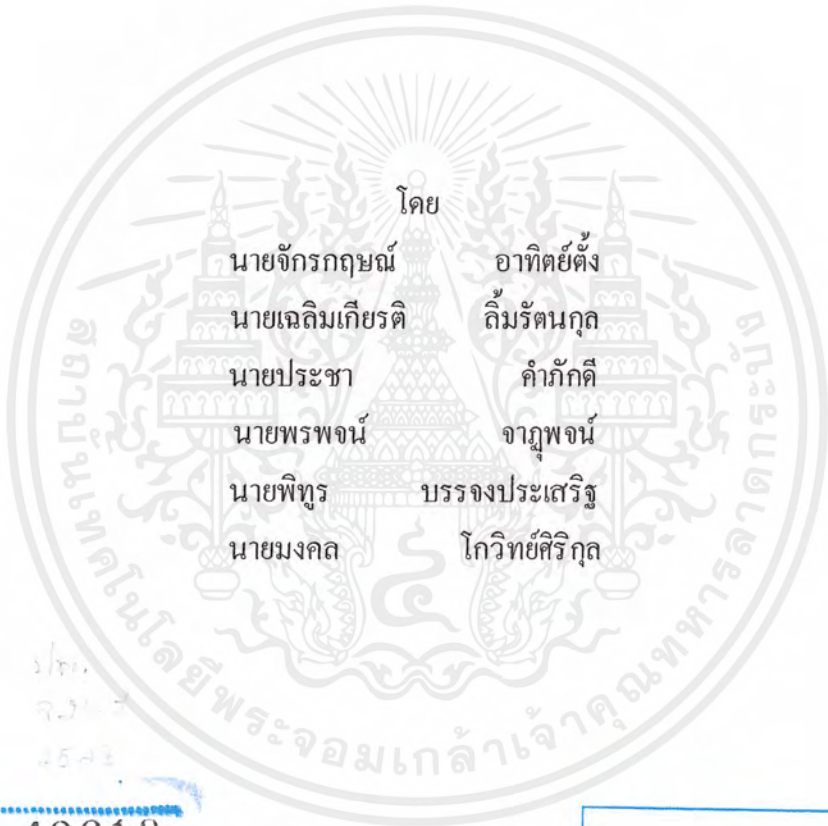




รตรางไฟฟ้า
ELECTRIC TRAM



โดย
นายจักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง
นายเฉลิมเกียรติ ลิ้มรัตนกุล
นายประชา คำภักดี
นายพรพจน์ จาญพจน์
นายพิฑูร บรรจงประเสริฐ
นายมงคล โกวิทย์ศิริกุล

ร/ท.
จ.ว.บ.
2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42613
วัน, เดือน, ปี 4 ส.ค. 2545

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

ปฏิญญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2543

รตรางไฟฟ้า
ELECTRIC TRAM



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วีระเชษฐ์ จันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

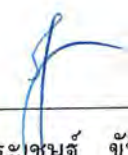
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รางไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 
1. นายจักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง
 2. นายเฉลิมเกียรติ ลิ้มรัตนกุล
 3. นายประชา คำภักดี
 4. นายพรพจน์ จากุพจน์
 5. นายพิฑูร บรรจงประเสริฐ
 6. นายมงคล โกวิทย์ศิริกุล


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอร่างไฟฟ้า

นายจักรกฤษณ์ อาทิตย์ตั้ง
 นายเฉลิมเกียรติ ลีมรัตน์กุล
 นายประธา คำภักดี
 นายพรพจน์ จาญพจน์
 นายพิฑูร บรรจงประเสริฐ
 นายมงคล โกวิทย์ศิริกุล
 ผศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและสร้างรอร่างไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนและใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 48 โวลต์ ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า กระแสตรงแรงดัน 48 โวลต์ เข้าไปยังวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์เพื่อยกระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์ แล้วส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง 310 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 220 โวลต์ ป้อนให้แก่มอเตอร์ที่ต่อแบบเคลด้า เพื่อใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนต่อไป โครงการที่สำเร็จนี้ได้แสดงถึงการนำพลังงานที่ไม่เกิดมลพิษมาใช้งาน

II

THE ELECTRIC TRAM

Jakkrit Arthitthang

Chalermkiet Limrattanakul

Pracha Kampakdee

Pornpote Jatupote

Pitoon Banjongprasert

Mongkol Kowitsirikul

Asst. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Adviser

2000

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study and invent a prototype tram using 3 phase induction motor. The three phase induction motor is driven by transformation of electric power from direct current to alternating current by passing two circuits, push-pull converter and inverter. The process of transformation electric power for driving three phase induction motor, 48 Vdc from battery supply to push-pull converter is to boost voltage from 48 Vdc to 310 Vdc then pass through the inverter for converting from 310 Vdc to 220 Vac. The three phase induction motor is driven and controlled by 220 Vac from inverter. Energy source is electric power which is the clean energy to reduce the pollution in society.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	4
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	7
2.2 หลักการทำงาน	8
2.3 คุณลักษณะ	10
2.4 สลิป	11
2.5 กระแสของมอเตอร์	12
2.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์และกระแส	12
2.7 แรงบิดพิกัด	13
2.8 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์	14
2.9 การพิจารณาวิเคราะห์สมบัติของโหลด	14
2.10 รูปแบบที่เลือกใช้	16
2.11 ขั้นตอนการนำไปใช้งานจริง	17
บทที่ 3 อินเวอร์เตอร์และการเลือกใช้	18
3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	18
3.2 การทำงานของภาคคอนเวอร์เตอร์	19
3.3 การทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์	21
3.4 รูปแบบ V/f และ ทอร์กบูส	25
3.5 ข้อแตกต่างเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์	27
3.6 เหตุที่ต้องเปลี่ยนแรงดันเมื่อแปรความเร็วรอบ	27
3.7 แรงบิด ของมอเตอร์ที่ถูกควบคุม โดยอินเวอร์เตอร์	28
3.8 ประสิทธิภาพและเพาเวอร์แฟคเตอร์ของอินเวอร์เตอร์	28
3.9 เพาเวอร์แฟคเตอร์	30
3.10 รูปแบบที่เลือกใช้	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.11 พิกัดของอินเวอร์เตอร์ที่เลือก	31
บทที่ 4 คอนเวอร์เตอร์	32
4.1 คอนเวอร์เตอร์	32
4.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	34
4.1.2 ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์	34
4.1.3 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์	35
4.1.4 ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์	35
4.1.5 ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์	36
4.2 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์	36
4.2.1 การออกแบบวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์	39
4.2.2 ทำการออกแบบวงจรที่ใช้งานจริง	42
4.3 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	45
4.3.1 การออกแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	47
4.3.2 การออกแบบวงจรฟลายแบคที่ใช้งานจริง	47
บทที่ 5 วงจรควบคุม	49
5.1 ไอซีเบอร์ TL 494	49
5.1.1 การกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งาน	49
5.1.2 การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาต์พุตของไอซี	49
5.1.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ T_D	49
5.1.4 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์	50
5.1.5 การออกแบบวงจร TL494 ที่ใช้งานจริง	51
5.2 ส่วนของวงจรที่ใช้สำหรับแยกกราวด์(Isolate Ground)	51
5.2.1 การเลือกใช้อุปกรณ์ได้คัปเปิลอร์มีข้อพิจารณาคือ	52
บทที่ 6 หม้อแปลงสวิตจิ่ง	54
6.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตจิ่ง	54
6.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)	54
6.3 บอบบิ้น (Bobbin)	54
6.4 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)	55
6.5 เทปพันฉนวน (Insulation Tape)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
6.6 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้	55
6.7 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์	56
6.8 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve)	56
6.9 การสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)	56
6.10 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม	57
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารี ของหม้อแปลงสวิตชิง	58
บทที่ 7 วงจรสับเบอร์	60
7.1 วงจรสับเบอร์ช่วงหยุดนำกระแส	60
7.2 วงจรสับเบอร์ป้องกันแรงดันเกิน	61
บทที่ 8 ตัวรถ ระบบต่างๆของรถและราง	63
8.1 แนวคิด	63
8.2 ตัวรถ	63
8.2.1 โคจรรถ	64
8.2.2 ล้อ เพลาหน้า เพลาท้าย และระบบบังคับล้อ	65
8.3 รางรถและระบบนำไฟฟ้า	73
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง	76
การทดลองตอนที่ 1 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ด้วยอินเวอร์เตอร์	76
การทดลองตอนที่ 2 การวัดค่าสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจร ฟลายแบคและพวงพูล-คอนเวอร์เตอร์	86
การทดลองตอนที่ 3 การทดลองควบคุมความเร็วรรางไฟฟ้า	95
บทที่ 10 บทสรุปและวิจารณ์	121
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

III

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดง Block Diagram ของทั้ง 3 กลุ่ม	3
รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างของสเตเตอร์	7
รูปที่ 2.2 แสดง โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก	8
รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัด โครงสร้างภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	10
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง แรงดัน, โหลด กับความเร็วรอบ	12
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงคุณสมบัติแบบต่างๆ	15
รูปที่ 3.1 แสดง โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	18
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์	19
รูปที่ 3.3 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์	20
รูปที่ 3.4 รูปคลื่นแสดง กระแส และแรงดันขาออก	21
รูปที่ 3.5 วิธีการสร้างไฟสลับ	21
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแส	21
รูปที่ 3.7 รูปคลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz	22
รูปที่ 3.8 ความถี่	22
รูปที่ 3.9 แสดงวงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส	22
รูปที่ 3.10 การสร้างไฟสลับ 3 เฟส	23
รูปที่ 3.11 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์	24
รูปที่ 3.12 แสดงการเกิดรูปคลื่นชายน้ที่ความถี่ ค่า และ สูง	24
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	25
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลย์กรณีไม่มีโหลด	26
รูปที่ 3.15 รูปแบบ V/f อุดมคติ	26
รูปที่ 3.16 รูปแบบ V/f ที่ใช้งานจริง	26
รูปที่ 3.17 การทำงานของมอเตอร์แรงบิดคงที่และแรงดันคงที่	28
รูปที่ 3.18 กำลังไฟฟ้าเข้า และ ขาออก	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเปรียบเทียบกรณี ของแหล่งจ่ายไฟ กับ กรณีของอินเวอร์เตอร์	30
รูปที่ 4.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 5 แบบ	33
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรพื้นฐานของพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์	37
รูปที่ 4.3 แสดงการกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D ให้ กับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์	38
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของการแสที่ไหลผ่าน ไดโอด D1 และ D2 และกระแสที่ไหลผ่านเอาต์	39
รูปที่ 4.5 วงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทำงานจริง	44
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	45
รูปที่ 4.7 สภาวะการทำงานของ ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ 1) ขณะON 2)ขณะOFF	46
รูปที่ 4.8 สัญญาณของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	46
รูปที่ 4.9 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานจริง	48
รูปที่ 5.1 วงจรภายในของ TL 494	50
รูปที่ 5.2 วงจร TL494 ส่วนที่ 2 (พุก-พุลคอนเวอร์เตอร์)	51
รูปที่ 5.3 วงจรออปโตไอโซเลเตอร์	53
รูปที่ 6.1 ลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส	56
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง	58
รูปที่ 7.1 แสดงการต่อวงจรสับเบอร์ดช่วยหยุดนำกระแสเพื่อหน่วง แรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ	60
รูปที่ 7.2 แสดงการต่อสับเบอร์ดป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุด ที่จะตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส	61
รูปที่ 8.1 แสดงโครงรถ	64
รูปที่ 8.2 แสดงรถ ไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	65
รูปที่ 8.3 แสดงระบบบังคับล้อหน้า	67
รูปที่ 8.4 แสดงการทำงานของระบบบังคับล้อหน้าขณะที่เป็นทางตรงและทางโค้ง	68
รูปที่ 8.5 แสดงการทำงานจริงของระบบบังคับล้อหน้ากรณีที่เป็นทางตรงและทางโค้ง	70

รูปที่ 8.6 แสดงการใช้โซ่ในการขับเคลื่อน	71
รูปที่ 8.7 แสดงหลักการทำงานของดิฟเฟอเรนเชียล	72
รูปที่ 8.3 แสดงระบบบังคับล้อหลัง	73
รูปที่ 8.9 แสดงการเชื่อมยึดตามจุดต่างๆของรางแต่ละท่อน ซึ่งยาวท่อนละ 6 เมตร	74
รูปที่ 8.10 แสดงการติดตั้งแขนรับไฟฟ้า และรางนำไฟฟ้า	75
รูปที่ 9.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	78
รูปที่ 9.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f & T	81
รูปที่ 9.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f & I_{out}	82
รูปที่ 9.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f & $N(rmp)$	82
รูปที่ 9.5 แสดงจุดวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	87
รูปที่ 9.6 แสดงรูปสัญญาณคร่อมเกทและซอร์สของวงจรฟลายแบค	88
รูปที่ 9.7 แสดงรูปสัญญาณคร่อมเดรนและซอร์สของวงจรฟลายแบค	88
รูปที่ 9.8 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้าไดโอดของวงจรฟลายแบค	89
รูปที่ 9.9 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรฟลายแบค	89
รูปที่ 9.10 แสดงจุดวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆของพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์	90
รูปที่ 9.11 แสดงรูปสัญญาณคร่อมเกทและซอร์สของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์ ขณะยังไม่จ่ายโหลด	91
รูปที่ 9.12 แสดงรูปสัญญาณคร่อมเกทและซอร์สของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์ ขณะจ่ายโหลด	91
รูปที่ 9.13 แสดงรูปสัญญาณคร่อมเดรนและซอร์สของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์ ขณะยังไม่จ่ายโหลด	92
รูปที่ 9.14 แสดงรูปสัญญาณคร่อมเดรนและซอร์สของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์ ขณะจ่ายโหลด	92
รูปที่ 9.15 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้าไดโอดของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์	93
รูปที่ 9.16 แสดงรูปสัญญาณหลังผ่านไดโอดของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์	93
รูปที่ 9.17 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพุ่ม-พูลคอนเวอร์เตอร์	94
รูปที่ 9.18 แสดงแรงดันควบคุมจากวงจร TL 494	94
รูปที่ 9.19 วงจรการทดลองวัดผลประสิทธิภาพ	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III

หน้า

รูปที่ 9.20 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจรเมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่สภาวะวิ่งตัวเปล่า	101
รูปที่ 9.21 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจรเมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่สภาวะวิ่งบรรทุกน้ำหนัก 1 คน (65 kg.)	101
รูปที่ 9.22 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจรเมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่สภาวะวิ่งบรรทุกน้ำหนัก 2 คน (135 kg.)	102
รูปที่ 9.23 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจรเมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่สภาวะวิ่งบรรทุกน้ำหนัก 3 คน (190 kg.)	102
รูปที่ 9.24 แสดงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในทางอุดมคติ	104
รูปที่ 9.25 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	104
รูปที่ 9.26 กราฟที่ได้จากผลการทดลองหา % โวลต์เตจเรกกูเลชั่น	107
รูปที่ 9.27 กราฟที่ได้จากการทดลองหาค่าทอร์กบดที่เหมาะสม	108
รูปที่ 9.28 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 10 Hz	110
รูปที่ 9.29 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 20 Hz	111
รูปที่ 9.30 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 30 Hz	112
รูปที่ 9.31 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 40 Hz	113
รูปที่ 9.32 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 50 Hz	114
รูปที่ 9.33 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 60 Hz	115
รูปที่ 9.34 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ ที่ 70 Hz	116
รูปที่ 9.35 กราฟที่ได้จากผลการทดลองหาความเร็วรอบ	117
รูปที่ 10 รตรางไฟฟ้าต้นแบบเมื่อเสร็จสมบูรณ์	124

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของโหลด	15
ตารางที่ 9.2.1 ผลการทดลองที่สภาวะตัวเปล่า	97
ตารางที่ 9.2.2 ผลการทดลองที่สภาวะบรรทุก 1 คน	98
ตารางที่ 9.2.3 ผลการทดลองที่สภาวะบรรทุก 2 คน	99
ตารางที่ 9.2.4 ผลการทดลองที่สภาวะบรรทุก 3 คน	100
ตารางที่ 9.5.3 ผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ความถี่ 30 Hz	111
ตารางที่ 9.5.4 ผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ความถี่ 40 Hz	112
ตารางที่ 9.5.5 ผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ความถี่ 50 Hz	113
ตารางที่ 9.5.6 ผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ความถี่ 60 Hz	114
ตารางที่ 9.5.7 ผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ความถี่ 70 Hz	115
ตารางที่ 9.6 ผลการทดลองหาความเร็วรอบ	117
ตารางที่ 9.7 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	119

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากในยุคปัจจุบันยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหามลภาวะเป็นพิษ โดยเฉพาะมลพิษทางอากาศที่นับวันจะทวีความรุนแรงขึ้นจนยากจะทำการแก้ไข นอกจากนี้น้ำมันยังเป็นทรัพยากรประเภทสิ้นเปลืองคือใช้แล้วหมดไป และเป็นวัตถุดิบที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและราคาแพงขึ้นอยู่เสมอ ด้วยเหตุเหล่านี้จึงควรสร้างทางเลือกใหม่ที่ไม่ต้องพึ่งทรัพยากรน้ำมันเพียงอย่างเดียวและถือเป็นแรงบันดาลใจให้ทำรื่องไฟฟ้า ต้นแบบที่อาศัยแหล่งพลังงานจากไฟฟ้าแทนอาศัยแหล่งพลังงานจากทรัพยากรน้ำมันเพียงอย่างเดียว สาเหตุที่เลือกใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานเพราะไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาจนสามารถนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากธรรมชาติเรียกว่า เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งน่าจะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอนาคตต่อไป

หมายเหตุ โครงการชิ้นนี้เป็นโครงการที่เกิดจากความร่วมมือระหว่างกลุ่มโครงการ 3 กลุ่ม โดยโครงการอีกสองกลุ่มประกอบด้วย

กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่ม Maximum Power Point Tracking (MPPT) ทำงานเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และการนำไปใช้ประโยชน์

กลุ่มที่ 2 คือกลุ่ม (Battery Charger) ทำงานเกี่ยวข้องกับการนำพลังงานที่ได้รับจากกลุ่มที่ 1 มาประจุในแบตเตอรี่

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสร้างวงจร Push-Pull Converter
2. เพื่อสร้างรถต้นแบบที่ใช้พลังงานปราศจากมลพิษ
3. เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ อินเวอร์เตอร์
4. เพื่อฝึกการทำงานเป็นกลุ่ม

เป้าหมาย

ทำให้รถร่างต้นแบบเป็นพาหนะที่สามารถขับเคลื่อนและควบคุมได้ตามต้องการ โดยใช้พลังงานพลังไฟฟ้าจากแผง Solar cell ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตงานของกลุ่ม

- Push-Pull Converter

ทำหน้าที่ ยกระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่รับมาจากแบตเตอรี่หรือรับตรงมาจากแผง Solar Cell ขนาด 48 โวลต์แปลงเป็น 310 โวลต์ เพื่อจ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์ต่อไป

- Inverter

ทำหน้าที่ ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงมาจาก Push pull Converter ขนาด 310 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่สามารถปรับแรงดันและความถี่เอาต์พุตได้ตามต้องการ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

- Induction Motor

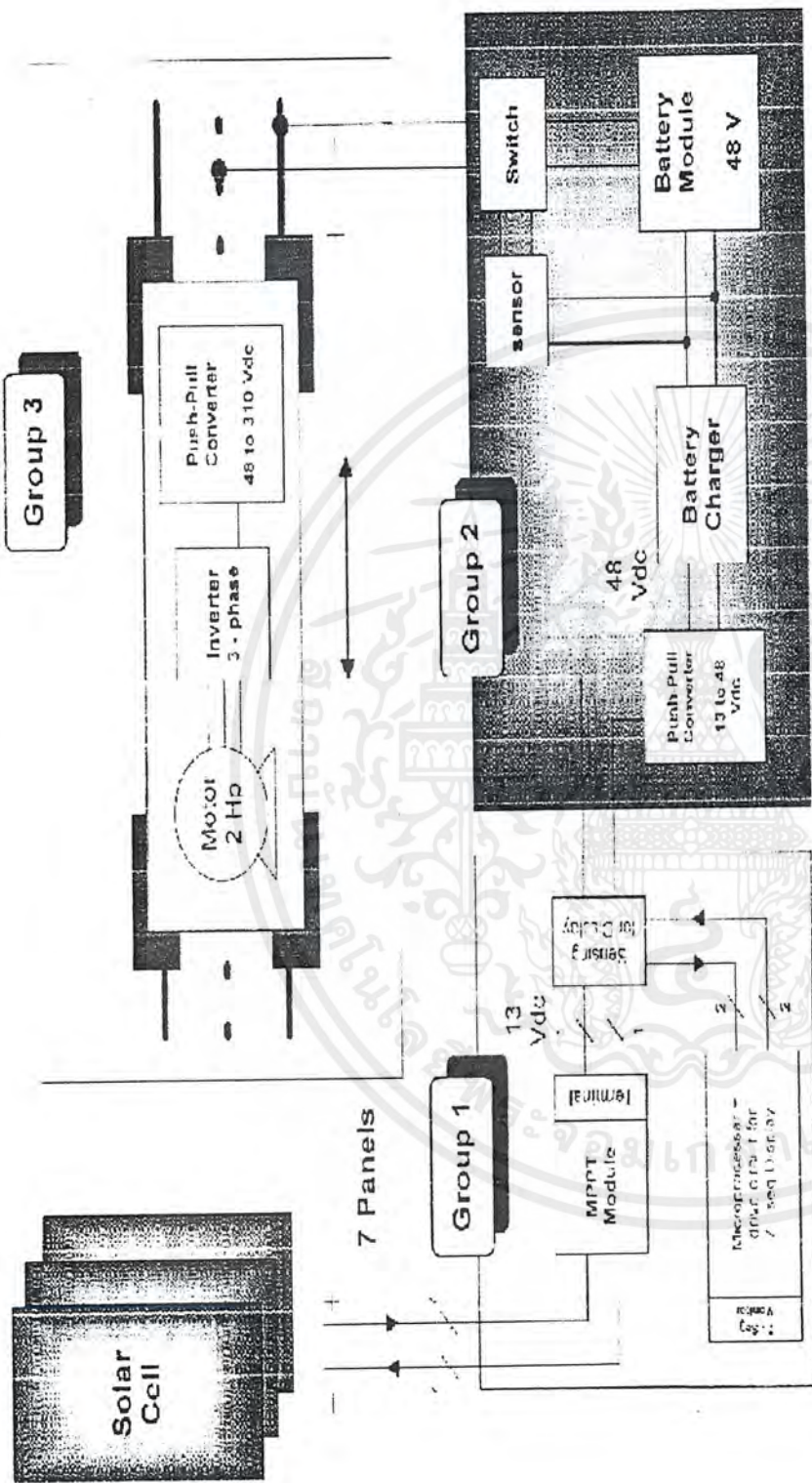
ทำหน้าที่ เป็นตัวการสำคัญในการขับเคลื่อน เมื่อ Inverter จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้ Induction Motor ก็จะไปขับระบบเฟืองต่อไป

- ระบบเฟืองและตัวรถ

ระบบเฟือง ทำหน้าที่ ทดความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้เป็นความเร็วรถตามต้องการ และช่วยให้ตัวรถนั้นสามารถเลี้ยวโค้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ
ตัวรถ ทำหน้าที่ รับน้ำหนักของผู้โดยสารและภาระบรรทุก

- ระบบความปลอดภัย

เบรกด้วยระบบไฟฟ้า และ Emergency Switch



รูปที่ 1.1 แสดง Block Diagram ที่ 3 กลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการทำโครงการทั้งปีการศึกษา

- เดือนมิถุนายน - ประชุมตกลงแนวทางในการทำโครงการพร้อมทั้งออกแบบระบบต่างๆ โดยรวมอย่างคร่าวๆ
- เดือนกรกฎาคม - ออกแบบระบบขับเคลื่อน โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำพร้อมทั้งระบบเฟือง
- ทำการทดสอบมอเตอร์ที่ซื้อมากับอินเวอร์เตอร์
 - ศึกษาและเลือกวงจรที่จะใช้ยกระดับแรงงานไฟตรง 48 Vdc ให้เป็น 310 Vdc
 - เลือกใช้วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เนื่องจากต้องการกำลังเอาต์พุตค่อนข้างสูงต่อวงจร TL494 และทำวงจรไฟเลี้ยงจากฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์
- เดือนสิงหาคม - ออกแบบและสร้างตัวรถต้นแบบ โดยใช้ไม้ เป็น โครงสร้าง
- ติดตั้งระบบขับเคลื่อนเข้ากับรถต้นแบบ
 - ออกแบบและสร้างระบบบังคับทิศทางล้อหน้าและล้อหลัง
 - ต่อวงจร แยกกราวด์และวงจรบัฟเฟอร์ ทำตัวเหนี่ยวนำ(L) และหม้อแปลงในวงจรกำลัง
- เดือนกันยายน - ออกแบบและสร้างรางทางตรงบางส่วนเพื่อทดสอบ
- ทำการทดสอบ โดยนำรถมาติดตั้งบนราง โดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุม
 - ทดสอบวงจรกำลังในลักษณะ โอเพนลูป(open loop) แต่เนื่องจากเราพบว่าการทำวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มีขั้นตอนค่อนข้างเยอะประกอบกับเกิดปัญหาในการทำงาน อาจารย์แนะนำให้ใช้วงจรฟูล-ฟูลคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นวงจรที่ง่ายกว่าและสามารถให้กำลังเอาต์พุตที่ต้องการได้เช่นกัน
- เดือนตุลาคม - ทำรางเพิ่มเติมและปรับปรุงระบบบังคับทิศทาง
- ออกแบบและติดตั้งระบบจ่ายไฟที่ราง
 - ทำวงจรฟูล-ฟูลคอนเวอร์เตอร์ในส่วนของโอเพนลูป
- เดือนพฤศจิกายน - ทำการปรับปรุง โครงรถ โดยใช้โครงสร้างเหล็กเพื่อความแข็งแรง
- สร้างรางให้สมบูรณ์แบบยาวประมาณ 50 เมตร
 - ทำวงจรฟูล-ฟูลคอนเวอร์เตอร์ในส่วนของระบบการควบคุมป้อนกลับ (close-loop control)
- เดือนธันวาคม - ทดสอบระบบ โดยรวม
- ปรับปรุงแก้ไขระบบควบคุมรถให้ง่ายต่อการขับเคลื่อน
 - พร้อมแสดงผลงานในงานนิเวศลาดกระบังนิทรรศน์ 20 - 24 ธันวาคม 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เดือนมกราคม - ทดสอบและเก็บผลการทดลอง หาประสิทธิภาพของระบบ
เดือนกุมภาพันธ์ - ทดสอบและเก็บผลการทดลอง หาประสิทธิภาพของระบบ
เดือนมีนาคม - วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปโครงการ
- จัดทำปฏิญญาพนธ์
- สอบปฏิญญาพนธ์ (29 – 30 มีนาคม 2544)



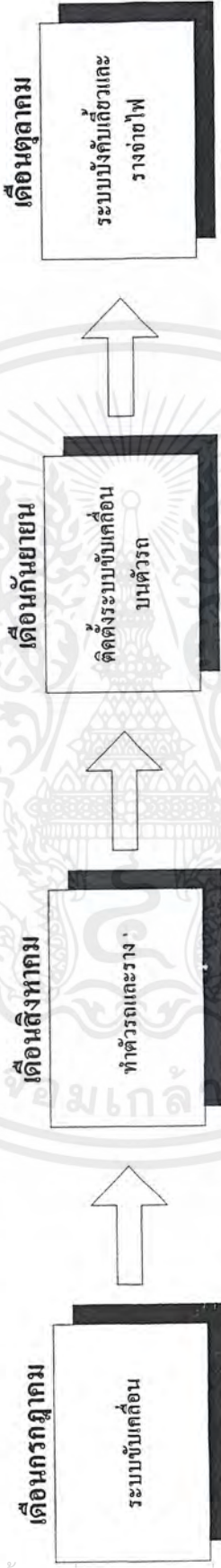
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram แผนการทำงาน

Block Diagram การทำงานในส่วนไฟฟ้า



Block Diagram การทำงานในส่วนเครื่องกล



Block Diagram การทำงานเมื่อรวมระบบไฟฟ้าเข้ากับระบบเครื่องกล



บทที่ 2

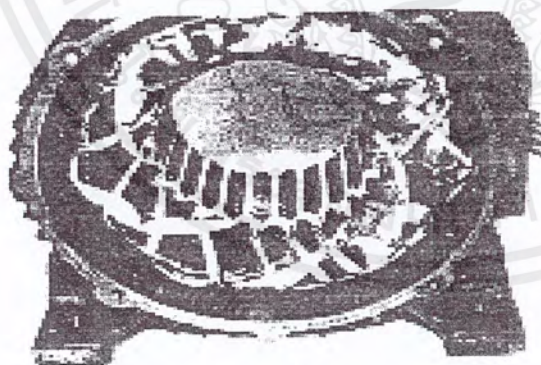
มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ สาเหตุที่เรียกเช่นนี้เพราะการหมุนของมอเตอร์ดังกล่าวเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์ มอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพราะมอเตอร์ชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนัก ต้องการการดูแลรักษาน้อยและมีความเร็วเกือบคงที่ คือความเร็วจากสภาวะไม่มีโหลดจนกระทั่งขับโหลดเต็มที่จะลดลงเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่ข้อเสียก็มีคือ

1. ควบคุมความเร็วได้ยาก
2. ขณะมีโหลดน้อยจะทำงานที่ตัวประกอบกำลังต่ำและถ้าหลัง
3. กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหมุนมักจะสูงเป็น 5 เท่าหรือ 7 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด (ขณะขับโหลดเต็มที่)

2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Induction Motor construction)

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนอยู่กับที่ (stator) และส่วนที่หมุน (rotor) สเตเตอร์มีหน้าที่ยัดขดลวดอาร์เมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในสลีต ทำด้วยแผ่นลามิเนตบางๆอัดเป็นรูปทรง

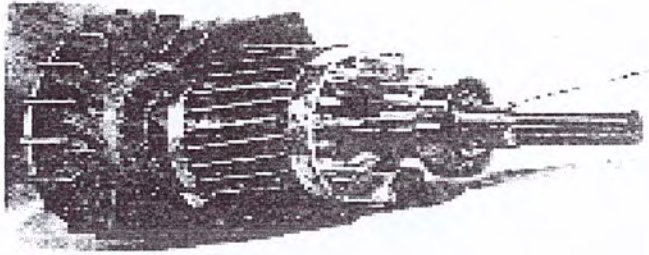


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของสเตเตอร์

โรเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบกรงกระรอก (squirrel cage) มีแท่งตัวนำ (rotor bar) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ภายในโรเตอร์ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำถูกยึดด้วยตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ดังรูป 2.1

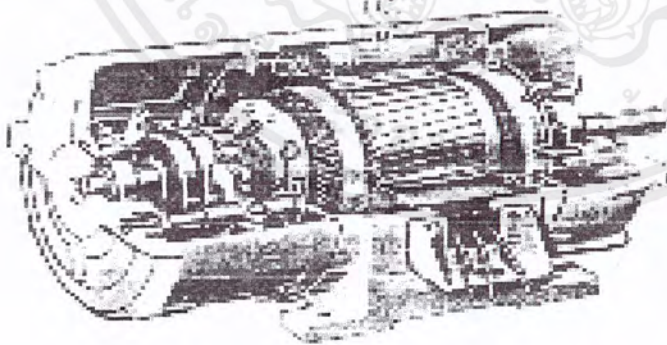
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก

แท่งตัวนำของโรเตอร์มักมีลักษณะเฉียงเพราะจะทำให้โรเตอร์หมุนได้ราบเรียบและลดปัญหาเสียงฮัมของแม่เหล็ก (magnetic hum)

2. แบบขดลวดพันรอบมอเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสปริงซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ดังรูป 2.3 และมีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์



รูปที่ 2.3 ภาพตัดของโครงสร้างภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.2 หลักการทำงาน (Principle of Operation)

ถ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำ และเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิด เป็นผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน กล่าวคือสนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะหมุนด้วยความเร็วเชิงโครนัส (N_s) ซึ่งหาค่าได้จาก

$$N_s = \frac{120 f_e}{P} \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ f_e คือความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสลับที่จ่ายให้มอเตอร์

P คือจำนวนขั้วของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่ตัวนำของโรเตอร์ (e_{ind}) หาค่าได้ดังนี้

$$e_{ind} = (v \times B_s) l \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ v คือความเร็วของโรเตอร์

B_s คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l คือความยาวของโรเตอร์

l

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำของโรเตอร์(B_R)และเกิดปฏิสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กของสเตเตอร์จึงเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ (T_{dR}) ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

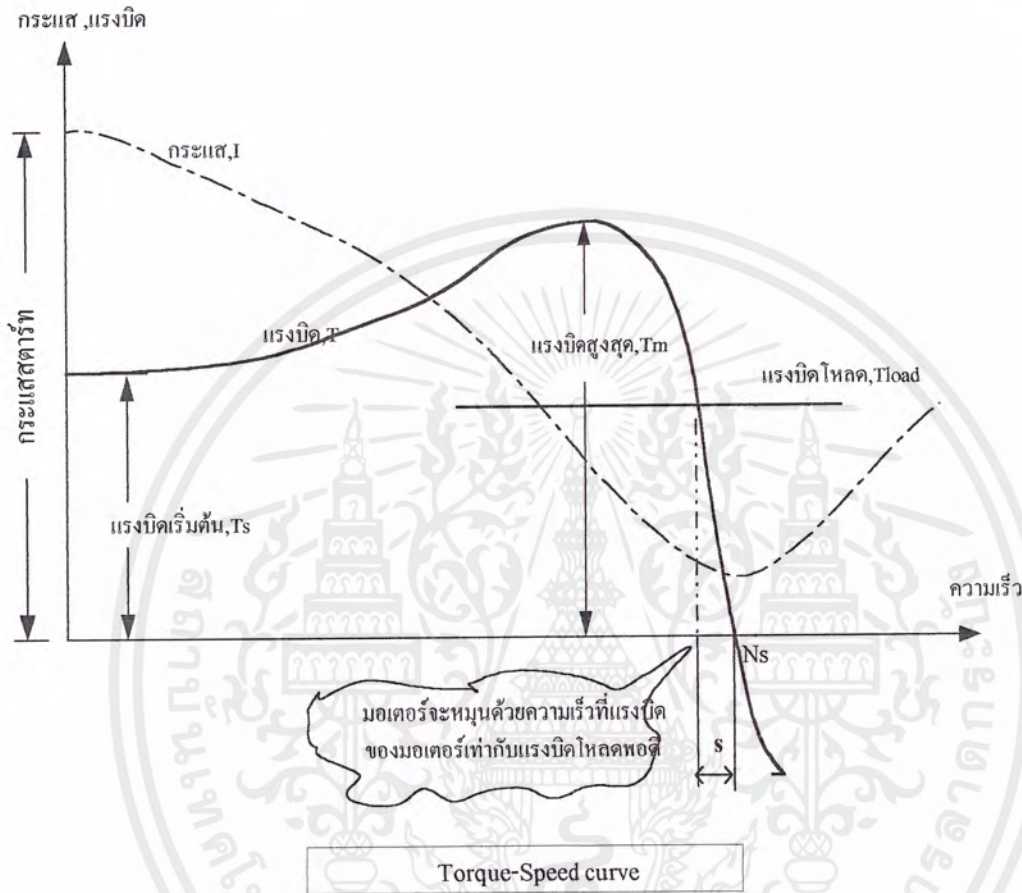
$$T_{dR} = k B_R * B_s \dots\dots\dots(2.3)$$

แรงบิด (T_{dR}) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วเชิงโครนัส ถ้า

ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับเท่ากับความเร็วเชิงโครนัส ค่า e_{ind} และ T_{dR} จะเท่ากับศูนย์ โรเตอร์จึงหยุดหมุน ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วเชิงโครนัสได้

การกลับทิศทางกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำได้ง่ายๆ โดยการสลับสายไฟคู่ใดคู่หนึ่ง ที่จ่ายให้กับขดลวดที่สเตเตอร์เท่านั้น วิธีการนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์หมุนกลับทิศทาง ซึ่งนี่ก็ถือเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของมอเตอร์ชนิดนี้

2.3 คุณลักษณะ (Induction Motor Characteristic)



รูปที่ 2.4 กราฟคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ wound rotor ที่ปรับความเร็วได้จะใช้ความต้านทานที่ปรับค่าจากภายนอกได้ต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดโรเตอร์เพื่อปรับความเร็วหรือเพิ่มแรงบิดเริ่มต้นหมุน มอเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับใช้กับโหลดที่ต้องเริ่มต้นหมุนบ่อยๆ เช่น ปั่นจั่น เป็นต้น

ส่วนงานที่ต้องการกำลังกลค่อนข้างคงที่และเริ่มต้นหมุนไม่บ่อยนัก เช่น ไซเป่าลม ไซซ์บีม พัดลม เป็นต้น จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก

จาก curve แสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว (Torque-Speed Characteristic) ทำให้ทราบข้อมูลในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้น (developed torque) ที่ความเร็วซิงโครนัส

2. curve ของ Torque-Speed เกือบเป็นเส้นตรงระหว่าง no load torque กับ full load torque เราเรียกช่วงนี้ว่า ย่านทำงานปกติ (normal operating range)
3. มีแรงบิดสูงสุด (maximum torque; T_{max}) เป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัด (rated torque)
4. มีแรงบิดเริ่มต้น (starting torque) มากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด
5. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะหมุนกลับทิศนั้นมอเตอร์จะหยุดหมุนอย่างรวดเร็วก่อน เราเรียกว่า plugging ซึ่งนำไปสู่การควบคุมมอเตอร์แบบหนึ่ง
6. ถ้าโรเตอร์ถูกขับให้มีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกลับทิศทางและมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4 สลิป (SLIP)

เมื่อมอเตอร์หมุนขับโหลด ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดต่ำลงจากความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย ขนาดความเร็วที่ลดลงมานี้เรียกว่าสลิป (slip) หาสลิปได้จากสูตรดังนี้

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots\dots\dots (2.4)$$

1. ในขณะสตาร์ท มอเตอร์จะหยุดนิ่ง สลิปจะมีค่า 100% (บางครั้ง แสดงค่าสลิป 1 ก็มี) เมื่อมีมอเตอร์เริ่มหมุน ความเร็วจะเพิ่มขึ้น ค่าสลิปจะมีค่าลดลง จนมีค่าประมาณไม่กี่เปอร์เซ็นต์
2. ถ้าให้มอเตอร์ขับโหลด ด้วยแรงบิดพิกัด ค่าสลิปจะมีค่าระหว่าง 3-5% ถ้าโหลดเพิ่มมากขึ้น ค่าสลิปจะมากขึ้นและกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะเพิ่มสูงมากขึ้นด้วย
3. เมื่อสลิปมีค่าเป็นลบ หมายถึง ความเร็วรอบของมอเตอร์สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ($N_r > N_s$)

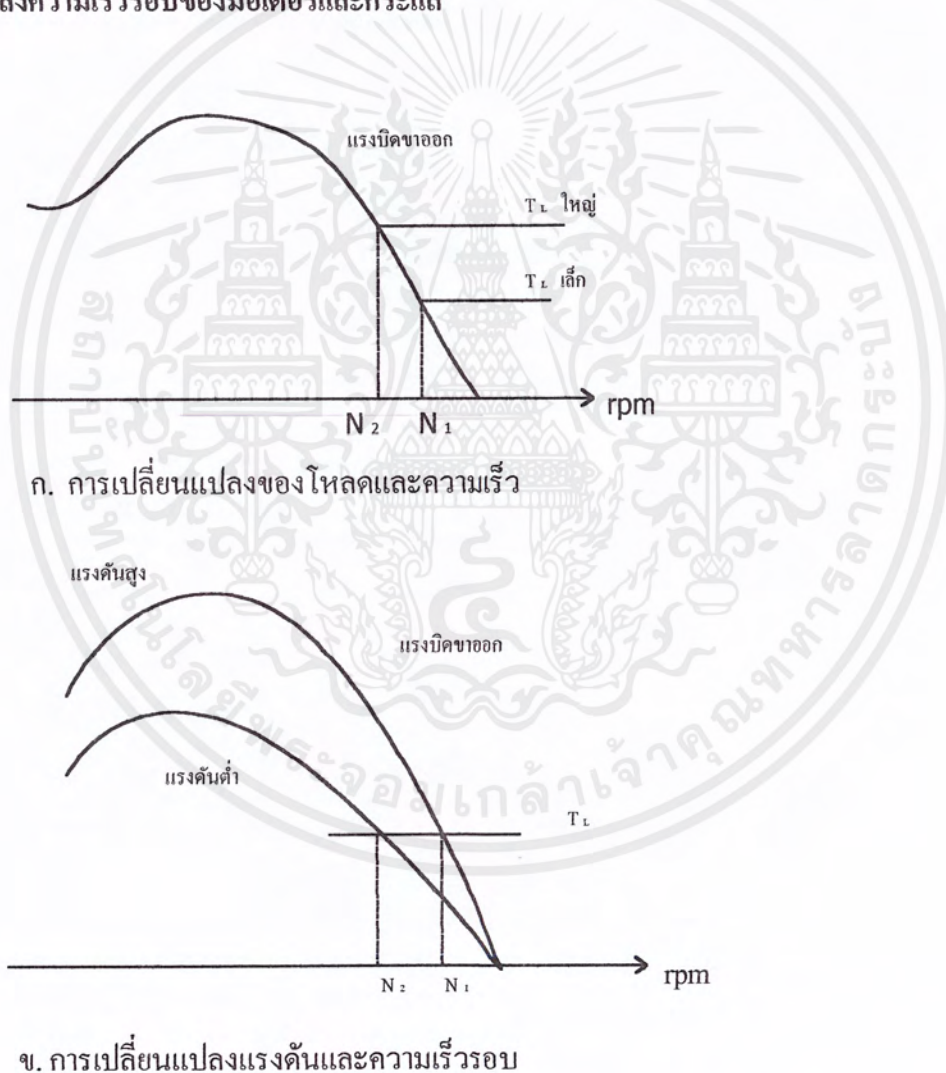
มอเตอร์จะผลิตแรงบิดให้เท่ากับโหลดเสมอ ดังนั้นแม้มอเตอร์จะมีขนาดใหญ่ เมื่อขับโหลดเบาๆ ก็จะมีแรงบิดเบาๆขับมาออกโหลด และจุดสมดุลนั้นจะกำหนดความเร็วมอเตอร์ แต่ถ้าในขณะนั้น โหลดมีการเปลี่ยนแปลง มอเตอร์ก็จะต้องผลิตแรงบิดให้สมดุลกับแรงบิดโหลดนั้น จึงทำให้ความเร็วรอบแตกต่างกันออกไป เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงเสมอ

2.5 กระแสของมอเตอร์

จากรูปกราฟ ความเร็ว-กระแส ในรูป 2.4 จะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบต่ำ (สลีปมีค่ามาก) กระแสมีขนาดใหญ่ ถ้าสลีปมีค่าใกล้ 0 กระแสจะมีค่าเท่ากับกระแสเมื่อไม่มีโหลด (NO LOAD CURRENT) ในมอเตอร์ขนาดเล็ก กระแสเมื่อไม่มีโหลดนี้ จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของกระแสฟลักซ์

เมื่อแรงบิดมีค่าเป็นลบ มอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คราวนี้จะมีพลังงานคืนสู่แหล่งจ่ายไฟ กระแสที่คืนมาจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับขนาดของสลีปในขณะนั้น

2.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์และกระแส



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงค้ำ, โหลด กับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ จะอยู่ที่จุดสมมูลระหว่าง แรงบิดของ โหลด และแรงบิดมอเตอร์

1.) เมื่อแรงบิดของโหลดเปลี่ยนแปลงไป (แรงบิดของมอเตอร์คงที่)จากรูป2.5ก.ถ้าแรงบิดของโหลดมากขึ้นความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงเป็น N_2 แต่ถ้าโหลดลดลงความเร็วรอบก็จะเพิ่มขึ้นเป็น N_1 โหลดยิ่งเพิ่มมากเท่าใด กระแสของมอเตอร์ก็จะไหลมากขึ้นตามไปด้วย

2.) เมื่อแรงดันป้อนมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป (โหลดคงที่)แรงบิดของมอเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันยกกำลัง 2 จากรูป 2.5ข. แรงดันเปลี่ยนแปลงไป แรงดันของมอเตอร์ก็เปลี่ยนไปมีผลทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนไปด้วย โดยทั่วไปเมื่อแรงดันมีขนาดใหญ่ขึ้น กระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะมีขนาดเล็กลง

2.7 แรงบิดพิคก (Rated Torque)

แรงที่เพลาของมอเตอร์ที่ผลิตขึ้นมาเรียกว่า แรงบิด (Torque) ประกติแรงที่กระทำเชิงเส้นจะมีหน่วยเป็น kgf หรือ N แต่แรงบิดเกิดที่เพลาของมอเตอร์ในขณะหมุน จึงเป็นแรงที่เกิดจากการหมุน มีหน่วยเป็น kgf . m หรือ N . m

เราสามารถคำนวณหาแรงบิดพิคกของมอเตอร์ ได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{แรงบิดพิคก } T_M = \frac{\text{พิคกกำลังเอาต์พุต } P_{out}(\text{ watt})}{\text{ความเร็วเชิงมุมที่พิคก } \omega(\text{ rad / sec})} \quad (\text{Nm}) \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

ความเร็วรอบพิคก หมายถึง ความเร็วของมอเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันและความถี่พิคกให้มอเตอร์และมอเตอร์ผลิตแรงบิดพิคกให้โหลด

เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์นั้น การคำนวณหาแรงบิดพิคก อาจใช้ความเร็วรอบซึ่งโครนัสมาใช้ในการคำนวณได้ แต่ถ้าต้องการคำนวณได้อย่างถูกต้องควรใช้ ความเร็วรอบพิคก

แรงบิดพิคกของมอเตอร์มิได้หมายถึงแรงบิดที่มอเตอร์ผลิตขึ้น แต่หมายถึงแรงบิดของโหลดที่มอเตอร์สามารถขับได้ เมื่อมอเตอร์หมุนต่อเนื่องที่ความเร็วรอบพิคก จึงเป็นแรงที่เกิดจากการหมุน มีหน่วยเป็น kgf.m หรือ N.m

2.8 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและความถี่ในโรเตอร์ (Rotor - Induced Voltage and Frequency)

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วซิงโครนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นย่อมมีค่าสูงสุดและขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ($n_r=0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์ (ความถี่ของโรเตอร์) จะเท่ากับความถี่ของสาย กรณีนี้อัตราสลิป เท่ากับ 1 หรือ 100% และเมื่อโรเตอร์หมุน อัตราที่ฟลักซ์แม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำจะช้าลงค่าสลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = s * E_{BR} \dots\dots\dots(2.6)$$

ในทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของสลิป ดังนั้น

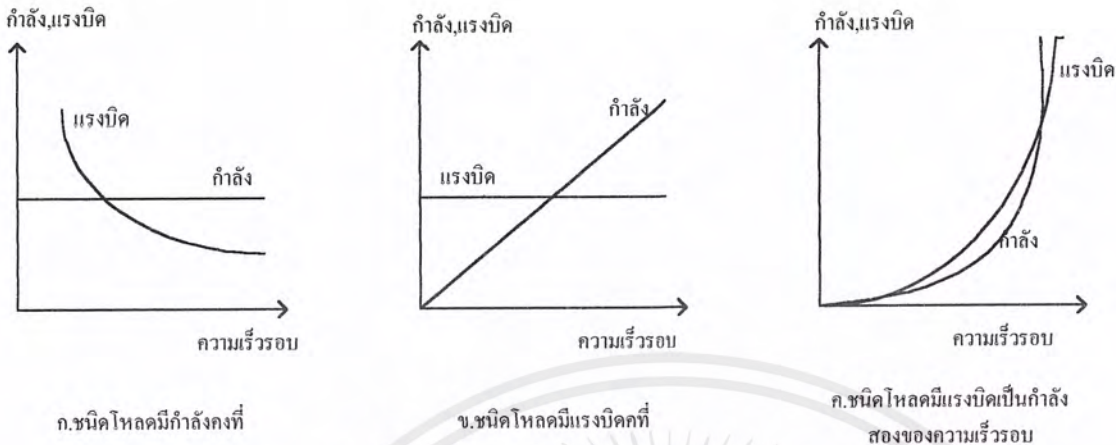
$$f_r = s * f_c \dots\dots\dots(2.7)$$

- เมื่อ E_r = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ
- E_{BR} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่ (blocked rotor induced voltage)
- f_r = ความถี่ของโรเตอร์
- f_c = ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

2.9 การพิจารณาวิเคราะห์สมบัติของโหลด

ก.สมบัติแรงบิด - ความเร็วรอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของโหลดและแรงบิดที่ใช้ในการขับโหลดที่ความเร็วต่างๆ เรียก สมบัติความสัมพันธ์ความเร็วรอบ-แรงบิดของโหลด เครื่องจักรโหลดมีสมบัติความเร็วรอบ - แรงบิด ตามสภาพเฉพาะของโครงสร้าง, สมบัติขณะเดินเครื่อง ฯลฯ ซึ่งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกใช้มอเตอร์



รูปที่ 2.6 กราฟคุณสมบัติแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติแรงบิด-ความเร็วรอบของ โหลด

สมบัติ	ความเกี่ยวข้องระหว่างความเร็วรอบและแรงบิด		ตัวอย่าง โหลด
	กับแรงบิด	กับกําลัง	
โหลดกําลังคงที่	แรงบิดแปรผกผัน ความเร็วรอบ $T \propto \frac{1}{n}$	กําลังคงที่ $P = \text{คงที่}$	(โหลดแบบพิเศษ) ปั้นจั่น, เครื่องปั้นไฟแบบ กําลังคงที่, เครื่องไสตัด เหล็ก
โหลดแรงบิดคงที่	แรงบิดคงที่ $T = \text{คงที่}$	กําลังแปรตาม ความเร็วรอบ $P \propto n$	(โหลดความถี่ต่างๆ , โหลดแรงดึงดูน้ำหนัก ฯลฯ) สายพานส่งของเครื่อง พิมพ์, เครื่องทำกระดาษ, เครื่องปั้นด้ายเครื่องกระทุ้ง อัตโนมัติ, ปีมลูกสูบ
ขณะแปรตามกําลัง สองของความเร็ว รอบ เมื่อแรงบิด โหลดคง	แรงบิดแปรตามกําลังสอง ของความเร็วรอบ $P \propto n^3$	กําลังแปรตามกําลัง สามของความเร็วรอบ $P \propto n^3$	(โหลดของไหล) โบลเวอร์ ปั๊มแรงเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. การเลือกขนาดของฟัดักคักดาและฟัดักกำลังมอเตอร์

ในการเลือกมอเตอร์ให้ใช้งานได้ตามความมุ่งหมายและมีการเลือกใช้พลังงานอย่างประหยัดจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้มอเตอร์ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างฟัดักคักดาและฟัดักกำลัง ยกตัวอย่างถ้าเลือกมอเตอร์ที่มีฟัดักคักดาต่ำขณะฟัดักกำลังที่ต้องการสูงหรือเลือกมอเตอร์ที่มีฟัดักคักดาสูงขณะฟัดักกำลังต่ำก็จะเป็นการเลือกที่ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างขนาดของมอเตอร์ที่ฟัดักคักดาและฟัดักกำลังที่มีใช้อยู่ในท้องตลาดคือ

ถ้าฟัดักคักดาประมาณ 200 โวลต์, ฟัดักกำลังจาก 0.2 – 90 kW

ถ้าฟัดักคักดาประมาณ 400 โวลต์, ฟัดักกำลังจาก 3.7 - 250 kW

ถ้าฟัดักคักดาประมาณ 3000 โวลต์, ฟัดักกำลังจาก 90 - 1000 kW

2.10 รูปแบบที่เลือกใช้

จากทฤษฎีข้างต้นจึงได้ทำการเลือกมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน โดยทำการคำนวณดังต่อไปนี้

$$P_m = F \times V$$

$$P_m = \mu N V = \frac{\mu m g v}{\eta}$$

$$P_m = 0.2 \times 120 \times 9.8 \times 5 / 0.8$$

$$P_m = 1,470 \text{ w}$$

$$P_m \approx 1,500 \text{ W}$$

โดยที่

P_m : ฟัดักกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ที่ต้องการ (watt)

F : แรงที่ใช้ขับเคลื่อนรถ(N-M)

V : ความเร็วของรถที่ต้องการ ในที่นี้ออกแบบความเร็วรถที่ 5 m/s

N : แรงปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำหนักของรถ(N-M)

m : น้ำหนักบรรทุกในที่นี้ออกแบบน้ำหนักบรรทุกรวมตัวรถ 120 kg

η : ประสิทธิภาพของมอเตอร์

μ : ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางซึ่งมีค่า 0.2

จากค่าที่คำนวณได้นำไปเลือกมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 1.5 kW

Volt 220/380 (เคลตต้า/สตาร์)

Amp 6.0/3.5

Rpm 1450

4 pole

2.11 ขั้นตอนการนำไปใช้งานจริง

เนื่องจากมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นมอเตอร์ 3 เฟส จึงต้องใช้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส แต่ในโรงงานนี้อินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในการควบคุมมอเตอร์เป็นอินเวอร์เตอร์สำเร็จรูป เหตุที่ต้องเลือกต่อมอเตอร์แบบเคลตต้าก็เพราะอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์และให้แรงดันเอาต์พุตออกมาเป็นไฟกระแสสลับ 3 เฟส 220 โวลต์ (line to line) ที่พิกัด ซึ่งพิกัดโวลต์เตจที่ได้นี้ หากดูตามป้ายชื่อ (name plate) ของมอเตอร์แล้ว จะต้องเลือกต่อมอเตอร์แบบเคลตต้า

บทที่ 3

หลักการทํางานของอินเวอร์เตอร์และการนำไปใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถสร้างความถี่และแรงดันขนาดต่างๆมาขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อให้หมุนด้วยความเร็วต่างๆ

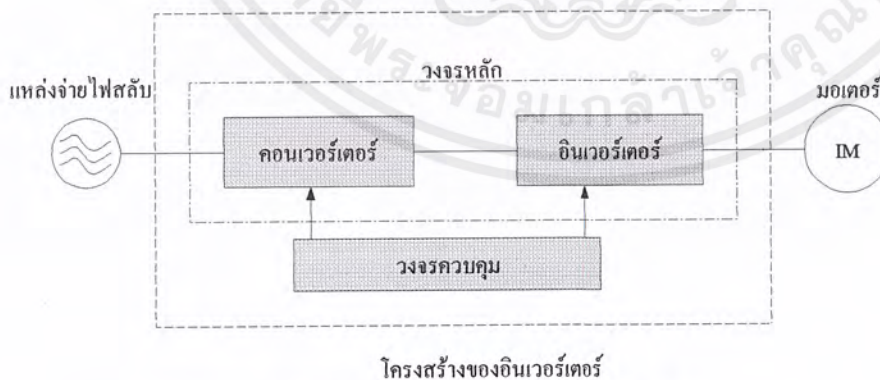
อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงไฟชนิดหนึ่งทีแปลงไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันคงที่ไปเป็นไฟสลับที่มีความถี่และแรงดันขนาดต่างๆ แหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเป็นอินพุทของอินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟสลับทั่วไปที่มีรูปไซน์ แต่เอาต์พุทของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์

จากหลักการทํางานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะผลิตรูปคลื่นขาออกที่ผิดปรกติจะเกี่ยวพันไปถึงการเลือกมอเตอร์และอุปกรณ์รอบข้าง การวัดกระแสแรงดัน ดังนั้นการทำความเข้าใจต่อการทํางานของวงจรต่างๆ ในอินเวอร์เตอร์จึงเป็นเรื่องสำคัญ

สิ่งทีต้องทำความเข้าใจในบทนี้

1. หลักการสร้างรูปคลื่นขาออก (แปรค่าแรงดัน และแปรค่าความถี่ได้)
2. แนวความคิดเกี่ยวกับการตั้งค่าทอร์กบูส (TORQUE BOOST)
3. แนวความคิดเกี่ยวกับเพาเวอร์แฟกเตอร์
4. การนำอินเวอร์เตอร์ไปควบคุมมอเตอร์

3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

จากรูป 3.1 แสดงโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ อินพุทของอินเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับจากแหล่งจ่ายไฟ (50 Hz หรือ 60 Hz) ไฟสลับนี้จะถูกแปลงเป็นไฟตรง โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

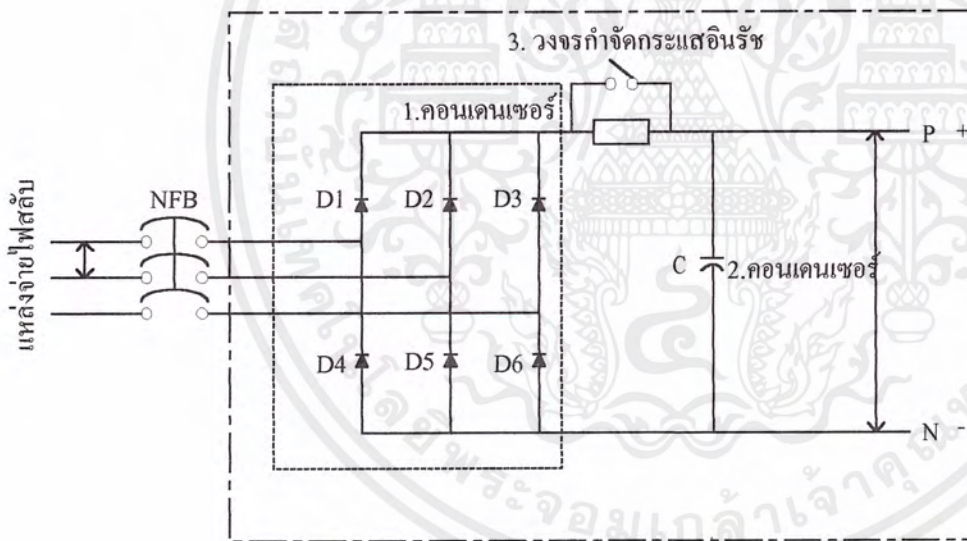
(CONVERTER) จากนั้นไฟตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่สามารถแปรขนาดแรงดันและความถี่ได้ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (INVERTER) วงจรทั้งสองส่วนนี้เป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังมีวงจรควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรทั้งสองส่วนนั้น

อินเวอร์เตอร์ชนิดที่ใช้งานทั่วไป(GENERAL PURPOSE INVERTER) จะประกอบด้วย ส่วนคอนเวอร์เตอร์ และอินเวอร์เตอร์ รวมอยู่ในเครื่องเดียวกันเสมอ

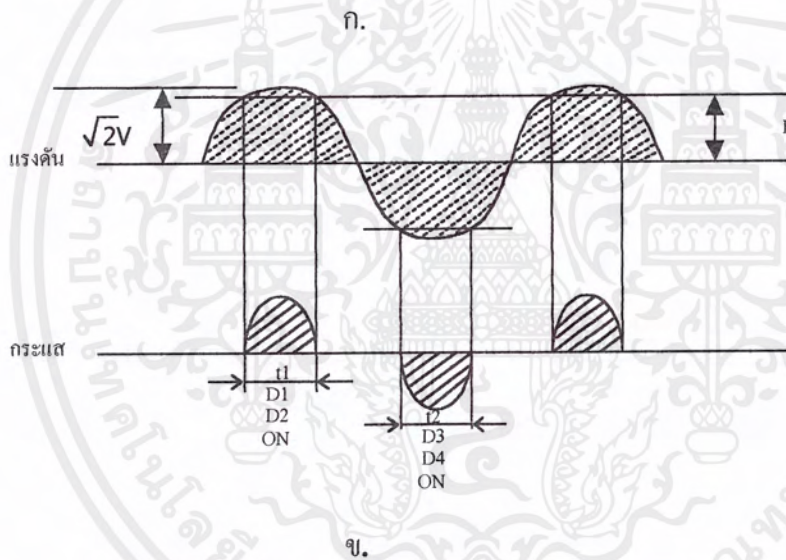
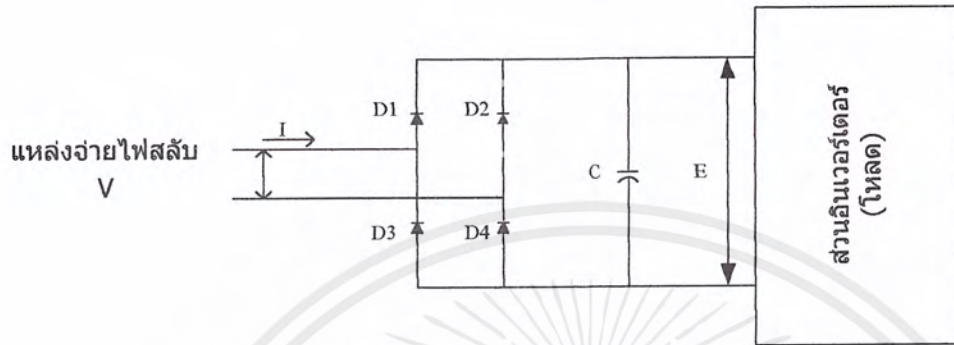
3.2 การทำงานของภาคคอนเวอร์เตอร์ (CONVERTER)

วงจรนี้ทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นกระแสตรง ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ

1. ส่วนคอนเวอร์เตอร์
2. คอนเดนเซอร์
3. วงจรจำกัดกระแสอินรัช (INRUSH CURRENT SUPPRESSION)



รูปที่ 3.2 วงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.3 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

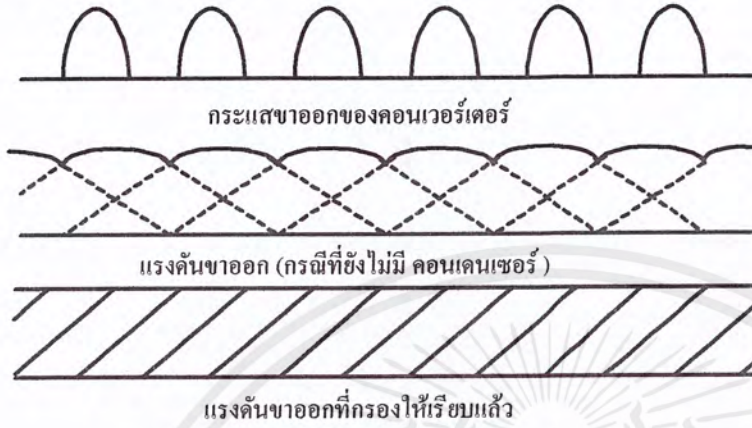
จากรูป 3.3 แสดงหลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งแปลงไฟสลับเฟสเดียวเป็นไฟตรง จะอธิบายถึงรูปคลื่นของกระแสไฟสลับขาเข้า

- อินพุตของคอนเวอร์เตอร์เป็นไฟสลับรูปซายน์ซึ่งมีค่า $V_{rms} = \sqrt{2} \times v$

ถ้าให้แรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ E จากรูป 3.3 จะเห็นว่าจะมีส่วนของแรงดันไฟสลับที่มีแรงดันสูงกว่าระดับ E ส่วนนี้มีช่วงเวลาเท่ากับ t_1 เป็นช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่านไดโอด D1 และไหลกลับทาง D4

- แรงดันไฟสลับส่วนที่เป็นลบ ช่วงเวลาที่แรงดันต่ำกว่าระดับแรงดัน $-E$ คือช่วงเวลา t_2 ช่วงเวลานี้ กระแสจะไหลเข้าทางไดโอด D2 และไหลกลับทาง D3 ตามในรูป

จะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์จะไม่เป็นรูปไซน์ แต่จะเพี้ยนจากรูปไซน์ และมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิก



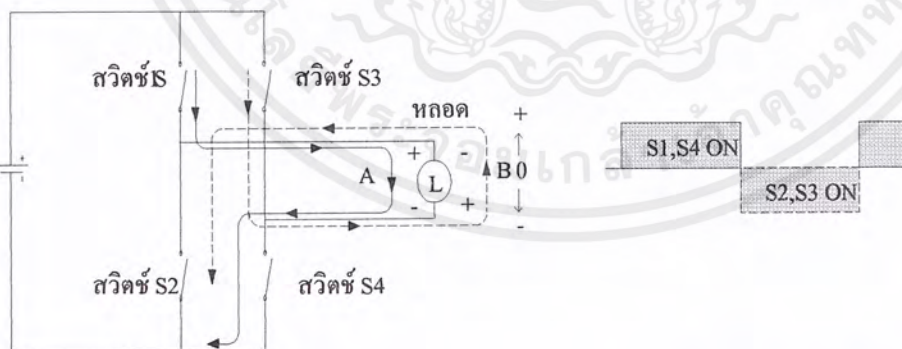
รูปที่ 3.4 รูปคลื่นกระแส และแรงดันขาออก

3.3 การทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์

(1) วิธีการสร้างไฟสลับจากไฟกระแสตรง

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตไฟสลับได้จากแหล่งจ่ายไฟตรง การทำความเข้าใจกับหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ก็ควรเริ่มจากวงจรสร้างไฟสลับเฟสเดียวก่อน

รูปที่ 3.5 อธิบายหลักการเปลี่ยนไฟตรงเป็นไฟสลับ โดยเปลี่ยนโหลดจากมอเตอร์เป็นหลอดไฟเพื่อให้เข้าใจง่าย สวิตช์ 4 ตัว S1,S2,S3 และ S4 ซึ่งต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงและโหลดจะปิด-เปิดสลับกันเป็นจังหวะเพื่อสร้างไฟสลับจ่ายให้กับหลอดไฟ ตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 วิธีการสร้างไฟสลับ

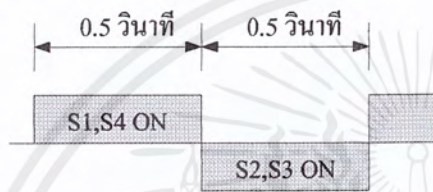
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแส

- เมื่อสวิตช์ S1 และ S4 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านสวิตช์และหลอดไฟตามที่ทิศทาง A
- เมื่อสวิตช์ S2 และ S3 ปิด จะมีกระแสวิ่งผ่านสวิตช์และหลอดไฟตามที่ทิศทาง B ซึ่งตรงกันกับทิศทาง A

ดังนั้นถ้าให้สวิตช์ S1 และ S4 เปิด-ปิด สลับกับสวิตช์ S2 และ S3 ก็จะทำให้กระแสที่ไหลไปที่หลอดกลับทิศทางการสลับไปมาเป็นไฟสลับนั่นเอง

(2)วิธีการแปรความถี่

ถ้าควบคุมเวลาที่เปิด-ปิดสวิตช์ S1-S4 ได้ ก็สามารถแปรความถี่ของไฟสลับได้ ตัวอย่างเช่น ให้สวิตช์ S1 และ S4 ปิด 0.5 วินาที ต่อมาสวิตช์ S2 และ S3 ปิด 0.5 วินาที และทำการปิด-เปิดสลับกันเช่นนี้เรื่อยไป ดังนั้นใน 1 วินาที ไฟสลับจะวิ่งไปกลับครบ 1 รอบ หรือ ไซเคิล ไฟสลับนี้จึงมีความถี่ 1Hz นั่นเอง



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นไฟสลับความถี่ 1 Hz

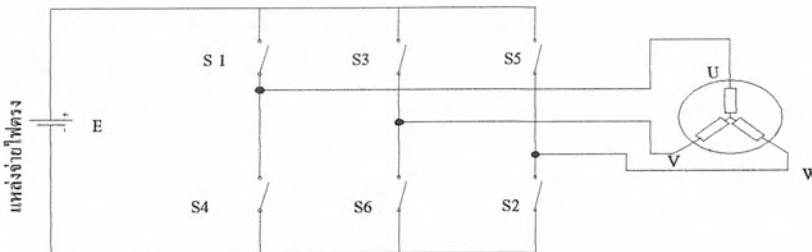
โดยทั่วไปช่วงเวลาที่ S1 S4 และ S2 S3 ปิดจะเท่ากัน เมื่อรวมเวลาที่สวิตช์ทั้งสองชุดปิดเท่ากับ t_0 วินาที เป็น หนึ่ง ไซเคิล ความถี่จะเท่ากับ

$$f = \frac{1}{t_0} \text{ Hz}$$



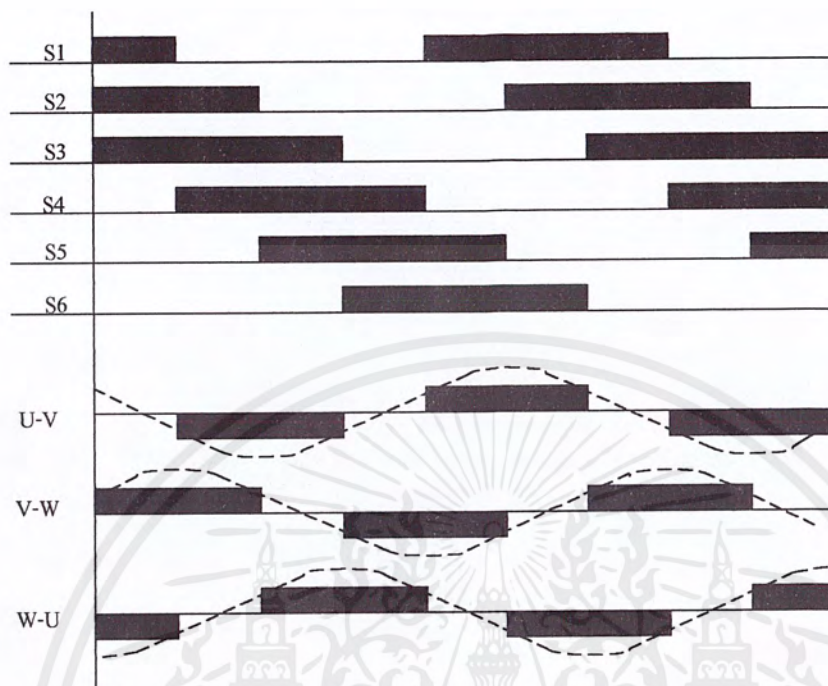
รูปที่ 3.8 ความถี่

(3) กรณีของไฟสามเฟส



รูปที่ 3.9 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

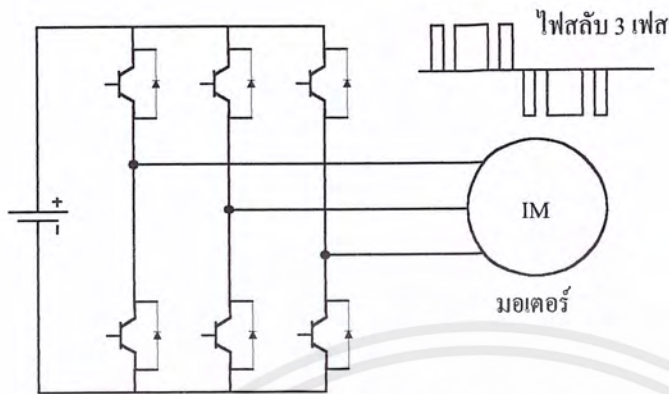


รูปที่ 3.10 การสร้างไฟสลับ 3 เฟส

ถ้าให้สวิตช์ S1 ถึง S6 ในวงจรเปิด-ปิด ตามจังหวะที่แสดงในรูป 3.7 ก็จะมีกระแสไหลผ่านขั้ว U-V, V-W และ W-U ของมอเตอร์ ตามรูปคลื่นแสดงในรูป 3.10 รูปคลื่นของกระแสนี้จะ เป็นไฟสลับของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงกว้าง และ ช่วงห่างระหว่างคลื่นเท่ากัน ถ้าเปลี่ยนช่วงเวลาของการเปิด-ปิดสวิตช์เหล่านี้ ก็จะทำให้ความถี่ของไฟสลับเปลี่ยนไปได้ และถ้าเปลี่ยนขนาดของแรงดันไฟสลับของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเปลี่ยนไปได้เช่นเดียวกัน

(4) โครงสร้างส่วนที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์ทั้ง 6 ตัว ดังแสดงในรูป 3.8 เมื่อต่อเอาท์พุทเข้ามอเตอร์ 3 เฟส และควบคุมให้ทรานซิสเตอร์ ON-OFF ตามจังหวะในรูป 3.7 ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนได้ และถ้าเปลี่ยนลำดับการ ON-OFF ของทรานซิสเตอร์ ก็สามารถบังคับให้มอเตอร์หมุนกลับทางได้



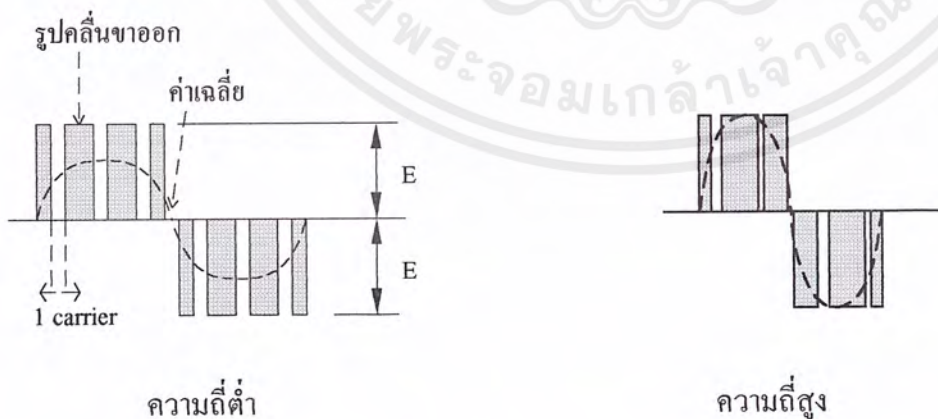
รูปที่ 3.11 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

(5) วิธีเปลี่ยนขนาดแรงดัน

เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ นอกจากการแปรความถี่เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์แล้ว ยังต้องแปรขนาดแรงดันตามความถี่ที่เปลี่ยนไป เพื่อรักษาอัตราส่วน V/f ให้คงที่

การแปรขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์มีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันมากในอินเวอร์เตอร์ชนิดใช้งานทั่วไปคือ วิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดันขาออกที่ป้อนให้มอเตอร์ การแปรรูปคลื่นแรงดันนี้ก็มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่ในโครงการใช้อินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปที่ใช้วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็นรูปซายน์ โดยการควบคุมความกว้างของพัลส์ให้แรงดันเฉลี่ยมีรูปคลื่นเป็นรูปซายน์จึงขอเสนอวิธีนี้ไว้ด้วย

วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็นรูปซายน์



รูปที่ 3.12 การเกิดรูปคลื่นซายน์ที่ความถี่ต่ำ และ สูง

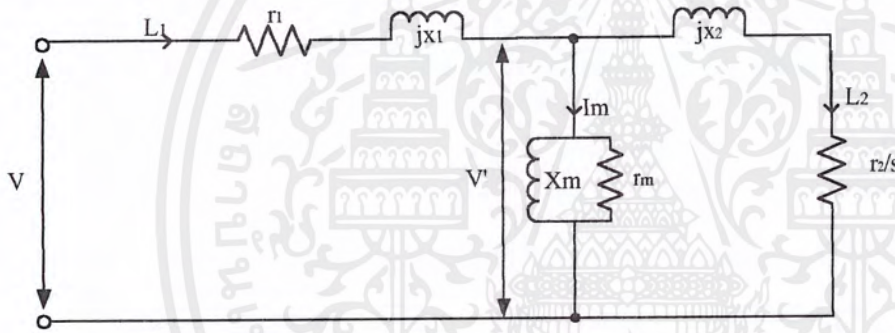
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดเด่น

- เคนมอเตอร์ได้เร็วที่ความเร็วต่ำ
- ฮาร์โมนิกความถี่ต่ำมีขนาดเล็ก

3.4 รูปแบบ V/f และ ทอร์กบูส (TORQUE BOOST)

ขนาดของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์จะแปรตามความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เพื่อรักษาให้รูปแบบ V/f มีค่าคงที่ แต่จากรูป 3.13 เราจะเห็นว่า ในขดลวดสเตเตอร์ หรือขดลวดปฐมภูมิของมอเตอร์นั้นจะมีส่วนที่เป็นความต้านทาน และรีแอคแตนซ์อยู่(รวมเรียกว่า อิมพีแดนซ์) เมื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์จะมีแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์นี้ จึงทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีขนาดลดลง

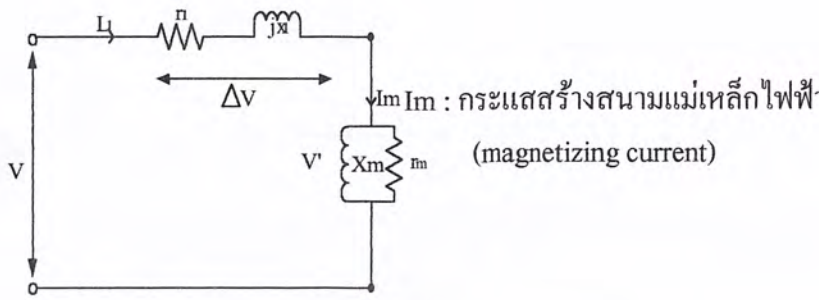


รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| V : แรงดันปฐมภูมิ | I1 : กระแสปฐมภูมิ |
| V' : แรงดันเหนี่ยวนำปฐมภูมิ | I2 : กระแสทุติยภูมิ |
| R1 : ความต้านทานด้าปฐมภูมิ | R2 : ความต้านทานทุติยภูมิ |
| Rm : ความต้านทานของแกนเหล็ก | Xm:รีแอคแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก |
| X1 : รีแอคแตนซ์รั้วไหลปฐมภูมิ | X2 : รีแอคแตนซ์รั้วไหลทุติยภูมิ |
| S : สลิป | Im : กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก |

ในสภาพไม่มีโหลดวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ จะเป็นดังในรูป 3.14 ที่เปิดวงจรทางด้าน

ทุติยภูมิ



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลยกรณีนไม่มีโหลด

เมื่อพิจารณาเฉพาะแรงดันจะได้

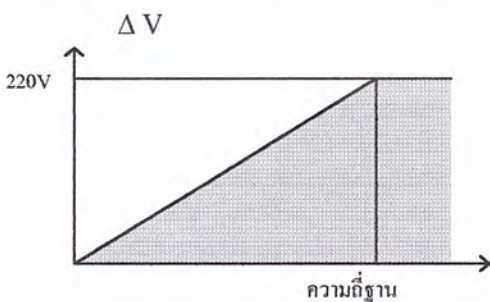
$$V' = V - (jI_m)(R_1 + jX_1) \tag{3.1}$$

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

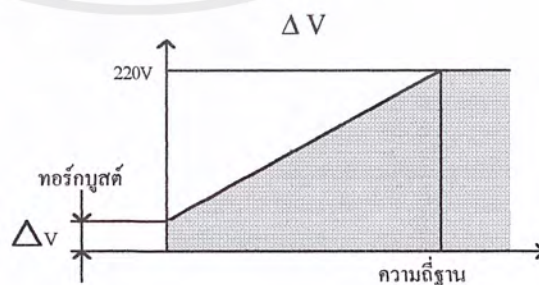
$$V' = V - \Delta V \tag{3.2}$$

ในกรณีที่ต่อมอเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟ 50 Hz หรือ 60 Hz โดยตรง ตัวมอเตอร์จะถูกออกแบบทาง
ด้านขดลวดให้ชดเชยแรงดันตกคร่อมค่าอิมพีแดนซ์นี้แล้ว

แต่ในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์นั้น ขนาดแรงดันขาออกจะแปรตามความถี่ ปัญหา
จะเกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่ำซึ่งแรงดันมีขนาดเล็ก แต่แรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ในสเตเตอร์มี
ขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับแรงดันที่ป้อนเข้ามาในมอเตอร์จึงทำให้แรงบิดของมอเตอร์ในขณะนั้นมี
ขนาดเล็ก เพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ต่ำนี้ ก็เพิ่มแรงดัน ตามสูตร 3.2
เพื่อให้ขนาดแรงดันมีขนาดใหญ่ขึ้น แก้ปัญหาแรงบิดตกต่ำของมอเตอร์ รูป 3.16 แสดงแรงดัน
ที่ชดเชยที่ความถี่ต่ำ การเพิ่มแรงดันนี้เราเรียกว่า ทอร์กบูส (TORQUE BOOST)



รูปที่ 3.15 รูปแบบ V/f อุดมคติ



รูปที่ 3.16 รูปแบบ V/f ที่ใช้งานจริง

3.5 ข้อแตกต่างเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีต่อมอเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟกับการใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์จะทำให้กระแสไหลเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากรูปคลื่นของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ผลิตออกมาจะไม่เป็นคลื่นไซน์ที่เคียวนักจะมีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่ ทำให้กระแสของมอเตอร์มีขนาดมากกว่ากรณีต่อกับแหล่งจ่ายไฟโดยตรงประมาณ 10% และจะทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าด้วย ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากเรื่องนี้เลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับมอเตอร์ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

$$\text{กระแสขาออกพิกัดของอินเวอร์เตอร์} \geq \text{กระแสพิกัดของมอเตอร์} \times 1.1 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

3.6 เหตุที่ต้องเปลี่ยนแรงดันเมื่อแปรความเร็วรอบ

ในบทของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ผ่านมา ความเร็วรอบของมอเตอร์จะขึ้นกับความถี่เท่านั้น แต่เมื่อความถี่เปลี่ยนไปโดยให้ความเร็วรอบคงที่ เช่นลดความถี่ต่ำกว่า 50Hz ในขณะที่แรงดันเป็น 380V จะทำให้ฟลักซ์เพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว กระแสก็จะเพิ่มมากขึ้นและมอเตอร์ก็จะร้อนขึ้นจนเสียหายได้

วิธีการแก้ปัญหานี้คือการรักษาฟลักซ์ให้มีค่าคงที่ ฟลักซ์จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันและจะแปรผกผันกับความถี่ ตามสูตร (3.4) เมื่อแปรความถี่ไปก็ควรแปรแรงดันตามไปด้วย เพื่อให้ค่าฟลักซ์คงที่ ก็จะแก้ปัญหานี้ได้

ทดลองลดความถี่ลงจาก 60Hz เป็น 30Hz อัตราส่วน V/f คงที่

$$\text{ฟลักซ์แม่เหล็ก} \propto \frac{\text{แรงดันไฟ}}{\text{ความถี่}} = \text{คงที่} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\frac{V}{f} = \frac{220}{60} = \frac{110}{30} = \text{คงที่} \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

แรงดันก็ควรลดลงเป็น 110Vด้วย ในทางปฏิบัติค่าแรงดันจะสูงกว่านี้เล็กน้อยเพื่อชดเชยแรงดันตกคร่อมภายในมอเตอร์ (ทอร์กนูนนั่นเอง)

การแปรค่าแรงดันนี้เพื่อแก้ปัญหาคาความร้อนของมอเตอร์ แต่ต้องคิดถึงแรงบิดด้วย ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.7 แรงบิด ของมอเตอร์ที่ถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์

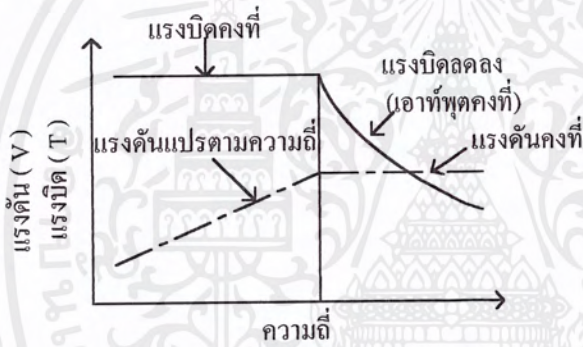
สูตรแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด T กับ แรงดัน V และความถี่ f

$$\text{แรงบิด} \quad T = k \times \frac{V}{f} \times I \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

K : ค่าคงที่ I : กระแส

ย่านการควบคุมโดยการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์ มี 2 กรณีดังนี้

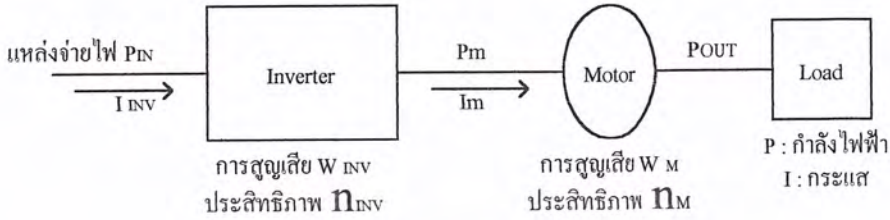
1. ถ้าอิมพีแดนซ์ส่วน V/f คงที่ ก็จะทำให้แรงบิด T คงที่ด้วย เรียกย่านนี้ว่า ย่านแรงบิดคงที่
2. ถ้าให้แรงดัน V คงที่ และให้ความถี่ f แปรค่าไป เรียกย่านนี้ว่า ย่านกำลังคงที่ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.17 การทำงานของมอเตอร์แรงบิดคงที่และแรงดันคงที่

3.8 ประสิทธิภาพและเพาเวอร์แฟกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงไฟ ซึ่งภายในประกอบด้วยส่วนคอนเวอร์เตอร์ แปลงไฟสลับเป็นไฟตรง และส่วนอินเวอร์เตอร์ ที่แปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ ในส่วนแปลงไฟเหล่านี้จะมีการสูญเสียพลังงานอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่า อินเวอร์เตอร์จะช่วยประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสูตรกำลังไฟขาเข้า กับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.18 กำลังไฟฟ้าเข้า และ ออก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าขาออก}}{\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า}} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าขาออก}}{\text{กำลังไฟฟ้าขาออก} + \text{การสูญเสีย}} \dots\dots(3.7)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า } P_{in} = \text{กำลังไฟขาออก } P_m + \text{การสูญเสีย } W_{inv} \dots\dots(3.8)$$

(อินเวอร์เตอร์)

$$\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า } P_m = \text{กำลังขาออก } P_{out} + \text{การสูญเสีย } W_m \dots\dots(3.9)$$

(มอเตอร์)

$$\text{กำลังขาออก } P_{out} = \text{แรงบิดขาออก} \times \text{ความเร็วรอบ} \dots\dots(3.10)$$

(มอเตอร์)

กำลังไฟฟ้าขาเข้าของอินเวอร์เตอร์สามารถหาได้จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟขาเข้าอินเวอร์เตอร์} &= \text{กำลังขาออก} + \text{สูญเสียมอเตอร์} + \text{สูญเสียอินเวอร์เตอร์} \\ &= \frac{\text{กำลังขาออกของมอเตอร์}}{\text{ประสิทธิภาพทั้งหมด}} \dots\dots(3.11) \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ประสิทธิภาพทั้งหมด} = \eta_{inv} \times \eta_M \dots\dots(3.12)$$

จากสูตร 3.11 จะเห็นว่า กำลังไฟขาเข้าทั้งหมดป้อนให้มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ จะมากกว่ากรณีการขับมอเตอร์จากแหล่งจ่ายไฟตรง เนื่องจากการสูญเสียของมอเตอร์เมื่อขับด้วยอินเวอร์เตอร์จะมีมากกว่า เพราะมีผลของฮาร์โมนิก และต้องเพิ่มการสูญเสียของอินเวอร์เตอร์เข้าไปด้วย แต่การขับด้วยอินเวอร์เตอร์สามารถลดความเร็วรอบของมอเตอร์ลงได้ ถ้าแรงบิดโหลดมีค่าคงที่การลดความเร็วรอบจะทำให้กำลังขาออกของมอเตอร์เล็กลง ส่วนนี้จะช่วยประหยัดกำลังไฟฟ้าขาเข้า

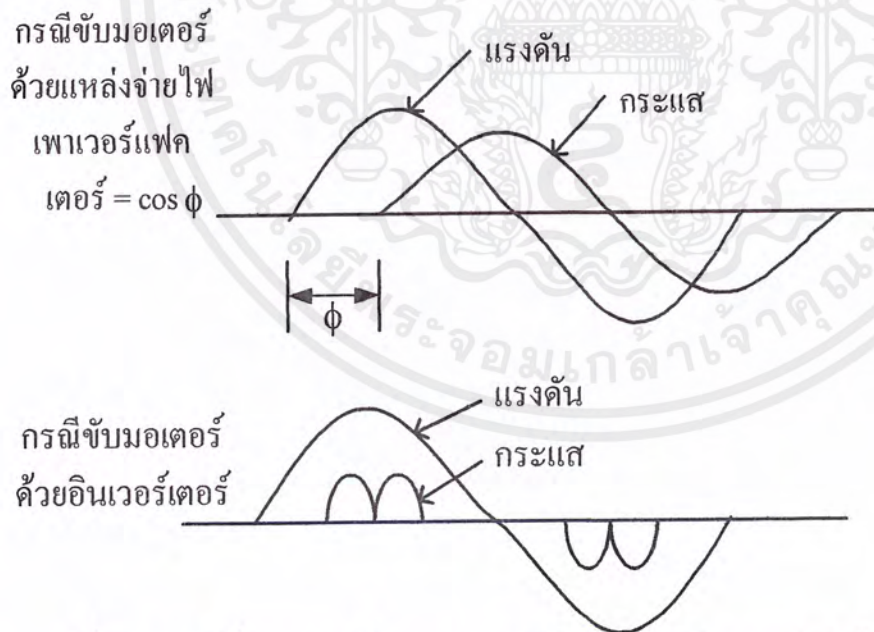
ไปได้มาก โหลดที่ใช้เช่น พัดลม และปั๊มน้ำ ซึ่งทำงานแบบกำลังขาออกแปรตามรอบหมุน การใช้อินเวอร์เตอร์จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าขาเข้าลงได้ เป็นการประหยัดพลังงาน

3.9 เพาเวอร์แฟคเตอร์(POWER FACTOR)

ปรกติเพาเวอร์แฟคเตอร์สามารถหาได้จาก ความต่างเฟสระหว่างคลื่นแรงดันไฟและกระแส แต่ในกรณีของอินเวอร์เตอร์นั้น คลื่นกระแสขาเข้าจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์และมีองค์ประกอบคลื่นฮาร์โมนิกอยู่มาก จึงไม่สามารถใช้ความต่างเฟสในการหาเพาเวอร์แฟคเตอร์ได้ (ถ้าใช้เพาเวอร์มิเตอร์วัดจะอ่านค่าได้ประมาณ 1 เสมอ) เพาเวอร์แฟคเตอร์สามารถหาได้จากอัตรา

$$\text{เพาเวอร์แฟคเตอร์} = \frac{\text{กำลังไฟจริง}}{\text{กำลังไฟปรากฏ}} = \frac{P_{out(inv)}}{VA_{ou(inv)}} \dots\dots(3.13)$$

ส่วนระหว่างกับ กำลังไฟจริง(REAL POWER watt) กับ กำลังไฟฟ้าปรากฏ(APPARENT POWER VA) ตามที่แสดงในสูตร 3.13



รูปที่ 3.19 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเปรียบเทียบกรณีของแหล่งจ่ายไฟ กับ กรณีของอินเวอร์เตอร์

3.10 รูปแบบที่เลือกใช้

จากข้อมูลข้างต้น ทำให้เราตัดสินใจเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สำเร็จรูปคลื่นแบบไซน์ พัลส์วิดท์ มอดดูเลชัน คอนโทรล (SINE WAVE PWM CONTROL) ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เพราะได้รูปไซน์ที่บริสุทธิ์สวยงาม และมีประสิทธิภาพสูง อันเนื่องมาจากฮามอนิกส์ที่ลำดับต่ำๆ ออกมามีขนาดต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์แบบอื่นๆ

3.11 พิกัดของอินเวอร์เตอร์ที่เลือก มีดังต่อไปนี้

-ใช้ FUJI INVERTER รุ่น FVR - C9S-7JE

-พิกัดกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ที่สามารถใช้ได้กับอินเวอร์เตอร์ คือ ตั้งแต่ 0.1 –1.5 kW

-Phase : Single phase

-Voltage range : 220V – 240V

-Frequency : 50/60Hz

-Rate output capacity : 2.7 kVA

-Rate output current : 6.4 A

-Output frequency range : 1-120Hz

-Required power supply capacity : 3.1 kVA

3.12 ขั้นตอนการนำไปใช้งานจริง

1.) นำอินเวอร์เตอร์ไปต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรง 310 Vdc ที่ได้มาจากการแปลงไฟของวงจรคอนเวอร์เตอร์ (พวช-พวล คอนเวอร์เตอร์)

2.) การควบคุมความเร็ว ใช้สัญญาณอนาล็อกจากภายนอก โดยใช้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ 5 โอห์ม ต่อเข้ากับเทอร์มินอลภายนอกของอินเวอร์เตอร์ ที่ เทอร์มินอล 11,12,13 และต้องตั้ง F02 เป็น 1 ซึ่งหมายถึงการควบคุมความเร็วจากภายนอก รูปแบบการต่อสามารถดูได้ที่ภาคผนวกในหัวข้อ External signal Operation

3.) การเดินหน้า-ถอยหลัง ใช้สวิทช์ 2 ทางมาประยุกต์ โดยการต่อเข้าที่เทอร์มินอลภายนอก Forward-Reverse Run และที่ขา Common สามารถดูรายละเอียดได้ที่ภาคผนวกในหัวข้อ Wiring

4.) การตั้งค่าฟังก์ชันอื่นๆ ที่ใช้สามารถดูได้ที่ภาคผนวก ในหัวข้อ Function Explanation โดยจะมีสัญลักษณ์บอกว่าใช้ฟังก์ชันไหนบ้าง

หมายเหตุ ส่วนรูปแบบ โครงสร้าง และหลักการ พร้อมทั้งฟังก์ชัน (Function)การทำงาน ของอินเวอร์เตอร์สามารถอ่านคู่มือของอินเวอร์เตอร์ ได้ที่ภาคผนวก

บทที่ 4

คอนเวอร์เตอร์

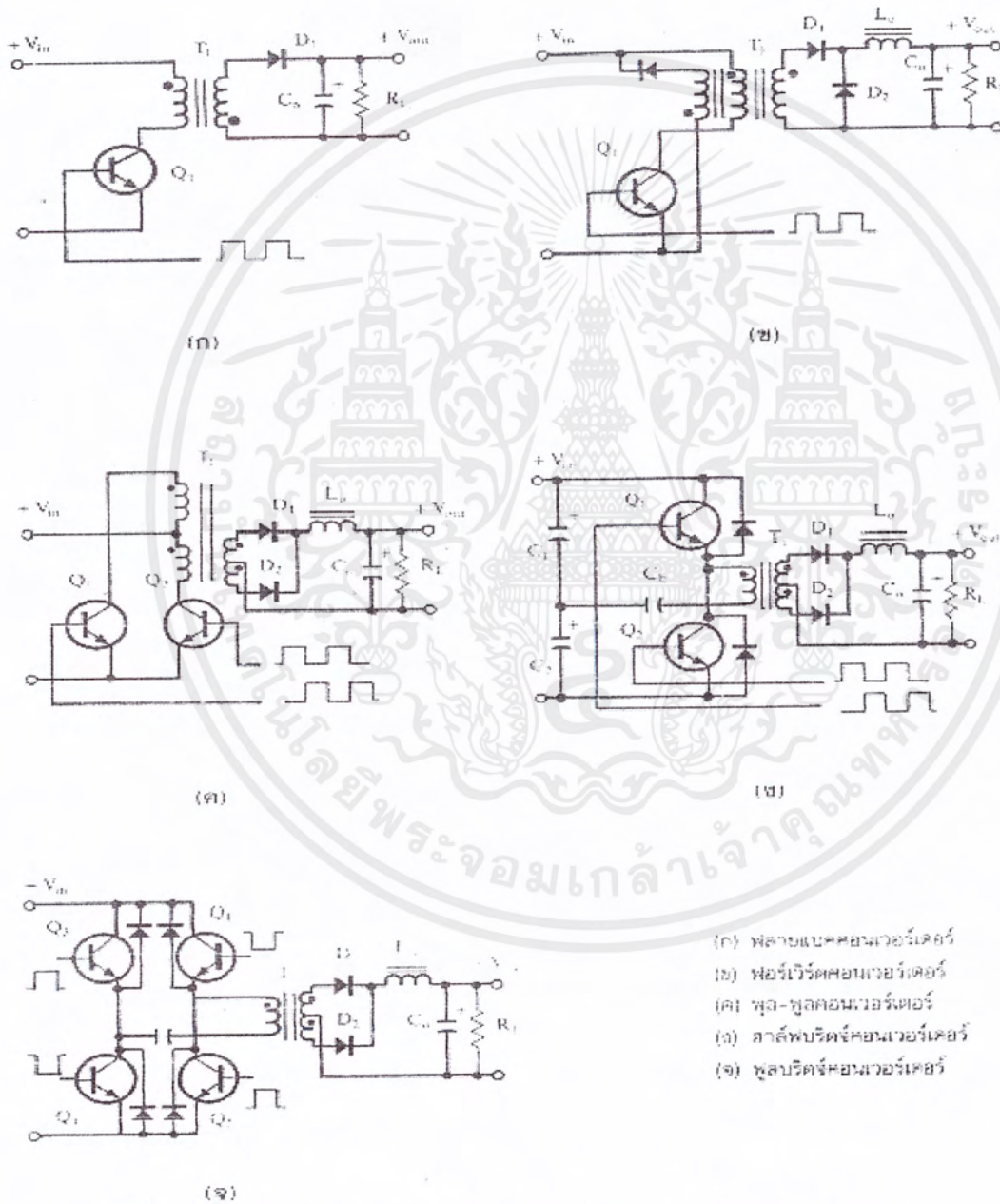
4.1 คอนเวอร์เตอร์(CONVERTER)

คอนเวอร์เตอร์นับเป็นส่วนสำคัญที่สุดในสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (SWITCHING POWER SUPPLY) คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจํวจรภายใน โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป การจะเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายนั้นมีข้อควรพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบดังนี้คือ

1. ลักษณะการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุต (INPUT) กับเอาต์พุต(OUTPUT) ของคอนเวอร์เตอร์
2. ค่าแรงดันอินพุตที่จะนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์
3. ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ (POWER TRANSISTOR) ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
4. ค่าแรงดันสูงสุดตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
5. การรักษาระดับแรงดันในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์มีเอาต์พุตหลายค่าแรงดัน
6. การกําเนิควัดสัญญาณรบกวนของตัวคอนเวอร์เตอร์

จากข้อพิจารณาดังกล่าว จะทำให้ผู้ออกแบบทราบขีดจำกัดของคอนเวอร์เตอร์และประเมินราคาเพื่อที่จะตัดสินใจเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดก็ได้ คอนเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้ในตลาดอุตสาหกรรมของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายคือ

1. ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter)
2. ฟอว์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ (Forward Converter)
3. พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์ (Push-Pull Converter)
4. ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Half-Bridge Converter)
5. ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์(Full-Bridge Converter)



- (ก) ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์
- (ข) ฟอรวอร์ดคอนเวอร์เตอร์
- (ค) พูช-พูลคอนเวอร์เตอร์
- (ง) ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์
- (จ) ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 4.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 5 แบบ แสดงไว้ในรูป (ก) ถึง (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.1(ก) เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 ในฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในลักษณะเป็น สวิตช์ (Switch) และจะนำกระแสตามคำสั่งของพัลส์สี่เหลี่ยม (Square Pulse) ที่ป้อนให้กับขาเบส (base) เนื่องจากหม้อแปลง T_1 จะกำหนดขดไฟปฐมาริ (Primary) และขดเซคันดารี (Secondary) ให้มีลักษณะกลับเฟส (Phase) กันอยู่ ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแส ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอส (Bias) กลับและไม่นำกระแส จึงมีการสะสมพลังงานที่ขดไฟปฐมาริของหม้อแปลง T_1 แทน เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส สนามแม่เหล็กใน T_1 ยุบตัวทำให้เกิดการกลับขั้วแรงดันที่ขดไฟปฐมาริและเซคันดารี D_1 ก็จะถูกไบแอสตรง พลังงานที่สะสมในขดไฟปฐมาริของหม้อแปลงก็จะถูกถ่ายเทออกไปยังขดเซคันดารี และมีกระแสไหลผ่าน ไดโอด D_1 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 และ โหลด (Load) ได้ ค่าของแรงดันที่เอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่การทำงานของ Q_1 , ช่วงเวลาการนำกระแสของ Q_1 , อัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลงและค่าของแรงดันอินพุต

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ให้กำลังงานได้ไม่สูงนัก โดยอยู่ในช่วงไม่เกิน 150 วัตต์ (Watt) และให้ค่าสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง แต่ใช้อุปกรณ์จำนวนน้อยและมีราคาถูก

4.1.2 ฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์

ในรูปที่ 4.1(ข) จะเห็นได้ว่าฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะใกล้เคียงกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่หม้อแปลง T_1 ในฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์จะกำหนดขดไฟปฐมาริและขดเซคันดารีให้มีเฟสตรงกัน ดังนั้นเมื่อ Q_1 นำกระแส ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง แต่ D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่นำกระแส กระแสจึงผ่านไดโอด D_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_0 ไปยังตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 และ โหลดได้ ขณะที่มีการไหลผ่าน L_0 จะมีการสะสมพลังงานไว้ในตัวมันด้วย เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส ไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับ จึงไม่มีกระแสไหลจากขดเซคันดารี สนามแม่เหล็กใน L_0 จะยุบตัว ทำให้มีการกลับขั้วแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันอยู่ ไดโอด D_2 ก็จะถูกไบแอสตรง L_0 จะถ่ายเทพลังงานออกมาทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวมันและ D_2 ออกไปยังโหลดได้ จะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลผ่านโหลดได้อย่างต่อเนื่องทั้งในช่วงที่ Q_1 นำกระแสและหยุดนำกระแส ทำให้มีการกระเพื่อมของแรงดันที่เอาต์พุตต่ำกว่าฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์ให้กำลังงานได้ในช่วงเดียวกันกับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ แต่กระแสที่ได้จะมีการกระเพื่อมที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ตัวอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้ามาจะทำให้ฟอ์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์นั้นมีราคาที่สูงกว่า

4.1.3 พุช-พุลคอนเวอร์เตอร์

พุช-พุลคอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกำลังงานได้สูงตั้งแต่ 500 วัตต์ขึ้นไป แต่มีข้อเสียคือ มักเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์แม่เหล็กของแกนหม้อแปลง ซึ่งจะมีผลต่อการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเทคนิคการควบคุมแบบควบคุมกระแสจะทำให้ลดปัญหานี้ลงได้ ดังนั้นพุช-พุลคอนเวอร์เตอร์จึงเป็นคอนเวอร์เตอร์ที่น่าสนใจสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังสูงๆ

จากรูปที่ 3.1(ค) Q_1 และ Q_2 จะสลับกันนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลาการทำงาน เมื่อ Q_1 นำกระแส D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับ แต่ D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงและนำกระแสผ่าน L_0 ไปยังโหลดได้ เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแส Q_2 จะเริ่มนำกระแส D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและ D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงและนำกระแสผ่าน L_0 ไปยังโหลดได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นโหลดจึงมีกระแสไหลต่อเนื่องได้ตลอดเวลา กระแสที่ได้ทางเอาต์พุตจึงค่อนข้างเรียบ อย่างไรก็ตาม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาจะมีผลต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

4.1.4 ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จัดเป็นคอนเวอร์เตอร์ในตระกูลเดียวกับพุช-พุลคอนเวอร์เตอร์ และให้กำลังงานได้ค่อนข้างสูง ข้อดีของฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ก็คือ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรมีค่าแรงดันตกคร่อมขณะไม่นำกระแสน้อยกว่าคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวมาแล้ว และลดการเกิดไม่สมมาตรฟลักซ์ได้

จากรูปที่ 4.1(ง) จะเห็นได้ว่าหากเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแสค่าแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวที่เหลือจะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตเท่านั้น เมื่อ Q_1 และ Q_2 สลับกันนำกระแสผลที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับการทำงานของพุช-พุลคอนเวอร์เตอร์ ยกเว้นค่าแรงดันตกคร่อมขณะทำงานของขดไฟโรมารี่จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของแรงดันที่อินพุต เนื่องจากผลของการต่อตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เพื่อแบ่งครึ่งแรงดัน กระแสที่ไหลผ่านขดไฟโรมารี่จึงมีค่าสูง ซึ่งเป็นการจำกัดกำลังงานสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ โดยกำลังงานสูงสุดที่ฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์สามารถทำได้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 500 วัตต์

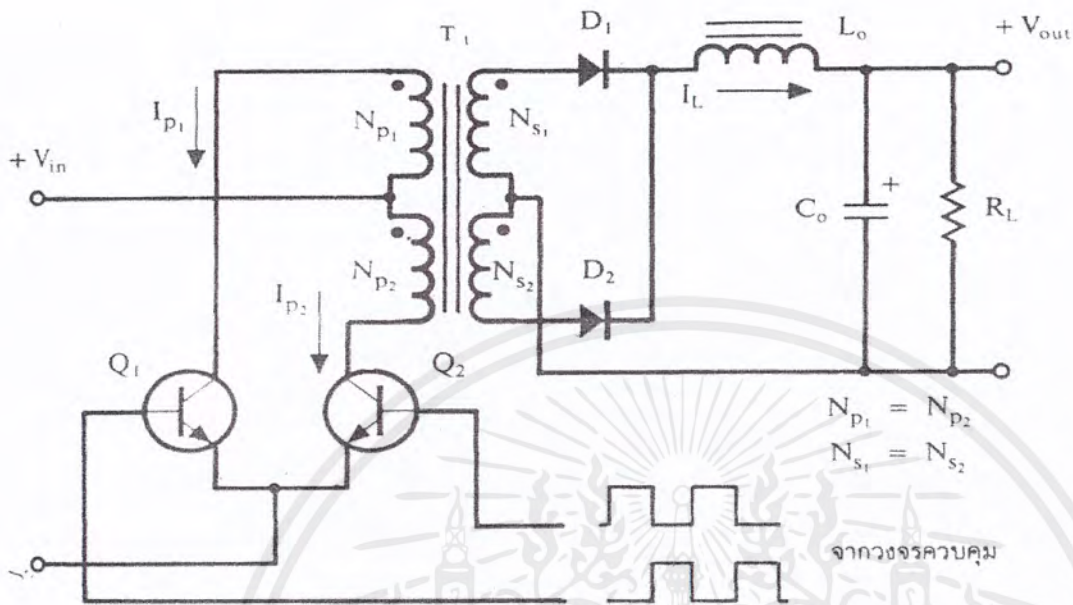
4.1.5 ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 4.1(จ) จะเห็นได้ว่ามีเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรทั้งหมดถึง 4 ตัว แต่จะทำงานสลับกันเป็นคู่ๆ โดย Q_1 จะนำกระแสพร้อมกับ Q_4 และ Q_2 จะนำกระแสพร้อมกับ Q_3 กระแสที่ไหลผ่านขดไฟรอมารีของหม้อแปลงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับฮาล์ฟ-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ แต่ข้อได้เปรียบของฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์ก็คือ ขณะทำงานที่ขดไฟรอมารีจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันอินพุต กระแสที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิจึงมีค่าต่ำกว่าฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์จึงสามารถจ่ายกำลังงานได้สูงกว่า ดังนั้น สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายที่ต้องการกำลังงานสูงๆตั้งแต่ 500 วัตต์ขึ้นไปจึงนิยมใช้ฟูล-บริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นหลัก

สำหรับในส่วนของวงจรที่นำมาใช้งานจะเลือกใช้วงจร พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์สำหรับวงจรยกระดับแรงดันจาก $48 V_{DC}$ เป็น $310 V_{DC}$ เนื่องจากง่ายต่อการออกแบบ สามารถทำงานในกำลังที่ต้องการได้ และราคาไม่แพงและในส่วนของวงจรซัพพลายของชิปต่างๆเลือกใช้วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

4.2 พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรเปลี่ยนระดับแรงดันโดยการใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์หรือเพาเวอร์มอสเฟตจำนวน 2 ตัวกำหนดช่วงเวลาการทำงาน (duty cycle) โดยจะผลัดกันทำงานในแต่ละครั้งคาบเวลาในลักษณะกลับเฟส ผ่านหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อทำการเปลี่ยนระดับแรงดัน อย่างไรก็ตาม เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรยังคงมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสสูงเช่นเดียวกับฟอร์เวิร์ดและฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์รวมทั้งปัญหาในการเกิดปัญหาฟลักซ์ไม่สมมาตรในแกนเฟอร์ไรท์ของวงจรทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ง่าย วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะของวงจรพื้นฐานดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรพื้นฐานของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานโดยผลัดกันนำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลา T ขณะที่ Q_1 นำกระแสจะมีกระแส I_p ไหลผ่านขดไพรมารี N_{p1} และไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับส่วนไดโอด D_2 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงทำให้มีกระแสไหลที่ขดไพรมารี N_{s2} ผ่านไดโอด D_2 และ L_o ไปยังตัวเก็บประจุ C_o และยังไหลด R_L ได้ในจังหวะนี้แรงดันตกคร่อม Q_2 จะมีค่าเป็น $2V_{in}$ (จำนวนรอบ $N_{p1} = N_{p2}$ และ $N_{s1} = N_{s2}$) ในทำนองเดียวกันขณะที่ Q_2 นำกระแส Q_1 และ D_2 จะไม่นำกระแสเนื่องจากถูกไบแอสกลับ D_1 ซึ่งอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรงจะนำกระแสจากขดเซคันดารี N_{s1} ผ่าน L_o ไปยังตัวเก็บประจุ C_o และไหลด R_L จะเห็นได้ว่าในหนึ่งคาบเวลาการทำงานขดเซคันดารีจะให้กระแสไหลผ่าน L_o ได้ถึงสองครั้ง พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์จึงสามารถจ่ายกำลังได้มากตั้งแต่ 500 W ขึ้นไป

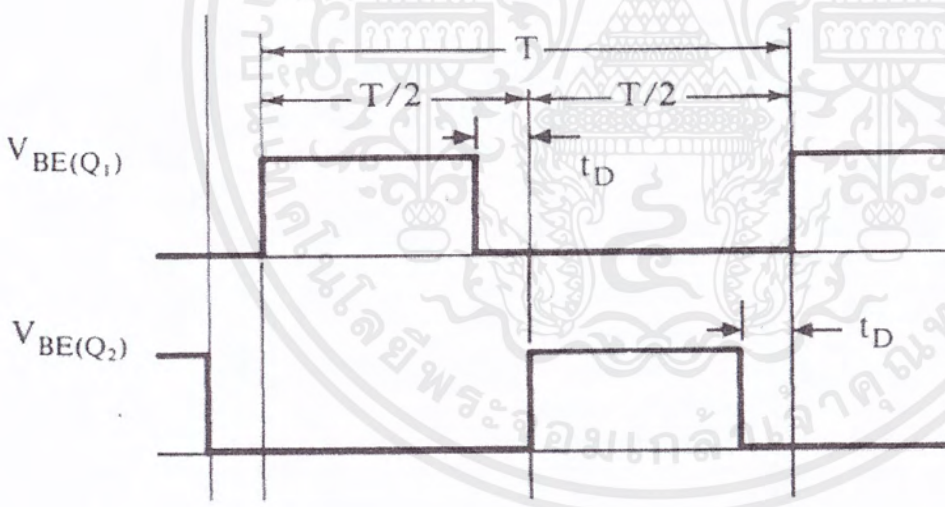
นอกจากนี้ข้อระวังสำคัญในการใช้งานวงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์คือการกำหนดค่าเวลาเพื่อ (dead time) เพื่อไม่ให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มีช่วงเวลานำกระแสมากเกินไปทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ 2 ประการคือ ประการแรกถ้ามีกรณีที่ไหลดถึงกระแสมากเกินไปวงจรควบคุมจะสั่งงานให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งมีค่าช่วงเวลานำกระแสเพิ่มมากขึ้นทำให้อีกตัวหนึ่งมีช่วงเวลานำกระแสลดลงและเกิดการไม่สมมาตรฟลักซ์ขึ้นในแกนเฟอร์ไรท์ของหม้อแปลง แกนเฟอร์ไรท์จะเข้าสู่จุดอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

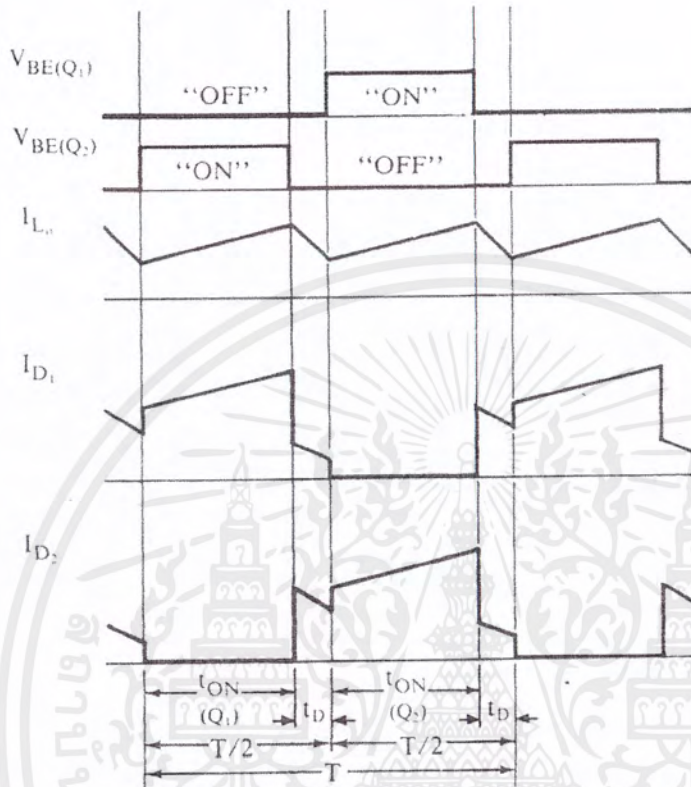
เร็วทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้ (การแก้ไขอาจทำได้โดยใช้เพาเวอร์มอสเฟต) และอีกประการหนึ่งคือ ในการใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะต้องมีช่วงเวลาในการคายประจุทำให้ยังสามารถนำกระแสต่อไปได้อีกช่วงระยะเวลาหนึ่ง ในขณะที่ถ้าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งได้รับไบแอสให้นำกระแสจะทำให้เกิดนำกระแสของทั้ง 2 ตัวพร้อมกันในกรณีนี้แรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์จะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตทำให้เกิดการพังเสียหายอย่างรวดเร็ว การกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D กำหนดดังนี้

$$t_{ON(MAX)} = 0.4 T \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

$t_{ON(MAX)}$: ช่วงเวลาที่คอนเวอเตอร์ทำงาน
 T : คาบเวลาการทำงาน



รูปที่ 4.3 การกำหนดค่าเวลาเพื่อ t_D ให้กับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 4.4 ลักษณะของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D1 และ D2 และกระแสที่ไหลผ่านเอาต์พุตโหลด L_o ขณะวงจรทำงาน จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดทั้ง 2 ตัวในเวลา t_d มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากมีการถ่ายเทพลังงานจากขดไฟรมารี่ในช่วงนี้ทำให้กระแสที่ไหลในไดโอดตัวหนึ่งมากกว่าอีกตัวหนึ่งสลับกันไป ตามการทำงานของขดไฟรมารี่แต่ละขด

4.2.1 การออกแบบวงจรพุก-พุลคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรจะต้องรู้ค่าต่างๆเบื้องต้นก่อนดังนี้

- แรงดันที่ต้องการทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุต
- กำลังที่ใช้งานของอินเวอร์เตอร์
- คิวซีไอเคิลที่ใช้งาน
- แกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้ทำหม้อแปลงสวิตชิ่งมีค่า B (ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก) และพื้นที่หน้าตัด ที่ใช้งาน
- ความถี่ที่ใช้งานของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดค่าโดยประมาณของ แรงดันกระเพื่อม (ripple)

นำค่าต่างๆมาคำนวณตามลำดับดังนี้

จำนวนรอบขดไพรมารี

$$E_p = 4.44 N_p f B A \quad \dots\dots(4.2)$$

E_p : แรงดันทางค้ำไพรมารี

N_p : จำนวนรอบของขดลวดทางค้ำไพรมารี

f : ความถี่ที่ใช้งานของอินเวอร์เตอร์

B : ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์

A : พื้นที่หน้าตัดตรงกลางของแกนเฟอร์ไรท์

จำนวนรอบของหม้อแปลง

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 2 \frac{N_s}{N_p} D \quad \dots\dots(4.3)$$

V_{out} : ค่าแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์

V_{in} : ค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์

N_s : จำนวนรอบของขดลวดทางด้านเซคคันดารี

N_p : จำนวนรอบของขดลวดทางค้ำไพรมารี

D : ดิวตี้ไซเคิล

ค่ากระแสที่ไพรมารีโดยประมาณ จาก

$$I_p = \frac{P}{V_{IN}} \quad \dots\dots(4.4)$$

I_p : กระแสทางค้ำไพรมารี

P : กำลังที่ใช้งาน

V_{IN} : แรงดันอินพุต

กระแสทางดำนเซคชั่นคาร์รี่โดยประมาณจะมีขนาด

$$I_S = \frac{P}{V_{OUT}} \quad \dots\dots(4.5)$$

I_S : กระแสทางดำนไพรมารี

P : กำลังที่ใช้งาน

V_{OUT} : แรงดันอินพุต

ซึ่งจากค่ากระแสทางดำนไพรมารีจะนำไปออกแบบ ขดลวดทางดำนไพรมารีโดยจะออกแบบให้ทนกระแสได้ประมาณ 2 เท่า และทำการเลือกมอสเฟตกำลังที่สามารถทนกระแสและแรงดันได้ รวมถึงไดโอดที่สนับสนุนเบอร์ด้วย

สำหรับทางดำนเซคชั่นคาร์รี่จะนำไปออกแบบ ขดลวดทางดำนไพรมารีโดยทนกระแสได้ประมาณ 2 เท่าเช่นกัน และนำไปใช้ในการเลือกไดโอดทางดำนเอาต์พุต ค่าเอาต์พุตโวลต์ สามารถหาช่วงเอาต์พุตโวลต์ได้จาก

$$L_{O(min)} = (V_{OUT} + V_D) \frac{ESR}{2V_{ripple}} (T - 2t_{on(max)} \frac{V_{in(min)}}{V_{in(max)}}) \quad \dots\dots(4.6)$$

$$L_{O(max)} = \frac{(V_{OUT} + V_D)(T - t_{on(max)})}{\Delta I_O \times 2t_{on(max)}} \times t_R \quad \dots\dots(4.7)$$

$$ESR = \frac{V_{ripple}}{\Delta I_O} \quad \dots\dots(4.8)$$

โดย	$L_{O(min)}$: ค่าต่ำสุดของเอาต์พุต โวลต์
	$L_{O(max)}$: ค่าสูงสุดของเอาต์พุต โวลต์
	V_{OUT}	: แรงดันเอาต์พุต
	V_D	: แรงดันตกคร่อม ไดโอด
	ESR	: ค่าความต้านทานของ C
	V_{ripple}	: แรงดันริบเบิลของแรงดันเอาต์พุต
	$t_{on(max)}$: ช่วงเวลาทำงานที่ควิต์ไซเคิลมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T	: คาบเวลาการทำงาน
$V_{in(min)}$: ค่าต่ำสุดของแรงดันอินพุต
$V_{in(max)}$: ค่าสูงสุดของแรงดันอินพุต
ΔI_o	: ค่ากระแสที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด
t_r	: ค่าเวลาคืนตัวตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด

4.2.2 ทำการออกแบบวงจรที่ใช้งานจริง

ทำการออกแบบวงจรพุ่ม-พุดคอนเวอร์เตอร์ขนาด 1500 W แรงดันอินพุต 48 V_{DC} แรงดันเอาต์พุต 310 V_{DC} ให้มีค่าแรงดันกระเพื่อม (ripple) 0.01% และใช้แกนเฟอร์ไรท์ขนาด EE - 80 จำนวน 2 แกน

หาค่าจำนวนขดรอบไพรมารี

จากสมการที่ (4.2) เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ขนาด EE-80 เลือกค่า $B = 1500$ เกาส์ และมีค่าพื้นที่หน้าตัด $2(1.98 \times 1.98) \text{ cm}^2$ ทำงานที่ความถี่ 25 kHz

ได้ค่า $N_p = 3.67$ รอบ

$$48 = 4.44 \times N_p \times 2.5 \times 10^3 \times \frac{1500}{1000} \times 2 \times 1.98^2 \times 10^{-4}$$

หาค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ (turn ratio) จากสมการที่ และกำหนดช่วงเวลาการทำงาน (duty cycle) ของการทำงานที่สภาวะคงที่ (steady state) คือ 0.3

$$\frac{310}{48} = 2 \times \frac{N_s}{N_p} \times 0.3$$

จะได้ค่าอัตราส่วนจำนวนรอบ (N_s/N_p) = 10.76 ใช้ 11

หาค่ากระแสทางด้านไพรมารี

$$I_p = \frac{1500}{48}$$

ได้ค่า $I_p = 31.25 \text{ A}$

เลือกใช้ขดลวดเบอร์ 25 ทนได้ 200 °C ที่ เกี่ยวข้องจำนวน 20 เส้น

เลือกใช้หม้อสเฟตเบอร์ IRFP 250 (ทนกระแสได้ 21 A และ ทนแรงดันได้ 200 V) ต่อขนานกัน

2 ตัว จำนวน 2 ชุด

หาค่ากระแสทางคานเซคันคาร์

$$I_S = \frac{1500}{310}$$

ได้ค่า $I_S = 4.84$ A

เลือกใช้ขดลวดชนิดเดียวกับทางคานไพรมารีที่เกี่ยวข้องจำนวน 6 เส้น

เลือกไดโอดทนกระแสได้ 8 A และทนแรงดันเบรคควาน์ 1000 V

จากข้อมูลของขดลวดและอัตราส่วนจำนวนรอบข้างคานนำมาออกแบบหม้อแปลงสวิตจิ่ง

ได้หม้อแปลงมีจำนวนรอบไพรมารีต่อทางคานเซคันคาร์ 5:55

กำหนดค่า V_{ripple} ประมาณ 0.01 % ของ V_O และค่า ΔI_O มีค่า 12 A

(ลดลงจาก 18 A เหลือ 6 A)

$$ESR = \frac{0.01\% \times 310}{12}$$

จะได้ค่า ESR 2.6×10^{-3}

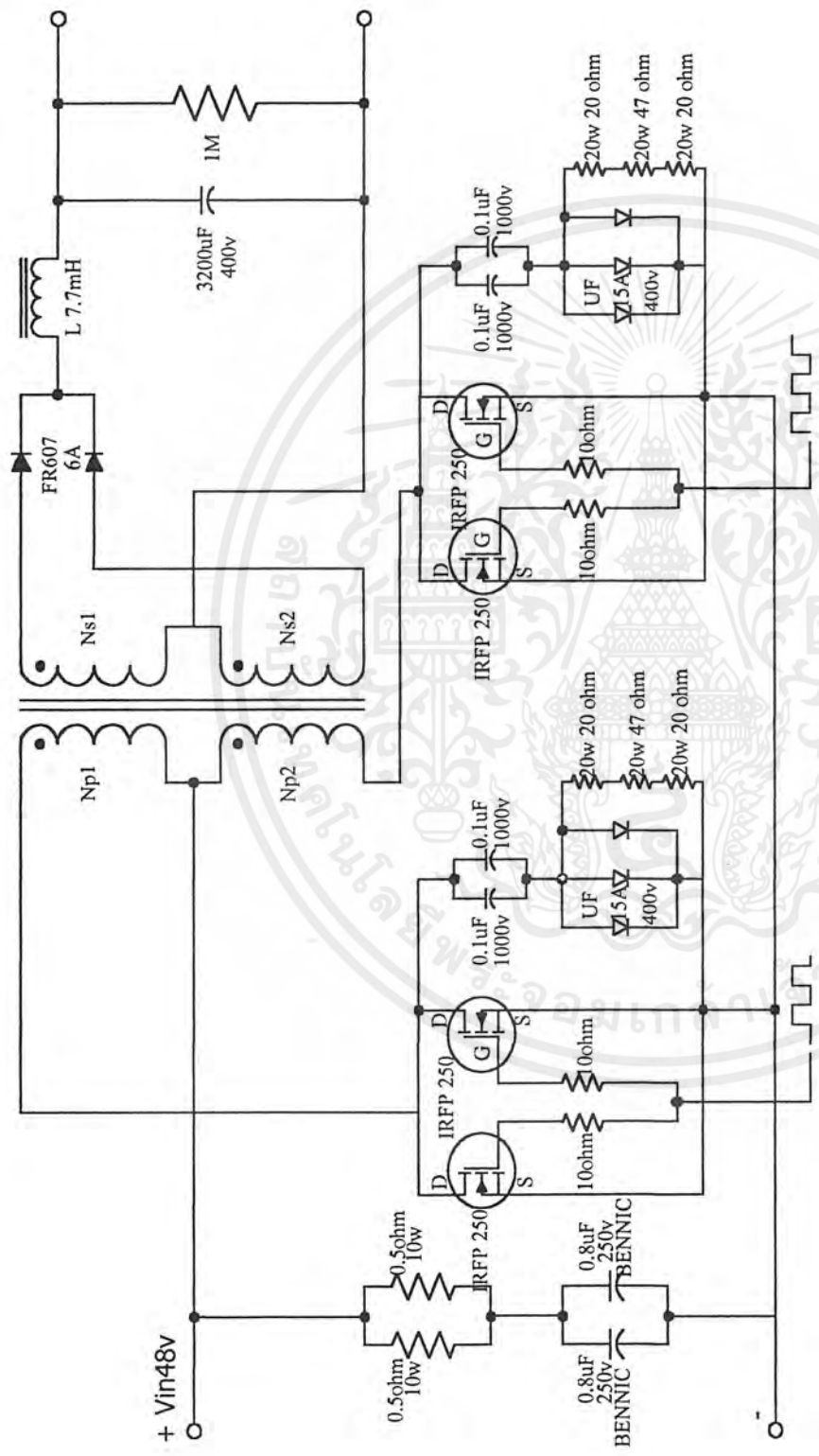
จากสมการหา ค่าเอาต์พุตโวลต์ ดังนี้

$$L_{O(\min)} = (310+1) \times \frac{2.6 \times 10^{-3}}{2 \times 0.01\% \times 310} \times (40 \times 10^{-6} - 2 \times 16 \times 10^{-6} \times \frac{47}{52})$$

จะได้ค่า $L_{O(\min)} = 0.144$ mH

$$L_{O(\max)} = \frac{(310+1)(40 - 16)}{12 \times 2 \times 16} \times 22 \times 10^{-6}$$

ได้ค่า $L_{O(\max)} = 6.8$ mH และ ค่า CO เลือกใช้ที่ 2200 μF

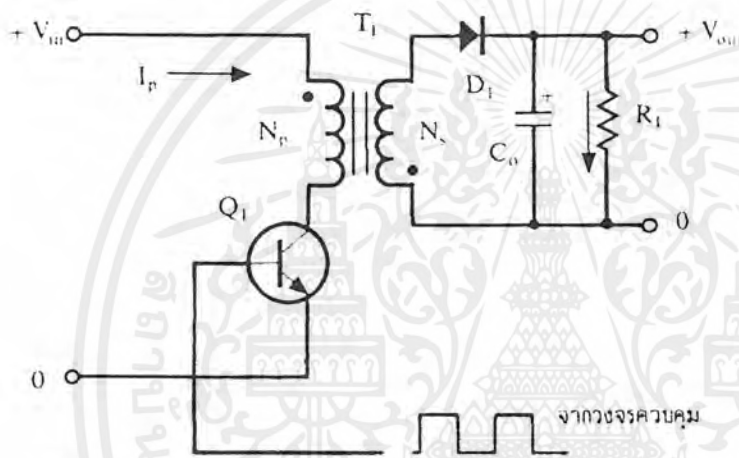


รูปที่ 4.5 วงจรพุ่ม-พุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทำงานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

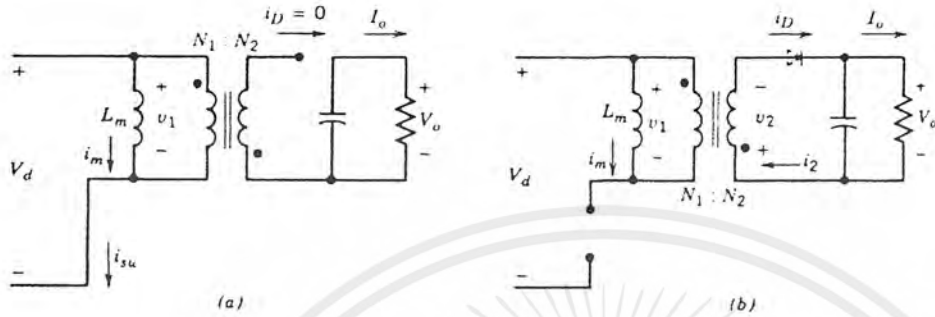
4.3 ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter) มีค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำเหมาะสำหรับวงจรที่ต้องการกำลังไฟฟ้าในช่วง 50 W ถึง 150 W ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มีข้อเสียคือ แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าแรงดันกระเพื่อม (ripple) สูง และมอสเฟตจะต้องทนแรงดันได้สูงกว่าแรงดันอินพุตมากทำให้หาซื้อได้ยาก วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นดังในรูปที่

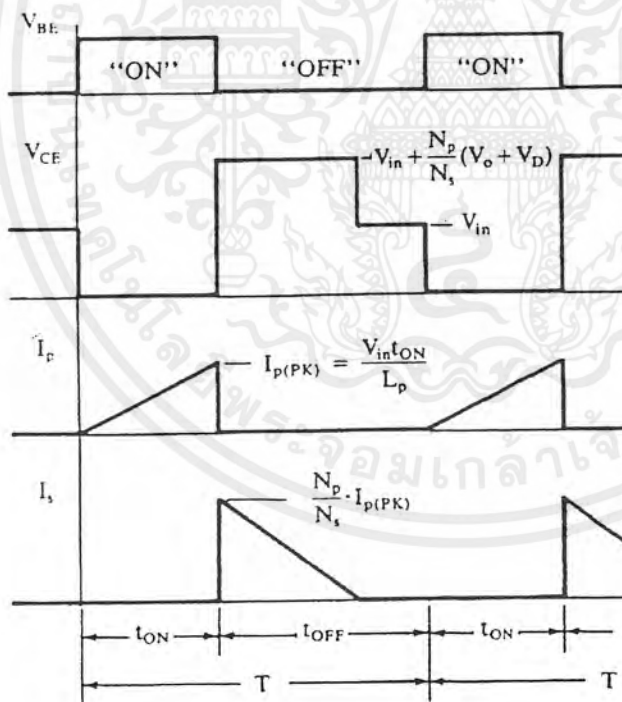


รูปที่ 4.6 แสดงวงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์นั้นเริ่มจากทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงานโดยนำกระแสและหยุดนำกระแส เมื่อ Q_1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดไพรมารี (I_p) แต่เนื่องจากหม้อแปลงถูกกำหนดให้ขดไพรมารีและขดเซคันดารีพันอยู่ในลักษณะกลับทิศทางกันดังนั้นในขณะที่ Q_1 นำกระแสไดโอด D_1 จะอยู่ในลักษณะถูกไบแอสกลับและไม่มีการไหลผ่านไปยังโหลด R_L พลังงานจึงถูกสะสมไว้ที่ขดไพรมารีของหม้อแปลง เมื่อ Q_1 หยุดนำกระแสสนามแม่เหล็กในแกนหม้อแปลงยุบตัว ทำให้มีการกลับขั้วของแรงดันที่เซคันดารี ไดโอด D_1 จึงอยู่ในลักษณะถูกไบแอสตรง พลังงานที่ถูกสะสมไว้ที่ขดไพรมารีจะถูกถ่ายโอนไปยังขดเซคันดารี และมีการไหลผ่านไปยังโหลดและตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_0 ได้



รูปที่ 4.7 สถานะการทำงานของ ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ 1) ขณะON 2)ขณะOFF



รูปที่ 4.8 สัญญาณของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การออกแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

สมการที่ใช้ในการหาอัตราส่วนจำนวนรอบคือ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_S}{N_P} \times \frac{D}{1-D} \quad \dots\dots(4.9)$$

โดย

V_{out} : ค่าแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์

V_{in} : ค่าแรงดันอินพุตของคอนเวอร์เตอร์

N_S : จำนวนรอบของขดลวดทางด้านเซคคันดารี

N_P : จำนวนรอบของขดลวดทางด้านไพรมารี

D : ดิวตี้ไซเคิล

และสามารถหาค่าต่างๆโดยใช้หลักการเดียวกับการออกแบบพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์

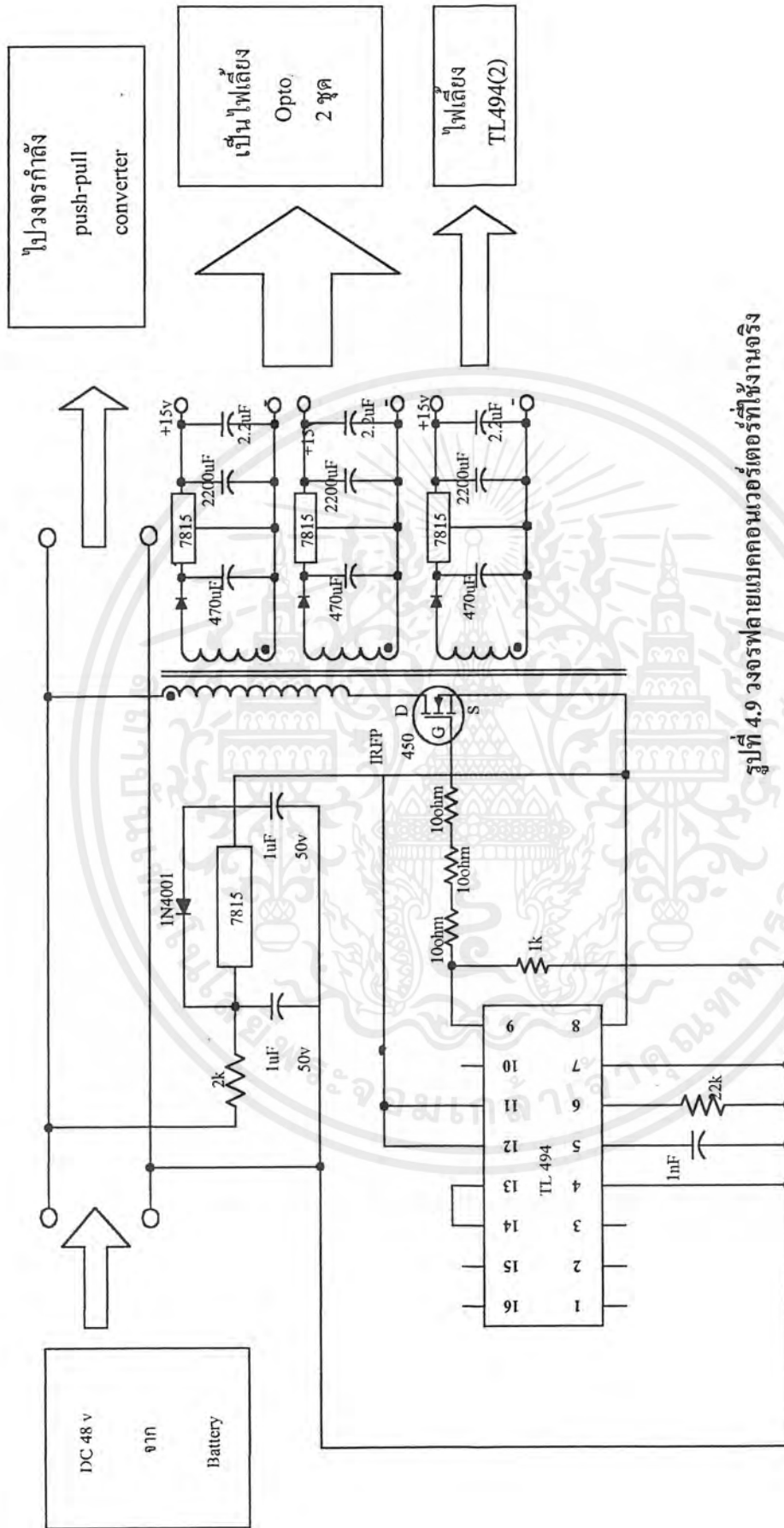
4.3.2 การออกแบบวงจรฟลายแบคที่ใช้งานจริง

ทำการออกแบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้เป็นซัพพลายโดยทำการรับแรงดัน 48

V_{DC} ลดระดับแรงดันลงเป็น $15 V_{DC}$ จำนวน 4 ช่องสัญญาณแบ่งให้กับวงจรต่างๆทั้งหมด 3 ส่วน ดังนี้

- วงจรแยกสัญญาณกราวด์ระหว่างวงจรถูกำลัง (พุก-พูลคอนเวอร์เตอร์)
และวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ จำนวน 2 วงจร
- วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ TL494 ในส่วนที่ 2 (ควบคุม พุกพูลคอน
เวอร์เตอร์) 1 วงจร
- พัลลัมที่ใช้ระบายความร้อนของวงจรพุก-พูลคอนเวอร์เตอร์

และเนื่องจากเป็นวงจรที่จ่ายกำลังค่อนข้างน้อย (ประมาณ 1.2 W) ดังนั้นจึงง่ายต่อการออกแบบ



รูปที่ 4.9 วงจรหลายแบบคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วงจรควบคุม

5.1 ไอซีเบอร์ TL 494

ไอซีเบอร์ TL 494 เป็นไอซีที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากำลัง ในวงจรคอนเวอร์เตอร์และยังสามารถใช้ในการคงค่าแรงดันเอาต์พุต ของคอนเวอร์เตอร์ ได้อีกด้วย

5.1.1 การกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งาน

วงจรของ TL 494 เป็นวงจรถูกกำหนดสัญญาณพัลส์ ที่มีความถี่คงที่ ซึ่งสามารถหาความถี่ของสัญญาณพัลส์ได้โดยกำหนดค่าของ R_T, C_T จากภายนอกที่ขา 6 และขา 5 ของ ไอซี

$$f_{osc} = 1.1 / (R_T * C_T) \quad \dots\dots (5.1)$$

5.1.2 การเลือกใช้ Q_1 และ Q_2 ที่เอาต์พุตของไอซี

เอาต์พุต Q_1 และ Q_2 ของไอซีสามารถทำงานได้ 2 โหมดคือ ทำงานพร้อมกัน หรือสลับกันทำงาน ซึ่งสามารถเลือกการทำงานได้ที่ขา 13 (เอาต์พุตคอนโทรล) โดยขณะที่ C_T คายประจุ เอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบค่าเวลาเมื่อ (Dead-Time Comparator) จะให้พัลส์ออกมา C_T จะมีสถานะเป็นสูง (High) และหยุดการทำงานของ Q_1 และ Q_2 ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น สูง โดยการต่อเข้ากับขา 14 (TL494 จะมีแรงดันอ้างอิงภายใน $= +5 V_{ref}$) Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานตามจังหวะของ ฟลิป-ฟล็อป เพื่อใช้ขับคอนเวอร์เตอร์แบบพุก-พุด (พัลส์ที่ได้จะมีขนาดและความถี่เท่ากันแต่มุมจะต่างกัน 180 องศา) ความถี่ที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของออสซิลเลเตอร์แต่ถ้ากำหนดให้ขา 13 มีสถานะเป็น ต่ำ (Low) โดยการต่อลงกราวด์ (ยกเลิก ฟลิป-ฟล็อป) Q_1 และ Q_2 จะทำงานพร้อมกันและถ้าต้องการกระแสมากขึ้นก็สามารถขนาน Q_1 และ Q_2 เข้าด้วยกัน ได้ ในกรณีนี้ความถี่ที่ได้จะมีค่าเท่ากับออสซิลเลเตอร์

5.1.3 การกำหนดค่าเวลาเมื่อ T_D

TL 494 สามารถกำหนดค่าเวลาเมื่อของวงจรได้เอง ด้วยการต่อแรงดันระหว่าง 0 ถึง 3.3 V ที่ขา 4 ของไอซี แต่หากแรงดันที่ขา 4 มีค่าเท่ากับ 0 V ค่าเวลาเมื่อต่ำสุดของไอซีจะไม่ต่ำกว่า 4%

ของคาบเวลาการทำงานเนื่องจากมีแรงดันออฟเซต 120 mV ค่อยู่ภายใน ดังนั้นค่า คิวตี้ไซเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน นี ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

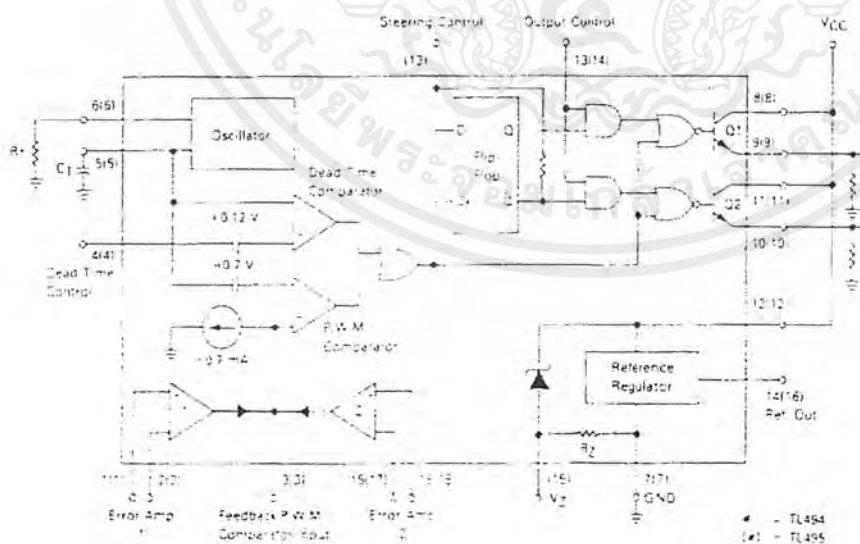
แรงดันป้อนกลับสูงสุดของ คอนเวอร์เตอร์ ที่ได้จากไอซีจะเท่ากับ 96% เมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์ และเท่ากับ 48% เมื่อต่อขา 13 เข้ากับขา 14

5.1.4 การทำงานของไอซีในการคงค่าแรงดันของคอนเวอร์เตอร์

ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของ ไอซีจะ ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณพินเดียวกับแรงดันที่ได้จาก เออร์เรอร์ แอมป์ (Error Amp) ทั้ง 2 ตัวที่ ตัวเปรียบเทียบสัญญาณ พัลส์เบิ้ลยูเอ็ม (PWM Comparator) ส่วน NOR gate ที่ควบคุมทรานซิสเตอร์เอาต์พุต Q₁ และ Q₂ จะทำงานก็ต่อเมื่อขา C_x ของ ฟลิป-ฟลอป อยู่ในสถานะ สัญญาณต่ำ เท่านั้น ซึ่ง C_x จะเป็น สัญญาณต่ำ ก็ต่อเมื่อแรงดันของสัญญาณพินเดียวกับค่ามากกว่าแรงดันที่มาจาก เออร์เรอร์ แอมป์ ทั้ง 2 ตัว นั่นคือหากแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ มีค่าสูงขึ้น ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของ ไอซีจะมีค่าลดลง หากแรงดันป้อนกลับมีค่าลดลง ความกว้างของเอาต์พุตพัลส์ของ ไอซีจะเพิ่มขึ้น ความกว้างเอาต์พุตพัลส์ของ ไอซีจะสามารถกำหนดให้มีค่ามากที่สุดหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา 3 จาก 0.5-3.5 V.

TL494, TL495

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

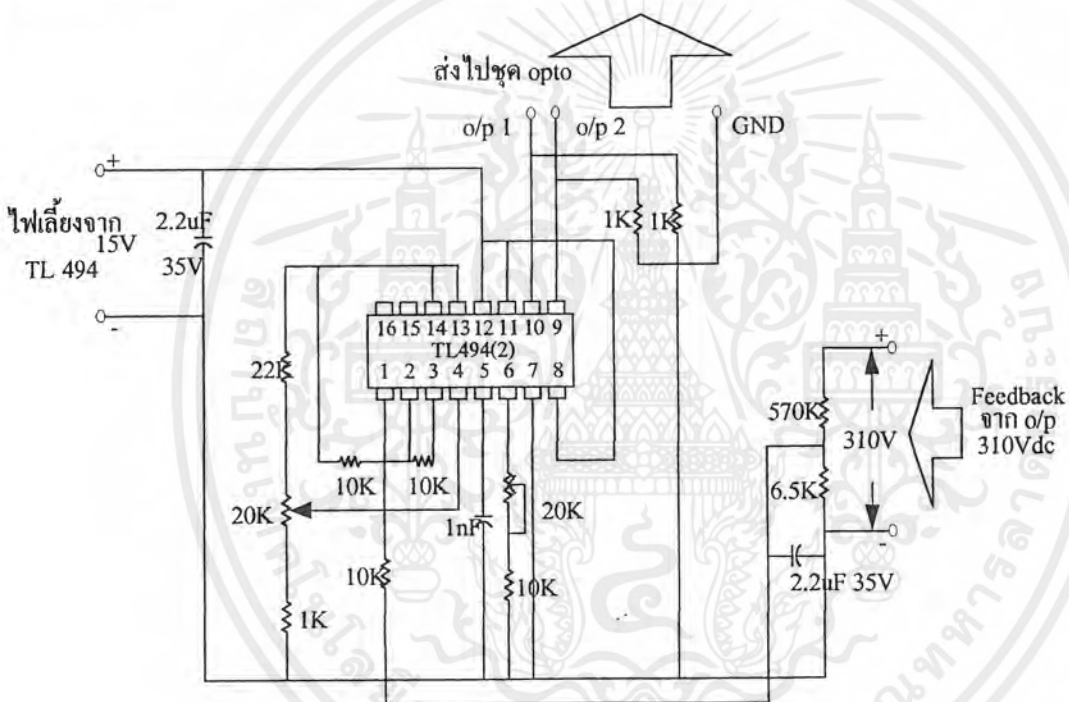


รูปที่ 5.1 แสดงวงจรภายในของ TL 494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 การออกแบบวงจร TL494 ที่ใช้งานจริง

ในส่วนของการใช้งานจริงจะใช้วงจรกำหนดพัลส์จาก TL 494 ทั้งหมด 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ที่วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์จะให้ทำงานที่สภาวะคงที่ไม่ต้องรับส่วน โคลตสตูป ทำงานที่ 25 kHz ให้แรงดันเอาต์พุตรูปพัลส์ 15 V ที่ควิตซ์ไซเคิล 0.4 เพื่อใช้ในการขับมอสเฟต IRFP 450 (วงจรสามารถดูได้จากรูปที่ 4.9) ส่วนที่ 2 ที่วงจรพุกพุลคอนเวอร์เตอร์ให้การทำงานที่สภาวะ โคลตสตูป ทำงานที่ 25 kHz ที่ควิตซ์ไซเคิล 0.1 ถึง 0.4 (จากแรงดันที่ส่งกลับจากส่วน โคลตสตูป) และทำงานใน พุก-พุล โหมด สร้างแรงดันพัลส์ 15 V เพื่อใช้ในการขับ มอสเฟต IRFP 250 2 ชุด

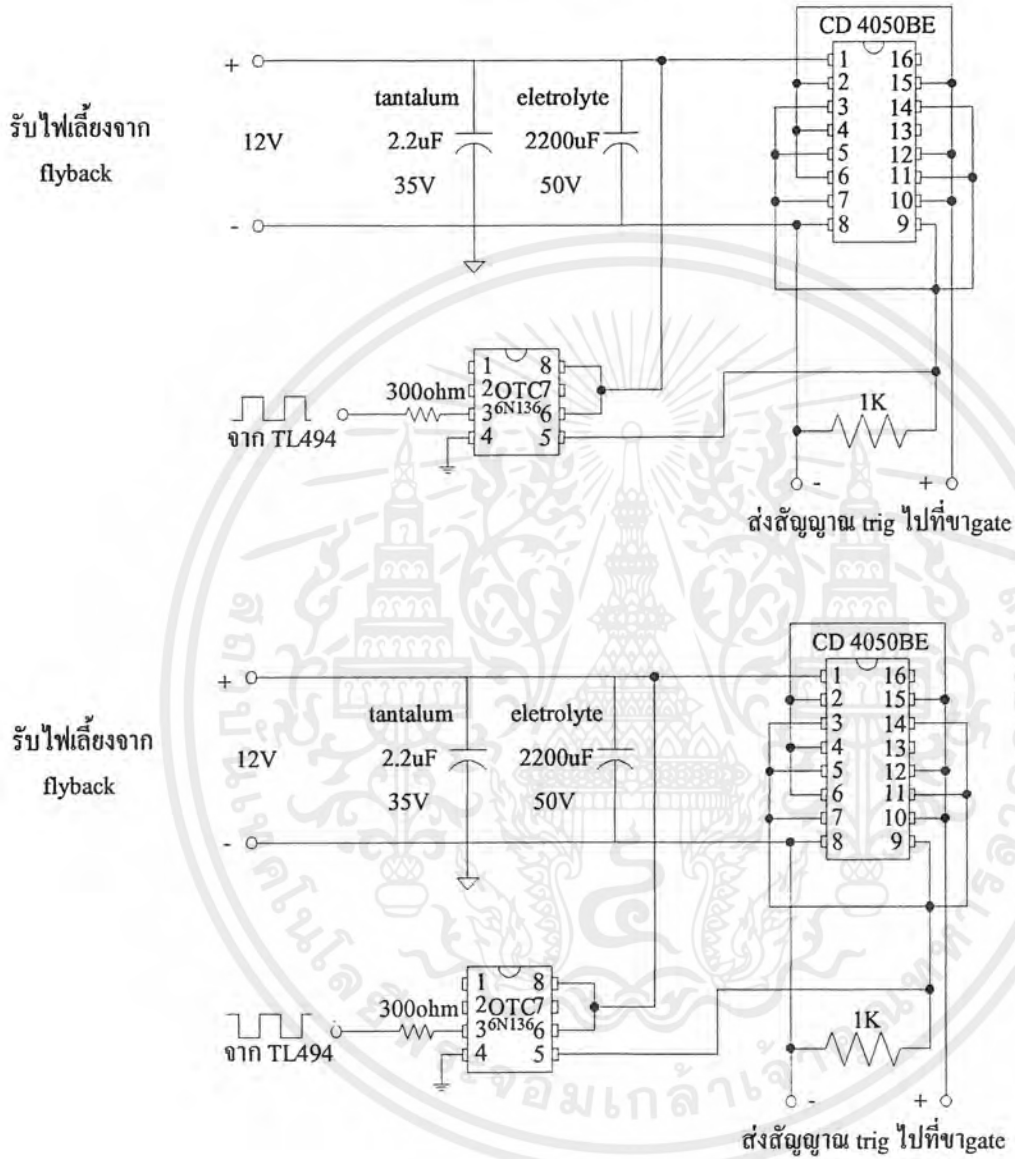


รูปที่ 5.2 วงจร TL494 ส่วนที่ 2 (พุก-พุลคอนเวอร์เตอร์)

5.2 ส่วนของวงจรที่ใช้สำหรับแยกกราวด์(Isolate Ground)

เป็นส่วนของวงจรที่ใช้สำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณทริก(Trig Signal)ที่มาจาก TL494 เพื่อป้องกันการรบกวนของสัญญาณ โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้ไอโซเลเตอร์ 6N136 ออปโตคัปเปิลเลอร์(Optocoupler) หรือออปโตไอโซเลเตอร์(Optoisolater) สำหรับแบ่งส่วนทางไฟฟ้าในคอนเวอร์เตอร์ จัดเป็นอุปกรณ์ที่ต้องมีความปลอดภัยสูง เนื่องจากอาจก่อให้เกิดอันตรายทางไฟฟ้ากับผู้ใช้ได้ ในกรณีที่มีข้อบกพร่องที่ตัวอุปกรณ์ ออปโตคัปเปิลเลอร์จะส่งสัญญาณ ได้โดยใช้แสงเป็นตัว

วงจร opto isolate



รูปที่ 5.3 วงจรอปโตไอโซเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

หม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิง (Switching Transformer) จัดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ผู้ออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจำเป็นต้องศึกษารูปแบบที่เป็นไปได้ในลักษณะต่างๆ ของหม้อแปลงสวิตชิง ความเหมาะสมในการใช้งานการคำนวณขนาดของแกนเฟอร์ไรต์และขนาดของลวดทองแดงรวมทั้งการกำหนดความปลอดภัยทางไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยและลดกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงสวิตชิงขณะทำงาน

6.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงมีหน้าที่หลักในการลดทอนแรงดันไฟตรงที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งอาจมีค่าสูงถึง 310 โวลต์ ให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟต่ำที่เอาต์พุต และทำให้เกิดการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงสวิตชิงมีรายละเอียดดังนี้

6.2 แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นแม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์มีค่าอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูง ประมาณในช่วง 3000-4000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวมันค่าที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นหม้อแปลงสวิตชิงจึงนิยมใช้แกนเป็นเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนสวิตชิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ

6.3 บอบบิ้น (Bobbin)

บอบบิ้นหรือแบบรองพัน ปกติจะทำจากแผ่นพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ บอบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้นและป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์ได้ซึ่งบอบบิ้นจะมีขนาดมาตรฐานตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ บอบบิ้นส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มีขาพักลวดทองแดง เพื่อความสะดวกในการพันขดลวดและบัดกรีติดกับแผ่นพีซีบี (PCB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดทั้งไฟโรมารีและเซคันคาร์รี่ของหม้อแปลงสวิตซิ่งที่กำลังไม่สูงมากนักปกติจะใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนแกนบอบบิ้นเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามความต้องการ ขนาดของขดลวดทองแดงที่จะใช้พันนั้น ขึ้นอยู่กับกระแสสูงสุดที่จะผ่านขดลวด ความถี่และผลข้างเคียงอื่นๆ

6.5 เทปพันฉนวน (Insulation Tape)

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดในหม้อแปลงสวิตซิ่ง และมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขดไฟโรมารีและขดเซคันคาร์รี่ด้วยวัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นพวกไมลาร์ (Mylar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและค่าความปลอดภัยที่ต้องการจากหม้อแปลงสวิตซิ่งเป็นหลัก

6.6 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้

แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงสวิตซิ่ง จะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น แกนแบบ EI ,EE,ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะของคู่ประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น การประกอบแกนเฟอร์ไรต์กับบอบบิ้นจะทำให้ทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้

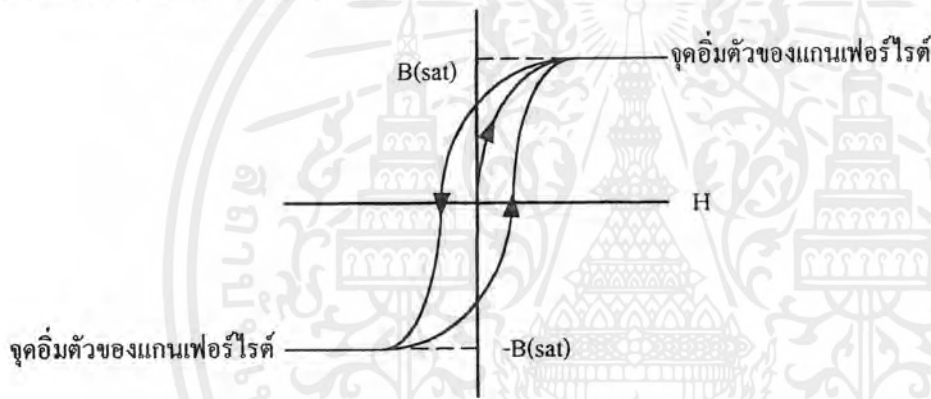
แกนแบบ POT จะใช้กับหม้อแปลงสวิตซิ่งที่ไม่ต้องการกำลังสูง (ไม่เกิน 125 วัตต์) และในงานที่ต้องการสัญญาณรบกวน EMI/RFI ต่ำ เนื่องจากลักษณะรูปทรงของมันสามารถป้องกันการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนได้ดี แต่แกนแบบ POT มีช่องสำหรับให้ขดลวดลวดออกมาภายนอกได้ค่อนข้างเล็ก จึงเป็นอุปสรรคในการพันขดลวดทองแดงขนาดใหญ่เมื่อหม้อแปลงต้องการกำลังสูง ๆ แกนที่นิยมใช้กันมากสำหรับสวิตซิ่งที่ต้องการกำลังสูง จะเป็นแกนแบบ EI,EE,และ ETD เนื่องจากสามารถพันขดลวดรอบแกนบอบบิ้นได้สะดวก แกนในกลุ่มนี้จะมีขนาดต่างๆให้เลือกใช้งานได้เป็นจำนวนมากโดยสามารถให้กำลังงานได้ตั้งแต่ 5 วัตต์ไปจนถึง 10 กิโลวัตต์ แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวน EMI/RFI ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าแกนแบบ POT

6.7 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน จะทำให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วย

6.8 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Curve)

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกน โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสเพียงครั้งเดียว เนื่องจากอีกครึ่งหนึ่งของเส้นฮิสเตอร์รีซิสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการเพียงแต่มีลักษณะกลับทิศกันเท่านั้น



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส

การใช้งานแกนเฟอร์ไรต์ในหม้อแปลงสวิตช์จะต้องระวังไม่ให้แกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ดังนั้น โดยทั่วไปในการออกแบบหม้อแปลงสวิตช์ซึ่ง จึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงาน มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ เพื่อความปลอดภัย

6.9 การสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการคือ การสูญเสียที่เกิดจากฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสเพียงอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวปกติค่าการสูญเสียจะถูกระบุไว้เป็นมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร (mW/cm^3) และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่การใช้งาน รวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์

6.10 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับหม้อแปลงสวิตชิง จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็นส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน กำลังงานสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ พิจารณาได้จากขนาดหน้าตัดของแกน (A_c) และขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น (A_w) โดยอาจคำนวณจากสมการต่างๆ ดังนี้ สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของฟอร์เวิร์คคอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{0.5 \Delta B_{(\text{max})} * f * A_c * A_w * 10^{-3}}{D} \dots\dots(6.1)$$

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของพวง-พูลคอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{\Delta B_{(\text{max})} * f * A_c * A_w * 10^{-3}}{D} \dots\dots(6.2)$$

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{1.4 \Delta B_{(\text{max})} * f * A_c * A_w * 10^{-3}}{D} \dots\dots(6.3)$$

โดยที่ $\Delta B_{(\text{max})}$ = ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ เป็นเกาส์

f = ค่าความถี่การทำงานของแกนเฟอร์ไรต์ เป็นเฮิรตซ์

A_c = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตารางเซนติเมตร

A_w = พื้นที่ช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้นเป็นตารางเซนติเมตร

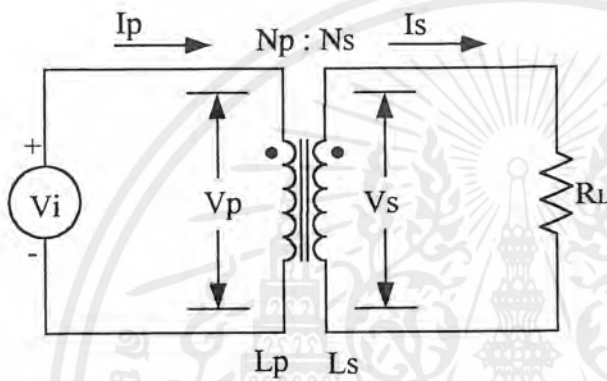
D = ค่าความหนาแน่นกระแสในขด ไพรมารี เป็นเซอร์คูลาร์มิลต่อแอมป์

P = กำลังงานสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรต์ เป็นวัตต์

6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตซิ่ง

หม้อแปลงสวิตซิ่งจะมีความสัมพันธ์ของขดไพรมารีและขดเซคันดารีเป็นไปตามทฤษฎีหม้อแปลงทั่วไปดังนี้

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad \dots\dots(6.4)$$



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง

และ

$$\frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad \dots\dots(6.5)$$

- เมื่อ
- N_p = จำนวนรอบของขดไพรมารี
 - N_s = จำนวนรอบของขดเซคันดารี
 - V_p = แรงดันตกคร่อมขดไพรมารี
 - V_s = แรงดันตกคร่อมขดเซคันดารี
 - L_p = ค่าความเหนี่ยวนำของขดไพรมารี
 - L_s = ค่าความเหนี่ยวนำของขดเซคันดารี
 - I_p = กระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารี
 - I_s = กระแสที่ไหลผ่านขดเซคันดารี

มีข้อสังเกตคือ แรงดัน V_p เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรมารีซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนของหม้อแปลงเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านขดไพรมารี ไม่ใช่ค่าแรงดันอินพุต V_1 โดย V_p จะมีค่าตามสมการ

$$V_p = N_p * A_c * \frac{dB}{dt} * 10^8 \quad \dots\dots(6.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า V_p ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า V_t แต่ถ้าแกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัว อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก db/dt จะมีค่าน้อยมากหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันตกคร่อม V_p จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนเกิดการลัดวงจร และจะมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงและวงจรที่เกี่ยวข้องด้วย

การคำนวณและการเลือกใช้อุปกรณ์หม้อแปลงสวิตชิงแสดงไว้ในบทที่ 4 เรื่องคอนเวอร์เตอร์



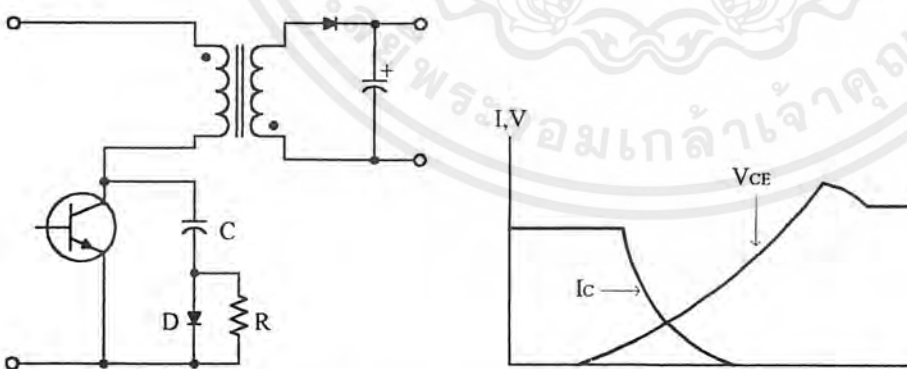
บทที่ 7

วงจร snubber

วงจร snubber (Snubber Network) เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในคอนเวอร์เตอร์ เพื่อลดการเกิดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในวงจรขณะทำงานปกติ วงจร snubber ในที่นี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส (turn off snubber) และ วงจร snubber ป้องกันแรงดัน (clamp snubber) วงจร snubber โดยทั่วไปจะประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและไดโอด ในบางครั้งจึงเรียกกันว่า วงจร RCD snubber

7.1 วงจร snubber ช่วงหยุดนำกระแส

กำลังสูญเสียที่เกิดในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะเป็นไปได้สูงขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะเริ่มหยุดนำกระแส ก่อนที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะหยุดนำกระแส นั้น กระแสจะลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสู่ค่าแรงดันอินพุตอย่างรวดเร็ว กำลังสูญเสียในรูปความร้อนในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นสูง การลดกำลังงานสูญเสียในช่วงนี้อารทำได้โดยการต่อวงจร snubber เข้ากับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ เพื่อควบคุมแรงดันตกคร่อมที่คอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงได้ทันกัน ซึ่งจะทำการลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ

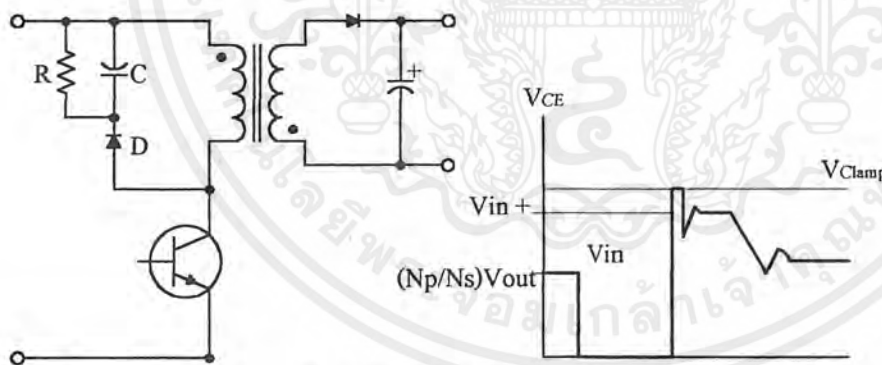


รูปที่ 7.1 แสดงการต่อวงจร snubber ช่วยหยุดนำกระแสเพื่อหน่วงแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

การทำงานของวงจร RCD สนับเบอร์ดั้งเดิมจะแสดงเป็นดังนี้คือ เมื่อเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q_1 เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และไดโอด D_1 ของวงจรสับเบอร์ดั้งเดิมทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C_1 ด้วยแรงดันที่ตกคร่อม C_1 จะทำให้แรงดันที่คอลเล็กเตอร์ของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังนั้นถ้าให้ C_1 มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาของคอลเล็กเตอร์จะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ลดลงจนมีค่าน้อยๆ ได้ทันกัน และจะลดการเกิดกำลังงานสูญเสียในตัวเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ได้

7.2 วงจรสับเบอร์ดั้งเดิมป้องกันแรงดันเกิน

ปกติการพังเสียหายของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะทำงานมักมีสาเหตุมาจากการทำงานเกินพิกัดปลอดภัย RBSOA แรงดันสไปค์ขณะหยุดนำกระแส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟลายแบคและฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ มักทำให้ค่าของแรงดันตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าสูงเกินค่าแรงดันสูงสุดที่มันจะทนได้ และเกิดการพังเสียหายขึ้น วงจรสับเบอร์ดั้งเดิมป้องกันแรงดันเกินจึงมีหน้าที่ป้องกันค่าสไปค์ที่เกิดขึ้นไม่ให้เกินค่าปลอดภัยของเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 7.2 แสดงการต่อสับเบอร์ดั้งเดิมป้องกันแรงดันเกินเพื่อจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่จะตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะเริ่มหยุดนำกระแส

การทำงานของวงจรสับเบอร์ดั้งเดิมป้องกันแรงดันเกินเป็นดังนี้ ในขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มหยุดนำกระแส ตัวเก็บประจุ C จะถูกชาร์จประจุผ่านไดโอด D จากค่าแรงดันสไปค์ ค่าของ R_1 จะทำให้แรงดันตกคร่อม C มีค่าต่ำกว่าแรงดันสไปค์ และมีค่าคงที่ตลอดช่วงของการเกิดแรงดันสไปค์ ค่าแรงดันสูงสุดที่คอลเล็กเตอร์ขณะเกิดสไปค์จึงถูกกั้นไว้ด้วยแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C และเนื่องจากแรงดันสไปค์จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นขณะที่แรงดันสไปค์มีค่าลดลง C_1 จะคายประจุออกมาผ่านตัวต้านทาน R แรงดันตกคร่อมที่คอลเล็กเตอร์จะกลับสู่ค่าแรงดันตามการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติ อาจกล่าวได้ว่า วงจรสับเบอร์ดึงกันแรงดันเกินนั้น ทำงานโดยการถ่ายเทพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำแม่เหล็กเป็นต้นทำให้เกิดแรงดันสไปค์ ไปไว้ที่ตัวเก็บประจุแทน

ขณะที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสอีกครั้ง C_1 จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R_1 ที่ไปแรงดันตกคร่อม C_1 จึงลดลงได้อีกครั้งและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป ค่าของ C_1 และ R_1 ที่เหมาะสมอาจหาได้จาก

$$C > \frac{I_L t_f}{2V_C} \quad \dots\dots(7.1)$$

$$\frac{V_{in}}{I_{pk} I_L} < R < \frac{T_{on(min)}}{3C} \quad \dots\dots(7.2)$$

- C : ค่าคาปาซิแตนซ์ของสับเบอร์ดึง
- I_{pk} : ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านวงจรถูก
- I_L : ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด
- t_f : ช่วงเวลาที่ลดจากสภาวะสูงสุดสู่สภาวะต่ำ (fall time)
- $T_{on(min)}$: ช่วงเวลาที่น้อยที่สุดในการนำกระแส
- V_C : แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์
- V_{in} : แรงดันขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์
- R : ค่าของความต้านทานของสับเบอร์ดึง

สำหรับการออกแบบสับเบอร์ดึงที่ใช้งานจริงจะต้องทดสอบจากลักษณะของโหลดและจะได้อีกจากการทดลองจริงค่าที่คำนวณได้คือช่วงของการเลือกใช้นั้น

จากการทดลอง ได้ค่า $C = 1 \mu F$ และ $R = 82 \Omega$ เลือกใช้ไดโอดชนิดอัลตราฟาสต์รีคัฟเวอร์รี พิกัด 15 A 400 V ต่อขนาน 3 ตัว เพื่อแบ่งกระแส (ใช้ทั้งหมดจำนวน 2 ชุดตามวงจรในรูปที่ 4.5)

บทที่ 8

ตัวรถ ระบบต่างๆของรถและราง

8.1 แนวคิด

แนวคิดในการออกแบบตัวรถมีดังนี้

1. จะต้องไม่บรรทุกแหล่งจ่ายพลังงานซึ่งก็คือแบตเตอรี่ไปกับตัวรถ ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการลดน้ำหนักรวมของตัวรถ
2. ต้องมีระบบบังคับเลี้ยวซึ่งสามารถบังคับรถให้เลี้ยวไปตามรางที่โค้งได้โดยไม่ต้องมีคนบังคับ
3. ต้องสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุด

8.2 ตัวรถ

ตัวรถถูกออกแบบให้รองรับผู้โดยสารได้หนึ่งคน โดยผู้โดยสารสามารถบังคับและควบคุมความเร็ว รวมทั้งการขับเคลื่อนและการหยุดรถได้อย่างง่ายดายจากแผงหน้าปัดที่ถูกออกแบบมาอย่างพิถีพิถัน สอดคล้องกับสรีระและลักษณะทางกายภาพของมนุษย์ พร้อมกันนั้นบนหน้าปัดยังติดตั้งสวิทช์ปิด-เปิด มิเตอร์แสดงค่ากระแส-แรงดันตามจุดต่างๆ ปุ่มปรับความถี่และจอแสดงข้อมูลที่ป้อนเข้ามอเตอร์ อีกทั้งยังมีสวิทช์ตัดไฟฉุกเฉินตั้งอยู่ในจุดที่มองเห็นได้ง่ายและสามารถใช้มือบังคับได้อย่างทันท่วงทีในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ

สำหรับการออกแบบตัวรถ เพื่อให้เป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติจึงออกแบบตัวรถให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด โดยผู้ขับขี่จะไม่มีรู้สึกถึงความอึดอัดคับแคบซึ่งเกิดจากขนาดของรถ เพราะการออกแบบหลังคาที่ให้มีลักษณะเป็นหลังคาทรงสูงทำให้รู้สึกโล่ง โปร่งสบาย อีกทั้งยังเพิ่มทัศนวิสัยในการขับขี่ และเส้นโค้งของโครงหลังคาที่ลากยาวมาถึงส่วนหน้าของรถยังช่วยเพิ่มความสวยงาม และทำให้รถดูทันสมัยขึ้นอีกด้วย

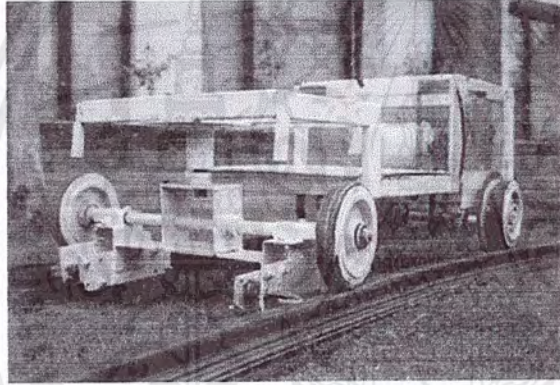
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนปลีกย่อยต่างๆของตัวรถ ต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงโครงสร้างหลักๆของตัวรถซึ่งแบ่งเป็น

8.2.1 โครงรถ

8.2.2 ล้อ เพลาหน้า เพลาท้ายและระบบบังคับล้อ

8.2.1 โครงรถ

ในการการขึ้นโครงรถนั้นจำเป็นต้องใช้เหล็ก ซึ่งเหล็กในท้องตลาดมีอยู่มากมายหลายชนิดให้เลือกใช้ทั้งเหล็ก I บีม C บีม U บีม ฯลฯ สำหรับในนี้เราจะเลือกใช้เหล็ก กลองเพราะเหล็ก กลองเป็นเหล็กที่แข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้ดีในทุกทิศทางอีกทั้งเมื่อนำมาขึ้นรูปแล้ว ยังได้โครงสร้างที่มีความสวยงามกว่าการใช้เหล็กชนิดอื่น โครงรถทั้งหมดเราใช้เหล็กกอลงขนาด 2*1 นิ้ว หนา 2 มิลลิเมตร นำมาเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 8.1 ส่วนหน้าของรถยกสูงขึ้นเพื่อวางกล่องซึ่งบรรจุวงจรไฟฟ้าทุกชนิดของโครงงาน และส่วนหน้ารถนี้ยังเป็นส่วนที่ใช้เป็นจุดติดตั้งเพลลาหน้า ที่ใช้ในการบังคับเลี้ยวด้วย ตอนกลางของรถจะวางแผ่นเหล็กขึ้นลายไว้ เพื่อใช้เป็นที่พักเท้า และยังเป็นจุดติดตั้งแท่นยึดแขนรับไฟ(collector current) ดังจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 8.1 โครงรถ

ส่วนท้ายของโครงรถออกแบบให้เป็นกล่องสี่เหลี่ยม ซึ่งด้านบนจะใช้วางเบาะสำหรับนั่ง ภายในกล่องจะทำเป็นแท่นสำหรับติดตั้งมอเตอร์และเป็นยึดสำหรับเพลลาท้าย สำหรับตอนท้ายของรถนี้จะไม่มีส่วนของวงจรไฟฟ้าใดๆเลยนอกจากสายไฟ ทั้งนี้ก็เพื่อ

1. ป้องกันไม่ให้ความร้อนจากมอเตอร์ขณะทำงาน ไปรบกวนวงจรไฟฟ้า
2. เนื่องจากส่วนท้ายของตัวรถใช้เป็นที่ติดตั้งเพลลาท้ายที่เป็นดิฟเฟอเรนเชียล และโซ่ที่ใช้ในการจับเพลลาจับ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะต้องมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันและจารบีอยู่เสมอ การวางส่วนของวงจรไฟฟ้าทั้งหมดไว้ในตอนหน้าป้องกันความสกปรกอันจะเกิดจากสารหล่อลื่นต่างๆ

8.2.2 ล้อ เพลาหน้า เพลาท้าย และระบบบังคับล้อ

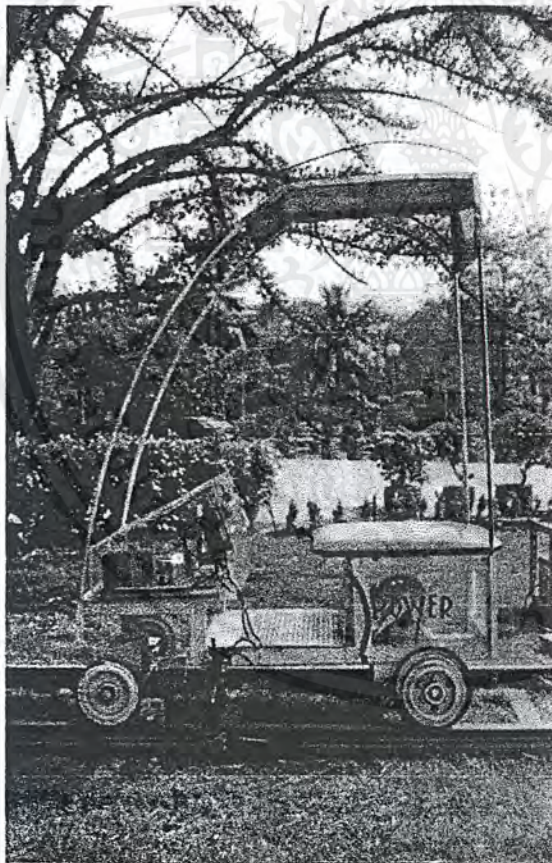
ล้อ

ในท้องตลาดมีล้อมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้มากมายหลายชนิดทั้งล้อเหล็ก ล้อยางทั้งที่เป็นยางตันและแบบสูบลม ฯลฯ

- ล้อเหล็ก ดังเช่นล้อรถ ไฟ มีข้อดีคือแข็งแรงทนทาน เกิดความเสียหาย

ได้น้อย มาก แต่มี ข้อเสียคือ เกิดเสียงดังขณะวิ่ง

- ล้อยาง มีข้อดีคือสามารถรับน้ำหนักและแรงกระแทกได้ดี อีกทั้งขณะ วิ่งยัง เกิดเสียงดังน้อยมาก ข้อเสียคือมีความคงทนน้อยกว่าเหล็ก



รูปที่ 8.2 แสดงรถไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

ในโครงการนี้จะเลือกใช้ล้อทั้งสี่ล้อเป็น ล้อเหล็กที่ขอบนอกเป็นยางตัน ซึ่งเป็นการผสม ข้อดีของล้อเหล็กและล้อยางไว้ด้วยกัน ล้อชนิดนี้จะมีลักษณะที่ทนทานของล้อเหล็กและลักษณะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของล้อยางที่มีความนุ่มนวล ไม่มีเสียงดังขณะวิ่ง โดยขอบนอกจะเป็นยางคันที่ผลิตจากยางคุณภาพสูง(High Quality Rubber) ซึ่งมีความยืดหยุ่นและแข็งแรงมาก จึงตัดปัญหาที่เกี่ยวกับความทนทานของล้อออกไปได้เลย

เพลาน้ำและระบบบังคับเลี้ยว

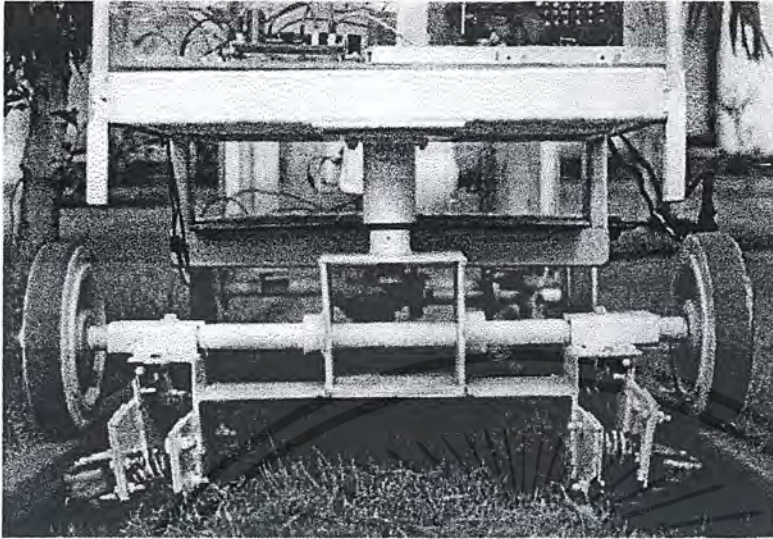
ในส่วนของเพลาน้ำ จะเป็นส่วนที่ช่วยในการรับน้ำหนักของตัวรถ และเป็นส่วนที่ติดตั้งระบบบังคับล้อไว้เป็นชุดเดียวกัน ระบบที่สามารถบังคับล้อให้วิ่งไปตามรางได้นั้น ที่เห็นได้ตามทั่วไปและหลายคนคงจะนึกภาพออกก็คือ ล้อรถไฟ ในที่นี้เราจะพิจารณาในส่วนของระบบบังคับไม่ให้ตกราง จากล้อรถไฟจะเห็นว่า

มีข้อดีคือ

1. มีความแข็งแรงทนทาน
2. รับน้ำหนักได้มาก เหมาะสำหรับการขนส่งขนาดใหญ่

ข้อเสีย

1. ในขณะที่รางเป็นทางโค้ง ล้อรถไฟไม่สามารถปรับการเลี้ยวให้ไปตามรางได้แต่ยัง สามารถวิ่งไปตามรางได้ โดยล้อจะเบียดและถื่นไถลไปกับราง ซึ่งลักษณะนี้จะทำให้เกิด ความร้อนที่ล้อ และจะทำให้ล้อและรางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น
2. ในการออกแบบติดตั้งล้อรถไฟ จำเป็นต้องเผื่อช่องว่างระหว่างล้อกับรางไว้เล็กน้อยเพื่อให้มีการให้ตัวได้บ้าง ผลของช่องว่างนี้ก็คือเวลาที่รถไฟวิ่งจะมี การกระทบกระหว่างด้านข้างของล้อกับรางเกิดขึ้นตลอดเวลา

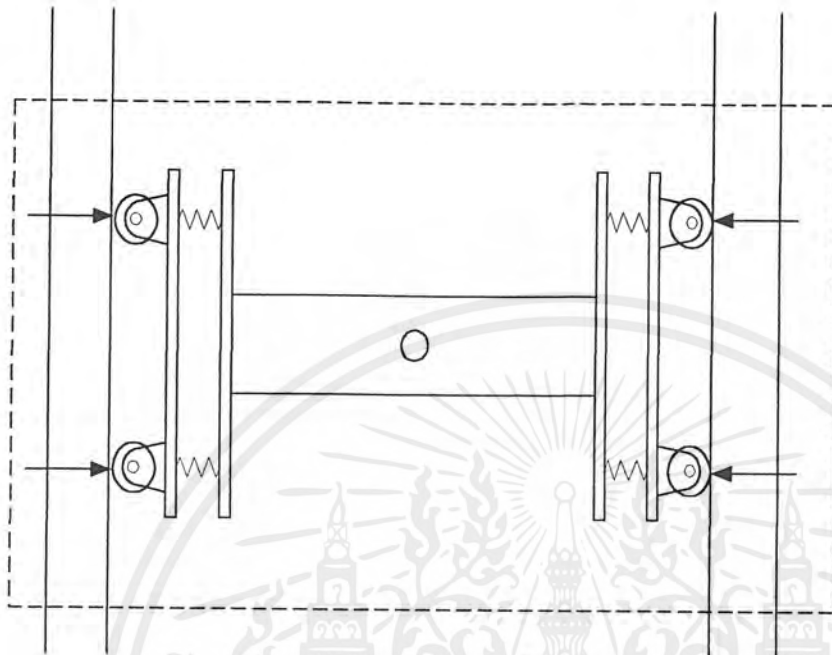


รูปที่ 8.3 แสดงระบบบังคับล้อหน้า

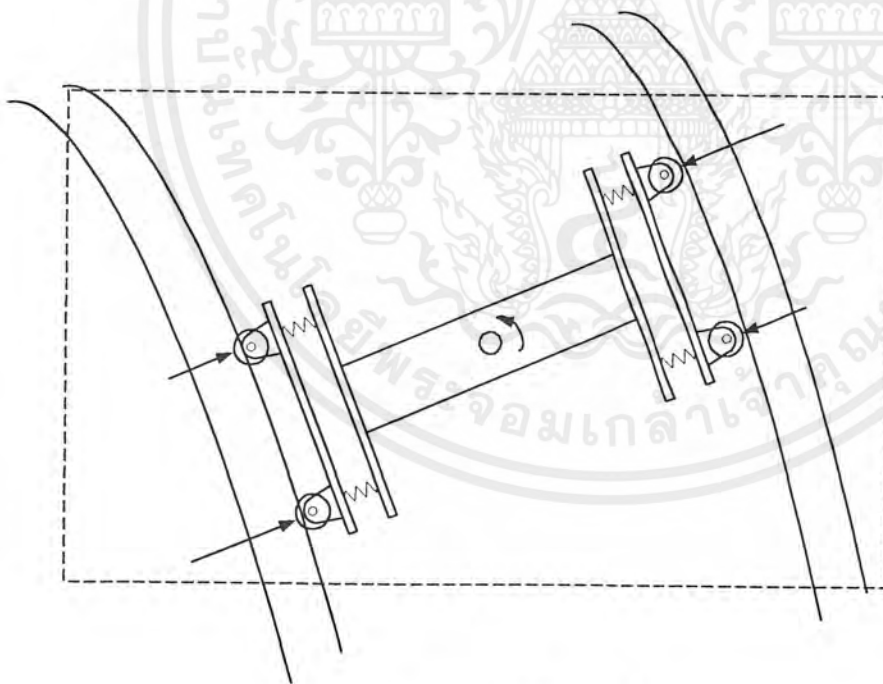
เมื่อพิจารณาข้อเสียของมอเตอร์ไฟทั้งสองข้อแล้ว เราไม่ต้องการให้ข้อเสียนั้นเกิดขึ้นกับโครงการนี้ จึงได้คิดค้นระบบบังคับล้อแบบใหม่ขึ้นมาดังรูปที่ 8.3 เพื่อรถทรงตัวอยู่บนรางได้โดยไม่ตกนั้น ตรงจุดบังคับที่ต้องสัมผัสกับด้านข้างของราง ได้ใช้ล้อขนาดเล็กเป็นจุดสัมผัสทั้งสี่จุด และยังสามารถสปริงเพื่อรองรับแรงที่เกิดขึ้นตรงจุดสัมผัส ระหว่างล้อเล็กกับรางไว้อีกด้วย ระบบนี้มีข้อดีคือ

1. เมื่อรถวิ่งในบริเวณที่เป็นทางโค้ง ระบบนี้สามารถบังคับให้ล้อรถวิ่งเดี่ยวโค้งไปกับรางได้โดยอัตโนมัติและแทบจะไม่มีการเล่น โกลล้อรถเลย
2. เนื่องจากแรงดันของสปริงทำให้ล้อบังคับทั้งสี่ล้อสัมผัสกับรางตลอดเวลาจึงเป็นผลให้ขณะที่รถวิ่ง จะไม่มีการกระแทกระหว่างล้อบังคับกับรางเลย ทำให้การอายุการใช้งานของล้อบังคับและรางยาวนานขึ้น
3. สปริงที่ติดตั้งไว้ที่ด้านข้างของล้อบังคับทั้งสี่ล้อ นอกจากจะช่วยดันให้ล้อบังคับสัมผัสกับรางตลอดเวลาแล้ว ยังเป็นตัวดูดซับแรงที่เกิดตรงจุดสัมผัสอีกด้วย ซึ่งจะเป็นผลให้รถวิ่งได้อย่างนุ่มนวลขึ้น
4. ล้อบังคับทั้งสี่ล้อผลิตจาก High Performance Polymer ซึ่งมีความแข็งแรงและรองรับแรงกระแทกได้อย่างดีเยี่ยม อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่คงทน เหมาะสมกับทุกสภาพการใช้งาน เพราะฉะนั้นจึงตัดปัญหาเรื่องความแข็งแรงของล้อบังคับออกไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แสดงการทำงานขณะที่เป็นทางตรง



(ข) แสดงการทำงานขณะที่เป็นทางโค้ง

รูปที่ 8.4 แสดงการทำงานของระบบบังคับล้อหน้าขณะที่เป็นทางตรงและทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของระบบบังคับล้อหน้า (ดูรูปที่ 8.4 ประกอบ)

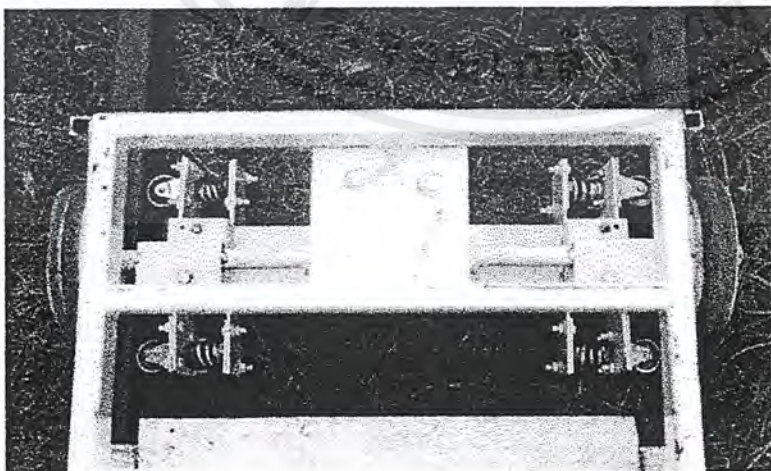
ทางตรง ขณะที่รถวิ่งอยู่ในทางตรง ลักษณะที่เป็นคู่ขนานกันของรางจะทำให้เกิดแรงขนาดเท่าๆกัน กระทำที่ล้อบังคับทั้งสี่ล้อ ดังรูปที่ 8.4(ก) ล้อบังคับและสปริงทั้งคู่จะช่วยประคองให้รถวิ่งอยู่บนรางต่อไปโดยไม่คกราง

ทางโค้ง เมื่อรถวิ่งถึงบริเวณทางโค้ง ส่วนโค้งของรางทั้งวงนอกและวงในจะเบียดกับล้อบังคับ ทำให้เกิดแรงที่ไม่สมดุลกระทำที่ล้อบังคับทั้งสี่ล้อ ดังรูปที่ 8.4(ข) ภาวะเช่นนี้จะเป็นลักษณะคล้ายกับการเกิดแรงคู่ควบ ทำให้เกิดการหมุนที่จุดหมุนของระบบ บังคับให้ล้อวิ่งไปตามส่วนโค้งของรางได้ โดยมีสปริงและล้อบังคับทั้งคู่ช่วยประคองรถไม่ให้คกราง เช่นเดียวกับกรณีที่เป็นทางตรง

เพลาท้าย และระบบบังคับล้อหลัง

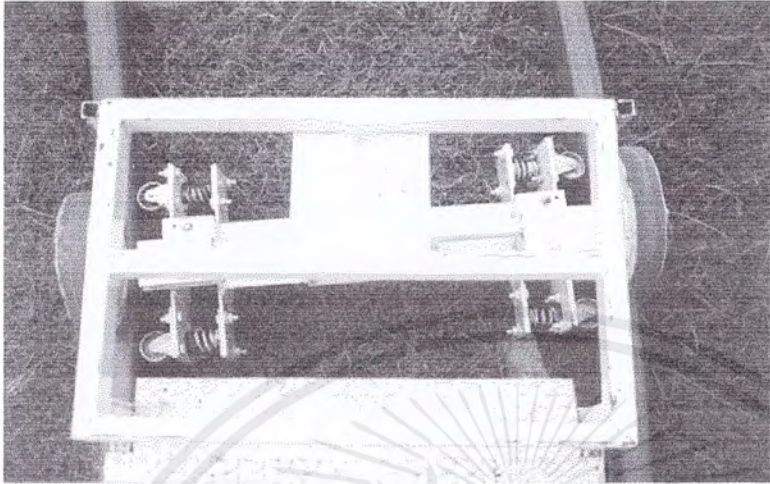
เพลาท้ายมีส่วนในการช่วยรับน้ำหนักของยานพาหนะและเป็นตัวขับเคลื่อนล้อด้วย โดยมีตัวต้นกำลังคือมอเตอร์ เพลาท้ายจึงเป็นส่วนที่เรียกว่าเพลาดำเนิน ซึ่งจะตรงข้ามกับเพลาดายคือเพลาดำเนินหรือเพลาดายซึ่งจะช่วยรับน้ำหนักของรถเพียงอย่างเดียว ไม่มีส่วนในการขับเคลื่อน

ในการออกแบบระบบขับเคลื่อนนี้ ในปัจจุบันมีให้เลือกใช้ทั้งการใช้สายพาน โซ่ และเฟืองขับ ในโครงการนี้เลือกการใช้การขับเคลื่อนโดยโซ่โซ่ ดังรูปที่ 8.6 เพราะโซ่จะให้แรงจุดมากว่าสายพาน ประกอบกับเป็นระบบที่ติดตั้งง่ายและมีความซับซ้อนน้อยกว่าเฟืองขับ สำหรับในการทดสอบและแรงบิดของมอเตอร์ อาจใช้ระบบอย่างง่ายคือการทดสอบด้วยเฟืองโซ่เพียงชั้นเดียวหรือมากกว่านั้น แต่เพื่อให้เป็นไปตามแนวคิดในการออกแบบตัวรถที่ว่า จะต้องใช้



(ก) กรณีทางตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

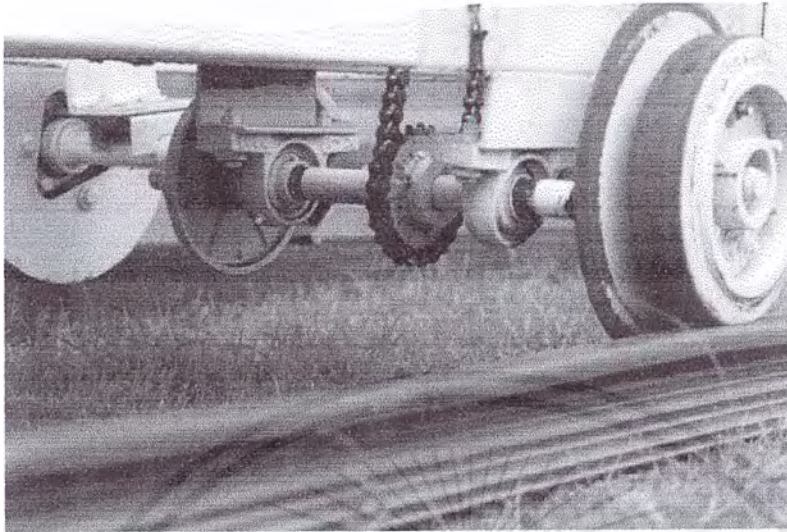


(ข) กรณีทางโค้ง

รูปที่ 8.5 การทำงานจริงของระบบบังคับล้อหน้ากรณีที่เป็นทางตรงและทางโค้ง

พลังงานในการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ให้น้อยที่สุด จึงได้เลือกเฟืองทดแบบคิฟเฟอร์เรนเซียลที่มีข้อดีคือ

- 1.สามารถทดรอบและแรงบิดได้สูงมาก ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ใช้กำลังงานน้อยลง เป็นผลให้สามารถเลือกมอเตอร์ที่เป็นตัวต้นกำลังให้มีขนาดเล็กลงได้
- 2.เฟืองทดแบบคิฟเฟอร์เรนเซียลนี้หาได้ง่ายตามท้องตลาด อีกทั้งยังมีขนาดและอัตราทดต่างๆ ให้เลือกมากมาย ทำให้สามารถเลือกขนาดและอัตราทดที่เหมาะสมมาใช้กับโครงการได้ตามต้องการ สำหรับโครงการนี้ จะเลือกใช้เฟืองทดแบบคิฟเฟอร์เรนเซียลที่อัตราทด 1:18
- 3.เฟืองทดแบบคิฟเฟอร์เรนเซียล นอกจากจะสามารถใช้ในการทดรอบและแรงบิดแล้วยังเป็นระบบช่วยในการเลี้ยวโค้งของเพลาท้ายที่ไม่ได้ติดตั้งระบบบังคับเลี้ยวไว้อีกด้วย



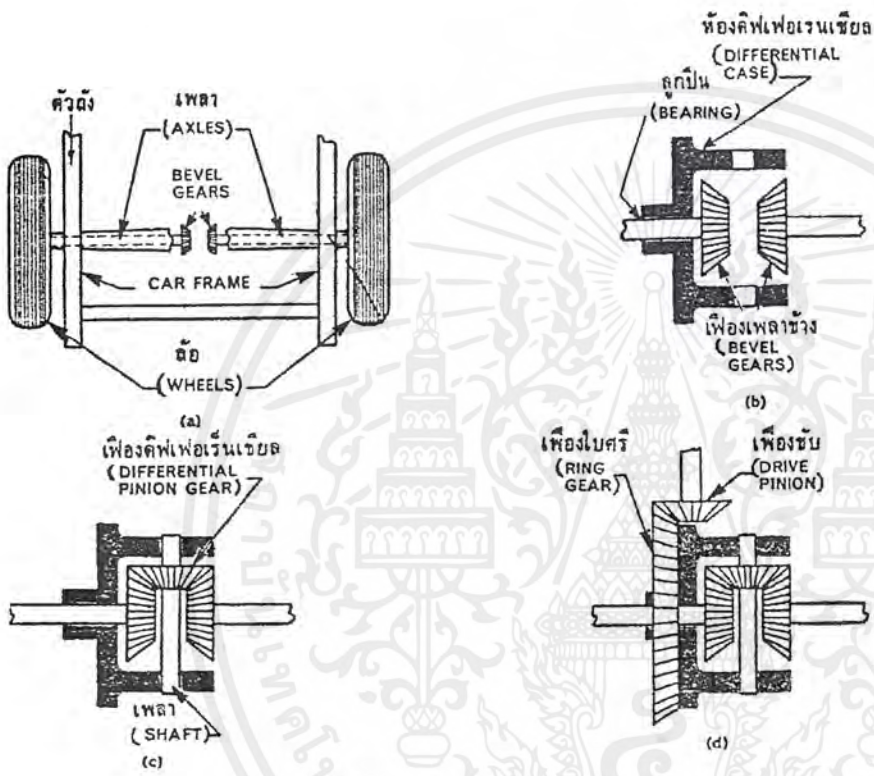
รูปที่ 8.6 การใช้โซ่ในการขับเคลื่อน

หลักการของดิฟเฟอเรนเชียล

ขอยกตัวอย่างการเดินแถวของกองทหาร ในขณะที่เลี้ยวมุม คนที่อยู่แถวในจะก้าวสั้นที่สุดเกือบจะย่ออยู่กับที่ ในขณะที่คนอยู่แถวนอกสุดต้องก้าวยาว และเดินได้ทางมากที่สุดเพื่อการเลี้ยว เช่นเดียวกับรถยนต์ เมื่อเวลาเลี้ยวโค้ง ล้อนอกของวงเลี้ยวจะต้องหมุนเร็วกว่าและได้ระยะทางมากกว่าล้อที่อยู่วงใน ส่วนล้อหน้าจะไม่มีปัญหาอะไรเพราะไม่ได้เป็นล้อขับเคลื่อนจึงต่างหมุนโดยอิสระของมัน ในกรณีที่ล้อหลังจะต้องหมุนด้วยความเร็วที่ต่างกัน แกนล้อแต่ละข้างจะต้องอยู่กับเฟืองในลักษณะที่แต่ละเพลาล้อจะหมุนด้วยความเร็วที่ต่างกัน แต่ยังหมุนไปเป็นระบบเดียวกัน (Single Unit) ทั้งหมดนี้ก็คือหน้าที่ของดิฟเฟอเรนเชียล

รูปที่ 8.7 แสดงให้เห็นถึงภาพหลักการของดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้กัน โดยทั่วไปอันประกอบด้วยเฟืองดิฟเฟอเรนเชียลติดกับเฟืองขับ และมีเฟืองดิฟเฟอเรนเชียลตัวเล็กอีกสองตัวหรือมากกว่าหมุนไปในลักษณะตามรัศมีภายในเรือนดิฟเฟอเรนเชียลนั้นและขบกับเฟืองดิฟเฟอเรนเชียลทั้งสองข้าง ซึ่งก็คือปลายของเพลาล้อนั่นเอง เพลากล้อจะอยู่ทั้งสองข้างต่อออกไปจากเรือนดิฟเฟอเรนเชียล แต่จะหมุนไม่ขึ้นต่อกันทั้งเฟืองข้างและเฟืองดิฟเฟอเรนเชียล มักจะเป็นเฟืองธรรมดาที่ขบกันเป็นมุมฉาก (Spur Bevel Gears) โดยปกติมักมี 2 หรือ 4 ตัว

-กรณีเมื่อวิ่งทางตรง ความฝืดของแกนล้อทั้งสองข้างเท่ากัน เฟืองคิฟเฟอร์เรนเซียลที่อยู่ตรงกลางจะขบเฟืองข้างหมุนด้วยแรงที่เท่ากันทั้งสองข้าง เฟืองทั้งสามตัวก็จะไม่หมุน ในขณะที่นั้นเฟืองก็จะขบเฟืองใบศรีที่ถูกขับด้วยเฟืองขับ ล้อจะหมุนด้วยอัตราเร็วเท่ากันทั้งสองข้าง



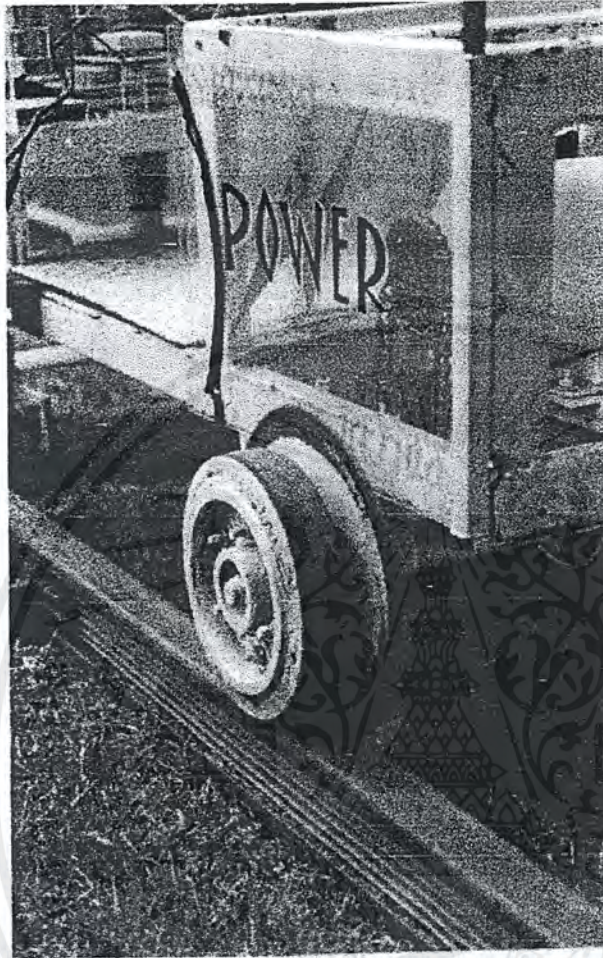
รูปที่ 8.7 แสดงหลักการของคิฟเฟอร์เรนเซียล

-กรณีเมื่อรถเลี้ยวโค้ง ล้อหนึ่งจะต้องหมุนเร็วกว่าอีกล้อหนึ่ง แรงที่กระทำต่อล้อทั้งสองข้างจะไม่เท่ากัน เฟืองข้างที่ขบเฟืองคิฟเฟอร์เรนเซียลตัวกลางด้วยแรงที่ไม่เท่ากัน คราวนี้เฟืองคิฟเฟอร์เรนเซียลจะขบเอาเฟืองข้างหมุนไปด้วย จะทำให้เฟืองข้างหนึ่ง แกนล้อและล้อหมุนเร็วกว่าอีกข้างหนึ่ง

เพลตท้ายและระบบบังคับล้อหลัง

ล้อหลังเป็นล้อชนิดเดียวกับล้อหน้า แต่จะใช้ระบบในการบังคับล้อต่างกัน คือจะใช้ระบบบังคับล้อแบบเดียวกับล้อรถไฟ เนื่องจากเพลตท้ายประกอบด้วยคิฟเฟอร์เรนเซียลที่เป็นระบบช่วยเลี้ยวอยู่แล้ว จึงช่วยลดปัญหาต่างๆที่มีในล้อรถไฟลงได้ โดยระบบบังคับล้อหลังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.8 แสดงระบบบังคับล้อหลัง

8.3 รางรถและระบบนำไฟฟ้า

รางรถ

ใช้เหล็กตัวซีขนาด 2*4 นิ้ว หนา 2 มิลลิเมตร ประกอบกันเป็นลักษณะคล้ายรางรถไฟ โดย
ใช้เหล็กแบนขนาด 3 นิ้ว หนา 3 มิลลิเมตร เป็นตัวยึดระหว่างคู่ของรางดังรูปที่ 8.9 เจาะรูระบายน้ำ
ทุกๆระยะ 0.5 เมตร เพื่อป้องกันน้ำขังในรางอันจะทำให้เกิดการลัดวงจรในรางนำไฟฟ้าได้

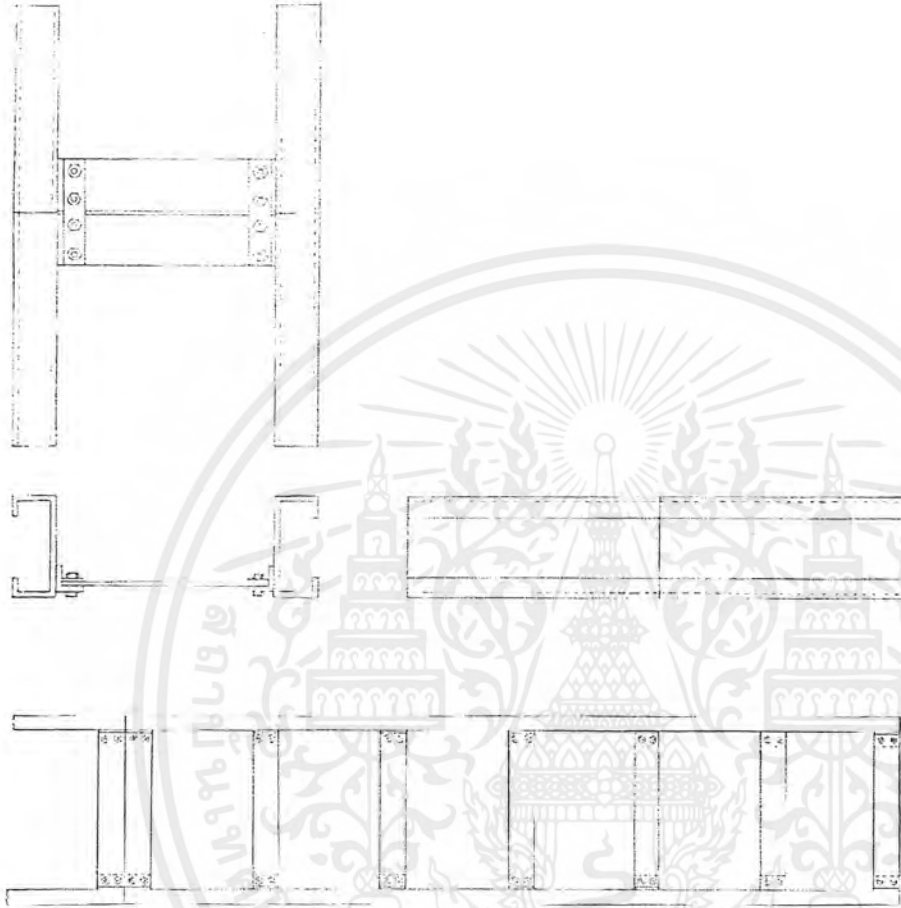
มิติของราง

ความยาวของรางหนึ่งท่อน	6	เมตร
ระยะทาง 1 รอบ (วัดที่เส้นรอบวงด้านใน)	50	เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะระหว่างคูราง

0.67 เมตร



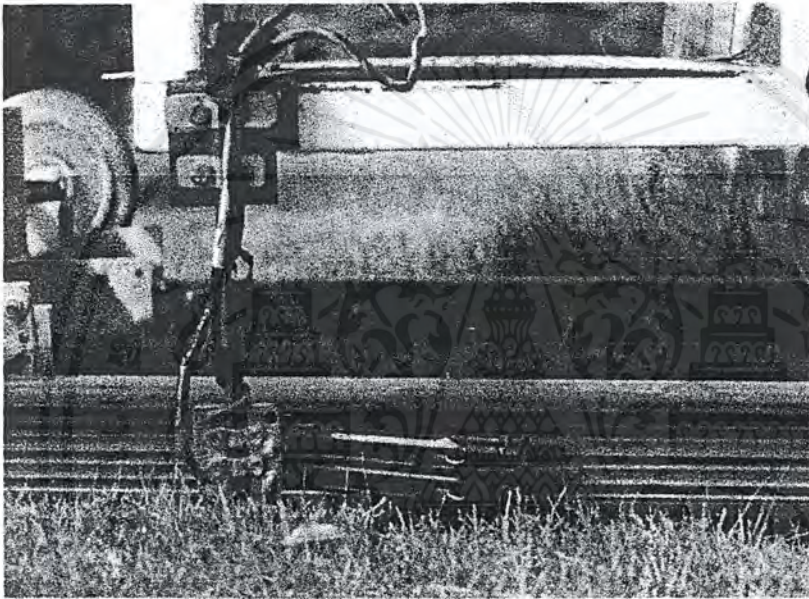
รูปที่ 8.9 แสดงการเชื่อมยึดตามจุดต่างๆของรางแต่ละท่อน ซึ่งยาวท่อนละ 6 เมตร

ระบบนำไฟฟ้า

รางนำไฟฟ้า ใช้รางนำไฟฟ้าแบบบัสบาร์ทองแดงชนิดสามสายในหนึ่งราง(Three in one) ติดตั้งภายในรางรถ(วงใน) โดยมี Hanger Clamp เป็นตัวยึดรางนำไฟฟ้าไว้กับรางรถไฟฟ้าดังแสดงไว้ในรูปที่ 8.10 สำหรับรูปแบบและข้อกำหนดในการติดตั้งรางไฟฟ้าจะแสดงไว้ในภาคผนวกที่สอง

ในการนำไฟฟ้านั้นจะใช้ขั้วสับาร์เพียง 2 สายต่อเข้ากับขั้วบวกและลบของแบตเตอรี่ แล้วส่งกระแสผ่านแขนรับไฟ (Collector Current) เข้าไปยังวงจร Push-Pull บนตัวรถ

สำหรับการพัฒนาโครงการในอนาคต ขั้วสับาร์ที่เหลืออีกหนึ่งสาย ถูกวางแผนไว้ให้เป็นสายส่งสัญญาณควบคุมระยะไกล ซึ่งสามารถควบคุมทุกอย่างบนตัวรถได้จากสถานีควบคุม เพื่อให้รถไฟฟ้าระบบนี้เป็นระบบอัตโนมัติที่สมบูรณ์แบบที่สอดคล้องต่อไป



รูปที่ 8.10 แสดงการติดตั้งแขนรับไฟฟ้าและรางนำไฟฟ้า

แขนรับไฟฟ้า(Collector Current)

ในการรับไฟฟ้ากระแสตรงจากรางไฟฟ้าผ่านเข้าไปในวงจร Push-Pull จะใช้แขนรับไฟฟ้า (Collector Current) รุ่น KY-A 3706 ขนาด 60 แอมป์ จำนวน 2 แขน เป็นตัวส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยจะติดตั้งแขนรับไฟนี้ไว้บนตัวรถบริเวณกลางรถ ดังแสดงในรูปที่ 8.10 สำหรับและข้อกำหนดในการติดตั้งแขนรับไฟฟ้าจะแสดงไว้ในภาคผนวกที่ 2

ในอนาคตเพื่อการพัฒนารถไฟฟ้าให้เป็นระบบอัตโนมัติดังที่ได้กล่าวไปแล้ว เราสามารถเพิ่มจำนวนแขนรับไฟฟ้าและรางนำไฟฟ้าได้ตามต้องการ เพื่อความเหมาะสมในการใช้งานต่อไป

บทที่ 9

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองที่ 1

เรื่อง การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์
2. เพื่อศึกษาว่าอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างไร
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงบิด ณ โหลดขนาดต่างๆ ที่ความเร็วใดๆ ของมอเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้

1. Fuji Inverter รุ่น FVR-C9S-7JE ขนาด 1.5 kW
2. แหล่งจ่ายไฟคือ ไฟ 1 เฟส 220 V
3. Induction Motor 2 Hp , Volt 220/380 , Amp 6.0/3.5 , rpm 1450 ; Pole 4
4. ชุดทดสอบ torque
 - มู่เล่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm.
 - คู่มือเล็ก หลายขนาด เชือก ทรายขังสปริง .
 - ac volt meter 0-300 V
 - ac amp meter 0-30A
 - vom แบบ digital
 - terminal box 2 ตัว
 - สายไฟ
 - tachometer วัดความเร็วรอบ
 - ตัวต้านทาน 0.05 โอห์ม แบบกระเบื้อง 3 ตัว

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งมอเตอร์เข้ากับแท่น
2. ต่อดวงจรตามรูป
3. ทำการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ในช่วง 1-50 Hz (ควบคุมในย่าน V/F คงที่ หรือ แรงบิดคงที่ เพราะเหมาะกับการใช้งานในลักษณะของรถบรรทุกหรือรถราง ไม่เน้นความเร็ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใส่ภาระ โหลด โดยการเพิ่มน้ำหนักลูกตุ้มเหล็ก $W1 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ kg
5. อ่านค่าที่ได้จากตาชั่งสปริงบันทึกผลเป็น $W2$
6. ทำการวัด กระแส ,แรงดัน พร้อมทั้งความเร็ว และกระแสขณะสตาร์ท ของมอเตอร์
7. คำนวณหาแรงบิด แล้วนำผลการทดลองมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
 - ค่าการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์กับกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ (f & I_{line})
 - ค่าการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์กับแรงบิดมอเตอร์ (f & T_o)
 - ความการปรับความถี่ของมอเตอร์กับความเร็วมอเตอร์ (f & N)

หมายเหตุ

1. การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ที่ต้องใช้ จาก สมการ 2.5

$$T_o = \frac{P_o}{\omega} = \frac{1500w}{2\pi(1450)/60} = 9.88 \text{ N-m}$$

- ค่าทอร์กสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 9.88 N-m

จากรูปผลการทดลอง สามารถหาค่าทอร์กได้จากสูตรนี้

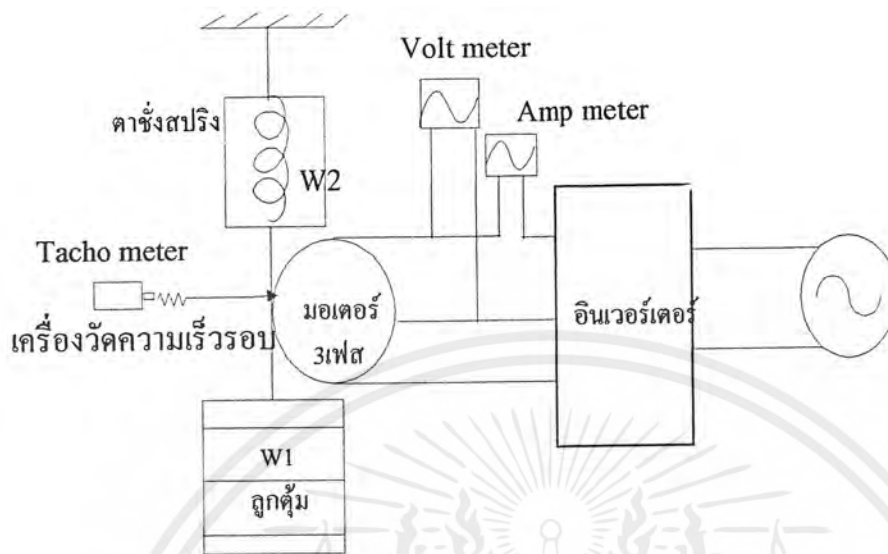
$$T = 9.8(W1 - W2)(D/2) \quad \dots\dots\dots(9.1)$$

$$9.88 = 9.8(10)D/2$$

$$D = 0.2m$$

* $W1 - W2$ คือค่าต่างระหว่างน้ำหนักลูกตุ้ม กับ แรงดึงสปริง

ค่าสูงสุดของน้ำหนักลูกตุ้มที่มาถ่วงคือ 10 kg เท่านั้น เพราะสเกล(scale)ของตาชั่งสปริงก็มีค่า 10 kg ดังนั้นค่าความต่างสูงสุดจึงเท่ากับ $W1 - W2 = 10 - 0 = 10$ kg



รูปที่ 9.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

ตาราง ที่ 9.1 แสดงผลการทดสอบมอเตอร์

W1(kg)	f(Hz)	W2(kg)	Vline (volt)	Iline (amp)	N (rpm)	Is (amp)	To(N-m)
1	1	0.4	0	1.6	18.5	0	0.588
1	5	1	0	0.9	0	1.3	0
1	10	1.1	0	0.8	0	1.3	0.1
1	15	0.6	8	3.2	0	1.3	0.392
1	20	0.4	33	1.6	563	6	0.588
1	25	0.4	53	1.9	724	6.2	0.588
1	30	0.4	80	1.9	885.8	6.5	0.588
1	40	0.4	144	2.2	1192	6.3	0.588
1	50	0.4	220	2.3	1495	6.5	0.588
2	1	1.2	0	1.6	0	0	0.784
2	5	2	0	0.9	0	1.3	0
2	10	2	0	0.8	0	1.3	0
2	15	1.8	8	3.2	0	1.3	0.196
2	20	0.7	29	6.5	0	1.3	1.274
2	25	0.6	52	2.5	700	7.8	1.372

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W1(kg)	f(Hz)	W2(kg)	Vline (volt)	Iline (amp)	N (rpm)	Is (amp)	To(N-m)
2	30	0.6	79	2.4	871.6	7.6	1.372
2	40	0.8	144	2.6	1184	7.6	1.176
2	50	0.6	220	2.7	1490	7.3	1.372
3	1	2	0	1.6	0	0	0.98
3	5	2.8	0	0.9	0	1.3	0.196
3	10	3	0	0.8	0	1.3	0
3	15	2.6	8	3.1	0	1.3	0.392
3	20	1.6	32	6.5	0	1.3	1.372
3	25	1.6	52	3.2	671	8.4	1.372
3	30	1	78	2.9	855.8	9	1.96
3	40	0.8	143	3	1178	9.5	2.156
3	50	0.8	218	2.9	1485	9	2.156
4	1	3	0	1.6	0	0	0.98
4	5	3.6	0	0.9	0	1.3	0.392
4	10	3.8	0	0.8	0	1.3	0.196
4	15	3.6	10	3.1	0	1.3	0.392
4	20	2.5	32	6.5	0	1.3	1.47
4	25	1.2	52	4.3	631	9.3	2.744
4	30	1.2	78	3.5	838	9	2.744
4	40	1.2	142	3.4	1171	9.5	2.744
4	50	1.2	218	3.1	1480	10	2.744
5	1	3.8	0	1.6	0	0	1.176
5	5	4.4	0	0.9	0	1.3	0.588
5	10	4.5	0	0.8	0	1.3	0.49
5	15	4.4	10	3.2	0	1.3	0.588
5	20	3.4	32	6.5	0	1.3	1.568
5	25	1.6	52	5.8	561	9.6	3.332

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W1(kg)	f(Hz)	W2(kg)	Vline (volt)	Iline (amp)	N (rpm)	Is (amp)	To(N-m)
5	30	1.6	76	4.1	817.2	11	3.332
5	40	1.4	140	3.5	1162	12	3.528
5	50	1.4	216	3.3	1475	11	3.528
6	1	4.6	0	1.6	0	0	1.372
6	5	5	0	0.9	0	1.3	0.98
6	10	5.2	0	0.8	0	1.3	0.784
6	15	5	10	3.2	0	1.3	0.98
6	20	4.2	32	6.5	0	1.3	1.764
6	25	2.6	50	10	0	1.3	3.332
6	30	2	76	4.6	797.1	12	3.92
6	40	1.8	139	3.9	1154	12	4.116
6	50	1.8	216	3.6	1471	12	4.116
7	1	5.4	0	1.6	18.5	0	1.568
7	5	5.7	0	0.9	0	1.3	1.274
7	10	6	0	0.8	0	1.3	0.98
7	15	5.8	10	3.1	0	1.3	1.176
7	20	5	32	6.3	0	1.3	1.96
7	25	3.6	50	10	0	1.3	3.332
7	30	2	76	5.5	767	12	4.9
7	40	2	138	4.3	1145	12	4.9
7	50	2	210	4.1	1466	13	4.9
8	1	5.8	0	1.6	0	0	2.156
8	5	6.2	0	0.9	0	1.3	1.764
8	10	6.4	0	0.8	0	1.3	1.568
8	15	6.2	8	3.2	0	1.3	1.764
8	20	5.6	29	6.3	0	1.3	2.352
8	25	4.4	50	10	0	1.3	3.528

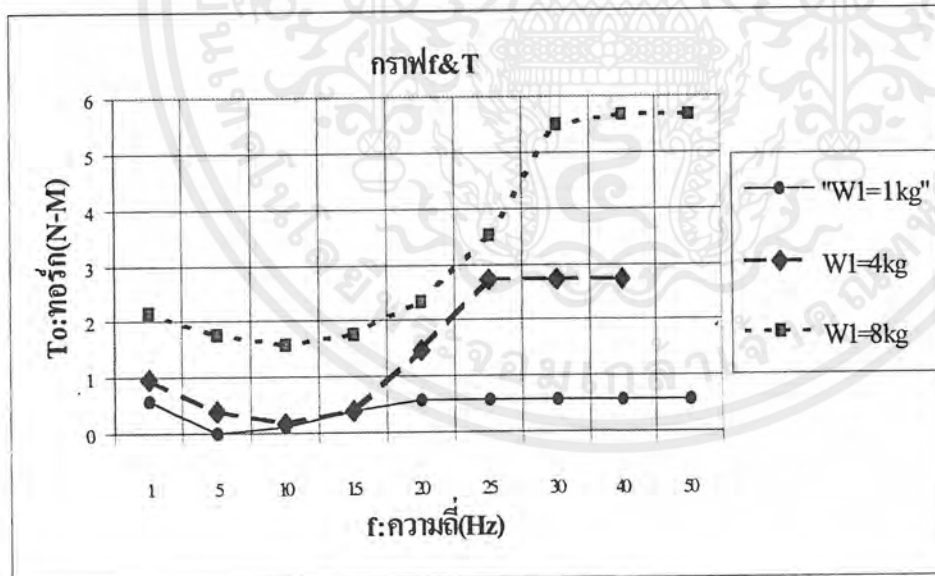
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W1(kg)	f(Hz)	W2(kg)	Vline (volt)	Iline (amp)	N (rpm)	Is (amp)	To(N-m)
8	30	2.4	75	6.5	720	14	5.488
8	40	2.2	139	4.7	1135	13	5.684
8	50	2.2	218	4.5	1460	14	5.684

กราฟตัวอย่างที่พล็อตได้จากผลการทดลอง

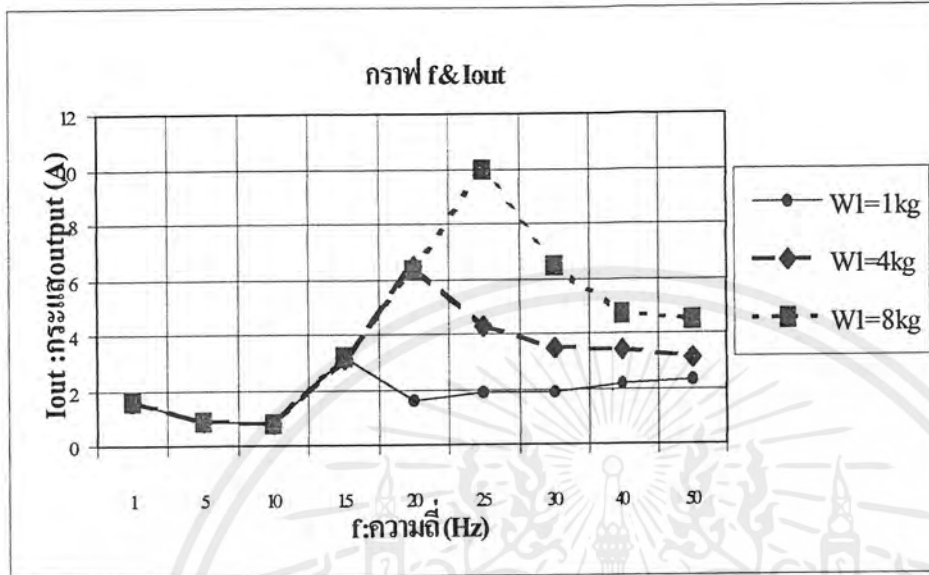
ในที่นี้จะขอแสดงกราฟเฉพาะที่ $W1=1,4,8$ kg เท่านั้นเพื่อให้ได้เห็นแนวโน้มการคุณสมบัติของมอเตอร์เท่านั้น โดยจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้คือ

1. ค่าการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์กับกระแสที่ป้อนเข้ามอเตอร์ (f & Iline)
2. ค่าการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์กับแรงบิดมอเตอร์ (f & To)
3. ความการปรับความถี่ของมอเตอร์กับความเร็วมอเตอร์ (f & N)

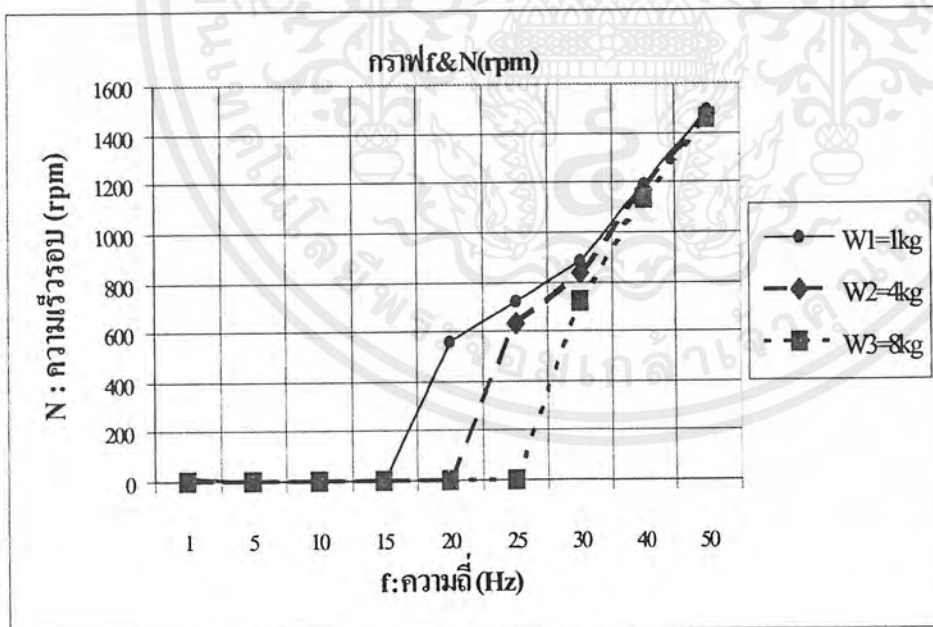


รูปที่ 9.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f & T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f & Iout



รูปที่ 9.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f & N(rmp)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.) จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f & I จะเห็นว่าเมื่อมีภาระโหลดมากขึ้นมอเตอร์จะต้องดึงกระแสมากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงบิดเริ่มต้นของโหลด แล้วกระแสอินพุตก็จะลดลง และคงที่เพื่อรักษาระดับ Torque ซึ่งสามารถเห็นความสัมพันธ์นี้ได้จากกราฟ f & T_o

2.) จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f & N จะเห็นว่าเมื่อภาระโหลดมากขึ้น ค่าของความถี่ที่ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนจะมีค่ามากขึ้น เมื่อมอเตอร์สามารถออกตัวได้แล้ว ความเร็วกับความถี่จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น

3.) จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f & T_o จะเห็นได้ว่าเมื่อมีภาระโหลดมากขึ้น แรงบิดที่จะเอาชนะโหลดก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์ก็ต้องมากขึ้น ตามขนาดของโหลด เมื่อเราปรับความถี่จนถึงค่าหนึ่ง ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์สามารถเอาชนะโหลดได้ แรงบิดจะมีแนวโน้มคงที่ เราเรียกการควบคุมมอเตอร์ช่วงนี้ว่า ช่วง V/F คงที่

สรุปผลการทดลอง เราสามารถนำเอาค่าของผลการทดลองนี้ไปเลือกภาระโหลดที่ต้องการ เมื่อเลือกได้แล้ว ก็สามารถนำไปออกแบบทางระบบเครื่องกล ไม่ว่าจะเป็น พิกัดของระบบขับเคลื่อน, น้ำหนักบรรทุก และ ความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการ การออกแบบในส่วนของไฟฟ้า ก็สามารถนำผลดังกล่าวไปออกแบบพิกัดวงจรคอนเวอร์เตอร์ และเลือกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

การคำนวณและการเลือกใช้

1.หาขนาดพิกัดของระบบขับเคลื่อน น้ำหนักบรรทุก ความเร็วรถ ได้ดังต่อไปนี้

จากผลการทดลอง ในที่นี้จะเลือกที่พิกัดสูงสุด ที่ 8 kg ที่ความเร็วพิกัดของมอเตอร์ $N = 1450$ rpm มาพิจารณาจากผลการทดลอง วัตต์ค่า $T_{max} = 5.624$ N-m แต่ในที่นี้จะขอใช้ค่าที่ได้จากทฤษฎี เพราะค่าจากทดลองมีการคลาดเคลื่อน(เนื่องจากมู่เล่ที่กลิ้งมาไม่ได้ศูนย์ทำให้มอเตอร์มีการแกว่ง)

1.1) หาแรงบิด ที่ภาระโหลดเต็มพิกัด จากทฤษฎี

$$T_{max} = \frac{P}{\omega} = \frac{1500 \text{ W}}{2\pi N / 60} = 9.88 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{ที่ความเร็วพิกัด } 1450 \text{ rpm}$$

จึงประมาณค่าแรงบิดสูงสุดที่ต้องการคือ 9.88 N-m

1.2) นำค่าที่ได้ไปหาค่ากำลังที่ต้องการ

$$P_o = T_o \times \omega$$

$$P = 9.88 \times 2\pi \left(\frac{1450}{60} \right)$$

$$P = 1500 \text{ W}$$

1.3) จากกำลังที่ได้สามารถนำมาหาค่าแรงบิดที่เพลาลงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ในโครงการนี้ได้หาเฟืองทดรอบที่เพลาลังที่ขับเคลื่อนด้วย 2 ล้อหลัง เฟืองทดขนาด 1:18

จากการรกฎการทดเฟือง สมมติว่าไม่มีการสูญเสียกำลังในการส่งถ่าย $P_{in} = P_{out}$

P_{in} ที่ได้จากมอเตอร์ = P_{out} ได้จากเฟืองทด

$$P = T\omega$$

$$1500 = T \times 2\pi \times (80.5/60)$$

$$T = 178 \text{ N m}$$

1.4) จากค่าแรงบิดที่ได้ สามารถนำมาหาแรงกระทำที่ล้อได้ โดยที่รัศมีล้อที่เลือกใช้ เท่ากับ 10cm.

$$T = F \times R \quad \dots\dots(9.2)$$

$$178 = F \times 0.1$$

$$F = 1,780 \text{ N m}$$

1.5) จากค่าแรงกระทำต่อล้อ สามารถนำไปหาน้ำหนักที่กดลงในแนวตั้งที่ล้อ โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของยางเหล็กกับล้อรถเท่ากับ 0.2

จาก

$$F = \mu N \quad \dots\dots(9.3)$$

$$1,780 = 0.2 \times N$$

$$N = 8,900 \text{ N}$$

$$N = mg \quad \dots\dots\dots(9.4)$$

$$8,900/9.8 = m$$

$$m = 908 \text{ kg}$$

เพราะฉะนั้นน้ำหนักบรรทุก+น้ำหนักรถ เท่ากับ 908 kg

-น้ำหนักรถประมาณ 120 kg

-น้ำหนักบรรทุก 788 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6) หาความเร็วของรถที่คาดว่าจะทำได้ ขณะวิ่งที่พิกัดและ น้ำหนักบรรทุกเต็มพิกัด โดยไม่คิดการสูญเสียอื่น จะสามารถหาความเร็วได้จาก

$$P = F \times V \quad \dots\dots\dots (9.5)$$

$$1,500 = 1,780 \times V$$

$$V = 0.84 \text{ m/s}$$

2.หาพิกัดของวงจรคอนเวอร์เตอร์

จากกราฟการทดลอง ได้ค่าดังต่อไปนี้

- กระแสกระแสขาเริ่มต้นสูงสุด 14 A ที่ f=1 Hz
- กระแสอินพุตมอเตอร์สูงสุด 10 A ที่ f=25 Hz
- กระแสอินพุตมอเตอร์ที่พิกัด 6.5 A ที่ f=30 Hz
- แรงดันอินพุตที่ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์ 220 Volt ac แต่ถ้าเป็น dc ใช้ $220 \times 1.141 = 310 \text{ V}$

นำข้อมูลข้างต้นมาคำนวณหาพิกัดเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่จะใช้

จากกฎอนุรักษ์พลังงาน

กำลังไฟฟ้าด้าน dc = กำลังไฟฟ้าด้าน ac (ในกรณีที่ไม่วัดค่าสูญเสีย)

$$V_d \times I_d = \sqrt{3} \times V_o(\text{line}) \times I_o(\text{line}) \cos \phi \quad \dots\dots\dots (9.6)$$

$$I_d = \left(\frac{\sqrt{3} \times 220 \times 6.5 \times 0.8}{310} \right)$$

$$I_d = 6.39 \text{ A}$$

$$P_d = I_d \times V_d \quad \dots\dots\dots (9.7)$$

$$P_d = 6.39 \times 310 = 1980.9 \text{ w}$$

- พิกัดเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการคือ 1,981 watt
- ส่วนค่ากระแสกระแสขาสามารถนำไปเลือกอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่สามารถทนได้มากกว่า 14 A

วิจารณ์ผลการทดลอง

สาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองที่ภาระโหลดสูงสุด(8 kg) มีค่าสูงสุดคือ 5.624 N-m จะเห็นว่าผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งมีค่า 9.88 N-m มีสาเหตุมาจากมู่เล่ที่ใช้ในการทดสอบนั้นต้องทำขึ้นมาใหม่ ซึ่งการกลิ้งนั้นไม่ได้สัดส่วน ทำให้ตอนที่รับความถี่เพิ่มมากขึ้น จนถึงพิกัดที่ 50 Hz มอเตอร์จะเกิดการสั่นมาก มีผลทำให้การอ่านแรงบิดที่วัดมีการขาดเคลื่อน ในการออกแบบข้างต้นเป็นการสมมติว่าอุปกรณ์ทุกตัวเป็นแบบอุดมคติ ค่าที่ได้จากการคำนวณจึงเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น เวลานำไปปฏิบัติจริงอาจมีผลกระทบจากค่าความสูญเสียอื่นๆอีกทำให้ได้ผลไม่ตรงกับที่ออกแบบไว้ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

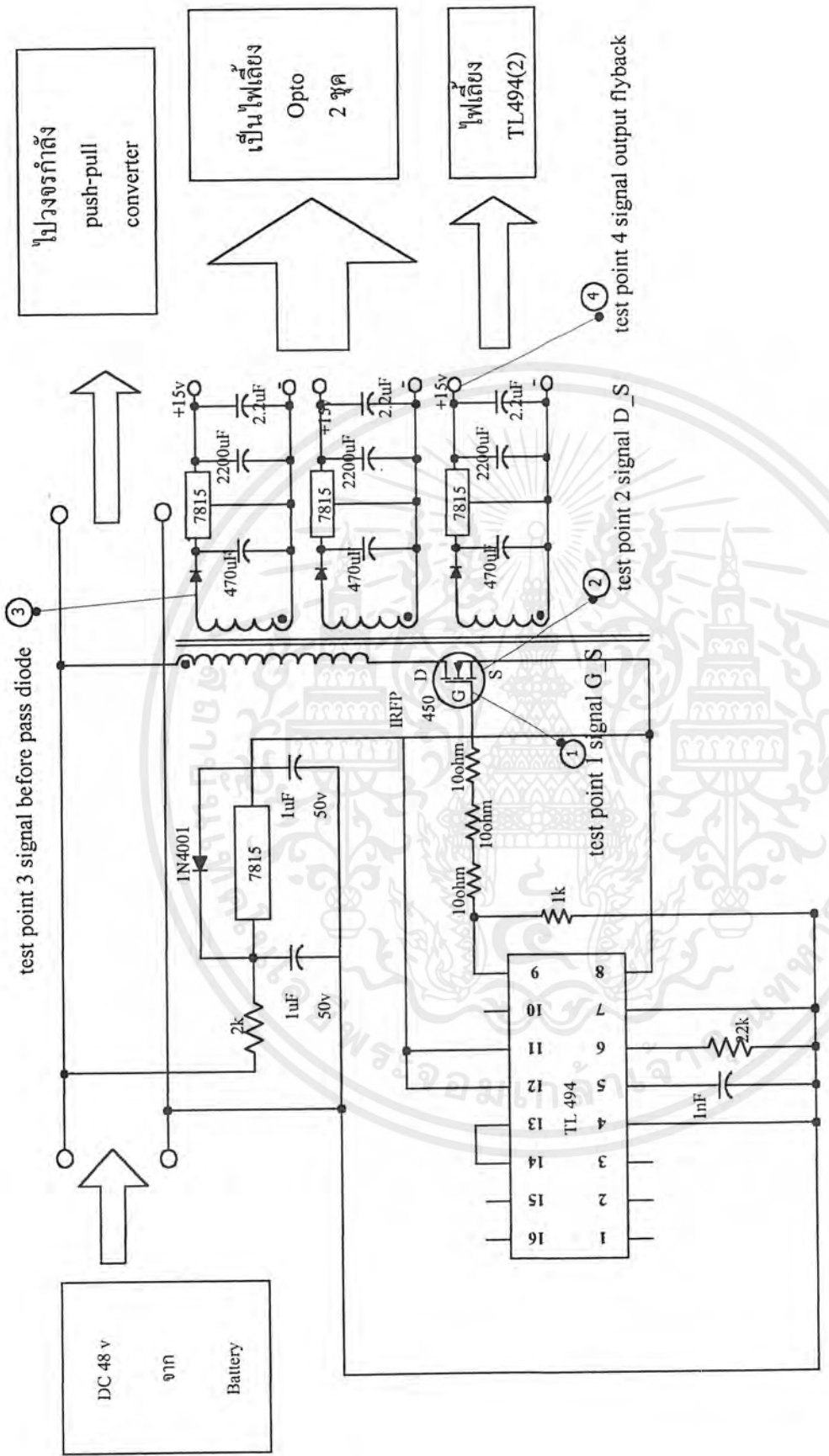
การทดลองที่ 2

ชื่อเรื่อง การวัดค่าสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจรฟลายแบคและวงจรพุก-พุกคอนเวอร์เตอร์
วัตถุประสงค์ เพื่อวัดและตรวจสอบสัญญาณที่จุดต่างๆของวงจร ว่าเป็นไปตามทฤษฎีและตรงตามทีออกแบบไว้หรือไม่

วิธีการทดลอง ต่ออุปกรณ์ต่างๆ ตามรูป 8.5 และ 8. ป้อนไฟเข้าวงจรแล้วทำการวัดสัญญาณและเก็บค่าที่จุดต่างๆคั่งตำแหน่งในภาพที่แสดงไว้

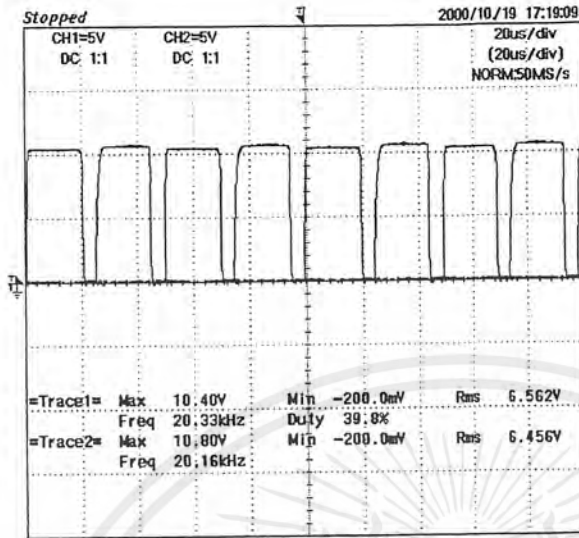
อุปกรณ์ที่ใช้

- | | | |
|---|-------|---------|
| 1. วาริแอค (Variac) 1 เฟส | จำนวน | 1 ตัว |
| 2. ชุดพุกบริดจ์เรกติฟายเออร์ (Bridge Rectifier) | จำนวน | 1 ชุด |
| 3. ออสซิลโลสโคป (Osilloscope ชนิด digital ของ Yogogawa) | จำนวน | 1 ตัว |
| 4. มัลติมิเตอร์ ของ Hellect Packard | | 1 ตัว |
| 5. สายไฟ | | 10 เส้น |



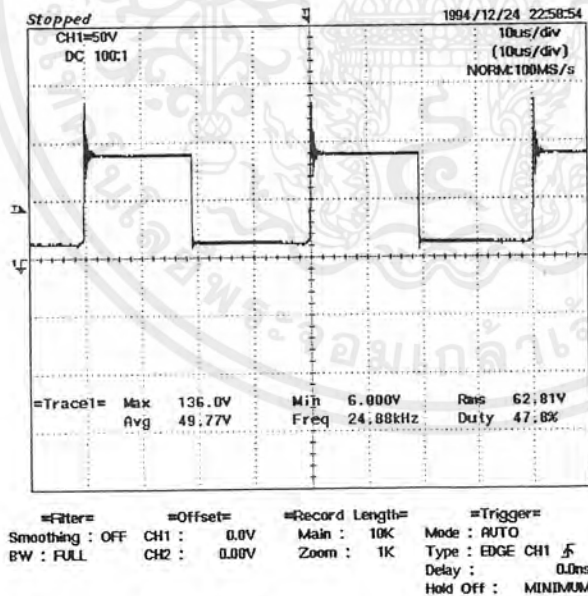
รูปที่ 9.5 ภาพแสดงจุดวัดสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.6 แสดงรูปสัญญาณกร่อมเกทและซอร์สของวงจรฟลายแบค

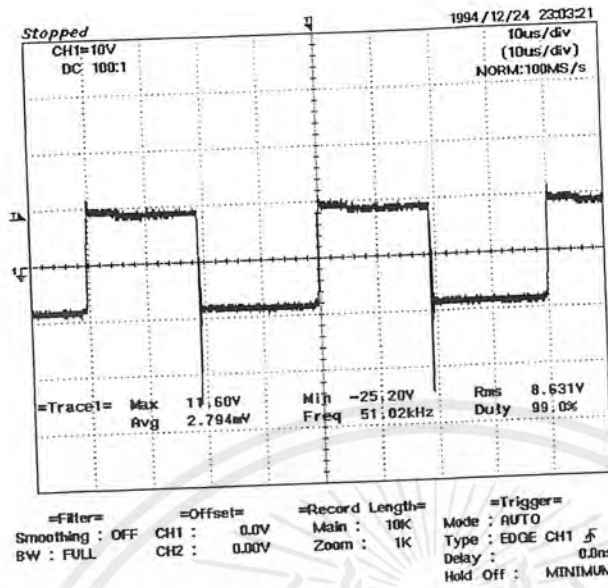
-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 1 ในภาพที่ 9.5 ซึ่งรูปสัญญาณที่ได้มีค่า duty 40% ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้



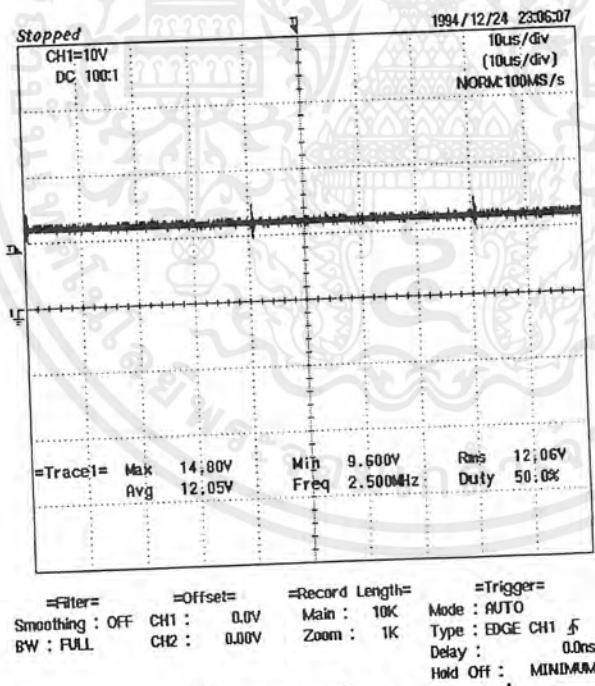
รูปที่ 9.7 แสดงรูปสัญญาณกร่อมเดรน-ซอร์สของวงจรฟลายแบค

-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 2 ในภาพที่ 9.5 จากรูปสัญญาณจะแสดงถึงการทำงานของวงจรที่ duty 47.8 % มีสไปค์เกิดขึ้นเล็กน้อยแต่สามารถยอมรับได้ จึงไม่ได้ทำการต่อสับเบอร์ที่วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

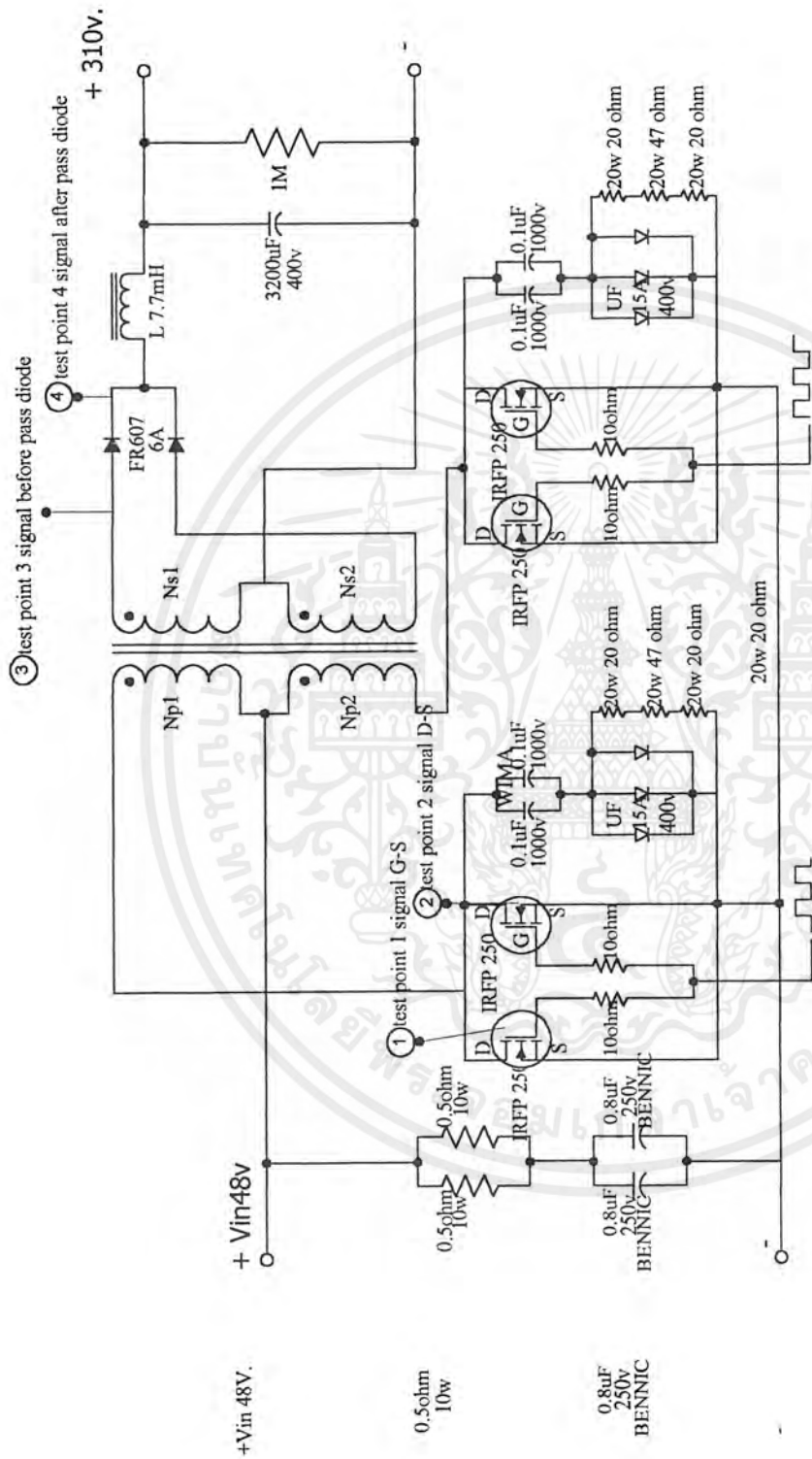


รูปที่ 9.8 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้าไดโอดของวงจรฟลายแบค
 -เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 3 ในภาพที่ 9.5



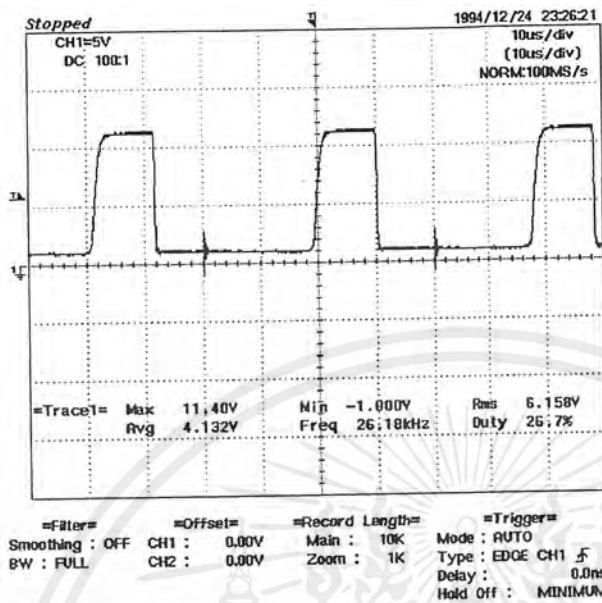
รูปที่ 9.9 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรฟลายแบค
 -เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 4 ในภาพที่ 9.5 ซึ่งได้ค่าโวลตเตจ 15 โวลตตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



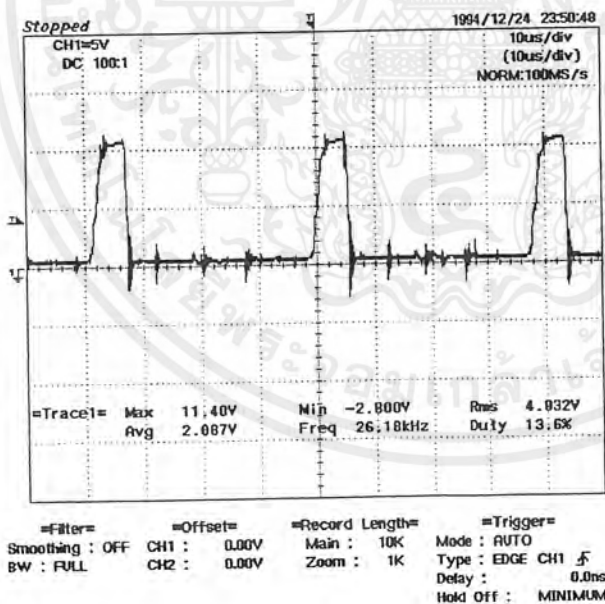
รูปที่ 9.10 ภาพแสดงจุดวัดสัญญาณ ตำแหน่งต่างๆของวงจรพาสคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.11 แสดงรูปสัญญาณที่วัดคร่อมเกตร-ซอร์สของวงจรพหุ-พูลคอนเวอร์เตอร์ขณะไม่จ่ายโหลด

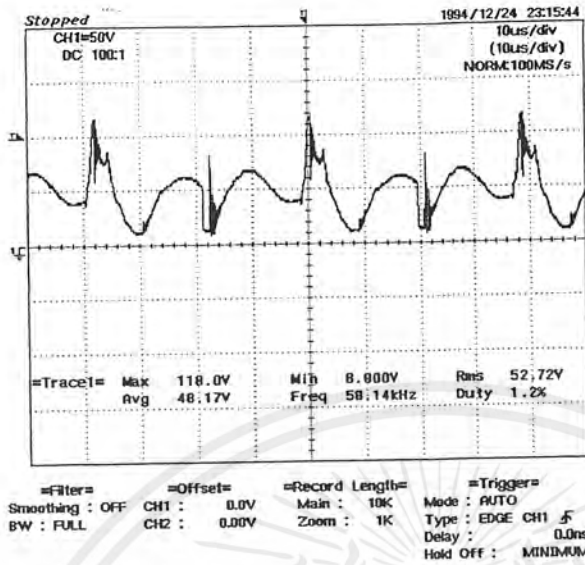
-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 1 ในภาพที่ 9.10 ซึ่งรูปสัญญาณที่วัดได้มีค่า duty 26.7%



รูปที่ 9.12 แสดงรูปสัญญาณที่วัดคร่อมเกตร-ซอร์สของวงจรพหุ-พูลคอนเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลด

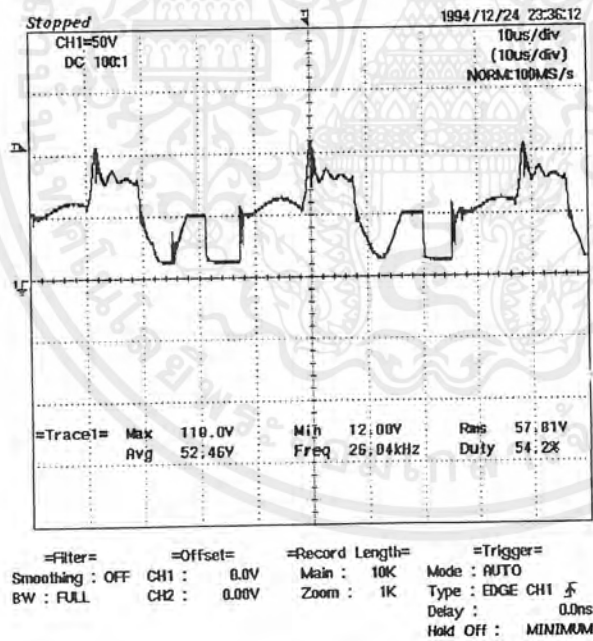
-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 1 ในภาพที่ 9.10 เช่นเดียวกับกับรูปที่ แต่เป็นสัญญาณที่วัดได้ขณะจ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.13 แสดงรูปสัญญาณที่วัดคร่อมแตรน-ซอร์สของวงจรพหุ-ผลคอนเวอร์เตอร์ขณะไม่จ่าย โหลด

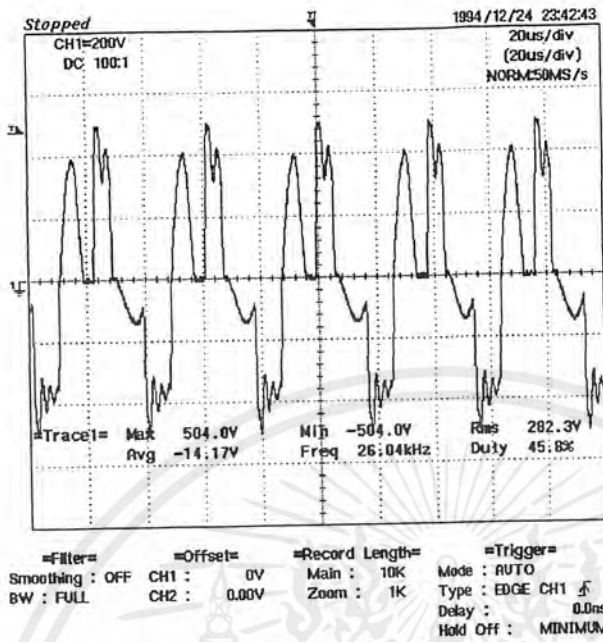
-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 2 ในภาพที่ 9.10



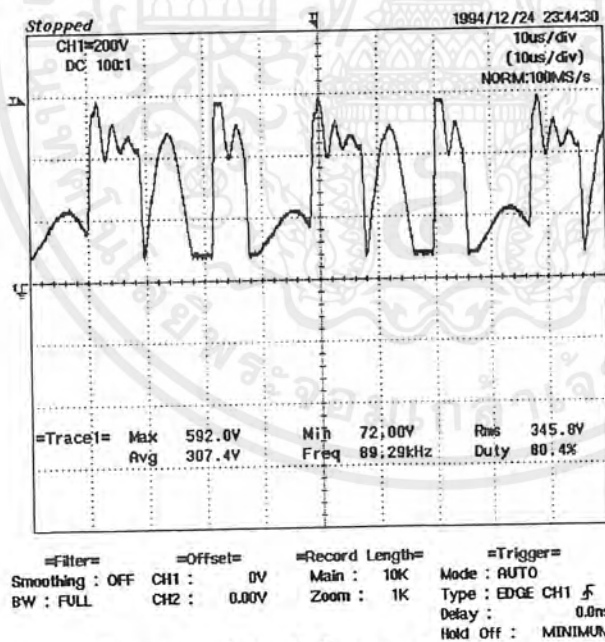
รูปที่ 9.14 แสดงรูปสัญญาณที่วัดคร่อมแตรน-ซอร์สของวงจรพหุ-ผลคอนเวอร์เตอร์ขณะจ่ายโหลด

-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 2 ในภาพที่ 9.10 เช่นเดียวกันกับรูปที่ 9.13 แต่เป็น สัญญาณที่วัดได้ขณะจ่ายโหลด รูปสัญญาณที่วัดได้มีลักษณะแตกต่างจากทฤษฎีเล็กน้อย หากจ่าย โหลดที่มีค่ามากกว่านี้จะทำให้รูปกราฟมีลักษณะใกล้เคียงทฤษฎีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

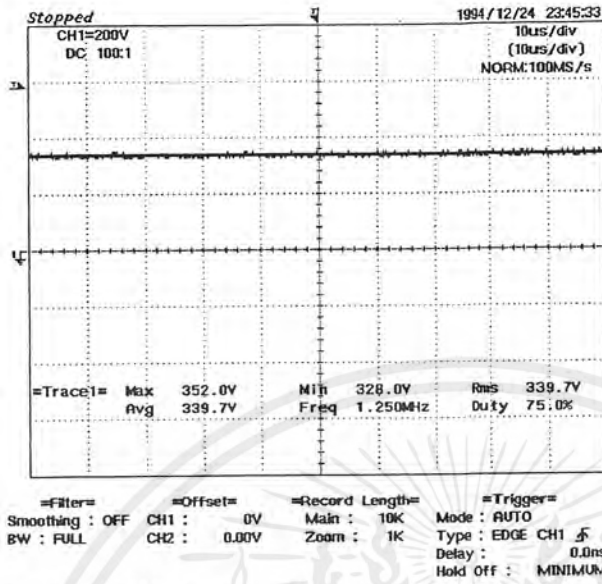


รูปที่ 9.15 แสดงรูปสัญญาณก่อนเข้าไดโอดของวงจรพวงรูปทูลคอนเวอร์เตอร์
 -เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 3 ในภาพที่ 9.10



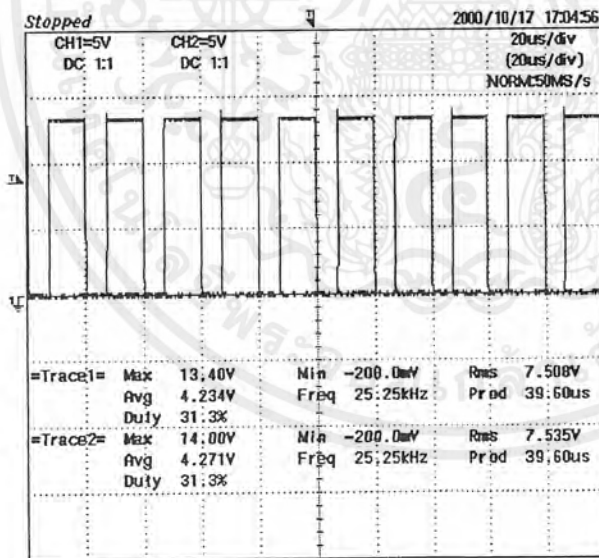
รูปที่ 9.16 แสดงรูปสัญญาณหลังผ่านไดโอดของวงจรพวงรูปทูลคอนเวอร์เตอร์
 -เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 4 ในภาพที่ 9.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.17 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพวง-พูลคอนเวอร์เตอร์

-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากจุดวัดที่ 4 ในภาพที่ 9.10 ซึ่งได้แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยออกมา 340 โวลท์ ซึ่งอยู่ในช่วงที่อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้



รูปที่ 9.18 แสดงแรงดันควบคุมจากวงจร TL 494

-เป็นรูปสัญญาณที่วัดได้จากขาเอาต์พุตของ TL494 ใช้เป็นสัญญาณทริกที่ป้อนแก่ขาเกตของ มอสเฟต ซึ่งใช้ความถี่ในการสวิตซ์ที่ 25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 3

เรื่อง : การทดลองควบคุมความเร็วรางไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

เพื่อหาวิธีการควบคุมความเร็วรถที่เหมาะสมและประหยัดพลังงานมากที่สุด

วิธีการทดลอง

จะแบ่งการทดลองทั้งหมดออกเป็น 6 ขั้นตอน แล้วนำข้อมูลที่ได้นำวิเคราะห์เลือกย่านการใช้งานที่เหมาะสม โดยการทดลองทั้ง 6 ขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 หาประสิทธิภาพของระบบ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทดลองหาประสิทธิภาพของวงจรพวง-พูล คอนเวอร์เตอร์
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจร inverter สำเร็จรูป
3. เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรทั้งระบบ

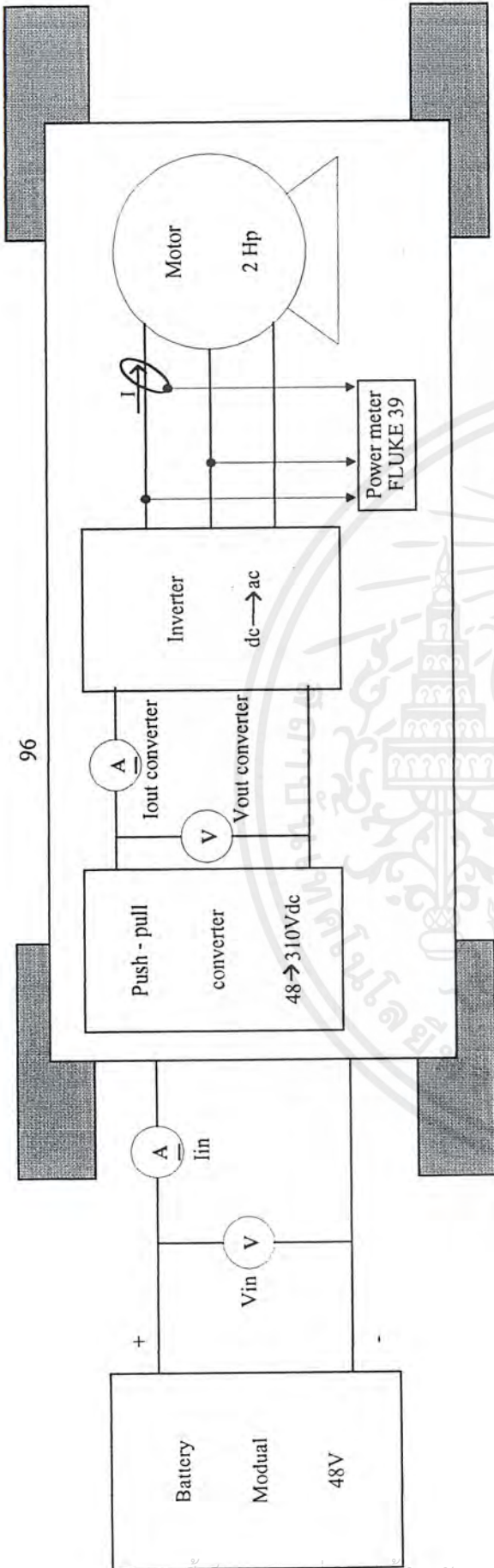
อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องวัด Power meter Analysis รุ่น Fluke 39 ,1 ตัว (ยืมจากสำนักบริการ)
2. Multimeter ของ Hewlettpackage 2 ตัว ชนิด digital
3. Dc meter ของ Yogogawa 2 ตัว
4. Junction Box 1 อัน
5. สายไฟ 20 เส้น

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งวงจรพวง-พูลเข้ากับวงจรอินเวอร์เตอร์พร้อมทั้งประกอบระบบขับเคลื่อนเข้ากับตัวรถ จ่ายไฟจากแบตเตอรี่เข้าที่รางจ่ายไฟ
2. ทำการติดตั้งเครื่องวัดตามจุดต่างๆ ดังรูป 9.19
3. ทดลองที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกต่างๆ (ไม่มีน้ำหนักบรรทุก , 65 kg. , 130 kg. , 195 kg.) โดยการปรับความเร็วตั้งแต่ 0-70 Hz บันทึกค่า V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out} ของ พวง-พูล ค่า V_{out} , I_{out} , P_{out} , P.F. ของวงจรอินเวอร์เตอร์
4. นำค่าที่ได้ไปวาดกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์เลือกสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



V

Vom Hellate packard ชนิด digital

A

Ammeter DC ชนิดเข็ม

รูปที่ 9.19 วงจรการทดลองวัดผลประสิทธิภาพ

ตอนที่ 1 หาประสิทธิภาพของวงจร ที่สภาวะโหลดใดๆ

ตารางที่ 9.2.1 ผลการทดลองที่สภาวะตัวเปล่า

ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (Hz)	พหุผลคอนเวอร์เตอร์							อินเวอร์เตอร์					
	Vin (Volt)	Iin (Amp)	Pin (W)	Vout (Volt)	Iout (Amp)	Pout (W)	η (%)	Vout(inv) (Volt)	Iout(inv) (Amp)	Pout(inv) (W)	P.F	η (inv)	η all
0	49.10	1.40	68.74	334.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	48.70	3.19	155.35	310.50	0.20	62.10	39.97	31.00	1.67	32.24	0.36	51.92	20.75
20	48.65	3.50	170.28	307.50	0.30	92.25	54.18	58.40	1.69	80.25	0.47	86.99	47.13
30	48.55	4.00	194.20	302.50	0.42	127.05	65.42	84.70	1.74	119.83	0.47	94.32	61.71
40	48.50	4.70	227.95	297.00	0.60	178.20	78.18	109.00	1.69	152.97	0.48	85.84	67.11
50	48.35	5.60	270.76	289.00	0.78	225.42	83.25	134.40	1.72	199.96	0.50	88.71	73.85
60	48.35	6.40	309.44	286.50	0.90	257.85	83.33	160.00	1.69	233.90	0.50	90.71	75.59
70	48.20	7.90	380.78	287.00	1.13	324.31	85.17	183.00	1.77	240.96	0.43	74.30	63.28

ตารางที่ 9.2.2 ผลการทดลองที่สภาวะบรรทุก 1 คน

1.2 สภาวะบรรทุก 1 คน 65 kg														
ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (Hz)	พิกัดคอนเวอร์เตอร์							อินเวอร์เตอร์						
	Vin (Volt)	Iin (Amp)	Pin (W)	Vout (Volt)	Iout (Amp)	Pout (W)	η (%)	Vout(inv) (Volt)	Iout(inv) (Amp)	Pout(inv) (W)	P.F	η (inv) (%)	η (all) (%)	
0	47.50	1.50	71.25	332.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	47.10	2.90	136.59	312.00	0.21	65.52	47.97	29.40	1.72	24.50	0.28	37.39	17.93	
20	46.80	3.50	163.80	303.50	0.35	106.23	64.85	57.20	1.74	72.32	0.42	68.08	44.15	
30	46.50	4.60	213.90	298.50	0.52	155.22	72.57	82.90	1.73	104.21	0.42	67.13	48.72	
40	46.30	5.50	254.65	288.50	0.75	216.38	84.97	107.80	1.72	144.35	0.45	66.71	56.68	
50	46.10	6.50	299.65	272.50	0.85	231.63	77.30	134.00	1.74	193.62	0.48	83.59	64.61	
60	45.50	7.00	318.50	270.00	1.05	283.50	89.01	157.00	1.83	198.82	0.40	70.13	62.42	
70	45.40	9.50	431.30	273.50	1.50	410.25	95.12	179.00	1.92	202.15	0.34	49.28	46.87	

ตารางที่ 9.2.3 ผลการทดลองที่สภาวะบรรทุก 2 คน

1.3 ที่สภาวะบรรทุก 2 คน (132 kg.)

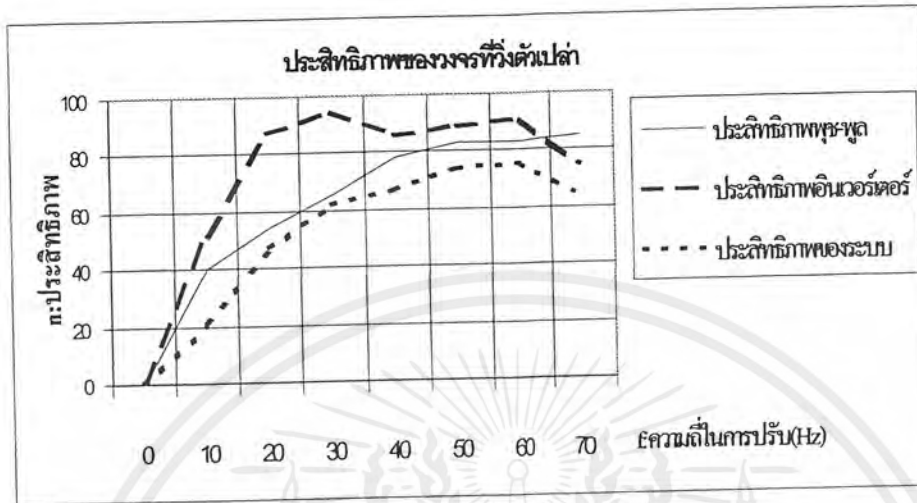
ความถี่ของอินเวอร์เตอร์	พวงพุดคอนเวอร์เตอร์										อินเวอร์เตอร์					
	Vin (Volt)	Iin (Amp)	Pin (W)	Vout (Volt)	Iout (Amp)	Pout (W)	η (%)	Vout(inv) (Volt)	Iout(inv) (Amp)	Pout(inv) (W)	P.F	η (inv) (%)	η (all) (%)			
0	49.1	1.4	68.74	335.2	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00			
10	48.7	3.3	160.71	311	0.2	62.20	38.70	28.7	1.74	24.19	0.28	38.89	15.05			
20	48.7	4	194.80	305	0.44	134.20	68.89	56.1	1.84	64.29	0.36	47.90	33.00			
30	48.5	4.5	218.25	298	0.62	184.76	84.66	80.7	1.75	112.39	0.46	60.83	51.49			
40	48.5	6	291.00	292	0.79	230.68	79.27	106.2	1.79	128.26	0.39	55.60	44.08			
50	48.3	7.5	362.25	287	1.04	298.48	82.40	121	1.74	182.12	0.50	61.01	50.27			
60	48.1	8	384.80	285	1.21	344.85	89.62	151	1.83	205.56	0.43	59.61	53.42			
70	48	10	480.00	281	1.51	424.31	88.40	164	1.75	248.26	0.50	58.51	51.72			

ตารางที่ 9.2.4 ผลการทดลองที่สภาวะบรรทุก 3 คน

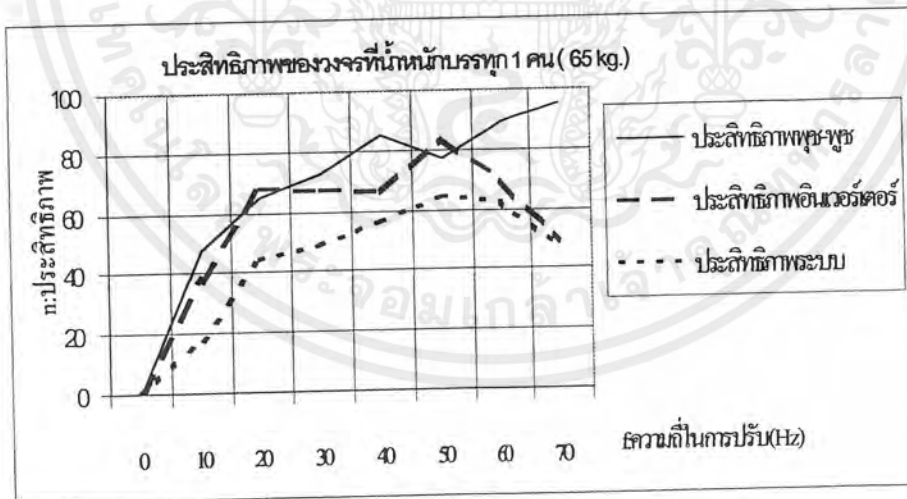
1.4 ที่สภาวะวิ่งบรรทุก 3 คน (187 kg.)

ความถี่ของอินเวอร์เตอร์	พหุผลคอนเวอร์เตอร์							อินเวอร์เตอร์						
	Vin (Volt)	Iin (Amp)	Pin (W)	Vout (Volt)	Iout (Amp)	Pout (W)	η (%)	Vout(inv) (Volt)	Iout(inv) (Amp)	Pout(inv) (W)	P.F	η (inv) (%)	η (all) (%)	
0	49.3	1.4	69.02	334	0	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
10	48.8	3.4	165.92	308	0.2	61.60	37.13	31	1.69	40.79	0.45	66.21	24.58	
20	48.7	4	194.80	302	0.45	135.90	69.76	58	1.7	80.17	0.47	58.99	41.16	
30	48.6	5	243.00	298	0.65	193.70	79.71	83	1.79	120.80	0.47	62.37	49.71	
40	48.5	6	291.00	288	0.82	236.16	81.15	106	1.79	134.58	0.41	56.99	46.25	
50	48.3	7.5	362.25	287	1.06	304.22	83.98	132	1.76	192.92	0.48	63.41	53.26	
60	48	10	480.00	282	1.3	366.60	76.38	157	1.76	239.02	0.50	65.20	49.80	
70	48	11	528.00	280	1.6	448.00	84.85	182	1.75	275.50	0.50	61.50	52.18	

กราฟที่ได้จากการทดลอง ตอนที่ 1

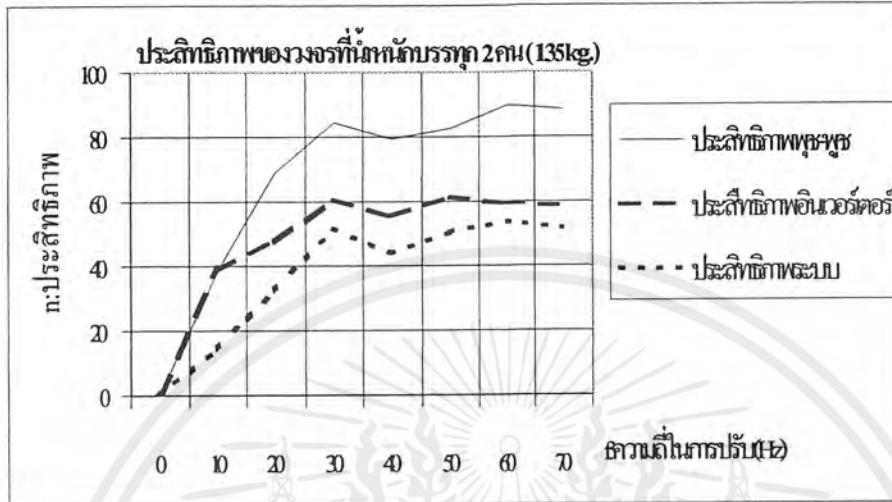


รูปที่ 9.20 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจร เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ สภาวะวงตัวเปล่า

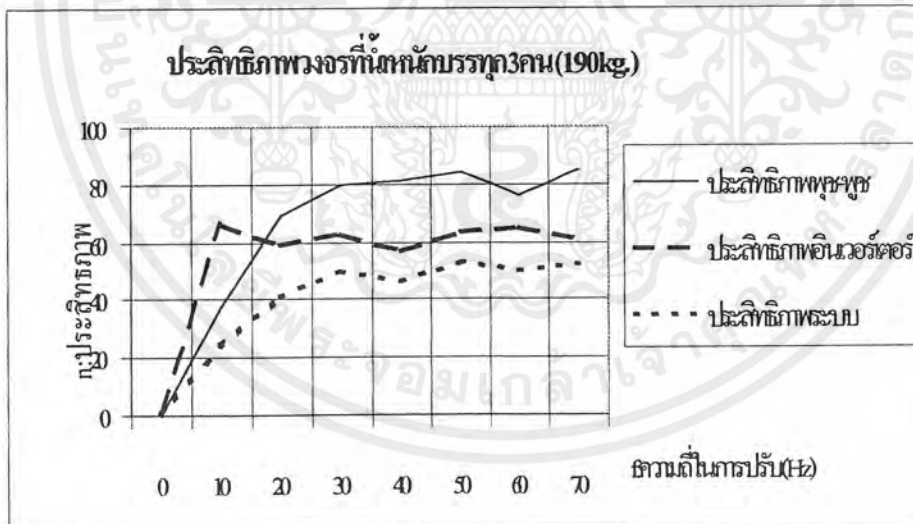


รูปที่ 9.21 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจร เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่ สภาวะวิ่งบรรทุกน้ำหนัก 1 คน (65 kg.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.22 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจร เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่ สภาวะวิ่งบรรทุกน้ำหนัก 2 คน (135 kg.)



รูปที่ 9.23 แสดงประสิทธิภาพของวงจร ณ จุดต่างๆของวงจร เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ที่ สภาวะวิ่งบรรทุกน้ำหนัก 3 คน (190 kg.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1

1. ส่วนของวงจร พุช-พูล คอนเวอร์เตอร์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่การปรับอินเวอร์เตอร์ กับประสิทธิภาพของวงจร พุช-พูล คอนเวอร์เตอร์ ทั้ง 4 กราฟมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ เมื่อปรับค่าความถี่มากขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

- ในช่วงความถี่ต่ำ (0-30 Hz) ค่าประสิทธิภาพ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก

- ในช่วงความถี่สูง (40-70 Hz) ค่าประสิทธิภาพ จะมีแนวโน้มเกือบคงที่ ที่ 80 %

จากสิ่งที่เกิดขึ้น มีสาเหตุจากสิ่งดังต่อไปนี้ คือ เมื่อเราเพิ่มความถี่มากขึ้น แรงดันอินพุตที่ป้อนให้วงจรก็มากขึ้น กำลังงานขาเข้า (Pin) ของวงจรมากขึ้น กำลังงานขาออก (Pout) มากขึ้น ส่วนค่าความสูญเสียเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังงาน ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยจะทำการอธิบายถึงการส่งถ่ายกำลัง ที่เกิดภายในวงจรคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

$$P_{in} (\text{เพิ่มขึ้น}) = P_{loss} (\text{เพิ่มขึ้นเล็กน้อย}) + P_{out} (\text{เพิ่มขึ้น})$$

โดยที่ $P_{loss} = P_{cu}$ (สูญเสียในขดลวด) + P_{core} (สูญเสียในแกนเหล็ก)

$P_{cu} = I^2 R$ มีค่าเพิ่มขึ้นน้อย เนื่องจากค่าความต้านทานในขดลวดมีค่าน้อย

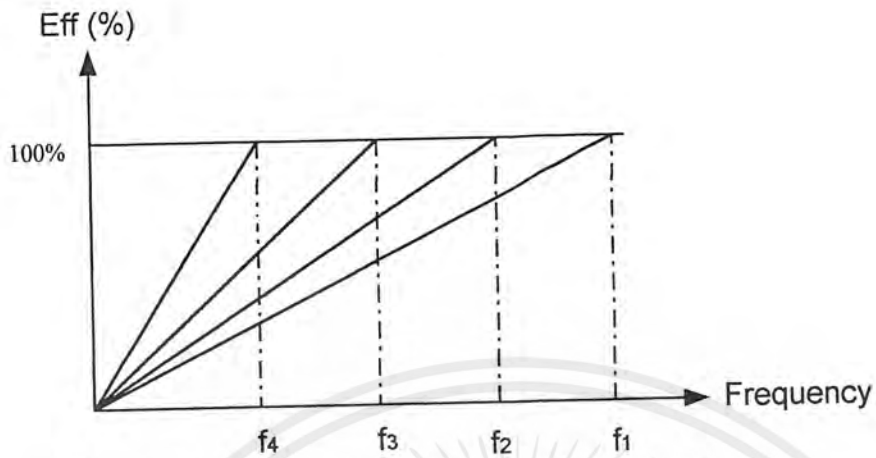
$P_{core} = I_{\phi}^2 R_c$ มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยเช่นกัน เนื่องจาก ค่า I_{ϕ} (กระแสกระตุ้น) มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ค่าความต้านทานในแกนเหล็กก็มีค่าคงที่ ด้วย ดังนั้น ค่า P_{loss} จึงมีผลต่อระบบค่อนข้างน้อยในช่วงความถี่ 40 - 70 Hz

- ในย่านความถี่ใช้งานที่ 50-60 Hz ค่าประสิทธิภาพของวงจร พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์โดยเฉลี่ยคือ 80%

2. ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์

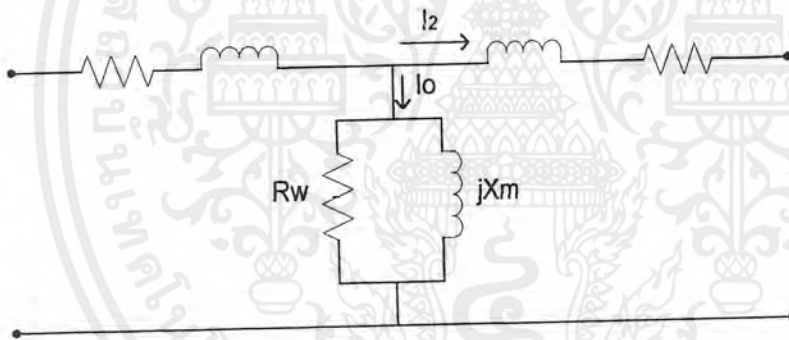
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการปรับอินเวอร์เตอร์กับ ประสิทธิภาพของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทั้ง 4 กราฟมีลักษณะคล้ายกัน คือเมื่อปรับค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของวงจรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วง 0- 20 Hz แล้วมีค่าเกือบคงที่ ที่ 60 % ในช่วง 30-70 Hz แต่ในทางอุดมคติประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ มีค่าคงที่ที่ 100% โดยจะอธิบายดังต่อไปนี้

- ในทางอุดมคติ อินเวอร์เตอร์จะมีประสิทธิภาพ 100% คงที่ดังกราฟ



รูปที่ 9.24 แสดงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในทางอุดมคติ

แต่ในการนำอินเวอร์เตอร์ไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ความถี่ต่ำๆ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะไม่เท่ากับ 100% ทั้งนี้พิจารณาจากวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 9.25 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร (Z) ในส่วนที่ $R_w // X_m$ ได้จาก

$$Z = \frac{R_w \times jX_m}{R_w + jX_m} \quad \dots(9.8)$$

เพื่อความชัดเจน สมมุติค่า $R_w = 50 \Omega$

$$L = \frac{1}{2\pi} \text{ H} \quad \dots(9.9)$$

$$\text{สูตร} \quad X_m = 2\pi fL \quad \dots\dots\dots(9.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \{\text{ที่ความถี่สูง}\} \quad f = 50 \text{ Hz} &\rightarrow X_m = 50 \Omega \\ &\rightarrow Z = \frac{50 \times j50}{50 + j50} = \frac{2500 \angle 90^\circ}{70.71 \angle 45^\circ} \\ &Z = 35.35 \angle 45^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{\text{ที่ความถี่ต่ำ}\} \quad f = 1 \text{ Hz} &\rightarrow X_m = 1 \Omega \\ &\rightarrow Z = \frac{50 \times j1}{50 + j1} = \frac{50 \angle 90^\circ}{50 \angle 1.14^\circ} \\ &Z = 1 \angle 88.86^\circ \Omega \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำ ค่า Z (impedance) จะลดลงมาก เมื่อเทียบกับที่ความถี่สูง ทำให้กระแสกระตุ้น (I_b) ไหลได้มาก จึงเกิดการสูญเสีย ($I^2 R_w$) มากตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ไม่เป็น 100% ตามทฤษฎีในเชิงอุดมคติ หากยังต้องการรักษาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ให้ยังคง 100% เหมือนเดิม ก็สามารถทำได้โดยการยกแรงดัน (Boost Voltage) หรือ เรียกอีกอย่างว่าการเพิ่มค่า ทอร์คบูส สามารถดูรายละเอียดได้ในเรื่องอินเวอร์เตอร์ จากทฤษฎีดังกล่าวจะนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุที่ความถี่ต่ำ และความถี่สูงดังต่อไปนี้

ในช่วงความถี่ต่ำ ช่วง 0-20 Hz ค่าประสิทธิภาพมีค่าต่ำมาก ประมาณ 0-50 % ซึ่งมีเหตุผลตามทฤษฎีข้างต้น คือที่ความถี่ต่ำ ประสิทธิภาพจะมีค่าต่ำ

ในช่วงความถี่สูง ช่วง 30-70 Hz

- กรณี no-load ประสิทธิภาพประมาณ 80%

- กรณี มีโหลดบรรทุกที่ 65 kg, 130 kg, และ 195 kg ประสิทธิภาพจะลดลงเหลือประมาณ 60% แต่จะไม่เป็น 100% ตรงตามทฤษฎี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ รถไฟฟ้าที่ทำการทดลองได้ถูกใช้งานไม่ถึงพิกัด(ดูจากกำลังงานเอาต์พุตที่ใช้เพียงประมาณ 275 วัตต์ จาก 1,500 วัตต์) จากทฤษฎีของมอเตอร์บที่ 1 ผลเสียของการใช้มอเตอร์ที่สถานะ โหลดน้อย จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง(Power factor) มีค่าต่ำมีผลทำให้กำลังงานเอาต์พุต(Pout)ต่ำตามไปด้วย

- ย่านความถี่ใช้งาน ที่ 50-60Hz ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าประมาณ 60 %

3. ในส่วนของวงจรทั้งระบบ

จะเห็นว่าที่ย่านความถี่ที่ใช้งาน 50-60 Hz ค่าประสิทธิภาพของวงจรจะมีค่าโดยประมาณที่

48%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 หา % Voltage Regulation ของวงจร พืช-พุด คอนเวอร์เตอร์

วัตถุประสงค์ : เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของวงจร พืช-พุด คอนเวอร์เตอร์

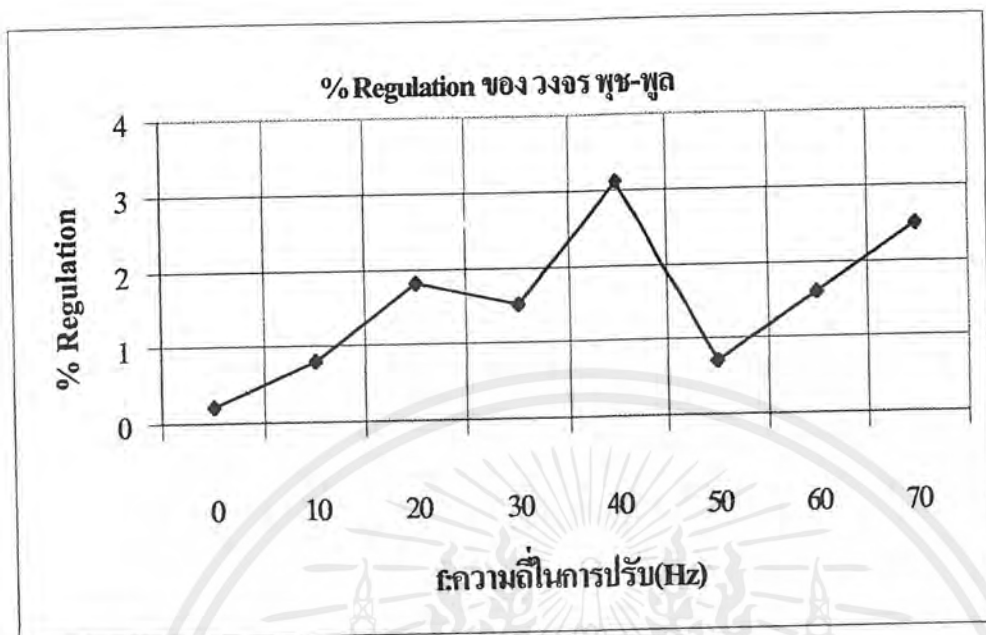
วิธีการทดลอง: การทดลองทำการทดลองเช่นเดียวกันกับตอนที่ 1 โดยใช้ผลการทดลองที่น้ำหนัก

บรรทุก 3 คน (195 kg)

ตารางที่ 9.3 แสดงผลการทดลอง % Voltage Regulation

f (Hz)	Vout(no-load)	Vout(full-load 187 kg.)	%voltage regulation
0	334.70	334	0.21
10	310.50	308	0.81
20	307.50	302	1.82
30	302.50	298	1.51
40	297.00	288	3.13
50	289.00	287	0.70
60	286.50	282	1.60
70	287.00	280	2.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.26 กราฟที่ได้จากผลการทดลองหา%โวลต์เตจเรกกูเลชั่น

วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2

จากกราฟโวลต์เตจเรกกูเลชั่น จะเห็นได้ว่าการแกว่งขึ้นลงในช่วง 20 – 60 Hz ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของการวัด และการออกแบบวงจรควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control) ยังไม่ดีเท่าที่ควร โดยจะต้องทดลองปรับแก้ไขที่ค่าดีวตี้ไซเคิล(duty cycle) ของวงจรดังกล่าว เพื่อหาค่าโวลต์เตจเรกกูเลชั่นที่เหมาะสม โดยมีค่าลดลงต่ำกว่านี้

-ในย่านความถี่ใช้งาน 50-60 Hz มีค่า% โวลต์เตจเรกกูเลชั่น ประมาณ 1.5 %

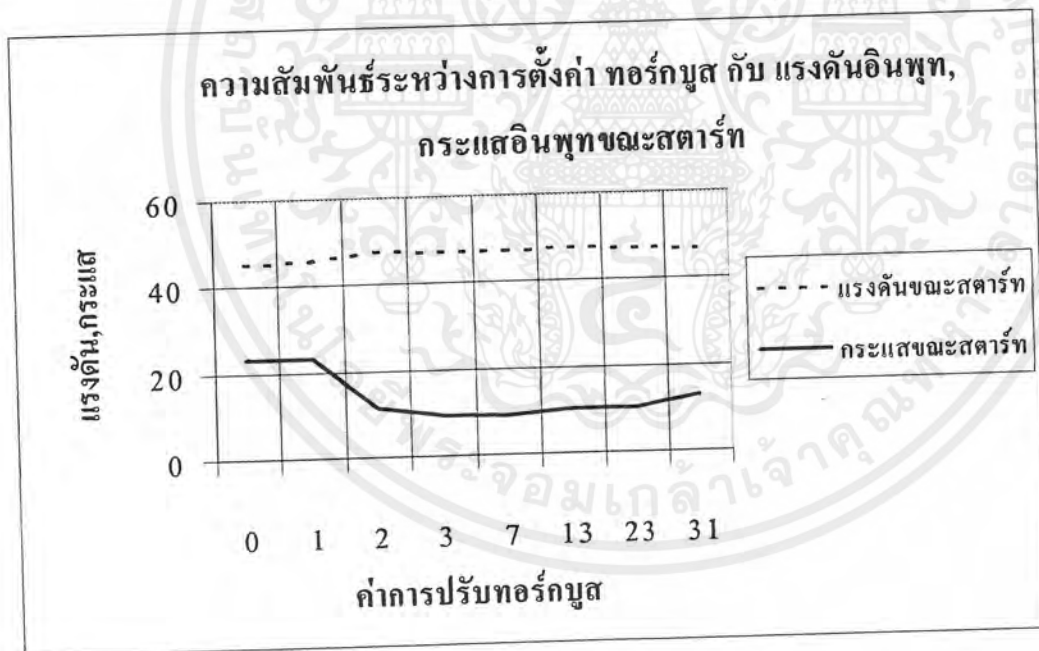
ตอนที่ 3 หาค่าความสัมพันธ์ของค่าทอร์กบูส กับแรงดัน และกระแสขณะสตาร์ท

วัตถุประสงค์ : เพื่อหาค่าทอร์กบูสที่เหมาะสมในการสตาร์ทมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

วิธีการทดลอง : ทำการบรรทุกโหลด 1 คน (65 kg) แล้วทำการวัดค่าแรงดันอินพุทและกระแสอินพุทของวงจรพูช-พูลคอนเวอร์เตอร์โดยวิธีการทดลองทำเช่นเดียวกันกับตอนที่ 1

ตารางที่ 9.4 แสดงผลการทดลองหาค่าทอร์กบูส

ตั้งค่า Torque-boost ที่	Vin start Volt	Iin start Amp
0	45.3	23.0
1	45.4	23.0
2	47.5	11.2
3	47.3	9.4
7	47.0	9.0
13	47.4	10.0
23	47.0	10.0
31	46.6	13.0



รูปที่ 9.27 กราฟที่ได้จากการทดลองการหาค่าทอร์กบูสที่เหมาะสม

วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 3

จากกราฟผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าการปรับทอร์กบูสให้มากขึ้น มีผลให้แรงดันอินพุตที่วัดได้ค่อนข้างคงที่ ส่วนกระแสอินพุตจะมีค่าสูงมากในช่วงแรก(ทอร์กบูสค่า 0-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจะมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงการปรับทอร์เก้นค่า 3-23 จึงสรุปได้ว่าการตั้งค่าทอร์เก้นที่ต่ำเกินไปจะมีผลทำให้กระแสอินพุทขณะสตาร์ทสูงเกินไปซึ่งอาจจะทำให้วงจรและมอเตอร์เกิดความเสียหายเมื่อกระแสขณะสตาร์ทสูงเกินพิกัดที่สามารถทนได้ ดังนั้นเราควรที่จะตั้งค่าทอร์เก้นที่เหมาะสมคือค่าทอร์เก้นประมาณ 7-13 (โดยดูได้จากคู่มือการใช้งานอินเวอร์เตอร์ที่ให้มา)

-ค่าทอร์เก้นที่เหมาะสม คือ 13

ตอนที่ 4 การหาค่าแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิกส์

วัตถุประสงค์ : เพื่อวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับอื่นๆที่เกิดขึ้นจากระบบ

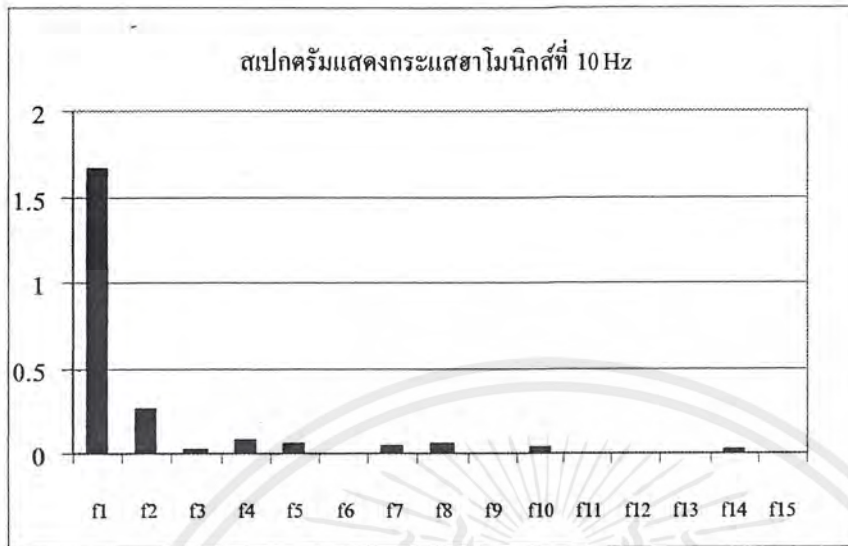
อุปกรณ์ : เพาเวอร์มิเตอร์ FLUKE 39 ที่สามารถวัดค่าฮาร์มอนิกส์ได้

วิธีการทดลอง : นำเพาเวอร์มิเตอร์วัดที่เอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ อ่านค่าแล้วบันทึกผล

ตารางผลการทดลองตอนที่ 4

ตาราง 9.5.1 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์มอนิกส์ ที่ ความถี่ 10 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	99.7	30	98.5	1.66
f2	5.3	2	15.5	0.26
f3	0	0	1.3	0.02
f4	1.1	0	4.6	0.08
f5	2.1	1	3.8	0.06
f7	1.8	1	2.8	0.05
f8	2.9	1	3.4	0.06
f10	1.3	0	1.6	0.03
f11	1.2	0	0	0
f12	1.3	0	0	0
f14	0	0	1	0.02

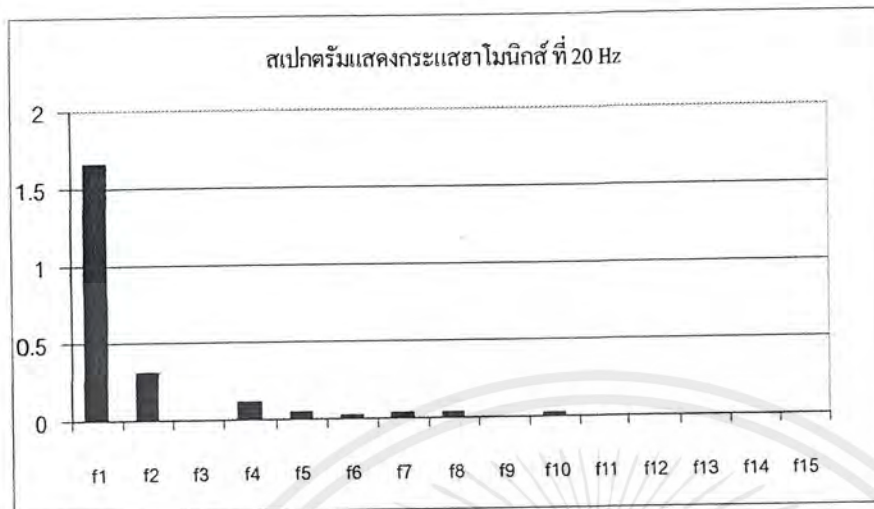


รูปที่ 9.28 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ที่ 10 Hz

ตาราง 9.5.2 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ ความถี่ 20 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	99.9	57	98	1.66
f2	4.5	3	18.6	0.31
f3	0	0	0	0
f4	0	0	6.3	0.11
f5	1	1	2.8	0.05
f6	0	0	1.1	0.02
f7	1.1	1	1.9	0.03
f8	1.8	1	1.3	0.03
f9	0	0	0	0
f10	0	0	1.2	0.02
f11	0	0	0	0
f12	0	0	0	0
f13	0	0	0	0
f14	0	0	0	0
f15	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

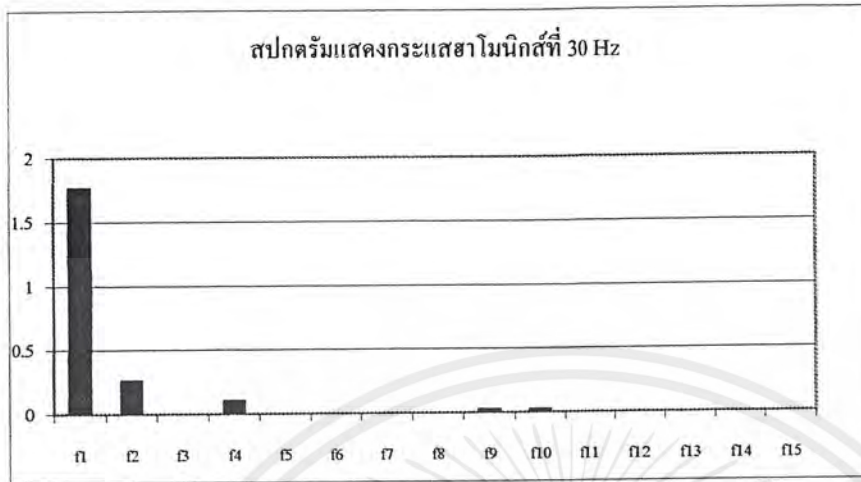


รูปที่ 9.29 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ ที่ 20 Hz

ตาราง 9.5.3 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์มอนิกที่ ความถี่ 30 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	99.9	83	98.7	1.76
f2	3.2	3	14.8	0.26
f3	0	0	0	0
f4	0	0	5.6	0.1
f5	0	0	0	0
f6	0	0	0	0
f7	0	0	0	0
f8	0	0	0	0
f9	0	0	1.1	0.02
f10	0	0	1.2	0.02
f11	0	0	0	0
f12	0	0	0	0
f13	0	0	0	0
f14	0	0	0	0
f15	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

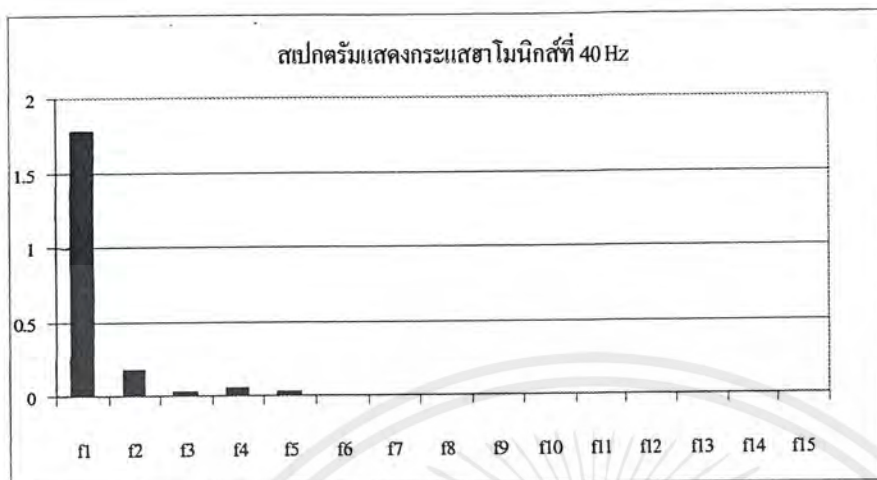


รูปที่ 9.30 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ที่ 30 Hz

ตาราง 9.5.4 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ ความถี่ 40 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	100	106	99.5	1.78
f2	1.9	2	9.4	0.17
f3	0	0	1.8	0.03
f4	0	0	2.6	0.05
f5	0	0	1	0.02
f6	0	0	0	0
f7	0	0	0	0
f8	0	0	0	0
f9	0	0	0	0
f10	0	0	0	0
f11	0	0	0	0
f12	0	0	0	0
f13	0	0	0	0
f14	0	0	0	0
f15	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

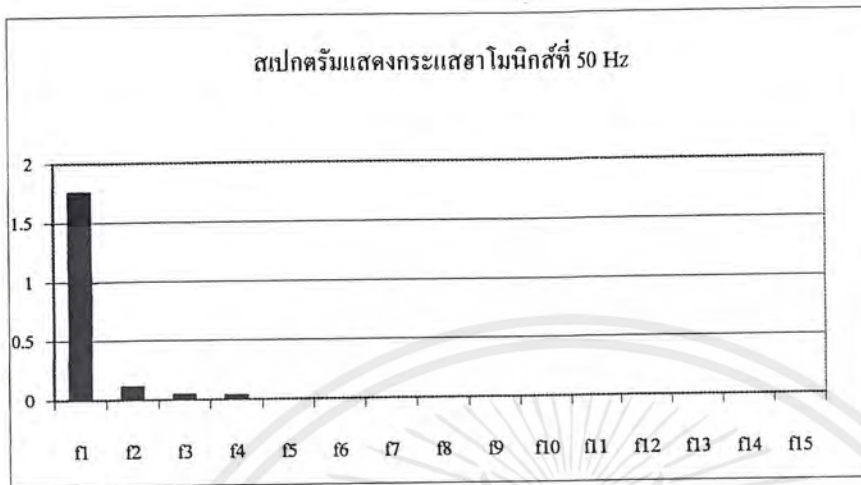


รูปที่ 9.31 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ที่ 40 Hz

ตาราง 9.5.5 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ ความถี่ 50 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	100	132	99.8	1.75
f2	1.3	2	6	0.11
f3	0	0	2.1	0.04
f4	0	0	1.4	0.03
f5	0	0	0	0
f6	0	0	0	0
f7	0	0	0	0
f8	0	0	0	0
f9	0	0	0	0
f10	0	0	0	0
f11	0	0	0	0
f12	0	0	0	0
f13	0	0	0	0
f14	0	0	0	0
f15	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

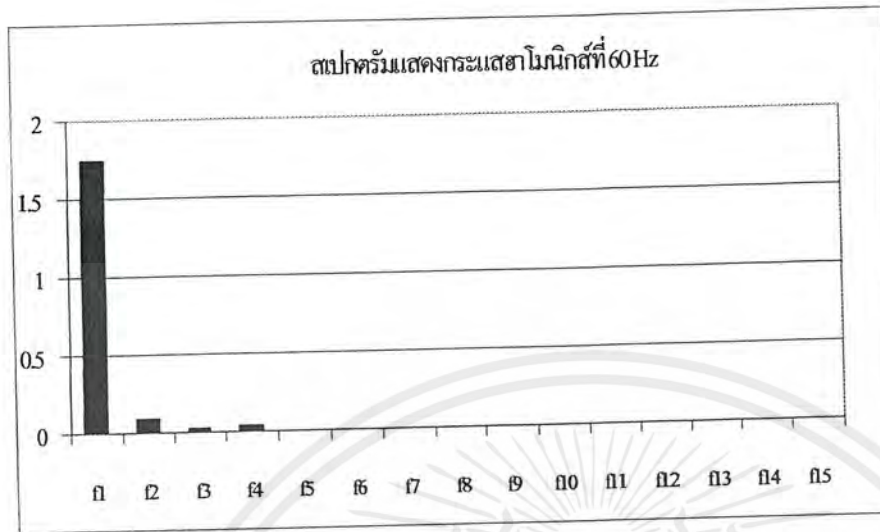


รูปที่ 9.32 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ที่ 50 Hz

ตาราง 9.5.6 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิกที่ ความถี่ 60 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	100	157	99.8	1.75
f2	1.2	2	5.1	0.09
f3	0	0	1.5	0.03
f4	0	0	2.2	0.04
f5	0	0	0	0
f6	0	0	0	0
f7	0	0	0	0
f8	0	0	0	0
f9	0	0	0	0
f10	0	0	0	0
f11	0	0	0	0
f12	0	0	0	0
f13	0	0	0	0
f14	0	0	0	0
f15	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

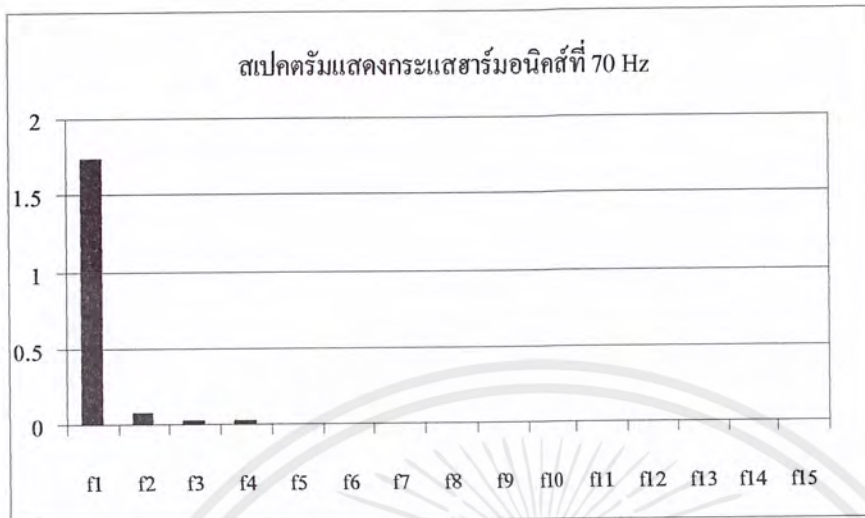


รูปที่ 9.33 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ ที่ 60 Hz

ตาราง 9.5.7 ตารางผลการทดลองหาค่าฮาร์โมนิก ที่ ความถี่ 70 Hz

ความถี่	%V	V	%A	A
f1	100	182	99.9	1.74
f2	1.1	2	4.4	0.08
f3	0	0	1.3	0.02
f4	0	0	1.9	0.03
f5	0	0	0	0
f6	0	0	0	0
f7	0	0	0	0
f8	0	0	0	0
f9	0	0	0	0
f10	0	0	0	0
f11	0	0	0	0
f12	0	0	0	0
f13	0	0	0	0
f14	0	0	0	0
f15	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.34 กราฟสเปกตรัมแสดงกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ที่ 70 Hz

วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 4

จากกราฟการทดลองหาค่ากระแสฮาร์โมนิก ที่ค่าการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ตั้งแต่ 0-70 Hz จะสังเกตเห็นว่าที่ความถี่ต่ำๆ (10-40 Hz) จะมีค่ากระแสฮาร์โมนิกเกิดขึ้นค่อนข้างมากทำให้ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) ต่ำ ส่งผลให้ค่ากำลังงานเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าต่ำประสิทธิภาพจึงต่ำตามไปด้วย โดยสังเกตได้จากกราฟการทดลองตอนที่ 1 (ที่ความถี่ต่ำๆประสิทธิภาพก็ต่ำ) ในทางตรงข้ามหากเพิ่มค่าการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น (50-70Hz) ค่ากระแสฮาร์โมนิกจะมีค่าลดลงโดยจะมีค่ากระแสฮาร์โมนิกเพียง 3 ลำดับเท่านั้น (f2-f4) จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าย่านที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าอินเวอร์เตอร์ควรจะอยู่ระหว่างค่า 50-70 Hz

-ค่าความถี่ที่ย่านใช้งานที่ความถี่ 50-60Hz มีค่าเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ประมาณ 5.5% ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

ตอนที่ 5 หาความเร็วรถที่สถานะโหลดใดๆ

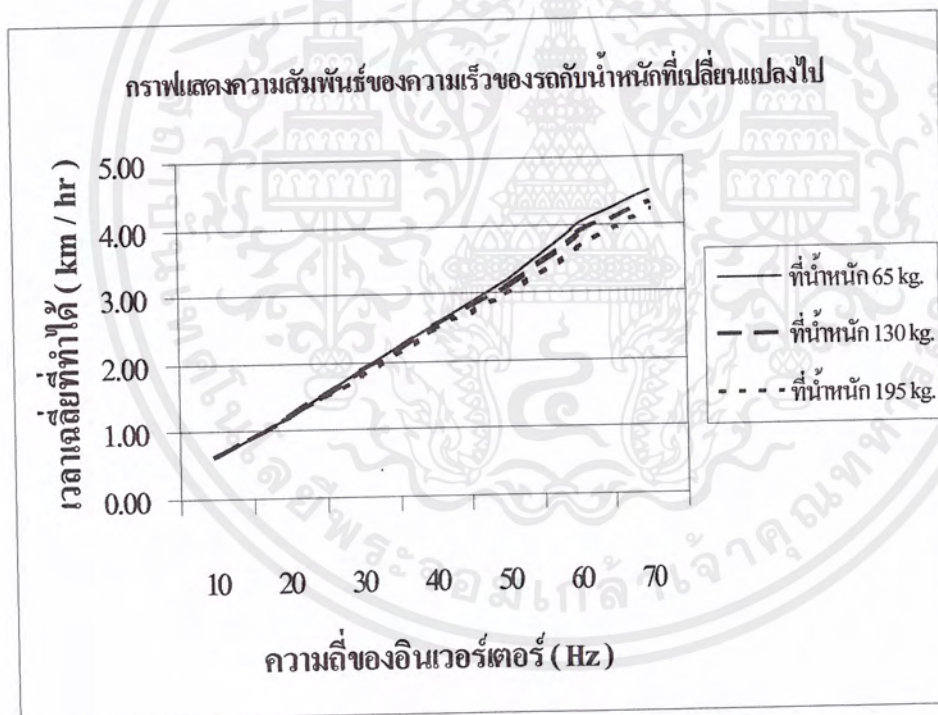
วัตถุประสงค์: เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยที่รถรางไฟฟ้าสามารถทำได้

วิธีการทดลอง: ทำการบรรทุกรถคน 1 คน (65 kg) , 2 คน (130 kg) ,3 คน (195kg) ให้รถวิ่ง 1 รอบ

ระยะทาง 50 เมตร แล้วจับเวลา นำข้อมูลที่ได้บันทึกผล และคำนวณหาความเร็วรถ

ตารางที่ 9.6 ผลการทดลองการหาความเร็วรอบ

ความถี่ของinverter Hz	เวลาเฉลี่ยที่ทำได้ (km / hr)		
	โหลด 65 kg.	โหลด 130 kg.	โหลด 195 kg.
10	0.61	0.61	0.61
20	1.22	1.22	1.22
30	1.91	1.87	1.80
40	2.56	2.52	2.48
50	3.20	3.10	2.99
60	4.03	3.89	3.64
70	4.5	4.32	4.21



รูปที่ 9.35 กราฟที่ได้จากการทดลองหาความเร็วรอบ

วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 5

จากกราฟความเร็วรถที่พล็อตได้จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าที่น้ำหนักบรรทุก 65 ,130 , 195 kg. กราฟที่ได้จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก จนเกือบจะทับซ้อนกันจากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทำการทดลองมีผลน้อยมากต่อผลของความเร็วรถ ซึ่งอาจมีผลมาจากน้ำหนักที่ใช้ทำการทดลองยังมีค่าไม่ถึงพิกัดบรรทุกของรถราง ประกอบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

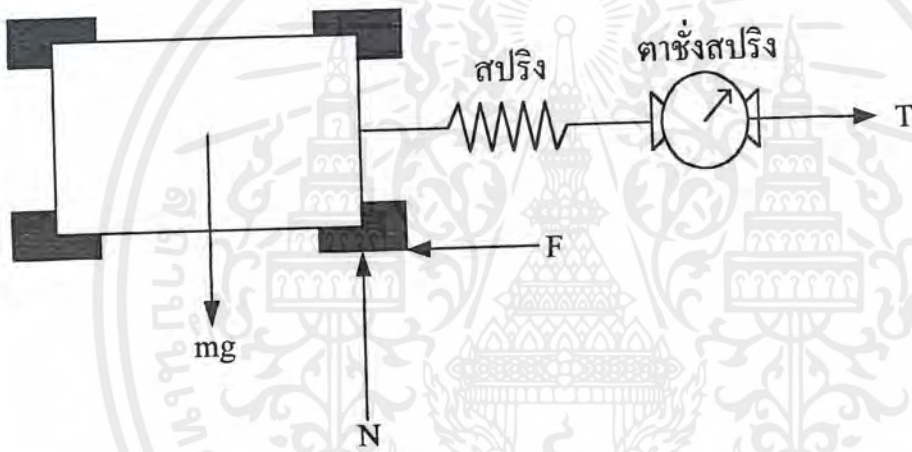
จับเคลื่อนบนตัวรถมีเฟืองทที่มีอัตราทดค่อนข้างสูง (1:18) จึงทำให้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นในการทดลองแทบไม่ส่งผลให้ความเร็วของรถรางลดลง

-ที่ย่านความถี่ใช้งาน 50-60 Hz ความเร็วโดยเฉลี่ย 4 km/hr

ตอนที่ 6 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อรถและรางโดยใช้ตาชั่งสปริง

วัตถุประสงค์ : เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกที่พิกัดของรถรางไฟฟ้า

วิธีการทดลอง: ดัดตั้งตาชั่งสปริงเข้ากับตัวรถดังแสดงในภาพแล้วออกแรงดึง อ่านค่าที่ตาชั่งสปริงขณะรถเริ่มเคลื่อนที่ออกตัว



หลักการ

จากสูตร

$$F = \mu N \quad \dots\dots\dots(9.11)$$

$$T \text{ (แรงดึงสปริง) } N = m = F \text{ (แรงเสียดทาน) } N \quad m$$

$$T = \mu N$$

$$\mu = \frac{T}{N} \quad \dots\dots\dots(9.12)$$

F: แรงเสียดทานที่กระทำที่ล้อ(N-m)

N:แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อล้อ

μ: ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.7 แสดงผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ครั้งที่	ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (Kg)
1	13.4
2	11.6
3	11.4
4	13.6
5	12.5

-หาค่าเฉลี่ยทั้งหมด = $13.4 + 11.6 + 11.4 + 13.6 + 12.5 = 62.5 / 5 = 12.5 \text{ kg}$

จากสมการที่ 9.12

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{12.5}{125} = 0.1$$

จากการคำนวณที่ได้จากการทดลองที่ 1 เรื่องทดสอบมอเตอร์ ได้กำหนดค่า $\mu = 0.2$ แต่จากการทดลองจริงพบว่า ค่า $\mu = 0.1$ ซึ่งสามารถหาน้ำหนักที่รถสามารถบรรทุกได้จริงดังที่แสดงต่อไป จาก การคำนวณในส่วนการวิเคราะห์การทดลองเรื่องมอเตอร์ ได้ค่า แรงเสียดทานที่ล้อ เท่ากับ $1,780 \text{ N-m}$ จึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณต่อเพื่อหาน้ำหนักที่รถสามารถบรรทุกได้ จากสมการ 9.11

$$F = \mu N$$

$$1,780 = 0.1 \times N$$

$$N = 17,800 \text{ N-m}$$

$$m = \frac{17,800}{9.8} = 1,816 \text{ kg}$$

เพราะฉะนั้นน้ำหนักบรรทุกของรถราง คือ $1,816 \text{ kg}$ สาเหตุที่สามารถบรรทุกได้มากขนาดนี้เพราะมีเฟืองทดที่มีประสิทธิภาพ อัตราทด 1:18 ซึ่งช่วยผ่อนแรงมอเตอร์ได้มากทีเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทั้ง 6 ตอนสามารถนำมาเขียนคุณสมบัติของระบบรูดรางไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้ดังต่อไปนี้

รายละเอียด	ขนาด
1. ค่าการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์	50-60 Hz
2. ประสิทธิภาพของวงจรทั้งระบบ	48%
3. ความเร็ว	4 km/hr
4. น้ำหนักบรรทุก(1 คน)	65kg
5. น้ำหนักบรรทุกที่พิกัด	1,816 kg
6. โวลต์เตจเรกกูเลชั่น(Voltage Regulation)	1.50%
7. % THD	5.88-6.9%
8. ค่าทอร์กบูส ที่เหมาะสม(Torque Boost)	13

วิจารณ์ผลการทดลอง

- 1.) ผลที่ได้อาจมีค่าคลาดเคลื่อน อันมีสาเหตุมาจาก เครื่องมือวัดที่ตอบสนองความถี่สูงมีอันเดียว จึงไม่สามารถวัดค่าทางอินพุต และ เอาต์พุตในเวลาเดียวกันได้ ทำให้ต้องค่าคนละครั้ง
- 2.) ค่าที่ได้จากการอ่านค่าที่เครื่องมือมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อันเนื่องมาจาก รางที่ทำขึ้นไม่มีความราบเรียบ สม่่าเสมอ บางช่วงแคบ บางช่วงกว้างเกินไป ส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อบังคับกับราง มีผลให้วงจรคิงกระแส ไม่สม่่าเสมอ ทำให้ค่าที่อ่านได้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

บทที่ 10

บทสรุปและวิจารณ์

สรุปผลการทำโครงการ

จากการศึกษา ออกแบบและประดิษฐ์รอรางไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังที่ได้กล่าวมาพบว่าประสิทธิภาพของระบบยังไม่ดีเท่าที่ควร แต่ก็ถือได้ว่าประสบความสำเร็จสำหรับเป็นรอรางไฟฟ้าต้นแบบปราศจากมลพิษ ที่จะใช้ในการพัฒนาให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของระบบคมนาคมขนส่งในอนาคต

วิจารณ์ผลการทำโครงการ

จากการทำโครงการ ได้พบอุปสรรค และปัญหามากมาย โดยแยกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆดังนี้ คือ **ปัญหาและแนวทางแก้ไขทางด้านระบบไฟฟ้า**

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรกำลังหาซื้อยากเพราะมีขนาดพิกัดกระแสสูงแต่ด้วยความพยายามก็สามารถหาซื้อมาได้ เช่น แกนเหล็ก EE 80 ที่ต้องไปซื้อที่ บริษัท ฮาวาร์ด ไทยอินคัสเทรียล ที่ จ.สมุทรสาคร, มอสเฟต (IREFP 250) และ ไดโอดที่ต้องทำการต่อขนานกันเพื่อแบ่งการทนกระแสเนื่องจากหาพิกัดที่ต้องการไม่ได้ และขดลวดทองแดงที่ใช้พันหม้อแปลงที่จะต้องทนแรงดันเบรคความถี่สูง ซึ่งหาได้จากภาควิชาไฟฟ้ากำลัง ศึกไฮโวลต์ ชั้น 3
2. มีปัญหาเนื่องจากสัญญาณรบกวนในวงจรค่อนข้างสูง จึงต้องทำการลดปัญหานี้โดยการออกแบบลายปริ้นท์ให้มีกราวด์รอบวงจรมากขึ้น
3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบมีไม่เพียงพอ แต่ก็เป็นการฝึกให้มีความอดทน และต้องมีการวางแผนในการทำงาน
4. แรงดันขาออกด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ได้มีค่าไม่เท่ากันทั้งสองขด เนื่องจากความไม่สมมาตรในการพันขดลวด ซึ่งแก้ไขได้โดยพยายามพันขดลวดให้เป็นระเบียบ มีความสมมาตรกันทั้งสองขด

ปัญหาและแนวทางการแก้ไขทางด้านเครื่องกล

1. เนื่องจากคณะผู้จัดทำโครงการได้ศึกษามาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ทำให้คณะผู้จัดทำโครงการไม่มีความรู้ความชำนาญในด้านเครื่องกลมากนัก ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมาไม่ว่าจะเป็น ปัญหาจากการคำนวณทางกลศาสตร์ การสร้างชิ้นงานในทางเครื่องกล ตลอดจนการใช้เครื่อง-

ไม้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจะต้องศึกษาเรียนรู้การใช้งานกันใหม่หมดเป็นการเสียเวลามากในการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรึกษาผู้รู้ตลอดจนอาจารย์ที่ภาควิชาเครื่องกลและฝึกฝนการทำงานบ่อยๆ

2. ชิ้นงานบางชิ้นต้องการความชำนาญในการสร้างสูงมากไม่สามารถทำเองได้ เช่น การคัดรางให้โค้ง จึงมีความจำเป็นต้องจ้างผู้ชำนาญการในการสร้างแทน ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

3. วัสดุอุปกรณ์หลายชนิดหาซื้อยาก เพราะไม่รู้แหล่งขายและปัญหาในการสื่อสารกับผู้ขายที่เข้าใจไม่ตรงกัน

4. วัสดุและอุปกรณ์บางชิ้นมีขนาดใหญ่และหนัก ยากแก่การเคลื่อนย้าย จำเป็นต้องใช้พาหนะในการขนส่ง ซึ่งจะต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในค่าพาหนะเพิ่มขึ้น

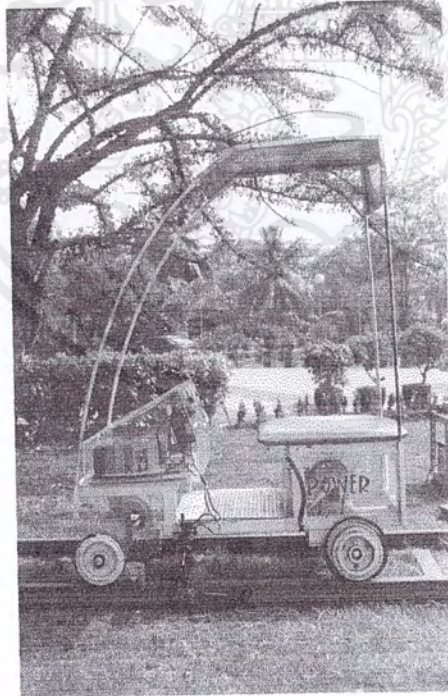
5. เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการที่ค่อนข้างใหญ่จำเป็นต้องแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ฝ่าย คือฝ่ายเครื่องกลและฝ่ายไฟฟ้า ทำให้ทั้ง 2 ฝ่ายไม่ค่อยได้ทำงานร่วมกัน จำเป็นต้องมีการนำความรู้ของแต่ละฝ่ายมาแลกเปลี่ยนกัน ซึ่งไม่ค่อยได้ผลเต็มที่เท่าที่ควร

คุณสมบัติเฉพาะของรกรางไฟฟ้า

รายละเอียด	ขนาด
1. ราง	
- ความกว้างของราง	0.67 เมตร
- ความยาวของราง(วงใน)	50 เมตร
2. ตัวรถไฟฟ้า	
- ความกว้างของตัวรถ	0.62 เมตร
- ความยาวของตัวรถ	1.30 เมตร
- ความสูงของตัวรถ	1.63 เมตร
- ระยะระหว่างล้อหน้า-ล้อหลัง	0.97 เมตร
- ระยะระหว่างล้อ	0.68 เมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ	0.2 เมตร
- จำนวนที่นั่ง	1 ที่นั่ง
- น้ำหนักตัวรถ	125 kg
- น้ำหนักบรรทุกที่พิกัดที่คำนวณได้	1,816 kg
- อัตราส่วนเฟืองทด	18 : 1
3. วงจร พุช - พูล คอนเวอร์เตอร์	
- แรงดันอินพุต	DC 48 V
- แรงดันเอาต์พุต	DC 310 V
- พิกัดกำลัง	1,816 watt
- ประสิทธิภาพ	80%
- ความถี่สวิตซ์	25 kHz
- เรกกูเรชัน (Regulation)	1.5 %
4. วงจรอินเวอร์เตอร์	
- แรงดันอินพุต	AC 220-240 V
- ย่านการปรับความถี่ทำได้	1-120 Hz
- ค่าทอร์กนุสที่เหมาะสม	13
- พิกัดกำลัง	0.1-1.5kw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.อินดักชั่นมอเตอร์(ต่อแบบเคลด้า)	
-แรงดันไฟฟ้าที่พิกัด	AC 220V
-กระแสไฟฟ้าที่พิกัด	6 A
-พิกัดกำลัง	2 แรงม้า
-ความเร็วรอบที่พิกัด	1,450 rpm
-จำนวนขั้วแม่เหล็ก(pole)	4 ขั้ว
-ตัวประกอบกำลัง(power factor)	0.8
6.ระบบโครงข่ายไฟฟ้า(ผลจากการทดลอง)	
-ช่วงการปรับความถี่ที่อินเวอร์เตอร์	50-60 Hz
-ประสิทธิภาพของวงจรทั้งระบบ	48%
-น้ำหนักบรรทุก(1 คน)	65 kg
-% THD(Total Harmonics Distortion)	6.5%
-ความเร็ว	4 km/hr



รูปที่ 10 รรรางไฟฟ้าต้นแบบเมื่อเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
เอกสารประกอบการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
(Data Sheet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CMOS Hex Buffer/Converters

The CD4049UB and CD4050B devices are inverting and non-inverting hex buffers, respectively, and feature logic-level conversion using only one supply voltage (V_{CC}). The input-signal high level (V_{IH}) can exceed the V_{CC} supply voltage when these devices are used for logic-level conversions. These devices are intended for use as CMOS to DTL/TTL converters and can drive directly two DTL/TTL loads. ($V_{CC} = 5V$, $V_{OL} \leq 0.4V$, and $I_{OL} \geq 3.3mA$.)

The CD4049UB and CD4050B are designated as replacements for CD4009UB and CD4010B, respectively. Because the CD4049UB and CD4050B require only one power supply, they are preferred over the CD4009UB and CD4010B and should be used in place of the CD4009UB and CD4010B in all inverter, current driver, or logic-level conversion applications. In these applications the CD4049UB and CD4050B are pin compatible with the CD4009UB and CD4010B respectively, and can be substituted for these devices in existing as well as in new designs. Terminal No. 16 is not connected internally on the CD4049UB or CD4050B, therefore, connection to this terminal is of no consequence to circuit operation. For applications not requiring high-sink-current or voltage conversion, the CD4069UB Hex Inverter is recommended.

Features

- CD4049UB Inverting
- CD4050B Non-Inverting
- High Sink Current for Driving 2 TTL Loads
- High-To-Low Level Logic Conversion
- 100% Tested for Quiescent Current at 20V
- Maximum Input Current of 1 μ A at 18V Over Full Package Temperature Range; 100nA at 13V and 25°C
- 5V, 10V and 15V Parametric Ratings

Applications

- CMOS to DTL/TTL Hex Converter
- CMOS Current "Sink" or "Source" Driver
- CMOS High-To-Low Logic Level Converter

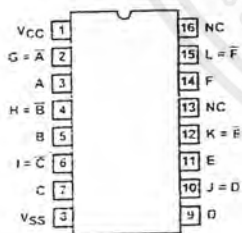
Ordering Information

PART NUMBER	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE	PKG. NO.
CD4049UBE	-55 to 125	16 Ld PDIP	E16.3
CD4050BE	-55 to 125	16 Ld PDIP	E16.3
CD4049UBF	55 to 125	16 Ld CERDIP	F16.3
CD4050BF	55 to 125	16 Ld CERDIP	F16.3
CD4050BM	-55 to 125	16 Ld SOIC	M16.3

NOTE: Wafer and die for this part number is available which meets all electrical specifications. Please contact your local sales office or customer service for ordering information.

Pinouts

CD4049UB (PDIP, CERDIP)
TOP VIEW

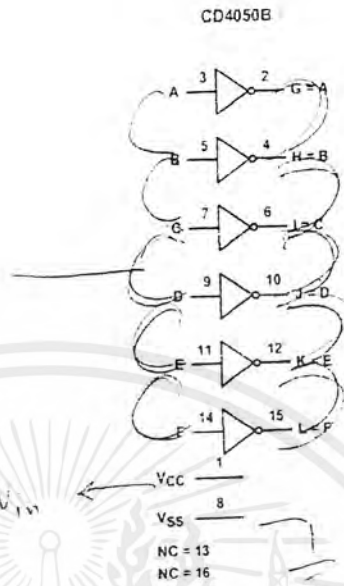
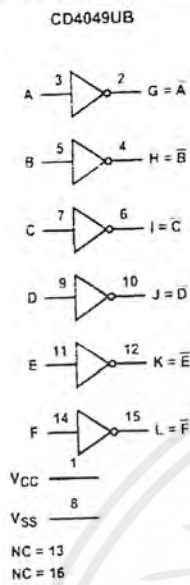


CD4050B (PDIP, CERDIP, SOIC)
TOP VIEW



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Functional Block Diagrams



Schematic Diagrams

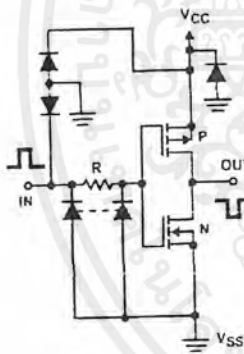


FIGURE 1A. SCHEMATIC DIAGRAM OF CD4049UB. 1 OF 6 IDENTICAL UNITS

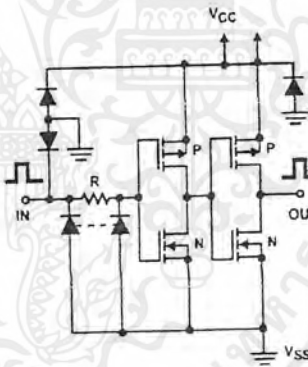


FIGURE 1B. SCHEMATIC DIAGRAM OF CD4050B. 1 OF 6 IDENTICAL UNITS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4049UB, CD4050B

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage (V+ to V-)	-0.5V to 20V
DC Input Current, Any One Input	±10mA

Operating Conditions

Temperature Range	-55°C to 125°C
-------------------	----------------

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 1)	θ_{JA} (°C/W)	θ_{JC} (°C/W)
PDIP Package	90	N/A
CERDIP Package	130	55
SOIC Package	100	N/A
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150°C	
Maximum Storage Temperature Range	65°C to 150°C	
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	265°C	
(SOIC - Lead Tips Only)		

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

- θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

DC Electrical Specifications

PARAMETER	TEST CONDITIONS			LIMITS AT INDICATED TEMPERATURE (°C)							UNITS
	V_G (V)	V_{IN} (V)	V_{CC} (V)	-55	-40	85	125	25			
								MIN	TYP	MAX	
Quiescent Device Current I_{DD} (Max)		0.5	5	1	1	30	30	-	0.02	1	μ A
		0.10	10	2	2	60	60	-	0.02	2	μ A
		0.15	15	4	4	120	120	-	0.02	4	μ A
		0.20	20	20	20	600	600	-	0.04	20	μ A
Output Low (Sink) Current I_{OL} (Min)	0.4	0.5	4.5	3.3	3.1	2.1	1.8	2.6	5.2	-	mA
	0.4	0.5	5	4	3.8	2.9	2.4	3.2	6.4	-	mA
	0.5	0.10	10	10	9.6	6.6	5.6	8	16	-	mA
	1.5	0.15	15	26	25	20	18	24	48	-	mA
Output High (Source) Current I_{OH} (Min)	4.5	0.5	5	-0.81	0.73	-0.58	0.48	-0.65	-1.2	-	mA
	2.5	0.5	5	-2.6	-2.4	-1.9	-1.55	-2.1	-3.9	-	mA
	9.5	0.10	10	-2.0	-1.8	-1.35	-1.18	-1.65	-3.0	-	mA
	13.5	0.15	15	-5.2	-4.8	-3.5	-3.1	-4.3	-8.0	-	mA
Output Voltage Low Level V_{OL} (Max)	-	0.5	5	0.05	0.05	0.05	0.05	-	0	0.05	V
	-	0.10	10	0.05	0.05	0.05	0.05	-	0	0.05	V
	-	0.15	5	0.05	0.05	0.05	0.05	-	0	0.05	V
Output Voltage High Level V_{OH} (Min)	-	0.5	5	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	5	-	V
	-	0.10	10	9.95	9.95	9.95	9.95	9.95	10	-	V
	-	0.15	15	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	15	-	V
Input Low Voltage, V_{IL} (Max) CD4049UB	4.5	-	5	1	1	1	1	-	-	1	V
	9	-	10	2	2	2	2	-	-	2	V
	13.5	-	15	2.5	2.5	2.5	2.5	-	-	2.5	V
Input Low Voltage, V_{IL} (Max) CD4050B	0.5	-	5	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	1.5	V
	1	-	10	3	3	3	3	-	-	3	V
	1.5	-	15	4	4	4	4	-	-	4	V
Input High Voltage, V_{IH} (Min) CD4049UB	0.5	-	5	4	4	4	4	4	-	-	V
	1	-	10	8	8	8	8	8	-	-	V
	1.5	-	15	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	-	-	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4049UB, CD4050B

DC Electrical Specifications (Continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS			LIMITS AT INDICATED TEMPERATURE (°C)							UNITS
	V _O (V)	V _{IN} (V)	V _{CC} (V)	25				MIN	TYP	MAX	
				-55	-40	85	125				
Input High Voltage, V _H Min CD4050B	4.5	-	5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	-	-	V
	9	-	10	7	7	7	7	7	-	-	V
	13.5	-	15	11	11	11	11	11	-	-	V
Input Current, I _N Max	-	0.18	18	±0.1	±0.1	±1	±1	-	±10 ⁻⁵	±0.1	µA

AC Electrical Specifications T_A = 25°C, Input t_r, t_f = 20ns, C_L = 50pF, R_L = 200kΩ

PARAMETER	TEST CONDITIONS		LIMITS (ALL PACKAGES)		UNITS
	V _{IN}	V _{CC}	TYP	MAX	
Propagation Delay Time Low to High, t _{PLH} CD4049UB	5	5	60	120	ns
	10	10	32	65	ns
	10	5	45	90	ns
	15	15	25	50	ns
	15	5	45	90	ns
Propagation Delay Time Low to High, t _{PLH} CD4050B	5	5	70	140	ns
	10	10	40	80	ns
	10	5	45	90	ns
	15	15	30	60	ns
	15	5	40	80	ns
Propagation Delay Time High to Low, t _{PHL} CD4049UB	5	5	32	65	ns
	10	10	20	40	ns
	10	5	15	30	ns
	15	15	15	30	ns
	15	5	10	20	ns
Propagation Delay Time High to Low, t _{PHL} CD4050B	5	5	55	110	ns
	10	10	22	55	ns
	10	5	50	100	ns
	15	15	15	30	ns
	15	5	50	100	ns
Transition Time, Low to High, t _{TLH}	5	5	80	160	ns
	10	10	40	80	ns
	15	15	30	60	ns
Transition Time, High to Low, t _{THL}	5	5	30	60	ns
	10	10	20	40	ns
	15	15	15	30	ns
Input Capacitance, C _{IN} CD4049UB	-	-	15	22.5	pF
Input Capacitance, C _{IN} CD4050B	-	-	5	7.5	pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4049UB, CD4050B

Typical Performance Curves (Continued)

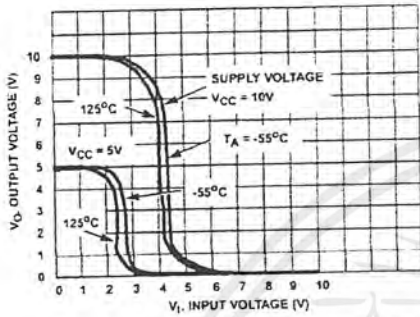


FIGURE 8. TYPICAL VOLTAGE TRANSFER CHARACTERISTICS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE FOR CD4049UB

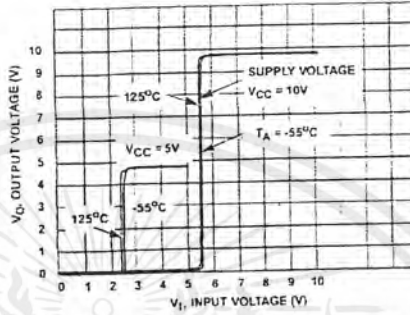


FIGURE 9. TYPICAL VOLTAGE TRANSFER CHARACTERISTICS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE FOR CD4050B

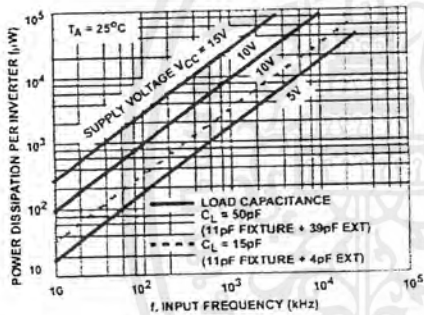


FIGURE 10. TYPICAL POWER DISSIPATION vs FREQUENCY CHARACTERISTICS

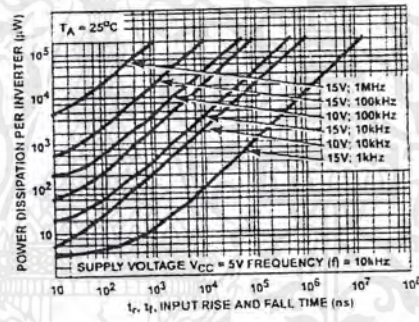


FIGURE 11. TYPICAL POWER DISSIPATION vs INPUT RISE AND FALL TIMES PER INVERTER FOR CD4049UB

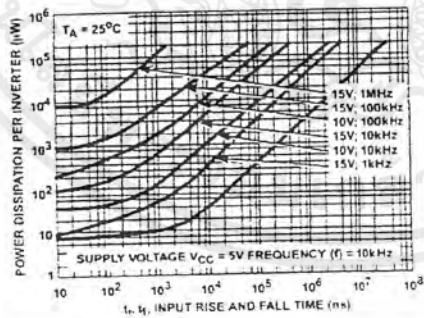


FIGURE 12. TYPICAL POWER DISSIPATION vs INPUT RISE AND FALL TIMES PER INVERTER FOR CD4050B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuits

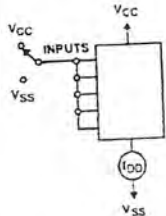
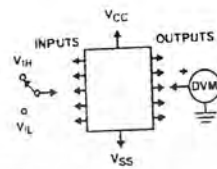
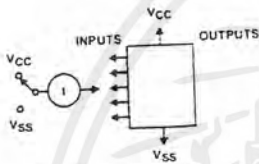


FIGURE 13. QUIESCENT DEVICE CURRENT TEST CIRCUIT



NOTE: Test any one input with other inputs at V_{CC} or V_{SS}.

FIGURE 14. INPUT VOLTAGE TEST CIRCUIT



NOTE: Measure inputs sequentially. To both V_{CC} and V_{SS} connect all unused inputs to either V_{CC} or V_{SS}.

FIGURE 15. INPUT CURRENT TEST CIRCUIT

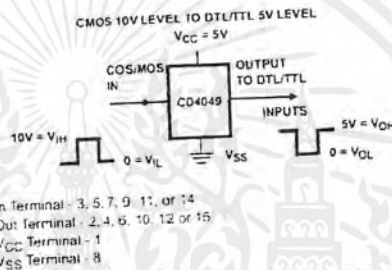
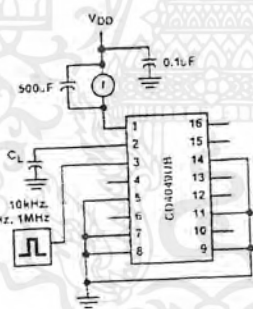


FIGURE 16. LOGIC LEVEL CONVERSION APPLICATION

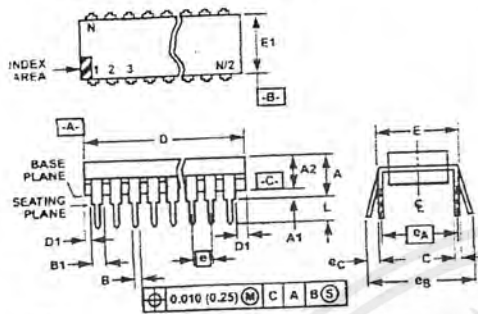


C_L INCLUDES FIXTURE CAPACITANCE

FIGURE 17. DYNAMIC POWER DISSIPATION TEST CIRCUITS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dual-In-Line Plastic Packages (PDIP)



E16.3 (JEDEC MS-001-BB ISSUE D)
16 LEAD DUAL-IN-LINE PLASTIC PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	-	0.210	-	5.33	4
A1	0.015	-	0.39	-	4
A2	0.115	0.195	2.93	4.95	-
B	0.014	0.022	0.356	0.558	-
B1	0.045	0.070	1.15	1.77	8, 10
C	0.008	0.014	0.204	0.355	-
D	0.735	0.775	18.66	19.68	5
D1	0.005	-	0.13	-	5
E	0.300	0.325	7.62	8.25	6
E1	0.240	0.280	6.10	7.11	5
e	0.100 BSC		2.54 BSC		-
eA	0.300 BSC		7.62 BSC		6
eB	-	0.430	-	10.92	7
L	0.115	0.150	2.93	3.81	4
N	16		16		9

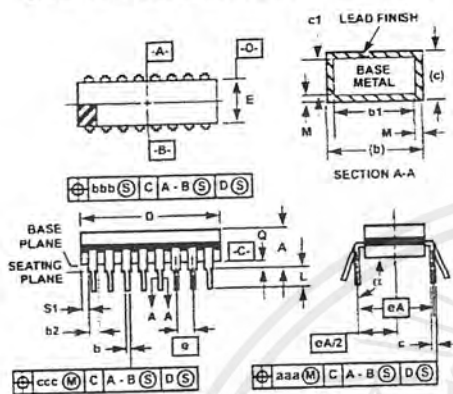
NOTES

- Controlling Dimensions: INCH. In case of conflict between English and Metric dimensions, the inch dimensions control.
- Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982
- Symbols are defined in the "MO Series Symbol List" in Section 2.2 of Publication No. 95.
- Dimensions A, A1 and L are measured with the package sealed in JEDEC seating plane gauge GS-3.
- D, D1, and E1 dimensions do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- E and eA are measured with the leads constrained to be perpendicular to datum C.
- eB and eC are measured at the lead tips with the leads unconstrained. eC must be zero or greater.
- B1 maximum dimensions do not include dambar protrusions. Dambar protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- N is the maximum number of terminal positions.
- Corner leads (1, N, N/2 and N/2 - 1) for E8.3, E16.3, E18.3, E28.3. E42.6 will have a B1 dimension of 0.030 - 0.045 inch (0.76 - 1.14mm).

Rev. 0 12/93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ceramic Dual-In-Line Frit Seal Packages (CERDIP)



F16.3 MIL-STD-1835 GDIP1-T16 (D-2, CONFIGURATION A)
16 LEAD CERAMIC DUAL-IN-LINE FRIT SEAL PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	-	0.200	-	5.08	-
b	0.014	0.026	0.36	0.66	2
b1	0.014	0.023	0.36	0.58	3
b2	0.045	0.065	1.14	1.65	-
b3	0.023	0.045	0.58	1.14	4
c	0.008	0.018	0.20	0.46	2
c1	0.008	0.015	0.20	0.38	3
D	-	0.840	-	21.34	5
E	0.220	0.310	5.59	7.87	5
e	0.100 BSC		2.54 BSC		-
eA	0.300 BSC		7.62 BSC		-
eA/2	0.150 BSC		3.81 BSC		-
L	0.125	0.200	3.18	5.08	-
Q	0.015	0.060	0.38	1.52	6
S1	0.005	-	0.13	-	7
α	90°	105°	90°	105°	-
aaa	-	0.015	-	0.38	-
bbb	-	0.030	-	0.76	-
ccc	-	0.010	-	0.25	-
M	-	0.0015	-	0.038	2, 3
N	16	-	16	-	8

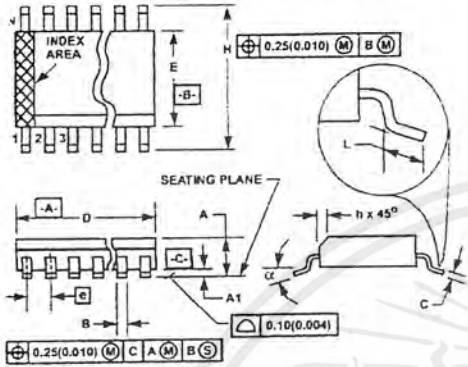
Rev 04/94

- NOTES
- 1 Index area: A notch or a pin one identification mark shall be located adjacent to pin one and shall be located within the shaded area shown. The manufacturer's identification shall not be used as a pin one identification mark.
 - 2 The maximum limits of lead dimensions b and c or M shall be measured at the centroid of the finished lead surfaces, when solder dip or tin plate lead finish is applied.
 - 3 Dimensions b1 and c1 apply to lead base metal only. Dimension M applies to lead plating and finish thickness.
 - 4 Corner leads (1, N, N/2, and N/2+1) may be configured with a partial lead paddle. For this configuration dimension b3 replaces dimension b2.
 - 5 This dimension allows for off-center lid, meniscus, and glass overrun.
 - 6 Dimension Q shall be measured from the seating plane to the base plane.
 - 7 Measure dimension S1 at all four corners.
 - 8 N is the maximum number of terminal positions.
 - 9 Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M - 1982.
 - 10 Controlling dimension: INCH.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4049UB, CD4050B

Small Outline Plastic Packages (SOIC)



M16.3 (JEDEC MS-013-AA ISSUE C)
16 LEAD WIDE BODY SMALL OUTLINE PLASTIC PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	0.0925	0.1043	2.35	2.65	
A1	0.0040	0.0118	0.10	0.30	
B	0.013	0.0200	0.33	0.51	9
C	0.0091	0.0125	0.23	0.32	
D	0.3977	0.4133	10.10	10.50	3
E	0.2914	0.2992	7.40	7.60	4
e	0.050 BSC		1.27 BSC		
H	0.394	0.419	10.00	10.65	
h	0.010	0.029	0.25	0.75	5
L	0.016	0.050	0.40	1.27	6
N	16		16		7
α	0°	8°	0°	8°	

NOTES:

1. Symbols are defined in the "MO Series Symbol List" in Section 2.2 of Publication Number 95.
2. Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982.
3. Dimension "D" does not include mold flash, protrusions or gate burrs. Mold flash, protrusion and gate burrs shall not exceed 0.15mm (0.006 inch) per side.
4. Dimension "E" does not include interlead flash or protrusions. Interlead flash and protrusions shall not exceed 0.25mm (0.010 inch) per side.
5. The chamfer on the body is optional. If it is not present, a visual index feature must be located within the crosshatched area.
6. "L" is the length of terminal for soldering to a substrate.
7. "N" is the number of terminal positions.
8. Terminal numbers are shown for reference only.
9. The lead width "B", as measured 0.36mm (0.014 inch) or greater above the seating plane, shall not exceed a maximum value of 0.51mm (0.024 inch).
10. Controlling dimension: MILLIMETER. Converted inch dimensions are not necessarily exact.

Rev 0 12/93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgement, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

CERTAIN APPLICATIONS USING SEMICONDUCTOR PRODUCTS MAY INVOLVE POTENTIAL RISKS OF DEATH, PERSONAL INJURY, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE ("CRITICAL APPLICATIONS"). TI SEMICONDUCTOR PRODUCTS ARE NOT DESIGNED, AUTHORIZED, OR WARRANTED TO BE SUITABLE FOR USE IN LIFE-SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS OR OTHER CRITICAL APPLICATIONS. INCLUSION OF TI PRODUCTS IN SUCH APPLICATIONS IS UNDERSTOOD TO BE FULLY AT THE CUSTOMER'S RISK.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

Copyright © 1999, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP250/251/252/253 IRFP250R/251R/252R/253R

N-Channel Power MOSFETs
Avalanche Energy Rated*

August, 1991

Features

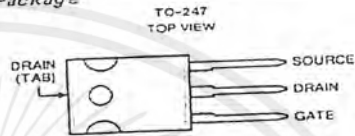
- 27A and 33A, 150V - 200V
- $r_{DS(on)} = 0.085\Omega$ and 0.120Ω
- Single Pulse Avalanche Energy Rated*
- SOA is Power-Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance

Description

The IRFP250, IRFP251, IRFP252, and IRFP253 are n-channel enhancement-mode silicon-gate power field-effect transistors. IRFP250R, IRFP251R, IRFP252R, and IRFP253R types are advanced power MOSFETs designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers, relay drivers, and drivers for high-power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate-drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

The IRFP types are supplied in the JEDEC TO-247 plastic package.

Package



Terminal Diagram

N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE



Absolute Maximum Ratings ($T_C = +25^\circ\text{C}$), Unless Otherwise Specified

	IRFP250 IRFP250R	IRFP251 IRFP251R	IRFP252 IRFP252R	IRFP253 IRFP253R	UNITS
Drain-Source Voltage (1) V_{DS}	200	150	200	150	V
Drain-Source Voltage (1) V_{DSR}	200	150	200	150	V
Continuous Drain Current I_D	33	33	27	27	A
$T_C = +25^\circ\text{C}$	21	21	17	17	A
$T_C = +100^\circ\text{C}$	130	130	110	110	A
Pulsed Drain Current (3) I_{DM}	± 20	± 20	± 20	± 20	A
Gate-Source Voltage V_{GS}	± 20	± 20	± 20	± 20	V
Maximum Power Dissipation P_D	180	180	180	180	W
$T_C = +25^\circ\text{C}$	1.44	1.44	1.44	1.44	W/°C
Linear Operating Factor	120	120	100	100	%
Inductive Current, Clamped (See Figure 14, $L = 100\mu\text{H}$)	810	810	810	810	mJ
Single Pulse Avalanche Energy Rating (4) E_{AS}	810	810	810	810	mJ
Operating and Storage Junction Temperature Range T_J, T_{STG}	-55 to $+150$	-55 to $+150$	-55 to $+150$	-55 to $+150$	$^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temperature for Soldering T_L (0.050" (1.6mm) from case for 10s)	300	300	300	300	$^\circ\text{C}$

NOTES:

- $T_J = -25^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$
- Pulse Test: Pulse width $\leq 300\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$
- Repetitive Rating: Pulse width limited by max. junction temperature. See Transient Thermal Impedance Curve (Figure 5).
- $V_{DS} = 50\text{V}$, $I_{AS} = 2\text{A}$, $T_J = -25^\circ\text{C}$, $L = 1\text{mH}$, $R_{GS} = 50\Omega$, $I_{PEAK} = 33\text{A}$. See Figure 15.

* R Series Types Only

File Number: 2330.1

CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge. Proper ESD handling procedures should be followed.
Copyright © Harris Corporation 1991

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP250, IRFP251, IRFP252, IRFP253 IRFP250R, IRFP251R, IRFP252R, IRFP253R

Electrical Characteristics $T_C = +25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified						
CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITIONS	LIMITS			UNITS
			MIN	TYP	MAX	
Drain-Source Breakdown Voltage (IRFP250/252, IRFP250R/252R IRFP251/253, IRFP251R/253R)	BV_{DSS}	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$	200	-	-	V
			150	-	-	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage Forward	I_{GSS}	$V_{GS} = 20V$	-	-	500	nA
Gate-Source Leakage Reverse	I_{GSS}	$V_{GS} = -20V$	-	-	-500	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = \text{Max Rating}, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = \text{Max Rating} \times 0.8, V_{GS} = 0V$ $T_C = +125^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
			-	-	1000	μA
On-State Drain Current (Note 2) (IRFP250/251, IRFP250R/251R IRFP252/253, IRFP252R/253R)	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times I_{DS(ON)} \text{ Max } V_{GS} = 13V$	33	-	-	A
			27	-	-	A
State Drain-Source On-State Resistance (Note 2) (IRFP250/251, IRFP250R/251R IRFP252/253, IRFP252R/253R)	$r_{DS(ON)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 17A$	-	0.07	0.085	Ω
			-	0.09	0.120	Ω
Forward Transconductance (Note 2)	g_{fs}	$V_{GS} \geq 80V, I_D = 17A$	13	19	-	S(V)
Input Capacitance	C_{ISS}	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V, f = 1.0\text{MHz}$ See Figure 10	-	2000	-	pF
Output Capacitance	C_{OSS}	See Figure 10	-	600	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{RSS}		-	300	-	pF
Turn-On Delay Time	$t_{D(ON)}$	$V_{GS} = 100V, I_D = 30A, R_{\theta C} = 0.2^\circ\text{C/W}$ See Figure 16. (MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature)	-	18	30	ns
Rise Time	t_r		-	125	180	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{D(OFF)}$	See Figure 16. (MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature)	-	70	100	ns
Fall Time	t_f		-	80	120	ns
Total Gate Charge Gate-Source = Gate-Drain	Q_g	$V_{GS} = 10V, I_D = 30A, V_{GS} = 0.8 \text{ Max}$ Rating. See Figure 17 for test circuit. (Gate charge is essentially independent of operating temperature.)	-	12	-	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	42	-	nC
Gate-Drain ("Miller") Charge	Q_{gd}	Measured between the contact screw on header that is closer to source and gate p-ins and center of center of die.	-	5.0	-	nH
Internal Drain Inductance	L_D		Measured from the source lead, 6mm (0.25") from header and source bonding pad.	-	12.5	-
Internal Source Inductance	L_S	Modified MOSFET symbol showing the internal device inductances.		-	-	-
Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$		Mounting surface flat, smooth and pressed	-	0.1	-
Case-to-Sink	$R_{\theta CS}$	Free air operation	-	-	30	$^\circ\text{C/W}$
Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$					

Source Drain Diode Ratings and Characteristics						
Continuous Source Current (Body Diode)	I_S	Modified MOSFET symbol showing the integral reverse P-N junction rectifier.	-	-	33	A
Pulse Source Current (Body Diode) (Note 3)	I_{SM}		-	-	130	A
Diode Forward Voltage (Note 2)	V_{SD}	$T_J = -25^\circ\text{C}, I_S = 33A, V_{GS} = 0V$	-	-	2.0	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = +25^\circ\text{C}, I_F = 30A, di/dt = 100A/\mu s$	140	-	630	ns
Reverse Recovered Charge	Q_{RR}	$T_J = -25^\circ\text{C}, I_F = 30A, di/dt = 100A/\mu s$	1.5	-	8.1	μC
Forward Turn-on Time	t_{ON}	Intrinsic turn-on time is negligible. Turn-on speed is substantially controlled by $L_S = L_D$	-	-	-	-

NOTES: 1. $T_J = -25^\circ\text{C}, I_S = 150^\circ\text{C}$
2. Pulse Test: Pulse width $\leq 300\mu s$, Duty Cycle $\leq 2\%$
3. Repetitive Rating: Pulse width limited by max junction temperature. See Transient Thermal Impedance Curve (Figure 3)
4. $V_{GS} = 60V$, Start $T_J = -25^\circ\text{C}$, $L = 1.1\text{mH}$, $F_{GS} = 50\text{Hz}$, $I_{PEAK} = 33A$ (See Figure 15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP250, IRFP251, IRFP252, IRFP253 IRFP250R, IRFP251R, IRFP252R, IRFP253R

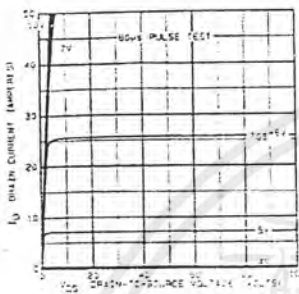


FIGURE 1. TYPICAL OUTPUT CHARACTERISTICS

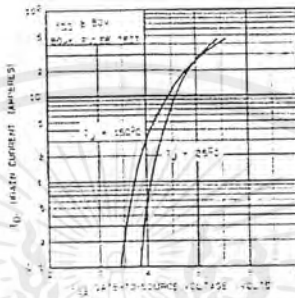


FIGURE 2. TYPICAL TRANSFER CHARACTERISTICS

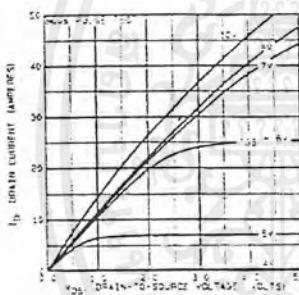


FIGURE 3. TYPICAL SATURATION CHARACTERISTICS

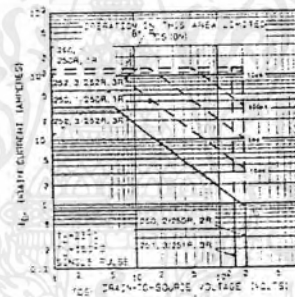


FIGURE 4. MAXIMUM SAFE OPERATING AREA

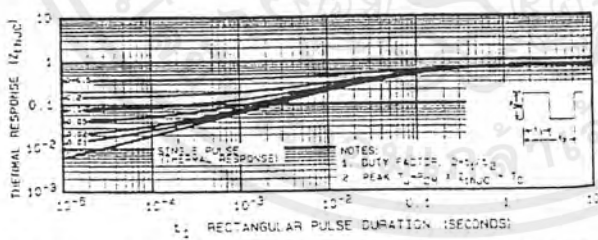
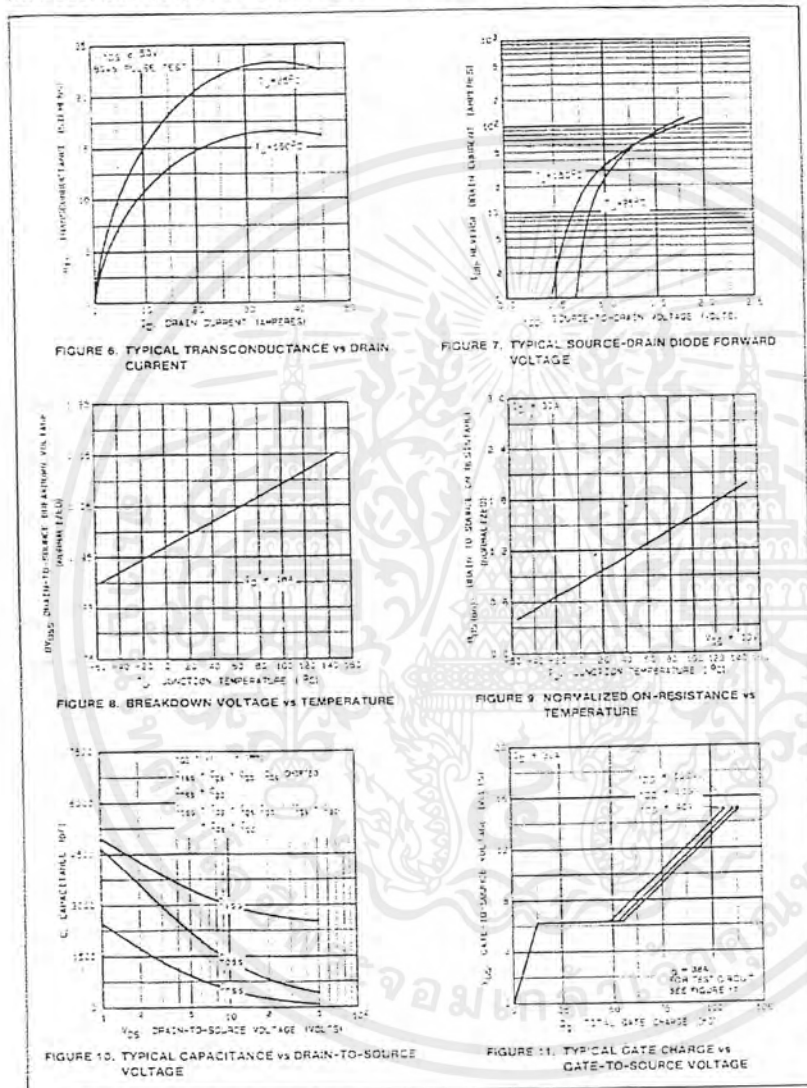


FIGURE 5. MAXIMUM EFFECTIVE TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE, JUNCTION-TO-CASE vs. PULSE DURATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

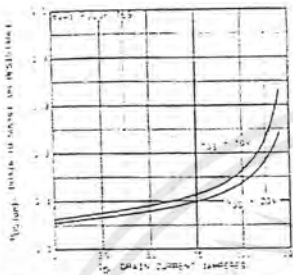


FIGURE 12. TYPICAL ON RESISTANCE vs DRAIN CURRENT

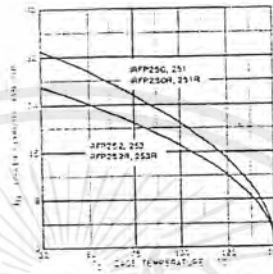


FIGURE 13. MAXIMUM DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

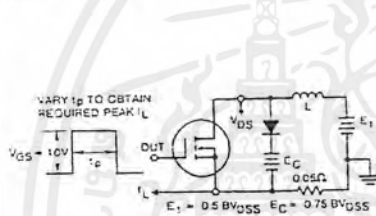


FIGURE 14a. CLAMPED INDUCTIVE TEST CIRCUIT

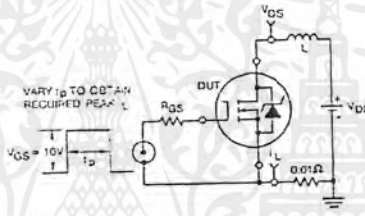


FIGURE 15a. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

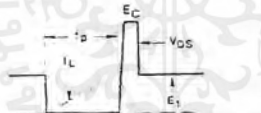


FIGURE 14b. CLAMPED INDUCTIVE WAVEFORMS

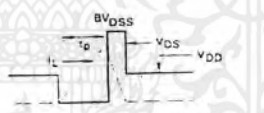


FIGURE 15b. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

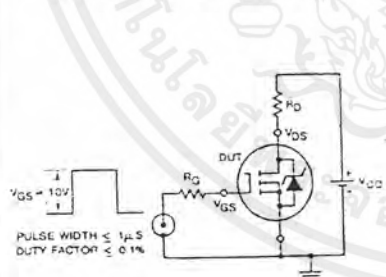


FIGURE 16. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

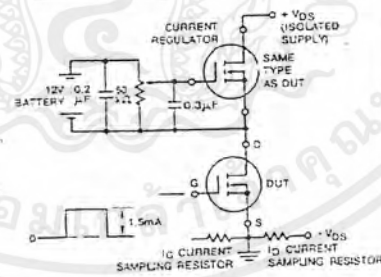


FIGURE 17. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IRFP450/451/452/453 IRFP450R/451R/452R/453R

N-Channel Power MOSFETs
Avalanche Energy Rated*

August 1991

Features

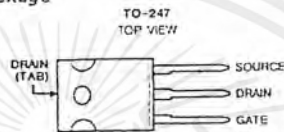
- 12A and 14A, 450V - 500V
- $r_{DS(on)} = 0.4\Omega$ and 0.5Ω
- Single Pulse Avalanche Energy Rated*
- SOA is Power-Dissipation Limited
- Nanosecond Switching Speeds
- Linear Transfer Characteristics
- High Input Impedance

Description

The IRFP450, IRFP451, IRFP452, and IRFP453 are n-channel enhancement-mode silicon-gate power field-effect transistors. IRFP450R, IRFP451R, IRFP452R and IRFP453R types are advanced power MOSFETs designed, tested, and guaranteed to withstand a specified level of energy in the breakdown avalanche mode of operation. All of these power MOSFETs are designed for applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers, relay drivers, and drivers for high-power bipolar switching transistors requiring high speed and low gate-drive power. These types can be operated directly from integrated circuits.

The IRFP types are supplied in the JEDEC TO-247 plastic package.

Package



Terminal Diagram

N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE



Absolute Maximum Ratings ($T_C = -25^\circ\text{C}$), Unless Otherwise Specified

	IRFP450 IRFP450R	IRFP451 IRFP451R	IRFP452 IRFP452R	IRFP453 IRFP453R	UNITS
Drain-Source Voltage ($I_D = 0$)	500	450	500	450	V
Drain-Gate Voltage ($R_{GS} = 20k\Omega$)	500	450	500	450	V
Continuous Drain Current					A
$T_C = -25^\circ\text{C}$	14	12	12	12	A
$T_C = -100^\circ\text{C}$	8.9	7.9	7.9	7.9	A
Pulsed Drain Current (I_{DM})	56	56	48	48	A
Gate-Source Voltage	± 20	± 20	± 20	± 20	V
Maximum Power Dissipation					W
$T_C = -25^\circ\text{C}$	180	180	180	180	W
Linear Derating Factor	1.44	1.44	1.44	1.44	W/°C
Inductive Current, Clamped (See Figure 14, $L = 100\mu\text{H}$)	52	52	48	48	A
Single Pulse Avalanche Energy Rating (I_{AS}^*)	860	860	860	860	mJ
Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to $+150$	-55 to $+150$	-55 to $+150$	-55 to $+150$	$^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temperature for Soldering (0.063" (1.6mm) from case for 10s)	300	300	300	300	$^\circ\text{C}$

NOTES:

- $T_C = -25^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$
- Pulse Test: Pulse width $\leq 200\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$
- Repetitive rating: Pulse width limited by maximum junction temperature. See Transient Thermal Impedance Curve (Figure 5).
- I_{AS}^* = Types Only
- $V_{GS} = 50\text{V}$, starting $T_C = -25^\circ\text{C}$, $L = 7\text{mH}$, $R_{GS} = 25k\Omega$, $I_{AS} = 14\text{A}$. See Figure 15.

CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge. Proper ESD handling procedures should be followed.
Copyright © Harris Corporation 1991

File Number 2331.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP450, IRFP451, IRFP452, IRFP453 IRFP450R, IRFP451R, IRFP452R, IRFP453R

Electrical Characteristics $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITIONS	LIMITS			UNITS
			MIN	TYP	MAX	
Drain-Source Breakdown Voltage IRFP450/452, IRFP450R/452R IRFP451/453, IRFP451R/453R	BV_{DSS}	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$	500	-	-	V
Gate Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage Forward	I_{GSS}	$V_{GS} = 20V$	-	-	500	nA
Gate-Source Leakage Reverse	I_{GSS}	$V_{GS} = -20V$	-	-	-500	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = \text{Max Rating}, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = \text{Max Rating} \times 0.3, V_{GS} = 0V$ $T_J = -125^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
On-State Drain Current (Note 2) IRFP450/451, IRFP450R/451R IRFP452/453, IRFP452R/453R	$I_{D(ON)}$	$V_{DS} > I_{D(ON)} \times r_{DS(ON)}$, Max. $V_{GS} = 10V$	14	-	-	A
Static Drain-Source On-State Resistance (Note 2) IRFP450/451, IRFP450R/451R IRFP452/453, IRFP452R/453R	$r_{DS(ON)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 7.5A$	-	0.3	0.4	Ω
Forward Transconductance (Note 2)	g_{fs}	$V_{DS} \geq 50V, I_D = 7.5A$	9.3	13.8	-	S(V)
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V, f = 1.0\text{MHz}$ See Figure 10	-	2000	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	400	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	100	-	pF
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$V_{DD} = 250V, I_D = 14A, R_G = 6.1\Omega$ See Figure 16. (MOSFET switching times are essentially independent of operating temperature.)	-	16	27	ns
Rise Time	t_r		-	45	68	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	58	100	ns
Fall Time	t_f		-	41	60	ns
Total Gate Charge (Gate-Source + Gate-Drain)	Q_g	$V_{GS} = 10V, I_D = 14A, V_{DS} = 0.8V$ Max. Rating. See Figure 17 for test setup. (Gate charge is essentially independent of operating temperature.)	-	82	130	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	12	-	nC
Gate-Drain ("Miller") Charge	Q_{gd}		-	42	-	nC
Internal Drain Inductance	L_D	Measured between the contact screw on header that is closer to source and gate pins and center of center of die. Modified MOSFET symbol showing the internal device inductances.	-	5.0	-	nH
Internal Source Inductance	L_S	Measured from the source lead, 6mm (0.25") from header and source bonding pad.	-	12.5	-	nH
Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$		-	-	0.70	$^\circ\text{C/W}$
Case-to-Sink	$R_{\theta CS}$	Mounting surface flat, smooth and pressed.	-	-	0.10	$^\circ\text{C/W}$
Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	Free air operation	-	-	30	$^\circ\text{C/W}$

Source-Drain Diode Ratings and Characteristics

Continuous Source Current (Body Diode)	I_S	Modified MOSFET symbol showing the integral reverse P-N junction rectifier.	-	-	14	A
Pulse Source Current (Body Diode) (Note 3)	I_{SM}		-	-	56	A
Diode Forward Voltage (Note 2)	V_{SD}	$T_J = -25^\circ\text{C}, I_S = 14A, V_{GS} = 0V$	-	-	1.4	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = -150^\circ\text{C}, I_S = 13A, di/dt = 100A/\mu s$	-	1300	-	ns
Reverse Recovered Charge	Q_{RR}	$T_J = -150^\circ\text{C}, I_S = 13A, di/dt = 100A/\mu s$	-	7.4	-	μC
Forward Turn-on Time	t_{ON}	Intrinsic turn-on time is negligible. Turn-on speed is substantially controlled by $L_S - L_D$.	-	-	-	-

NOTES: 1. $T_J = -25^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$.
2. Pulse Test: Pulse width $\leq 200\mu s$, Duty Cycle $\leq 2\%$.
3. Repetitive Rating: Pulse width limited by max. junction temperature. See Transient Thermal Impedance Curve (Figure 5).
* $V_{CE} = 50V$, Start $T_J = -25^\circ\text{C}$, $t = 7$ μs , $R_{GS} = 25\Omega$, $I_{GAK} = 1.4A$ (See Figure 15).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance Curves (Continued)

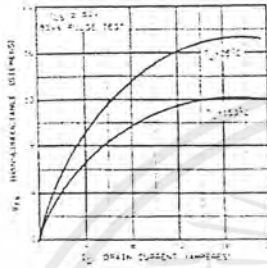


FIGURE 6. TYPICAL TRANSCONDUCTANCE VS DRAIN CURRENT

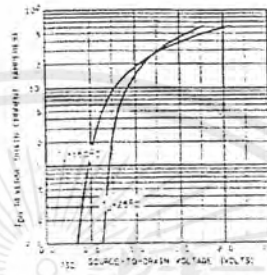


FIGURE 7. TYPICAL SOURCE-DRAIN DIODE FORWARD VOLTAGE

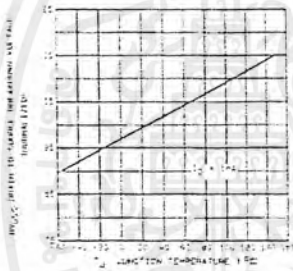


FIGURE 8. BREAKDOWN VOLTAGE VS TEMPERATURE

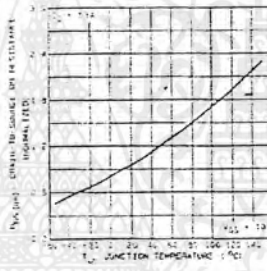


FIGURE 9. NORMALIZED ON-RESISTANCE VS TEMPERATURE

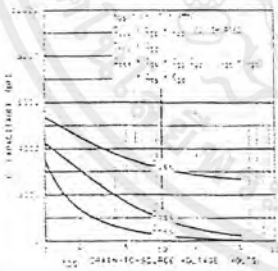


FIGURE 10. TYPICAL CAPACITANCE VS DRAIN-TO-SOURCE VOLTAGE

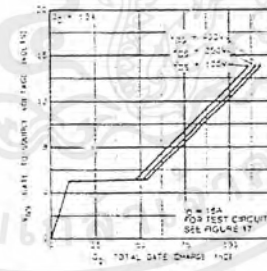


FIGURE 11. TYPICAL GATE CHARGE VS GATE-TO-SOURCE VOLTAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single Channel, High Speed Optocouplers

Technical Data

6N135/6
HCNW135/6
HCNW4502/3
HCPL-0452/3
HCPL-0500/1
HCPL-4502/3

Features

- 15 kV/ μ s Minimum Common Mode Transient Immunity at $V_{CM} = 1500$ V (4503/0453)
- High Speed: 1 Mb/s
- TTL Compatible
- Available in 8-Pin DIP, SO-8, Widebody Packages
- Open Collector Output
- Guaranteed Performance from Temperature: 0°C to 70°C
- Safety Approval
UL Recognized - 2500 V rms for 1 minute (5000 V rms for 1 minute for HCNW and Option 020 devices) per UL1577
CSA Approved
VDE 0884 Approved
- V_{ORM} = 650 V peak for HCPL-4503#060
- V_{ORM} = 1414 V peak for HCNW devices
BSI Certified (HCNW devices only)
- Dual Channel Version Available (253X/4534/053X/0534)
- MIL-STD-1772 Version Available (55XX/65XX/4N55)

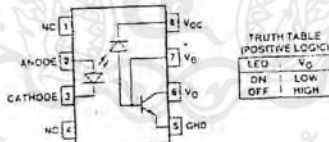
Applications

- High Voltage Isolation
- Video Signal Isolation
- Power Transistor Isolation in Motor Drives
- Line Receivers
- Feedback Element in Switched Mode Power Supplies
- High Speed Logic Ground Isolation - TTL/TTL, TTL/CMOS, TTL/LSTTL
- Replaces Pulse Transformers
- Replaces Slow Phototransistor Isolators
- Analog Signal Ground Isolation

Description

These diode-transistor optocouplers use an insulating layer between a LED and an integrated photodetector to provide electrical insulation between input and output. Separate connections for the photodiode bias and output-transistor collector increase the speed up to a hundred times that of a conventional phototransistor coupler by reducing the base-collector capacitance.

Functional Diagram



TRUTH TABLE (POSITIVE LOGIC)	
LED	V_O
ON	LOW
OFF	HIGH

A 0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pins 5 and 8.

CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

5965-3605E

These single channel optocouplers are available in 8-Pin DIP, SO-8 and Widebody package configurations.

The 6N135, HCPL-0500, and HCNW135 are for use in TTL/CMOS, TTL/LSITL or wide bandwidth analog applications. Current transfer ratio (CTR) for these devices is 7% minimum at $I_F = 16$ mA.

The 6N135, HCPL-0501, and HCNW135 are designed for high speed TTL/TTL applications. A standard 16 mA TTL sink current through the input LED will provide enough output current for 1 TTL load and a 5.6 k Ω pull-up resistor. CTR for these devices is 19% minimum at $I_F = 16$ mA.

The HCPL-4502, HCPL-0452, and HCNW4502 provide the electrical and switching performance of the 6N135, HCPL-0501, and HCNW135 with increased ESD protection.

The HCPL-4503, HCPL-0453 and HCNW4503 are similar to the HCPL-4502, HCPL-0452, and HCNW4502 optocouplers but have increased common mode transient immunity of 15 kV/ μ s minimum at $V_{CM} = 1500$ V guaranteed.

Selection Guide

Minimum CMR		Current Transfer Ratio (%)	8-Pin DIP (300 MHz)		Small-Outline SO-8		Widebody (400 MHz)	Hermetic	
dV/dt (V/ μ s)	V_{CM} (V)		Single Channel Package	Dual Channel Package*	Single Channel Package	Dual Channel Package*	Single Channel Package	Single and Dual Channel Packages*	
1,000	10	7	6N135	HCPL-2530	HCPL-0500	HCPL-0530	HCNW135		
			19	6N136	HCPL-2531	HCPL-0501	HCPL-0531	HCNW136	
				HCPL-4502†		HCPL-0452†		HCNW4502†	
15,000	1500	19	HCPL-4503†	HCPL-4534	HCPL-0453†	HCPL-0534	HCNW4503†		
1,000	10	9						HCPL-65XX HCPL-65XX 4NS5	

*Technical data for these products are on separate HP publications.
†Pin 7, transistor base, is not connected.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ordering Information

Specify Part Number followed by Option Number (if desired).

Example:

HCPL-4503#XXX

- 020 = UL 5000 V rms/1 Minute Option*
- 650 = VDE OSS4 $V_{CEM} = 630$ V peak Option**
- 300 = Gull Wing Surface Mount Option†
- 500 = Tape and Reel Packaging Option

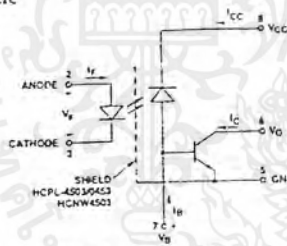
Option data sheets available. Contact your Hewlett-Packard sales representative or authorized distributor for information.

*For 6N133/6 and HCPL-4502/3 only.

**For HCPL-4503 only. Combination of Options 020 and Option 050 is not available.

†Gull wing surface mount option applies to through hole parts only.

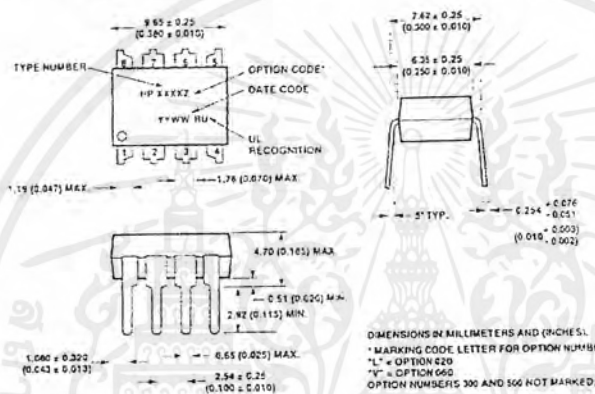
Schematic



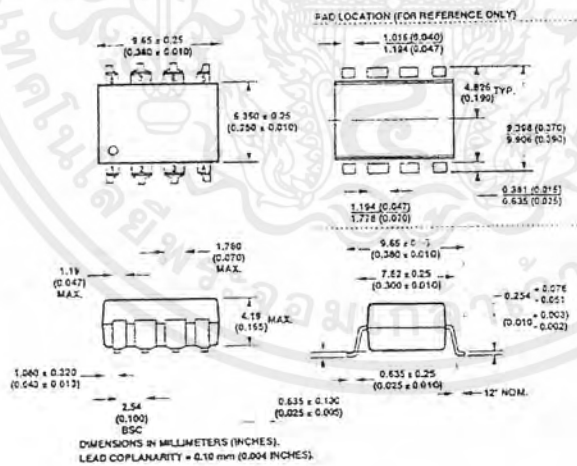
*NOTE: FOR HCPL-4502/3, HCPL-0452/3, HCNW6502, PIN 7 IS NOT CONNECTED.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Package Outline Drawings
5-Pin DIP Package (6N135/6, HCPL-4502/3)

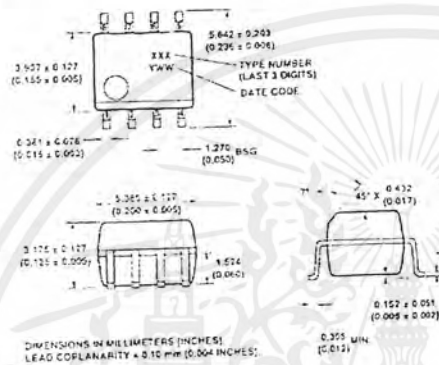


8-Pin DIP Package with Gull Wing Surface Mount Option 300 (6N135/6, HCPL-4502/3)

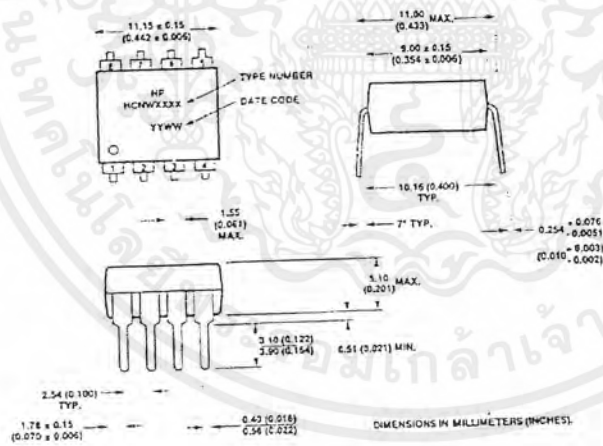


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Small Outline SO-8 Package (HCPL-0500/1, HCPL-0452/3)

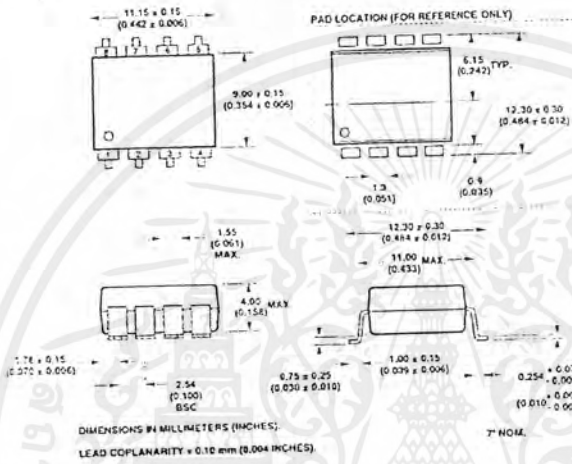


8-Pin Widebody DIP Package (HCNW135/6, HCNW4502/3)

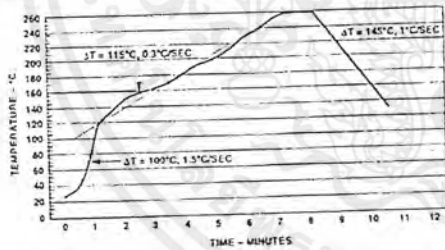


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8-Pin Widebody DIP Package with Gull Wing Surface Mount Option 300 (HCNW135/6, HCNW4502/3)



Solder Reflow Temperature Profile (HCPL-0500/1, HCPL-0452/3, and Gull Wing Surface Mount Option Parts)



Note: Use of Non-Chlorine Activated Fluxes is Recommended.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Regulatory Information

The devices contained in this data sheet have been approved by the following organizations:

UL

Recognized under UL 1577, Component Recognition Program, File E55361.

CSA

Approved under CSA Component Acceptance Notice #5, File CA 88324

VDE

Approved according to VDE 0884/06.92 (HCNW and Option 060 devices only)

BSI

Certification according to BS451:1994, (BS EN60065:1994); BS EN60950:1992 (BS7002:1992) and EN41003:1993 for Class II applications (HCNW devices only).

Insulation and Safety Related Specifications

Parameter	Symbol	8-Pin DIP (300 Mil) Value	SO-8 Value	Widebody (400 Mil) Value	Units	Conditions
Minimum External Air Gap (External Clearance)	L(101)	7.1	4.9	9.6	mm	Measured from input terminals to output terminals, shortest distance through air.
Minimum External Tracking (External Creepage)	L(102)	7.4	4.8	10.0	mm	Measured from input terminals to output terminals, shortest distance path along body.
Minimum Internal Plastic Gap (Internal Clearance)		0.05	0.05	1.0	mm	Through insulation distance, conductor to conductor, usually the direct distance between the photoemitter and photodetector inside the optocoupler cavity.
Minimum Internal Tracking (Internal Creepage)		NA	NA	4.0	mm	Measured from input terminals to output terminals, along internal cavity.
Tracking Resistance (Comparative Tracking Index)	CTI	200	200	200	Volts	DIN IEC 112/VDE 0303 Part 1
Isolation Group		IIIa	IIIa	IIIa		Material Group (DIN VDE 0110, 1/S9, Table 1)

Option 300 - surface mount classification is Class A in accordance with CECC 00803.

VDE 0884 Insulation Related Characteristics
(HCPL-4503 OPTION 060 ONLY)

Description	Symbol	Characteristic	Units
Installation classification per DIN VDE 0110/1.89, Table 1 for rated mains voltage ≤ 300 V rms for rated mains voltage ≤ 450 V rms		I-IV	
		I-III	
Climatic Classification		55/100/21	
Pollution Degree (DIN VDE 0110/1.89)		2	
Maximum Working Insulation Voltage	V_{IORM}	630	V peak
Input to Output Test Voltage, Method b* $V_{IORM} \times 1.875 = V_{PR}$, 100% Production Test with $t_m = 1$ sec, Partial Discharge < 5 pC	V_{PR}	1181	V peak
Input to Output Test Voltage, Method a* $V_{IORM} \times 1.5 = V_{FR}$, Type and sample test, $t_m = 60$ sec, Partial Discharge < 5 pC	V_{FR}	945	V peak
Highest Allowable Overvoltage* (Transient Overvoltage, $t_m = 10$ sec)	V_{IOTM}	6000	V peak
Safety Limiting Values (Maximum values allowed in the event of a failure, also see Figure 9, Thermal Derating curve.)			
Case Temperature	T_S	175	°C
Input Current	$I_{S INPUT}$	230	mA
Output Power	$P_{S OUTPUT}$	600	mW
Insulation Resistance at T_S , $V_{IO} = 500$ V	R_S	$\geq 10^9$	Ω

VDE 0884 Insulation Related Characteristics (HCNW135/6, HCNW4502/3 ONLY)

Description	Symbol	Characteristic	Units
Installation classification per DIN VDE 0110/1.89, Table 1 for rated mains voltage ≤ 600 V rms for rated mains voltage ≤ 1000 V rms		I-IV	
		I-III	
Climatic Classification		55/85/21	
Pollution Degree (DIN VDE 0110/1.89)		2	
Maximum Working Insulation Voltage	V_{IORM}	1414	V peak
Input to Output Test Voltage, Method b* $V_{IORM} \times 1.875 = V_{PR}$, 100% Production Test with $t_m = 1$ sec, Partial Discharge < 5 pC	V_{PR}	2652	V peak
Input to Output Test Voltage, Method a* $V_{IORM} \times 1.5 = V_{FR}$, Type and sample test, $t_m = 60$ sec, Partial Discharge < 5 pC	V_{FR}	2121	V peak
Highest Allowable Overvoltage* (Transient Overvoltage, $t_m = 10$ sec)	V_{IOTM}	8000	V peak
Safety Limiting Values (Maximum values allowed in the event of a failure, also see Figure 9, Thermal Derating curve.)			
Case Temperature	T_S	150	°C
Input Current	$I_{S INPUT}$	400	mA
Output Power	$P_{S OUTPUT}$	700	mW
Insulation Resistance at T_S , $V_{IO} = 300$ V	R_S	$\geq 10^9$	Ω

*Refer to the front of the optocoupler section of the current catalog, under Product Safety Regulations section (VDE 0884), for a detailed description.

Note: Isolation characteristics are guaranteed only within the safety maximum ratings which must be ensured by protective circuits in application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Device	Min.	Max.	Units	Note
Storage Temperature*	T _S		-55	125	°C	
Operating Temperature*	T _A	8-Pin DIP SO-8	-55	100	°C	
		Widebody	-55	85		
Average Forward Input Current*	I _{F(AVG)}			25	mA	1
Peak Forward Input Current* (50% duty cycle, 1 ms pulse width) (20% duty cycle, 1 ms pulse width)	I _{F(PEAK)}	8-Pin DIP SO-8		50	mA	2
		Widebody		40		
Peak Transient Input Current* (10 μs pulse width, 300 pps)	I _{F(TRANS)}	8-Pin DIP SO-8		1	A	
		Widebody		0.1		
Reverse LED Input Voltage* (Pin 3/2)	V _R	8-Pin DIP SO-8		5	V	
		Widebody		3		
Input Power Dissipation*	P _{IN}	8-Pin DIP SO-8		45	mW	3
		Widebody		40		
Average Output Current* (Pin 6)	I _{O(AVG)}			8	mA	
Peak Output Current*	I _{O(PEAK)}			16	mA	
Emitter-Base Reverse Voltage* (Pin 5-7, except 4502/3, 0452/3)	V _{EBR}			5	V	
Supply Voltage (Pin 8-5)	V _{CC}		-0.5	30	V	
Output Voltage (Pin 6-5)	V _O		-0.5	20	V	
Supply Voltage* (Pin 8-5)	V _{CC}		-0.5	15	V	
Output Voltage* (Pin 6-5)	V _O		-0.5	15	V	
Base Current* (Pin 7, except 4502/3, 0452/3)	I _B			5	mA	
Output Power Dissipation*	P _O			100	mW	4
Lead Solder Temperature* (Through-Hole Parts Only) 1.6 mm below seating plane, 10 seconds up to seating plane, 10 seconds	T _{LS}	8-Pin DIP		260	°C	
		Widebody		260	°C	
Reflow Temperature Profile	T _{BP}	SO-8 and Option 300	See Package Outline Drawings section			

*Data has been registered with JEDEC for the 6N135/6N136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Specifications (DC)

Over recommended temperature ($T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C) unless otherwise specified. See note 13.

Parameter	Symbol	Device	Min.	Typ.**	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note
Current Transfer Ratio	CTR*	6N135	7	15	50	%	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$ $V_{CE} = 0.5\text{ V}$	$I_F = 16\text{ mA}$	1, 2, 5, 11
		HCPL-0700	5	19				$V_{CE} = 4.5\text{ V}$	4
		HCNW135							
		6N136	19	24	50		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = 0.4\text{ V}$		
Logic Low Output Voltage	V_{OL}	6N135	0.1	0.4		V	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_O = 1.1\text{ mA}$ $I_I = 0.8\text{ mA}$	$I_F = 16\text{ mA}$ $V_{CE} = 4.5\text{ V}$	
		HCPL-0700	0.1	0.5					
		HCNW135							
		6N136	0.1	0.4			$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_I = 3.0\text{ mA}$ $I_O = 2.4\text{ mA}$		
Logic High Output Current	I_{OH}	6N135	0.003	0.5		μA	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = V_{CE} = 5.5\text{ V}$	$I_F = 0\text{ mA}$	7
		HCPL-0700	0.01	1			$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_O = V_{CE} = 15\text{ V}$		
		HCNW135							
		6N136	0.1	0.5					
Logic Low Supply Current	I_{CCL}		50	200		μA	$I_F = 16\text{ mA}$, $V_O = \text{Open}$, $V_{CE} = 15\text{ V}$		10
Logic High Supply Current	I_{CCH}		0.02	1		μA	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 0\text{ mA}$, $V_O = \text{Open}$, $V_{CE} = 15\text{ V}$		13
Input Forward Voltage	V_F *	8-Pin DIP SO-8	1.5	1.7		V	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 16\text{ mA}$		3
		Widebody	1.45	1.68	1.85		$T_A = 25^\circ\text{C}$ $I_F = 16\text{ mA}$		
			1.35	1.90					
Input Reverse Breakdown Voltage	BV_F *	8-Pin DIP SO-8	5			V	$I_F = 10\text{ }\mu\text{A}$		
		Widebody	3				$I_F = 100\text{ }\mu\text{A}$		
Temperature Coefficient of Forward Voltage	$\frac{\Delta V_F}{\Delta T_A}$	8-Pin DIP SO-8	-1.6			mV/°C	$I_F = 16\text{ mA}$		
		Widebody	-1.9						
Input Capacitance	C_{IN}	8-Pin DIP SO-8	60			pf	$f = 1\text{ MHz}$, $V_F = 0\text{ V}$		
		Widebody	90						
Transistor DC Current Gain	β_{DC}	8-Pin DIP SO-8	150				$V_O = 5\text{ V}$, $I_O = 3\text{ mA}$		
		Widebody	130				$V_O = 0.4\text{ V}$, $I_O = 20\text{ }\mu\text{A}$		
			180				$V_O = 5\text{ V}$, $I_O = 3\text{ mA}$		
			160				$V_O = 0.4\text{ V}$, $I_O = 20\text{ }\mu\text{A}$		

*For JEDEC registered parts.

**All typicals at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Switching Specifications (AC)

Over recommended temperature ($T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C), $V_{CC} = 5\text{ V}$, $I_F = 16\text{ mA}$ unless otherwise specified

Parameter	Sym.	Device	Min.	Typ.**	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note
Propagation Delay Time to Logic Low at Output	t_{PL} *	6N135		0.2	1.5	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_L = 4.1\text{ k}\Omega$	5, 6, 11	8, 9
		HCPL-0500 HCNW135			2.0				
		6N136	0.2	0.8	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_L = 1.9\text{ k}\Omega$	5, 6, 11	8, 9	
		HCPL-4502/3 HCPL-0501 HCPL-0452/3		1.0					
		HCNW136 HCNW4502/3							
Propagation Delay Time to Logic High at Output	t_{PH} *	6N135		1.3	1.5	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_L = 4.1\text{ k}\Omega$	5, 6, 11	8, 9
		HCPL-0500 HCNW135			2.0				
		6N136	0.6	0.8	μs	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_L = 1.9\text{ k}\Omega$	5, 6, 11	8, 9	
		HCPL-4502/3 HCPL-0501 HCPL-0452/3		1.0					
		HCNW136 HCNW4502/3							
Common Mode Transient Immunity at Logic High Level Output	$ CM_{IH} $	6N135		1		$\text{kV}/\mu\text{s}$	$R_L = 4.1\text{ k}\Omega$ $I_F = 0\text{ mA}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CM} = 10\text{ V}_{pp}$, $C_L = 15\text{ pF}$	12	7, 8, 9
		HCPL-0500 HCNW135							
		6N136		1	$\text{kV}/\mu\text{s}$	$R_L = 1.9\text{ k}\Omega$ $I_F = 0\text{ mA}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CM} = 1500\text{ V}_{pp}$, $C_L = 15\text{ pF}$	12	7, 8, 9	
		HCPL-4502/3 HCPL-0501 HCPL-0452/3							
		HCNW4502/3	15	30					
Common Mode Transient Immunity at Logic Low Level Output	$ CM_{IL} $	6N135		1		$\text{kV}/\mu\text{s}$	$R_L = 4.1\text{ k}\Omega$ $I_F = 16\text{ mA}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CM} = 10\text{ V}_{pp}$, $C_L = 15\text{ pF}$	12	7, 8, 9
		HCPL-0500 HCNW135							
		6N136		1	$\text{kV}/\mu\text{s}$	$R_L = 1.9\text{ k}\Omega$ $I_F = 16\text{ mA}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CM} = 1500\text{ V}_{pp}$, $C_L = 15\text{ pF}$	12	7, 8, 9	
		HCPL-4502/3 HCPL-0501 HCPL-0452/3							
		HCNW4502/3	15	30					
Bandwidth	BW	6N135/6 HCPL-0500/1		9		MHz	See Test Circuit	8, 10	10
		HCNW135/5		11					

*For JEDEC registered parts.

**All typicals at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Package Characteristics

Over recommended temperature ($T_A = 0^\circ\text{C}$ to 70°C) unless otherwise specified

Parameter	Sym.	Device	Min.	Typ.*	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note
Input-Output Momentary Withstand Voltage**	V_{iso}	S-Pin DIP	2500			V _{rms}	RH < 50%, t = 1 min., $T_A = 25^\circ\text{C}$		6, 14
		SO-8	5000						6, 15
		Widebody	5000						6, 12, 15
	I_{FO}	S-Pin DIP		1		μA	45% RH, t = 5 s, $V_{FO} = 3 \text{ kVdc}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		6, 16
Input-Output Resistance	R_{FO}	S-Pin DIP		10^{10}		Ω	$V_{FO} = 500 \text{ Vdc}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$		6
		SO-8		10^{10}					
		Widebody	10^{12}	10^{13}					
Input-Output Capacitance	C_{FO}	S-Pin DIP		0.6		pf	f = 1 MHz		6
		SO-8		0.6	0.6				
		Widebody		0.6	0.6				

*All test values at $T_A = 25^\circ\text{C}$.

**The Input-Output Momentary Withstand Voltage is a dielectric voltage rating that should not be interpreted as an input-output continuous voltage rating. For the continuous voltage rating refer to the VDE 0884 Insulation Related Characteristics Table (if applicable), your equipment level safety specification or HP Application Note 1074 entitled "Optocoupler Input-Output Endurance Voltage" publication number 5963-2103E.

Notes:

- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $0.8 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ (S-Pin DIP).
- Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $0.5 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $1.6 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ (S-Pin DIP).
- Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $1.0 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $0.9 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ (S-Pin DIP).
- Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $1.1 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- Derate linearly above 70°C free-air temperature at a rate of $2.0 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ (S-Pin DIP).
- Derate linearly above 85°C free-air temperature at a rate of $2.3 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ (SO-8).
- CURRENT TRANSFER RATIO in percent is defined as the ratio of output collector current, I_C , to the forward LED input current, I_F , times 100.
- Device considered a two-terminal device. Pins 1, 2, 3, and 4 shorted together and Pins 5, 6, 7, and 8 shorted together.
- Common mode transient immunity in a Logic High level is the maximum tolerable (positive) dV_{CM}/dt on the leading edge of the common mode pulse signal, V_{CM} , to assure that the output will remain in a Logic High state (i.e., $V_O > 2.0 \text{ V}$). Common mode transient immunity in a Logic Low level is the maximum tolerable (negative) dV_{CM}/dt on the trailing edge of the common mode pulse signal, V_{CM} , to assure that the output will remain in a Logic Low state (i.e., $V_O < 0.8 \text{ V}$).
- The 1.9 k Ω load represents 1 TTL unit load of 0.36 mA and the 3.6 k Ω pull-up resistor.
- The 4.1 k Ω load represents 1 LSTTL unit load of 0.36 mA and 6.1 k Ω pull-up resistor.
- The frequency at which the ac output voltage is 3 dB below its mid-frequency value.
- The JEDEC registration for the 6N136 specifies a minimum CTR of 15%. HP guarantees a minimum CTR of 19%.
- See Option 020 data sheet for more information.
- Use of a 0.1 μF bypass capacitor connected between pins 5 and 5 is recommended.
- In accordance with UL 1577, each optocoupler is proof tested by applying an insulation test voltage $\geq 3000 \text{ V rms}$ for 1 second (leakage detection current limit, $I_{LD} \leq 5 \mu\text{A}$). This test is performed before the 100% Production test shown in the VDE 0884 Insulation Related Characteristics Table if applicable.
- In accordance with UL 1577, each optocoupler is proof tested by applying an insulation test voltage $\geq 6000 \text{ V rms}$ for 1 second (leakage detection current limit, $I_{LD} \leq 5 \mu\text{A}$). This test is performed before the 100% Production test shown in the VDE 0884 Insulation Related Characteristics Table if applicable.
- This rating is equally validated by an equivalent ac proof test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

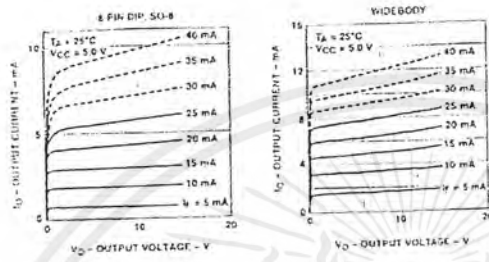


Figure 1. IC and Pulsed Transfer Characteristics.

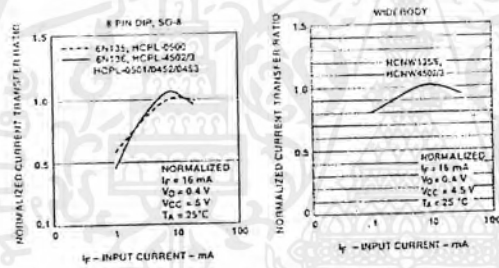


Figure 2. Current Transfer Ratio vs. Input Current.

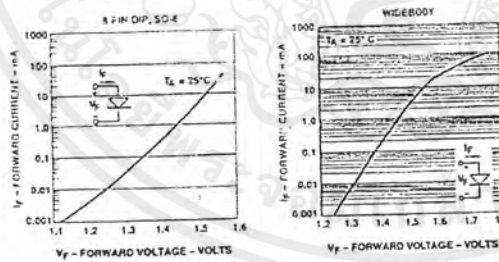


Figure 3. Input Current vs. Forward Voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

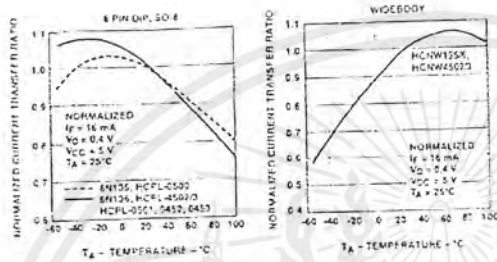


Figure 4. Current Transfer Ratio vs. Temperature.

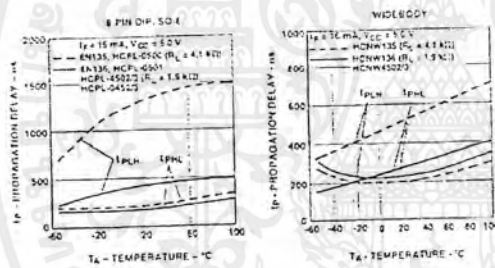


Figure 5. Propagation Delay vs. Temperature

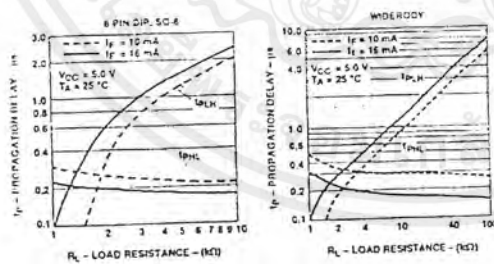


Figure 6. Propagation Delay Time vs. Load Resistance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

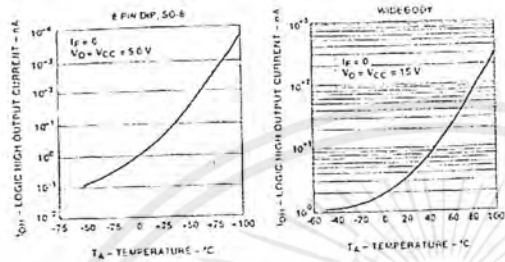


Figure 7. Logic High Output Current vs. Temperature.

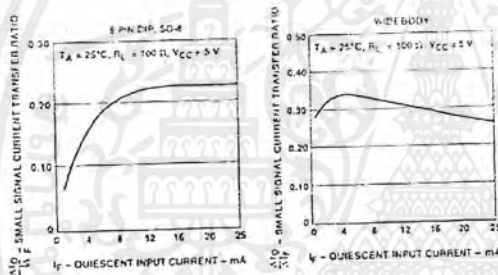


Figure 8. Small Signal Current Transfer Ratio vs. Quiescent Input Current.

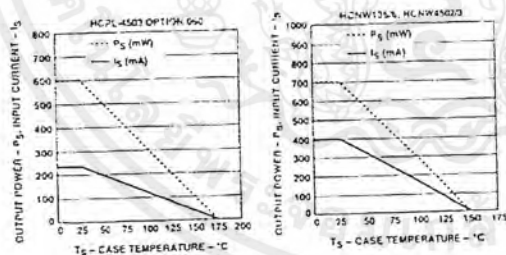


Figure 9. Thermal Derating Curve, Dependence of Safety Limiting Value with Case Temperature per VDE 0884.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

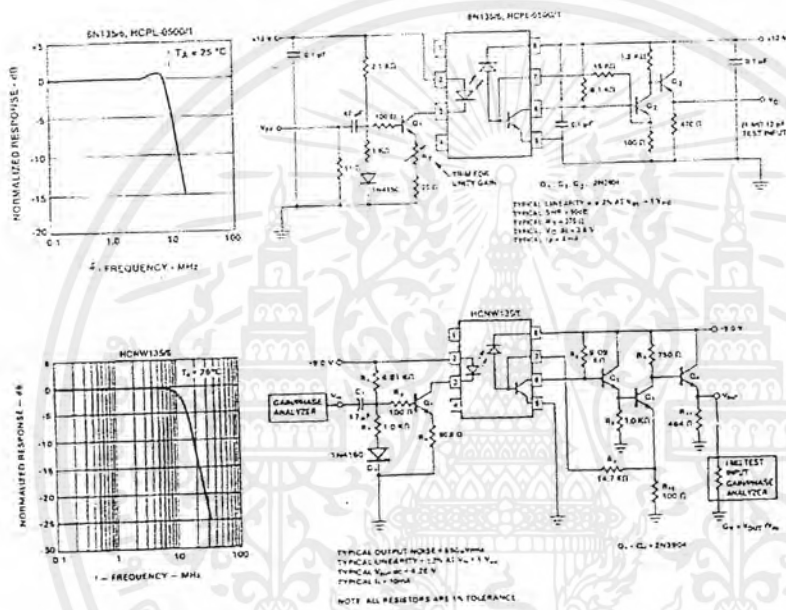


Figure 10. Frequency Response.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

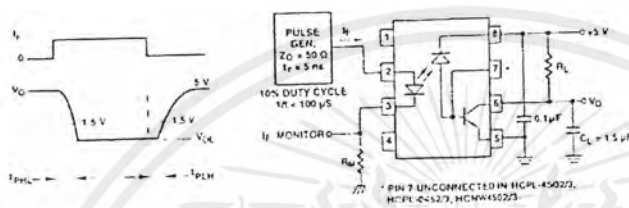


Figure 11. Switching Test Circuit

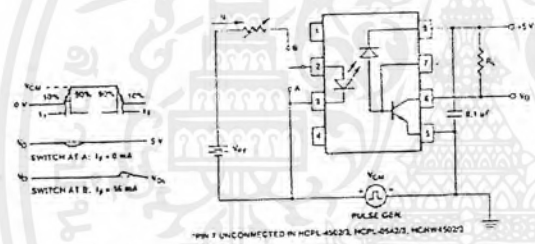


Figure 12. Test Circuit for Transient Immunity and Typical Waveforms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**TL494
TL495**

**Specifications and Applications
Information**

**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

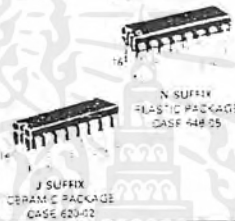
The TL494 and TL495 are fixed frequency, pulse width modulation control circuits designed primarily for Switchmode power supply control. These devices feature:

- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator With Master Or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5 Volt Reference
- Adjustable Dead-Time Control
- Uncommitted Output Transistors For 200 mA Source Or Sink
- Output Control For Push-Pull Or Single-Ended Operation
- On-Chip 20 Volt Zener (TL495 Only)
- Output Steering Control (TL495 Only)

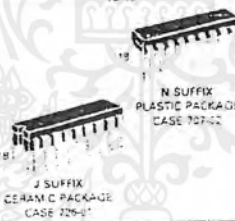
**SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS**

SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS

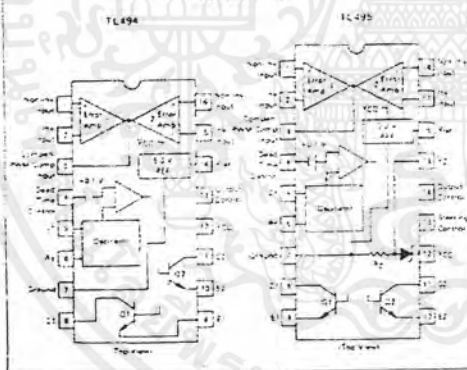
TL494



TL495



PIN CONNECTIONS



The TL494C/495C are specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I/495I are specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
TL494CN	0 To 70°C	Plastic DIP
TL494CJ	0 To 70°C	Ceramic DIP
TL494IN	-25 To 85°C	Plastic DIP
TL494IJ	-25 To 85°C	Ceramic DIP
TL494MJ	-55 To 125°C	Ceramic DIP
TL495CN	0 To 70°C	Plastic DIP
TL495CJ	0 To 70°C	Ceramic DIP
TL495IN	-25 To 85°C	Plastic DIP
TL495IJ	-25 To 85°C	Ceramic DIP

MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

4-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

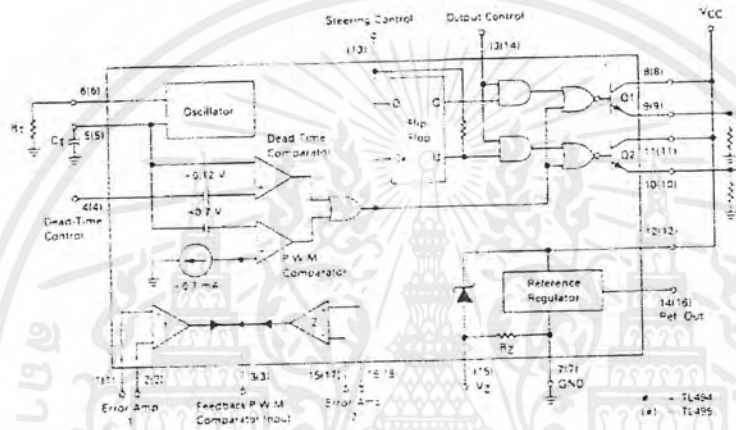
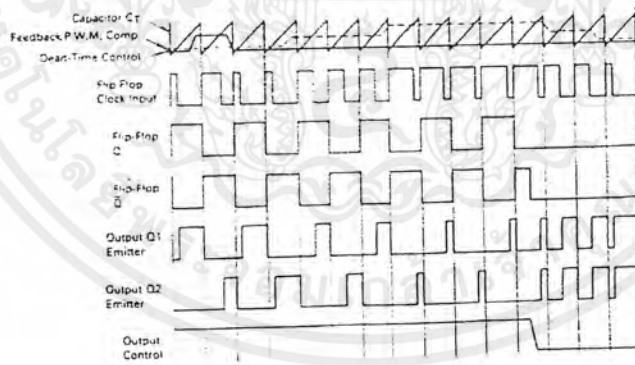


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

Description

The TL494/495 are fixed frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} = \frac{1}{R_T \cdot C_T}$$

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to timing diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the dead time control, the error amplifier inputs or the feedback input. The dead-time control comparator has an effective 120 mV input offset, which limits the minimum output dead time to approximately the first 4% of the sawtooth cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96%, with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional dead time may be imposed on the output by setting the dead time control input to a fixed voltage, ranging between 0 to 3.3 V.

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the dead time control input, down to zero, as the

voltage at the feedback pin varies from 0.5 to 3.3 V. Both error amplifiers have a common-mode input range from -0.3 V to $(V_{CC} - 2 V)$, and may be used to sense power supply output voltage and current. The error amplifier outputs are active high and are OR'ed together at the non-inverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time dominates operation of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the dead time comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated pulses to each of the two output transistors, alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2 when single ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a primary winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-to-oscillator currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, in which case the feedback pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494/495 has an internal 5.0 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an accuracy of $\pm 5\%$ with a thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0 to 70°C.

The TL495 contains an on-chip 3% zener diode for high voltage applications where V_{CC} is greater than 40 volts, and an output steering control that overrides the internal control of the pulse-steering flip-flop. (Refer to the functional table shown in Figure 3.)

FIGURE 3 — FUNCTIONAL TABLE

Inputs		Output Function	f_{out} f_{osc}
Output Control	Steering Control		
Grounded	Open	Single-ended P.W.M. at Q1 and Q2	1
At V_{ref}	Open	Push-pull operation	0.5
At V_{ref}	V1 = 0.4 V	Single-ended P.W.M. at Q1 only	1
At V_{ref}	V1 = 2.4 V	Single-ended P.W.M. at Q2 only	1

See Engineering Bulletin EB100 for further information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

MAXIMUM RATINGS (full operating ambient temperature range applies unless otherwise noted)

Rating	Symbol	TL494M	TL494/TL495I	TL494C/TL495C	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	42	42	42	V
Collector Output Voltage	V _{CE1} , V _{CE2}	42	42	42	V
Collector Output Current (each transistor)	I _{C1} , I _{C2}	250	250	250	mA
Amplifier Input Voltage	V _{in}	V _{CC} - 3.0	V _{CC} - 3.0	V _{CC} - 3.0	V
Power Dissipation (T _a = 45°C)	P _D	1000	1000	1000	mW
Operating Junction Temperature	T _j	150	150	150	°C
Operating Ambient Temperature Range	T _A	55 to 125	25 to 85	0 to 70	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150	-65 to +150	55 to +150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	J Suffix Ceramic Package	N Suffix Plastic Package	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	R _{θJA}	100	40	°C/W
Power Derating Factor	RRJA	17.0	12.5	mW/°C
Operating Ambient Temperature	T _A	55	25	°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Condition Value	Symbol	TL494/TL495			Unit
		Min	Typ	Max	
Power Supply Voltage	V _{CC}	7.0	12	40	V
Collector Output Voltage	V _{CE1} , V _{CE2}	—	30	40	V
Collector Output Current (each transistor)	I _{C1} , I _{C2}	—	—	200	mA
Amplifier Input Voltage	V _{in}	0.3	—	V _{CC} - 2.0	V
Current Into Feedback Terminal	I _{fb}	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	I _{ref}	—	—	10	mA
Timing Resistor	R _T	18	30	500	kΩ
Timing Capacitor	C _T	0.47	1.0	10,000	nF
Oscillator Frequency	f _{osc}	1.0	50	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_{CC} = 15 V, f_{osc} = 10 kHz unless otherwise noted).
For typical values T_a = 25°C; for min-max values T_a is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494M			TL494C, TL495C,I			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
REFERENCE SECTION								
Reference Voltage (I _Q = 1.0 mA)	V _{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Reference Voltage Change with Temperature (ΔI _A = Min to Max)	ΔV _{ref} /ΔT _A	—	0.2	2.0	—	1.3	2.5	μV/°C
Input Regulation (V _{CC} = 7.0 V to 40 V)	Reg _{in}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Output Regulation (I _Q = 1.0 mA to 10 mA)	Reg _{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current (V _{ref} = 0 V, T _A = 25°C)	I _{sc}	10	35	50	—	35	—	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $f_{osc} = 10\text{ kHz}$ unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL434M			TL494C, LTL495C, I			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
OUTPUT SECTION								
Collector OH-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$)	$I_{C(off)}$	—	2.0	100	—	2.0	100	μA
Emitter OH-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$, $V_{BE} = 0\text{ V}$)	$I_{E(off)}$	—	—	150	—	—	100	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage Common-Emitter ($V_{BE} = 0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$)	$V_{sat(C)}$	—	1.1	1.5	—	1.1	1.3	V
Emitter-Follower ($V_{CE} = 15\text{ V}$, $I_E = 200\text{ mA}$)	$V_{sat(E)}$	—	1.5	2.5	—	1.5	2.5	V
Output Control Pin Current: Low State ($V_{OC} = 0.4\text{ V}$)	I_{OCL}	—	10	—	—	10	—	μA
High State ($V_{OC} = V_{sat}$)	I_{OCH}	—	0.2	3.5	—	1.1	3.5	mA
Output Voltage Rise Time ($T_d = 25^\circ\text{C}$) Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	t_r	—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time ($T_d = 25^\circ\text{C}$) Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	t_f	—	25	100	—	25	100	ns
ERROR AMPLIFIER SECTIONS								
Input Offset Voltage (V_O (Pin 2) = 2.5 V)	V_{IO}	—	2.0	—	—	1.0	—	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	—	—	5.0	—	250	—	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	—	—	0.1	—	1.0	—	μA
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 7.5\text{ V}$ to 40 V)	V_{ICR}	—0.3	—	—	—	$V_{CC} - 2.0$	—	V
Open Load Voltage Gain ($V_O = 10\text{ V}$, $V_{O1} = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	$A_{v(OL)}$	—	70	95	—	—	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	f_c	—	—	350	—	—	—	kHz
Phase Margin at Unity Gain ($V_O = 0.5$ to 3.5 V , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	ϕ_m	—	—	65	—	—	—	deg
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	—	65	90	—	—	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	PSRR	—	—	100	—	—	—	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.2 V)	I_{O-}	—	0.3	0.7	—	—	—	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O+}	—	-2.0	-4.0	—	—	—	mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $f_{osc} = 10\text{ kHz}$ unless otherwise noted.)
 For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$; for min-max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494/TL495			Unit
		Min	Typ	Max	
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Threshold Voltage (Zero duty cycle)	V_{TH}	—	1.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{IN(3)} = 0.7\text{ V}$)	I_{IN}	0.5	0.7	—	mA
DEAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{IN} = 0\text{ to }5.25\text{ V}$)	I_{BIAS}	—	-7.0	-1.0	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{IN} = 5\text{ V}$, $C_T = 0.1\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$) ($V_{IN} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 10\text{ k}\Omega$)	D_{NMAX}	15	48	50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) Zero Duty Cycle (Maximum Duty Cycle)	V_{TH}	0	2.9	3.3	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 10\text{ k}\Omega$)	f_{osc}	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 10\text{ k}\Omega$)	Δf_{osc}	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 2.0\text{ V to }40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc}(\Delta V)$	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature ($T_A = T_{low}$ to T_{high} ($T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$))	$\Delta f_{osc}(\Delta T)$	—	—	12	%
TL495					
Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
STEERING CONTROL					
Input Current Low ($V_{IN(3)} = 0.4\text{ V}$)	I_{STL}	—	-25	200	μA
Input Current High ($V_{IN(3)} = 2.4\text{ V}$) ($V_{IN(3)} = V_{REF}$)	I_{STH}	—	25	200	μA
ZENER CHARACTERISTICS					
Zener Breakdown Voltage ($I_Z = 2.0\text{ mA}$)	V_Z	—	35	—	V
Sink Current ($V_{IN(15)} = 1.0\text{ V}$)	I_{RZ}	—	0.3	—	mA
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V_{REF} , All Other Inputs and Outputs Open) ($V_{CC} = 15\text{ V}$) ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	I_{CC}	—	5.5	10	mA
Average Supply Current ($V_{IN(4)} = 2.0\text{ V}$) (See Figure 12.) ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{ V}$)	—	—	7.0	—	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY versus TIMING RESISTANCE

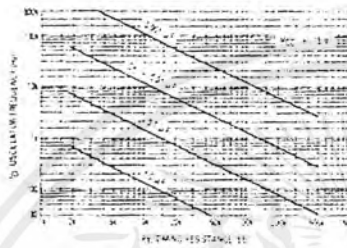


FIGURE 5 — OPEN LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE versus FREQUENCY

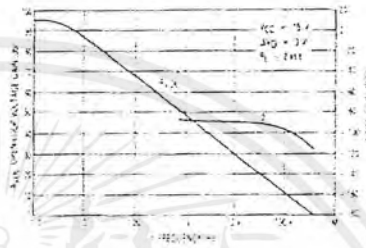


FIGURE 6 — PERCENT DEAD TIME versus OSCILLATOR FREQUENCY

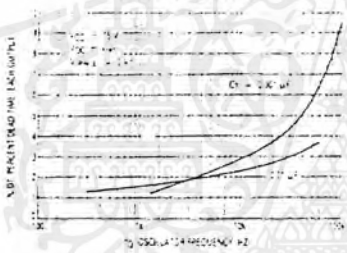


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus DEAD TIME CONTROL VOLTAGE

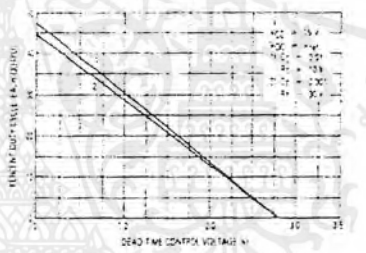


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus EMITTER CURRENT

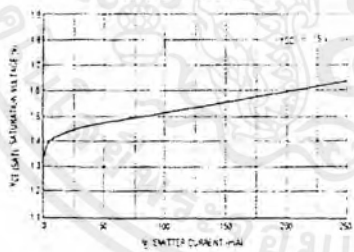
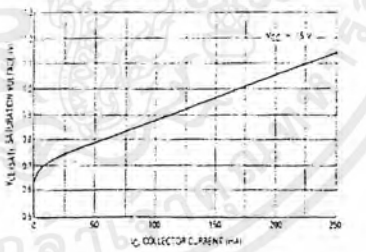


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus COLLECTOR CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

FIGURE 10 — STANDBY SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE



FIGURE 11 — ERROR AMPLIFIER CHARACTERISTICS

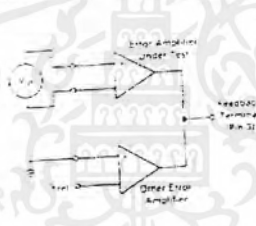


FIGURE 12 — DEAD TIME AND FEEDBACK CONTROL TEST CIRCUIT

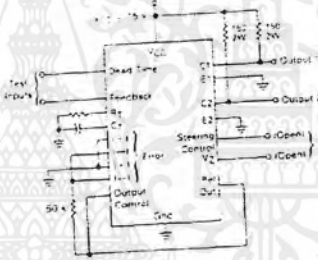


FIGURE 13 — COMMON-EMITTER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM

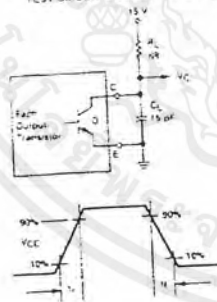
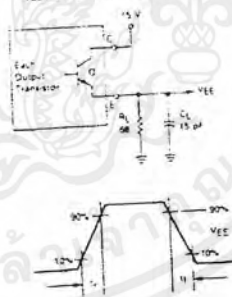


FIGURE 14 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION TEST CIRCUIT AND WAVEFORM



MOTOROLA LINEAR/INTERFACE DEVICES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 15 — ERROR AMPLIFIER SENSING TECHNIQUES

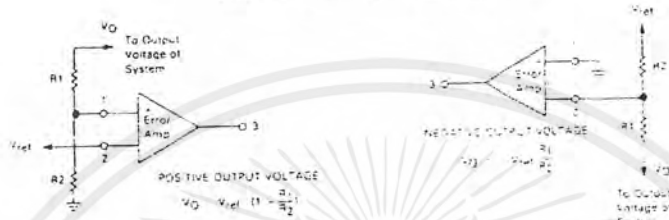


FIGURE 16 — DEAD TIME CONTROL CIRCUIT

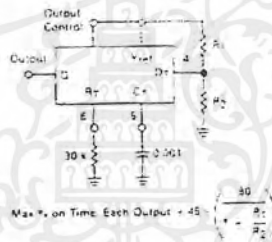


FIGURE 17 — SOFT-START CIRCUIT

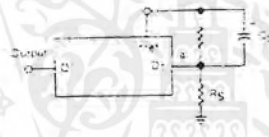
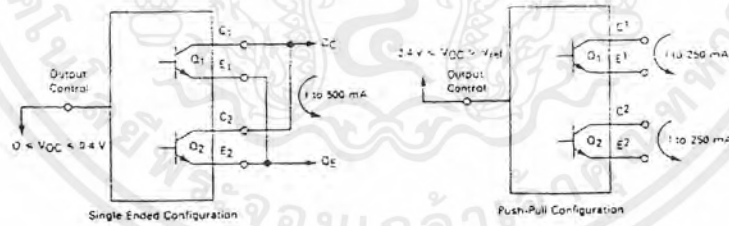


FIGURE 18 — OUTPUT CONNECTIONS FOR SINGLE-ENDED AND PUSH-PULL CONFIGURATIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

FIGURE 19 — SLAVING TWO OR MORE CONTROL CIRCUITS

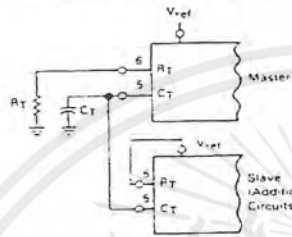


FIGURE 20 — OPERATION WITH $V_{IN} > 40$ V USING INTERNAL ZENER (TL495 ONLY)

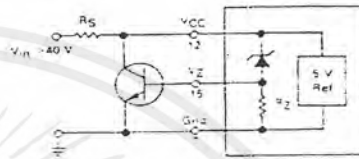
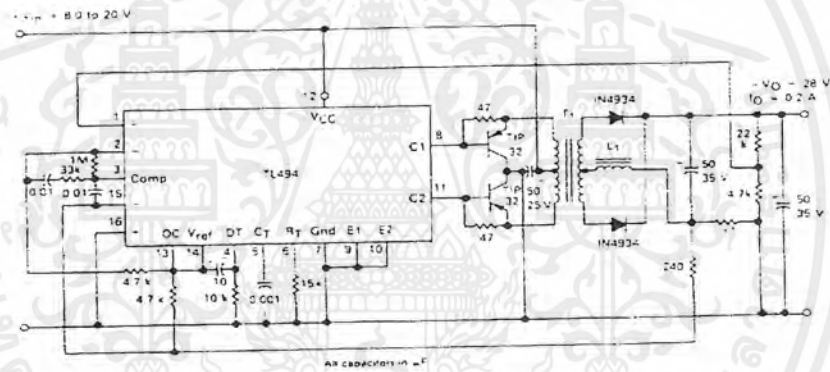


FIGURE 21 — PULSE WIDTH MODULATED PUSH-PULL CONVERTER



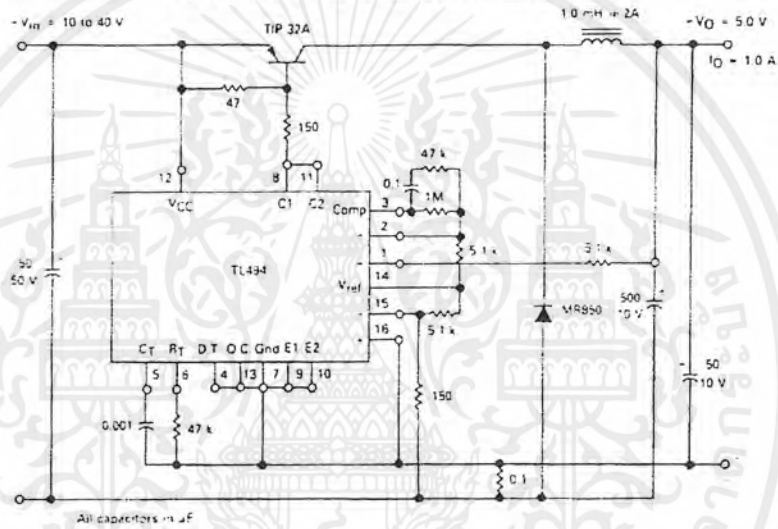
L1 — 3.5 mH @ 0.3 A
 T1 — Primary 20T C.T. #28 AWG
 Secondary 120T C.T. #36 AWG
 Core: Ferroxcube 1408P-L00-3C8

TEST	CONDITIONS	RESULTS
Line Regulation	$V_{in} = 8.0$ to 20 V	3.0 mV 0.01%
Load Regulation	$V_{in} = 12.6$ V, $I_O = 0.2$ to 200 mA	5.0 mV 0.02%
Output Ripple	$V_{in} = 12.6$ V, $I_O = 200$ mA	40 mV P.P. P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 12.6$ V, $R_L = 0.1 \Omega$	250 mA
Efficiency	$V_{in} = 12.6$ V, $I_O = 200$ mA	72%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL494, TL495

FIGURE 22 — PULSE-WIDTH MODULATED STEP-DOWN CONVERTER



TEST	CONDITIONS	RESULTS
Line Regulation	$V_{in} = 10\text{ V to }40\text{ V}$	14 mV 0.28%
Load Regulation	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ mA to }1.0\text{ mA}$	3.0 mV 0.06%
Output Ripple	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	55 mV P-P P.A.R.D.
Short Circuit Current	$V_{in} = 28\text{ V}, R_L = 0.1\Omega$	1.6 amps
Efficiency	$V_{in} = 28\text{ V}, I_O = 1.0\text{ A}$	71%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
คู่มือการใช้งานอินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F U J I I N V E R T E R
F V R - C 9 S - 7 J E
C O . L I M I T E D

I N S T R U C T I O N M A N U A L

F U J I E L E C T R I C C O . , L T D .

S I 1 1 7 - 0 3 2 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

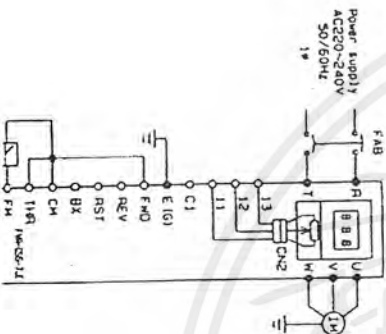
4) TFC-CA Series (cont'd)

Environment	Place where inverter is used (classified)	An indoor place at an altitude of 1000m or less and free of dust, corrosive gas and oil mist
Ambient temperature		-10 ~ 50°C
Ambient humidity		20 ~ 90%RH (There shall be no dew condensation)
Vibration		5.0m/s ² or less Vibration frequency: 5 ~ 55Hz
Storage temperature		-25 ~ 65°C
Protective structure (JIS 1020)		Enclosed type (IP 20)
Cooling method		Self-cooling (up to 0.5A/W). Forcibly air-cooling (1.5W)
Ways	[kg]	0.6 0.7 0.7 0.0 1.7

1-0 - Basic Wiring Diagram

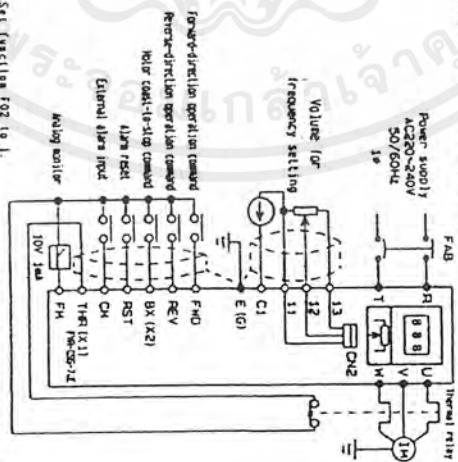
1) Start Panel Operation

In the state of setting done at the time of shipment from the factory, it is so arranged that connection of the power supply and the motor only takes it possible to set frequency by means of the remote control knob on the keypad panel as well as to perform run/stop operation of the inverter by means of the RUN/STOP keys on the keypad panel.



2) External Signal Operation

Ensure that the connection is as shown in the following diagram in case of operating the inverter by means of external frequency setting voltage or contact signal.



Note 1) Set frequency for 1.
 Note 2) In case of using an external frequency setting voltage, disconnect the voltage conductor (C02) from the keypad panel.
 Use of an external voltage together with the voltage on the keypad panel may result in damage to the inverter.

★☆ Caution ☆☆

- The control circuit terminal wiring should be kept as far as possible from the main circuit wiring to prevent operational error due to noise interference. Never install them in the same duct or conduit. (A separation distance of 10cm or more is recommended.)
- If the control circuit wiring must cross the main circuit wiring, make sure it crosses at a right angle.
- Use shielded wire or insulated wire for the control circuit wiring, which should be as short as possible (20m or less).
- Install a surge absorber in parallel with any magnet contactors, solenoids, relays or timer coils, which are close to the inverter.
- The longer the wiring between the inverter and the motor is, the larger current flows in parallel with the motor through the (floating) conductor between wires. This may cause parallel activation of such protective facilities as overcurrent protection, overvoltage protection and micrologic thermal overload, or the error in current detection may become larger. To avoid these, adjust the length of wiring between the inverter and the motor so that it does not exceed the length shown below.

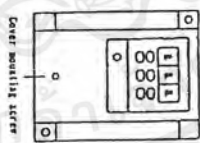
FWD IC05-7 : 50m
 FWD 2~1, 5C05-7 : 100m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Wiring

Perform wiring in accordance with the following procedure:

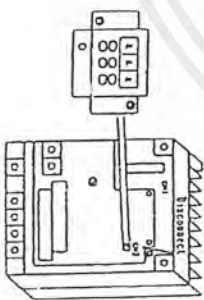
1) Remove the cover mounting screw at the center of the cover.



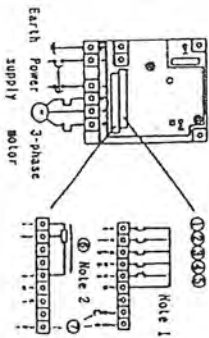
2) Hold the lower end of the cover, lift it up and remove the cover.



3) Remove the keypad panel from the main unit, and disconnect the harness from CN2 at the same time.



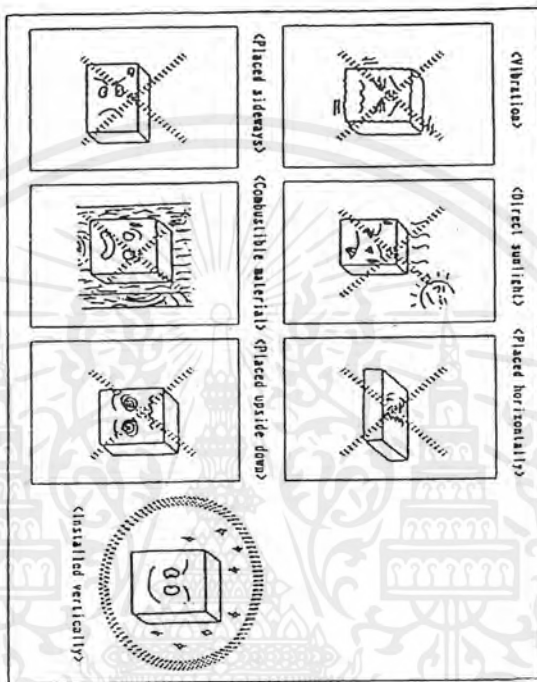
4) Arrange the main circuit and the control circuit wiring as follows.



- ① Motor coast-to-stop
- ② Reset signal
- ③ Reverse-direction operation command
- ④ Forward-direction operation command
- ⑤ External alarm
- ⑥ Frequency setting VR
- ⑦ Combined alarm relay output

Note 1) RND and TRK are connected to CM at the factory. In this condition, starting/stopping can be performed via RUN/STOP keys on the keypad panel.

Note 2) In case of using an external voltage, remove the connector by which the keypad panel and the CN2 on the inverter main unit are connected.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Function code	Function	Data code range	Unit setting	Min. setting	Factory setting	Change during operation
F27	TRN (terminal) function	0: External alarm input selection (I1) 1: Multistep speed selection (I1)	—	—	0	X
F28	SE (terminal) function	0: Motor coast-to-stop command 1: Input selection (I2)	—	—	0	X
F29	Multistep speed setting 1	0.0 ~ 120Hz	Hz	1	10	○
F30	Multistep speed setting 2	0.0 ~ 120Hz	Hz	1	20	○
F31	Multistep speed setting 3	0.0 ~ 120Hz	Hz	1	30	○
F32	Motor adjustment	0 ~ 99 (full scale DC 6.5 ~ 10.5V)	—	1	85	○
F33	Motor output selection	0: Output frequency monitor 1: Output current monitor	—	1	0	○

* 1 : Frequency can be set in increments of 0.1Hz within a range of 0.0 to 99.9Hz, and can be set in increments of 1Hz within a range of 100 to 120Hz.

Detailed Explanation of Each Function

F 0 0 Data Protection

The set data can be locked so that it will not be changed by mistake.
 0 : Data change possible
 1 : Data change not possible
 To change data, simultaneously press the key and either the or key.

F 0 1 Frequency Command

Either of the following two frequency setting methods can be selected:

- 0 : Keypad panel setting (/ keys)
- 1 : Analog Input (setting by volume control, 000 ~ 10V or 0CA ~ 20mA)

F 0 2 Operation Command

Either of the following two control methods can be selected:

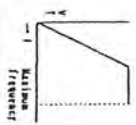
- 0 : Keypad panel operation (/ keys)
- 1 : External signal operation (FM, REV)

F 0 3 Maximum Frequency

Sets the maximum value for the output frequency.

- 50 : Frequency can be set in increments of 1Hz within a range of 50 to 120Hz.
- 120 : Frequency can be set in increments of 1Hz within a range of 50 to 120Hz.

Multistep motors and other motors which are designed to operate at low speed can be damaged if operated at high frequency. Be sure to set the frequency to match the characteristics of the motor.

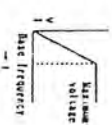


F 0 4 Base Frequency

Sets the base frequency (the frequency which is the divergent point of the specified torque characteristics and the specified output characteristics).

- 50 : Frequency can be set in increments of 1Hz within a range of 50 to 120Hz.
- 120 : Frequency can be set in increments of 1Hz within a range of 50 to 120Hz.

- Set to match the characteristics of the motor.
 Although the base frequency may exceed the maximum frequency, in that case the voltage will be decreased accordingly.

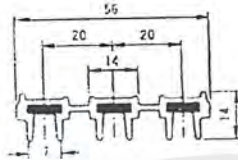


ภาคผนวก ค
เอกสารประกอบการติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้าที่ทรง



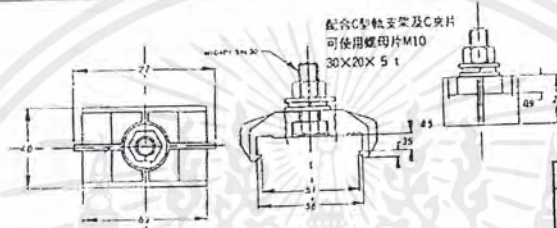
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3P安全電軌零件圖Parts Diagram

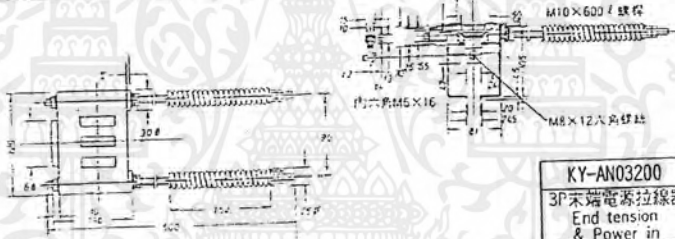


無氧銅99.9%Cu以上含銅量
100%以上導電率(Good Conductor rate)
2.8mm x 10mm (依CNS 273-H2010規範)
斷面積28mm²

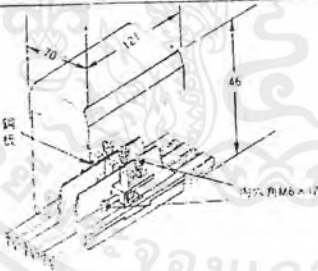
KY-AN03009
三合一電軌
Three in one



KY-AN03100
3P電軌夾
Hanger clamp



KY-AN03200
3P末端電源拉線器
End tension & Power in



KY-AN03300
3P中間供電器
Middle power feed-in



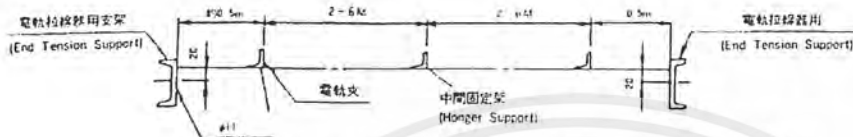
安裝步驟：
1. 將電軌由凸緣方孔插入到底
2. 電軌定位螺絲鉋緊固定拉直電軌。
3. 電源線夾端子，鎖上電源鋼板即完成。

KY-AN03200N
免剝皮拉線器

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3P、4P、5P 桁工圖 Working Diagram

第一步 按裝設計 (Supports design)



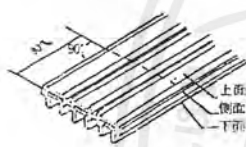
- 附註：
- 3P、4P、5P 電軌配有傾度時，必須採用側式施工。
 - 在轉彎處起點開始算，每 0.5M 配一只電軌夾。
 - 3P、4P、5P 電軌拉線器基礎須比電軌夾高約 5% 以防水順電軌而下至電源拉線器處，造成短接現象。
 - 3P、4P、5P 電軌不適用於室外或酸鹼成份高之場所。

第二步 末端拉線器按裝 (End tension & power in parts)

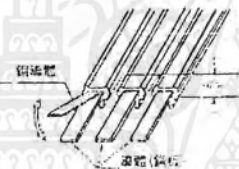
第四步 末端拉線器按裝 (End tension & power in parts)

* 於地面先裝好一端

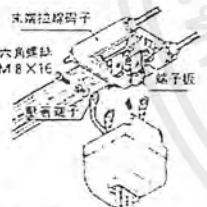
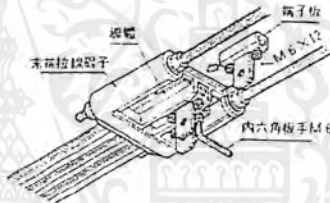
* 待上好電軌，再行按裝另一端。



- 自電軌頭端算起 90° 處將鋼索切斷。

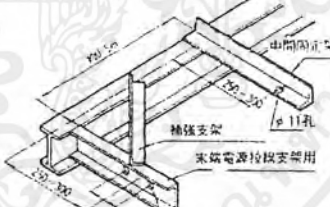
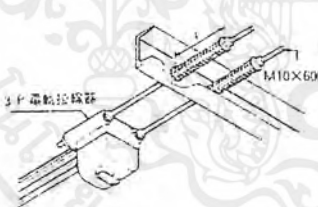


- 自電軌切頭部份算起 10° 將鋼索全部切斷。
- 將電軌穿入拉線器內，用鋼子板加以固定旋緊再將鋼索折彎 90°。



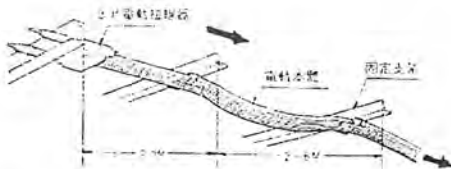
電源線要穿入接線盒，接好時方可蓋好。

- ★ 請注意兩頭電源拉線器內三個螺絲均應螺絲 M6 x 16 規格，以防鬆脫接線。

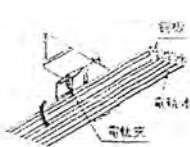


	A
3P	90
4P	110
5P	130
6P	150

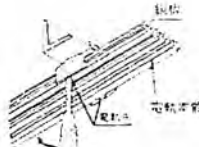
第二步 電軌夾部分 (Set, Hanger clamp)



- 末端固定架與第一支固定架 2-0.5M
- 電軌每 2 M 配一只電軌夾。

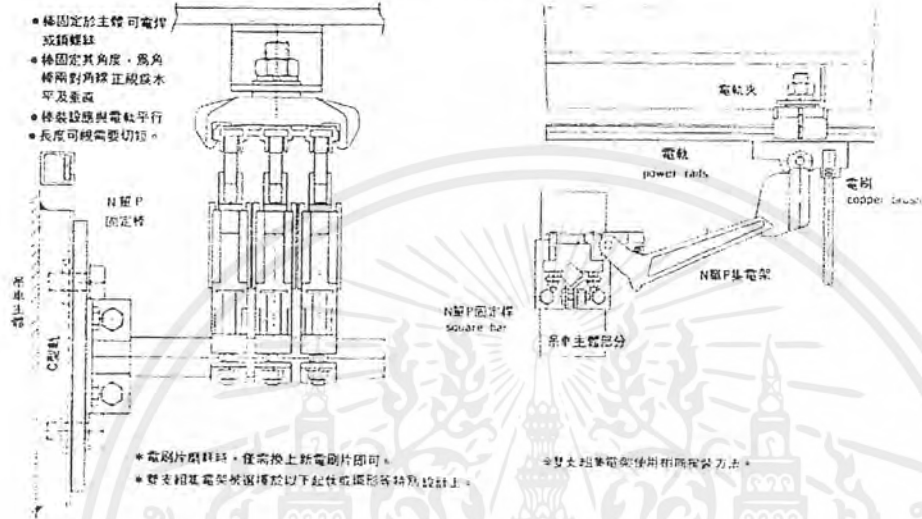


- 電軌小架一表對準電軌後，向上推開即可完成。
- 若電軌裝上如要掛下時，利用一字口起子，在電軌之兩側的槽處輕輕推起即可。

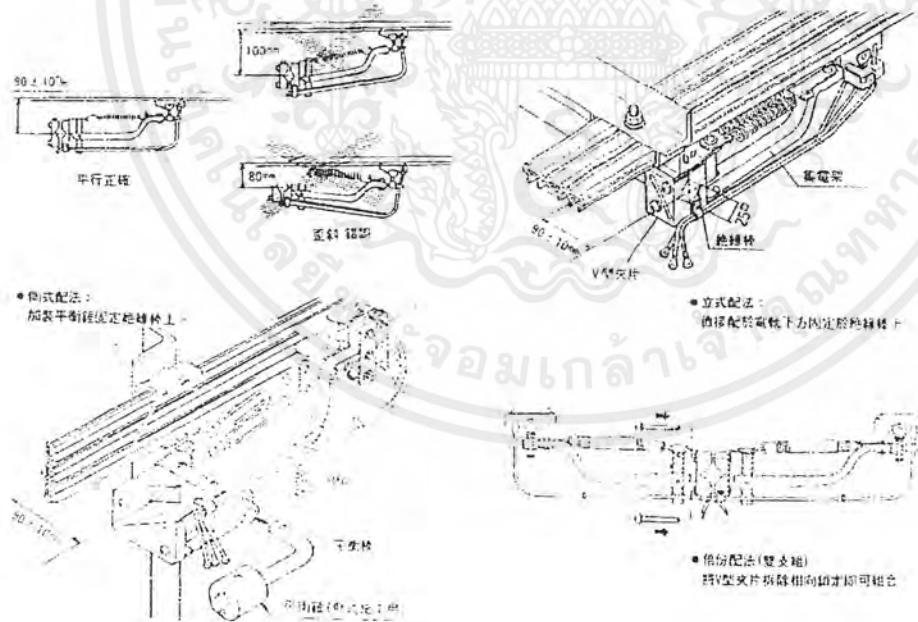


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

第五步 N單P固定桿與集電架安裝 (Fix square bar/current collector)

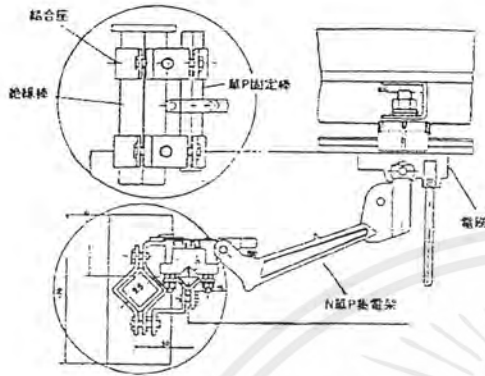


舊式集電架安裝法(Three or Four or Five in one Current Collector)



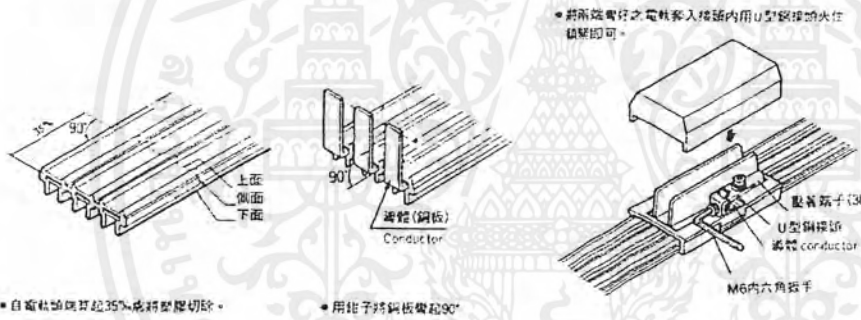
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

結合座(Fixing Parts for N&P Corrent Collector)



1. 本結合座專為原裝各型三合一集電器與N&P集電架用，可結合口25X25絕緣棒，與N&P棒。
2. N&P集電架若配上此結合座，則可與其他品牌電軌共用。(如Insul 8, Duct O. Bar, SAFE T. Bar,等)

3P電軌接頭(3P Connector & Middle power feed in)



• 將兩端電行之電軌塞入接頭內用U型鋼線插夾住鎖緊即可。

• 自電軌頭部剪起35%處將膠皮切除。

• 用錐子將銅板彎起90°

※ 新產品6P安全電軌零件圖Parts Diagram



KY-AN06009
六合一電軌
(Six in one)

KY-AN06100
6P電軌夾
(Hanger Clamp)

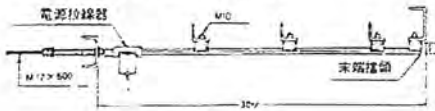
KY-AN06200
6P末端電源拉線器
(End Tension & Power in)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

工字型安全電軌施工圖(Working Diagram)

第一步 按裝設計 support Design

A. 30M以內施工用法

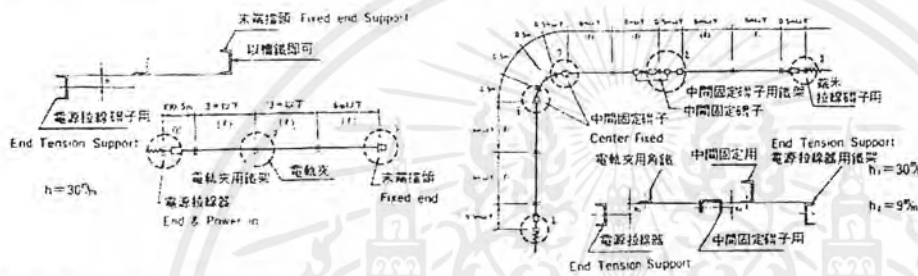


直線施工 (Line Case)

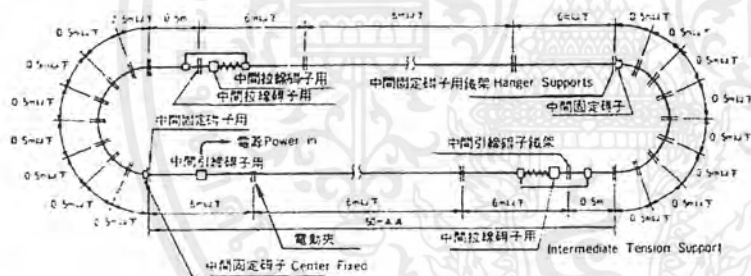
B. 30M以上施工用法



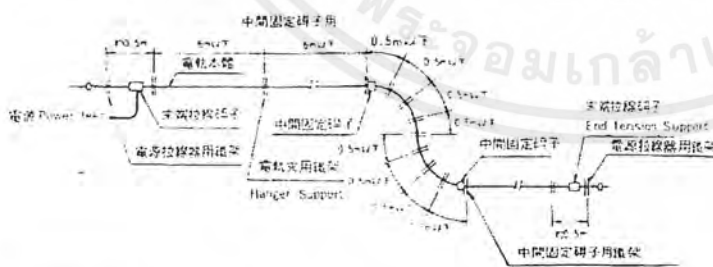
曲線施工 (Curve Case)



環型施工法 Around type



S型施工法 ('S' type)



高低起伏環狀施工法

1. 如環型施工方式，全線碼子距離設於0.5m以下
2. 拉上電軌方式，可使用機器放於馬車車架上，供臨時電源給大車馬達，利用馬車行走，逐步拉上電軌（如左頁圖片）

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
แสดงภาพบรรยากาศในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

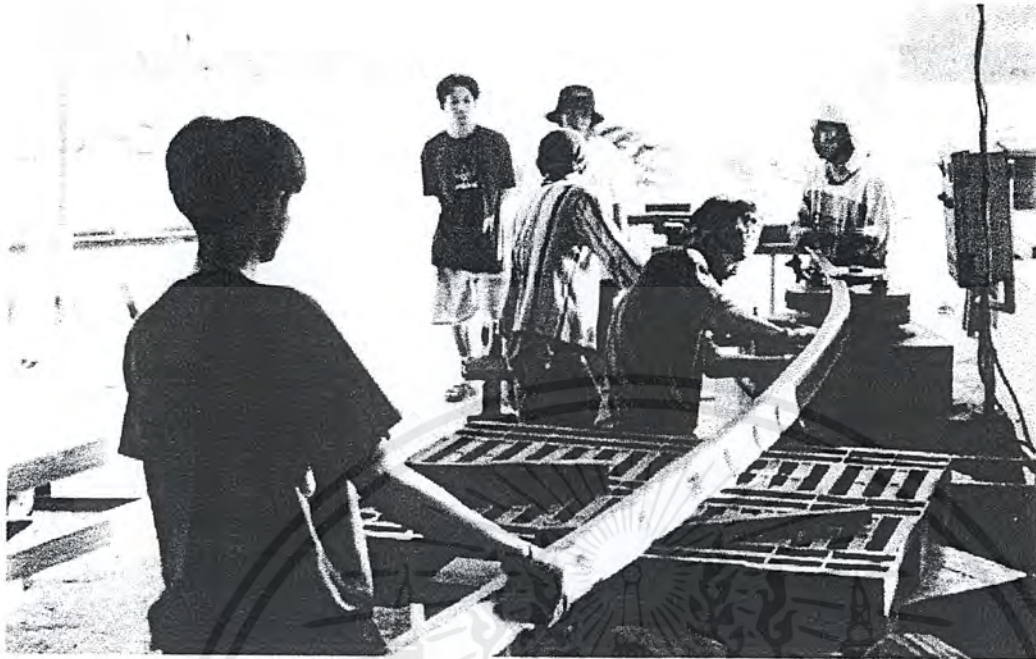


รูปที่ ง.1 แสดงการประกอบรถต้นแบบที่ทำจากไม้

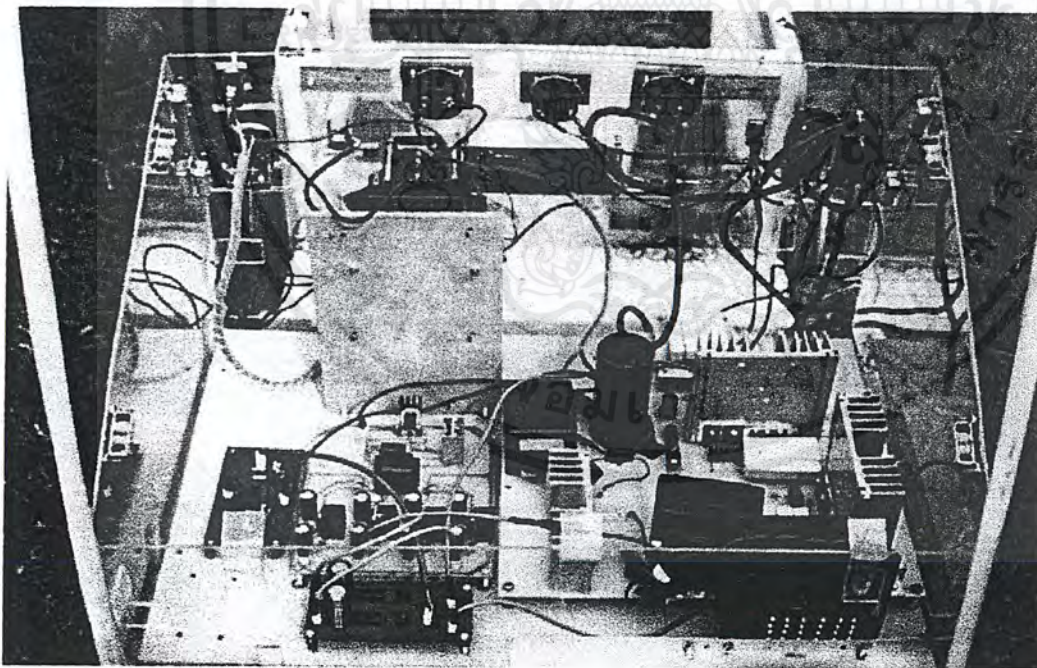


รูปที่ ง.2 แสดงการประกอบระบบขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

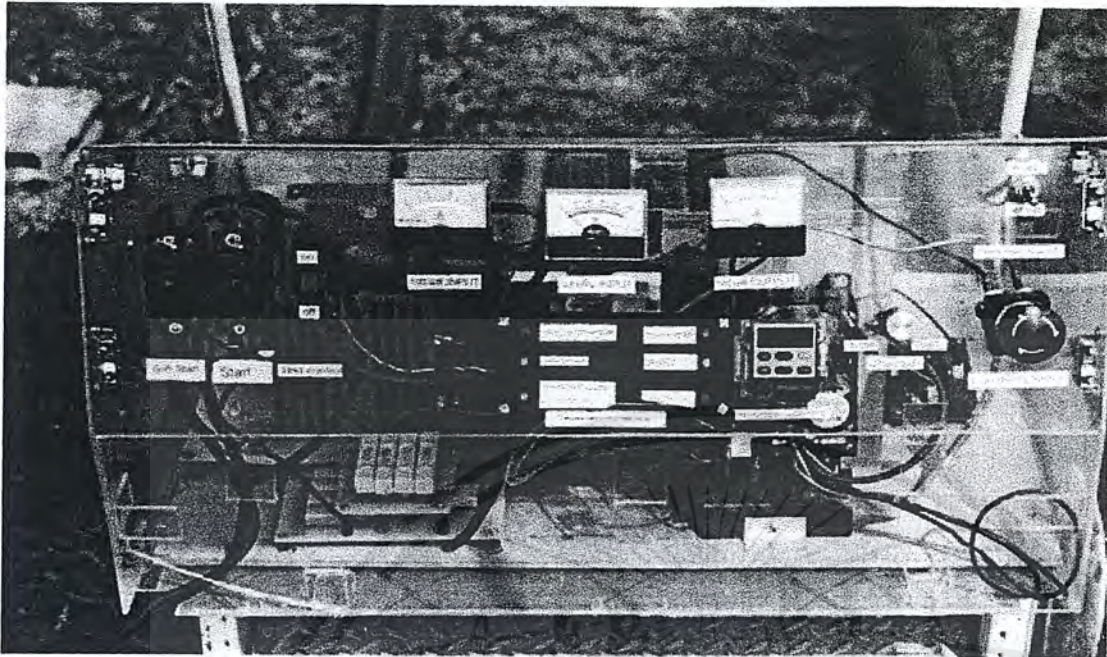


รูปที่ ๓.3 แสดงการคัดร่าง

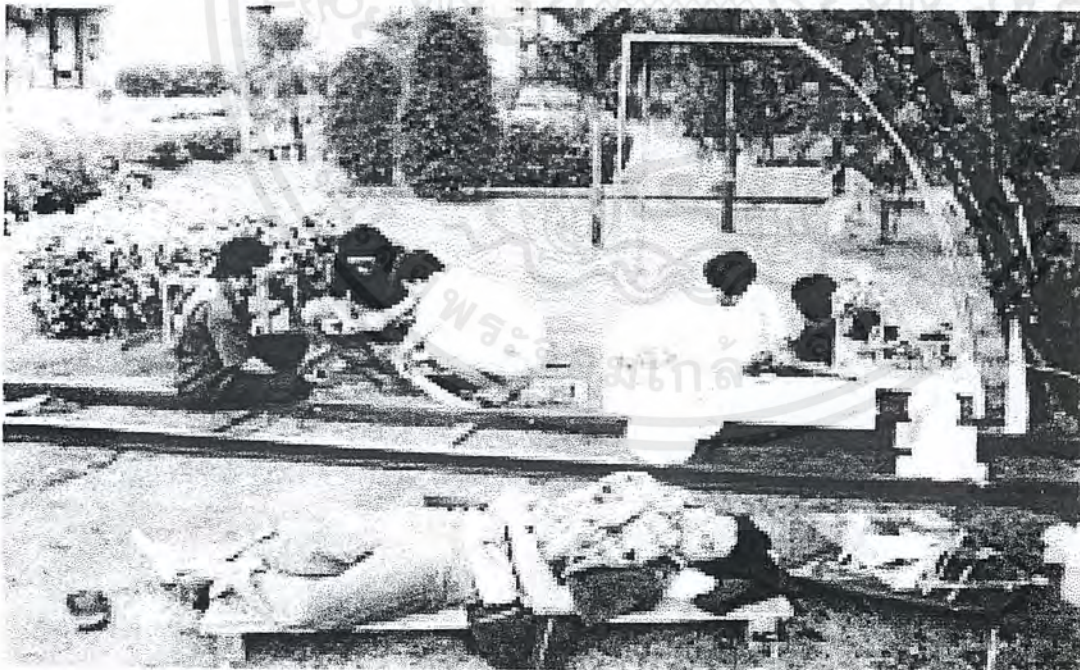


รูปที่ ๓.4 แสดงการติดตั้งวงจรบนตัวรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๖.5 แสดงแผงหน้าควบคุมบนตัวรถ

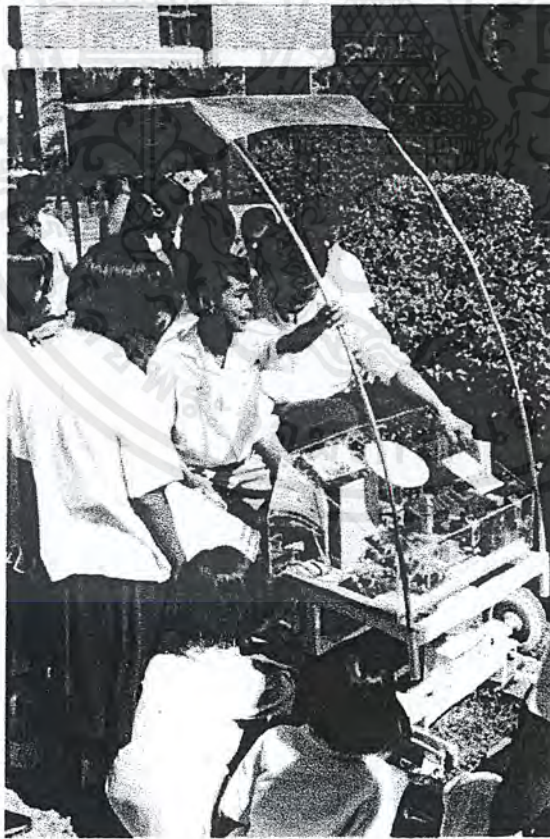


รูปที่ ๖.๗ แสดงการติดตั้งทั้งระบบ(เข้าวันงานตลาดกระบี่นิทรรศ 20๕.๖๔๔)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.8 แสดงภาพของรถไฟฟ้าทั้งระบบ(เข้าวันงานลาดกระบังนิทรรศ 20ธ.ค44)



รูปที่ ง.9 เด็กๆให้ความสนใจอย่างล้นหลาม(วันงานลาดกระบังนิทรรศ 20-24ธ.ค44)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.10 คณะผู้จัดทำโครงการทั้ง 3 กลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

- ประิณญาณิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำปรึกษาและข้อเสนอแนะจาก ผศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ในทุกๆด้าน แก่ คณะผู้จัดทำ ตลอดจนเป็นผู้ให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้และสร้างแรงกดดันอย่างมหาศาลในยามที่งานผิดพลาดและล่าช้า ท่านเป็นคั้งตัวค้ำก้ำลังในการขับเคลื่อนให้ประิณญาณิพนธ์ฉบับนี้สามารถมุ่งหน้าไปสู่ความสำเร็จได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

พร้อมกันนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ให้ความรู้และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อาจารย์ทุกท่านทั้งภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือและอนุญาติให้ใช้เครื่องมือต่างๆ
2. พี่ๆ ที่กองบำรุงรักษาไฟฟ้า เชื้อนสิริกิต์ กฟผ. ที่ถ่ายทอดความรู้และช่วยแนะนำการใช้อินเวอร์เตอร์ และ ช่วยต่อวงจรสำหรับทดสอบมอเตอร์
3. คุณมณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเครื่องกล ที่ให้คำแนะนำ และสอนการใช้เครื่องมือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกต่างๆแก่คณะผู้จัดทำ
4. พี่ๆ ประิณญาโท ที่ห้องโพรเจคตักแอล ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ และพร้อมที่จะช่วยแก้ปัญหาในหลายๆด้าน ตลอดจนความเป็นกันเองที่ให้กับน้องทุกคน
5. ร้านค้าดังต่อไปนี้
 - ร้านช.การช่างถนนเจ้าคุณทหาร
 - ร้านศรีวิศาล ถนนเจ้าคุณทหาร
 - ร้านกิ้งไส ถนนอ่อนนุช
 - ร้านนานาสติล
 - บริษัทภูวคล ไฟศาลเอ็นจีเนียริง จำกัด
 - ร้านพัฒนาพันธ์ จ. ปทุมธานีที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดจนให้ความอนุเคราะห์บริจาคอุปกรณ์และหยิบยืมเครื่องมือหลายชิ้นในโครงการนี้
6. ฟอ์คเรนเจอร์ บจ 581 ปทุมธานี สำหรับงานบรรทุกทุกชนิด และพาคณะผู้จัดทำไปทุกๆที่ ผู้ที่หมายอย่างสะดวกสบายและปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เพื่อนๆกลุ่มที่ 1 (MPPT) และกลุ่มที่ 2 (แบตเตอรี่ชาร์จเจอร์) สำหรับความสามัคคี และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนเกิดความร่วมมือกันของกลุ่มโปรเจกต์ทั้ง 3 กลุ่ม เป็นระบบรดไฟฟ้า เต็มรูปแบบ จนกลายเป็นชิ้นงานเด่นในงานวิศวกรรมศาสตร์ลาดกระบังนิทรรศน์ประยุกต์ 2543 ระหว่างวันที่ 20-24 ธันวาคม 2543
8. เพื่อนๆทุกคนสำหรับน้ำใจและเสียงหัวเราะ จนทำให้โครงการนี้ สำเร็จลงได้ ด้วยรอยยิ้ม และมิตรไมตรี
9. ชมรมพุทธศาสตร์และประเพณี , ชุมนุมไฟฟ้ากำลัง ที่ได้เอื้อเพื่อสถานที่ สำหรับเก็บของ และน้องๆชมรมทุกคนที่ให้ความร่วมมือในยามคับขัน
10. ขอขอบพระคุณ ครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แก่คณะผู้จัดทำ
11. ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ที่ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดู จนเติบโตใหญ่ทั้งร่างกาย และจิตใจ ท่านเป็นดั่งแรงใจให้คณะผู้จัดทำ สามารถฟันฝ่าอุปสรรคทุกอุปสรรคมาได้จนถึงทุกวันนี้และตลอดไป

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำ ขอขอบแต่ผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน และสิ่งแวดล้อมอันสวยงามในโลกใบนี้ หากมีข้อผิดพลาดใดๆ ในการทำโครงการชิ้นนี้ ทางคณะผู้จัดทำขออภัยไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins, "Power Electronics", John Wiley&Sons, 2 nd, 1995.
- [2] Alleva, C., Power Supplies- Make the Specs Work for You, Evaluation Engineering, Apr,1995.
- [3] Kilgenstein, O., Switch-Mode Power Supplies in Practice, John Wiley&Sons, 1989.
- [4] กฤษฎา วิสวธีรานนท์, "Inverter หลักการทำงานและเทคนิคการใช้งาน", ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 4 , 2540.
- [5] พิชิต ถ้ายอง, "Electrical Machine II", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] มงคล ทองสงคราม, "เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ", รามการพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2535.
- [7] สุวัฒน์ ดัน, "เทคนิคและการออกแบบสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย", อินเทลไทย, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2538.
- [8] ชวิน เป้าอารีย์, "เครื่องยนต์ Automotive Service Technology", 2529.
- [9] อัมพร ภักดีชาติ, เกษม ประพฤติธรรม, คำนึ่ง สาขากร, บุญทัน สมนึก, "เครื่องต่างรถยนต์", อมรินทร์พริตติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด(มหาชน), พิมพ์ครั้งที่8, พฤษภาคม, 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้