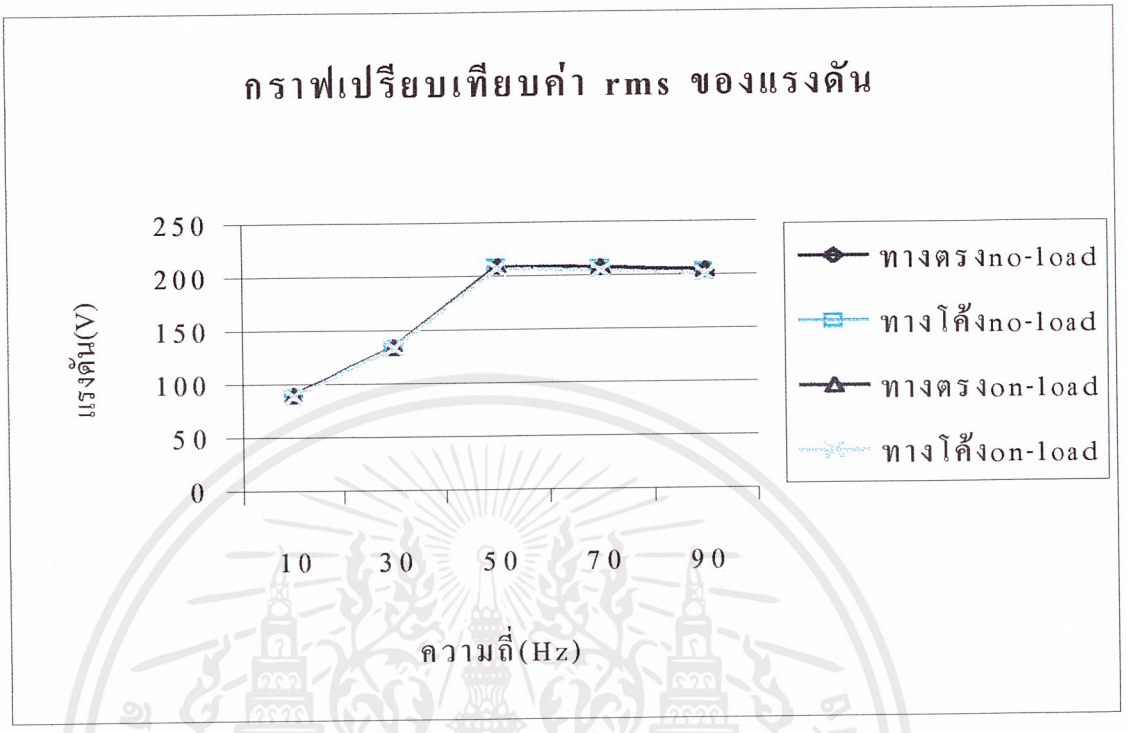
ความถี่	$V_{(fund)}$ **(V)**	$I_{(fund)}$ **(A)**	$p.f.$	S **(VA)**	P **(Watt)**	Q **(VAR)**
30	131.33	3.2	0.71	727.9047	516.81	512.5941
50	205.33	2.97	0.67	1056.257	707.69	784.1257
70	203.33	1.93	0.69	679.7033	469	491.9712
90	198.67	2.23	0.63	767.3576	483.44	595.9223

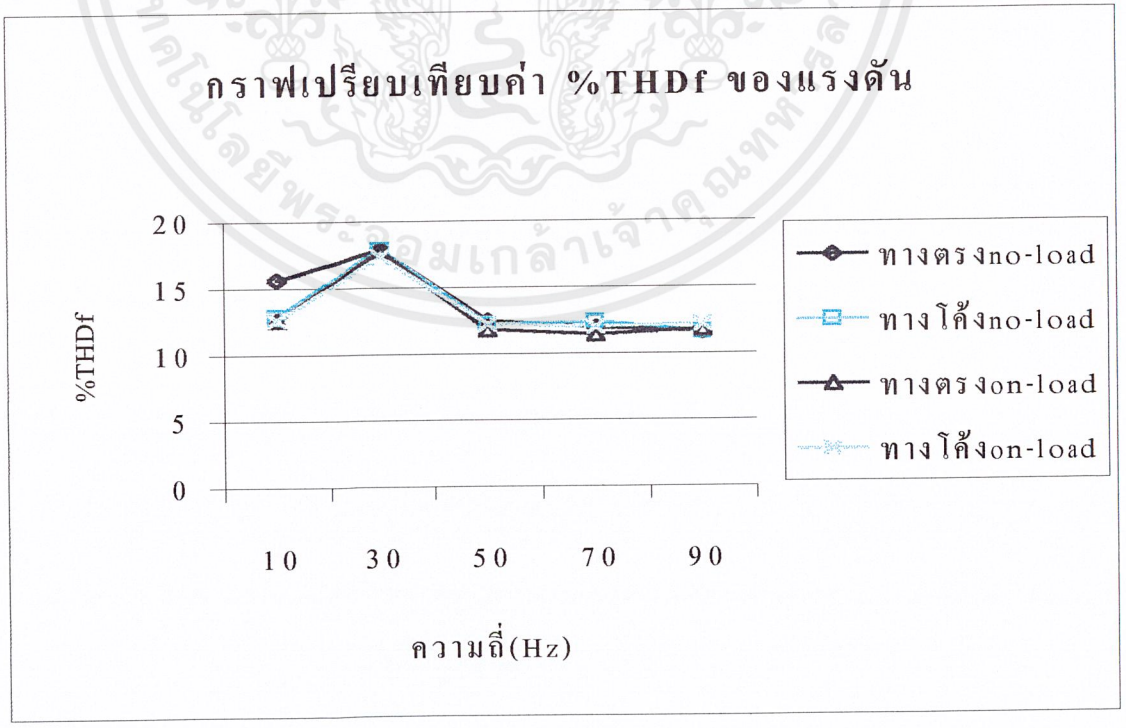
ตารางที่ 4.35 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความถี่	**ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)**	**ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)**
10	300	287.33
30	903	895
50	1500	1494
70	2106	2091.67
90	2709	2690.67

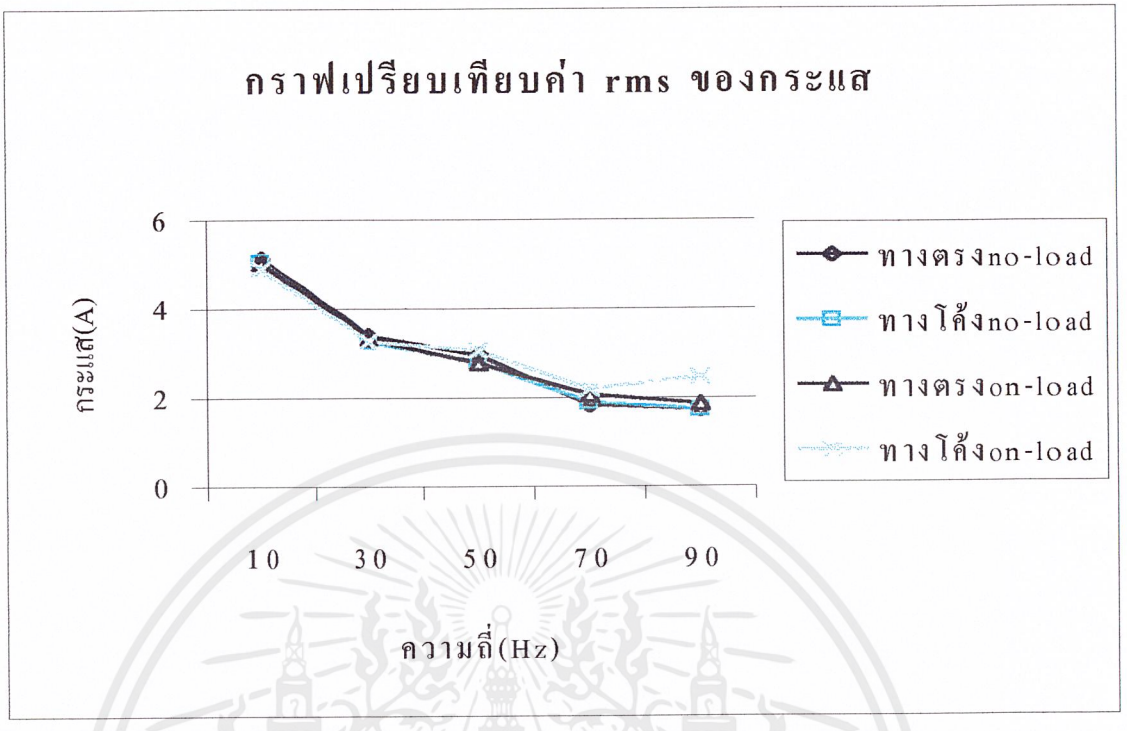
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

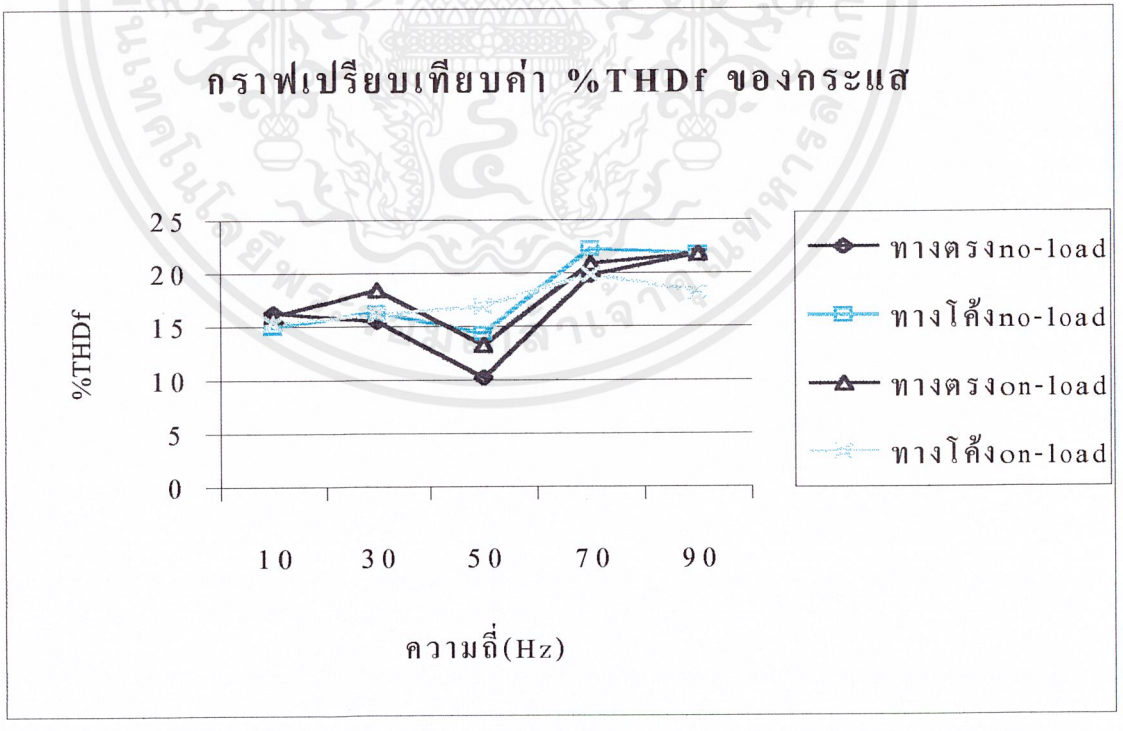
การเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สภาวะต่างๆ



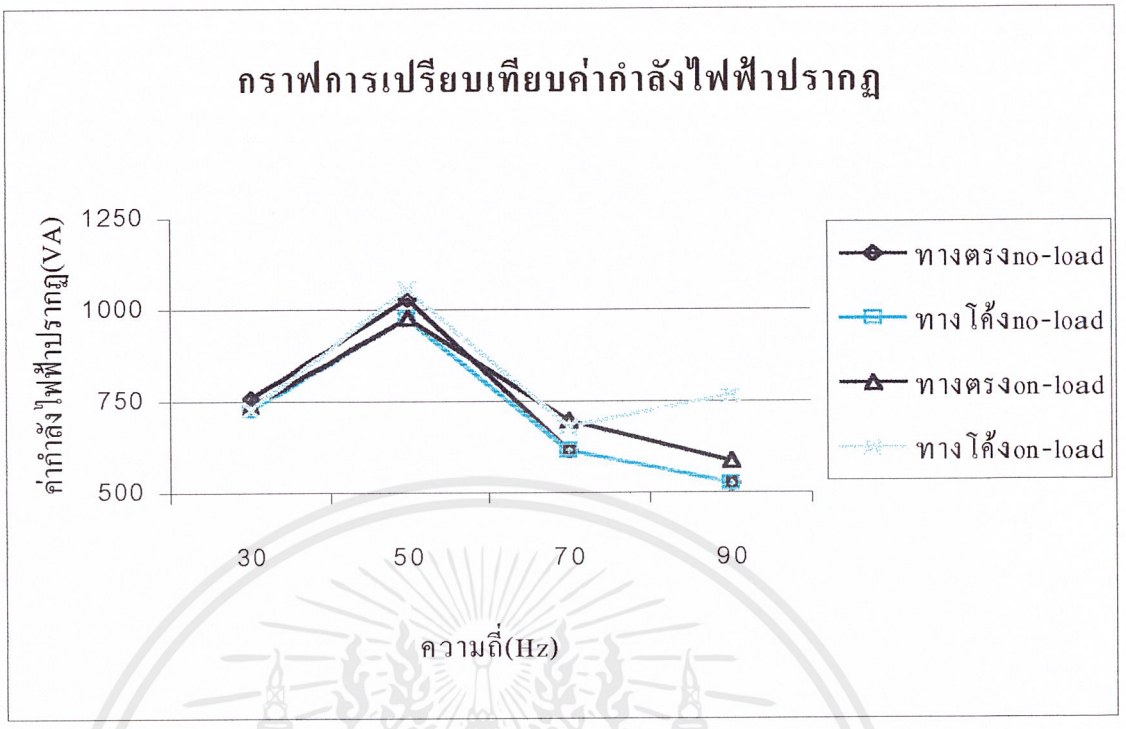


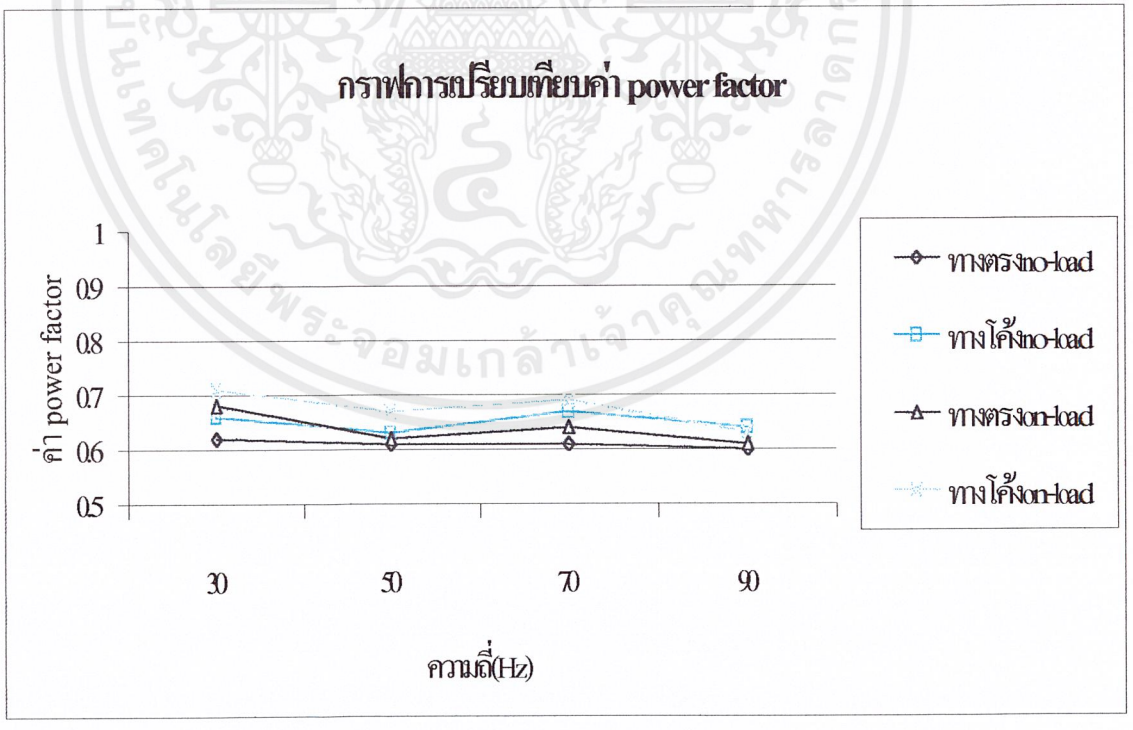
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



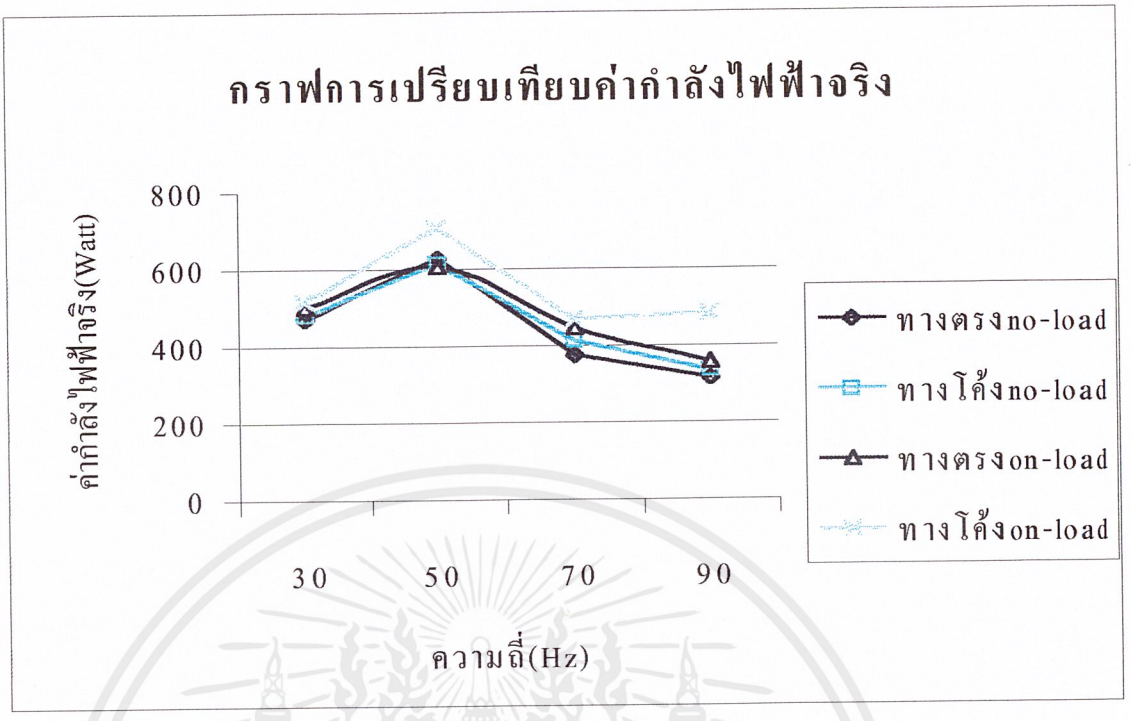


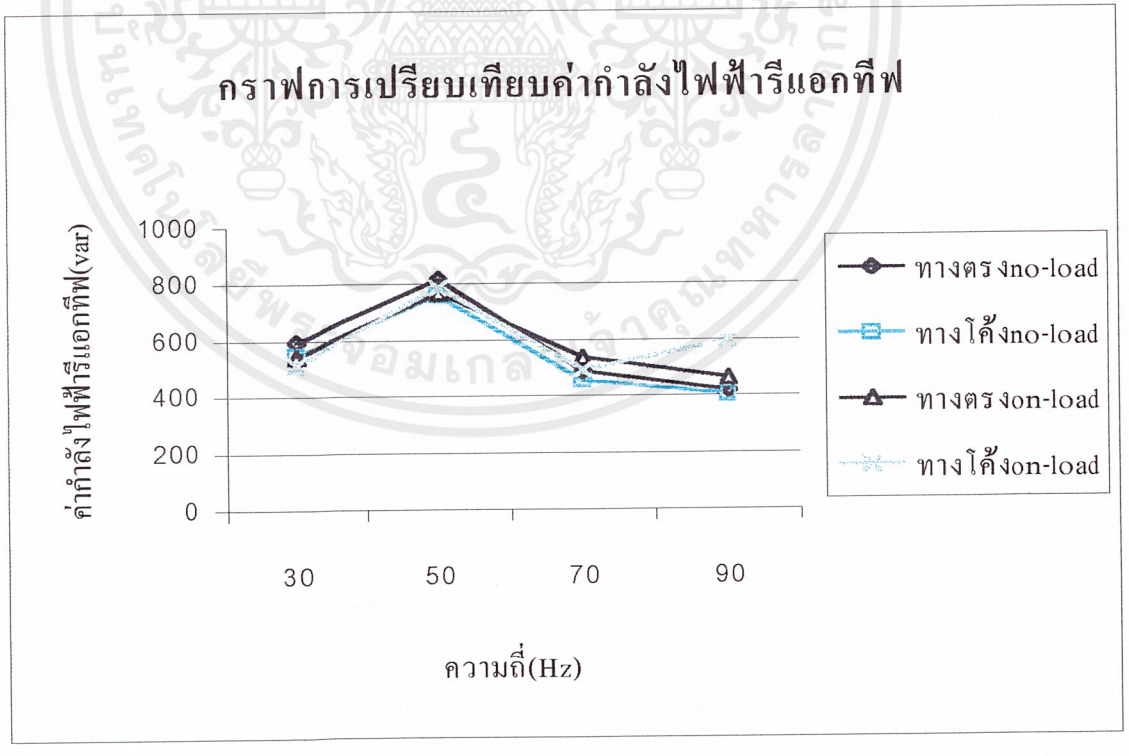
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายการทดลอง

1. การทดลองในการทดลองที่ 5 นี้เป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นการทดลองในสภาวะที่รถรางไฟฟ้าทำงาน 4 กรณี คือ

1. รถรางไฟฟ้าวิ่งทางตรงในสภาวะ No-load
2. รถรางไฟฟ้าวิ่งทางโค้งในสภาวะ No-load
3. รถรางไฟฟ้าวิ่งทางตรงในสภาวะ On-load
4. รถรางไฟฟ้าวิ่งทางโค้งในสภาวะ On-load

ทั้งนี้สภาวะ No-load คือสภาวะที่รถรางไฟฟ้าไม่ได้บรรทุกผู้โดยสาร แต่ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีการวัดค่าต่างๆ จึงจำเป็นต้องมีการบรรทุกผู้วัดด้วย ดังนั้นในสภาวะ No-load จึงมีค่าการบรรทุกเท่ากับ 240 กิโลกรัม โดยเป็นน้ำหนักของผู้วัด 2 คนรวม 120 กิโลกรัม และน้ำหนักรถ 120 กิโลกรัม และในสภาวะ On-load จะมีการเพิ่มค่าภาระอีก 260 กิโลกรัม ดังนั้นในสภาวะ On-load รถรางจะทำการรับภาระทั้งสิ้น 500 กิโลกรัม

โดยคุณสมบัติที่ทำการหาในการทดลองแบ่งออกเป็น 8 อย่างคือ

1. กราฟกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ที่ความถี่ต่างๆ
2. กราฟกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) ที่ความถี่ต่างๆ
3. กราฟกำลังไฟฟ้ารีแอคทีพ (Reactive Power) ที่ความถี่ต่างๆ
4. กราฟค่าประกอบกำลังที่ความถี่ต่างๆ
5. ค่า rms ของกระแสที่ความถี่ต่างๆ
6. ค่า % THD_f ของกระแสที่ความถี่ต่างๆ
7. ค่า rms ของแรงดันที่ความถี่ต่างๆ
8. ค่า % THD_f ของแรงดันที่ความถี่ต่างๆ

2. จากตารางการทดลองตารางที่ 1 ของทุกการทดลองเป็นการวัดเพื่อหาค่าประกอบกำลัง (Power Factor) โดยใช้ Power Quality Analyzer (Fluke 43) เป็นเครื่องมือวัด แต่ทั้งนี้ Fluke 43 มีข้อจำกัดในการวัดกำลังไฟฟ้า กล่าวคือ Fluke 43 สามารถวัดกำลังไฟฟ้าได้เพียงครั้งละ 1 เฟสเท่านั้น ดังนั้นในโหมดการวัดกำลังไฟฟ้า (Power Mode) จะสามารถทำการวัดกำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังได้เพียง 1 เฟสและการวัดต้องวัดเฟสเทียบกับนิวทรอลเท่านั้น จึงจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังที่ถูกต้อง แต่ทั้งนี้ในโครงงานเป็นการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีการต่อวงจรแบบเดลต้า ดังนั้นในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังจึงไม่สามารถทำได้โดยตรง ซึ่งก่อนการหาค่ากำลังไฟฟ้าของการต่อแบบเดลต้านั้น ต้องทำการหาค่าประกอบกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำก่อน โดยขั้นตอนการหาค่าประกอบกำลังนั้นสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก จ ซึ่งค่าที่ใช้ในการหาค่าประกอบกำลังนั้นสามารถดูได้จากตารางแรกของทุกการทดลอง นอกจากนี่ Fluke43 ยังมีข้อจำกัดในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าคือ จากการทดสอบการวัดกำลังไฟฟ้าจะพบว่าความถี่ต่ำสุดที่ Fluke 43 สามารถทำการวัดได้คือที่ 30 Hz

3. ตารางที่ 2 และ 3 ของทุกการทดลองเป็นการวัดค่ากระแสและแรงดันเพื่อนำไปใช้ประกอบกับค่าประกอบกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้า และเพื่อประโยชน์ในการนำกระแสและแรงดันที่ทำการวัดในแต่ละการทดลองไปใช้เพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดัน จึงต้องทำการวัดค่ากระแสและแรงดันด้วย Fluke43 แล้วทำการส่งข้อมูลของกระแสและแรงดันที่วัดได้ไปยังโปรแกรม Fluke Viewer ซึ่งการส่งผ่านข้อมูลจาก Fluke 43 ไปยังโปรแกรม Fluke Viewer สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ข โดยเมื่อข้อมูลที่โปรแกรม Fluke Viewer ได้รับนั้นจะแสดงผลในรูปของรูปคลื่น (ดูตัวอย่างรูปคลื่นการวัดได้ในการทดลองที่ 3) ทั้งนี้รูปคลื่นที่แสดงบนโปรแกรม Fluke Viewer นั้นสามารถนำไปวิเคราะห์ผลทางฟูเรียร์ได้ดังนี้คือ ค่า rms ของสัญญาณ ค่า rms ของสัญญาณที่ความถี่หลักมูล ค่า % THD_f ค่า % THD_r โดยค่าที่ได้จากการแปลงเป็นฟูเรียร์สามารถดูได้จากตารางที่ 2 และ 3 ของทุกการทดลอง ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันที่สภาวะการทำงานต่างๆ ได้

4. ผลการทดลองในข้อที่ 2 และ 3 จะนำมาใช้ประกอบในการหาค่ากำลังไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยค่า Apparent Power, Real Power และ Reactive Power โดยการหาค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากสูตรต่างๆ เหล่านี้

$$S = \sqrt{3} V_{L-L} I_{L-L}$$

$$P = \sqrt{3} V_{L-L} I_{L-L} \times p.f.$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. จากกราฟที่ได้จากการทดลองทั้ง 8 กราฟ จะพบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงของกราฟทั้ง 8 กราฟนั้นมีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองที่ 4 แต่ที่แตกต่างคือขนาดของกระแส ค่าประกอบกำลังและค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 อย่าง ค่า โดยสามารถวิเคราะห์แยกเป็นแต่ละกรณีได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 แรงดัน

เนื่องจากไม่ว่าที่สภาวะโหลดเท่าใด แรงดันที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากันตลอดที่ความถี่ต่างๆ ดังนั้นกราฟของแรงดันจากกรทดลองที่ 4 และ 5 จึงมีความคล้ายกันมาก โดยสามารถอ่านการวิเคราะห์กราฟแรงดันได้จากการวิเคราห์ในการทดลองที่ 4

1.2 กระแส

กระแสมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4 แต่ที่แตกต่างคือขนาดของกระแส โดยค่าขนาดของกระแสจะมีค่ามากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 4 จะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก กล่าวคือที่ทุกความถี่ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 แอมป์ ดังนั้นจากการวิเคราะห์การทดลองที่ 4 ซึ่งพบว่า กระแสที่วัดได้มีผลมาจาก Magnetizing Current มากกว่ากระแสจากโรเตอร์ที่เกิดจากโหลด โดย Magnetizing Current มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.8 แอมป์ ดังนั้นเมื่อกระแสโรเตอร์เพิ่มขึ้นอีก 0.5 แอมป์ของกระแสโรเตอร์ตอนไร้ภาระโหลดจึงยังไม่สามารถทำให้ผลของกระแสที่ไหลเข้าที่สเตเตอร์มีแนวน้มตามกระแสโหลดได้ ทั้งนี้จากการเพิ่มภาระเป็น 500 กิโลกรัม แต่ผลการทดลองยังออกมาตามแนวโน้มของ Magnetizing Current เนื่องมาจากการออกแบบให้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 แรงม้าซึ่งเป็นการออกแบบที่เกินความจำเป็น ดั้งนั้นเมื่อมีการรับภาระที่ 500 กิโลกรัม จึงไม่ส่งผลต่อกระแสโรเตอร์นัก

1.3 ค่าประกอบกำลัง(Power Factor)

จากกราฟการทดลองที่ 5 ของกราฟค่าประกอบกำลังเมื่อเทียบกับกราฟค่าประกอบกำลังในการทดลองที่ 4 ปรากฏว่ามีแนวโน้มเดียวกัน คือมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ที่แตกต่างจากการทดลองที่ 4 คือ ค่าประกอบกำลังจะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เมื่อมีการทำงานที่ภาระเพิ่มมากขึ้นค่าประกอบกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

1.4 ค่ากำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณากราฟค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 จะพบว่ามีแนวโน้มเดียวกับการทดลองที่ 4 แต่มีขนาดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสและค่าประกอบกำลังแต่ค่าแรงดันที่คงที่จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนยาดของกำลังทั้ง 3 เมื่อเทียบกับการทดลองที่ 4

1.5 การวิเคราะห์ค่า % THD_f ของกระแสและแรงดัน

เมื่อพิจารณากราฟของ % THD_f ของกระแสและแรงดันจะพบว่ามีค่าแนวโน้มที่ไปในแนวทางเดียวกันกับการทดลองที่ 4 โดยค่าที่ได้ของทั้ง 2 การทดลองมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้สามารถดูการวิเคราะห์ได้จากการทดลองที่4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและวิจารณ์

สรุปผลการทำงานโครงงาน

การทำโครงงานนี้เป็นการศึกษากำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าโดยดูผลของกำลังไฟฟ้า กระแส และแรงดันที่ไหลเข้าในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นส่วนขับเคลื่อนหลักของรถรางไฟฟ้า โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะระบบกำลังไฟฟ้า กระแสและแรงดันมาจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ซึ่งมีผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดัน โดยผลจากการทดลองพบว่า ในกรณีที่ภาระของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าไม่มากนักไม่สมควรจะมีการตั้งค่าทอร์กบูสสูงมากนัก เพราะจะมีผลทำให้ค่ากระแสที่ความถี่ต่ำมีค่าสูงเกินไป ซึ่งในโครงงานนี้มีการตั้งทอร์กบูสไว้ที่ 13 จาก 16 ระดับ จึงมีผลให้กระแสที่ความถี่ต่ำๆ มีค่าสูงมาก ซึ่งผลการทดลองการวัดกำลังไฟฟ้า ค่าประกอบกำลัง กระแสและแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมทั้งการวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของกระและแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

ในส่วนของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พบว่าเครื่องมือวัดความเร็วรอบของมอเตอร์มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้ Tacho meter กล่าวคือมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าที่ Tacho meter อ่านได้ไม่เกิน 0.5% แต่ทั้งนี้ความสามารถที่ด้อยกว่า Tacho meter คือไม่สามารถตอบสนองต่อความเร็วที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว โดยความเร็วในการตอบสนองเร็วสุดอยู่ที่ 0.1 วินาที แต่ทั้งนี้เนื่องจากต้องทำงานร่วมกับเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งมีความถี่ในการทำงานต่ำกว่าเครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์จึงทำให้ความเร็วสูงสุดของเครื่องมือวัดความเร็วรอบมอเตอร์อยู่ที่ 2 วินาที ในส่วนของเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะมีค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับการคำนวณที่ประมาณไม่เกิน 0.35% ซึ่งถือว่าทำงานได้ดีในระดับที่ใช้ในการทดลองได้

วิจารณ์ผลการทำโครงงานและแนวทางแก้ไข

จากการทำโครงงานได้พบอุปสรรคและปัญหามากมาย โดยสามารถแยกอธิบายได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

ปัญหาและแนวทางแก้ไขเกี่ยวกับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้า

1. เนื่องจากในการทำโครงงานภาระสูงสุดที่รถรางไฟฟ้าได้รับคือ 500 กิโลกรัมแต่จากการที่รถรางไฟฟ้าได้มีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีขนาด 2 แรงม้า ซึ่งเป็นการใช้มอเตอร์ที่ขนาดเกินความจำเป็น(Over Size)ทำให้สภาวะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำตลอดการทำโครงงานนี้ยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในสภาวะกระตุ้นอยู่ ซึ่งทำให้ค่ากระแสที่ไหลเข้าสเตเตอร์มีผลจาก Magnetizing มากกว่ากระแสที่ไหลเข้าโรเตอร์หรือกระแสที่เกิดจากภาระ ดังนั้นผลการทดลองในสภาวะรถรางไฟฟ้าทำงานตัวเปล่ากับสภาวะที่รถรางไฟฟ้าทำงานที่ภาระเต็มที่ ซึ่งภาระเต็มที่ของการทำโครงงานนี้อยู่ 500 กิโลกรัม โดยการทดลองไม่สามารถทำการเพิ่มภาระมากกว่านี้ได้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านโครงสร้างของตัวถังรถรางไฟฟ้าและโครงสร้างของรางที่รับภาระได้จำกัด ซึ่งเมื่อมีการเพิ่มภาระมากกว่า 500 กิโลกรัม ดังนั้นในการทดลองของโครงงานและผลสรุปของโครงงานนี้จึงเป็นการทดลองรถรางไฟฟ้าในสภาวะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังอยู่ในสภาวะกระตุ้นทั้งสิ้น ไม่สามารถทำการเพิ่มภาระเพื่อทดลองในสภาวะรถรางไฟฟ้ารับภาระได้เต็มความสามารถของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โดยมีแนวทางแก้ไขเพื่อให้สามารถทดลองในสภาวะรับภาระเต็มที่ได้โดยการทำการเปลี่ยนการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นแนวทางในการทดลองของผู้ที่สนใจต่อไป

2. เนื่องจากการทำงานของเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือ Power Quality Analyzer (Fluke 43) ซึ่งมีข้อจำกัดหลายอย่างคือไม่สามารถวัดกำลังไฟฟ้าและค่าประกอบกำลังของการต่อมอเตอร์แบบเดลต้าได้โดยตรงทำให้การทดลองในแต่ละการทดลองค่อนข้างที่จะไม่อยู่ในสภาวะเดียวกัน เช่น การทดลองเพื่อวัดค่าประกอบกำลังซึ่งต้องมีการใช้ Fluke43 วัด 2 ครั้งจึงจะทำการคำนวณหาค่าประกอบกำลังไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ในการทดลองมี Fluke43 เพียงเครื่องเดียวทำให้ต้องแบ่งการวัดออกเป็น 2 ครั้งทำให้ค่าที่วัดได้ไม่อยู่ในเวลาเดียวกัน เพียงแต่มีค่าใกล้เคียงเท่านั้น

แนวทางแก้ไขคือทำการจัดหา Fluke43 มาใช้ในการทดลองอีกเครื่องหนึ่ง

3. เนื่องจากโครงสร้างของรถรางไฟฟ้าและรางไม่ได้ออกแบบเพื่อทำการรับภาระมากนัก ทำให้ในการทดลองที่ภาระมากๆ จะมีผลต่อโครงสร้างอย่างมาก โดยปัญหาที่พบมากที่สุดคือปัญหาหารตกรางของรถรางไฟฟ้า เพลาที่เชื่อมต่อมอเตอร์กับล้อรถหลุด และปัญหาจุดเชื่อมของรางเกิดการแตกหักทำให้ตลอดการทดลองที่ภาระมากๆ ต้องมีการซ่อมในส่วนของรถและรางอยู่เป็นระยะ ทำให้การทดลองที่ตั้งเป้าไว้ไม่เสร็จทันเวลาที่กำหนด

โดยมีแนวทางแก้ไขเพื่อให้สามารถทดลองในสภาวะรับภาระเต็มที่ได้โดยการทำการเปลี่ยนขนาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นแนวทางในการทดลองของผู้ที่สนใจต่อไป

4. เนื่องจากการวัดค่ากระแสและแรงดัน โดยยังสามารถนำค่าที่วัดได้ไปใช้ในการวิเคราะห์หาความผิดเพี้ยนได้นั้นต้องทำการส่งผ่านข้อมูลจากเครื่อง Fluke 43 มายังโปรแกรม Fluke Viewer ซึ่งเป็นโปรแกรมที่อยู่บนคอมพิวเตอร์ แต่ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีการส่งผ่านข้อมูลกันจึงทำให้ไม่สามารถวัดผลการทดลองด้อยย่างตอเนื่องนัก ซึ่งความเร็วสูงสุดในการวัดคือ 4 วินาที ซึ่งที่ความเร็วนี้จะมีผลต่อการวัดค่าที่ความเร็วของรถรางสูงๆ ทั้งนี้เนื่องจากต้องทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้า กระแส และแรงดันพร้อมกันเพื่อให้จุดที่ทำการวัดเป็นจุดเดียวกัน แต่ด้วยข้อจำกัดจึงทำให้จุดที่ทำการวัดกระแส/แรงดัน กับจุดการวัดกำลังไฟฟ้าต่างกันอยู่ที่ประมาณ 1 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้ไขคือทำการจัดหา Fluke43 มาใช้ในการทดลองอีกเครื่องหนึ่ง เพื่อทำการแยกวัดค่ากระแส/แรงดัน กับกำลังไฟฟ้า

ปัญหาและแนวทางแก้ไขเกี่ยวกับเครื่องมือวัดความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1. เนื่องจากการทำงานร่วมกับมอเตอร์ที่มีการต่อแบบเดลต้าทำให้ไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการต่อลง ซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาคือพยายามออกแบบลายวงจรให้มีกราวน์ลูปน้อยที่สุด และออกแบบวงจรกรองความถี่ที่มีคุณภาพ รวมทั้งทำการแยกกราวน์ของสัญญาณให้มากที่สุด

2. เนื่องการทำซี่เอนโคดเดอร์เป็นการทำด้วยมือจึงทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับความกว้างของสัญญาณที่เกิดจากซี่เอนโคดเดอร์ ซึ่งแนวทางแก้ปัญหาคือออกแบบโปรแกรมให้ทำการคำนวณโดยใช้จำนวนรูปคลื่นที่นับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

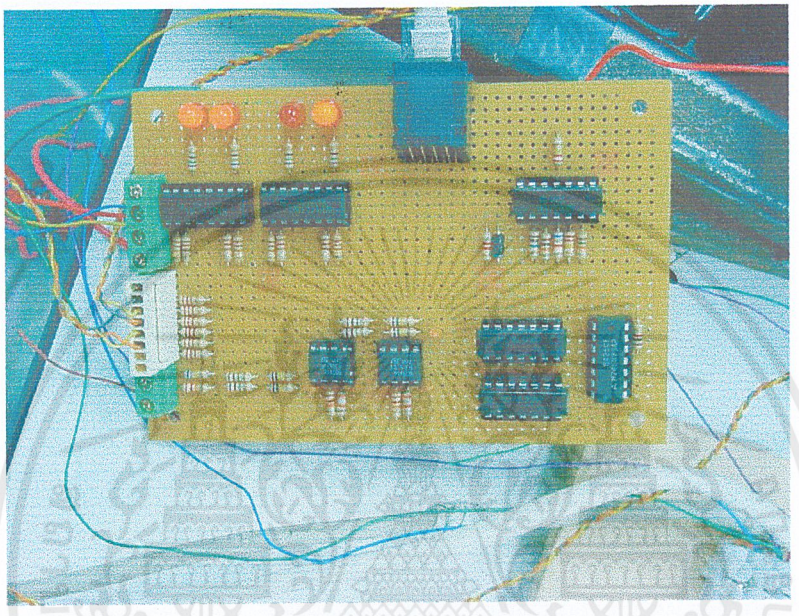
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ประมวลภาพชิ้นงานและการทำงาน โครงงาน 1 และ โครงงาน 2

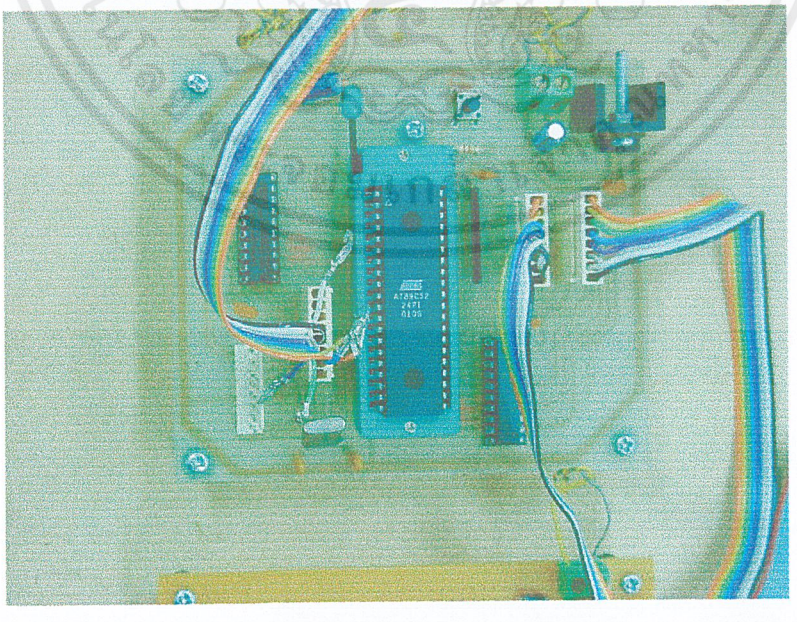
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ประมวลภาพชิ้นงานและการทำงาน โครงงาน 1 และ โครงงาน 2

1. ประมวลภาพชิ้นงานและการทำงาน โครงงาน 1

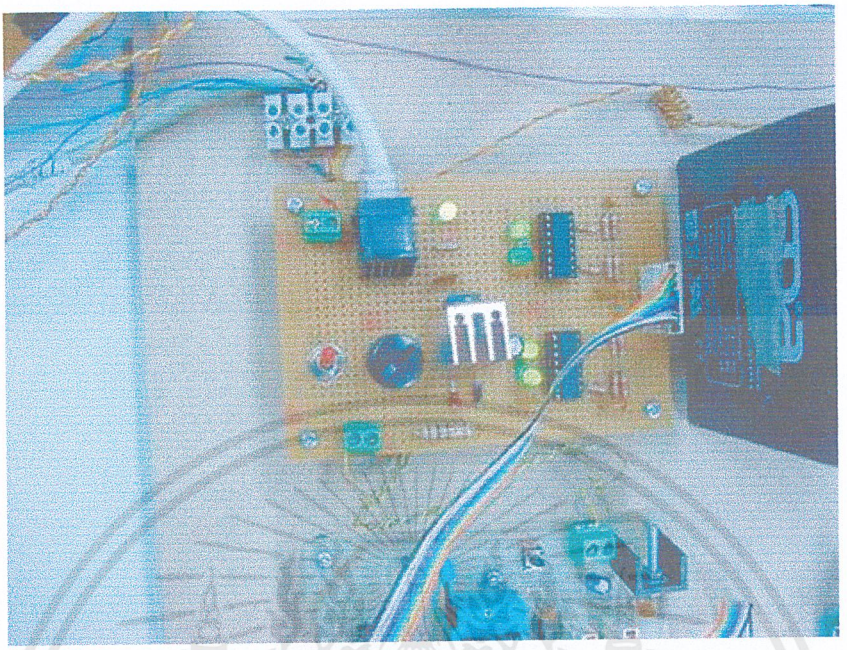


รูปที่ ก1 รูปวงจร Zero Crossing Detector และ วงจร Driver

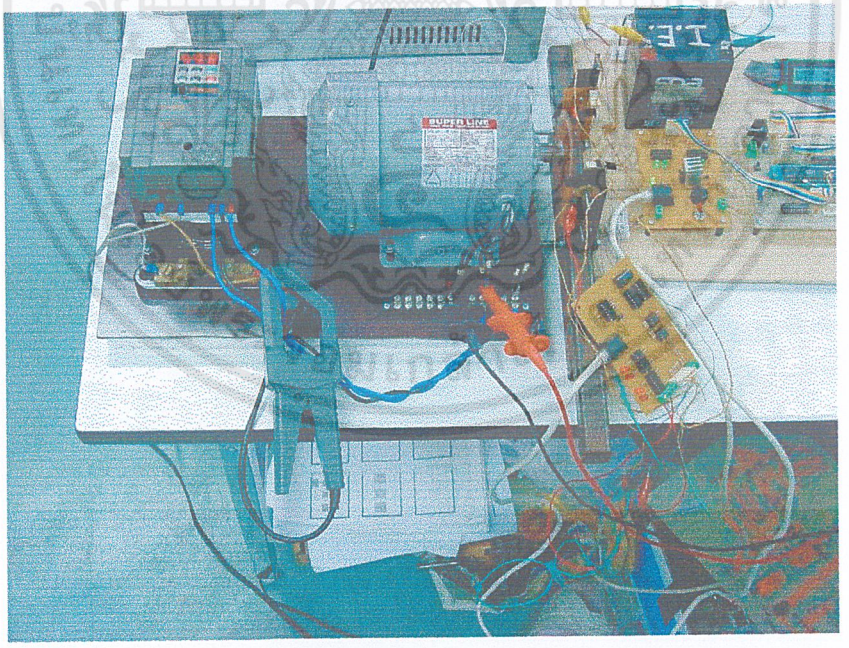


รูปที่ ก2 รูปวงจร Board ใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



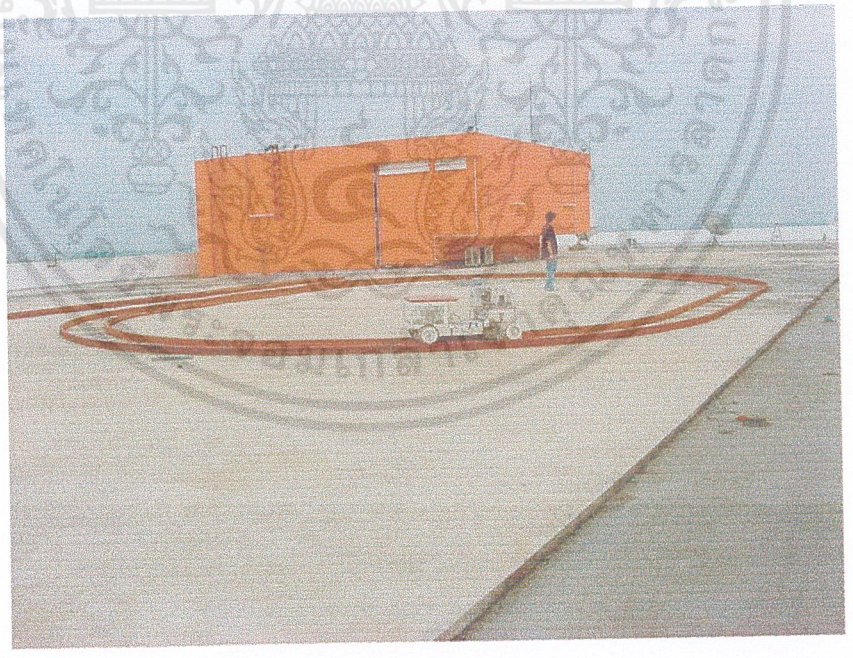
รูปที่ ก3 รูปวงจร Receiver



รูปที่ ก4 รูปการต่อวงจรต่างๆร่วมกัน เพื่อทำการวัด

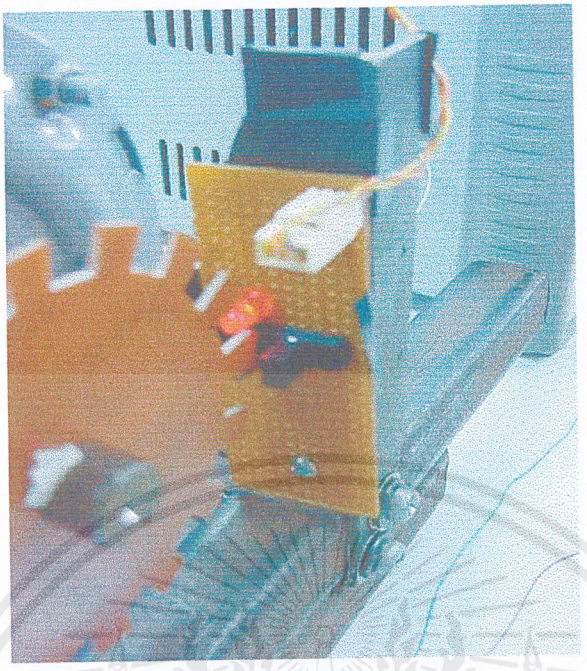
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก5 รูปวงจรสมบูรณ์ใช้ในการทดลองและเก็บค่า



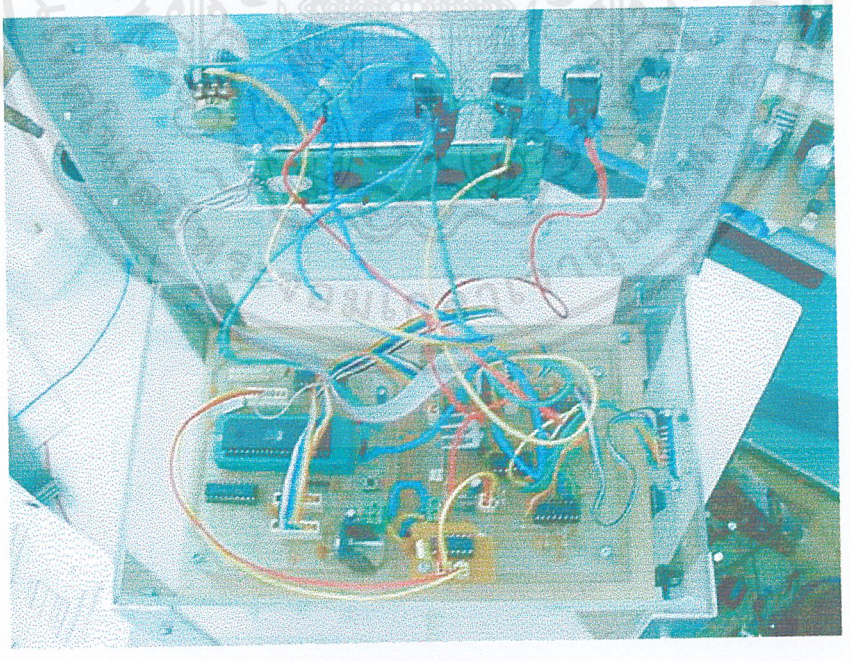
รูปที่ ก6 รูปรางรถที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



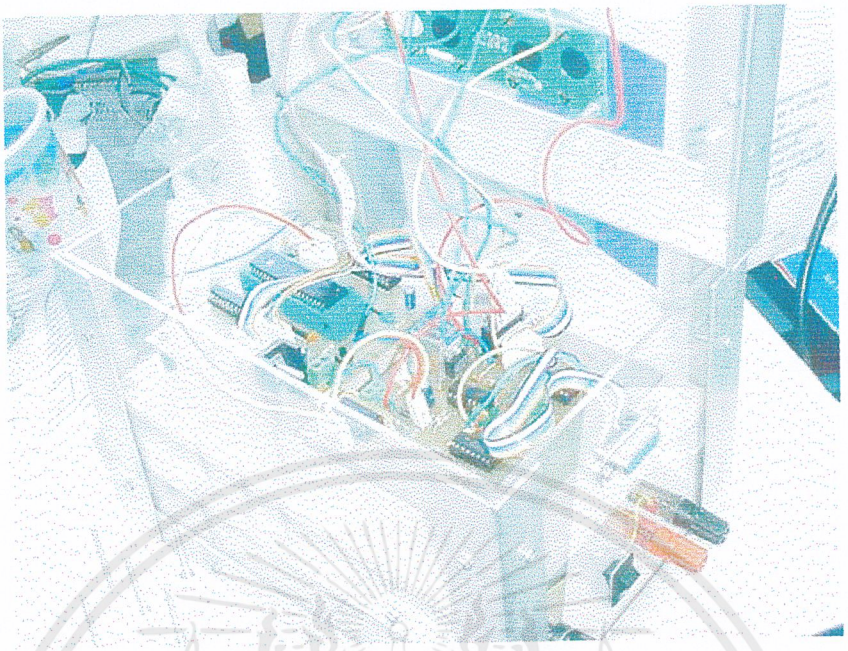
รูปที่ ก7 การต่อ Optical Interrupted Switch เพื่อส่งสัญญาณมาให้ ตัวประมวลผล

2. ประมวลภาพชิ้นงานและการทำงาน Project 2

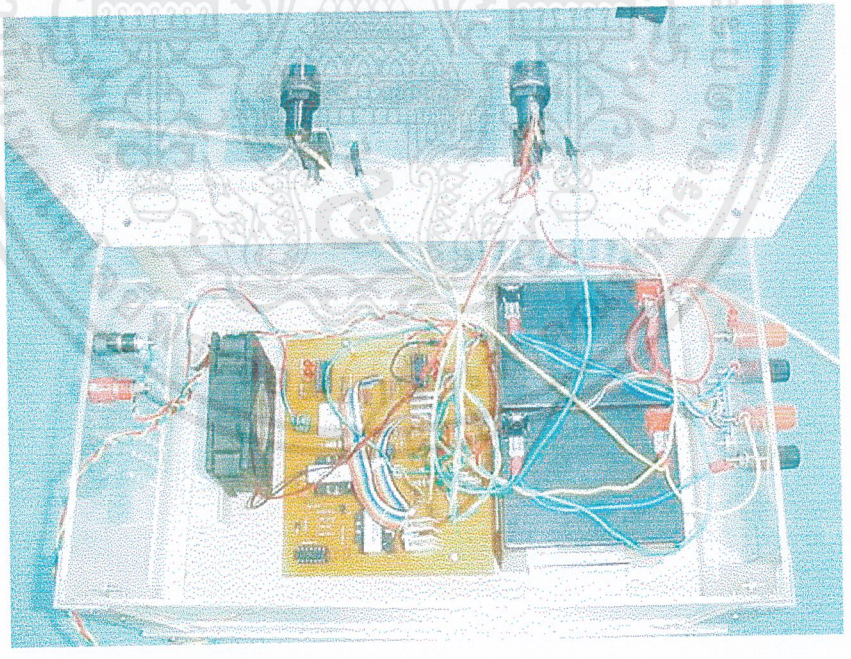


รูปที่ ก8.1 รูปวงจร Board ใช้งาน AT89C52 ต่อร่วมกับวงจร Driver และ Schmitt Trigger เมื่อบรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

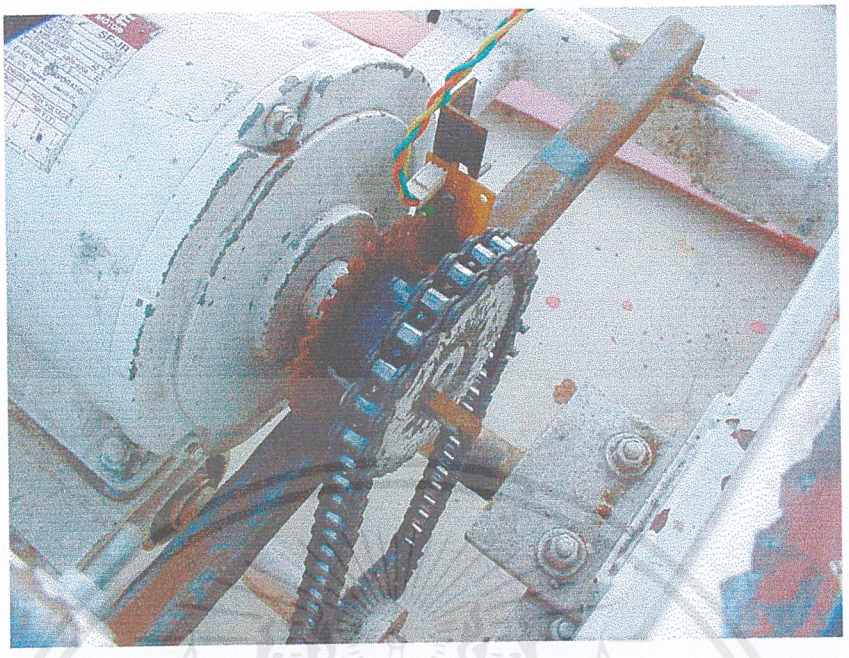


รูปที่ ก8.2 รูปวงจร Board ใช้งาน AT89C52 ต่อร่วมกับวงจร Driver และ Schmitt Trigger เมื่อบรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว

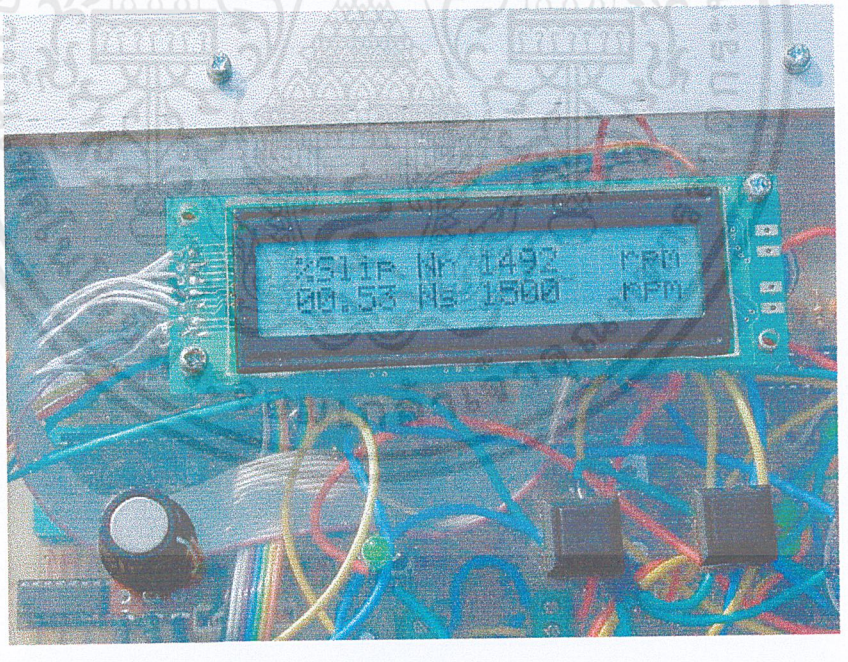


รูปที่ ก9 รูปวงจรส่วนของ Opto Interrupted Switch, Filter และ Driver เมื่อบรรจุลงกล่องเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

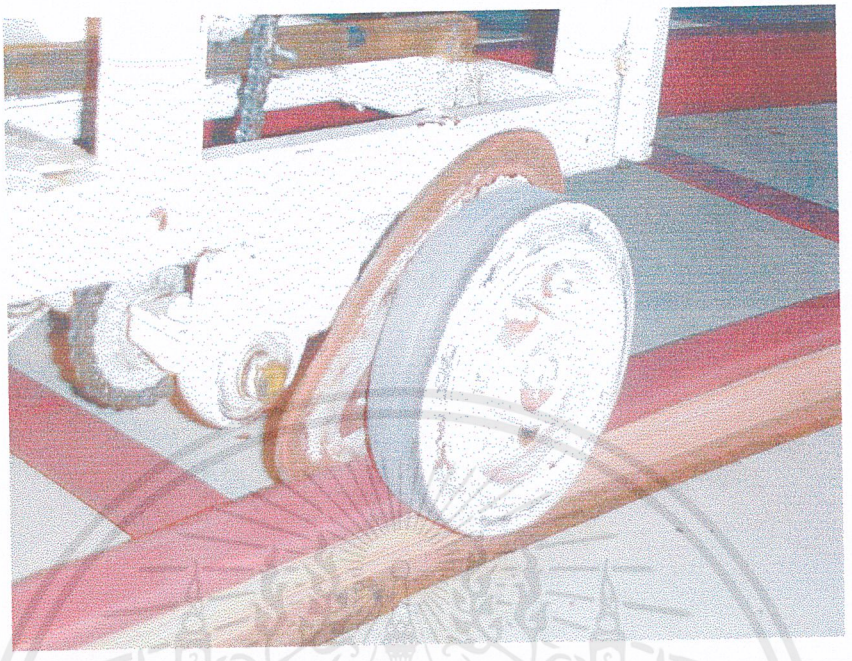


รูปที่ ก10 รูปการติดตั้งแผ่น Encoder และ Opto Interrupted Switch ในการทดลองจริง



รูปที่ ก11 รูปหน้าจอแสดง Nr, Ns และ เปอร์เซ็นต์ Slip ขณะ มอเตอร์หมุนที่ความถี่ 50 Hz

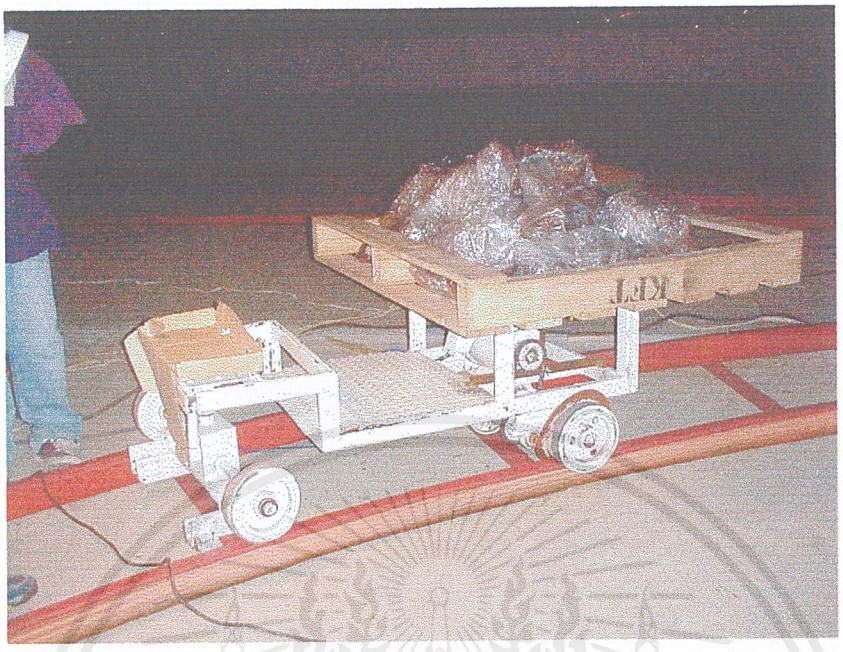
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก12.1 รูปจานล้อบังคับทิศทางล้อหลังเบี้ยวเนื่องจากรับภาระโหลดมากเกินไป

รูปที่ ก12.2 รูปจานล้อบังคับทิศทางล้อหลังเบี้ยวเนื่องจากรับภาระโหลดมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก13 รูปรถรางไฟฟ้าขณะบรรทุกแม่เหล็ก 180 kg.

รูปที่ ก14 รูปบรรยากาศการทำงานปกติของ

The Power Analysis of an Electric Tram Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคำนวณและแสดงค่าความเร็วรอบ, ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน, ค่าเปอร์เซ็นต์สลิป และเวลาที่ใช้ในการวัดของอินดักชั่นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคำนวณและแสดงค่าความเร็วรอบ, ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน, ค่าเปอร์เซ็นต์สลิป และเวลาที่ใช้ในการวัดของอินดักชั่นมอเตอร์

```
; Program: Speed Measurement V1.0 Final Edition
; Copyright (C) 2001 EMC Laboratory
; Create By Opas Ungvisitwong 41014555 Room 4B

;***********************************************
; Define Ports
; Port0 = Input From Sensor, Start/Stop Switch
; Port2 = Output to LCD
;***********************************************

;***********************************************
; Define Port & Pin Name
;***********************************************
Mot_Dir     Bit   P0.4      ; Input from Motor Direction Circuit
LCD_En      Bit   P0.6      ; LCD Module Enable
LCD_Rs      Bit   P0.7      ; LCD Module Register Select
Start       Bit   P0.3      ; Start Switch

;***********************************************
; Define User Registers
;***********************************************
            Ds    8
Stacksys:   Ds    20

LCD_Addr    Equ   30h       ; For Keep LCD Address
LCD_Data    Equ   31h       ; For Keep LCD Data
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Num_Pulse_L   Equ   32h     ; For Keep Pulse Quantity From Sensor
Nrl           Equ   33h     ; For Keep Rotor Speed
Nsl           Equ   34h     ; For Keep Synchronous Speed
Intl          Equ   35h     ; Integer (Low Bit)
Fraction_L    Equ   36h
Inth          Equ   37h     ; Integer (High Bit)
Nrh           Equ   38h     ; For Keep Rotor Speed
Nsh           Equ   39h     ; For Keep Synchronous Speed
Total_Tl      Equ   3ah
Total_Th      Equ   3bh
Num_Pulse_H   Equ   3ch
Res_L         Equ   3dh
Res_H         Equ   3eh
Fraction_H    Equ   3fh

Drem16ul      Equ   40h
Drem16uh      Equ   41h
Dd16ul        Equ   42h
Dd16uh        Equ   43h
Dv16ul        Equ   44h
Dv16uh        Equ   45h
Dcnt16u       Equ   46h
Digit1        Equ   47h
Digit2        Equ   48h
Digit3        Equ   49h
Digit4        Equ   4ah

Mc16ul        Equ   4bh
Mc16uh        Equ   4ch
Mp16ul        Equ   4dh
Mp16uh        Equ   4eh
M16u0         Equ   4dh
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
M16u1       Equ   4eh
M16u2       Equ   4fh
M16u3       Equ   50h
Mcnt16u1    Equ   51h
Nr_L        Equ   52h
Nr_H        Equ   53h
Ns_L        Equ   54h
Ns_H        Equ   55h

;***********************************************
;Main Program
;***********************************************
Set_Org:    Org   0000h
            Ajmp  Initial

            Org   0003h
            Acall Stopscreen
            Reti

            Org   002bh
            Acall Increast
            Reti

Initial:    Mov   Sp,#Stacksys
            Mov   P0,#00111000b     ; Set P0.3 - P0.5 To Input
            Mov   P1,#11101111b     ; Do Not Use
            Mov   P2,#00000000b     ; Set P2 To Output To LCD
            Mov   P3,#00111111b     ; Do Not Use

Main:       Acall Init_LCD
            Setb  Ea
            Setb  Et2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Setb    Ex0
                Clr     It0

                Mov     LCD_Addr,#000h
                Acall   Set_Addr_LCD
                Mov     Dptr,#Title
                Acall   Wrline1_LCD          ; For First Line

                Mov     LCD_Addr,#040h
                Acall   Set_Addr_LCD
                Mov     Dptr,#Title1
                Acall   Wrline1_LCD          ; For Second Line

                Acall   Sett2
                Mov     Tmod,#01010101b      ; Set T0/T1 To Counter In 16 Bit Mode

Checkstart:     Jb      Start,$              ; Check Start Botton
                Setb    T2con.2              ; Start Timer2
Pulse_Counter:  Mov     R0,#00h
                Mov     Tl0,#00h
                Mov     Th0,#00h
                Mov     Tl1,#00h
                Mov     Th1,#00h

                Setb    Tr1                  ; Start T1
                Setb    Tr0                  ; Start T0
                Acall   LCD_Delay1875ms
                Clr     Tr0                  ; Stop T0
                Acall   LCD_Delay125ms
                Clr     Tr1                  ; Stop T1

Sett:           Mov     Num_Pulse_L,Tl0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Mov     Num_Pulse_H,Th0
                Acall   Cal_Speed
                Acall   Htod
                Mov     Nrl,Intl
                Mov     Nrh,Inth

                Mov     Num_Pulse_L,Tl1
                Mov     Num_Pulse_H,Th1
                Acall   Cal_Speed1
                Acall   Htod
                Mov     Nsl,Intl
                Mov     Nsh,Inth
                Acall   Hex2LCD0
                Acall   Hex2LCD1
                Acall   Find_Slip
                Acall   Wr_Slip
                Jmp     Pulse_Counter

;************************************************
; Convert Time to LCD
;************************************************
Stopscreen:     Clr     T2con.2
                Acall   LCD_Delay2s
                Acall   LCD_Delay1s
                Acall   LCD_Clr
                Mov     LCD_Addr,#000h
                Acall   Set_Addr_LCD
                Mov     Dptr,#Title2
                Acall   Wrline1_LCD

Time2LCD:       Mov     LCD_Addr,#0ch
                Acall   Set_Addr_LCD
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Mov     A,Total_Th
                Mov     B,#100
                Div     Ab
                Add     A,#30h
                Cjne    A,#30h,Time2LCD_1
                Mov     A,#' '

Time2LCD_1:     Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     A,B
                Mov     B,#10
                Div     Ab
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     A,B
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Acall   LCD_Delay2s
                Jmp     $

;************************************************
; Set Timer2
;************************************************
Sett2:          Mov     T2con,#00h          ; Set Mode 16 Bit Counter Auto  Reload
                Mov     Total_Tl,#0ech      ; Ec = 236
                Mov     Total_Th,#00h       ; 256 - 236 = 20
                Mov     Rcap2l,#0b0h        ; Set 65536 - 15536 = 50000
                Mov     Rcap2h,#3ch         ; 50000*20 = 1 S
                Mov     Tl2,#0b0h
                Mov     Th2,#3ch
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Ret
;***********************************************
; Increase Total_T
;***********************************************
Increast:       Clr     C
                Mov     A,Total_Tl
                Add     A,#01
                Mov     Total_Tl,A
                Jnc     Cleartf2
                Inc     Total_Th
                Mov     Total_Tl,#0ech
Cleartf2:       Clr     T2con.7
                Clr     C
                Ret

;***********************************************
; Find Slip Routine
;***********************************************
Find_Slip:      Clr     C
                Mov     Digit1,#00
                Mov     Digit2,#00
                Mov     Digit3,#00
                Mov     Digit4,#00
                Mov     Res_L,#00
                Mov     Res_H,#00
                Clr     C
                Mov     A,Ns_L
                Subb    A,Nr_L
                Mov     Res_L,A
                Mov     A,Ns_H
                Subb    A,Nr_H
                Mov     Res_H,A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Mov     Mc16ul,Res_L
Mov     Mc16uh,Res_H
Mov     Mp16ul,#010
Acall   Mpy16u
Mov     Num_Pulse_L,M16u0
Mov     Num_Pulse_H,M16u1
Mov     Dv16ul,Ns_L
Mov     Dv16uh,Ns_H
Acall   Div16bit
Mov     Digit1,Intl

Mov     Mc16ul,Fraction_L
Mov     Mc16uh,Fraction_H
Mov     Mp16ul,#10
Acall   Mpy16u
Mov     Num_Pulse_L,M16u0
Mov     Num_Pulse_H,M16u1
Mov     Dv16ul,Ns_L
Mov     Dv16uh,Ns_H

Acall   Div16bit
Mov     Digit2,Intl

Mov     Mc16ul,Fraction_L
Mov     Mc16uh,Fraction_H
Mov     Mp16ul,#10
Acall   Mpy16u
Mov     Num_Pulse_L,M16u0
Mov     Num_Pulse_H,M16u1
Mov     Dv16ul,Ns_L
Mov     Dv16uh,Ns_H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Acall   Div16bit
                Mov     Digit3,Intl

                Mov     Mc16ul,Fraction_L
                Mov     Mc16uh,Fraction_H
                Mov     Mp16ul,#10
                Acall   Mpy16u
                Mov     Num_Pulse_L,M16u0
                Mov     Num_Pulse_H,M16u1
                Mov     Dv16ul,Ns_L
                Mov     Dv16uh,Ns_H

                Acall   Div16bit
                Mov     Digit4,Intl
                Ret

;***********************************************
; Multiply 16 Bit Routine
;***********************************************
Mpy16u:         Mov     Mp16uh,#00
                Mov     M16u3,#00h
                Mov     M16u2,#00h
                Mov     Mcnt16u1,#016
                Mov     A,Mp16uh
                Rrc     A
                Anl     A,#01111111b
                Mov     Mp16uh,A
                Mov     A,Mp16ul
                Rrc     A
                Mov     Mp16ul,A

M16u_1:         Jnc     Nosd8
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Mov     A,M16u2
                Clr     C
                Add     A,Mc16ul
                Mov     M16u2,A
                Mov     A,M16u3
                Addc    A,Mc16uh
                Mov     M16u3,A

Nosd8:          Mov     A,M16u3
                Rrc     A
                Mov     M16u3,A
                Mov     A,M16u2
                Rrc     A
                Mov     M16u2,A
                Mov     A,M16u1
                Rrc     A
                Mov     M16u1,A
                Mov     A,M16u0
                Rrc     A
                Mov     M16u0,A
                Djnz    Mcnt16u1,M16u_1
                Ret

;************************************************
; Div    16 Bit Routine
;************************************************
Div16bit:       Mov     Dd16ul,Num_Pulse_L
                Mov     Dd16uh,Num_Pulse_H
                Clr     C                       ;Clear Carry Flag
                Mov     Drem16ul,#00h           ;Clear Remainder
                Mov     Drem16uh,#00h
                Mov     Dcnt16u,#017            ;Initial Loop Counter
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Div1:   Mov   A,Dd16ul          ;Shift Left Dividend
        Rlc   A
        Mov   Dd16ul,A
        Mov   A,Dd16uh
        Rlc   A
        Mov   Dd16uh,A
        Djnz  Dcnt16u,Div2
        Mov   Intl,Dd16ul
        Mov   Fraction_L,Drem16ul
        Mov   Fraction_H,Drem16uh
        Ret

Div2:   Mov   A,Drem16ul    ;Shift Dividend Into Remainder
        Rlc   A
        Mov   Drem16ul,A
        Mov   A,Drem16uh
        Rlc   A
        Mov   Drem16uh,A
        Clr   C
        Mov   A,Drem16ul
        Subb  A,Dv16ul
        Mov   Drem16ul,A
        Mov   A,Drem16uh
        Subb  A,Dv16uh
        Mov   Drem16uh,A
        Jnc   Setcarry
        Mov   A,Drem16ul
        Add   A,Dv16ul
        Mov   Drem16ul,A
        Mov   A,Drem16uh
        Addc  A,Dv16uh
        Mov   Drem16uh,A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Clr     C
                Jmp     Div1
Setcarry:       Setb    C
                Jmp     Div1

;***********************************************
; Rotor Speed_Calculate Routine
;***********************************************
Cal_Speed:      Mov     Mc16ul,Num_Pulse_L
                Mov     Mc16uh,Num_Pulse_H
                Mov     Mp16ul,#01
                Acall   Mpy16u
                Mov     Intl,M16u0
                Mov     Inth,M16u1
                Mov     Nr_L,M16u0
                Mov     Nr_H,M16u1
                Ret

;***********************************************
; Synchronous Calculation Routine
;***********************************************
Cal_Speed1:     Mov     Mc16ul,Num_Pulse_L
                Mov     Mc16uh,Num_Pulse_H
                Mov     Mp16ul,#015
                Acall   Mpy16u
                Mov     Intl,M16u0
                Mov     Inth,M16u1
                Mov     Ns_L,M16u0
                Mov     Ns_H,M16u1
                Ret
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;************************************************
;         Routine Hex To Dec
;************************************************
;Change Hex To Dec
;In =  R7 R6 R5
;Out = R1 R2 R3 R4
;Reg = A,R0,R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7,Dptr
Htod:       Mov     R7,#00h
            Mov     R6,Inth
            Mov     R5,Intl
            Nop

Htod0:      Clr     A
            Mov     R1,A
            Mov     R2,A
            Mov     R3,A
            Mov     R4,A
            Mov     Dpl,#24
Htod1:      Mov     A,R5
            Rlc     A
            Mov     R5,A
            Mov     A,R6
            Rlc     A
            Mov     R6,A
            Mov     A,R7
            Rlc     A
            Mov     R7,A
            Mov     Dph,#04
            Mov     R0,#04
Htod2:      Mov     A,@R0
            Addc    A,Acc
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Da      A
        Mov     @R0,A
        Dec     R0
        Djnz    Dph,Htod2
        Djnz    Dpl,Htod1
        Mov     Intl,R4
        Mov     Inth,R3
        Ret

;***********************************************
;Hex To Asci0
;***********************************************
Hex2LCD0:   Mov     LCD_Addr,#0ah
            Acall   Set_Addr_LCD
            Mov     A,Nrh
            Swap    A
            Anl     A,#0fh
            Add     A,#30h
            Mov     LCD_Data,A
            Acall   Wrchar_LCD
            Mov     A,Nrh
            Anl     A,#0fh
            Add     A,#30h
            Mov     LCD_Data,A
            Acall   Wrchar_LCD

            Mov     A,Nrl
            Swap    A
            Anl     A,#0fh
            Add     A,#30h
            Mov     LCD_Data,A
            Acall   Wrchar_LCD
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Mov     A,Nrl
                Anl     A,#0fh
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Ret

;***********************************************
;Hex To Asci1
;***********************************************
Hex2LCD1:       Mov     LCD_Addr,#4ah
                Acall   Set_Addr_LCD
                Mov     A,Nsh
                Swap    A
                Anl     A,#0fh
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     A,Nsh
                Anl     A,#0fh
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD

                Mov     A,Nsl
                Swap    A
                Anl     A,#0fh
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     A,Nsl
                Anl     A,#0fh
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Ret

;************************************************
;Write Slip To LCD
;************************************************
Wr_Slip:        Mov     LCD_Addr,#041h
                Acall   Set_Addr_LCD
                Clr     C
                Mov     A,Digit1
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     A,Digit2
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     LCD_Data,#'.'
                Acall   Wrchar_LCD

                Mov     A,Digit3
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD
                Mov     A,Digit4
                Add     A,#30h
                Mov     LCD_Data,A
                Acall   Wrchar_LCD

                Ret
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;************************************************
;LCD Initialize
;************************************************
Init_LCD:       Acall   LCD_Delay100ms          ; Delay 100 Ms
                Clr     LCD_Rs                  ; Clear As Send Instruction

                Mov     P2,#00111000b  ; 8 Bit Mode
                Acall   LCD_Clk                 ; Make Pulse To Send Data From P2
                Acall   LCD_Delay10ms

                Mov     P2,#00111000b
                Acall   LCD_Clk
                Acall   LCD_Off                 ; Off LCD Screen But Data Still
                Acall   LCD_Clr                 ; Clear Data In Ddram

                Mov     P2,#00000110b  ; 1 = Ddram Increase 0 = Cursor Goto Right
                Acall   LCD_Clk

                Acall   LCD_Home        ; Cursor Goto Left Side
                Ret

;************************************************
;LCD Clear Display
;************************************************
LCD_Clr:        Clr     LCD_Rs
                Mov     P2,#00000001b
                Acall   LCD_Clk
                Ret
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;************************************************
;LCD Return Home
;************************************************
LCD_Home:       Clr     LCD_Rs
                Mov     P2,#00000010b
                Acall   LCD_Clk
                Ret

;************************************************
;LCD Display Off
;************************************************
LCD_Off:        Clr     LCD_Rs
                Mov     P2,#00001000b
                Acall   LCD_Clk
                Ret

;************************************************
;LCD Clock
;************************************************
LCD_Clk:        Setb    LCD_En          ; Enable LCD
                Acall   LCD_Delay
                Clr     LCD_En
                Acall   LCD_Delay
                Ret

;************************************************
;LCD Display On
;************************************************
LCD_On:         Clr     LCD_Rs
                Mov     P2,#00001100b
                Acall   LCD_Clk
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                    Ret
;************************************************
;Set LCD Address
;I/P:    LCD_Addr
;************************************************
Set_Addr_LCD:       Clr     LCD_Rs              ; Clear For Send Instruction
                    Mov     A,LCD_Addr
                    Setb    Acc.7           ; Setb Before Read/Write Data From Ddram
                    Mov     P2,A
                    Acall   LCD_Clk
                    Ret

;************************************************
;Write Charactor To Show LCD
;I/P:      LCD_Data
;************************************************
Wrchar_LCD:         Setb    LCD_Rs              ; Set For Send Data
                    Mov     P2,LCD_Data
                    Acall   LCD_Clk
                    Acall   LCD_On
                    Ret

;************************************************
;Write   Line1 Of 20 Charactor From Rom
;I/P:        Dptr : Locate Rom Address
;************************************************
Wrline1_LCD:        Mov     R0,#00h
Wrline1_LCD1:       Setb    LCD_Rs                      ; Setb For Send Data
                    Clr     A
                    Movc    A,@A+Dptr
                    Mov     P2,A
                    Acall   LCD_Clk
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Inc     Dptr
                Inc     R0
                Cjne    R0,#20,Wrline1_LCD1   ; 20 Loop For 20 Charactors
                Acall   LCD_On                ; Display LCD
                Ret

;***********************************************
;Dummy Delay Time LCD_Delay
;***********************************************
LCD_Delay:      Mov     R7,#02
LCD_Delay1:     Mov     R6,#200       ;Each Loop = 1ms
LCD_Delay2:     Nop
                Nop
                Nop
                Djnz    R6,LCD_Delay2
                Djnz    R7,LCD_Delay1
                Ret

LCD_Delay10ms:  Mov     R7,#010
LCD_Delay10ms1: Mov     R6,#0200
LCD_Delay10ms2: Nop
                Nop
                Nop
                Djnz    R6,LCD_Delay10ms2
                Djnz    R7,LCD_Delay10ms1
                Ret

LCD_Delay100ms:  Mov    R7,#0100              ; Do 100 Times
LCD_Delay100ms1: Mov    R6,#0200              ; Each Loop = 1 Ms
LCD_Delay100ms2: Nop
                Nop
                Nop
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Djnz    R6,LCD_Delay100ms2
                Djnz    R7,LCD_Delay100ms1
                Ret

LCD_Delay125ms: Mov     R7,#125
LCD_Delay125ms1: Mov    R6,#0200
LCD_Delay125ms2: Nop
                Nop
                Nop
                Djnz    R6,LCD_Delay125ms2
                Djnz    R7,LCD_Delay125ms1
                Ret

LCD_Delay250ms: Mov     R5,#025
LCD_Delay250ms1: Acall  LCD_Delay10ms
                Djnz    R5,LCD_Delay250ms1
                Ret

LCD_Delay1875ms: Mov    R5,#015
LCD_Delay1875ms1: Acall LCD_Delay125ms
                Djnz    R5,LCD_Delay1875ms1
                Ret

LCD_Delay1375ms: Mov    R5,#011
LCD_Delay1375ms1: Acall LCD_Delay125ms
                Djnz    R5,LCD_Delay1375ms1
                Ret

LCD_Delay1s:    Mov     R5,#10
LCD_Delay1s1:   Acall   LCD_Delay100ms
                Djnz    R5,LCD_Delay1s1
                Ret
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
LCD_Delay2s:      Mov   R5,#020
LCD_Delay2s1:     Acall LCD_Delay100ms
                  Djnz  R5,LCD_Delay2s1
                  Ret

;************************************************
;Define Constant<Store In Flash EEprom Program Mamory>
;************************************************
Title:                  Db    ' %Slip Nr      Rpm'
Title1:                 Db    '     Ns        Rpm'
Title2:                 Db    ' Totaltime=   S  '
Finish:                 End
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ผลการทดลองโดยละเอียดของการทดลองที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองโดยละเอียดของการทดลองที่ 4

1. การทดลองที่ความถี่ 10 Hz

ตารางที่ ค1 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - FLUKE43 ไม่สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้า และ PF ได้ที่ความถี่ต่ำกว่า 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค2 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	10.05	4.70	4.70	8.10	14.40	14.60	1.72
2	10.00	4.70	4.80	8.30	15.00	15.20	1.74
3	10.06	4.70	4.80	8.30	14.30	14.40	1.75
4	10.03	4.70	4.80	8.10	14.60	14.80	1.70
5	9.92	4.70	4.80	8.10	13.20	13.30	1.71
6	9.83	4.70	4.70	9.10	13.70	13.90	1.93
7	9.95	4.60	4.70	8.10	14.80	14.90	1.72
8	10.12	4.70	4.80	8.30	16.60	16.90	1.73
9	9.88	4.60	4.70	8.10	15.40	15.60	1.72
10	9.91	4.60	4.70	9.40	14.20	14.40	1.99
เฉลี่ย	9.98	4.67	4.75	8.39	14.62	14.80	1.77

ตารางที่ ค3 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	10.00	88.00	88.00	243.00	12.50	12.60
2	9.85	89.00	90.00	243.00	12.60	12.70
3	9.98	88.00	89.00	243.00	11.90	12.00
4	10.00	88.00	89.00	251.00	12.80	12.90
5	10.02	88.00	89.00	243.00	12.90	13.00
6	9.98	88.00	89.00	259.00	12.20	12.30
7	9.95	87.00	88.00	243.00	12.60	12.70
8	10.01	88.00	89.00	243.00	12.60	12.70
9	9.96	87.00	88.00	243.00	13.10	13.20
10	9.77	88.00	89.00	251.00	13.30	13.40
เฉลี่ย	9.95	87.90	88.80	246.20	12.65	12.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การทดลองที่ความถี่ 20 Hz

ตารางที่ ค4 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - FLUKE43 ไม่สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้า และ PF ได้ที่ความถี่ต่ำกว่า 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค5 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	19.96	3.20	3.30	6.30	23.20	23.90	1.90
2	20.04	3.20	3.30	6.10	23.20	23.80	1.86
3	20.01	3.20	3.30	6.10	23.60	24.30	1.83
4	20.02	3.20	3.30	6.50	24.20	24.90	1.95
5	20.03	3.20	3.30	6.10	23.40	24.10	1.82
6	20.05	3.30	3.40	7.10	21.90	22.40	2.11
7	19.96	3.20	3.40	6.10	22.40	23.00	1.82
8	19.95	3.20	3.30	6.90	24.70	25.50	2.10
9	19.98	3.20	3.30	6.10	22.40	23.00	1.83
10	19.95	3.20	3.30	6.90	24.70	25.50	2.07
เฉลี่ย	20.00	3.21	3.32	6.42	23.37	24.04	1.93

ตารางที่ ค6 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	19.96	110.00	112.00	282.00	16.80	17.10
2	19.95	110.00	112.00	282.00	16.70	16.90
3	20.07	109.00	111.00	282.00	16.70	16.90
4	20.08	110.00	112.00	286.00	16.40	16.70
5	20.10	110.00	112.00	282.00	16.80	17.00
6	20.03	110.00	112.00	282.00	16.40	16.60
7	20.04	110.00	112.00	282.00	16.60	16.80
8	19.91	110.00	111.00	282.00	16.80	17.00
9	20.01	110.00	112.00	282.00	16.30	16.50
10	19.98	109.00	111.00	282.00	17.00	17.30
เฉลี่ย	20.01	109.80	111.70	282.40	16.65	16.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลองที่ความถี่ 30 Hz

ตารางที่ ค7 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	30.40	290.00	160.00	420.00	0.62
2	30.40	290.00	160.00	420.00	0.62
3	30.40	290.00	160.00	420.00	0.62
4	30.40	290.00	160.00	420.00	0.62
5	30.40	300.00	160.00	420.00	0.63
6	30.40	290.00	160.00	420.00	0.62
7	30.40	300.00	160.00	430.00	0.62
8	30.40	300.00	160.00	440.00	0.60
9	30.40	300.00	160.00	440.00	0.60
10	30.40	310.00	160.00	440.00	0.62
เฉลี่ย	30.40	296.00	160.00	427.00	0.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค8 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	30.10	3.10	3.20	5.70	17.40	17.60	1.80
2	30.10	3.00	3.00	5.90	15.80	16.00	1.94
3	30.10	3.10	3.20	5.70	18.00	18.30	1.80
4	30.20	3.10	3.20	6.10	15.60	15.80	1.92
5	30.20	3.10	3.10	5.90	17.10	17.40	1.88
6	30.10	3.10	3.20	6.30	16.00	16.30	1.97
7	30.21	3.10	3.20	6.10	16.30	16.50	1.91
8	-	-	-	-	-	-	-
9	30.19	3.00	3.10	5.70	17.00	17.30	1.82
10	29.98	3.00	3.00	5.90	18.20	18.60	1.93
เฉลี่ย	30.13	3.07	3.13	5.92	16.82	17.09	1.89

ตารางที่ ค9 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	30.10	130.00	132.00	298.00	17.20	17.50
2	30.10	130.00	132.00	298.00	17.40	17.60
3	30.10	130.00	132.00	294.00	16.90	17.10
4	29.94	130.00	132.00	294.00	18.10	18.40
5	30.00	129.00	131.00	294.00	17.20	17.40
6	30.10	130.00	132.00	302.00	17.40	17.70
7	30.10	129.00	131.00	294.00	17.20	17.50
8	30.10	129.00	131.00	298.00	17.40	17.60
9	30.10	130.00	132.00	298.00	17.90	18.20
10	30.10	128.00	130.00	294.00	17.30	17.60
เฉลี่ย	30.07	129.50	131.50	296.40	17.40	17.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดลองที่ความถี่ 40 Hz

ตารางที่ ค10 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	39.90	350.00	180.00	500.00	0.61
2	39.90	340.00	180.00	520.00	0.58
3	39.90	340.00	180.00	510.00	0.59
4	39.90	340.00	180.00	510.00	0.59
5	39.90	340.00	180.00	510.00	0.59
6	39.90	340.00	180.00	490.00	0.61
7	39.90	360.00	180.00	530.00	0.59
8	39.90	360.00	180.00	510.00	0.61
9	39.90	360.00	180.00	510.00	0.61
10	39.90	350.00	180.00	520.00	0.59
เฉลี่ย	39.90	348.00	180.00	511.00	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค11 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	40.10	2.70	2.80	5.50	9.50	9.50	1.98
2	40.30	2.80	2.90	5.70	8.30	8.30	1.97
3	40.10	2.80	2.90	5.70	10.20	10.20	1.99
4	40.10	2.80	2.90	5.70	9.20	9.20	1.98
5	40.00	2.80	2.90	6.10	9.00	9.10	2.14
6	39.81	2.80	2.90	5.50	8.70	8.70	1.90
7	39.78	2.80	2.80	6.10	9.40	9.50	2.15
8	40.30	2.80	2.80	5.70	8.30	8.30	2.01
9	40.20	2.80	2.80	5.70	8.80	8.90	2.03
10	40.30	2.80	2.80	5.90	8.60	8.70	2.09
เฉลี่ย	40.10	2.79	2.85	5.76	9.00	9.04	2.02

ตารางที่ ค12 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	39.94	158.00	160.00	314.00	14.80	15.00
2	39.90	158.00	160.00	310.00	14.70	14.80
3	39.98	157.00	159.00	310.00	15.20	15.40
4	39.92	158.00	159.00	306.00	14.04	14.60
5	39.88	157.00	159.00	306.00	14.80	15.00
6	39.98	158.00	160.00	302.00	14.90	15.10
7	39.76	156.00	158.00	302.00	14.70	14.90
8	40.20	157.00	159.00	306.00	14.20	14.30
9	40.10	157.00	159.00	314.00	14.90	15.10
10	40.10	157.00	159.00	310.00	15.00	15.10
เฉลี่ย	39.98	157.30	159.20	308.00	14.72	14.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดลองที่ความถี่ 50 Hz

ตารางที่ ค13 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	50.30	360.00	210.00	550.00	0.60
2	50.30	360.00	210.00	550.00	0.60
3	50.30	370.00	210.00	550.00	0.61
4	50.30	350.00	210.00	550.00	0.59
5	50.30	360.00	210.00	550.00	0.60
6	50.30	350.00	210.00	550.00	0.59
7	50.30	370.00	210.00	550.00	0.61
8	50.30	360.00	210.00	550.00	0.60
9	50.30	370.00	210.00	550.00	0.61
10	50.30	370.00	210.00	550.00	0.61
เฉลี่ย	50.30	362.00	210.00	550.00	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ14 แสดงค่าต่างๆ คากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	50.20	2.50	2.50	5.50	9.30	9.40	2.19
2	50.20	2.40	2.40	5.30	9.10	9.10	2.18
3	50.50	2.50	2.50	5.30	9.60	9.60	2.12
4	50.00	2.40	2.50	5.30	10.30	10.30	2.15
5	50.40	2.50	2.50	5.50	8.20	8.20	2.16
6	50.10	2.50	2.50	5.50	9.60	9.70	2.19
7	50.30	2.50	2.50	5.50	9.40	9.50	2.18
8	50.20	2.30	2.40	5.30	9.30	9.30	2.20
9	50.10	2.40	2.40	5.30	9.80	9.90	2.19
10	49.50	2.50	2.60	5.70	8.00	8.00	2.21
เฉลี่ย	50.15	2.45	2.48	5.42	9.26	9.30	2.18

ตารางที่ จ15 แสดงค่าต่างๆ คากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	50.20	202.00	204.00	334.00	12.30	12.40
2	50.20	201.00	202.00	326.00	12.80	12.90
3	50.10	201.00	203.00	326.00	12.60	12.70
4	50.00	201.00	203.00	326.00	12.20	12.30
5	50.10	202.00	204.00	330.00	12.60	12.70
6	50.40	202.00	204.00	330.00	12.20	12.30
7	50.60	201.00	203.00	326.00	11.60	11.60
8	50.30	201.00	203.00	330.00	12.80	12.90
9	49.90	201.00	203.00	334.00	12.20	12.30
10	50.10	203.00	205.00	338.00	12.40	12.50
เฉลี่ย	50.19	201.50	203.40	330.00	12.37	12.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดลองที่ความถี่ 60 Hz

ตารางที่ จ16 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	60.10	300.00	140.00	430.00	0.59
2	60.10	300.00	140.00	440.00	0.58
3	60.10	290.00	140.00	440.00	0.56
4	60.10	270.00	140.00	410.00	0.58
5	60.10	280.00	140.00	410.00	0.59
6	60.10	250.00	140.00	400.00	0.56
7	60.10	280.00	140.00	420.00	0.58
8	60.10	280.00	140.00	420.00	0.58
9	60.10	290.00	140.00	420.00	0.59
10	60.10	260.00	140.00	400.00	0.58
เฉลี่ย	60.10	280.00	140.00	419.00	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค17 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	60.40	1.80	1.90	4.70	13.10	13.20	2.42
2	60.00	1.80	1.90	4.70	12.00	12.00	2.49
3	60.00	1.90	1.90	4.90	12.50	12.60	2.52
4	59.60	1.80	1.90	4.70	11.30	11.40	2.42
5	60.20	1.90	1.90	4.90	12.50	12.60	2.52
6	60.20	1.90	1.90	4.90	12.00	12.10	2.54
7	60.00	1.90	2.00	4.90	10.90	10.90	2.49
8	60.20	1.90	1.90	4.90	13.20	13.30	2.53
9	60.20	1.80	1.90	4.70	12.90	13.00	2.45
10	59.90	1.90	1.90	4.90	14.30	14.50	2.51
เฉลี่ย	60.07	1.86	1.91	4.82	12.47	12.56	2.49

ตารางที่ ค18 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	59.60	201.00	203.00	326.00	12.40	12.50
2	59.70	203.00	205.00	326.00	11.70	11.70
3	60.10	203.00	205.00	322.00	11.70	11.80
4	59.70	203.00	205.00	330.00	11.80	11.90
5	59.90	201.00	203.00	322.00	12.60	12.70
6	60.00	201.00	202.00	326.00	12.60	12.70
7	59.80	202.00	204.00	330.00	12.50	12.60
8	60.00	203.00	205.00	330.00	11.80	11.80
9	59.80	203.00	205.00	330.00	11.70	11.80
10	60.60	200.00	202.00	322.00	12.20	12.30
เฉลี่ย	59.92	202.00	203.90	326.40	12.10	12.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การทดลองที่ความถี่ 70 Hz

ตารางที่ ค19 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	70.00	250.00	120.00	350.00	0.61
2	70.00	240.00	120.00	350.00	0.59
3	70.00	250.00	120.00	360.00	0.59
4	70.00	250.00	120.00	360.00	0.59
5	70.00	250.00	120.00	360.00	0.59
6	70.00	250.00	120.00	360.00	0.59
7	70.00	250.00	120.00	350.00	0.61
8	70.00	250.00	120.00	350.00	0.61
9	70.00	260.00	120.00	350.00	0.63
10	70.00	250.00	120.00	350.00	0.61
เฉลี่ย	70.00	250.00	120.00	354.00	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค20 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	-	-	-	-	-	-	-
2	69.70	1.50	1.60	4.30	14.50	14.60	2.62
3	70.20	1.50	1.60	4.50	16.60	16.80	2.75
4	69.80	1.50	1.60	4.50	16.90	17.10	2.80
5	69.40	1.50	1.60	4.50	15.30	15.50	2.74
6	70.70	1.50	1.60	4.50	12.40	12.50	2.78
7	70.10	1.50	1.60	4.50	15.10	15.30	2.79
8	68.90	1.50	1.60	4.30	13.50	13.60	2.68
9	70.50	1.50	1.60	4.50	16.00	16.30	2.76
10	70.50	1.50	1.60	4.30	13.90	14.10	2.70
เฉลี่ย	69.98	1.50	1.60	4.43	14.91	15.09	2.74

ตารางที่ ค21 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	70.00	202.00	204.00	326.00	12.40	12.50
2	69.70	202.00	204.00	322.00	12.10	12.20
3	70.20	200.00	202.00	322.00	12.10	12.10
4	70.00	202.00	203.00	326.00	12.30	12.40
5	69.40	203.00	205.00	326.00	11.90	12.00
6	70.30	201.00	203.00	326.00	12.30	12.40
7	70.40	202.00	203.00	322.00	11.80	11.80
8	69.90	202.00	204.00	318.00	12.10	12.20
9	69.60	202.00	204.00	322.00	11.40	11.50
10	69.90	201.00	203.00	310.00	12.40	12.50
เฉลี่ย	69.94	201.70	203.50	322.00	12.08	12.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การทดลองที่ความถี่ 80 Hz

ตารางที่ ค22 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
2	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
3	79.30	230.00	70.00	310.00	0.56
4	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
5	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
6	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
7	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
8	79.30	230.00	70.00	310.00	0.56
9	79.30	240.00	70.00	310.00	0.58
10	79.30	230.00	70.00	310.00	0.56
เฉลี่ย	79.30	237.00	70.00	310.00	0.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค23 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	79.00	1.30	1.40	4.10	18.30	18.60	2.92
2	80.40	1.30	1.40	4.30	15.60	15.80	2.95
3	79.20	1.30	1.40	4.70	14.30	14.50	3.26
4	80.70	1.30	1.40	4.10	16.30	16.50	2.89
5	79.10	1.30	1.40	4.10	16.40	16.60	2.87
6	80.50	1.30	1.40	5.10	16.90	17.10	3.55
7	76.20	1.30	1.50	4.10	15.80	16.00	2.75
8	79.80	1.40	1.50	4.10	13.70	13.80	2.77
9	79.90	1.30	1.40	4.10	15.10	15.30	2.84
10	79.30	1.30	1.40	4.30	16.40	16.60	2.96
เฉลี่ย	79.41	1.31	1.42	4.30	15.88	16.08	2.98

ตารางที่ ค24 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	80.20	198.00	200.00	318.00	12.10	12.10
2	80.60	198.00	200.00	326.00	11.80	11.80
3	79.70	200.00	201.00	322.00	11.90	12.00
4	80.20	199.00	200.00	322.00	11.90	12.00
5	80.00	199.00	201.00	318.00	12.50	12.60
6	79.90	198.00	200.00	314.00	12.70	12.80
7	80.10	201.00	203.00	322.00	12.40	12.50
8	80.30	201.00	203.00	326.00	12.30	12.40
9	80.10	200.00	202.00	314.00	12.60	12.70
10	80.20	202.00	204.00	322.00	12.10	12.10
เฉลี่ย	80.13	199.60	201.40	320.40	12.23	12.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การทดลองที่ความถี่ 90 Hz

ตารางที่ ค25 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	90.50	230.00	60.00	290.00	0.58
2	90.50	230.00	60.00	280.00	0.60
3	90.50	240.00	60.00	280.00	0.62
4	90.50	230.00	60.00	280.00	0.60
5	90.50	230.00	60.00	280.00	0.60
6	90.50	240.00	60.00	290.00	0.60
7	90.50	240.00	60.00	290.00	0.60
8	90.50	230.00	60.00	280.00	0.60
9	90.50	230.00	60.00	290.00	0.58
10	90.50	240.00	60.00	290.00	0.60
เฉลี่ย	90.50	234.00	60.00	285.00	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค26 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	89.40	1.20	1.30	3.90	19.10	19.40	2.92
2	89.80	1.20	1.30	3.70	20.70	21.20	2.90
3	92.30	1.20	1.40	3.90	17.10	17.30	2.85
4	90.00	1.20	1.40	4.30	17.80	18.10	3.11
5	90.40	1.20	1.40	4.10	16.80	17.00	2.96
6	89.70	1.20	1.30	3.70	10.80	21.20	2.91
7	87.90	1.20	1.30	3.90	18.90	19.30	3.03
8	85.90	1.20	1.40	3.90	15.20	15.40	2.69
9	89.40	1.20	1.20	3.90	20.00	20.40	3.10
10	89.50	1.20	1.40	3.90	18.30	18.60	2.76
เฉลี่ย	89.43	1.20	1.34	3.92	17.47	18.79	2.92

ตารางที่ ค27 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	90.80	199.00	201.00	318.00	11.40	11.40
2	90.20	200.00	202.00	326.00	11.70	11.80
3	90.30	200.00	202.00	322.00	11.80	11.90
4	90.00	202.00	204.00	330.00	11.70	11.80
5	90.80	200.00	201.00	326.00	11.40	11.40
6	89.60	200.00	202.00	314.00	12.10	12.10
7	89.90	200.00	202.00	306.00	12.30	12.40
8	89.80	202.00	204.00	322.00	12.20	12.30
9	90.10	201.00	202.00	318.00	11.80	11.90
10	89.90	200.00	202.00	326.00	11.80	11.90
เฉลี่ย	90.14	200.40	202.20	320.80	11.82	11.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การทดลองที่ความถี่ 100 Hz

ตารางที่ ค28 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	99.90	240.00	40.00	280.00	0.58
2	99.90	240.00	40.00	280.00	0.58
3	99.90	240.00	40.00	280.00	0.58
4	99.90	230.00	40.00	270.00	0.58
5	99.90	240.00	40.00	270.00	0.60
6	99.90	240.00	40.00	280.00	0.58
7	99.90	240.00	40.00	280.00	0.58
8	99.90	230.00	40.00	270.00	0.58
9	99.90	240.00	40.00	270.00	0.60
10	99.90	240.00	40.00	280.00	0.58
เฉลี่ย	99.90	238.00	40.00	276.00	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค29 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	100.50	1.20	1.30	4.10	19.20	19.60	3.19
2	101.40	1.20	1.30	3.50	18.20	18.50	2.75
3	97.60	1.20	1.30	3.70	15.90	16.20	2.72
4	100.80	1.20	1.30	4.70	18.80	19.20	3.72
5	101.10	1.20	1.30	4.10	19.30	19.70	3.19
6	101.00	1.20	1.30	4.10	19.00	19.30	3.05
7	100.10	1.20	1.30	3.70	19.60	20.00	2.76
8	100.50	1.20	1.30	3.90	18.80	19.20	3.01
9	100.40	1.20	1.20	3.90	18.70	19.10	3.12
10	100.50	1.20	1.30	3.90	22.50	23.10	2.96
เฉลี่ย	100.39	1.20	1.29	3.96	19.00	19.39	3.05

ตารางที่ ค30 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	101.60	198.00	200.00	326.00	11.40	11.50
2	100.40	200.00	202.00	322.00	12.30	12.40
3	101.00	200.00	202.00	318.00	11.80	11.90
4	100.70	200.00	201.00	338.00	11.70	11.70
5	100.60	200.00	201.00	326.00	12.00	12.10
6	100.40	201.00	203.00	322.00	11.40	11.50
7	101.20	199.00	201.00	314.00	11.70	11.80
8	100.50	200.00	202.00	318.00	11.90	12.00
9	100.80	201.00	202.00	314.00	11.70	11.80
10	101.60	200.00	202.00	318.00	11.40	11.50
เฉลี่ย	100.88	199.90	201.60	321.60	11.73	11.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
ผลการทดลองโดยละเอียดของการทดลองที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

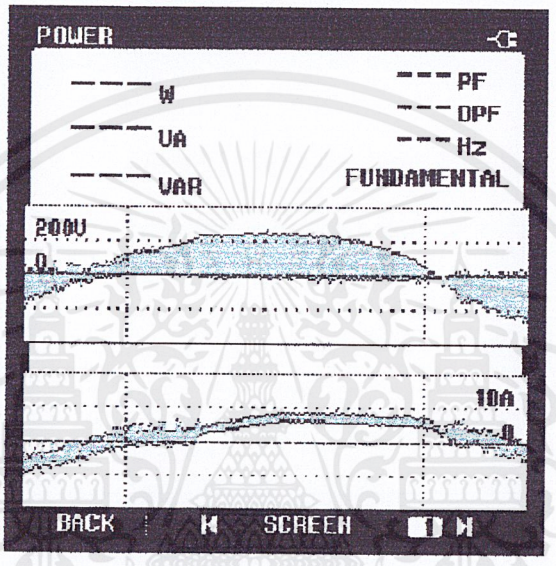
ผลการทดลองโดยละเอียดของการทดลองที่ 5

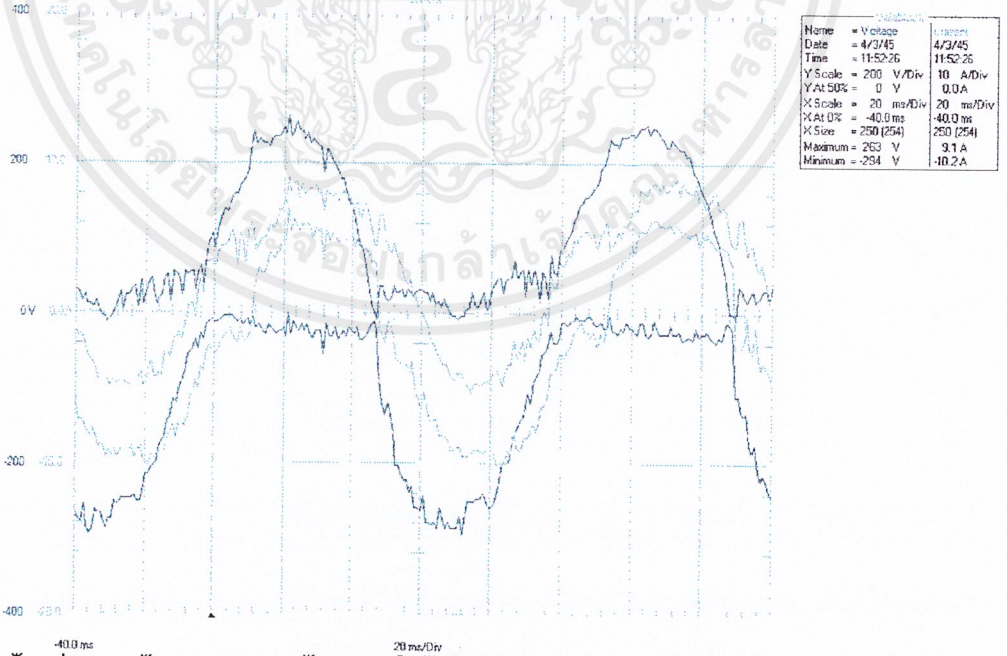
ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 สภาวะไม่มีภาระโหลด (240 kg)

1. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 10 Hz

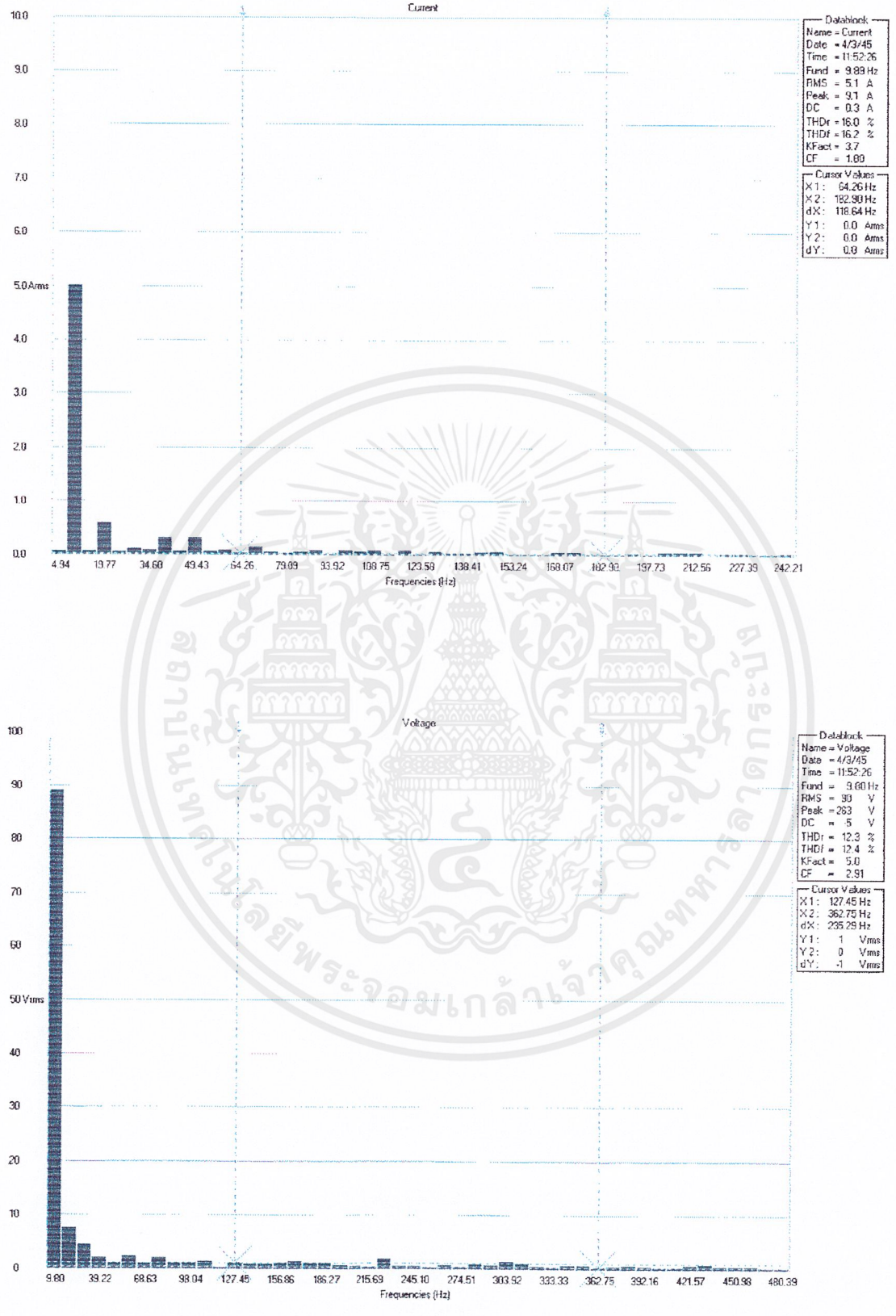
- ทางตรง





รูปที่ ง1 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง2 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง1 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	-	-	-	-	-

หมายเหตุ - FLUKE43 ไม่สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้า และ PF ได้ที่ความถี่ต่ำกว่า 30 Hz

ตารางที่ ง2 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	9.89	5	5.1	9.1	16	16.2	1.8
2	9.78	5.1	5.1	9.1	16.1	16.3	1.78
3	9.79	5.1	5.2	9.4	16.2	16.4	1.8
เฉลี่ย	9.82	5.07	5.13	9.2	16.1	16.3	1.79

ตารางที่ ง3 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	9.8	89	90	263	12.3	21.4
2	9.74	89	90	251	12.3	12.4
3	9.81	89	89	251	12.8	13
เฉลี่ย	9.783	89	89.667	255	12.47	15.6

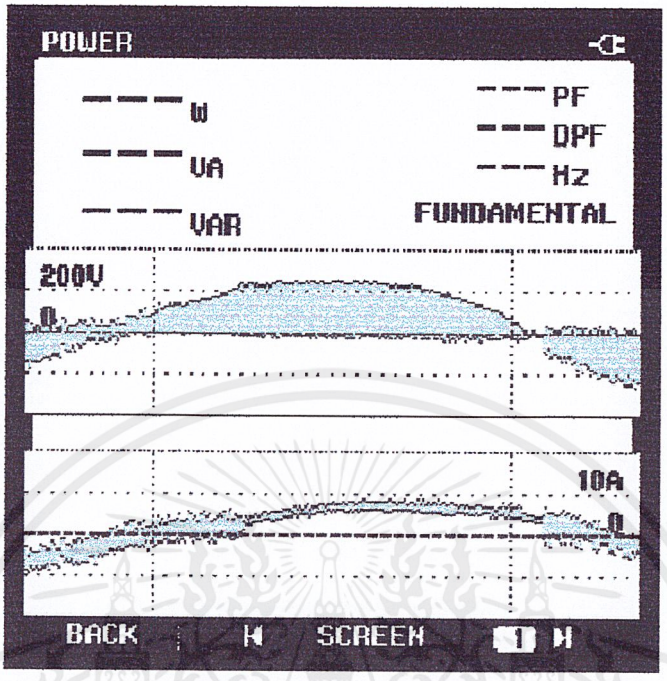
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

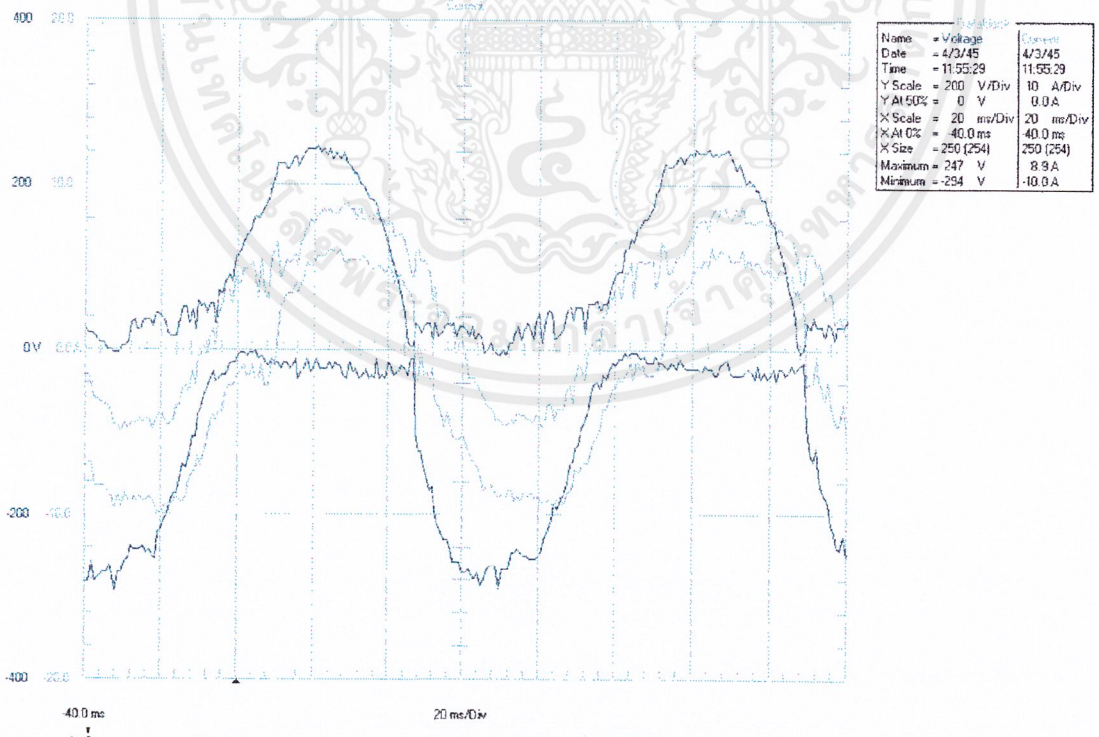
ตารางที่ ง4 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	300	292
2	300	291
3	300	290
เฉลี่ย	300	291

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

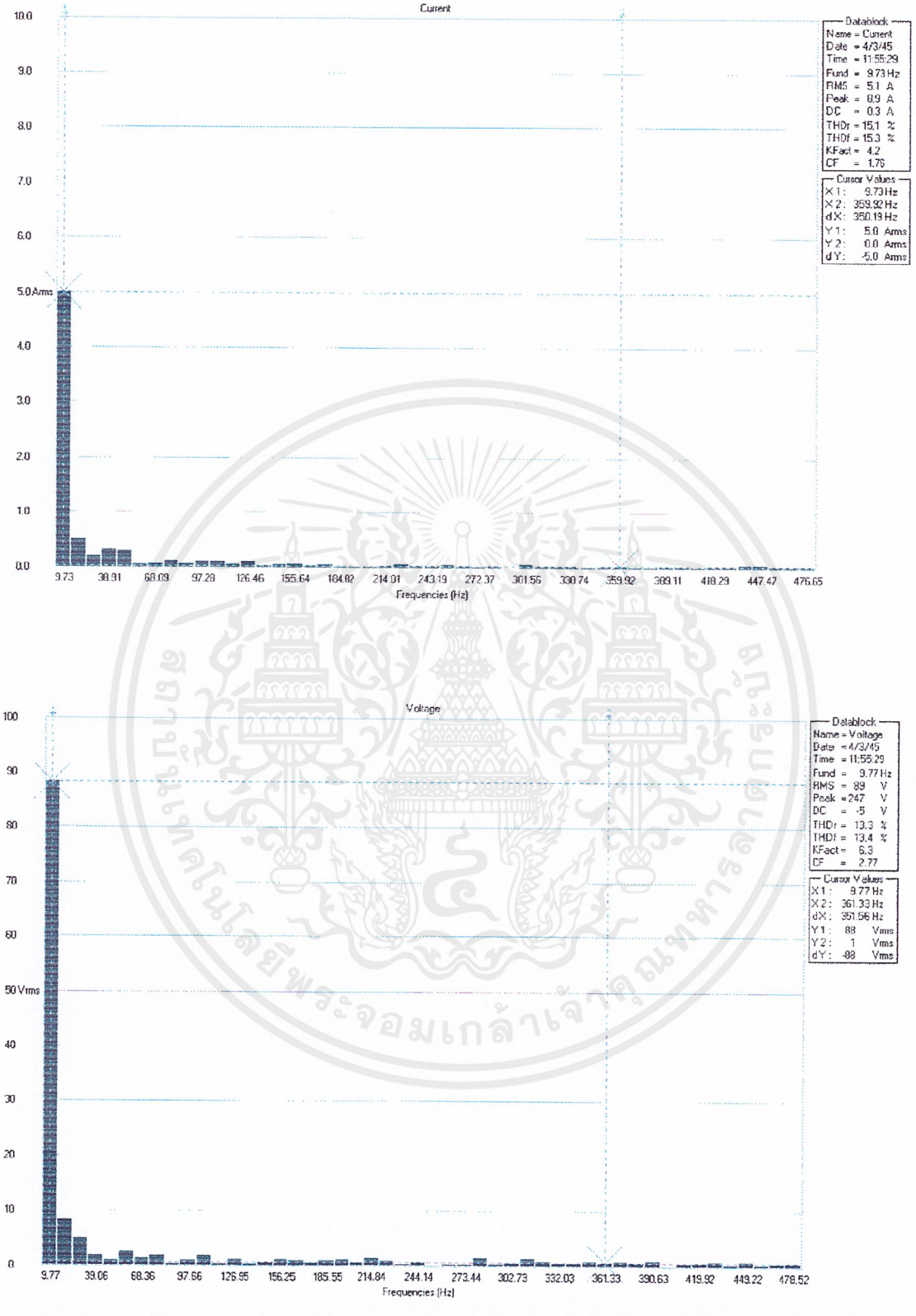
- ทางโค้ง





รูปที่ ง3 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง4 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง5 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง6 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	9.73	5	5.1	8.9	15.1	15.3	1.76
2	9.88	4.9	5	9.6	15.2	15.4	1.91
3	9.73	5.1	5.1	8.9	14	14.2	1.74
เฉลี่ย	9.78	5	5.07	9.13	14.77	14.97	1.8

ตารางที่ ง7 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	9.77	88	89	247	13.3	13.4
2	9.73	89	89	259	13.2	13.3
3	9.66	90	90	251	11.8	11.9
เฉลี่ย	9.72	89	89.333	252.33	12.77	12.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

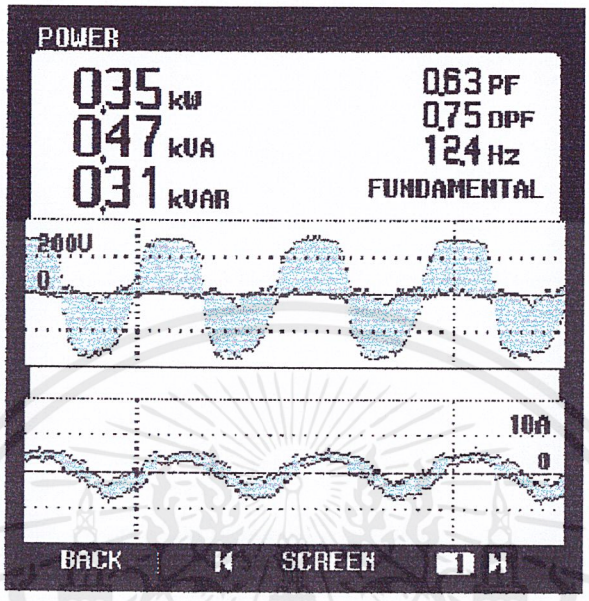
ตารางที่ ง8 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

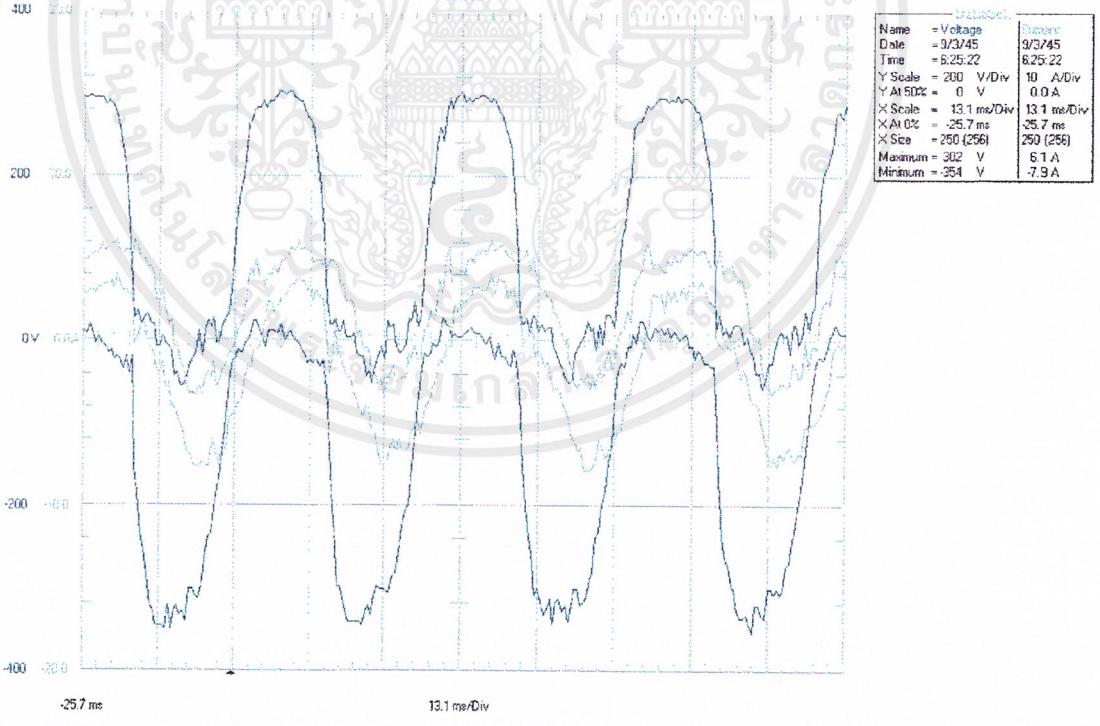
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	300	292
2	300	291
3	300	291
เฉลี่ย	300	291.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 30 Hz

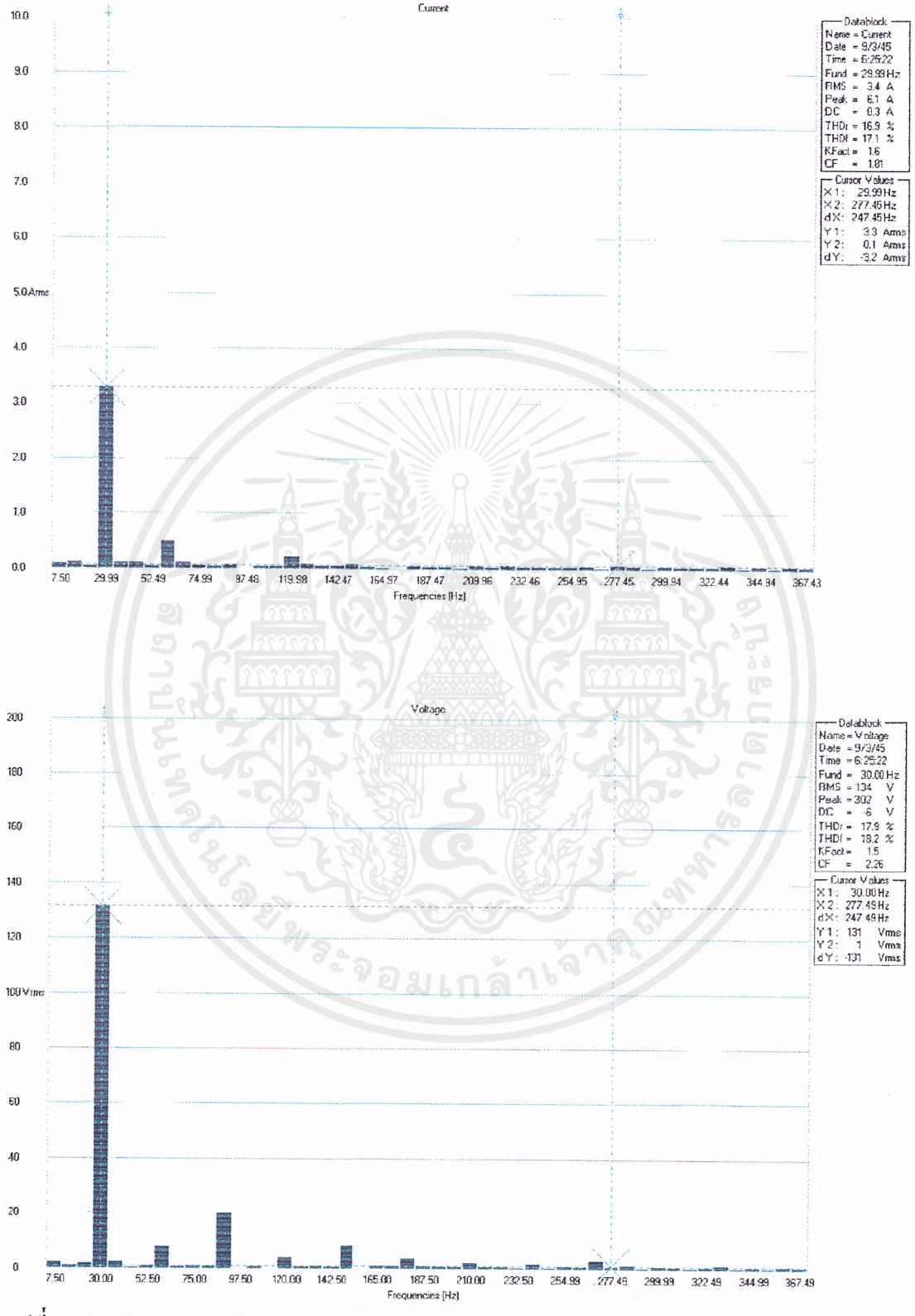
- **ทางตรง**





รูปที่ ง5 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง6 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง9 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	350	140	470	0.60
2	29.9	360	140	460	0.63
3	29.9	350	140	450	0.63
เฉลี่ย	29.9	353.33	140.00	460.00	0.62

ตารางที่ ง10 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	29.99	3.3	3.4	6.1	16.9	17.1	1.81
2	29.96	3.4	3.4	6.5	14.0	14.1	1.89
3	29.75	3.3	3.4	6.3	15.2	15.4	1.86
เฉลี่ย	29.9	3.33	3.4	6.3	15.37	15.53	1.85

ตารางที่ ง11 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	30.00	131	134	302	17.9	18.2
2	29.90	132	135	306	17.5	17.8
3	29.88	131	134	306	17.4	17.7
เฉลี่ย	29.93	131.33	134.33	304.67	17.6	17.9

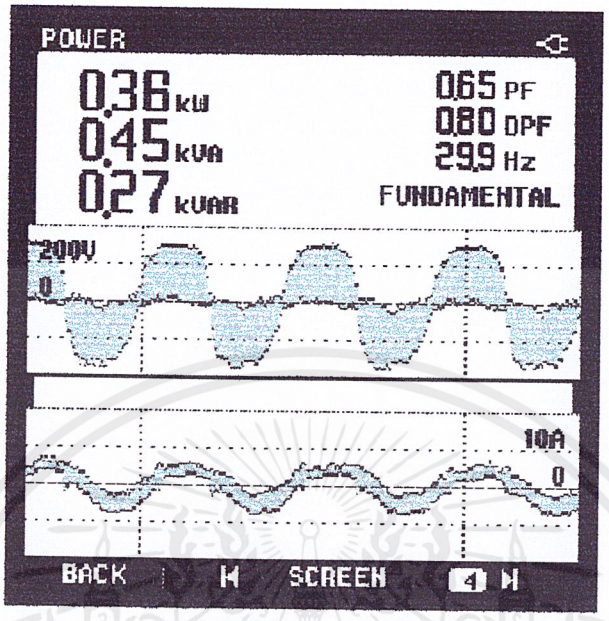
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

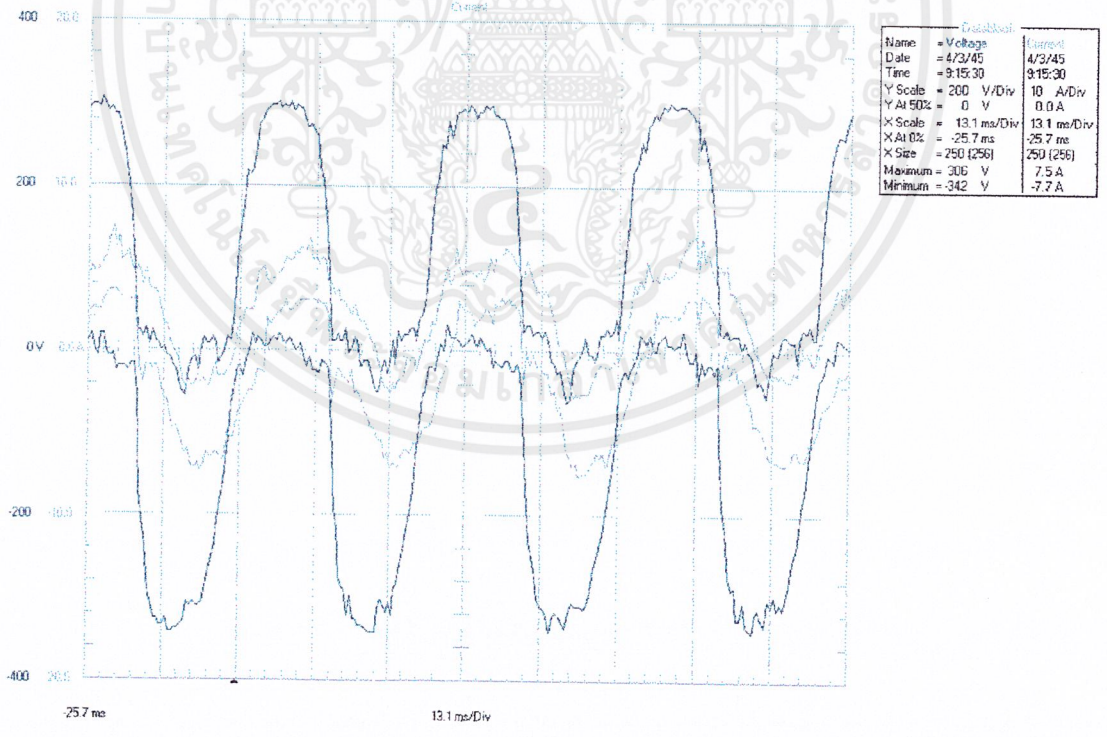
ตารางที่ ง12 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	903	893
2	903	893
3	903	893
เฉลี่ย	903	893

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

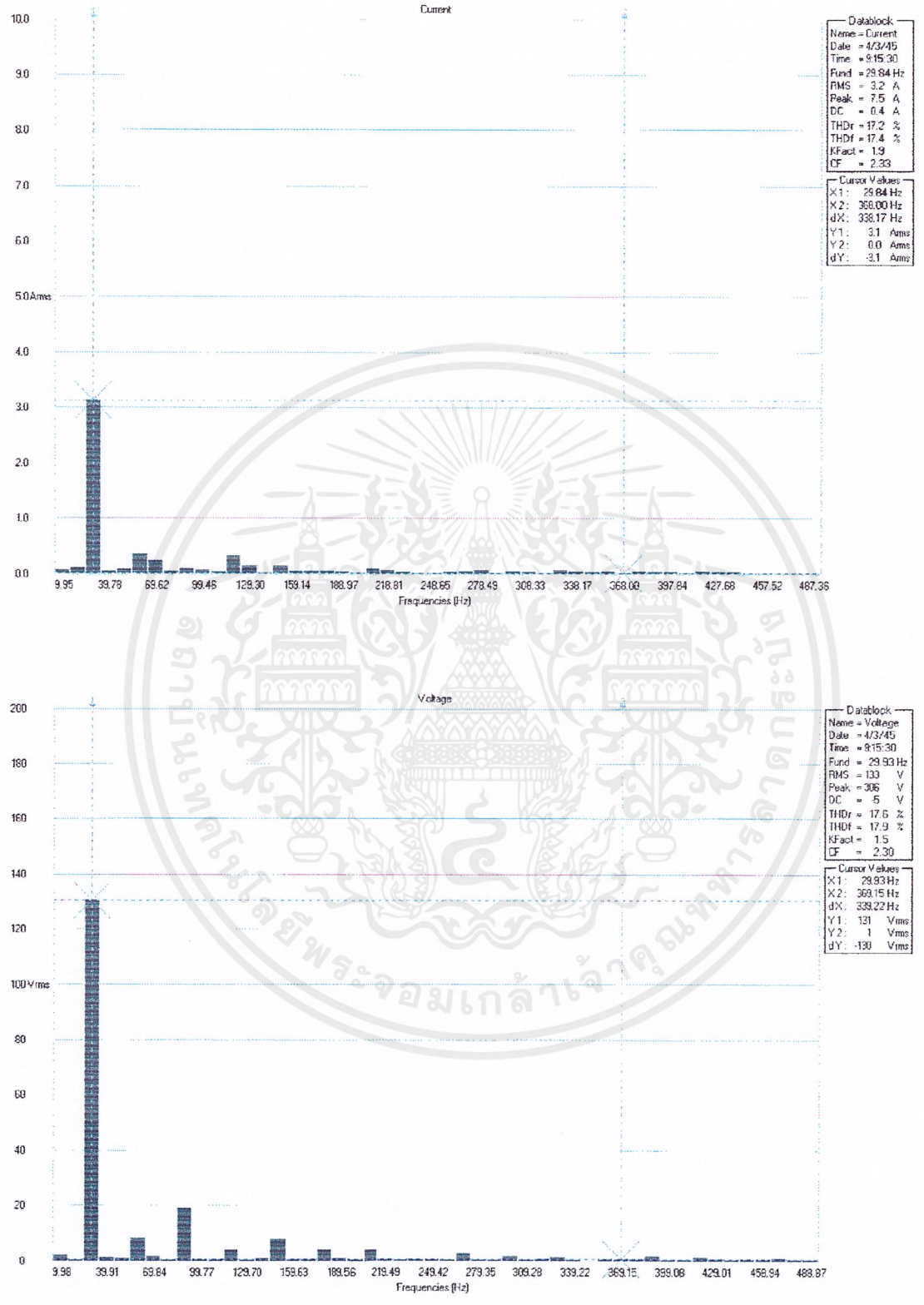
- ทางโค้ง





รูปที่ ง7 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง8 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง13 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	29.9	360	160	450	0.67
2	29.9	330	160	440	0.64
3	29.9	370	160	460	0.67
เฉลี่ย	29.9	353.33	160.00	450.00	0.66

ตารางที่ ง14 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	29.84	3.1	3.2	7.5	17.2	17.4	2.33
2	29.66	3.2	3.3	7.1	16.8	17.0	2.18
3	29.74	3.2	3.3	7.7	14.6	14.8	2.33
เฉลี่ย	29.75	3.17	3.27	7.43	16.2	16.4	2.28

ตารางที่ ง15 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	29.93	131	133	306	17.6	17.9
2	29.83	133	135	306	17.6	17.9
3	30.03	133	135	306	17.7	18.0
เฉลี่ย	29.93	132.33	133.67	306	17.63	17.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

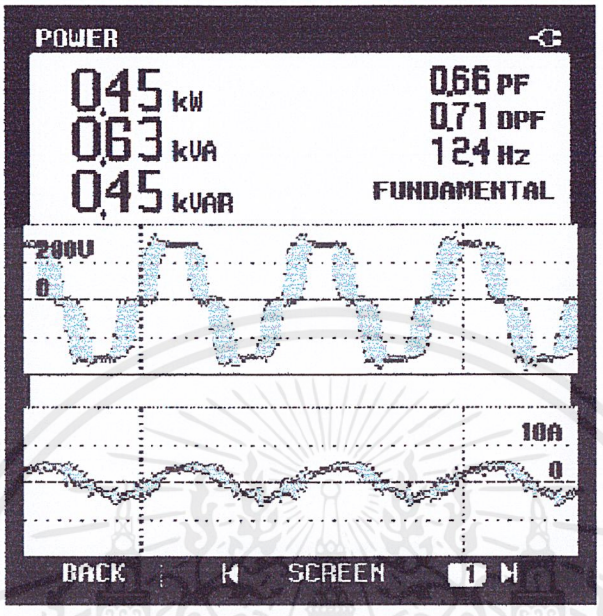
ตารางที่ ง16 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

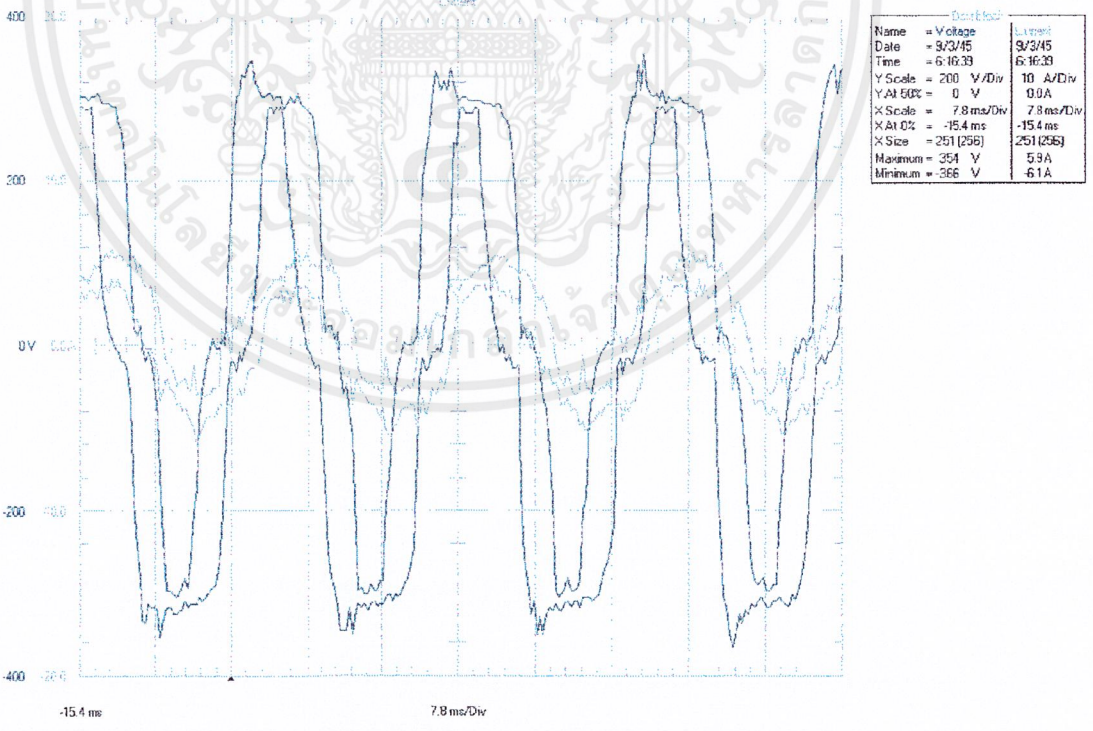
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	903	894
2	903	899
3	903	896
เฉลี่ย	903	896.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz

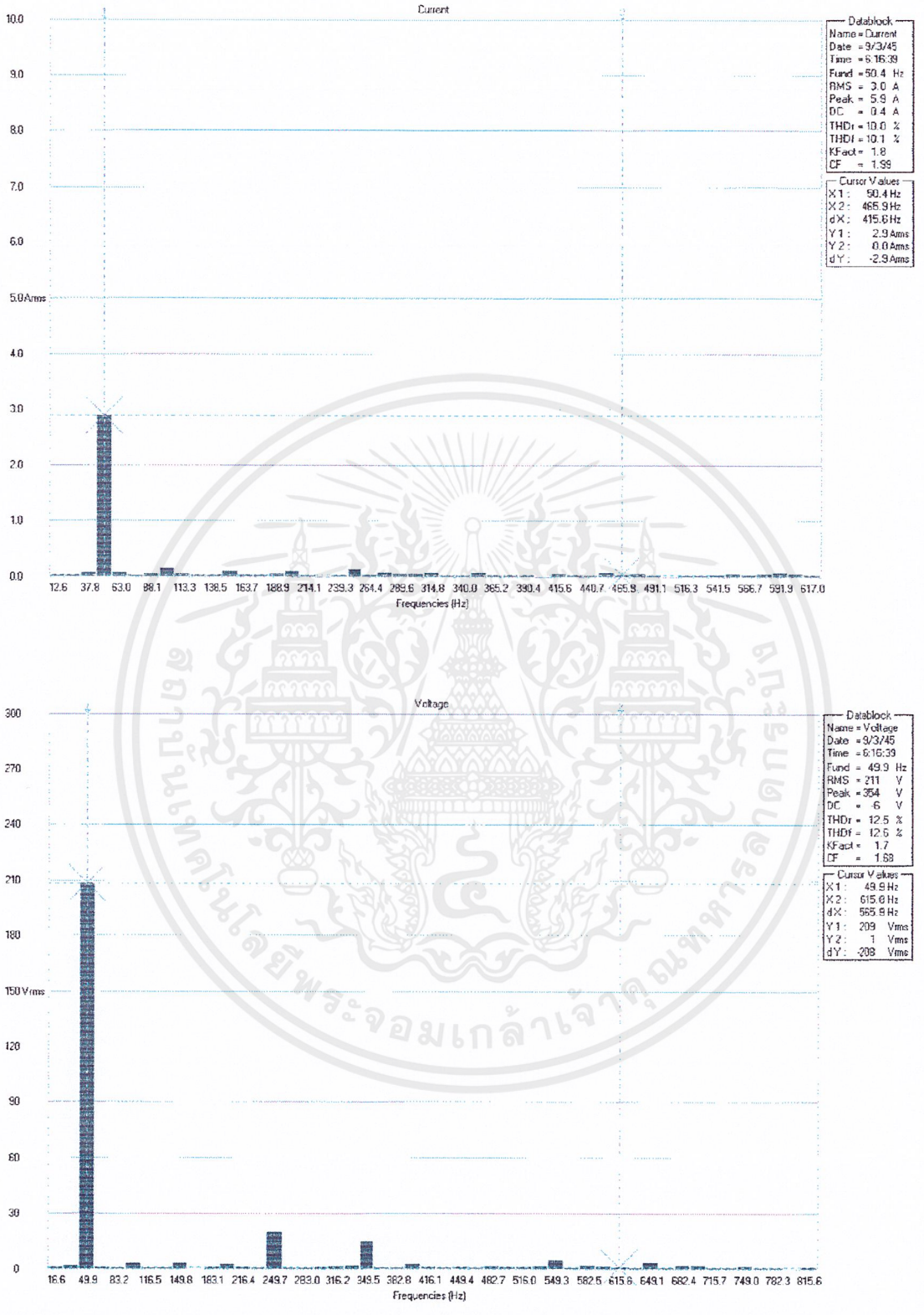
- **ทางตรง**





รูปที่ ง9 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง10 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง17 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	450	220	630	0.61
2	-	430	220	620	0.61
3	-	440	220	620	0.61
เฉลี่ย	-	440.00	220.00	623.33	0.61

ตารางที่ ง18 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	50.4	2.9	3.0	5.9	10.0	10.1	1.99
2	50.0	2.8	2.9	5.9	10.3	10.3	2.03
3	50.2	2.9	3.0	5.7	10.2	10.3	1.91
เฉลี่ย	50.2	2.87	2.97	5.83	10.117	10.23	1.98

ตารางที่ ง19 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	49.9	209	211	354	12.5	12.6
2	49.8	206	208	346	12.4	12.5
3	49.9	207	209	342	12.3	12.4
เฉลี่ย	49.87	207.33	209.33	347.33	12.4	12.5

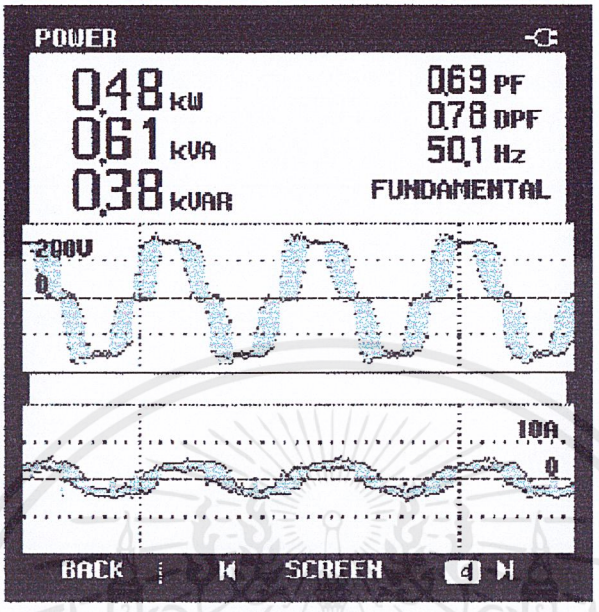
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

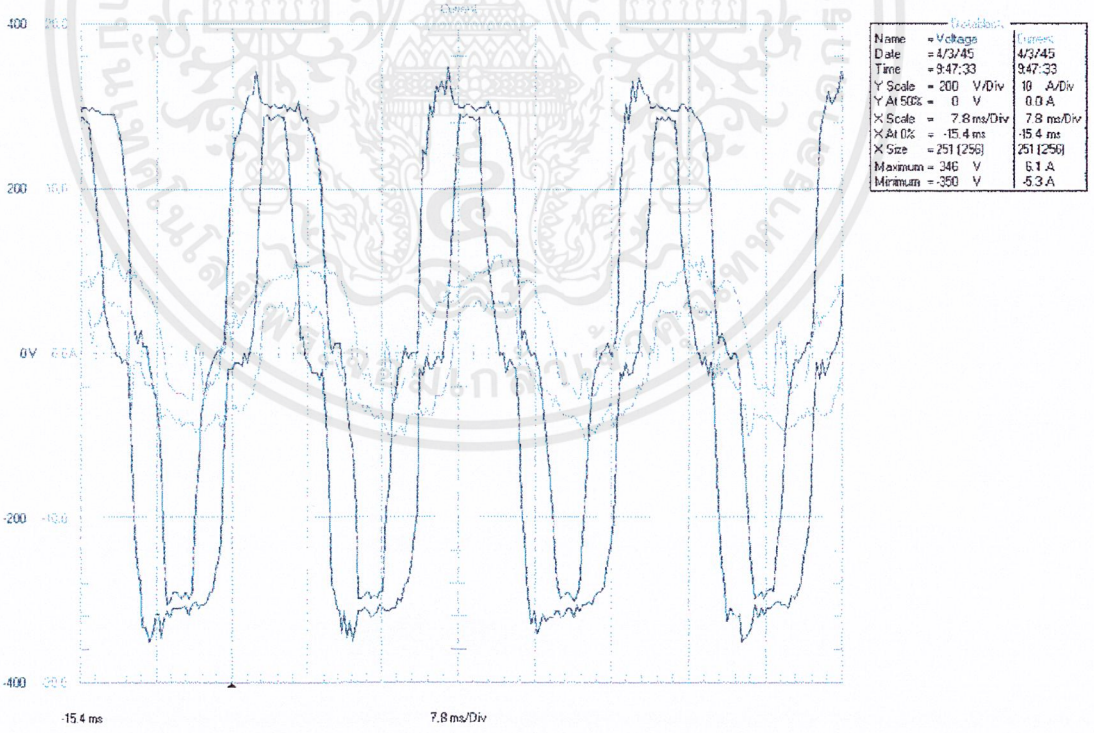
ตารางที่ ง20 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	1500	1497
2	1500	1497
3	1500	1498
เฉลี่ย	1500	1497.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

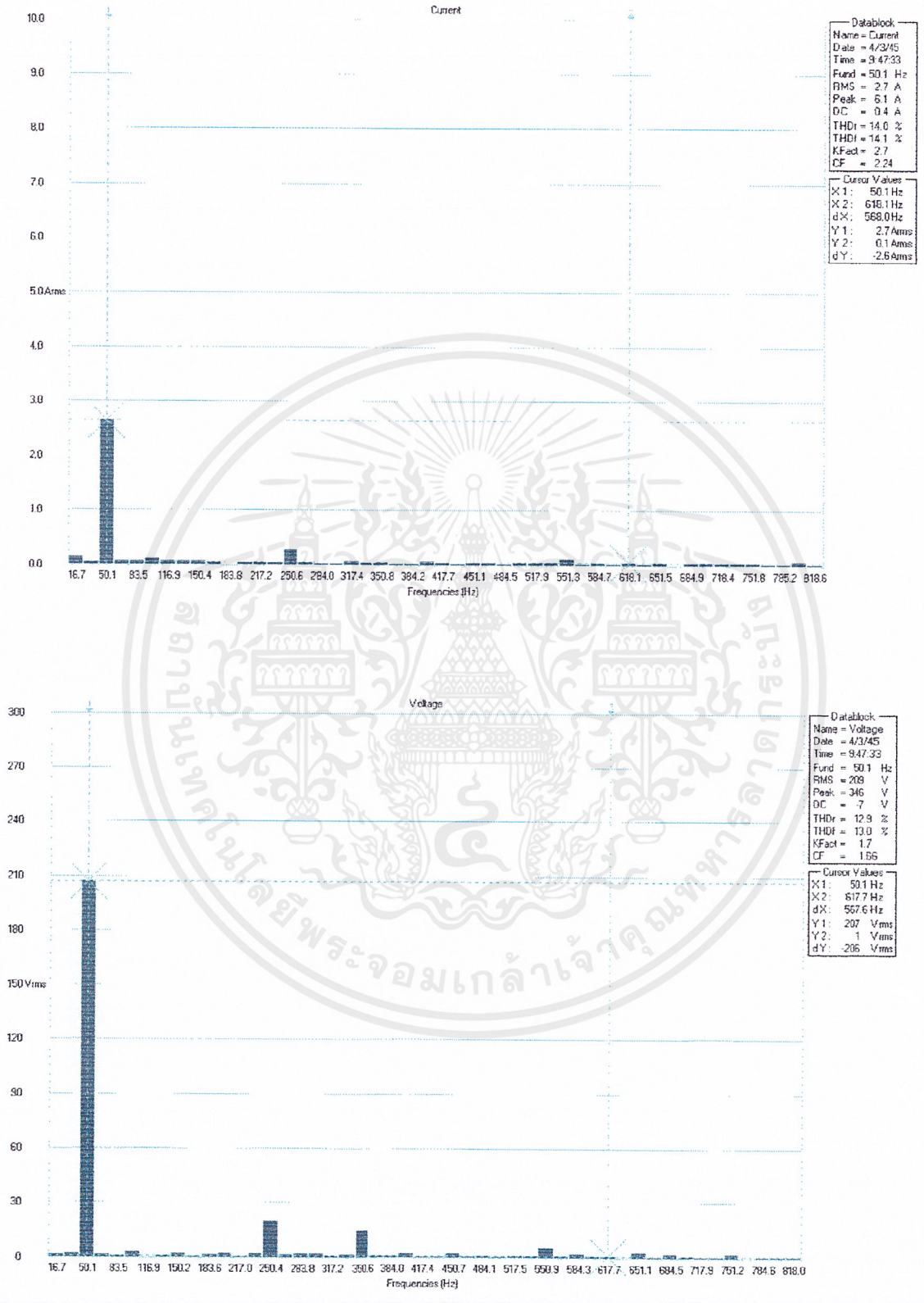
- ทางโค้ง





รูปที่ ง11 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง12 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง21 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (Hz)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	50.1	480	220	610	0.66
2	50.2	440	220	620	0.61
3	49.8	460	220	640	0.61
เฉลี่ย	50.03	460.00	220.00	623.33	0.63

ตารางที่ ง22 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (Hz)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	50.1	2.7	2.7	6.1	14	14.1	2.24
2	50	2.6	2.7	6.5	15	15.2	2.43
3	50	2.9	3	6.5	13.7	13.8	2.19
เฉลี่ย	50.03	2.73	2.8	6.37	14.23	14.37	2.29

ตารางที่ ง23 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (Hz)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	50.1	207	209	246	13.9	14
2	50.7	206	209	342	10	10.1
3	50.2	207	209	350	12.5	12.6
เฉลี่ย	50.33	206.67	209	312.67	12.13	12.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

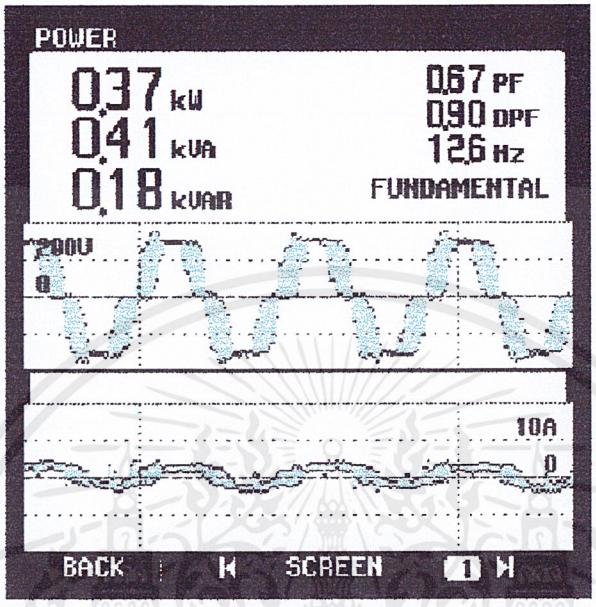
ตารางที่ ง24 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

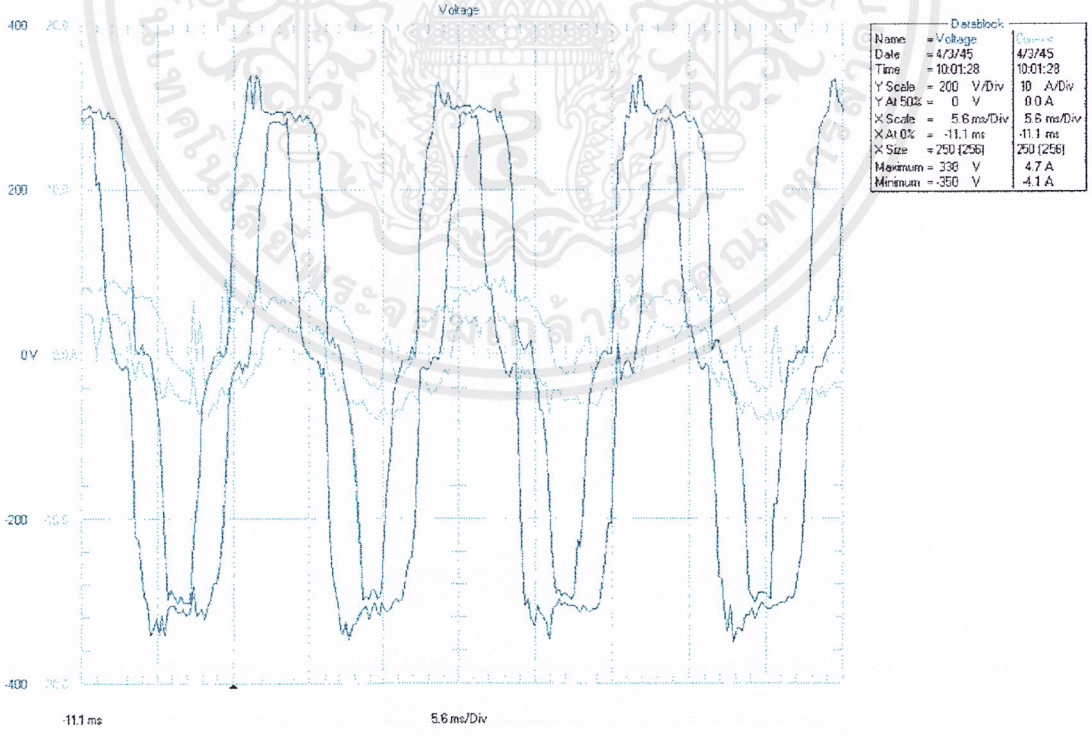
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	1500	1498
2	1500	1499
3	1500	1498
เฉลี่ย	1500	1498.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 70 Hz

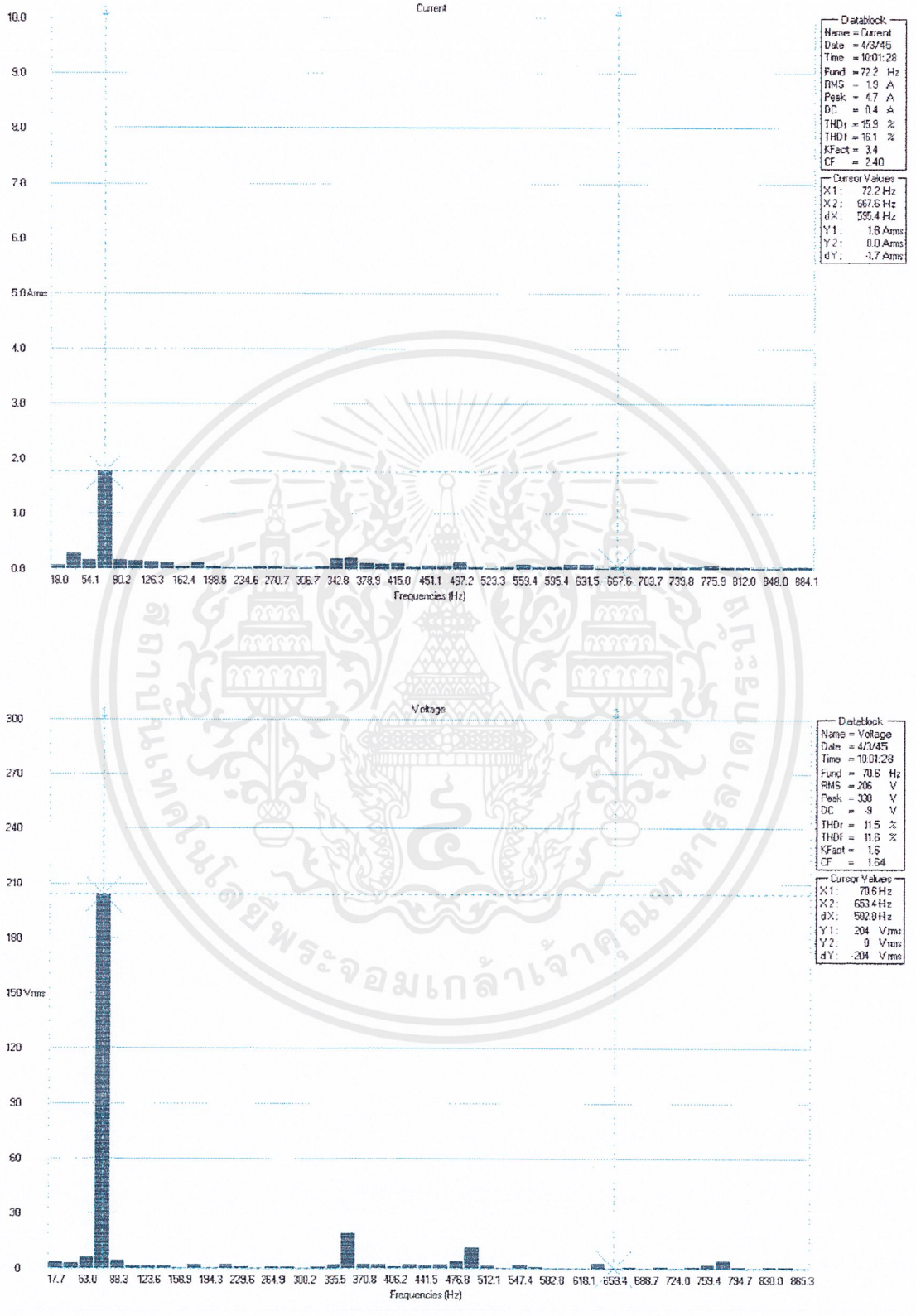
- **ทางตรง**





รูปที่ ง13 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง14 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง25 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	370	80	410	0.63
2	-	350	80	410	0.61
3	-	350	80	420	0.59
เฉลี่ย	-	356.67	80.00	413.33	0.61

ตารางที่ ง26 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	72.2	1.8	1.9	4.7	15.9	16.1	2.4
2	70.5	1.7	1.8	4.7	23.1	23.8	2.62
3	69.8	1.7	1.8	5.3	19.2	19.6	2.98
เฉลี่ย	70.83	1.73	1.83	4.9	19.4	19.83	2.67

ตารางที่ ง27 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	70.6	204	206	338	11.5	11.6
2	70.7	206	208	346	11.8	11.9
3	70.4	207	209	342	12.2	12.3
เฉลี่ย	70.57	205.67	207.67	342	11.83	11.93

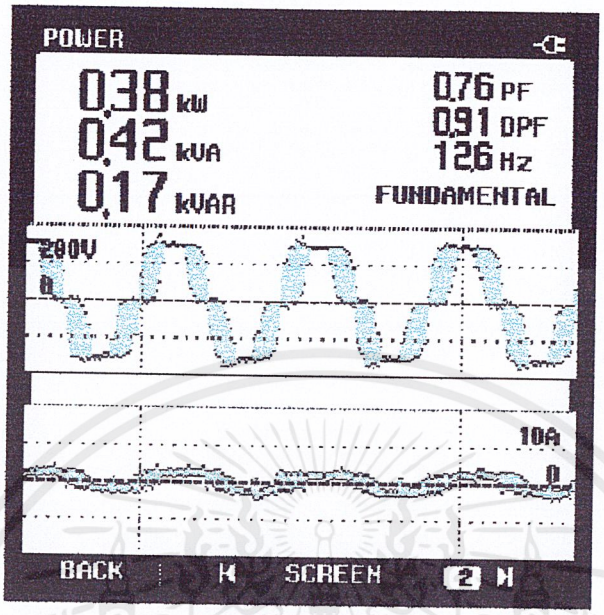
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

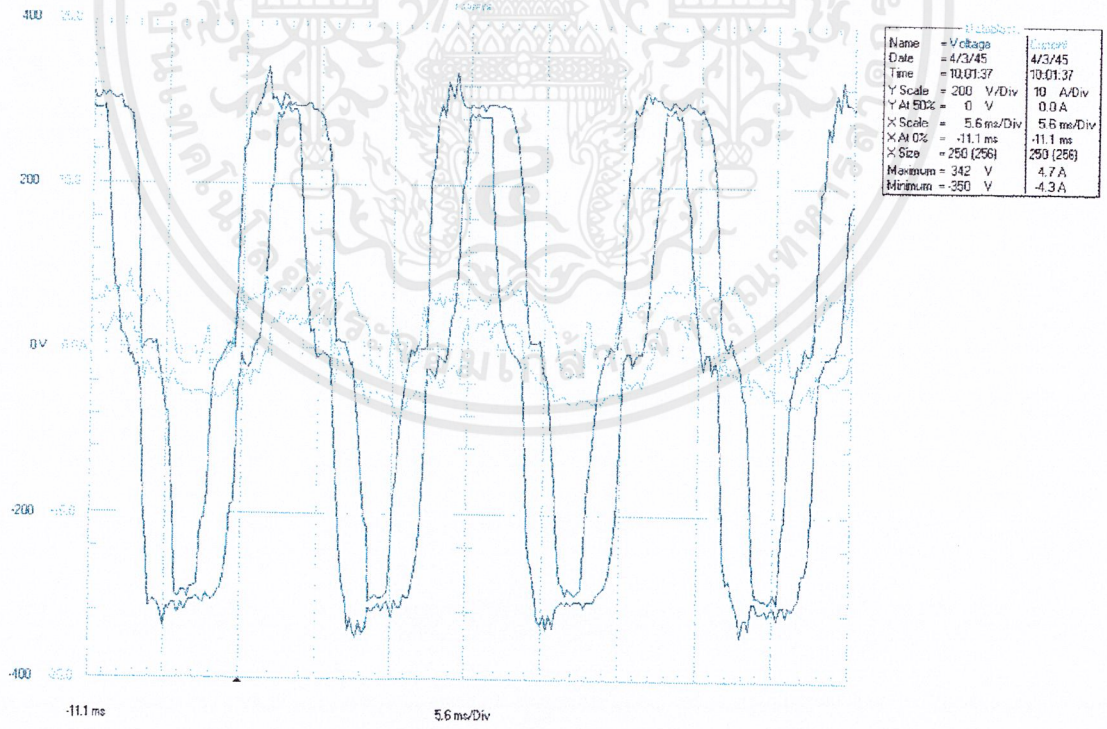
ตารางที่ ง28 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2106	2098
2	2106	2098
3	2106	2100
เฉลี่ย	2106	2098.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

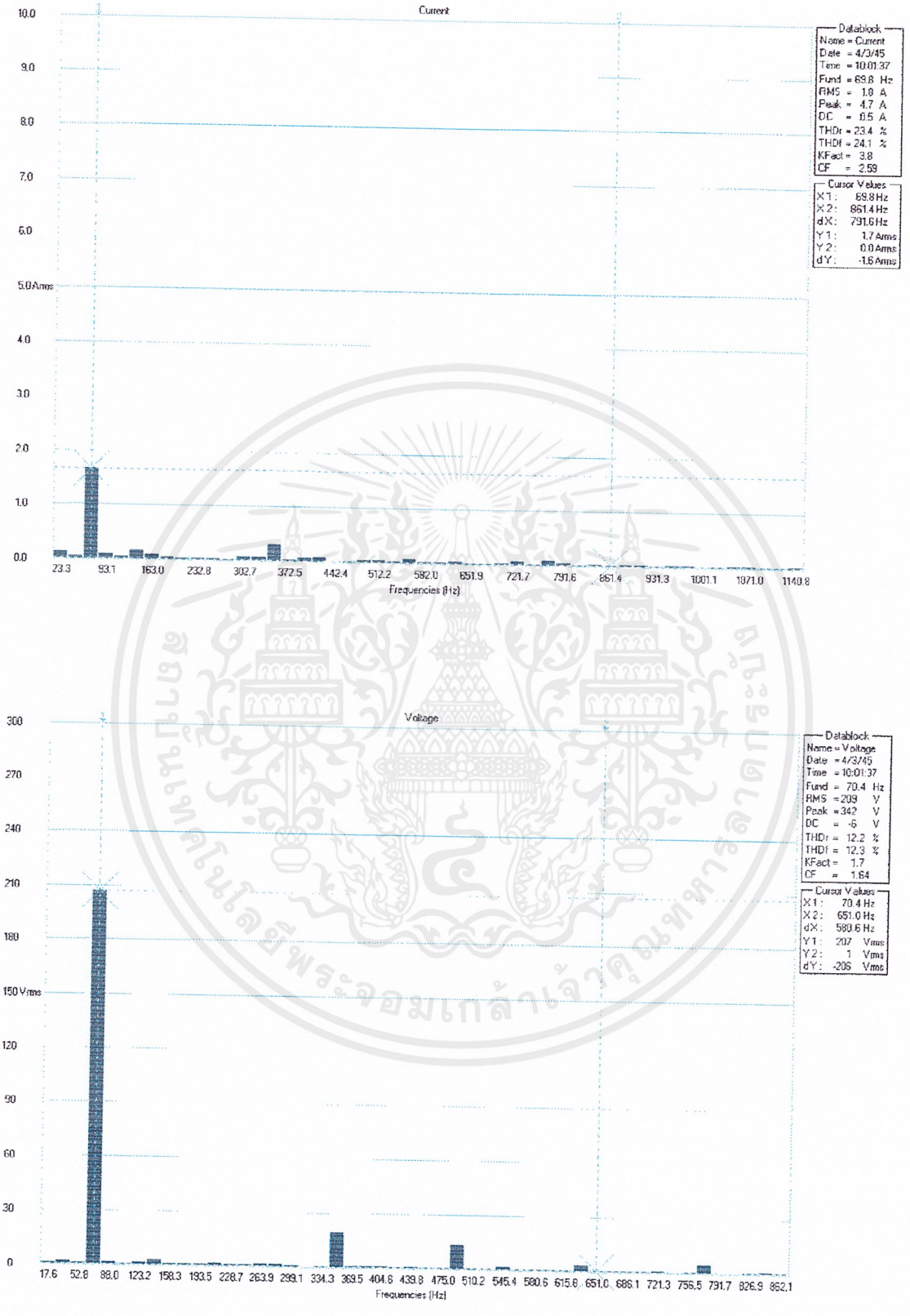
- ทางโค้ง





รูปที่ ง15 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง16 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง29 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	380	100	420	0.66
2	-	390	100	420	0.67
3	70.6	400	100	430	0.67
เฉลี่ย	70.6	390.00	100.00	423.33	0.67

ตารางที่ ง30 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	69.8	1.7	1.8	4.7	23.4	24.1	2.59
2	71.2	1.7	1.9	4.9	20.7	21.1	2.62
3	69.1	1.8	2	4.9	21.2	21.7	2.47
เฉลี่ย	70.03	1.73	1.9	4.83	21.77	22.3	2.56

ตารางที่ ง31 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	70.4	207	209	342	12.2	12.3
2	69.9	206	208	334	12.1	12.1
3	70.3	203	205	34	12.6	12.7
เฉลี่ย	70.2	205.33	207.33	236.67	12.3	12.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

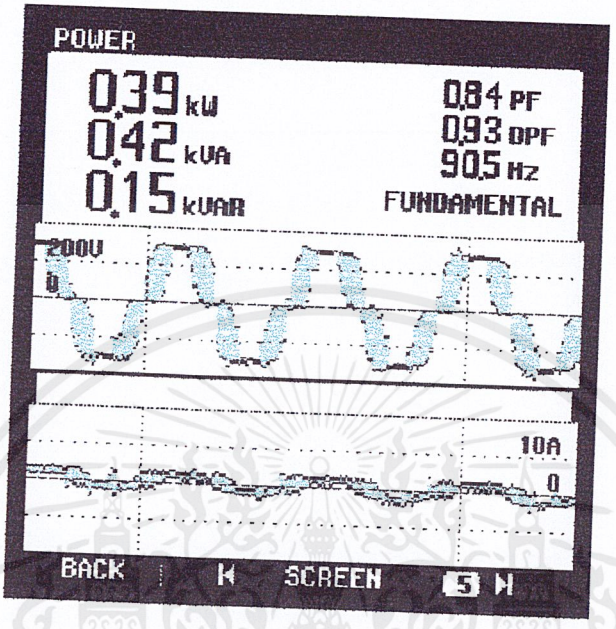
ตารางที่ ง32 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

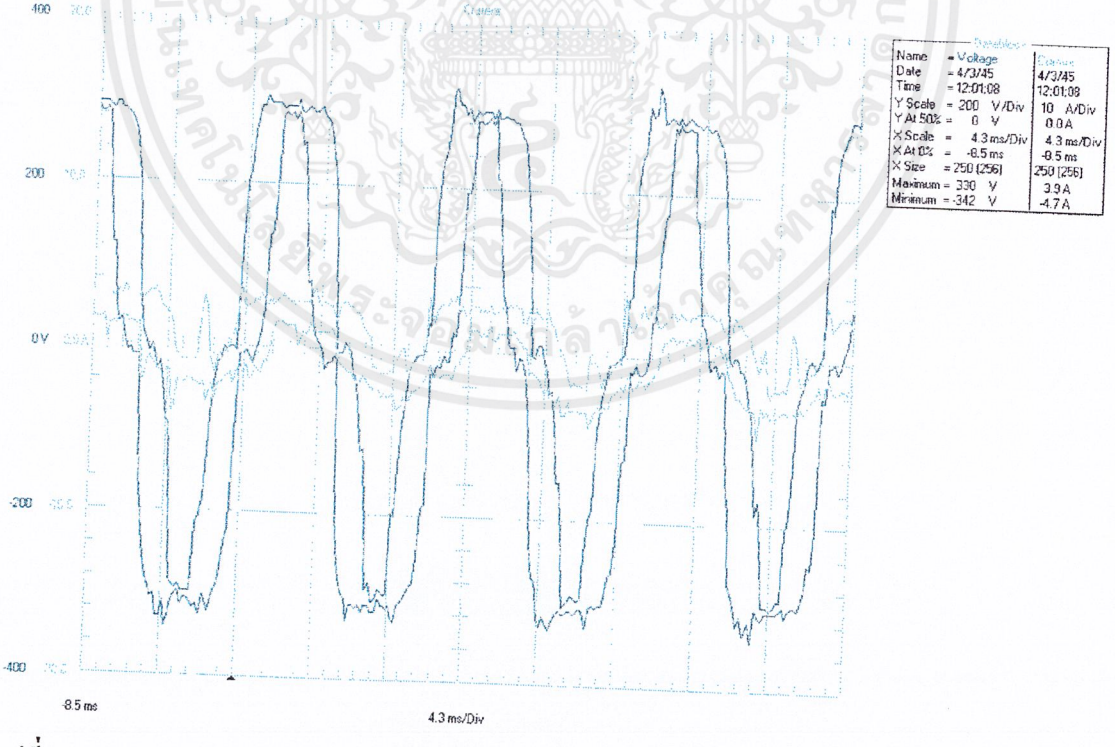
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2106	2100
2	2106	2095
3	2106	2098
เฉลี่ย	2106	2097.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 90 Hz

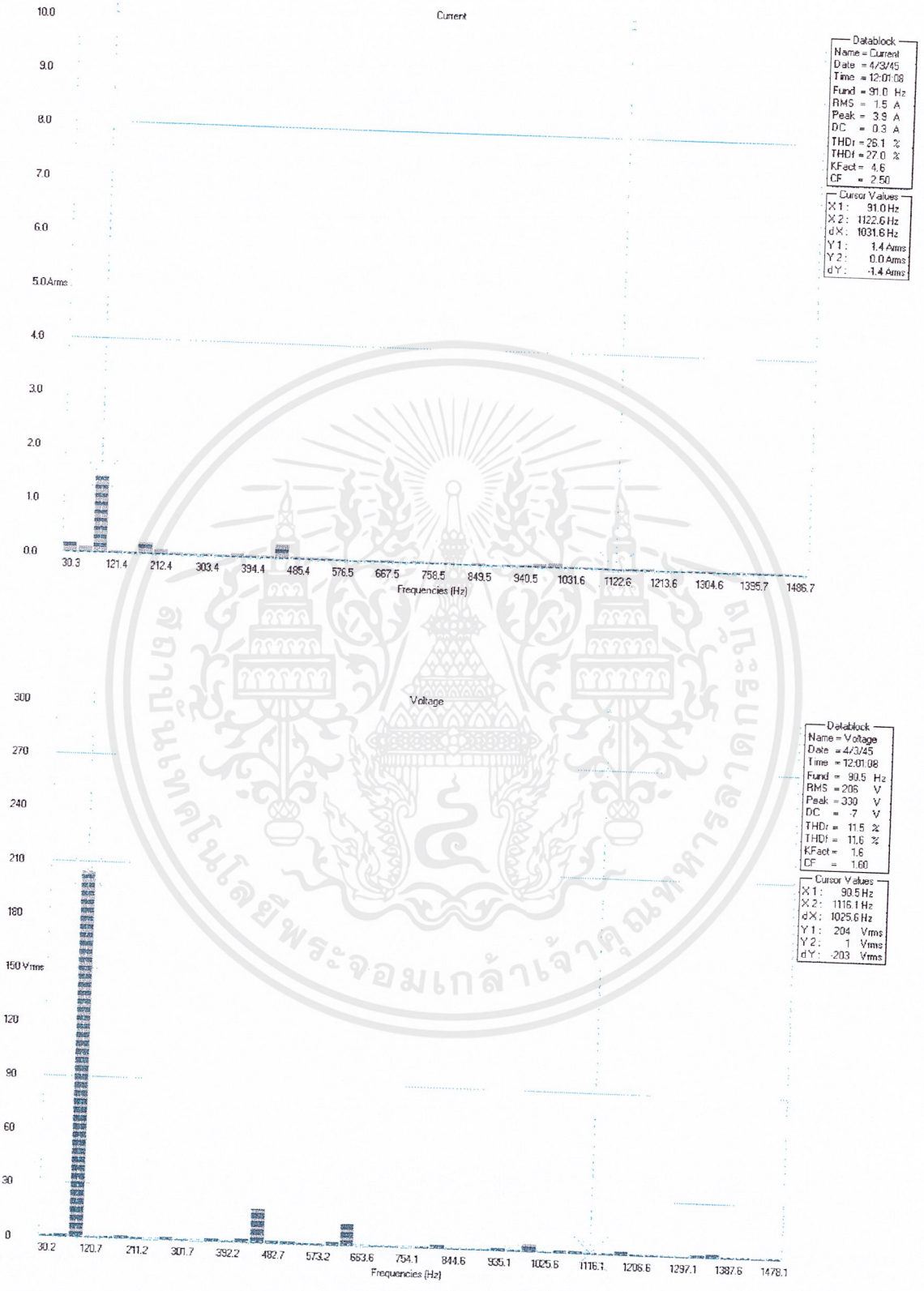
- **ทางตรง**





รูปที่ ง17 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง18 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง33 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	90.5	390	40	420	0.59
2	90.5	400	40	420	0.60
3	90.5	390	40	420	0.59
เฉลี่ย	90.5	393.33	40.00	420.00	0.60

ตารางที่ ง34 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	91	1.4	1.5	3.9	26.1	27	2.5
2	85.7	1.7	2.2	5.5	13.1	13.2	2.47
3	91.7	1.4	1.5	4.5	24.5	25.2	2.97
เฉลี่ย	89.47	1.5	1.73	4.63	21.23	21.8	2.65

ตารางที่ ง35 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	90.5	204	206	330	11.5	11.6
2	89.3	201	202	330	11.1	11.1
3	90.5	203	205	334	12.1	12.2
เฉลี่ย	90.1	202.67	204.33	331.33	11.57	11.63

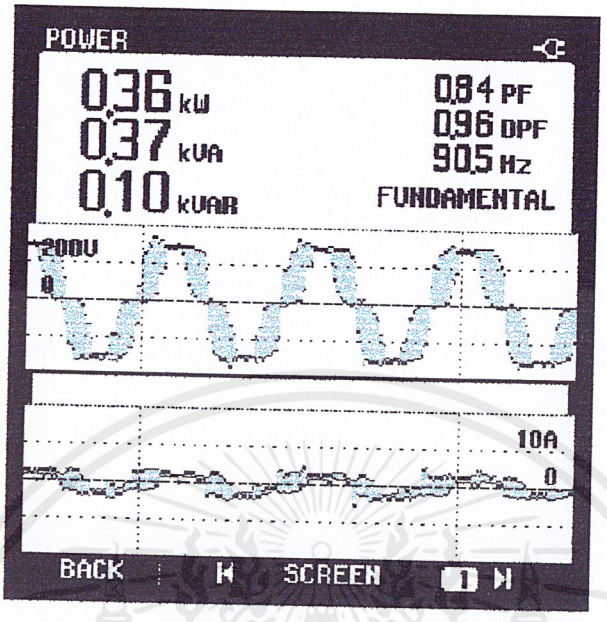
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

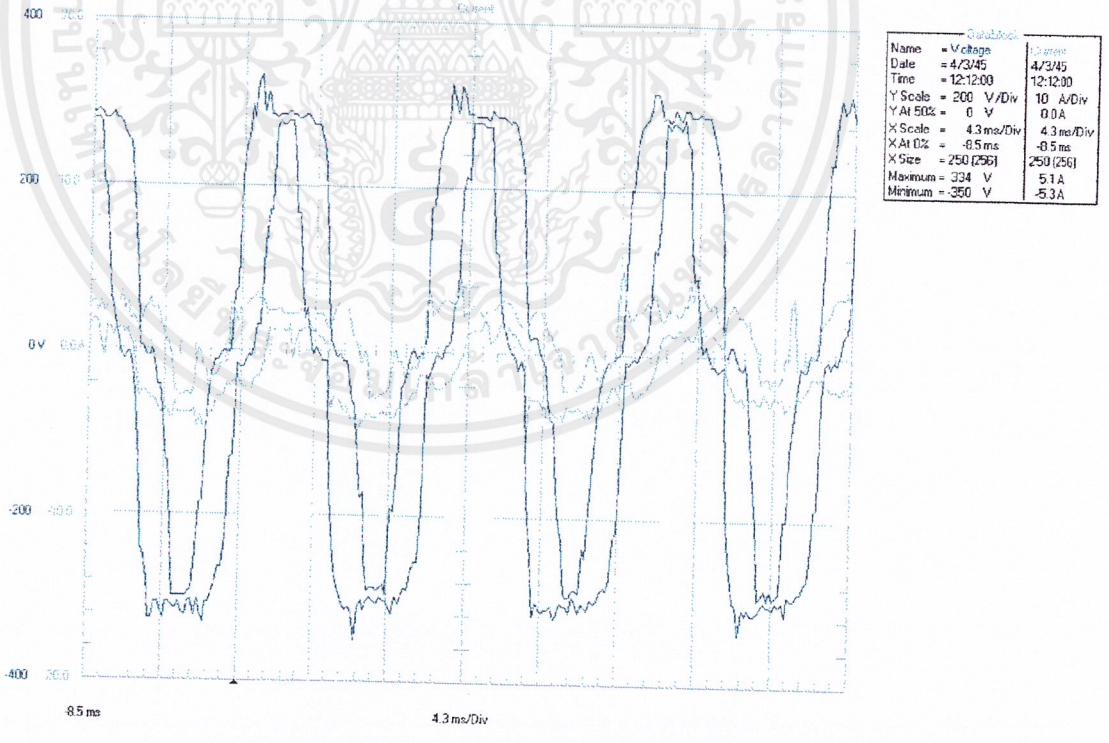
ตารางที่ ง36 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2709	2690
2	2709	2691
3	2709	2689
เฉลี่ย	2709	2690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

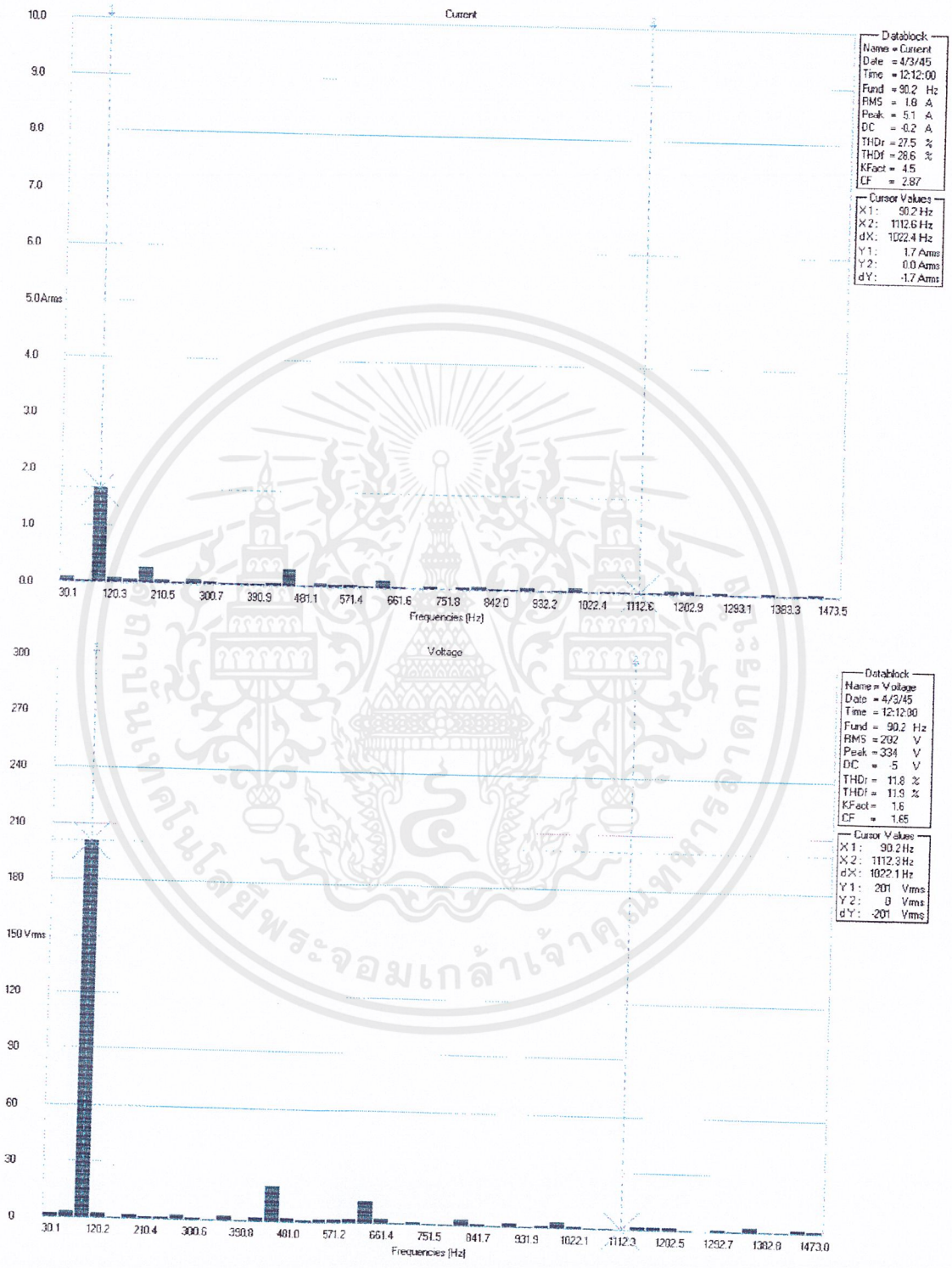
- ทางโค้ง





รูปที่ ง19 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง20 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง37 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	90.5	360	60	370	0.66
2	90.5	340	60	360	0.64
3	90.5	370	60	400	0.62
เฉลี่ย	90.5	356.67	60.00	376.67	0.64

ตารางที่ ง38 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	90.2	1.7	1.8	5.1	27.5	28.6	2.87
2	87.3	1.6	1.9	5.9	19.5	19.9	3.07
3	-	1.4	1.6	4.5	-	-	-
เฉลี่ย	88.75	1.57	1.77	5.17	23.5	24.25	2.97

ตารางที่ ง39 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	90.2	201	202	334	11.8	11.9
2	90.5	201	203	322	12.3	12.4
3	91	203	205	338	11.5	11.5
เฉลี่ย	90.57	201.67	203.33	331.33	11.87	11.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง40 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

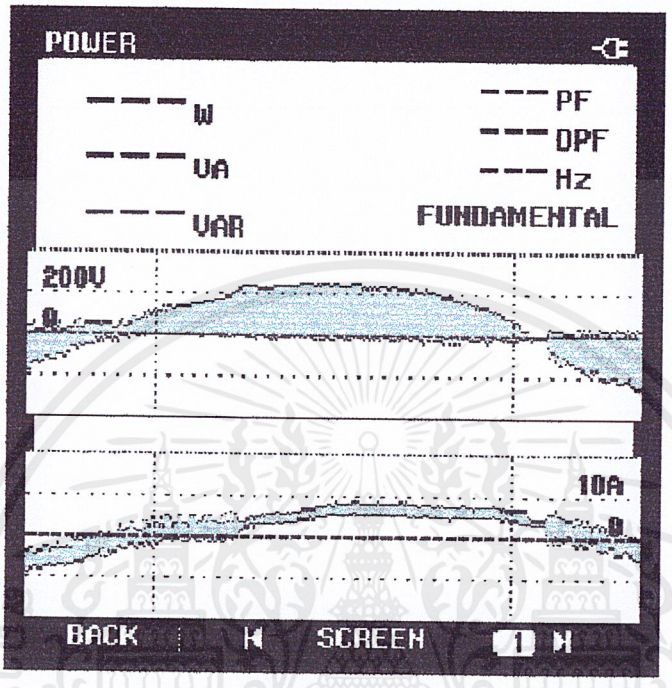
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2700	2691
2	2700	2691
3	2700	2690
เฉลี่ย	2700	2690.67

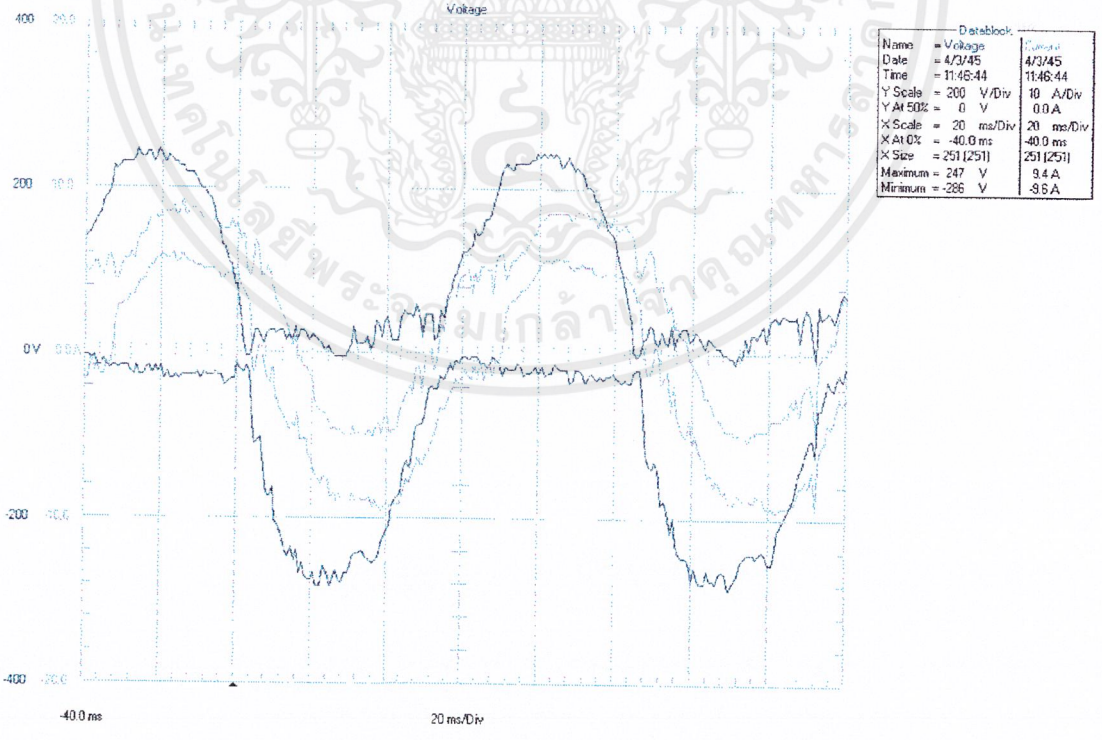
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 สภาวะรับภาระโหลด (500 kg)

1. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 10 Hz

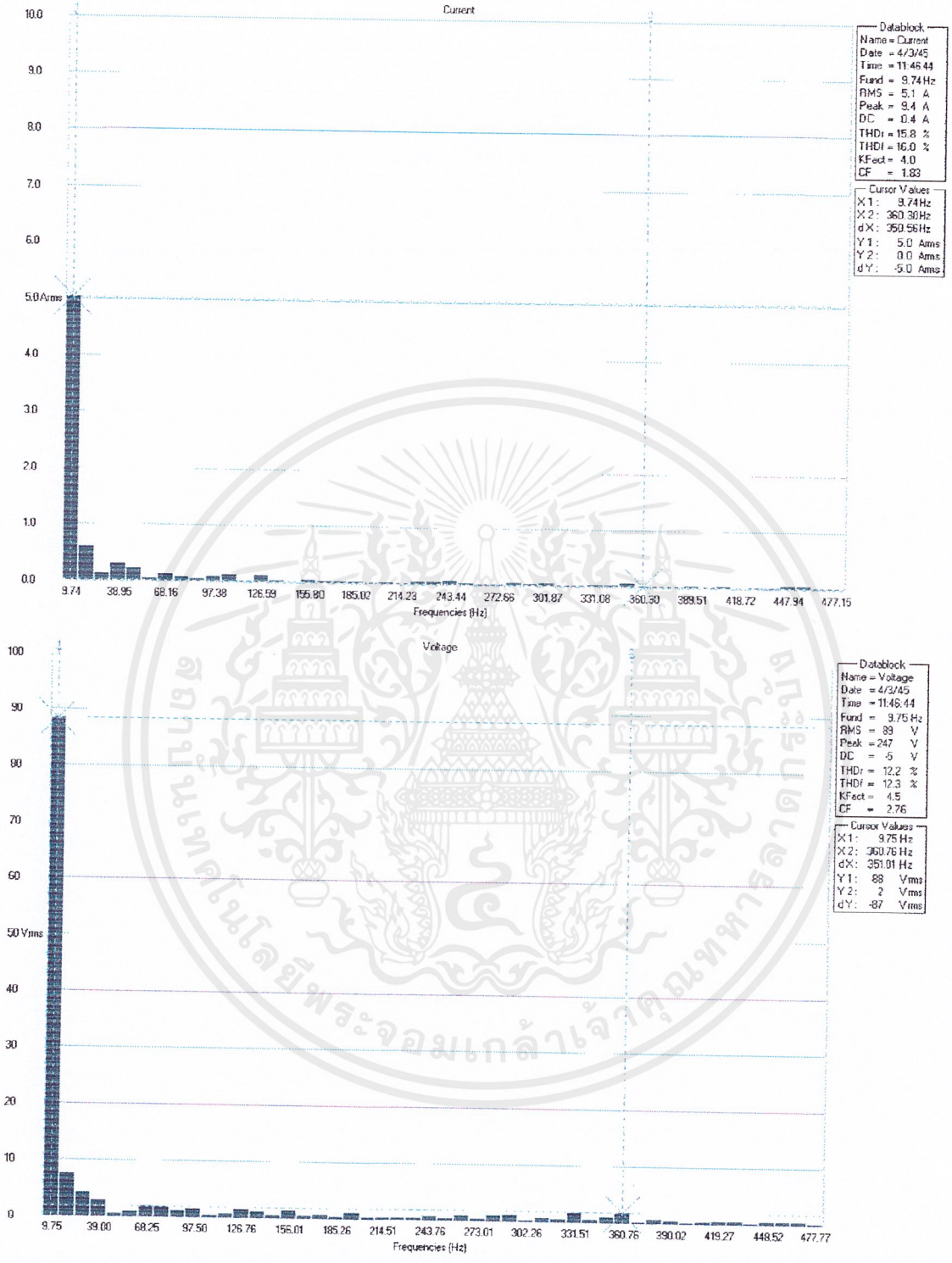
- **ทางตรง**





รูปที่ ง21 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง22 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง41 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง42 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	9.74	5	5.1	9.4	15.8	16	1.83
2	9.72	5	5.1	8.7	15.3	15.5	1.72
3	9.72	4.8	4.9	9.1	16.5	16.7	1.86
เฉลี่ย	9.73	4.93	5.03	9.07	15.87	16.07	1.8

ตารางที่ ง43 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	9.75	88	89	247	12.2	12.3
2	9.84	88	89	259	12.7	12.8
3	9.74	88	89	247	12.5	12.6
เฉลี่ย	9.78	88	89	251	12.47	12.57

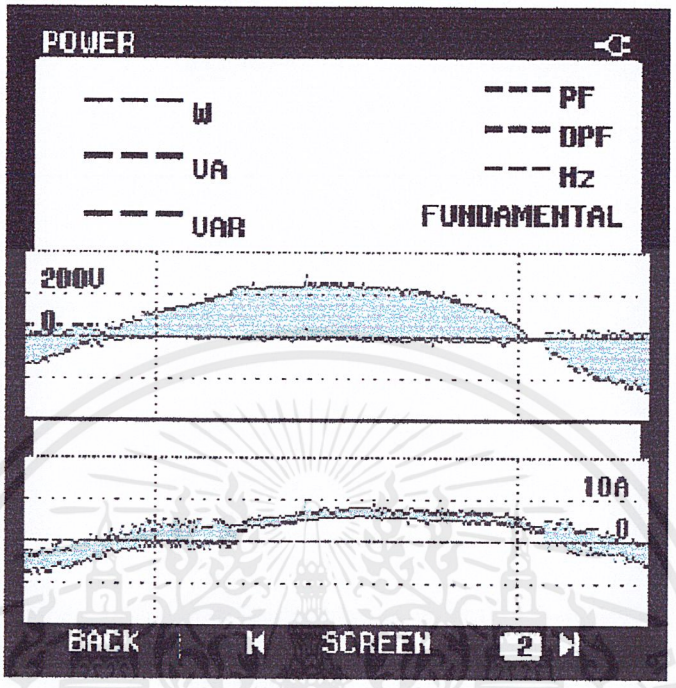
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

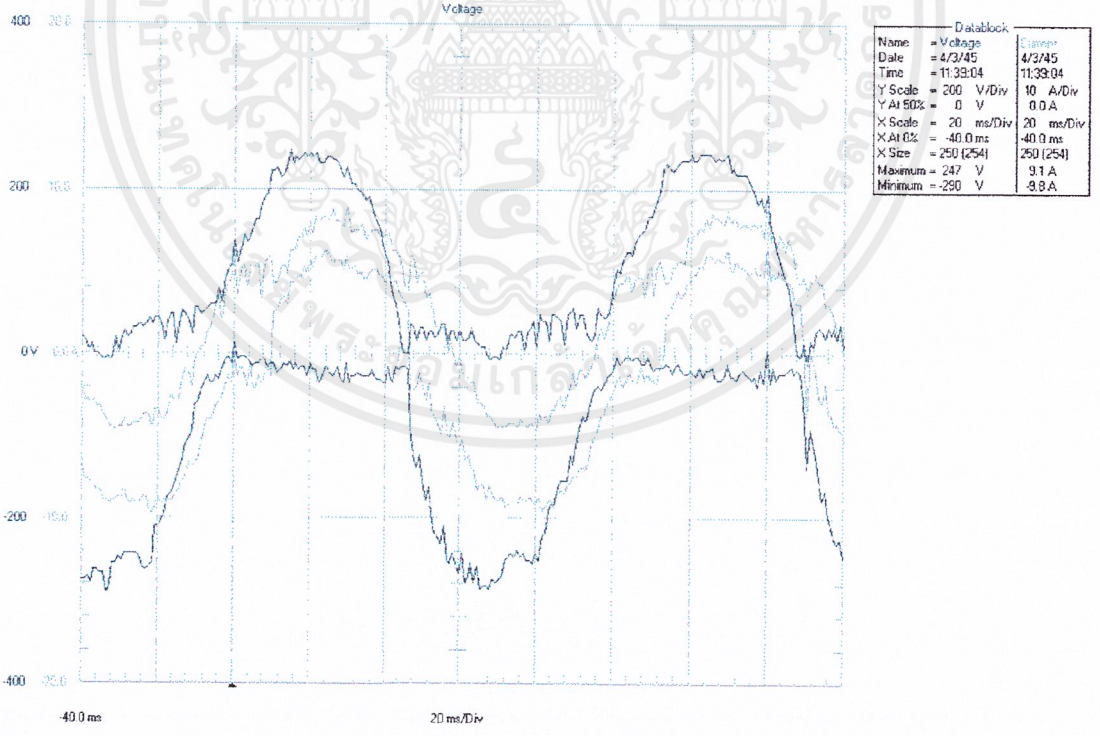
ตารางที่ ง44 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	300	285
2	300	285
3	300	285
เฉลี่ย	300	285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

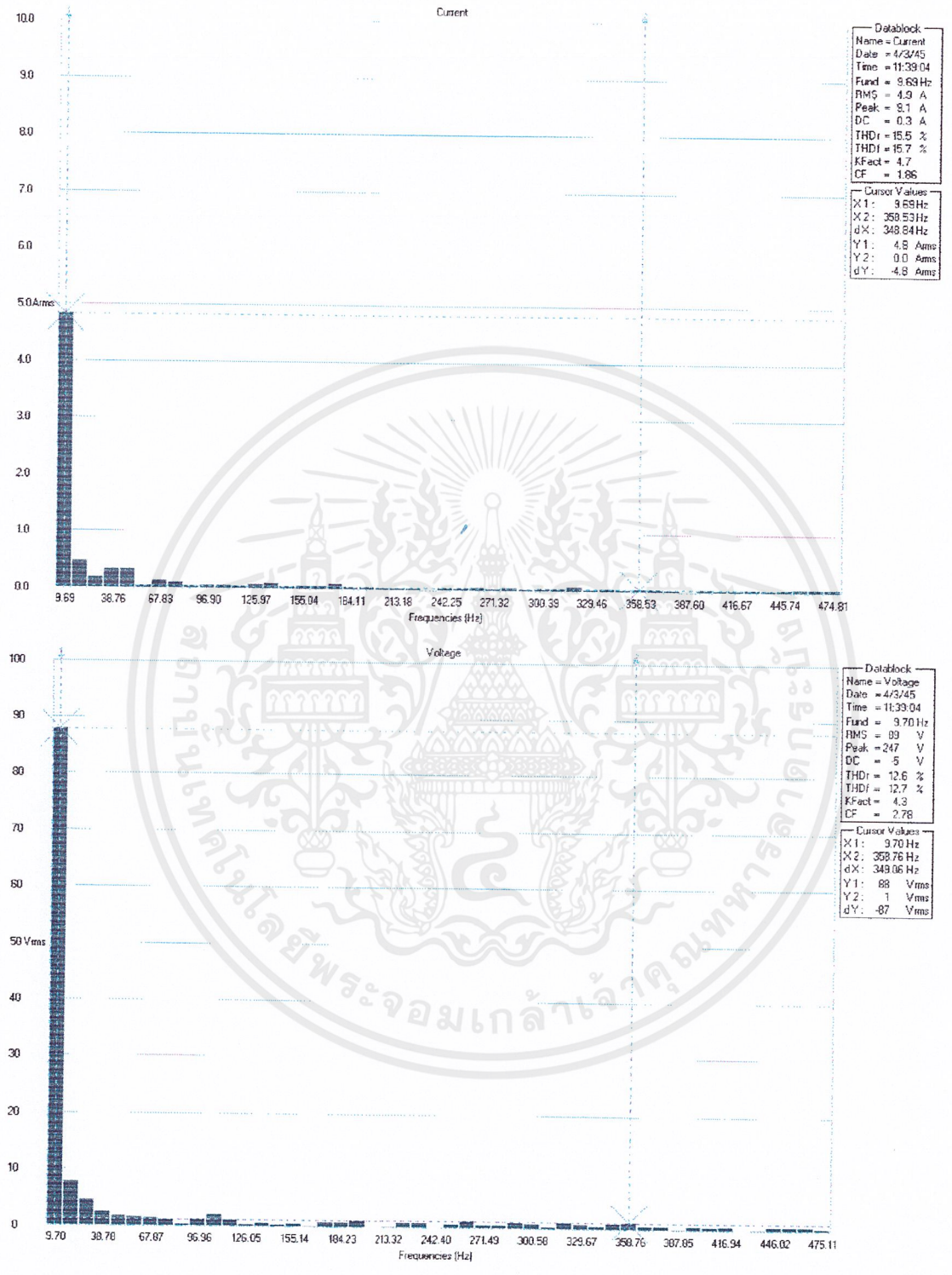
- ทางโค้ง





รูปที่ ง23 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 10 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง24 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 10 Hz(ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง45 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง46 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	9.69	4.8	4.9	9.1	15.5	15.7	1.86
2	9.58	4.9	5	9.4	14.5	14.6	1.89
3	9.62	4.7	4.8	8.5	15.5	15.7	1.78
เฉลี่ย	9.63	4.8	4.9	9	15.17	15.33	1.84

ตารางที่ ง47 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	9.7	88	89	247	12.6	12.7
2	9.8	88	89	251	12.6	12.7
3	9.66	87	88	255	12.4	12.5
เฉลี่ย	9.72	87.67	88.67	251	12.53	12.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

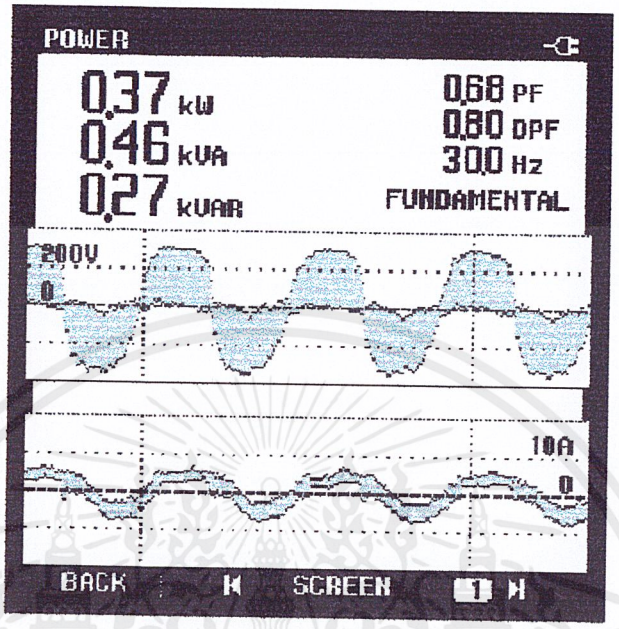
ตารางที่ ง48 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

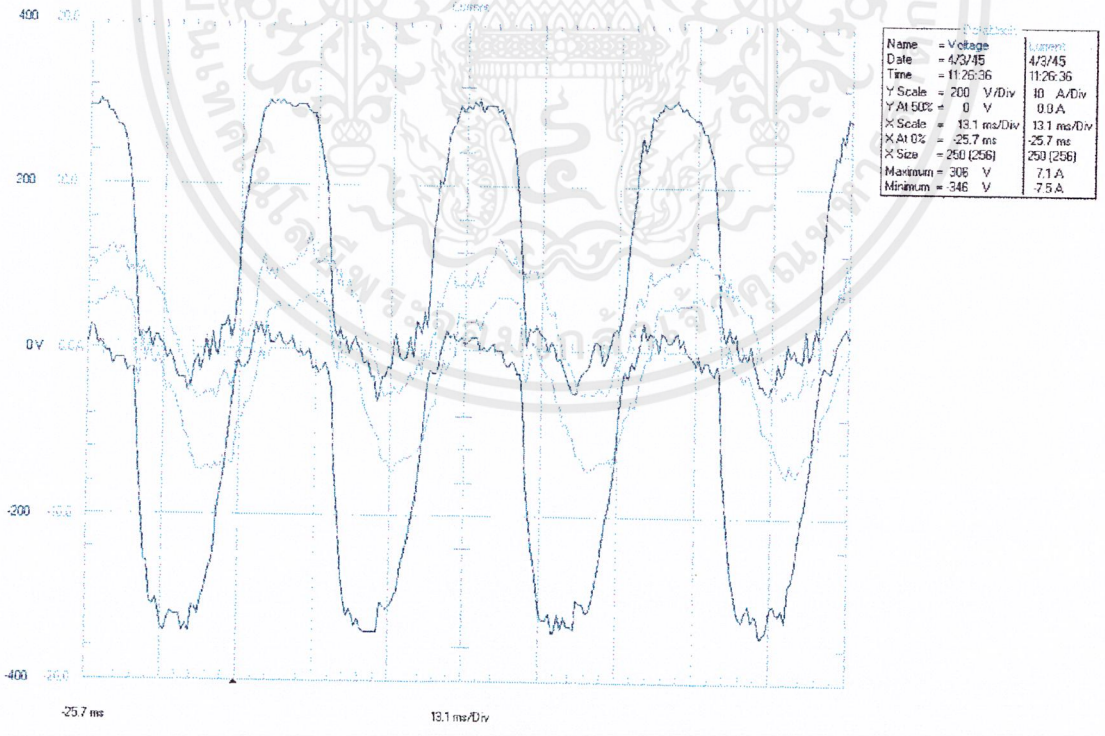
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	300	287
2	300	287
3	300	288
เฉลี่ย	300	287.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 30 Hz

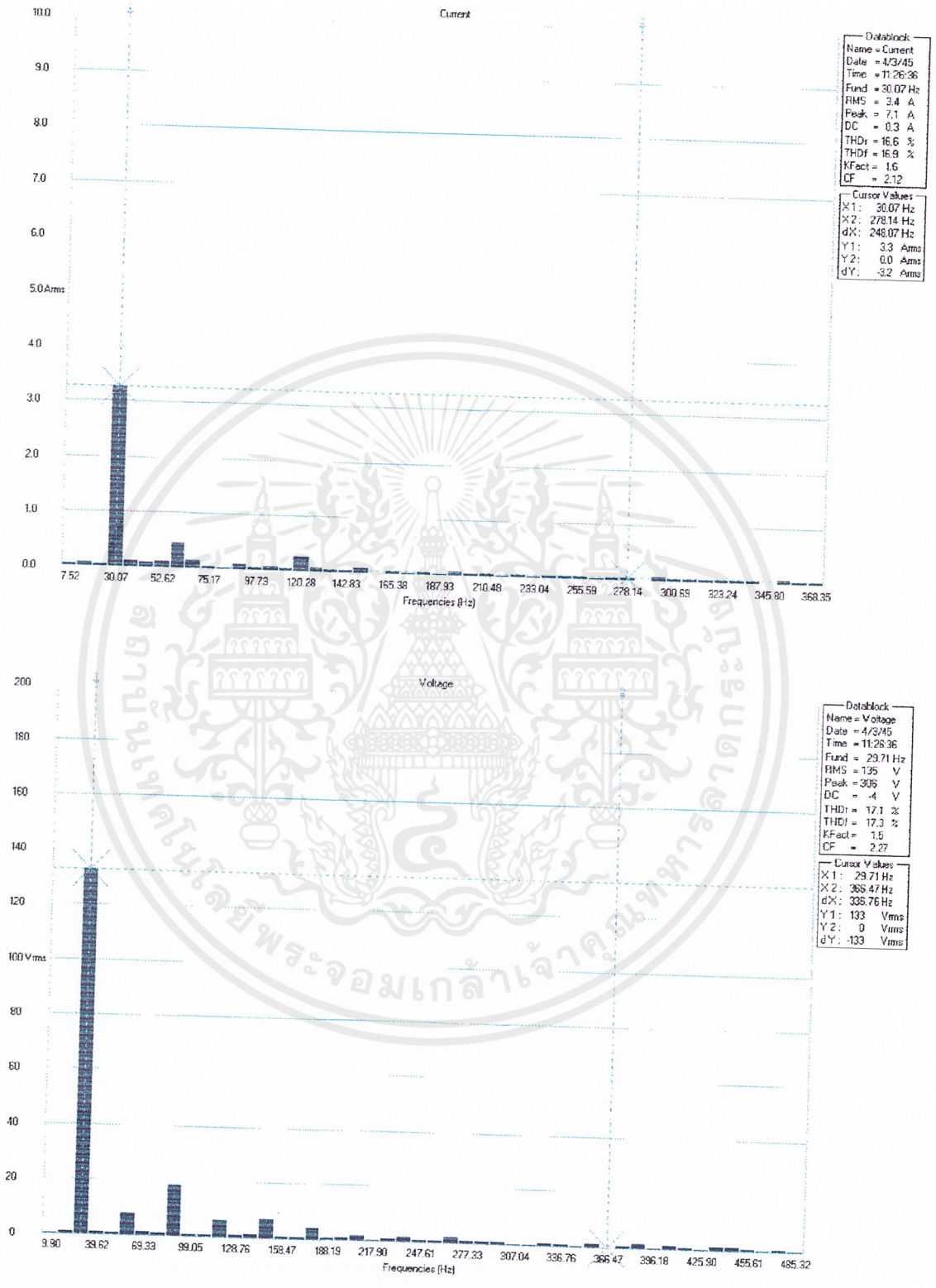
- **ทางตรง**





รูปที่ ง25 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง26 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง49 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	30	370	170	460	0.68
2	30	370	170	460	0.68
3	29.9	370	170	450	0.69
เฉลี่ย	29.97	370.00	170.00	456.67	0.68

ตารางที่ ง50 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	30.07	3.3	3.4	7.1	16.6	16.9	2.12
2	29.65	3.2	3.3	7.1	19.3	19.7	2.17
3	29.74	3.2	3.3	8.1	18.5	18.8	2.47
เฉลี่ย	29.82	3.23	3.33	7.43	18.13	18.47	2.25

ตารางที่ ง51 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	29.71	133	135	306	17.1	17.3
2	29.71	131	133	310	17.6	17.9
3	29.64	131	134	314	17.7	18
เฉลี่ย	29.69	131.67	134	310	17.47	17.73

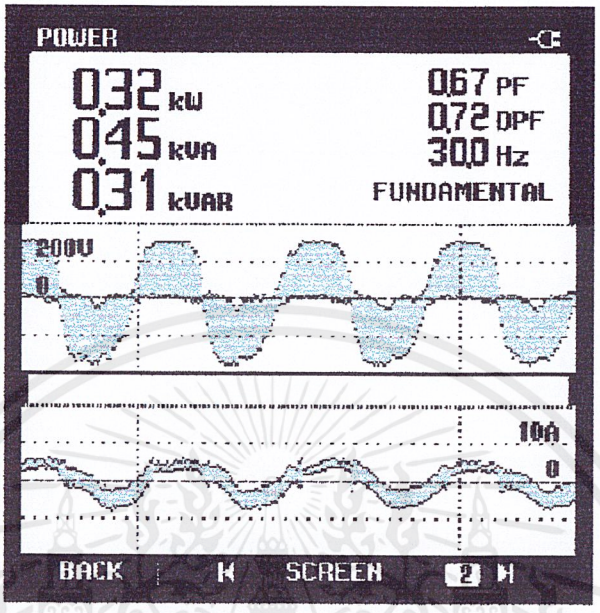
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

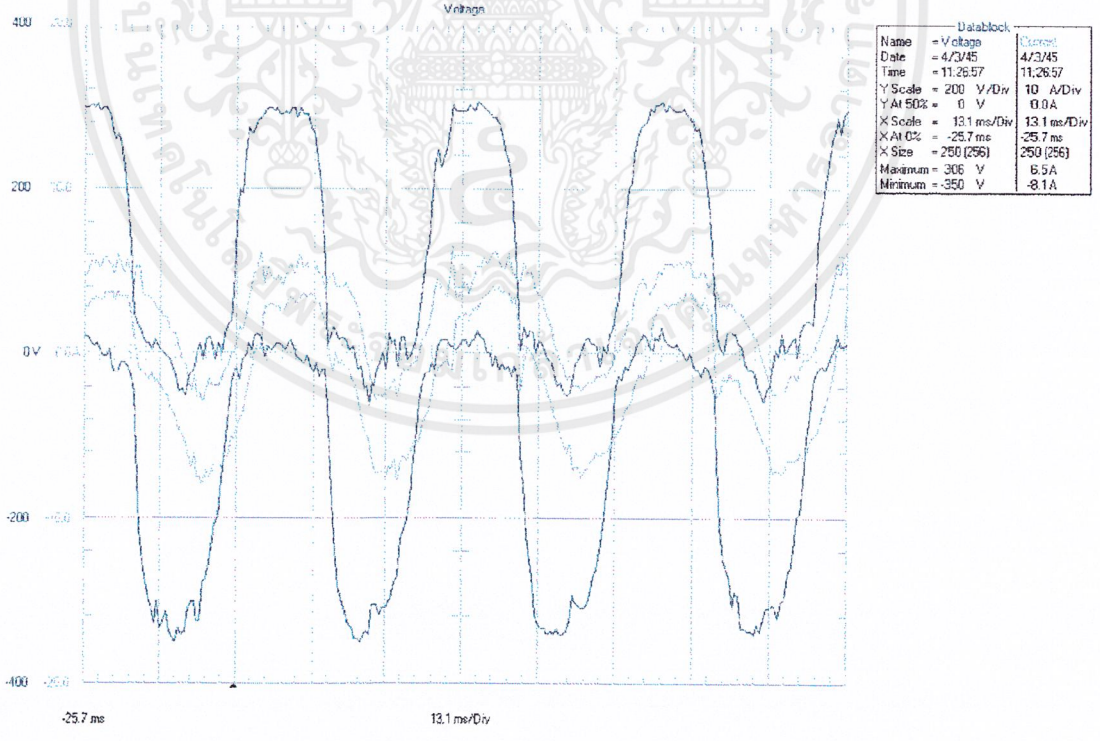
ตารางที่ ง52 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	903	890
2	903	889
3	903	889
เฉลี่ย	903	889.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

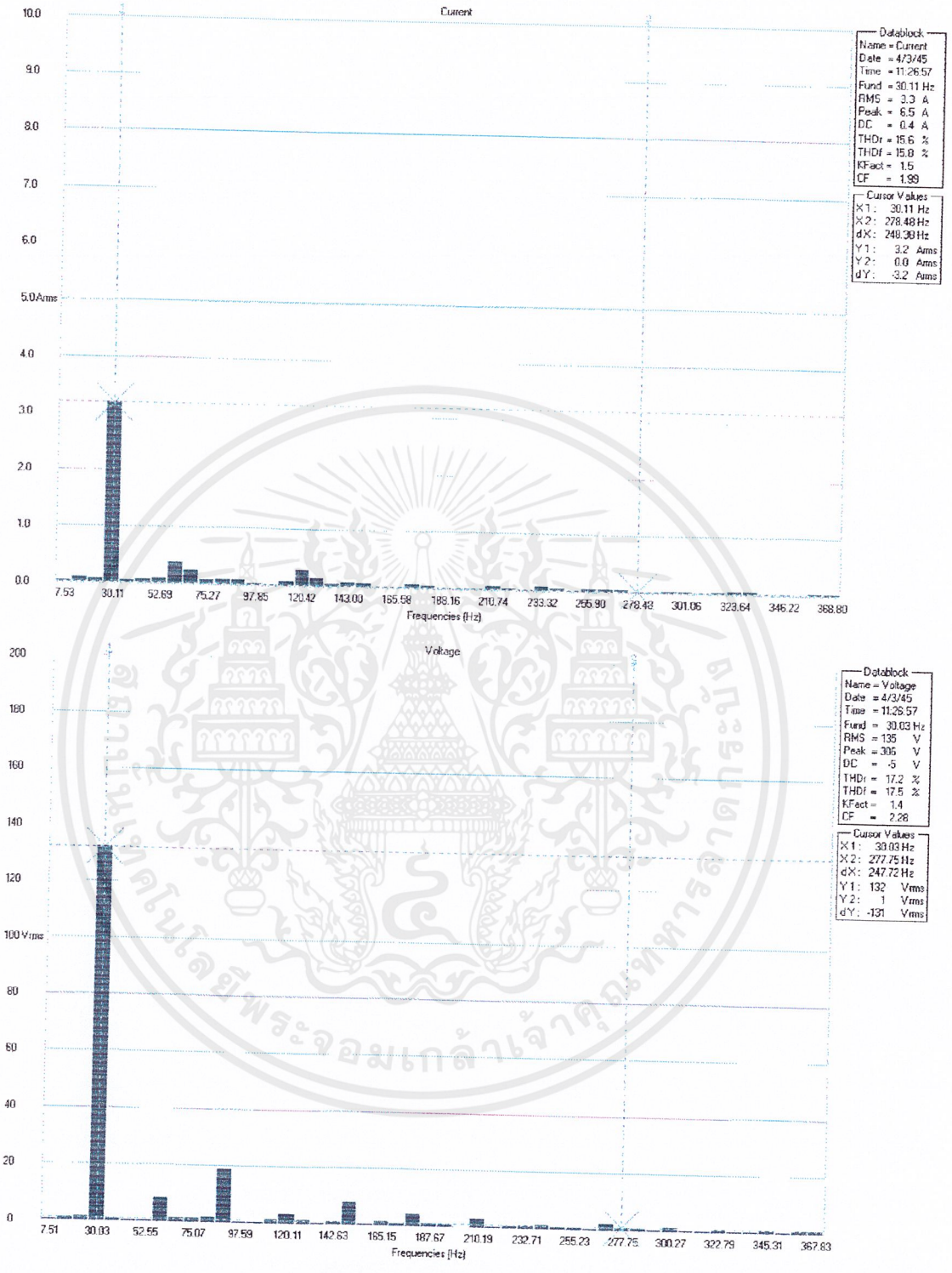
- ทางโค้ง





รูปที่ ง27 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง28 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 30 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง53 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	30	320	200	450	0.67
2	29.8	370	200	460	0.72
3	29.8	400	200	470	0.74
เฉลี่ย	29.87	363.33	200.00	460.00	0.71

ตารางที่ ง54 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	30.11	3.2	3.3	6.5	15.6	15.8	1.99
2	30.03	3.3	3.3	6.5	14.4	14.6	1.95
3	29.92	3.1	3.2	6.9	17.8	18.1	2.15
เฉลี่ย	30.02	3.2	3.27	6.63	15.93	16.17	2.03

ตารางที่ ง55 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	30.03	132	135	306	17.2	17.5
2	30.08	132	134	306	16.6	16.9
3	29.88	130	133	306	17.5	17.7
เฉลี่ย	30	131.33	134	306	17.1	17.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

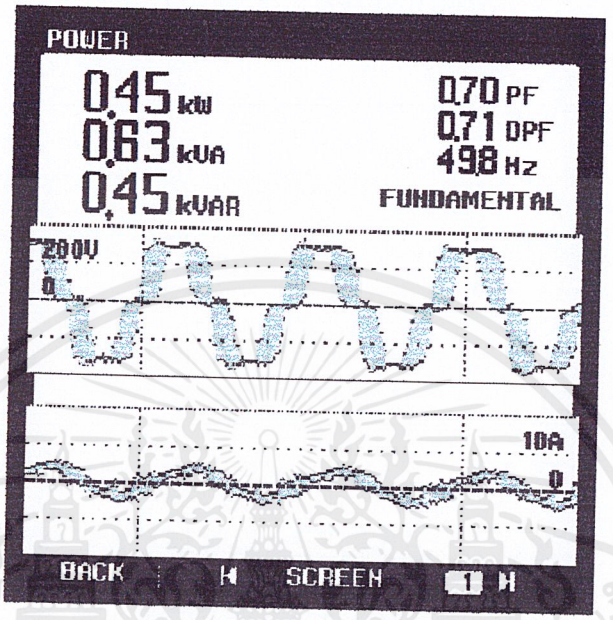
ตารางที่ ง56 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

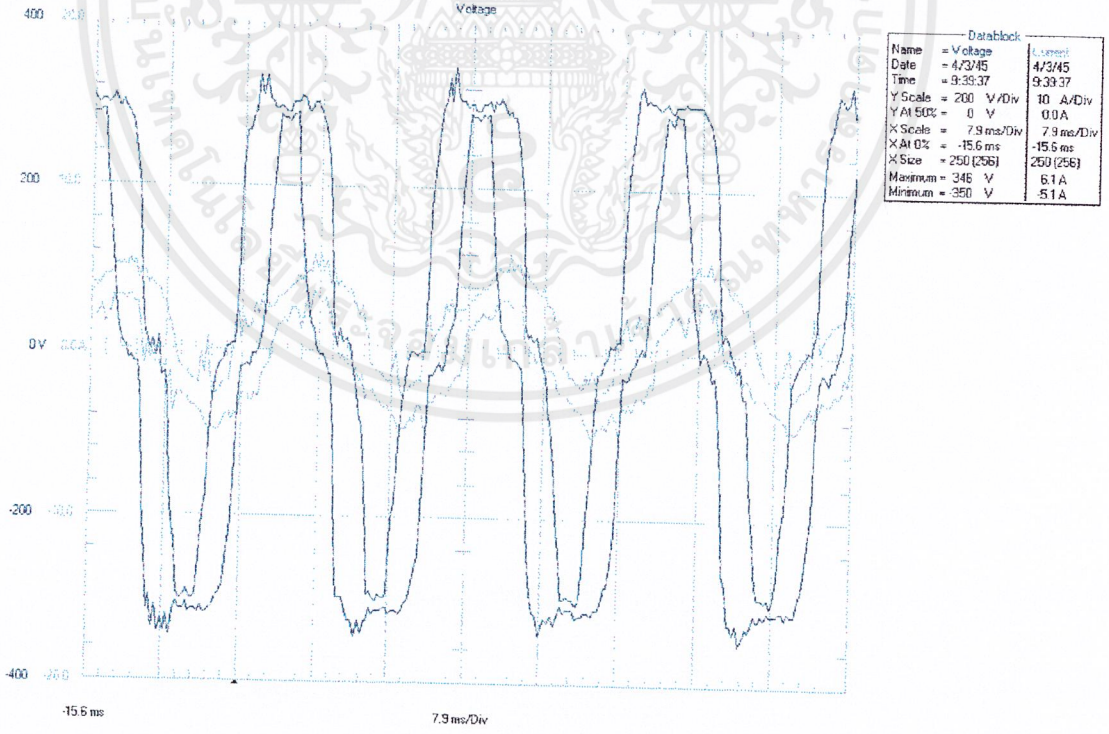
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	903	895
2	903	894
3	903	896
เฉลี่ย	903	895

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz

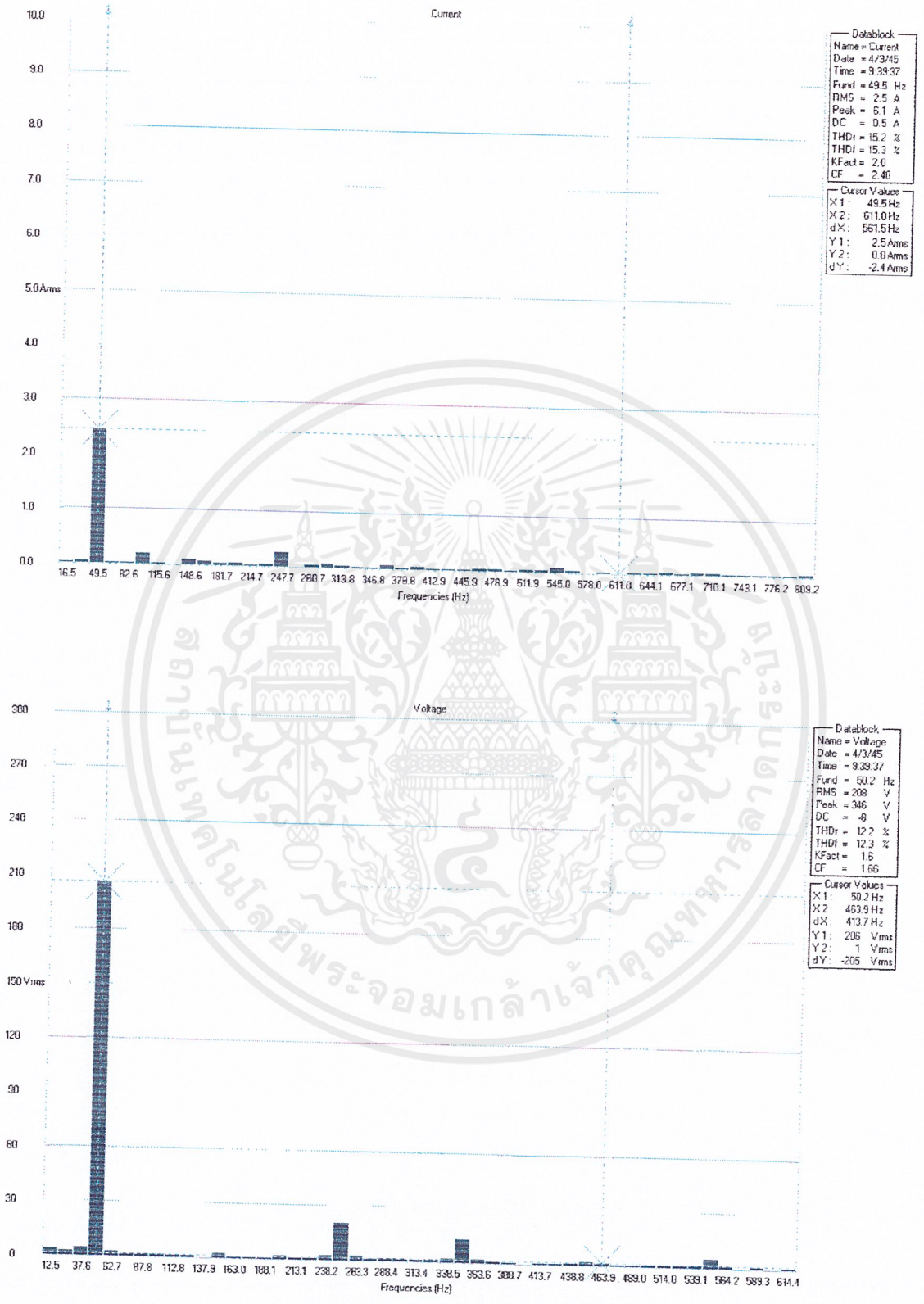
- **ทางตรง**





รูปที่ ง29 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง30 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง57 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	49.8	450	210	630	0.60
2	50	480	210	620	0.64
3	50.1	440	210	620	0.61
เฉลี่ย	49.97	456.67	210.00	623.33	0.62

ตารางที่ ง58 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	49.5	2.5	2.5	6.1	15.2	15.3	2.4
2	49.4	3	3	6.5	12.1	12.2	2.14
3	49.8	2.7	2.8	6.5	12.2	12.3	2.35
เฉลี่ย	49.57	2.73	2.77	6.37	13.17	13.27	2.3

ตารางที่ ง59 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	50.2	206	208	346	12.2	12.3
2	49.2	207	209	346	11.4	11.4
3	50.3	208	210	358	11.7	11.8
เฉลี่ย	49.9	207	209	350	11.77	11.83

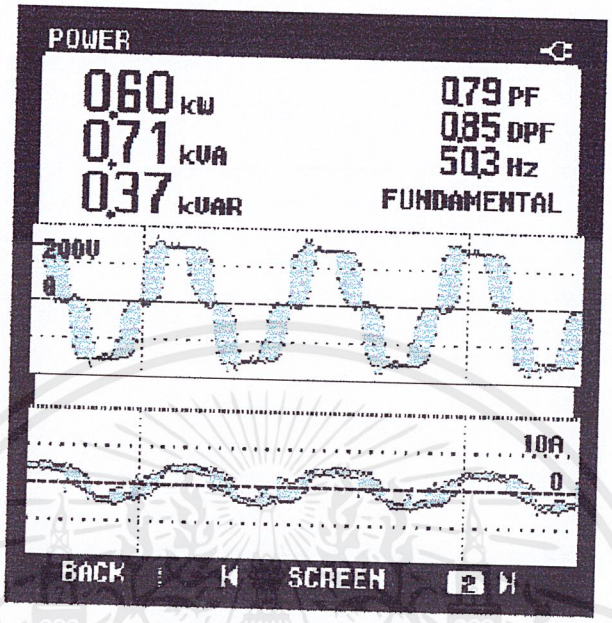
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

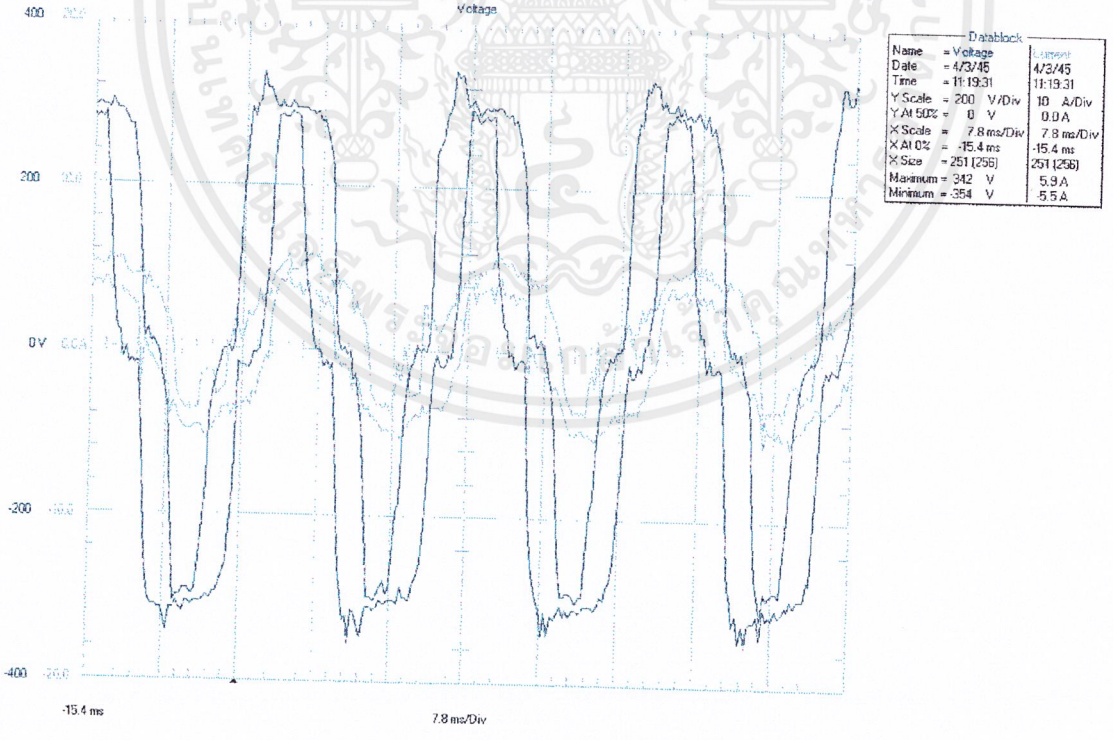
ตารางที่ ง60 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	1500	1496
2	1500	1494
3	1500	1494
เฉลี่ย	1500	1494.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

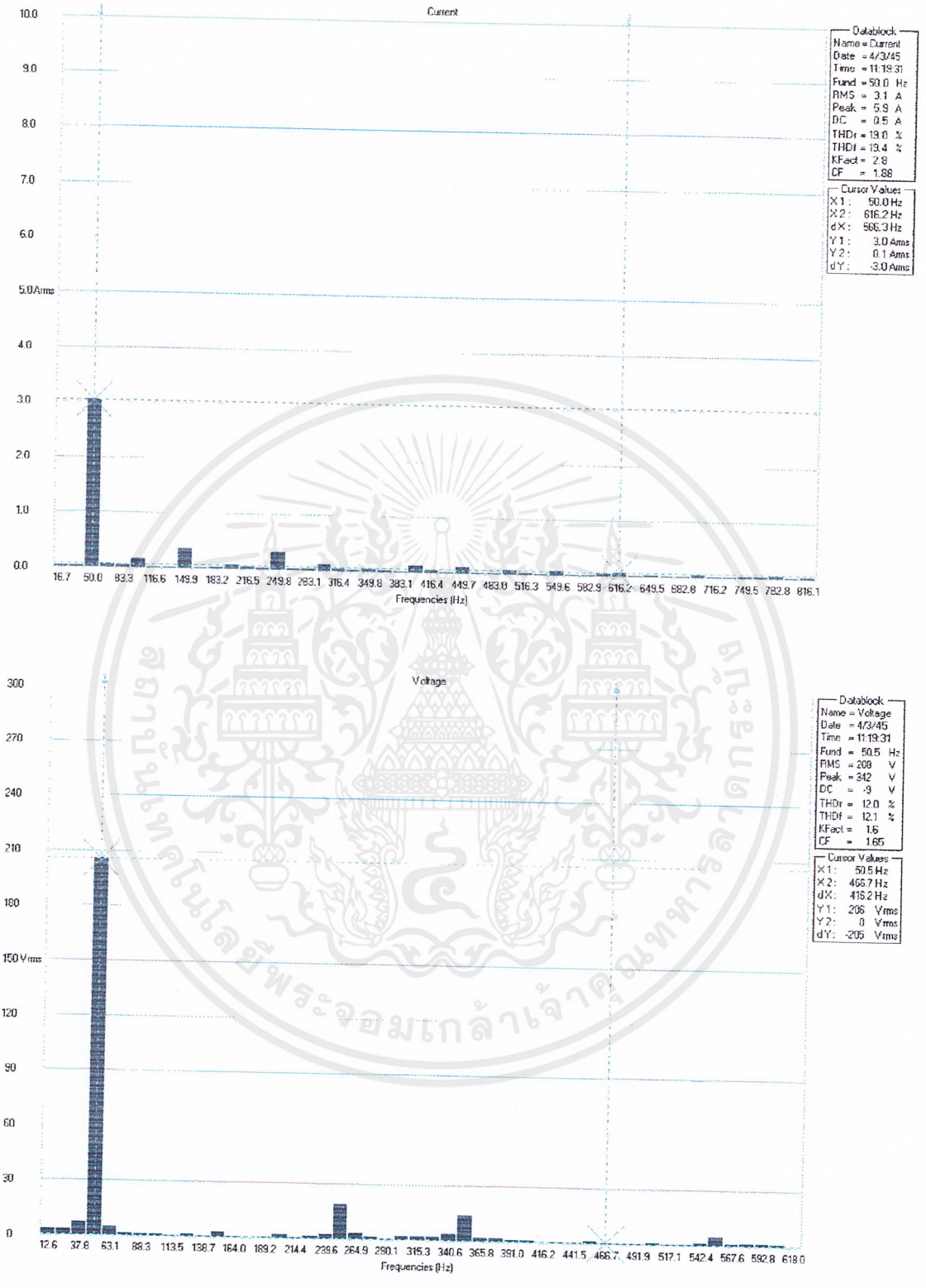
- ทางโค้ง





รูปที่ ง31 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง32 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 50 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง61 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	50.3	600	230	710	0.67
2	50.3	560	230	680	0.67
3	50.3	550	230	680	0.66
เฉลี่ย	50.3	570.00	230.00	690.00	0.67

ตารางที่ ง62 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	50	3	3.1	5.9	19	19.4	1.88
2	50.1	3	3.1	6.1	15.6	15.8	1.95
3	50.3	2.9	3	5.7	15.6	15.7	1.9
เฉลี่ย	50.13	2.97	3.07	5.9	16.73	16.97	1.91

ตารางที่ ง63 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	50.5	206	208	342	12	12.1
2	49.7	205	207	346	12.4	12.5
3	50.3	205	207	346	12	12.1
เฉลี่ย	50.17	205.33	207.33	344.67	12.13	12.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง64 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

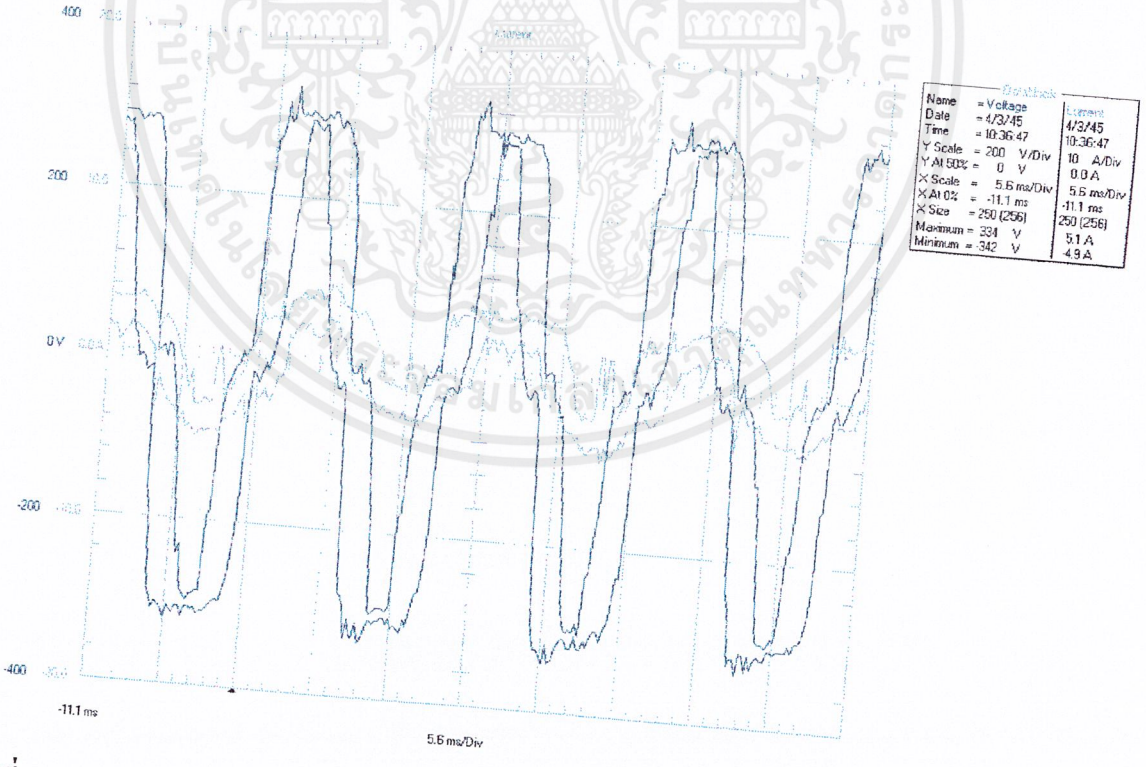
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	1500	1496
2	150	1491
3	1500	1495
เฉลี่ย	1500	1494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

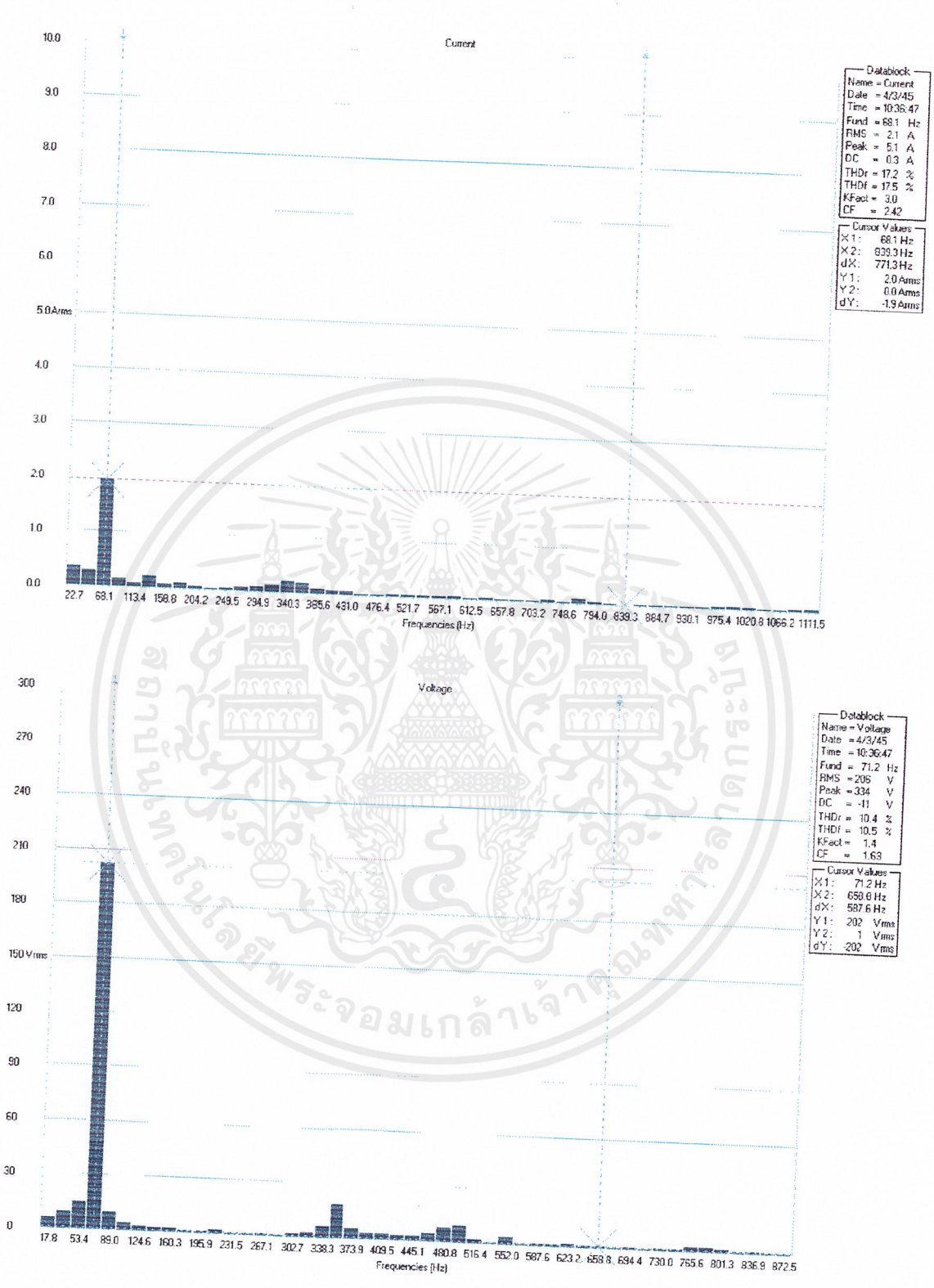
4. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 70 Hz

- ทางตรง



รูปที่ ง33 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง34 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง65 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	440	100	480	0.65
2	70.0	430	100	460	0.67
3	70.0	380	100	460	0.60
เฉลี่ย	70.0	416.67	100.00	466.67	0.64

ตารางที่ ง66 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	68.1	2	2.1	5.1	17.2	17.5	2.42
2	69.9	1.9	2	5.1	23.6	24.3	2.52
3	69	2	2.1	5.1	20.4	20.9	2.42
เฉลี่ย	69	1.97	2.07	5.1	20.4	20.9	2.45

ตารางที่ ง67 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	71.2	202	206	334	10.4	10.5
2	69.8	205	207	326	12.1	12.2
3	70.6	206	208	338	11.6	11.6
เฉลี่ย	70.53	204.33	207	332.67	11.37	11.43

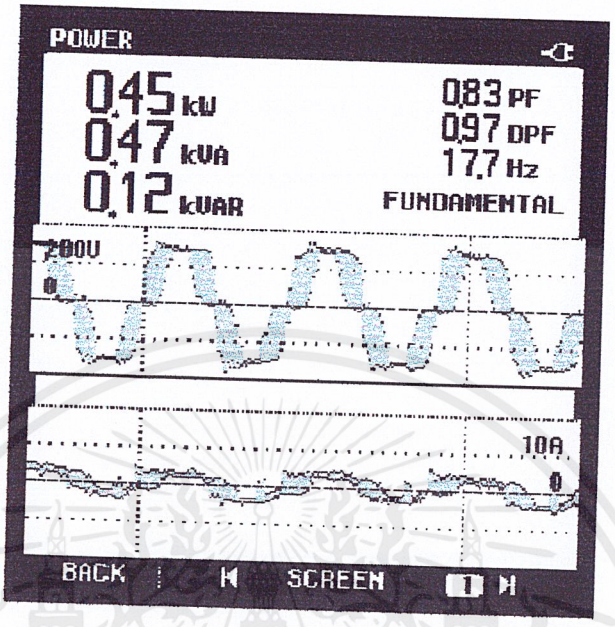
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

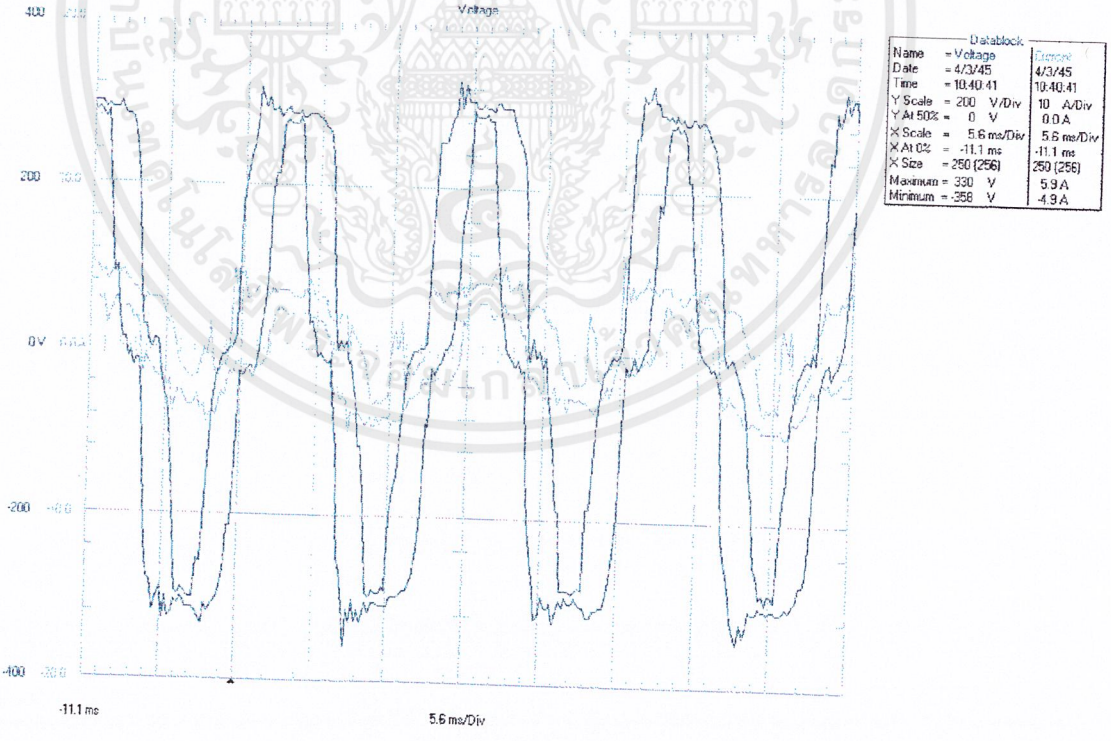
ตารางที่ ง68 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2106	2092
2	2106	2092
3	2106	2093
เฉลี่ย	2106	2092.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

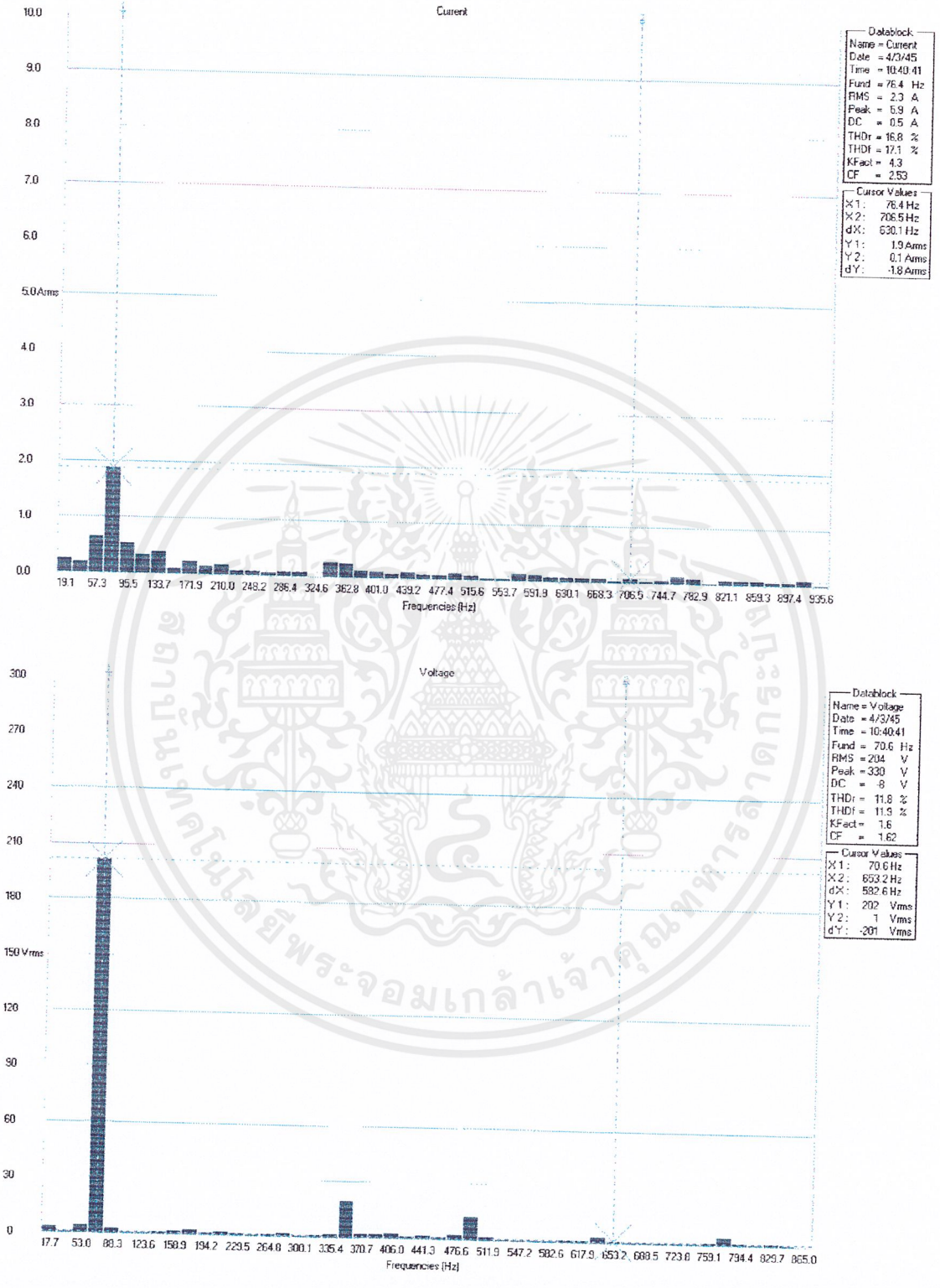
- ทางโค้ง





รูปที่ ง35 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง36 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 70 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง69 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	450	120	470	0.70
2	-	460	120	470	0.71
3	-	420	120	470	0.66
เฉลี่ย	-	443.33	120.00	470.00	0.69

ตารางที่ ง70 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	76.4	1.9	2.3	5.9	16.8	17.1	2.53
2	71.7	2.1	2.3	5.5	14.9	15.1	2.41
3	70.4	1.8	2	4.9	26.4	27.4	2.46
เฉลี่ย	72.83	1.93	2.2	5.43	19.37	19.87	2.47

ตารางที่ ง71 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	70.6	202	204	330	11.8	11.9
2	70.6	201	203	326	11.9	12
3	70.4	207	208	338	12	12.1
เฉลี่ย	70.53	203.33	205	331.33	11.9	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

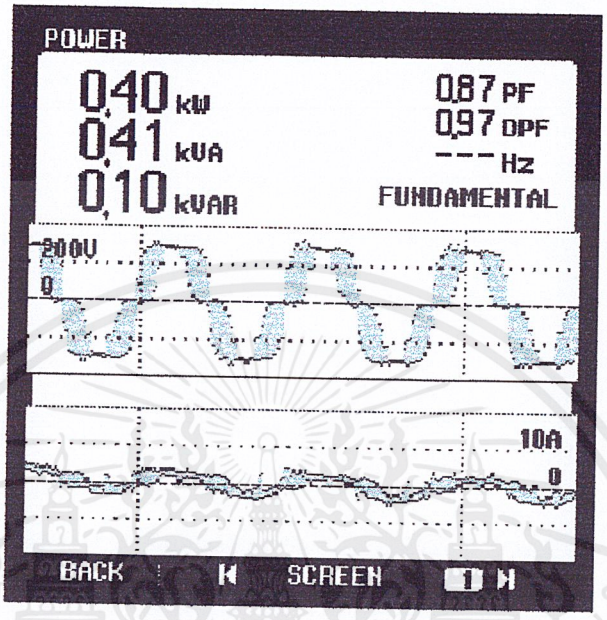
ตารางที่ ง72 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

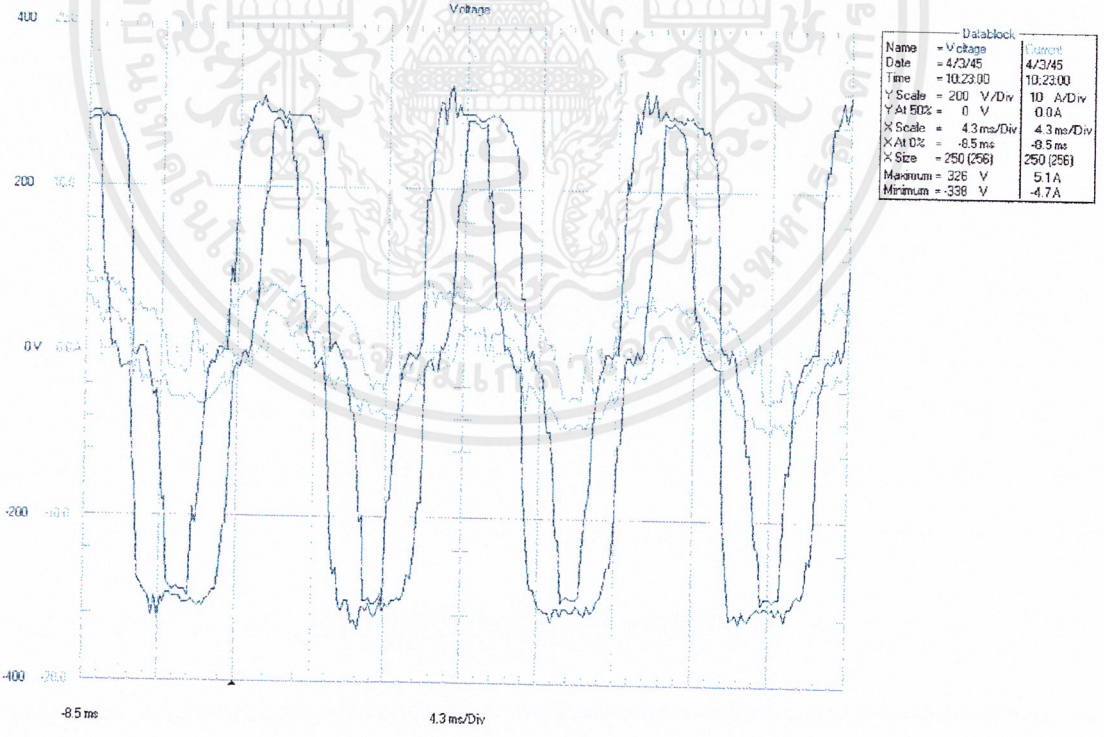
ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2106	2091
2	2106	2091
3	2106	2093
เฉลี่ย	2106	2091.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การทดสอบการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของรถรางไฟฟ้าที่ความถี่ 90 Hz

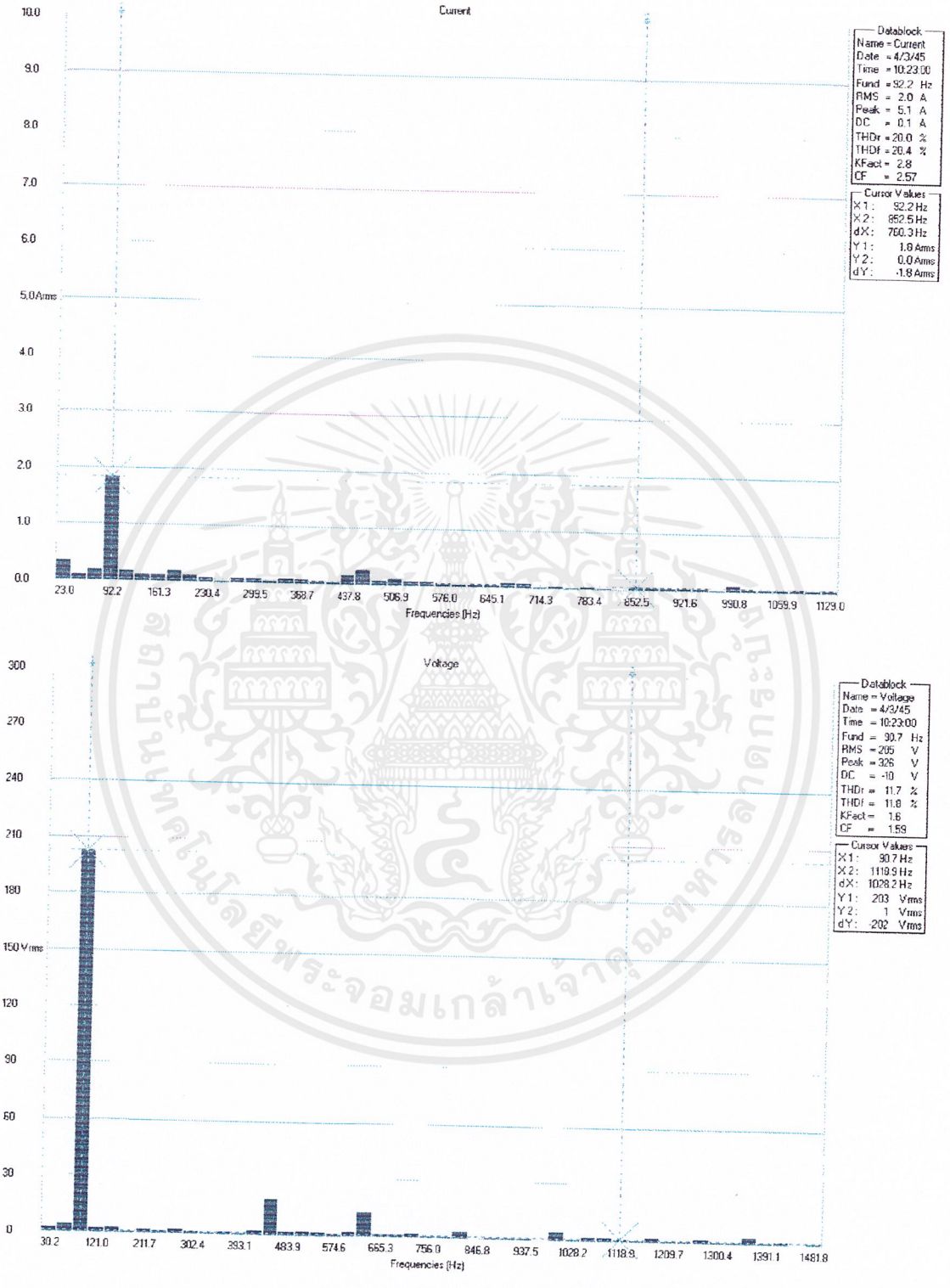
- **ทางตรง**





รูปที่ ง37 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง38 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางตรง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง73 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	400	40	410	0.62
2	90.5	390	40	410	0.61
3	90.8	430	40	440	0.62
เฉลี่ย	90.5	406.67	40.00	420.00	0.61

ตารางที่ ง74 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD$_r$	%THD$_f$	CF
1	92.2	1.8	2	5.1	20	20.1	2.57
2	90.7	1.6	1.7	4.1	25	25.8	2.41
3	97.6	1.6	1.9	4.7	19.2	19.5	2.5
เฉลี่ย	93.5	1.67	1.87	4.63	21.4	21.8	2.49

ตารางที่ ง75 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD$_r$	%THD$_f$
1	90.7	203	205	326	11.7	11.8
2	90.8	203	205	330	11.8	11.9
3	90.7	202	204	322	11.7	11.8
เฉลี่ย	90.73	202.67	204.67	326	11.73	11.83

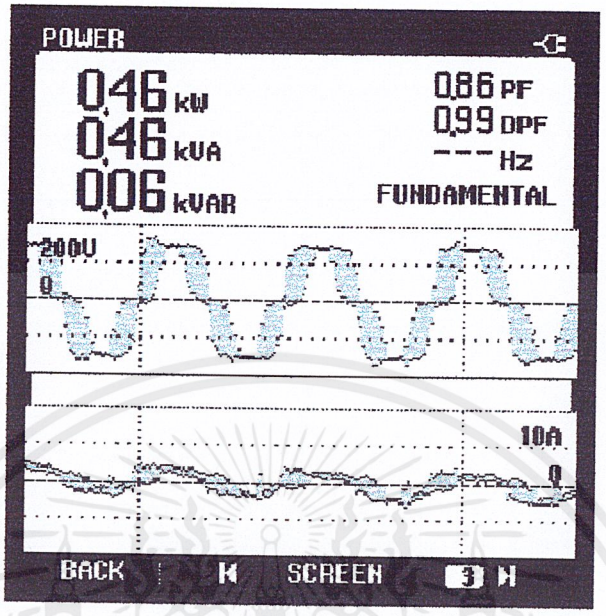
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

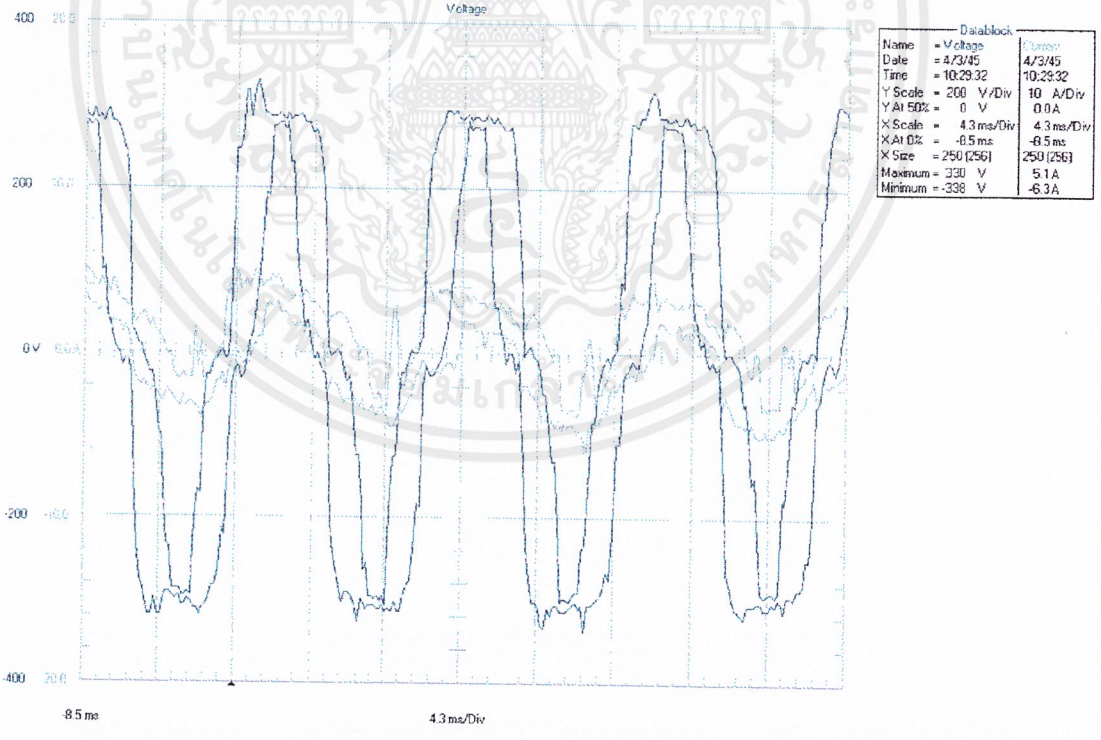
ตารางที่ ง76 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2709	2681
2	2709	2678
3	2709	2669
เฉลี่ย	2709	2676

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

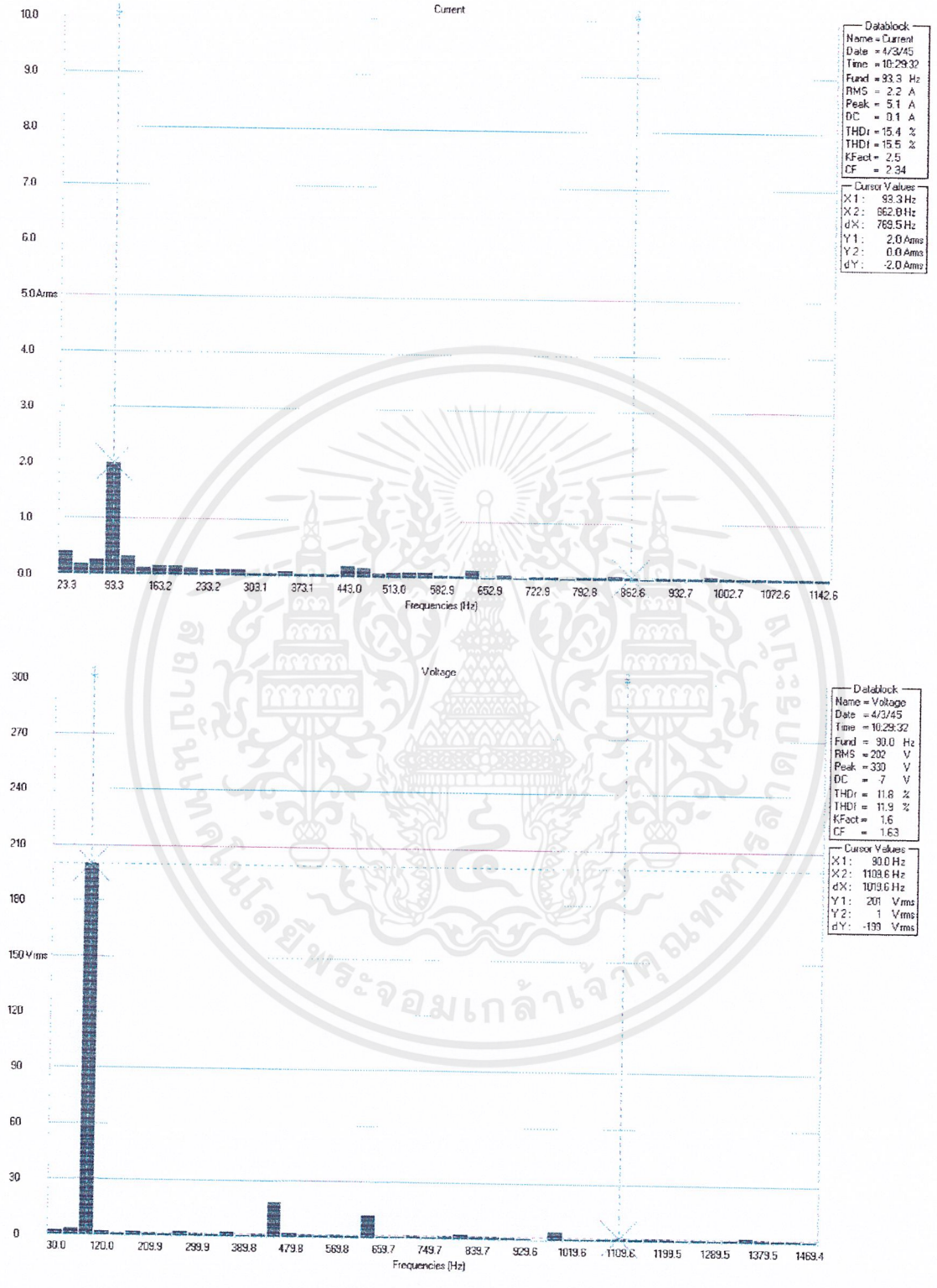
- ทางโค้ง





รูปที่ ง39 ตัวอย่างการวัดกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer และโปรแกรม Fluke Viewer ที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง40 ตัวอย่างการนำรูปสัญญาณกระแสและแรงดันจากโปรแกรม Fluke Viewer มาแปลงเป็นสเปกตรัมที่ความถี่ 90 Hz (ทางโค้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง77 แสดงผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก Power Quality Analyzer (Fluke43)

ครั้งที่	Power Quality Analyzer (Fluke43)				
	f (H_z)	P_1 (Watt)	P_2 (Watt)	S (VA)	$p.f.$
1	-	460	50	460	0.64
2	90.4	580	50	580	0.63
3	90.5	490	50	500	0.62
เฉลี่ย	90.45	510.00	50.00	513.33	0.63

ตารางที่ ง78 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณกระแสด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่ v	Fluke Viewer						
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$I_{(fund)}$ (A)	$I_{(rms)}$ (A)	$I_{(peak)}$ (A)	%THD_r	%THD_f	CF
1	93.3	2	2.2	5.1	15.4	15.5	2.34
2	90.8	2.4	2.5	4.7	21.7	22.2	1.84
3	92.4	2.3	2.7	6.9	16.9	17.1	2.59
เฉลี่ย	92.17	2.23	2.47	5.57	18	18.27	2.26

ตารางที่ ง79 แสดงค่าต่างๆ จากการวิเคราะห์รูปสัญญาณแรงดันด้วยโปรแกรม Fluke Viewer

ครั้งที่	Fluke Viewer					
	ความถี่หลักมูล (H_z)	$V_{(fund)}$ (V)	$V_{(rms)}$ (V)	$V_{(peak)}$ (V)	%THD_r	%THD_f
1	90	201	202	330	11.8	11.9
2	90.9	197	199	314	12.2	12.3
3	90.4	198	200	330	12.2	12.3
เฉลี่ย	90.43	198.67	200.33	324.67	12.07	12.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง80 แสดงค่าความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน และ ความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ครั้งที่	ความเร็วรอบสนามแม่เหล็กหมุน (rpm)	ความเร็วรอบที่เพลารถรางไฟฟ้า (rpm)
1	2709	2691
2	2709	2691
3	2709	2690
เฉลี่ย	2709	2690.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

วิธีการใช้งานเครื่องมือวัด Power Quality Analyzer(FLUKE 43)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

วิธีการใช้งานเครื่องมือวัด Power Quality Analyzer(FLUKE 43)

โหมดการทำงานของเครื่องมือวัด Power Quality Analyzer (FLUKE 43)

- Volts/Amps/Hertz

เป็นฟังก์ชันที่แสดงค่าสัญญาณ กระแส และแรงดันพร้อมๆกัน โดยเป็นฟังก์ชันแรก และเป็นพื้นฐานของการวัด ก่อนที่จะใช้ฟังก์ชันต่อๆไป

- Power

ฟังก์ชันนี้จะทำการวัดและแสดงค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งก็คือ Active Power (Watts), Apparent Power (VA) และ Reactive POWER (VAR) อีกทั้งยังแสดงค่า Power Factor (p.f.) Displacement Power Factor (DPF หรือ $\cos\phi$)

- Harmonics

ในฟังก์ชันนี้ FLUKE 43 จะแสดงให้เห็นถึงรูป spectrum ของสัญญาณ กระแส , แรงดัน และกำลังไฟฟ้า พร้อมกับทั้งแสดงค่า คุณสมบัติของสัญญาณที่ความถี่หลักมูล, ค่า RMS รวม และค่า % Total Harmonics Distortion (%THD)

- Sags & Swells

ในฟังก์ชันนี้จะตรวจจับค่าการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของรูปคลื่นแรงดันในช่วงเวลาเพียงเสี้ยววินาที โดยจะแสดงรูปคลื่นของกระแสพร้อมกันไปด้วย โดยที่กราฟจะแสดงค่าสูงสุด และ ต่ำสุดที่แต่ละจุดของกราฟ ซึ่งในฟังก์ชัน Sags & Swells นี้จะเป็นนิยมใช้ในการตรวจจับการเกิดภาวะแรงดันไฟตก

- Transients

จะเป็นสภาวะที่เกิดการspikeของสัญญาณกระแส หรือแรงดัน โดยที่การspikeจะสามารถทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์พังพังได้ สำหรับในฟังก์ชันนี้จะทำการตรวจจับการspikeของสัญญาณแรงดัน และจะทำการเก็บรูปการspikeของสัญญาณไว้ใน Memory ค่า Transient จะถูกตรวจจับเมื่อ สัญญาณไปชนกับขอบเขตกำหนด

- Inrush Current

กระแสกระชากคือ Surge ของกระแส ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เช่น เมื่อมีการ Start Motor ตัวใหญ่ ฟังก์ชันนี้จะแสดงสัญญาณกระแสขณะเกิด Surge ถ้ากระแสมีค่าเกินกว่าระดับที่ระบุไว้ รูปสัญญาณจะปรากฏเป็นแถบสีเทา และจะวัดค่า Peak ของกระแสกับคาบของการเกิด Surge Current

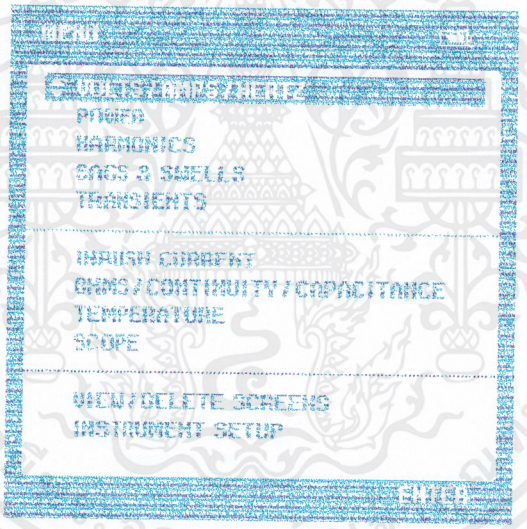
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ohms/Continuity/Capacitance

เป็นโหมดการทำงานที่ใช้วัดค่าความต้านทาน, ค่าการนำไฟฟ้า(เช่น ตรวจสอบ Diode หรือ Fuse) และค่าตัวเก็บประจุ

ในการที่จะวัดค่าต่างๆโดยใช้เครื่องมือวัด Power Quality Analyzer (FLUKE 43) จะมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

1. ทำการต่อสายสัญญาณของเครื่องมือวัดเข้ากับระบบที่จะทำการวัด
2. ทำการเปิดเครื่องโดยกดที่ปุ่ม Power On และจะได้ยินเสียง beep และกด Enter เพื่อเข้าสู่หน้าจอของ Main Menu
3. กดปุ่มขึ้นลงเพื่อเลือกโหมดการทำงานของเครื่องมือวัด โดยจะแบ่งออกเป็นโหมดต่างๆ ดังรูปที่ ค1



รูปที่ จ1 แสดงหน้าจอของ Main Menu

หมายเหตุ ในโครงงานนี้จะทำการใช้งานใน 2 โหมดคือ

- Volts/Amps/Hertz ซึ่งเป็นการวัดแรงดันและกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส
- Power ซึ่งเป็นการวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส

ทั้งนี้สามารถอธิบายการเชื่อมต่อสายสัญญาณการวัดกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

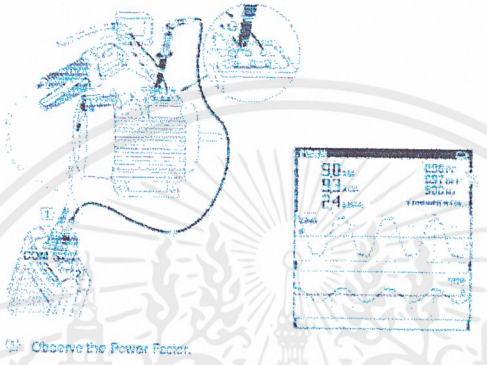
1. การวัดค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งมีการต่อแบบวาย

สำหรับมอเตอร์เฟสสมดุลที่มีการต่อแบบวายเราจะสามารถอ่านค่าต่าง ๆ โดยตรงจากหน้าจอแสดงผล โดยมีขั้นตอนการวัดดังนี้

1.1 กดปุ่ม Menu เพื่อกลับสู่หน้าจอหลัก

1.2 กดปุ่มขึ้นลงไปยัง Power และกดปุ่ม Enter เพื่อเลือกโหมดการวัดกำลังไฟฟ้า

1.3 ทำการต่อเชื่อมสายสัญญาณการวัดดังรูปที่ ค2



รูปที่ จ2 การวัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบวาย

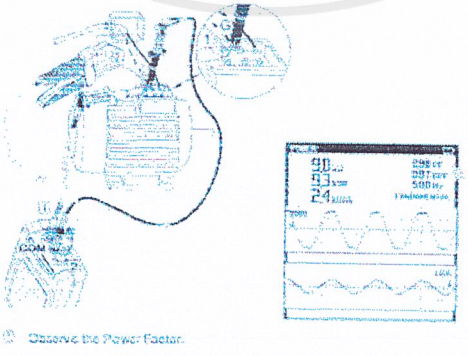
2. การวัดค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งมีการต่อแบบเดลต้า

สำหรับมอเตอร์เฟสสมดุลที่มีการต่อแบบเดลต้าจะมีกระบวนการที่ซับซ้อนมากกว่าแบบวาย โดยมีรูปการต่อ, ขั้นตอนการวัดและกระบวนการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่าตัวประกอบกำลัง ดังนี้

2.1 กดปุ่ม Menu เพื่อกลับสู่หน้าจอหลัก

2.2 กดปุ่มขึ้นลงไปยัง Power และกดปุ่ม Enter เพื่อเลือกโหมดการวัดกำลังไฟฟ้า

2.3 ทำการต่อเชื่อมสายสัญญาณการวัดดังรูปที่ค2และทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าจริง(kW_1) และค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA)



รูปที่ จ3 การวัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ย้ายสายโพรบสีแดงและคลิปแอมป์ไปยังเฟสที่ 2 โดยสายโพรบสีดำยังคงต่อไว้ที่เฟส 3 เหมือนเดิม และทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าจริง(kW_2) จะสังเกตุได้ว่าถ้าค่าตัวประกอบกำลังมีค่าน้อยกว่า 1 ค่าของ kW_1 และค่า kW_2จะมีค่าแตกต่างกันแม้ว่ากระแสโหลดจะเป็นแบบเฟสสมดุลย์กันก็ตาม แต่ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของการวัดทั้ง 2 ครั้งจะมีค่าประมาณใกล้เคียงกัน

2.5 สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่าค่าตัวประกอบกำลังดังนี้

$$kW_{total} = \frac{kW_1 + kW_2}{\sqrt{3}}$$

$$p.f. = \frac{P}{S} = \frac{kW_{total}}{kVA}$$

ตัวอย่างคำนวณ : $kW_1 = 170$ kW , $kW_2 = 68$ kW และ $kVA = 188$ kVA

$$kW_{total} = \frac{170 + 68}{\sqrt{3}} = 137.4 \quad \text{kW}$$

$$p.f. = \frac{137.4}{188} = 0.73$$

การใช้งานโปรแกรม FlukeView ร่วมกับ Fluke 43B

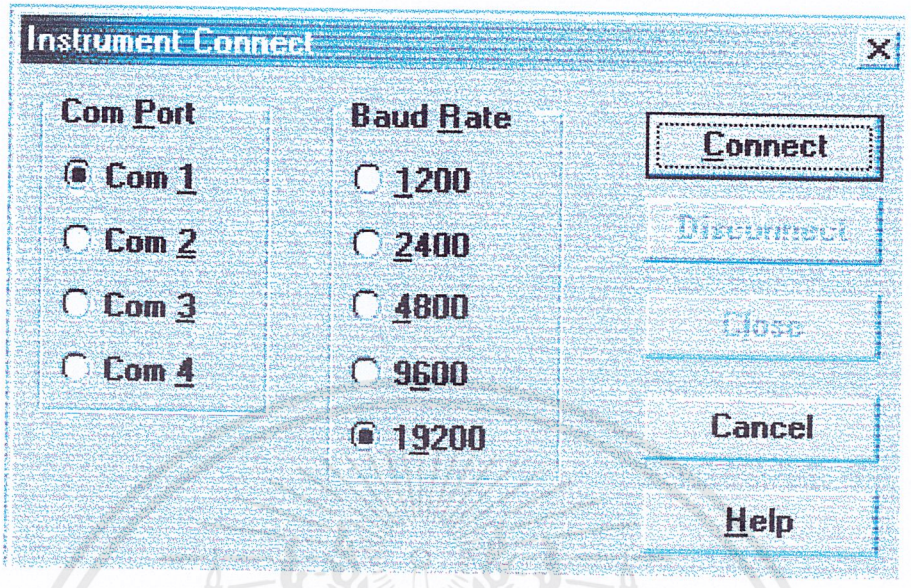
Fluke 43B นั้นมีความสามารถพิเศษอีกอยางหนึ่งก็คือ สามารถทำงานร่วมกับ PC ได้โดยการส่งผ่านข้อมูลที่ทำการวัดได้จาก Fluke 43B เพื่อเป็นการเก็บข้อมูลและทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม FlukeView โดยสามารถอธิบายการใช้งานคร่าว ๆ ดังนี้

การเชื่อมต่อ Fluke 43B เข้ากับ PC

โปรแกรม FlukeView นี้จะมีการเชื่อมต่อกับ Fluke 43B โดยผ่านทาง Optically Isolated RS-232 ซึ่งต่ออยู่ที่ COM port ของคอมพิวเตอร์

ระหว่างการเริ่มต้น(ยกเว้นครั้งแรก) โปรแกรม FlukeView จะทำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติตามการเซ็ตค่าใน Dialog Box Instrument Connect ครั้งล่าสุดดังรูป ค4 หากการเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติไม่สมบูรณ์จะมี Dialog Box Instrument Connect แสดงขึ้นมา ซึ่งผู้ใช้จะต้องทำการเชื่อมต่อเอง โดยมีขั้นตอนง่าย ๆ 3 ขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ4 Dialog Box Instrument Connect

1. เลือก COM port ที่ต้องการเชื่อมต่อกับ Fluke 43B
2. เลือก Baud rate (แนะนำให้เลือกค่าสูงสุด)
3. คลิกปุ่ม Connect เพื่อทำการเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัด

เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม FlukeView

โปรแกรม FlukeView สามารถที่จะอ่านข้อมูลที่ทำการวัดจาก Fluke 43B ได้หลายรูปแบบของข้อมูลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล	ชนิดของข้อมูล	การนำไปใช้
Screen	ข้อมูล bitmap-graphics จากหน้าจอของเครื่องมือวัด(แบบ pixel-format)	ใช้ในการทำเอกสารและรายงาน
Waveform	รูปคลื่นเชิงตัวเลขที่จุดต่าง ๆ ของกราฟสัญญาณ	ใช้ในการขยาย, ดูขนาด หรือสร้างสเปกตรัม
Readings	ข้อมูลเชิงตัวเลขของ Y-X vector-graphics data	ใช้ในการขยาย, ดูขนาด หรือสร้างสเปกตรัม
Setup	ข้อมูลการตั้งค่าเลขฐานสองจากเครื่องมือวัด	การดึงและส่งข้อมูล

ด้วยการ คลิก ปุ่มต่างๆ บน Tool Bar ข้างล่างนี้ เราจะสามารถอ่านข้อมูลได้โดยตรงจาก Fluke 43B

รูปที่ จ5 แสดง Tool-Bar ของโปรแกรม FlukeView

เราสามารถ Save, Open และ Print ข้อมูล หรือส่งไปยังโปรแกรมอื่นๆ

การแสดงหน้าจอของเครื่องมือวัดบน PC

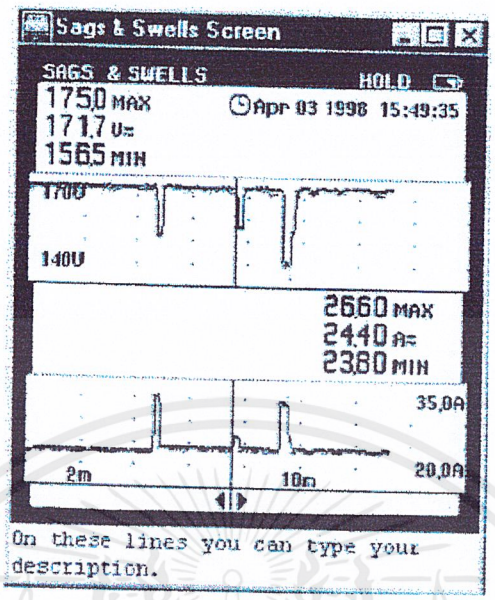
1. คลิก เพื่อดึงรูปหน้าจอของเครื่องมือวัดเข้าสู่หน้าจอของโปรแกรม FlukeView

2. เลือก Option- Add Description และพิมพ์คำอธิบายใน Text Box ใต้รูปภาพ(ไม่เกิน 10 บรรทัด)

3. เลือก Option – Title เพื่อที่จะเปลี่ยนชื่อของรูปภาพ

4. เลือก Option – Colors เพื่อที่จะเปลี่ยนสีของรูปภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ6 แสดงหน้าจอของเครื่องมือวัดบน PC

การวิเคราะห์ รูปคลื่น

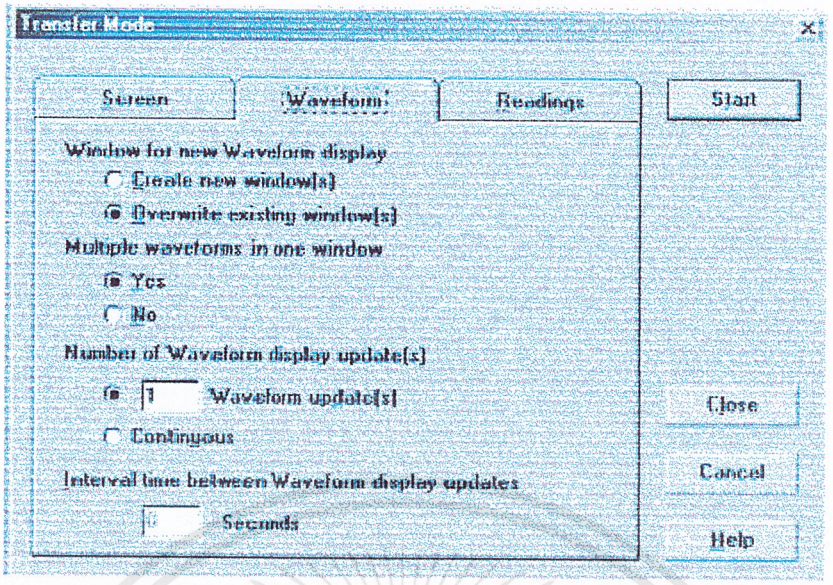
เราสามารถที่จะอ่านค่ารูปคลื่นและข้อมูลจาก Fluke 43B และแสดงรูปคลื่นของการทดลองในหน้าต่างรูปคลื่นมากถึง 4 รูปคลื่นในหนึ่งหน้าต่าง

เพื่อที่จะสาธิตให้เห็นภาพขอยกตัวอย่างการวัดรูปคลื่นกระแสและแรงดันในโหมด Volts/Amps/Hertz

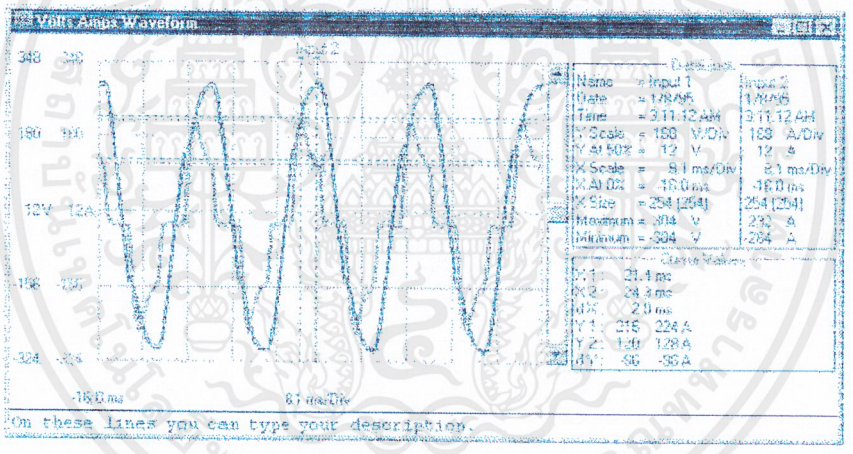
การแสดงรูปคลื่นบน PC

1. เลือก Instrument-Transfer Mode-Waveform
2. เลือก Yes เพื่อกำหนดให้สามารถแสดงรูปคลื่นได้หลายรูปใน 1 หน้าต่าง
3. เลือก 1 Waveform updates เพื่อที่จะอ่านและแสดง Waveform 1 ครั้งเท่านั้น
4. คลิก Start จะมี Dialog Box ปรากฏขึ้นมาเพื่อให้เราเลือก Waveform ที่ต้องการอ่าน
5. คลิก Check Box ของแรงดันและกระแส
6. คลิก Start เพื่ออ่านและแสดงรูปคลื่นที่เราเลือกไว้
7. เลือก Option-Add Description และพิมพ์คำอธิบายใน Text Box
8. เลือก View-Datablock เพื่อที่จะแสดง Data block
9. เลือก View-Cursors เพื่อแสดง cursors
10. เลือก Option-Colors เพื่อเปลี่ยนสีของรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ7 แสดง Transfer Mode Dialog



รูปที่ จ8 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของรูปคลื่น

คำแนะนำ

คลิก เพื่ออ่านค่าWaveformอย่างรวดเร็วจาก Input Chanel หรือ Record memory

คลิก เพื่ออ่านค่า Voltage Waveform อย่างรวดเร็วจาก Input 1

คลิก เพื่ออ่านค่า Current Waveform อย่างรวดเร็วจาก Input 2

คลิก เพื่ออ่านค่า Waveform อย่างรวดเร็วจาก Input 1 และ 2

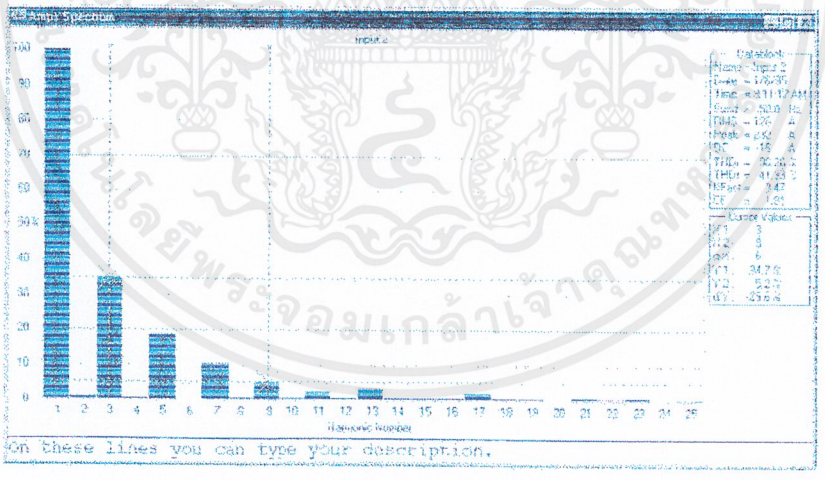
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก Option-Scale เพื่อที่จะเปลี่ยนสเกล
- เลือก Option-Title เพื่อเปลี่ยนชื่อหน้าต่าง
- เลือก View-Description เพื่อที่จะแสดงและซ่อนคำอธิบาย

การสร้าง FFT-Spectrum จากรูปคลื่น

เมื่อสัญญาณที่เข้ามายังโปรแกรม FlukeView มีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ และมีส่วนของ DC component ปะปนมา เมื่อเข้าสู่การทำงาน FFT Spectrum แล้วก็จะมีหน้าต่างแสดงแอมปลิจูดและความถี่ของแต่ละรูปคลื่นไซน์เป็นกราฟแท่งในส่วนของ DC component จะถูกแสดงอยู่ในส่วนของ Datablock

1. เลือกรูปคลื่นที่ต้องการแสดงสเปกตรัม
2. เลือก Tools-Spectrum สเปกตรัมจะถูกสร้างและแสดงอยู่ใน Spectrum Window
3. เลือก Option-Add Description และพิมพ์คำอธิบายใน Text Box
4. เลือก View-Datablock เพื่อที่จะแสดง Data block
5. เลือก View-Cursors เพื่อแสดง cursors
6. เลือก Option-Colors เพื่อเปลี่ยนสีของรูปคลื่น



รูปที่ จ9 ภาพตัวอย่าง Spectrum Window

คำแนะนำ

- เลือก Option-Scale เพื่อที่จะเปลี่ยนสเกล
- เลือก Option-Title เพื่อเปลี่ยนชื่อหน้าต่าง
- เลือก View-Description เพื่อที่จะแสดงและซ่อนคำอธิบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอัพเดทสเปกตรัมโดยอัตโนมัติ

เพื่อที่จะให้มีการอัพเดทสเปกตรัมอย่างต่อเนื่อง สามารถทำได้ดังนี้

คลิก เพื่อเลือก และแสดง Waveform ที่จะนำมาสร้างสเปกตรัม

- เลือก Tools-Spectrum เพื่อสร้างสเปกตรัมจาก Waveform
- เลือก Window-Auto tile เพื่อจัดหน้าต่างของรูปคลื่นและสเปกตรัม บนหน้าจอ PC
- เลือก Instrument-Transfer-Mode แล้ว Dialog Box จะปรากฏขึ้น
- เลือก Waveform, Overwrite existing window(s) และ Continuous
- คลิก Start เพื่อที่จะทำการอัพเดท Waveform และสเปกตรัมอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

MCS-51 และ LCD Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

MCS-51 และ LCD Module

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

MCS-51เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบชิพเดี่ยวที่มีข้อดีเมื่อเทียบกับไมโครโปรเซสเซอร์ขนาด 8 บิตตระกูลอื่นดังนี้

1. มีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลทั่วไป (RAM)บรรจุไว้ภายใน 128-256 กิโลไบต์
2. มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานอยู่ภายในจำนวน 4 กิโลไบต์
3. มีวงจรตั้งเวลาวงจรนับขนาด 16 บิต 2 ตัว อยู่ภายใน
4. มีวงจรรับส่งข้อมูลอนุกรมได้ 2 ทิศทาง
5. มีสัญญาณนาฬิกาภายในตัว
6. มีพอร์ตที่สามารถรับหรือส่งข้อมูลได้ 2 ทิศทาง จำนวน 4 พอร์ตๆละ 8 บิต

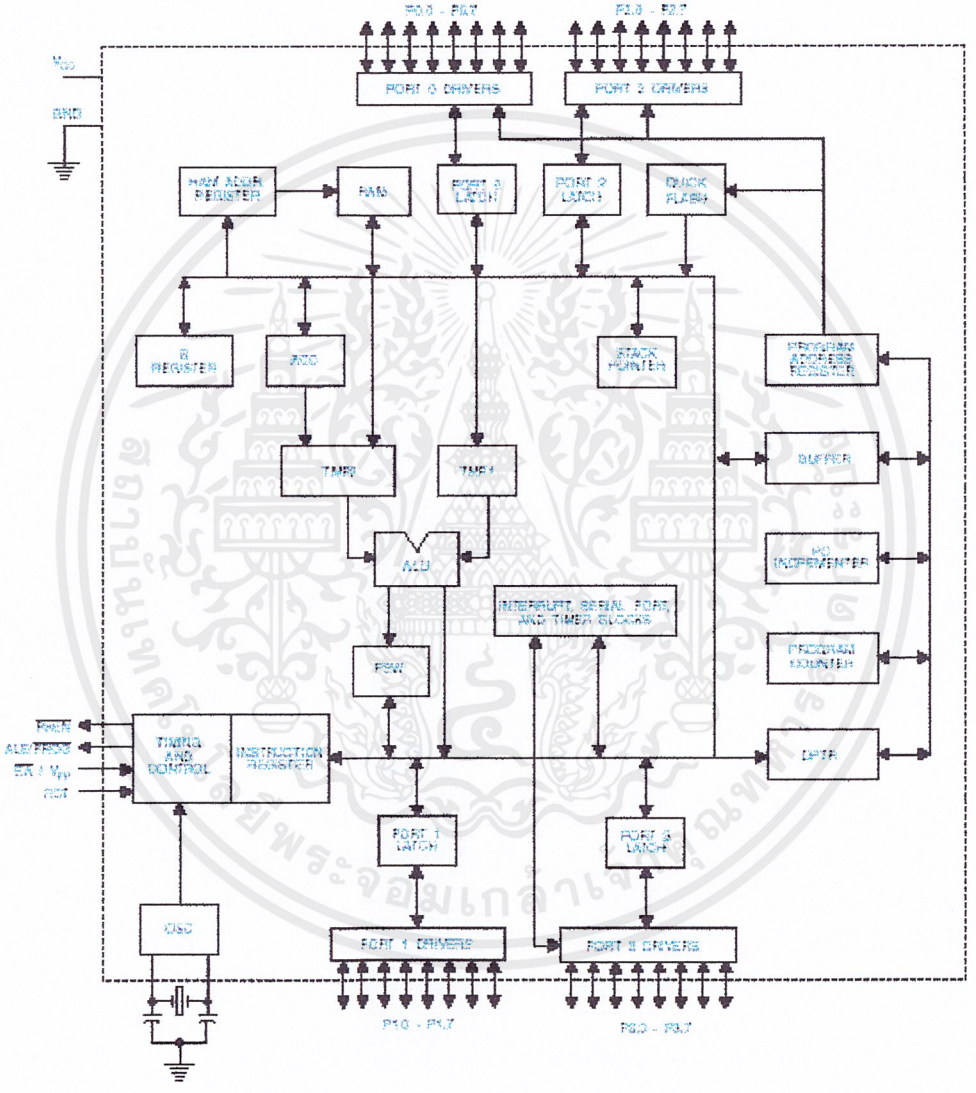
นอกจากนี้ MCS-51 ยังมีคุณสมบัติอื่นๆที่น่าสนใจ คือ

- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์เพียงชุดเดียว
- มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานอยู่ภายในชิพ
- สามารถใช้หน่วยความจำสำหรับโปรแกรมและข้อมูลที่อยู่ภายนอกชิพได้อย่างละ 64 กิโลไบต์
- มีคำสั่งคูณและหารเลขขนาด 8 บิตในตัวเอง
- จัดลำดับความสำคัญของสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้ 2 ระดับ
- รับและส่งข้อมูลแบบอนุกรมได้ในตัว โดยสามารถกำหนดอัตราเร็วในการรับและส่งข้อมูลได้ตั้งแต่ 300 ถึง 375 กิโลบิตต่อวินาที
- สามารถประมวลผลแบบบูลีนเพื่อใช้ในงานควบคุมโดยเฉพาะ
- มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานเป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์เพื่อนับจำนวนสัญญาณนาฬิกาภายในชิพหรือนับการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณภายนอกขนาด 16 บิต จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้สำหรับนับจำนวนพัลส์ วัดความกว้างของพัลส์หรือใช้วัดช่วงเวลา
- หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในบางส่วนสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทั้งระดับไบต์และระดับบิต เพื่อให้การออกแบบโปรแกรมและการควบคุมระบบงานทำได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 สถาปัตยกรรมของโครคอนโทรลเลอร์ 8051

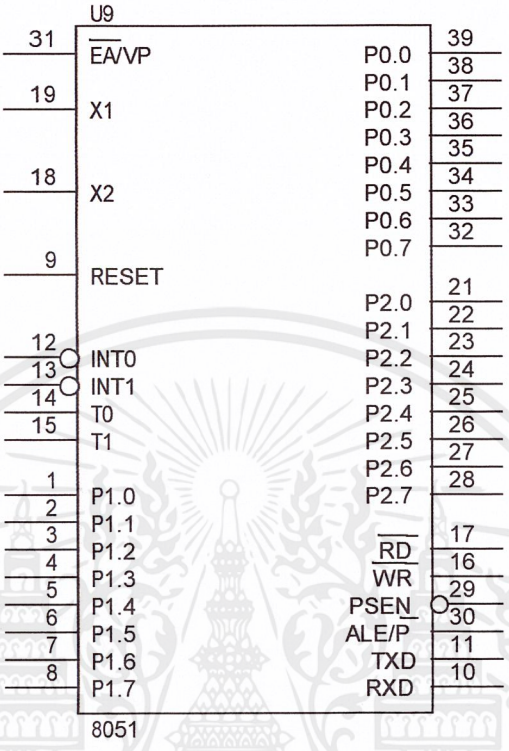
โครงสร้างภายในชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ชิพเดี่ยวแสดงดังรูปที่ ง1 ซึ่งอธิบายถึงส่วนย่อยๆภายใน 8051



รูปที่ ฉ1 โครงสร้างภายในชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051

สัญญาณจากภายในจะต่อออกสู่ภายนอกทางขาของ 8015 ที่มีอยู่ 40 ขาดังรูปที่ ง2 ซึ่งมีการใช้งานต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ2 ไดอะแกรมขาของ 8051

- VCC ขา 40 เป็นขาที่ต้องป้อนไฟเลี้ยง +5 โวลต์ เข้าไปเพื่อให้วงจรสามารถทำงานได้
- VSS ขา 20 เป็นขาที่ต้องต่อกับกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟ
- RST ขา 9 ขารีเซตนี้จะรีเซตการทำงานของ 8051 ถ้าป้อนสัญญาณที่มีสภาวะลอจิก 1 ที่ขานี้จะเป็นการรีเซตการทำงานกลับไปเริ่มการทำงานจากคำสั่งที่อยู่ในหน่วยความจำตำแหน่ง 0000
- PSEN ขา 29 ใช้ส่งสัญญาณเพื่ออ่านคำสั่งจากโปรแกรมที่เก็บไว้ในหน่วยความจำภายนอกชิพ
- XTAL 1 ขา 19 ใช้ต่อคริสตอลภายนอก โดยเป็นอินพุทเข้าสู่วงจรออสซิลเลเตอร์
- XTAL 2 ขา 18 ใช้ต่อคริสตอลภายนอก โดยเป็นเอาท์พุทออกจากวงจรออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การรีเซต

เมื่อเริ่มจ่ายพลังงานจะต้องมีการรีเซตก่อนเสมอ การรีเซตในขณะเริ่มจ่ายพลังงานจะกระทำโดยอัตโนมัติ

การทำงานของวงจรรีเซตมีดังนี้

เมื่อเริ่มจ่ายพลังงานให้แก่ MCS-51 จะทำให้ขา RST มีสถานะเป็นหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งขึ้นกับค่าตัวเก็บประจุ ความเร็วในการประจุ เพื่อให้แน่ใจว่ามีการรีเซตเกิดขึ้นจริงๆในช่วงเริ่มต้นให้ขา VCC จะต้องให้ขารีเซตมีสถานะเป็นหนึ่งนานพอที่จะให้วงจรออสซิลเลเตอร์เริ่มต้นทำงานรวมกับช่วงเวลา 2 แมชชีนไซเคิล

ในช่วงเริ่มต้นให้ VCC แก่ MCS-51 (ช่วง power up) VCC ควรมีค่าตามที่กำหนดภายในเวลา 10 วินาที (rise time) โดยช่วงเวลาที่วงจรออสซิลเลเตอร์เริ่มต้นทำงานจะขึ้นอยู่กับความถี่ของคริสตอลที่ใช้

- **PORT 0** เป็นพอร์ตขนานขนาด 8 บิตอยู่ที่ขา 39ถึง32 เริ่มจากบิต 0 ถึงบิต 7 ตามลำดับ พอร์ต 0 นี้ใช้ได้ทั้งการรับส่งตำแหน่งและข้อมูลกับหน่วยความจำหรือใช้รับส่งข้อมูลก็ได้ นอกจากนี้ยังใช้งานได้หลายอย่าง ดังนี้
  1) ใช้สำหรับส่งค่าตำแหน่งหน่วยความจำที่ต้องการติดต่อด้วย โดย 8 บิตล่างถูกส่งออกไปทางพอร์ต 0 และ 8 บิตบนถูกส่งออกทางพอร์ต 2
  2) ใช้รับส่งข้อมูลกับ Data Memory หรือใช้รับข้อมูลจาก Program Memory
  3) ใช้รับส่งข้อมูลจากพอร์ตโดยตรง
- **PORT 1** เป็นพอร์ตขนานขนาด 8 บิตอยู่ที่ขา 1 ถึง 8 เริ่มจากบิต 0 ถึงบิต 7 ตามลำดับใช้ทำหน้าที่เป็นตัวรับส่งข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถส่งตำแหน่งได้
- **PORT 2** เป็นพอร์ตขนานขนาด 8 บิตอยู่ที่ขา 21 ถึง 28 เริ่มจากบิต 0 ถึงบิต 7 ตามลำดับใช้งานเพียง 2 ลักษณะ คือ
  1) ใช้ส่งค่าตำแหน่งหน่วยความจำภายนอกที่ต้องการติดต่อทำงานร่วมกับพอร์ต 0
  2) ใช้เป็นพอร์ตรับส่งข้อมูลจากภายนอก
- **PORT 3** เป็นพอร์ตขนานขนาด 8 บิตอยู่ที่ขา 10 ถึง 17 เริ่มจากบิต 0 ถึงบิต 7 ตามลำดับ นอกจากจะใช้งานเหมือนพอร์ตอื่นๆแล้วยังใช้งานอื่นโดยใช้คำสั่งควบคุม ดังนี้

P3.0(RxD) เป็นขาที่ใช้รับข้อมูลแบบอนุกรม

P3.1(TxD) เป็นขาที่ใช้ส่งข้อมูลแบบอนุกรม

P3.2(INT0) ใช้รับสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก

P3.3(INT1) ใช้รับสัญญาณขัดจังหวะจากภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P3.4(T0) ใช้เป็นขารับสัญญาณให้เคาน์เตอร์ของไทม์เมอร์ 0

P3.5(T1) ใช้เป็นขารับสัญญาณให้เคาน์เตอร์ของไทม์เมอร์ 1

P3.6(WR) ใช้เป็นขาสัญญาณควบคุมการเขียนข้อมูลไปยังหน่วยความจำสำหรับข้อมูลภายนอก

P3.7(RD) ใช้เป็นขาสัญญาณควบคุมการอ่านข้อมูลไปยังหน่วยความจำสำหรับข้อมูลภายนอก

1.3 รีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปใน MCS-51

รีจิสเตอร์ A,B และรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป R0-R7 ซึ่งอยู่ในหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลทั่วไปภายในชิพบริเวณ 128 ไบต์แรกรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป R0-R7 ในMCS-51 มีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มประกอบด้วยรีจิสเตอร์จำนวน 8 ตัว (R0-R7) ซึ่งมีชื่อเรียกเหมือนกัน ดังนั้นรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป R0-R7 ใน MCS-51 จึงมีทั้งหมด 32 ตัว ในการทำงานขณะใดๆ รีจิสเตอร์ทั้ง 4 กลุ่ม (R0-R7) จะถูกเลือกใช้งานเพียงกลุ่มเดียวเท่านั้น การเลือกใช้งานรีจิสเตอร์ R0-R7
กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งใน 4 กลุ่มกระทำโดยการเซตหรือเคลียร์บิต RS0 , RS1 ในรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ PSW

1). รีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ IE (Interrupt Enable-Register) เข้าถึงข้อมูลได้ในระดับบิต

IE.7	IE.6	IE.5	IE.4	IE.3	IE.2	IE.1	IE.0
EA	-	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0

บิต ชื่อบิต

IE.7 EA ใช้ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ทั้งหมด
0 : MCS-51 จะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ใดๆทั้งสิ้น
1 : อินเตอร์รัปต์แต่ละชนิดถูกควบคุมการตอบสนองจากบิตในรีจิสเตอร์นี้

IE.6 - ไม่ถูกกำหนดการใช้งาน (สำรองไว้ใช้ใน MCS-51 เบอร์ใหม่ๆในอนาคต)

IE.5 ET2 ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ของไทม์เมอร์ 2 เมื่อเกิด overflow
หรือเกิดอินเตอร์รัปต์ของไทม์เมอร์ 2

IE.4 ES2 ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ของพอร์ตสื่อสารอนุกรม

IE.3 ET1 ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ของไทม์เมอร์ 1 เมื่อเกิด overflow

IE.2 EX1 ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ภายนอกชนิด 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IE.1 ET.0 ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ของไทม์เมอร์ 1 เมื่อเกิด overflow

IE.0 EX0 ควบคุมการตอบสนองต่อสัญญาณอินเตอร์รัปต์ภายนอกชนิด 0

2). รีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ TCON (Timer/Counter Control Register) เข้าถึงข้อมูลได้ในระดับบิต

TCON.7	TCON.6	TCON.5	TCON.4	TCON.3	TCON.2	TCON.1	TCON.0
TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT0	IE0	IT0

บิต ชื่อบิต

TCON.7 TF1 บิตแสดงการเกิด overflow ของไทม์เมอร์ 1 ถูกเซตเองเมื่อไทม์เมอร์ 1 เกิด overflow และถูกเคลียร์เองเมื่อซีพียูย้ายไปทำงานที่โปรแกรมการอินเตอร์รัปต์

TCON.6 TR1 บิตควบคุมการนับของไทม์เมอร์ 1

1 ไทม์เมอร์ 1 เริ่มทำงานต่อ

0 ไทม์เมอร์ 1 หยุดทำงาน

TCON.5 TF0 บิตแสดงการเกิด overflow ของไทม์เมอร์ 0 ถูกเซตเองเมื่อไทม์เมอร์ 0 เกิด overflow และถูกเคลียร์เองเมื่อซีพียูย้ายไปทำงานที่โปรแกรมการอินเตอร์รัปต์

TCON.4 TR0 บิตควบคุมการนับของไทม์เมอร์ 0

1 ไทม์เมอร์ 0 เริ่มทำงานต่อ

0 ไทม์เมอร์ 0 หยุดทำงาน

TCON.3 IE1 บิตแสดงสถานะสัญญาณอินเตอร์รัปต์ภายนอกชนิดที่ 1 ถูกเซตเองโดยฮาร์ดแวร์เมื่อมีสัญญาณอินเตอรัปต์ที่ได้จากการตรวจสอบการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณและจะถูกเคลียร์เองโดยคำสั่ง RETI ที่อยู่ในโปรแกรมส่วนบริการอินเตอร์รัปต์

TCON.2 IT1 บิตเลือกประเภทการตรวจสอบสัญญาณอินเตอร์รัปต์ที่เกิดขึ้นที่ขา INT1 โดย

1 ตรวจสอบการเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก 1 เป็น 0 ที่ขา INT1

0 ตรวจสอบระดับของสัญญาณที่ขา INT1

TCON.1 IE0 บิตแสดงสถานะสัญญาณอินเตอร์รัปต์ภายนอกชนิดที่ 1 ถูกเซตเองโดยฮาร์ดแวร์เมื่อมีสัญญาณอินเตอรัปต์ที่ได้จากการตรวจสอบการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณและจะถูกเคลียร์เองโดยคำสั่ง RETI ที่อยู่ในโปรแกรมส่วนบริการอินเตอร์รัปต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TCON.0 IT0 บิตเลือกประเภทการตรวจสอบสัญญาณอินเตอร์รัปต์ที่เกิดขึ้นที่ขา INT1 เหมือนบิต IT1

3). รีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ TMOD (Timer/Counter Mode Control Register) ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลในระดับบิตได้

TMOD.7	TMOD.6	TMOD.5	TMOD.4	TMOD.3	TMOD.2	TMOD.1	TMOD.0
GATE	C/T	M1	M0	GATE	C/T	M1	M0

บิต

GATE บิตเลือกการควบคุมให้รีจิสเตอร์สำหรับใช้เป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ทำงานโดยควบคุมจากฮาร์ดแวร์หรือซอร์ฟแวร์ดังนี้

- เมื่อบิต TRx (TR0,TR1) และ GATE ถูกเซตไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์จะทำงานต่อเมื่อ
  สถานะที่ขา INTx (INT0,INT1) มีค่าเป็น 1
- เมื่อบิต GATE ถูกเคลียร์ ไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์จะทำงานก็ต่อเมื่อบิต TRx ถูกเซตโดยไม่ขึ้นกับสถานะสัญญาณที่ขา INTx

C/T บิตเลือกการทำงานของรีจิสเตอร์สำหรับใช้เป็นไทเมอร์หรือเคาน์เตอร์ดังนี้

- 0 หมายถึงทำงานเป็นไทม์เมอร์
- 1 หมายถึงทำงานเป็นเคาน์เตอร์

M1 บิตสำหรับเลือกโหมดการทำงานของไทม์เมอร์ 0 ไทม์เมอร์ 1

M0 บิตสำหรับเลือกโหมดการทำงานของไทม์เมอร์ 0 ไทม์เมอร์ 1

0 0 โหมด 0 : ไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ขนาด 13 บิต

0 1 โหมด 1 : ไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต

1 0 โหมด 2 : ไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ขนาด 8 บิต ที่มีการโหลดค่าเองเมื่อเกิด overflow

1 1 โหมด 3 : ไทม์เมอร์ 0รีจิสเตอร์ TL0ใช้เป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ขนาด 8 บิต ที่ควบคุม การทำงานได้จากบิตของไทม์เมอร์ 0 เอง
รีจิสเตอร์ TL0ใช้เป็นไทม์เมอร์ขนาด 8 บิต ที่ควบคุมการทำงานได้ จากบิต ของไทม์เมอร์ 1

1 1 โหมด 3 : ไทม์เมอร์ 1 หยุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1..4 ไทม์เมอร์ / เคาน์เตอร์

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ มีรีจิสเตอร์พิเศษที่สามารถเลือกใช้งานเป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์อย่างใดอย่างหนึ่ง รีจิสเตอร์ประเภทนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ตัว แต่ละตัวขนาด 16 บิต เรียกไทม์เมอร์ 0 และไทม์เมอร์ 1 ตามลำดับ

- ไทม์เมอร์นั้นค่าในรีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นไทม์เมอร์ที่ถูกเลือกใช้งานจะถูกเพิ่มขึ้นทุกแมชชีนไซเคิล
- เคาน์เตอร์นั้นค่าในรีจิสเตอร์ที่ใช้เป็นเคาน์เตอร์ที่ถูกเลือกใช้งานจะถูกเพิ่มค่าทีละ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ

ไทม์เมอร์ 0 และ ไทม์เมอร์ 1

สามารถเลือกการทำงานให้เป็นไทม์เมอร์ / เคาน์เตอร์ได้โดยการกำหนดค่าบิท ในรีจิสเตอร์ใช้งานเฉพาะ TCON

นอกจากจะเลือกการทำงานของรีจิสเตอร์ให้เป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ได้แล้วในแต่ละการทำงานยังมีการทำงานย่อยอยู่ 4 แบบ ตามความเหมาะสมของการใช้งาน

โหมด 0 : จะใช้รีจิสเตอร์ขนาด 8 บิทเป็นตัวนับโดยมีการเพิ่มค่าครั้งละ 1 ทุกครั้งนับสัญญาณได้ครบ 32 ครั้ง โดยในโหมดนี้รีจิสเตอร์ที่ใช้นับเพียง 13 บิท (8 บิทในรีจิสเตอร์ TLx รวมกับ 5 บิทใน THx)

โหมด 1 : การทำงานเหมือนโหมด 0 เว้นแต่ค่าในรีจิสเตอร์ถูกใช้งานครบทั้ง 16 บิทนั่นเองคือไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ในโหมดนี้มีขนาด 16 บิท

โหมด 2 : ในโหมดนี้จะกำหนดรีจิสเตอร์ใช้งานในการเพียง 8 บิท (จากรีจิสเตอร์ TLx)ที่มีการโหลดค่าด้วยค่าในรีจิสเตอร์ THx การใช้งานโหมดนี้มีไว้เพื่อสร้างสัญญาณอินเตอร์รัปต์ที่มีคาบเวลาคงที่

โหมด 3 : ในโหมดนี้ไทม์เมอร์ 1 จะไม่มีการนับแต่ไทม์เมอร์จะบังคับให้รีจิสเตอร์ TL0 ของไทม์เมอร์ 0 ถูกใช้เป็นไทม์เมอร์เพียงอย่างเดียว การทำงานโหมด 3 มีไว้เพื่อใช้งานที่ต้องการไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ขนาด 8 บิทเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ1 แสดงค่าในรีจิสเตอร์ TMOD ค่าต่างๆ

โหมด	ฟังก์ชัน ไทม์เมอร์ 0	TMOD	
		ควบคุมจากโปรแกรม	ควบคุมจากฮาร์ดแวร์
0	13-bit Timer	00H	08H
1	16-bit Timer	01H	09H
2	8-bit Auto-Reload	02H	0AH
3	two 8-bit Timers	03H	0BH

โหมด	ฟังก์ชัน เคาน์เตอร์ 0	TMOD	
		ควบคุมจากโปรแกรม	ควบคุมจากฮาร์ดแวร์
0	13-bit Timer	04H	0CH
1	16-bit Timer	05H	0DH
2	8-bit Auto-Reload	06H	0EH
3	two 8-bit Timers	07H	0FH

โหมด	ฟังก์ชัน ไทม์เมอร์ 1	TMOD	
		ควบคุมจากโปรแกรม	ควบคุมจากฮาร์ดแวร์
0	13-bit Timer	00H	80H
1	16-bit Timer	10H	90H
2	8-bit Auto-Reload	20H	A0H
3	two 8-bit Timers	30H	B0H

โหมด	ฟังก์ชัน เคาน์เตอร์ 1	TMOD	
		ควบคุมจากโปรแกรม	ควบคุมจากฮาร์ดแวร์
0	13-bit Timer	40H	C0H
1	16-bit Timer	50H	D0H
2	8-bit Auto-Reload	60H	E0H
3	two 8-bit Timers	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. LCD Module

2.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD

ในโมดูล LCD จะมีส่วนประกอบหลักๆ 3 ส่วนดังนี้

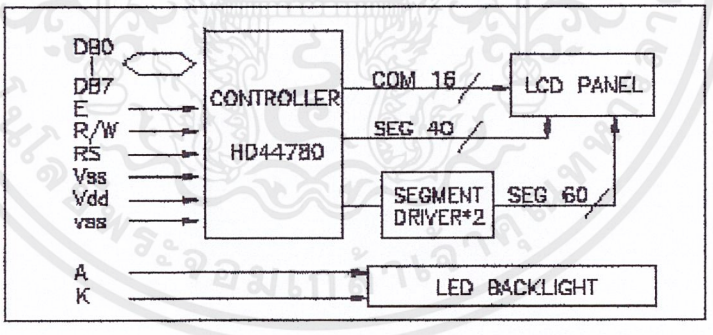
ตัวแสดงผล (display) ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมในการมองข้อมูลที่แสดงผลบนจอ LCD

ตัวควบคุม (controller) เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือ เลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ใช้ชิปควบคุมโดยเฉพาะ ชิปที่นิยมใช้คือ เบอร์ HD44780 และ HD61830 โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD แบบอักขระ ส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟฟิก

ตัวขับ (driver) เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด ชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับนี้ได้แก่เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น

โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD

ในการใช้งานโมดูล LCD จำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมให้ดีเสียก่อน ในที่นี้ขอยกตัวอย่างโมดูล LCD แบบอักขระ เพราะสามารถเข้าใจได้ง่าย ให้รูปที่ ง 3 เป็น Block Diagramภายในของชิปควบคุม LCD เบอร์ HD44780 ซึ่งใช้ในโมดูล LCD แบบอักขระประกอบด้วย



รูปที่ ฉ3 Block Diagram ของ LCD Module

บัฟเฟอร์อินพุตเอาต์พุต เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อที่จะถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม

รีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register: IR) เป็นรีจิสเตอร์ใช้รับข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอกเพื่อนำไปควบคุมการแสดงผล

รีจิสเตอร์ข้อมูล (Data Register: DR) เป็นรีจิสเตอร์ใช้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกเพื่อถ่ายทอดต่อไปยังหน่วยความจำที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแสดงผล หรือนำข้อมูลไปสร้างตัวอักษรเพื่อเติมในแรมเก็บตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรมเก็บข้อมูลแสดงผล (Display Data RAM: DDRAM) เป็นหน่วยความจำแรมทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่มาจากรีจิสเตอร์ DR ตัวควบคุมจะนำข้อมูลใน DDRAM นี้ไปเปิดตาราง (Look up-table) ของตัวอักษรที่เก็บไว้ในหน่วยความจำรอมและแรมเก็บตัวอักษร เพื่อนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล

รอมเก็บตัวอักษร (Character Generator ROM: CGROM) เป็นหน่วยความจำรอมที่ใชเก็บข้อมูลตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ที่สามารถอ่านออกไปแสดงที่ตัวแสดงผลได้ มีขนาด 7,200 บิตโดยจะถูกอ่านด้วยค่าของข้อมูลใน DDRAM

แรมเก็บตัวอักษร (Character Generator RAM: CGRAM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บตัวอักษรที่มีการสร้างเพิ่มเติมขึ้นใหม่ ในกรณีที่ตัวอักษร ใน CGROM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้นทำได้เช่นเดียวกับ CGROM คือ เขียนข้อมูลลงใน DDRAM แล้วตัวควบคุมจะมาอ่านค่าจาก CGRAM เอง

แฟลก BUSY เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานะการทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่า ตัวควบคุมพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้นก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมต้องตรวจสอบสถานะของ แฟลก BUSY นี้เสียก่อน

โมดูล LCD ขนาด20 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 20×2)

โมดูล LCD ขนาด20×2 มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา สำหรับรายละเอียด การทำงานของแต่ละขามีดังนี้

V_{ss} (ขา 1) : ต่อกราวด์

V_{dd} (ขา2) : ต่อไฟเลี้ยง +5 โวลต์

V_o (ขา3) : เป็นขาอินพุตรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

RS (ขา4) : เป็นขาอินพุตใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR หรือคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR โดยถ้าขานี้เป็น “0” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง แต่ถ้าขานี้เป็น “1” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล

$R/\overline{W}$ (ขา5) : เป็นขาที่ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ LCD ถ้าเป็น “0” เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูล

E (ขา6) : เป็นขาอีนาเบิล LCD ให้ทำงาน

D0-D7 (ขา 7-14) : เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอกขนาด 8 บิต

2.2 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD

ในการเขียนคำสั่งลงในตัวควบคุม แน่นอนว่าต้องกำหนดให้ขา RS และ $R/\overline{W}$ เป็น “0” แล้วเขียนคำสั่งตามไป คำสั่งควบคุมโมดูล LCD ของชิปควบคุม HD44780 ที่สำคัญมี 10 คำสั่งดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (clear display)

มีข้อมูลคำสั่งเป็น 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง หรือ space เข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด เมื่อตัวควบคุมเอ็กซิควิตคำสั่งนี้ จะทำการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เป็นศูนย์ เคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของจอแสดงผล แล้วเซตบิต I/D (ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลัง) ให้เป็น “1”

2. คำสั่ง return home

ต้องกำหนดให้บิต 1 ของข้อมูลเป็น “1” เป็นคำสั่งให้เคอร์เซอร์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผลแต่ข้อมูลบนจอแสดงผลไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ ข้อมูลคำสั่งของคำสั่งนี้จะเป็น 02H หรือ 03H ก็ได้

3. คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	0	0	0	1	I/D	S

บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผล เมื่อมีการป้อนข้อมูล ถ้าหากบิต S เป็น “1” เมื่อเกิดข้อมูลใหม่บนจอแสดงผล ตัวเคอร์เซอร์จะอยู่กับที่แต่ตัวอักษรข้อมูลเดิมจะถูกดันไปทางซ้าย แต่ถ้าหากบิตนี้เป็น “0” เมื่อเกิดข้อมูลใหม่เคอร์เซอร์จะเคลื่อนไปทางขวามือ

บิต I/D เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว ทำให้แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้นแต่ถ้าเป็น “0” แอดเดรสจะถูกลดลง

ดังนั้นข้อมูลคำสั่งที่เกิดขึ้นสำหรับคำสั่งนี้ได้แก่ 04H-07H และที่ใช้บ่อยคือ 06H หมายถึงกำหนดให้เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ เคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ และแอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้น

4. คำสั่งควบคุมการแสดงผล

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	0	0	0	D	C	B

บิต D ใช้ควบคุมการเปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “1” จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะเป็นการปิดจอแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมการแสดงตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จอแสดงผล ต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น “1” ถ้ากำหนดให้เป็น “0” จะเป็นการปิดเคอร์เซอร์ หรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

บิต B ใช้ควบคุมการกระพริบของเคอร์เซอร์ถ้าบิตนี้เป็น “1” เคอร์เซอร์จะกระพริบ ดังนั้นจะมีข้อมูลคำสั่งได้ตั้งแต่ 08H-0FH (8 รูปแบบคำสั่ง) ที่ใช้บ่อยคือ 0CH เป็นการเปิดจอแสดงผล แต่ไม่แสดงเคอร์เซอร์ และ 0FH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แสดงเคอร์เซอร์ และ สั่งให้เคอร์เซอร์กะพริบ

5. คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผลขึ้นอยู่กับการกำหนดบิต S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

S/C	R/L	ลักษณะการเลื่อน	ข้อมูลคำสั่ง
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย	10H-13H
0	1	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา	14H-17H
1	0	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย	18H-1BH
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ทางขวา	1CH-1FH

6. คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	1	DL	N	F	*	*

บิต DL ใช้กำหนดจำนวนบิตที่ใช้ติดต่อส่งผ่านข้อมูล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการติต่อสื่อสารแบบ 4 บิต แต่ถ้าเป็น “1” จะเป็นแบบ 8 บิต

บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะแสดงผล 1 บรรทัด ถ้าเป็น “1” จะแสดงผล 2 บรรทัด ในกรณีที่จอแสดงผลแสดงผลได้มากกว่า 2 บรรทัด และต้องการให้แสดงผลได้มากกว่า 2 บรรทัด ก็กำหนดบิต N นี้ให้เป็น “1”

บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรให้การแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการแสดงผลแบบ 5×7 จุด และถ้าเป็น “1” จะแสดงผลเป็นแบบ 5×10 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลคำสั่งที่ใช้บ่อยคือ 38H เป็นการกำหนดให้โมดูล LCD ทำงานแบบ 8 บิต แสดงผล 2 บรรทัด และเลือกความละเอียดเป็น 5× 7 จุด

จุดที่น่าสังเกตคือ โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัดแม้จะมีการแสดงผลเพียง 1 บรรทัด แต่ต้องกำหนดบิต N เป็น “1” เนื่องจากแอดเดรสของ DDRAM แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ 00H และ 40H

7. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้บิต7 เป็น “0” บิต 6 เป็น “1” ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือจะแทนด้วยค่าแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ก่อนที่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM จะอยู่ระหว่าง 00H-3FH

8. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้องเป็น “1” และข้อมูลอีก 7 บิต ที่เหลือจะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 8CH-0FFH ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสยังขึ้นกับการกำหนดสถานะที่บิต N ด้วย หากบิต N เป็น “0” แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H-0CFH และถ้าบิต N เป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะมี 2 ช่วงคือ 8CH-87H และ 0C0H-0C7H

9. คำสั่งอ่านแฟลก BUSY และแอดเดรส

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
BF	A	A	A	A	A	A	A
	← แอดเดรสไบต์สูง →			← แอดเดรสไบต์สูง →			

เป็นคำสั่งอ่านแฟลก BUSY (BF) โดยแฟลกนี้จะเป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมจะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าหากบิต BF เป็น “0” แสดงว่าตัวควบคุม LCD พร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่ง แต่ถ้าเป็น “1” แสดงว่า ขณะนี้ตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายในหรือกำลังประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง

เมื่อต้องการอ่านแฟลกต้องกำหนดให้ขา $R/\overline{W}$ เป็น “1” ด้วย แต่สัญญาณ ที่ RS ยังต้องเป็น “0” อยู่เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง

นอกจากนี้ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูลแอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยบิต 0-6 เป็นค่าข้อมูลของแอดเดรสที่ต้องการอ่าน

การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD

ในการเขียนข้อมูลเพื่อควบคุมให้โมดูล LCD แสดงผลตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ต้องส่งคำสั่ง (Instruction) แล้วกำหนดโหมด การทำงานให้แก่โมดูล LCd ก่อน จากนั้นค่อยส่งข้อมูล (Data) ที่ต้องการแสดงผลเนื่องจากบัสข้อมูลของโมดูล LCD มี 8 เส้นคือ D0-D7 และใช้เป็นทางผ่านของทั้งคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สั่งและข้อมูล ดังนั้นในการส่งคำสั่งและข้อมูลจึงต้องอาศัยการกำหนดสัญญาณลอจิกที่ขา RS ถ้าหากขา RS ได้ลอจิก “0” หมายความว่า ข้อมูลที่ป้อนให้แก่โมดูล LCD ขณะนั้นเป็นคำสั่ง ในทางตรงกันข้าม หากขา RS ได้รับลอจิก “1” ข้อมูลที่ป้อนในขณะนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้ในการแสดงผล

เมื่อต้องการเขียนหรืออ่านข้อมูลใน CGRAM และ DDRAM เริ่มต้นต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน โดยใช้คำสั่งเลือกแอดเดรส จากนั้นกำหนดให้ขา RS เป็น “1” เพื่อแจ้งให้ตัวควบคุมภายในโมดูล LCD ทราบว่าข้อมูลที่ปรากฏต่อไปนี้เป็นข้อมูลปกติไม่ใช่คำสั่ง

ในกรณีที่ต้องการอ่านข้อมูลต้องกำหนดให้ขา $R/\overline{W}$ เป็น “1” ข้อมูลขนด 8 บิต (หรือ 4บิต) ก็จะปรากฏบนบัสข้อมูล โดยข้อมูลที่อ่านออกมาได้จะเป็นข้อมูลจากแอดเดรสของ CGRAM หรือ DDRAM ตามที่ต้องการ

ในกรณีที่ต้องการเขียนข้อมูล เมื่อกำหนดแอดเดรสและป้อนลอจิก “1” ให้ขา RS แล้ว แล้วต้องกำหนดให้ขา$R/\overline{W}$ เป็น “0” ข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลจะถูกเขียนลงในรีจิสเตอร์ DR จากนั้นจึงถ่ายทอดลงใน DDRAM ต่อไป

จังหวะการทำงานของ LCD โมดูล

ในการติดต่อกับโมดูล LCD จะต้องมีการหน่วงเวลาหลังจากที่ทำการส่งรหัสคำสั่งหรือข้อมูล เนื่องจากต้องรอให้คอนโทรลเลอร์ภายใน LCD โมดูลแปลความหมายของรหัสคำสั่งและทำงานตามคำสั่งให้เสร็จเรียบร้อยเสียก่อน จากนั้นจึงจะรับข้อมูลหรือดำเนินการต่อไป

ดังนั้น ในการใช้งานโมดูล LCD ผู้เขียนโปรแกรมต้องมีโปรแกรมหน่วงเวลารอให้โมดูล LCD พร้อมทำงานด้วย โดยเมื่อเริ่มจ่ายไฟให้แก่โมดูล LCD ต้องรอประมาณ 10 มิลลิวินาที เพื่อจะให้โมดูล LCD ทำการเตรียมความพร้อมหรืออินนิเชียล(initial) หลังจากนั้นก็จะกำหนดลอจิกให้แก่ขา RS ของโมดูล LCD แล้วต้องหน่วงเวลาไว้อีกประมาณ 2 มิลลิวินาที เพื่อให้คอนโทรลเลอร์ภายใน LCD โมดูลแปลความหมายของลอจิกที่ขา RS ว่าข้อมูลต่อไปที่จะได้รับนั้นเป็นรหัสคำสั่งหรือข้อมูลที่ต้องแสดงผล จากนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลมารอที่บัสข้อมูล D0-D7 (กรณีทำงานในโหมด 8 บิต) ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณ พัลส์ที่ป้อนเข้าที่ขา E ของโมดูล LCD ต้องเป็นพัลส์ขอบขาขึ้นจากนั้นทำการหน่วงเวลา 2 มิลลิวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว

(Fundamental concept of the Fast Fourier Transform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว
(Fundamental concept of the Fast Fourier Transform)

1. ประวัติการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (The theory of the Fast Fourier Transform)

การแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณค่าของการแปลงฟูเรียร์แบบค่าจำกัด (Finite Fourier Transform) ของอนุกรม (Series) ข้อมูลเชิงซ้อนจำนวน N ค่า (N Complex Data Points) โดยใช้การคำนวณ $N\ Log_2\ N$ ครั้ง วิธีการนี้มีประวัติที่เกี่ยวเนื่องกันมาดังนี้ คือ เมื่อปี 1965 Cooley และ Tukey ได้อธิบายถึงวิธีการอันนี้ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการใหม่สำหรับผู้ที่เชื่อกันว่า การวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier Analysis) นั้นต้องใช้กระบวนการบางอย่างที่เป็นสัดส่วน (Proportional) กับการดำเนินการ (Operation) จำนวน N^2 ครั้งโดยตัวประกอบสัดส่วน (Proportionality Factor) ของการคำนวณนั้นสามารถลดจำนวนครั้งของการดำเนินการลงได้โดยใช้คุณสมบัติของการสมมาตร (Symmetry) ของฟังก์ชันตรีโกณ (Trigonometric Function) โดยที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์เดิมนั้นต้องใช้เวลา (Machine Time) นับเป็นร้อยชั่วโมงเพื่อให้การคำนวณแล้วเสร็จ จากผลงานของ Cooley และ Tukey นี้ บวกกับวิธีการของ Rudnick และ Daneilson & Lanczos ก็จะสามารถสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้การคำนวณเป็นสัดส่วนกับค่า $N\ Log_2\ N$ ซึ่งผลงานของ Danielson และ Lanczos นี้ก็ได้ถูกนำมาอธิบายปัญหาของการกระจายของรังสีเอกซ์ (X-Ray Scattering Problem) และก็เป็นเวลาหลายปีทีเดียวคือ ตั้งแต่ปี 1942 เป็นต้นมาที่นักวิจัยทั้งหลายไม่ยอมรับในประสิทธิภาพของวิธีการแปลงฟูเรียร์นี้

จากผลงานต่างๆ เหล่านี้ รวมกับเอกสารของ Runge กับ Konig ก็ได้อธิบายวิธีการนี้ในเทอมของอนุกรมซายน์และโคซายน์โดยใช้คุณสมบัติของการเป็นฟังก์ชันสมมาตรของซายน์และโคซายน์ ตอนหนึ่งของผลงานของ Runge กับ Konig ก็ได้แสดงให้เห็นว่า เราสามารถใช้คุณสมบัติฟังก์ชันคาบของฟังก์ชันซายน์และโคซายน์มาวิเคราะห์ฟูเรียร์ 2N-point จากการวิเคราะห์ N-point 2 ชุดแทน โดยใช้การคำนวณมากกว่า N ครั้งแบบช้าๆ อีกทางหนึ่ง ถ้าอนุกรมนั้นถูกแปลง(Transform) ไปยาว N โดย N เป็นค่าที่เขียนในรูปของสองยกกำลังได้อนุกรมนั้นจะสามารถแตกออกเป็นอนุกรมย่อยจำนวน $Log_2\ N$ อนุกรมได้ เรียกขั้นตอนวิธีแบบนี้ว่าขั้นตอนวิธีแบบทวีคูณ (Doubling algorithm) ซึ่งเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการแปลงฟูเรียร์แบบค่าจำกัดโดยใช้จำนวนครั้งของการคำนวณเป็นทวีคูณแบบ $\log_2 N$ จำนวนครั้งของการคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในขั้นตอนวิธีแบบทวีคูณสืบเนื่อง (successive doubling algorithm) จะเป็นสัดส่วนของค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N\ Log_2\ N$ แทนค่าของ N^2 สังเกตว่าการใช้การสมมาตรนั้นจะลดเพียงค่าของตัวประกอบของการเป็นสัดส่วน (Proportionality factor) ในขณะที่ขั้นตอนวิธีแบบทวีคูณสืบเนื่องจะแทน N ด้วย$N\ Log\ N$ แต่ความแตกต่างอันนี้ไม่ใช้เรื่อสำคัญอะไรเลยสำหรับค่าของ N ในงานของ Runge กับ Konig

วิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็วของ Cooley และ Tukey นั้นโดยทั่วไปแล้วจะใช้ได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าเราสามารถเอาวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้กับค่า N ที่เป็นจำนวนประกอบ (Composite) ที่สามารถเขียนได้ในรูปของ 2 ยกกำลังได้ ดังนั้นถ้าเราแยกตัวประกอบของ N ออกเป็น $N = r \times s$ ข้อมูลนั้นก็จะถูกเก็บเป็นแถวลำดับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular array) ที่มีแถวตั้ง r แถว (r-column) และแถวนอน s แถว (s-row) ดังนั้นการแปลงแบบ 2 มิติ (Two- Dimensional Transformation) ก็จะถูกสร้างขึ้นด้วย Phase-Shifting Operational Intervening ในระหว่างการแปลงแบบ 2 มิตินั้น ด้วยเหตุนี้เองเราก็จะคำนวณเพียง $N(r+s)$ ครั้งแทนที่จะเป็น N^2 ครั้ง แต่เมื่อใดก็ตามที่ N เป็นจำนวนที่สามารถเขียนได้ในรูปของ 2 ยกกำลังแล้ว วิธีการคำนวณตามแบบของ Cooley และ Tukey นั้นจะเหลือเพียงการคำนวณ $N\ Log_2\ N$ ครั้งเช่นกัน

ต่อมา L.H. Thomas ได้นำเอาขั้นตอนวิธีการแบบทวีคูณสืบเนื่องมาใช้ในการคำนวณค่าอนุกรมฟูเรียร์ และเขาก็ไดทราบว่าเมื่อใดควรจะใช้วิวธีการนี้ ขั้นตอนวิธีซึ่งอธิบายโดย Thomas นี้ดูเหมือนจะคล้ายๆวิธีของ Cooley และ Tukey เพราะว่าใช้เวลาในการคำนวณน้อย และเป็นการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ (One- Dimensional Fourier Analysis) โดยการใช้การวิเคราะห์ฟูเรียร์ แบบหลายมิติ (Multidimensional Fourier Analysis) แทน อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันอยู่บ้างด้วยเหตุผลดังนี้คือ

1) ขั้นตอนวิธีของ Thomas นั้นตัวประกอบของ N จะต้องเป็นจำนวนเฉพาะที่แตกต่างกันทั้งหมด (Mutually Prime)
2) ในขั้นตอนวิธีการคำนวณของ Thomas นั้นจะเป็นการวิเคราะห์ฟูเรียร์แบบหลายมิติโดยไม่มีการใช้ Intervening phase shifts หรือที่เขาเรียกเองว่า Twiddle Factors เลย
3) ความสมนัย (Correspondence) ระหว่างดัชนีของแบบ 1 มิติ (one-dimensional index) กับดัชนีแบบหลายมิติ (Multidimensional indexes)

ของวิธีทั้งสองนั้นต่างกันโดยสิ้นเชิง ขั้นตอนวิธีแบบท Thomas หรือแบบ Prime factor นี้จะใช้ได้เป็นอย่างดีเมื่อนำไปใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีการแปลงอย่างเร็วและวิธีทั้งสองก็เป็นที่นิยมใช้กันอยู่มาก

การพัฒนาต่อมา เป็นการปรับปรุงขั้นตอนวิธีของ Thomas ให้ใช้ได้โดยทั่วไปยิ่งขึ้น เรื่องนี้เป็นผลมาจากการวิเคราะห์ และการออกแบบการทดลอง เช่นสมมติ ให้ A ($k_0, k_1, \ldots, k_{m-1}$) เป็นตัวอย่างของข้อมูลหนึ่ง Yates ได้พิจารณา กรณีที่ k = 0 หรือ 1 ไม่ว่าจะใช้ค่า I หรือไม่ก็ตาม จะให้ว่า N = 2 และจะได้ความแตกต่างทั้งหมดที่เป็นไปได้ ดังนั้นเราจึงต้องคำนวณหา N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปของผลรวมเชิงเส้น (LinearCombination) ของทุกค่า A ซึ่งงานนี้ต้องใช้การดำเนินการถึง N^2 ครั้ง Yates ได้คำนวณแถวลำดับของผลรวม N ค่าใหม่กับคำนวณค่าความแตกต่างของค่า A คู่ต่างๆ กระบวนการนี้จะกระทำซ้ำๆกัน บนแถวลำดับอันใหม่ นี้โดยเลือกคู่ที่ให้อันดับต่างกัน (Different Order) และงานนี้ต้องทำโดยใช้ m = $Log_2\ N$ นั่นหมายความว่า เราจะต้องทำการคำนวณ N $Log_2\ N$ ครั้งแทน N^2 ครั้ง Good ได้ให้ข้อสังเกตว่าวิธีการของ Yates สามารถใช้กับการวิเคราะห์ฟูเรียร์ ที่มี m มิติ (m-dimensional Fourier Analysis) โดยใช้ข้อมูลเพียง 2 ชุด ในแต่ละทศทาง และหลักการนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั่วๆไปกับจำนวนจุดที่ไม่เจาะจง (Arbitrary Number of Point)สำหรับแต่ละทิศทาง ดังนั้น Good จึงได้แสดงว่า ถ้า N เป็นจำนวนประกอบที่มีตัวประกอบเป็นจำนวนเฉพาะที่แตกต่างกันทั้งหมด (Mutually Primefactors) กล่าวคือ

$$N = r_1 r_2 \ldots r_m$$

เราก็จะสามารถวิเคราะห์ฟูเรียร์แบบ 1 มิติ ที่มี N จุดได้โดยการวิเคราะห์ฟูเรียร์แบบ m มิติ บนจุดของแถวลำดับแบบ m มิติ $r_1 \times r_2 \times \ldots\ldots \times r_m$ เมื่อรวมความคิดต่างๆ เหล่าเข้าด้วยกันแล้วก็จะได้เป็นวิธีการของ Good ซึ่งเป็นวิธีการแบบทั่วไป ของขั้นตอนวิธีแบบใช้ตัวประกอบที่เป็นจำนวนเฉพาะของ Thomas (Thomas Prime Factor Algorithm)

2. การแปลงฟูเรียร์อย่างเร็วคืออะไร

เมื่อ Cooley และ Tukey ได้คิดวิธีการคำนวณหาสัมประสิทธ์ของฟูเรียร์ (Fourier Coefficients) ขึ้นเมื่อปี 1965 โดยเสียเวลาในการคำนวณน้อย ซึ่งวิธีนี้รู้จักกันในปัจจุบันในชื่อว่า การแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (The Fast Furrier Transform) ด้วยวิธีการนี้เองได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในด้านเทคนิคการคำนวณที่ใช้กันใน Digital Spectral Analysis , Filter Simulation และสาขาอื่นๆอีกมากที่เกี่ยวข้องกัน

การแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (FFT) เป็นวิธีการอันหนึ่งที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าของการแปลงฟูเรียร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform: DFT) ของอนุกรมเวลา (Time Series) ชุดหนึ่ง วิธีการนี้ วิธีการนี้สามารถช่วยให้การแก้ปัญหาได้รวดเร็วและสะดวกกว่าแต่ก่อน ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้ FFT เป็นเรื่องทีหน้าสนใจอย่างมาก DFT เป็นการแปลงในตัวเองแบบหนึ่ง เช่นเดียวกับ การแปลงอินทิกรัลของฟูเรียร์ (Fourier Integral Transform) หรือการแปลงอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series Transform) และยังเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สามารถทำการดำเนินการ การส่งแบบผกผัน (Reverse Mapping Operation) ของอนุกรมเวลาได้ DFT นี้มีคุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ เหมือนกับการแปลงอินทิกรัลของฟูเรียร์ทุกประการ ที่สำคัญ DFT สามารถหา Spectrum ของอนุกรมเวลาได้ เช่น การคูณของการแปลงของอนุกรมเวลา 2 ตัว จะมีค่าสอดคล้องกับการประสาน (Convolve) ของอนุกรมเวลา 2 ตัวนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เทคนิค Digital Analysis เพื่อหาค่าของคลื่นต่อเนื่อง(continuous waveform) นั้นจะต้องมีการสุ่มตัวอย่าง(โดยปกติมักใช้ช่วงเวลาห่างเท่ากัน) เพื่อจะหาค่าของอนุกรมเวลาของตัวอย่างแบบเต็มหน่วย(Discrete Sample) ซึ่งจะต้องป้อนเข้า Digital Computer เราทราบดีอยู่ว่าอนุกรมเวลานั้นเป็นคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous Waveform) จึงให้คลื่นที่มีแถบความถี่แบบจำกัด (Frequency Band-Limited) และตัวอย่าง (Sample) ที่ได้รีมีอัตราอย่างน้อยสุดเป็นสอง เท่าของความถี่สูงสุดที่เกิดขึ้น ในคลื่นนั้น เมื่อตัวอย่างต่างๆ เหล่านี้ถูกจัด ให้มีช่วงเท่าๆกันเราจะเรียกว่า Nyquist Samples ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า DFT ของอนุกรมเวลานี้จะมีความสัมพันธ์กับการแปลงฟูเรียร์ของคลื่นแบบต่อเนื่องของตัวอย่างที่มาสร้างเป็นอนุกรมเวลา ด้วยวิธีกานี้เองที่ทำให้ DFT ใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมายใน Power Spectrum Analysis และใน Filter Simulation โดยใช้ Digital Computer

FFT เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำมาใช้หาค่าของ DFT ของอนุกรมเวลา โดยอาศัยข้อเท็จจริงที่ว่า การคำนวณหาสัมประสิทธ์ของ DFT นั้นสามารถหาได้ด้วยวิธีการ การทำซ้ำๆกัน (Iteration) ซึ่งจะทำให้ทุ่นเวลาในการคำนวณไปได้มาก ด้วยเหตุที่วิธีการอันนี้ ไม่ได้เป็นวิธีที่เข้าใจกันได้ง่ายๆจึงทำให้ FFT มักจะถูกมองข้ามไป ถ้าอนุกรมเวลาประกอบด้วยตัวอย่าง $N = 2^n$ ตัว ดังนั้นเราต้องคำนวณ $2nN = 2n \log_2 N$ ครั้ง เพื่อจะได้ค่า N ทุกตัวที่เกี่ยวเนื่องกัน สัมประสิทธิ์ของ DFT เมื่อเทียบกับจำนวนครั้งของการคำนวณด้วยวิธีปกติแล้ว จำนวนครั้งของการคำนวณที่ได้นี้นับว่าน้อยมาก เมื่อ N ใหญ่ขึ้น จะทำให้การคำนวณแบบธรรมดา เกิดปัญหาขึ้นมากมาย ตัวอย่างเช่น N=8192 เวลาที่ใช้ในการคำนวณ หาค่าสัมประสิทธิ์ของ DFT ทั้ง 8192 ตัวจะใช้เวลาเพียง 5 วินาที เมื่อใช้กับเครื่อง IBM 7094 แต่ถ้าใช้วิธีคำนวณธรรมดา จะใช้เวลาถึงครึ่งชั่วโมง

การใช้ FFT เพื่อลดเวลาในการคำนวณนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆหลายสาขา เช่น

1. การหา power spectra และ autocorrelation function ของตัวอย่างข้อมูล
2. การ simulation ของ filter
3. pattern recognition โดยใช้ DFT ที่เป็นแบบ2มิติ
4. การหา bispectra , covariance function , cepstra และฟังก์ชันที่เกี่ยวเนื่องอื่นๆ
5. การแยกของการประสานฟังก์ชัน(Decomposing of convolved functions)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ

เอกสารประกอบ (Data Sheet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM339, LM239, LM2901, LM2901V, MC3302

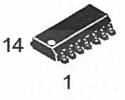
Quad Single Supply Comparators

These comparators are designed for use in level detection, low–level sensing and memory applications in consumer, automotive, and industrial electronic applications.

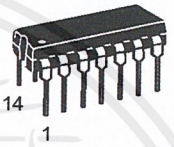
- Single or Split Supply Operation
- Low Input Bias Current: 25 nA (Typ)
- Low Input Offset Current: ±5.0 nA (Typ)
- Low Input Offset Voltage
- Input Common Mode Voltage Range to Gnd
- Low Output Saturation Voltage: 130 mV (Typ) @ 4.0 mA
- TTL and CMOS Compatible
- ESD Clamps on the Inputs Increase Reliability without Affecting Device Operation

ON Semiconductor™

http://onsemi.com



SO–14
D SUFFIX
CASE 751A



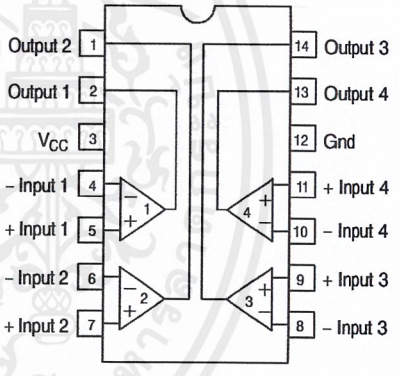
PDIP–14
N, P SUFFIX
CASE 646

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage LM239/LM339/LM2901, V MC3302	V_{CC}	 +36 or ±18 +30 or ±15	Vdc
Input Differential Voltage Range LM239/LM339/LM2901, V MC3302	V_{IDR}	 36 30	Vdc
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICMR}	–0.3 to V_{CC}	Vdc
Output Short Circuit to Ground (Note 1.)	I_{SC}	Continuous	
Power Dissipation @ T_A = 25°C Plastic Package Derate above 25°C	P_D	 1.0 8.0	 W mW/°C
Junction Temperature	T_J	150	°C
Operating Ambient Temperature Range LM239 MC3302 LM2901 LM2901V LM339	T_A	 –25 to +85 –40 to +85 –40 to +105 –40 to +125 0 to +70	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	–65 to +150	°C

1. The maximum output current may be as high as 20 mA, independent of the magnitude of V_{CC}. Output short circuits to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction.

PIN CONNECTIONS



(Top View)

ORDERING INFORMATION

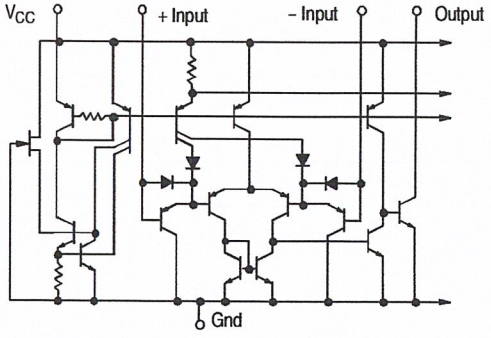
See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 6 of this data sheet.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 6 of this data sheet.

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NOTE: Diagram shown is for 1 comparator.

Figure 1. Circuit Schematic

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = +5.0 Vdc, T_A = +25°C, unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LM239/339			LM2901/2901V			MC3302			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage (Note 3.)	V_{IO}	–	±2.0	±5.0	–	±2.0	±7.0	–	±3.0	±20	mVdc
Input Bias Current (Notes 3., 4.) (Output in Analog Range)	I_{IB}	–	25	250	–	25	250	–	25	500	nA
Input Offset Current (Note 3.)	I_{IO}	–	±5.0	±50	–	±5.0	±50	–	±3.0	±100	nA
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICMR}	0	–	V_{CC} –1.5	0	–	V_{CC} –1.5	0	–	V_{CC} –1.5	V
Supply Current R_L = ∞ (For All Comparators) R_L = ∞, V_{CC} = 30 Vdc	I_{CC}	 – –	 0.8 1.0	 2.0 2.5	 – –	 0.8 1.0	 2.0 2.5	 – –	 0.8 1.0	 2.0 2.5	mA
Voltage Gain R_L ≥ 15 kΩ, V_{CC} = 15 Vdc	A_{VOL}	50	200	–	25	100	–	25	100	–	V/mV
Large Signal Response Time V_I = TTL Logic Swing, V_{ref} = 1.4 Vdc, V_{RL} = 5.0 Vdc, R_L = 5.1 kΩ	–	–	300	–	–	300	–	–	300	–	ns
Response Time (Note 5.) V_{RL} = 5.0 Vdc, R_L = 5.1 kΩ	–	–	1.3	–	–	1.3	–	–	1.3	–	μs
Output Sink Current V_I (–) ≥ +1.0 Vdc, V_I(+) = 0, V_O ≤ 1.5 Vdc	I_{Sink}	6.0	16	–	6.0	16	–	6.0	16	–	mA
Saturation Voltage V_I(–) ≥ +1.0 Vdc, V_I(+) = 0, I_{sink} ≤ 4.0 mA	V_{sat}	–	130	400	–	130	400	–	130	500	mV
Output Leakage Current V_I(+) ≥ +1.0 Vdc, V_I(–) = 0, V_O = +5.0 Vdc	I_{OL}	–	0.1	–	–	0.1	–	–	0.1	–	nA

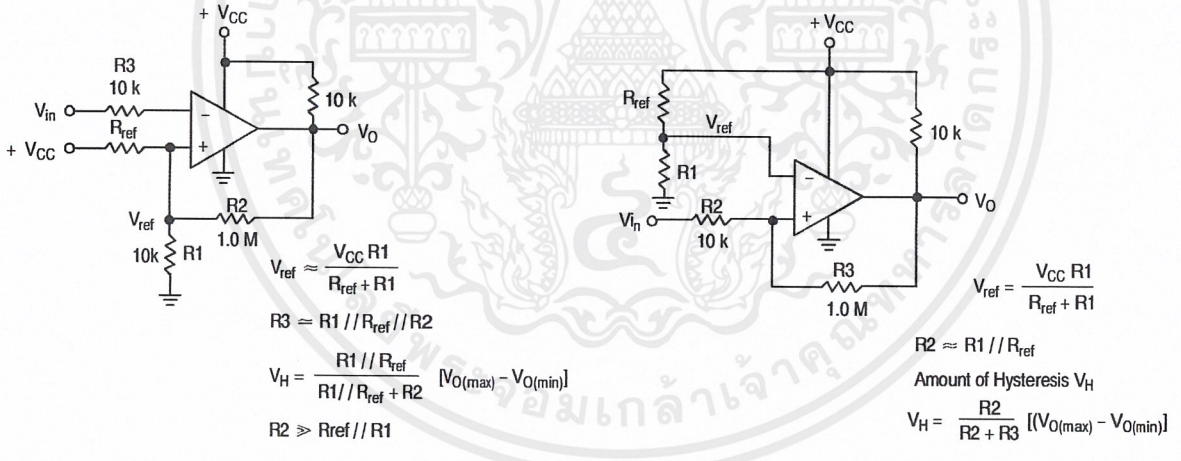
2. (LM239) T_{low} = –25°C, T_{high} = +85°
   (LM339) T_{low} = 0°C, T_{high} = +70°C
   (MC3302) T_{low} = –40°C, T_{high} = +85°C
   (LM2901) T_{low} = –40°C, T_{high} = +105°
   (LM2901V) T_{low} = –40°C, T_{high} = +125°C
3. At the output switch point, V_O ≃ 1.4 Vdc, R_S ≤ 100 Ω 5.0 Vdc ≤ V_{CC} ≤ 30 Vdc, with the inputs over the full common mode range (0 Vdc to V_{CC} –1.5 Vdc).
4. The bias current flows out of the inputs due to the PNP input stage. This current is virtually constant, independent of the output state.
5. The response time specified is for a 100 mV input step with 5.0 mV overdrive. For larger signals, 300 ns is typical.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE CHARACTERISTICS (V_{CC} = +5.0 Vdc, T_A = T_{low} to T_{high} [Note 2.])

Characteristic	Symbol	LM239/339			LM2901/2901V			MC3302			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage (Note 3.)	V_{IO}	–	–	±9.0	–	–	±15	–	–	±40	mVdc
Input Bias Current (Notes 3., 4.) (Output in Analog Range)	I_{IB}	–	–	400	–	–	500	–	–	1000	nA
Input Offset Current (Note 3.)	I_{IO}	–	–	±150	–	–	±200	–	–	±300	nA
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICMR}	0	–	V_{CC} –2.0	0	–	V_{CC} –2.0	0	–	V_{CC} –2.0	V
Saturation Voltage $V_I(-) \geq +1.0$ Vdc, $V_I(+) = 0$, $I_{sink} \leq 4.0$ mA	V_{sat}	–	–	700	–	–	700	–	–	700	mV
Output Leakage Current $V_I(+) \geq +1.0$ Vdc, $V_I(-) = 0$, $V_O = 30$ Vdc	I_{OL}	–	–	1.0	–	–	1.0	–	–	1.0	µA
Differential Input Voltage All $V_I \geq 0$ Vdc	V_{ID}	–	–	V_{CC}	–	–	V_{CC}	–	–	V_{CC}	Vdc

2. (LM239) T_{low} = –25°C, T_{high} = +85°
   (LM339) T_{low} = 0°C, T_{high} = +70°C
   (MC3302) T_{low} = –40°C, T_{high} = +85°C
   (LM2901) T_{low} = –40°C, T_{high} = +105°
   (LM2901V) T_{low} = –40°C, T_{high} = +125°C
3. At the output switch point, $V_O \simeq$ 1.4 Vdc, $R_S \leq 100\ \Omega$ 5.0 Vdc ≤ V_{CC} ≤ 30 Vdc, with the inputs over the full common mode range (0 Vdc to V_{CC} –1.5 Vdc).
4. The bias current flows out of the inputs due to the PNP input stage. This current is virtually constant, independent of the output state.
5. The response time specified is for a 100 mV input step with 5.0 mV overdrive. For larger signals, 300 ns is typical.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Characteristics

(V_{CC} = 15 Vdc, T_A = +25°C (each comparator) unless otherwise noted.)

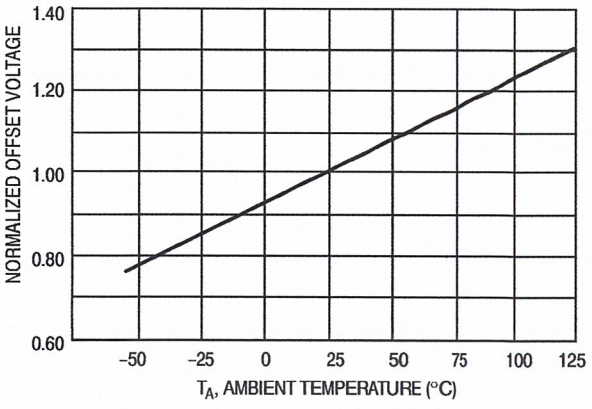


Figure 4. Normalized Input Offset Voltage

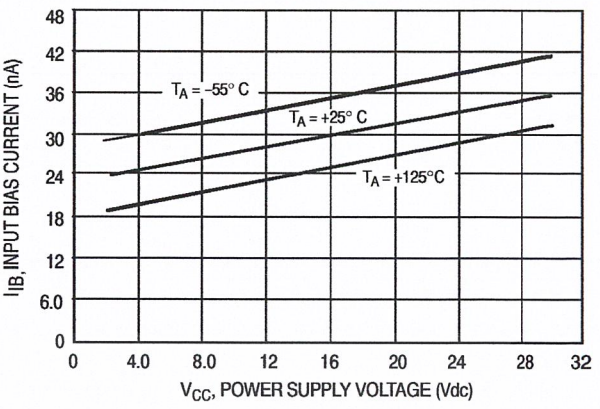


Figure 5. Input Bias Current

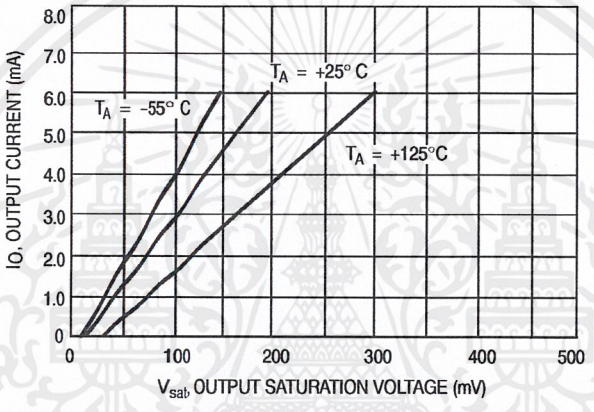
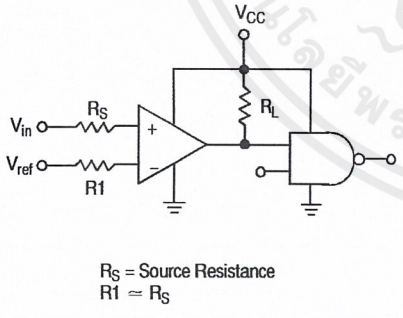


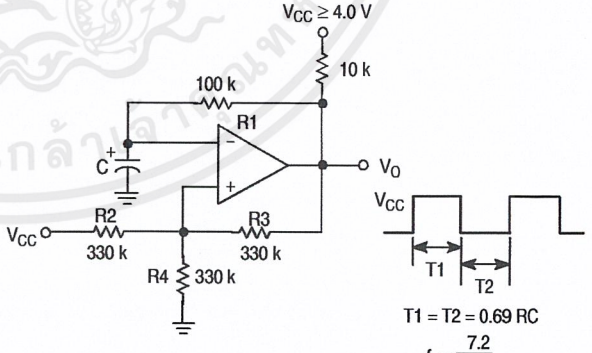
Figure 6. Output Sink Current versus Output Saturation Voltage



R_S = Source Resistance
$R1 \simeq R_S$

Logic	Device	V_{CC} (V)	R_L kΩ
CMOS	1/4 MC14001	+15	100
TTL	1/4 MC7400	+5.0	10

Figure 7. Driving Logic



$T1 = T2 = 0.69\ RC$

$f \approx \frac{7.2}{C(\mu F)}$

$R2 = R3 = R4$

$R1 \approx R2 \,//\, R3 \,//\, R4$

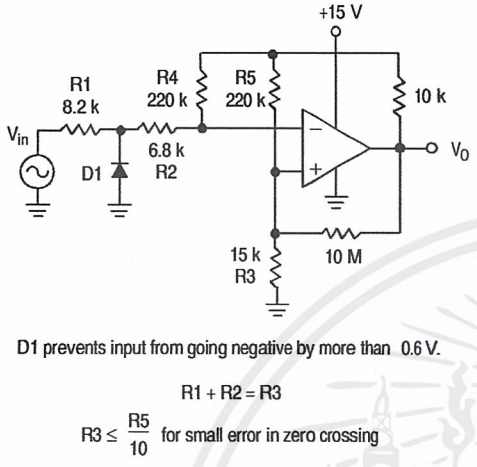
Figure 8. Squarewave Oscillator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATIONS INFORMATION

These quad comparators feature high gain, wide bandwidth characteristics. This gives the device oscillation tendencies if the outputs are capacitively coupled to the inputs via stray capacitance. This oscillation manifests itself during output transitions (V_{OL} to V_{OH}). To alleviate this situation input resistors < 10 kΩ should be used. The addition of positive feedback (< 10 mV) is also recommended. It is good design practice to ground all unused input pins.

Differential input voltages may be larger than supply voltages without damaging the comparator's inputs. Voltages more negative than –300 mV should not be used.



D1 prevents input from going negative by more than 0.6 V.

$$R1 + R2 = R3$$

$$R3 \leq \frac{R5}{10} \text{ for small error in zero crossing}$$

Figure 9. Zero Crossing Detector (Single Supply)

$V_{in(min)} \approx 0.4$ V peak for 1% phase distortion ($\Delta\Theta$).

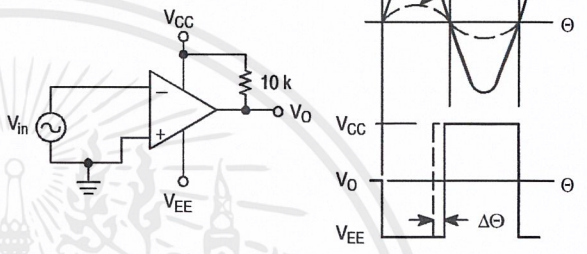


Figure 10. Zero Crossing Detector (Split Supplies)

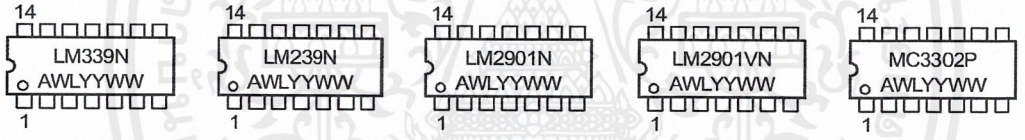
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ORDERING INFORMATION

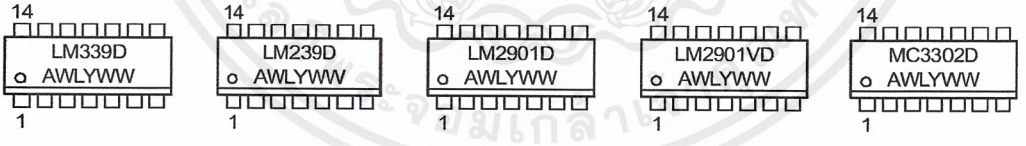
Device	Package	Shipping
LM239D	SO–14	55 Units/Rail
LM239DR2	SO–14	2500 Units/Tape & Reel
LM239N	PDIP–14	25 Units/Rail
LM339D	SO–14	55 Units/Rail
LM339DR2	SO–14	2500 Units/Tape & Reel
LM339N	PDIP–14	25 Units/Rail
LM2901D	SO–14	55 Units/Rail
LM2901DR2	SO–14	2500 Units/Tape & Reel
LM2901N	PDIP–14	25 Units/Rail
LM2901VDR2	SO–14	2500 Units/Tape & Reel
LM2901VN	PDIP–14	25 Units/Rail
MC3302D	SO–14	55 Units/Rail
MC3302DR2	SO–14	2500 Units/Tape & Reel
MC3302P	PDIP–14	25 Units/Rail

MARKING DIAGRAMS

PDIP–14
N, P SUFFIX
CASE 646



SO–14
D SUFFIX
CASE 751A

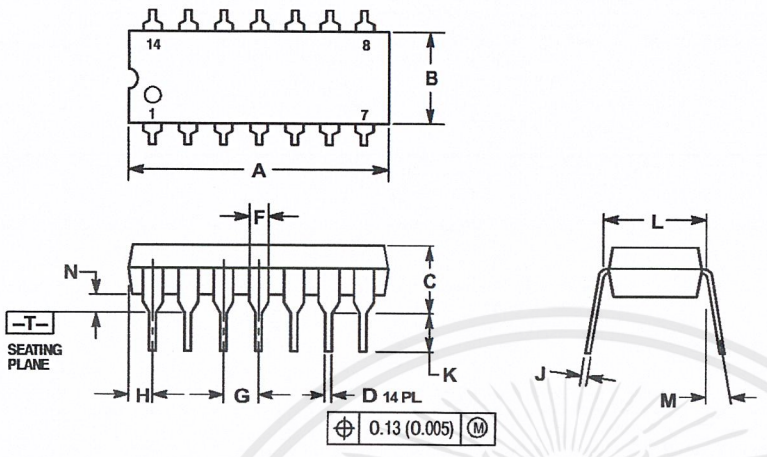


A = Assembly Location
WL = Wafer Lot
YY, Y = Year
WW = Work Week

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

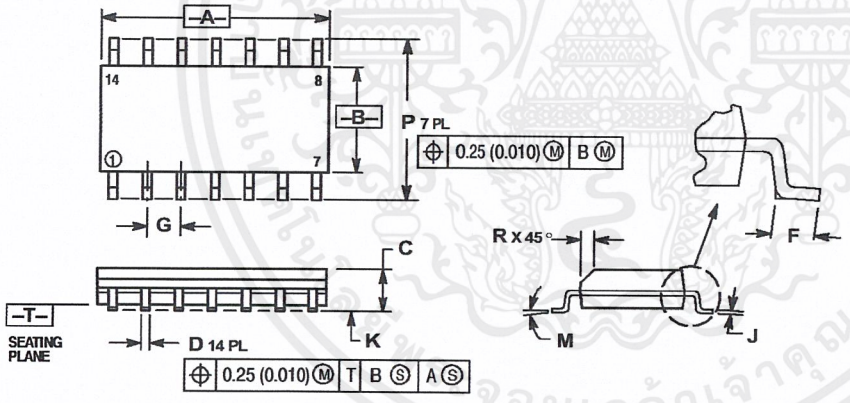
PDIP–14
P SUFFIX
CASE 646–06
ISSUE M



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.715	0.770	18.16	18.80
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.145	0.185	3.69	4.69
D	0.015	0.021	0.38	0.53
F	0.040	0.070	1.02	1.78
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.052	0.095	1.32	2.41
J	0.008	0.015	0.20	0.38
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.290	0.310	7.37	7.87
M	—	10°	—	10°
N	0.015	0.039	0.38	1.01

SO–14
D SUFFIX
CASE 751A–03
ISSUE F



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	8.55	8.75	0.337	0.344
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.228	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

NORTH AMERICA Literature Fulfillment:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303–675–2175 or 800–344–3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303–675–2176 or 800–344–3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com
Fax Response Line: 303–675–2167 or 800–344–3810 Toll Free USA/Canada

N. American Technical Support: 800–282–9855 Toll Free USA/Canada

EUROPE: LDC for ON Semiconductor – European Support
German Phone: (+1) 303–308–7140 (Mon–Fri 2:30pm to 7:00pm CET)
Email: ONlit–german@hibbertco.com
French Phone: (+1) 303–308–7141 (Mon–Fri 2:00pm to 7:00pm CET)
Email: ONlit–french@hibbertco.com
English Phone: (+1) 303–308–7142 (Mon–Fri 12:00pm to 5:00pm GMT)
Email: ONlit@hibbertco.com

EUROPEAN TOLL–FREE ACCESS*: 00–800–4422–3781
*Available from Germany, France, Italy, UK, Ireland

CENTRAL/SOUTH AMERICA:
Spanish Phone: 303–308–7143 (Mon–Fri 8:00am to 5:00pm MST)
Email: ONlit–spanish@hibbertco.com
Toll–Free from Mexico: Dial 01–800–288–2872 for Access – then Dial 866–297–9322

ASIA/PACIFIC: LDC for ON Semiconductor – Asia Support
Phone: 303–675–2121 (Tue–Fri 9:00am to 1:00pm, Hong Kong Time)
Toll Free from Hong Kong & Singapore:
001–800–4422–3781
Email: ONlit–asia@hibbertco.com

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4–32–1 Nishi–Gotanda, Shinagawa–ku, Tokyo, Japan 141–0031
Phone: 81–3–5740–2700
Email: r14525@onsemi.com

ON Semiconductor Website: http://onsemi.com

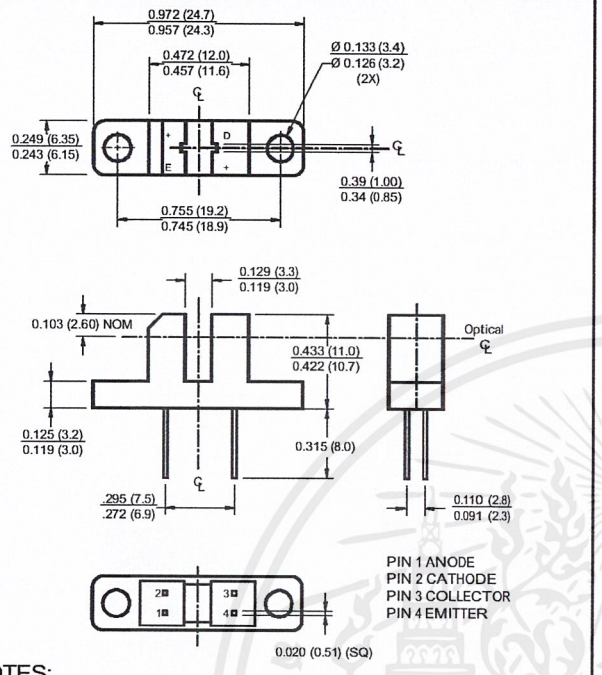
For additional information, please contact your local Sales Representative.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

H21B1 / H21B2 / H21B3
PHOTODARLINGTON OPTICAL INTERRUPTER SWITCH

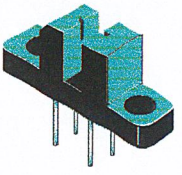
PACKAGE DIMENSIONS



NOTES:

1. Dimensions for all drawings are in inches (mm).
2. Tolerance of ± .010 (.25) on all non-nominal dimensions unless otherwise specified.

DESCRIPTION

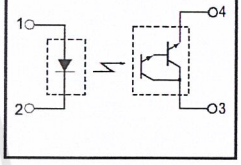


The H21B1, H21B2 and H21B3 consist of a gallium arsenide infrared emitting diode coupled with a silicon photodarlington in a plastic housing. The packaging system is designed to optimize the mechanical resolution, coupling efficiency, ambient light rejection, cost and reliability. The gap in the housing provides a means of interrupting the signal with an opaque material, switching the output from an "ON" to an "OFF" state.

FEATURES

- Opaque housing
- Low cost
- .035" apertures
- High $I_{C(ON)}$

SCHEMATIC



1. Derate power dissipation linearly 1.67 mW/°C above 25°C.
2. RMA flux is recommended.
3. Methanol or isopropyl alcohols are recommended as cleaning agents.
4. Soldering iron tip 1/16" (1.6mm) minimum from housing.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Operating Temperature	T_{OPR}	-55 to +100	°C
Storage Temperature	T_{STG}	-55 to +100	°C
Soldering Temperature (Iron)(2,3 and 4)	T_{SOL-I}	240 for 5 sec	°C
Soldering Temperature (Flow)(2 and 3)	T_{SOL-F}	260 for 10 sec	°C
INPUT (EMITTER)			
Continuous Forward Current	I_F	50	mA
Reverse Voltage	V_R	6	V
Power Dissipation (1)	P_D	100	mW
OUTPUT (SENSOR)			
Collector to Emitter Voltage	V_{CEO}	30	V
Emitter to Collector Voltage	V_{ECO}	6	V
Collector Current	I_C	40	mA
Power Dissipation (T_C = 25°C)(1)	P_D	150	mW

© 2001 Fairchild Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL / OPTICAL CHARACTERISTICS (T_A =25°C)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SYMBOL	DEVICES	MIN	TYP	MAX	UNITS
INPUT (EMITTER) Forward Voltage	I_F = 60 mA	V_F	All	—	—	1.7	V
Reverse Breakdown Voltage	I_R = 10 µA	V_R	All	6.0	—	—	V
Reverse Leakage Current	V_R = 3 V	I_R	All	—	—	1.0	µA
OUTPUT (SENSOR) Emitter to Collector Breakdown	I_F = 100 µA, Ee = 0	BV_{ECO}	All	7.0	—	—	V
Collector to Emitter Breakdown	I_C = 1 mA, Ee = 0	BV_{CEO}	All	30	—	—	V
Collector to Emitter Leakage	V_{CE} = 25 V, Ee = 0	I_{CEO}	All	—	—	100	nA
COUPLED On-State Collector Current	I_F = 2 mA, V_{CE} = 1.5 V	$I_{C(ON)}$	H21B1	0.5	—	—	mA
			H21B2	1.0	—	—	
			H21B3	2.0	—	—	
	I_F = 5 mA, V_{CE} = 1.5 V		H21B1	2.5	—	—	
			H21B2	5.0	—	—	
			H21B3	10	—	—	
	I_F = 10 mA, V_{CE} = 1.5 V		H21B1	7.5	—	—	
			H21B2	14	—	—	
			H21B3	25	—	—	
Saturation Voltage	I_F = 10 mA, I_C = 1.8 mA	$V_{CE(SAT)}$	All	—	—	1.0	V
	I_F = 60 mA, I_C = 50 mA		H21B1/2	—	—	1.5	V
Turn-On Time	I_F = 10 mA, V_{CC} = 5 V, R_L = 750Ω	t_{on}	All	—	45	—	µs
	I_F = 60 mA, V_{CC} = 5 V, R_L = 75Ω		All	—	7	—	
Turn-Off Time	I_F = 10 mA, V_{CC} = 5 V, R_L = 750Ω	t_{off}	All	—	250	—	µs
	I_F = 60 mA, V_{CC} = 5 V, R_L = 75Ω		All	—	45	—	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 1. Output Current vs. Input Current

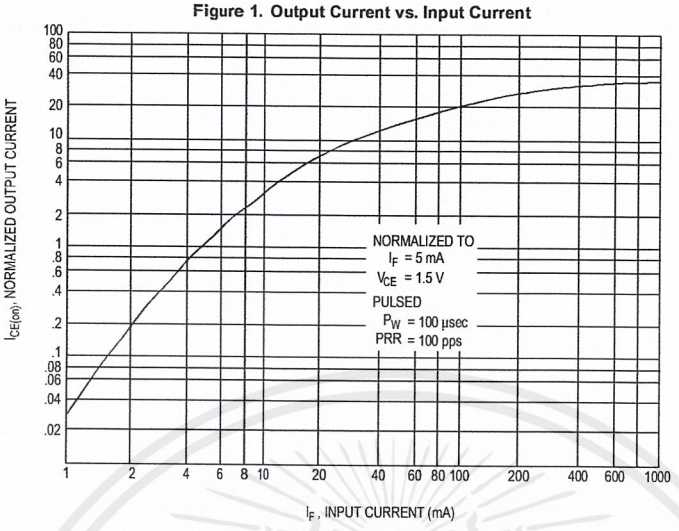


Figure 2. Output Current vs. Temperature

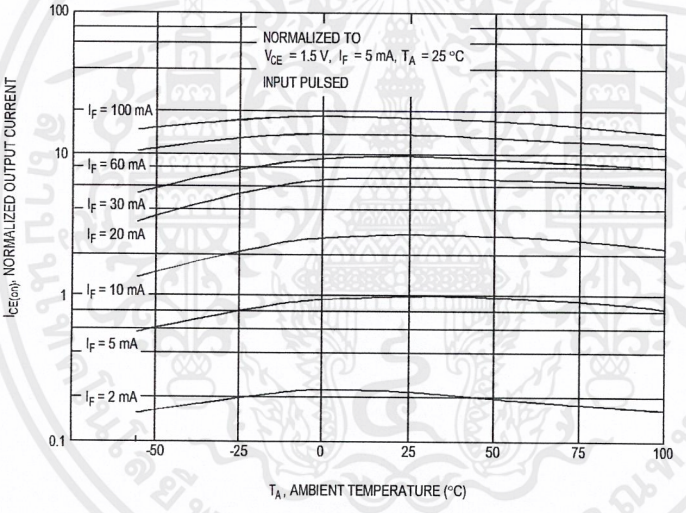
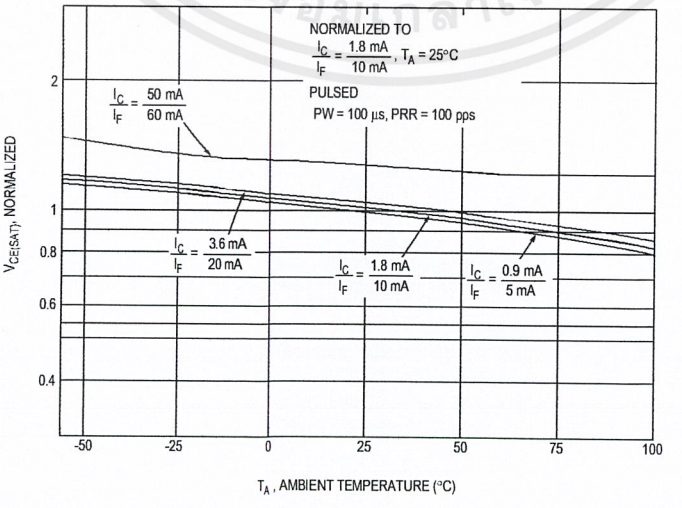


Figure 3. $V_{CE(SAT)}$ vs. Temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 4. Leakage Current vs. Temperature

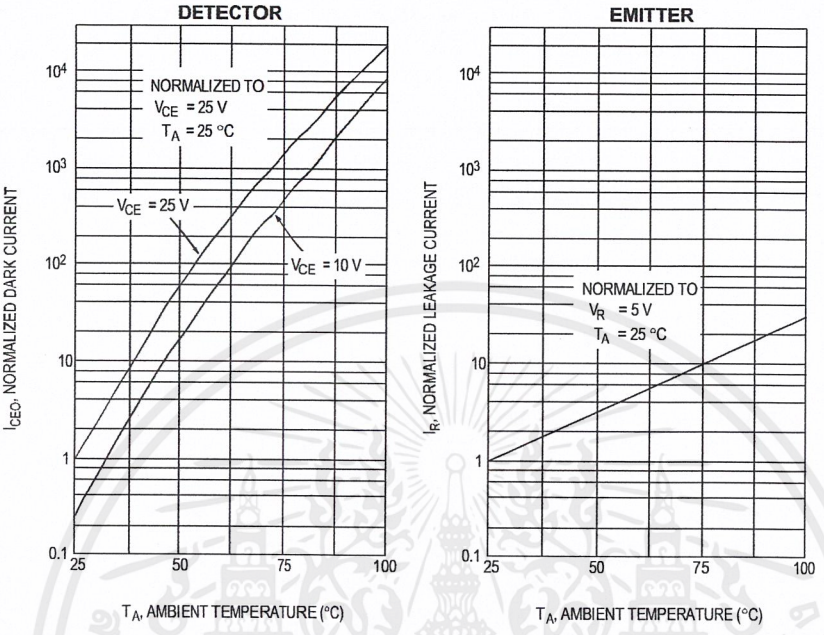


Figure 5. Switching Speed vs. RL

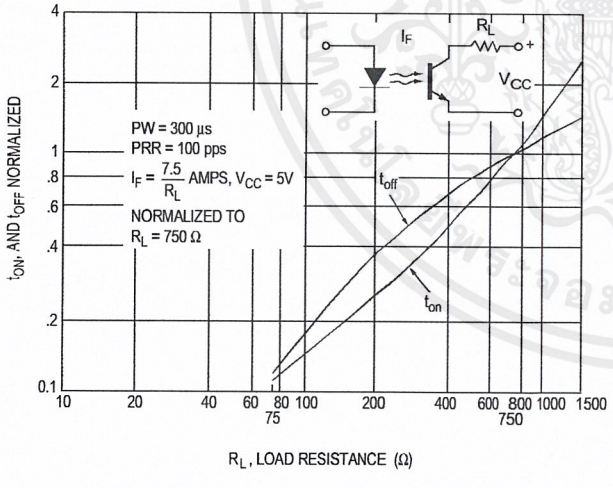
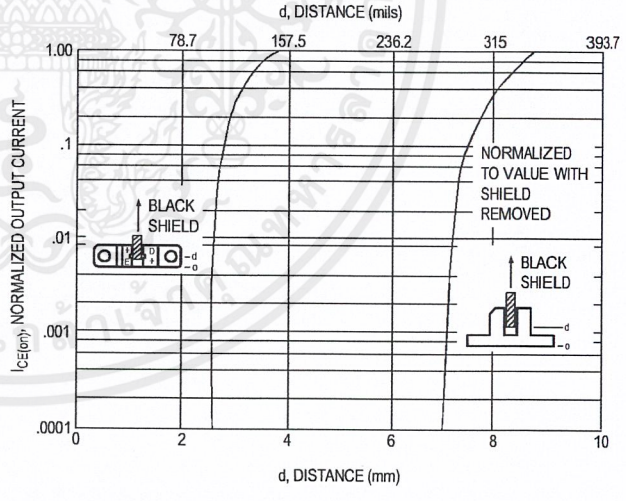


Figure 6. Output Current vs. Distance



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body,or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.

2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN74LS240, SN74LS244

Octal Buffer/Line Driver with 3-State Outputs

The SN74LS240 and SN74LS244 are Octal Buffers and Line Drivers designed to be employed as memory address drivers, clock drivers and bus-oriented transmitters/receivers which provide improved PC board density.

- Hysteresis at Inputs to Improve Noise Margins
- 3-State Outputs Drive Bus Lines or Buffer Memory Address Registers
- Input Clamp Diodes Limit High-Speed Termination Effects

ON Semiconductor

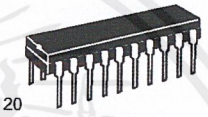
http://onsemi.com

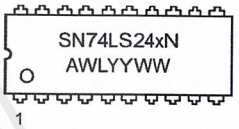
LOW POWER SCHOTTKY

GUARANTEED OPERATING RANGES

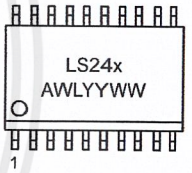
Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
V_{CC}	Supply Voltage	4.75	5.0	5.25	V
T_A	Operating Ambient Temperature Range	0	25	70	°C
I_{OH}	Output Current – High			–3.0	mA
				–15	mA
I_{OL}	Output Current – Low			24	mA

MARKING DIAGRAMS

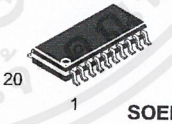


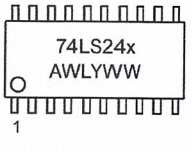


PDIP–20
N SUFFIX
CASE 738



SOIC–20
DW SUFFIX
CASE 751D





SOEIAJ–20
M SUFFIX
CASE 967

x = 0 or 4
A = Assembly Location
WL = Wafer Lot
YY = Year
WW = Work Week

ORDERING INFORMATION

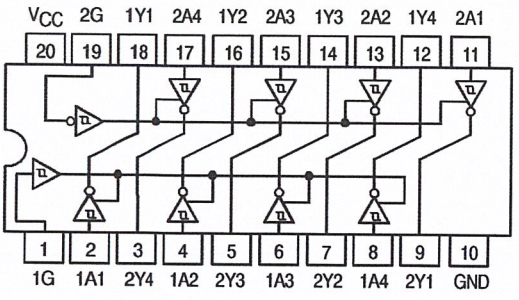
See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 5 of this data sheet.

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2001

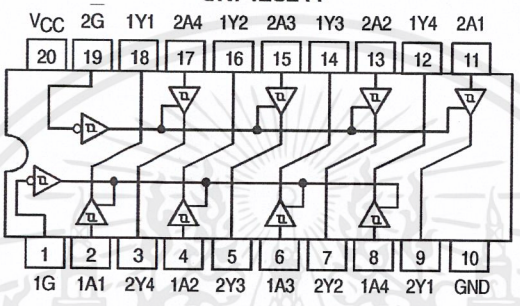
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOGIC AND CONNECTION DIAGRAMS DIP (TOP VIEW)

SN74LS240



SN74LS244



TRUTH TABLES

SN74LS240

INPUTS		OUTPUT
1G, 2G	D	
L	L	H
L	H	L
H	X	(Z)

SN74LS244

INPUTS		OUTPUT
1G, 2G	D	
L	L	L
L	H	H
H	X	(Z)

H = HIGH Voltage Level
L = LOW Voltage Level
X = Immaterial
Z = HIGH Impedance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC CHARACTERISTICS OVER OPERATING TEMPERATURE RANGE (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter		Limits Min	Typ	Max	Unit	Test Conditions	
V_{IH}	Input HIGH Voltage		2.0			V	Guaranteed Input HIGH Voltage for All Inputs	
V_{IL}	Input LOW Voltage				0.8	V	Guaranteed Input LOW Voltage for All Inputs	
$V_{T+}–V_{T–}$	Hysteresis		0.2	0.4		V	V_{CC} = MIN	
V_{IK}	Input Clamp Diode Voltage			–0.65	–1.5	V	V_{CC} = MIN, I_{IN} = –18 mA	
V_{OH}	Output HIGH Voltage		2.4	3.4		V	V_{CC} = MIN, I_{OH} = –3.0 mA	
			2.0			V	V_{CC} = MIN, I_{OH} = MAX	
V_{OL}	Output LOW Voltage			0.25	0.4	V	I_{OL} = 12 mA	V_{CC} = V_{CC} MIN, V_{IN} = V_{IL} or V_{IH} per Truth Table
				0.35	0.5	V	I_{OL} = 24 mA	
I_{OZH}	Output Off Current HIGH				20	μA	V_{CC} = MAX, V_{OUT} = 2.7 V	
I_{OZL}	Output Off Current LOW				–20	μA	V_{CC} = MAX, V_{OUT} = 0.4 V	
I_{IH}	Input HIGH Current				20	μA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 2.7 V	
					0.1	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 7.0 V	
I_{IL}	Input LOW Current				–0.2	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 0.4 V	
I_{OS}	Output Short Circuit Current (Note 1)		–40		–225	mA	V_{CC} = MAX	
I_{CC}	Power Supply Current Total, Output HIGH				27	mA	V_{CC} = MAX	
	Total, Output LOW	LS240			44			
		LS244			46			
	Total at HIGH Z	LS240			50			
		LS244			54			

1. Not more than one output should be shorted at a time, nor for more than 1 second.

AC CHARACTERISTICS (T_A = 25°C, V_{CC} = 5.0 V)

Symbol	Parameter	Limits Min	Typ	Max	Unit	Test Conditions
t_{PLH} t_{PHL}	Propagation Delay, Data to Output LS240		9.0 12	14 18	ns	C_L = 45 pF, R_L = 667 Ω
t_{PLH} t_{PHL}	Propagation Delay, Data to Output LS244		12 12	18 18	ns	
t_{PZH}	Output Enable Time to HIGH Level		15	23	ns	
t_{PZL}	Output Enable Time to LOW Level		20	30	ns	
t_{PLZ}	Output Disable Time from LOW Level		15	25	ns	C_L = 5.0 pF, R_L = 667 Ω
t_{PHZ}	Output Disable Time from HIGH Level		10	18	ns	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC WAVEFORMS

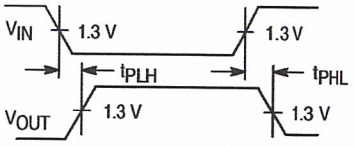


Figure 1.

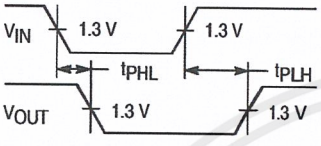
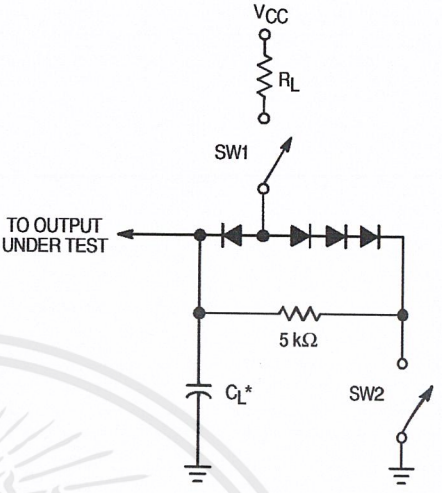


Figure 2.



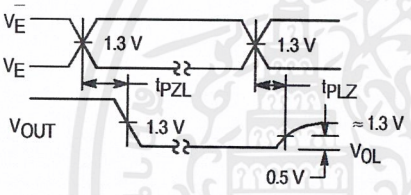


Figure 3.

SWITCH POSITIONS

SYMBOL	SW1	SW2
t_{PZH}	Open	Closed
t_{PZL}	Closed	Open
t_{PLZ}	Closed	Closed
t_{PHZ}	Closed	Closed

Figure 5.

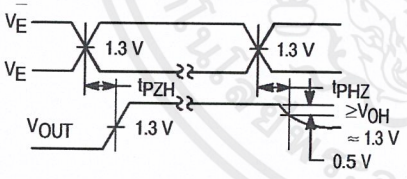


Figure 4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVICE ORDERING INFORMATION

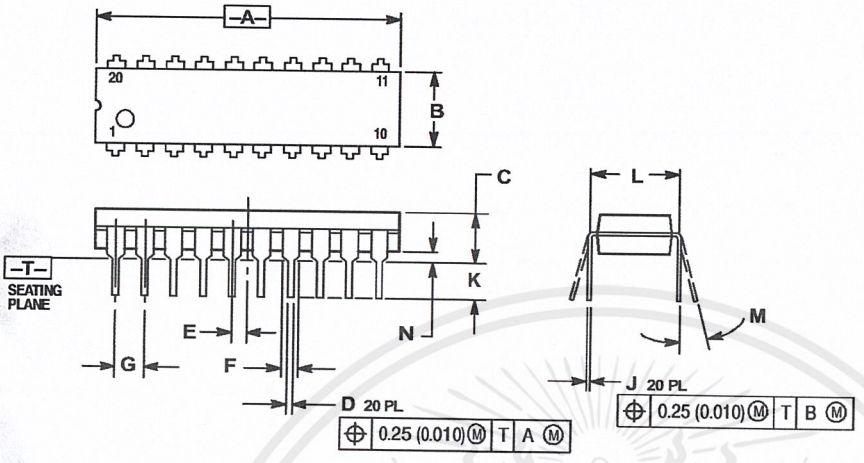
Device Order Number	Package Type	Tape and Reel Size
SN74LS240N	PDIP–20	1440 Units/Box
SN74LS240DW	SOIC–WIDE	38 Units/Rail
SN74LS240DWR2	SOIC–WIDE	2500/Tape and Reel
SN74LS240M	SOEIAJ–20	See Note 2
SN74LS240MEL	SOEIAJ–20	See Note 2
SN74LS244N	PDIP–20	1440 Units/Box
SN74LS244DW	SOIC–WIDE	38 Units/Rail
SN74LS244DWR2	SOIC–WIDE	2500/Tape and Reel
SN74LS244M	SOEIAJ–20	See Note 2
SN74LS244MEL	SOEIAJ–20	See Note 2

2. For ordering information on the EIAJ version of the SOIC package, please contact your local ON Semiconductor representative.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

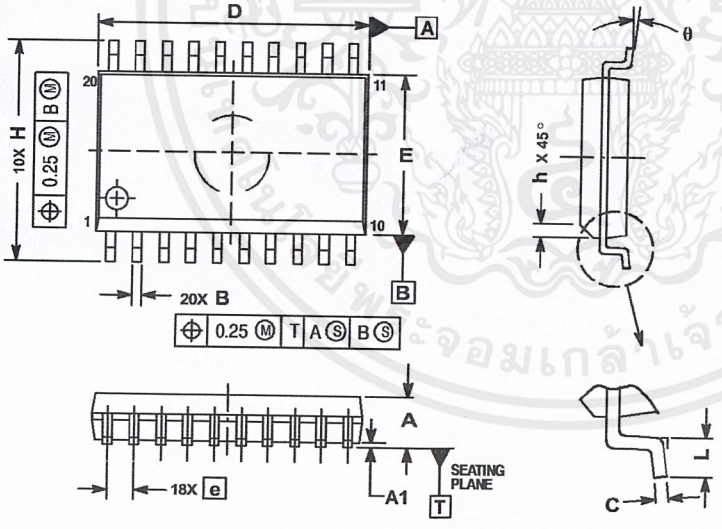
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 738–03
ISSUE E



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.010	1.070	25.66	27.17
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.150	0.180	3.81	4.57
D	0.015	0.022	0.39	0.55
E	0.050 BSC		1.27 BSC	
F	0.050	0.070	1.27	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.140	2.80	3.55
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	15°	0°	15°
N	0.020	0.040	0.51	1.01

D SUFFIX
PLASTIC SOIC PACKAGE
CASE 751D–05
ISSUE F



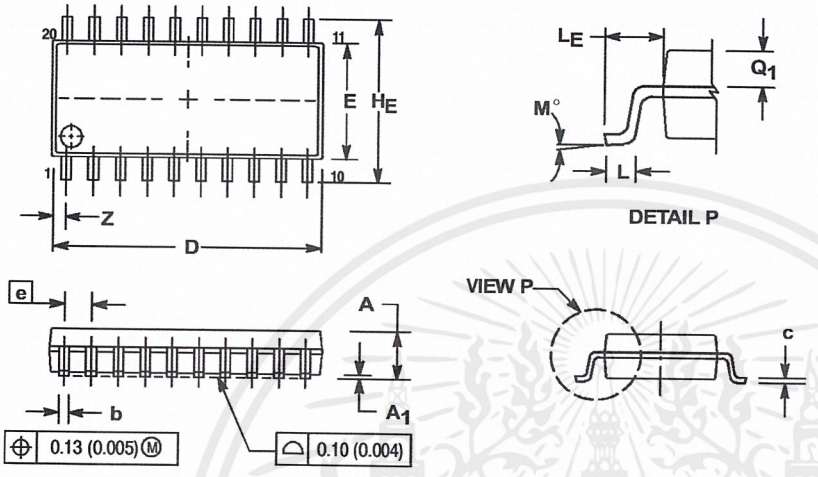
NOTES:
1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M, 1994.
3. DIMENSIONS D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.
5. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE PROTRUSION SHALL BE 0.13 TOTAL IN EXCESS OF B DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX
A	2.35	2.65
A1	0.10	0.25
B	0.35	0.49
C	0.23	0.32
D	12.65	12.95
E	7.40	7.60
e	1.27 BSC	
H	10.05	10.55
h	0.25	0.75
L	0.50	0.90
θ	0°	7°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

M SUFFIX
SOEIAJ PACKAGE
CASE 967–01
ISSUE O



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS D AND E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS AND ARE MEASURED AT THE PARTING LINE. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED 0.15 (0.006) PER SIDE.
4. TERMINAL NUMBERS ARE SHOWN FOR REFERENCE ONLY.
5. THE LEAD WIDTH DIMENSION (b) DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.08 (0.003) TOTAL IN EXCESS OF THE LEAD WIDTH DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION. DAMBAR CANNOT BE LOCATED ON THE LOWER RADIUS OR THE FOOT. MINIMUM SPACE BETWEEN PROTRUSIONS AND ADJACENT LEAD TO BE 0.46 (0.018).

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	—	2.05	—	0.081
A_1	0.05	0.20	0.002	0.008
b	0.35	0.50	0.014	0.020
c	0.18	0.27	0.007	0.011
D	12.35	12.80	0.486	0.504
E	5.10	5.45	0.201	0.215
e	1.27 BSC		0.050 BSC	
H_E	7.40	8.20	0.291	0.323
L	0.50	0.85	0.020	0.033
L_E	1.10	1.50	0.043	0.059
M	0°	10°	0°	10°
Q_1	0.70	0.90	0.028	0.035
Z	—	0.81	—	0.032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

Literature Fulfillment:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303–675–2175 or 800–344–3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303–675–2176 or 800–344–3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com

N. American Technical Support: 800–282–9855 Toll Free USA/Canada

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4–32–1 Nishi–Gotanda, Shinagawa–ku, Tokyo, Japan 141–0031
Phone: 81–3–5740–2700
Email: r14525@onsemi.com

ON Semiconductor Website: http://onsemi.com

For additional information, please contact your local Sales Representative.

SN74LS240/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SN74LS132

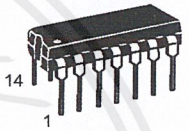
Quad 2-Input Schmitt Trigger NAND Gate

The SN74LS132 contains four 2-Input NAND Gates which accept standard TTL input signals and provide standard TTL output levels. They are capable of transforming slowly changing input signals into sharply defined, jitter-free output signals. Additionally, they have greater noise margin than conventional NAND Gates.

Each circuit contains a 2-input Schmitt trigger followed by a Darlington level shifter and a phase splitter driving a TTL totem pole output. The Schmitt trigger uses positive feedback to effectively speed-up slow input transitions, and provide different input threshold voltages for positive and negative-going transitions. This hysteresis between the positive-going and negative-going input thresholds (typically 800 mV) is determined internally by resistor ratios and is essentially insensitive to temperature and supply voltage variations. As long as one input remains at a more positive voltage than V_{T+} (MAX), the gate will respond to the transitions of the other input as shown in Figure 1.

ON Semiconductor
Formerly a Division of Motorola
http://onsemi.com

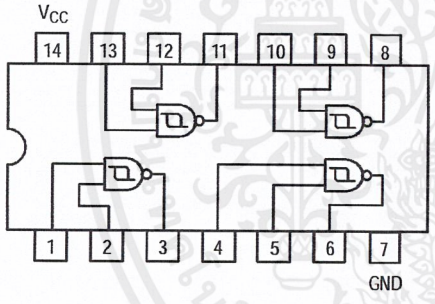
LOW POWER SCHOTTKY



PLASTIC
N SUFFIX
CASE 646

SOIC
D SUFFIX
CASE 751A

LOGIC AND CONNECTION DIAGRAM
DIP (TOP VIEW)



GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
V_{CC}	Supply Voltage	4.75	5.0	5.25	V
T_A	Operating Ambient Temperature Range	0	25	70	°C
I_{OH}	Output Current – High			–0.4	mA
I_{OL}	Output Current – Low			8.0	mA

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
SN74LS132N	14 Pin DIP	2000 Units/Box
SN74LS132D	14 Pin	2500/Tape & Reel

© Semiconductor Components Industries, LLC, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

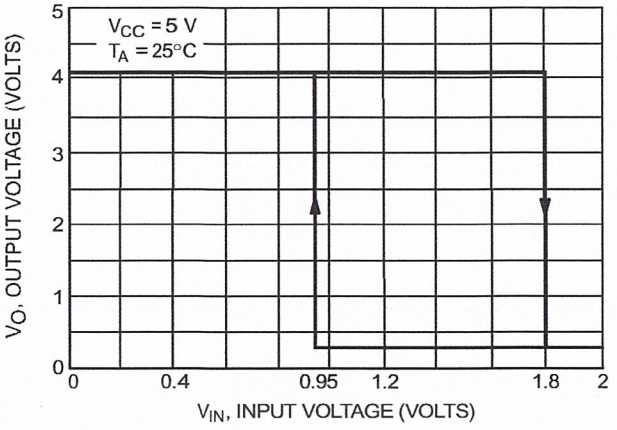


Figure 1. V_{IN} versus V_{OUT} Transfer Function

DC CHARACTERISTICS OVER OPERATING TEMPERATURE RANGE (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Limits			Unit	Test Conditions
		Min	Typ	Max		
V_{T+}	Positive-Going Threshold Voltage	1.5		2.0	V	V_{CC} = 5.0 V
V_{T-}	Negative-Going Threshold Voltage	0.6		1.1	V	V_{CC} = 5.0 V
$V_{T+} - V_{T-}$	Hysteresis	0.4	0.8		V	V_{CC} = 5.0 V
V_{IK}	Input Clamp Diode Voltage		−0.65	−1.5	V	V_{CC} = MIN, I_{IN} = −18 mA
V_{OH}	Output HIGH Voltage	2.7	3.4		V	V_{CC} = MIN, I_{OH} = −400 μA, V_{IN} = V_{IL}
V_{OL}	Output LOW Voltage		0.25	0.4	V	V_{CC} = MIN, I_{OL} = 4.0 mA, V_{IN} = 2.0 V
			0.35	0.5	V	V_{CC} = MIN, I_{OL} = 8.0 mA, V_{IN} = 2.0 V
I_{T+}	Input Current at Positive-Going Threshold		−0.14		mA	V_{CC} = 5.0 V, V_{IN} = V_{T+}
I_{T-}	Input Current at Negative-Going Threshold		−0.18		mA	V_{CC} = 5.0 V, V_{IN} = V_{T-}
I_{IH}	Input HIGH Current			20	μA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 2.7 V
				0.1	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 7.0 V
I_{IL}	Input LOW Current			−0.4	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 0.4 V
I_{OS}	Output Short Circuit Current (1)	−20		−100	mA	V_{CC} = MAX, V_{OUT} = 0 V
I_{CC}	Power Supply Current Total, Output HIGH		5.9	11	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 0 V
	Total, Output LOW		8.2	14	mA	V_{CC} = MAX, V_{IN} = 4.5 V

Note 1: Not more than one output should be shorted at a time, nor for more than 1 second.

AC CHARACTERISTICS (T_A = 25°C)

Symbol	Parameter	Limits			Unit	Test Conditions
		Min	Typ	Max		
t_{PLH}	Turn-Off Delay, Input to Output			22	ns	V_{CC} = 5.0 V C_L = 15 pF
t_{PHL}	Turn-On Delay, Input to Output			22	ns	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

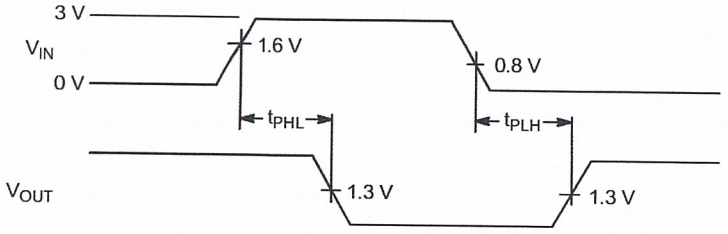


Figure 2. AC Waveforms

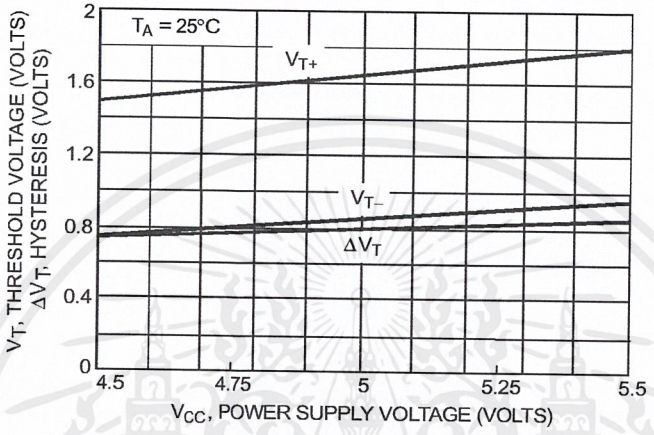


Figure 3. Threshold Voltage and Hysteresis versus Power Supply Voltage

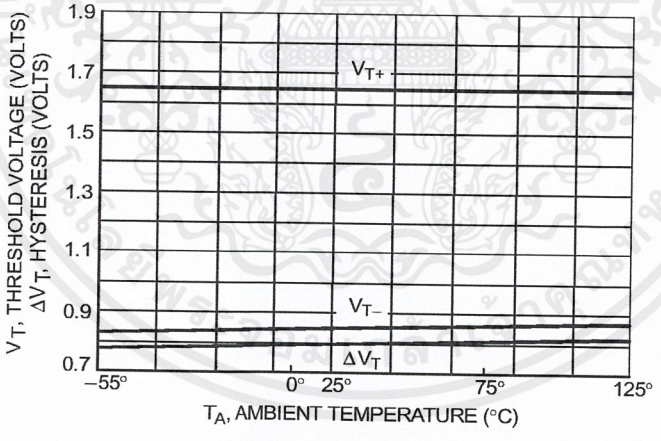
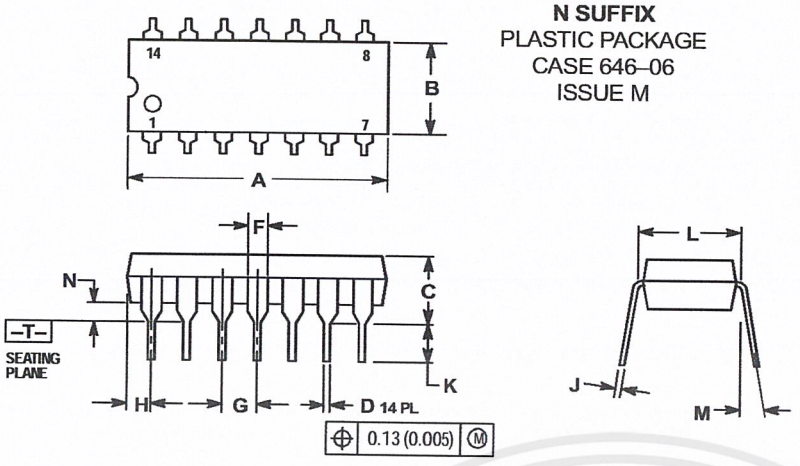


Figure 4. Threshold Voltage and Hysteresis versus Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

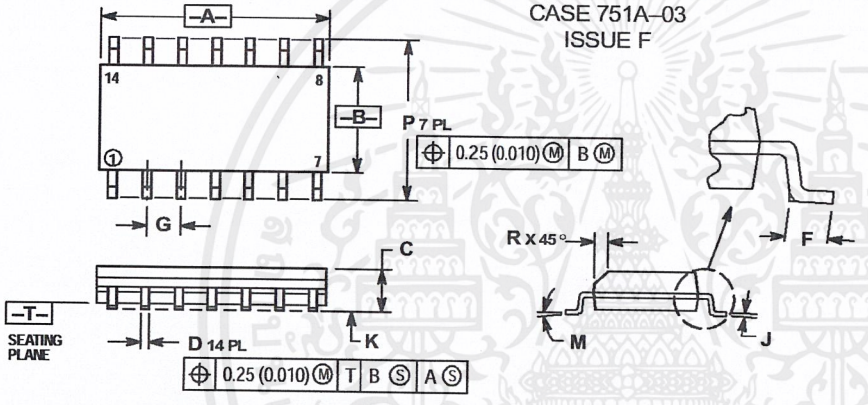
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646–06
ISSUE M



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.715	0.770	18.16	18.80
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.145	0.185	3.69	4.69
D	0.015	0.021	0.38	0.53
F	0.040	0.070	1.02	1.78
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.052	0.095	1.32	2.41
J	0.008	0.015	0.20	0.38
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.290	0.310	7.37	7.87
M	—	10°	—	10°
N	0.015	0.039	0.38	1.01

D SUFFIX
PLASTIC SOIC PACKAGE
CASE 751A–03
ISSUE F



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	8.55	8.75	0.337	0.344
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.228	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

ON Semiconductor and ON are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

North America Literature Fulfillment:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303–675–2175 or 800–344–3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303–675–2176 or 800–344–3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com

N. American Technical Support: 800–282–9855 Toll Free USA/Canada

EUROPE: LDC for ON Semiconductor – European Support
German Phone: (+1) 303–308–7140 (M–F 2:30pm to 5:00pm Munich Time)
Email: ONlit–german@hibbertco.com
French Phone: (+1) 303–308–7141 (M–F 2:30pm to 5:00pm Toulouse Time)
Email: ONlit–french@hibbertco.com
English Phone: (+1) 303–308–7142 (M–F 1:30pm to 5:00pm UK Time)
Email: ONlit@hibbertco.com

ASIA/PACIFIC: LDC for ON Semiconductor – Asia Support
Phone: 303–675–2121 (Tue–Fri 9:00am to 1:00pm, Hong Kong Time)
Toll Free from Hong Kong 800–4422–3781
Email: ONlit–asia@hibbertco.com

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4–32–1 Nishi–Gotanda, Shinagawa–ku, Tokyo, Japan 141–8549
Phone: 81–3–5487–8345
Email: r14153@onsemi.com

Fax Response Line: 303–675–2167
800–344–3810 Toll Free USA/Canada

ON Semiconductor Website: http://onsemi.com

For additional information, please contact your local Sales Representative.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GlobalOptoisolator™

VDE	UL	CSA	SETI	SEMKO	DEMKO	NEMKO	BABT

6-Pin DIP Optoisolators Transistor Output

4N25*
4N25A*
4N26*
[CTR = 20% Min]
4N27
4N28
[CTR = 10% Min]
*Motorola Preferred Devices

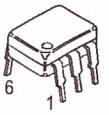
The 4N25/A, 4N26, 4N27 and 4N28 devices consist of a gallium arsenide infrared emitting diode optically coupled to a monolithic silicon phototransistor detector.

- Most Economical Optoisolator Choice for Medium Speed, Switching Applications
- Meets or Exceeds All JEDEC Registered Specifications
- ***To order devices that are tested and marked per VDE 0884 requirements, the suffix "V" must be included at end of part number. VDE 0884 is a test option.***

Applications

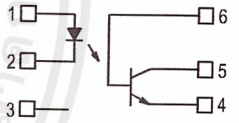
- General Purpose Switching Circuits
- Interfacing and coupling systems of different potentials and impedances
- I/O Interfacing
- Solid State Relays

STYLE 1 PLASTIC



STANDARD THRU HOLE
CASE 730A–04

SCHEMATIC



PIN 1. LED ANODE
2. LED CATHODE
3. N.C.
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
INPUT LED			
Reverse Voltage	V_R	3	Volts
Forward Current — Continuous	I_F	60	mA
LED Power Dissipation @ T_A = 25°C with Negligible Power in Output Detector	P_D	120	mW
Derate above 25°C		1.41	mW/°C
OUTPUT TRANSISTOR			
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	30	Volts
Emitter–Collector Voltage	V_{ECO}	7	Volts
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	70	Volts
Collector Current — Continuous	I_C	150	mA
Detector Power Dissipation @ T_A = 25°C with Negligible Power in Input LED	P_D	150	mW
Derate above 25°C		1.76	mW/°C
TOTAL DEVICE			
Isolation Surge Voltage(1) (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 sec Duration)	V_{ISO}	7500	Vac(pk)
Total Device Power Dissipation @ T_A = 25°C	P_D	250	mW
Derate above 25°C		2.94	mW/°C
Ambient Operating Temperature Range(2)	T_A	–55 to +100	°C
Storage Temperature Range(2)	T_{stg}	–55 to +150	°C
Soldering Temperature (10 sec, 1/16″ from case)	T_L	260	°C

1. Isolation surge voltage is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.
2. Refer to Quality and Reliability Section in Opto Data Book for information on test conditions.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.
GlobalOptoisolator is a trademark of Motorola, Inc.

© Motorola, Inc. 1995

MOTOROLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)(1)

Characteristic		Symbol	Min	Typ(1)	Max	Unit
INPUT LED						
Forward Voltage (I_F = 10 mA)	T_A = 25°C T_A = –55°C T_A = 100°C	V_F	— — —	1.15 1.3 1.05	1.5 — —	Volts
Reverse Leakage Current (V_R = 3 V)		I_R	—	—	100	µA
Capacitance (V = 0 V, f = 1 MHz)		C_J	—	18	—	pF
OUTPUT TRANSISTOR						
Collector–Emitter Dark Current (V_{CE} = 10 V, T_A = 25°C	4N25,25A,26,27 4N28	I_{CEO}	— —	1 1	50 100	nA
(V_{CE} = 10 V, T_A = 100°C)	All Devices	I_{CEO}	—	1	—	µA
Collector–Base Dark Current (V_{CB} = 10 V)		I_{CBO}	—	0.2	—	nA
Collector–Emitter Breakdown Voltage (I_C = 1 mA)		$V_{(BR)CEO}$	30	45	—	Volts
Collector–Base Breakdown Voltage (I_C = 100 µA)		$V_{(BR)CBO}$	70	100	—	Volts
Emitter–Collector Breakdown Voltage (I_E = 100 µA)		$V_{(BR)ECO}$	7	7.8	—	Volts
DC Current Gain (I_C = 2 mA, V_{CE} = 5 V)		h_{FE}	—	500	—	—
Collector–Emitter Capacitance (f = 1 MHz, V_{CE} = 0)		C_{CE}	—	7	—	pF
Collector–Base Capacitance (f = 1 MHz, V_{CB} = 0)		C_{CB}	—	19	—	pF
Emitter–Base Capacitance (f = 1 MHz, V_{EB} = 0)		C_{EB}	—	9	—	pF
COUPLED						
Output Collector Current (I_F = 10 mA, V_{CE} = 10 V)	4N25,25A,26 4N27,28	I_C (CTR)(2)	2 (20) 1 (10)	7 (70) 5 (50)	— —	mA (%)
Collector–Emitter Saturation Voltage (I_C = 2 mA, I_F = 50 mA)		$V_{CE(sat)}$	—	0.15	0.5	Volts
Turn–On Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_{on}	—	2.8	—	µs
Turn–Off Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_{off}	—	4.5	—	µs
Rise Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_r	—	1.2	—	µs
Fall Time (I_F = 10 mA, V_{CC} = 10 V, R_L = 100 Ω)(3)		t_f	—	1.3	—	µs
Isolation Voltage (f = 60 Hz, t = 1 sec)(4)		V_{ISO}	7500	—	—	Vac(pk)
Isolation Resistance (V = 500 V)(4)		R_{ISO}	10^{11}	—	—	Ω
Isolation Capacitance (V = 0 V, f = 1 MHz)(4)		C_{ISO}	—	0.2	—	pF

1. Always design to the specified minimum/maximum electrical limits (where applicable).
2. Current Transfer Ratio (CTR) = I_C/I_F x 100%.
3. For test circuit setup and waveforms, refer to Figure 11.
4. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS

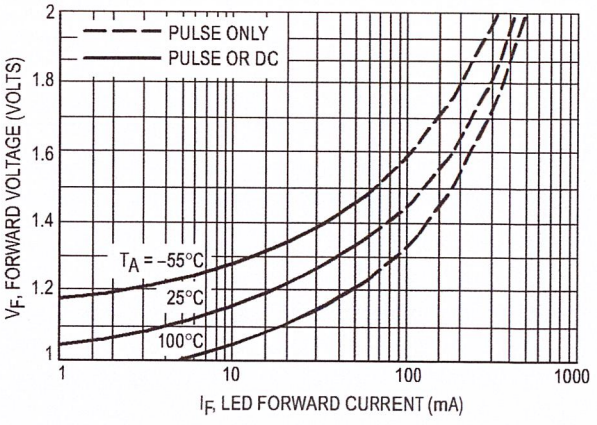


Figure 1. LED Forward Voltage versus Forward Current

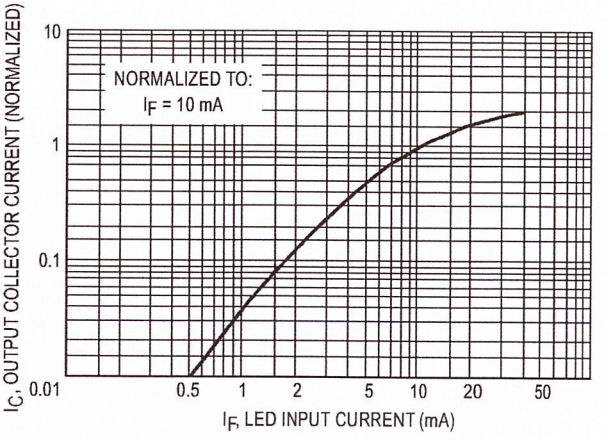


Figure 2. Output Current versus Input Current

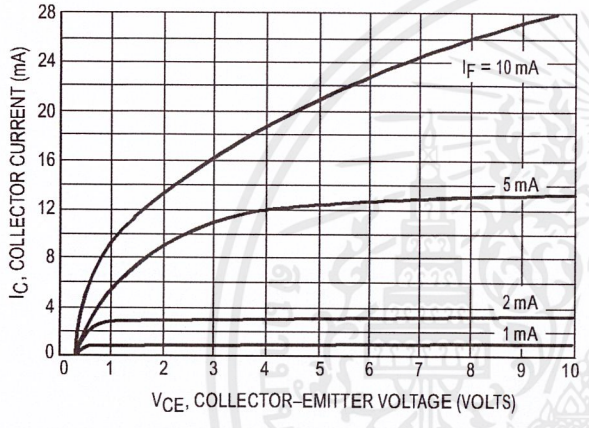


Figure 3. Collector Current versus Collector–Emitter Voltage

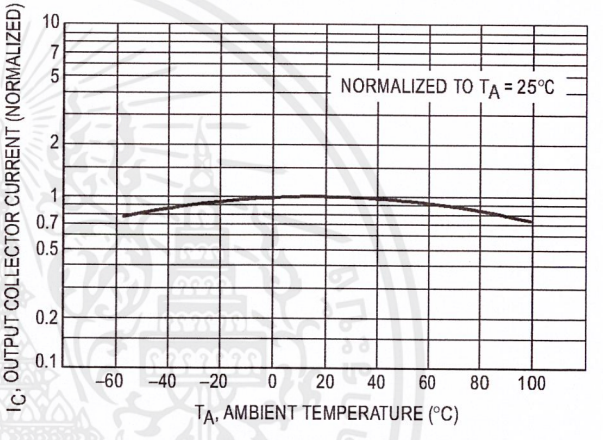


Figure 4. Output Current versus Ambient Temperature

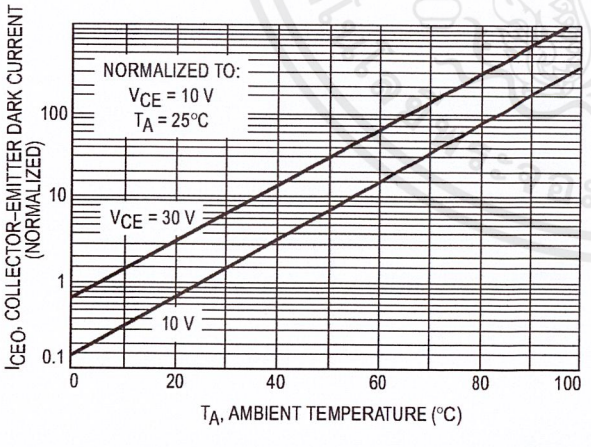


Figure 5. Dark Current versus Ambient Temperature

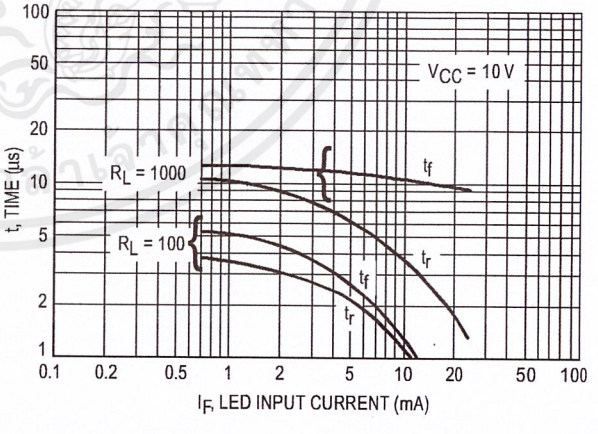


Figure 6. Rise and Fall Times (Typical Values)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

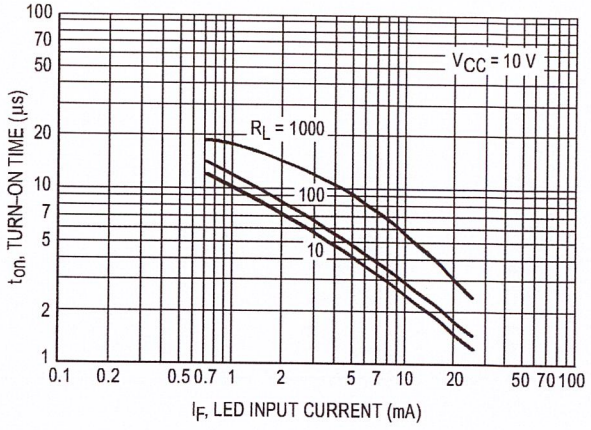


Figure 7. Turn–On Switching Times (Typical Values)

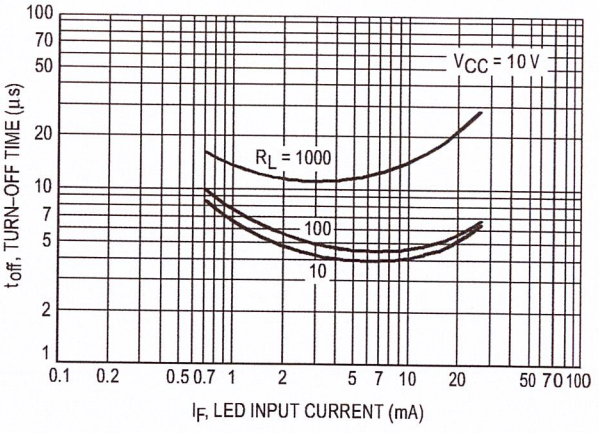


Figure 8. Turn–Off Switching Times (Typical Values)

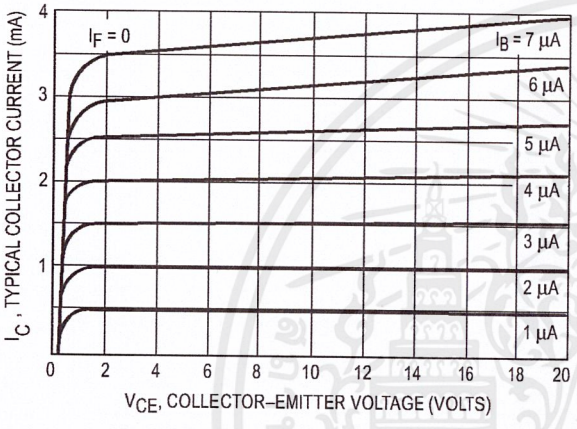


Figure 9. DC Current Gain (Detector Only)

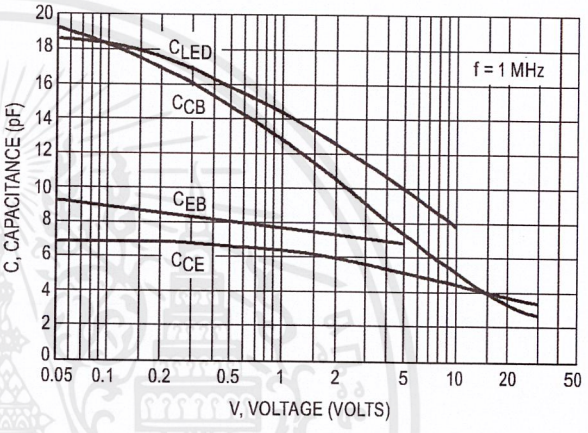


Figure 10. Capacitances versus Voltage

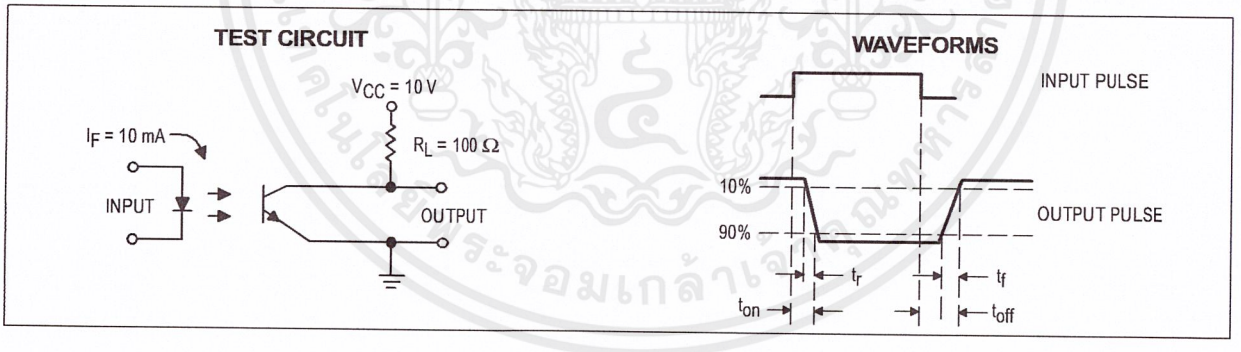
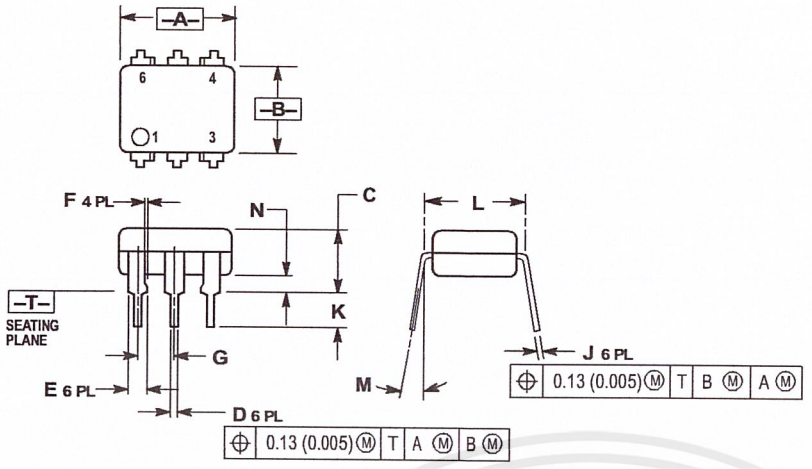


Figure 11. Switching Time Test Circuit and Waveforms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS

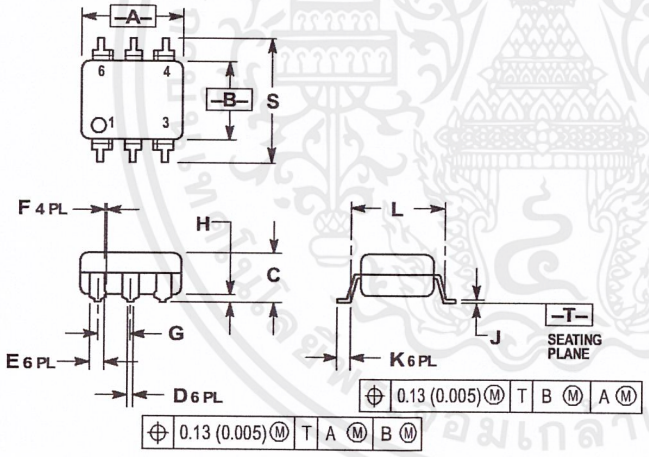


NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.320	0.350	8.13	8.89
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.115	0.200	2.93	5.08
D	0.016	0.020	0.41	0.50
E	0.040	0.070	1.02	1.77
F	0.010	0.014	0.25	0.36
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.008	0.012	0.21	0.30
K	0.100	0.150	2.54	3.81
L	0.300 BSC		7.62 BSC	
M	0°	15°	0°	15°
N	0.015	0.100	0.38	2.54

STYLE 1:
PIN 1. ANODE
2. CATHODE
3. NC
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

CASE 730A–04
ISSUE G



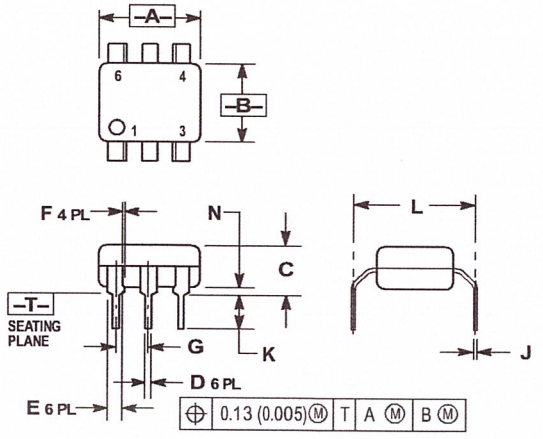
NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.320	0.350	8.13	8.89
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.115	0.200	2.93	5.08
D	0.016	0.020	0.41	0.50
E	0.040	0.070	1.02	1.77
F	0.010	0.014	0.25	0.36
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.020	0.025	0.51	0.63
J	0.008	0.012	0.20	0.30
K	0.006	0.035	0.16	0.88
L	0.320 BSC		8.13 BSC	
S	0.332	0.390	8.43	9.90

***Consult factory for leadform option availability**

CASE 730C–04
ISSUE D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.320	0.350	8.13	8.89
B	0.240	0.260	6.10	6.60
C	0.115	0.200	2.93	5.08
D	0.016	0.020	0.41	0.50
E	0.040	0.070	1.02	1.77
F	0.010	0.014	0.25	0.36
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.008	0.012	0.21	0.30
K	0.100	0.150	2.54	3.81
L	0.400	0.425	10.16	10.80
N	0.015	0.040	0.38	1.02

***Consult factory for leadform option availability**

CASE 730D–05
ISSUE D

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters can and do vary in different applications. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and Ⓜ are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:
USA / EUROPE: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1–800–441–2447

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE (602) 244–6609
INTERNET: http://Design–NET.com

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi–SPD–JLDC, Toshikatsu Otsuki,
6F Seibu–Butsuryu–Center, 3–14–2 Tatsumi Koto–Ku, Tokyo 135, Japan. 03–3521–8315

HONG KONG: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852–26629298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Order this document by SN75173/D

MOTOROLA

SN75173
SN75175

Quad EIA-485 Line Receivers

The Motorola SN75173/175 are monolithic quad differential line receivers with three–state outputs. They are designed specifically to meet the requirements of EIA–485, EIA–422A/23A Standards and CCITT recommendations.

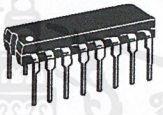
The devices are optimized for balanced multipoint bus transmission at rates up to 10 megabits per second. They also feature high input impedance, input hysteresis for increased noise immunity, and input sensitivity of ±200 mV over a common mode input voltage range of –12 V to 12 V. The SN75173/175 are designed for optimum performance when used with the SN75172 or SN75174 quad differential line drivers.

- Meets EIA Standards EIA–422A and EIA–423A, EIA–485
- Meets CCITT Recommendations V.10, V.11, X.26, and X.27
- Designed for Multipoint Transmission on Long Bus Lines in Noisy Environments
- 3–State Outputs
- Common–Mode Input Voltage Range . . . –12 V to 12 V
- Input Sensitivity . . . ±200 mV
- Input Hysteresis . . . 50 mV Typ
- High Input Impedance . . . 1 EIA–485 Unit Load
- Operates from Single 5.0 V Supply
- Lower Power Requirements
- Plug–In Replacement for MC3486 (SN75175) AM26LS32 (SN75173)

QUAD EIA–485 LINE RECEIVERS WITH THREE–STATE OUTPUTS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

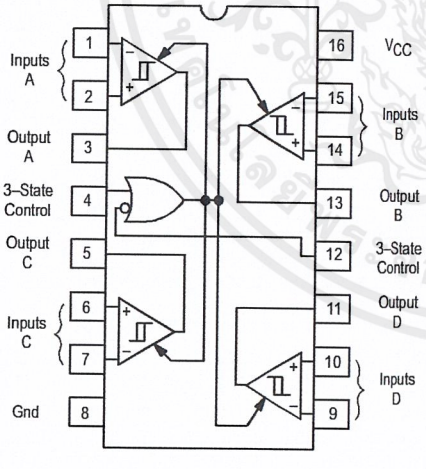
D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751B
(SO–16)



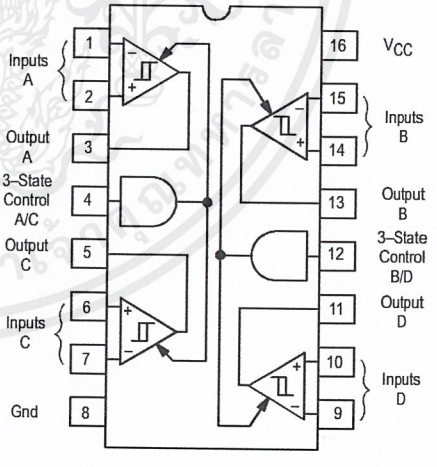
N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

PIN CONNECTIONS

SN75173



SN75175



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
SN75173N	T_A = 0 to +70°C	Plastic DIP

ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
SN75175N	T_A = 0 to +70°C	Plastic DIP
SN75175D		SO–16

© Motorola, Inc. 1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	Vdc
Input Common Mode Voltage	V_{ICM}	±25	Vdc
Input Differential Voltage	V_{ID}	±25	Vdc
Three–State Control Input Voltage	V_I	7.0	Vdc
Output Sink Current	I_O	50	mA
Storage Temperature	T_{stg}	–65 to +150	°C
Operating Junction Temperature	T_J	+150	°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	4.75 to 5.25	Vdc
Operating Ambient Temperature	T_A	0 to +70	°C
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICM}	–12 to +12	Vdc
Input Differential Voltage Range	V_{IDR}	–12 to +12	Vdc

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Unless otherwise noted, minimum and maximum limits apply over recommended temperature and power supply voltage ranges. Typical values are for T_A = 25°C, V_{CC} = 5.0 V, and V_{ICM} = 0 V, Note 1).

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Differential Input Threshold Voltage (Note 2) (–12 V ≤ V_{ICM} ≤ 12 V, V_{IH} = 2.0 V) (I_O = –0.4 mA, V_{OH} ≥ 2.7 V) (I_O = 16 mA, V_{OL} ≤ 0.5 V)	$V_{TH(D)}$	 – –	 – –	 0.2 –0.2	V
Input Hysteresis	$V_{T+} - V_{T–}$	–	50	–	mV
Input Line Current (Differential Inputs) (Unmeasured Input at 0 V, Note 3) (V_I = 12 V) (V_I = –7.0 V)	I_I	 – –	 – –	 1.0 –0.8	mA
Input Resistance (Note 4)	r_i	1 Unit Load	–	–	
Input Balance and Output Level (Note 3) (–12 V ≤ V_{ICM} ≤ 12 V, V_{IH} = 2.0 V) (I_O = –0.4 mA, V_{ID} = 0.2 V) (I_O = 8.0 mA, V_{ID} = –0.2 V) (I_O = 16 mA, V_{ID} = –0.2 V)	 V_{OH} V_{OL} V_{OL}	 2.7 – –	 – – –	 – 0.45 0.5	V
Input Voltage – High Logic State (Three–State Control)	V_{IH}	2.0	–	–	V
Input Voltage – Low Logic State (Three–State Control)	V_{IL}	–	–	0.8	V
Input Current – High Logic State (Three–State Control) (V_{IH} = 2.7 V) (V_{IH} = 5.5 V)	I_{IH}	 – –	 – –	 20 100	µA
Input Current – Low Logic State (Three–State Control) (V_{IL} = 0.4 V)	I_{IL}	–	–	–100	µA
Input Clamp Diode Voltage (Three–State Control) (I_{IK} = –18 mA)	V_{IK}	–	–	–1.5	V
Output Third State Leakage Current ($V_{I(D)}$ = 3.0 V, V_{IL} = 0.8 V, V_O = 0.4 V) ($V_{I(D)}$ = –3.0 V, V_{IL} = 0.8 V, V_O = 2.4 V)	I_{OZ}	 – –	 – –	 –20 20	µA
Output Short–Circuit Current (Note 5) ($V_{I(D)}$ = 3.0 V, V_{IH} = 2.0 V, V_O = 0 V)	I_{OS}	–15	–	–85	mA
Power Supply Current (V_{IL} = 0 V) (All Inputs Grounded)	I_{CC}	–	–	70	mA

NOTES: 1. All currents into device pins are shown as positive, out of device pins are negative. All voltages referenced to ground unless otherwise noted.
2. Differential input threshold voltage and guaranteed output levels are done simultaneously for worst case.
3. Refer to EIA–485 for exact conditions. Input balance and guaranteed output levels are done simultaneously for worst case.
4. Input resistance should be derived from input line current specifications and is shown for reference only. See EIA–485 and input line current specifications for more specific input resistance information.
5. Only one output at a time should be shorted.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWITCHING CHARACTERISTICS (Unless otherwise noted, V_{CC} = 5.0 V and T_A = 25°C)

Characteristic	Symbol	SN75173			SN75175			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Propagation Delay Time – Differential Inputs to Output								ns
Output High to Low	$t_{PHL(D)}$	–	25	35	–	25	35	
Output Low to High	$t_{PLH(D)}$	–	25	35	–	25	35	
Propagation Delay Time – Three–State Control to Output								ns
Output Low to Third State	t_{PLZ}	–	20	40	–	16	35	
Output High to Third State	t_{PHZ}	–	20	30	–	19	35	
Output Third State to High	t_{PZH}	–	16	22	–	11	30	
Output Third State to Low	t_{PZL}	–	16	25	–	11	30	

SN75173
FUNCTION TABLE (EACH RECEIVER)

Differential Inputs	3–State Control		Output Y
	4	12	
$V_{ID} \geq 0.2$ V	H	X	H
	X	L	H
$-0.2 < V_{ID} < 0.2$ V	H	X	?
	X	L	?
$V_{ID} \leq -0.2$ V	H	X	L
	X	L	L
X	L	H	Z

SN75175
FUNCTION TABLE (EACH RECEIVER)

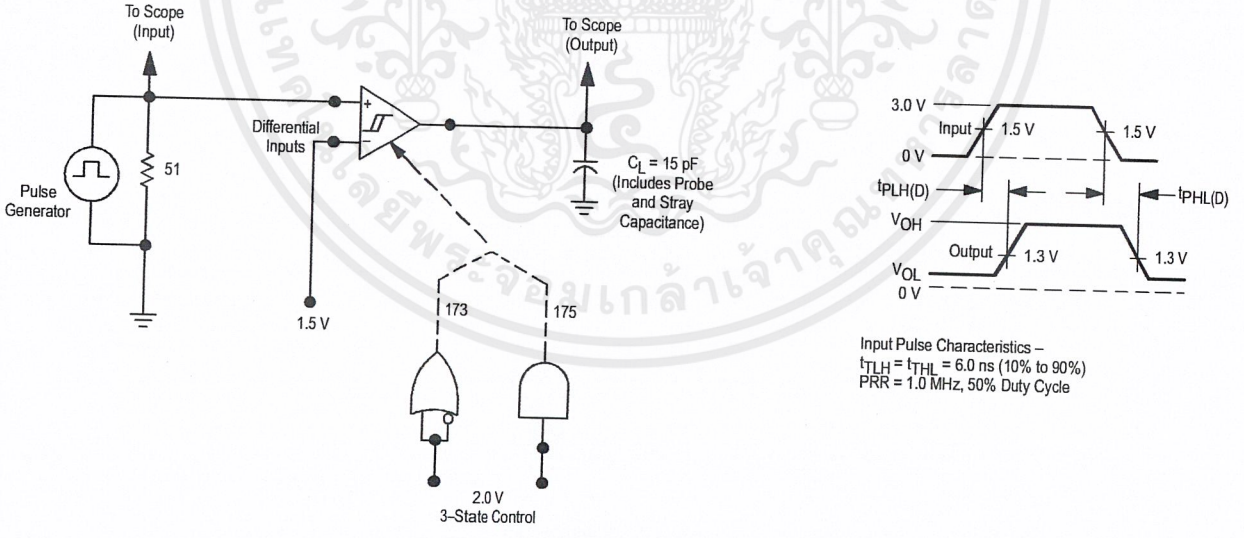
Differential Inputs	3–State Control	Output Y
$V_{ID} \geq 2.0$ V	H	H
-0.2 V $< V_{ID} < 0.2$ V	H	?
$V_{ID} \leq -0.2$ V	H	L
X	L	Z

H = high level
L = low level
X = irrelevant

? = indeterminate
Z = high–impedance (off)

SWITCHING TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS

Figure 1. Propagation Delay, Differential Input to Output

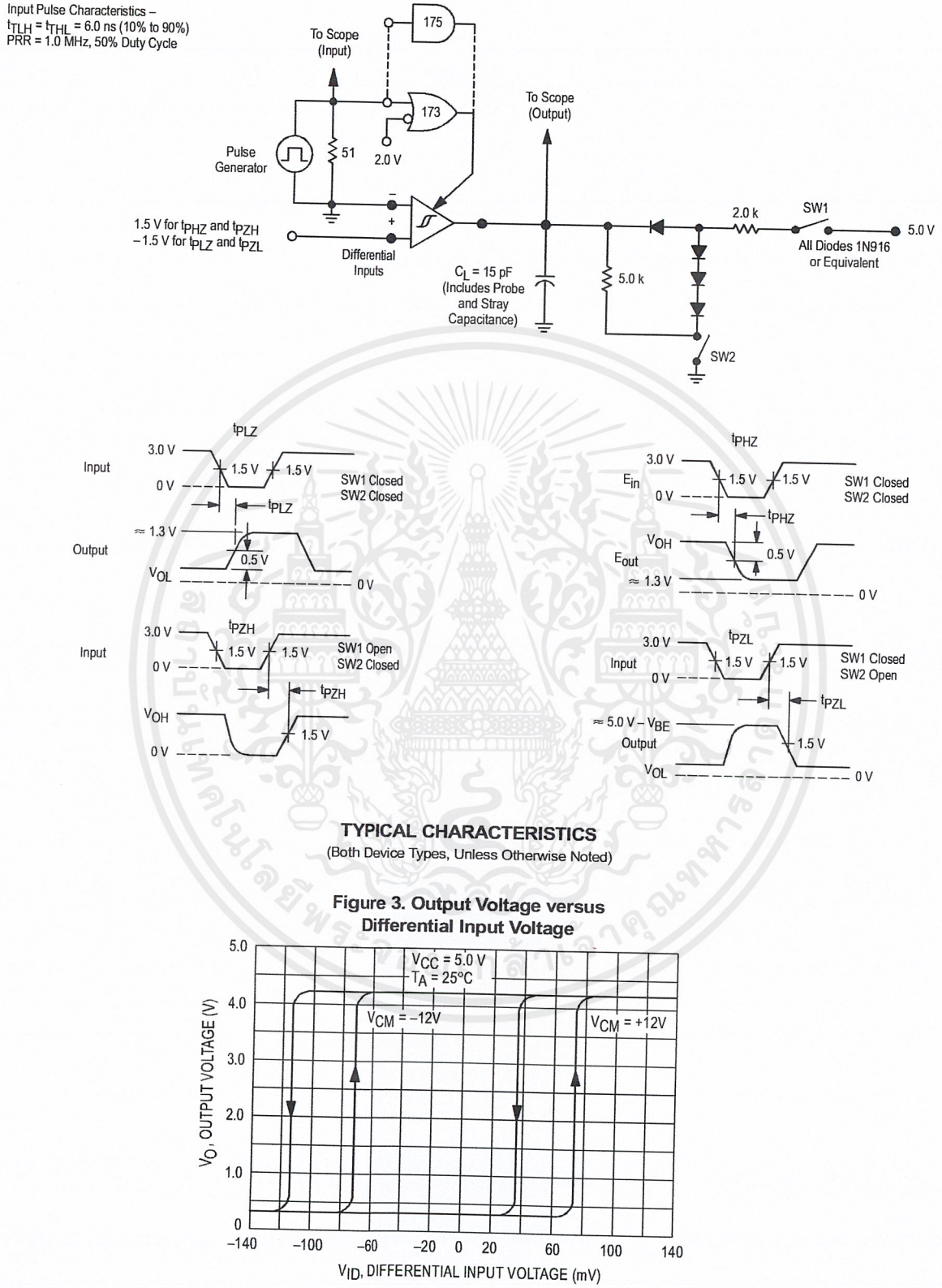


Input Pulse Characteristics –
$t_{TLH} = t_{THL}$ = 6.0 ns (10% to 90%)
PRR = 1.0 MHz, 50% Duty Cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWITCHING TEST CIRCUIT AND WAVEFORMS (continued)

Figure 2. Propagation Delay, Three–State Control Input to Output



TYPICAL CHARACTERISTICS

(Both Device Types, Unless Otherwise Noted)

Figure 3. Output Voltage versus Differential Input Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS (continued)

Figure 4. Output Voltage versus 3–State Control Voltage

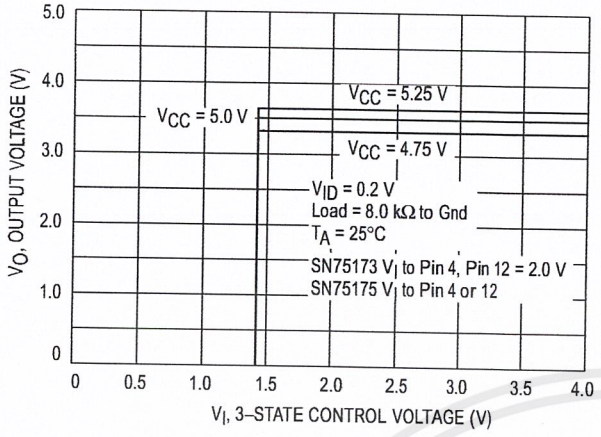


Figure 5. Output Voltage versus (Inverted) 3–State Control Voltage – SN75173

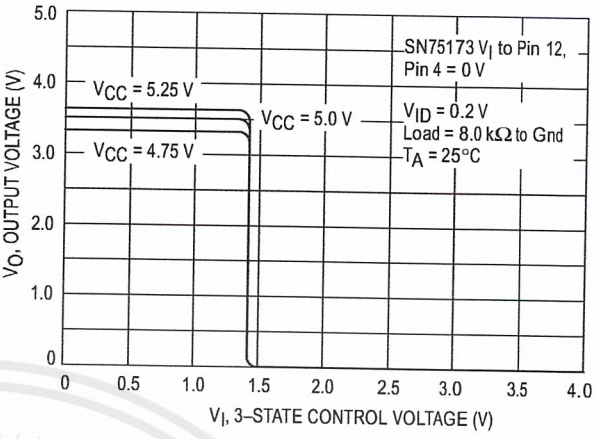


Figure 6. High Level Output Voltage versus Output Current

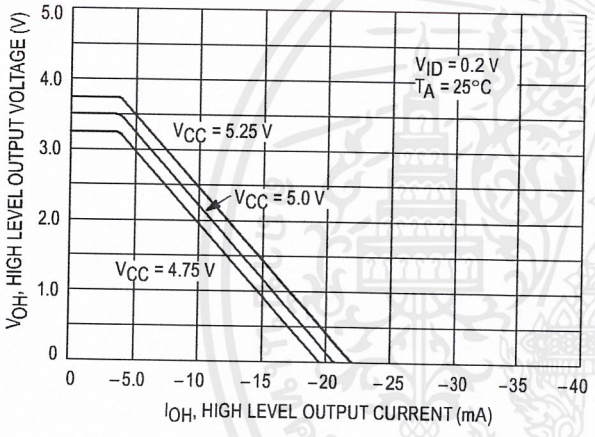


Figure 7. Low Level Output Voltage versus Output Current

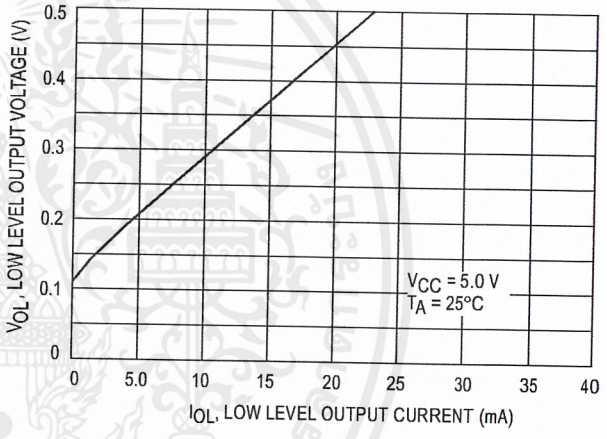


Figure 8. High Level Output Voltage versus Temperature

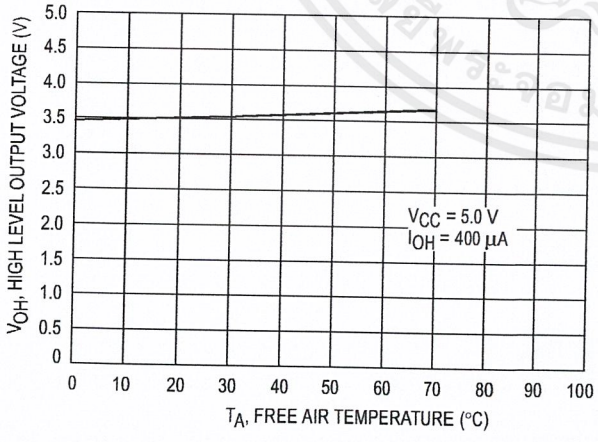
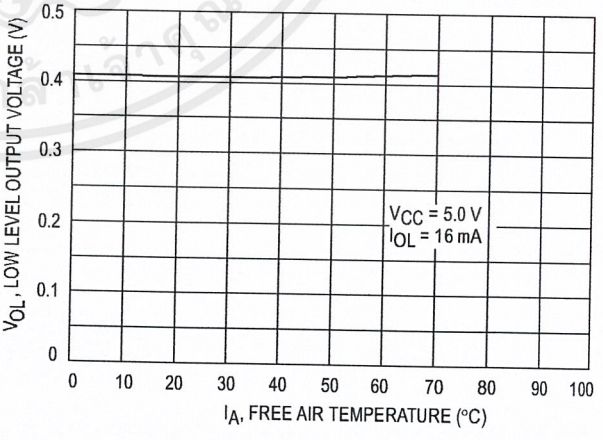


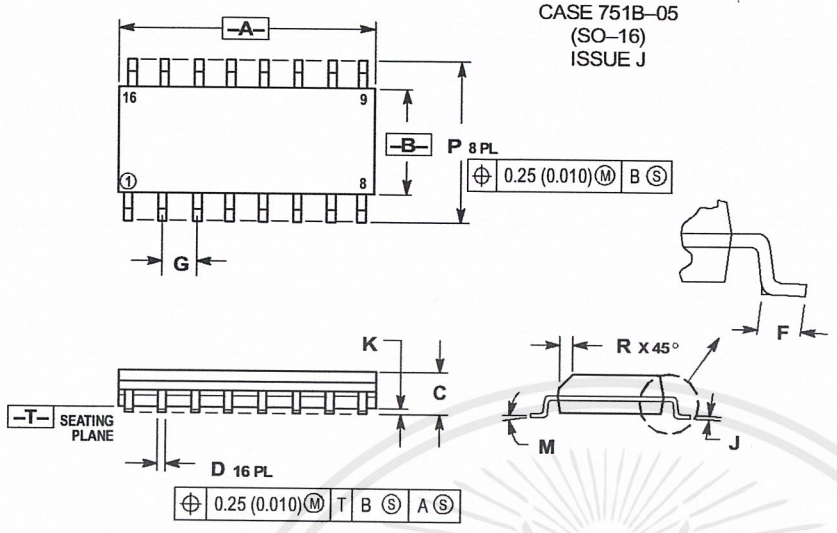
Figure 9. Low Level Output Voltage versus Temperature



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

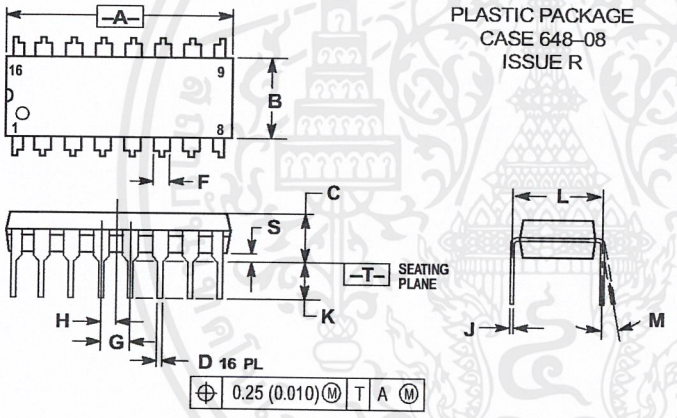
D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751B–05
(SO–16)
ISSUE J



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS		INCHES	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.80	10.00	0.386	0.393
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.054	0.068
D	0.35	0.49	0.014	0.019
F	0.40	1.25	0.016	0.049
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
J	0.19	0.25	0.008	0.009
K	0.10	0.25	0.004	0.009
M	0°	7°	0°	7°
P	5.80	6.20	0.229	0.244
R	0.25	0.50	0.010	0.019

N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648–08
ISSUE R



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN FORMED PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.295	0.305	7.50	7.74
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters can and do vary in different applications. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and M are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:
USA / EUROPE: Motorola Literature Distribution;
P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1–800–441–2447

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com – TOUCHTONE (602) 244–6609
INTERNET: http://Design–NET.com

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi–SPD–JLDC, Toshikatsu Otsuki,
6F Seibu–Butsuryu–Center, 3–14–2 Tatsumi Koto–Ku, Tokyo 135, Japan. 03–3521–8315

HONG KONG: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852–26629298

MOTOROLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quad EIA-485 Line Drivers with Three-State Outputs

MC75172B
MC75174B

QUAD EIA–485 LINE DRIVERS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

The ON Semiconductor MC75172B/174B Quad Line drivers are differential high speed drivers designed to comply with the EIA–485 Standard. Features include three–state outputs, thermal shutdown, and output current limiting in both directions. These devices also comply with EIA–422–A, and CCITT Recommendations V.11 and X.27.

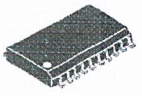
The MC75172B/174B are optimized for balanced multipoint bus transmission at rates in excess of 10 MBPS. The outputs feature wide common mode voltage range, making them suitable for party line applications in noisy environments. The current limit and thermal shutdown features protect the devices from line fault conditions. These devices offer optimum performance when used with the MC75173 and MC75175 line receivers.

Both devices are available in 16–pin plastic DIP and 20–pin wide body surface mount packages.

- Meets EIA–485 Standard for Party Line Operation
- Meets EIA–422–A and CCITT Recommendations V.11 and X.27
- Operating Ambient Temperature: –40°C to +85°C
- High Impedance Outputs
- Common Mode Output Voltage Range: –7 to 12 V
- Positive and Negative Current Limiting
- Transmission Rates in Excess of 10 MBPS
- Thermal Shutdown at 150°C Junction Temperature, (±20°C)
- Single 5.0 V Supply
- Pin Compatible with TI SN75172/4 and NS µA96172/4
- Interchangeable with MC3487 and AM26LS31 for EIA–422–A Applications

P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648

DW SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751D
(SO–20L)

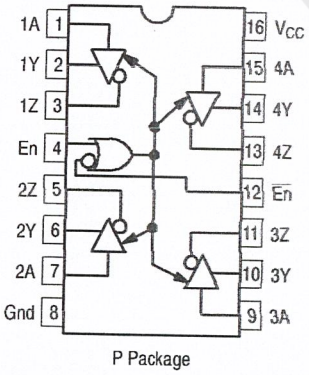


ORDERING INFORMATION

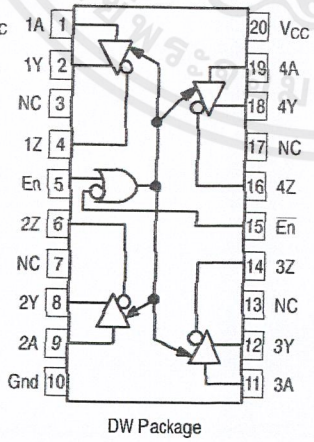
Device	Operating Temperature Range	Package
MC75172BDW	T_A = –40° to +85°C	SO–20L
MC75174BDW		SO–20L
MC75174BP		Plastic DIP

PIN CONNECTIONS

MC75172B

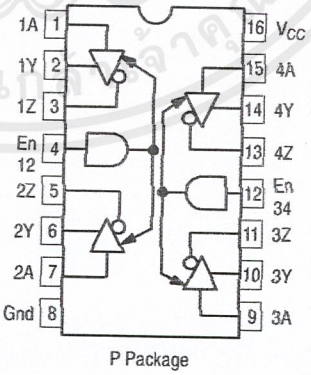


P Package

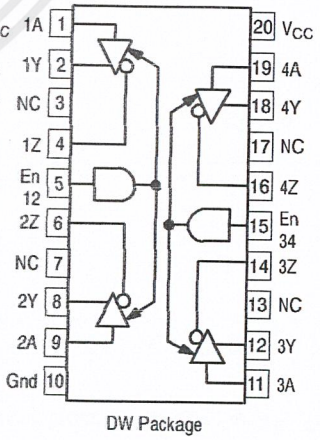


DW Package

MC75174B



P Package



DW Package

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	–0.5, +7.0	Vdc
Input Voltage (Data, Enable)	V_{in}	+7.0	Vdc
Input Current (Data, Enable)	I_{in}	–24	mA
Applied Output Voltage, when in 3–State Condition (V_{CC} = 5.0 V)	V_{za}	–10, +14	Vdc
Applied Output Voltage, *when* V_{CC} = 0 V	V_{zb}	±14	
Output Current	I_O	Self–Limiting	–
Storage Temperature	T_{stg}	–65, +150	°C

Devices should not be operated at these limits. The "Recommended Operating Conditions" table provides for actual device operation.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	+4.75	+5.0	+5.25	Vdc
Input Voltage (*All Inputs*)	V_{in}	0	–	V_{CC}	Vdc
Output Voltage in 3–State Condition, or when V_{CC} = 0 V	V_{cm}	–7.0	–	+12	Vdc
Output Current (Normal data transmission)	I_O	–65	–	+65	mA
Operating *Ambient Temperature (see text)*	T_A				°C
EIA–485		–40	–	+85	
EIA–422		0	–	+85	

All limits are not necessarily functional concurrently.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (–40°C ≤ T_A ≤ 85°C, 4.75 V ≤ V_{CC} ≤ 5.25 V, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Voltage					
Single–Ended Voltage					Vdc
I_O = 0	V_O	0	–	6.0	
High @ I_O = –33 mA	V_{OH}	–	4.0	–	
Low @ I_O = +33 mA	V_{OL}	–	1.6	–	
Differential Voltage					
Open Circuit (I_O = 0)	$\lvert V_{OD1}\rvert$	1.5	3.4	6.0	
R_L = 54 Ω (Figure 1)	$\lvert V_{OD2}\rvert$	1.5	2.3	5.0	
Change in Differential*, R_L = 54 Ω (Figure 1)	$\lvert\Delta V_{OD2}\rvert$	–	5.0	200	mVdc
Differential Voltage, R_L = 100 Ω (Figure 1)	$\lvert V_{OD2A}\rvert$	–	2.2	–	Vdc
Change in Differential*, R_L = 100 Ω (Figure 1)	$\lvert\Delta V_{OD2A}\rvert$	–	5.0	200	mVdc
Differential Voltage, –7.0 V ≤ V_{cm} ≤ 12 V (Figure 2)	$\lvert V_{OD3}\rvert$	1.5	–	5.0	Vdc
*Change in Differential**, –7.0 V ≤ V_{cm} ≤ 12 V *(Figure 2)*	$\lvert\Delta V_{OD3}\rvert$	–	5.0	200	mVdc
Offset Voltage, R_L = 54 Ω (Figure 1)	V_{OS}	–	2.9	–	Vdc
Change in Offset*, R_L = 54 Ω (Figure 1)	$\lvert\Delta V_{OS}\rvert$	–	5.0	200	mVdc
Output Current (Each Output)					
Power Off Leakage, V_{CC} = 0, –7.0 V ≤ V_O ≤ 12 V	$I_{O(off)}$	–50	0	+50	µA
Leakage in 3–State Mode, –7.0 V ≤ V_O ≤ 12 V	I_{OZ}	–50	0	+50	
Short Circuit Current to Ground	I_{OSR}	–150	–	+150	mA
Short Circuit Current, –7.0 V ≤ V_O ≤ 12 V	I_{OS}	–250	–	+250	

*V_{in} switched from 0.8 to 2.0 V.
Typical values determined at 25°C ambient and 5.0 V supply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($-40°C \leq T_A \leq 85°C$, $4.75\ V \leq V_{CC} \leq 5.25\ V$, unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Inputs					
Low Level Voltage (Pins 4 & 12, MC75174B only)	$V_{IL(A)}$	0	–	0.7	Vdc
Low Level Voltage (All Other Pins)	$V_{IL(B)}$	0	–	0.8	
High Level Voltage (All Inputs)	V_{IH}	2.0	–	V_{CC}	
Current @ V_{in} = 2.7 V (All Inputs)	I_{IH}	–	0.2	20	μA
Current @ V_{in} = 0.5 V (All Inputs)	I_{IL}	–100	–15	–	
Clamp Voltage (All Inputs, I_{in} = –18 mA)	V_{IK}	–1.5	–	–	Vdc
Thermal Shutdown Junction Temperature	T_{jts}	–	+150	–	°C
Power Supply Current (Outputs Open, V_{CC} = 5.25 V)	I_{CC}				mA
Outputs Enable		–	60	70	
Outputs Disabled		–	30	40	

TIMING CHARACTERISTICS (T_A = 25°C, V_{CC} = 5.0 V)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Propagation Delay – Input to Single–ended Output (Figure 3)					ns
Output Low–to–High	t_{PLH}	–	23	30	
Output High–to–Low	t_{PHL}	–	18	30	
Propagation Delay – Input to Differential Output (Figure 4)					ns
Input Low–to–High	$t_{PLH(D)}$	–	15	25	
Input High–to–Low	$t_{PHL(D)}$	–	17	25	
Differential Output Transition Time (Figure 4)	t_{dr}, t_{df}	–	19	25	ns
Skew Timing					ns
$\lvert t_{PLHD} - t_{PHLD} \rvert$ for Each Driver	t_{SK1}	–	0.2	–	
Max – Min t_{PLHD} Within a Package	t_{SK2}	–	1.5	–	
Max – Min t_{PHLD} Within a Package	t_{SK3}	–	1.5	–	
Enable Timing					ns
Single–ended Outputs (Figure 5)					
Enable to Active High Output	$t_{PZH(E)}$	–	48	60	
Enable to Active Low Output	$t_{PZL(E)}$	–	20	30	
Active High to Disable (using Enable)	$t_{PHZ(E)}$	–	35	45	
Active Low to Disable (using Enable)	$t_{PLZ(E)}$	–	30	50	
$\overline{\text{Enable}}$ to Active High Output (MC75172B only)	$t_{PZH(E)}$	–	58	70	
$\overline{\text{Enable}}$ to Active Low Output (MC75172B only)	$t_{PZL(E)}$	–	28	35	
Active High to Disable (using $\overline{\text{Enable}}$, MC75172B only)	$t_{PHZ(E)}$	–	38	50	
Active Low to Disable (using $\overline{\text{Enable}}$, MC75172B only)	$t_{PLZ(E)}$	–	36	50	
Differential Outputs (Figure 6)					ns
Enable to Active Output	$t_{PZD(E)}$	–	47	–	
$\overline{\text{Enable}}$ to Active Output (MC75172B only)	$t_{PZD(E)}$	–	56	–	
Enable to 3–State Output	$t_{PDZ(E)}$	–	32	–	
$\overline{\text{Enable}}$ to 3–State Output (MC75172B only)	$t_{PDZ(E)}$	–	40	–	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

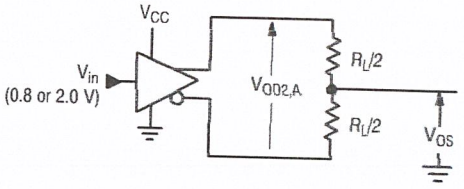


Figure 1. V_{DD} Measurement

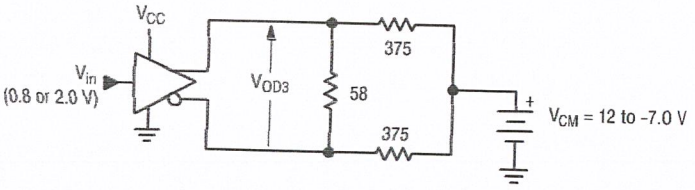


Figure 2. Common Mode Test

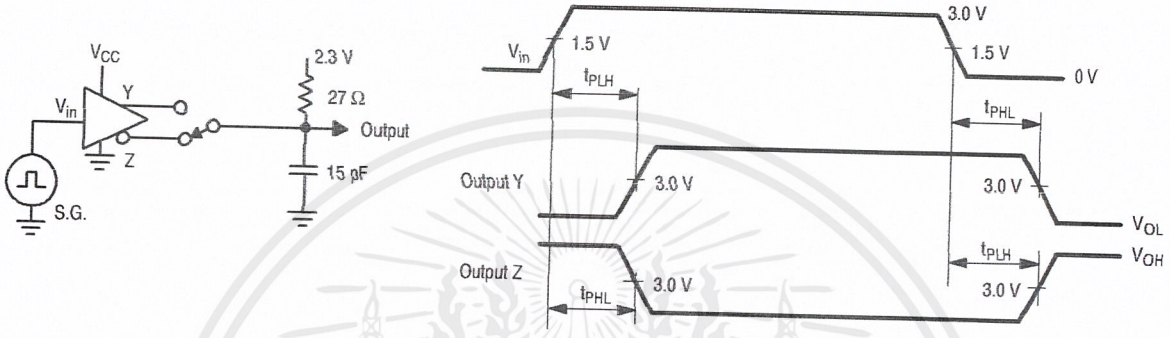
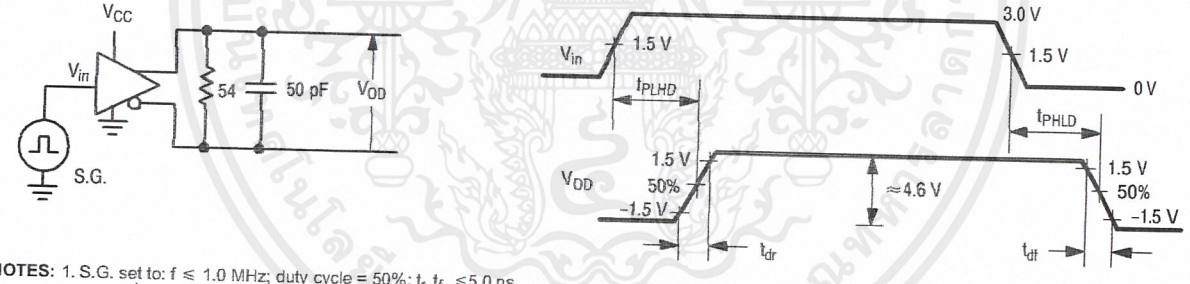


Figure 3. Propagation Delay, Single–Ended Outputs



NOTES: 1. S.G. set to: f ≤ 1.0 MHz; duty cycle = 50%; t_r, t_f, ≤5.0 ns.
2. $t_{SK1} = |t_{PLHD} - t_{PHLD}|$ for each driver.
3. t_{SK2} computed by subtracting the shortest t_{PLHD} from the longest t_{PLHD} of the 4 drivers within a package.
4. t_{SK3} computed by subtracting the shortest t_{PHLD} from the longest t_{PHLD} of the 4 drivers within a package.

Figure 4. Propagation Delay, Differential Outputs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

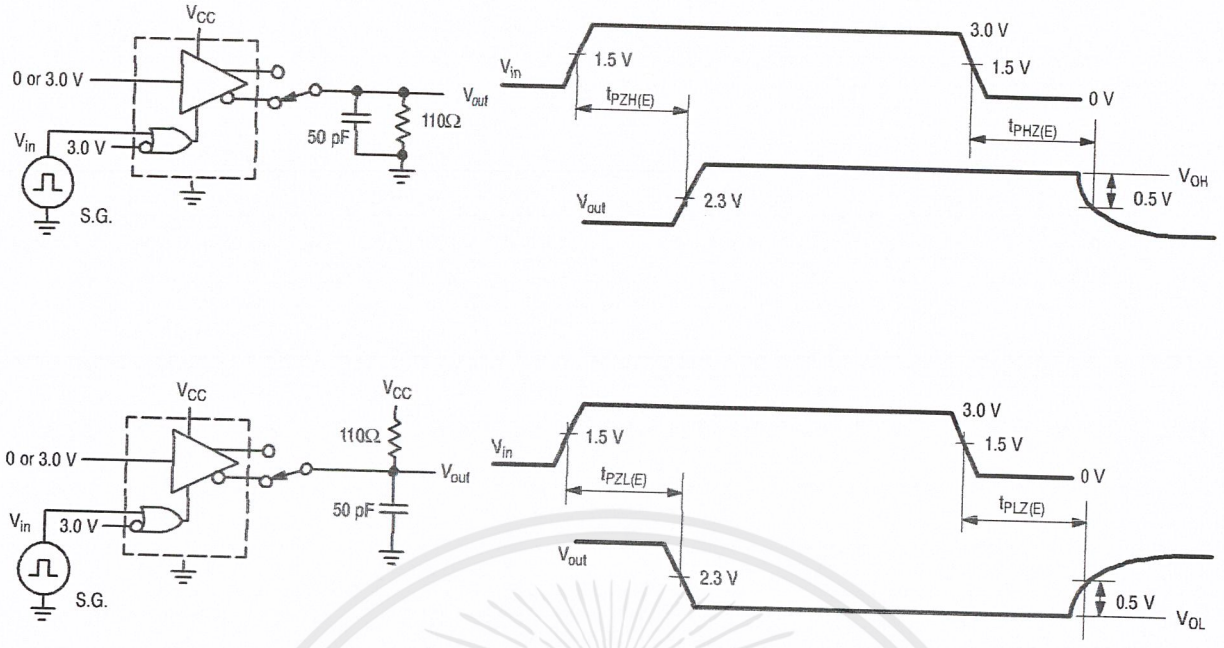
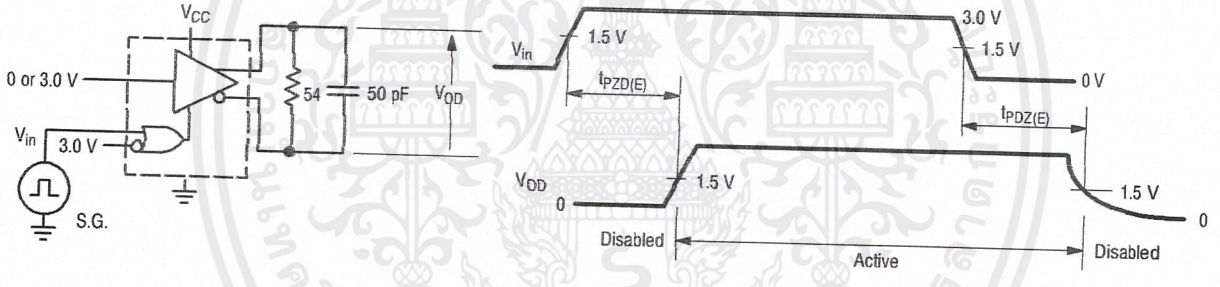


Figure 5. Enable Timing, Single–Ended Outputs



NOTES: 1. S.G. set to: f ≤ 1.0 MHz; duty cycle = 50%; t_f, t_r ≤ 5.0 ns.
2. V_{in} is inverted for $\overline{\text{Enable}}$ measurements.

Figure 6. Enable Timing, Differential Outputs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

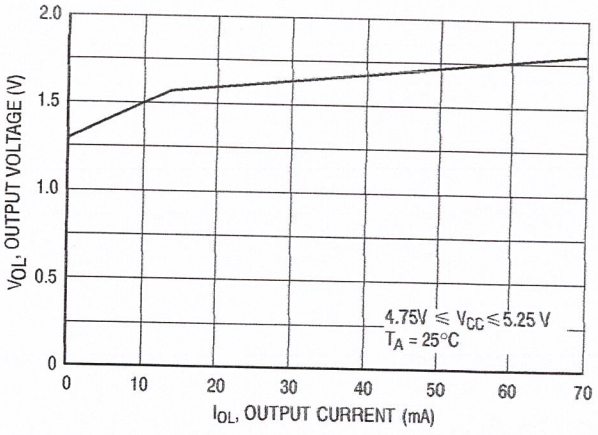


Figure 7. Single–Ended Output Voltage versus Output Sink Current

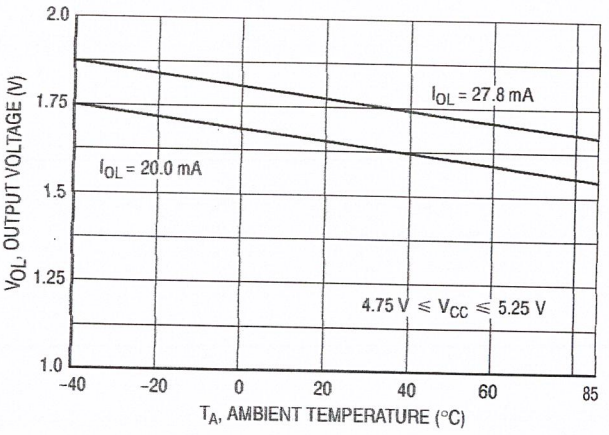


Figure 8. Single–Ended Output Voltage versus Temperature

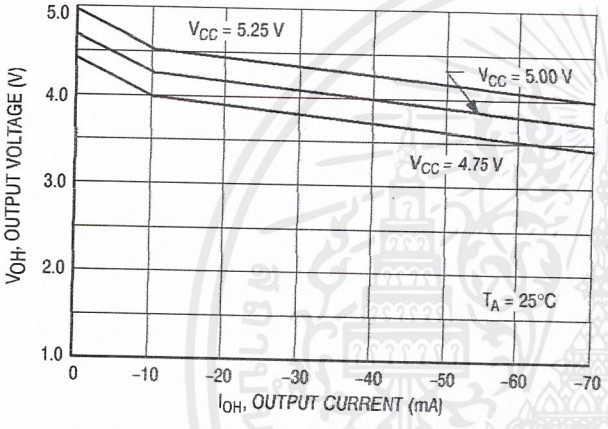


Figure 9. Single–Ended Output Voltage versus Output Source Current

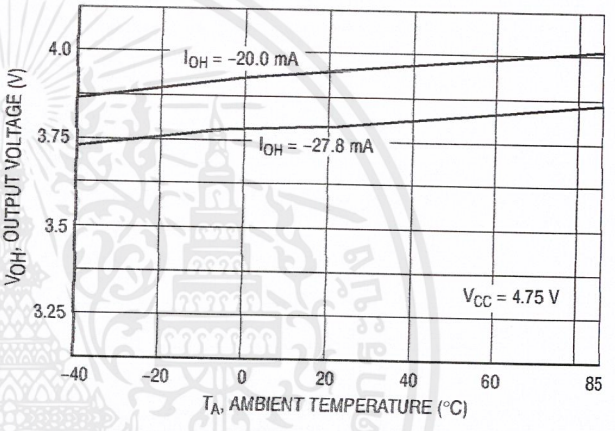


Figure 10. Single–Ended Output Voltage versus Temperature

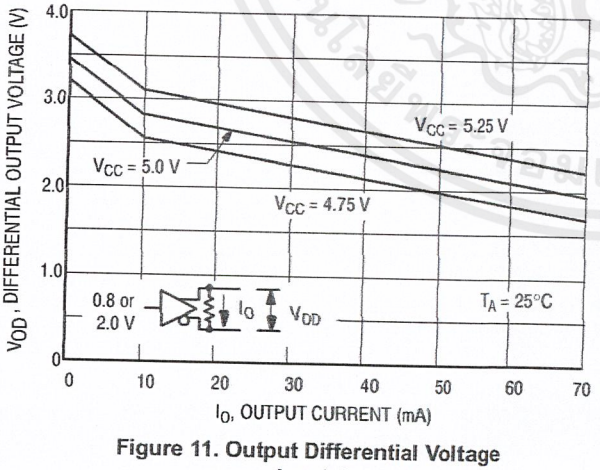


Figure 11. Output Differential Voltage versus Load Current

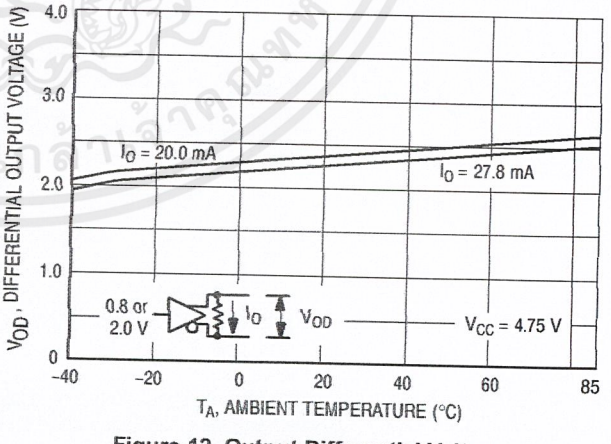


Figure 12. Output Differential Voltage versus Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

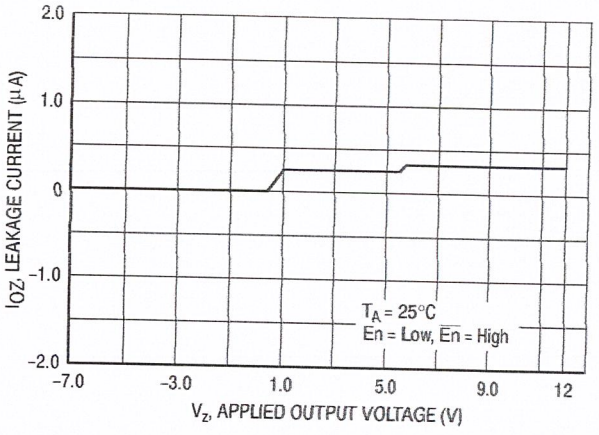


Figure 13. Output Leakage Current versus Output Voltage

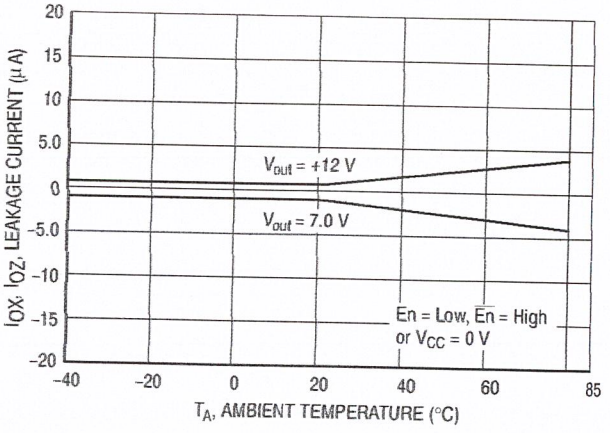


Figure 14. Output Leakage Current versus Temperature

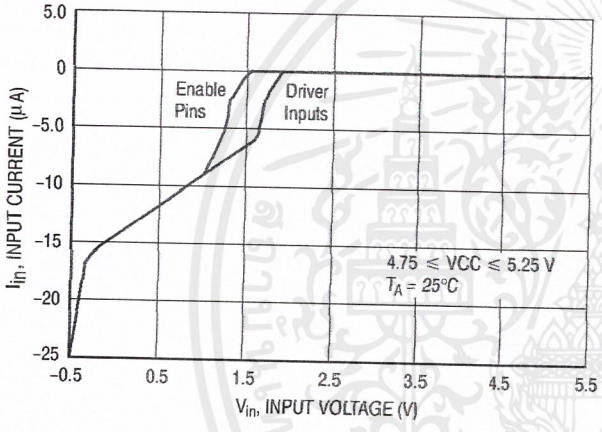


Figure 15. Input Current versus Input Voltage

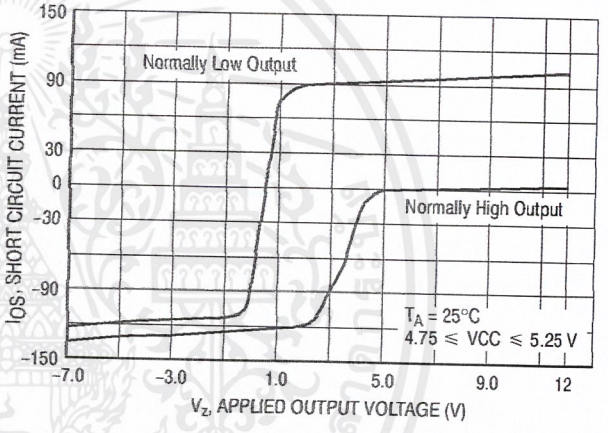


Figure 16. Short Circuit Current versus Common Mode Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATIONS INFORMATION

Description

The MC75172B and MC75174B are differential line drivers designed to comply with EIA–485 Standard (April 1983) for use in balanced digital multipoint systems containing multiple drivers. The drivers also comply with EIA–422–A and CCITT Recommendations V.11 and X.27. The drivers meet the EIA–485 requirement for protection from damage in the event that two or more drivers attempt to transmit data simultaneously on the same cable. Data rates in excess of 10 MBPS are possible, depending on the cable length and cable characteristics. A single power supply, 5.0 V, ±5%, is required at a nominal current of 60 mA, plus load currents.

Outputs

Each output (when active) will be a low or a high voltage, which depends on the input state and the load current (see Table 1, 2 and Figures 7 to 10). The graphs apply to each driver, regardless of how many other drivers within the package are supplying load current.

Table 1. MC75172B Truth Table

	Enables		Outputs	
Data Input	EN	$\overline{EN}$	Y	Z
H	H	X	H	L
L	H	X	L	H
H	X	L	H	L
L	X	L	L	H
X	L	H	Z	Z

Table 2. MC75174B Truth Table

		Outputs	
Data Input	Enable	Y	Z
H	H	H	L
L	H	L	H
X	L	Z	Z

H = Logic high, L = Logic low, X = Irrelevant, Z = High impedance

The two outputs of a driver are always complementary. A "high" output can only source current out, while a "low" output can only sink current (except for short circuit current – see Figure 16).

The outputs will be in the high impedance mode when:

a) the Enable inputs are set according to Table 1 or 2;

b) V_{CC} is less than 1.5 V;

c) the junction temperature exceeds the trip point of the thermal shutdown circuit (see below). When in this condition, the output's source and sink capability are shut off, and only leakage currents will flow (see Figures 13, 14). Disabled outputs may be taken to any voltage between –7.0 V and 12 V without damage.

The drivers are protected from short circuits by two methods:

a) Current limiting is provided at each output, in both the source and sink direction, for shorts to any voltage within the range of 12V to –7.0V, with respect to circuit ground (see Figure 16). The short circuit current will flow until the fault is removed, or until the thermal shutdown circuit activates (see below). The current limiting circuit has a negative temperature coefficient and requires no resetting upon removal of the fault condition.

b) A thermal shutdown circuit disables the outputs when the junction temperature reaches 150°C, ±20°C. The thermal shutdown circuit has a hysteresis of ≈ 12°C to prevent oscillations. When this circuit activates, the output stage of each driver is put into the high impedance mode, thereby shutting off the output currents. The remainder of the internal circuitry remains biased. The outputs will become active once again as the IC cools down.

Driver Inputs

The driver inputs determine the state of the outputs in accordance with Tables 1 and 2. The driver inputs have a nominal threshold of 1.2 V, and their voltage must be kept within the range of 0 V to V_{CC} for proper operation. If the voltage is taken more than 0.5 V below ground, excessive currents will flow, and proper operation of the drivers will be affected. An open pin is equivalent to a logic high, but good design practices dictate that inputs should never be left open. The characteristics of the driver inputs are shown in Figure 15. This graph is not affected by the state of the Enable pins.

Enable Logic

Each driver's outputs are active when the Enable inputs (Pins 4 and 12) are true according to Tables 1 and 2.

The Enable inputs have a nominal threshold of 1.2 V and their voltage must be kept within the range of 0 V to V_{CC} for proper operation. If the voltage is taken more than 0.5 V below ground, excessive currents will flow, and proper operation of the drivers will be affected. An open pin is equivalent to a logic high, but good design practices dictate that inputs should never be left open. The Enable input characteristics are shown in Figure 15.

Operating Temperature Range

The minimum ambient operating temperature is listed as –40°C to meet EIA–485 specifications, and 0°C to meet EIA–422–A specifications. The higher V_{OD} required by EIA–422–A is the reason for the narrower temperature range.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The maximum ambient operating temperature (applicable to both EIA–485 and EIA–422–A) is listed as 85°C. However, a lower ambient may be required depending on system use (i.e. specifically how many drivers within a package are used) and at what current levels they are operating. The maximum power which may be dissipated within the package is determined by:

$$PD_{max} = \frac{T_{Jmax} - T_A}{R_{\theta JA}}$$

where: $R_{\theta JA}$ = package thermal resistance (typical 70°C/W for the DIP package, 85°C/W for SOIC package);
T_{Jmax} = max. operating junction temperature, and
T_A = ambient temperature.

Since the thermal shutdown feature has a trip point of 150°C, ±20°C, T_{Jmax} is selected to be 130°C. The power dissipated within the package is calculated from:

PD = $\{[(V_{CC} - V_{OH}) \bullet I_{OH}] + V_{OL} \bullet I_{OL})\}$ each driver + $(V_{CC} \bullet I_{CC})$

where: V_{CC} = the supply voltage;
V_{OH}, V_{OL} are measured or estimated from Figures 7 to 10;
I_{CC} = the quiescent power supply current (typical 60 mA).

As indicated in the equation, the first term (in brackets) must be calculated and summed for each of the four drivers, while the last term is common to the entire package.

Example 1: T_A = 25°C, I_{OL} = I_{OH} = 55 mA for each driver, V_{CC} = 5.0 V, DIP package. How many drivers per package can be used?

Maximum allowable power dissipation is:

$$PD_{max} = \frac{130°C - 25°C}{70°C/W} = 1.5\ W$$

Since the power supply current of 60 mA dissipates 300 mW, that leaves 1.2 W (1.5 W – 0.3 W) for the drivers. From Figures 7 and 9, $V_{OL} \approx 1.75$ V, and $V_{OH} \approx 3.85$ V. The power dissipated in each driver is:

$\{(5.0 - 3.85) \bullet 0.055\} + (1.75 \bullet 0.055) = 160$ mW.

Since each driver dissipates 160 mW, the four drivers per package could be used in this application.

Example 2: T_A = 85°C, I_{OL} = 27.8 mA, I_{OH} = 20 mA for each driver, V_{CC} = 5.0 V, SOIC package. How many drivers per package can be used?

Maximum allowable power dissipation is:

$$PD_{max} = \frac{130°C - 85°C}{85°C/W} = 0.53\ W$$

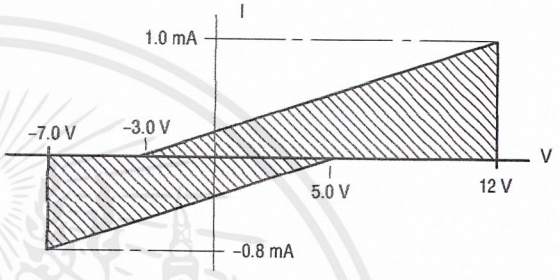
Since the power supply current of 60 mA dissipates 300 mW, that leaves 230 mW (530 mW – 300 mW) for the drivers. From Figures 8 and 10 (adjusted for V_{CC} = 5.0 V), $V_{OL} \approx 1.38$ V, and $V_{OH} \approx 4.27$ V. The power dissipated in each driver is:

$\{(5.0 - 4.27) \bullet 0.020\} + (1.38 \bullet 0.0278) = 53$ mW

Since each driver dissipates 53 mW, the use of all four drivers in a package would be marginal. Options include reducing the load current, reducing the ambient temperature, and/or providing a heat sink.

System Requirements

EIA–485 requires each driver to be capable of transmitting data differentially to at least 32 unit loads, plus an equivalent DC termination resistance of 60Ω, over a common mode voltage of –7.0 to 12 V. A unit load (U.L.), as defined by EIA–485, is shown in Figure 17.



Reprinted from EIA–485, Electronic Industries Association, Washington, DC.

Figure 17. Unit Load Definition

A load current within the shaded regions represents an impedance of less than one U.L., while a load current of a magnitude outside the shaded area is greater than one U.L. A system's total load is the sum of the unit load equivalents of each receiver's input current, and each disabled driver's output leakage current. The 60Ω termination resistance mentioned above allows for two 120Ω terminating resistors.

Using the EIA–485 requirements (worst case limits), and the graphs of Figures 7 and 9, it can be determined that the maximum current an MC75172B or MC75174B driver will source or sink is ≈65 mA.

System Example

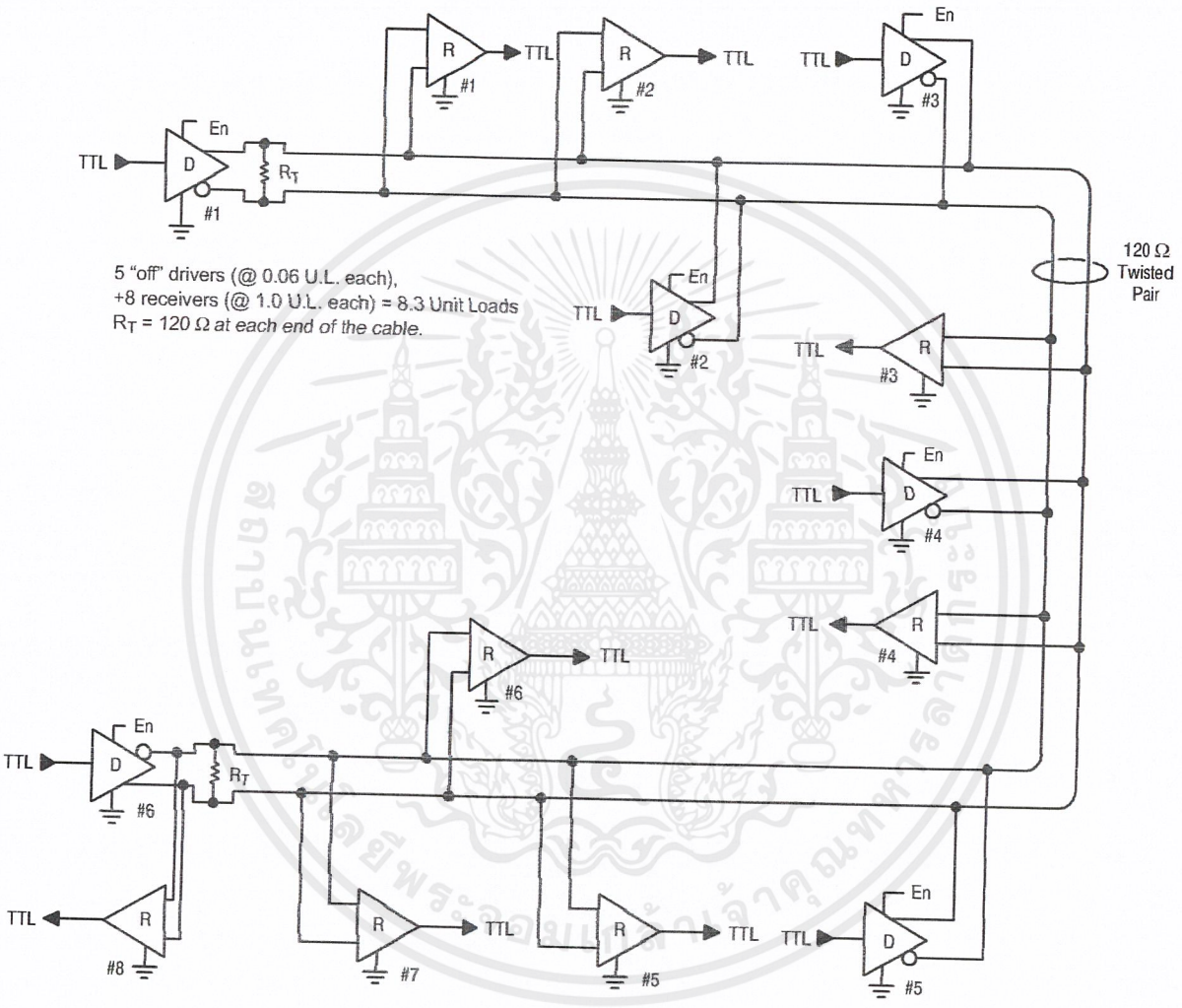
An example of a typical EIA–485 system is shown in Figure 18. In this example, it is assumed each receiver's input characteristics correspond to 1.0 U.L. as defined in Figure 17. Each "off" driver, with a maximum leakage of ±50 μA over the common mode range, presents a load of ≈0.06 U.L. The total load for the active driver is therefore 8.3 unit loads, plus the parallel combination of the two terminating resistors (60Ω). It is up to the system software to control the driver Enable pins to ensure that only one driver is active at any time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Termination Resistors

Transmission line theory states that, in order to preserve the shape and integrity of a waveform traveling along a cable, the cable must be terminated in an impedance equal to its characteristic impedance. In a system such as that depicted in Figure 18, in which data can travel in both directions, both physical ends of the cable must be terminated. Stubs, leading to each receiver and driver, should be as short as possible.

Leaving off the terminations will generally result in reflections which can have amplitudes of several volts above V_{CC} or below ground. These overshoots and undershoots can disrupt the driver and/or receiver operation, create false data, and in some cases damage components on the bus.



NOTES: 1. Terminating resistors R_T must be located at the physical ends of the cable.
2. Stubs should be as short as possible.
3. Circuit ground of all drivers and receivers must be connected via a dedicated wire within the cable. Do not rely on chassis ground or power line ground.

Figure 18. Typical EIA–485 System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Comparing System Requirements

Characteristic	Symbol	EIA–485	EIA–422–A	V.11 and X.27
GENERATOR (DRIVER)				
Output Impedance (Note 1)	Z_{out}	Not Specified	< 100 Ω	50 10 100 Ω
Open Circuit Voltage Differential Single–Ended	 V_{OCD} V_{OCS}	 1.5 to 6.0 V <6.0 V	 ≤6.0 V ≤6.0 V	 ≤6.0 V, w/3.9 kΩ, Load ≤6.0 V, w/3.9 kΩ, Load
Loaded Differential Voltage	V_{OD}	1.5 to 5.0 V, w/54 Ω load	≥2.0 V or ≥ 0.5 V_{OCD}, w/100 Ω load	≥2.0 V or ≥0.5 V_{OCD}, w/100 Ω load
Differential Voltage Balance	ΔV_{OD}	< 200 mV	≤400 mV	<400 mV
Output Common Mode Range	V_{CM}	–7.0 to +12 V	Not Specified	Not Specified
Offset Voltage	V_{OS}	$-1.0 < V_{OS} < 3.0$ V	≤3.0 V	≤3.0 V
Offset Voltage Balance	ΔV_{OS}	< 200 mV	≤400 mV	<400 mV
Short Circuit Current	I_{OS}	≤250 mA for –7.0 to 12 V	≤ 150 mA to ground	≤ 150 mA to ground
Leakage Current (V_{CC} = 0)	I_{OLK}	Not Specified	≤ 100 μA to –0.25 V thru 6.0 V	≤ 100 μA to ± 0.25 V
Output Rise/Fall Time (Note 2)	t_r, t_f	≤0.3 T_B, w/54 Ω/1150 pF load	≤0.1 T_B or ≤ 20 ns, w/100 Ω load	≤0.1 T_B or ≤ 20 ns, w/100 Ω load
RECEIVER				
Input Sensitivity	V_{th}	± 200 mV	± 200 mV	± 300 mV
Input Bias Voltage	V_{bias}	≤3.0 V	≤3.0 V	≤3.0 V
Input Common Mode Range	V_{cm}	–7.0 to 12 V	–7.0 to 7.0 V	–7.0 to 7.0 V
Dynamic Input Impedance	R_{in}	Spec number of U.L.	≥4 kΩ	≥4 kΩ

NOTES: 1. Compliance with V.11 and X.27 (Blue book) output impedance requires external resistors in series with the outputs of the MC75172B and MC75174B.
2. T_B = Bit time.

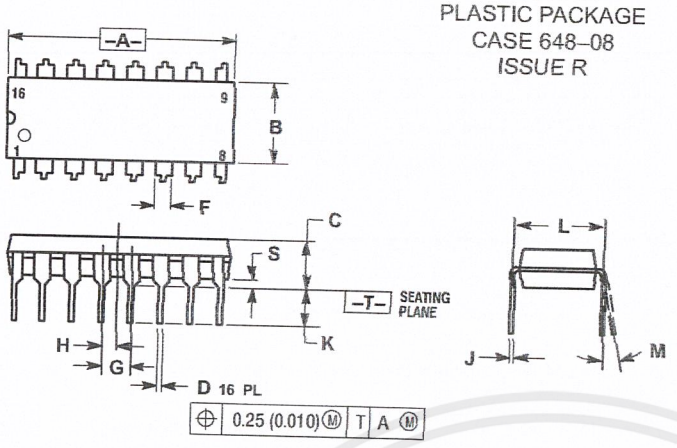
Additional Information

Copies of the EIA Recommendations (EIA–485 and EIA–422–A) can be obtained from the Electronics Industries Association, Washington, D.C. (202–457–4966). Copies of the CCITT Recommendations (V.11 and X.27) can be obtained from the United States Department of Commerce, Springfield, VA (703–487–4600).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

P SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648–08
ISSUE R



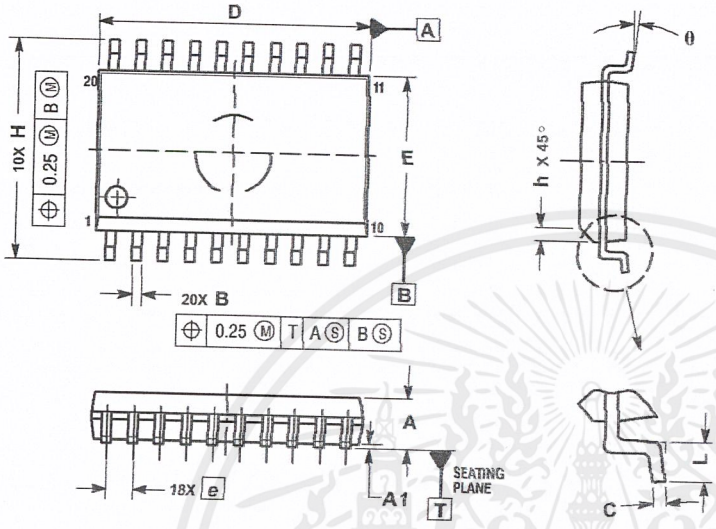
NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION L TO CENTER OF LEADS WHEN *FORMED* PARALLEL.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

	INCHES		*MILLIMETERS*	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.740	0.770	18.80	19.55
B	0.250	0.270	6.35	6.85
C	0.145	0.175	3.69	4.44
D	0.015	0.021	0.39	0.53
F	0.040	0.70	1.02	1.77
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.050 BSC		1.27 BSC	
J	0.008	0.015	0.21	0.38
K	0.110	0.130	2.80	3.30
L	0.295	0.305	7.50	7.74
M	0°	10°	0°	10°
S	0.020	0.040	0.51	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTLINE DIMENSIONS

DW SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751D–05
(SO–20L)
ISSUE F



NOTES:
1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M, 1994.
3. DIMENSIONS D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.
5. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE PROTRUSION SHALL BE 0.13 TOTAL IN EXCESS OF B DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

	MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX
A	2.35	2.65
A1	0.10	0.25
B	0.35	0.49
C	0.23	0.32
D	12.65	12.95
E	7.40	7.60
e	1.27 BSC	
H	10.05	10.55
h	0.25	0.75
L	0.50	0.90
θ	0°	7°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

NORTH AMERICA Literature Fulfillment:
Literature *Distribution Center for ON Semiconductor*
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303–675–2175 *or* 800–344–3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303–675–2176 *or* 800–344–3867 *Toll Free USA/Canada*
Email: ONlit@hibbertco.com
Fax Response Line: 303–675–2167 or 800–344–3810 Toll Free USA/Canada

N. American Technical Support: 800–282–9855 Toll Free USA/Canada

EUROPE: LDC for ON Semiconductor – European Support
German Phone: (+1) 303–308–7140 (Mon–Fri 2:30pm to 7:00pm CET)
Email: ONlit–german@hibbertco.com
French Phone: (+1) 303–308–7141 (Mon–Fri 2:00pm to 7:00pm CET)
Email: ONlit–french@hibbertco.com
English Phone: (+1) 303–308–7142 (Mon–Fri 12:00pm to 5:00pm GMT)
Email: ONlit@hibbertco.com

EUROPEAN TOLL–FREE ACCESS*: 00–800–4422–3781
*Available from Germany, France, Italy, UK, Ireland

CENTRAL/SOUTH AMERICA:
Spanish Phone: *303–308–7143 (Mon–Fri 8:00am to 5:00pm MST)*
Email: ONlit–spanish@hibbertco.com
Toll–Free from Mexico: Dial 01–800–288–2872 for Access –
then Dial 866–297–9322

ASIA/PACIFIC: LDC for ON Semiconductor – Asia Support
Phone: 1–303–675–2121 (Tue–Fri 9:00am to 1:00pm, Hong Kong Time)
Toll Free from Hong Kong & Singapore:
001–800–4422–3781
Email: *ONlit–asia@hibbertco.com*

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4–32–1 Nishi–Gotanda, Shinagawa–ku, Tokyo, Japan 141–0031
Phone: 81–3–5740–2700
Email: r14525@onsemi.com

ON Semiconductor Website: http://onsemi.com

For additional information, please contact your local
Sales Representative.

MC75172B/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำปรึกษาและข้อเสนอแนะจาก ผศ.ดร.วีระเชษฐ์ ขันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในทุก ๆ ด้านแก่คณะผู้จัดทำ ช่วยไขปัญหาขจัดอุปสรรคต่าง ๆ ตลอดจนเป็นผู้ให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้และสร้างแรงกดดันอย่างมหาศาลในยามที่งานผิดพลาดและล่าช้า ท่านเป็นดั่งตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนให้ปริญญานิพนธ์ฉบับบนี้สามารถมุ่งหน้าไปสู่ความสำเร็จได้ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบพระคุณท่านในทุก ๆ เรื่องเป็นอย่างสูง

พร้อมกันนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่ให้ความรู้และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. อาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทธิ์วิชาความรู้ทั้งในด้านวิชาการและมุมมองการใช้ชีวิตในรูปแบบต่าง ๆ
2. พี่ ๆ ปริญญาโทห้องโปรเจค EMC lab (ReCCIT ตึก 10 ชั้น) ที่ให้คำปรึกษา, ข้อแนะนำและพร้อมที่จะช่วยแก้ปัญหาในหลาย ๆ ด้านตลอดจนความเป็นกันเองที่ให้กับน้องทุก คน
3. พี่ ๆ รุ่น 36 หัวข้อโปรเจครถรางไฟฟ้า ที่ช่วยสร้างรถรางไฟฟ้าเพื่อให้น้อง ๆ ได้มีรถรางไฟฟ้าใช้ในการสานต่อทำโปรเจค
4. พี่ผู้ไม่ประสงค์จะออกนามเจ้าของเครื่องเชื่อมซึ่งอนุเคราะห์ให้ยืมเครื่องเชื่อมเหล็กเพื่อใช้ในการซ่อมรางและซ่อมรถตลอดการทำโครงงานนี้
5. เพื่อน ๆ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยอนุเคราะห์ให้ยืมชุด Fly wheel เพื่อใช้ทดสอบคุณลักษณะของ Induction Motor เมื่อทำงานที่โหลดต่าง ๆ
6. เพื่อนภาคคอมพิวเตอร์ที่ให้ยืมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการพิมพ์วิทยานิพนธ์ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
7. เพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับน้ำใจและเสียงหัวเราะ จนทำให้โครงงานนี้สำเร็จลงได้ด้วยรอยยิ้มและมิตรไมตรี
8. ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ที่ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดู จนเติบใหญ่ทั้งร่างกายและจิตใจ ท่านเป็นดั่งแรงใจให้คณะผู้จัดทำ สามารถฟันฝ่าอุปสรรคนา ๆ ประการจนได้มีวันนี้และตลอดไป

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน และสิ่งแวดล้อมอันสวยงามบนโลกใบนี้ หากมีข้อผิดพลาดใด ๆ ในการทำโครงงานชิ้นนี้ ทางคณะผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Sons, 2nd, 1995.

[2] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Prentice-Hall International, 4th, 2000.

[3] Richard Valentine, "Motor Control Electronics Handbook", McGraw Hill, 1st , 1998.

[4] Timothy L. Skvarenina, William E. DeWitt, "Electrical Power and Controls", Prentice-Hall International, 1st , 2001.

[5] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice-Hall International,1st , 1997.

[6] Mulukutla S. Sarma, "Electric Machines: steady-state theory and dynamic performance", West Publishing Company, 2nd , 1994.

[7] กฤษดา วิศวธีรานนท์ม, "Inverter หลักการทำงานและเทคนิคการใช้งาน", ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่4, 2540.

[8] จักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง, เฉลิมเกียรติ ลิ้มรัตนกุล, ประชา คำภักดี, พรพจน์ จาฎุพจน์, พิทูร บรรจงประเสริฐ, มงคล โกวิทย์ศิริกุล, "รถรางไฟฟ้า", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้