ปีการศึกษา 2537

เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ 3 เฟส

(INVERTER 3 PHASE)

โดย

1. นาย ประเสริฐ ฟุร้ดนพาณิชย์

2. นาย วันชัย เด่นพายัพ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2537

เรื่อง เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ 3 เฟส

ผู้จัดทำ

1. นาย ประเสริฐ พูรัตนพาณิชย์

2. นาย วันชัย เด่นพายัพ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ 3 เฟส

โดย	นาย ประเสริฐ	ฟูรัตนพาณิชย์
	นาย วันชัย	เด่นพายัพ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์
ปีการศึกษา	2537	

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมอเตอร์ได้ถูกใช้งานในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ขนาดกระทัดรัด ราคาถูก จึงทำให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์ ถูกพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้การใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้จะถูกจำกัดด้วยเรื่องความสามารถของอุปกรณ์กำลังที่มาใช้ขับมอเตอร์ แต่เทคโนโลยีปัจจุบันได้ผลิตอุปกรณ์กำลังที่มีความสามารถในการสวิทช์สูง และเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ก็พัฒนาไปสูงมาก ทำให้เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ในปัจจุบันถูกสร้างขึ้นโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ ให้โปรแกรมไปควบคุมการทำงานด้านต่างๆ ทำให้ความถี่ในการสวิทช์ของอุปกรณ์กำลังซึ่งมาจากวงจรพัลส์วิดมอดูเลทเตอร์ถูกกำหนดรูปแบบได้ เพื่อให้ข้อจำกัดทางด้านต่างๆ ของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์กว้างขึ้น เช่น แรงบิดความเร็ว ความเร่งซึ่งความถี่ฮาร์โมนิคจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง

เนื้อหาสำคัญของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงหลักการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดแบบเทียบพื้นที่ใต้โค้งซายน์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งจะมีผลอย่างไรต่อความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นที่เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVERTER 3 PHASE

By. Mr.Prasert Furattanapanit

Mr.Wanchai Denpayup

Project Report Adivisor Mr.Singhthong Patanasethanon

Academic 1994

Abstract

Presently, Motor has been used to widly in industrial Particularly induction motor,because of instructure strong,small and low-price. It has been developed for inverter and has been efficiency. All told to limited able of device to drive motor. But technology about computer has been developed. So inverter in presently to make by microcomputer by used progame to control, frequency for switching whitch before pulse width modulation toset from of signal for limit of inverter to widly.Exam torque, speed and velocity because frequency of harmonic has been efficiency to fall down

Gist of this project to told principle make pulse width modulation signal from Equal Area Technique. By control by computer, result for harmonic frequency with inverter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....

บทที่

1. บทนำ 1

ความสำคัญเบื้องต้น 1

การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2

ขั้นตอนและขอบเขตการวิจัย 3

2. ทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม 5

ลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5

ชนิดของเครื่องความคุมความเร็วแบบปรับความถี่ได้ 13

หลักการมอดูเลทสัญญาณตามความกว้างพัลส์ 16

เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์ 20

การคำนวณหาค่ามุมในแต่ละส่วนย่อย 21

การวิเคราะห์ฮาร์โมนิคของกระแสจากวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ .. 23

3. การสร้างวงจรพีดับบลิวเอ็มแบบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์ 34

ข้อกำหนดทางเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้ง 34

การออกแบบวงจรพีดับบลิวเอ็มโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 39

วงจรภาคประมวลผลกลางและควบคุมการสวิทช์ 42

วงจรภาคหน่วยความจำ 45

วงจรภาครับสัญญาณควบคุมจากภายนอก 45

วงจรภาคแสดงผลความถี่ 48

โปรแกรมควบคุมการทำงานของวงจรพีดับบลิวเอ็ม 49

ผลการทดสอบวงจรพีดับบลิวเอ็ม 57

การประกอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 68
จุดประสงค์ของการทดสอบ 68
เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 70
ขั้นตอนการทดสอบ 71
ผลการทดสอบจากสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิค 88
สรุปผลการทดสอบ 89
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 90
สรุปผลการวิจัย 90
ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา 91
ภาคผนวก ก .....
ภาคผนวก ข .....
ภาคผนวก ค .....
ภาคผนวก ง .....
ภาคผนวก จ .....
กิตติกรรมประกาศ .....
เอกสารอ้างอิง .....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญเบื้องต้น

ในปัจจุบันเทคโนโลยี่ด้านต่างๆ ที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมกำลังพัฒนา เช่นเดียวกับความต้องการของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งเป็นตัวขับกำลังในโรงงานอุตสาหกรรมก็ยิ่งทวีความต้องการสูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ต้องสามารถควบคุมความเร็วได้ต่อเนื่องแม่นยำ มีเสถียรภาพ และประสิทธิภาพดีเยี่ยม ราคาถูก สะดวกและง่ายต่อการบำรุงรักษา ตลอดจนต้องปราศจากการทำให้เกิดสภาวะใดๆ ต่อในระบบอุตสาหกรรม และระบบไฟฟ้าด้วย

เนื่องจากมอเตอร์กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ มีข้อดีกว่ามอเตอร์กระแสตรง ซึ่งเคยนำมาใช้เป็นต้วต้นกำลังชนิดปรับความเร็วได้กล่าวคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำโครงสร้างแข็งแรงทนทาน มีลักษณะปกปิดมิดชิด มีส่วนประกอบสำคัญเพียงสองส่วนคือส่วนอยู่นิ่ง (Stator) และส่วนหมุน (Rotor) ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีราคาถูก ขนาดกระทัดรัดกว่าที่ขนาดกำลังม้าเท่ากัน สามารถทำงานได้นานโดยต้องการซ่อมบำรุงน้อยมาก ใช้งานได้ดีแม้ในสถานที่ฝุ่นละอองมาก หรือบริเวณที่มีความชื้นสูง หรือแม้แต่บริเวณที่ไวต่อการระเบิดเนื่องจากประกายไฟ จึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่าแบบกระแสตรง แต่มอเตอร์เหนี่ยวนำไม่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบเปลี่ยนแปลงความเร็ว เนื่องจากมีความเร็วค่อนข้างคงที่ เพราะความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แปรผันตามความถี่ไฟสลับของแหล่งจ่ายกำลังเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำอย่างไม่หยุดยั้ง ทำให้อุปกรณ์สวิทช์อิเลคทรอนิกส์กำลังในปัจจุบัน เช่น ไทริสเตอร์ ทรานซิสเตอร์กำลัง ไทริสเตอร์แบบเกทหยุดนำกระแส(Gate Turn Off Thyristor)และอื่นๆ มีอัตรากำลังกำหนดพิกัดสูงขึ้นความไวสวิทช์สูงขึ้น ทำให้การพัฒนาชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นที่สนใจมากขึ้นทั้งนี้สมรรถนะของเครื่องควบคุมความเร็วไม่ได้ขึ้นอยู่กับ ความไวสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์กำลังเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับอิทธิพลของการเลือกหลักการสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิทช์กำลังเหล่านั้นอีกด้วย โดยเฉพาะการควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่มีขนาดไม่เกิน 10 กำลังม้า มักนิยมใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการสวิทช์โดยการมอดูเลทสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation Inverter)

โดยทั่วไปการมอดูเลทสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) จะมีหลักการสร้างสัญญาณการสวิทช์อยู่ 2 หลักการใหญ่ คือ แบบ Sinusoidal PWM. และ แบบ Harmonic Elimination PWM. Technique.

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่นิยมใช้กันมากสำหรับงานขนาดย่อมคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระบอก (Squirrel cage induction motor) การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบนี้ทำได้หลายวิธีเช่น

1. การควบคุมความเร็วโดยปรับระดับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยคงค่าความถี่เดิม

เนื่องจากแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์ แปรผันตามค่ากำลังสองของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์มีภาระอยู่ แล้วลดแรงดันลงความเร็วมอเตอร์ก็จะลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการปรับระดับแรงดันมอเตอร์นี้จะสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ในช่วงแคบๆเท่านั้น เพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันมากหรือน้อยเกินไปอาจทำให้มอเตอร์เสียหาย หรือแรงบิดต่ำมากจนไม่สามารถใช้งานได้

2. การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก

ปกติความเร็วของมอเตอร์จะแปรผันตาม ค่าความถี่ของแหล่งจ่ายและแปรผกผันกับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ด้วยการออกแบบการพันของขอลวดส่วนอยู่นิ่ง (Stator Winding) ให้สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เช่น จาก 2 เป็น 4 ขั้ว หรือ 4 เป็น 8 ขั้ว แม่เหล็กได้ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบดาเลนเดอร์ (Dahlander motor) ก็สามารถเปลี่ยนความเร็วมอเตอร์ได้ขั้นละทวีคูณ ซึ่งก็ยังไม่เหมาะสมกับการควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบต่อเนื่องได้

3. การควบคุมความเร็วโดยการปรับค่าความถี่แหล่งจ่ายของมอเตอร์

ถ้าปรับค่าความถี่ที่จ่ายมอเตอร์ให้ต่อเนื่องและละเอียดได้จะทำให้ความเร็วมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามอย่างต่อเนื่องและนิ่มนวลเช่นกัน แต่การปรับความถี่ให้มอเตอร์นี้จะต้องปรับค่าระดับแรงดันตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งจะทำให้อัตราแรงดันต่อความถี่ (V/F) ของมอเตอร์มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ เพื่อรักษาค่าแรงบิดของมอเตอร์ให้คงที่ และมีประสิทธิภาพที่ดีในการทำงาน

เพื่อให้เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีสมรรถนะสูงปราศจากมลภาวะ เนื่องจากฮาร์โมนิกส์ที่จะเกิดขึ้นไปรบกวนระบบไฟฟ้าหลัก โครงงานนี้จึงกล่าวถึงการออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่าย ตามหลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม แบบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์ (Equal Area PWM Technique)

<u>ขั้นตอนและขอบเขตการวิจัย</u>

สำหรับขั้นตอนการวิจัย ได้ดำเนินการเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการออกแบบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบปรับค่าความถี่

2. ศึกษารายละเอียดการทำงานของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ รอบข้าง (Peripheral device) เพื่อนำมาประยุกต์สร้างวงจรควบคุม

3. สร้างโปรแกรมคำนวณค่ามุมสวิทช์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique

4. สร้างวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้ประกอบด้วยวงจรหลักดังนี้

4.1 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรอง (Rectifier and Filter) เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟสลับ 220 V 50 Hz ให้เป็นแรงดันไฟตรง 310 V

4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟตรง 310 โวลท์ ให้เป็นแรงดันไฟสลับที่แรงดันและความถี่ต่างๆ ตามความต้องการ เพื่อใช้ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบมอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิทช์

4.3 วงจรพีดับบลิวเอ็ม (PWM modulator) เป็นวงจรสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ทั้ง 6 ในวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS'51 เป็นตัวควบคุมหลักของการทำงานในส่วนนี้ ทั้งนี้มุมสวิทช์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มนี้ จะถูกคำนวณด้วยหลักการเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์ (Equal Area PWM. Technique)

5. สร้างโปรแกรมจำลองหารูปคลื่น และฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์พีดับบลิวเอ็มแบบหลักการเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Equal Area PWM. Technique)

6. ทดลองและบันทึกผลการทดลอง

7. สรุป วิจารณ์ และเสนอแนะสำหรับการพัฒนาเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิค พีดับบลิวเอ็ม

<u>ลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ</u>

มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟสลับ 3 เฟสประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือ ส่วนอยู่นิ่ง (Stator) และส่วนหมุน (Rotor) ส่วนอยู่นิ่งเป็นขดลวดซึ่งกระจายการพันอยู่ตามร่อง (Slot) จำนวน 3 ชุด แต่ละขดวางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้ามีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น สนามแม่เหล็กนี้จะแปรผันไปตามค่ากระแสขาเข้าขดลวดของส่วนอยู่นิ่ง และจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed)

$$w_s = 2\pi f/p \qquad (1)$$

โดย w_s = ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุน หน่วย เรเดียน/วินาที (rad/sec)

f = ความถี่ของแรงดันและกระแสจากแหล่งจ่าย หน่วย เฮิร์ทซ์ (Hz)

p = จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็กในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดส่วนอยู่นิ่ง จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในบริเวณช่องอากาศ (air gap) และเชื่อมโยง (Link) เข้าสู่ขดลวดตัวนำในส่วนหมุนซึ่งเป็นวงจรปิด เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (V_2) และกระแสไหลในส่วนหมุน (I_2) ทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ โดยแรงบิดของมอเตอร์ก็คือ กำลังงานกลที่เพลาของมอเตอร์ซึ่งเกิดจากกำลังไฟฟ้าในส่วนหมุนนั้น จึงได้สมการแรงบิดเป็น

$$T = k.\phi.I_2.\cos(\theta_2) \qquad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T = แรงบิดของมอเตอร์

k = ค่าคงที่

ϕ = ค่าปลั๊กซ์สูงสุดต่อ 1 ขั้วแม่เหล็ก

I_2 = กระแสในส่วนหมุน

θ_2 = มุมระหว่างแรงดันและกระแสในส่วนหมุน

ทั้งนี้ค่าสูงสุดของฟลั๊กซ์แม่เหล็กต่อขั้ว จะแปรผันตามค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่ (V/f) โดยพิจารณาจากสมการแรงดันเหนี่ยวนำตามกฎของเลนซ์ (Lenz'Law) และให้แรงดันเข้าเป็นสัญญาณชายน์ ดังสมการ (2),(3)

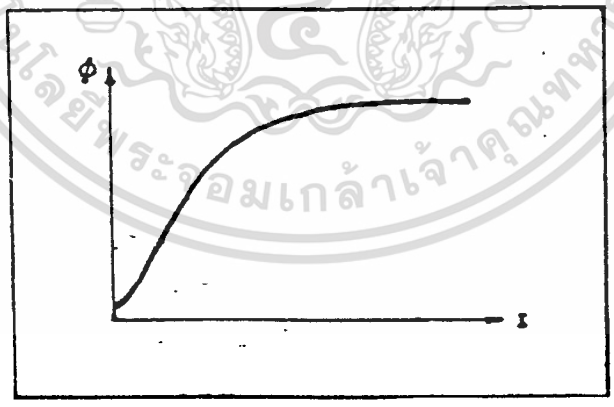
จากสมการแรงดันเหนี่ยวนำ $v = -N.(d\phi/dt)$

ดังนั้น $V.\sin(wt) = -N.(d\phi/dt)$

$$\int d\phi = -(1/N).\int \sin(wt).dt$$

$$\phi = -(1/2\pi N).(V/f).\cos(wt)$$

$$= k_1.(V/f).\cos(wt) \qquad (3)$$

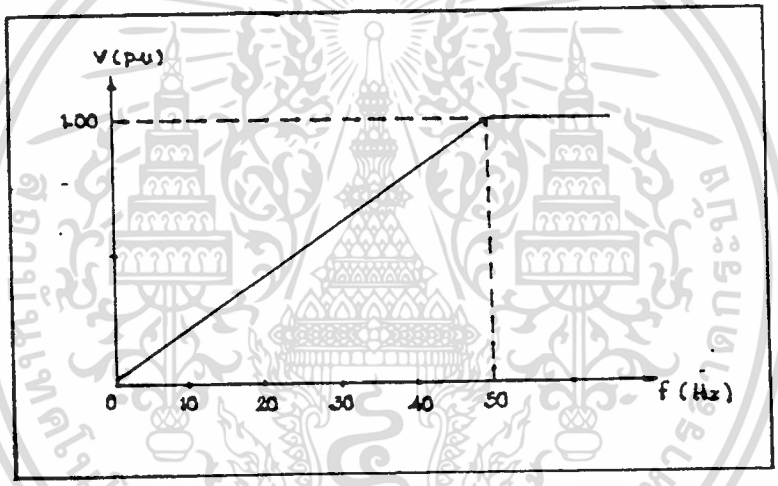


ภาพที่ 1 ลักษณะสมบัติการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization curve)

จะเห็นว่าค่าสูงสุดของฟลั๊กซ์แม่เหล็กแต่ละขั้ว แปรผันตรงกับอัตราแรงดันต่อความถี่ และโดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไปมักถูกออกแบบให้ฟลั๊กซ์แม่เหล็กอยู่ในบริเวณส่วนเข้าโค้งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

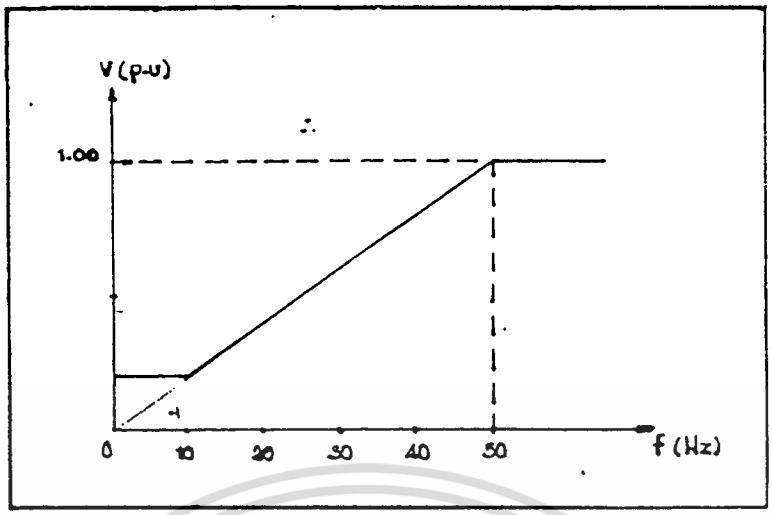
ลักษณะสมบัติการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization curve) ดังภาพที่ 1 การลดความถี่ลงโดยให้แรงดันเท่าเดิม ทำให้ฟลั๊กซ์สูงขึ้นจนเข้าสู่บริเวณอิ่มตัว (Saturation) เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron loss) ได้จึงต้องลดค่าแรงดันลง เช่นเดียวกันถ้าเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นจะทำให้ฟลั๊กซ์ลดลง แรงบิดของมอเตอร์ก็จะลดลงด้วย ทำให้ต้องเพิ่มแรงดันขึ้นเพื่อให้ฟลั๊กซ์ และแรงบิดของมอเตอร์คงที่ ดังนั้นจึงต้องรักษาอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ (V/f)ให้คงที่ตลอดเวลาขณะทำงาน



ภาพที่ 2 ลักษณะสมบัติของอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ทางอุดมคติ

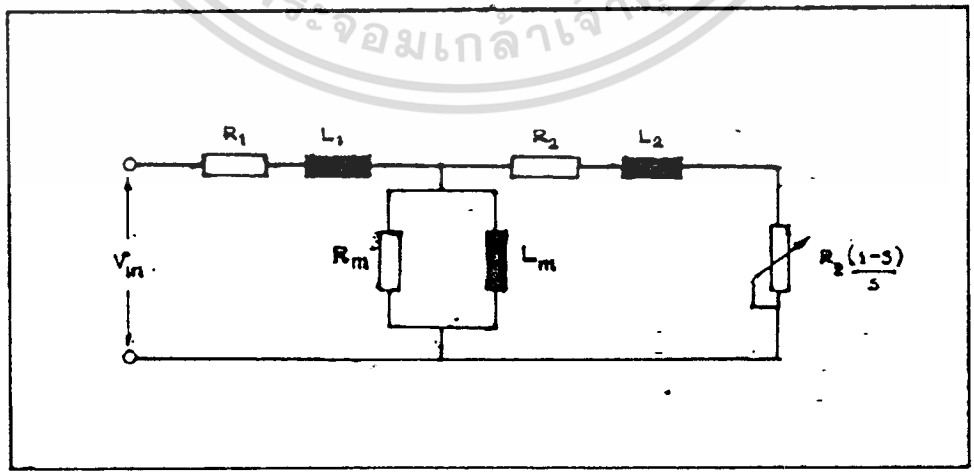
สำหรับกรณีความต้านทานของขดลวดในส่วนอยู่นิ่งมีค่าต่ำมาก แรงดันตกคร่อมความต้านทานก็จะต่ำมากจนสามารถตัดทิ้งได้ เราก็สามารถใช้อัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ดังภาพที่ 2. ได้ แต่ในกรณีที่ความต้านทานขดลวดมีค่าสูงแรงดันตกคร่อมความต้านทานก็จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งถ้าสูงเกินไปจะทำให้แรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำบริสุทธิ์ (Pure inductance) ของขดลวดนั้นต่ำมากเช่นกัน เป็นผลให้ฟลั๊กซ์ในช่องอากาศลดลงจนมอเตอร์มีแรงบิดไม่เพียงพอ ดังนั้นในทางปฏิบัติโดยเฉพาะสำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กเราต้องรักษาแรงบิดในขณะความถี่ต่ำ จึงมักใช้อัตราโวลท์ต่อเฮิรทซ์ดังภาพที่ 3.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3 ลักษณะสมบัติของอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ที่นิยมใช้ทั่วไป

มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไปทั้งแบบ 1 เฟสและ 3 เฟส มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนอยู่นิ่งและส่วนหมุนเหมือนกัน สำหรับส่วนหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดส่วนหมุนทรงกระรอก (Squirrel cage rotor) ซึ่งนิยมใช้กันมากสำหรับงานขนาดเล็ก และชนิดส่วนหมุนพันด้วยขดลวด (Wound rotor) สำหรับงานขนาดใหญ่ซึ่งปรับปรุงแรงบิดเริ่มต้นได้ อย่างไรก็ตามมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบใดๆ สามารถเขียนวงจรสมมูลแบบ 1 เฟส ได้ดังภาพที่ 4.



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
แบบแยกแสดงส่วนกำลังเชิงกล $R_2 (1-S)/s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้ R_1 = ความต้านทานขดลวดส่วนอยู่นิ่ง

R_2 = ความต้านทานขดลวดส่วนหมุนถ่ายโอนสู่ส่วนอยู่นิ่งแล้ว

L_s = ค่าอินดัคแตนท์รั่ว (Leakage inductance) ของขดลวดส่วนอยู่นิ่ง

L_r = ค่าอินดัคแตนท์รั่วของขดลวดส่วนหมุนถ่ายโอนสู่ส่วนอยู่นิ่งแล้ว

R_m = ค่าความต้านทานการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization resistance)

L_m = ค่าอินดัคแตนท์รั่วการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization inductance)

S = ค่าสลิป

ถ้าจ่ายแรงดันและกระแสรูปคลื่นซายน์ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขนาดแรงดันพิกัด มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วปกติ (W_n) ซึ่งต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (W_s) เพียงเล็กน้อยเกิดค่าสลิปขึ้น นอกจากวงจรสมมูลภาพที่ 4 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ข้ามช่องอากาศไปสู่ส่วนหมุนจะมีค่า

$$P_{ag} = M.(I_2)^2.(R_2/s)$$
$$= T.W_s \qquad (4)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในความต้านทานขดลวด

$$P_2 = M.(I_2)^2.R_2$$
$$= s.P_{ag}$$
$$= s.T.W_s \qquad (5)$$

กำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์

$$P_{mech} = P_{ag} - P_2$$
$$= M.(I_2)^2.R_2.(1/s-1)$$
$$= (1-s).T.W_s \qquad (6)$$

ทั้งนี้ M = จำนวนเฟสของมอเตอร์

P_{ag} = กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องอากาศสู่ส่วนหมุน

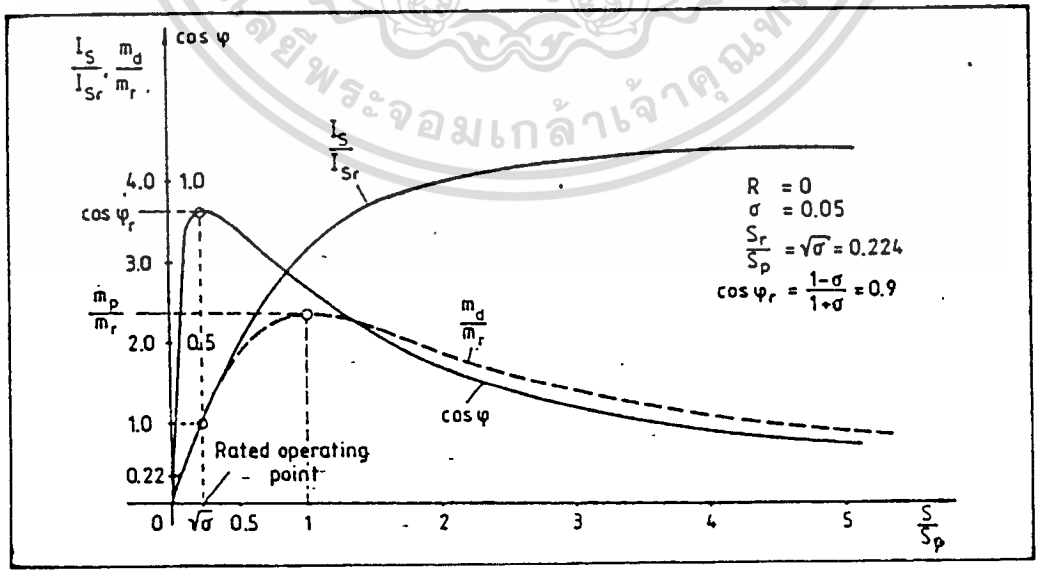
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
034826

P_2 = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในความต้านทานของส่วนหมุน หรือเรียกว่ากำลังสลิป (Slip power)

P_{mech} = กำลังงานเอ๊าท์พุทเชิงกลภายในมอเตอร์

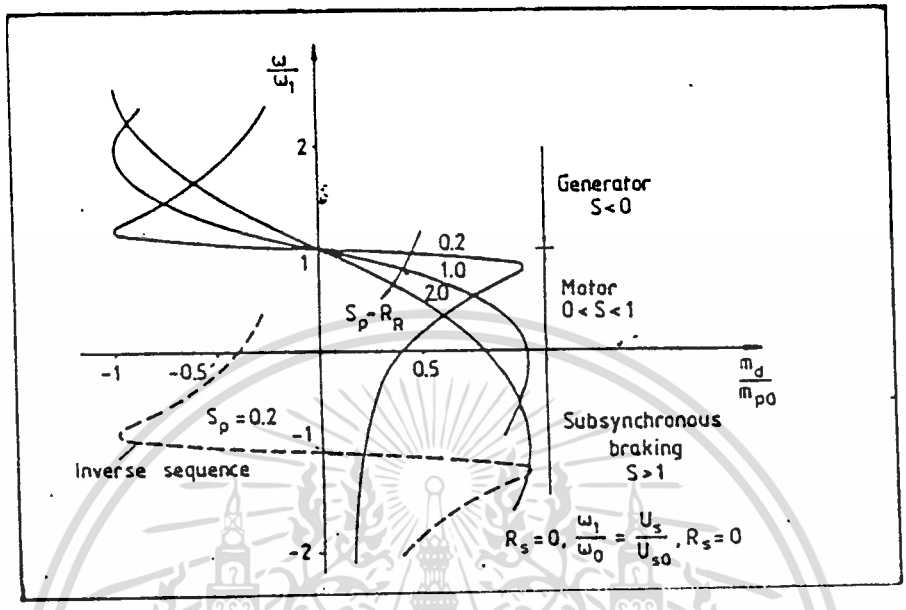
จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าในส่วนหมุนสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นเชิงกลและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด ซึ่งเห็นได้ว่าถ้าความต้านทานขดลวดสูงขึ้น สลิปจะมากขึ้นและประสิทธิภาพจะต่ำลง จึงไม่นิยมปรับความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีปรับความต้านทานส่วนหมุน ในทางตรงกันข้าม เราสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพมอเตอร์ให้ดีขึ้นได้ โดยนำกำลังสลิปป้อนกลับสู่วงจรแหล่งจ่ายไฟ หรือนำไปขับเคลื่อนช่วยหมุนให้มอเตอร์โดยตรงก็ได้เช่น วิธีการของระบบเครมเมอร์แบบสถิต (Static Kraemer system) เป็นต้น

ภาพที่ 5 แสดงลักษณะสมบัติระหว่างกระแส แรงบิด ตัวประกอบกำลังกับค่าสลิปขณะทำงานปกติ ทั้งนี้ระบุค่าตัวประกอบการรั่วของฟลั๊ก (Leakage factor) เป็น 0.05 ในขั้วขณะเริ่มหมุนมอเตอร์จะมีแรงหมุนสูงประมาณ 2-3 เท่าของแรงหมุนพิกัด ซึ่งกระแสจะสูงมากเช่นกันจากนั้นจึงเข้าสู่สภาวะทำงานปกติได้



ภาพที่ 5 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแส แรงหมุน ตัวประกอบกำลังกับค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



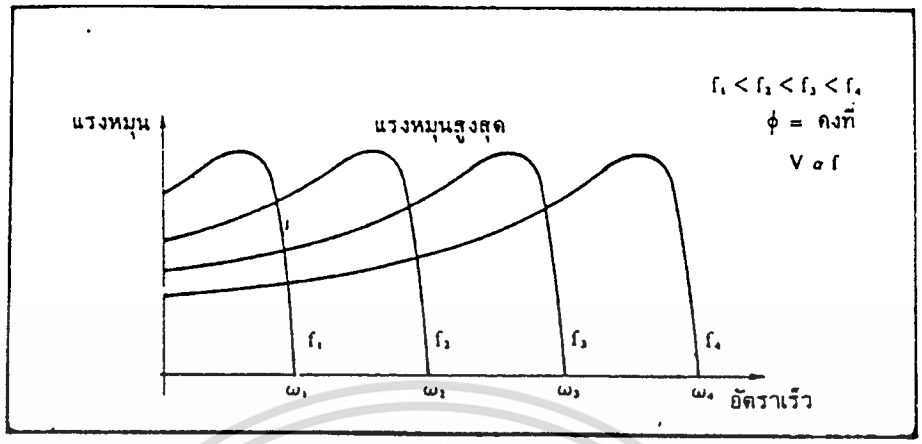
ภาพที่ 6 ลักษณะสมบัติระหว่างแรงหมุนกับความเร็วที่ความต้านทานส่วนหมุนต่างๆ

สำหรับลักษณะสมบัติระหว่างแรงหมุนกับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเป็นดังภาพที่ 6 ความเร็วทำงานตามปกติจะอยู่ระหว่างความเร็วซิงโครนัสและจุดแรงหมุนทลาย (Breakdown torque) ถ้ารับภาระมากจนแรงหมุนเกินกว่าค่าที่จุดนี้ ความเร็วจะลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ และหากสนามแม่เหล็กหมุนถูกกลับทิศทาง มอเตอร์จะหยุดหมุนทันที ถ้ายังคงสภาวะนี้ต่อไปอีก มันจะหมุนด้วยความเร็วปกติในทิศตรงข้ามกับทิศทางเดิม เรียกบริเวณนี้ว่า "บริเวณพลักกิง" หรือ "การเบรคแบบชับชิงโครนัส" (Plugging or Subsynchronous braking)

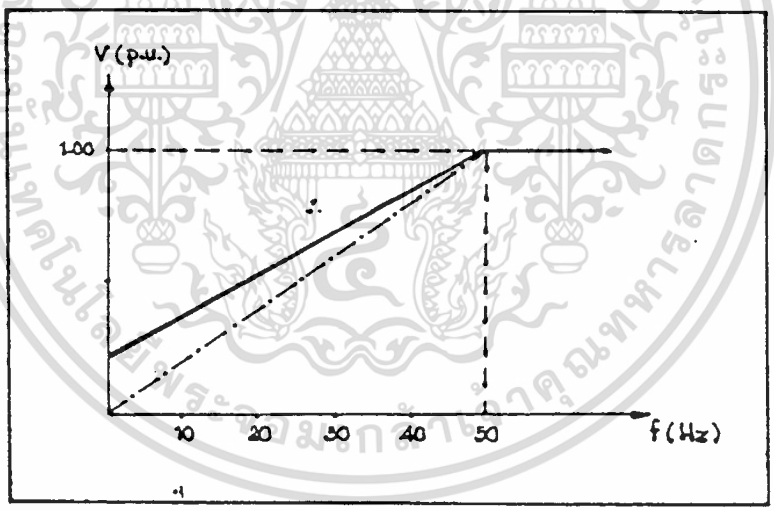
ในทางตรงกันข้าม ถ้าช่วยขับด้วยเชิงกลภายนอกให้มีความเร็วสูงกว่าซิงโครนัส (Super synchronous speed) พลังงานในส่วนหมุนจะส่งผ่านเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ส่วนอยู่นิ่ง และแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้

ดังนั้นเมื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต้องควบคุมฟลั๊กซ์ในช่องอากาศให้คงที่ ด้วยการรักษาอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ให้คงที่เสมอจะทำให้ได้ลักษณะสมบัติระหว่างแรงบิดกับความเร็วที่ความถี่ต่างๆ เป็นดังภาพที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 7 ลักษณะสมบัติระหว่างแรงบิดกับความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างๆ เมื่อฟลั๊กซ์ในช่องอากาศคงที่



ภาพที่ 8 ลักษณะอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์อีกรูปแบบหนึ่ง

อย่างไรก็ตาม มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่ต่ำๆ อาจเกิดปัญหาแรงบิดสูงสุดลดลงมาก เนื่องจากขณะความถี่ต่ำ แรงดันตกคร่อมความต้านทานจะมีขนาดใกล้เคียงหรือมากกว่าแรงดันตกคร่อมค่าดั๊คแต๊นท์ในวงจรสมมูล ทำให้ฟลั๊กซ์ในช่องอากาศ, และแรงบิดต่ำมากเกินไปจึงต้องชดเชยแรงดันขณะทำงานที่ความถี่ต่ำด้วยอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ ดังแสดงในภาพที่ 3 หรือในภาพที่ 8 ตามความต้องการ

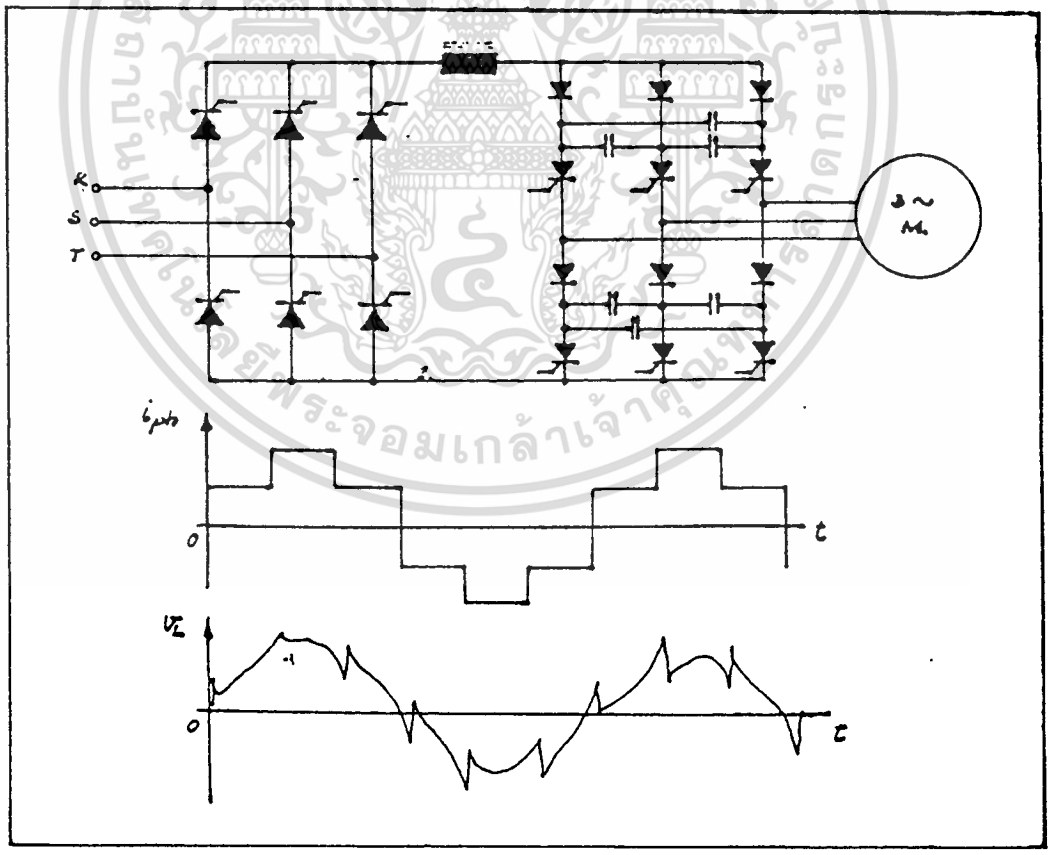
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับความถี่

เครื่องควบคุมความเร็วแบบปรับความถี่โดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ชุดเรคติไฟเออร์พร้อมวงจรกรอง ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ และชุดสร้างสัญญาณควบคุม ทั้งนี้ เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบปรับความถี่ยังสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. เครื่องควบคุมความเร็วแบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Fed Inverter drive)

เครื่องควบคุมความเร็วแบบนี้จะแปรพลังงานด้านเข้าให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสควบคุมกระแสโดยใช้อุปกรณ์สวิทช์กำลัง 6 ตัว และขดลวด (Choke) ขนาดใหญ่ เพื่อให้กระแสต่อเนื่องและราบเรียบ วงจรอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมการสวิทช์ตามลำดับ ทำให้เกิดกระแสไฟสลับรูปซายน์ที่ปรับความถี่ได้ วงจรและรูปคลื่นแรงดัน กระแสจะเป็นดังภาพที่ 9. เครื่องควบคุมแบบนี้มีฮาร์โมนิกของกระแสต่ำ ไม่มีการกระตุกของความเร็วและแรงบิด การควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ค่อนข้างยุ่งยากจึงเหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์ขนาดใหญ่เท่านั้น

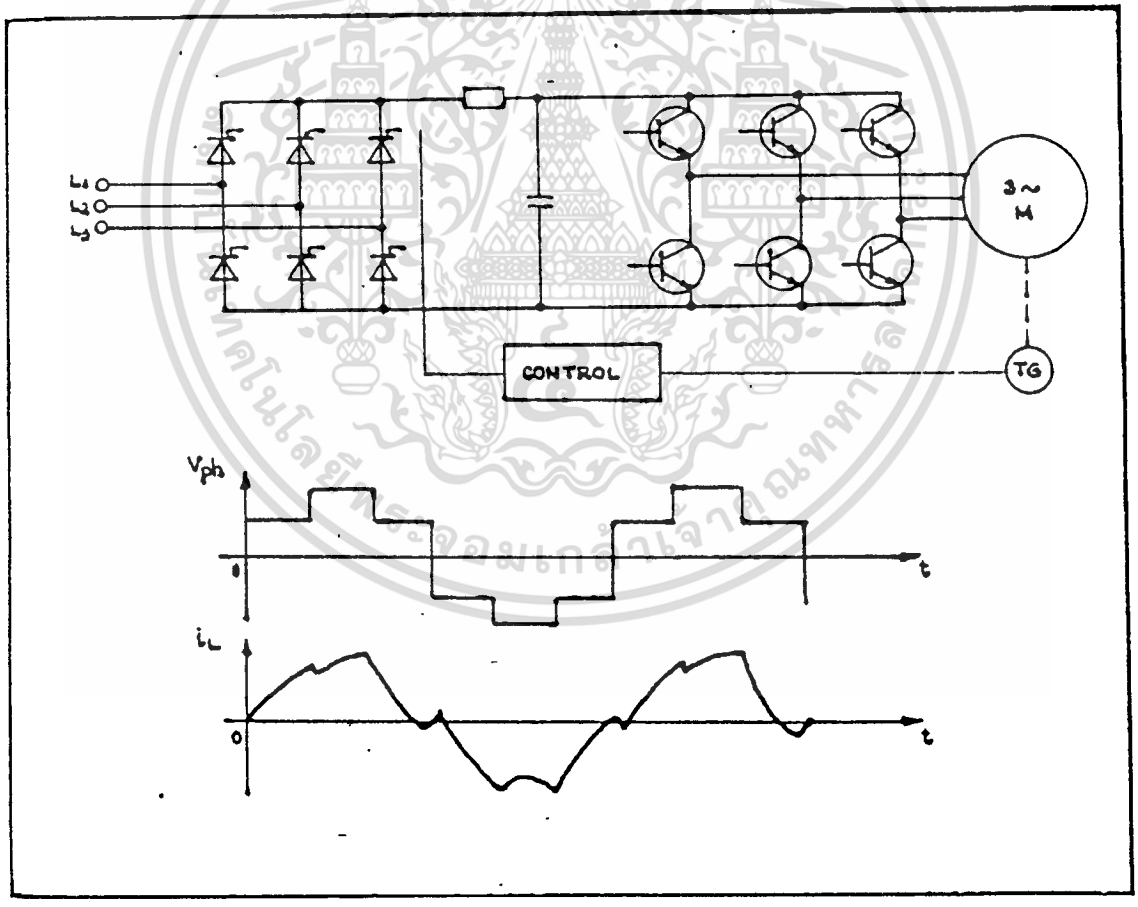


ภาพที่ 9 วงจร รูปคลื่นกระแส แรงดัน ของเคลื่อนควบคุมความเร็วแบบแหล่งจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องควบคุมความเร็วแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Fed Inverter drive) ชนิดปรับระดับแรงดันไฟตรง (Variable DC link voltage)

อินเวอร์เตอร์ของเครื่องควบคุมนี้ถูกจุดชนวนตามวิธีควบคุมเฟส โดยแหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟตรงปรับระดับได้ จากวงจรเรคติฟายเออร์ชนิดควบคุมได้ดังภาพที่ 10 ทำให้สามารถปรับอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ (V/F) ได้ตามต้องการ จากรูปคลื่นแรงดัน, กระแสจะเห็นว่าฮาร์โมนิกของกระแสที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับค่ารีแอ็คแตนท์รั่ว (Leakage reactance) นั้นยังอยู่ในอัตราที่สูงกว่าแบบแรก จึงทำให้เกิดผลเสียทั้งกำลังสูญเสียในมอเตอร์และการกระตุกของความเร็ว แรงบิด วิธีนี้จึงเหมาะสมสำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กๆ เท่านั้น



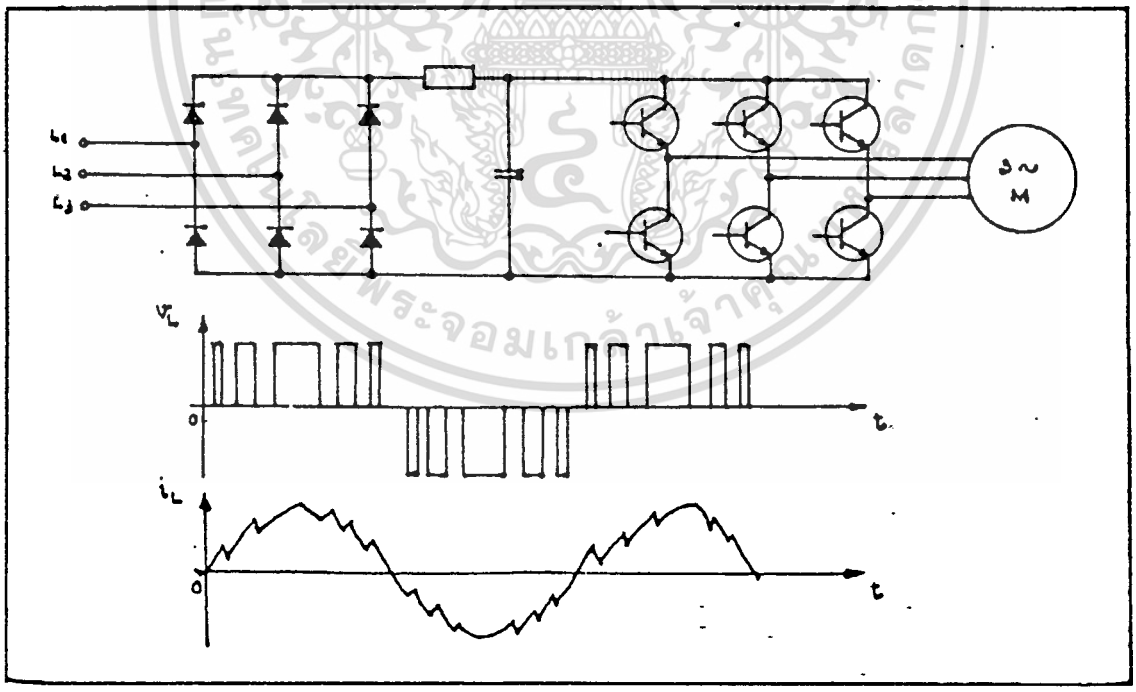
ภาพที่ 10 วงจร รูปคลื่นแรงดันกระแสของเครื่องควบคุมความเร็วแบบแหล่งจ่ายแรงดันชนิดปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องควบคุมความเร็วแบบมอดูเลทตามความกว้างพัลส์ (PWM.Inverter drive)

อินเวอร์เตอร์ของเครื่องควบคุมแบบนี้ ถูกควบคุมการสวิทช์โดยวิธีการมอดูเลทตามความกว้างพัลส์ จากวงจรสร้างสัญญาณควบคุมแบบ พีดับบลิวเอ็ม (PWM. หรือ Pulse Width Modulation) ที่สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ โดยรับแรงดันไฟตรงค่าคงที่จากวงจรเรคติฟายเออร์และวงจรกรองสัญญาณ จึงทำให้ได้รูปคลื่นแรงดัน กระแสดังภาพที่ 11 จะเห็นว่าอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ จะต้องมีความถี่ในการสวิทช์ (Switching frequency) สูงกว่าอุปกรณ์สวิทช์กำลังที่ใช้ใน 2 แบบแรก

ฮาร์โมนิกของแรงดันที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับความถี่การสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์กำลัง ส่วนฮาร์โมนิกของกระแสยังขึ้นอยู่กับค่ารีแอคแตนท์รั่วของมอเตอร์ ซึ่งฮาร์โมนิกทั้ง 2 นี้จะมีค่าต่ำกว่าฮาร์โมนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ในแบบที่ 2 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไป



ภาพที่ 11 วงจร รูปคลื่นแรงดันกระแสของเครื่องควบคุมความเร็วแบบ พีดับบลิวเอ็ม

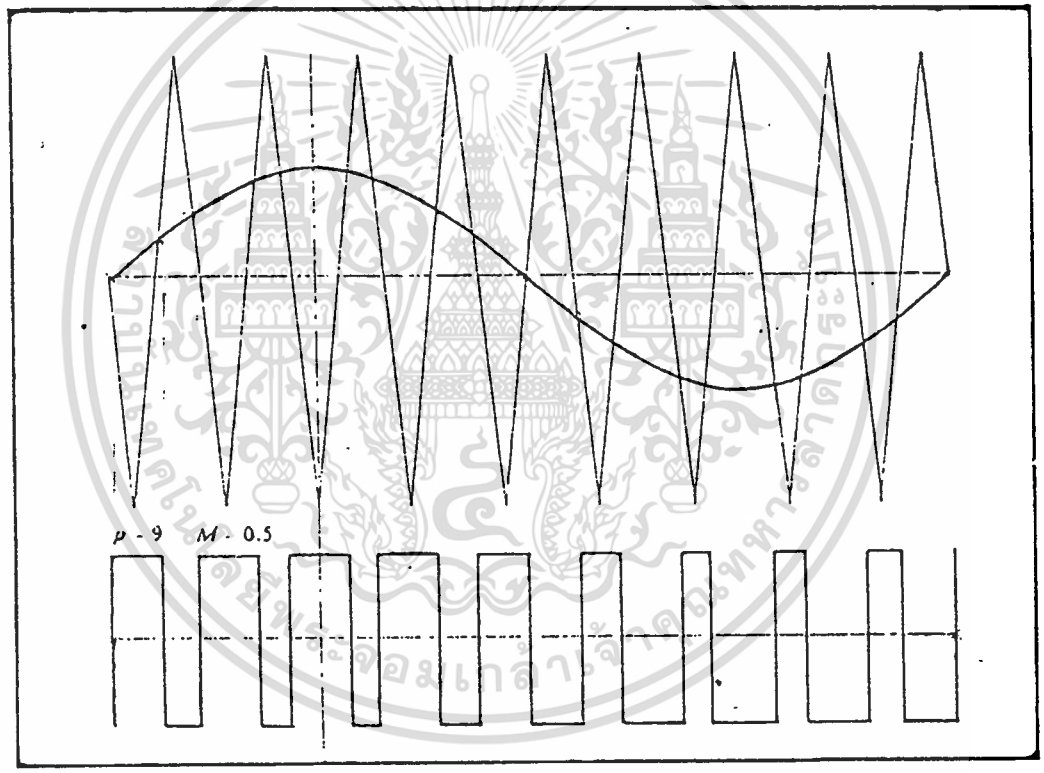
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการมอดูเลทสัญญาณตามความกว้างพัลส์

สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันและความถี่ตามต้องการ มีการสร้างสัญญาณที่นิยมใช้กันทั่วไป 2 หลักการคือ

1. เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบฮาร์โมนิกย่อย (Sub Harmonic PWM. Technique)

วิธีการนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "หลักการพีดับบลิวเอ็มแบบสัญญาณซายน์"(Sinusoidal PWM) เป็นสัญญาณควบคุมที่ได้จากการสุ่มระหว่างสัญญาณอ้างอิงรูปซายน์กับสัญญาณพาห์รูปคลื่นสามเหลี่ยมดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มตามวิธีฮาร์โมนิกย่อย

จากภาพที่ 12 ความถี่การสวิทย์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณพาห์รูปคลื่นสามเหลี่ยม ทั้งนี้เราสามารถคำนวณหาค่ามุมสวิทช์ (Switching angle) ที่เกิดขึ้นใน 1/4 วัฏจักรของความถี่ขาออก (Output frequency) ได้ตามสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A.\sin(\alpha_i) = (-1)^i.(2.i - \frac{2.p.\alpha_i}{\pi}) \qquad (7)$$

โดย A = ตัวประกอบความสูง ระหว่างค่าสูงสุดสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณพาห์

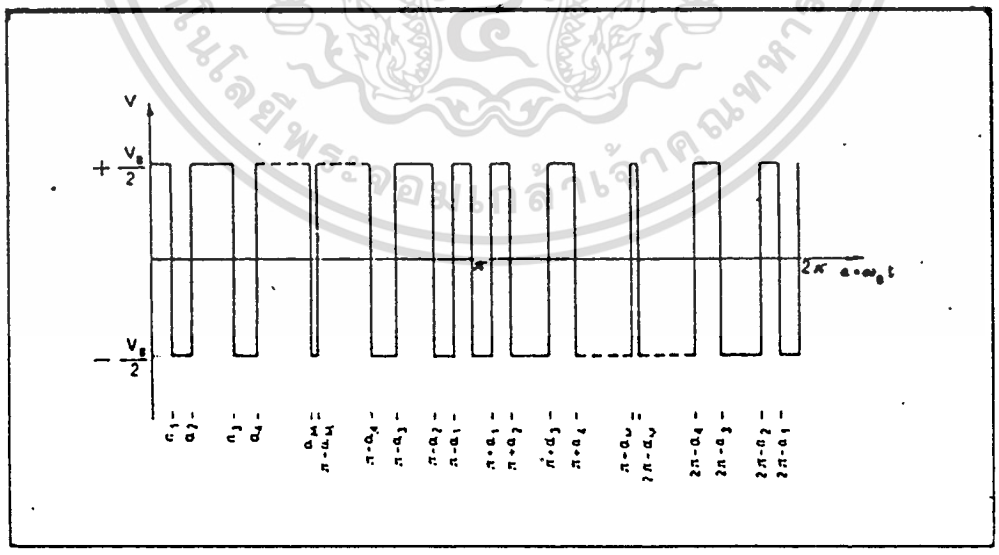
P = อัตราส่วนระหว่างความถี่สัญญาณพาห์กับความถี่สัญญาณอ้างอิง

α_i = มุมสวิทช์ใดๆ ในช่วง 1/4 วัฏจักร โดย $1 < i < (p-1)/2$

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการออกแบบวงจรควบคุมแบบประยุกต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ เราสามารถคำนวณค่ามุมสวิทช์สำหรับทุกความถี่ขาออก เพื่อเก็บไว้ในหน่วยความจำของวงจรได้เช่นกัน

2. เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบกำจัดฮาร์โมนิก(Harmonic Elimination Technique)

วิธีการนี้ใช้สำหรับวงจรควบคุมแบบดิจิตอล หรือควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์เท่านั้น โดยนำค่ามุมที่คำนวณได้ตามหลักการนี้สำหรับทุกความถี่ขาออกเก็บไว้ในหน่วยความจำของวงจร หลักการคำนวณมาจากทฤษฎีฟูริเอตามรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มดังภาพที่ 13. โดยจะคำนวณหามุมสวิทช์ใน 1/4 ของวัฏจักร



ภาพที่ 13 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีการสวิทช์ M ครั้งใน 1/4 วัฏจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_{2M}$ เป็นมุมสวิทช์ใน 1/2 วัฏจักรซึ่งเขียนเป็นสมการอนุกรมฟูริเอได้ดังนี้

$$f(wt) = \sum_{n=i}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (8)$$

โดย $$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t)\sin(n\omega t)\, d(\omega t) \quad (9)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t)\cos(n\omega t)\, d(\omega t) \quad (10)$$

แทน $f(wt)$ ในสมการ a_n และใช้คุณสมบัติการสวิทช์ตามสัญญาณภาพที่ 13.

$$a_n = \frac{2}{\pi}\sum_{k=0}^{2M}(-1)^k \int_{\alpha_k}^{\alpha_{k-1}} \sin(n\omega t)\, d(\omega t)$$

โดย $\alpha_0 = 0$, $\alpha_{2M+1} = \pi$ และอินทิเกรทสมการ a_n จะได้

$$a_n = \frac{2}{n\pi}\sum_{k=0}^{2M}(-1)^k [\cos(n\alpha_k) - \cos(n\alpha_{k+1})]$$

$$= \frac{2}{n\pi}[\cos n\alpha_0 - \cos n\alpha_{2M+1} + 2\sum_{k=1}^{2M}(-1)^k \cos n\alpha_k] \quad (11)$$

เนื่องจาก $\alpha_0 = 0$, $\alpha_{2M+1} = \pi$ จะได้ $\cos(n\alpha_0) = 1$, $\cos(n\alpha_{2M+1}) = (-1)^n$

ดังนั้น

$$a_n = \frac{2}{n\pi}[1 - (-1)^n + 2\sum_{k=1}^{2M}(-1)^k \cos n\alpha_k] \quad (12)$$

ทำนองเดียวกัน $$b_n = -\frac{4}{n\pi}\sum_{k=1}^{2M}(-1)^k \sin n\alpha_k \quad (13)$$

เนื่องจากสมมาตรในครึ่งวัฏจักร $a_n = 0, b_n = 0$ สำหรับ n เลขคู่ ดังนั้นสำหรับ n เลขคี่

$$a_n = \frac{4}{n\pi}\left[1 + \sum_{k=1}^{2M}(-1)^k \cos n\alpha_k\right] \quad (14)$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi}\left[-\sum_{k=1}^{2M}(-1)^k \sin n\alpha_k\right] \quad (15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการสมมาตรกันใน 1/4 วัฏจักร ซึ่ง $\alpha_k = \pi - \alpha_{2M-k+1}$, k=1,2....M และ sin(n) = 0, cos(nπ) = -1 เมื่อ n เลขคี่ ดังนั้น

$$\begin{aligned}\sin\ n\alpha_k &= \sin\ n(\pi - \alpha_{2M-k+1}) \\ &= [\sin n\pi \cos n\alpha_{2M-k+1} - \cos n\pi \sin n\alpha_{2M-k+1}] \\ &= \sin\ n\alpha_{2M-k+1} \qquad k=1,2,..,M\end{aligned}$$

เช่นเดียวกัน

$$\begin{aligned}\cos\ n\alpha_k &= \cos\ n(\pi - \alpha_{(2M-k+1)}) \\ &= -\cos\ n\alpha_{(2M-k+1)} \qquad k=1,2,..,M\end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ b_n, a_n ตามลำดับ

$$b_n = \frac{4}{n\pi}\sum_{k=1}^{M}(\sin n\alpha_k - \sin n\alpha_{(2M-k+1)}) = 0 \qquad (16)$$

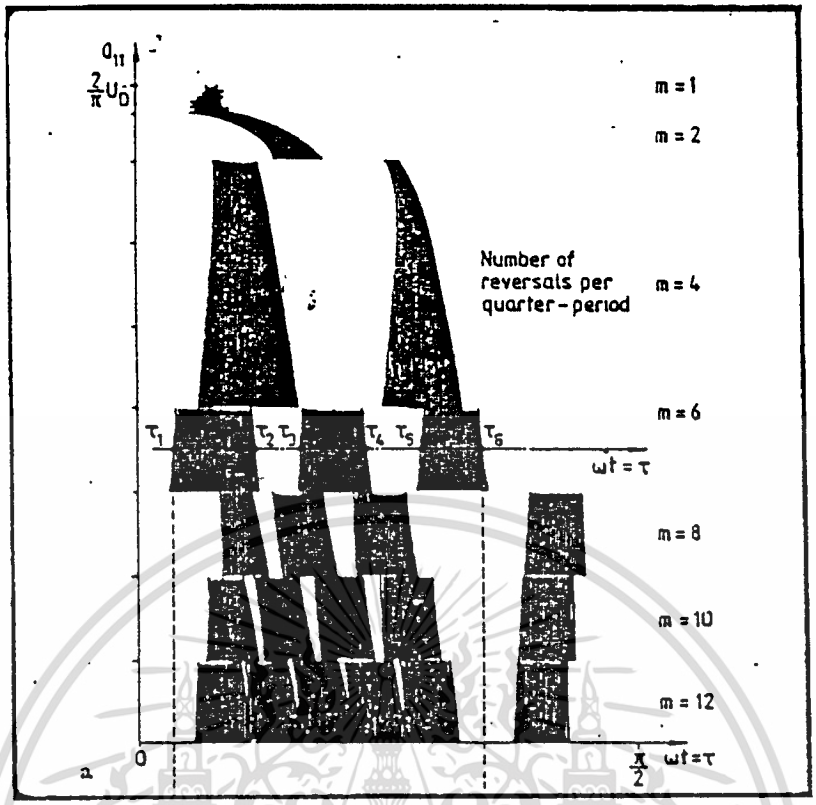
$$a_n = \frac{4}{n\pi}\left[1 + 2\sum_{k=1}^{M}(-1)^k \cos n\alpha_k\right] \qquad (17)$$

จากสมการ a_n นี้ สามารถจัดตั้งสมการได้ถึง M สมการ โดยแต่ละสมการเป็นตัวแทนของฮาร์โมนิกลำดับ n ต่างๆ ที่ต้องการกำจัดทิ้ง และถ้ากำหนดให้สมการแรกสำหรับฮาร์โมนิกหลักมูลแล้ว จะเห็นว่าใน 1/4 วัฏจักรเราสามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้จำนวน M-1 ตัว

อย่างไรก็ตามการกำจัดฮาร์โมนิกสำหรับสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่นิยมกำจัดฮาร์โมนิกลำดับคี่ที่เป็นตัวคูณ 3 เช่นลำดับ 3,9,15.... เพราะฮาร์โมนิกเหล่านี้จะทำลายซึ่งกันและกันเองจนมีค่าเป็นศูนย์

ตัวอย่างแพทเทอร์นของสวิทช์ระหว่างมุมสวิทช์ (α_1)และค่าองค์ประกอบหลักมูล (a_1) จะเป็นดังภาพที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 14 แพทเทอร์นการสวิทช์

เทคนิคพีดับบลิวเอ็ม แบบเทียบพื้นที่ใต้โค้งชายน์

จากหลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มทั้งสองหลักการที่กล่าวมาแล้วนั้น จะเห็นว่ามีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันเช่น แบบฮาร์โมนิกย่อยสามารถคำนวณหามุมได้ง่าย แต่วงจรควบคุมมักเป็นแบบอนาลอกที่ยุ่งยากต่อการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มฟังก์ชันใดในวงจรควบคุมนั้นๆ ส่วนวิธีกำจัดฮาร์โมนิกสามารถลดฮาร์โมนิกในระบบลงได้มาก อีกทั้งวงจรควบคุมต้องเป็นวงจรดิจิตอลหรือไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสะดวกต่อการเปลี่ยนแปลง เพิ่มเติมฟังก์ชั่นในวงจรควบคุม แต่ก็ยุ่งยากในการคำนวณมากไป และเช่นเดียวกันขณะที่ความถี่สูงขึ้น จำนวนฮาร์โมนิกที่สามารถกำจัดได้ก็จะน้อยลงเรื่อยๆ ไม่เป็นไปตามต้องการที่ทุกความถี่ขาออก

สำหรับเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม แบบเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้งนี้ ยังคงใช้วิธีคำนวณมุมสวิทช์เพื่อนำไปเก็บในหน่วยความจำของวงจรควบคุม ซึ่งเป็นแบบดิจิตอล หรือไมโครโปรเซสเซอร์เช่นกัน ทั้งนี้จะใช้หลักการแบ่งฐานเวลาของสัญญาณที่ความถี่หลักมูลขาออกใน 1 วัฏจักรออกเป็นส่วนย่อย ช่วงละเท่าๆ กัน จำนวน N_{st} ส่วน จำนวนส่วนย่อยนี้จะต้องเป็นเลขคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเป็นตัวคูณของ 3 (ในกรณีอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส) ซึ่งจะมีค่ามากน้อยเท่าไรก็ได้ จากภาพที่ 15 ข. และ ค. จะเห็นว่ายิ่งแบ่งส่วนย่อยมากขึ้นเท่าใด กระแสของมอเตอร์ก็จะใกล้เคียงรูปคลื่นซายน์มากขึ้นเท่านั้น

<u>การคำนวณหาค่ามุมในแต่ละส่วนย่อย</u>

จากภาพที่ 15 ง. จะเห็นว่าเราสามารถคำนวณหาค่าคาบเวลาของพัลส์ส่วนย่อย (Switching time : T_s) ความถี่ในการสวิทช์ (Switching frequency :f_s)ได้จากค่าความถี่ขาออก(Output frequency :f_o) และจำนวนพัลส์ส่วนย่อยที่ต้องการได้

$$f_s = N_{st}.Z.f_o \qquad (18)$$

$$T_s = 1/(f_s) = 1/(N_{st}.Z.f_o) \qquad (19)$$

โดย อัตราคาบมุมสวิทช์แต่ละส่วนย่อยจะเท่ากับ

$$\Delta\alpha = 360/(N_{st}.Z)$$

ค่าตัวนับเวลา (Time counter :THO) นี้จะใช้ในการจัดตั้งค่าคาบเวลาของสัญญาณส่วนย่อย ซึ่งในกรณีที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS'51 เป็นตัวควบคุมในวงจรควบคุมสามารถคำนวณค่าต่างๆ ในการสร้างสัญญาณได้ดังนี้

$$T_s = (2^B-THO).(1/f_{ck}) \qquad (20)$$

จากนั้นการคำนวณหาค่าตัวนับที่จะนำไปเก็บในหน่วยความจำ

$$Aw = Tm.\ (1+ A.\sin(\alpha)) \qquad (21)$$

ทั้งนี้ f_{ck} = ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในวงจรควบคุม

B = ค่าบิทของตัวนับฐาน 2 ของไมโครคอนโทลเลอร์ (ดูภาคผนวก ค.)

THO = ค่าตัวนับเวลาเพื่อจัดตั้งคาบเวลาส่วนย่อย

Aw = ค่าตัวนับของมุมสวิทช์ในส่วนย่อยต่างๆ

A = ตัวประกอบความสูงของสัญญาณ (Amplitude factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tm = ค่าตัวนับที่ทำให้ค่าเฉลี่ยส่วนย่อยเป็น 1.00 = $(2^B - THO)/2$

α = ค่ามุมของแต่ละสัญญาณส่วนย่อย

N_{st} = จำนวนพัลส์ส่วนย่อยใน 1 คาบ

Z = จำนวนพัลส์ซ้ำในแต่ละพัลส์ส่วนย่อย

<u>ตัวอย่าง</u> อินเวอร์เตอร์วงจรหนึ่ง ออกแบบโดยใช้การควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิทความถี่สัญญาณนาฬิกา 0.33 เมกะเฮิร์ทซ์ ถ้าต้องการสัญญาณพีดับบลิวเอ็มความถี่ 50 เฮิร์ท โดยแบ่งเป็น 30 ส่วนย่อย จำนวนพัลส์ซ้ำในส่วนย่อยเท่ากับ 1.00 จงคำนวณค่าตัวนับที่จะเก็บในหน่วยความจำ (ให้ A = 1.00)

วิธีทำ T_s = 1/1500 = 666 s

THO = 256-(666x0.33) = 32

Tm = (256-32)/2 = 112

$\Delta\alpha$ = 360/30 = 12

<u>ตารางที่ 1</u> ผลคำนวณค่าตัวนับจากหลักการเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์

ส่วนที่	มุม (°)	ค่าตัวนับ (Aw)	คิดเป็นมุม (°)	ส่วนที่	มุม (°)	ค่าตัวนับ (Aw)	คิดเป็นมุม (°)
1	0	112	5.0	9	96	223	106.4
2	12	135	18.3	10	108	218	118.2
3	24	157	31.4	11	120	209	129.8
4	36	178	44.3	12	132	195	141.1
5	48	195	57.1	13	144	178	152.3
6	60	209	69.8	14	156	157	163.4
7	72	218	82.2	15	168	135	174.3
8	84	223	94.4				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่ามุมสวิทช์ที่ได้จริงไม่ตรงกับค่ามุมสวิทช์ที่ใช้ในการคำนวณตัวนับ (Aw) ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้ทำการเฉลยหาค่ามุมสวิทช์ที่ตรงกับค่าที่ใช้ในการคำนวณตัวนับ (Aw) จริง โดยใช้ทฤษฎีไบเซคชั่น (Bisection) ของการคำนวณเชิงเลขช่วยในการคำนวณค่ามุมสวิทช์ดังกล่าว แผนผังและโปรแกรมการคำนวณมุมสวิทช์ตามหลักการนี้ แสดงไว้ในภาคผนวก ก

<u>การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของกระแสจากวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ</u>

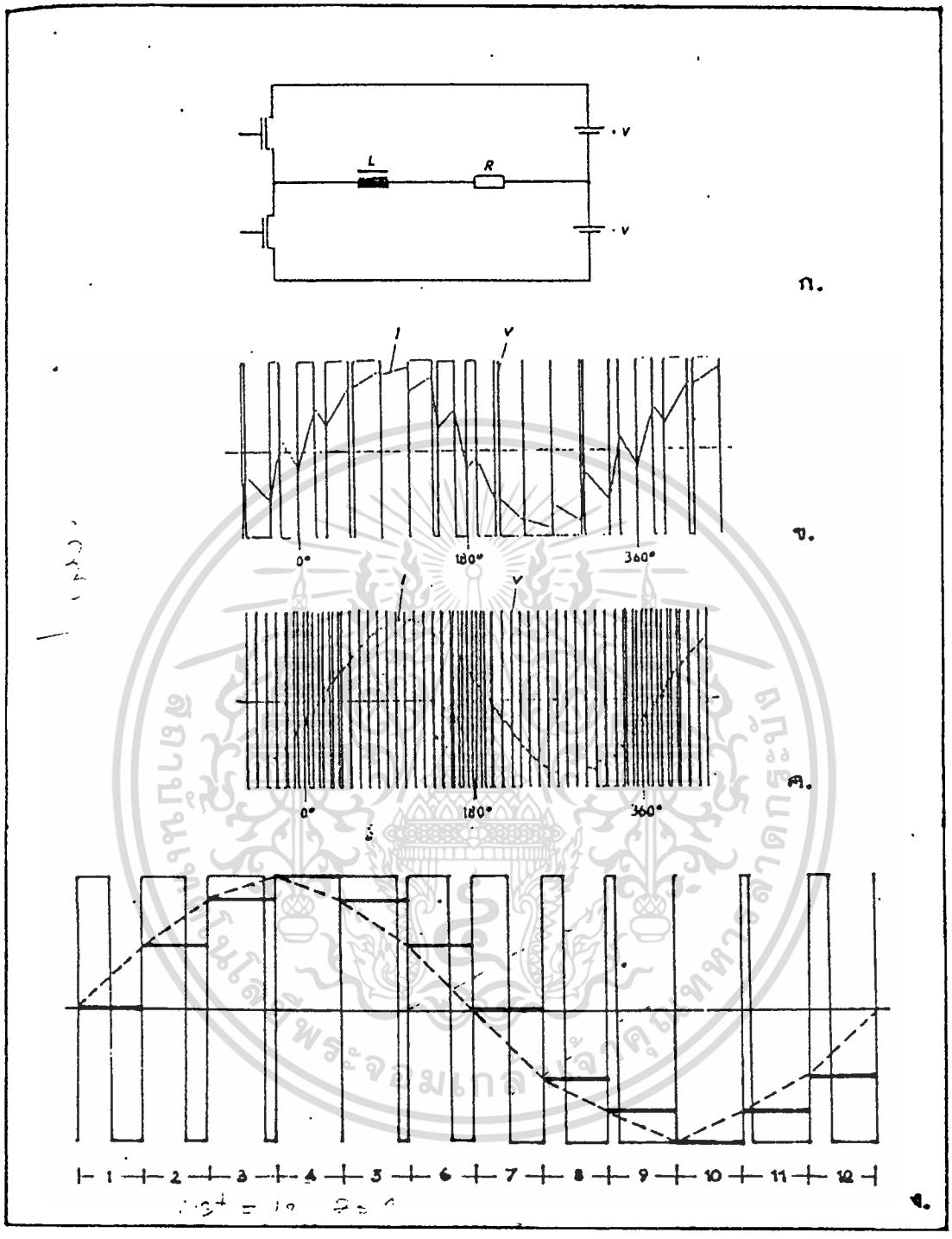
ฮาร์โมนิก หรือภาวะในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่ มักเกิดจากเครื่องควบคุมต่างๆ ในงานอุตสาหกรรมซึ่งใช้อุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์กำลังแทบทั้งสิ้น เช่น คอนเวอร์เตอร์ เตาหลอมโลหะแบบอาร์ค หรือ ความถี่สูง และเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น จึงถือได้ว่าวงจรอินเวอร์เตอร์ในเครื่องควบคุมความเร็ว เป็นต้นกำเนิดตัวหนึ่งของฮาร์โมนิก ถ้าฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับความถี่หลักมูลในระบบก็จะไม่เป็นอันตรายต่อระบบ แต่ถ้าสูงเกินไป ก็ต้องถูกกำจัดออกจากระบบนั้น เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบเสียหายหรือมีประสิทธิภาพต่ำลง

เนื่องจากเครื่องควบคุมความเร็วมีภาวะเป็นมอเตอร์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงภาวะเชิงกลบ่อย ๆ โครงงานนี้จึงได้พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจากกระแสขาออกจากอินเวอร์เตอร์ โดยทำการจำลองหารูปคลื่นกระแสขาเข้าและฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ของกระแสจำลองนี้ จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะใช้ทดสอบเชิงปฏิบัติ ตามหลักการเทคนิคพีดับบลิวเอ็ม แบบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้ง (Equal Area PWM.)

โดยได้กล่าวถึงรายละเอียดของหลักการมาแล้ว

มอเตอร์ที่จะใช้หากระแสจำลองนี้ มีผลการทดสอบเพื่อหาวงจรสมมูลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 15 หลักการสร้างสัญญาณพีดับบลิวแบบเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้ง

ก. วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์อย่างง่าย (ใน 1 เฟส)

ข. เพื่อแบ่งส่วนย่อยเป็น 12 ส่วน

ค. เพื่อแบ่งส่วนย่อยเป็น 36 ส่วน

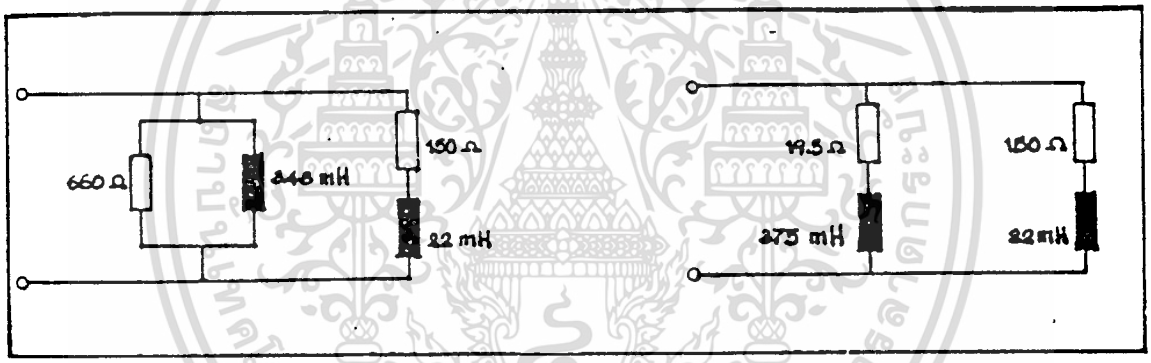
ง. รายละเอียดต่างๆในการแบ่งส่วนย่อย (ตัวอย่างแบบ 12 ส่วนย่อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้ในการปฏิบัติ

ค่าที่วัด	ทดสอบขณะไม่มีภาระ	ทดสอบขณะหยุดหมุน
V_t	220 Volt	58 Volt
I_t	3.2 Amp	6.6 Amp
P	200 Watt	550 Watt

ถ้ากำหนดให้ขณะทำงานปกติ ค่าสลิปเท่ากับ 0.05 จะเขียนวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 16.



ภาพที่ 16 วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทดสอบเครื่องควบคุมความเร็ว

ก. แบบ R_m และ L_m ต่อขนาน

ข. แบบ R_m และ L_m ต่อขนาน

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังภาพที่ 16 ข. สามารถเขียนสมการกระแสขาเข้าเชิงเวลา (Time domain) ในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณแบบพีคับบลิวเอ็ม ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} i(t) &= i_1(t) + i_2(t) \\ &= (V/R_1).(1-e^{(t/\tau)}_1) + (V/R_2).(1-e^{(t/\tau)}_2)+ \\ &\quad i_{1(0)}.e^{(t/\ )}_1+i_{2(0)}.e^{(t/\ )}_2 \end{aligned} \qquad (22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าเวลาคงตัว $\tau_1 = R_1/L_1$

และ $\tau_2 = R_2/L_2$

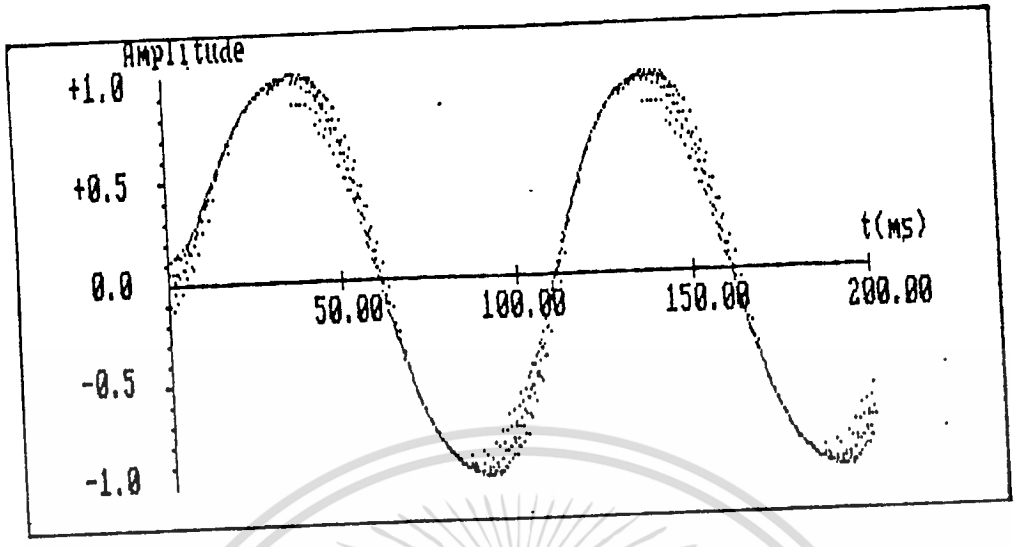
จากสมการที่ 20. จะนำไปเขียนโปรแกรมการคำนวณหาค่ากระแสขาเข้ามอเตอร์ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ข. จากนั้นจึงคำนวณหาค่ากระแสในเชิงความถี่ โดยใช้โปรแกรมฟาสท์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform หรือ FFT.Program) ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ข. เช่นกัน เพื่อเปลี่ยนสมการเชิงเวลาให้เป็นสมการเชิงความถี่ ทั้งนี้เพื่อเขียนรูปคลื่น และสเปคตรัมฮาร์โมนิกกระแสของมอเตอร์

ทั้งนี้เมื่อนำค่ามุมสวิทช์ที่คำนวณไว้แล้ว ตามหลักการของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้งซายน์ มาคำนวณหากระแสเชิงความถี่ด้วยโปรแกรมด้วกล่าว ทำให้ได้ผลการจำลองรูปคลื่นและองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสมอเตอร์ โดยแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแบบพีดับบลิวเอ็ม ที่ความถี่ขาออกต่างๆ

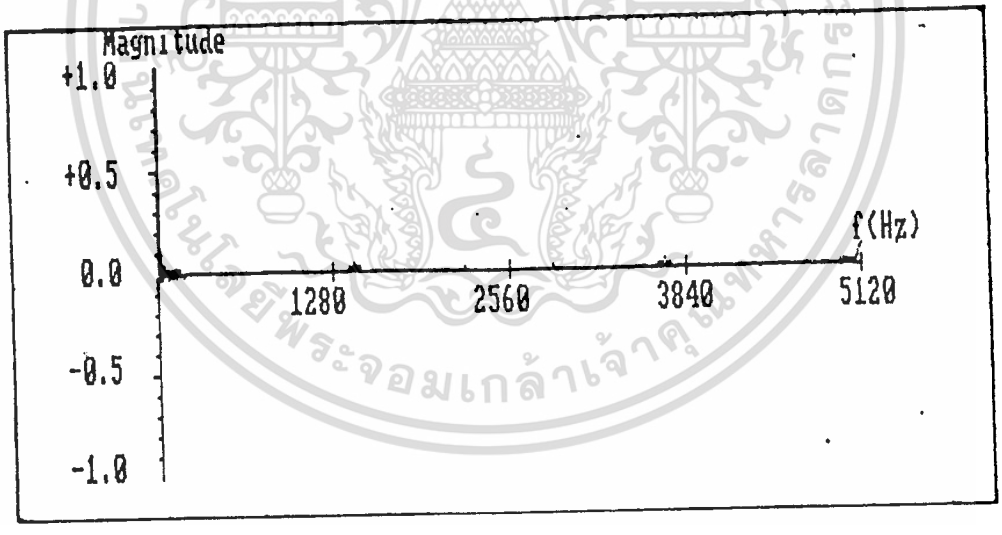
ภาพที่ 17 ถึงภาพที่ 22 เป็นรูปคลื่นกระแสและองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแส จากการจำลอง ตามหลักการ Equal Area PWM. ตั้งแต่ความถี่ 10 เฮิร์ทซ์ ถึง 60 เฮิร์ทซ์ ตามลำดับ

ทั้งนี้ภาพบน (ภาพ ก.) จะแสดงรูปคลื่นของกระแสมอเตอร์ โดยแกนตั้งเป็นอัตราความสูง(เทียบกับค่าสูงสุด) ของกระแสนั้น หน่วยเป็น เปอร์เซนต์ (%) และแกนนอนเป็นแกนเวลา หน่วยเป็น มิลลิวินาที (ms) ส่วนภาพล่าง (ภาพ ข.) แสดงองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสที่เกิดขึ้นโดยการคำนวณจากโปรแกรม FFT.(Fast Fourier Transform) โดยแกนตั้งจะเป็นความสูงขององค์ประกอบฮาร์โมนิก หน่วยเป็น เปอร์เซนต์ (%) และแกนนอนเป็นแกนความถี่ หน่วยเป็น เฮิร์ทซ์ (Hz).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



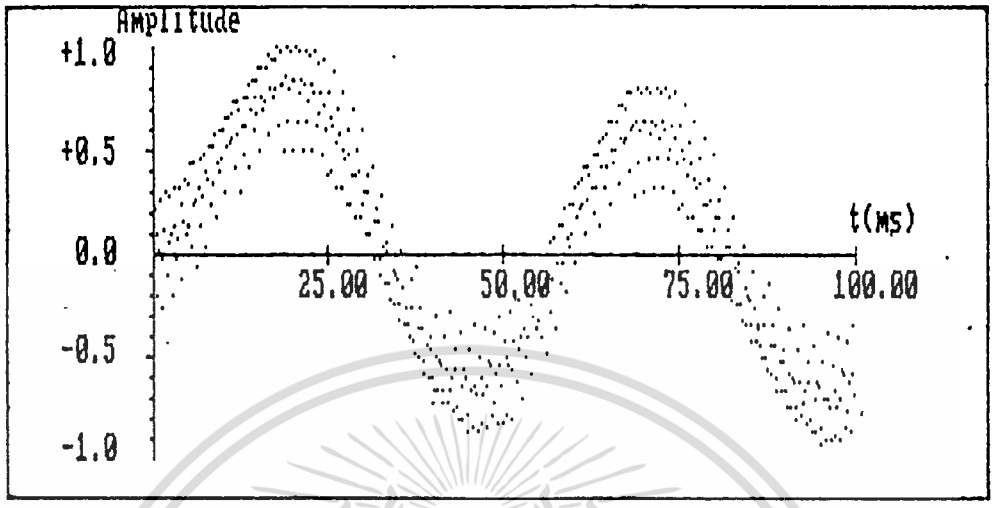
ก. รูปคลื่นกระแส



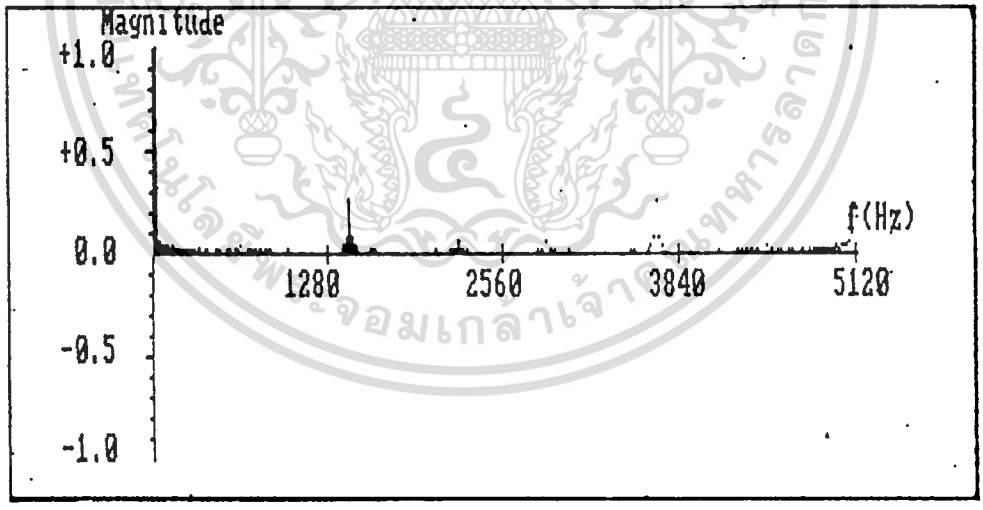
ข. ความถี่ฮาร์โมนิก

ภาพที่ 17 รูปคลื่นกระแส และความถี่ฮาร์โมนิกจากการจำลอง
ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique
ที่ความถี่ขาออก 10 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



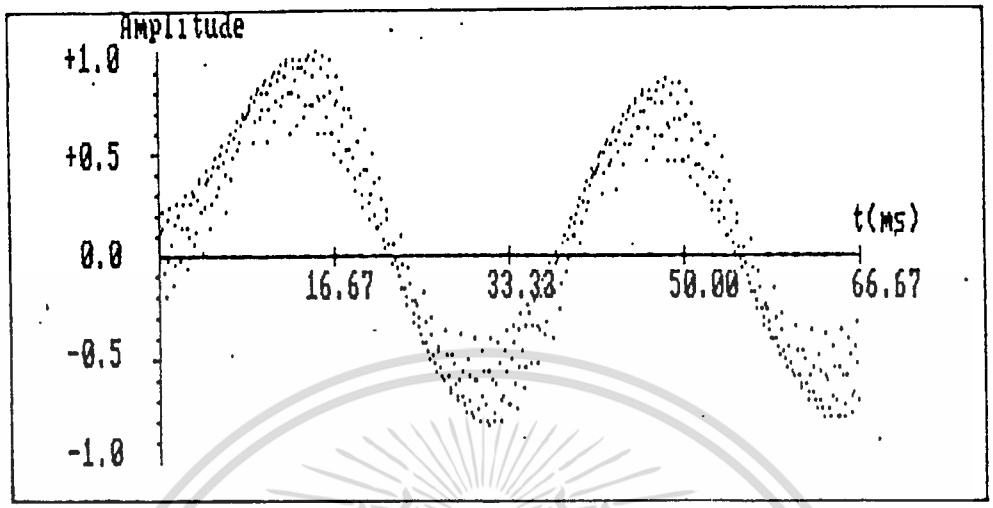
ก. รูปคลื่นกระแส



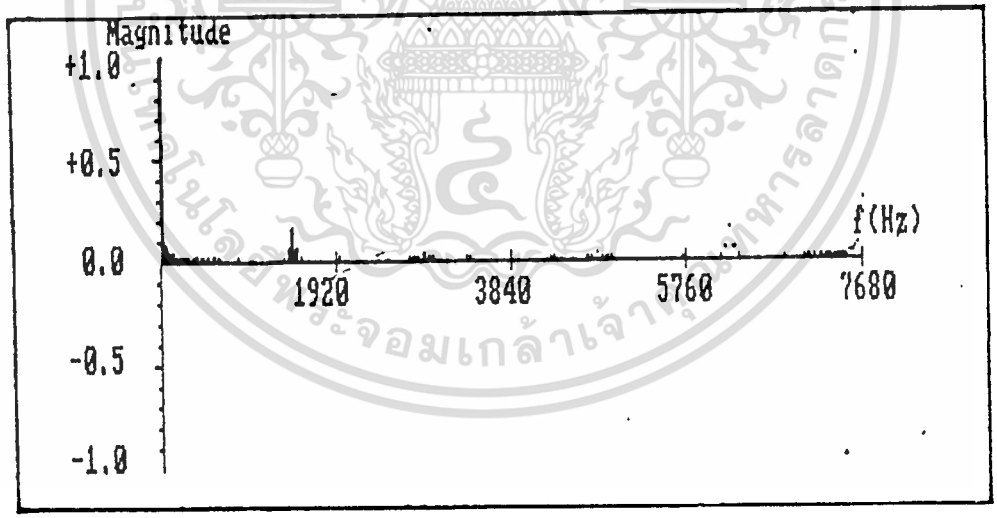
ข. ความถี่ฮาร์โมนิก

ภาพที่ 18 รูปคลื่นกระแส และความถี่ฮาร์โมนิกจากการจำลอง
ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique
ที่ความถี่ขาออก 20 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



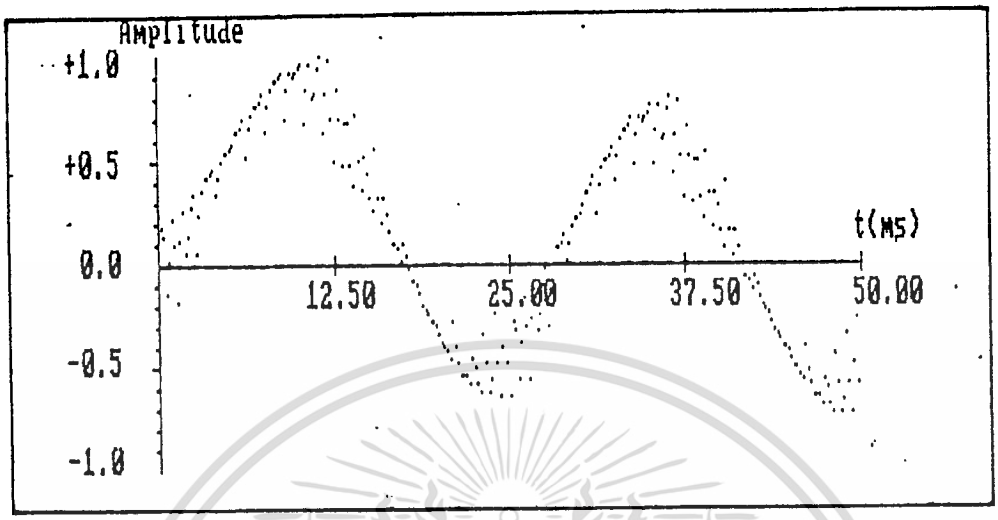
ก. รูปคลื่นกระแส



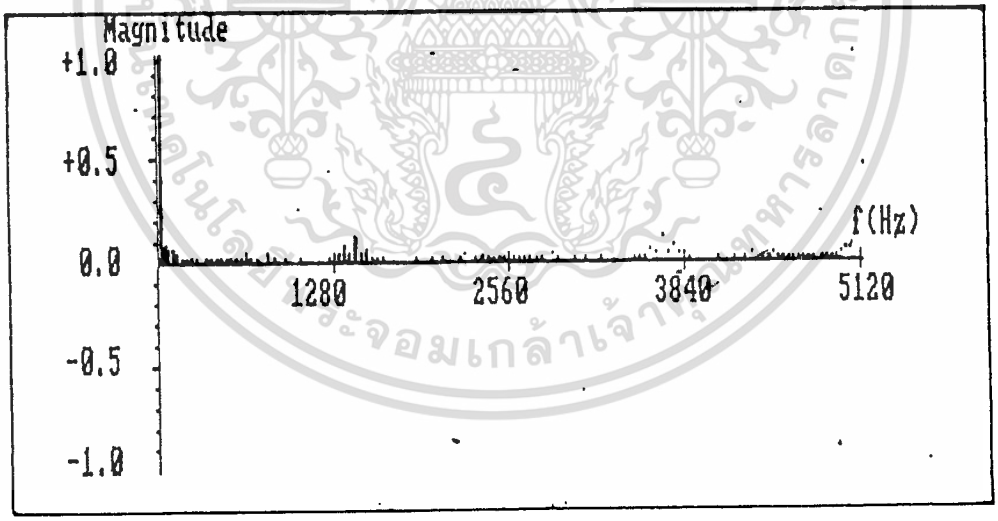
ข. ความถี่ฮาร์โมนิก

ภาพที่ 19 รูปคลื่นกระแส และความถี่ฮาร์โมนิกจากการจำลอง
ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique
ที่ความถี่ขาออก 30 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



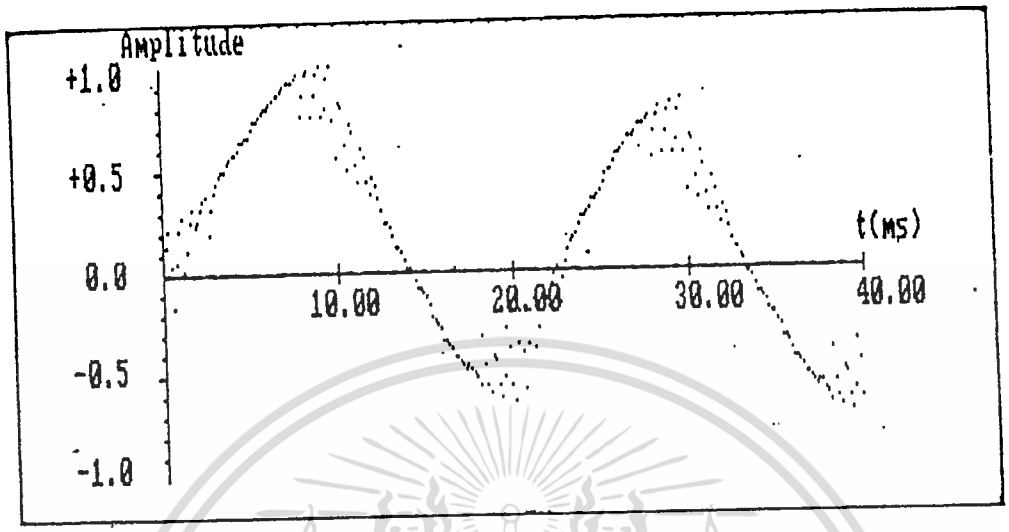
ก. รูปคลื่นกระแส



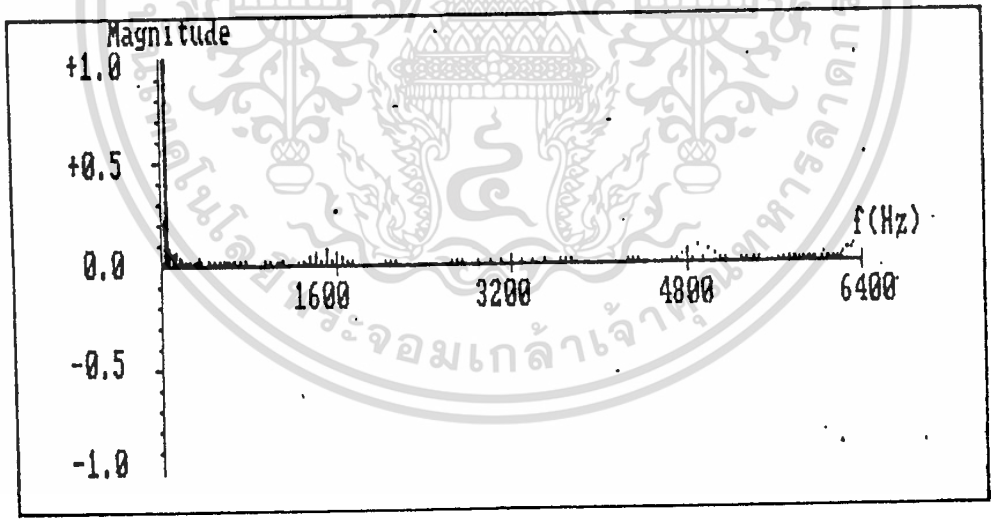
ข. ความถี่ฮาร์โมนิก

ภาพที่ 20 รูปคลื่นกระแส และความถี่ฮาร์โมนิกจากการจำลอง
ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique
ที่ความถี่ขาออก 40 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



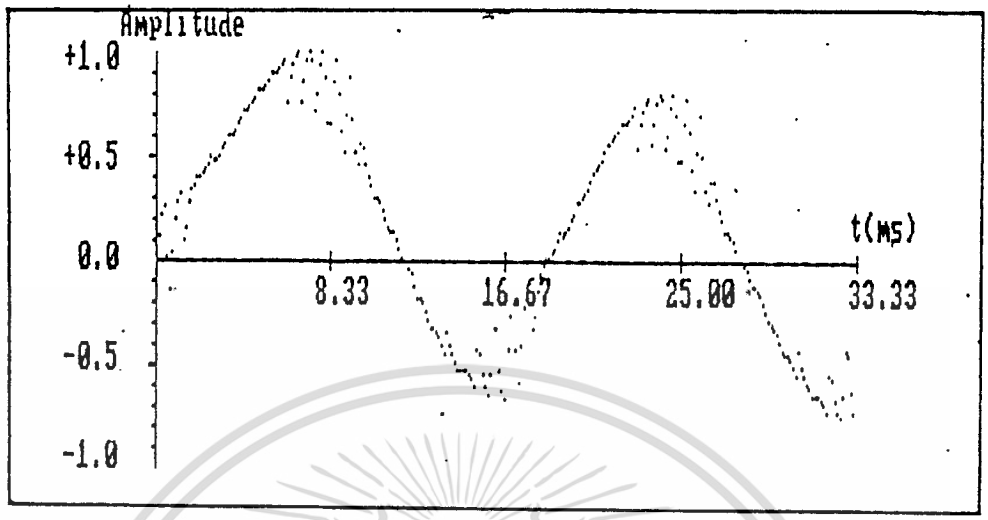
ก. รูปคลื่นกระแส



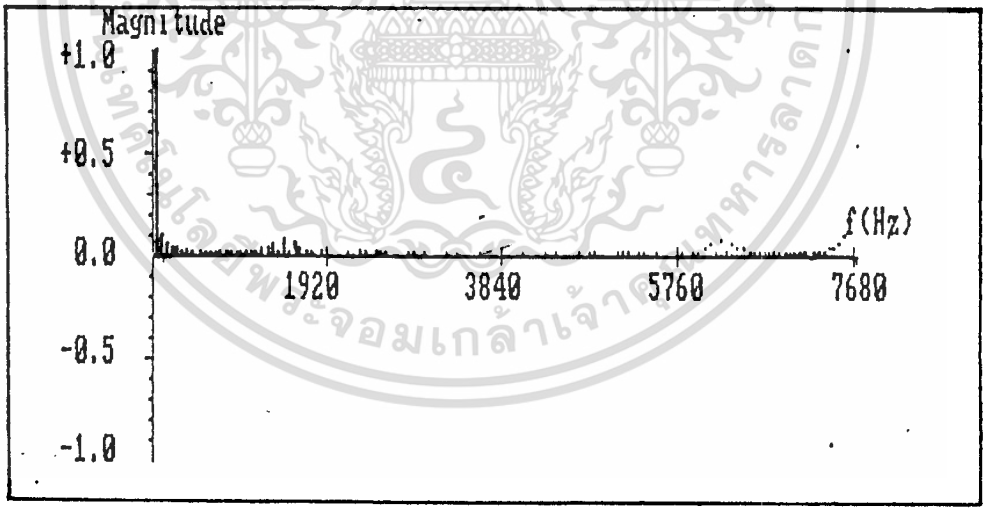
ข. ความถี่ฮาร์โมนิก

ภาพที่ 21 รูปคลื่นกระแส และความถี่ฮาร์โมนิกจากการจำลอง
ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique
ที่ความถี่ขาออก 50 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. รูปคลื่นกระแส



ข. ความถี่ฮาร์โมนิก

ภาพที่ 22 รูปคลื่นกระแส และความถี่ฮาร์โมนิกจากการจำลอง
ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique
ที่ความถี่ขาออก 60 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพ เป็นรูปคลื่นกระแสและองค์ประกอบฮาร์โมนิกจากการจำลองตามหลักการ Equal Area PWM. Technique ที่มีความถี่การสวิทช์คงที่ ที่ 1440 เฮิร์ทช์โดยประมาณทั้งนี้ ที่ความถี่ขาออกตั้งแต่ 10 ถึง 60 เฮิร์ทช์ ตามลำดับ

โดยทั่วไปรูปคลื่นกระแสจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ตามความถี่หลักทุกประการ แต่จะมีฮาร์โมนิกที่บริเวณความถี่การสวิทช์ (Switching frequency) องค์ประกอบฮาร์โมนิกที่มีค่าสูงชัดเจนจะอยู่ที่ความถี่หลัก และบริเวณความถี่การสวิทช์เท่านั้น ส่วนองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ใกล้เคียงความถี่หลักนั้น มีค่าต่ำมากกระแสมอเตอร์ที่ไม่มีฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำนี้จะไม่ทำให้มอเตอร์เกิดกระตุกในขณะทำงาน

จะเห็นได้ว่า เนื่องจากวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง เป็นแบบวงจร R-L อนุกรม อีกทั้งแรงดันแหล่งจ่ายของวงจรเป็นสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็ม จึงทำให้รูปคลื่นกระแสล้าหลังรูปคลื่นแรงดัน ตลอดจนมี Sub Transient ความถี่ต่ำปะปนอยู่ด้วย รูปคลื่นกระแสจึงมีลักษณะไม่สมมาตรในขณะเริ่มต้น ผลจากความไม่สมมาตรของรูปคลื่นกระแสนี้ เมื่อนำไปคำนวณหาค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิก ด้วยโปรแกรม FFT. (Fast Fourier Transform) จึงอาจทำให้ผลการคำนวณผิดพลาดไปได้บ้าง โดยเฉพาะฮาร์โมนิกความถี่ต่ำที่เกิดจากสัญญาณ Sub Transient

และเนื่องจากความถี่ที่ใช้ในแกนนอน ของภาพองค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกนั้น ค่อนข้างใหญ่มาก จึงอาจทำให้ไม่สามารถพิจารณา Sup Harmonic ที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงนับเป็นข้อบกพร่องอันหนึ่งของการเขียนภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิกด้วยโปรแกรม FFT. ของโครงงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วงจรพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์แบบเทียบพื้นที่ใต้โค้งซายน์

<u>ข้อกำหนดของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเทียบพื้นที่ใต้โค้งซายน์</u>

การสร้างสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็ม เพื่อควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถทำได้ทั้งแบบอะนาลอก และแบบดิจิตอล ซึ่งแบบดิจิตอลมีข้อได้เปรียบกว่าแบบอะนาลอกอยู่หลายประการเช่น ปรับแต่ค่ามุมสวิทช์ได้ตามต้องการ ปรับปรุงระบบควบคุมวงจรได้ง่าย ปรับปรุงเสถียรภาพของการควบคุมได้ เป็นต้น ในปัจจุบันวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มส่วนใหญ่ จึงนิยมประยุกต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มเพื่อควบคุมวงจร ทั้งนี้ด้วยเทคนิคทางด้านซอฟท์แวร์จึงทำให้มีความคล่องตัวในการออกแบบระบบควบคุมได้ดีกว่า

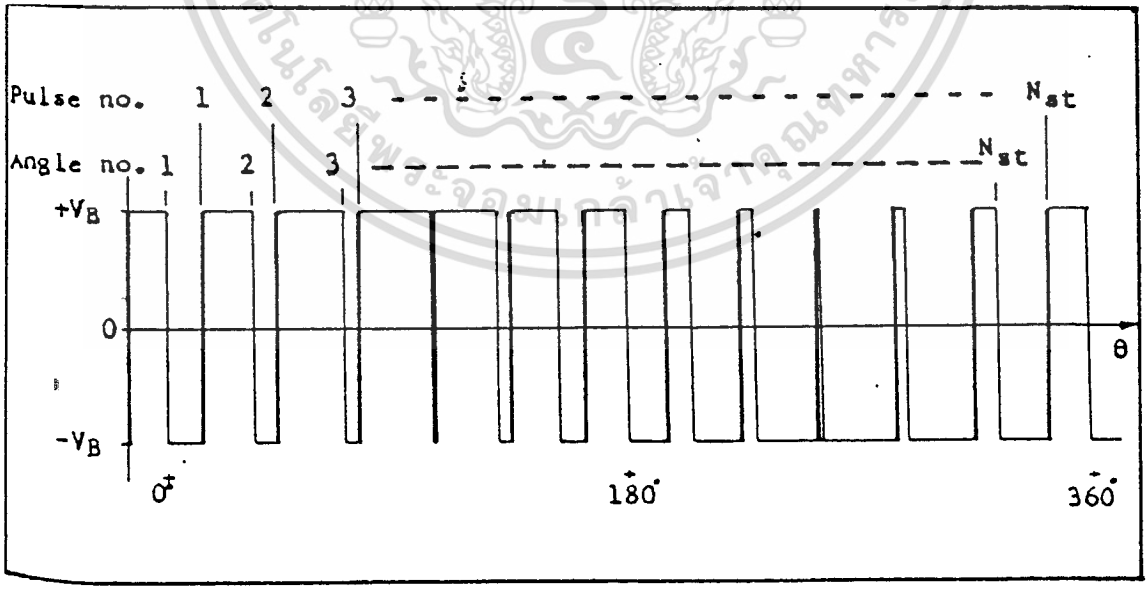
หลักการทางเทคนิคของการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มคือ ต้องสร้างสัญญาณพีดับเอ็มที่มีความถี่การสวิทช์ (Switching frequnecy :f_s) คงที่ ความกว้างระหว่างมุมสวิทช์ความสูงขององค์ประกอบหลักมูลจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าความถี่หลักมูลที่ต้องการ ทั้งนี้อัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทช์จะต้องมีค่าคงที่ตามที่กำหนด จำนวนมุมสวิทช์ในครึ่งไซเกิลจะเท่ากับอัตราส่วนความถี่มอดูเลท (Frequency Modulation Ratio :p) ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 อีกทั้งฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ที่อาจเป็นผลเสียต่อแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์ ควรมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น มักมีความถี่ไม่ต่ำกว่าค่าความถี่การสวิทช์ที่เลือกใช้

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถกรองความถี่ฮาร์โมนิกที่มีผลกระทบต่อมอเตอร์และระบบไฟฟ้าออกโดยง่าย จึงมักใช้ความถี่การสวิทช์ค่อนข้างสูง สำหรับอินเวอร์เตอร์ขนาดกำลังต่ำและใช้ความถี่การสวิทช์ค่อนข้างต่ำ สำหรับอินเวอร์เตอร์ขนาดกำลังงานสูง ทั้งนี้เพราะความถี่การสวิทช์สูงสุดที่สามารถเลือกใช้ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา turn on และ turn off ของอุปกรณ์สวิทช์กำลังในอินเวอร์เตอร์เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรพีดับบลิวเอ็มที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้ ใช้หลักการเทียบเคียงพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์ดังได้กล่าวถึงหลักการ และผลการจำลองสัญญาณกระแสแล้ว ทั้งนี้โดยคำนวณหาค่ามุมสวิทช์และตัวนับค่ามุมตามแผนผังโปรแกรมคำนวณในภาคผนวก ก. และสมการที่ 21 ตามลำดับ เมื่อได้ค่าตัวนับของมุมสวิทช์ทุกมุมของทุกความถี่ขาออกแล้ว จึงนำมาสร้างเป็น "แพทเทอร์นการสวิทช์" เก็บไว้ในส่วนหน่วยความจำกึ่งถาวร (ERROM) ของวงจร เพื่อให้โปรแกรมหลักสามารถเรียกใช้ได้ขณะสร้างสัญญาณที่ความถี่หลักมูลใดๆ วงจรพีดับบลิวเอ็มนี้สามารถควบคุมความถี่หลักมูลได้ตั้งแต่ 0 จนถึง 60 เฮิร์ทซ์ โดยปรับได้ขั้นละ 1 เฮิร์ทซ์ โดยใช้ความถี่การสวิทช์ค่อนข้างคงที่ ที่ 1440 เฮิรทซ์โดยประมาณ ทำให้สามารถกำจัดความถี่ฮาร์โมนิกที่มีค่าต่ำกว่า 1.4 กิโลเฮิร์ทซ์ได้

สัญญาณพีดับบลิวเอ็มโดยใช้หลักการเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้งซายน์นี้ จะมีการแบ่งฐานเวลาออกเป็นส่วนย่อย ช่วงละเท่าๆ กันออกเป็น N_{st} ส่วน มุมสวิทช์ต่างๆ ที่จะต้องคำนวณหาเพื่อเก็บไว้เป็น "แพทเทอร์นการสวิทช์"ในหน่วยความจำ คือมุมที่ทำให้วงรอบภาระ (Duty cycle) ของแต่ละส่วนย่อยนั้นๆ มีค่าเทียบเท่าความสูง (Amplitude) ของสัญญาณซายน์ ณ. ค่ามุมนั้นๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามุมสวิทช์ที่จะคำนวณหา มีจำนวน N_{st} มุมเช่นกัน ดังภาพที่ 23.



ภาพที่ 23 สัญญาณ PWM. ตามหลักการเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้งซายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณมุมสวิทช์จะเป็นไปตามแผนผังการคำนวณโปรแกรมในภาคผนวก ค. โดยจะเก็บไว้ในรูปค่าตัวนับของมุมสวิทช์ (Aw) ทั้งนี้การเลือกค่าตัวประกอบความสูงของสัญญาณ (A) จะถูกกำหนดมาจากอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ที่ต้องการดังภาพที่ 24 ทำให้ได้ค่าตัวประกอบความสูงของสัญญาร (A) สัมพันธ์กับค่าความถี่ขาออก ดังแสดงในตารางที่ 3.

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่สวิทช์ (f_s) ค่าตัวประกอบความสูง (A) จำนวนมุมสวิทช์ (N_{st}) และพัลส์ซ้ำ (Z) ที่ใช้ในความถี่ขาออก (f_o) ค่าต่างๆ

f_o(Hz)	f_s(Hz)	A	N_{st}	Z
1	1440	0.02	144	10
2	1440	0.04	144	5
3	1440	0.06	120	4
4	1440	0.08	120	3
5	1440	0.10	96	3
6	1440	0.12	120	2
7	1428	0.14	102	2
8	1440	0.16	90	2
9	1404	0.18	78	2
10	1440	0.20	72	2
11	1386	0.22	63	2
12	1440	0.24	60	2
13	1404	0.26	54	2
14	1428	0.28	51	2
15	1440	0.30	96	1
16	1440	0.32	90	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 (ต่อ)

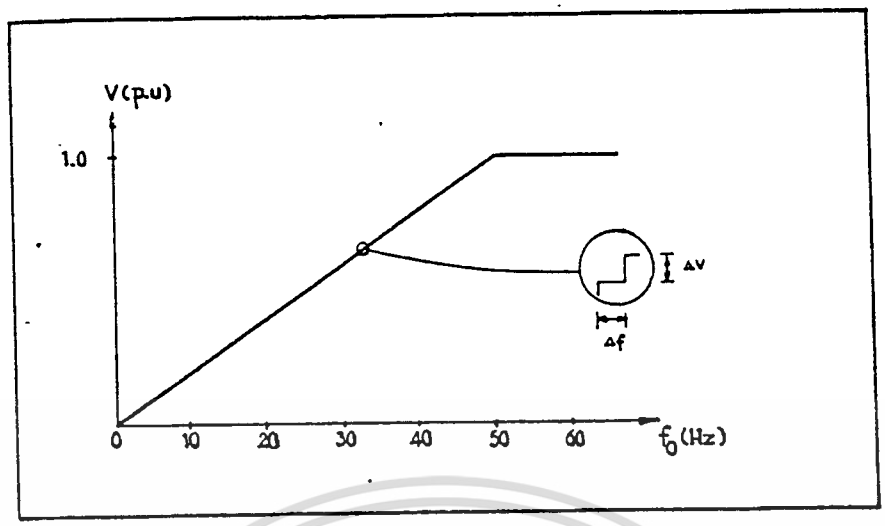
f_o(Hz)	f_s (Hz)	A	N_{st}	Z
17	1428	0.34	84	1
18	1404	0.36	78	1
19	1368	0.38	72	1
20	1440	0.40	72	1
21	1386	0.42	66	1
22	1452	0.44	66	1
23	1380	0.46	60	1
24	1440	0.48	60	1
25	1350	0.50	54	1
26	1404	0.52	54	1
27	1458	0.54	54	1
28	1344	0.56	48	1
29	1392	0.58	48	1
30	1440	0.60	48	1
31	1488	0.62	48	1
32	1344	0.64	42	1
33	1386	0.66	42	1
34	1428	0.68	42	1
35	1470	0.70	42	1
36	1512	0.72	42	1
37	1332	0.74	36	1
38	1368	0.76	36	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 (ต่อ)

f_o(Hz)	f_s(Hz)	A	N_{st}	Z
39	1404	0.78	36	1
40	1440	0.80	36	1
41	1476	0.82	36	1
42	1512	0.84	36	1
43	1548	0.86	36	1
44	1320	0.88	30	1
45	1350	0.90	30	1
46	1380	0.92	30	1
47	1410	0.94	30	1
48	1440	0.96	30	1
49	1470	0.98	30	1
50	1500	1.00	30	1
51	1530	1.00	30	1
52	1560	1.00	30	1
53	1590	1.00	30	1
54	1620	1.00	30	1
55	1320	1.00	24	1
56	1344	1.00	24	1
57	1368	1.00	24	1
58	1392	1.00	24	1
59	1416	1.00	24	1
60	1440	1.00	24	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 24 ลักษณะโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ที่ใช้ในโครงงาน

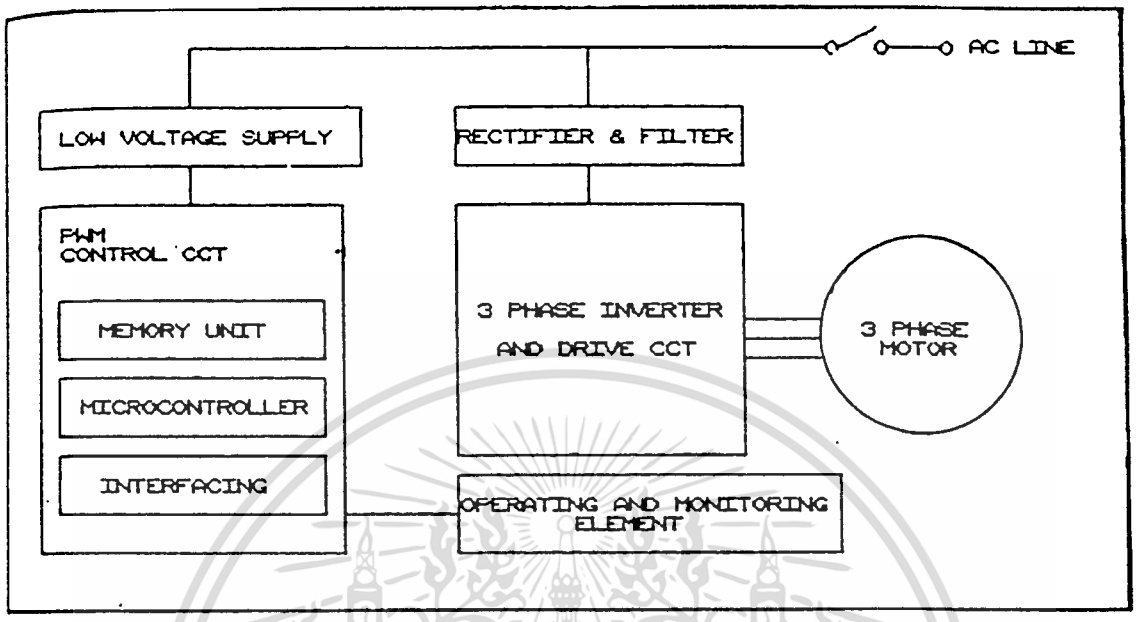
จากตารางที่ 3. จะเห็นได้ว่าเนื่องจากข้อจำกัดต่างๆ ของการเลือกค่าจำนวนส่วนย่อย (N_{st}) จึงทำให้ความถี่การสวิทช์ที่แต่ละความถี่ขาออกมีค่าไม่เท่ากับ 1440 เฮิร์ทซ์เสมอ แต่จะเบียงเบนจากค่า 1440 เฮิร์ทซ์น้อยที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

อย่างไรก็ตาม ที่ความถี่ขาออกค่าต่ำๆ จำเป็นต้องมีจำนวนส่วนย่อยสูงมาก ซึ่งจำนวนมุมสวิทช์ก็จะสูงมากเช่นกัน เพื่อลดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลมุมสวิทช์ในหน่วยความจำ จึงออกแบบให้โปรแกรมควบคุมสร้างสัญญาณพัลส์ซ้ำ (Equal pulse) ขึ้นในแต่ละส่วนย่อยนั้นๆ โดยเฉพาะที่ความถี่ขาออกค่าต่ำมากๆ จำนวนส่วนย่อย (N_{st}) จำนวนพัลส์ซ้ำ (Z) ในแต่ละแพทเทอร์นของความถี่ขาออก แสดงไว้ในตารางที่ 3 เช่นกัน

การออกแบบวงจร PWM โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสตามโครงงาน ถูกควบคุมการสวิทช์จากวงจรพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งใช้หลักการเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้งซายน์ (Equal Area PWM. Technique) ทั้งนี้วงจรพีดับบลิวเอ็มนี้ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นชิงเกิลชิปไอซีในตระกูล MCS'51 เป็นตัวประมวลผลทั้งหมดของระบบควบคุม ส่วนหน่วยเชื่อมต่อระบบ (Interfacing Unit) ใช้ไอซีอินเตอร์เฟสสำเร็จรูปซึ่งเหมาะสมสำหรับการควบคุมการสวิทช์แบบพีดับบลิวเอ็ม เพื่อลดความยุ่งยากต่างๆ ในการออกแบบวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 25 แผนผังวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

สำหรับวงจรพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งเป็นส่วนควบคุมสำคัญของอินเวอร์เตอร์นั้น สามารถแบ่งเป็นส่วนประกอบหลักได้ดังนี้

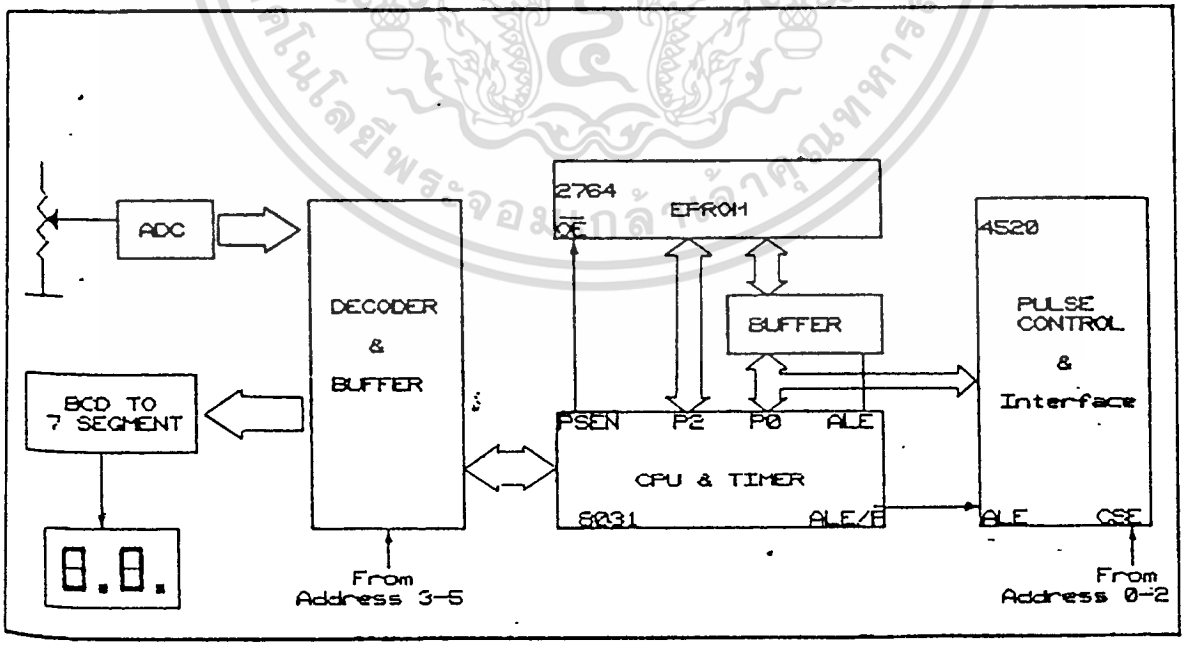
1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ชิงเกิลชิปไอซีที่ใช้เป็นเบอร์ 8031 ที่มีซีพียูขนาด 8 บิท เป็นตัวประเมินผลกลาง รวมทั้งมีพอร์ตไอโอ (I/O Port) จำนวน 4 พอร์ต มีตัวจับเวลาจำนวน 2 ชุด และมีหน่วยความจำชั่วคราว (RAM) ขนาด 128 ไบท์ภายใน ทำให้เหมาะสมต่องานควบคุมทั่วไป รายละเอียดเกี่ยวกับไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 โดยสังเขปแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

2. หน่วยความจำ (Memory Unit) เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลโปรแกรม (Monitor Program) และข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์ (Switching pattern data) โดยจะใช้หน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) เบอร์ 2716 ขนาดความจำ 2 กิโลไบท์ซึ่งสามารถเพิ่มขนาดความจำเป็น 4 หรือ 8 กิโลไบท์ได้ โดยใช้อีพรอม (EPROM) เป็นเบอร์ 2732 หรือ เบอร์ 2764 แทน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หน่วยเชื่อมต่อระบบ (Interfacing unit) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการเชื่อมต่อการทำงานของซีพียู ในไมโครคอนโทรลเลอร์ กับวงจรภายนอก เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้ในงานควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส จึงใช้ไอซีควบคุมการสวิทช์แบบพีดับบลิวเอ็มเบอร์ SLE 4520 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SIEMENS ประเทศเยอรมัน ทั้งนี้เพราะสามารถลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมจัดการลำดับเฟส อีกทั้งสามารถจัดตั้งเวลาตายตัว (Dead time) เพื่อหน่วงเวลาระหว่างการ ON และ OFF ของคู่สัญญาณในเฟสเดียวกัน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิทช์กำลังที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ได้ด้วย รายละเอียดของไอซีเบอร์ SLE 4520 โดยสังเขป แสดงไว้ในภาคผนวก ง.

อย่างไรก็ตาม ภายในวงจรพีดับบลิวเอ็มนี้ยังประกอบด้วยวงจรสัญญาณนาฬิกา และวงจรเข้ารหัส (Decoder) เพื่อควบคุมการส่งผ่านข้อมูล ในกรณีต้องติดต่อกับส่วนภาคแสดงผลต่างๆ (Display หรือ Monitoring Element) ตลอดจนส่วนจัดตั้งค่าความถี่ หรืออื่นๆ (Operating Element) เป็นต้น การติดต่อข้อมูลภายในวงจรพีดับบลิวเอ็ม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 ไอซีควบคุมการสวิทช์เบอร์ SLE 4520 หน่วยความจำและวงจรประกอบอื่นๆ สามารถเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 บล็อคไดอะแกรมแสดงการควบคุมแอดเดรสและข้อมูลภายในวงจร PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรพีดับบลิวเอ็ม ที่ได้ออกแบบไว้ดังบล็อคไดอะแกรมดังภาพที่ 26 นั้นสามารถแบ่งเป็นวงจรภาคต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการอธิบายการทำงานได้ดังนี้

- ภาคประมวลผลกลางและควบคุมการสวิทช์
- ภาคหน่วยความจำ
- ภาครับสัญญาณควบคุมจากภายนอก
- ภาคแสดงผล
- ภาคส่งสัญญาณควบคุมขาออก

<u>วงจรภาคประมวลผลกลางและควบคุมการสวิทช์</u>

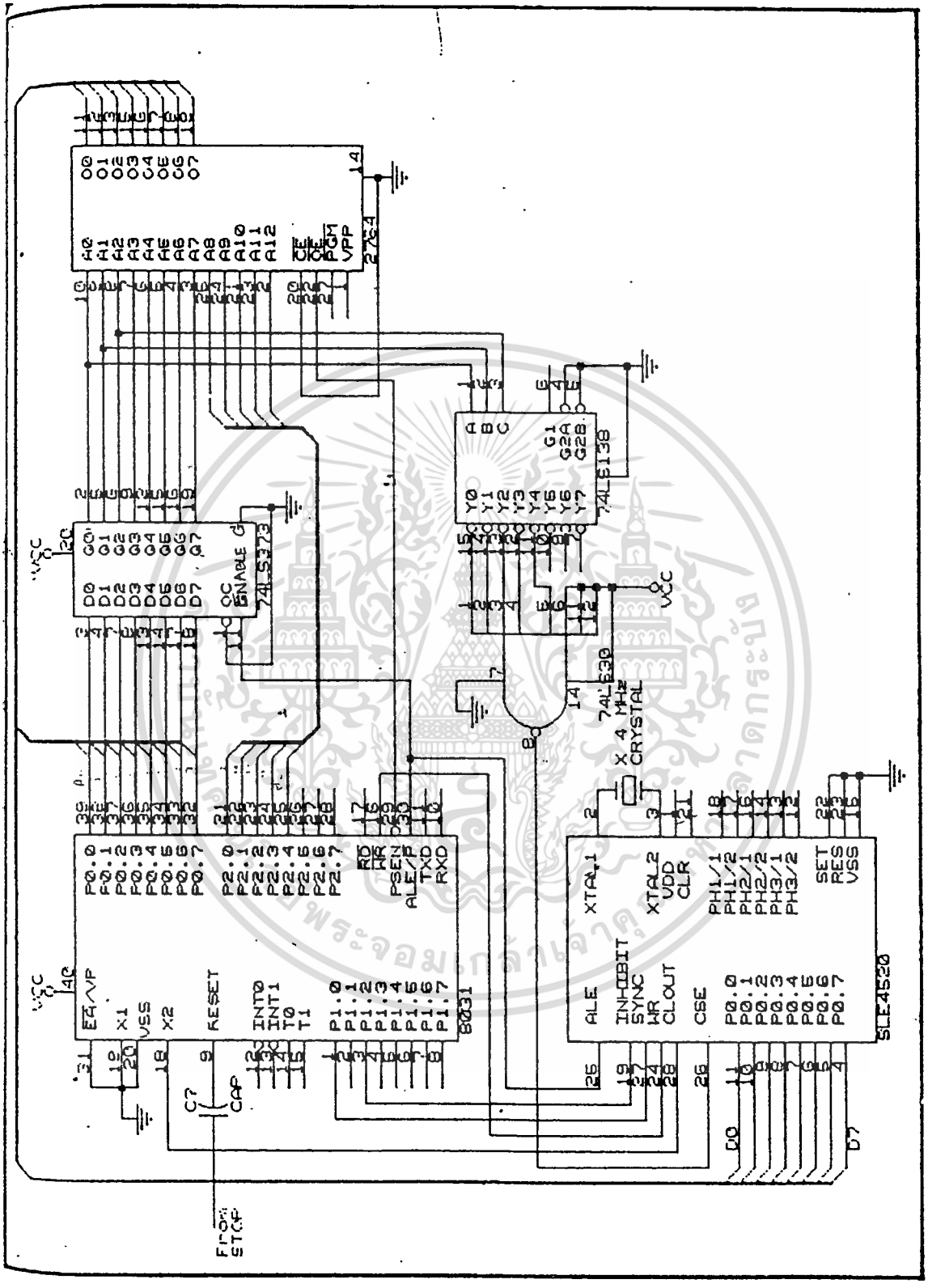
ภาคนี้ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของวงจร ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 และไอซีเบอร์ SLE 4520 ร่วมกับวงจรถอดรหัส (Decoder) เพื่อควบคุมหน่วยความจำและควบคุมไอซีเบอร์ 4520 เช่นกันดังแสดงในภาพที่ 38 โดยมีการทำงานของส่วนต่างๆ ของภาคดังนี้

1. ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ส่วนนี้จะใช้คริสตัล (Crystal) ขนาดความถี่ 4 เมกะเฮิร์ทซ์ป้อนให้ขา XTAL1 และ XTAL2 ของไอซีเบอร์ SLE 4520 เพื่อหารความถี่ลง 12 เท่า ด้วยโปรแกรมควบคุม (Monitor Program) ดังนั้นความถี่ที่ใช้ในระบบและควบคุมการสวิทช์ขนาด 0.333 เมกะเฮิร์ทซ์

2. ส่วนควบคุมหน่วยความจำ เนื่องจากหน่วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 จะใช้พอร์ต 2 และพอร์ต 0 เป็นบัสแอดเดรสขนาด 16 บิทสำหรับไบท์สูงและไบท์ต่ำตามลำดับทั้งสามารถใช้พอร์ต 0 เป็นบัสข้อมูลขนาด 8 บิทได้อีกด้วย การควบคุมจึงต้องแลทช์สัญญาณแอดเดรสไบท์ต่ำด้วยไอซีเบอร์ 74LS373 พร้อมควมคุมด้วยสัญญาณจากขา ALE/P เมื่อบัสแอดเดรสครบ16 บิทแล้ว ข้อมูลจากหน่วยความจำจะถูกอ่านเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณควบคุมจากขา PSEN

3. ส่วนควบคุมการสวิทช์ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างไมโครทอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 กับไอซีควบคุมการสวิทช์เบอร์ SLE 4520 (ดูภาคผนวก ง. ประกอบ) โดยใช้สายที่ A0 - A2 ของบัสแอดเดรสมาเข้าวงจรถอดรหัส โดยใช้ไอซี เบอร์ 74LS138 พร้อมทั้ง NAND รหัสสัญญาณทั้ง 4 ด้วยไอซีเบอร์ 74LS30 ดังภาพที่ 27 เพื่อให้ไอซีควบคุมการสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 27 วงจรภาคประมวลผลกลางและควบคุมการสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบอร์ SLE 4520 รับคำสั่งจากโปรแกรมเพื่อเก็บค่าคงที่ และเลือกรีจิสเตอร์ภายในสำหรับเก็บข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์ เฉพาะที่แอดเดรส 0000H - 0004 เท่านั้น โดยแต่ละตำแหน่งแอดเดรส กำหนดให้ไอซี เบอร์ SLE4520 ทำหน้าที่ดังนี้

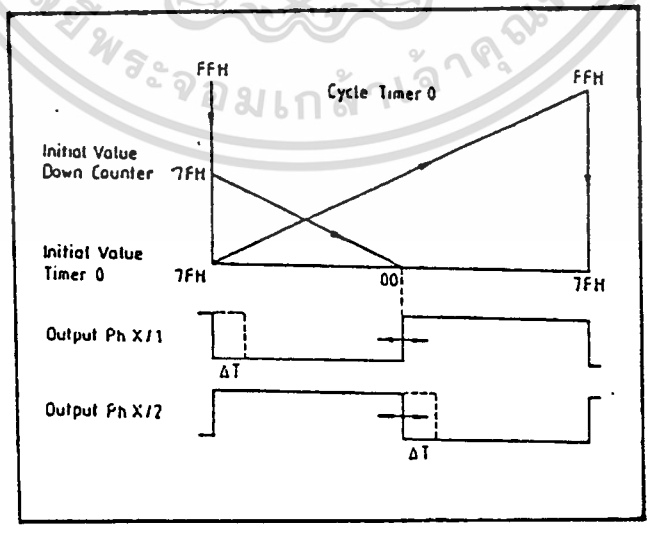
ตำแหน่ง 0000 - 0002 รับข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์จากหน่วยความจำมาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ภายในทั้ง 3 เพื่อใช้นับถอยหลัง (Count down) ในการสร้างสัญญาณสวิทช์สำหรับเฟสทั้ง 3 ตามลำดับ

ตำแหน่ง 0003 รับค่าเวลาตายตัว (Dead time) ที่จัดตั้งไว้

ตำแหน่ง 0004 รับค่าตัวหารความถี่ (Divider) ที่จัดตั้งไว้

ทั้งนี้ไอซีเบอร์ SLE 4520 นี้ จะรับสัญญาณควบคุมเพื่อเริ่มต้นสร้างสัญญาณช่วงย่อย (Transfer pulse)จากขา P1.0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ขา SYNC ส่วนวงรอบภาระ (Duty cycle) ของสัญญาณส่วนย่อยเหล่านี้ จะขึ้นอยู่กับค่าตัวนับมุมสวิทช์ (Aw) โดยใช้การนับถอยหลัง หลักการสร้างสัญญาณส่วนย่อยดังกล่าว แสดงให้เห็นดังภาพที่ 28

คู่สัญญาณพีดับบลิวเอ็มดังภาพที่ 28 นี้ จะใช้ควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ทั้ง 2 ในวงจรกึ่งบริดจ์ (Half Bridge circuit) ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างการทำงานของอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้งสอง จึงต้องทำให้สัญญาณควบคุมมีสภาวะ "ON" ช้ากว่าปกติเล็กน้อย โดยอาศัยการจัดตั้งเวลาตายตัวให้กับโปรแกรมที่แอดเดรส 0003 ดังกล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 28 แสดงการสร้างสัญญาณในช่วงย่อย ด้วยค่าตัวนับมุมสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้ทำการเผยแพร่ ทำซ้ำ ดัดแปลง ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วงจรภาคหน่วยความจำ</u>

เนื่องจากโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Monitor Program) ตลอดจนข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์ทุกความถี่ขาออก มีความยาวรวมไม่เกิน 8 กิโลไบท์ จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของวงจร จึงใช้ไอซีหน่วยความจำแบบกึ่งถาวร (EPROM) เบอร์ 2764 ขนาดความจุ 8 กิโลไบท์จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 27

วงจรพีดับบลิวเอ็มตามหลักการเทียบพื้นที่ใต้โค้งซายน์ ข้อมูลในแพทเทอร์นการสวิทช์ต่อ 1 เฟส จะมีจำนวนมุมสวิทช์เป็น N_{st} เท่ากับจำนวนส่วนย่อยที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3 แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ได้ออกแบบโปรแกรมควบคุมไว้นี้ ต้องเก็บข้อมูลในแพทเทอร์นการสวิทช์สำหรับ 3 เฟส เป็นจำนวน 5/3 เท่าของจำนวนส่วนย่อย (N_{st}) ทั้งนี้เพราะเฟสลำดับ 2 และ 3 สามารถใช้แพทเทอร์นการสวิทช์ของความถี่ขาออกนั้นๆ ได้เช่นกัน เพียงแต่มุมสวิทช์เริ่มต้นที่ถูกเลือกใช้นั้นจะห่างจากมุมเริ่มต้นของเฟสแรกเท่ากับ 1/3 ของจำนวนส่วนย่อยทั้งหมด และถ้าต้องการสร้างสัญญาณพัลส์ซ้ำ (Equal pulse) ในส่วนย่อยจำนวน Z ชุด เพื่อลดจำนวนข้อมูลในแพทเทอร์นการสวิทช์ก็สามารถทำได้เช่นกัน โครงงานนี้ได้ทำการลดจำนวนข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์ด้วยวิธีการพัลส์ซ้ำ เฉพาะความถี่ขาออกค่าต่ำๆ เท่านั้น

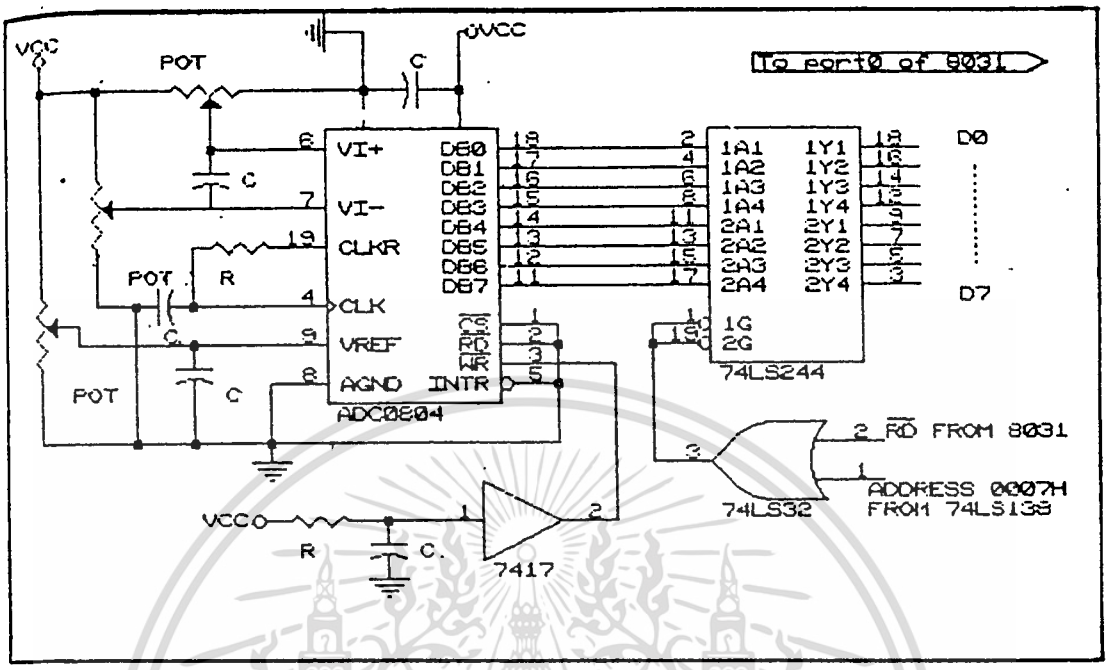
จำนวนพัลส์ซ้ำ (Z) ในส่วนย่อยของแต่ละความถี่ขาออก แสดงในตารางที่ 3 เช่นกัน

<u>วงจรภาครับสัญญาณควบคุมจากภายนอก</u>

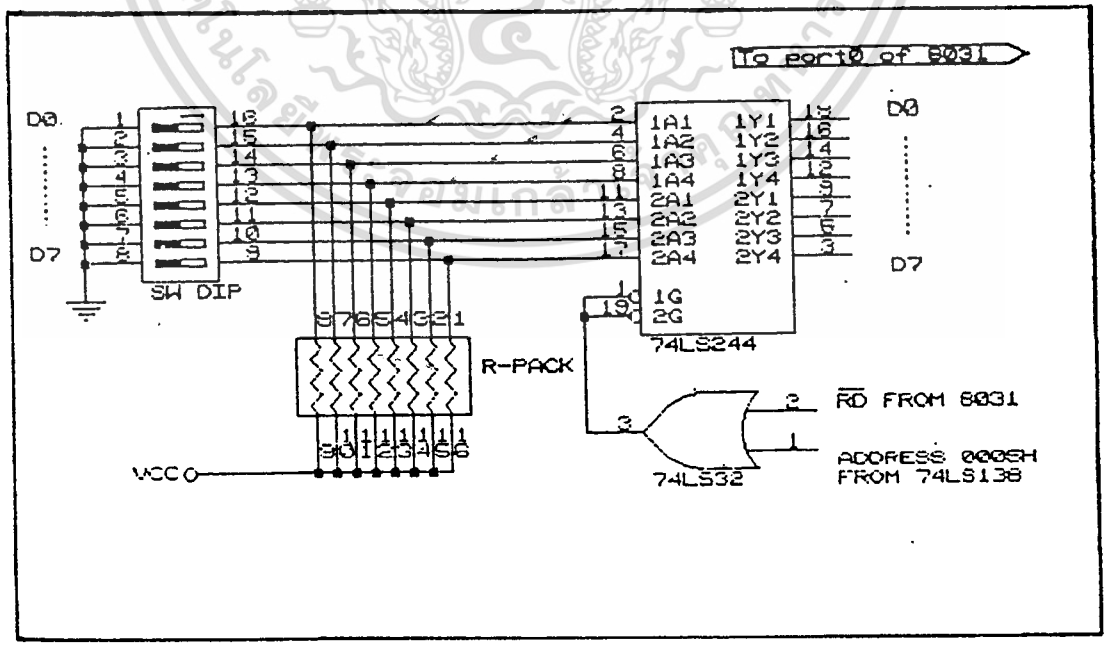
ภาครับสัญญาณควบคุมจากภายนอก ประกอบด้วย ส่วนจัดตั้งค่าความถี่ (Frequency Setting) และ ส่วนจัดตั้งอัตราส่ง อัตราหยุด (Acceleration and Deaceleration) โดยมีการควบคุมแต่ละส่วนดังนี้

1. ส่วนจัดตั้งความถี่ การเลือกค่าความถี่ของวงจรพีดับบลิวเอ็ม ทำได้โดยปรับค่าความต้านทาน เพื่อเปรียบระดับสัญญาณอะนาลอกที่ป้อนกับไอซีเบอร์ ADC 0804 ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบไบนารี ขนาด 8 บิท เพื่อป้อนให้กับซีพียูในไมโครคอนโทรลเลอร์ นำไปเลือกแพทเทอร์นการสวิทช์ ทั้งนี้โดยมีไอซีเบอร์ 74LS244 เป็นอินพุทพอร์ต ควบคุมการส่งข้อมูลความถี่นี้เข้าสู่ ซีพียู ด้วยสัญญาณแอดเดรส 0007H จากวงจรถอดรหัสและสัญญาณอ่าน (RD) จากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

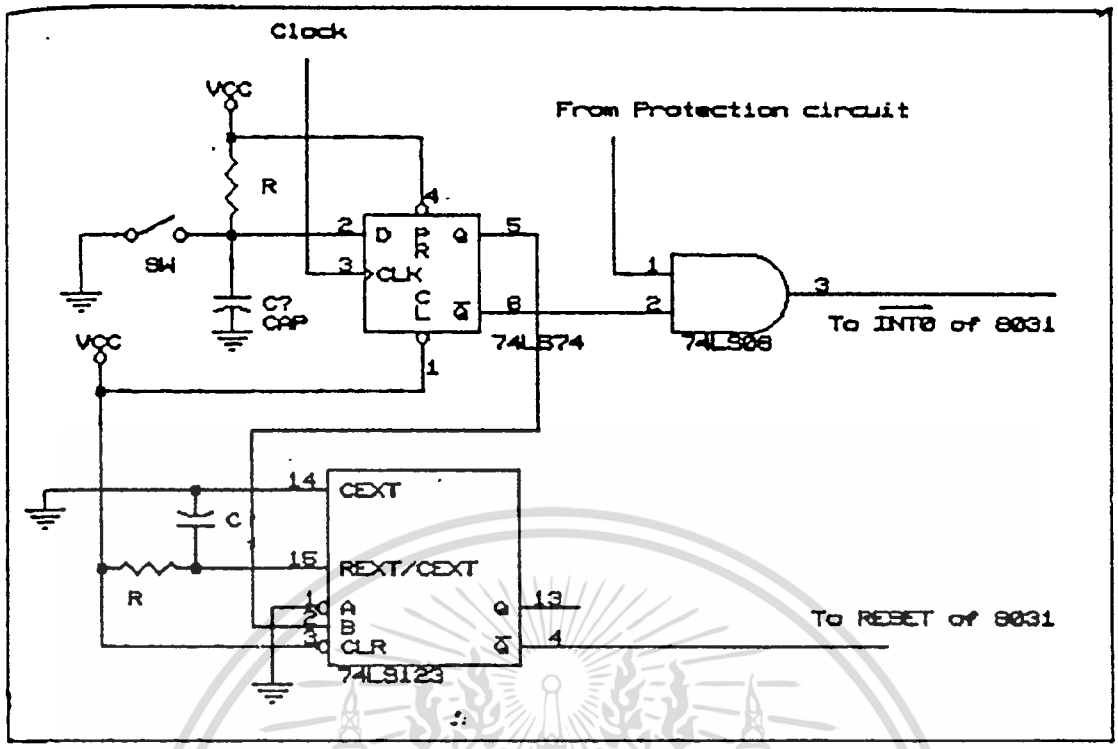


ภาพที่ 29 วงจรภาคควบคุมส่วนจัดตั้งความถี่



ภาพที่ 30 วงจรภาคควบคุมส่วนจัดตั้งอัตราเร่ง, อัตราหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 31 วงจรควบคุมการเริ่มหมุน,หยุดหมุนมอเตอร์

2. สัญญาณจัดตั้งอัตราเร่ง อัตราหยุด เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ไม่ควรเพิ่มขึ้นหรือลดลง (ในกรณีเปลี่ยนแปลงความถี่ขาออก) อย่างรวดเร็วเกินไป เพราะอาจทำให้กระแสมอเตอร์กระชาจนเกินพิกัดได้ จึงต้องหน่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงความถี่แต่ละ 1 เฮิร์ทซ์ ไม่ให้เร็วหรือนานเกินไป ในที่นี้จะเลือกอัตราเร่ง,อัตราหยุดได้ตั้งแต่ 0 - 255 ขั้นจากสวิทช์ตัวเลือก (DIP switch) จำนวน 8 ตัว สำหรับสัญญาณดิจิตอลขนาด 8 บิทที่จะส่งไปให้ซีพียูของไมโครคอนโทรลเลอร์โดยมีไอซีเบอร์ 74LS244 เป็นอินพุทพอร์ทควบคุมการส่งข้อมูลโดยสัญญาณแอดเดรส 0005H จากวงจรถอดรหัส และสัญญาณ RD จากไมโครคอนโทรลเลอร์ดังภาพที่ 30

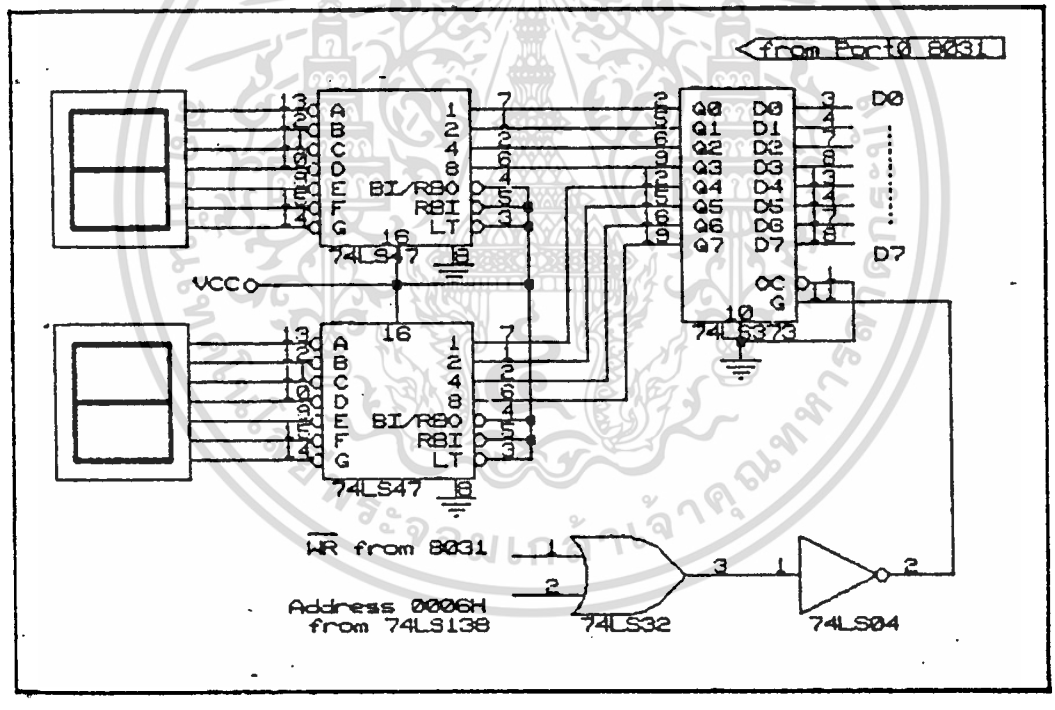
3. สัญญาณควบคุมการเริ่มต้นและหยุดทำงาน เพื่อสะดวกต่อการเริ่มต้นทำงานของมอเตอร์ จะให้ไอซีเบอร์ 74LS74 รับสัญญาณจากสวิทช์ SW_1 ดังภาพที่ 31 ซึ่งจะเห็นว่าขณะ ON สวิทช์ SW_1 จะมีพัลส์บวกออกจากขา Q ของไอซีเบอร์ 74LS123 เพื่อนำไปรีเซตโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ และถ้า OFF สวิทช์ SW_1 หรือมีสัญญาณ "0" มาจากวงจรป้องกัน (เนื่องจากกระแสเกิน,แรงดันเกิน หรืออื่นๆ) จะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สัญญาณควบคุมที่ขา INTO ของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น "0" โปรแกรมควบคุมจะเกิดอินเตอร์รัพท์ขึ้น ทำให้หยุดการทำงานของมอเตอร์ได้

<u>วงจรภาคแสดงผลความถี่</u>

เป็นภาคที่แสดงค่าความถี่ออกมาเป็นตัวเลขแบบ 7 ขีดจำนวน 2 หลัก โดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS47 จำนวน 2 ตัวทำหน้าที่ถอดรหัสจากสัญญาณ BCD (Binary Code Decimal) เพื่อใช้ขับ LED แบบ 7 ขีดดังกล่าว ทั้งนี้การส่งข้อมูลจากซีพียูของไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังภาคแสดงผลจะถูกแลทช์ข้อมูลด้วยไอซีเบอร์ 74LS373 ซึ่งถูกควบคุมด้วยสัญญาณแอดเดรส 0006H จากวงจรถอดรหัส และสัญญาณ WR จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังภาพที่ 32



<u>ภาพที่ 32</u> วงจรภาคแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการควบคุมการทำงานของวงจรพีดับบลิวเอ็ม

วงจรพีดับบลิวเอ็ม ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหลักในการควบคุมวงจรสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ในอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์นั้น จะถูกกำหนดการทำงานด้วยโปรแกรมควบคุม (Monitor Program) ที่ถูกเก็บไว้ด้วยภาษาเครื่องในหน่วยความจำของวงจร ทั้งนี้จะประกอบด้วยโปรแกรมย่อยหลายโปรแกรม ดังนี้

1. โปรแกรมหลัก (Main Program)

เป็นโปรแกรมที่ควบคุมการทำงานของโปรแกรมส่วนย่อยทั้งหมด ดังแผนผังการทำงานในภาพที่ 33 โดยเมื่อจ่ายไฟเข้าสู่วงจรและรีเซตระบบแล้ว โปรแกรมจะเข้าสู่ภาคแรกเพื่อเซตค่าเริ่มต้นต่างๆ (Initialization) ให้กับรีจิสเตอร์ ข้อมูลที่พอร์ตต่างๆ พร้อมทั้งอ่านค่าอัตราเร่ง อัตราหยุด และจัดค่าข้อมูลเริ่มต้นเพื่อให้สร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ความถี่ต่ำสุด (0 เฮิร์ทซ์) จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่ภาคสร้างสัญญาณ (Generate switching signal) โดยจะสร้างสัญญาณจนครบทั้ง 3 เฟส และเริ่มอ่านค่าความถี่ที่ตั้งไว้จากอุปกรณ์ภายนอก พร้อมแสดงผลความถี่ด้วย

ในกรณีที่ความถี่ขาออกของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่สร้างขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงหรือคลาดเคลื่อนจากค่าความถี่ที่ได้ตั้งไว้ โปรแกรมก็สามารถปรับค่าความถี่ขาออกเข้าหาค่าที่ต้องการได้ โดยจะเปลี่ยนไปขั้นละ 1 เฮิร์ทซ์ แต่ถ้าในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่แล้วโปรแกรมก็จะวนอ่านข้อมูลเก่าเพื่อสร้างความถี่ขาออกค่าเดิม อย่างไรก็ตามโปรแกรมนี้จะสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มได้ ที่ความถี่ไม่เกิน 60 เฮิร์ทซ์

เวลาในการเปลี่ยนแปลงความถี่ขั้นละ 1 เฮิร์ทซ์นี้ จะเป็นไปตามค่าอัตราเร่ง หยุดที่ได้สร้างไว้แล้วด้วยสวิทช์เชิงเลข 8 หลัก (DIP SWITCH PACK 8) ซึ่งจะเห็นได้ว่าตั้งค่าสูงสุดได้ 255 ขั้น โดยที่แต่ละขั้นจะใช้เวลา 6.4 มิลิวินาที ดังนั้นอัตราเร่ง และอัตราหยุดสูงสุดจะเท่ากับประมาณ 1.6 วินาทีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ 1 เฮิร์ทซ์ จึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 0 ถึงความเร็วพิกัดที่ 50 เฮิร์ทซ์ ได้ภายใน 81.6 วินาที ทั้งนี้ถ้าต้องการลดอัตราเร่ง หยุดลง ก็สามารถทำได้เช่นกัน และถ้าเกิดอินเตอร์รัพท์ขึ้นไม่ว่ากรณีใดๆ อินเตอร์รัพท์เวคเตอร์ (Interrupt Vector) จะชี้ไปที่ตำแหน่ง 0003H หรือ 0013H แล้วแต่แบบของอินเตอร์รัพนั้นๆ ทั้งนี้โปรแกรมจะสามารถเริ่มต้นทำงานใหม่ได้ ถ้ามีการรีเซตระบบใหม่อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization)

เมื่อเริ่มทำงาน วงจรจะถูกรีเซตให้เริ่มต้นที่ตำแหน่ง 0000H และเข้าสู่โปรแกรมย่อย "INIT" เพื่อกำหนดหน้าที่รีจิสเตอร์ และตำแหน่งข้อมูลภายในที่จะใช้ในโปรแกรมพร้อมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับรีจิสเตอร์และพอร์ตต่างๆ เช่นกัน รวมทั้งเพื่อเริ่มต้นทำงานที่ความถี่ 0 เฮิร์ทซ์จากนั้นจะอ่านค่าอัตราเร่ง หยุด มาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ R2 ด้วย แผนผังโปรแกรมจะเป็นดังภาพที่ 34

ทั้งนี้หน้าที่ของรีจิสเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรมที่ต้องถูกกำหนดค่าเริ่มต้นมีดังนี้

R0 เก็บข้อมูลตัวนับตำแหน่งแอดเดรสภายนอก เพื่อติดต่ารีจิสเตอร์ทั้ง 3 ในไอซีเบอร์ SLE 4520

R2 เก็บข้อมูลอัตราเร่ง,อัตราหยุด

R4 เก็บดัชนีที่ชี้ค่าเริ่มต้นของตำแหน่งข้อมูลในแต่ละแพทเทอร์นการสวิทช์

R5 เก็บดัชนีชี้ตำแหน่งข้อมูลสำหรับการเลื่อนเฟส

R6 เก็บค่าความถี่หลักมูลของแพทเทอร์นการสวิทช์ที่เลือกใช้

R7 เก็บค่าจำนวนมุมสวิทชในแพทเทอร์นนั้นๆ

ตำแหน่งข้อมูลภายในที่ใช้งานในโปรแกรม

09H เก็บข้อมูลค่าอัตราเร่ง,อัตราหยุดเช่นเดียวกับรีจิสเตอร์ R2

10H เก็บค่าจำนวนพัลส์ซ้ำ (Equal pulse : Z)

11H เก็บค่าจำนวนตำแหน่งของการเลื่อนเฟส

17H เก็บค่าจำนวนสวิทช์ในแพทเทอร์นนั้นๆ

19H เก็บค่าความถี่หลักมูลที่เซตไว้

หน้าที่ตำแหน่งข้อมูลภายนอกสำหรับติดต่ออุปกรณ์ภาพนอกไมโครคอนโทรลเลอร์

0000H สำหรับติดต่อกับรีจิสเตอร์เฟส 1 ของไอซีเบอร์ SLE4520

0001H สำหรับติดต่อกับรีจิสเตอร์เฟส 2 ของไอซีเบอร์ SLE4520

0002H สำหรับติดต่อกับรีจิสเตอร์เฟส 3 ของไอซีเบอร์ SLE4520

0003H สำหรับเซตค่าเวลาตายตัว (Dead time)

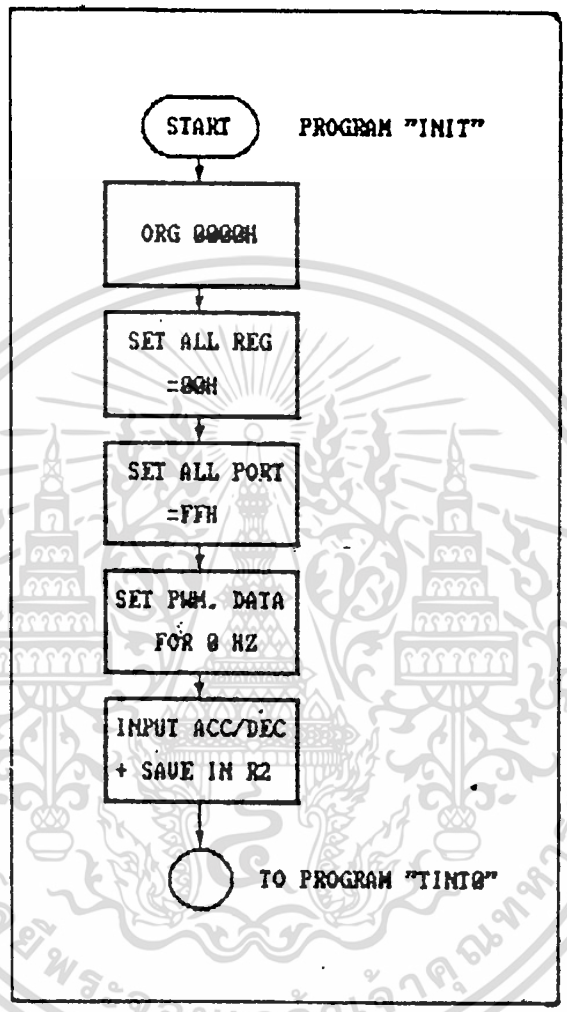
0004H สำหรับเซตค่าตัวหารความถี่

0005H สำหรับเซตค่าอัตราเร่ง,อัตราหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0006H สำหรับติดต่อภาคแสดงผลความถี่

0007H สำหรับเซตค่าความถี่ที่ต้องการ



ภาพที่ 34 แผนผังการทำงานของโปรแกรมย่อย "INIT"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรมสร้างสัญญาณการสวิทช์

เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้น และโปรแกรมได้อ่านค่าอัตราเร่ง อัตราหยุดนิ่งมาเก็บในรีจิสเตอร์แล้ว จึงเข้าสู่ระบบการสร้างสัญญาณการสวิทช์ ที่โปรแกรม "TINIO" เพื่อสร้างสัญญาณจุดพัลส์ (Transfer pulse) จากนั้นจะเริ่มสร้าง และส่งออกสัญญาณที่ละมุมสวิทช์โดยคำสั่ง MOVX OPIR,A สำหรับทั้ง 3 เฟส จนครบจำนวนมุมสวิทช์ที่กำหนดในแพทเทอร์นการสวิทช์นั้นๆ ทั้งนี้โดยเริ่มต้นจากความถี่ที่ 0 เฮิร์ทช์ แผนผังโปรแกรมส่วนนี้แสดงไว้แล้วดังภาพที่ 35

4. โปรแกรมอ่านค่า,แสดงผล,และตรวจสอบความถี่

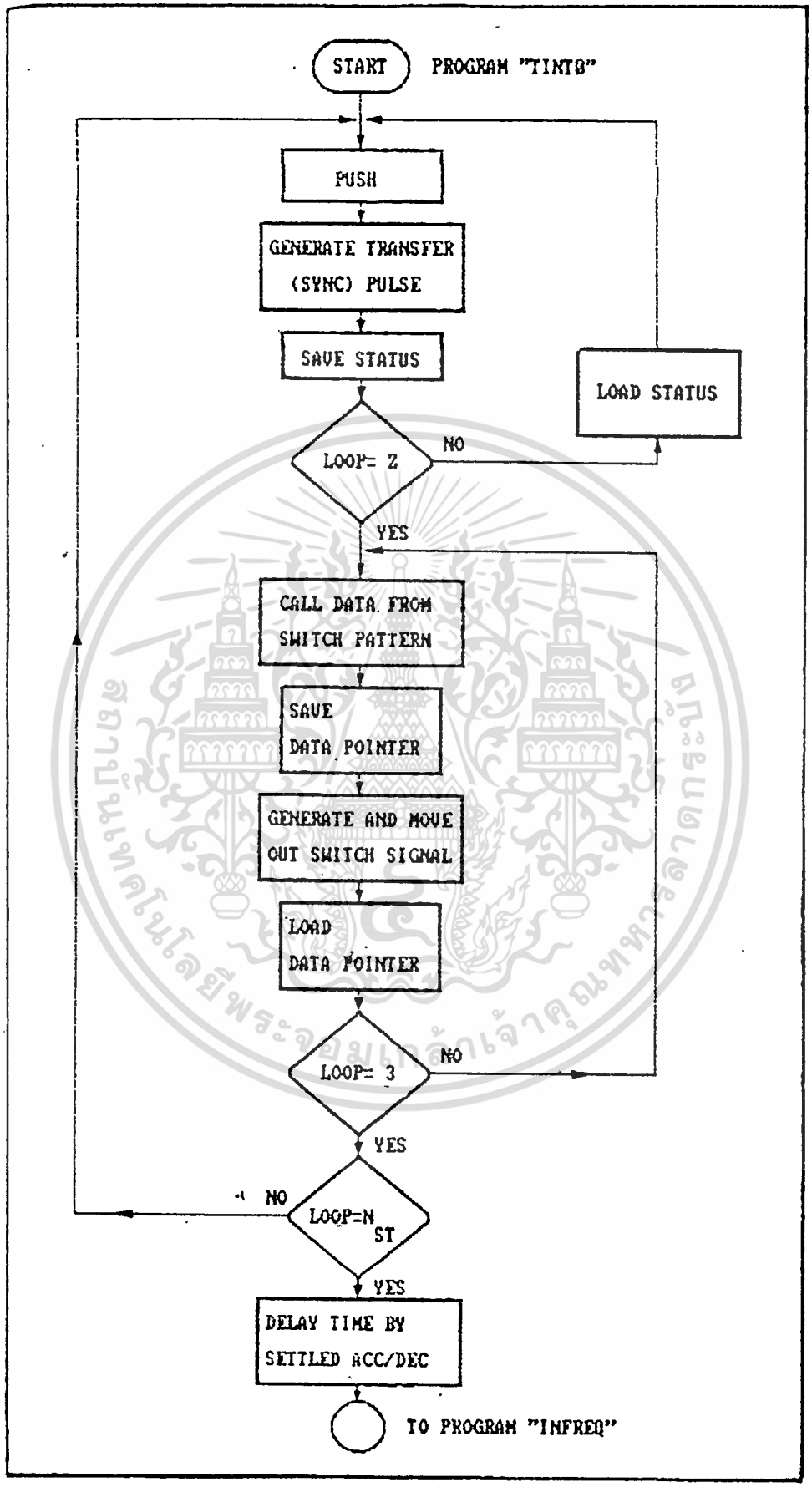
ในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โปรแกรมจะต้องอ่านค่าความถี่ที่จัดตั้งไว้จากอุปกรณ์ภายนอกทุกวงรอบทำงาน เมื่อสร้างมุมสวิทช์ครบทั้งไซเคิลและทุกเฟสเรียบร้อยแล้ว (ทั้งนี้จะกำหนดความถี่สูงสุดไม่เกิน 60 เฮิร์ทช์) พร้อมทั้งมีการตรวจสอบว่าความถี่ขาออกของสัญญาณพีดับบลิวที่สร้างนี้ตรงกับความถี่ที่จัดตั้งไว้หรือไม่ ถ้าหากไม่เท่ากันหรือมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่จัดตั้งไว้ โปรแกรมจะปรับให้วงจรสร้างความถี่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

สำหรับภาคแสดงผลนั้น ซีพียูจะทำหน้าที่แปลงข้อมูลความถี่แบบไบนารี เป็นแบบ BCD (Dinary Code Decimal) แล้วส่งข้อมูลมายังภายนอก ที่ตำแหน่งข้อมูลภายนอกแอดเดรส 0006H ดังได้กล่าวมาแล้ว และสำหรับแผนผังโปรแกรมนี้จะเป็นดังภาพที่ 36

เนื่องจากสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่สร้างขึ้น ณ.ความถี่ต่างๆ กัน ย่อมต้องการค่าเฉพาะตัวไม่เท่ากัน เช่น ค่าจำนวนมุมสวิทช์ต่อคาบ (N_{st}) จำนวนพัลส์ซ้ำ (Z) ค่าคาบเวลาของพัลส์ย่อย (THO) หรือ แอดเดรสเริ่มต้นของแพทเทอร์นนั้นๆ เป็นต้น ในส่วนของการเรียกข้อมูลเฉพาะตัวที่ความถี่ใดๆ จะทำงานในลักษณะอ้างอิงแอดเดรสหลัก โดยจะเท่ากับ 15000+R6 (R6 ชี้ค่าความถี่ขาออกที่ต้องการ) เพื่อนำข้อมูลในแอดเดรสอ้างอิงนั้น ไปหากลุ่มข้อมูลเฉพาะตัวของความถี่ที่ต้องการอีกทอดหนึ่ง ลักษณะการทำงานจะเป็นไปตามแผนผังโปรแกรมในภาพที่ 37

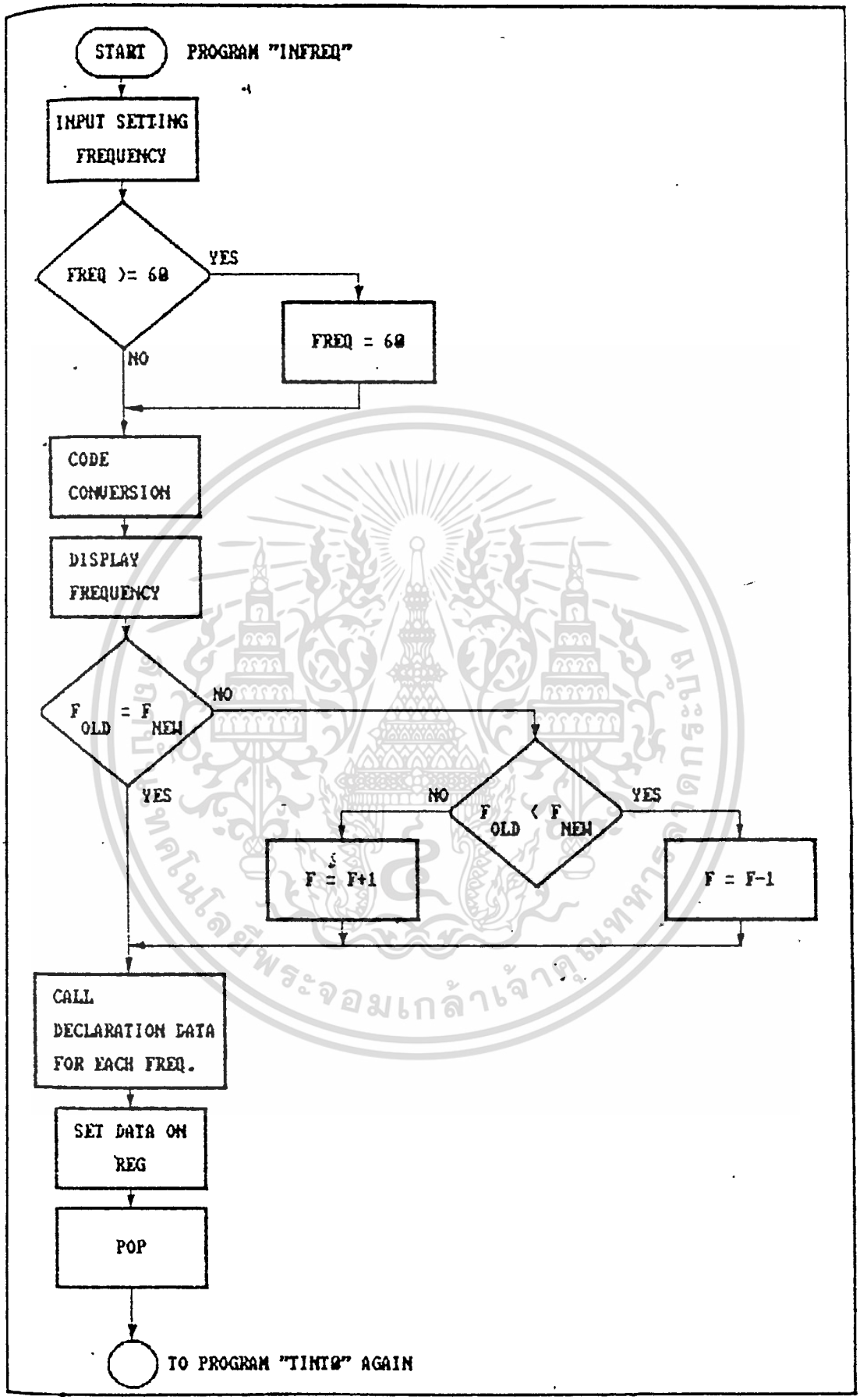
ซึ่งทั้งนี้ค่าแอดเดรสเริ่มต้นของกลุ่มข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์ของความถี่ใดๆ จะไปปรากฏอยู่ในส่วนของโปรแกรม "TINIO" ทำให้สามารถเรียกข้อมูลมุมสวิทช์ในแพทเทอร์นนั้นๆ เพื่อส่งไปนับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



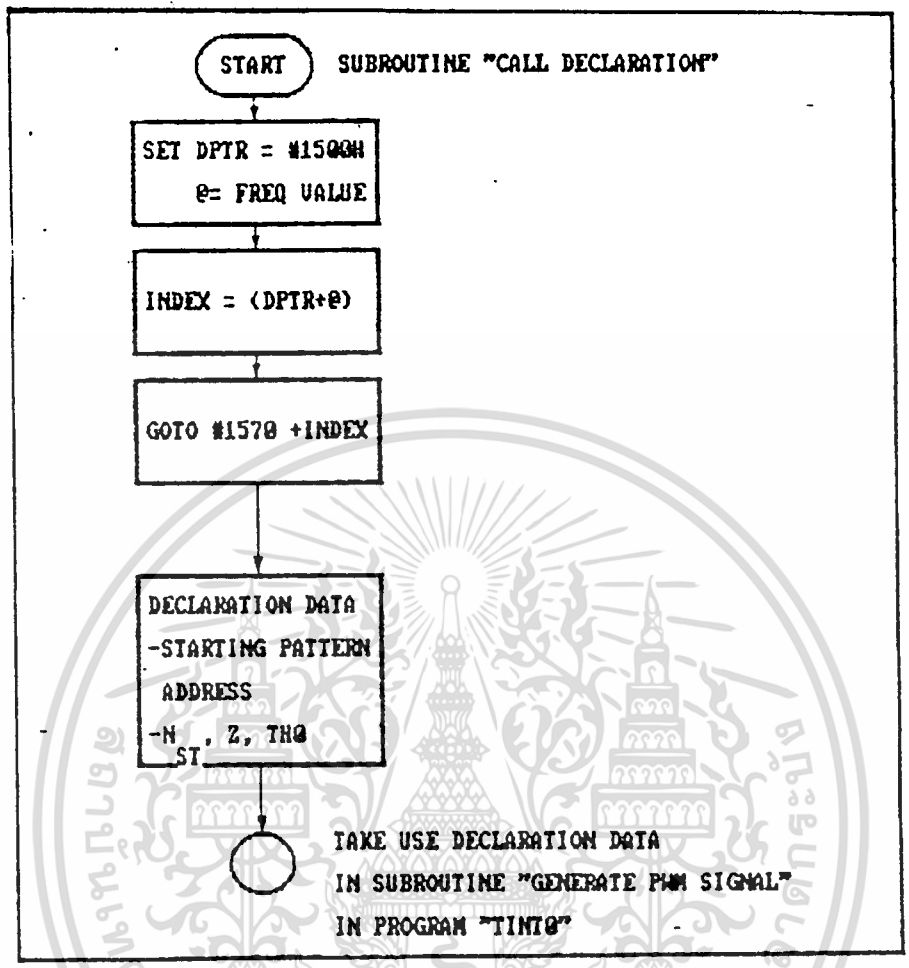
ภาพที่ 35 แผนผังโปรแกรมสร้างสัญญาณการสวิทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 36 แผนผังโปรแกรมอ่าน แสดงผล และตรวจสอบค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 37 แผนผังการเรียกข้อมูลเฉพาะตัวของแต่ละความถี่ขาออก

5. โปรแกรมการอินเตอร์รัพท์

การอินเตอร์รัพท์ของซีพียู ในไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 นี้มี 2 แบบ คือ อินเตอร์รัพท์จากข้อมูลภายนอก (External interrupt) และอินเตอร์รัพท์จากข้อมูลภายในซึ่งมาจากการตั้งเวลาในระบบ (Time interrupt) ทั้งนี้การอินเตอร์รัพท์จากข้อมูลภายในจะกระทำเพื่อสร้างสัญญาณจุดพัลส์ย่อย (Transfer pulse Trigger)เมื่อโปรแกรมนำข้อมูลจากแพทเทอร์นมาสร้างสัญญาณการสวิทช์สิ้นสุดลง เพื่อขอชุดข้อมูลถัดไป การทำงานของโปรแกรมอินเตอร์รัพท์ แต่ละครั้งจะเหมือนกันคือเริ่มต้นด้วยการเก็บรักษาข้อมูลลงในรีจิสเตอร์ (PUSH) นำข้อมูลมาสร้างสัญญาณสวิทช์ (ดังในภาพที่ 35) และเมื่อเปรียบเทียบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พร้อมทั้งค้นหาข้อมูลเฉพาะตัวของความถี่ใหม่เรียบร้อยแล้ว ก็จะดึงเอาข้อมูลที่เก็บรักษาไว้ (POP) ออกมาตามเดิม (ดังในภาพที่ 36) ส่วนการอินเตอร์รัพท์จากข้อมูลภายนอกจะกระทำเพื่อหยุดการทำงานของโปรแกรมควบคุม และระบบการทำงานทั้งหมด เนื่องมาจากระบบป้องกันวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ตรวจสอบพบว่ามีการทำงานเกินพิกัด หรือแรงดันป้อนมีค่าสูงเกินพิกัด หรือเหตุอื่นๆ ที่อาจทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์เสียหายได้ หรือเกิดจากการ OFF สวิทช์ SW_1 (ดังภาพที่ 31) อย่างไรก็ตามเมื่อโปรแกรมหยุดทำงานด้วยอินเตอร์รัพท์จากภายนอกแล้ว เมื่อถูกรีเซตใหม่ โปรแกรมก็จะสามารถทำงานใหม่ได้เช่นเดิม (ดูภาพที่ 33 ประกอบ)

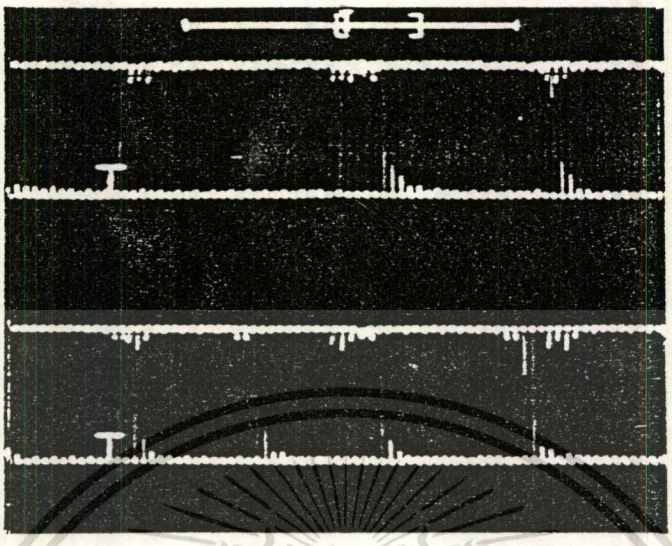
ผลการทดสอบวงจรพีดับบลิวเอ็ม

วงจรพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งเป็นส่วนควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสของโครงการนี้ เป็นแบบหลักการเทียบเคียงพื้นที่ใต้โค้งซายน์ โดยได้สร้างวงจรต้นแบบลงในแผ่นวงจรพิมพ์เพียงแผ่นเดียว ซึ่งประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 ไอซีหน่วยความจำกึ่งถาวรเบอร์ 2764 ไอซีควบคุมการสวิทช์เบอร์ SLE 4520 วงจรภาคแสดงผลและวงจรภาครับสัญญาณภายนอกต่างๆ ดังได้กล่าวรายละเอียดแต่ละภาคมาแล้ว

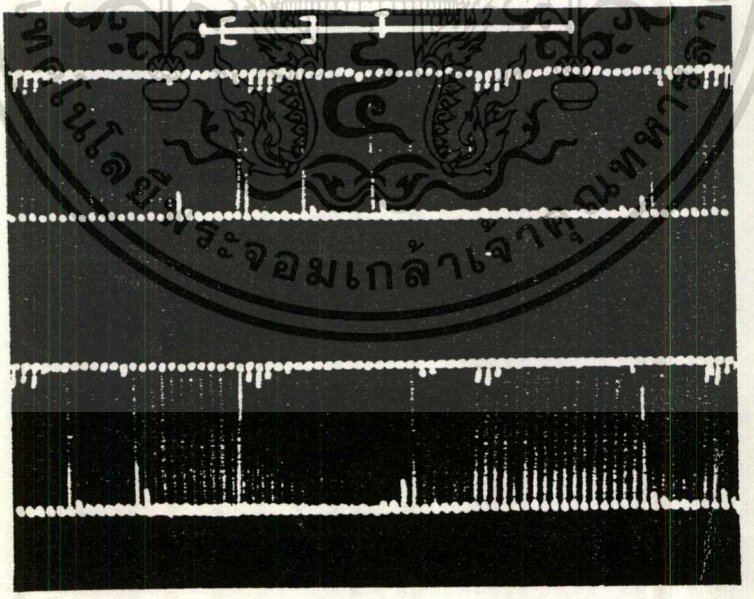
โปรแกรมควบคุม ข้อมูลจำเพาะแต่ละความถี่ตลอดจนข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์ทั้งหมดทุกค่าความถี่ จะเขียนเป็นภาษาแซมบลี โดยใช้โปรแกรม MCS'51 CROSS ASSEMBLER ช่วยในการเขียน เมื่อตรวจสอบการทำงานด้วยโปรแกรม MCS'51 SIMULATOR เรียบร้อยแล้วจึงแปลเป็นภาษาเครื่องอัดเก็บไว้ในหน่วยความจำกึ่งถาวร (EPROM) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมของวงจรพีดับบลิวเอ็มต่อไป ทั้งนี้จำนวนมุมสวิทช์ (N_{st}) จำนวนพัลส์ซ้ำ (Z) ตัวนับตั้งเวลา (THO) ของแต่ละความถี่จะเป็นไปตามตารางที่ 3 ส่วนข้อมูลแพทเทอร์นการสวิทช์แสดงไว้ในโปรแกรมย่อย F0 - F60 ของโปรแกรมควบคุมในภาคผนวก จ.

สัญญาณควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส จากวงจรพีดับบลิวเอ็ม ที่ความถี่ขาออกค่าต่างๆ นี้ แสดงให้เห็นดังภาพที่ 38 ถึงภาพที่ 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

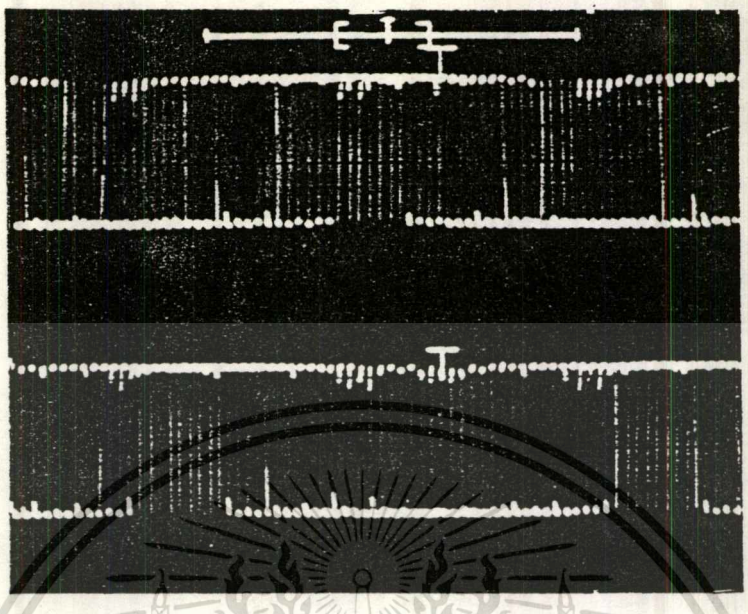


ภาพที่ 38 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ 10 เฮิร์ทซ์ของเฟสที่ 2 และ 1 ตามลำดับ เสกลแรงดัน 2 V/DIV เสกลเวลา 5 mS/DIV

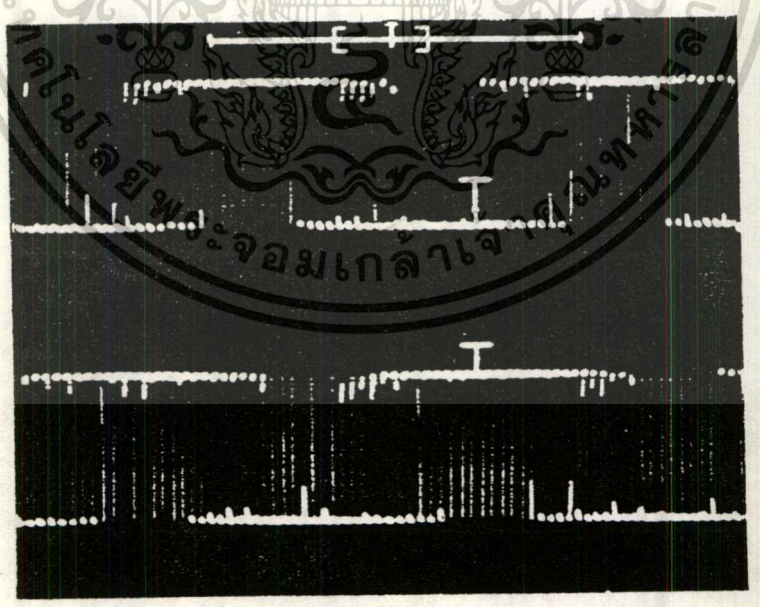


ภาพที่ 39 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ 20 เฮิร์ทซ์ของเฟสที่ 2 และ 1 ตามลำดับ เสกลแรงดัน 2 V/DIV เสกลเวลา 5mS/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

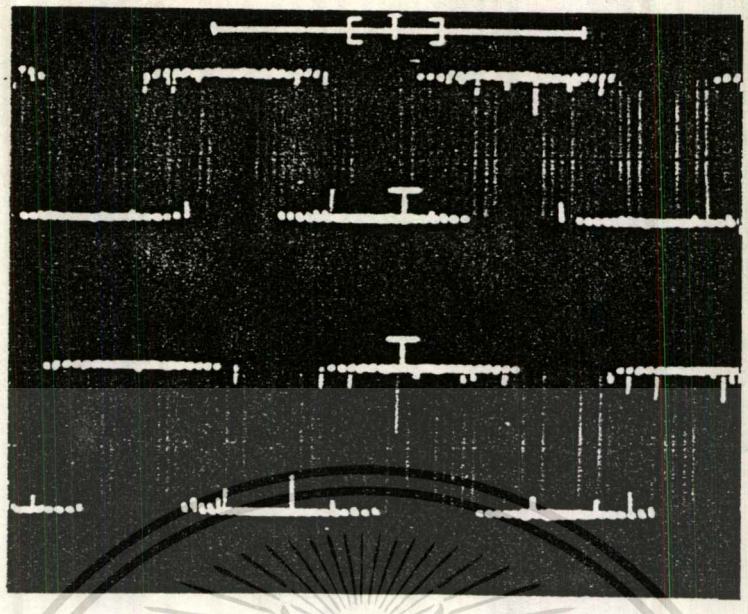


ภาพที่ 40 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ 30 เฮิร์ทซ์ของเฟสที่ 2 และ 1 ตามลำดับ เสกลแรงดัน 2 V/DIV เสกลเวลา 5 mS/DIV

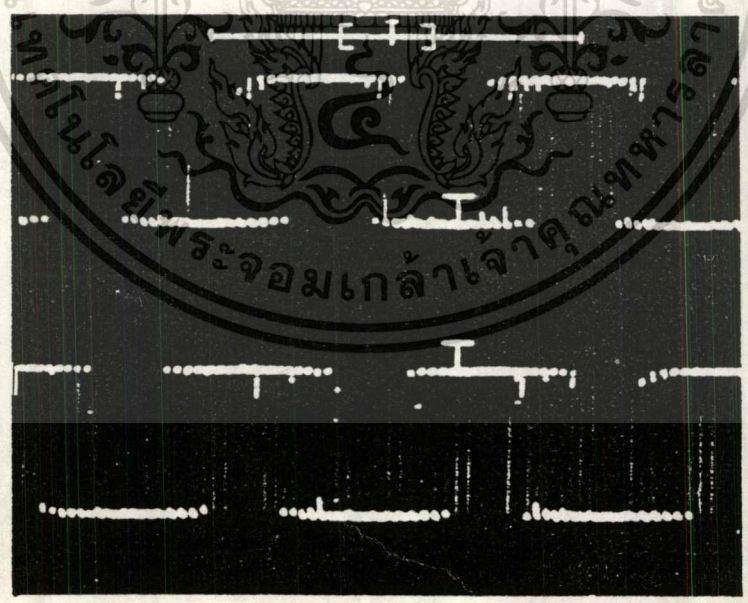


ภาพที่ 41 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ 40 เฮิร์ทซ์ของเฟสที่ 2 และ 1 ตามลำดับ เสกลแรงดัน 2 V/DIV เสกลเวลา 5 mS/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 42 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ 50 เฮิร์ทซ์ของเฟสที่ 2 และ 1 ตามลำดับ สเกลแรงดัน 2 V/DIV เสกลเวลา 5 mS/DIV



ภาพที่ 43 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ 60 เฮิร์ทซ์ของเฟสที่ 2 และ 1 ตามลำดับ สเกลแรงดัน 2 V/DIV เสกลเวลา 5 mS/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าในภาพที่ 38 เป็นสัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ขาออก 10 เฮิร์ทซ์ ซึ่งแสดงเพียงช่วง 50 mS หรือเพียง 1/2 คาบของรูปคลื่นเท่านั้น ทั้งนี้ภายในช่วงเวลาที่แสดงในภาพจะมีมุมสวิทช์จำนวนถึง 72 มุมซึ่งมีค่าละเอียดมาก จึงไม่สามารถเห็นความถี่หลักของสัญญาณได้

ในภาพที่ 39 เป็นสัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ขาออก 20 เฮิร์ทซ์ ซึ่งแสดงช่วง 50 mS หรือเท่ากับ 1 คาบของรูปคลื่น ทั้งนี้ใน 1 คาบนี้จะมีมุมสวิทช์จำนวน 72 มุม ซึ่งยังมีละเอียดมาก จนไม่สามารมองเห็นความถี่หลัก 20 เฮิร์ทซ์ของสัญญาณได้เช่นกัน

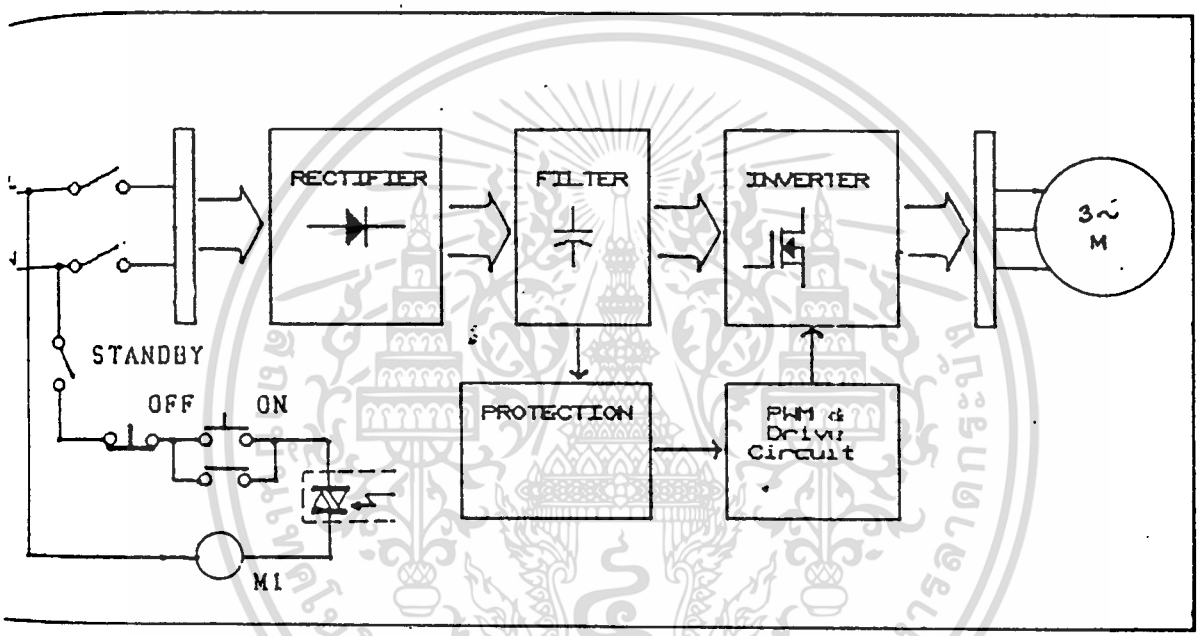
ส่วนในภาพที่ 40 สัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ขาออก 30 เฮิร์ทซ์ ซึ่งแสดงในช่วง 50 mS เช่นกัน จะเห็นความถี่หลักของสัญญาณชัดเจน ใน 1 คาบของสัญญาณนี้จะใช้เวลาประมาณ 33 mS หรือประมาณ 6.6 ช่วง (DIV) ซึ่งมีมุมสวิทช์จำนวน 48 มุมต่อ 1 คาบ

สำหรับภาพที่ 41 ถึง 43 นั้นเป็นสัญญาณขับนำเกทที่ความถี่ขาออก 40 ถึง 60 เฮิร์ทซ์ตามลำดับ มีจำนวนมุมสวิทช์ต่อ 1 คาบเท่ากับ 36, 30 และ 24 ตามลำดับเช่นกัน ซึ่งจะเห็นความถี่หลักในแต่ภาพชัดเจนขึ้น เพราะที่ความถี่ขาออกยิ่งสูง ยิ่งต้องใช้จำนวนมุมสวิทช์ต่อคาบน้อยลง เพื่อรักษาให้ค่าความถี่การสวิทช์มีค่าค่อนข้างคงที่ ที่ทุกความถี่ขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประกอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่สร้างขึ้นประกอบด้วยวงจรกำลัง 3 ส่วนคือ วงจรเรคติไฟเออร์ วงจรกรองความถี่ และวงจรอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังต้องประกอบด้วยวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการสวิทช์(หรือวงจรพีดับบลิวเอ็ม) และวงจรป้องกันอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อวงจรทั้งหมด และต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะทำงาน การเชื่อมต่อวงจรหลักต่างๆ จะเป็นดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 การเชื่อมต่อระหว่างวงจรหลักต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์

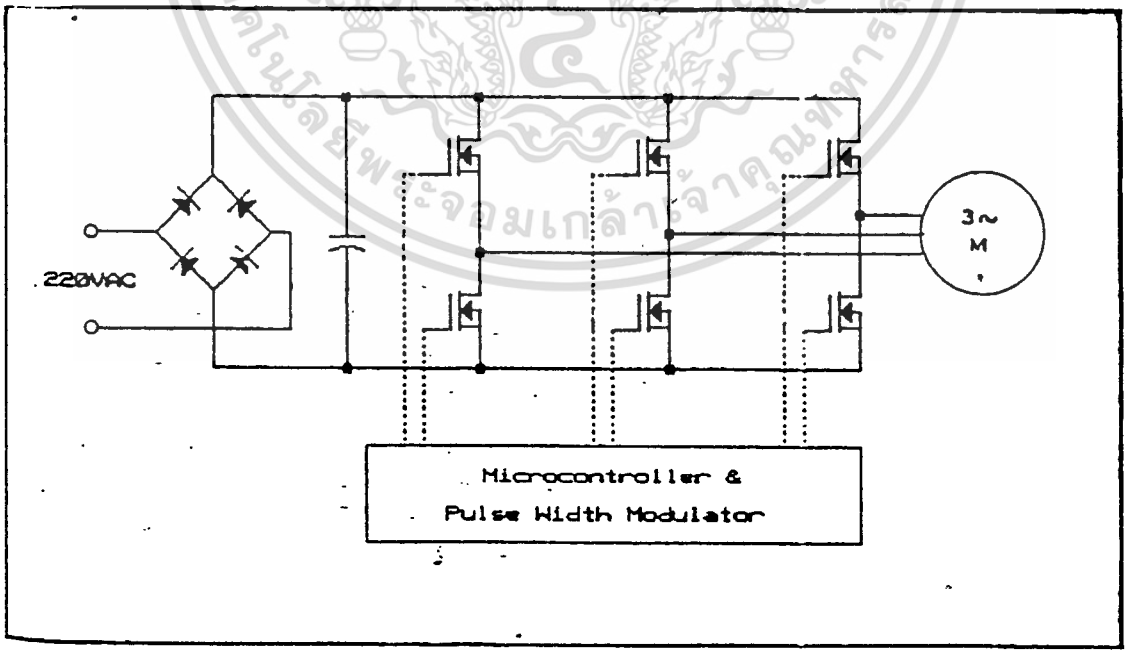
ขณะเริ่มทำงาน สวิทช์ Stand by จะต้องอยู่ในตำแหน่ง "ON" เพื่อมีไฟเลี้ยงวงจรควบคุม และวงจรป้องกันของวงจรอินเวอร์เตอร์ จากนั้นเมื่อกดสวิทช์ "ON" จึงจะทำให้ตัวสัมผัสแม่เหล็ก (Magnetic Contactor) ต่อวงจรเพื่อส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 โวลท์ 1 เฟสเข้าสู่วงจรเรคติฟายเออร์ได้ หลังจากสับสวิทช์ RUN/STOP ไปสู่ตำแหน่ง "RUN" แล้ว โปรแกรมควบคุมในวงจรจึงเริ่มทำงานเพื่อสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มไปควบคุมการสวิทช์ให้กับอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ในอินเวอร์เตอร์ โดยเริ่มต้นที่ความถี่ 0 เฮิร์ทช์ จนถึงค่าความถี่ที่จัดตั้งจากภาค Frequency setting โดยแต่ละขั้นความถี่ 1 เฮิร์ทช์ จะใช้เวลาประมาณ 0.98 วินาที ทั้งนี้รายละเอียดสำคัญของแต่ละภาคจะเป็นดังนี้

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ภาคจ่ายแรงดันไฟตรง

มีหน้าที่แปลงระบบไฟฟ้าจากแรงดันไฟสลับมาเป็นแรงดันไฟตรง เพื่อเลี้ยงวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรกรองสัญญาณ (Filter)วงจรเรียงกระแสจะเปลี่ยนแรงดันไฟสลับแบบ 1 เฟส 220 โวลท์ 50 เฮิร์ทซ์ ให้เป็นแรงดันไฟตรงขนาด 310 โวลท์ แรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสนี้ยังไม่เรียบ เนื่องจากมีองค์ประกอบของความถี่ไฟสลับปะปนอยู่จึงจำเป็นต้องกรองสัญญาณความถี่ไฟสลับนั้นๆ ออก ด้วยวงจรกรองสัญญาณ (Filter) เพื่อให้แรงดันไฟตรงที่ได้ ราบเรียบที่สุด

วงจรเรียงกระแสที่ใช้เป็นแบบวงจรบริดจ์ชนิด 1 เฟสประกอบด้วยไดโอดขนาดทนกระแสได้ 20 แอมแปร์ และทนแรงดันย้อนกลับได้ 600 โวลท์ จำนวน 4 ตัว ติดตั้งอยู่บนแผ่นระบายความร้อน ส่วนวงจรกรองสัญญาณเป็นแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ชนิด 1 ออร์เดอร์โดยใช้ตัวเก็บประจุขนาด 1800 ไมโครฟารัด ทนแรงดันไฟตรงต่อเนื่องได้ 350 โวลท์แบบอิเลคโตรไลติกจำนวน 1 ตัว และต่อคร่อมตัวเก็บประจะด้วยความต้านทานขนาด 30 กิโลโอร์ม 10 วัตต์ สำหรับการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 45 วงจรภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ภาควงจรอินเวอร์เตอร์

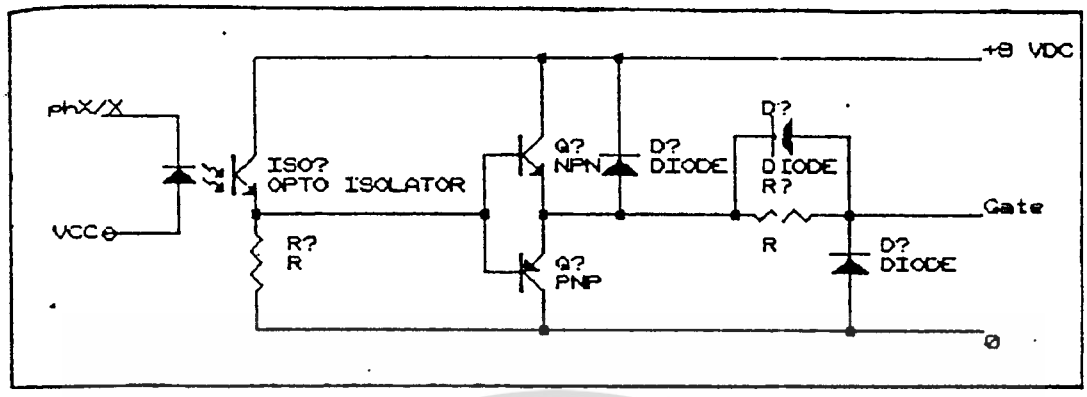
ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงขนาด 310 โวลท์จากวงจรกรองสัญญาณให้เป็นแรงดันไฟสลับแบบ 3 เฟสขนาดแรงดันสูงสุด 220 โวลท์ โดยสามารถปรับระดับแรงดัน และความถี่ขาออกได้ด้วยการควบคุมการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 แบบมอดูเลทสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (PWM.Inverter) จากวงจรพีดับบลิวเอ็ม ลักษณะวงจรอินเวอร์เตอร์ที่สร้างแสดงในภาพที่ 45

อุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงงานเป็นทรานซิสเตอร์กำลังแบบ IGBT เบอร์ 6MBI20L-060 เป็นแบบ MODULE 6 ตัวใน 1PACK ซึ่งสามารถทนกระแสต่อเนื่องสูงสุดได้ 20 แอมแปร์ ทนแรงดันตกคร่อมต่อเนื่องสูงสุด 600 โวลท์ มีค่าคาบเวลาการสวิทช์ขณะเริ่มทำงาน (Turn on time) ประมาณ 400 นาโนวินาที คาบเวลาการสวิทช์ขณะหยุดทำงาน (Turn off time) ประมาณ 600 นาโนวินาที จะเห็นว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูง อีกทั้งสะดวกต่อการควบคุมการสวิทช์ เนื่องจากถูกจุดทำงานด้วยระดับแรงดันเกท (Gate threshold Voltage) จึงทำให้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบ IGBT นี้เหมาะสมกับงานที่ต้องการการควบคุมทำงานที่ความถี่สูง

เนื่องจากทรานซิสเตอร์แบบนี้ต้องการระดับแรงดันที่เกท (Gate theshold Voltage) ไม่ต่ำกว่า 5 โวลท์ จึงใช้ IC MOSGATE DRIVE เบอร์ IR2130 มาทำเป็นวงจรขับนำเกทแสดงดังภาพที่ 46

อย่างไรก็ตาม ทรานซิสเตอร์กำลังที่อนุกรมกันในกิ่งวงจรเดียวกัน เช่น T1 กับ T2 T3 กับ T4 , T5 กับ T6 จะต้องถูกควบคุมให้เวลาเริ่มทำงาน (Turn on time) ช้ากว่าเวลาหยุดทำงาน (Turn off time) ของอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งเสมอเพื่อป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิทช์ทั้ง 2 ในขณะทำงาน

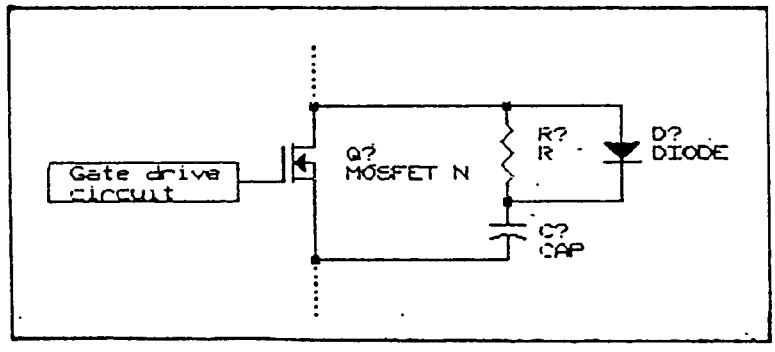
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 46 วงจรขับเกท (Drive circuit)

เนื่องจากภาระของวงจรอินเวอร์เตอร์เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ พลังงานสะสมตกค้างในขดลวดแต่ละขดของมอเตอร์อาจเป็นผลทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วเดรน-ซอร์ส (Drain-source voltage : V_{ds}) ของทรานซิสเตอร์กำลังแบบมอสเฟต ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงมาก ทั้งในขณะเริ่มและหยุดนำกระแส ที่เรียกว่า แรงดันเกินปกติชั่วขณะ (Overshoot voltage) ซึ่งถ้าหากทรานซิสเตอร์กำลังที่ใช้ ทนแรงดันสูงสุดได้ไม่เพียงพอก็อาจทำให้วงจรอินเวอร์เตอร์ชำรุดเสียหายได้

ทรานซิสเตอร์กำลังแบบมอสเฟตที่ใช้นี้ สามารถทนแรงดันสูงสุดได้เพียง 600 โวลท์ ซึ่งอาจต่ำกว่าแรงดัน Overshoot ที่เกิดขึ้น เพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายของทรานซิสเตอร์กำลังจึงต่อคร่อมขั้วเดรน-ซอร์ส (Drain-source) ของทรานซิสเตอร์กำลังทุกตัว ด้วยวงจรสนับเบอร์แบบอาร์-ซี-ดี (RCD snubber circuit) แสดงดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 วงจรสลับเบอร์แบบอาร์-ซี-ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ภาคระบบป้องกันวงจร

เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ ควบคุมโดยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งวงจรพีดับบลิวเอ็มจะทำงานด้วยโปรแกรมควบคุม จะเห็นว่าอัตราเร่ง, หยุดที่อาจที่อันตรายต่อมอเตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ได้นั้นถูกควบคุมโดยอาศัยโปรแกรมควบคุมซึ่งทั้งนี้สามารถหยุดการทำงานของโปรแกรม และหยุดการสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ทันทีที่ได้รับสัญญาณอินเวอร์เตอร์รัพท์ภาพนอก จากทางขา INTO หรือ INTI ของไอซีไมโครโปรเซสเซอร์ อย่างไรก็ตามสัญญาณอินเตอร์รัพท์ที่ป้อนให้ขา INTO หรือ INTI จะได้การตอบสนองมาจากวงจรตรวจสอบความผิดปกติของระบบ วงจรตรวจสอบหรือวงจรป้องกันที่สร้างขึ้นสำหรับโครงงานนี้ประกอบด้วยวงจรป้องกันแรงดันเกินพิกัดและวงจรป้องกันกระแสเกินพิกัด

3.1 วงจรป้องกันแรงดันเกินพิกัด

จากกรณีที่แรงดันไฟตรงใน Bus สูงเกินกว่า 310 โวลท์ อาจเป็นผลให้อัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ไม่ตรงตามที่กำหนด และทำให้มอเตอร์เสียหายได้ การตรวจสอบแรงดันไฟตรงดังกล่าวทำได้ โดยแบ่งแรงดันลงมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) โดยไอซีเบอร์ LM311 เมื่อแรงดันเกินกว่าแรงดันอ้างอิงที่ตั้งไว้ จะมีแรงดันเอ้าท์พุท ออกมาจุดให้เอสซีอาร์นำกระแส และตัดวงจรเชื่อมต่อทางแสงโดยใช้ไอซีเบอร์ 4N25 ซึ่งจะเป็นสัญญาณ "0" ไปอินเตอร์รัพท์ซีพียูของไมโครคอนโทรลที่ขา INTO จึงทำให้โปรแกรมหยุดทำงาน เพื่อหยุดการทำงานของอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ ในขณะเดียวกันก็จะไปตัดวงจรของไอซีเบอร์ MCC 3020 ทำให้ตัวสัมผัสแม่เหล็ก (Magnetic Contactor) ตัดระบบไฟสลับที่จะส่งผ่านให้กับวงจร

3.2 วงจรป้องกันกระแสเกิน

เมื่อเกิดการการลัดวงจรของโหลด หรือการเพิ่มความถี่เร็วเกินไป อาจทำให้กระแสใน DC Bus สูงเกินพิกัดได้ ในการตรวจจับกระแสจะใช้ไอซีเบอร์ SAS231W ซึ่งทำงานตามหลักการของ Hall Effect และสามารถแยกส่วน (Isolate) การทำงานระหว่างวงจรกำลัง กับวงจรควบคุม สัญญาณเอ้าท์พุทของ SAS231W นี้จะนำไปผ่านวงจรขยายสัญญาณเพื่อใช้จุดชนวนเอสซีอาร์ให้นำกระแสเมื่อกระแสที่ตรวจจับเกินค่าอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อหยุดการทำงานของโปรแกรม และหยุดการจ่ายแรงดันไฟสลับเข้าสู่วงจรเรียงกระแสเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องข้อจำกัดด้านเวลา และอุปกรณ์ ทำให้ไม่สามารถสร้างวงจรในส่วนภาคระบบป้องกันวงจรที่ได้ออกแบบไว้เพื่อประกอบกับวงจรกำลังได้ทัน จึงไม่สามารถนำผลการทดลองของวงจรทั้งสองดังกล่าวมาแสดงได้ และทำให้จำเป็นต้องระมัดระวังวงจรภาคกำลังเป็นพิเศษขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

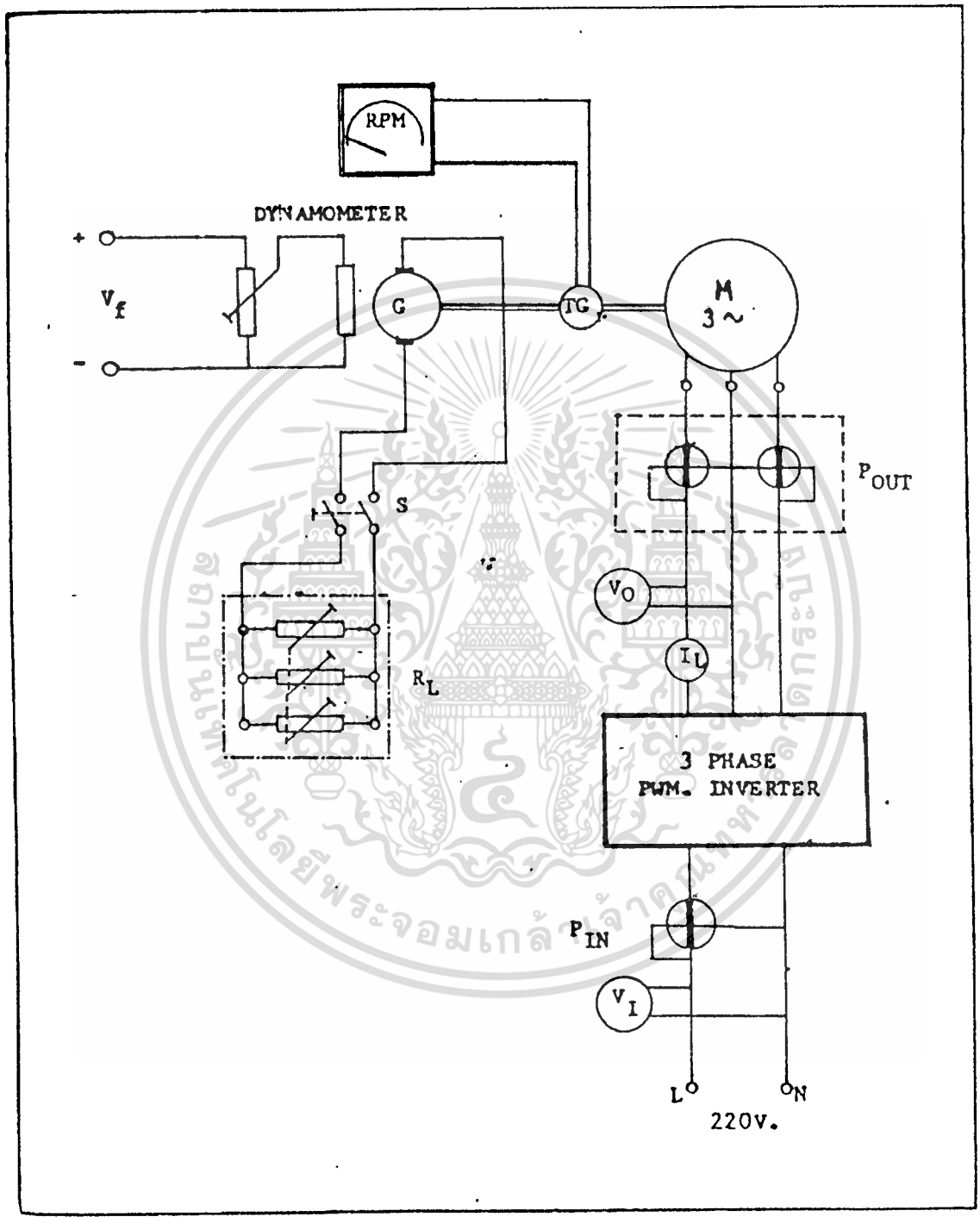
<u>จุดประสงค์ของการทดสอบ</u>

เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพีดับบลิว ตามหลักการเทียบเคียงพื้นที่ใต้เส้นโค้งซายน์ ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ จะถูกนำไปทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก แรงบิดที่เพลามอเตอร์_ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่พิกัดความถี่ขาออก 50 เฮิร์ทซ์ ตลอดจนวัดหารูปคลื่นของกระแสมอเตอร์ และสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้น ทั้งในขณะมอเตอร์ไม่มีภาระและขณะมีภาระ ที่ความถี่ขาออกตั้งแต่ 10 ถึง 60 เฮิร์ทซ์

เนื่องจากเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้ จุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการเกิดขององค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิคขณะใช้งานจริง กับความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นจากการจำลองของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเทียบพื้นที่ใต้เส้นโค้ง ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นในโครงงานฉบับนี้จึงได้เลือกใช้อัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์ (V/F) ดังในภาพที่24 ทำให้สามารถทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วนี้ยังขาดวงจรป้องกัน ทำให้ไม่สามารถทดสอบขณะมอเตอร์ทำงานเต็มพิกัดได้ จึงทดสอบได้เพียงครึ่งหนึ่งของพิกัดกำลังสูงสุดของมอเตอร์เท่านั้น

วงจรสำหรับทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์แสดงดังภาพที่ 48และผลการวัดและคำนวณค่าต่างๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 48 วงจรการทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ</u>

จากภาพวงจรการทดสอบเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น ประกอบด้วยเครื่องวัดหลายรูปแบบดังนี้

1. P_{in} (Input Power : W)

การวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ จะใช้วัตต์มิเตอร์ 1 เฟส ชนิดเข็มชี้ ซึ่งมีระบบวัดแบบ Electrodynamometer และมีชั้นความผิดพลาด (Class) เท่ากับ 0.5

2. P_{out} (Output Power : W)

การวัดกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ (หรือกำลังไฟฟ้าขาเข้าของมอเตอร์) จะใช้วัตต์มิเตอร์ 3 เฟสชนิดเข็มชี้ ซึ่งมีระบบการวัดแบบ Electrodynamometer และมีชั้นความผิดพลาด (Class) เป็น 0.5 เช่นกัน

3. V_{in} (Input Voltage : V)

แรงดันไฟสลับขาเข้าของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์นี้ จะวัดด้วยโวลท์มิเตอร์แบบดิจิตอล (Digital Voltmeter) ค่าแรงดันที่วัดได้จึงเป็นค่า True RMS. Voltage

4. V_{out} (Output Voltage : V)

แรงดันไฟฟ้าขาออกของเครื่องควบคุมความเร็ว เป็นสัญญาณแรงดันแบบพีดับบลิวเอ็มนั้น จะถูกวัดด้วย Digital Voltmeter ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่า True RMS. Voltageเช่นกัน

5. I_L (Output Current : A)

กระแสขาเข้าของมอเตอร์จะถูกวัดด้วย Moving Iron Ammeter ที่มีค่าความผิดพลาด (Class) เท่ากับ 0.5

6. T (Output Torque : Nm)

เครื่องวัดแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ที่เรียกว่า Torquemeter มีลักษณะเป็น Dynamometer เชิงกล ซึ่งแสดงค่าแรงบิดออกมาด้วยเข็มชี้เสกล ที่จะแปรผันไปตามแรงบิดเชิงกลของภาระที่ถูกมอเตอร์ขับนั้นๆ

7. f_o (Output Frequency : Hz)

ค่าความถี่ขาออก ดังแสดงในตารางที่ 4 นั้นเป็นค่าความถี่ที่เซตไว้ที่เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำการปรับเพื่อทดสอบเป็นขั้นๆ ขั้นละ 5 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในการวัดหารูปคลื่นแรงดัน กระแสขาออก ตลอดจนสเปคตรัมฮาร์โมนิคของกระแสขาออกนั้นๆ ยังต้องใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์การวัดอื่นๆ ประกอบด้วยเช่นกัน

8. Digital Oscilloscope

ออสซิสโลสโคปแบบดิจิตอลที่ใช้นี้สามารถคงค่า (storage)ในขณะทำการวัดได้และยังจะต้องสามารถคำนวณหาสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นทั้งหมดของสัญญาณได้ด้วยในที่นี้จะใช้ Digital Oscilloscope

9. Current Amplifier และ Current Probe

ในการวัดรูปคลื่นของกระแส จะใช้ Current Probe ซึ่งเป็นหัววัดกระแสแบบ Hall Effect และ Current Amplifierโดยวิธีคล้องสายไฟที่ต้องการวัดหารูปคลื่นกระแสนั้นๆ

<u>ขั้นตอนของการทดสอบ</u> (ขณะมอเตอร์มีภาระ)

1. ตรวจสอบว่าเพลาของมอเตอร์ได้คัปปลิ้งกับเพลาของภาระ เรียบร้อยแล้ว

2. จ่ายแรงดันไฟสลับ 220 โวลท์ให้กับเครื่องควบคุมความเร็ว พร้อมทั้งปรับความถี่ไว้ที่ 0 เฮิร์ทซ์

3. กดปุ่ม "RUN" เพื่อเริ่มทำงานที่ 0 เฮิร์ทซ์

4. ค่อยๆ ปรับความถี่ขึ้นจนถึงค่า 60 เฮิร์ทซ์ แล้วรอจนกระทั่งได้ค่าความถี่ขาออกตรงตามต้องการ โดยพิจารณารูปคลื่นกระแสจากออสซิลโลสโคป

5. เมื่อได้ความถี่ขาออกที่ 60 เฮิร์ทซ์แล้ว จึงค่อยเพิ่มค่าภาระให้กับมอเตอร์ โดยการเพิ่มโหลดให้กับ DC Generator อย่างช้าๆ จนกระทั่งแรงบิดจาก Torque meter ชี้ที่ค่าประมาณ 4.2 Nm (นิวตัน-เมตร) ซึ่งเป็นค่าแรงบิดบริเวณครึ่งพิกัดกำลังสูงสุดของมอเตอร์ เนื่องจากแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เท่ากับ

$$T_{max} = \frac{60.P_{out}}{2\pi N}$$

$$= \frac{60.\eta_{LM}\ P_{in}}{2\pi N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามอเตอร์ที่ทดสอบมีขนาดกำลังขาเข้า 1500 วัตต์ ประสิทธิภาพ 85% ความเร็วพิกัด 1450 รอบ/นาที ดังนั้นแรงบิดสูงสุดจะเท่ากับ 8.4 นิวตัน-เมตร

6. วัดและบันทึกค่า f_o, V_o, I, T, n จากเครื่องวัดต่างๆ ในวงจร

7. บันทึกภาพแรงดันไฟขาออก (Output Line voltage) จากช่องที่ 1 และกระแสขาออก (Output Line current) จากช่องที่ 2 ของ Digital Oscilloscope

8. นำสัญญาณกระแสจากช่อง 2 ของ Digital Oscilloscope ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบฮาร์โมนิค พร้อมบันทึกภาพสเปคตรัมฮาร์โมนิคที่วิเคราะห์ได้จากรูปคลื่นกระแสนั้น

9. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 6 ถึงข้อ 8 โดยลดความถี่ลงขั้นละ 5 เฮิร์ทซ์ จนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุด ทั้งนี้ในการทดสอบให้แรงบิดคงที่ประมาณ 4.2 Nm เสมอ

10. หยุดจ่ายแรงดันให้กับเครื่องควบคุมความเร็ว (ขณะมอเตอร์ไม่มีภาระ)

11. ปลดภาระที่เพลาของมอเตอร์ออกให้เรียบร้อย

12. จ่ายแรงดันไฟสลับ 220 โวลท์ให้กับเครื่องควบคุมความเร็ว พร้อมทั้งปรับความถี่ไว้ที่ 0 เฮิร์ทซ์

13. กดปุ่ม "RUN" เพื่อเริ่มทำงานที่ 0 เฮิร์ทซ์

14. ค่อยๆ ปรับความถี่ขึ้นจาก 0 ถึง 60 เฮิร์ทซ์ โดยปรับเป็นขั้นๆ ขั้นละ 5 เฮิร์ทซ์ ในการปรับแต่ละครั้ง เมื่อรอจนกระทั่งได้ค่าความถี่ขาออกตรงตามต้องการแล้ว ให้นำสัญญาณกระแสจากช่อง 2 ของ Digital Oscilloscope ไปวิเคราะห์ หาองค์ประกอบฮาร์โมนิค พร้อมบันทึกภาพสเปคตรัมฮาร์โมนิคที่วิเคราะห์ได้จากรูปคลื่นกระแสนั้น

15. เมื่อบันทึกภาพที่ต้องการแล้ว ปิดแหล่งจ่ายแรงดันให้เรียบร้อยด้วย

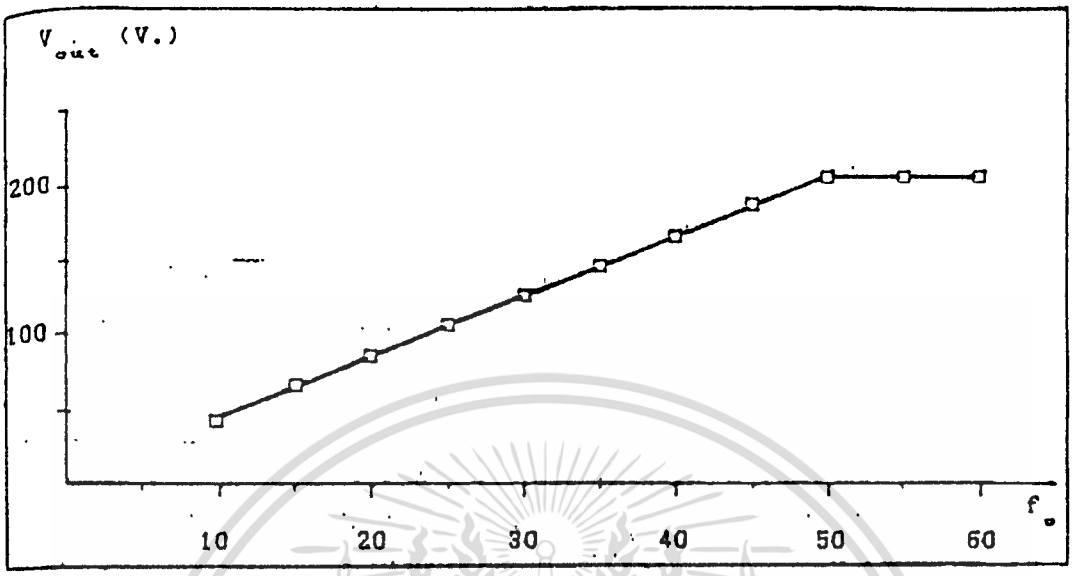
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ผลการวัดค่าต่างๆจากการทดสอบเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ครึ่งพิกัดสูงสุด

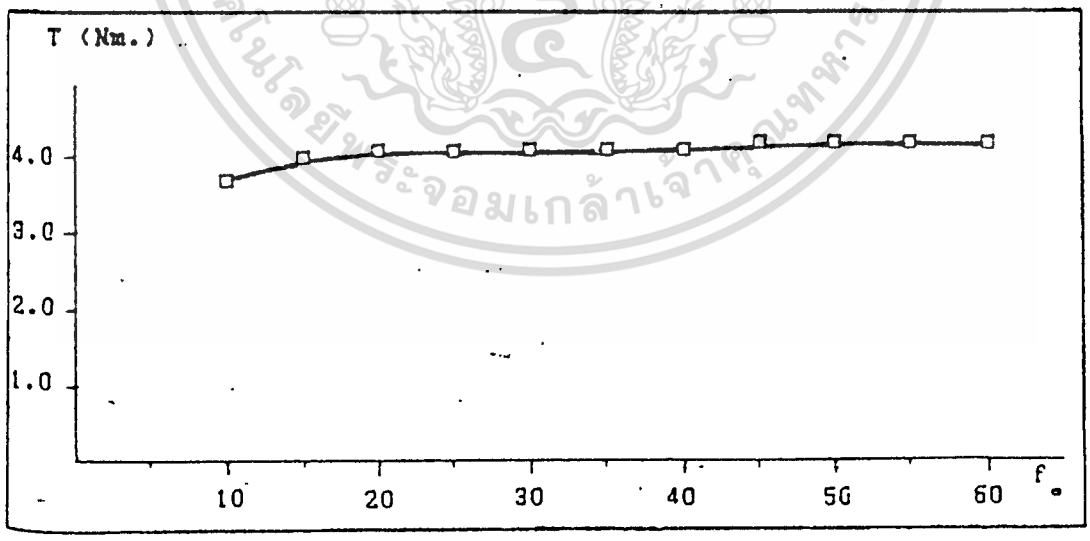
ความถี่	แรงดันขาออก	กระแสขาออก	แรงบิด	ความเร็วรอบ
f_o(Hz)	V_o(V)	I_L(A)	T(Nm)	n(RPM)
10	42	2.8	3.7	267
15	65	2.8	4.0	406
20	85	2.97	4.1	506
25	105	3.1	4.1	722
30	126	3.15	4.1	873
35	146	3.25	4.1	1022
40	166	3.35	4.1	1168
45	185	3.4	4.2	1322
50	205	3.5	4.2	1471
55	205	3.5	4.2	1621
60	205	3.5	4.2	1697

ผลการทดสอบขณะทำงาน ที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดกำลังสูงสุดของมอเตอร์ที่ได้ตามตารางที่ 4 สามารถเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับค่าความถี่ขาออกได้ดังภาพที่ 49 และแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์กับความถี่ขาออก ดังภาพที่ 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความถี่ขาออก



ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความถี่ขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดต่างๆ เช่นประเภท Moving Iron Instrument และประเภท Electrodynamometer Instrument ที่ใช้ในการทดสอบ สามารถให้ความเที่ยงตรงแม่นยำได้เฉพาะกับสัญญาณชายน์บริสุทธิ์ที่ความถี่ 45 ถึง 65 เฮิร์ทซ์เท่านั้น ทำให้ค่าต่างๆ ที่วัดได้ ณ. ความถี่ต่ำๆ มีความผิดพลาดค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงไม่นำมาบันทึกลงในตารางที่ 4

อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบในตารางที่ 4 นั้น ได้นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับความถี่ขาออกดังภาพที่ 49 และระหว่างแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์กับความถี่ขาออกดังภาพที่ 50 ซึ่งทั้งนี้ในขณะมอเตอร์ทำงานที่ครึ่งพิกัดกำลังสูงสุด ณ. ความถี่พิกัด 50เฮิร์ทซ์นั้นสามารถวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้า (P_{in})และกำลังไฟฟ้าขาออก (P_{out}) ของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เป็น 1000 วัตต์ และ 700 วัตต์ ตามลำดับ ทำให้คำนวณค่าประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่พิกัด 50 เฮิร์ทซ์ ได้ดังนี้

$$\text{ค่าประสิทธิภาพ } (\eta) \text{ ของเครื่อง} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าขาออก } (P_{out}) \times 100}{\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า } (P_{in})}$$

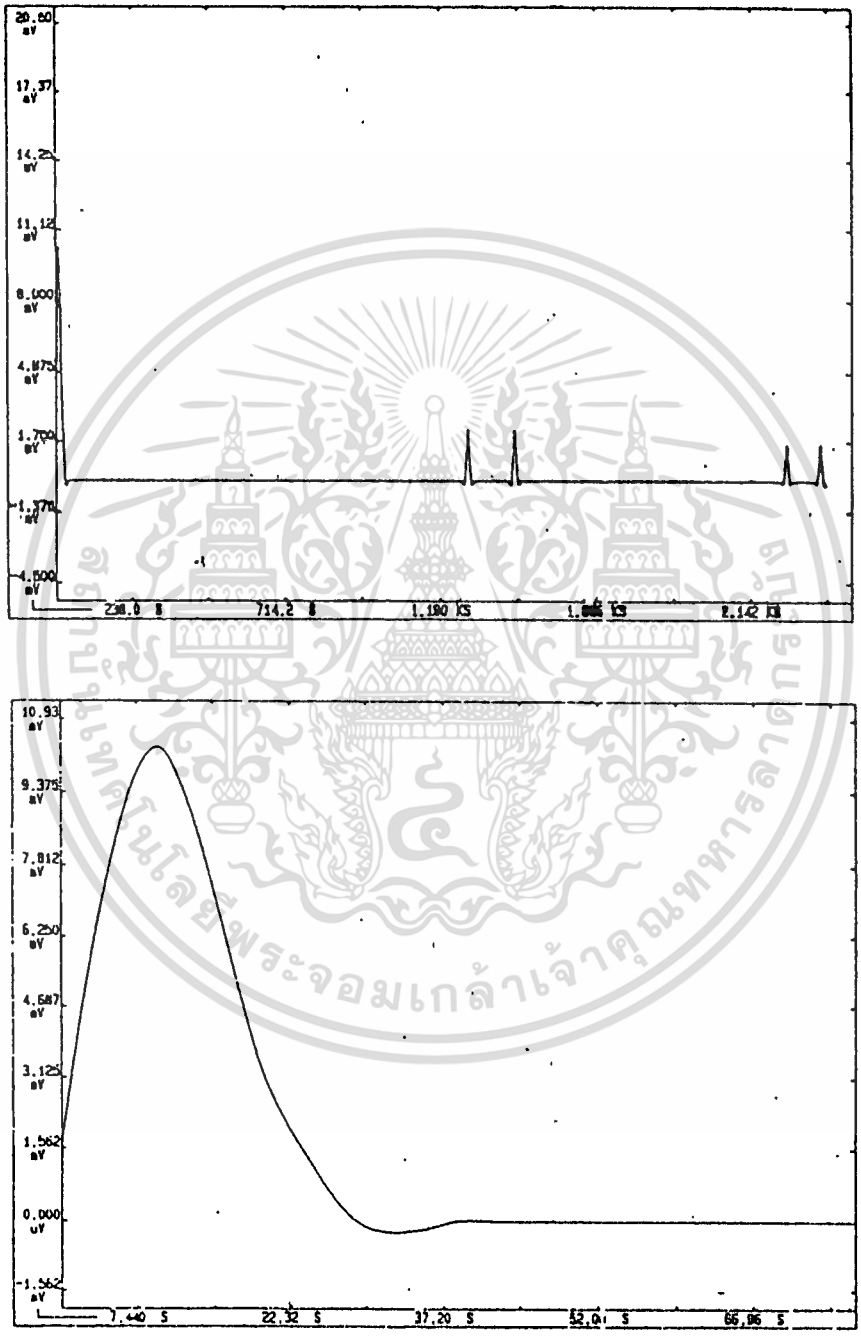
$$= \frac{70 \times 100}{1000}$$

$$= 70 \ \%$$

จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ขณะทำงานที่ครึ่งพิกัดกำลังสูงสุดของมอเตอร์ขนาด 1500 วัตต์มีค่าเพียง 70% ซึ่งค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ มีการสูญเสียพลังงานไปมากในรูปความร้อนที่เกิดขึ้นจากวงจรสนับเบอร์ ตลอดจนความถี่สูงเนื่องจากฮาร์โมนิคที่อาจทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดจากเครื่องวัดประเภท Electrodynamometer ที่ใช้ในการทดสอบ ผิดพลาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

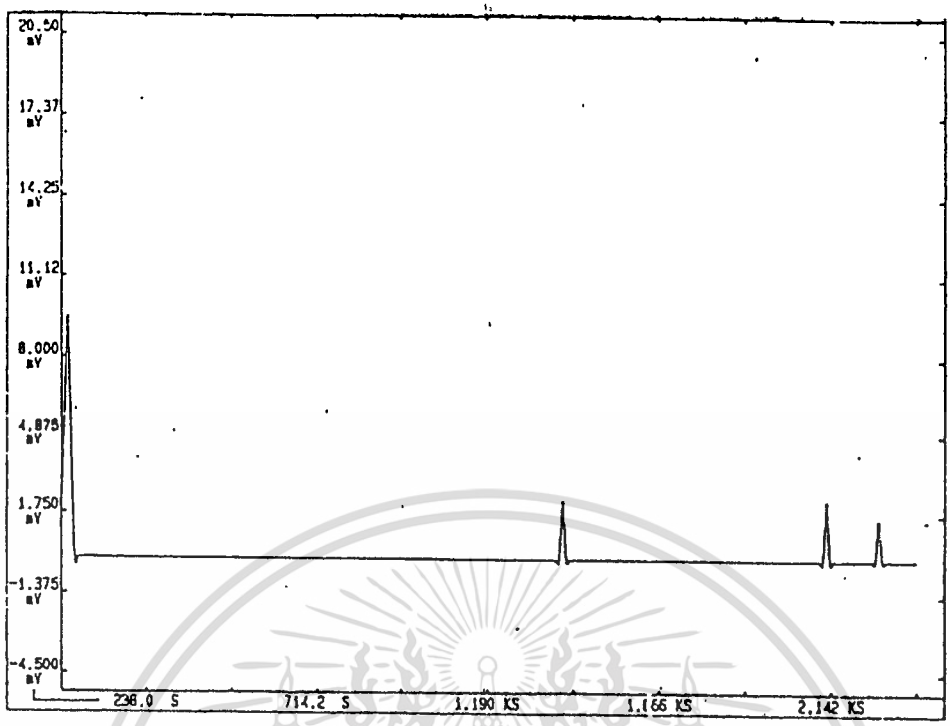
นอกจากนั้นเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำตามหลักการนี้ ยังถูกนำไปทดสอบเพื่อหาค่าความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นในสภาวะมอเตอร์ขณะไม่มีภาระด้วย ซึ่งสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นขณะมอเตอร์ไม่มีภาระจะแสดงดังภาพที่ 50 ถึง 55 ตามลำดับ

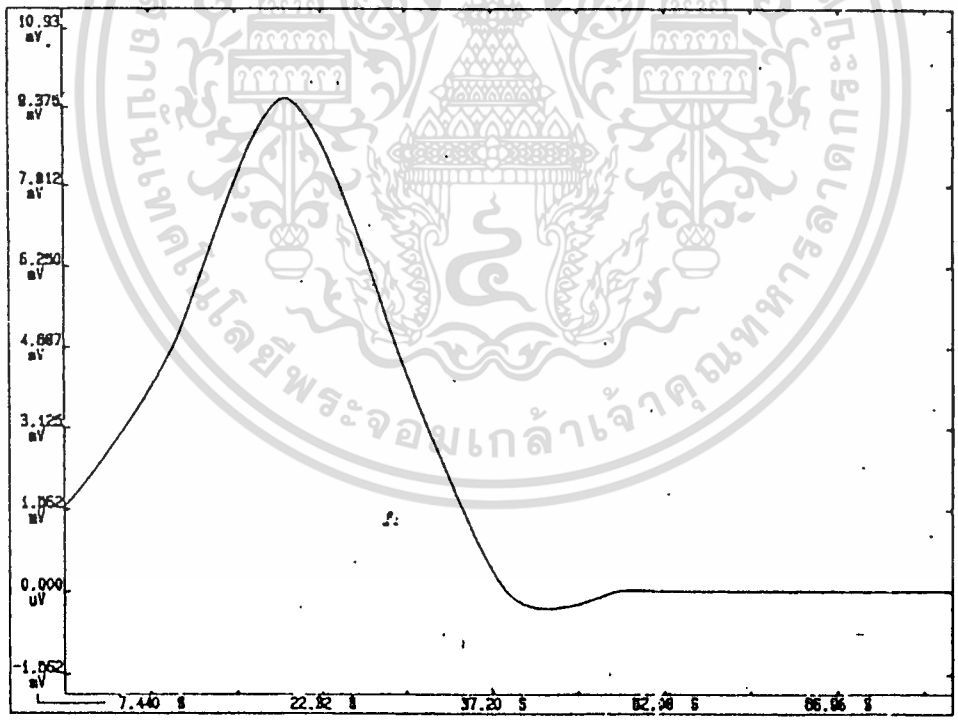


ภาพที่ 50 บน : สเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์ไม่มีภาระที่ความถี่ 10 เฮิร์ทซ์

ล่าง : แสดงค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูลที่ความถี่ 10 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

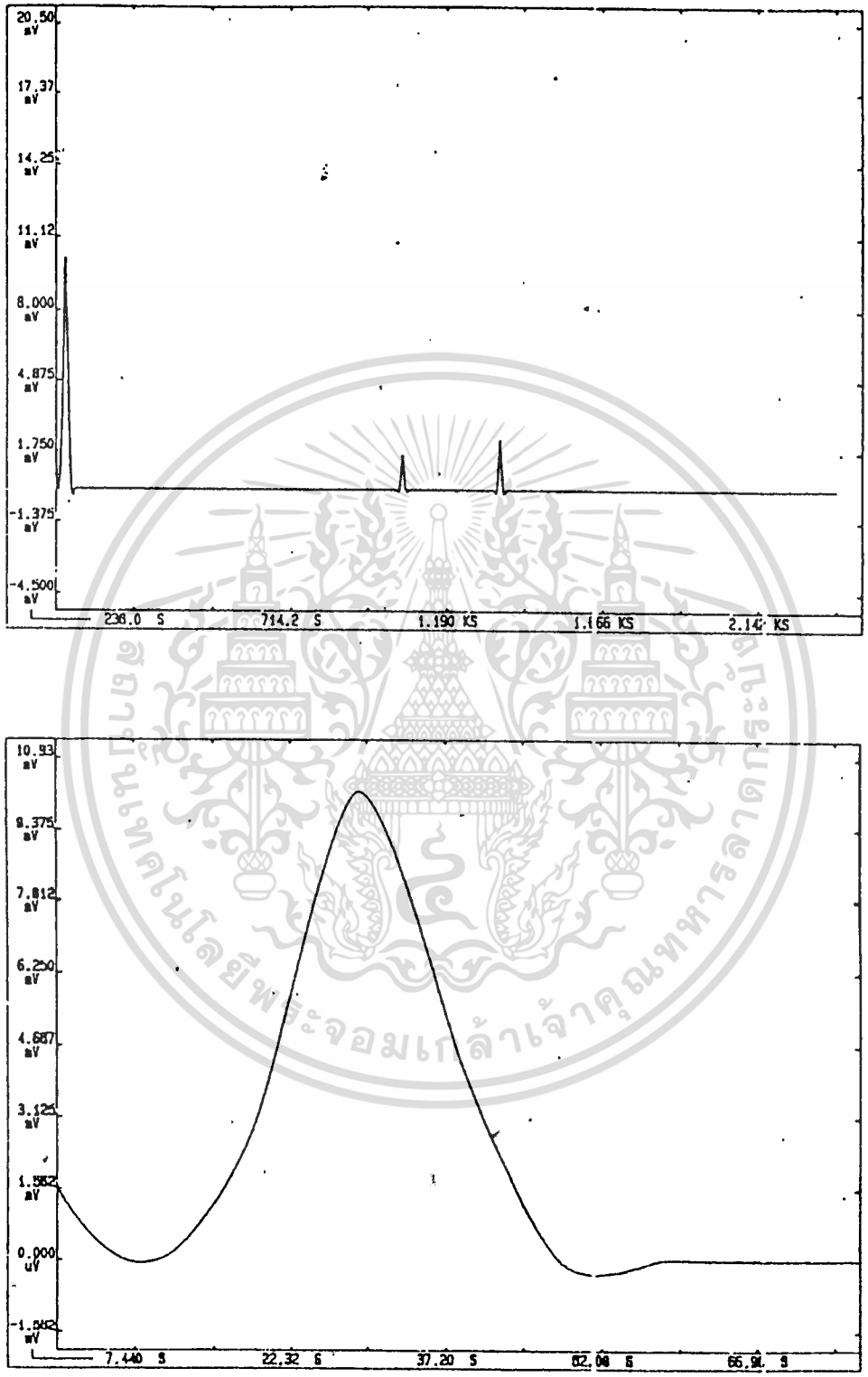




ภาพที่ 51 บน : สเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์ไม่มีภาระที่ความถี่ 20 เฮิร์ทซ์

ล่าง : แสดงค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูลที่ความถี่ 20 เฮิร์ทซ์

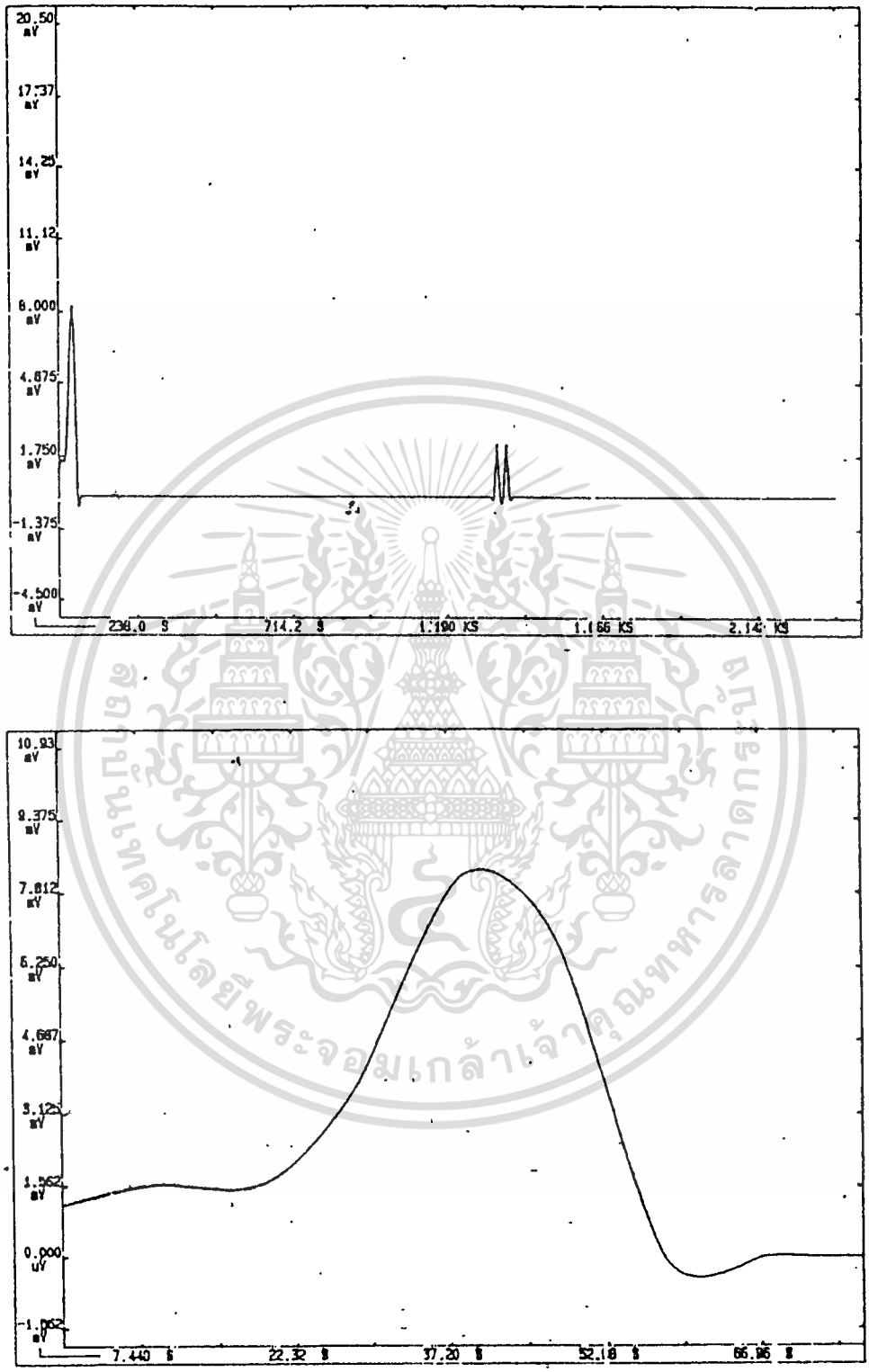
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 52 บน : สเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์ไม่มีภาระที่ความถี่ 30 เฮิร์ทซ์

ล่าง : แสดงค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูลที่ความถี่ 30 เฮิร์ทซ์

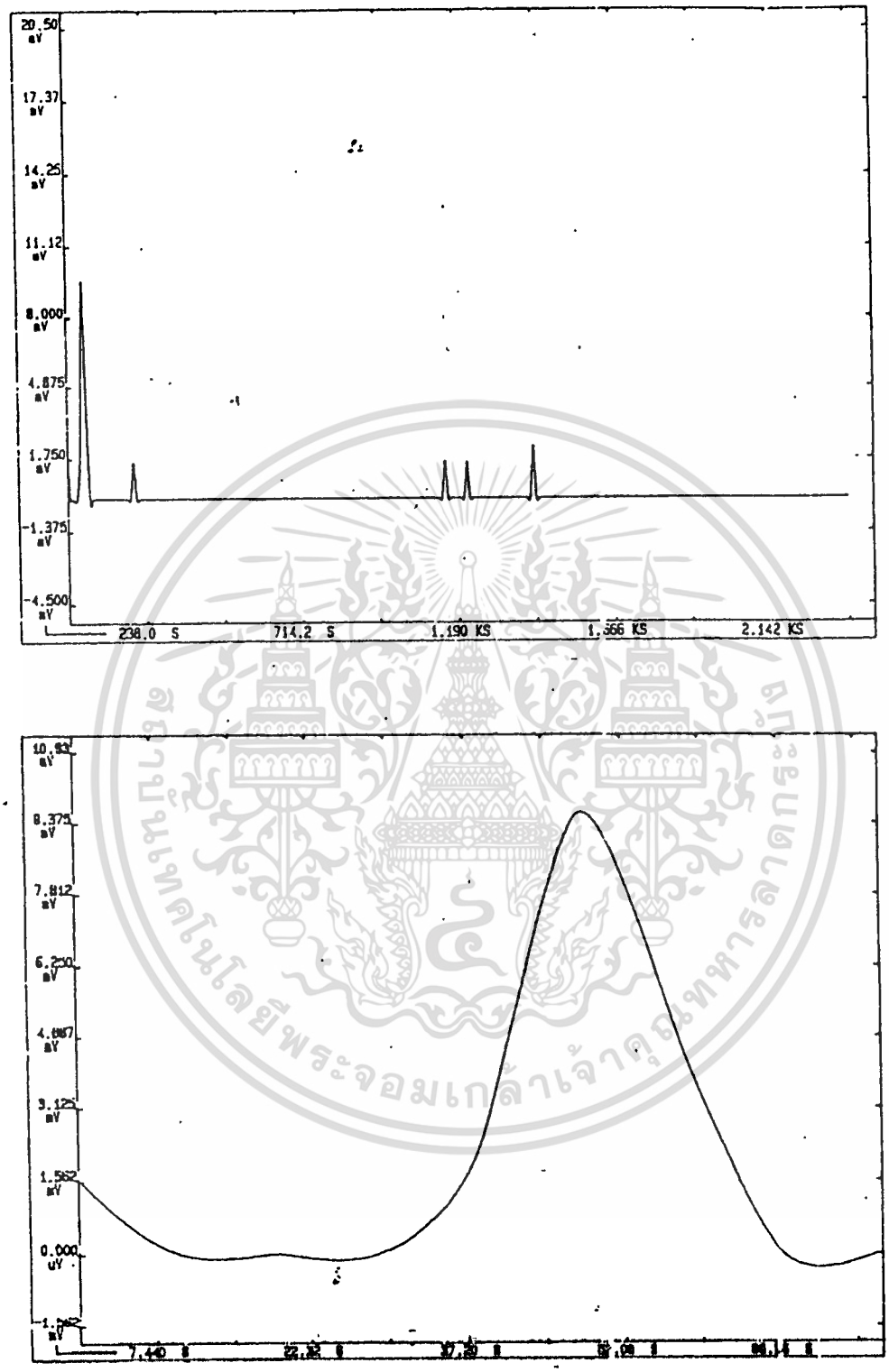
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 53 บน : สเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์ไม่มีภาระที่ความถี่ 40 เฮิร์ทซ์

ล่าง : แสดงค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูลที่ความถี่ 40 เฮิร์ทซ์

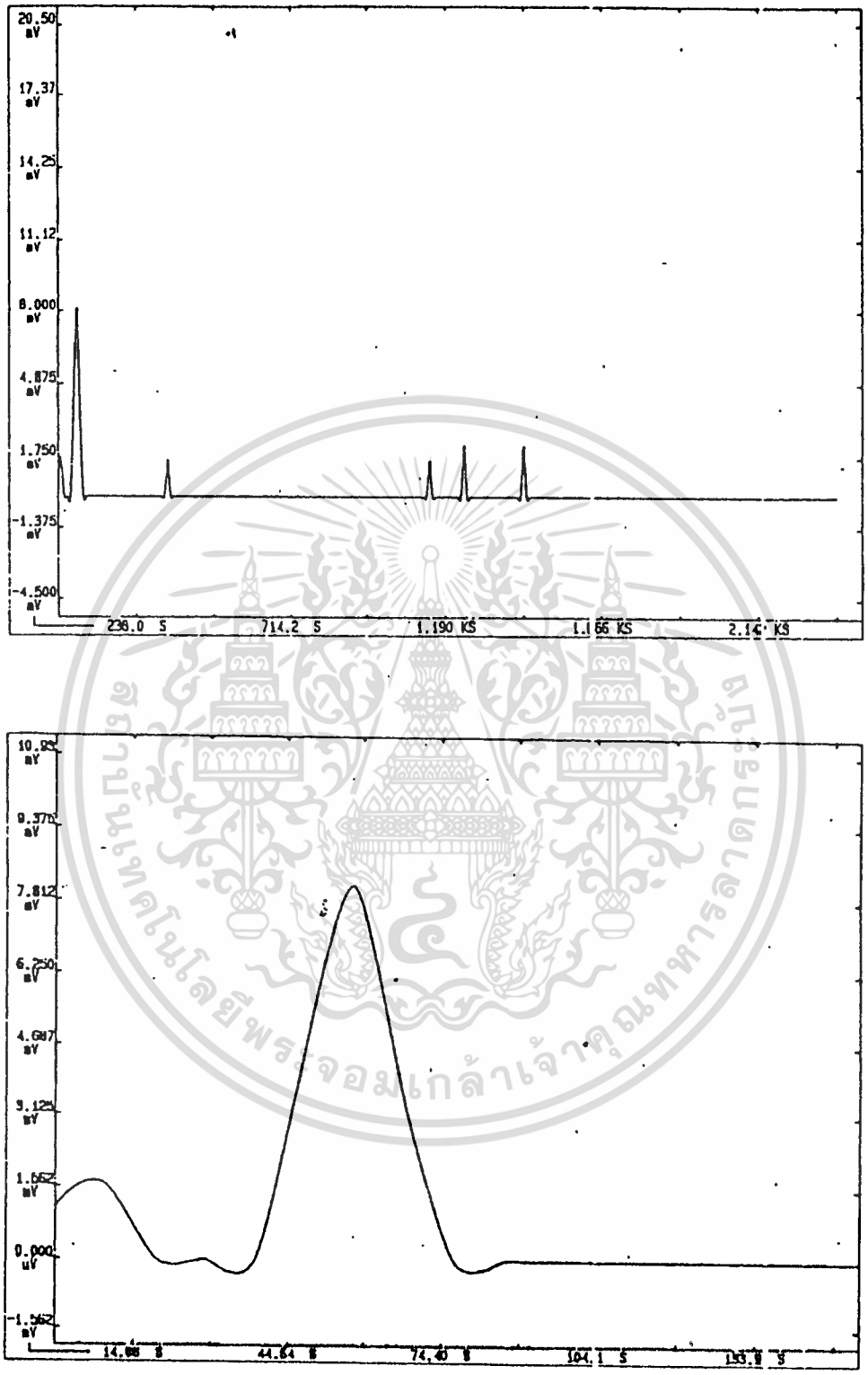
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 54 บน : สเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์ไม่มีภาระที่ความถี่ 50 เฮิร์ทซ์

ล่าง : แสดงค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูลที่ความถี่ 50 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

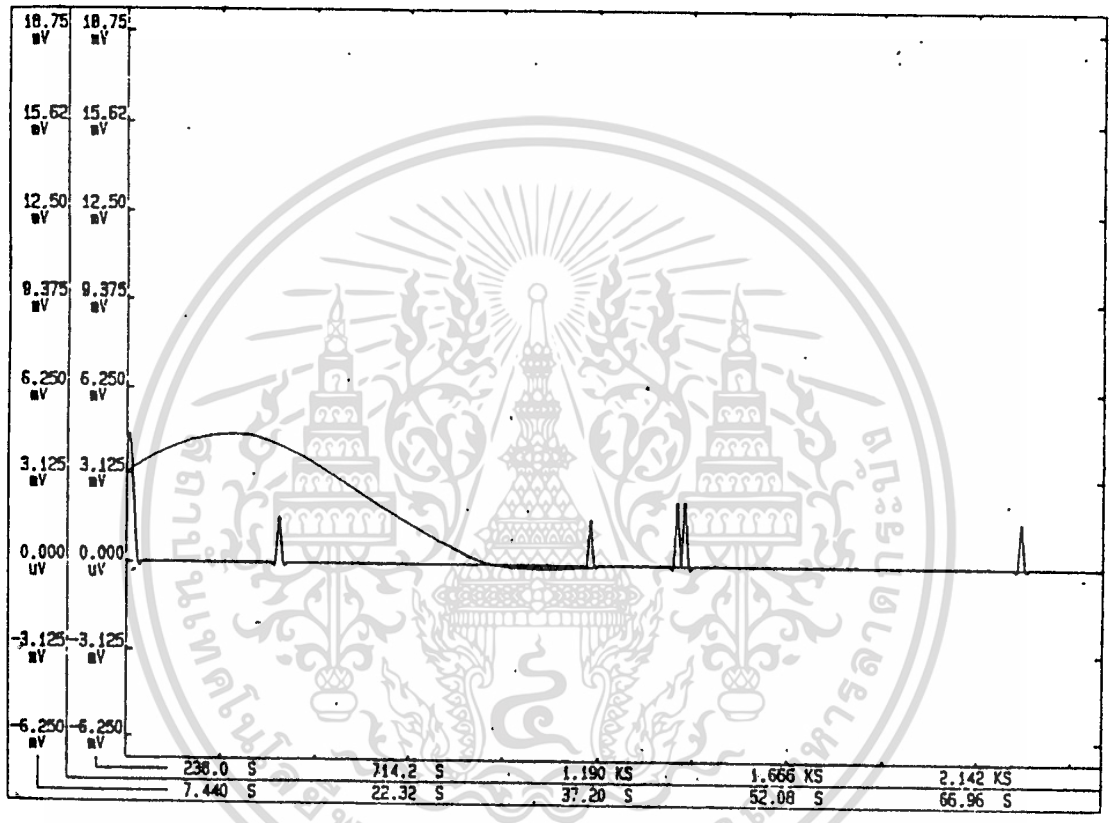


ภาพที่ 55 บน : สเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์ไม่มีภาระที่ความถี่ 60 เฮิร์ทซ์

ล่าง : แสดงค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูลที่ความถี่ 60 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

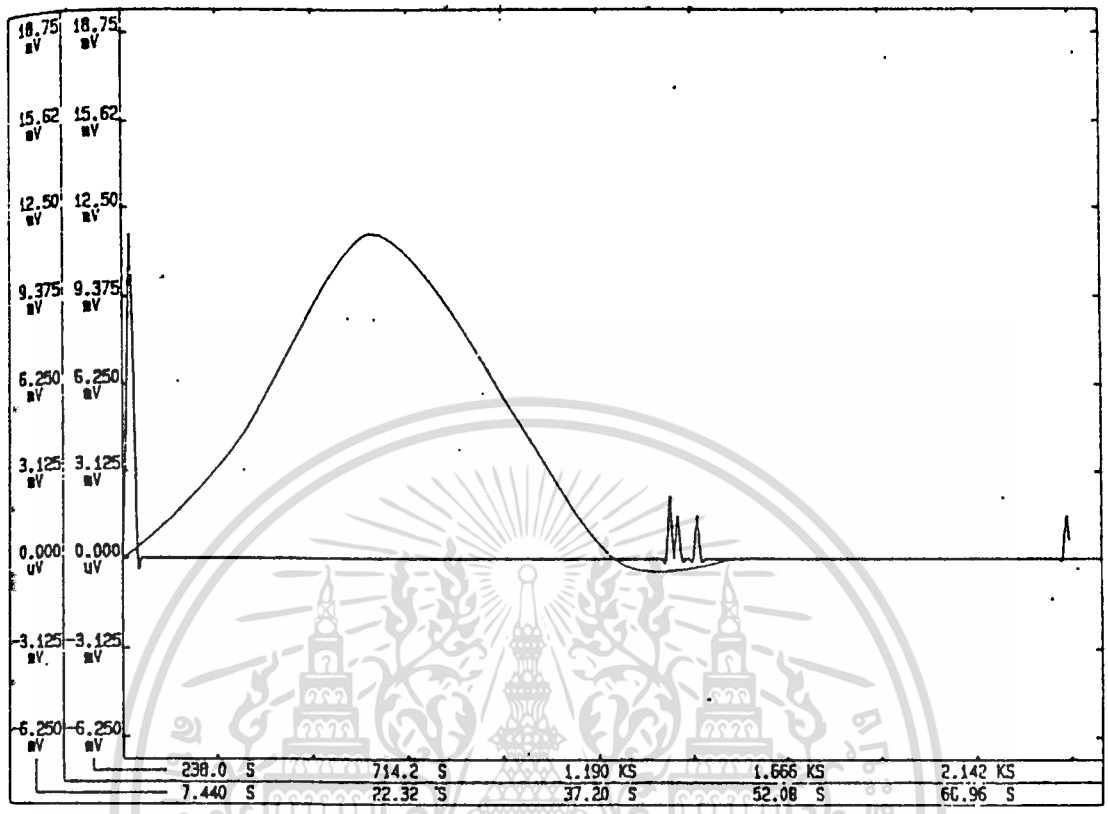
เช่นเดียวกัน เมื่อนำไปทดสอบเพื่อหาความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นขณะมอเตอร์มีภาระที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดสูงสุด จะได้สเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคดังแสดงในภาพที่ 56 ถึง 61 ตามลำดับเช่นกัน



ภาพที่ 56 แสดงสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์มีภาระ พร้อมทั้งค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูล ที่ความถี่ 10 เฮิร์ทซ์

จากภาพที่ 50 และ 56 แสดงสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคของกระแส ขณะมอเตอร์ไม่มีภาระ และมีภาระตามลำดับที่ความถี่ขาออก 10 เฮิร์ทซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าฮาร์โมนิคปกติจะเกิดบริเวณความถี่การสวิทช์ 1440 เฮิร์ทซ์ตามที่ต้องการ เพียงแต่ในขณะมอเตอร์มีภาระนั้น การสั่นสะเทือนขณะทำงานอาจเป็นผลให้เกิดฮาร์โมนิคที่ความถี่ค่อนข้างต่ำปะปนมาบ้าง แต่ก็มีขนาดต่ำ และไม่แน่นอนอีกด้วย

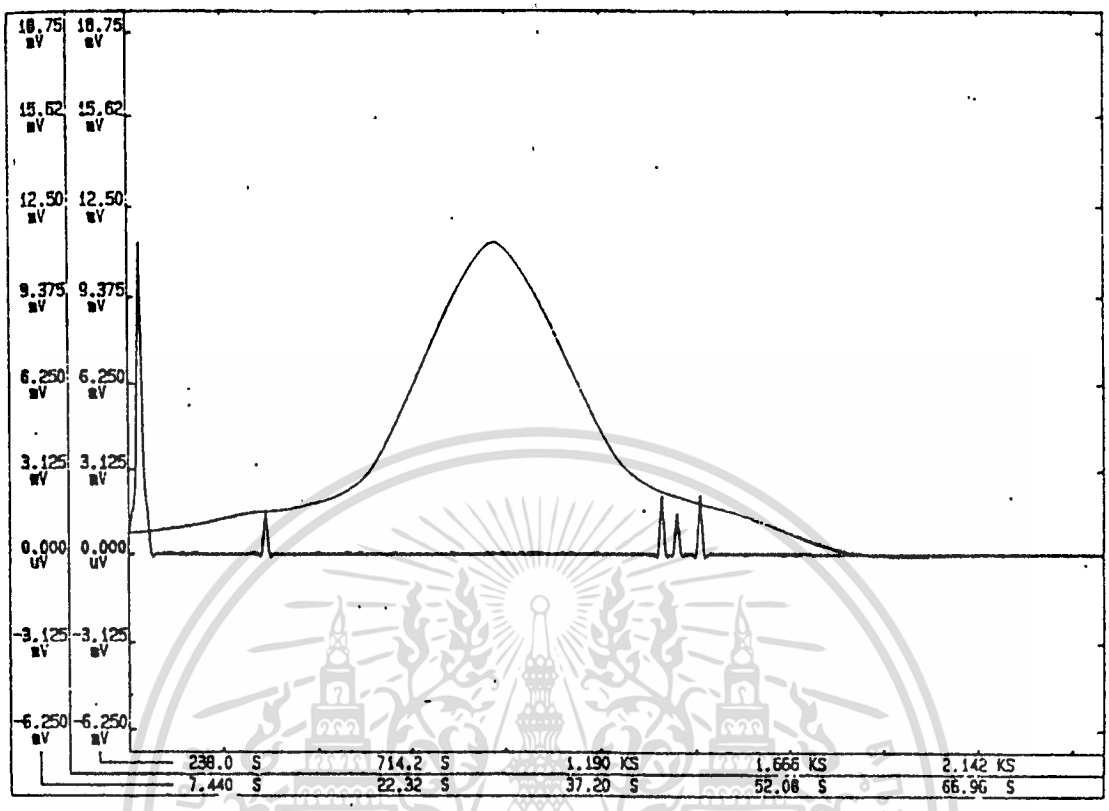
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 57 แสดงสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์มีภาระ พร้อมทั้งค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูล ที่ความถี่ 20 เฮิร์ทซ์

ภาพที่ 51 และ 57 เป็นภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคของกระแสมอเตอร์ ขณะไม่มีภาระ และขณะมีภาระตามลำดับ ที่ความถี่ขาออก 20 เฮิร์ทซ์จะเห็นว่าในขณะไม่มีภาระฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ จะไม่เกิดขึ้นเลย ฮาร์โมนิคตัวแรกที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่บริเวณความถี่การสวิทช์ 1440 เฮิร์ทซ์ เมื่อขณะมอเตอร์มีภาระ ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นยังคงเกิดอยู่ที่ 1440 เฮิร์ทซ์โดยประมาณเช่นเดิม แต่อาจเกิดขึ้นที่ความถี่ข้างเคียงบ้าง ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเกิดอาการแกว่งของค่าความถี่ขาออก

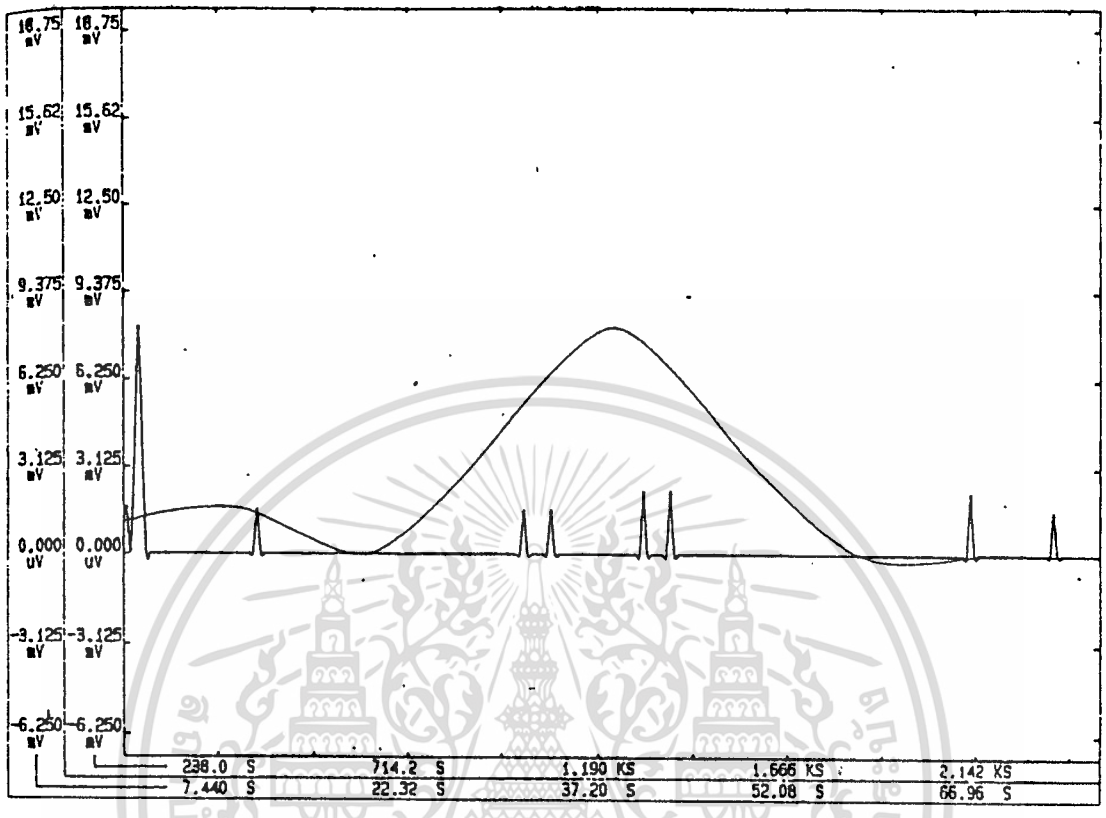
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 58 แสดงสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์มีภาระ พร้อมทั้งค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูล ที่ความถี่ 30 เฮิร์ทซ์

ภาพที่ 52 และ 58 เป็นภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคของกระแสมอเตอร์ ในขณะไม่มีและขณะมีภาระตามลำดับ ที่ความถี่ขาออก 30 เฮิร์ทซ์ จะเห็นว่าในขณะมอเตอร์ไม่มีภาระนั้น ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ จะไม่เกิดขึ้นเช่นกัน ฮาร์โมนิคตัวแรกที่เกิดขึ้นอยู่ที่บริเวณความถี่การสวิทช์ 1440 เฮิร์ทซ์ เมื่อขณะมอเตอร์มีภาระ ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นยังคงเกิดอยู่ที่ 1440 เฮิร์ทซ์ โดยประมาณเช่นเดิม แต่อาจเกิดขึ้นที่ความถี่ข้างเคียงบ้าง ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าเกิดอาการแกว่งของค่าความถี่ขาออก และอาจเกิดฮาร์โมนิคขึ้นบ้างที่ความถี่ต่ำ (ประมาณ 300 เฮิร์ทซ์) ซึ่งอาจจากกรณีที่มอเตอร์มีอาการสั่นสะเทือนเล็กน้อยในขณะรับภาระ ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ นี้มีจำนวนไม่มากนัก อีกทั้งการเกิดก็ไม่แน่นอนเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

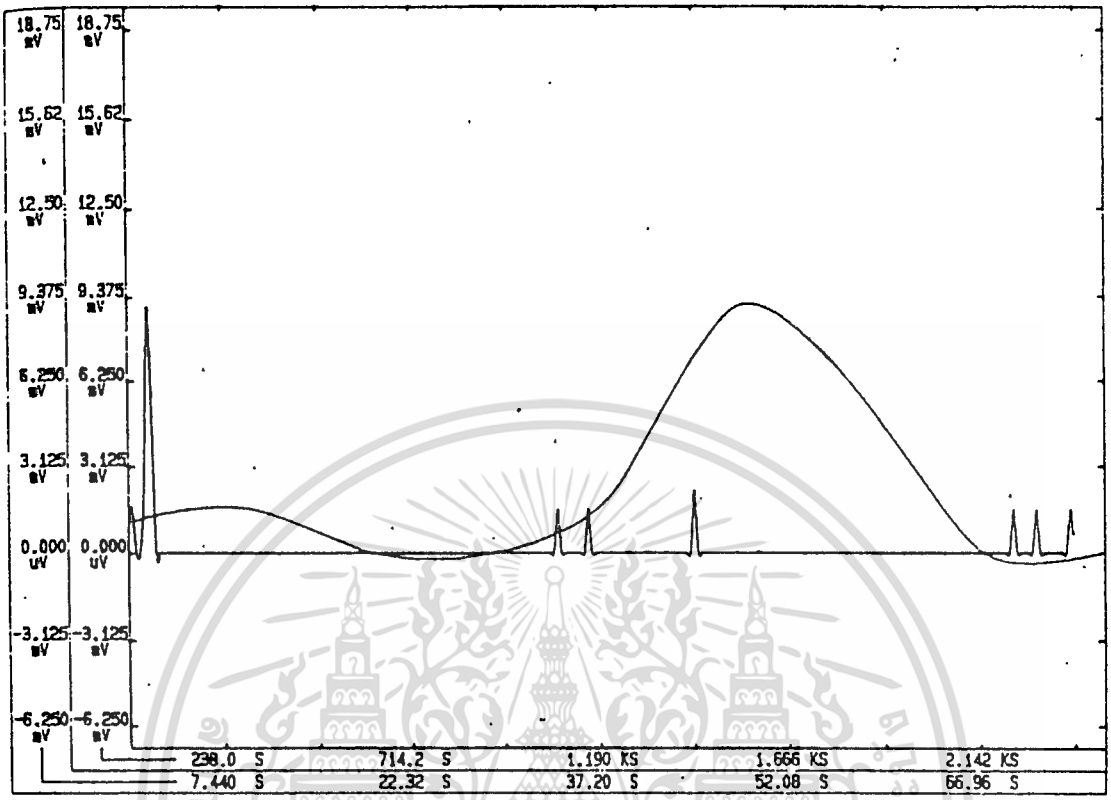


ภาพที่ 59 แสดงสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์มีภาระ พร้อมทั้งค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูล ที่ความถี่ 40 เฮิร์ทซ์

ภาพที่ 53 และ 59 เป็นภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคของกระแสมอเตอร์ ในขณะไม่มีและขณะมีภาระตามลำดับ ที่ความถี่ขาออก 40 เฮิร์ทซ์ จะเห็นว่าในขณะมอเตอร์ไม่มีภาระนั้น ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ จะไม่เกิดขึ้นเช่นกัน ฮาร์โมนิคตัวแรกที่เกิดขึ้นอยู่ที่บริเวณความถี่การสวิทช์ 1440 เฮิร์ทซ์ เมื่อขณะมอเตอร์มีภาระ ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นยังคงเกิดอยู่ที่ 1440 เฮิร์ทซ์ โดยประมาณเช่นเดิม แต่อาจเกิดขึ้นที่ความถี่ข้างเคียง และเกิดฮาร์โมนิคขึ้นบ้างที่ความถี่ต่ำ เนื่องจากขณะทดสอบที่ความถี่ขาออก 40 เฮิร์ทซ์นี้ มอเตอร์มีอาการสั่นสะเทือนในขณะรับภาระ ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ ที่เกิดขึ้นนี้มีตำแหน่งการเกิดไม่แน่นอน

จากภาพองค์ประกอบความสูงจะเห็นว่าที่ความถี่ขาออก 40 เฮิร์ทซ์นี้มีฮาร์โมนิคที่ต่ำกว่าความถี่หลักมูลเกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากเกิด Sub Transient ขึ้นภายในมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

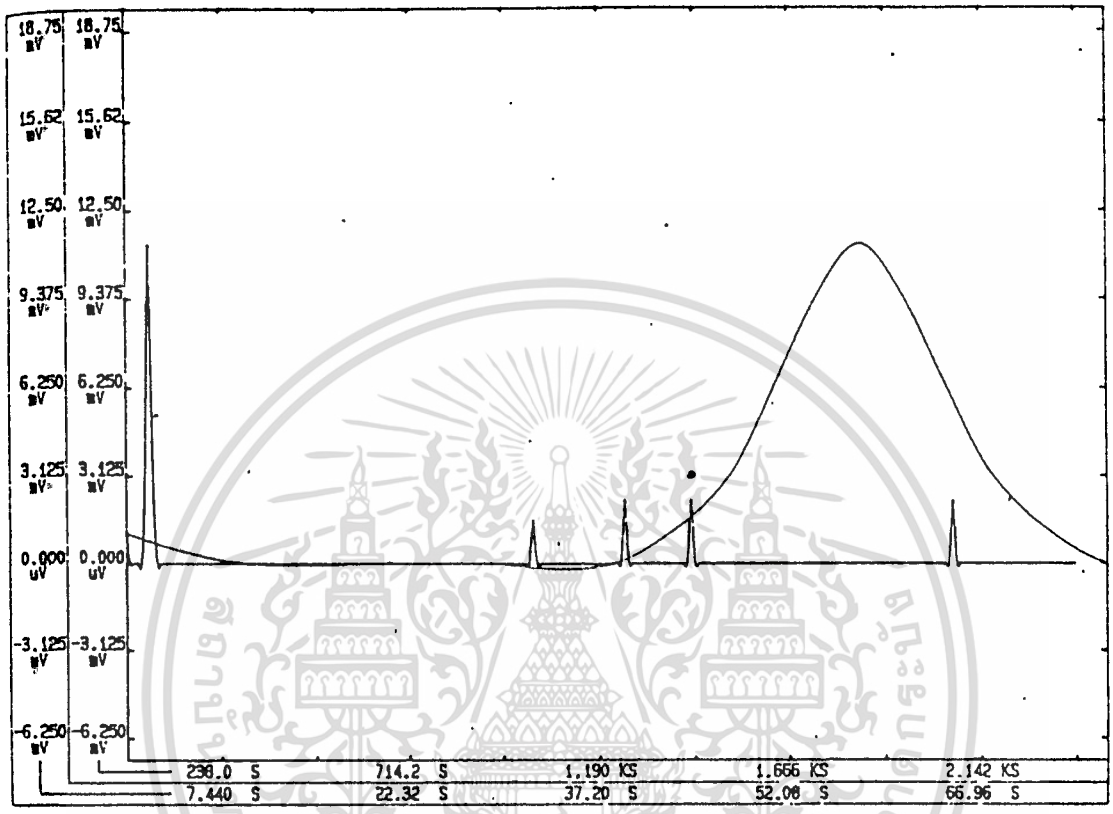


ภาพที่ 60 แสดงสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์มีภาระ พร้อมทั้งค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูล ที่ความถี่ 50 เฮิร์ทซ์

ภาพที่ 54 และ 60 เป็นภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคของกระแสมอเตอร์ ในขณะไม่มีและขณะมีภาระตามลำดับ ที่ความถี่ขาออก 50 เฮิร์ทซ์ จะเห็นว่าในขณะมอเตอร์ไม่มีภาระนั้น ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ จะเกิดขึ้นเล็กน้อย ฮาร์โมนิคที่บริเวณความถี่การสวิทช์ 1500 เฮิร์ทซ์ ยังประกฏอยู่เช่นเดิม เมื่อขณะมอเตอร์มีภาระ จะเกิดฮาร์โมนิคขึ้นที่ความถี่ต่ำ ค่อนข้างมากขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากขณะทดสอบ มอเตอร์มีอาการสั่นสะเทือนในขณะรับภาระ อย่างไรก็ตามฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ ที่เกิดขึ้นนี้มีตำแหน่งการเกิดไม่แน่นอน

จากภาพองค์ประกอบความสูงจะเห็นว่าที่ความถี่ขาออก 50 เฮิร์ทซ์นี้มีฮาร์โมนิคที่ต่ำกว่าความถี่หลักมูลเกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากเกิด Sub Transient ขึ้นภายในมอเตอร์เช่นเดียวกับกรณีความถี่ขาออก 40 เฮิร์ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 61 แสดงสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคขณะมอเตอร์มีภาระ พร้อมทั้งค่าสูงสุดขององค์ประกอบความถี่หลักมูล ที่ความถี่ 60 เฮิร์ทซ์

ภาพที่ 55 และ 61 เป็นภาพสเปคตร้มความถี่ฮาร์โมนิคของกระแสมอเตอร์ ในขณะไม่มีและขณะมีภาระตามลำดับ ที่ความถี่ขาออก 60 เฮิร์ทซ์ จะเห็นว่าในขณะมอเตอร์ไม่มีภาระนั้น ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ จะเกิดขึ้นประปรายและเมื่อขณะมอเตอร์มีภาระ ฮาร์โมนิคเหล่านี้ยังคงปรากฏอยู่เช่นเดิม เนื่องจากมอเตอร์มีอาการสั่นสะเทือนในขณะทดสอบ อย่างไรก็ตาม ฮาร์โมนิคที่ความถี่ต่ำๆ ที่เกิดขึ้นนี้มีตำแหน่งการเกิดไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบจากสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิค

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2 แรงม้า เพื่อหาความถี่ฮาร์โมนิคที่อาจเกิดขึ้นจริงจากรูปคลื่นกระแสมอเตอร์ ทั้งในขณะมอเตอร์ไม่มีภาระ และมีภาระที่ครึ่งพิกัดกำลังสูงสุดของมอเตอร์นั้น ทำให้เราทราบว่าฮาร์โมนิคจะเกิดขึ้นที่บริเวณความถี่ฮาร์โมนิคที่ใช้ในแต่ละความถี่ขาออก แต่ว่ายังมีความถี่ฮาร์โมนิคอื่นๆ เกิดขึ้นปะปนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ซึ่งเท่าที่ได้ทดสอบพบว่า ความถี่ต่างๆที่ปะปนมานี้มีค่าองค์ประกอบความสูงและตำแหน่งไม่แน่นอน ซึ่งอาจเกิดจากสภาวะแวดล้อมต่างๆ จากการทำงานของมอเตอร์ เช่น ระดับแรงดันป้อนเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงภาระโดยกระทันหัน การสั่นสะเทือนเชิงกลที่สายพาน หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ขาออก เนื่องจากความแน่นอนของโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบหาความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นทั้ง 2 สภาวะพบว่าฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยจุด แต่ละจุดมีค่าองค์ประกอบความสูงประมาณ 10 - 15 % ยกเว้นที่ค่าความถี่การสวิทช์ที่ใช้เท่านั้น

เช่นเดียวกัน ถ้าเรานำภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคที่ได้จากการทดสอบจริง ในขณะมอเตอร์มีภาระ ที่ความถี่ขาออกต่างๆ ตั้งแต่ภาพที่ 56 ถึง 61 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับภาพรูปคลื่นกระแส และสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิค จากการจำลองของวงจรสมมูลมอเตอร์ ขนาด 2 แรงม้าทั้งนี้ที่ค่าสลิป (Slip) เป็น 0.05 ตั้งแต่ภาพที่ 17 ถึง 21 ตามลำดับเช่นกัน ได้ดังนี้

ที่ความถี่ขาออก 10 เฮิร์ทซ์(ดังภาพที่ 17 และ 56) รูปคลื่นของกระแสขณะทดสอบจริงจะใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสจากการจำลองมาก ทั้งนี้รูปคลื่นจากการจำลองอาจมีการคลาดเคลื่อนในด้านเวลาไปบ้าง เนื่องจาก Sub Transient ที่เกิดขึ้นในวงจรสมมูลเท่านั้น ส่วนฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นจริงที่ค่าความถี่การสวิทช์จะมีค่าองค์ประกอบ สูงกว่าที่จำลองได้ อย่างไรก็ตามที่ความถี่อื่นๆ โดยเฉพาะที่ใกล้เคียงความถี่หลักมูลจะไม่มีฮาร์โมนิคเกิดขึ้น เหมือนกับผลที่ได้จากการจำลองเช่นกัน

ที่ความถี่ขาออก 20 เฮิร์ทซ์(ดังภาพที่ 18 และ 57) รูปคลื่นของกระแสขณะทดสอบจริงจะใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสจากการจำลองเช่นกัน ส่วนฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นจริงที่ค่าความถี่ใกล้เคียงกับผลการจำลองมาก เพียงแต่มีฮาร์โมนิคเกิดขึ้นที่ใกล้เคียงความถี่การสวิทช์มากกว่าที่จำลองไว้เท่านั้น

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ขาออก 30 เฮิร์ทซ์ (ดังภาพที่ 19 และ 58) ก็เช่นกัน รูปคลื่นของกระแสขณะทดสอบจริงจะใกล้เคียงกับรูปคลื่นกระแสจากการจำลองได้ ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นจริงมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองเช่นกัน เพียงแต่มีฮาร์โมนิคเกิดขึ้นความถี่ต่ำปะปนมาบ้าง ซึ่งก็ไม่เป็นสภาวะที่แน่นอนเสมอไป

ที่ความถี่ขาออก 40 เฮิร์ทซ์ (ดังภาพที่ 20 และ 59) เนื่องจากในการทดสอบนั้น เกิดการสั่นสะเทือนเชิงกลค่อนข้างบ่อย จึงทำให้เกิดฮาร์โมนิคที่ความถี่อื่นๆ ปะปนเข้ามามากกว่าที่ควรจะเป็น อย่างไรก็ตามผลการทดสอบจริง ยังมีค่าฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง

ที่ความถี่ขาออก 50 และ 60 เฮิร์ทซ์(ดังภาพที่ 21,22 และ 60,61 ตามลำดับ) ก็ได้ผลเช่นเดียวกันคือ ผลจากการทดสอบจริง มีค่าฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองมาแล้ว

<u>สรุปผลการทดสอบ</u>

ผลที่ได้จากการทดสอบ ทั้งรูปคลื่นกระแส และสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่จำลองไว้ จะเห็นว่าใกล้เคียงกันมาก แต่อย่างไรก็ตามภาพสเปคตรัมความถี่ฮาร์โมนิคจากการจำลองยังมีรายละเอียดไม่เพียงพอ จึงอาจทำให้การวิจารณ์ผลที่ได้มีจุดบกพร่องไปบ้าง อีกทั้งรูปคลื่นของกระแสจากการจำลองนั้นมี Sub Transient ที่ความถี่ต่ำปะปนอยู่ เนื่องจากการเลือกวงจรสมมูลที่ใช้ในการจำลอง ทำให้รูปคลื่นที่ได้ดูไม่สมมาตรไปบ้างเช่นกัน แต่จากการเปรียบเทียบผลที่ได้ของทั้ง 2 กรณีนั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

และเช่นเดียวกัน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ ในการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ กับความถี่ขาออก ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดพลาด และผลลัพธ์จากกราฟต่างๆ เช่น $P_{out} = f(f_o)$ และ $\quad = f(f_o)$ ไม่ตรงกับความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้เขียนโปรแกรมคำนวณมุมสวิทช์ และโปรแกรมจำลองรูปคลื่นกระแสสเปคตรัมของความถี่ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้น ตามหลักการเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบ Equal Area PWM. โดยใช้วงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1500 วัตต์ แรงดัน 220/380 โวลท์ ที่ความถี่ขาออกต่างๆ เพื่อหาผลดี ผลเสียของเทคนิคนี้ ซึ่งจะนำมาใช้เป็นหลักในการสร้างสัญญาณควบคุมในวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จะสร้างขึ้นเพื่อศึกษาและทดสอบ จากผลการจำลองทำให้ทราบว่ารูปคลื่นของกระแสมอเตอร์ที่ทุกความถี่ขาออกจะใกล้เคียงสัญญาณซายน์ ฮาร์โมนิคความถี่ต่ำที่เป็นผลต่อการกระตุกของแรงบิดมอเตอร์ก็จะไม่เกิดขึ้น

จากนั้นจึงได้ออกแบบวงจร และโปรแกรมควบคุมของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ 3 เฟสขนาดพิกัดกำลัง 1500 วัตต์ แรงดันขาออก 0-220 โวลท์ สามารถควบคุมความถี่ขาออกได้ตั้งแต่ 0-60 เฮิร์ทซ์ โดยมีอัตราโวลท์ต่อเฮิร์ทซ์คงที่ตั้งแต่ 0-50 เฮิร์ทซ์ ทั้งนี้ปรับความถี่ขาออกเป็นขั้นๆ ได้ ขั้นละ 1 เฮิร์ทซ์ ทั้งสามารถปรับตั้งอัตราเร่ง อัตราหยุดของมอเตอร์ด้วย DIP Switch ได้ 255 ขั้นๆ ละประมาณ 1 วินาทีและสามารถปรับแต่งค่าเวลาตายตัว (Dead time)ของการควบคุมอุปกรณ์สวิทช์กำลังได้ โดยการจัดตั้งค่าในโปรแกรมควบคุม ส่วนสำคัญของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วย ส่วนวงจรพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณการสวิทช์ตามหลักการเทคนิคแบบ Equel Area PWM. เพื่อให้ได้สัญญาณขาออกตามต้องการ และส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในที่นี้อุปกรณ์สวิทช์กำลังทั้ง 6 ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จะเป็นทรานซิสเตอร์กำลังแบบ IGBT

วงจรพีดับบลิวเอ็ม ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการกำเนิดสัญญาณควบคุมการสวิทช์ ออกแบบโดยใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 เป็นหลักในการควบคุมโปรแกรมทั้งหมด และไอซีควบคุมการสวิทช์เบอร์ SLE 4520 สำหรับควบคุมการนับ จัดลำดับเฟส และสร้างเวลาตายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ไอซีหน่วยเก็บความจำกึ่งถาวรขนาด 8 กิโลไบท์ เบอร์ 2764 ทำหน้าที่เก็บโปรแกรมควบคุม และแพทเทอร์นการสวิทช์ทั้งหมด ทั้งนี้มุมสวิทช์ต่างๆ ได้ถูกคำนวณไว้แล้วโดยมีค่าความถี่การสวิทช์ (Switching frequency) ประมาณ 1400 เฮิร์ทช์

วงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแบบแรงดันคงที่ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแบบปรับแรงดัน และความถี่ขาออกได้นั้น ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังแบบ IGBT ขนาด 20 แอมแปร์ 600 โวลท์ เป็นอุปกรณ์สวิทช์ ทำให้ออกแบบวงจรขับนำเกทได้ง่าย แต่เนื่องจากทนแรงดันขณะสวิทช์ได้ต่ำ ทำให้ต้องมีวงจรสนับเบอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรสนับเบอร์ให้ทรานซิสเตอร์กำลังสามารถต่อวงจร (Turn on) และตัดวงจร (Turn off) ได้ในเวลาสั้นที่สุด พร้อมทั้งกำหนดเวลาตายตัวให้เหมาะสมลงในโปรแกรมควบคุมเพื่อป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิทช์กำลังในขณะทำงาน หลังจากที่ทดสอบการสวิทช์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวแล้ว จึงประกอบกันเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส พร้อมต่อสัญญาณควบคุมการสวิทช์จากวงจรพีดับบลิวเอ็ม เมื่อประกอบวงจรทั้งหมดเรียบร้อยแล้วจึงนำไปทดสอบกับภาระชนิดความต้านทาน และมอเตอร์ต่อไป

เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้ ยังไม่มีส่วนป้องกันวงจรอื่นๆ เลย อาทิเช่น วงจรป้องกันกระแสเกิน วงจรป้องกันแรงดันเกิน เป็นต้น ทำให้เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์นี้ขาดความสมบูรณ์สำหรับการนำไปใช้งานจริงไปบ้าง จึงไม่สามารถทดสอบที่มอเตอร์ขณะทำงานเต็มพิกัดได้

<u>ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา</u>

เนื่องจากเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ได้ออกแบบ และสร้างขึ้นนี้ ยังอยู่ในรูปของวงจรต้นแบบ ทำให้ขาดความสมบูรณ์ในด้านการออกแบบแผงวงจรควบคุม และวงจรป้องกัน อย่างไรก็ตามผลของการทดสอบขณะมอเตอร์ทำงายที่ครึ่งพิกัดกำลัง ทำให้ผู้วิจัยได้เห็นข้อบกพร่องบางประการของโครงการ ซึ่งสามารถนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อไปได้

1. หลักการเรียกข้อมูลแพทเทอร์นมุมการสวิทช์ จากหน่วยความจำภายในวงจรควบคุมของเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สร้างนี้ เป็นแบบ Look up Table ซึ่งต้องใช้พื้นที่หน่วยความจำจำนวนมาก โดยเฉพาะเมื่อออกแบบให้มีมุมสวิทช์จำนวนมากต่อ 1 คาบสัญญาณ ความถี่ขาออก เพื่อประหยัดพื้นที่หน่วยความจำ ควรให้ซีพียูของไมโครคอนโทรลเลอร์ช่วยในการคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นวณมุมสวิทช์ในครึ่งคาบหลังของสัญญาณ หรือมีการคำนวณมุมสวิทช์เองทั้งหมดด้วยการใช้ไอซีไมโครโปรเซสเซอร์ช่วยคำนวณในเชิงคณิตศาสตร์ เพิ่มเติมในวงจรควบคุม

2. ไอซีควบคุมการสวิทช์เบอร์ SLE 4520 ซึ่งทำหน้าที่หลัก คือเพียงเป็นตัวนับแยกอิสระ 3 ชุดภายใน สามารถจัดลำดับเฟส และสามารถตั้งเวลาตายตัวป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์กำลังได้เท่านั้น เนื่องจากไอซีตัวนี้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้าต้องการปรับปรุงวงจรโดยไม่ใช้ไอซีตัวนี้ก็สามารถทำได้ โดยออกแบบโปรแกรมควบคุมใหม่โดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์และไอซีตัวนับเช่น Z80 CTC เป็นหลักในการสร้างสัญญาณควบคุม

3. การเปลี่ยนแปลงความถี่ขาออกสามารถทำได้ขั้นละ 1 เฮิร์ทซ์เท่านั้น ซึ่งทำให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงขั้นละ 30 รอบต่อนาที (สำหรับมอเตอร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก) ซึ่งถ้าต้องการปรับความเร็วมอเตอร์ให้มีความละเอียดกว่านี้ ควรปรับความถี่ขาออกให้ได้ขั้นละต่ำกว่า 1 เฮิร์ทซ์ ซึ่งต้องเพิ่มหน่วยความจำของวงจร หรือโดยเปลี่ยนวิธีการเรียกข้อมูลมุมการสวิทช์ให้เป็นแบบอื่น

4. อัตราเร่ง อัตราหยุดที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม ยังทำให้อัตราเร่ง หยุดในเชิงปฏิบัติมีค่าไม่แน่นอน คือการเปลี่ยนความถี่ขาออกที่ค่าความถี่ต่ำๆจำใช้เวลานากเนื่องจากต้องอ่านค่ามุมสวิทช์ซึ่งมีจำนวนมาก แต่การเปลี่ยนแต่ละความถี่ที่ค่าความถี่ขาออกค่าสูงๆ นั้นกลับใช้เวลาสั้นลง

5. จากผลของการทดสอบ ทำให้ทราบว่าถ้าหากต้องการกำจัดฮาร์โมนิคความถี่ต่ำซึ่งมีผลโดยตรงต่ออาการกระตุกของมอเตอร์แล้ว สามารถทำได้โดยเลือกค่าความถี่การสวิทช์ให้มีค่าสูง แต่ผลจากการเลือกความถี่การสวิทช์ค่าสูงนั้น จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสวิทช์ (switching loss) สูงขึ้นเช่นกัน ผลคือประสิทธิภาพของเครื่องต่ำ ซึ่งในกรณีนี้อาจแก้ไขได้โดยการเลือกใช้ทรานซิสเตอร์กำลังที่ทนแรงดันขณะสวิทช์ได้สูงกว่านี้ ซึ่งทำให้ตัดปัญหาเรื่องพลังงานสูญเสียในวงจรสนับเบอร์ไปได้บ้างอีกทั้งไม่ทำให้เกิดเสียงดังและเกิดความร้อนสูงขึ้นที่วงจรสนับเบอร์ในขณะทำงานอีกด้วย

6. เครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ควรต้องเพิ่มเติมระบบป้องกันวงจรต่างๆ เช่นวงจรป้องกันแรงดันเกิน วงจรป้องกันกระแสเกิน และอื่นๆ พร้อมทั้งระบบระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

แผนผัง โปรแกรม และผลการคำนวณมุมสวิทช์ ตามหลักการ Equal Area PWM. Technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังและโปรแกรมการคำนวณมุมสวิทช์

ตามหลักการ Equal Area PWM. Tachnique

ข้อมูลอินพุท

F	ค่าความถี่หลักมูลขาออกที่ต้องการ (Output Frequency)
ST	ค่าความถี่การสวิทช์ที่ต้องการ (Switching Frequency)
P	ค่าดัชนีมอดูเลทของความถี่ (Frequency Modulation)
M	ค่าตัวประกอบความสูงสัญญาณ (Amplitude Factor)
N	จำนวนวงรอบการคำนวณ
TOL	ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้ได้
A_1, A_2	มุมเริ่มต้นและมุมสุดท้ายของแต่ละช่วงย่อย หน่วยเป็น rad/sec.

ฟังก์ชั่นการคำนวณ

$$M.\sin(A_i) = \frac{(A_i - A_1) - (A_2 - A_1)}{(A_2 - A_1)}$$

โดย $i = 1, 2, \ldots, P$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'-------------------------------------
EQUAL AREA PWM TECHNIQUE
'-------------------------------------
10 CLS : KEY OFF: SCREEN 0
   DIM a(600), l(600), x(600), aw(600), t(600)
   PRINT "Fullwave angle of Equal Area PWM."
   INPUT "Output frequency    "; f
   INPUT "Step per Fullwave   "; st
   INPUT "Amplitude factor    "; m
   INPUT "Iteration loop      "; n
   INPUT "Tolerence error     "; er
   INPUT "Timer counter [TH0] "; t

   fs = st * f: y = 360 / st
   FOR i = 1 TO st
   xa = (i - 1) * y: xb = i * y
   pi = 3.14159: x1 = xa: x2 = xb: d = xb - xa
   f1 = m * SIN(x1 * pi / 180) - ((x1 - xa) - (xb - x1)) / d
   f2 = m * SIN(x2 * pi / 180) - ((x2 - xa) - (xb - x2)) / d
    FOR j = 1 TO n
    x3 = (x1 + x2) / 2
    f3 = m * SIN(x3 * pi / 180) - ((x3 - xa) - (xb - x3)) / d
     IF ABS(x1 - x2) > er THEN 160
     GOTO 220
160   IF (f3 * f1) > 0 THEN 190
     x2 = x3: f2 = f3
     GOTO 200
190   x1 = x3: f1 = f3
200  NEXT j
      PRINT "Error....": GOTO 300
220    a(i) = x3: l(i) = a(i) / (360 * f)
    NEXT i

    mv = (256 - t) / 2
    FOR i = 1 TO st
    a(i) = 360 * f * l(i)
    aw(i) = mv * (1 + m * SIN(a(i) * pi / 180)): GOTO 245
245  NEXT i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
247  INPUT "Display Fullwave switching angle, time data [y/n]"; a$
     IF a$ = "y" THEN 250
     IF a$ = "n" THEN 260
     IF a$ <> "y" AND a$ <> "n" THEN 247

250  PRINT "Count no.", : PRINT " aw ", : PRINT "Angle", : PRINT "time"
     FOR i = 0 TO st
     PRINT i, : PRINT USING "###.##"; aw(i); : PRINT ,
     PRINT USING "###.###"; a(i); : PRINT , : PRINT USING "##.######"; l(i)
     NEXT i

260  INPUT "Print switching angle & time data to printer [y/n]"; a$
     IF a$ = "y" THEN 265
     IF a$ <> "y" THEN 300
265  LPRINT "Fullwave angle of Equal Area PWM."
     LPRINT TAB(1); "Output frequency  "; f; "Hz";
     LPRINT TAB(40); "Amplitude factor  "; m;
     LPRINT TAB(1); "Step per Fullwave  "; st;
     LPRINT TAB(40); "Switching frequency"; fs; "Hz";
     LPRINT TAB(1); "Timer counter [TH0]"; t;
     LPRINT TAB(40); "Switching angle  "; y;
     LPRINT :LPRINT"Count no.",:LPRINT"AW",:LPRINT"Chop angle",:LPRINT"Time"

     FOR i = 0 TO st
     LPRINT i, : LPRINT USING "###.##"; aw(i); : LPRINT ,
     LPRINT USING "###.###"; a(i);: LPRINT ,: LPRINT USING "##.######";l(i)
     NEXT i
     LPRINT : LPRINT

300  END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fullwave angle of Equal Area PWM.

Output frequency	10 Hz	Amplitude factor	.2
Step per Fullwave	144	Switching frequency	1440 Hz
Timer counter [TH0]	24	Switching angle	2.5

Count no.	AW	Chop angle	Time
0	0.00	0.000	0.000000
1	116.51	1.270	0.000353
2	117.53	3.770	0.001047
3	118.53	6.270	0.001742
4	119.54	8.770	0.002436
5	120.55	11.309	0.003141
6	121.54	13.809	0.003836
7	122.51	16.309	0.004530
8	123.49	18.848	0.005235
9	124.45	21.348	0.005930
10	125.38	23.848	0.006624
11	126.30	26.348	0.007319
12	127.21	28.887	0.008024
13	128.08	31.387	0.008719
14	128.94	33.887	0.009413
15	129.76	36.387	0.010107
16	130.58	38.926	0.010813
17	131.35	41.426	0.011507
18	132.09	43.926	0.012202
19	132.81	46.426	0.012896
20	133.49	48.926	0.013590
21	134.15	51.465	0.014296
22	134.76	53.965	0.014990
23	135.34	56.465	0.015685
24	135.88	58.965	0.016379
25	136.38	61.465	0.017074
26	136.85	63.965	0.017768
27	137.27	66.465	0.018462
28	137.65	68.965	0.019157
29	138.00	71.504	0.019862
30	138.30	74.004	0.020557
31	138.56	76.504	0.021251
32	138.77	79.004	0.021946
33	138.95	81.504	0.022640
34	139.07	84.004	0.023334
35	139.16	86.504	0.024029
36	139.20	89.004	0.024723
37	139.19	91.504	0.025418
38	139.14	94.004	0.026112
39	139.05	96.504	0.026807
40	138.91	99.004	0.027501
41	138.73	101.504	0.028196
42	138.51	104.004	0.028890
43	138.24	106.504	0.029584
44	137.94	109.004	0.030279
45	137.59	111.465	0.030962
46	137.20	113.965	0.031657
47	136.77	116.465	0.032351
48	136.30	118.965	0.033046
49	135.79	121.465	0.033740

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50	135.24	123.965	0.034435
51	134.66	126.465	0.035129
52	134.05	128.926	0.035813
53	133.40	131.426	0.036507
54	132.71	133.926	0.037202
55	131.99	136.426	0.037896
56	131.24	138.926	0.038590
57	130.48	141.387	0.039274
58	129.67	143.887	0.039969
59	128.84	146.387	0.040663
60	127.99	148.887	0.041357
61	127.11	151.387	0.042052
62	126.23	153.848	0.042735
63	125.31	156.348	0.043430
64	124.37	158.848	0.044124
65	123.42	161.348	0.044819
66	122.47	163.809	0.045502
67	121.49	166.309	0.046197
68	120.50	168.809	0.046891
69	119.52	171.270	0.047575
70	118.52	173.770	0.048269
71	117.51	176.270	0.048964
72	116.50	178.770	0.049658
73	115.50	181.230	0.050342
74	114.49	183.730	0.051036
75	113.48	186.230	0.051731
76	112.48	188.730	0.052425
77	111.50	191.191	0.053109
78	110.51	193.691	0.053803
79	109.53	196.191	0.054498
80	108.58	198.652	0.055181
81	107.63	201.152	0.055876
82	106.69	203.652	0.056570
83	105.77	206.152	0.057265
84	104.89	208.613	0.057948
85	104.01	211.113	0.058643
86	103.16	213.613	0.059337
87	102.33	216.113	0.060031
88	101.52	218.613	0.060726
89	100.76	221.074	0.061410
90	100.01	223.574	0.062104
91	99.29	226.074	0.062798
92	98.60	228.574	0.063493
93	97.95	231.074	0.064187
94	97.34	233.535	0.064871
95	96.76	236.035	0.065565
96	96.21	238.535	0.066260
97	95.70	241.035	0.066954
98	95.23	243.535	0.067649
99	94.80	246.035	0.068343
100	94.41	248.535	0.069038
101	94.06	250.996	0.069721
102	93.76	253.496	0.070416
103	93.49	255.996	0.071110
104	93.27	258.496	0.071804

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

105	93.09	260.996	0.072499
106	92.95	263.496	0.073193
107	92.86	265.996	0.073888
108	92.81	268.496	0.074582
109	92.80	270.996	0.075277
110	92.84	273.496	0.075971
111	92.93	275.996	0.076666
112	93.05	278.496	0.077360
113	93.23	280.996	0.078054
114	93.44	283.496	0.078749
115	93.70	285.996	0.079443
116	94.00	288.496	0.080138
117	94.35	291.035	0.080843
118	94.73	293.535	0.081538
119	95.15	296.035	0.082232
120	95.62	298.535	0.082926
121	96.12	301.035	0.083621
122	96.66	303.535	0.084315
123	97.24	306.035	0.085010
124	97.85	308.535	0.085704
125	98.51	311.074	0.086410
126	99.19	313.574	0.087104
127	99.91	316.074	0.087798
128	100.65	318.574	0.088493
129	101.42	321.074	0.089187
130	102.24	323.613	0.089893
131	103.06	326.113	0.090587
132	103.92	328.613	0.091281
133	104.79	331.113	0.091976
134	105.70	333.652	0.092681
135	106.62	336.152	0.093376
136	107.55	338.652	0.094070
137	108.51	341.152	0.094765
138	109.49	343.691	0.095470
139	110.46	346.191	0.096164
140	111.45	348.691	0.096859
141	112.46	351.230	0.097564
142	113.47	353.730	0.098258
143	114.47	356.230	0.098953
144	115.49	358.730	0.099647

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fullwave angle of Equal Area PWM.

Output frequency 20 Hz Amplitude factor .4

Step per Fullwave 72 Switching frequency 1440 Hz

Timer counter [TH0] 24 Switching angle 5

Count no.	AW	Chop angle	Time
0	0.00	0.000	0.000000
1	118.07	2.559	0.000355
2	122.17	7.637	0.001061
3	126.21	12.715	0.001766
4	130.18	17.793	0.002471
5	134.03	22.871	0.003177
6	137.78	27.988	0.003887
7	141.29	33.027	0.004587
8	144.63	38.105	0.005292
9	147.75	43.184	0.005998
10	150.62	48.262	0.006703
11	153.20	53.301	0.007403
12	155.49	58.340	0.008103
13	157.48	63.379	0.008803
14	159.15	68.418	0.009502
15	160.48	73.457	0.010202
16	161.47	78.496	0.010902
17	162.10	83.496	0.011597
18	162.38	88.496	0.012291
19	162.31	93.496	0.012986
20	161.89	98.496	0.013680
21	161.13	103.457	0.014369
22	160.01	108.457	0.015063
23	158.58	113.418	0.015752
24	156.82	118.379	0.016442
25	154.76	123.340	0.017131
26	152.41	128.301	0.017820
27	149.81	133.223	0.018503
28	146.94	138.184	0.019192
29	143.86	143.105	0.019876
30	140.57	148.027	0.020559
31	137.10	152.949	0.021243
32	133.48	157.871	0.021927
33	129.73	162.793	0.022610
34	125.87	167.715	0.023294
35	121.95	172.637	0.023977
36	117.98	177.559	0.024661
37	114.02	182.441	0.025339
38	110.05	187.363	0.026023
39	106.13	192.285	0.026706
40	102.27	197.207	0.027390
41	98.52	202.129	0.028073
42	94.90	207.051	0.028757
43	91.43	211.973	0.029441
44	88.14	216.895	0.030124
45	85.06	221.816	0.030808
46	82.19	226.777	0.031497
47	79.59	231.699	0.032180
48	77.24	236.660	0.032869
49	75.18	241.621	0.033558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50	73.42	246.582	0.034248
51	71.99	251.543	0.034937
52	70.87	256.543	0.035631
53	70.11	261.504	0.036320
54	69.69	266.504	0.037014
55	69.62	271.504	0.037709
56	69.90	276.504	0.038403
57	70.53	281.504	0.039098
58	71.52	286.543	0.039798
59	72.85	291.582	0.040498
60	74.52	296.621	0.041197
61	76.51	301.660	0.041897
62	78.80	306.699	0.042597
63	81.38	311.738	0.043297
64	84.25	316.816	0.044002
65	87.37	321.895	0.044708
66	90.71	326.973	0.045413
67	94.22	332.012	0.046113
68	97.97	337.129	0.046823
69	101.82	342.207	0.047529
70	105.79	347.285	0.048234
71	109.83	352.363	0.048939
72	113.93	357.441	0.049645

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fullwave angle of Equal Area PWM.

Output frequency	30 Hz	Amplitude factor	.6
Step per Fullwave	48	Switching frequency	1440 Hz
Timer counter [TH0]	24	Switching angle	7.5

Count no.	AW	Chop angle	Time
0	0.00	0.000	0.000000
1	120.75	3.911	0.000362
2	130.12	11.704	0.001084
3	139.23	19.497	0.001805
4	147.91	27.290	0.002527
5	155.97	35.054	0.003246
6	163.28	42.788	0.003962
7	169.70	50.493	0.004675
8	175.13	58.169	0.005386
9	179.49	65.815	0.006094
10	182.70	73.403	0.006797
11	184.74	80.962	0.007496
12	185.58	88.491	0.008194
13	185.22	95.991	0.008888
14	183.70	103.433	0.009577
15	181.04	110.845	0.010263
16	177.32	118.228	0.010947
17	172.61	125.581	0.011628
18	166.98	132.905	0.012306
19	160.55	140.200	0.012981
20	153.43	147.466	0.013654
21	145.74	154.702	0.014324
22	137.58	161.938	0.014994
23	129.07	169.175	0.015664
24	120.39	176.382	0.016332
25	111.61	183.618	0.017002
26	102.93	190.825	0.017669
27	94.42	198.062	0.018339
28	86.26	205.298	0.019009
29	78.57	212.534	0.019679
30	71.45	219.800	0.020352
31	65.02	227.095	0.021027
32	59.39	234.419	0.021705
33	54.68	241.772	0.022386
34	50.96	249.155	0.023070
35	48.30	256.567	0.023756
36	46.78	264.009	0.024445
37	46.42	271.509	0.025140
38	47.26	279.038	0.025837
39	49.30	286.597	0.026537
40	52.51	294.185	0.027239
41	56.87	301.831	0.027947
42	62.30	309.507	0.028658
43	68.72	317.212	0.029371
44	76.03	324.946	0.030088
45	84.09	332.710	0.030806
46	92.77	340.503	0.031528
47	101.88	348.296	0.032250
48	111.25	356.089	0.032971

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fullwave angle of Equal Area PWM.

Output frequency	40 Hz	Amplitude factor	.8
Step per Fullwave	36	Switching frequency	1440 Hz
Timer counter [TH0]	24	Switching angle	10

Count no.	AW	Chop angle	Time
0	0.00	0.000	0.000000
1	124.69	5.371	0.000373
2	141.76	16.113	0.001119
3	157.87	26.816	0.001862
4	172.42	37.441	0.002600
5	184.95	47.988	0.003333
6	195.06	58.418	0.004057
7	202.48	68.730	0.004773
8	207.07	78.926	0.005481
9	208.79	89.004	0.006181
10	207.67	98.965	0.006873
11	203.86	108.770	0.007553
12	197.56	118.496	0.008229
13	188.98	128.145	0.008899
14	178.48	137.676	0.009561
15	166.31	147.168	0.010220
16	152.88	156.582	0.010874
17	138.52	165.957	0.011525
18	123.55	175.332	0.012176
19	108.45	184.668	0.012824
20	93.48	194.043	0.013475
21	79.12	203.418	0.014126
22	65.69	212.832	0.014780
23	53.52	222.324	0.015439
24	43.02	231.855	0.016101
25	34.44	241.504	0.016771
26	28.14	251.230	0.017447
27	24.33	261.035	0.018127
28	23.21	270.996	0.018819
29	24.93	281.074	0.019519
30	29.52	291.270	0.020227
31	36.94	301.582	0.020943
32	47.05	312.012	0.021667
33	59.58	322.559	0.022400
34	74.13	333.184	0.023138
35	90.24	343.887	0.023881
36	107.31	354.629	0.024627

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fullwave angle of Equal Area PWM.

Output frequency 50 Hz Amplitude factor 1

Step per Fullwave 30 Switching frequency 1500 Hz

Timer counter [TH0] 32 Switching angle 12

Count no.	AW	Chop angle	Time
0	0.00	0.000	0.000000
1	125.03	6.680	0.000371
2	150.38	20.039	0.001113
3	173.50	33.305	0.001850
4	193.02	46.336	0.002574
5	208.14	59.133	0.003285
6	218.33	71.695	0.003983
7	223.38	83.977	0.004665
8	223.39	95.977	0.005332
9	218.70	107.695	0.005983
10	209.74	119.227	0.006624
11	197.08	130.570	0.007254
12	181.37	141.727	0.007874
13	163.30	152.742	0.008486
14	143.50	163.664	0.009092
15	122.57	174.586	0.009699
16	101.43	185.414	0.010301
17	80.50	196.336	0.010908
18	60.70	207.258	0.011514
19	42.63	218.273	0.012126
20	26.92	229.430	0.012746
21	14.26	240.773	0.013376
22	5.30	252.305	0.014017
23	0.61	264.023	0.014668
24	0.62	276.023	0.015335
25	5.67	288.305	0.016017
26	15.86	300.867	0.016715
27	30.98	313.664	0.017426
28	50.50	326.695	0.018150
29	73.62	339.961	0.018887
30	98.97	353.320	0.019629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fullwave angle of Equal Area PWM.

Output frequency 60 Hz Amplitude factor 1

Step per Fullwave 24 Switching frequency 1440 Hz

Timer counter [TH0] 24 Switching angle 15

Count no.	AW	Chop angle	Time
0	0.00	0.000	0.000000
1	133.40	8.628	0.000399
2	166.43	25.767	0.001193
3	194.49	42.583	0.001971
4	215.36	58.931	0.002728
5	227.90	74.722	0.003459
6	232.00	89.985	0.004166
7	228.18	104.751	0.004850
8	217.41	119.048	0.005511
9	200.85	132.993	0.006157
10	179.83	146.616	0.006788
11	155.55	160.063	0.007410
12	129.40	173.364	0.008026
13	102.60	186.636	0.008641
14	76.45	199.937	0.009256
15	52.17	213.384	0.009879
16	31.15	227.007	0.010510
17	14.59	240.952	0.011155
18	3.82	255.249	0.011817
19	0.00	270.015	0.012501
20	4.10	285.278	0.013207
21	16.64	301.069	0.013938
22	37.51	317.417	0.014695
23	65.57	334.233	0.015474
24	98.60	351.372	0.016267

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมการจำลองรูปคลื่นและฮาร์โมนิกของกระแสมอเตอร์

กรณีแหล่งจ่ายแรงดันแบบสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'------------------------------------------------------------
'                    PWM CURRENT CALCULATION
'------------------------------------------------------------
10  CLS : KEY OFF: SCREEN 0
    DIM t(1200), j1(1200), j2(1200), jr(1200), v(1200), s(1200)
    PRINT TAB(20); "----------MENU----------": PRINT : PRINT
    PRINT TAB(20); "(1) Equal Area PWM.(10Hz)";
    PRINT TAB(20); "(2) Equal Area PWM.(20Hz)";
    PRINT TAB(20); "(3) Equal Area PWM.(30Hz)";
    PRINT TAB(20); "(4) Equal Area PWM.(40Hz)";
    PRINT TAB(20); "(5) Equal Area PWM.(50Hz)";
    PRINT TAB(20); "(6) Equal Area PWM.(60Hz)";
    PRINT TAB(20); "(7) EXIT                 ";
    PRINT TAB(20); "                         ";
    PRINT TAB(20); "-------------------------";
41  PRINT TAB(20); "Select Input (1 -7)";
    INPUT n
    IF n = 7 THEN END
    IF n < 7 THEN 44
    GOTO 41
44  CLS : KEY OFF: SCREEN 0
    IF n < 7 THEN 90
    GOTO 44
90  PRINT "PWM.sampling current (EA.PWM.Technique) ": GOTO 125
125 INPUT "Input File name"; n$: OPEN n$ FOR INPUT AS #1
    INPUT "For output frequency    "; m
    INPUT "No.angle in 1 cycle     "; b
    INPUT "No.cycle be calculate   "; cy
    a = cy * b
128 pi = 3.14159: r1 = 19.5: l1 = .375: r2 = 150: l2 = .022
    PRINT : PRINT "Output PWM.frequency          "; m; "Hz"
    PRINT "Total angle be calculated  "; a
    PRINT "Excitation serie resistance [Rm]"; r1; "Ohm"
    PRINT "Excitation serie Inductance [Lm]"; l1; "Henry"
    PRINT "Transfer serie resistance   [Re]"; r2; "Ohm"
    PRINT "Transfer serie Inductance   [Le]"; l2; "Henry"
    INPUT "Display Chopping time & current on CRT.[y/n]"; a$
    IF a$ = "y" THEN 130
    IF a$ <> "y" THEN 140
130 jr(0) = 0: j1(0) = 0: j2(0) = 0: t(0) = 0
    PRINT " No. ", "  time  ", " current"
    PRINT " 0   ", "0.000000", "0.000000"
    FOR i = 1 TO a
     INPUT #1, t(i)
     y = i MOD 2
       v(i) = 220 * y - 110
       tp = t(i) - t(i - 1): 'print"tp=";tp
       tu1 = -(r1 * tp / l1): 'print"tu1=";tu1
       tu2 = -(r2 * tp / l2): 'print"tu2=";tu2

    '------------------------------------------------------------
    '                    PWM CURRENT CALCULATION
    '------------------------------------------------------------
    j1(i)=v(i)/r1*(1-EXP(tu1))+j1(i-1)*
       EXP(tu1):'print"j1(";i;")=";j1(i)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    j2(i)=v(i)/r2*(1-EXP(tu2))+j2(i-1)*
       EXP(tu2):'print"j2(";i;")=";j2(i)
    jr(i) = j1(i) + j2(i)
    PRINT i,:PRINT USING"##.######";t(i);:PRINT,
            :PRINT USING"+###.######";jr(i)
135 NEXT i

140 INPUT "Print Chopping time & current on print [y/n]"; a$
    IF a$ = "y" THEN 150
    IF a$ <> "y" THEN 250
150 GOSUB 1000
    LPRINT " No."; "  time  ", " current"
    LPRINT " 0  "; "0.000000", "0.000000"
    FOR i = 1 TO a
    LPRINT i;:LPRINT USING"##.######";t(i);:LPRINT,
       :LPRINT USING"+###.######"; jr(i)
    NEXT i

250 INPUT"Solve of sampling current data for
      FFT.program?[y/n]"; a$
    IF a$ ="y" THEN 270
    IF a$ <> "y" THEN 375

270 j1(0)=0:j2(0)=0:jr(0)=0:jx=0:t(0)=0:s(0)=0:c=1
    FOR i = 1 TO a
      y = i MOD 2
         v(i) = 220 * y - 110
      INPUT #1, t(i)
       FOR k = c TO n
       s(k) = k * cy / (m * n)
         IF s(k) < t(i - 1) THEN 280
         IF s(k) > t(i) THEN 290
         tp=s(k)-t(i-1):tu1=-(r1*tp/l1):tu2=-(r2*tp/l2)

    '-------------------------------------------------------
    '          CAL. FOR SAMPLING PWM. CURRENT
    '-------------------------------------------------------
          j1(k) = v(i)/r1*(1-EXP(tu1))+j1(k-1)*EXP(tu1)
          j2(k) = v(i)/r2*(1-EXP(tu2))+j2(k-1)* EXP(tu2)
          jr(k) = j1(k) + j2(k)
280 c = c + 1: NEXT k
290 c = c + 0: NEXT i
    INPUT"Display sampling current data on CRT.?[y/n]";a$
    IF a$ = "y" THEN 300
    IF a$ <> "y" THEN 320
300 PRINT "Output PWM.frequency          "; m; "Hz"
    PRINT "Number of angle in 1 cycle    "; a
    PRINT "Number of sampling data       "; n
    PRINT " No.  ", "   time  ", " current"
    PRINT " 0    ", " 0.000000", " 0.000000"
    FOR k = 1 TO n
    PRINT k,:PRINT USING"##.######";s(k);:PRINT,
     :PRINT USING"+###.######"; jr(k)
    NEXT k
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
320 INPUT "Print sampling current data on printer? [y/n]"; a$
    IF a$ = "y" THEN 330
    IF a$ <> "y" THEN 375

330 GOSUB 1000
    LPRINT : LPRINT TAB(1); "Number of sampling data   "; n
    LPRINT "No"; : LPRINT " Time ";: LPRINT,:LPRINT "Current"
    FOR k = 0 TO n
    LPRINT k;:LPRINT USING "##.######"; s(k); : LPRINT ,
      : LPRINT USING "+###.######"; jr(k)
    NEXT k

375 INPUT "Do you want to calculate again ? [y/n]"; a$
    IF a$ = "y" THEN 10
    IF a$ <> "y" THEN END

    '-------------------------------------------------
    '                  SUBROUTINE
    '-------------------------------------------------
1000 INPUT "Type of PWM. tachnique [Ea]"; a$
     IF a$ = "e" THEN 1005
     GOTO 1000
1005 LPRINT TAB(1); "Sampling current (Equal area PWM.)":
       LPRINT : GOTO 1020
1020 LPRINT TAB(1); "Output PWM.frequency       "; m; "Hz";
     LPRINT TAB(1); "Number of angle in 1 cycle "; a: LPRINT
     LPRINT TAB(1); "Excited resistance (in serie) ;Rm"; r1
     LPRINT TAB(1); "Excited inductance (in serie) ;Lm"; l1
     LPRINT TAB(1); "Total tranfer resistance (in serie);Re"; r2
     LPRINT TAB(1); "Total tranfer inductance (in serie);Le"; l2
     RETURN
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
     '-----------------------------------------------
     '          FAST  FOURIER  TRANFORM
     '              (calculation)
     '-----------------------------------------------
10   z$ = "#.#######^^^"
     pi = 3.14159
     PRINT TAB(20); "  Fast fourier transform"
60   PRINT TAB(20); "----------Main Menu--------"
     PRINT TAB(1); "(L)oad data ";
     PRINT TAB(40); "(F)orward FFT.[T to F]";
     PRINT TAB(1); "(P)rint data";
     PRINT TAB(40); "(In)verse FFT.[F to T]";
     PRINT TAB(1); "(E)xit";
120  PRINT TAB(50); : INPUT "Your selection  "; a$
     IF a$ = "l" THEN 200
     IF a$ = "f" THEN sign = -1: a$ = "Forward": GOTO 740
     IF a$ = "i" THEN sign = 1: a$ = "Forward": GOTO 740
     IF a$ = "p" THEN 1150
     IF a$ = "e" THEN END
     GOTO 120

     '--------------------------------
     '   Read data from disk files
     '--------------------------------
200  PRINT : INPUT "File name   "; n$
     INPUT "Number of data  "; n
     DIM xr(n), xi(n)
     OPEN n$ FOR INPUT AS #1
     'erase xr,xi:dim xr(n),xi(n)
     FOR i = 1 TO n
     xi(i) = 0
     INPUT #1, xr(i), xi(i)
     NEXT i
     CLOSE #1
     GOTO 60

     '--------------------------------
     '          FFT.ALLORITHM
     '--------------------------------
     '  Calculation the # of iteration [ Log N base 2 ]
740  ir = LOG(n) / LOG(2)
     np2 = n

     '..............computation for each iteration
     '..............nxp = number of point in partition
     '..............np2 = nxp/2
     FOR it = 1 TO ir
     nxp = np2: np2 = nxp / 2: wpwr = pi / np2

     '..............Calculation miltiplier
         FOR m = 1 TO np2
          arg=(m-1)*wpwr:wr=COS(arg): wi = sign * SIN(arg)
     '..............computation for each partition
        FOR mxp = nxp TO n STEP nxp
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          j1 = mxp - nxp + m: j2 = j1 + np2
          tr = xr(j1) - xr(j2): ti = xi(j1) - xi(j2)
          xr(j1) = xr(j1) + xr(j2): xi(j1) = xi(j1) + xi(j2)
          xr(j2) = wr * tr - wi * ti: xi(j2) = wr * ti + wi * tr
          NEXT mxp
        NEXT m
      NEXT it

      '..............BIT REVERSAL.............
      n2 = n / 2: n1 = n - 1: j = 1
      FOR i = 1 TO n1
          IF i >= j THEN 1000
          SWAP xr(i), xr(j): SWAP xi(i), xi(j)
1000      k = n2
1010      IF k >= j THEN 1030
          j = j - k: k = k / 2: GOTO 1010
1030      j = j + k
      NEXT i

      '............FINDING THE SOLUTION...........
      IF a$ = "i" THEN 1100
      FOR i = 1 TO n
        xr(i) = xr(i) / n: xi(i) = xi(i) / n
      NEXT i
1100  'print time$
      PRINT " * calculation is complete * ": GOTO 60

      '-------------------------------------------
      '               PRINT DATA
      '-------------------------------------------
1150  p$ = "cx(###) = ": s$ = "Xabs(###) = "
      PRINT TAB(1); "print data on (T) domain";
      PRINT TAB(1); "print data on (F) damain";
      PRINT TAB(45); : INPUT "Your selection "; a$
      IF a$ = "T" THEN p$ = "Xm(###) = ": s$ = "Xabs(###) ="
      PRINT : PRINT TAB(1); "print data on (C)RT.";
      PRINT TAB(1); "print data on (P)rint";
      PRINT TAB(1); "print data on (D)isk files";
      PRINT TAB(45); : INPUT "Your selection "; a$
1240  IF a$ = "c" THEN 1280
      IF a$ = "p" THEN 1400
      IF a$ = "d" THEN 1580
      GOTO 1240

      '---------------Print data to CRT----------
1280  FOR i = 1 TO n
      PRINT USING p$; i - 1: PRINT USING z$; xr(i);
      PRINT "i*"; : PRINT USING z$; xi(i)
      NEXT i
      PRINT : PRINT "print Absolute value ? [y/n]"; a$
      IF a$ <> "y" THEN 60

      '------Find abaolute value in radian-------
      FOR i = 1 TO n
      GOSUB 1670:IF p$="0"THEN PRINT"--CO=0/0--":GOTO 1370
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
     PRINT USING s$; i - 1; : PRINT USING z$; ca;
     PRINT USING "ang(###) = "; i - 1; : PRINT USING z$; co
1370 NEXT i
     GOTO 60

     '----------Print data to Printer------------
1400 LPRINT "Rectangular form ": LPRINT
     FOR i = 1 TO n
        LPRINT USING p$; u - 1; : LPRINT USING z$; xr(i); :
        LPRINT "i*;": PRINT USING z$; xi(i)
     NEXT i
     PRINT : PRINT "Print absolute value ?[y/n]";
     INPUT "Your selection "; a$
     IF a$ <> "y" THEN 60
     LPRINT : LPRINT

     '------------Find absolute value------------
     LPRINT " Absolute value": LPRINT
     FOR i = 1 TO n
     GOSUB 1670:IF p$="0"THEN LPRINT"--CO=0/0 --":GOTO 1550
     LPRINT USING s$; i - 1; : LPRINT USING z$; ca;
     LPRINT USING "ang(###) = "; i - 1; : LPRINT USING z$; co
1550 NEXT i
     GOTO 60

     '------------Save data to disk files---------
1580 INPUT "File name"; n$
     'input"Starting saved data at ";b
     'input"Number of data to save ";k :s=b+k-1
     'print"Then stop saved data at";s
     OPEN n$ FOR OUTPUT AS #2
     'for i=b to s
     FOR i = 1 TO n
     PRINT #2, xr(i); ","; xi(i)
     NEXT i
     CLOSE #2: END

     '-------------------------------------
     '          Sub Routine
     '    Find absolute value and angle
     '-------------------------------------
1670 ca = SQR(xr(i) ^ 2 + xi(i) ^ 2): p$ = " "
     IF xr(i) = 0 AND xi(i) = 0 THEN p$ = "0":
        BEEP: FOR s = 1 TO 40: NEXT s: BEEP: RETURN
     IF xr(i) = 0 THEN co = pi / 2: RETURN
     IF xi(i) = 0 THEN co = 0: RETURN
     co = ATN(xi(i) / xr(i)): RETURN
     END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดเกี่ยวกับการใช้งาน

ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ SAB 8031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รายละเอียดโดยสังเขป

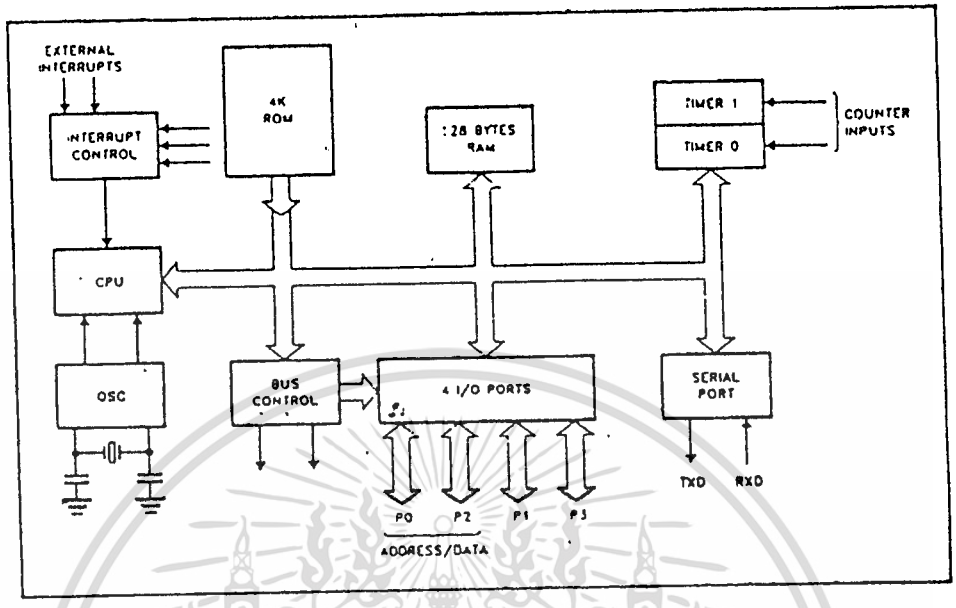
ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ SAB 8031

ลักษณะโดยทั่วไป

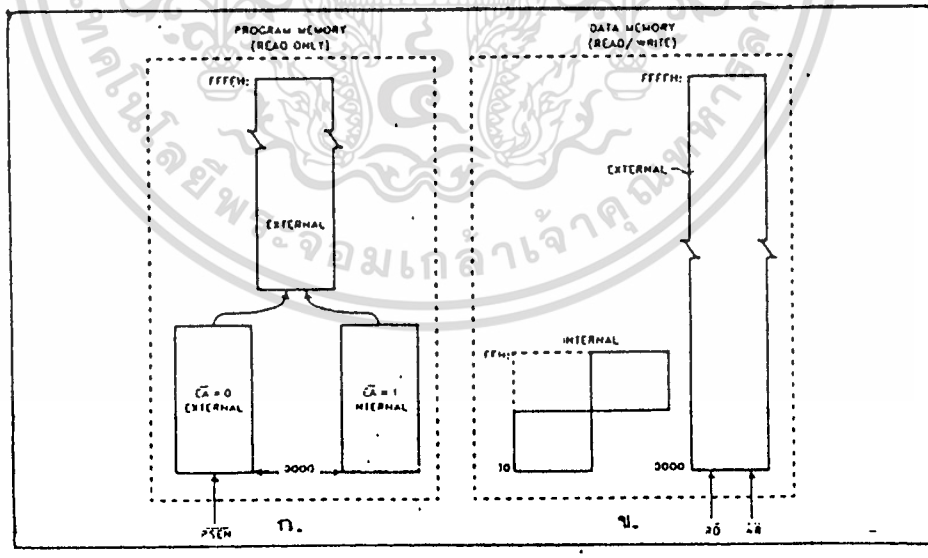
1. เป็นไอซีในตระกูล MCS'51 โดยใช้เทคโนโลยี CHMOS ทำงานด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน +5 VDC
2. CPU มีขนาด 8 บิท มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาบนชิปเอง
3. มีวงจรตั้งเวลาและนับ ขนาด 16 บิทจำนวน 2 ชุด
4. ภายในชิปมีหน่วยความจำชั่วคราว ขนาด 128x8 บิท ไม่มีหน่วยความจำถาวร
5. ชุดแบงค์ (BANK) รีจิสเตอร์มี 4 ชุดแต่ละชุดมีรีจิสเตอร์ 8 ตัว
6. มีพอร์ตไอโอแบบขนานสองทิศทางจำนวน 2 พอร์ต (พอร์ต 0 และ 2) โดยการเข้าถึงแอดแดรส จะใช้พอร์ต 0 เป็นไบท์ต่ำและ พอร์ต 2 เป็นไบท์สูง ส่วนการเข้าถึงข้อมูล จะใช้เฉพาะพอร์ต 0 จึงทำให้แอดแดรสโปรแกรมภายนอกชิปได้สูงสุด 64 กิโลไบท์
7. สามารถจัดการตัวเลขทางคณิตศาสตร์ได้ทั้งแบบไบนารี และเดซิมัลพร้อมทั้งมีคำสั่งคูณ และการหารทางฮาร์ดแวร์
8. อินเตอร์รัพท์ทำได้ 5 แหล่ง โดยจัดไพรโอริตี้ (Priority) ได้ 2 ระดับ
9. โปรเซสเซอร์สามารถใช้งานแบบบูลลีน (Boolean) จึงเหมาะสำหรับงานควบคุม

การติดต่อของข้อมูลภายในไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 จะเป็นดังภาพภาคผนวกที่ 1 โดยข้อมูลอินพุทของไมโครคอนโทรลเลอร์จะมาจากหน่วยความจำข้อมูล (ภายในหรือภายนอก แล้วสัญญาณ EA) ข้อมูลเอาท์พุทจะอยู่ที่พอร์ต 0 โดยมีซีพียูทำหน้าที่ประมวลผลกลาง ในกรณีที่ติดต่อกับข้อมูลภายนอก พอร์ต 0 และพอร์ต 2 จะเป็นบัสแอดแดรสพร้อมระบุตำแหน่งข้อมูลนั้นด้วย เพื่อให้เข้าใจการควบคุมหน่วยความจำโปรแกรมและข้อมูล จะพิจารณาโครงสร้างของหน่วยความจำได้ดังภาพภาคผนวกที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพภาคผนวกที่ 1 บล็อคไดอะแกรมของ 8051 โดยสังเขป



ภาพภาคผนวกที่ 2 แผนผังการควบคุมหน่วยความจำ

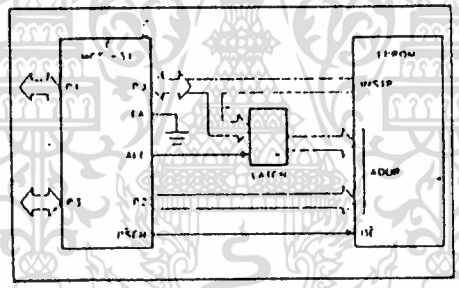
ก. ส่วนความจำโปรแกรม (Program Memory)

ข. ส่วนความจำข้อมูล (Data Memory)

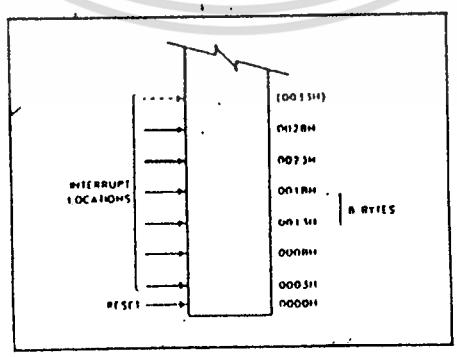
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดต่อข้อมูลหน่วยความจำ

จากภาพภาคผนวกที่ 2 จะเห็นว่าหน่วยความจำของไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS' 51 แบ่งออกเป็นหน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) และหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ดังนั้นในกรณีของไมโครคอนโท์รลเลอร์เบอร์ 8031 ที่ไม่มีหน่วยความจำถาวรภายในต้องใช้หน่วยความจำภายนอก (External Memory)เท่านั้น จึงต้องใช้สัญญาณ EA เป็น 0 เสมอและเมื่อต้องการอ่านข้อมูลจะทำได้โดยการส่งสัญญาณอ่าน (Read strobe) จากขา PSEN มายังหน่วยความจำถึงถาวรนั้นๆ พร้อมกำหนดตำแหน่งแอดแดรสมาทางพอร์ต 0 และพอร์ต 2 ดังภาพภาคผนวกที่ 3 ซึ่งขณะที่รอกระทำ (Fetch) คำสั่งนั้นสัญญาณจากพอร์ต 0 จะต้องถูกแลทช์ (Latch) ด้วยสัญญาณจาก ALE ชั่วคราวเพื่อให้สัญญาณ PSEN จากไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำที่ตำแหน่งแอดแดรสนั้นๆ ออกมาประมวลผลในซีพียู ของไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



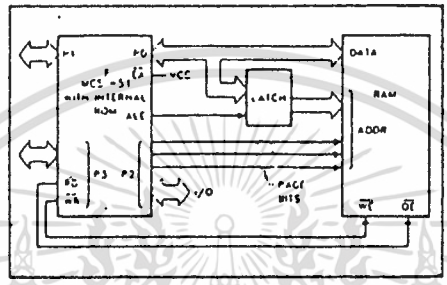
ภาพภาคผนวกที่ 3 การทำงานร่วมกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก



ภาพภาคผนวกที่ 4 ตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในส่วนความจำของโปรแกรมนั้น (ตั้งแต่แอดแดรส 0000H-FFFFH) ถ้าระบบหรือวงจรควบคุมถูกรีเซท (Reset) จะทำให้ซีพียูเริ่มทำงาน (Execute) โปรแกรมใหม่จากตำแหน่ง 0000H ทุกครั้ง ดังนั้นส่วนหัวของโปรแกรมควบคุมควรกำหนดรูปแบบอินเตอร์รัพท์ (Interrupt Location) โดยระบุตำแหน่งแอดแดรสด้วยเช่น External Interrup 0 (IE0) จะอยู่ที่ 0003H External Interrupt 1 (IE1) จะอยู่ที่ 0013H Timer 0 จะอยู่ที่ 000BH Timer 1 จะอยู่ที่ 001BH เป็นต้น



ภาพภาคผนวกที่ 5 การทำงานร่วมกับหน่วยความจำชั่วคราวภายนอก

การติดต่อกับหน่วยความจำชั่วคราว (RAM) ซึ่งสามารถทั้งอ่านและเขียนข้อมูลได้จึงมีสายสัญญาณควบคุมการอ่าน (RD) และเขียน (WR) ดังภาพภาคผนวกที่ 5 ส่วนสายสัญญาณ ALE ยังคงทำหน้าที่ควบคุมบัสแอดแดรสไบท์ต่ำเช่นเดิม ส่วนสายสัญญาณที่มีนัยสูง (MSB) ทั้ง 3 ของพอร์ต 2 ทำหน้าที่เลือกหน้า (Page) ของข้อมูลในหน่วยความจำนั้นๆ

โครงสร้างภายในและการจัดขาต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031

ภาพภาคผนวกที่ 6 และภาพภาคผนวกที่ 7 เป็นโครงสร้างภายใน และการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 ซึ่งแต่ละขาจะมีหน้าที่ดังนี้

- ขา Vcc,Vss สำหรับรับแหล่งจ่ายแรงดัน +5VDC และกราวนด์ ตามลำดับ
- ขา XTAL1,XTAL2 สำหรับรับสัญญาณนาฬิกา เพื่อกำหนดช่วงเวลาทำงานของระบบ
- ขา RST สำหรับรีเซตระบบโปรแกรมขณะเริ่มทำงาน
- ขา Vpp/EA สำหรับติดต่อหน่วยความจำภายนอก แบบสถานะต่ำ (Active Low) ในกรณีของไอซีเบอร์ 8031 EA ต้องลงกราวนด์เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขา PROG/ALE สำหรับควบคุมการแลทช์ข้อมูลแอดแดรสไบท์ต่ำที่พอร์ต 0
- ขา PSEN สำหรับส่งสัญญาณ (Strobe) สถานะต่ำ เมื่อต้องการอ่านข้อมูลจากโปรแกรมภายนอก
- พอร์ต 0 เป็นพอร์ตไอโอ (I/O Port) แบบขนานชนิด 2 ทิศทาง ทำงานเป็น PCL /Data Multiplex (PCL คือบัสแอดแดรสไบท์ต่ำ)
- พอร์ต 1 เป็นพอร์ตไอโอแบบขนานชนิด 2 ทิศทางปกติสามารถตั้งคำสั่งพิเศษได้โครงงานนี้จะใช้บิต 1.0 สำหรับส่งสัญญาณพัลส์ย่อย (Transfer pulse)

  บิต 1.2 สำหรับส่งสัญญาณหยุดทำงานขณะเกิดอินเตอร์รัพท์ไปให้ไอซีเบอร์ SLE 4520 ที่ขา INHIBIT
- พอร์ต 2 เป็นพอร์ตไอโอแบบขนานชนิด 2 ทิศทางซึ่งจะใช้เป็นบัสแอดแดรสไบท์สูง
- พอร์ต 3 เป็นพอร์ตไอโอแบบขนานชนิด 2 ทิศทางซึ่งจะใช้ในกรณีคำสั่งพิเศษ โดยขาต่างๆ ของพอร์ต 3 นี้มีหน้าที่ดังนี้

P3.0 RXD (Serial input port)

P3.1 TXD (Serial output port)

P3.2 INT0 (External Interrupt 0)

P3.3 INT1 (External Interrupt 1)

P3.4 T0 (Timer 0 External Input)

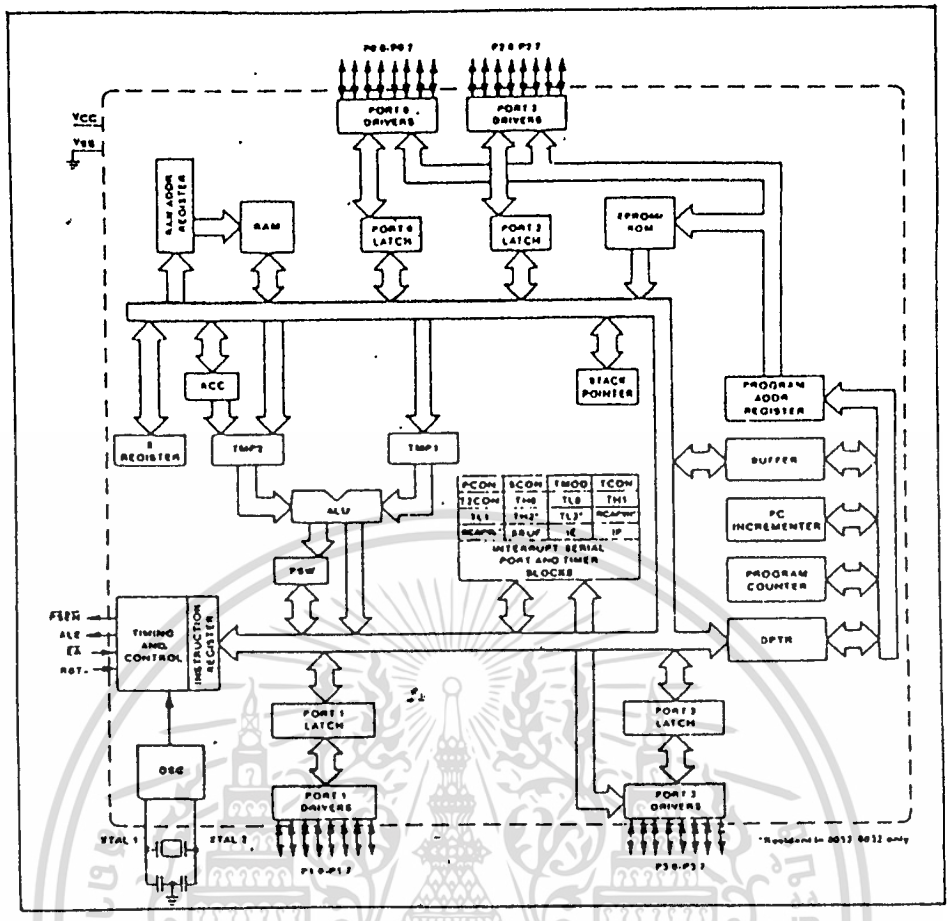
P3.5 T1 (Timer 1 External Input)

P3.6 WR (External Memory Write strobe)

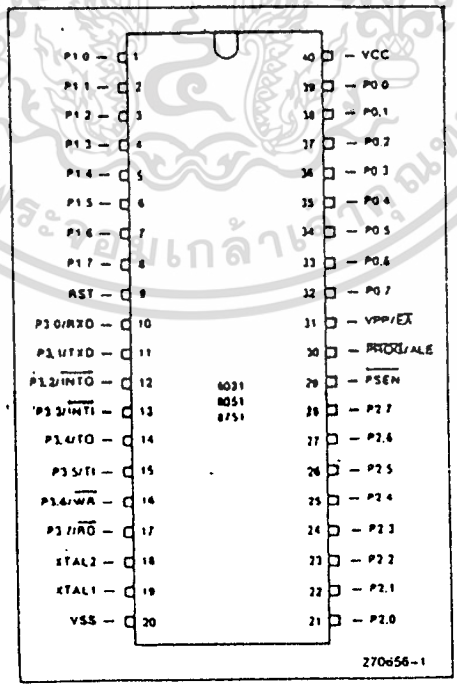
P3.7 RD (External Memory Read strobe)

นอกจากนี้ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ยังประกอบด้วยรีจิสเตอร์สำหรับฟังก์ชั่นพิเศษอีกมากมายตามตารางภาคผนวกที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพภาคผนวกที่ 6 แผนผังโครงสร้างภายในชิปไอซี MCS' 51



ภาพภาคผนวกที่ 7 การจัดขาต่างๆ ของไอซีตระกูล MCS' 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 1 แอดแดรสและหน้าที่ของรีจิสเตอร์ต่างๆ ในไอซีตระกูล MCS' 51

Symbol	Name	Address
*ACC	Accumulator	0E0H
*B	d Register	0F0H
*PSW	Program Status Word	0D0H
SP	Stack Pointer	81H
DPTR	Data Pointer 2 Bytes	
DPL	Low Byte	82H
DPH	High Byte	83H
*P0	Port 0	80H
*P1	Port 1	90H
*P2	Port 2	0A0H
*P3	Port 3	0B0H
*IP	Interrupt Priority Control	0B8H
*IE	Interrupt Enable Control	0A8H
TMOD	Timer/Counter Mode Control	89H
*TCON	Timer/Counter Control	88H
*T2CON	Timer/Counter 2 Control	0C8H
TH0	Timer/Counter 0 High Byte	8CH
TL0	Timer/Counter 0 Low Byte	8AH
TH1	Timer/Counter 1 High Byte	8DH
TL1	Timer/Counter 1 Low Byte	8BH
TH2	Timer/Counter 2 High Byte	0CDH
TL2	Timer/Counter 2 Low Byte	0CCH
RCAP2H	T/C 2 Capture Reg. High Byte	0CBH
RCAP2L	T/C 2 Capture Reg. Low Byte	0CAH
*SCON	Serial Control	98H
SBUF	Serial Data Buffer	99H
PCON	Power Control	87H

ทั้งนี้แผนผังตำแหน่งของฟังก์ชั่นพิเศษดังกล่าวแสดงในตารางภาคผนวกที่ 2

ตารางภาคผนวกที่ 2 แสดงแผนผังแอดแดรสของรีจิสเตอร์ต่างๆ

SFR MEMORY MAP

	8 Bytes								
F8									FF
F0	B								F7
E8									EF
E0	ACC								E7
D8									DF
D0	PSW								D7
C8	T2CON		RCAP2L	RCAP2H	TL2	TH2			CF
C0									C7
B8	IP								BF
B0	P3								B7
A8	IE								AF
A0	P2								A7
98	SCON	SBUF							9F
90	P1								97
88	TCON	TMOD	TL0	TL1	TH0	TH1			8F
80	P0	SP	DPL	DPH				PCON	87

Bit Addresssble

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชั่นพิเศษที่จะนำมาใช้ในโครงงานนี้มีหลายฟังก์ด้วยกัน โดยแต่ละรีจิสเตอร์ที่ใช้จะมีความสำคัญของบิตต่างๆ ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 3 ถึงตารางภาคผนวกที่ 13

ตารางภาคผนวกที่ 3 รีจิสเตอร์แสดงสถานะของโปรแกรม

(Program Status Word : PWM)

PSW: PROGRAM STATUS WORD. BIT ADDRESSABLE.

CY	AC	F0	RS1	RS0	OV	—	P

CY	PSW.7	Carry Flag.
AC	PSW.6	Auxiliary Carry Flag.
F0	PSW.5	Flag 0 available to the user for general purpose.
RS1	PSW.4	Register Bank selector bit 1 (SEE NOTE 1).
RS0	PSW.3	Register Bank selector bit 0 (SEE NOTE 1).
OV	PSW.2	Overflow Flag.
–	PSW.1	User definable flag.
P	PSW.0	Parity flag. Set/cleared by hardware each instruction cycle to indicate an odd/even number of '1' bits in the accumulator.

NOTE:
1. The value presented by RS0 and RS1 selects the corresponding register bank.

RS1	RS0	Register Bank	Address
0	0	0	00H-07H
0	1	1	08H-0FH
1	0	2	10H-17H
1	1	3	18H-1FH

ตารางภาคผนวกที่ 4 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์สำหรับการควบคุมกำลัง

(Power Control Register : PCON)

PCON: POWER CONTROL REGISTER. NOT BIT ADDRESSABLE.

SMOD	—	—	—	GF1	GF0	PD	IDL

SMOD	Double baud rate bit. If Timer 1 is used to generate baud rate and SMOD = 1, the baud rate is doubled when the Serial Port is used in modes 1, 2, or 3.
–	Not implemented, reserved for future use.*
—	Not implemented, reserved for future use.*
–	Not implemented, reserved for future use.*
GF1	General purpose flag bit.
GF0	General purpose flag bit.
PD	Power Down bit. Setting this bit activates Power Down operation in the 80C51BH. (Available only in CHMOS).
IDL	Idle Mode bit. Setting this bit activates Idle Mode operation in the 80C51BH. (Available only in CHMOS).

If 1s are written to PD and IDL at the same time, PD takes precedence.

*User software should not write 1s to reserved bits. These bits may be used in future MCS-51 products to invoke new features. In that case, the reset or inactive value of the new bit will be 0, and its active value will be 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 5 แสดงตำแหน่งแอดแดรสที่อินเตอร์รัพท์แบบต่างๆ กำหนด

INTERRUPTS:

In order to use any of the interrupts in the MCS-51, the following three steps must be taken.

1. Set the EA (enable all) bit in the IE register to 1.
2. Set the corresponding individual interrupt enable bit in the IE register to 1.
3. Begin the interrupt service routine at the corresponding Vector Address of that interrupt. See Table below.

Interrupt Source	Vector Address
IE0	0003H
TF0	000BH
IE1	0013H
TF1	001BH
RI & TI	0023H
TF2 & EXF2	002BH

In addition, for external interrupts, pins $\overline{INT0}$ and $\overline{INT1}$ (P3.2 and P3.3) must be set to 1, and depending on whether the interrupt is to be level or transition activated, bits IT0 or IT1 in the TCON register may need to be set to 1.

ITx = 0 level activated

ITx = 1 transition activated

ตารางภาคผนวกที่ 6 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์สำหรับเลือกแบบการอินเตอร์รัพท์

(Interrupt Enable Register : IE)

IE: INTERRUPT ENABLE REGISTER. BIT ADDRESSABLE.

If the bit is 0, the corresponding interrupt is disabled. If the bit is 1, the corresponding interrupt is enabled.

EA	—	ET2	ES	ET1	EX1	ET0	EX0

EA	IE.7	Disables all interrupts. If EA = 0, no interrupt will be acknowledged. If EA = 1, each interrupt source is individually enabled or disabled by setting or clearing its enable bit.
—	IE.6	Not implemented, reserved for future use.*
ET2	IE.5	Enable or disable the Timer 2 overflow or capture interrupt (8052 only).
ES	IE.4	Enable of disable the serial port interrupt.
ET1	IE.3	Enable or disable the Timer 1 overflow interrupt.
EX1	IE.2	Enable or disable External Interrupt 1.
ET0	IE.1	Enable or disable the Timer 0 overflow interrupt.
EX0	IE.0	Enable or disable External Interrupt 0.

*User software should not write 1s to reserved bits. These bits may be used in future MCS-51 products to invoke new features. In that case, the reset or inactive value of the new bit will be 0, and its active value will be 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 7 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์สำหรับเลือกลำดับการอินเตอร์รัพท์

(Interrupt Priority Register : IP)

IP: INTERRUPT PRIORITY REGISTER. BIT ADDRESSABLE.

If the bit is 0, the corresponding interrupt has a lower priority and if the bit is 1 the corresponding interrupt has a higher priority.

—	—	PT2	PS	PT1	PX1	PT0	PX0

—	IP. 7	Not implemented, reserved for future use.*
—	IP. 6	Not implemented, reserved for future use.*
PT2	IP. 5	Defines the Timer 2 interrupt priority level (8052 only).
PS	IP. 4	Defines the Serial Port interrupt priority level.
PT1	IP. 3	Defines the Timer 1 interrupt priority level.
PX1	IP. 2	Defines External Interrupt 1 priority level.
PT0	IP. 1	Defines the Timer 0 interrupt priority level.
PX0	IP. 0	Defines the External Interrupt 0 priority level.

*User software should not write 1s to reserved bits. These bits may be used in future MCS-51 products to invoke new features. In that case, the reset or inactive value of the new bit will be 0, and its active value will be 1.

ตารางภาคผนวกที่ 8 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์สำหรับควบคุมการตั้ง/นับเวลา

(Timer/Counter Control Register : TCON)

TCON: TIMER/COUNTER CONTROL REGISTER. BIT ADDRESSABLE.

TF1	TR1	TF0	TR0	IE1	IT1	IE0	IT0

TF1	TCON. 7	Timer 1 overflow flag. Set by hardware when the Timer/Counter 1 overflows. Cleared by hardware as processor vectors to the interrupt service routine.
TR1	TCON. 6	Timer 1 run control bit. Set/cleared by software to turn Timer/Counter 1 ON/OFF.
TF0	TCON. 5	Timer 0 overflow flag. Set by hardware when the Timer/Counter 0 overflows. Cleared by hardware as processor vectors to the service routine.
TR0	TCON. 4	Timer 0 run control bit. Set/cleared by software to turn Timer/Counter 0 ON/OFF.
IE1	TCON. 3	External Interrupt 1 edge flag. Set by hardware when External Interrupt edge is detected. Cleared by hardware when interrupt is processed.
IT1	TCON. 2	Interrupt 1 type control bit. Set/cleared by software to specify falling edge/low level triggered External Interrupt.
IE0	TCON. 1	External Interrupt 0 edge flag Set by hardware when External Interrupt edge detected. Cleared by hardware when interrupt is processed.
IT0	TCON. 0	Interrupt 0 type control bit. Set/cleared by software to specify falling edge/low level triggered External Interrupt.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 9 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์สำหรับเลือกโหมดตั้ง/นับเวลา

(Timer/Counter Mode Control Register : TMOD)

TMOD: TIMER/COUNTER MODE CONTROL REGISTER. NOT BIT ADDRESSABLE.

GATE	C/T	M1	M0	GATE	C/T	M1	M0
TIMER 1				TIMER 0			

GATE — When TRx (in TCON) is set and GATE = 1, TIMER/COUNTERx will run only while INTx pin is high (hardware control). When GATE = 0, TIMER/COUNTERx will run only while TRx = 1 (software control).

C/T — Timer or Counter selector. Cleared for Timer operation (input from internal system clock). Set for Counter operation (input from Tx input pin).

M1 — Mode selector bit. (NOTE 1)

M0 — Mode selector bit. (NOTE 1)

NOTE 1:

M1	M0		Operating Mode
0	0	0	13-bit Timer (MCS-48 compatible)
0	1	1	16-bit Timer/Counter
1	0	2	8-bit Auto-Reload Timer/Counter
1	1	3	(Timer 0) TL0 is an 8-bit Timer/Counter controlled by the standard Timer 0 control bits. TH0 is an 8-bit Timer and is controlled by Timer 1 control bits.
1	1	3	(Timer 1) Timer/Counter 1 stopped.

ตารางภาคผนวกที่ 10 แสดงการตั้งค่าต่างใน TMOD เมื่อเลือกใช้ TIMER/COUNTER 0

TIMER/COUNTER 0

As a Timer:

MODE	TIMER 0 FUNCTION	TMOD INTERNAL CONTROL (NOTE 1)	TMOD EXTERNAL CONTROL (NOTE 2)
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

As a Counter:

MODE	COUNTER 0 FUNCTION	TMOD INTERNAL CONTROL (NOTE 1)	TMOD EXTERNAL CONTROL (NOTE 2)
0	13 bit Timer	04H	0CH
1	16-bit Timer	05H	0DH
2	8-bit Auto-Reload	06H	0EH
3	one 8-bit Counter	07H	0FH

NOTES:
1. The Timer is turned ON/OFF by setting/clearing bit TR0 in the software.
2. The Timer is turned ON/OFF by the 1 to 0 transition on INT0 (P3.2) when TR0 = 1 (hardware control).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 11 แสดงการตั้งค่าต่างใน TMOD เมื่อเลือกใช้ TIMER/COUNTER 1

TIMER/COUNTER 1

As a Timer:

MODE	TIMER 1 FUNCTION	TMOD INTERNAL CONTROL (NOTE 1)	TMOD EXTERNAL CONTROL (NOTE 2)
0	13-bit Timer	00H	80H
1	16-bit Timer	10H	90H
2	8-bit Auto-Reload	20H	A0H
3	does not run	30H	B0H

As a Counter:

MODE	COUNTER 1 FUNCTION	TMOD INTERNAL CONTROL (NOTE 1)	TMOD EXTERNAL CONTROL (NOTE 2)
0	13-bit Timer	40H	C0H
1	16-bit Timer	50H	D0H
2	8-bit Auto-Reload	60H	E0H
3	not available	—	—

NOTES:
1. The Timer is turned ON/OFF by setting/clearing bit TR1 in the software.
2. The Timer is turned ON/OFF by the 1 to 0 transition on INT1 (P3.3) when TR1 = 1 (hardware control).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

รายละเอียดเกี่ยวกับการใช้งาน ไอซีควบคุมการสวิทช์แบบพีดับบลิวเอ็ม เบอร์ SLE 4520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโดยสังเขป

ไอซีควบคุมการสวิทช์แบบพีดับบลิวเอ็ม เบอร์ SLE 4520

<u>คุณสมบัติและลักษณะโดยทั่วไป</u>

ไอซีควบคุมการสวิทช์แบบพีดับบลิวเอ็ม เบอร์ SLE 4520 เป็นไอซีในเทคโนโลยีแบบ ACMOS และเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SIEMENS ทำงานในลักษณะเพื่อเปลี่ยนข้อมูลเชิงเลขขนาด 8 บิทที่ถูกส่งมาจากซีพียูของไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้เป็นสัญญาณพัลส์ ทั้งนี้สัญญาณดังกล่าวจะมีความกว้างพัลส์ตามค่าข้อมูลที่ส่งเข้ามา อย่างไรก็ตามไอซีเบอร์ SLE 4520 นี้ มีรีจิสเตอร์อิสระอยู่ภายในจำนวน 3 ชุด ทำให้เหมาะสมในการใช้สร้างสัญญาณควบคุมสำหรับงานในระบบไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้นำไอซีเบอร์นี้มาทำงานร่วมกับไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็มสำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส ในเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์

คุณสมบัติของไอซีควบคุมการสวิทช์ เบอร์ SLE 4520 มีรายละเอียดดังนี้

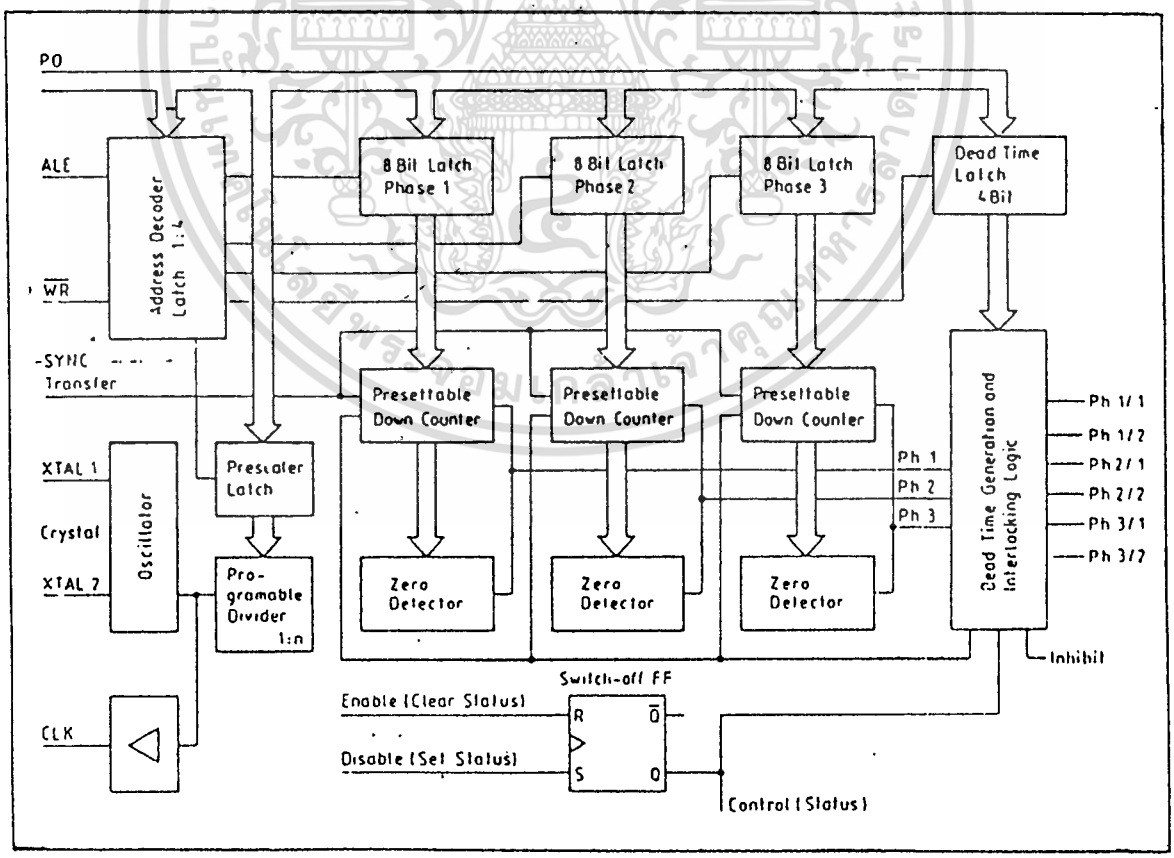
- สามารถใช้งานร่วมกับไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ได้เป็นอย่างดี
- สามารถเซตค่าตัวหารความถี่ (Divider) เพื่อให้ได้ความถี่สวิทช์ (Switching frequency) ของวงจรตามต้องการ
- สามารถเลือกความถี่สวิทช์ได้ตั้งแต่ 1-20 กิโลเฮิร์ทช์ และความถี่ขาออกจะอยู่ในย่าน 0-2600 เฮิร์ทช์
- มีรีจิสเตอร์อิสระซึ่งกันและกันอยู่จำนวน 3 ชุดพร้อมวงจรฟลิปฟลอป ทำให้สามารถสร้างสัญญาณพัลส์ได้ถึง 3 คู่ จึงเหมาะสมกับงานในระบบไฟฟ้า 3 เฟส
- สามารถจัดตั้งค่าเวลาตายตัว (Dead time) ระหว่างคู่สัญญาณเพื่อป้องกันการเกิดลัดวงจรขึ้นในคู่อุปกรณ์สวิทช์กำลังของวงจรอินเวอร์เตอร์
- ทางด้านสัญญาณขาออกสามารถขับอุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสง (Opto isolator)ได้ทั้งนี้ยังสามารถหยุดการทำงานได้ทันที เมื่อได้รับสัญญาณควบคุมที่ขา INHIBIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างภายในและการใช้งาน

บล็อคไดอะแกรมแสดงโครงสร้างภายในของไอซีควบคุมการสวิทช์ เบอร์ SLE 4520 ดังภาพภาคผนวกที่ 8 จะเห็นว่าข้อมูลตัวนับถอยหลัง (Down counter data) แต่ละชุดซึ่งเป็นแบบเชิงเลขขนาด 8 บิตถูกส่งมาทางพอร์ต 0 จากนั้นจะถูกเขียนลงในรีจิสเตอร์ของแต่ละเฟส (Phase Register) ด้วยการถอดรหัสแอดแดรสขนาด 2 บิต (ในโครงงานนี้จะใช้แอดแดรส 0000-0002) พร้อมทั้งผ่านการแลทช์ (Latch) ข้อมูลนั้น ด้วยค่าจาก Address Decoder Latch ที่ขอบขาลงของสัญญาณ ALE จนกระทั่งเมื่อได้รับสัญญาณ WR จากซีพียูของไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลของทั้ง 3 เฟส จึงมาพร้อมกันที่บัส (Bus) เพื่อส่งไปทำการนับถอยหลัง และเมื่อได้รับสัญญาณจุดพัลส์ย่อย (Transfer pulse) จาก SYNC จึงจะเริ่มต้นนับพร้อมกันซึ่งจะเห็นว่าการนับในแต่ละรีจิสเตอร์จะเป็นอิสระต่อกัน

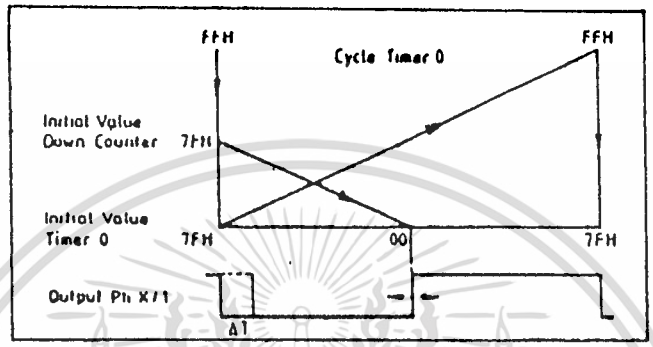
การนับจะถูกควบคุมโดย Zero Detector และ Presettable Down counter ทั้งนี้จะหยุดการนับทันทีด้วยสัญญาณควบคุมจากภายนอกเช่น จากขา Control(Status) และ INHIBIT



ภาพภาคผนวกที่ 8 แผนผังโครงสร้างภายในของไอซีเบอร์ SLE 4520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณย่อยๆ นั้นจะอยู่ในลักษณะเปลี่ยนแปลงความกว้างพัลส์ได้ ซึ่งเกิดจากการนับถอยหลังของค่าข้อมูลในรีจิสเตอร์ ทั้งนี้เวลาของการนับค่าข้อมูลแต่ละครั้งย่อมขึ้นอยู่กับคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาที่ผ่านการหารความถี่มาแล้ว และเมื่อการนับสิ้นสุดลง วงจรในภาค Zero Detector จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณสถานะต่ำ "0" ออกไปที่ขา Ph X และจะคงอยู่ในสถานะ "0" นี้จนกระทั่งได้รับสัญญาณจุดพัลส์ย่อยมาใหม่ ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 9



ภาพภาคผนวกที่ 9 แสดงการนับเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ย่อย

ค่าเวลาตายตัว (Dead time) ซึ่งเป็นการหน่วงเวลาการเริ่มนำกระแสของอุปกรณ์สวิทช์กำลังในอินเวอร์เตอร์เพื่อป้องกันการลัดวงจรเนื่องจากการทำงานต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 9 ขึ้นอยู่กับค่าความถี่คริสตัล (Crystal frequency) ค่าตัวหารความถี่ (Divider Ratio) และค่าเวลาตายตัวที่จัดตั้งขณะเริ่มต้น ดังในตารางภาคผนวกที่ 12

ความถี่สัญญาณนาฬิกาของระบบควบคุมวงจรนั้นย่อมเท่ากับความถี่คริสตัลที่ใช้ในวงจร แต่สำหรับสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการนับเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม จะมีความถี่ต่ำกว่าความถี่คริสตัลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดตั้งค่า Divider Ratio สำหรับการนับถอยหลังในรีจิสเตอร์ขณะเริ่มต้น ซึ่งทำให้ได้ค่าหน่วงเวลา (Delay time) ค่าต่างๆ กัน ดังในตารางภาคผนวกที่ 13

เมื่อกำหนดค่าตัวหารความถี่ได้แล้ว จะทำให้ความถี่สัญญาณการนับ (Counter frequency) มีคาบเวลาเปลี่ยนไปเช่นกัน ดังนั้นความถี่สวิทช์ของวงจร พีดับบลิวเอ็มนี้ ก็สามารถกำหนดได้ด้วยค่าตัวหารความถี่ และบิตกำหนดความละเอียด (Resolution bit) ซึ่งค่าบิตนี้จะจัดตั้งเซตไว้ในรีจิสเตอร์ B ขณะเริ่มต้น ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 14

★ หมายเหตุ ★ ค่าในตารางภาคผนวกที่ 12 , 14 นั้น เมื่อความถี่คริสตัล 12 เมกะเฮริทช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาตายตัว กับค่าที่จัดตั้งไว้ในขณะเริ่มต้น

Word in dead time memory	Dead time [μs] at divider ratio 1:4	1:6
0	0	0
1	0.33	0.5
2	0.66	1
3	1.0	1.5
4	1.33	2
5	1.66	2.5
6	2.0	3
7	2.33	3.5
8	2.66	4
9	3.0	4.5
10	3.33	5
11	3.66	5.5
12	4.0	6
13	4.33	6.5
14	4.66	7
15	5.0	7.5

ตารางภาคผนวกที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วงเวลากับค่าตัวหารความถี่

Value	Divider ratio down counter	Divider ratio delay clock
0	1:4	1:4
1	1:6	1:6
2	1:8	1:4
3	1:12	1:6
4	1:16	1:4
5	1:24	1:6
6	1:32	1:4
7	1:48	1:6

ตารางภาคผนวกที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวหารความถี่ ความถี่สัญญาณนับ บิตกำหนดความละเอียด และความถี่การสวิทช์

Divider ratio down counter	Counter frequency	Run time Timer 0	Switching frequency	Reso-lution
1:6	2 MHz	64 μs	15.6 kHz	7-bit
1:6	2 MHz	128 μs	7.8 kHz	8-bit
1:12	1 MHz	128 μs	7.8 kHz	7-bit
1:12	1 MHz	256 μs	3.9 kHz	8-bit
1:24	500 kHz	256 μs	3.9 kHz	7-bit
1:24	500 kHz	2×256 μs	1.95 kHz	8-bit
1:48	250 kHz	2×256 μs	1.95 kHz	7-bit
1:48	250 kHz	4×256 μs	975.0 Hz	8-bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าในขณะเริ่มต้นทำงานจะต้องเก็บค่าต่างๆ ไว้ในรีจิสเตอร์ เช่น ค่าตัวหารความถี่ ค่าเวลาตายตัว และข้อมูลนับสำหรับเฟสทั้ง 3 ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการสับสน จึงกำหนดแอดแดรสข้อมูล จากหน่วยความจำภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 3 บิตดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 15

ตารางภาคผนวกที่ 15 แสดงหน้าที่และแอดแดรสของรีจิสเตอร์ในไอซีเบอร์ SLE 4520

Address (3 bits)	Register
00	8-bit register for phase 1
01	8-bit register for phase 2
02	8-bit register for phase 3
03	dead time control register
04	divider control register

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

โปรแกรมควบคุมการทำงานของวงจรพีดับบลิวเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        CPU         "8051.TBL"
        HOF         "INT8"

;*********************************************************
;THIS IS A LIST OF THE REGISTER AND BIT NAMES
;WITH THEIR CORRESPONDING ADDRESSES.  THESE MUST BE
;INCLUDED IN THE SOURCE FILE FOR THE BIT ADDRESSING
;MODES TO ASSEMBLE PROPERLY.
;
;MCS-51 INTERNAL REGISTERS
;
B:          EQU         0F0H        ;B REGISTER
ACC:        EQU         0E0H        ;ACCUMULATOR
PSW:        EQU         0D0H        ;PROGRAM STATUS WORD
IPC:        EQU         0B8H        ;INTERRUPT PRIORITY
P3:         EQU         0B0H        ;PORT 3
IEC:        EQU         0A8H        ;INTERRUPT ENABLE
P2:         EQU         0A0H        ;PORT 2
SBUF:       EQU         99H         ;SEND BUFFER
SCON:       EQU         98H         ;SERIAL CONTROL
P1:         EQU         90H         ;PORT 1
TH1:        EQU         8DH         ;TIMER 1 HIGH
TH0:        EQU         8CH         ;TIMER 0 HIGH
TL1:        EQU         8BH         ;TIMER 1 LOW
TL0:        EQU         8AH         ;TIMER 0 LOW
TMOD:       EQU         89H         ;TIMER MODE
TCON:       EQU         88H         ;TIMER CONTROL
PCON:       EQU         87H         ;POWER CONTROL REGISTER
DPH:        EQU         83H         ;DATA POINTER HIGH
DPL:        EQU         82H         ;DATA POINTER LOW
SP:         EQU         81H         ;STACK POINTER
P0:         EQU         80H         ;PORT 0
;
;MCS-51 INTERNAL BIT ADDRESSES
;
CY:         EQU         0D7H        ;CARRY FLAG
AC:         EQU         0D6H        ;AUXILIARY-CARRY FLAG
F0:         EQU         0D5H        ;USER FLAG 0
RS1:        EQU         0D4H        ;REGISTER SELECT MSB
RS0:        EQU         0D3H        ;REGISTER SELECT LSB
OV:         EQU         0D2H        ;OVERFLOW FLAG
P:          EQU         0D0H        ;PARITY FLAG
PS:         EQU         0BCH        ;PRIORITY SERIAL PORT
PT1:        EQU         0BBH        ;PRIORITY TIMER 1
PX1:        EQU         0BAH        ;PRIORITY EXTERNAL 1
PT0:        EQU         0B9H        ;PRIORITY TIMER 0
PX0:        EQU         0B8H        ;PRIORITY EXTERNAL 0
EA:         EQU         0AFH        ;ENABLE ALL INTERRUPT
ES:         EQU         0ACH        ;ENABLE SERIAL INTERRUPT
ET1:        EQU         0ABH        ;ENABLE TIMER 1 INTERRUPT
EX1:        EQU         0AAH        ;ENABLE EXTERNAL 1 INTERR
ET0:        EQU         0A9H        ;ENABLE TIMER 0 INTERRUPT
EX0:        EQU         0A8H        ;ENABLE EXTERNAL 0 INTERR
SM0:        EQU         09FH        ;SERIAL MODE 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SM1:        EQU         09EH        ;SERIAL MODE 1
SM2:        EQU         09DH        ;SERIAL MODE 2
REN:        EQU         09CH        ;SERIAL RECEPTION ENABLE
TB8:        EQU         09BH        ;TRANSMITT BIT 8
RB8:        EQU         09AH        ;RECEIVE BIT 8
TI:         EQU         099H        ;TRANSMIT INTERRUPT FLAG
RI:         EQU         098H        ;RECEIVE INTERRUPT FLAG
TF1:        EQU         08FH        ;TIMER 1 OVERFLOW FLAG
TR1:        EQU         08EH        ;TIMER 1 RUN CONTROL BIT
TF0:        EQU         08DH        ;TIMER 0 OVERFLOW FLAG
TR0:        EQU         08CH        ;TIMER 0 RUN CONTROL BIT
IE1:        EQU         08BH        ;EXT INTERR. 1 EDGE FLAG
IT1:        EQU         08AH        ;EXT INTERR. 1 TYPE FLAG
IE0:        EQU         089H        ;EXT INTERR. 0 EDGE FLAG
IT0:        EQU         088H        ;EXT INTERR. 0 TYPE FLAG

;===================================
;  ******** PWM  PROGRAM ********
;              CPU 8031
;-----------------------------------
;INITIALIZATION
;-----------------------------------
            ORG     0000D
            SJMP    INIT
            ORG     03H         ;INT0 start
            AJMP    EXIN0
            ORG     0BH         ;Vector of timer0
            AJMP    TINT0
            ORG     13H         ;INT1 start
            AJMP    EXIN1
            ORG     26H
EXIN0:      SETB    P1.2        ;inhibit PWM
            CLR     P1.4        ;clear LINE
            CLR     IEC.7       ;disable INT
            AJMP    EXIN0
EXIN1:      SETB    P1.2        ;inhibit PWM
            CLR     IEC.7       ;disable INT
            AJMP    EXIN1
INIT:       MOV     A,#0FFH
            MOV     P0,A
            MOV     P1,A
            MOV     P2,A
            MOV     P3,A
            CLR     P1.0        ;clr sync
            CLR     A
            MOV     R0,A
            MOV     R4,A
            MOV     R5,A
            MOV     R6,A
            MOV     R7,#01H
            MOV     SP,#1FH
            MOV     TMOD,#32H
            ANL     IEC,#60H
            ORL     IEC,#87H
            ANL     IPC,#0E0H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        SETB    IPC.2
        SETB    IPC.1
        SETB    IPC.0
;------------------------------
; INPUT ACC/DEC TIME FROM P-1
;------------------------------
AC0:    MOV     DPTR,#0005H
        MOVX    A,@DPTR
        MOV     R2,A
        MOV     09H,A
;------------------------------
;       RUN 0 Hz
;------------------------------
        MOV     DPTR,#0000H
        MOV     A,#127D ;pulse 1:1
        MOVX    @DPTR,A ;DPTR 00(ph1)
        INC     DPTR
        MOVX    @DPTR,A ;DPTR 01(ph2)
        INC     DPTR
        MOVX    @DPTR,A ;DPTR 02(ph3)
        INC     DPTR
        MOV     A,#10D  ;DPTR 03(dead time)
        MOVX    @DPTR,A
        INC     DPTR
        MOV     A,#03D  ;DPTR 04(divider)
        MOVX    @DPTR,A
        MOV     DPTR,#1800D
        MOV     11H,#04D    ;Ph.Displ angle
        MOV     10H,#01D    ;z pulse per Nst
        MOV     17H,#12D    ;Nst per cycle
        MOV     TH0,#128D   ;set time in ..
        MOV     TL0,#0FCH   ;...Timer0
        MOV     TCON,#15H
        CLR     P1.2
WTINTO  NOP     ;wait Internal interupt
        NOP     ;..form timer0 then 000B
;--------------------------
;INTERUPT SERVICE ROUTINE
;--------------------------
TINTO:  SETB    P1.0    ;generate SYNC signal..
        CLR     P1.0    ;..for 1 switching time
        PUSH    PSW
        PUSH    ACC
        CLR     IEC.7
        DJNZ    R7,OVER ;Run for Z loop
        MOV     R7,10H
;--------------------------
; OUTPUT OF 3-PHASE VALUE
;--------------------------
ILOOP:  MOV     R0,#00H
XLOOP:  MOV     A,R4
        ADD     A,R5
        MOVC    A,@A+DPTR
        PUSH    DPH     ;
        PUSH    DPL     ;Keep DPTR=1800H
        MOV     DPH,#00H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOVC    A,@A+DPTR
        MOV     DPTR,#1570D
        JMP     @A+DPTR
;--------------------------------
FINISH: MOV     R7,#01H
        MOV     R2,09H
AWERT:  MOV     R4,#00H
OVER:   SETB    IEC.7
        POP     ACC
        POP     PSW
        RETI
;--------------------------------
;  FREQUENCY SETTING
;--------------------------------
S00:    MOV     17H,#12D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#128D
        MOV     DPTR,#1800D
        MOV     11H,#04D
        MOV     R6,#00H
        LJMP    FINISH
S01:    MOV     17H,#114D
        MOV     10H,#10D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#1821D
        MOV     11H,#48D
        MOV     R6,#01H
        LJMP    FINISH
S02:    MOV     17H,#114D
        MOV     10H,#05D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#2062D
        MOV     11H,#48D
        MOV     R6,#02H
        LJMP    FINISH
S03:    MOV     17H,#120D
        MOV     10H,#04D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#2303D
        MOV     11H,#40D
        MOV     R6,#03H
        LJMP    FINISH
S04:    MOV     17H,#120D
        MOV     10H,#03D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#2504D
        MOV     11H,#40D
        MOV     R6,#04H
        LJMP    FINISH
S05:    MOV     17H,#96D
        MOV     10H,#03D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#2705D
        MOV     11H,#32D
        MOV     R6,#05H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        LJMP    FINISH
S06:    MOV     17H,#120D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#2866D
        MOV     11H,#40D
        MOV     R6,#06H
        LJMP    FINISH
S07:    MOV     17H,#102D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#22D
        MOV     DPTR,#3067D
        MOV     11H,#34D
        MOV     R6,#07H
        LJMP    FINISH
S08:    MOV     17H,#90D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#3238D
        MOV     11H,#30D
        MOV     R6,#08H
        LJMP    FINISH
S09:    MOV     17H,#78D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#18D
        MOV     DPTR,#3389D
        MOV     11H,#26D
        MOV     R6,#09H
        LJMP    FINISH
S10:    MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#3520D
        MOV     11H,#24D
        MOV     R6,#0AH
        LJMP    FINISH
S11:    MOV     17H,#63D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#15D
        MOV     DPTR,#3641D
        MOV     11H,#21D
        MOV     R6,#0BH
        LJMP    FINISH
S12:    MOV     17H,#60D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#3747D
        MOV     11H,#20D
        MOV     R6,#0CH
        LJMP    FINISH
S13:    MOV     17H,#54D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#18D
        MOV     DPTR,#3848D
        MOV     11H,#18D
        MOV     R6,#0DH
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        LJMP    FINISH
S14:    MOV     17H,#51D
        MOV     10H,#02D
        MOV     TH0,#22D
        MOV     DPTR,#3939D
        MOV     11H,#17D
        MOV     R6,#0EH
        LJMP    FINISH
S15:    MOV     17H,#96D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#4025D
        MOV     11H,#32D
        MOV     R6,#0FH
        LJMP    FINISH
S16:    MOV     17H,#90D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#4186D
        MOV     11H,#30D
        MOV     R6,#10H
        LJMP    FINISH
S17:    MOV     17H,#84D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#22D
        MOV     DPTR,#4337D
        MOV     11H,#28D
        MOV     R6,#11H
        LJMP    FINISH
S18:    MOV     17H,#78D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#18D
        MOV     DPTR,#4478D
        MOV     11H,#26D
        MOV     R6,#12H
        LJMP    FINISH
S19:    MOV     17H,#72D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#12D
        MOV     DPTR,#4609D
        MOV     11H,#24D
        MOV     R6,#13H
        LJMP    FINISH
S20:    MOV     17H,#72D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#4730D
        MOV     11H,#24D
        MOV     R6,#14H
        LJMP    FINISH
S21:    MOV     17H,#66D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#15D
        MOV     DPTR,#4815D
        MOV     11H,#22D
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV     R6,#15H
        LJMP    FINISH
S22:    MOV     17H,#66D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#26D
        MOV     DPTR,#4962D
        MOV     11H,#22D
        MOV     R6,#16H
        LJMP    FINISH
S23:    MOV     17H,#60D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#14D
        MOV     DPTR,#5073D
        MOV     11H,#20D
        MOV     R6,#17H
        LJMP    FINISH
S24:    MOV     17H,#60D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#5174D
        MOV     11H,#20D
        MOV     R6,#18H
        LJMP    FINISH
S25:    MOV     17H,#54D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#09D
        MOV     DPTR,#5275D
        MOV     11H,#18D
        MOV     R6,#19H
        LJMP    FINISH
S26:    MOV     17H,#54D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#18D
        MOV     DPTR,#5366D
        MOV     11H,#17D
        MOV     R6,#1AH
        LJMP    FINISH
S27:    MOV     17H,#54D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#27D
        MOV     DPTR,#5457D
        MOV     11H,#17D
        MOV     R6,#1BH
        LJMP    FINISH
S28:    MOV     17H,#48D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#08D
        MOV     DPTR,#5548D
        MOV     11H,#16D
        MOV     R6,1CH
        LJMP    FINISH
S29:    MOV     17H,#48D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#16D
        MOV     DPTR,#5629D
        MOV     11H,#16D
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV     R6,#1DH
        LJMP    FINISH
S30:    MOV     17H,#48D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#5710D
        MOV     11H,#16D
        MOV     R6,#1EH
        LJMP    FINISH
S31:    MOV     17H,#48D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#32D
        MOV     DPTR,#5791D
        MOV     11H,#16D
        MOV     R6,#1FH
        LJMP    FINISH
S32:    MOV     17H,#42D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#08D
        MOV     DPTR,#5872D
        MOV     11H,#14D
        MOV     R6,#20H
        LJMP    FINISH
S33:    MOV     17H,#42D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#15D
        MOV     DPTR,#5943D
        MOV     11H,#14D
        MOV     R6,#21H
        LJMP    FINISH
S34:    MOV     17H,#42D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#22D
        MOV     DPTR,#6014D
        MOV     11H,#14D
        MOV     R6,#22H
        LJMP    FINISH
S35:    MOV     17H;#42D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#29D
        MOV     DPTR,#6085D
        MOV     11H,#14D
        MOV     R6,#23H
        LJMP    FINISH
S36:    MOV     17H,#42D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#35D
        MOV     DPTR,#6156D
        MOV     11H,#14D
        MOV     R6,#24H
        LJMP    FINISH
S37:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#05D
        MOV     DPTR,#6227D
        MOV     11H,#12D
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV     R6,#25H
        LJMP    FINISH
S38:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#12D
        MOV     DPTR,#6288D
        MOV     11H,#12D
        MOV     R6,#26H
        LJMP    FINISH
S39:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#18D
        MOV     DPTR,#6349D
        MOV     11H,#12D
        MOV     R6,#27H
        LJMP    FINISH
S40:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#6410D
        MOV     11H,#12D
        MOV     R6,#28H
        LJMP    FINISH
S41:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#30D
        MOV     DPTR,#6471D
        MOV     11H,#12D
        MOV     R6,#29H
        LJMP    FINISH
S42:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#35D
        MOV     DPTR,#6532D
        MOV     11H,#12D
        MOV     R6,#2AH
        LJMP    FINISH
S43:    MOV     17H,#36D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#40D
        MOV     DPTR,#6593D
        MOV     11H,#12D
        MOV     R6,#2BH
        LJMP    FINISH
S44:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#03D
        MOV     DPTR,#6654D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#2CH
        LJMP    FINISH
S45:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#09D
        MOV     DPTR,#6705D
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#2DH
        LJMP    FINISH
S46:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#14D
        MOV     DPTR,#6756D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#2EH
        LJMP    FINISH
S47:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#19D
        MOV     DPTR,#6807D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#2FH
        LJMP    FINISH
S48:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#6858D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#30H
        LJMP    FINISH
S49:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#29D
        MOV     DPTR,#6909D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#31H
        LJMP    FINISH
S50:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#33D
        MOV     DPTR,#6960D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#32H
        LJMP    FINISH
S51:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#38D
        MOV     DPTR,#7011D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#33H
        LJMP    FINISH
S52:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#42D
        MOV     DPTR,#7062D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#34H
        LJMP    FINISH
S53:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#46D
        MOV     DPTR,#7113D
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#35H
        LJMP    FINISH
S54:    MOV     17H,#30D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#50D
        MOV     DPTR,#7164D
        MOV     11H,#10D
        MOV     R6,#36H
        LJMP    FINISH
S55:    MOV     17H,#24D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#03D
        MOV     DPTR,#7215D
        MOV     11H,#08D
        MOV     R6,#37H
        LJMP    FINISH
S56:    MOV     17H,#24D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#08D
        MOV     DPTR,#7256D
        MOV     11H,#08D
        MOV     R6,#38H
        LJMP    FINISH
S57:    MOV     17H,#24D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#12D
        MOV     DPTR,#7297D
        MOV     11H,#08D
        MOV     R6,#39H
        LJMP    FINISH
S58:    MOV     17H,#24D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#16D
        MOV     DPTR,#7338D
        MOV     11H,#08D
        MOV     R6,#3AH
        LJMP    FINISH
S59:    MOV     17H,#24D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#20D
        MOV     DPTR,#7379D
        MOV     11H,#08D
        MOV     R6,#3BH
        LJMP    FINISH
S60:    MOV     17H,#24D
        MOV     10H,#01D
        MOV     TH0,#24D
        MOV     DPTR,#7420D
        MOV     11H,#08D
        MOV     R6,#3CH
        LJMP    FINISH
;-------------------------
;  POINTER ADDRESS
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;--------------------------
        ORG     1500D
RMK:    DFB     00H,03H,06H,09H
        DFB     0CH,0FH,12H,15H
        DFB     18H,1BH,1EH,21H
        DFB     24H,27H,2AH,2DH
        DFB     30H,33H,36H,39H
        DFB     3CH,3FH,42H,45H
        DFB     48H,4BH,4EH,51H
        DFB     54H,57H,5AH,5DH
        DFB     60H,63H,66H,69H
        DFB     6CH,6FH,72H,75H
        DFB     78H,7BH,7EH,81H
        DFB     84H,87H,8AH,8DH
        DFB     90H,93H,96H,99H
        DFB     9CH,9FH,0A2H,0A5H
        DFB     0A8H,0ABH,0AEH,0B1H
;--------------------------
;JUMPING TO EACH FREQUENCY
;--------------------------
        ORG     1570D
LMK:    LJMP    S00
        LJMP    S01
        LJMP    S02
        LJMP    S03
        LJMP    S04
        LJMP    S05
        LJMP    S06
        LJMP    S07
        LJMP    S08
        LJMP    S09
        LJMP    S10
        LJMP    S11
        LJMP    S12
        LJMP    S13
        LJMP    S14
        LJMP    S15
        LJMP    S16
        LJMP    S17
        LJMP    S18
        LJMP    S19
        LJMP    S20
        LJMP    S21
        LJMP    S22
        LJMP    S23
        LJMP    S24
        LJMP    S25
        LJMP    S26
        LJMP    S27
        LJMP    S28
        LJMP    S29
        LJMP    S30
        LJMP    S31
        LJMP    S32
        LJMP    S33
        LJMP    S34
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        LJMP    S35
        LJMP    S36
        LJMP    S37
        LJMP    S38
        LJMP    S39
        LJMP    S40
        LJMP    S41
        LJMP    S42
        LJMP    S43
        LJMP    S44
        LJMP    S45
        LJMP    S46
        LJMP    S47
        LJMP    S48
        LJMP    S49
        LJMP    S50
        LJMP    S51
        LJMP    S52
        LJMP    S53
        LJMP    S54
        LJMP    S55
        LJMP    S56
        LJMP    S57
        LJMP    S58
        LJMP    S59
        LJMP    S60
;-------------------------------------
        ORG     1800D
NMK:    DFB     127,127,127,127
        DFB     127,127,127,127
        DFB     127,127,127,127
        DFB     127,127,127,127
        DFB     127,127,127,127
        DFB     127
;-------------------------------------
F1:     DFB     116,116,116,116
        DFB     116,117,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,117,116
        DFB     116,116,116,116
        DFB     116,116,116,116
        DFB     116,115,115,115
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     115,115,115,115
        DFB     115,115,115,115
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     115,115,115,115
        DFB     115,115,115,115
        DFB     115,115,115,116
        DFB     116,116,116,116
        DFB     116,116,116,116
        DFB     116,117,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,117,116
        DFB     116,116,116,116
        DFB     116,116,116,116
        DFB     116,115,115,115
        DFB     115,115,115,115
        DFB     115,115,115,115
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114
;---------------------------------
F2:     DFB     116,116,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,119,119,119
        DFB     119,119,119,119
        DFB     120,120,120,120
        DFB     120,120,120,120
        DFB     120,120,121,121
        DFB     121,121,121,121
        DFB     121,121,121,121
        DFB     121,121,120,120
        DFB     120,120,120,120
        DFB     120,120,120,120
        DFB     119,119,119,119
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     119,119,119,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,116,116
        DFB     116,116,116,115
        DFB     115,115,115,115
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,113,113,113
        DFB     113,113,113,113
        DFB     112,112,112,112
        DFB     112,112,112,112
        DFB     112,112,111,111
        DFB     111,111,111,111
        DFB     111,111,111,111
        DFB     111,111,112,112
        DFB     112,112,112,112
        DFB     112,112,112,112
        DFB     113,113,113,113
        DFB     113,113,113,114
        DFB     114,114,114,114
        DFB     115,115,115,115
        DFB     115,115,116,116
        DFB     116,116,117,117
        DFB     117,117,117,117
        DFB     118,118,118,118
        DFB     118,119,119,119
        DFB     119,119,119,119
        DFB     120,120,120,120
        DFB     120,120,120,120
        DFB     120,120,121,121
        DFB     121,121,121,121
        DFB     121,121,121,121
        DFB     121,121,120,120
        DFB     120,120,120,120
        DFB     120,120,120,120
        DFB     119,119,119,119
        DFB     119,119,118,118
        DFB     118,118,118,118
        DFB     117,117,117,117
        DFB     117,117,116,116
        DFB     116,116,116,115
        DFB     115,115,115,115
        DFB     114,114,114,114
        DFB     114,113,113,113
        DFB     113,113,113,113
        DFB     112,112,112,112
        DFB     112
;-----------------------------------
F3:     DFB     116,117,117,117
        DFB     118,118,118,119
        DFB     119,119,120,120
        DFB     120,121,121,121
        DFB     121,122,122,122
        DFB     122,122,122,123
        DFB     123,123,123,123
        DFB     123,123,123,123
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     123,123,123,123
        DFB     123,122,122,122
        DFB     122,122,122,121
        DFB     121,121,121,120
        DFB     120,120,119,119
        DFB     119,118,118,118
        DFB     117,117,117,116
        DFB     116,115,115,115
        DFB     114,114,114,113
        DFB     113,113,112,112
        DFB     112,111,111,111
        DFB     111,110,110,110
        DFB     110,110,110,109
        DFB     109,109,109,109
        DFB     109,109,109,109
        DFB     109,109,109,109
        DFB     109,109,109,110
        DFB     110,110,110,111
        DFB     111,111,111,112
        DFB     112,112,113,113
        DFB     113,114,114,114
        DFB     115,115,115,116
        DFB     116,117,117,117
        DFB     118,118,118,119
        DFB     119,119,120,120
        DFB     120,121,121,121
        DFB     121,122,122,122
        DFB     122,122,122,123
        DFB     123,123,123,123
        DFB     123,123,123,123
        DFB     123,123,123,123
        DFB     123,122,122,122
        DFB     122,122,122,121
        DFB     121,121,121,120
        DFB     120,120,119,119
        DFB     119,118,118,118
        DFB     117,117,117,116
        DFB     116,115,115,115
        DFB     114,114,114,113
        DFB     113,113,112,112
        DFB     112,111,111,111
        DFB     111,110,110,110
        DFB     110
;---------------------------------
F4:     DFB     116,117,117,118
        DFB     118,119,119,120
        DFB     120,120,121,121
        DFB     122,122,122,123
        DFB     123,123,124,124
        DFB     124,124,125,125
        DFB     125,125,125,125
        DFB     125,125,125,125
        DFB     125,125,125,125
        DFB     125,125,124,124
        DFB     124,124,123,123
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     123,122,122,122
        DFB     121,121,120,120
        DFB     120,119,119,118
        DFB     118,117,117,116
        DFB     116,115,115,114
        DFB     114,113,113,112
        DFB     112,112,111,111
        DFB     110,110,110,109
        DFB     109,109,108,108
        DFB     108,108,107,107
        DFB     107,107,107,107
        DFB     107,107,107,107
        DFB     107,107,107,107
        DFB     107,108,108,108
        DFB     108,108,109,109
        DFB     109,110,110,110
        DFB     111,111,112,112
        DFB     112,113,113,114
        DFB     114,115,115,116
        DFB     116,117,117,118
        DFB     118,119,119,120
        DFB     120,120,121,121
        DFB     122,122,122,123
        DFB     123,123,124,124
        DFB     124,124,125,125
        DFB     125,125,125,125
        DFB     125,125,125,125
        DFB     125,125,125,125
        DFB     125,125,124,124
        DFB     124,124,123,123
        DFB     123,122,122,122
        DFB     121,121,120,120
        DFB     120,119,119,118
        DFB     118,117,117,116
        DFB     116,115,115,114
        DFB     114,113,113,112
        DFB     112,112,111,111
        DFB     110,110,110,109
        DFB     109,109,108,108
        DFB     108
;-----------------------------------
F5:     DFB     116,117,118,119
        DFB     119,120,121,121
        DFB     122,122,123,124
        DFB     124,125,125,126
        DFB     126,127,127,127
        DFB     127,127,128,128
        DFB     128,128,127,127
        DFB     127,127,127,126
        DFB     126,125,125,124
        DFB     124,123,123,122
        DFB     121,121,120,119
        DFB     119,118,117,116
        DFB     116,115,114,113
        DFB     113,112,111,110
        DFB     110,109,109,108
        DFB     108,107,107,106
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     106,105,105,105
        DFB     105,105,104,104
        DFB     104,104,105,105
        DFB     105,105,105,106
        DFB     106,107,107,108
        DFB     108,109,109,110
        DFB     111,111,112,113
        DFB     113,114,115,116
        DFB     116,117,118,119
        DFB     119,120,121,121
        DFB     122,122,123,124
        DFB     124,125,125,126
        DFB     126,127,127,127
        DFB     127,127,128,128
        DFB     128,128,127,127
        DFB     127,127,127,126
        DFB     126,125,125,124
        DFB     124,123,123,122
        DFB     121,121,120,119
        DFB     119,118,117,116
        DFB     116,115,114,113
        DFB     113,112,111,110
        DFB     110,109,109,108
        DFB     108,107,107,106
        DFB     106
;-------------------------------------
F6:     DFB     116,117,118,119
        DFB     119,120,121,121
        DFB     122,123,123,124
        DFB     124,125,126,126
        DFB     127,127,127,128
        DFB     128,129,129,129
        DFB     129,130,130,130
        DFB     130,130,130,130
        DFB     130,130,130,129
        DFB     129,129,129,128
        DFB     128,127,127,127
        DFB     126,126,125,124
        DFB     124,123,123,122
        DFB     121,121,120,119
        DFB     119,118,117,116
        DFB     116,115,114,114
        DFB     113,112,111,111
        DFB     110,109,109,108
        DFB     108,107,106,106
        DFB     105,105,105,104
        DFB     104,103,103,103
        DFB     103,102,102,102
        DFB     102,102,102,102
        DFB     102,102,102,103
        DFB     103,103,103,104
        DFB     104,105,105,105
        DFB     106,106,107,108
        DFB     108,109,109,110
        DFB     111,111,112,113
        DFB     113,114,115,116
        DFB     116,117,118,119
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     119,120,121,121
        DFB     122,123,123,124
        DFB     124,125,126,126
        DFB     127,127,127,128
        DFB     128,129,129,129
        DFB     120,130,130,130
        DFB     130,130,130,130
        DFB     130,130,130,129
        DFB     129,129,129,128
        DFB     128,127,127,127
        DFB     126,126,125,124
        DFB     124,123,123,122
        DFB     121,121,120,119
        DFB     119,118,117,116
        DFB     116,115,114,114
        DFB     113,112,111,111
        DFB     110,109,109,108
        DFB     108,107,106,106
        DFB     105,105,105,104
        DFB     104
;-------------------------------
F7:     DFB     118,119,120,121
        DFB     122,123,123,124
        DFB     125,126,127,128
        DFB     128,129,130,130
        DFB     131,131,132,132
        DFB     133,133,133,133
        DFB     133,133,133,133
        DFB     133,133,133,132
        DFB     132,131,131,130
        DFB     130,129,128,128
        DFB     127,126,125,124
        DFB     123,122,121,120
        DFB     120,119,118,117
        DFB     116,115,114,113
        DFB     112,111,110,109
        DFB     108,107,106,106
        DFB     105,104,104,103
        DFB     103,102,102,101
        DFB     101,101,101,101
        DFB     101,101,101,101
        DFB     101,101,102,102
        DFB     103,103,104,104
        DFB     105,106,106,107
        DFB     108,109,110,111
        DFB     112,113,113,114
        DFB     115,116,118,119
        DFB     120,121,122,122
        DFB     123,124,125,126
        DFB     127,128,128,129
        DFB     130,130,131,131
        DFB     132,132,133,133
        DFB     133,133,133,133
        DFB     133,133,133,133
        DFB     133,132,132,131
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          DFB     131,130,130,129
          DFB     128,128,127,126
          DFB     125,124,123,122
          DFB     121,120,120,119
          DFB     118,117,116,115
          DFB     114,113,112,111
          DFB     110,109,108,107
          DFB     106,106,105,104
          DFB     104,103,103
;---------------------------------
F8:       DFB     117,118,119,121
          DFB     122,123,124,125
          DFB     126,127,128,129
          DFB     130,131,132,132
          DFB     133,133,134,134
          DFB     134,135,135,135
          DFB     134,134,134,133
          DFB     133,132,132,131
          DFB     130,129,128,127
          DFB     126,125,124,123
          DFB     122,120,119,118
          DFB     117,115,114,113
          DFB     112,110,109,108
          DFB     107,106,105,104
          DFB     103,102,101,100
          DFB     100,99,99,98
          DFB     98,98,97,97
          DFB     97,98,98,98
          DFB     99,99,100,100
          DFB     101,102,103,104
          DFB     105,106,107,108
          DFB     109,110,111,113
          DFB     114,115,117,118
          DFB     119,121,122,123
          DFB     124,125,126,127
          DFB     128,129,130,131
          DFB     132,132,133,133
          DFB     134,134,134,135
          DFB     135,135,134,134
          DFB     134,133,133,132
          DFB     131,131,130,129
          DFB     128,127,126,125
          DFB     124,123,122,120
          DFB     119,118,117,115
          DFB     114,113,112,110
          DFB     109,108,107,106
          DFB     105,104,103,102
          DFB     101,100,100
;---------------------------------
F9:       DFB     120,122,123,125
          DFB     127,128,130,131
          DFB     133,134,135,136
          DFB     137,138,139,139
          DFB     140,140,140,140
          DFB     140,140,140,139
          DFB     139,138,137,136
          DFB     135,134,132,131
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            DFB     130,128,127,125
            DFB     123,122,120,118
            DFB     116,115,113,111
            DFB     110,108,107,106
            DFB     104,103,102,101
            DFB     100,99,99,98
            DFB     98,98,98,98
            DFB     98,98,98,99
            DFB     100,101,102,103
            DFB     104,105,107,108
            DFB     110,111,113,115
            DFB     116,118,120,122
            DFB     123,125,127,128
            DFB     130,131,133,134
            DFB     135,136,137,138
            DFB     139,139,140,140
            DFB     140,140,140,140
            DFB     140,139,139,138
            DFB     137,136,135,134
            DFB     132,131,130,128
            DFB     127,125,123,122
            DFB     120,118,116,115
            DFB     113,111,110,108
            DFB     107,106,104,103
            DFB     102,101,100
;-------------------------------
F10:        DFB     117,119,121,123
            DFB     125,127,129,130
            DFB     132,133,135,136
            DFB     137,138,138,139
            DFB     139,139,139,139
            DFB     139,138,137,137
            DFB     135,134,133,132
            DFB     130,128,127,125
            DFB     123,121,119,117
            DFB     115,113,111,109
            DFB     107,105,104,102
            DFB     100,99,98,97
            DFB     96,95,94,93
            DFB     93,93,93,93
            DFB     93,94,94,95
            DFB     96,98,99,100
            DFB     102,103,105,107
            DFB     109,111,113,115
            DFB     117,119,121,123
            DFB     125,127,129,130
            DFB     132,133,135,136
            DFB     137,138,138,139
            DFB     139,139,139,139
            DFB     139,138,137,137
            DFB     135,134,133,132
            DFB     130,128,127,125
            DFB     123,121,119,117
            DFB     115,113,111,109
            DFB     107,105,104,102
            DFB     100,99,98,97
            DFB     96
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;-----------------------------------
F11:    DFB     122,124,127,130
        DFB     132,134,137,139
        DFB     141,142,144,145
        DFB     146,146,147,147
        DFB     147,147,146,145
        DFB     144,143,141,139
        DFB     137,135,133,131
        DFB     128,126,123,121
        DFB     118,115,113,110
        DFB     108,106,104,102
        DFB     100,98,97,96
        DFB     95,94,94,94
        DFB     94,95,95,96
        DFB     97,99,100,102
        DFB     104,107,109,111
        DFB     114,117,119,122
        DFB     124,127,130,132
        DFB     134,137,139,141
        DFB     142,144,145,146
        DFB     146,147,147,147
        DFB     147,146,145,144
        DFB     143,141,139,137
        DFB     135,133,131,128
        DFB     126,123,121,118
        DFB     115,113,110,108
        DFB     106,104,102,100
        DFB     98,97
;-----------------------------------
F12:    DFB     117,120,123,126
        DFB     129,131,134,136
        DFB     138,140,141,142
        DFB     143,144,144,144
        DFB     143,143,142,141
        DFB     139,137,136,133
        DFB     131,129,126,123
        DFB     120,117,115,112
        DFB     109,106,104,101
        DFB     99,96,95,93
        DFB     91,90,89,89
        DFB     88,88,88,89
        DFB     90,91,92,94
        DFB     96,98,101,103
        DFB     106,109,112,115
        DFB     117,120,123,126
        DFB     129,131,134,136
        DFB     138,140,141,142
        DFB     143,144,144,144
        DFB     143,143,142,141
        DFB     139,137,136,133
        DFB     131,129,126,123
        DFB     120,117,115,112
        DFB     109,106,104,101
        DFB     99,96,95,93
        DFB     91
;-----------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
F13:    DFB     121,124,128,131
        DFB     135,138,140,143
        DFB     145,147,148,149
        DFB     150,150,150,149
        DFB     148,146,145,142
        DFB     140,137,134,131
        DFB     128,124,121,117
        DFB     114,110,107,104
        DFB     101,98,96,93
        DFB     92,90,89,88
        DFB     88,88,89,90
        DFB     91,93,95,98
        DFB     100,103,107,110
        DFB     114,117,121,124
        DFB     128,131,135,138
        DFB     140,143,145,147
        DFB     148,149,150,150
        DFB     150,149,148,146
        DFB     145,142,140,137
        DFB     134,131,128,124
        DFB     121,117,114,110
        DFB     107,104,101,98
        DFB     96,93,92
;-----------------------------------
F14:    DFB     119,123,127,131
        DFB     135,138,141,143
        DFB     146,147,149,149
        DFB     150,150,149,148
        DFB     146,144,142,139
        DFB     136,132,129,125
        DFB     121,117,113,109
        DFB     105,102,98,95
        DFB     92,90,88,86
        DFB     85,84,84,85
        DFB     85,87,88,91
        DFB     93,96,100,103
        DFB     107,111,115,119
        DFB     123,127,131,135
        DFB     138,141,143,146
        DFB     147,149,149,150
        DFB     150,149,148,146
        DFB     144,142,139,136
        DFB     132,129,125,121
        DFB     117,113,109,105
        DFB     102,98,95,92
        DFB     90,88
;-----------------------------------
F15:    DFB     117,119,122,124
        DFB     126,128,130,133
        DFB     135,136,138,140
        DFB     142,143,144,146
        DFB     147,148,149,149
        DFB     150,150,151,151
        DFB     151,151,150,150
        DFB     149,148,148,147
        DFB     145,144,143,141
        DFB     140,138,136,134
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     132,130,128,126
        DFB     124,122,119,117
        DFB     115,113,110,108
        DFB     106,104,102,100
        DFB     98,96,94,92
        DFB     91,89,88,87
        DFB     85,84,84,83
        DFB     82,82,81,81
        DFB     81,81,82,82
        DFB     83,83,84,85
        DFB     86,88,89,90
        DFB     92,94,96,97
        DFB     99,102,104,106
        DFB     108,110,113,115
        DFB     117,119,122,124
        DFB     126,128,130,133
        DFB     135,136,138,140
        DFB     142,143,144,146
        DFB     147,148,149,149
        DFB     150,150,151,151
        DFB     151,151,150,150
        DFB     149,148,148,147
        DFB     145,144,143,141
        DFB     140,138,136,134
        DFB     132,130,128,126
        DFB     124,122,119,117
        DFB     115,113,110,108
        DFB     106,104,102,100
        DFB     98,96,94,92
        DFB     91,89,88,87
        DFB     85
;-----------------------------------
F16:    DFB     117,120,123,125
        DFB     128,130,132,135
        DFB     137,139,141,143
        DFB     145,146,148,149
        DFB     150,151,152,152
        DFB     153,153,153,153
        DFB     153,152,152,151
        DFB     150,149,147,146
        DFB     144,143,141,139
        DFB     137,134,132,130
        DFB     127,125,122,120
        DFB     117,115,112,110
        DFB     107,105,102,100
        DFB     98,95,93,91
        DFB     90,88,86,85
        DFB     83,82,81,80
        DFB     80,79,79,79
        DFB     79,79,80,80
        DFB     81,82,83,84
        DFB     86,87,89,91
        DFB     93,95,97,100
        DFB     102,104,107,109
        DFB     112,115,117,120
        DFB     123,125,128,130
        DFB     132,135,137,139
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     141,143,145,146
        DFB     148,149,150,151
        DFB     152,152,153,153
        DFB     153,153,153,152
        DFB     152,151,150,149
        DFB     147,146,144,143
        DFB     141,139,137,134
        DFB     132,130,127,125
        DFB     122,120,117,115
        DFB     112,110,107,105
        DFB     102,100,98,95
        DFB     93,91,90,88
        DFB     86,85,83
;-----------------------------------
F17:    DFB     119,122,124,127
        DFB     130,133,136,138
        DFB     141,143,145,147
        DFB     149,151,152,154
        DFB     155,156,156,157
        DFB     157,157,156,156
        DFB     155,154,153,152
        DFB     150,149,147,145
        DFB     143,140,138,135
        DFB     133,130,127,124
        DFB     121,118,116,113
        DFB     110,107,104,101
        DFB     99,96,94,91
        DFB     89,87,85,84
        DFB     82,81,80,79
        DFB     78,78,77,77
        DFB     77,78,78,79
        DFB     80,82,83,85
        DFB     87,89,91,93
        DFB     96,98,101,104
        DFB     107,110,112,115
        DFB     119,122,124,127
        DFB     130,133,136,138
        DFB     141,143,145,147
        DFB     150,151,152,154
        DFB     155,156,156,157
        DFB     157,157,156,156
        DFB     155,154,153,152
        DFB     150,149,147,145
        DFB     143,140,138,135
        DFB     133,130,127,124
        DFB     121,118,116,113
        DFB     110,107,104,101
        DFB     100,96,94,91
        DFB     89,87,85,84
        DFB     82
;-----------------------------------
F18:    DFB     121,124,128,131
        DFB     134,138,141,144
        DFB     146,149,151,154
        DFB     155,157,159,160
        DFB     161,161,162,162
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     162,161,160,159
        DFB     158,157,155,153
        DFB     151,148,146,143
        DFB     140,137,134,131
        DFB     127,124,121,117
        DFB     114,111,107,104
        DFB     101,98,95,92
        DFB     90,87,85,83
        DFB     81,80,79,78
        DFB     77,76,76,76
        DFB     77,77,78,79
        DFB     81,83,84,87
        DFB     89,92,94,97
        DFB     100,104,107,110
        DFB     114,117,121,124
        DFB     128,131,134,138
        DFB     141,144,146,149
        DFB     151,154,155,157
        DFB     159,160,161,161
        DFB     162,162,162,161
        DFB     160,159,158,157
        DFB     155,153,151,148
        DFB     146,143,140,137
        DFB     134,131,127,124
        DFB     121,117,114,111
        DFB     107,104,101,98
        DFB     95,92,90,87
        DFB     85,83,81
;---------------------------------------
F19:    DFB     124,128,132,136
        DFB     140,144,147,151
        DFB     154,157,159,161
        DFB     163,165,166,167
        DFB     168,168,168,168
        DFB     167,166,165,163
        DFB     161,158,156,153
        DFB     150,147,143,139
        DFB     136,132,128,124
        DFB     120,116,112,108
        DFB     105,101,97,94
        DFB     91,88,86,83
        DFB     81,79,78,77
        DFB     76,76,76,76
        DFB     77,78,79,81
        DFB     83,85,87,90
        DFB     93,97,100,104
        DFB     108,112,116,120
        DFB     124,128,132,136
        DFB     140,144,147,151
        DFB     154,157,159,161
        DFB     163,165,166,167
        DFB     168,168,168,168
        DFB     167,166,165,163
        DFB     161,158,156,153
        DFB     150,147,143,139
        DFB     136,132,128,124
        DFB     120,116,112,108
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     105,101,97,94
        DFB     91,88,86,83
        DFB     81
;-----------------------------------
F20:    DFB     118,122,126,130
        DFB     134,138,141,145
        DFB     148,151,153,156
        DFB     157,159,160,161
        DFB     162,162,162,162
        DFB     161,160,159,157
        DFB     155,152,150,147
        DFB     144,141,137,133
        DFB     130,126,122,118
        DFB     114,110,106,102
        DFB     99,95,91,88
        DFB     85,82,80,77
        DFB     75,73,72,71
        DFB     70,70,70,70
        DFB     71,72,73,75
        DFB     77,79,81,84
        DFB     87,91,94,98
        DFB     102,106,110,114
        DFB     118,122,126,130
        DFB     134,138,141,145
        DFB     148,151,153,156
        DFB     157,159,160,161
        DFB     162,162,162,162
        DFB     161,160,159,157
        DFB     155,152,150,147
        DFB     144,141,137,133
        DFB     130,126,122,118
        DFB     114,110,106,102
        DFB     99,95,91,88
        DFB     85,82,80,77
        DFB     75
;-----------------------------------
F21:    DFB     123,128,133,137
        DFB     142,146,150,154
        DFB     158,161,164,166
        DFB     168,169,170,171
        DFB     171,171,170,169
        DFB     167,165,163,160
        DFB     157,153,149,145
        DFB     141,137,132,128
        DFB     123,118,113,109
        DFB     104,100,96,92
        DFB     88,84,81,78
        DFB     76,74,72,71
        DFB     70,70,70,71
        DFB     72,73,75,77
        DFB     80,83,87,91
        DFB     95,99,104,108
        DFB     113,118,123,128
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          DFB     133,137,142,146
          DFB     150,154,158,161
          DFB     164,166,168,169
          DFB     170,171,171,171
          DFB     170,169,167,165
          DFB     163,160,157,153
          DFB     149,145,141,137
          DFB     132,128,123,118
          DFB     113,109,104,100
          DFB     96,92,88,84
          DFB     81,78,76
;-----------------------------------
F22       DFB     117,122,127,132
          DFB     136,141,145,149
          DFB     152,155,158,160
          DFB     162,164,165,165
          DFB     166,165,164,163
          DFB     162,160,157,154
          DFB     151,148,144,140
          DFB     136,131,127,122
          DFB     117,113,108,103
          DFB     99,94,90,86
          DFB     82,79,76,73
          DFB     70,68,67,66
          DFB     65,64,65,65
          DFB     66,68,70,72
          DFB     75,78,81,85
          DFB     89,94,98,103
          DFB     108,113,117,122
          DFB     127,132,136,141
          DFB     145,149,152,155
          DFB     158,160,162,164
          DFB     165,165,166,165
          DFB     164,163,162,160
          DFB     157,154,151,148
          DFB     144,140,136,131
          DFB     127,122,117,113
          DFB     108,103,99,94
          DFB     90,86,82,79
          DFB     76,73,70
;-----------------------------------
F23:      DFB     124,130,136,141
          DFB     147,152,157,161
          DFB     165,168,171,173
          DFB     175,176,177,177
          DFB     176,174,173,170
          DFB     167,164,160,155
          DFB     151,146,141,135
          DFB     130,124,118,113
          DFB     107,101,96,91
          DFB     87,82,78,75
          DFB     72,69,68,66
          DFB     66,65,66,67
          DFB     69,71,74,77
          DFB     81,85,90,95
          DFB     101,106,112,118
          DFB     124,130,136,141
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            DFB     147,152,157,161
            DFB     165,168,171,173
            DFB     175,176,177,177
            DFB     176,174,173,170
            DFB     167,164,160,155
            DFB     151,146,141,135
            DFB     130,124,118,113
            DFB     107,101,96,91
            DFB     87,82,78,75
            DFB     72
;-----------------------------------
F24:        DFB     119,125,131,136
            DFB     142,147,152,156
            DFB     160,163,166,168
            DFB     170,171,172,172
            DFB     171,169,168,165
            DFB     162,159,155,150
            DFB     146,141,136,130
            DFB     125,119,113,108
            DFB     102,97,91,86
            DFB     82,77,73,70
            DFB     67,65,63,61
            DFB     60,60,61,62
            DFB     64,66,69,72
            DFB     76,80,85,90
            DFB     96,101,107,113
            DFB     119,125,131,136
            DFB     142,147,152,156
            DFB     160,163,166,168
            DFB     170,171,172,172
            DFB     171,169,168,165
            DFB     162,159,155,150
            DFB     146,141,136,130
            DFB     125,119,113,108
            DFB     102,97,91,86
            DFB     82,77,73,70
            DFB     67
;-----------------------------------
F25:        DFB     127,135,142,149
            DFB     155,161,167,172
            DFB     176,180,182,184
            DFB     185,185,185,183
            DFB     181,178,174,170
            DFB     165,160,154,147
            DFB     141,134,127,120
            DFB     113,106,100,93
            DFB     87,82,77,73
            DFB     69,66,64,62
            DFB     62,62,63,65
            DFB     68,71,75,80
            DFB     86,92,98,105
            DFB     112,120,127,135
            DFB     142,149,155,161
            DFB     166,172,176,179
            DFB     182,184,185,185
            DFB     185,183,181,178
            DFB     174,170,165,160
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     154,147,141,134
        DFB     127,120,113,106
        DFB     100,93,87,82
        DFB     77,73,69
;-------------------------------
F26:    DFB     123,130,137,144
        DFB     151,157,162,167
        DFB     172,175,178,180
        DFB     181,181,180,179
        DFB     177,174,170,165
        DFB     161,155,149,143
        DFB     136,129,122,116
        DFB     109,102,95,89
        DFB     83,77,73,68
        DFB     64,61,59,58
        DFB     57,57,58,60
        DFB     63,66,71,76
        DFB     81,87,94,101
        DFB     108,115,123,130
        DFB     137,144,151,157
        DFB     162,167,172,175
        DFB     178,180,181,181
        DFB     180,179,177,174
        DFB     170,165,161,155
        DFB     149,143,136,130
        DFB     122,116,109,102
        DFB     95,89,83,77
        DFB     73,78,64
;-------------------------------
F27:    DFB     118,126,133,140
        DFB     146,152,158,163
        DFB     167,171,173,175
        DFB     176,176,176,174
        DFB     172,169,165,161
        DFB     156,151,145,138
        DFB     132,125,118,111
        DFB     104,97,91,84
        DFB     78,73,68,64
        DFB     60,57,55,53
        DFB     53,53,54,56
        DFB     58,62,66,71
        DFB     77,83,89,96
        DFB     103,111,118,126
        DFB     133,140,146,152
        DFB     158,163,167,171
        DFB     173,175,176,176
        DFB     176,174,172,169
        DFB     165,161,156,151
        DFB     145,138,132,125
        DFB     118,111,104,97
        DFB     91,84,78,73
        DFB     68,64,60
;-------------------------------
F28:    DFB     129,138,,147,156
        DFB     164,171,177,183
        DFB     187,191,193,193
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          DFB     193,192,189,185
          DFB     181,175,169,161
          DFB     154,146,137,128
          DFB     120,111,102,94
          DFB     87,79,73,67
          DFB     63,59,56,55
          DFB     55,55,58,61
          DFB     65,71,77,84
          DFB     92,101,110,119
          DFB     129,138,147,156
          DFB     164,171,177,183
          DFB     187,191,193,193
          DFB     193,192,189,185
          DFB     181,175,169,161
          DFB     154,146,137,128
          DFB     120,111,102,94
          DFB     87,79,73,67
          DFB     63
;-----------------------------------
F29:      DFB     125,134,143,152
          DFB     160,167,174,179
          DFB     183,187,189,190
          DFB     189,188,185,181
          DFB     177,171,165,157
          DFB     150,142,133,124
          DFB     116,107,98,90
          DFB     83,75,69,63
          DFB     59,55,52,51
          DFB     50,51,53,57
          DFB     61,66,73,80
          DFB     88,97,106,115
          DFB     125,134,143,152
          DFB     160,167,174,179
          DFB     183,187,189,190
          DFB     189,188,185,181
          DFB     177,171,165,157
          DFB     150,142,133,124
          DFB     116,107,98,90
          DFB     83,75,69,63
          DFB     59
;-----------------------------------
F30:      DFB     121,130,139,148
          DFB     156,163,170,175
          DFB     179,183,185,186
          DFB     185,184,181,177
          DFB     173,167,161,153
          DFB     146,138,129,120
          DFB     112,103,94,86
          DFB     79,71,65,59
          DFB     55,51,48,47
          DFB     46,47,49,53
          DFB     57,62,69,76
          DFB     84,93,112,111
          DFB     121,130,139,148
          DFB     156,163,170,175
          DFB     179,183,185,186
          DFB     185,184,181,
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     173,167,161,153
        DFB     146,138,129,120
        DFB     112,103,94,86
        DFB     79,71,65,59
        DFB     55
;-----------------------------------
F31     DFB     117,126,135,144
        DFB     152,159,166,171
        DFB     175,179,181,181
        DFB     181,180,177,173
        DFB     168,163,156,149
        DFB     142,133,125,116
        DFB     108,99,91,82
        DFB     75,68,61,56
        DFB     51,47,44,43
        DFB     43,43,45,49
        DFB     53,58,65,72
        DFB     80,89,98,107
        DFB     117,126,135,144
        DFB     152,159,166,171
        DFB     175,179,181,181
        DFB     181,180,177,173
        DFB     168,163,156,149
        DFB     142,133,125,116
        DFB     108,99,91,82
        DFB     75,68,61,56
        DFB     51
;-----------------------------------
F32:    DFB     130,143,154,165
        DFB     175,184,191,197
        DFB     201,203,203,202
        DFB     199,194,188,180
        DFB     172,162,152,141
        DFB     130,118,107,96
        DFB     86,76,68,60
        DFB     54,49,46,45
        DFB     45,47,51,57
        DFB     64,73,83,94
        DFB     105,118,130,143
        DFB     154,165,175,184
        DFB     191,197,201,203
        DFB     203,202,199,194
        DFB     188,180,172,162
        DFB     152,141,130,118
        DFB     107,96,86,76
        DFB     68,60,54
;-----------------------------------
F33:    DFB     127,139,151,162
        DFB     172,181,188,194
        DFB     197,200,200,198
        DFB     195,191,184,177
        DFB     168,159,148,137
        DFB     126,115,103,93
        DFB     82,73,64,57
        DFB     50,46,43,41
        DFB     41,43,47,53
        DFB     60,69,79,90
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          DFB     102,114,127,139
          DFB     151,162,172,180
          DFB     188,194,198,200
          DFB     200,198,195,191
          DFB     184,177,168,159
          DFB     148,137,126,115
          DFB     104,93,82,73
          DFB     64,57,50
;---------------------------------
F34:      DFB     123,136,148,159
          DFB     169,176,185,190
          DFB     194,196,196,195
          DFB     192,187,181,173
          DFB     165,155,145,134
          DFB     123,111,100,89
          DFB     76,69,61,53
          DFB     47,42,39,38
          DFB     38,40,44,49
          DFB     57,65,75,86
          DFB     98,111,123,136
          DFB     148,159,169,176
          DFB     185,190,194,196
          DFB     196,195,192,187
          DFB     181,173,165,155
          DFB     145,134,123,111
          DFB     100,89,76,69
          DFB     61,53,47
;---------------------------------
F35:      DFB     120,132,144,155
          DFB     165,174,181,187
          DFB     191,193,193,191
          DFB     188,183,177,170
          DFB     161,151,141,130
          DFB     119,108,97,86
          DFB     76,66,57,50
          DFB     44,39,36,34
          DFB     34,36,40,46
          DFB     53,62,72,83
          DFB     95,107,120,132
          DFB     144,155,165,174
          DFB     181,187,191,193
          DFB     193,191,188,183
          DFB     177,170,161,151
          DFB     141,130,119,108
          DFB     97,86,76,66
          DFB     57,50,44
;---------------------------------
F36:      DFB     117,139,141,152
          DFB     162,171,178,184
          DFB     188,190,190,188
          DFB     185,180,174,167
          DFB     158,149,138,127
          DFB     116,105,94,83
          DFB     73,63,54,47
          DFB     41,36,33,31
          DFB     31,33,37,43
          DFB     50,59,69,80
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          DFB     92,104,117,129
          DFB     141,152,162,171
          DFB     178,184,188,190
          DFB     190,188,185,180
          DFB     174,167,158,149
          DFB     138,127,116,105
          DFB     94,83,73,63
          DFB     54,47,41
;---------------------------------
F37:      DFB     134,151,167,182
          DFB     194,204,212,217
          DFB     218,217,214,207
          DFB     199,188,176,163
          DFB     148,133,118,103
          DFB     88,75,63,52
          DFB     44,37,34,33
          DFB     34,39,46,57
          DFB     69,84,100,117
          DFB     134,151,167,182
          DFB     194,204,212,217
          DFB     218,217,214,207
          DFB     199,188,176,163
          DFB     148,133,118,103
          DFB     88,75,63,52
          DFB     44
;---------------------------------
F38:      DFB     131,148,164,178
          DFB     191,201,208,213
          DFB     215,214,210,204
          DFB     195,185,172,159
          DFB     145,130,114,99
          DFB     85,72,59,49
          DFB     40,34,30,29
          DFB     31,36,43,53
          DFB     66,80,96,113
          DFB     131,148,164,178
          DFB     191,201,208,213
          DFB     215,214,210,204
          DFB     195,185,172,159
          DFB     145,130,114,99
          DFB     85,72,59,49
          DFB     40
;---------------------------------
F39:      DFB     128,145,161,175
          DFB     188,198,205,210
          DFB     212,211,207,201
          DFB     192,182,169,156
          DFB     142,127,111,96
          DFB     82,69,56,46
          DFB     37,31,27,26
          DFB     28,33,40,50
          DFB     63,77,93,110
          DFB     128,145,161,175
          DFB     188,198,205,210
          DFB     212,211,207,201
          DFB     192,182,169,156
          DFB     142,127,111,96
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     82,69,56,46
        DFB     37
;-----------------------------------
F40:    DFB     125,142,158,172
        DFB     185,195,202,207
        DFB     209,208,204,198
        DFB     189,178,166,153
        DFB     139,124,108,94
        DFB     79,66,54,43
        DFB     34,28,24,23
        DFB     25,30,37,47
        DFB     60,74,90,107
        DFB     125,142,158,172
        DFB     185,195,202,207
        DFB     209,208,204,198
        DFB     189,178,166,153
        DFB     139,124,108,94
        DFB     79,66,54,43
        DFB     34
;-----------------------------------
F41:    DFB     122,139,155,169
        DFB     182,192,199,204
        DFB     206,205,201,194
        DFB     186,175,163,150
        DFB     135,121,105,91
        DFB     76,63,51,40
        DFB     32,25,21,20
        DFB     22,27,34,44
        DFB     57,71,87,104
        DFB     122,139,155,169
        DFB     182,192,199,204
        DFB     206,205,201,194
        DFB     186,175,163,150
        DFB     135,121,105,91
        DFB     76,63,51,40
        DFB     32
;-----------------------------------
F42:    DFB     119,136,153,167
        DFB     186,190,197,202
        DFB     203,202,198,192
        DFB     183,173,161,147
        DFB     133,118,103,88
        DFB     74,60,48,38
        DFB     29,23,19,18
        DFB     19,24,31,41
        DFB     54,69,85,102
        DFB     119,136,153,167
        DFB     180,190,197,201
        DFB     203,202,198,192
        DFB     183,173,161,147
        DFB     133,118,103,88
        DFB     74,60,48,38
        DFB     29
;-----------------------------------
F43:    DFB     117,134,150,165
        DFB     177,187,195,199
        DFB     201,200,196,189
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          DFB     181,170,158,145
          DFB     130,116,100,86
          DFB     71,58,46,35
          DFB     27,20,16,15
          DFB     17,21,29,39
          DFB     51,66,82,99
          DFB     117,134,150,165
          DFB     177,187,195,199
          DFB     201,200,196,189
          DFB     181,170,158,145
          DFB     130,116,100,86
          DFB     71,58,46,35
          DFB     27
;---------------------------------
F44:      DFB     139,164,187,206
          DFB     221,232,237,237
          DFB     233,224,212,196
          DFB     178,158,137,116
          DFB     95,75,57,41
          DFB     29,20,16,16
          DFB     21,32,47,66
          DFB     89,114,139,164
          DFB     187,206,221,232
          DFB     237,237,233,224
          DFB     212,196,178,158
          DFB     137,116,95,75
          DFB     57,41,29
;---------------------------------
F45:      DFB     136,161,184,203
          DFB     218,229,234,234
          DFB     230,221,208,193
          DFB     175,155,134,113
          DFB     92,72,54,39
          DFB     26,17,13,13
          DFB     18,29,44,63
          DFB     86,111,136,161
          DFB     184,203,218,229
          DFB     234,234,230,221
          DFB     208,193,175,155
          DFB     134,113,92,72
          DFB     54,39,26
;---------------------------------
F46:      DFB     134,159,182,201
          DFB     216,226,232,232
          DFB     227,219,206,90
          DFB     72,153,132,110
          DFB     90,70,52,36
          DFB     23,15,10,10
          DFB     16,26,41,60
          DFB     83,108,134,159
          DFB     82,201,216,226
          DFB     232,232,227,219
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     206,190,172,153
        DFB     132,110,90,70
        DFB     52,36,23
;---------------------------------
F47:    DFB     131,156,179,199
        DFB     214,224,229,229
        DFB     225,216,203,188
        DFB     170,150,129,108
        DFB     87,67,49,34
        DFB     21,12,8,8
        DFB     13,23,38,58
        DFB     81,106,131,156
        DFB     179,199,214,224
        DFB     229,229,225,216
        DFB     203,188,170,150
        DFB     129,108,87,67
        DFB     49,34,21
;---------------------------------
F48:    DFB     129,154,177,196
        DFB     211,222,227,227
        DFB     222,213,201,185
        DFB     167,147,127,105
        DFB     85,65,47,31
        DFB     79,10,5,5
        DFB     10,21,36,55
        DFB     78,103,129,154
        DFB     177,196,211,222
        DFB     227,227,222,213
        DFB     201,185,167,147
        DFB     127,105,85,65
        DFB     47,31,19
;---------------------------------
F49:    DFB     126,152,174,194
        DFB     209,219,224,224
        DFB     220,211,198,183
        DFB     165,145,124,103
        DFB     82,62,44,29
        DFB     16,7,3,3
        DFB     8,18,33,53
        DFB     75,101,126,152
        DFB     174,194,209,219
        DFB     224,224,220,211
        DFB     198,183,165,145
        DFB     124,103,82,62
        DFB     44,29,16
;---------------------------------
F50:    DFB     125,150,173,192
        DFB     207,217,222,222
        DFB     218,208,196,181
        DFB     163,143,122,101
        DFB     80,60,42,27
        DFB     14,5,1,1
        DFB     6,16,31,50
        DFB     73,98,125,150
        DFB     173,192,207,217
        DFB     222,222,218,209
        DFB     196,181,163,143
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     122,101,80,60
        DFB     42,27,14
;-----------------------------------
F51:    DFB     122,146,169,188
        DFB     203,212,217,217
        DFB     213,204,192,177
        DFB     159,140,119,99
        DFB     78,59,41,26
        DFB     14,5,1,1
        DFB     6,15,30,49
        DFB     72,96,122,146
        DFB     169,188,203,212
        DFB     217,217,213,204
        DFB     192,177,159,140
        DFB     119,99,78,59
        DFB     41,26,14
;-----------------------------------
F52:    DFB     119,144,166,184
        DFB     199,209,213,213
        DFB     209,200,188,173
        DFB     156,137,117,97
        DFB     77,58,41,26
        DFB     14,5,1,1
        DFB     5,15,30,48
        DFB     70,95,119,144
        DFB     166,184,199,209
        DFB     213,213,209,200
        DFB     188,173,156,137
        DFB     177,97,77,58
        DFB     41,26,14
;-----------------------------------
F53:    DFB     117,141,163,181
        DFB     195,205,209,209
        DFB     205,197,185,170
        DFB     153,135,115,95
        DFB     76,57,40,25
        DFB     13,5,1,1
        DFB     5,15,29,47
        DFB     69,93,117,141
        DFB     163,181,195,205
        DFB     209,209,205,197
        DFB     185,170,153,135
        DFB     115,95,76,57
        DFB     40,25,13
;-----------------------------------
F54:    DFB     115,138,159,178
        DFB     191,201,205,205
        DFB     201,193,181,167
        DFB     150,132,113,93
        DFB     74,56,39,25
        DFB     13,5,1,1
        DFB     5,15,28,46
        DFB     68,91,115,138
        DFB     159,178,191,201
        DFB     205,205,201,193
        DFB     181,167,150,132
        DFB     113,93,74,56
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     39,25,13
;-----------------------------------
F55:    DFB     145,181,212,235
        DFB     249,253,249,237
        DFB     219,196,170,141
        DFB     112,83,57,34
        DFB     16,4,0,4
        DFB     18,41,72,108
        DFB     145,181,212,235
        DFB     249,253,249,237
        DFB     219,196,170,141
        DFB     112,83,57,34
        DFB     16
;-----------------------------------
F56:    DFB     143,178,128,130
        DFB     224,248,244,232
        DFB     215,192,166,138
        DFB     110,82,56,33
        DFB     16,4,0,4
        DFB     18,40,70,105
        DFB     143,178,128,230
        DFB     224,248,244,232
        DFB     245,192,166,138
        DFB     110,82,56,33
        DFB     16
;-----------------------------------
F57:    DFB     140,175,205,226
        DFB     240,244,240,229
        DFB     211,189,164,136
        DFB     108,80,55,33
        DFB     15,4,0,4
        DFB     18,39,69,104
        DFB     140,175,205,226
        DFB     240,244,240,229
        DFB     211,189,164,136
        DFB     108,80,55,33
        DFB     15
;-----------------------------------
F58:    DFB     138,175,201,223
        DFB     236,240,236,225
        DFB     208,186,161,134
        DFB     106,79,54,32
        DFB     15,4,0,4
        DFB     17,39,68,102
        DFB     138,172,201,223
        DFB     236,240,236,225
        DFB     208,186,161,134
        DFB     106,79,54,32
        DFB     15
;-----------------------------------
F59:    DFB     136,169,198,219
        DFB     232,236,232,221
        DFB     204,183,158,132
        DFB     104,78,53,32
        DFB     15,4,0,4
        DFB     17,38,67,100
        DFB     136,169,198,219
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        DFB     232,236,232,221
        DFB     204,183,158,132
        DFB     104,78,53,32
        DFB     15
;-----------------------------------
F60:    DFB     133,166,194,215
        DFB     228,232,228,217
        DFB     201,180,156,129
        DFB     103,176,52,31
        DFB     15,4,0,4
        DFB     17,38,66,99
        DFB     133,166,194,215
        DFB     228,232,228,217
        DFB     201,180,156,129
        DFB     103,76,52,31
        DFB     15
;-----------------------------------
        END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องด้วยคำแนะนำ ชี้แนะ และสนับสนุนด้านอุปกรณ์จากอาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงงานนี้

และขอขอบคุณอาจารย์ พนาฤทธิ์ เศรษฐกูล ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และแนะนำด้านวิชาการในการทำโครงงานนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้เป็นกำลังใจและสนับสนุนด้านการศึกษาเล่าเรียนของผู้วิจัยเสมอมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หนังสืออ้างอิง

1. Siemens Aktiengesellschaft. Application Note for SLE 4520 . Germany : Siemend AG, 1986

2. วิชัย ค้างขจันทรานนท์. การควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอีเลคทรอนิกส์กำลัง เล่ม 1 . สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2528.

3. _____. การควบคุมเครื่องกลไฟฟ้าด้วยอีเลคทรอนิกส์กำลัง เล่ม 2 . สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2528.

4. Thorborg K. Power Electronics. Prentice Hall International (UK). Cambridge UK : University Press, 1988.

5. Casteel Jordan B., and Hoft R.G. "Optimum waveform of Microprocessor Controlled Inverter". Microcomputer Control of Power Electronics and Drives. 135-141. Edited by Bose Bimal K. New York : IEEE Press, 1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้