

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยใช้
ไมโครคอนโทรลเลอร์

A MICROCONTROLLERS-BASED ASYMMETRICAL PARAMETER
TWO-PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE



โดย

นาย นพดล กลิ่นหมักผล
นาย อรรถวุฒิ ทองสุกดี
นาย ศุภกิจ เสือสัมฤทธิ์
นาย อภิรักษ์ ขาวยะบุตร

2/11
ข 169/1
9749

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72733
วัน,เดือน,ปี 2.2 ค.ย. 2550.

b. 11772090
i.....

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยใช้ไมโคร
คอนโทรลเลอร์

A MICROCONTROLLERS-BASED ASYMMETRICAL PARAMETER TWO-
PHASE INDUCTION MOTOR DRIVE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร กิณทรศ

อ. ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

ผู้จัดทำ

นาย นพดล กลิ่นมัทผล
นาย อรรถวุฒิ ทองสุกดี
นาย ศุภกิจ เสือสัมฤทธิ์
นาย อภิรักษ์ ขาวยะบุตร

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์

นาย นพดล กลิ่นมัทผล

นาย อรรถวุฒิ ทองสุคติ

นาย ศุภกิจ เสือสัมฤทธิ์

นาย อภิรักษ์ ขาวยะบุตร

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญญาพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสขนาด 1/2 แรงม้าชนิดคาปาซิเตอร์วันที่ได้จากการดัดแปลงแยกขด 2 ขดของมอเตอร์หนึ่งเฟสชนิดคาปาซิเตอร์วันดั้งเดิม โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ (Sinusoidal Pulse Width Modulation :SPWM) ควบคุมการสวิทช์ของ MOSFET โดยสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบ V/F เพื่อควบคุม flux ให้คงที่ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สร้างสัญญาณมอดูเลตก็คือไมโครคอนโทรลเลอร์ DSPIC-30F4011 และยังทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด ทั้งวงจรป้องกันและส่วนของการแสดงผล และในส่วนของไฟเลี้ยงจะใช้เป็น Switching power supply ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด

TWO-PHASE UNSYMMETRICAL PARAMETER INDUCTION MOTOR DRIVE

Noppadon Kinmmakphon

Attawut Thongsukdee

Suppakit Suresamrit

Apirark Kouwyabood

Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnarase Advisor

Chaitat maneein Advisor

ABSTRACT

This project is focusing on characteristics of variable speed control of 2 phase induction motor, 1/2 HP which is adapted from 1-phase existing induction capacitor run. The one phase induction motor drive using Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) voltage source inverter. The switch control MOSFET that can control the speed motor by controlling V/F for constant flux. The equipment for generating PWM signal in a microcontroller DSPIC-30F4011 that control the whole system including protection circuit and display unit. A switching power supply provides all electronics equipment for electronics source.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	5
2.2.1 ทฤษฎีสถนามแม่เหล็กหมุนคู่	5
2.2.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	11
2.2.3 ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว	22
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานอินเวอร์เตอร์	27
2.3.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์.....	27
2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน	27
2.3.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	28
2.3.4 วิธีการในการควบคุมแรงดันและความถี่ของอินเวอร์เตอร์.....	29
2.3.5 การมอดคูลเลทตามความกว้างของพัลส์.....	29
2.3.6 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....	31
บทที่ 3 ส่วนประกอบของโครงการ	
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของโครงการ.....	35
3.2 ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	35
3.2.1 วงจรฮาล์ฟบริดจ์ไดโอดเรกติไฟส์	35
3.3 ส่วนของควบคุม.....	37
3.4 Flow chart.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

4.1 การทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ.....	41
4.2 การทดสอบหาค่า FRICTION AND WINDAGE LOSS.....	48
4.3 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Blocked-Roter Test).....	50
บทที่ 5 รูปและข้อเสนอนะ.....	53

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์.....	5
2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	6
2.3 การสั้น (หรือการกระเพื่อม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน.....	8
2.4 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	8
2.5 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว	9
2.6 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์.....	9
2.7 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว.....	10
2.8 คลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	11
2.9 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง.....	11
2.10 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวพิจารณาตามพิกัด $d-q$	13
2.11 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	16
2.12 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว.....	19
2.13 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก.....	23
2.14 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.....	24
2.15 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.....	24
2.16 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดเริ่มต้นหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ.....	25
2.17 มอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบบังขั้ว.....	26
2.18 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานทางอินเวอร์เตอร์.....	28
2.19 ลักษณะของเอาต์พุตเมื่อมีโหลดแบบอินดักทีฟ.....	28
2.20 กราฟ v_0 และ i_0 แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในหนึ่งไซเคิล.....	29
2.21 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจร อินเวอร์เตอร์.....	31
2.22 แสดงวงจรฮาล์ฟบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (Half bridge inverter).....	32

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.23 แสดงวงจรฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (full bridge inverter).....	33
2.24 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของ bipolar voltage switching.....	34
3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของอินเวอร์เตอร์.....	35
3.2 วงจรฮาล์ฟบริดจ์ไดโอดเรกติไฟส์.....	36
3.3 วงจรเรียงกระแสแบบทวิแรงดัน.....	37
3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ DSPIC-30F4011 ใช้ในโครงการ.....	38
3.5 แสดง Flow chart ของสัญญาณ PWM.....	39
3.6 แสดง Flow chart ของสัญญาณ PWM.....	40
4.1 การทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ.....	41
4.2 การทดสอบหาค่า FRICTION AND WINDAGE LOSS.....	48
4.3 การทดสอบยัดโรเตอร์ (Blocked-Rotor Test).....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางผลการทดสอบสภาวะไม่มีโหลด(No Load Test).....	42
4.2 การทดสอบหาค่า FRICTION AND WINDAGE LOSS.....	49
4.3 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Blocked-Roter Test).....	51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรม ทั้งอุตสาหกรรมขนาดเล็ก,ขนาดกลางและขนาดใหญ่รวมถึงการใช้งานตามบ้านเรือนและสำนักงานโดยปกติมอเตอร์เหล่านี้ถูกใช้งานที่ความเร็วคงที่ซึ่งหากต้องการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นมีด้วยกันหลายวิธีด้วยกันทั้งแบบเทคนิคทางกลและเทคนิคทางไฟฟ้าในทางกลก็เช่น ใช้เฟืองทดรอบ ,tap winding หรือ pole switching ซึ่งแต่ละวิธีเหล่านี้ไม่สามารถที่จะควบคุมความเร็วได้ต่อเนื่องเพราะว่าแรงต้นและความถี่ทางด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะโหลดต่างๆดังนั้นจึงมีวิธีการคิดวิธีการใช้อินเวอร์เตอร์แบบต่างๆขึ้นมาซึ่งจะมีหลายเทคนิคหลายวิธีด้วยกัน และเทคนิคทางไฟฟ้าที่นิยมใช้อินเวอร์เตอร์เนื่องจากสามารถควบคุมความถี่เอาต์พุตได้ทำให้การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบเป็นไปอย่างต่อเนื่องและมีช่วงที่กว้าง การสตาร์ทมอเตอร์และหยุดเป็นไปอย่างนุ่มนวล เนื่องจากสามารถควบคุมความถี่เอาต์พุตได้จากความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่สูงและจากความถี่สูงมายังความถี่ต่ำๆ จึงทำให้ไม่เกิดการกระชากของความเร็วและอินเวอร์เตอร์อาจติดตั้งอยู่ในห้องควบคุมที่เหมาะสมเพื่อสะดวกในการควบคุมการใช้งานในการวิจัยนี้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงต้นเนื่องจากสามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์โดยการควบคุมอัตราส่วนแรงต้นต่อความถี่ให้คงที่และมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าหนึ่งเฟสโดยส่วนใหญ่มีขนาดแรงม้าที่ไม่มากนักซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงต้นที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสนั้นประกอบไปด้วยวงจรไดโอดเรกติไฟล์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงต้นไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงต้นไฟฟ้ากระแสตรง และตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ซึ่งทำหน้าที่กรองแรงต้นไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 งานวิจัยนี้เพื่อเป็นการออกแบบและวิเคราะห์เพื่อสร้างอุปกรณ์ชุดขับเคลื่อน มอเตอร์สองเฟสพารามิเตอร์ไม่สมมาตร ซึ่งนำไปขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสที่ได้มาจากการแยกขดหลัก และขดช่วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หนึ่งเฟสที่มีอยู่ทั่วไป

1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส $\frac{1}{2}$ แรงม้า ชนิดคาปาซิเตอร์รันเมื่อแหล่งจ่ายเป็นสัญญาณไซน์ตัดสามเหลี่ยมโดยใช้เทคนิค SPWM

1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่มีการควบคุมค่า V/F ที่ความถี่ต่างๆมีค่าคงที่โดยอินเวอร์เตอร์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในวิธีการวิจัย

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้เทคนิค SPWM ซึ่งในโครงการนี้จะใช้การควบคุมให้ค่า V/F ให้คงที่เพื่อทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์สร้างวงจรสวิตช์โหมตคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า , 220 V. , 2.66 A., 1500 rpm , 4 ขั้ว

โดยที่ในภาคเรียนที่หนึ่งได้ทำการศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมที่ใช้ในวงจรควบคุมการสวิตช์ของวงจรสวิตช์โหมตคอนเวอร์เตอร์และวงจรควบคุมที่ใช้ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส โดยใช้ สัญญาณสามเหลี่ยมตัดสัญญาณไซน์ โดยใช้ EPROM เป็นตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ และประกอบด้วย วงจรกำลัง , วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา , วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ , วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม , วงจรขยายสัญญาณไซน์และปรับสัญญาณดีซี , วงจรเปรียบเทียบ (Comparator) , วงจรเดดไทม์ (Dead Time) และวงจรขั้วเกิด และในภาคเรียนที่สอง ได้ทำการเปลี่ยนตัวกำเนิดสัญญาณไซน์จาก EPROM เป็น ไมโครคอนโทรล DSPIC-30F4011 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ PWM ให้กับอินเวอร์เตอร์ เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ สองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตร

โดยแบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัย ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ชนิดและคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบต่างๆและทฤษฎีพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์วงจรกำลังใช้งาน อินเวอร์เตอร์แบบต่างๆที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรที่ใช้ในการศึกษาโครงการงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะต่างๆ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1.3.1 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูลจากบทความ วารสาร และตำรา ที่สามารถศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคที่ใช้สร้างวงจรและวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส

1.3.2 จำลองการออกแบบและวิเคราะห์หลักการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3.3 ศึกษาและทดลองวงจรที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์

1.3.4 สร้างวงจรในแต่ละส่วนและนำมาทดลองและขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.3.5 ออกแบบแก้ไขและปรับปรุงวงจรและนำมาทดลองเพื่อให้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย

1.3.6 เก็บผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมาเปรียบเทียบกัน

1.3.7 สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง

1.3.8 เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถสร้างชุดอินเวอร์เตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้

1.5.2 สามารถปรับความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์

1.5.3 รู้จักคุณสมบัติหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยสามารถนำเทคนิคที่ใช้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อให้ได้แรงบิดที่ดีขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

2.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสโดยส่วนมากมีพิกัดแรงม้าน้อย โดยทั่วไปจึงมักใช้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส เมื่อต้องการแรงม้าสูงๆเนื่องจากหาได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ในที่อาศัยส่วนใหญ่ยังคงมีความต้องการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสมากกว่าอยู่ดี

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสพอจะสรุปได้คือ

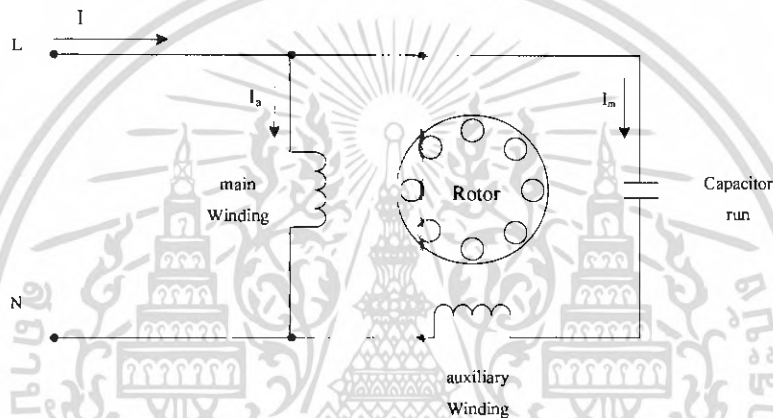
- ที่กำลังเอาต์พุตเท่ากันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสจะมีขนาดใหญ่กว่ามาก

- การเริ่มหมุนจะต้องมีวิธีการใดวิธีการหนึ่ง เพื่อให้มีแรงบิดเริ่มหมุนดีขึ้น

- การออกแบบยุ่งยากมาก และเสียค่าใช้จ่ายแพงกว่าที่ขนาดเท่าๆกัน

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสนั้น สามารถเริ่มหมุนได้โดยไม่ต้องมีตัวช่วยให้เริ่มหมุน เพราะในตัวมันมีสนามแม่เหล็กหมุน แต่สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสในหนึ่งขั้วแม่เหล็กจะมีขดลวดเพียงหนึ่งขดเท่านั้น เมื่อมีขดลวดเพียงขดเดียวสนามแม่เหล็กแทนที่จะหมุนเช่นเดียวกับมอเตอร์สองเฟสหรือมอเตอร์สามเฟส แต่จะกลับขั้วจากขั้วเหนือ (N) เป็นขั้วใต้ (S) และกลับจากขั้วใต้ (S) เป็นขั้วเหนือ (N) กลับไปกลับมาเท่านั้น จะทำให้โรเตอร์สั่นและไม่สามารถทำให้โรเตอร์หมุนได้เพื่อที่จะให้โรเตอร์หมุนจึงต้องทำให้สนามแม่เหล็กหมุนก่อน มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสการหมุนต้องมีวิธีการช่วยให้เริ่มหมุน การทำให้มอเตอร์เฟสเดียวเริ่มต้นหมุนได้มีหลายวิธี หลักการขึ้นต้นโดยการพันขดลวดเพิ่มเข้าไปที่สเตเตอร์อีกหนึ่งขด เรียกขดลวดขุดนี้ว่าขดลวดช่วยหมุน (auxiliary winding) และจะเรียกขดลวดอีกขดหนึ่งว่าขดลวดหลัก(main winding)ขดลวดหลักหรือขดลวดเมนนี้จะทำให้โรเตอร์หมุนอยู่ตลอดเวลา หรือเรียกว่าขดรัน (run winding) ส่วนขดลวดช่วยหมุนจะช่วยให้โรเตอร์เริ่มหมุนแล้วก็ปลดออก เรียกขดลวดขุดนี้ว่าขดสตาร์ท (start winding) โดยทั่วไปแล้วจะออกแบบให้ขดสตาร์ทมีค่าความต้านทานสูง ๆ ค่าอินดักแตนซ์ต่ำ และให้ขดรันมีค่าความต้านทานต่ำ อินดักแตนซ์สูงจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขดลวดทั้งสองที่มุมต่างเฟสกันเกือบ 90 องศาทางไฟฟ้า จึงทำให้สนามแม่เหล็กหมุน และมอเตอร์จึงสามารถหมุนได้โดยอาศัยหลักการของมอเตอร์สองเฟสนั่นเอง

มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor run motor) มีคาปาซิเตอร์ต่อใช้สำหรับสตาร์ทและเดินเครื่องใช้งาน โดยไม่มีสวิตช์แรงเหวี่ยงต่ออยู่ในวงจร ดังนั้นมอเตอร์ชนิดนี้จึงมีคาปาซิเตอร์เป็นแบบ oil filled ที่มีค่าต่ำ จะเห็นว่าคาปาซิเตอร์และขดช่วยจะต่ออยู่ในวงจรตลอดเวลาทั้งในขณะสตาร์ทและเดินเครื่องใช้งานดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจากโครงสร้างและลักษณะวงจรแบบนี้สามารถลดต้นทุนให้ต่ำลงได้เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีสวิตช์แรงเหวี่ยงที่สำคัญโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ ทำให้สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังลดการสั่นและทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้นเนื่องจากมอเตอร์ทำงาน(หมุน)เป็นแบบมอเตอร์สองเฟสซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนได้เรียบขึ้น



รูปที่ 2.1 วงจรคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์

2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Single Phase Induction Motor :SPIM)

สำหรับโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จากโครงสร้างดังกล่าวนี้มีผลทำให้ไม่เกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปได้นั้นจึงต้องมีวิธีการช่วยให้มอเตอร์เริ่มต้นหมุนและสำหรับการพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่เพื่ออ้างอิงในการวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์

2.2.1 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (Double revolving field theory)

หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว สามารถวิเคราะห์โดยอาศัย ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ ตามรายละเอียดที่กล่าวต่อไปนี้

การพิจารณาโรเตอร์ขณะอยู่นิ่งและขดลวดสเตเตอร์ถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป จะเห็นพฤติกรรมการสั่น หรือการกระเพื่อมของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Pulsating magnetomotive force) และการสั่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Pulsating flux) ที่เกิดขึ้น

ตามแนวแกนขดลวดสเตเตอร์โดยกระแสที่ไหลในวงจรโรเตอร์ เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็ก ที่สเตเตอร์ (ตามกฎของเลนซ์) โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองนั้นมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังนั้นมุมระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ นั้นหมายความว่ามอเตอร์ไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้เนื่องจากการไม่มีการเกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน (Starting torque)

พฤติกรรมของโรเตอร์ขณะหมุน

ถ้าสมมติให้โรเตอร์ทำการหมุน การหมุนของโรเตอร์เกิดขึ้นได้ดังนั้นจำเป็นต้องมีวงจรช่วยเริ่มต้นหมุน ดังนั้นการเกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขของการเริ่มต้นหมุนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

การสั้นของสนามแม่เหล็ก (แรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็ก)

เมื่อพิจารณาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบหลักซึ่งจะมีขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางตรงข้ามและหมุนที่ความเร็วเดียวกัน คือความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กดังกล่าวพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ หรือใช้กราฟมาทำการวิเคราะห์

จากรูปที่ 2.3 ถ้ากำหนดให้ OP เป็นเวกเตอร์ที่เกิดจากผลของการเคลื่อนที่สองส่วน ซึ่งมีขนาดเท่ากันโดยที่ f คือ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามีทิศทางตอนเข็มนาฬิกา และ b คือ การเคลื่อนที่ถอยหลังมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้น การหมุนของเวกเตอร์ทั้งสองเกิดขึ้นที่ความเร็วเดียวกันในทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อกำหนดให้ OR คือ เวกเตอร์ที่เป็นผลรวมของเวกเตอร์สองส่วนที่มีขนาด $+20P$ และ $-20P$ โดยที่เวกเตอร์ทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน และเป็นเวกเตอร์ที่แปรตามเวลาในฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นถ้าการหมุนของเวกเตอร์ทั้งสองดังกล่าวนั้นหมุนด้วยความเร็วคงที่เดียวกัน ซึ่งการสั้นของสนามแม่เหล็ก (เขียนแทนด้วยเวกเตอร์ OR) ที่จะเกิดจากกระแสไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์นั้น ส่งผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทาง ดังนั้นการสั้นของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตเตอร์ (Plasating stator flux) ϕ_s

ตามแนวแกนของขดลวดสเตเตอร์เป็นผลจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนสองทางคือ ϕ_f และ ϕ_b ดังรูปที่ 2.3

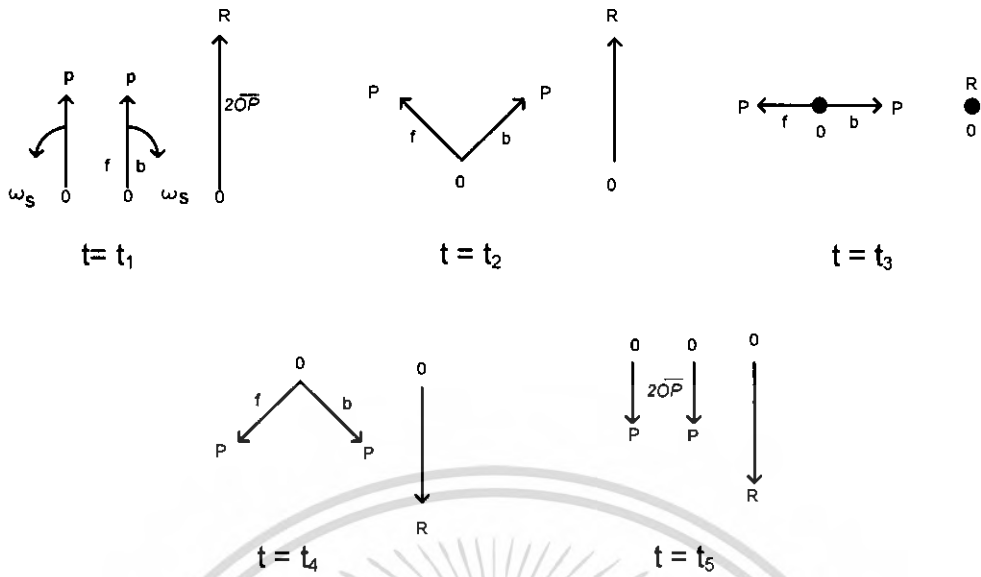
สำหรับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ที่วางแบบกระจาย ในรูปสัญญาณไซน์นั้น เป็นการวิเคราะห์จากสมการแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive Force : mmf) ในตำแหน่งของมุม θ ดังรูปที่ 2.4 และกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$F(\theta) = Ni \cos \theta \quad (2.1)$$

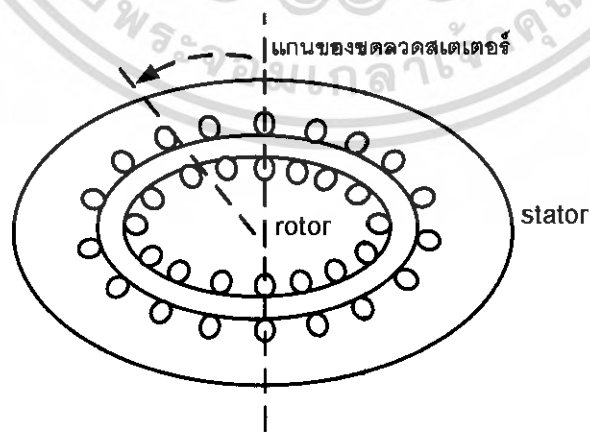
เมื่อ N คือจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ และกำหนดให้ $i = I_{\max} \cos \omega t$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= NI_{\max} \cos \theta \cos \omega t \\ &= \frac{NI_{\max}}{2} \cos(\omega t - \theta) + \frac{NI_{\max}}{2} \cos(\omega t + \theta) \\ &= F_f + F_b \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ F_f คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนตามทิศทางของมุม θ และ F_b แทนแรงเคลื่อนแม่เหล็กตามทิศทางตรงข้ามกับ F_f สำหรับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนทั้งสองนั้น มีผลที่ทำให้เกิดแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ที่มีทิศทางตรงกันข้าม และองค์ประกอบของแรงบิดทั้งสองส่วนลดลงได้ดังรูปที่ 2.5 สำหรับในขณะมอเตอร์อยู่นิ่งนั้น แรงบิดไปข้างหน้าและแรงบิดถอยหลังมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น ทำให้ผลของแรงบิดขณะเริ่มต้นหมุนมีค่าเท่ากับศูนย์แต่ในขณะที่ยังมอเตอร์หมุนที่ค่าความเร็วต่าง ๆ กัน แรงบิดทั้งสองส่วนไม่เท่ากันส่งผลทำให้มอเตอร์หมุนไปได้ตามทิศทางของการหมุน



รูปที่ 2.3 การสลับ (หรือการกระเพื่อม) ของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุน



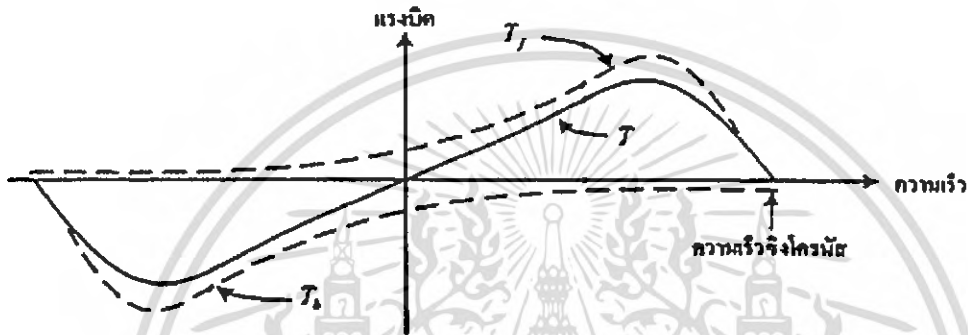
รูปที่ 2.4 ภาพตัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลิป (Sip)

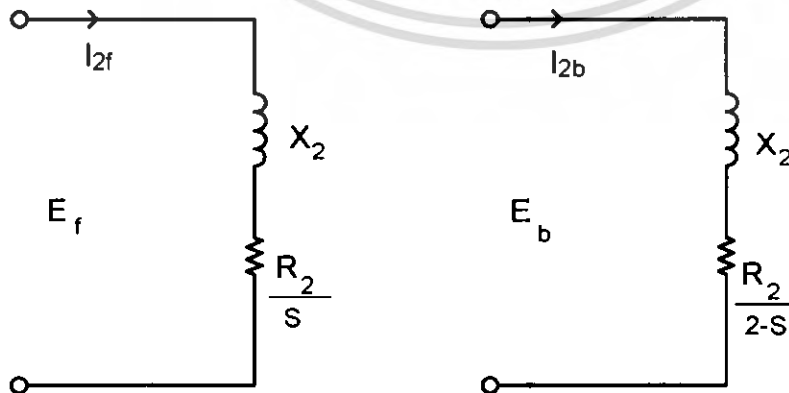
ถ้าสมมติว่าโรเตอร์หมุนตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าด้วยความเร็ว n_r รอบต่อนาทีและความเร็วซิงโครนัส คือ n รอบต่อนาที ดังนั้นค่าสลิปของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ากำหนดตามสมการ (2.3)

$$S_r = \frac{n - n_r}{n} = s \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.5 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง การหมุนของโรเตอร์ในทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า เรียกว่าสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังและค่าสลิปกำหนดได้ดังนี้คือ

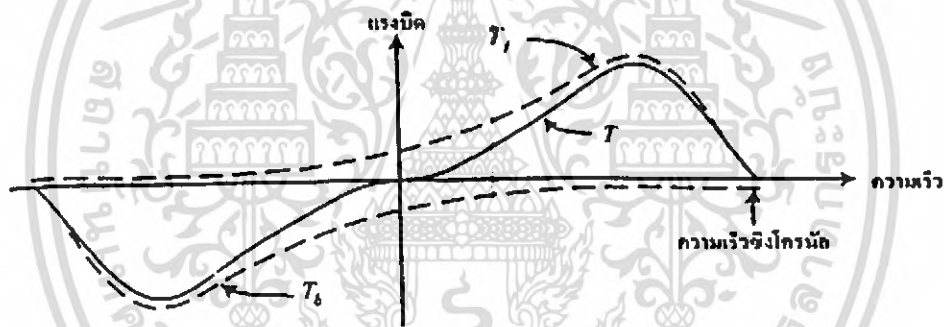
$$S_b = \frac{n - (-n_r)}{n} = 2 - s \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรวอร์เตอร์เส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า และเส้นแรงแม่เหล็ก หมุนถอยหลังดังรูปที่ 2.6 นั้น ขณะโรเตอร์อยู่นิ่งอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจากเส้นแรงแม่เหล็ก หมุนทั้งสองมีค่าเท่ากัน ส่งผลทำให้กระแสเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กหมุนทั้งสองเท่ากัน คือ $I_{2f} = I_{2b}$ และทำให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นมีขนาดเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ สเตเตอร์ (ทิศทางตรงกันข้าม) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_f และ ϕ_b ที่เกิดขึ้นในช่องอากาศจึง มีขนาดเท่ากันด้วย โดยพฤติกรรมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้น ยังมีผลทำให้เส้นแรง แม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลงอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ความเร็วของมอเตอร์และเส้น แรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าเพิ่มขึ้นในขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กหมุนถอยหลังลดลง อย่างไรก็ตาม ขณะที่โรเตอร์หมุนอิมพีแดนซ์ของวงจรวอร์เตอร์ (ในรูปที่ 2.6) นั้นไม่เท่ากัน ซึ่งกระแสโร เดอร์ $I_{2b} > I_{2f}$ (ทำให้ค่าประกอบกำลังต่ำ) และขณะโรเตอร์เคลื่อนที่แรงบิดไปข้างหน้าจึงมีค่า เพิ่มขึ้น โดยที่ในทางตรงข้ามกันแรงบิดถอยหลังมีค่าลดลงทำให้คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว ในรูปที่ 2.5 เปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีค่าแรงบิดชั่วขณะ

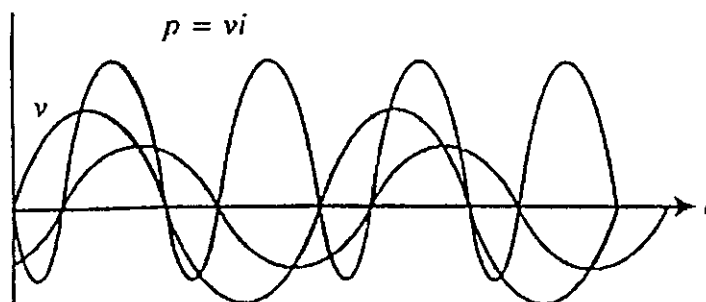


รูปที่ 2.7 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว ค่าจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

การสั่นของแรงบิด (Toure Pulsation)

การสั่นของแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียววนั้นเกิดขึ้นที่ค่าความถี่ของ กำลังชั่วขณะมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ที่แหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากเหตุผลข้างต้นจึง กล่าวได้ว่าการสั่นของแรงบิดเกิดขึ้นขณะที่ความถี่ของสเตเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าด้วยเช่นกัน และการสั่นของแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลจากการกระทำร่วมกันของ ϕ และ m_{mf} ที่หมุนตัด ผ่านในทิศทางตรงกันข้ามขณะความเร็วเชิงโรครนัสเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เช่น การกระทำร่วมกัน ของ ϕ_s กับ F_b และ ϕ_b กับ F_f ของโรเตอร์ นั้นส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าสำหรับผลจากการ สั่นของแรง ยังทำให้เกิดเสียงดัง เรียกว่า humming effect และการสั่นของแรงบิดสามารถ ทำให้ลดน้อยลงได้โดยใช้แผ่นยางรองหรือวัสดุที่เป็นยางรอบฐานของมอเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



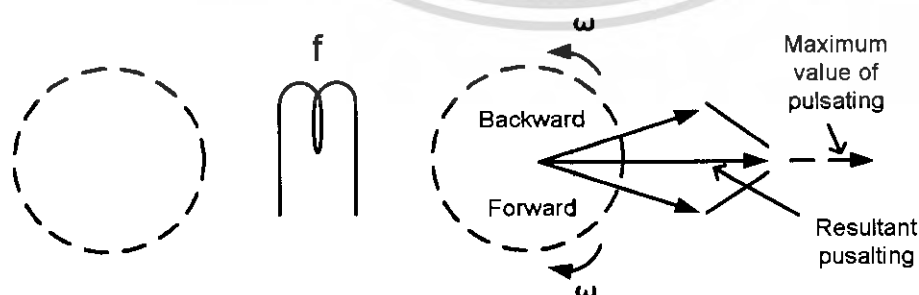
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำเฟสเดียว

2.2.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (Equivalent Circuit of Single Phase Induction Motor)

ในส่วนนี้เป็นการพิจารณาคูณลักษณะต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยอาศัยการวิเคราะห์จากวงจรสมมูลย์ภายใต้เงื่อนไขของการทำงานในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทาง

การกระตุ้นขดลวดสเตเตอร์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียว ทำให้เกิดการกระเพื่อมของสนามแม่เหล็กดังกล่าวมาข้างต้น ซึ่งการพิจารณาสถาณแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นนั้น ด้วยการแบ่งสนามแม่เหล็กหมุนออกเป็นสองส่วนที่มีทิศทางตรงข้ามกัน โดยที่แต่ละส่วนมีค่า mmf สูงสุดที่ สเตเตอร์เท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งหมดที่ความเร็วเชิงมุม คือ ω และองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนทั้งสองที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง

เมื่อพิจารณาขดลวดสเตเตอร์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนสองทางเห็นได้ว่า สนามแม่เหล็กหมุนแต่ละส่วนทำให้เกิดแรงดันสมมูลยขึ้นในขดลวดโรเตอร์ และผลลัพธ์ของ กระแสโรเตอร์คือ ผลรวมของกระแสที่ไหลในบริเวณผิวรอบขดลวดโรเตอร์ (closed rotor winding) ที่กำหนดโดยแรงดันแต่ละส่วนถ้าแบ่งวงจรมูลยของโรเตอร์ออกเป็นสองส่วนซึ่งตั้ง จากกันและกำหนดให้กระแสที่ไหลในโรเตอร์เนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอย หลังคือ I_f และ I_b ตามลำดับ ดังนั้นกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่ เห็นยวนำทำให้เกิดกระแสสมมูลย คือ

$$I_f \text{ (ไหลในคอล์ย } d) \text{ และ } -jI_f \text{ (ไหลในคอล์ย } q)$$

สำหรับกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังที่เห็นยวนำให้เกิดกระแส สมมูลย คือ

$$I_b \text{ (ไหลในคอล์ย } d) \text{ และ } -jI_b \text{ (ไหลในคอล์ย } q)$$

ดังนั้น ผลลัพธ์ของกระแสที่ไหลในคอล์ย d และ q คือ

$$I_d = I_f + I_b \quad (2.5)$$

$$I_q = j(I_f - I_b)$$

ดังนั้น

$$I_f = \frac{1}{2}(I_d + jI_q)$$

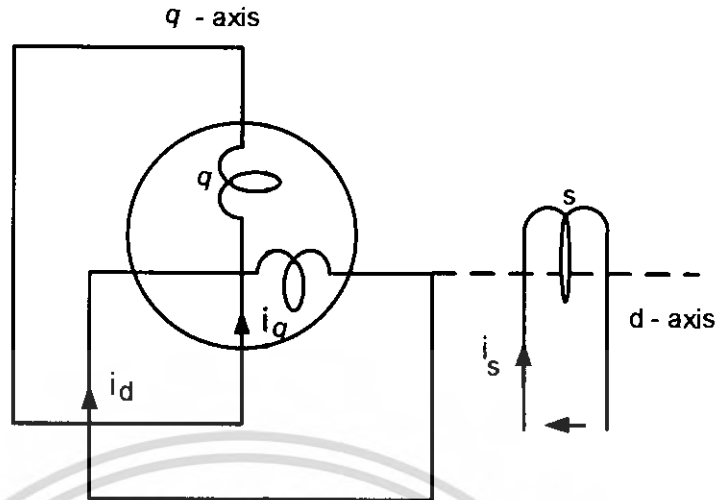
$$I_b = \frac{1}{2}(I_d - jI_q) \quad (2.6)$$

สมการในรูปเฟสเซอร์และวงจรมูลย

เมื่อพิจารณาวงจรมูลยของมอเตอร์เห็นยวนำเฟสเดียว เขียนในรูปของพิกัด d - q แสดงดังรูปที่ 2.10 นั้น สามารถนำเขียนเป็นสมการแรงดันได้ดังนี้ คือ

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + L_s p)M_p 0 \\ M_p(R_d + L_d p)\omega_r L_d \\ \omega_r M \omega_r L_d (R_d + L_d p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ค่าพารามิเตอร์ d - q เป็นค่าที่ถือว่าสม่ำเสมอในช่องอากาศ (uniform air-gap)



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวที่พิจารณาตามพิกัด d-q

สำหรับการทำงานภายใต้สภาวะคงตัว สมการในรูปเฟสเซอร์หาได้โดยแทน $j\omega$ สำหรับค่าที่อนุพันธ์ตั้งสมการข้างต้น

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + j\omega L_s) & & \\ j\omega M(R_d + j\omega L_d) - \omega_r L_d & & \\ \omega_r M \omega_r L_d (R_d + j\omega L_d) & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

แทนค่า I_d และ I_q จากสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.8) ดังนั้นจัดรูปสมการใหม่ได้ ดังนี้คือ

$$V_s = (R_s + j\omega L_s) + j\omega M (I_f + I_b) \quad (2.9)$$

$$0 = j\omega M I_s + (R_d + j\omega L_d) (I_f + I_b) - j\omega_r L_d (I_f - I_b) \quad (2.10)$$

$$0 = \omega_r M I_s + \omega_r L_d (I_f + I_b) + j (R_d + j\omega L_d) (I_f - I_b) \quad (2.11)$$

จัดรูปสมการ (2.10) และ (2.11) ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ω กับ ω_r ดังนี้ คือ

$$\omega_r = (1 - S) \omega \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = j\omega M I_s + R_d (I_r + I_b) + j\omega L_d [s I_r + (2-s) I_b] \quad (2.13)$$

$$0 = j\omega M(1-s) I_s - R_d (I_r - I_d) - j\omega L_d [s I_r - (2-s) I_b] \quad (2.14)$$

นำสมการ (2.12) บวกกับ (2.13) และหารด้วย (2-s) ดังนั้นเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$0 = j\omega M I_s + \left[\frac{R_d}{(2-s)} + j\omega L_d \right] 2I_b \quad (2.15)$$

ดังนั้นนำสมการ (2.9), (2.14) และ (2.15) มาเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$V_s = [R_s + j\omega (L_s - M)] I_s + \frac{j\omega M}{2} (I_s + 2I_r) + \frac{j\omega M}{2} (I_s + 2I_b)$$

$$0 = \frac{j\omega M}{2} (I_s + 2I_r) + \left[\frac{R_d}{2s} + \frac{j\omega (L_d - M)}{2} \right] 2I_r \quad (2.16)$$

$$0 = \frac{j\omega M}{2} (I_s + 2I_b) + \left[\frac{R_d}{2(2-s)} + \frac{j\omega (L_d - M)}{2} \right] 2I_b$$

วงจรสมมูลย์ของเครื่องจักรกลที่แสดงดังรูปที่ 2.11 นั้น ค่าพารามิเตอร์ที่สเตเตอร์และโรเตอร์เขียนแทนด้วยเลข 1 และ 2 โดยที่กำหนดให้อัตราส่วนจำนวนรอบของสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เขียนแทนด้วย N ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถกำหนดได้ดังนี้ คือ

ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ คือ R_1

รีแอกแตนซ์การทำให้แม่เหล็กที่ผ่านโหนดไปทางด้านสเตเตอร์ คือ $X_{m1} = \omega N M$

รีแอกแตนซ์รั่วของขดลวดสเตเตอร์ คือ $X_1 = (\omega L_s - X_{m1})$

รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์ คือ $X_2 = \omega N^2 L_d - X_{m1}$

ความต้านทานของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์ คือ $R_2 = N^2 R_d$

แรงดันที่จ่ายให้สเตเตอร์ คือ $V_1 = V_2$

กระแสที่จ่ายให้สเตเตอร์ คือ $I_1 = I_s$

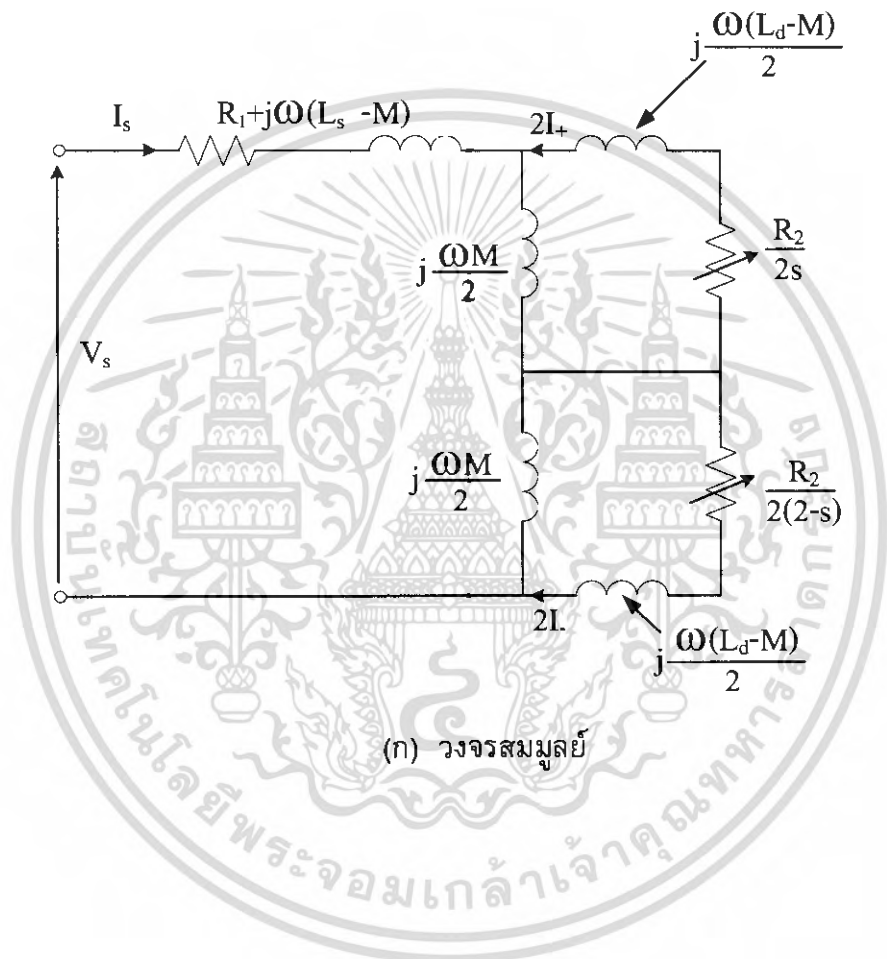
แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดสเตเตอร์ คือ E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

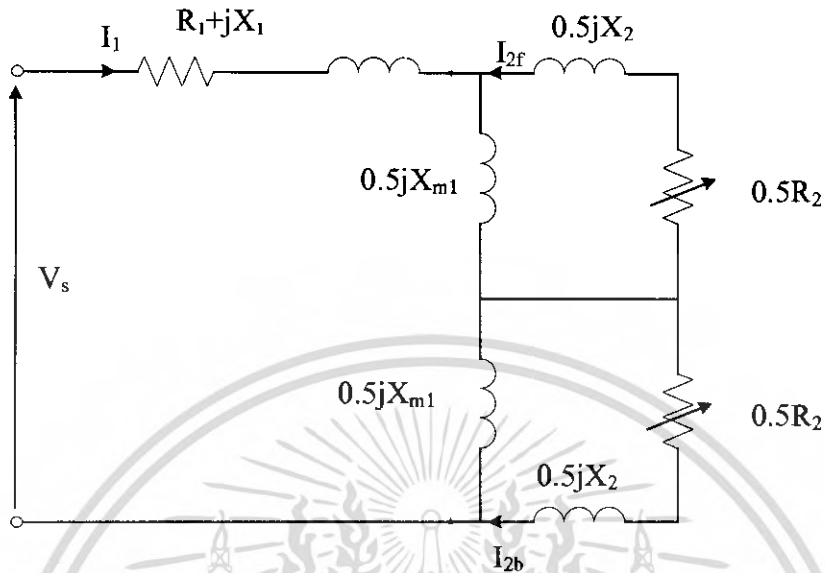
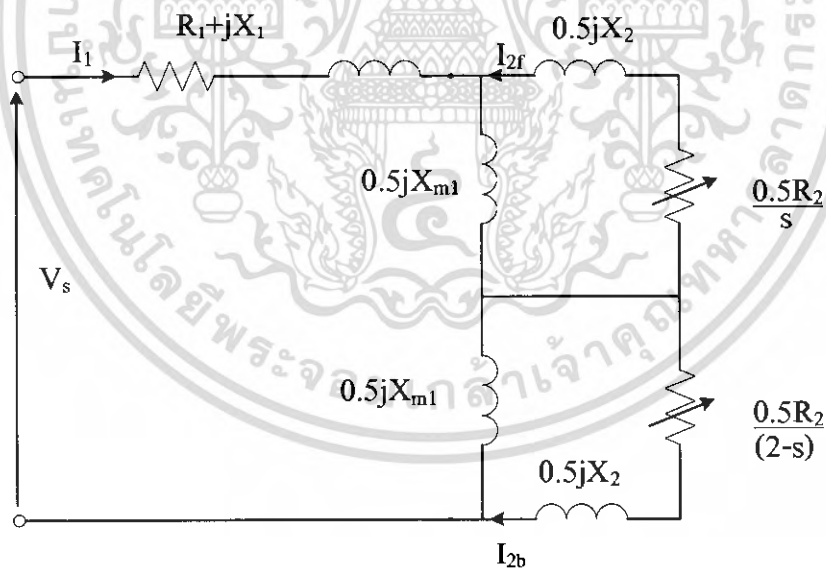
ในส่วนของวงจรสมมูลย์ที่แสดงดังรูปที่ 2.11 (ข) และ (ค) เป็นวงจรสมมูลย์ที่ได้จากการถ่ายโอนค่าตามข้อกำหนดข้างต้น ส่วนรูปที่ 2.11 (ง) เป็นวงจรสมมูลย์ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายและสำหรับกระแสโรเตอร์ที่ถ่ายโอนไปทางด้านสเตเตอร์กำหนดใหม่ได้ดังนี้ คือ

องค์ประกอบของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า $I_{2f} = -2I_1/N$

องค์ประกอบของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง $I_{2b} = -2I_1/N$



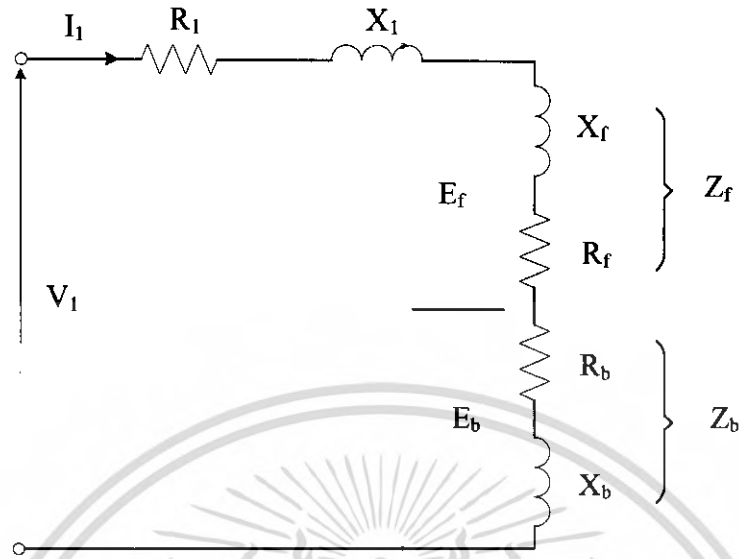
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) วงจรสมมูลยู่ขณะมอเตอร์อยู่นิ่ง ($S=1$)

(ค) วงจรสมมูลยู่ขณะโรเตอร์หมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



(ง) วงจรสมมูลยของมอเตอร์หมุนที่เขียนในรูปอย่างง่าย

รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลยของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

คุณลักษณะของแรงบิด-สลิป

แรงบิดทางไฟฟ้า (electromagnetic torque) ที่มอเตอร์สร้างขึ้นนั้นสามารถเขียนในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$T = \text{Re} \{ (\text{pole - pairs}) [i_s] [G] [i] \} \tag{2.17}$$

แทนค่า $[i_s]$, $[G]$ และ $[i]$ จากสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.17) ดังนั้นสมการแรงบิดเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$T = \text{Re} \left\{ (\text{pole - pairs}) \begin{bmatrix} I_s^* & I_d^* & I_q^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_d \\ M & L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \text{Re} \left[(\text{pole - pairs}) (-L_d I_d^* I_q + M I_q^* I_s + L_d I_q^* I_d) \right] \tag{2.18}$$

เมื่อ $L_d (-\dot{i}_d|_q + \dot{i}_d|_d)$ คือ เทอมจินตภาพสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นสมการแรงบิด หรือ

$$T = \text{Re} [(pole-pairs)MI_s \dot{i}_q] \quad (2.19)$$

แทนค่า \dot{i}_q จากสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.19) ดังนั้น

$$T = \text{Re} [(pole-pairs)(jMI_s)(\dot{i}_f - \dot{i}_b)] \quad (2.20)$$

นำค่า \dot{i}_b และ \dot{i}_f จากสมการ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ ดังนั้นเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$0 = j\omega MI_s \dot{i}_b^* + \left[\frac{R_d}{(2-s)} + j\omega L_d \right] 2\dot{i}_b \dot{i}_b^* \quad (2.21)$$

$$0 = j\omega MI_s \dot{i}_f^* + \left[\frac{R_d}{2} + j\omega L_d \right] 2\dot{i}_b \dot{i}_f^* \quad (2.22)$$

ดังนั้นสมการของเทอมส่วนจริง คือ

$$\text{Re} (-jMI_s \dot{i}_f) = \text{Re} \left[\frac{R_d}{s\omega} 2\dot{i}_f^2 + jL_d 2\dot{i}_f \dot{i}_f^* \right] = \frac{2R_d}{s\omega} \dot{i}_f^2 \quad (2.23)$$

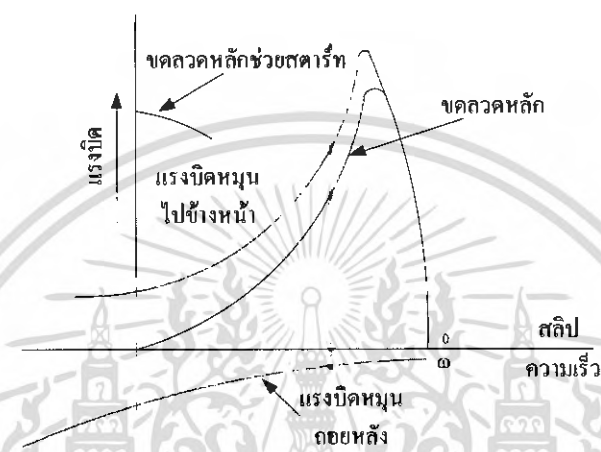
$$\text{Re} (+jMI_s \dot{i}_b) = \text{Re} \left[\frac{R_d}{(2-s)\omega} 2\dot{i}_b^2 + jL_d 2\dot{i}_b \dot{i}_b^* \right] = \frac{-2R_d}{(2-s)\omega} \dot{i}_b^2 \quad (2.24)$$

และแทนค่าสมการ (2.23) และ (2.24) ลงในสมการ (2.20) ดังนั้นสมการแรงบิด คือ

$$T = (pole - pairs) 2 \left[\frac{R_d}{s\omega} \dot{i}_f^2 - \frac{R_d}{(2-s)\omega} \dot{i}_b^2 \right] \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.25) เห็นได้ว่าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นนั้นเกิดจากองค์ประกอบสองส่วนด้วยกัน คือ องค์ประกอบของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง ที่สัมพันธ์กับค่า สลิป s และ $(2-s)$ ตามลำดับ และจากสมการดังกล่าวนี้ ถ้าพิจารณาผลลัพธ์ของคุณลักษณะแรงบิด-สลิป ที่เกิดจากผลรวมเนื่องจากองค์ประกอบทั้งสองส่วนและไม่คิดผลของแรงบิดขณะมอเตอร์เริ่มหมุนนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 คุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว

จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ วงจรสมมูลสามารถแยกได้เป็นสองส่วนดังรูปที่ 2.11 (ง) โดยส่วนที่แยกออกมานั้นแทนด้วยผลของสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง นั่นคือ

$$E_f = 4.44 fN\phi_f \quad (2.26)$$

$$E_f = 4.44 fN\phi_b \quad (2.27)$$

สำหรับขณะโรเตอร์อยู่นิ่งนั้น $\phi_f = \phi_b$ และ $E_f = E_b$ ดังนั้นผลรวมของแรงดันคือ V_1 เมื่อ ϕ คือ เส้นแรงในช่องอากาศ

เมื่อพิจารณาจากการหมุนของมอเตอร์แต่ละช่วงความเร็วในทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าที่สลิปเริ่มต้นเท่ากับ s การเหนี่ยวนำเนื่องจากกระแสในโรเตอร์โดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ามีความถี่เท่ากับ sf และกำหนดให้ f คือความถี่สี่เสเดเตอร์ ดังนั้นผลของ F_f ที่เสเดเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิด ϕ_f ในช่องอากาศ ซึ่งเหนี่ยวนำทำให้เกิด

แรงดัน E_f สำหรับอิมพีแดนซ์ ของวงจรวอเตอร์ที่ปรากฏอยู่ในส่วนจรัสเตเตอร์มีค่า $0.5 R_2/s + j 0.5 X_2$ ดังรูปที่ 2.11 (ค)

การพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังซึ่งทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในโรเตอร์ที่ความถี่สลิปเท่ากับ $(2-s) f$ ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวนั้นสอดคล้องกับในตอนแรก โดยที่แรงเคลื่อนแม่เหล็กหมุนของโรเตอร์ในช่องอากาศที่ความเร็วเชิงโครนัส และมีทิศทางตรงข้ามกับ F_f ผลของ F_b ที่สเตเตอร์ และโรเตอร์ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศถอยหลังซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ E_b และสำหรับในส่วนของวงจรวอเตอร์อิมพีแดนซ์มีค่าถอยหลังซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ E_b และสำหรับในส่วนของวงจรวอเตอร์อิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับ $0.5 R_2/(2/(2-s) + j 0.5 X_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ค) สำหรับที่สลิปค่าต่ำ ๆ รูปคลื่นของกระแสโรเตอร์มีองค์ประกอบของความถี่สูง $[(2-s) f \cong 2f]$ ซึ่งกำหนดให้โดยสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง สำหรับองค์ประกอบของความถี่ต่ำกำหนดได้โดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้า (s_f)

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขณะมอเดอร์หมุนจากวงจรมูลย์กำหนดให้ $Z_f > Z_b$, $E_f > E_b$ ดังนั้น ϕ_f ในช่องอากาศมีค่ามากกว่า ϕ_b และวงจรมูลย์ดังกล่าวมานั้นสามารถกำหนดสมรรถนะของมอเดอร์ได้โดยการคำนวณหาค่ากระแสเตเตอร์ กำลังอินพุท แรงบิดที่สร้างขึ้นและประสิทธิภาพ เป็นต้น โดยใช้วงจรมูลย์ในรูปที่ 2.11 (ค) และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงใช้วงจรมูลย์ดังรูปที่ 2.11 (ง) กำหนดค่าต่าง ๆ แทนโดยค่าพารามิเตอร์แต่ละส่วนกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{j0.5X_{ml} (j0.5X_2' + 0.5R_2'/s)}{0.5R_2'/s + j0.5(X_{ml} + X_2')} \quad (2.29)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{j0.5X_{ml} (j0.5X_2' + 0.5R_2'/(2-s))}{0.5R_2'/(2-s) + j0.5(X_{ml} + X_2')} \quad (2.30)$$

และกำลังในช่องอากาศที่กำหนดโดยสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลัง คือ

$$P_{gf} = I_f^2 R_f \quad (2.31)$$

$$P_{gb} = I_b^2 R_b \quad (2.32)$$

สำหรับแรงบิดกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega} \quad (2.33)$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega} \quad (2.34)$$

และผลรวมของแรงบิด คือ

$$T = T_f - T_b = \frac{I_1^2}{\omega} (R_f - R_b) \quad (2.35)$$

สำหรับกำลังทางกลที่เกิดขึ้นกำหนดได้ดังนี้คือ

$$P_{mech} = T\omega_r = T\omega(1-s) \quad (2.36)$$

$$= I_1^2 (R_f - R_b)(1-s) \quad (2.37)$$

$$= (P_{gf} - P_{gb})(1-s) \quad (2.38)$$

และกำลังด้านเอาต์พุต คือ

$$P_{out} = P_{mech} - P_{rot} \quad (2.39)$$

โดยที่ P_{rot} ประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงลมบวกกับการสูญเสียที่แกนรวมเป็นการสูญเสียเนื่องจากการหมุน สนามแม่เหล็กหมุนในช่องอากาศทั้งสองทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำในวงจรรอเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากทองแดงใน โรเตอร์ (I^2R) คือ ผลรวมเชิงตัวเลขของการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กแต่ละส่วนโดยที่การสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังกำหนดได้ดังนี้

$$P_{2f} = sP_{gf} \quad (2.40)$$

$$P_{2b} = (2-s)P_b \quad (2.41)$$

และผลรวมของการสูญเสียเนื่องจากทองแดงในโรเตอร์ คือ

$$P_2 = sP_{gf} + (2-s)P_{gb} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลรวมของกำลังในช่องอากาศ เนื่องจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กหมุน
ในช่องอากาศทั้งสองสามารถกำหนดได้ดังนี้ คือ

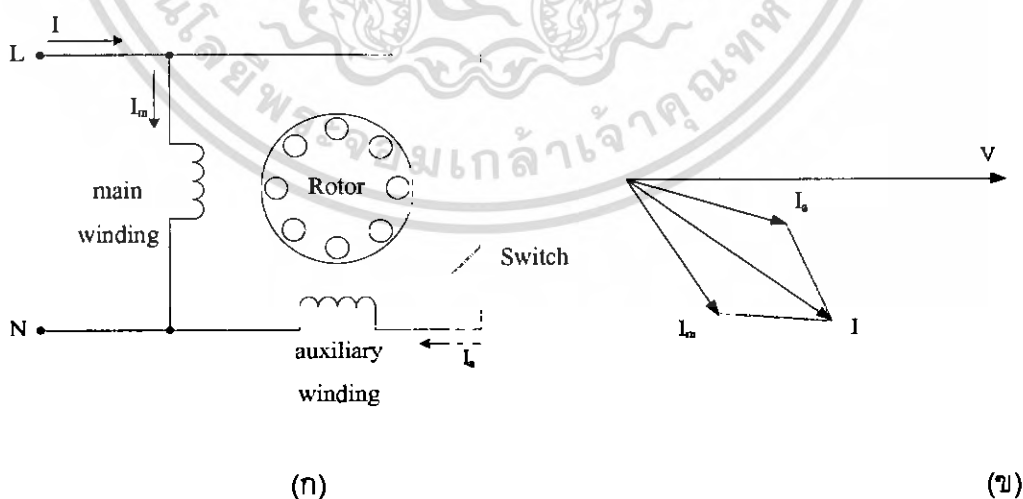
$$P_g = P_{gf} + P_{gb} \quad (2.43)$$

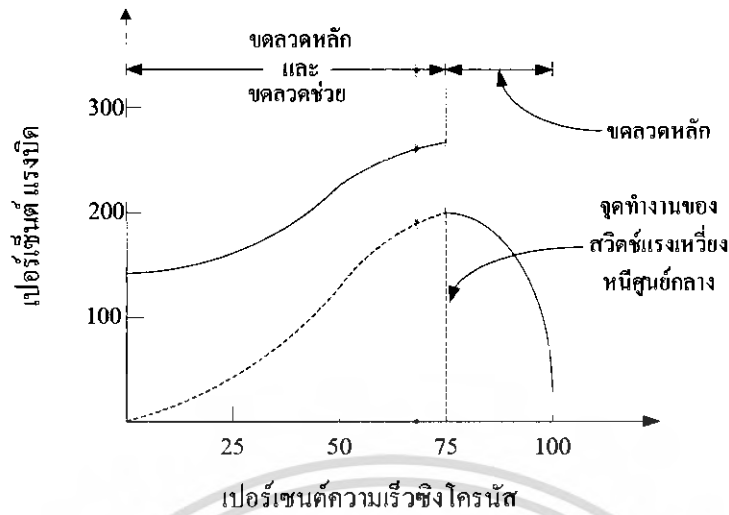
2.2.3 ชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งเรียกชื่อแตกต่างกันไป ในแต่ละชนิดสามารถอธิบายได้จากหลักการที่ทำให้เกิดการต่างเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดหลัก และขดลวดช่วย แต่ในบางครั้งเราเรียกชื่อรวมกันว่า มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้ คือ

2.2.3.1 มอเตอร์แบบแยกเฟส (Split-Phase Motor)

โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดแยกเฟส แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ก) ขดลวดช่วยมีอัตราส่วนค่าความต้านทานต่อรีแอคแตนซ์สูงกว่าขดลวดหลัก โดยที่กระแสซึ่งไหลผ่านขดลวดทั้งสองมีเฟสต่างกันดังรูปที่ 2.13 (ข) การทำให้อัตราส่วนของค่าความต้านทานต่อรีแอคแตนซ์ของขดลวดช่วยมีค่าสูงนั้นเพื่อใช้ในระหว่างการเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์เท่านั้น หลังจากนั้นเมื่อมอเตอร์หมุนไปแล้วจนกระทั่งมีความเร็วที่ 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วซิงโครนัส ขดลวดช่วยถูกตัดออกด้วย สวิตช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal Switch) สำหรับคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13 (ค) มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนต่ำจนถึงปานกลาง





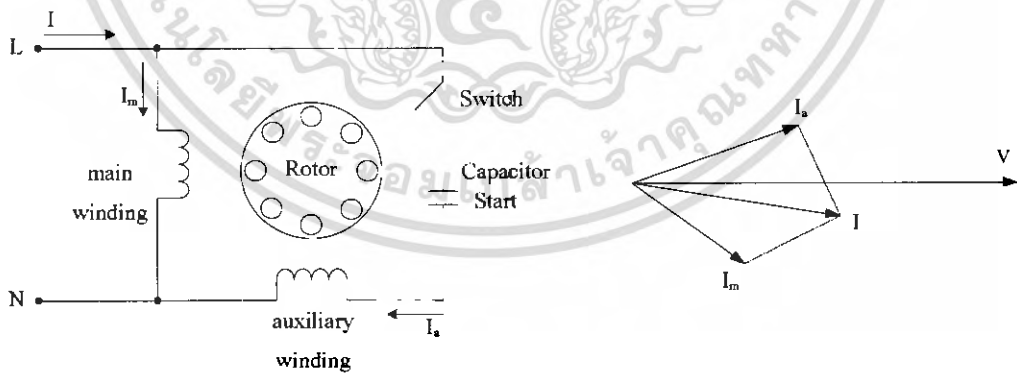
(ค)

รูปที่ 2.13 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดขดลวดแยก

2.2.3.2 มอเตอร์ชนิดเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor-Start

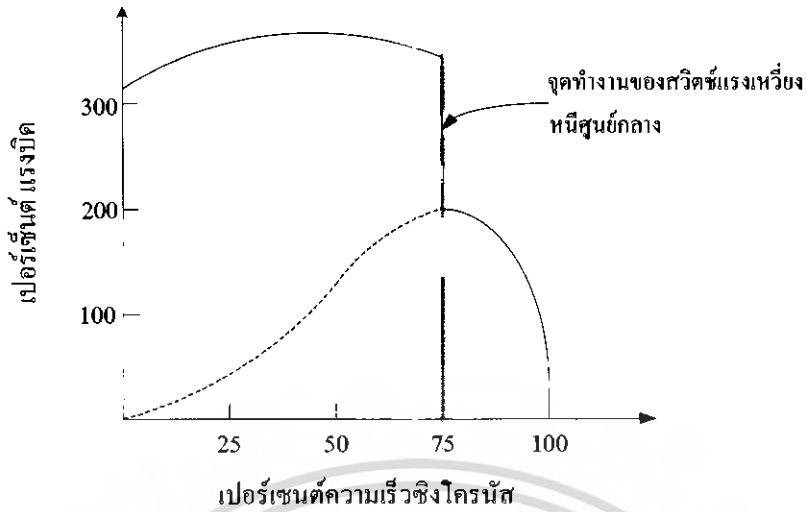
Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนสูงมาก เนื่องจากได้ต่อตัวเก็บประจุนุกรมเข้ากับขดลวดช่วย ดังรูปที่ 2.14 (ก) นั่นคือเป็นการเพิ่มมุมเฟสระหว่างกระแสที่ไหลในขดลวดทั้งสองดังรูปที่ 2.14 (ข) สำหรับคุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว 75 เปอร์เซ็นต์ ของความเร็วซิงโครนัส สวิทช์แรงเหวี่ยงจะตัดขดลวดช่วยออก



(ก)

(ข)

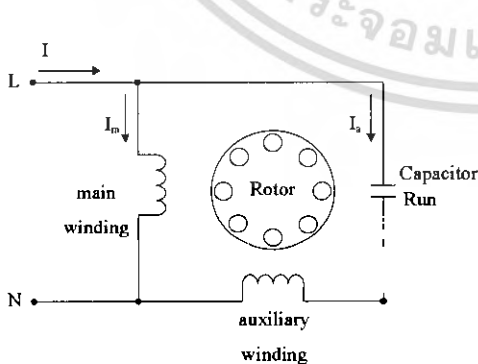


(ค)

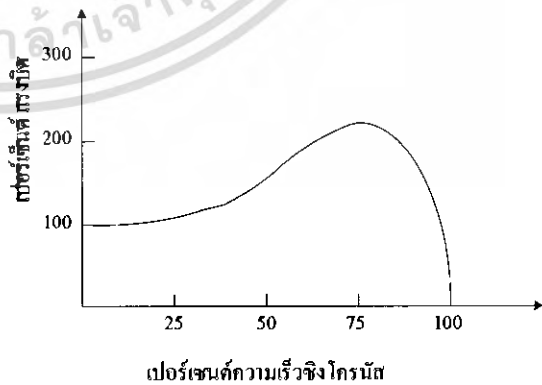
รูปที่ 2.14 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.3.3 มอเตอร์ชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor-Run Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.15 (ก) โดยที่ตัวเก็บประจุถูกต่ออนุกรมกับขดลวดช่วย และไม่ถูกตัดออกหลังจากที่มอเตอร์หมุนไปแล้ว ซึ่งโครงสร้างและลักษณะวงจรแบบนี้สามารถลดต้นทุนให้ต่ำลงได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีสวิทช์แรงเหวี่ยงที่สำคัญ โครงสร้างลักษณะเช่นนี้ ทำให้สามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลัง การสั่น และประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้นเนื่องจากมอเตอร์ทำงาน (หมุน) เป็นแบบมอเตอร์สองเฟส ซึ่งทำให้มอเตอร์หมุนได้เรียบขึ้นสำหรับคุณลักษณะของ แรงบิด-ความเร็ว แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 (ข)



(ก)



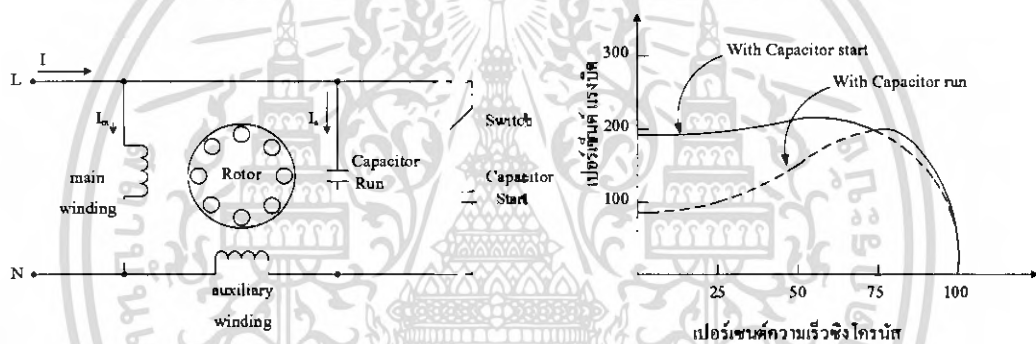
(ข)

รูปที่ 2.15 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวชนิดหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.4 มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor-Start Capacitor-Run Motor)

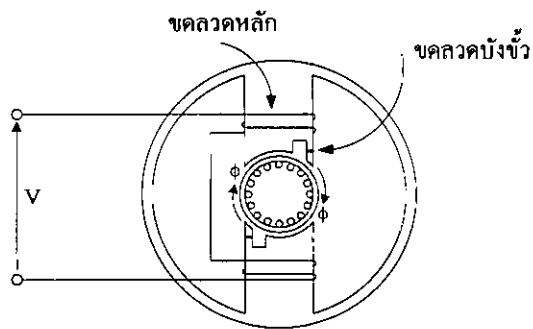
โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีตัวเก็บประจุสองตัวประกอบอยู่ในวงจร โดยที่ตัวแรกจะใช้เพื่อการเริ่มต้นหมุนส่วนอีกตัวหนึ่งในขณะมอเตอร์หมุน ดังรูปที่ 2.16 (ก) ตามทฤษฎีนั้น จุดที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นหมุน และสมรรถนะของมอเตอร์ขณะหมุนสามารถกำหนดได้โดยตัวเก็บประจุทั้งสองตัวเก็บประจุเริ่มต้นหมุน C_s มีขนาดใหญ่และเป็นชนิด ac electrolytic ส่วนตัวเก็บประจุขณะมอเตอร์หมุน C_r ถูกต่ออนุกรมอย่างถาวรกับขดลวดเริ่มต้นหมุนซึ่งมีขนาดเล็กเป็นชนิด paper oil สำหรับคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วแสดงในรูปที่ 2.16 (ข) มอเตอร์ชนิดดังกล่าวนี้มีราคาแพง เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามก็ถือได้ว่าเป็นมอเตอร์ที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดชนิดหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว



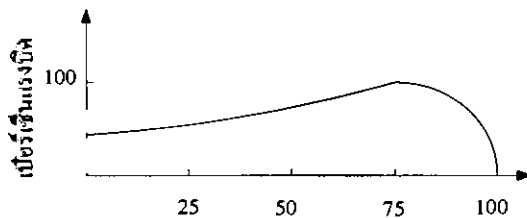
รูปที่ 2.16 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ชนิดเริ่มต้นหมุนและหมุนด้วยตัวเก็บประจุ

2.2.3.5 มอเตอร์แบบบังขั้ว (Shaded-pole Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้โครงสร้างของขั้วแม่เหล็ก (Pole) ที่สเตเตอร์แบบบังขั้วดังรูปที่ 2.17 (ก) โดยที่ขั้วยื่นดังกล่าวนั้นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน และมีส่วนหนึ่งที่ถูกปิดล้อมด้วยวงแหวนทองแดงเรียกว่า Shading coil สำหรับขดลวดหลักพันอยู่บนขั้วยื่นของมอเตอร์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำบน Shading coil เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนขั้วบัง (Shaded) ล้าหลังส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อม ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กในส่วนขั้วบังมีค่าสูงสุด หลังจากเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อมมีค่าถึงจุดสูงสุดก่อน สำหรับวงจรสมมูลย์เมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กในส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อมจะต่างเฟสกับส่วนขั้วบังซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนที่จากส่วนที่ไม่ได้ถูกปิดล้อมไปยังขั้วบังยังผลให้เกิดแรงบิดเริ่มต้นหมุน และคุณลักษณะ แรงบิด-ความเร็ว แสดงไว้ดังรูปที่ 2.17 (ข) มอเตอร์แบบบังขั้วส่วนใหญ่ถูกสร้างขึ้นในช่วงประมาณ $1/20$ แรงม้า



(ก) วงจรมอเตอร์แบบบังขั้ว



(ข) คุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบ

รูปที่ 2.17 มอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบบังขั้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์หรือการเปลี่ยนแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับ (dc to ac converter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตไฟตรงเป็นไฟสลับ ที่สามารถปรับความถี่และขนาดได้ตามความต้องการ

2.3.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์

แบ่งได้ตามลักษณะของจำนวนเฟสของเอาต์พุตได้ 2 ประเภท คือ

1. อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว (Single Phase Inverter) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่เอาต์พุตเป็นไฟกระแสสลับเฟสเดียว

2. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (Three Phase Inverter) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่เอาต์พุตเป็นไฟกระแสสลับ 3 เฟส

แบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 2 ประเภท คือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่อินพุตที่จ่ายให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง (DC Voltage Source)

2. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนกระแส (Current Source Inverter: CSI) เป็นอินเวอร์เตอร์ ที่อินพุตที่จ่ายให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟตรง (DC Current Source) ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการกำลังสูงๆ

2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI)

อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดันยังสามารถแบ่งได้อีก 3 ชนิดตามลักษณะของสัญญาณที่ใช้ป้อน อุปกรณ์สวิตช์ ดังนี้

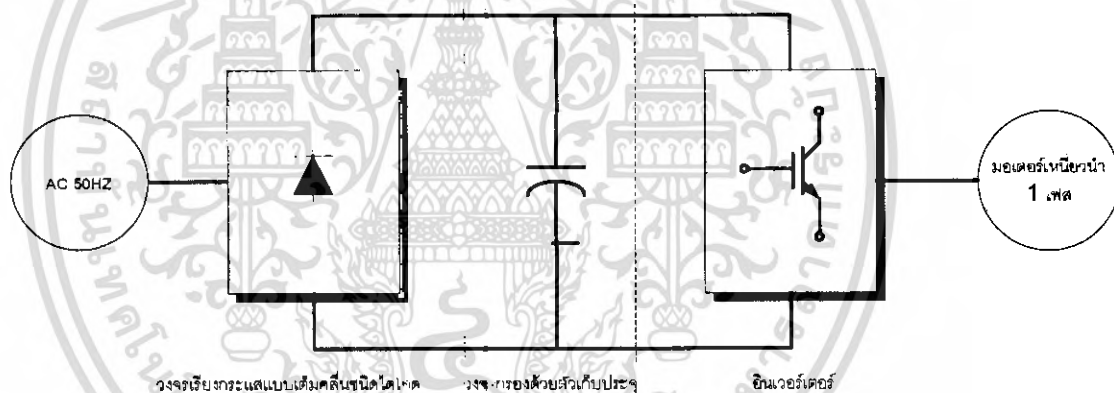
1. อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulated Inverter) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ของเอาต์พุต ได้ที่อินเวอร์เตอร์เลยโดยแรงดันอินพุตจะมีค่าคงที่ สัญญาณที่นำไปสวิตช์ตัวอุปกรณ์ จะเกิดเรียกว่า PWM มีวิธีการในการสร้างสัญญาณ โดยวิธีหลายวิธีดังต่อไปนี้

2. อินเวอร์เตอร์แบบคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave Inverter) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ขนาดแรงดันเอาต์พุตถูกควบคุมโดยการปรับแรงดัน อินพุต ส่วนการปรับความถี่จะปรับที่ตัวอินเวอร์เตอร์ได้อย่างเดียว และสัญญาณที่นำมาสวิตช์จะเป็นสี่เหลี่ยมเป็นผลทำให้สัญญาณเอาต์พุต มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมด้วย

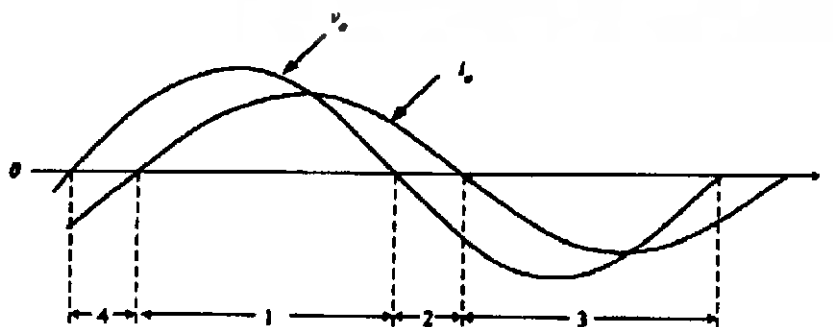
3. อินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวที่มีโวลต์เตจแคนเซลชั่น (Single Phase Inverter Cancellation) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ไม่สามารถปรับความถี่และขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ตัวอินเวอร์เตอร์แต่เราจะสามารถใช้เทคนิคนี้เรียกว่า โวลต์เตจแคนเซลชั่นมาช่วยได้

2.3.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์

เราสามารถอธิบายการทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ได้โดยพิจารณาอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่มีบล็อกไดอะแกรม จากรูปสมมุติ ได้ว่าแรงดันเอาต์พุต (v_o) จะจนกระทั่งสัญญาณมี ลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์และถ้าเราเอาอินเวอร์เตอร์ไปต่อกับโหลดที่มีลักษณะเป็นอินдукทีฟ (Inductive load) กระแสเอาต์พุต แสดงในช่วงหมายเลข 1 และ 3 v_o และ i_o เป็นบวกทั้งคู่แสดงว่ามีการไหลของพลังงาน ($p_o = v_o i_o$) จากด้านไฟตรงไปด้านไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ ในทางตรงกันข้ามในช่วงที่ 2 และ 4 v_o และ i_o จะมีเครื่องหมายตรงข้าม แสดงว่าการไหลของกำลังงานจากด้านไฟสลับ ไปทางด้านไฟตรง ซึ่งเป็นลักษณะของทำงานเป็นเรกติไฟร์ ดังนั้น อินเวอร์เตอร์ จะสามารถทำงานได้ 4 ลักษณะได้ตามกราฟ v_o และ i_o ในแต่ละไซเคิลของเอาต์พุตไฟสลับ

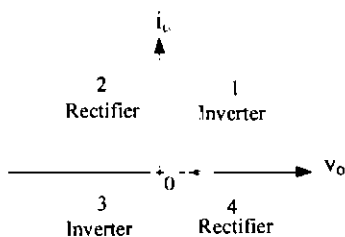


รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานทางอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.19 ลักษณะของเอาต์พุตเมื่อมีโหลดแบบอินдукทีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 กราฟ v_o และ i_o แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในหนึ่งไซเคิล

วงจรที่ใช้ในการอธิบายหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทุกวงจร จะมีพื้นฐานมาจากรูปที่ 3.3 ซึ่งจะมีวงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะเป็นวงจรฮาล์ฟเฟสนั่นเอง

2.3.4 วิธีการในการควบคุมแรงดันและค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์

วิธีการควบคุมสามารถแบ่งได้คร่าวๆ 3 แบบ คือ

1. การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation PWM)
2. การควบคุมโดยใช้สัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave Operation)
3. การควบคุมโดยใช้หลักการอื่นๆเข้ามาช่วย

วิธีการในการควบคุมแรงดันและค่าความถี่ของอินเวอร์เตอร์มีอยู่หลายแบบ แต่ละวิธีนิยมที่สุดในปัจจุบันและมีประสิทธิภาพดี คือ วิธีการควบคุมโดยการใช้นิวตันที่ได้จากการมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์ ซึ่งเป็นวิธีในโครงการนี้

2.3.5 การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์

เทคนิคของ PWM จะเริ่มจากการผลิตแอมพลิจูด คงที่ (อาจเป็นสามเหลี่ยมหรือฟันเลื่อยก็ได้) และจะนำไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นต่างๆ ขึ้นอยู่กับรูปแบบในการทำ PWM รูปแบบในการมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบ่งได้ 3 แบบ คือ

1. การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบเดี่ยว (Single pulse width)
2. การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบหลายพัลส์ (Multiple pulse width)
3. การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบไซน์ (Sinusoidal pulse width)

2.3.5.1 การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบเดี่ยว (Single pulse width)

เป็นการควบคุมความกว้างของพัลส์ที่สัญญาณที่นำไปสวิตซ์ไทรสเตอร์มีจำนวน 1 พัลส์ในครึ่งไซเคิลทำให้รูปคลื่นแรงดันมีจำนวน 1 ลูกคลื่นในครึ่งไซเคิลเช่นกัน

การควบคุมความกว้างของพัลส์สามารถทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คงที่ขอบเขตบน (leading edge) แต่แปรเปลี่ยนขอบเขตล่าง (trailing edge) ของพัลส์
- คงที่ขอบเขตล่าง (trailing edge) แต่แปรเปลี่ยนขอบเขตบน (leading edge) ของพัลส์
- แปรเปลี่ยนทั้งขอบเขตล่างและบนโดยคงที่ความสมมาตรของรูปพัลส์เอาไว้

2.3.5.2 การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบหลายพัลส์ (Multiple pulse width)

เป็นการทำให้จำนวนพัลส์ในแต่ละไซเคิลของรูปคลื่นแรงดันมีจำนวนมากกว่าเดิมและสามารถลดองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์คลื่นแรงดันเอาท์พุท จะเห็นว่าพื้นที่ใต้กราฟในครึ่งไซเคิลของการมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบหลายพัลส์ มีค่าเท่ากับ การมอดดูเลทตามความกว้างของพัลส์แบบเดี่ยว เป็นผลทำให้ค่าแรงดัน rms มีค่าเท่ากับ แต่ฮาโมนิกส์จะแตกต่างกันออกไปถ้าความถี่แคเรียร์เป็น f_c และความถี่ของการมอดดูเลทมีค่า f โดยที่ $f_c > f$

2.3.5.3 การมอดดูเลทความกว้างของพัลส์แบบไซน์

เป็นการนำสัญญาณไซน์มาทำเป็นสัญญาณมอดดูเลทแทนสัญญาณสี่เหลี่ยม ความกว้างของพัลส์จะมีค่าไม่คงที่ผ่านมาโดยจะแปรรูปตามรูปสัญญาณไซน์

สัญญาณมอดดูเลท ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ $V_m (Wt) = V_m \sin Wt$ ได้นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ $V_c (Wt)$ ที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ V_c จุดตัดของสัญญาณทั้งสองจะทำให้เกิดช่วงเวลาของการ on- off ก็จะมีการจำสัญญาณดังกล่าวนี้ไปใช้

ความกว้างของพัลส์จะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของค่าสูงสุดของสัญญาณมอดดูเลท (V_m) กับค่าสูงสุดของสัญญาณคลื่นพาหะ (V_c) หรือเรียกว่ามอดดูเลชันอินเดกซ์ หรือ Ma

$$Ma = V_{\text{control}} / V_{\text{control}}$$

ค่าแรงดันแอมพลิจูดของแรงดันเอาท์พุทจะแปรค่าตามโดยค่าสูงสุดของ ma คือ 1 ถ้า $ma > 1$ หรือ $V_{\text{control}} > V_{\text{control}}$ จะเกิดฮาร์โมนิคต่างๆ ที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น

อัตราส่วน $N = f_c / 2f$ ยังสามารถนำไปใช้และเราสามารถนำมาช่วยหาค่าฮาร์โมนิคสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ไหนจาก $2N+1$ การเพิ่มของ N จะทำให้ฮาร์โมนิค loss เพิ่มขึ้นและจะมีผล คือ

PWM จะทำให้จำนวนฮาร์โมนิคเพิ่มมากขึ้นแต่ขนาดของฮาร์โมนิคเพิ่มขึ้น

SPWM จะทำให้จำนวนฮาร์โมนิคส์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดของฮาร์โมนิคยังคงเดิม

การใช้สัญญาณสามเหลี่ยมที่มีทั้งซีกบวกและลบมาเป็นสัญญาณพาหะ เป็นการนำเอาสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีทั้งซีกบวก และลบ มาเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ ดังรูปที่ 2.22 จะมีผลดีหลายอย่างทั้งช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณและสามารถนำไปพัฒนาวงจรอินเวอร์เตอร์ได้

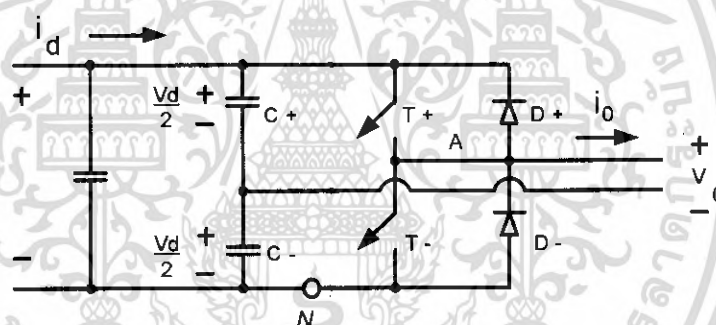
2.3.6 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว(Single phase inverter)

สามารถแบ่งเป็นชนิดย่อยได้ 3 ชนิด คือ

1. Half bridge inverter
2. Full bridge inverter
3. Push pull inverter

2.3.6.1 ฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Half bridge inverter)

วงจรฮาล์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรที่ใช้สวิทช์การควบคุมเพียง 2 ตัว ดังรูปที่ 2.21



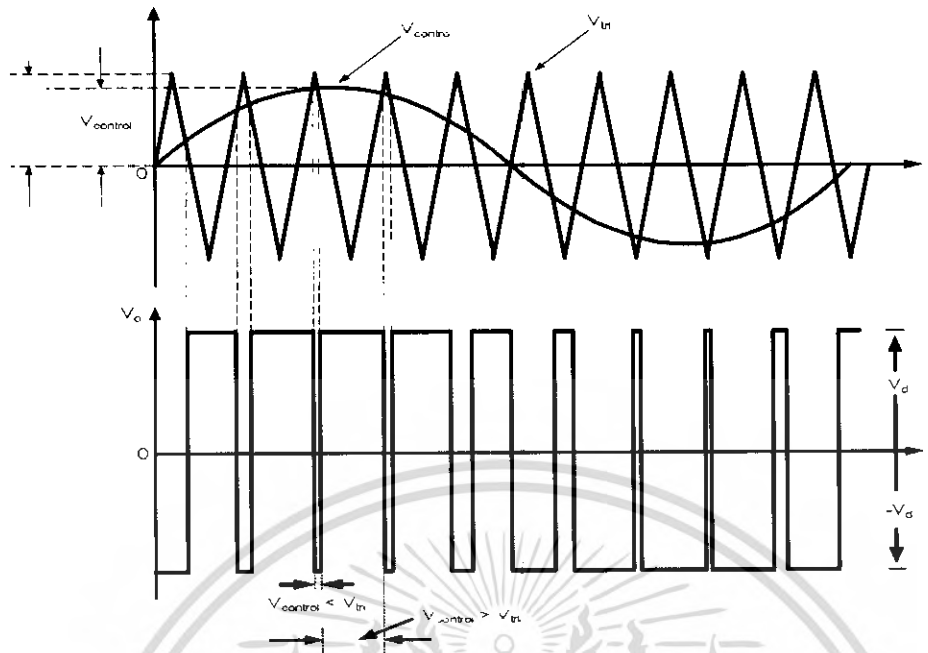
รูปที่ 2.21 แสดงวงจรฮาล์ฟบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (Half bridge inverter)

จากรูปวงจรฮาล์ฟบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (Half bridge inverter)

สวิทช์ T_+ จะเปิดเมื่อ $V_{control} > V_{in}$ และจะได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุต $(V_{AC}) = +\frac{1}{2}V_d$

สวิทช์ T_- จะเปิดเมื่อ $V_{control} < V_{in}$ และจะได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุต $(V_{AC}) = -\frac{1}{2}V_d$

ดังรูปที่



รูปที่ 2.22 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจร อินเวอร์เตอร์

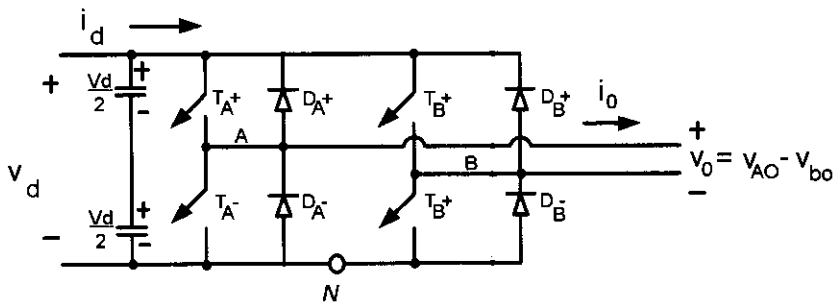
จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ (V_T) สูงสุดจะมีค่าเท่ากับแรงดันอินพุต

$$V_T = V_d$$

และกระแสไหลผ่านสวิตช์สูงสุดจะมีค่า $I_T = I_{o(\text{peak})}$

2.3.6.2 พูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full bridge inverter)

มีวงจรดังรูปที่ 2.23 อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัว และมี 2 สวิตช์ ซึ่งในแต่ละกิ่งจะทำงานพร้อมกันไม่ได้ อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะได้เปรียบกว่าแบบแรกคือสามารถที่จะรับกำลังได้สูงเพราะสวิตช์แต่ละตัวจะรับแรงดันครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุต ไม่เหมือนกับแบบฮาล์ฟบริดจ์โดยที่อุปกรณ์ที่ต้องจะมีขนาดเล็กลงด้วย

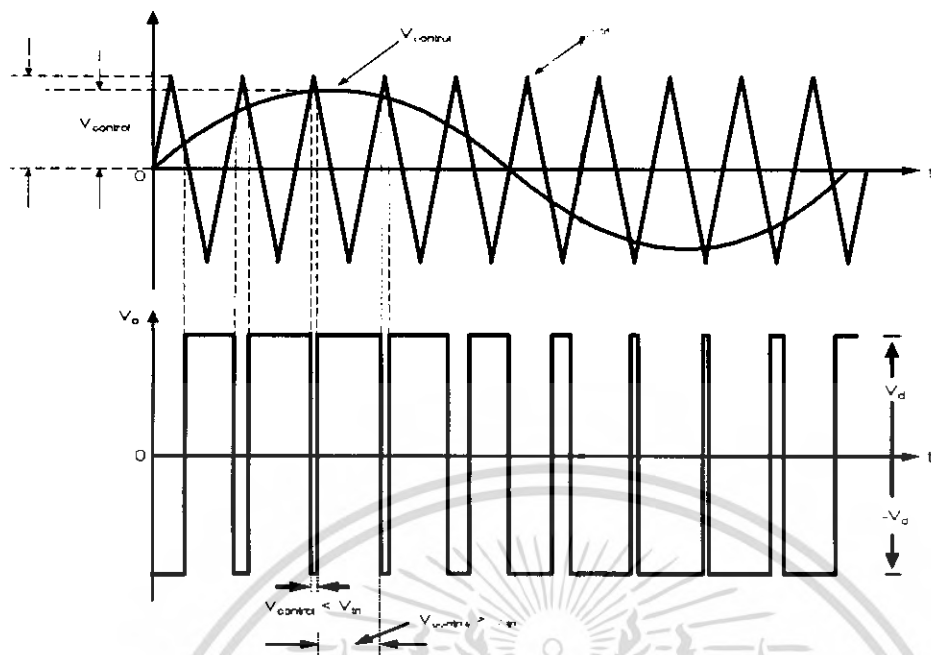


รูปที่ 2.23 แสดงวงจรฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ (full bridge inverter)

การใช้สัญญาณ PWM ควบคุมแบบไบโพลาร์โวลเตจสวิทช์ (PWM with bipolar voltage switching) เป็นการควบคุมในลักษณะการสร้างสัญญาณ PWM ขึ้นมาให้เปิดหรือปิดพร้อมกันเป็นคู่ๆ โดยสวิทช์ที่อยู่ กิ่งเดียวกันจะทำงานพร้อมกันไม่ได้ ดังนั้นจากรูปที่ 2.23 เราจะได้ว่า

สวิทช์ T_{A+} และ T_{B-} จะเปิดเมื่อ $V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}$ และ $V_{AC} = +\frac{1}{2}V_d$

สวิทช์ T_{A-} และ T_{B+} จะเปิดเมื่อ $V_{\text{control}} < V_{\text{tri}}$ และ $V_{AC} = -\frac{1}{2}V_d$



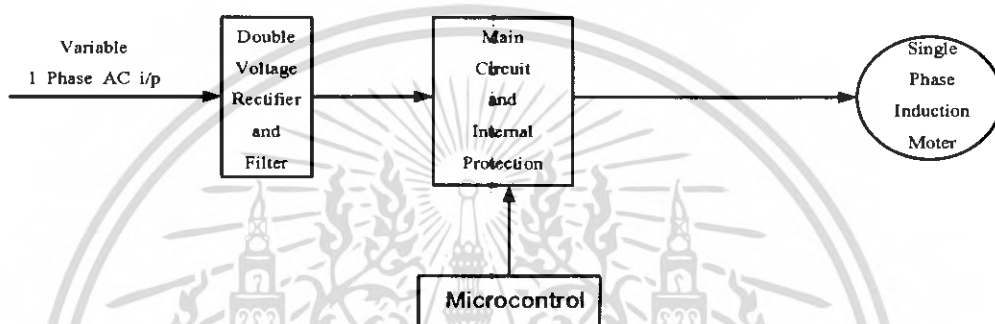
รูปที่ 2.24 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของ bipolar voltage switching แสดงสัญญาณที่เปรียบเทียบกัน และสัญญาณเอาต์พุต

บทที่ 3

โครงสร้างและส่วนประกอบของโครงการ

3.1 ส่วนประกอบของโครงการ

ส่วนประกอบของโครงการทั้งหมด สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ชุดอินเวอร์เตอร์และชุดควบคุมและสามารถที่จะแยกอธิบายถึงโครงสร้างส่วนประกอบทั้งสองส่วนอย่างละเอียดได้ดังนี้



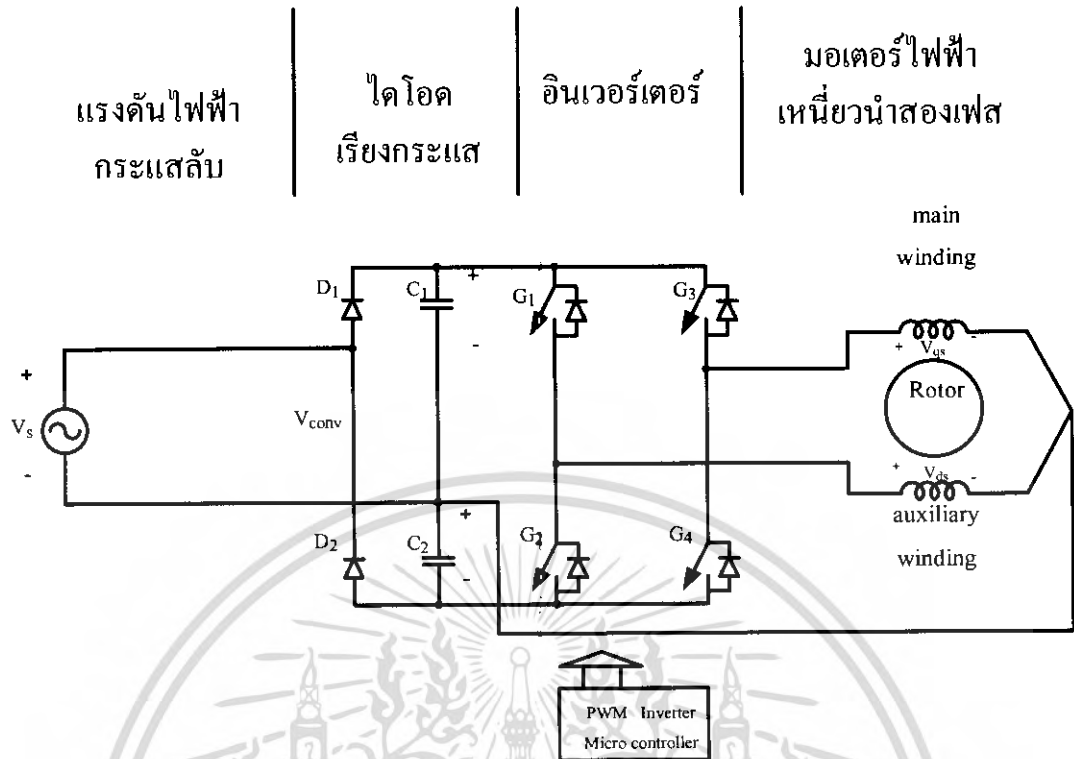
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของอินเวอร์เตอร์

3.2 ชุดอินเวอร์เตอร์ (Inverter)

โครงการนี้จะใช้ MOSFET เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลัง วงจรเรียงกระแสแบบทรีแรงดันวงจรป้องกันภายในและวงจรป้องกันภายนอกโดยสามารถแสดงให้เห็นเป็นบล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวมดังนี้

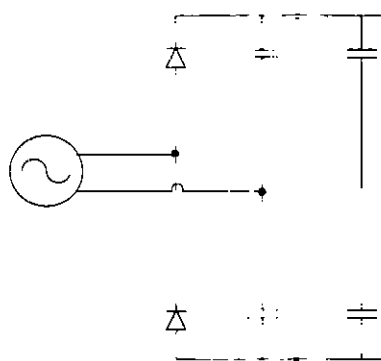
3.2.1 วงจรฮาล์ฟบริดจ์ไดโอดเรคตีไฟร์ (วงจรกำลังใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ 2 กิ่ง)

จากรูปที่ 3.2 เป็นวงจรกำลังใช้งานที่มีวงจรไดโอดเรคตีไฟร์ที่ต่อแบบทรีแรงดันเป็นอินพุทให้กับอินเวอร์เตอร์แบบ 2 กิ่งขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสที่ต่อในลักษณะแยกขดหลักและขดช่วยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่มีอยู่ที่ทั่วไปโดยมีจุดต่อร่วมกันระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกับมอเตอร์ไฟฟ้าอยู่ที่จุดค้ำกึ่งกลาง (center point potential) ของตัวเก็บประจุทั้งสองโดยขั้วของวงจรนี้จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงที่สูงเป็น 2 เท่าของขนาดแรงดันแหล่งจ่าย



รูปที่ 3.2 วงจรฮาล์ฟบริดจ์ไดโอดเรียงกระแส (วงจรกำลังใช้งานอินเวอร์เตอร์แบบ 2 กิ่ง)

จากรูปที่ 3.2 เป็นวงจรกำลังใช้งานสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตรโดยมีวงจรระดับแรงดันและมีฮาล์ฟบริดจ์โดยใช้ IGBT ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีสวิตช์ไอจีบีที อยู่ 4 ตัวโดยทั้งสองกิ่งนั้นออกแบบให้เป็นอินเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นเอาต์พุตให้กับระบบและนำไปขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส ในส่วนของอินเวอร์เตอร์นั้นใช้เทคนิค การควบคุมควบคุมแบบโพลาร์โวลเทจสวิตซ์ ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส ที่ได้มาจากการแยกขดหลักและ ขดช่วยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสทำให้ขดลวด ของมอเตอร์ทั้งสองทำมุม ต่างเฟสกันจึงเป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมมาตร



รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสแบบทวิแรงดัน

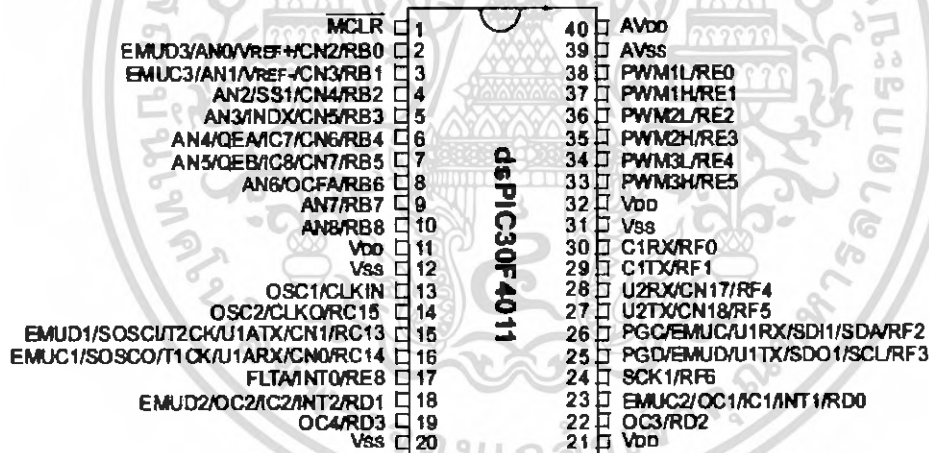
จากรูปเป็นวงจรเรียงกระแสแบบทวิแรงดัน เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ออกมา มีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันที่ป้อนเข้ามา เมื่อไฟซีกบวกเข้ามาแรงดันที่ออกส่วนหนึ่งจะจ่ายออกไปยังเอาต์พุต ขณะเดียวกันก็ทำการชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ไว้ด้วย เมื่อซีกลบเข้ามาแรงดันที่จ่ายไปยังเอาต์พุตก็จะเป็นแรงดันที่ได้จากการเรคตีไฟร์ร่วมกับแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ ทำให้แรงดันเอาต์พุตที่ได้ออกมาเป็นสองเท่าของแรงดันที่ป้อนเข้าไป และเมื่อซีกบวกเข้ามาอีกครั้งแรงดันที่จ่ายออกไปก็จะเป็นแรงดันที่ได้จากการเรคตีไฟร์ร่วมกับแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ทำให้แรงดันที่ได้จากการเรคตีไฟร์ร่วมกับแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็นสองเท่าตลอดการทำงาน

3.3 ส่วนของวงจรควบคุม

ในส่วนของการควบคุม การทำงานของอินเวอร์เตอร์จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ข้อมูลจำเพาะของไมโครโปรเซสเซอร์ DSPIC-30F4011 ทางด้านฮาร์ดแวร์

เปรียบเทียบกับ ซี พี ยู ตัวอื่นที่มีความสามารถใกล้เคียงกับทางด้านราคา ถือว่าสมเหตุสมผลทางด้านคุณภาพก็อยู่ในระดับกลางเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่ไม่ซับซ้อน ากส่วนคุณสมบัติในการสร้างสัญญาณพี ดับบลิวเอ็ม นั้นถือว่าตรงกับจุดประสงค์ของการนำมาใช้งาน และก็มีจำนวนเพียงพอต่อการใช้งานจึงได้พิจารณาเลือก DSPIC-30F4011 มาใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์

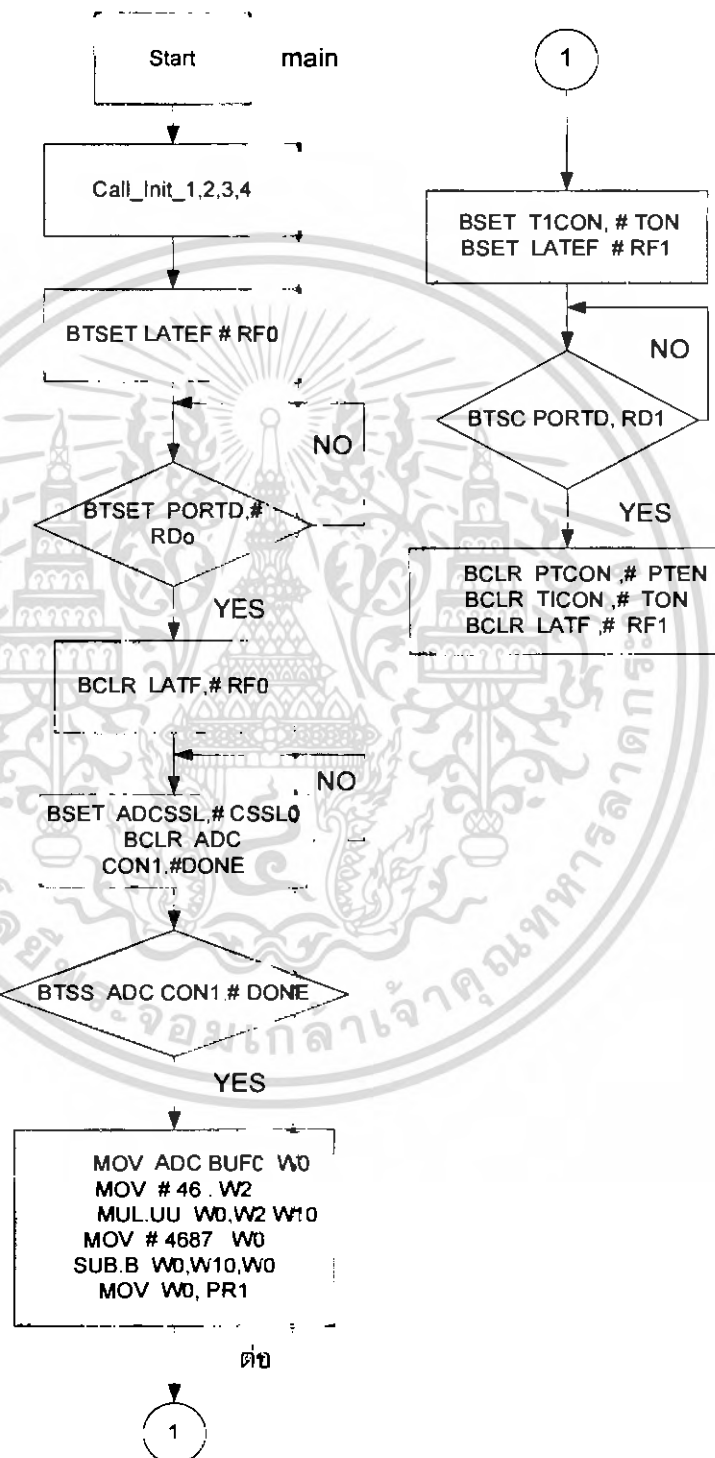
จากการศึกษาในเรื่องอินเวอร์เตอร์ในข้างต้นจะทราบว่า การสร้างสัญญาณทางด้านเอาต์พุตได้นั้นต้องอาศัยการกระตุ้นที่ขาเกต หรือ ทริกเกอร์ เพื่อให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทำงาน(นำกระแส)



รูปที่ 3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ DSPIC-30F4011 ใช้ในโครงงาน

3.4 Flow chart

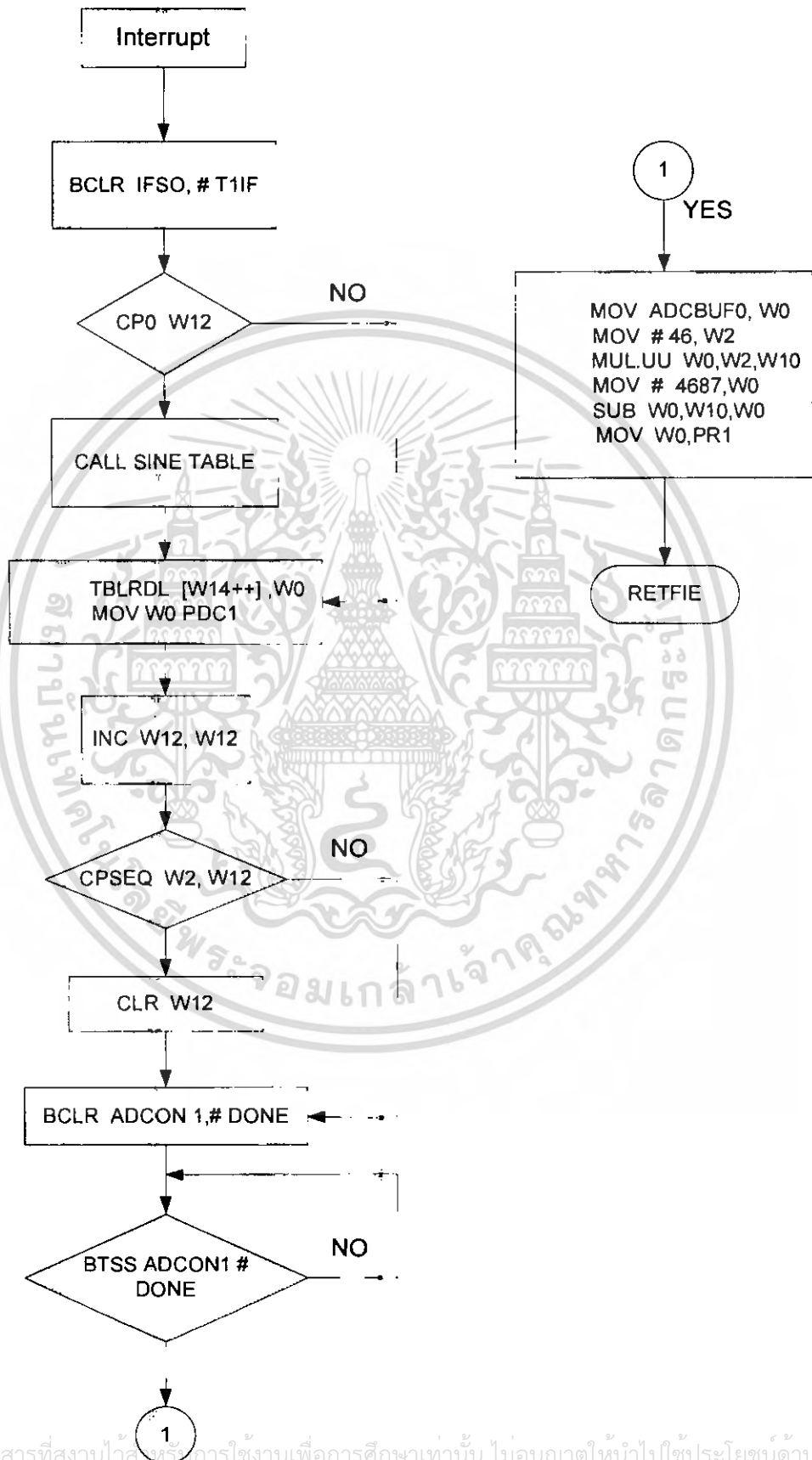
Flow chart แสดง PWM 1 เฟสที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ 2 เฟสที่มีพารามิเตอร์ไม่สมดุค



รูปที่ 3.5 แสดง Flow chart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Interrupt



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

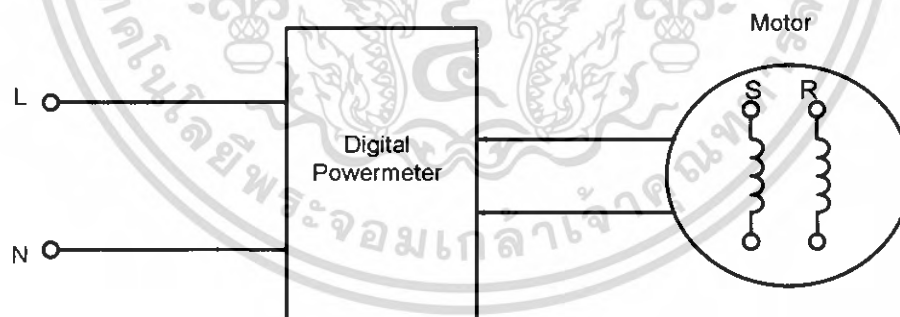
4.1 การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบบประมาณโดยใช้หลักการ Double Revolving Field Theory

การทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ใช้วิธีการทดสอบพื้นฐานตามมาตรฐานการทดสอบทั่วไป เพื่อที่จะทำให้เราทราบพารามิเตอร์เบื้องต้นของมอเตอร์ที่เรานำมาศึกษา โดยมีรายละเอียดและผลการทดสอบดังนี้

4.1.1 การทดสอบสภาวะไม่มีโหลด(No Load Test)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส Permanent Capacitor-Start Motor ½ HP	1 ตัว
- แหล่งจ่ายปรับค่าได้ (Voltage regulator) 1 เฟส 0-260 V	1 เครื่อง
- ฟิวส์ 10 แอมป์	10 ตัว
- โวลมิเตอร์	1 เครื่อง
- แอมมิเตอร์	1 เครื่อง
- แผงต่อวงจร	1 แผง
- สายต่อวงจร	30 เส้น
- Digital Power Meter 3 เฟส YOKOGAWA WT 1030	1 เครื่อง

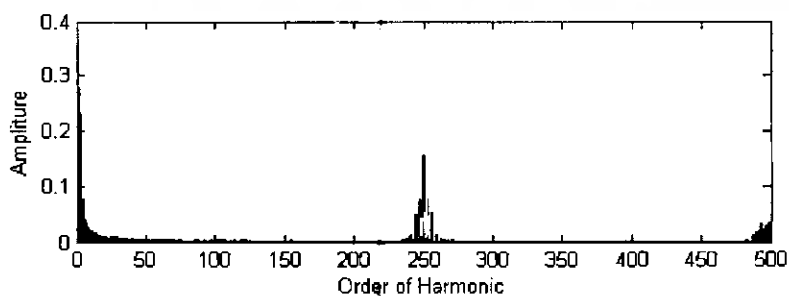
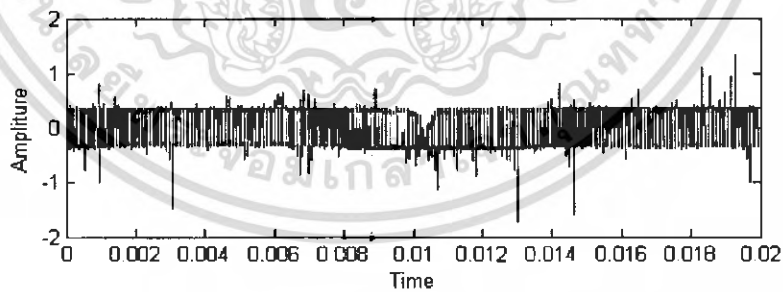


ลำดับการทดสอบ

- ต่อกับวงจรการทดลองดังรูป (ปลดคาปาซิเตอร์ออกจากขดช่วย)
- ค่อยๆจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่อยู่ในสภาวะไม่มีโหลดให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเท่ากับ 25 , 50 , 75 V
- วัดและบันทึกค่าแรงดัน (v_0) กระแสไฟฟ้า(i_0) ของขดหลัก (R) ของขดช่วย (S) ของมอเตอร์

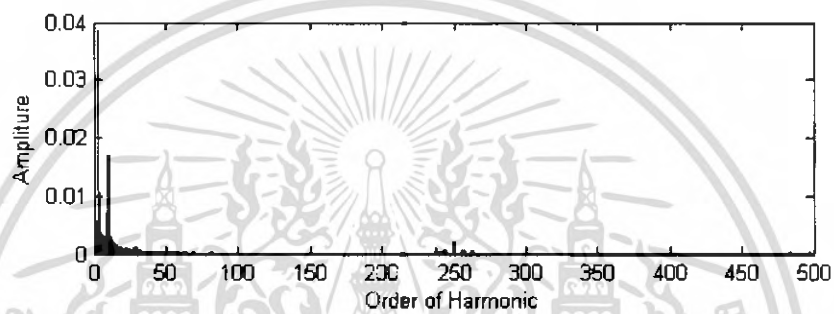
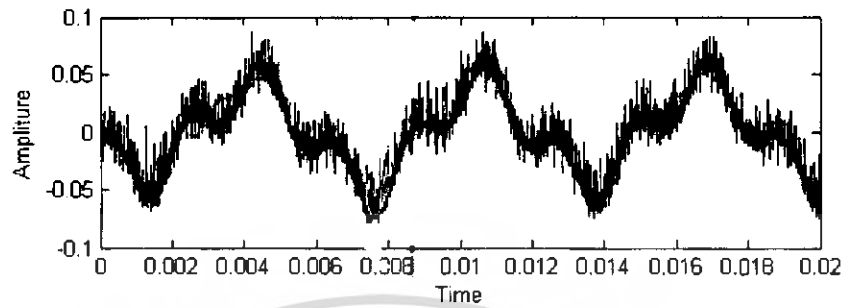
ตารางที่ 4.1 ตารางผลการทดสอบสภาวะไม่มีโหลด(No Load Test)

ค่าที่วัด			
V_L (V)	50	75	100
I_o (ขดช่วย) (A)	0.28	0.27	0.341
I_o (ขดหลัก) (A)	0.27	0.37	0.541
V (ขดหลัก) (V)	69	101.7	136.3
V (ขดช่วย) (V)	68.8	102.2	136.9
S_0 (VA)	19.264	27.594	46.68

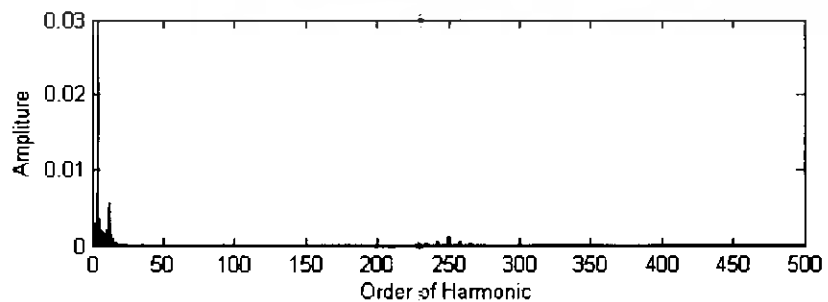
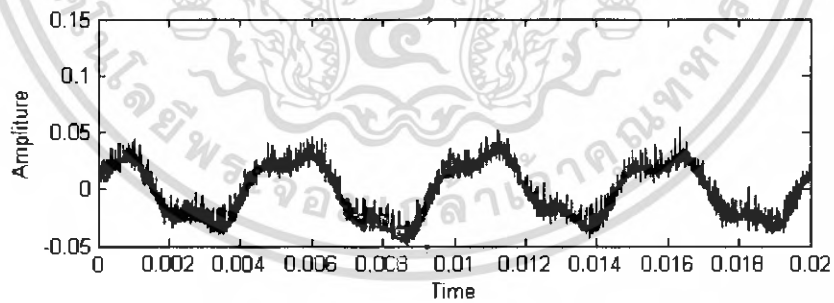


รูปคลื่นแรงดันและฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

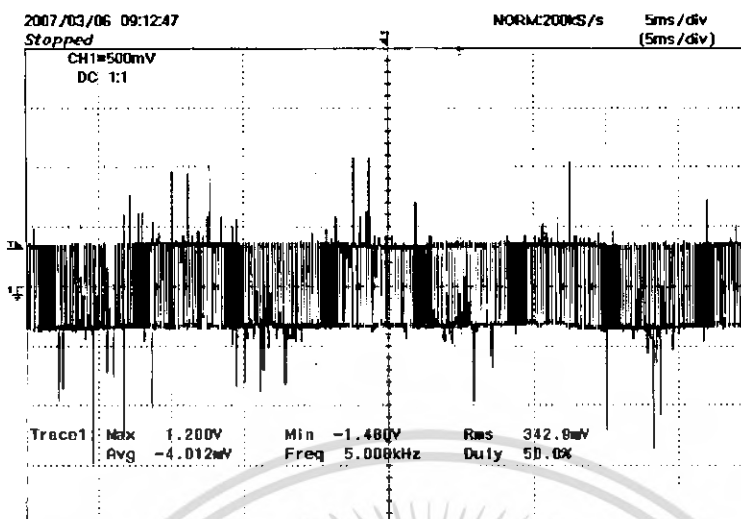


ที่ความถี่ 50Hz

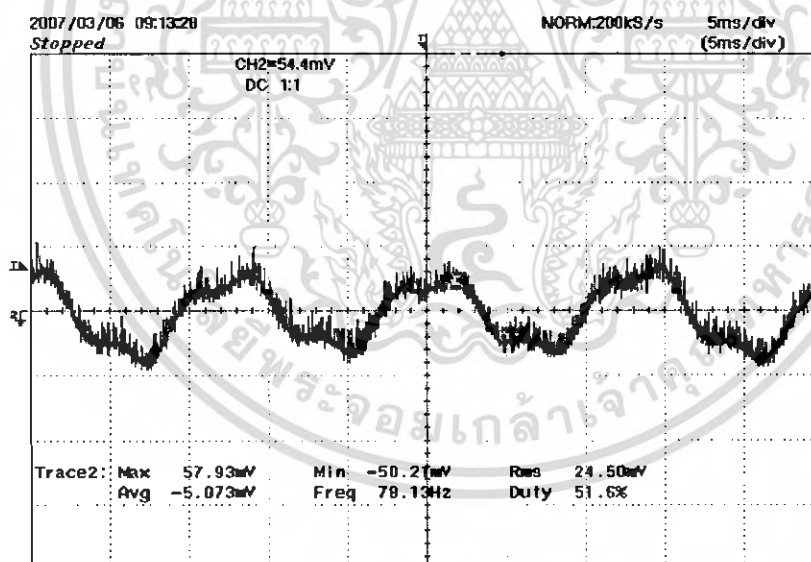


ที่ความถี่ 70 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

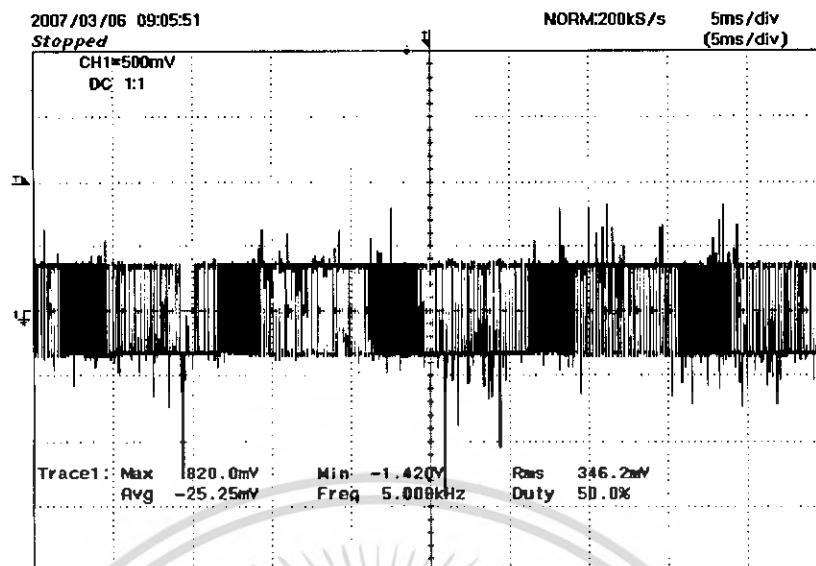


รูปคลื่นแรงดันที่ ความถี่ 70Hz

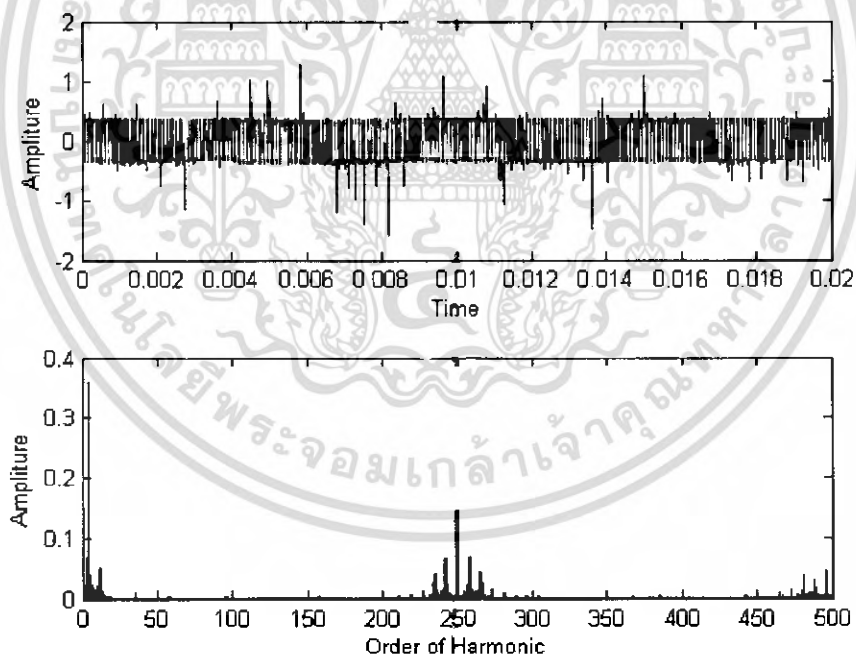


รูปคลื่นกระแสที่ 70 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

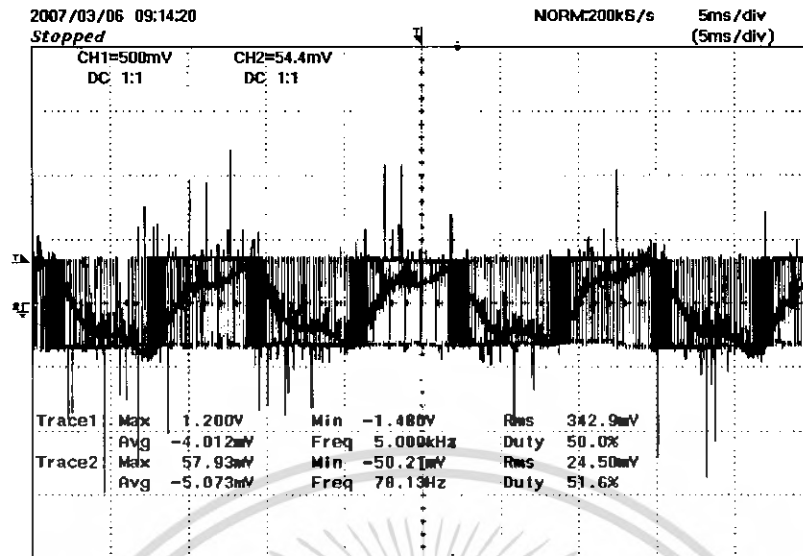


รูปคลื่นแรงดันที่ 30 Hz

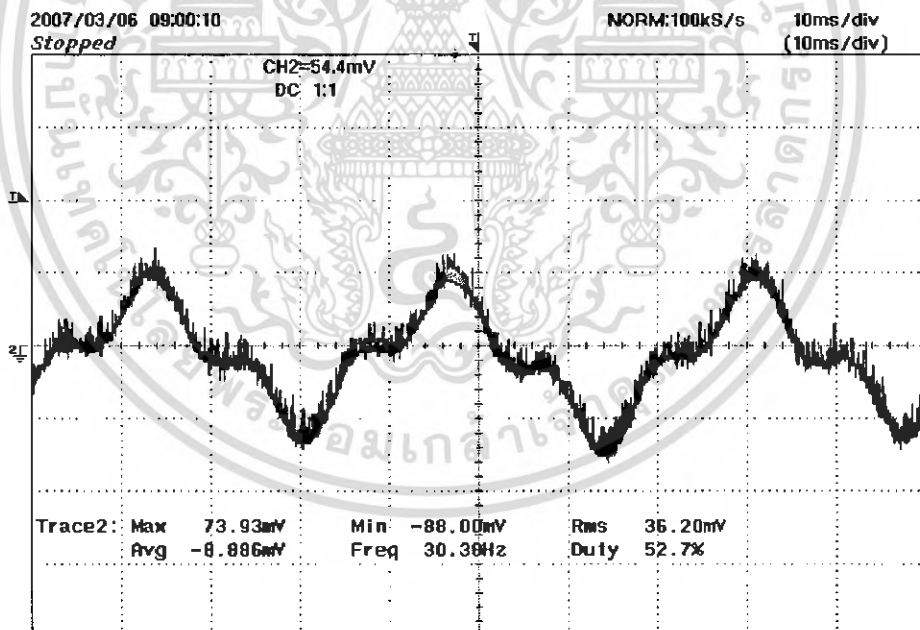


สเปกตรัมโวลเตจ 70 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โวลต์แอมที่ความถี่ 70Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน

- กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)
- กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดเนื่องจากกระแสกระตุ่น(Stator copper loss)
- กำลังที่สูญเสียทางกล (Mechanical loss)

ซึ่งเรียกการสูญเสียทั้งหมดว่าเป็นการสูญเสียคงที่(Fix loss)

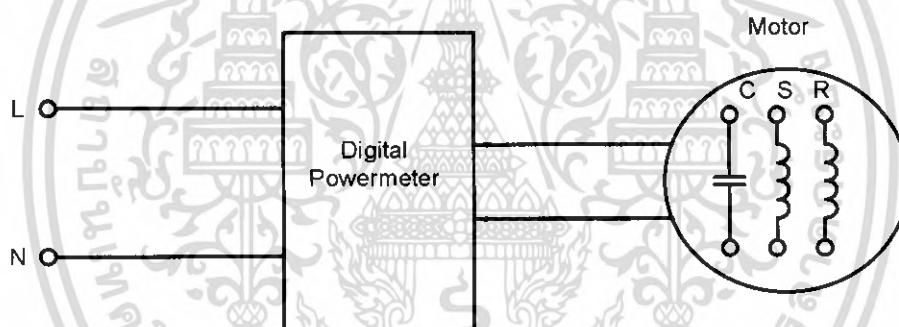


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดสอบหาค่า FRICTION AND WINDAGE LOSS

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส Permanent Capacitor-Start Motor ½ HP	1 ตัว
- แหล่งจ่ายปรับค่าได้ (Voltage regulator) 1 เฟส 0-260 V	1 เครื่อง
- ฟิวส์ 10 แอมป์	10 ตัว
- โวลมิเตอร์	1 เครื่อง
- แอมมิเตอร์	1 เครื่อง
- แผงต่อวงจร	1 แผง
- สายต่อวงจร	50 เส้น
- Digital Power Meter 3 เฟส YOKOGAWA WT 1030	1 เครื่อง



ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- ต่อวงจรการทดสอบดังรูป(ต่อคาปาซิเตอร์ของมอเตอร์เข้ากับขดช่วยเหมือนวงจรปกติ)
- ค่อยๆจ่ายไฟฟ้ากระแสลับให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่อยู่ในสภาวะไม่มีโหลดให้แรงดันเท่ากับแรงดันพิกัดของมอเตอร์
- วัดและบันทึกค่าแรงดัน(V_0) กระแสไฟฟ้า(I_0) กำลังไฟฟ้า(V_0) ของขดหลัก(R) ขดช่วย(S) ของมอเตอร์และผลรวมของทั้งสองขด
- ลดแรงดันลงเรื่อยๆ ประมาณ STEP ละ 20V บันทึกค่าดังเดิมจนมอเตอร์หยุดหมุน

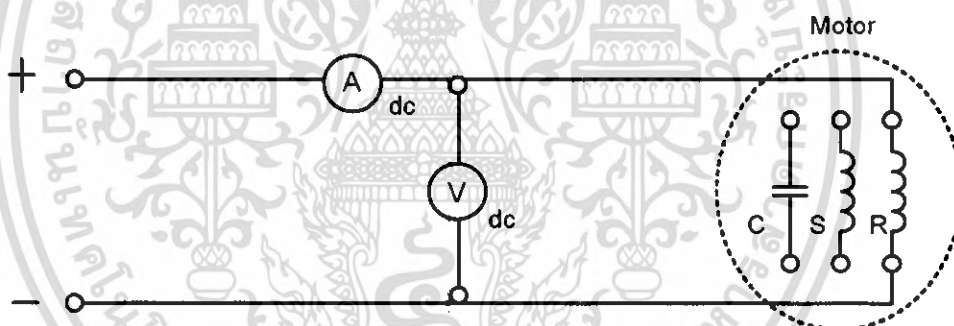
4.1.2 ผลการทดสอบค่าหาค่า Friction and windage loss

ขด ช่วย	V(V)	266.4	251.8	231	210	173	130.5	94.8	54.2
	I(A)	2.33	2.18	1.92	1.73	1.43	1.14	0.79	0.48
	P(W)	340	300	250	200	134	82	40	13
ขด หลัก	V(V)	219.5	210	180.5	160	130	100	70	40
	I(A)	0.75	2.05	1.61	1.5	0.92	0.67	0.45	0.27
	P(W)	110	120	100	84	55	35	16	4
รวม	V(V)	220.96	200	180	160	150	100	70	40
	I(A)	1.56	1.13	0.95	0.83	0.75	0.63	0.45	0.31
	P(W)	250	113	159	127	90	55	27	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การทดสอบยึดโรเตอร์ (Blocked-Roter Test)

- | | |
|---|-----------|
| - มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส Permanent Capacitor-Start Motor ½ HP | 1 ตัว |
| - แหล่งจ่ายปรับค่าได้ (Voltage regulator) 1 เฟส 0-260 V | 1 เครื่อง |
| - ฟิวส์ 10 แอมป์ | 10 ตัว |
| - โวลมิเตอร์ | 1 เครื่อง |
| - แอมมิเตอร์ | 1 เครื่อง |
| - แผงต่อวงจร | 1 แผง |
| - สายต่อวงจร | 50 เส้น |
| - Digital Power Meter 3 เฟส YOKOGAWA WT 1030 | 1 เครื่อง |



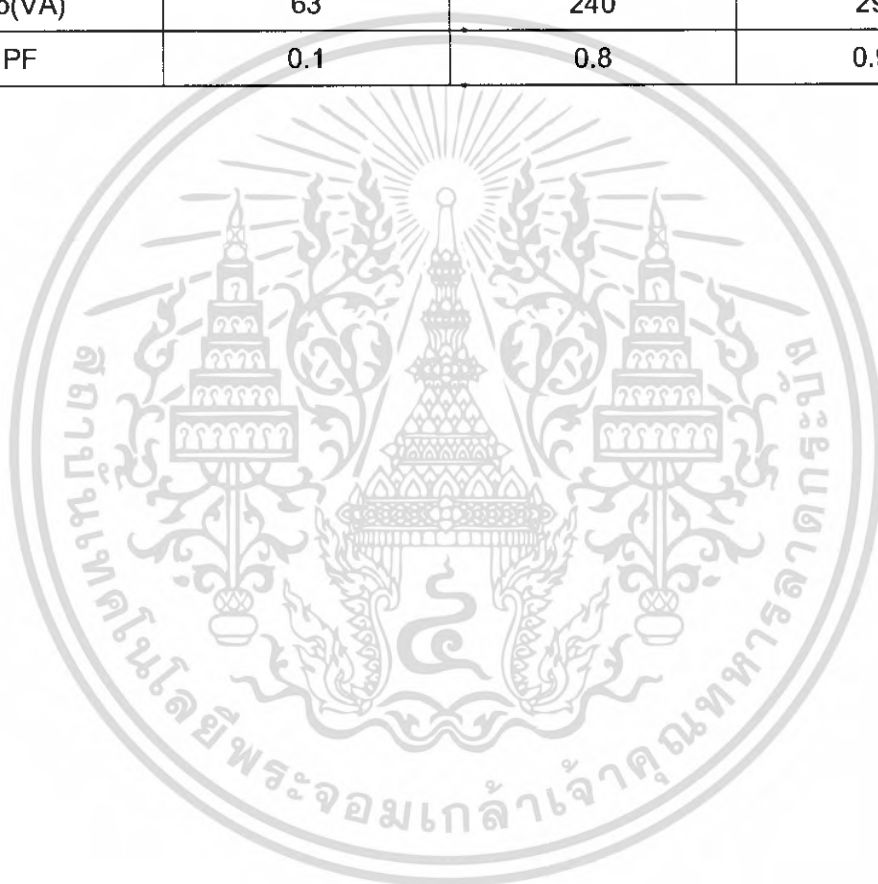
ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

- ต่อวงจรการทดสอบดังรูป
- ทำการจับยึดให้โรเตอร์หยุดนิ่ง แล้วค่อยๆ ปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจนอ่านกระแสไฟฟ้าที่พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือนำค่าใกล้เคียงที่สุด
- วัดและบันทึกค่าแรงดัน (V_b) กระแสไฟฟ้า (I_b) กำลังไฟฟ้า (P_b) ของขดหลัก (R) ขดช่วย (s) ของมอเตอร์และผลรวมของทั้งสองขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ตารางทดสอบยึดโรเตอร์(Blocked-Roter Test)

ค่าที่วัด	ขดช่วย	ขดหลัก	ผลรวม
Vb(V)	27.9	27.6	52
Ib(A)	3.23	0.7	3.1
Pb(W)	14	260	260
Sb(VA)	63	240	290
PF	0.1	0.8	0.91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวการทดลองต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วยการทดลองการทำงานของวงจร อินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหี่ยวนาสองเฟสที่ได้จากการแยกขดหลักและขดช่วย ของมอเตอร์ไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์นั้นใช้เทคนิคควบคุมสวิตช์แบบไบโพลาร์ โวลเตจสวิตช์โดย สร้างสัญญาณไซน์พีดับบลิวเอ็มที่ทำมุมต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ส่วน การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบที่จ่ายให้กับขดลวดช่วยไว้ที่พิกัด และขดลวดเมนนั้นใช้เทคนิคการ ควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่หรือ V/F และสามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่จ่าย เป็นสัญญาณไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหี่ยวนาสองเฟสที่ได้ จาก การแยกขดหลักและขดช่วย ของมอเตอร์ไฟฟ้าให้ขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ และยัง สามารถทำ การปรับเปลี่ยน ความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าเหี่ยวนาสองเฟสที่ได้จากการแยกขดลวดหลักและ ขดลวดช่วยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหี่ยวนาหนึ่งเฟส โดยได้แรงบิดที่ติดต่อยานความถี่ที่ใช้งาน รัักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงให้คงที่ได้ ทั้งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทางด้านอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ 20% และกรณีที่มีการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์แต่ จะมีข้อเสียที่ การทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ยังพบปัญหาการเกิดสไปร์สูงจึงต้องทำ การแก้ไข ได้ทำการใส่ $r c d$ สนับเบอร์พบว่าช่วยลด ค่าสไปร์ที่ลงได้บ้าง แต่คิดว่าถ้าจะทำให้ ดีกว่านี้ต้องทำการเพิ่มค่าความต้านทานให้สูงขึ้น เพราะช่วยลดกระแสที่ถูกดิสซิป์มาจากค่า c เพราะตัวความต้านทานจะร้อนมาก ๆ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

การศึกษาการปรับความเร็วมอเตอร์และคุณสมบัติการทำงานของมอเตอร์ เมื่อแหล่งจ่ายเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่จ่ายเป็นสัญญาณไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหี่ยวนาสองเฟสที่ได้จากการแยกขดหลักและขดช่วย ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหี่ยวนาหนึ่งเฟสขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า , 220 V. , 2.66 A., 1500 rpm , 4 ขั้ว โดยใช้เทคนิค SPWM ซึ่งในโครงการนี้จะใช้การควบคุมให้ค่า V/F ให้คงที่เพื่อทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์สร้างวงจรสวิตช์โหมดคอนเวอเตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

ในส่วนของอินเวอร์เตอร์นั้นใช้เทคนิคควบคุมสวิตช์แบบไบโพลาร์โวลเดจสวิตช์ โดย สร้างสัญญาณไซน์พีดับลิแวมที่ห้ามุมต่างเฟสกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ส่วนการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบที่จ่ายให้กับขดลวดช่วยไว้ที่พิกัด และขดลวดเมนนั้นใช้เทคนิคการควบคุมอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ให้คงที่

สรุปผลการวิจัย

- 5..1.1 สามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่จ่ายเป็นสัญญาณไซน์ และ PWM อินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหี่ยวนาสองเฟสที่ได้จากการแยกขดหลักและขดช่วย ของมอเตอร์ไฟฟ้าให้ขับเคลื่อนมอเตอร์ได้
- 5..1.2 สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงให้คงที่ได้ ทั้งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านอินพุทที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ 20% และกรณีที่มีการเพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์
- 5.1.3 สามารถทำการปรับเปลี่ยนความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าเหี่ยวนาสองเฟสที่ได้จากการแยกขดลวดหลักและขดลวดช่วยของมอเตอร์ไฟฟ้าเหี่ยวนาหนึ่งเฟส โดยได้แรงบิดที่ติดลดยานความถี่ที่ใช้งาน
- 5.1.4. การทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ยังพบปัญหาการเกิดสไปร์สูงจึงต้องทำการแก้ไข ได้ทำการใส่ r c d สนิบเบอร์พบว่าช่วยลดค่าสไปร์ทลงได้บ้าง แต่คิดว่าถ้าจะทำให้ดีขึ้นนี้ ต้องทำการเพิ่มค่าความต้านทานให้สูงขึ้น เพราะช่วยลดกระแสที่ถูกดิสซาร์ทมาจากค่า c เพราะตัวความต้านทานจะร้อนมาก ๆ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

5.2.1 ในการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรม ทั้งอุตสาหกรรมขนาดเล็ก,ขนาดกลางและขนาดใหญ่รวมถึงการใช้งานตามบ้านเรือนและสำนักงานโดยปกติมอเตอร์เหล่านี้ถูกใช้งานที่ความเร็วคงที่ซึ่งหากต้องการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นมีด้วยกันหลายวิธีด้วยกันทั้งแบบเทคนิคทางกลและเทคนิคทางไฟฟ้าในทางกลก็เช่น ใช้เฟืองทดรอบ ,tap winding หรือ pole switching ซึ่งแต่ละวิธีเหล่านี้ไม่สามารถที่จะควบคุมความเร็วได้ต่อเนื่องเพราะว่าแรงดันและความถี่ทางด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะโหลดต่างๆดังนั้นจึงมีวิธีการคิดวิธีการใช้อินเวอร์เตอร์แบบต่างๆ จึงน่าจะเป็นแนวทางในการควบคุมมอเตอร์ เช่น มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ

5.2.2 เป็นพื้นฐานแนวทางในการพัฒนาวิธีการควบคุมอื่นๆ เนื่องจากอาจจะมีการอื่นที่มีวิธีการควบคุมที่ง่ายกว่านี้ และให้ผลในการปรับปรุงแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ดีกว่านี้ได้

5.2.3 ควรจะรู้ถึงพิกัดกำลังของวงจรกำลังมาก่อนทำการซื้อมอเตอร์ เพราะถ้าซื้อมาโดยมิได้คำนวณพิกัดกำลังอย่างถูกต้องจะมีปัญหาอาจทำให้มอเตอร์ระเบิดได้ เพราะจากที่ผมทำการปฏิบัติพบว่ามอเตอร์มีสไปรท์สูงมาก ซึ่งเกินพิกัดกำลังของมอเตอร์จึงต้องทำการแก้ไขโดยเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ หรือ อาจจะต้องแก้ไขโดยการใส่สับเบอร์

5.2.4 การใช้สับเบอร์ช่วยลดแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ขณะturn off-turn on การคำนวณค่าสับเบอร์ที่ถูกต้องจะช่วยลดปัญหาค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ทำสับเบอร์ ซึ่งจากการที่กลุ่มผมทดลองต้องเสียเวลานานั่งมูลค่า r และ c ซึ่งสับเบอร์ที่ผมใช้เป็น r c d สับเบอร์

แนะนำเพิ่มเติม

5.2.5 สถานที่ๆไปซื้อของที่บ้านหม้อขอแนะนำว่าให้ไปร้าน es ซึ่งของราคาถูกมีคุณภาพแต่นานเล็กน้อย ซึ่งต่างจากร้าน eps ซึ่งของร้านนี้จะค่อนข้างแพงเป็น 2เท่า ถ้าไม่จำเป็นหรือหาอุปกรณ์ไม่ได้ไม่ควรไปเลย

5.2.6 การกัดแผ่นปริ้นท์ ถ้าต้องการทำลายให้สวยก็ต้องออกแบบในโพเทลก่อน แล้วจึงใช้วิธีการกัดแผ่นปริ้นท์ด้วยไดอะฟิล์มซึ่งจะใช้เวลากัดไม่นาน ลายสวย แต่ต้องใช้การอดทนในการรีดไดอะฟิล์มไม่ให้เกิดฟองอากาศ

เอกสารอ้างอิง

1. พิชิต ล้ายอง, **เครื่องกลไฟฟ้า1**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร,2540
2. พิชิต ล้ายอง, เอกสารประกอบการบรรยาย วิชา **เครื่องกลไฟฟ้า2**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร,2542
3. วิจิตร กิณเรศ, เอกสารประกอบการบรรยาย วิชา **Electric Drives**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร,2544
4. วีระเชษฐ์ ชันเงิน/วุฒิพลธารารัตริเศรษษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, คณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2544
5. วิทยานิพนธ์ เรื่อง **การศึกษาการปรับความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 เฟส**, คณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2544
6. วิทยานิพนธ์ เรื่อง **การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส**, คณะวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
; Author          : stater
; Company         : KMITL
; Filename        : Main Program.s
; Date           : 08/02/2007
; Frequency       : 4.00 MHz at PLL 16x
;*****
; Other Files Required : p30F4011.gld, p30f4011.inc
; Tools Used:MPLAB GL : 7.40
; Compiler        : 1.30
; Assembler       : 1.30
; Linker          : 1.30
; Devices Supported by this file : dsPIC 30F4011
;*****
; Additional Notes   : PWM_V1
;*****
.equ __30F4011, 1
.include "p30f4011.inc"
;-----
;Configuration bits:
;-----
config __FOSC, CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16 ;Turn off clock switching and
;fail-safe clock monitoring and
;use the External
;Clock as the system clock
config __FWDT, WDT_OFF ;Turn off Watchdog Timer
config __FBORPOR, PBOR_ON & BORV_27 & PWRT_16 & MCLR_DIS
;Set Brown-out Reset voltage and
;and set Power-up Timer to
;16msecs
config __FGS, CODE_PROT_OFF ;Set Code Protection Off for the
;General Segment
;-----
;Global Declarations:
;-----
.global __wreg_init ;Provide global scope to __wreg_
;init routineIn order to call this
;routine from a
;C file, place "wreg_init" in an
;"extern" declaration in the C file.
.global __reset ;The label for the first line of
;code.
.global __T1Interrupt ;DeclareTimer 1 ISR name global
;-----
;Difine Constants
;-----
.equ G_XOR,#0x8000
.equ G_AND,#0x7FFF
;.equ Count_sine,W12

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;-----  
;Difine Variable  
;-----
```

```
.bss    V_PV,2  
.bss    I_PV,2  
.bss    PHASE_A,4  
.bss    PHASE_B,4  
.bss    ENDTB_A,4  
.bss    ENDTB_B,4  
.bss    STARTTBL,4  
.bss    PRESCALE,4  
.bss    DELAY1,4
```

```
;-----  
;Global Declarations Variable:  
;-----
```

```
.global    PHASE_A  
.global    PHASE_B  
.global    ENDTB_A  
.global    ENDTB_B  
.global    STARTTBL  
.global    PRESCALE  
.global    DELAY1
```

```
;-----  
;Global Declarations Constants:  
;-----
```

```
;-----  
;Code Section in Program Memory  
;-----
```

```
.text  
__reset:    MOV    #__SP_init, W15    ;Start of Code section  
           MOV    #__SPLIM_init, W0    ;Initialize the Stack Pointer  
           MOV    W0, SPLIM    ;Initialize the Stack Pointer Limit  
           NOP    ;Add NOP to follow SPLIM  
           CLR    W0    ;Initialization of W registers  
           REPEAT    #12  
           MOV    W0,[++W14]  
           CLR    W14
```

```
*****<<insert more user code here>>*****
```

```
START0:    CALL    Init_PORT    ; Initialize the I/O ports  
           CALL    Init_TMR_INT    ; Initialize the I/O ports  
           CALL    SINETABLE  
           CALL    Init_PWM  
           CALL    Init_ADCI  
           BSET    LATF,#RF0  
LOOP0:    CALL    SW_DELAY
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BTSS PORTD,#RD1
BSET LATF,#RF6
CALL SW_DELAY
BTSC PORTD,#RD0
GOTO LOOP0
BCLR LATF,#RF0
BSET PTCON,#PTEN
BSET ADCSSL,#CSSL0
BCLR ADCON1,#DONE
LOOP1: BTSS ADCON1,#DONE ;DONE
GOTO LOOP1
MOV ADCBUF0,W0 ; Load the Period register
MOV #4,W2
MUL.UU W0,W2,W10
MOV #4163,W0
SUB W0,W10,W10
MOV W10,PR1 ; Frequency sinewave
CLR TMR1
CLR PTMR
BSET T1CON,#TON ; Start Timer1 with prescaler
BSET PTCON,#PTEN
BSET LATF,#RF1
LOOP2: CLR DELAY1
BTSC PORTD,#RD1 ;วนดูปรอการ Interrup จาก timer
GOTO LOOP2
LOOP22: BTSS PORTD,#RD1
GOTO LOOP2
MOV #20,W1
MOV DELAY1,W0
INC W0,W0
MOV W0,DELAY1
CPSGT W0,W1
GOTO LOOP22
BCLR PTCON,#PTEN
BCLR T1CON,#TON
BCLR LATF,#RF1
BCLR LATF,#RF6
GOTO START0

__T1Interrupt:
BCLR IFS0,#T1IF ;Clear the Timer1 Interrupt flag
;<<insert user code here>>
CP0 W12 ; W11 = 0 ?
BRA Z,INTI_TABLE ; If Yes jump to INTI_TABLE
BRA SEND_DUTY ; If No jump to SEND_DUTY

INTI_TABLE: CALL SINETABLE
SEND_DUTY: BCLR ADCON1,#DONE
LOOP3: BTSS ADCON1,#DONE ;DONE
GOTO LOOP3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV ADCBUF0,W0
MOV #37,W2
MUL.UU    W0,W2,W10      ;ได้ปีสเกลของ PDC เก็บค่าใน W10
MOV W10,PRESCALE
MOV PHASE_A,W13
TBLRDL    [W13++],W0
MOV W13,PHASE_A
CALL MULPRE
MOV W0,PDC1              ; AMPLIUDE SINEWAVE
MOV PHASE_B,W13
TBLRDL    [W13++],W0
MOV W13,PHASE_B
CALL MULPRE

MOV W0,PDC3              ; AMPLIUDE SINEWAVE
INC W12,W12              ;นับรอบการทำงาน/นับการเลื่อนตำแหน่ง
                          ของค่า sinetable
MOV ENDTB_C,W0           ;ใส่ค่าที่เฟส B จะสุดตาราง คือ 180
CPSEQ     W12,W0         ;เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการเลื่อน
                          ตำแหน่ง
BRA EXIT0                ;ถ้าเปรียบเทียบแล้วค่าเท่ากัน แสดงว่าค่า
                          มาถึงจุดสุดตาราง ต้องมีการกำหนดค่า
                          ตัวชี้ตำแหน่งของเฟส B ใหม่
MOV STARTTBL,W0         ;กำหนดค่าของตัวชี้ตำแหน่งเฟส B เป็นค่า
                          เริ่มต้นตาราง

EXIT0:  MOV ENDTB_B,W0
        CPSEQ     W12,W0
        BRA EXIT1
        MOV STARTTBL,W0
        MOV W0,PHASE_B
EXIT1:  MOV ENDTB_A,W0
        CPSEQ     W12,W0
        BRA EXIT2
        CLR W12
EXIT2:  BCLR ADCON1,#DONE
LOOP4:  BTSS ADCON1,#DONE      ;DONE
        GOTO LOOP4

MOV ADCBUF0,W0
MOV #4,W2
MUL.UU    W0,W2,W10
MOV #4163,W0
SUB W0,W10,W10
MOV W10,PR1              ; Frequency sinewave
GOTO EXIT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MULPRE:  MOV  PRESCALE,W10
          MUL.UU   W10,W0,W2
          MUL.SU   W3,#2,W0
          RETURN
EXIT:    RETFIE                                ;Return from Interrupt Service
routine
.end                                           ;End of program code in this file

```

```

-----
.equ __30F4011, 1
.include "p30f4011.inc"
-----

```

```

;Subroutine:Init_PORTS
-----

```

```

.global Init_PORT
Init_PORT: CLR  LATD                          ; clear LATD
           MOV  #0xFFFF,W0                   ; set is INPUT
           MOV  W0,TRISD
           CLR  LATF                          ; clear LATF
           MOV  #0xFF00,W0                    ; set is outputs
           MOV  W0,TRISF
           RETURN
-----

```

```

;Subroutine to Init TMR
-----

```

```

.global Init_TMR_INT
Init_TMR_INT: CLR  T1CON                      ; Stops the Timer1 and reset
              CLR  TMR1                       ; Clear contents of the timer
              BSET IPC0,#T1IP0                ; Setup Timer1 interrupt for
              BCLR IPC0,#T1IP1                ; desired priority level
              BCLR IPC0,#T1IP2                ; (this example assigns level 1)
              BCLR IFS0,#T1IF                 ; Clear the Timer1 interrupt status
              BSET IEC0,#T1IE                 ; Enable Timer1 interrupts
              RETURN
-----

```

```

;Subroutine to PWM
-----

```

```

.global SINETABLE
SINETABLE: MOV  #tblpage(SinTable),W13
           MOV  W13,TBLPAG
           MOV  #tbloffset(SinTable),W13
           MOV  #0,W12
           MOV  W13,STARTTBL                  ;ใส่ค่าเริ่มต้นของลวดตัวชี้ตำแหน่ง
           MOV  W13,PHASE_A
           MOV  W13,PHASE_B
           BTSC PORTF,#RF6
           GOTO REVERST
           GOTO FORWARD
-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

FORWARD: MOV PHASE_B,W0
          ADD #180,W0
          MOV W0,PHASE_B           ;จีฟเฟส B ไป 90องศา
          MOV #360,W0
          MOV W0,ENDTB_A
          GOTO END1
REVERST: MOV PHASE_B,W0
          ADD #360,W0
          MOV W0,PHASE_B           ;จีฟเฟส B ไป 90ศา
          MOV #180,W0              ;เก็บค่าในตารางอีก50 ค่า
          MOV W0,ENDTB_A
          GOTO END1
END1:    RETURN

```

SinTable:

```

.word 1600,1647,1694,1741,1788,1835,1882,1929,1976,2023
.word 2070,2116,2163,2209,2255,2301,2347,2393,2439,2484
.word 2529,2575,2619,2664,2709,2753,2797,2841,2884,2927
.word 2955,2967,2979,2991,3002,3013,3024,3035,3045,3054
.word 3064,3073,3081,3090,3098,3105,3112,3119,3125,3131
.word 3137,3142,3146,3151,3154,3158,3160,3163,3165,3166
.word 3167,3168,3168,3167,3166,3165,3163,3160,3157,3154
.word 3150,3145,3140,3134,3128,3121,3114,3106,3098,3089
.word 3080,3070,3059,3048,3037,3024,3012,2998,2985,2970
.word 2986,3001,3015,3029,3042,3055,3067,3079,3090,3100
.word 3110,3120,3128,3137,3145,3152,3158,3165,3170,3175
.word 3180,3184,3188,3191,3193,3195,3197,3198,3198,3198
.word 3182,3181,3180,3178,3176,3173,3170,3166,3162,3157
.word 3152,3146,3141,3134,3128,3120,3113,3105,3097,3088
.word 3079,3070,3060,3050,3039,3029,3018,3006,2995,2983
.word 2955,2912,2869,2825,2782,2738,2693,2649,2604,2559
.word 2514,2469,2423,2378,2332,2286,2240,2194,2147,2101
.word 2054,2008,1961,1914,1867,1820,1773,1726,1679,1632
.word 1585,1538,1491,1443,1396,1349,1302,1256,1209,1162
.word 1115,1069,1022,976,930,883,838,792,746,701
.word 655,610,565,521,476,432,388,344,301,257
.word 245,233,221,209,198,187,176,165,155,146
.word 136,127,119,110,102,95,88,81,75,69
.word 63,58,54,49,46,42,40,37,35,34
.word 18,17,17,18,19,20,22,25,28,31
.word 35,40,45,51,57,63,71,78,87,96
.word 105,115,126,137,148,160,173,186,200,215
.word 214,199,185,171,158,145,133,121,110,100
.word 90,80,72,63,55,48,42,35,30,25
.word 20,16,12,9,7,5,3,2,2,2
.word 2,3,5,7,9,12,15,19,23,28
.word 33,38,44,51,57,64,72,80,88,97
.word 106,115,125,135,145,156,167,178,190,202
.word 245,288,331,375,418,462,507,551,596,641

```

```
.word 686,731,777,822,868,914,960,1006,1053,1099
.word 1146,1192,1239,1286,1333,1380,1427,1474,1521,1568,1600
```

```
;-----
;Subroutine to PWM
;-----
```

```
.global Init_PWM
```

```
Init_PWM: ;0x5432109876543210
MOV #0b0000000000000010,W0
MOV W0,PTCON
MOV #0x063F,W0
MOV W0,PTPER
;0x5432109876543210
MOV #0b0000000000000000,W0
MOV W0,SEVTCMP
;0x5432109876543210
MOV #0b000000000110011,W0
MOV W0,PWMCON1
;0x5432109876543210
MOV #0b0000000000000010,W0
MOV W0,PWMCON2
;0x5432109876543210
MOV #0b000000000111111,W0
MOV W0,DTCON1
CLR FLTACON
RETURN
```

```
;-----
;Subroutine:Init_ADC 10 BIT
;-----
```

```
.global Init_ADC1
Init_ADC1: MOV #0x0000,W0 ;CH0=>AN3,CH1=>AN0,
; CH2=>AN1,CH3=>AN2
MOV W0,ADPCFG
MOV #0x00EE,W0
MOV W0,ADCON1
MOV #0x0300,W0
MOV W0,ADCON2
MOV #0x0002,W0
MOV W0,ADCON3
MOV #0x0000,W0
MOV W0,ADCHS
CLR ADCSSL
BSET ADCON1,#ADON ; Turn on A/D
RETURN
```

```
;-----
;Subroutine: Delay_W12ms
;-----
```

```
.global Delay_W12ms
```

```
Delay_W12ms: DO #10000,END_1ms ; Delay 1ms
DO W12,END_W12 ; Do W12 times
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        NOP
        NOP
END_W12:  NOP
END_1ms:  NOP
        RETURN

```

```

;-----
;Subroutine: I2C_DELAY
;-----

```

```

.global I2C_DELAY
I2C_DELAY:  MOV #2,W12
            DO #10,END_5us           ;Delay 5us
            DO W12,END_Wx           ; Do W12 times
            NOP
            NOP
END_Wx:    NOP
END_5us:   NOP
            RETURN

```

```

;-----
;Subroutine:SW_DELAY
;-----

```

```

.global SW_DELAY
SW_DELAY:  MOV #10,W12                ; Delay 10ms
            DO #10000,END_1ms_SW     ; Delay 1ms
            DO W12,END_W12_SW        ; Do W12 times
            NOP
            NOP
END_W12_SW:  NOP
END_1ms_SW:  NOP
            RETURN

```

```

;-----
;Subroutine: DELAY 200uS
;-----

```

```

.global DELAY_50Hz
DELAY_50Hz:  MOV #94,W12
            DO #10,END_50Hz          ;Delay 5us
            DO W12,END_Wx1           ;Do W12 times
            NOP
            NOP
END_Wx1:    NOP
END_50Hz:   NOP
            RETURN

```

```

;-----
;Subroutine: Delay_2ms
;-----

```

```

.global Delay_2ms
Delay_2ms:  MOV #2,W12
            DO #10000,END_1msX       ; Delay 1ms
            DO W12,END_W12X          ; Do W12 times
            NOP
            NOP

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

END_W12X: NOP
END_1msX: NOP
RETURN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การที่ปริญญาโทฉบับนี้และโครงการสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น กระผมและคณะขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ และ อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนคณะอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกๆท่านที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำโครงการนี้ เพื่อให้โครงการนี้สามารถที่จะบรรลุผลและสำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้จัดทำโครงการต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือโดยเฉพาะพีตัวเล็กและพีเป็ยกที่ให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดีโครงการ รวมไปถึงพีปริญญาโทอีกหลาย ๆ คนที่ให้คำปรึกษา และต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการทำโครงการที่คอยช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำโครงการต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของพวกเรา ผู้ที่มีพระคุณสูงสุดที่เป็นผู้ที่ให้โอกาสในการศึกษา ที่คอยส่งเสียเงินให้ผู้จัดทำโครงการศึกษาจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Request For Quotation

Order the parts you need from our real-time inventory database. Simply complete a request for quotation form with your part information and a sales representative will respond to you with price and availability.

Request For Quotation

Your free datasheet starts on the next page.

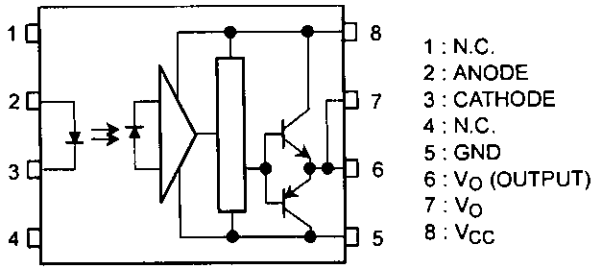
More datasheets and data books are available from our webpage: <http://www.datasheetarchive.com>



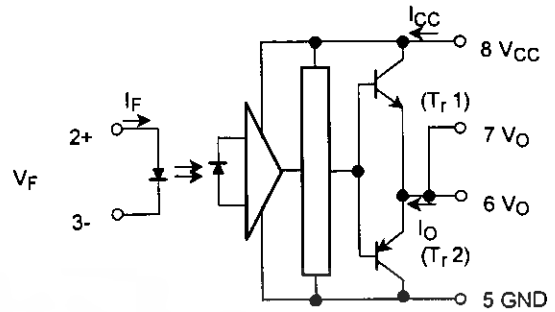
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin Configuration (top view)



Schematic



(Note 2) A 0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5.



RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

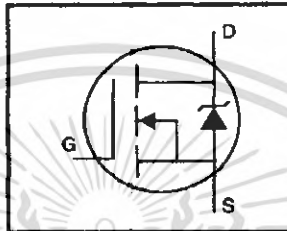
000707EBC

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- Gallium arsenide (GaAs) is a substance used in the products described in this document. GaAs dust and fumes are toxic. Do not break, cut or pulverize the product, or use chemicals to dissolve them. When disposing of the products, follow the appropriate regulations. Do not dispose of the products with other industrial waste or with domestic garbage.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

IRFP460PbF

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead-Free



$$V_{DSS} = 500V$$

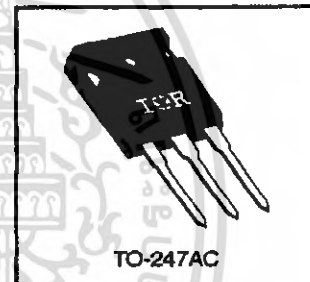
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.




Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
I_D @ $T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	20	A
I_D @ $T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{\textcircled{1}}$	80	
P_D @ $T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/ $^\circ C$
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy $\text{\textcircled{2}}$	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current $\text{\textcircled{1}}$	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy $\text{\textcircled{1}}$	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt $\text{\textcircled{3}}$	3.5	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	$^\circ C$
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1 N•m)	

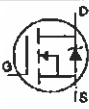
Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	$^\circ C/W$
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	500	—	—	V	V _{GS} =0V, I _D =250μA
ΔV _{(BR)DSS} /ΔT _J	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.63	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D =1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.27	Ω	V _{GS} =10V, I _D =12A ④
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} =V _{GS} , I _D =250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	13	—	—	S	V _{DS} =50V, I _D =12A ④
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} =500V, V _{GS} =0V
		—	—	250	μA	V _{DS} =400V, V _{GS} =0V, T _J =125°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} =20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	V _{GS} =-20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	210	nC	I _D =20A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	29	nC	V _{DS} =400V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	110	nC	V _{GS} =10V See Fig. 6 and 13 ④
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	18	—	ns	V _{DD} =250V
t _r	Rise Time	—	59	—		I _D =20A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	110	—		R _G =4.3Ω
t _f	Fall Time	—	58	—		R _D =13Ω See Figure 10 ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	5.0	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L _S	Internal Source Inductance	—	13	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	V _{GS} =0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	870	—		V _{DS} =25V
C _{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T _J =25°C, I _S =20A, V _{GS} =0V ④
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	T _J =25°C, I _F =20A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	di/dt=100A/μs ④
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S +L _D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② V_{DD}=50V, starting T_J=25°C, L=4.3mH R_G=25Ω, I_{AS}=20A (See Figure 12)
- ③ I_{SD}≤20A, di/dt≤160A/μs, V_{DD}≤V_{(BR)DSS}, T_J≤150°C
- ④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.

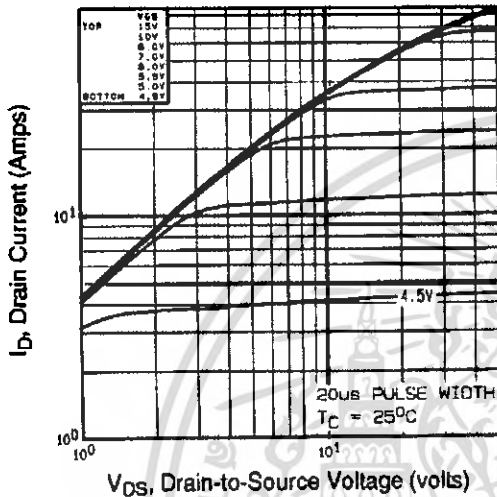


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

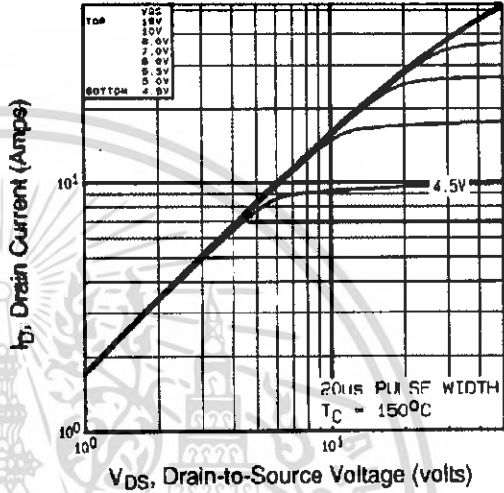


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

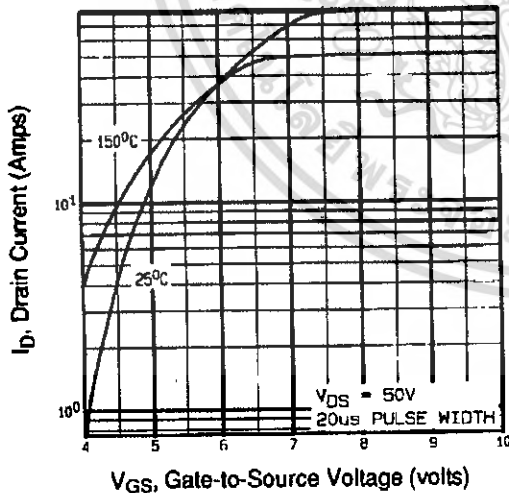


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

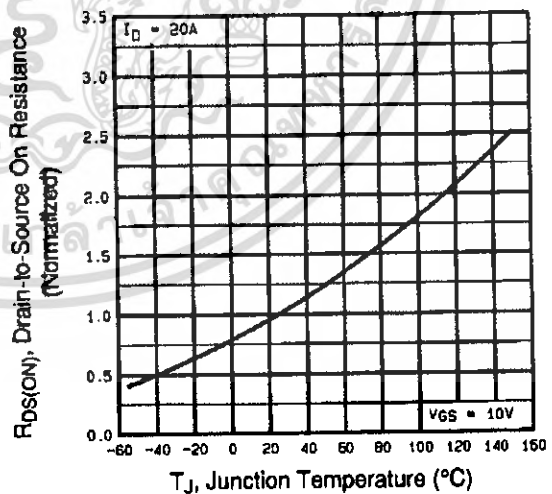


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRFP460PbF

International
IR Rectifier

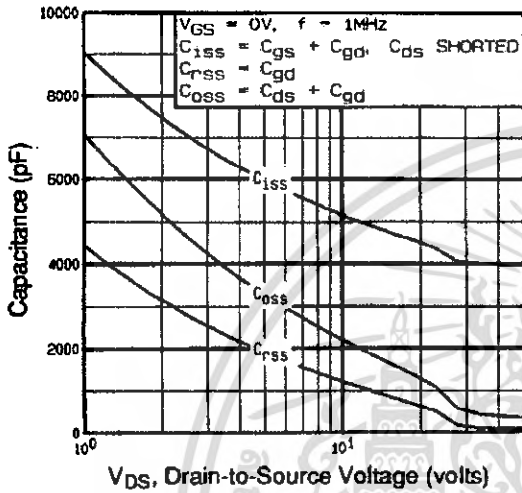


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

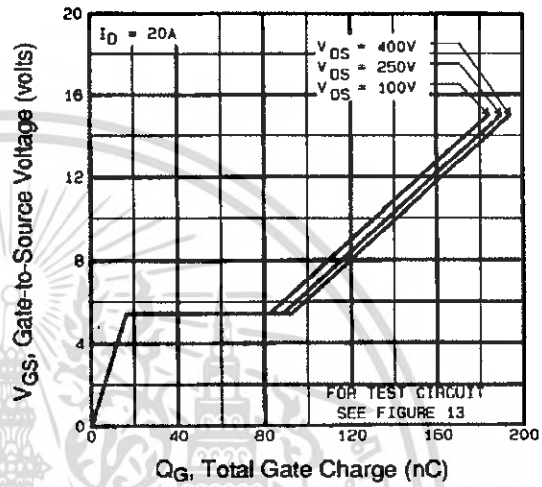


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

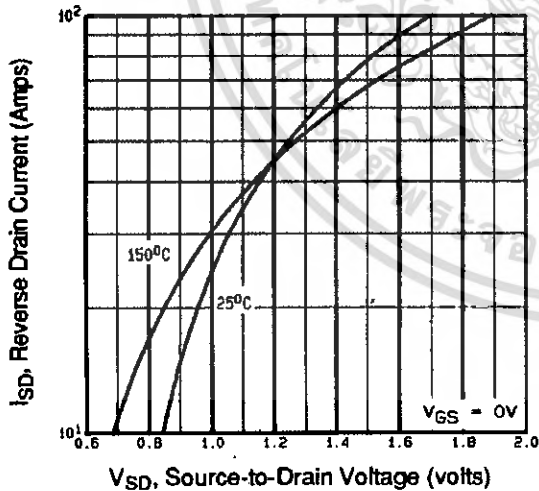


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

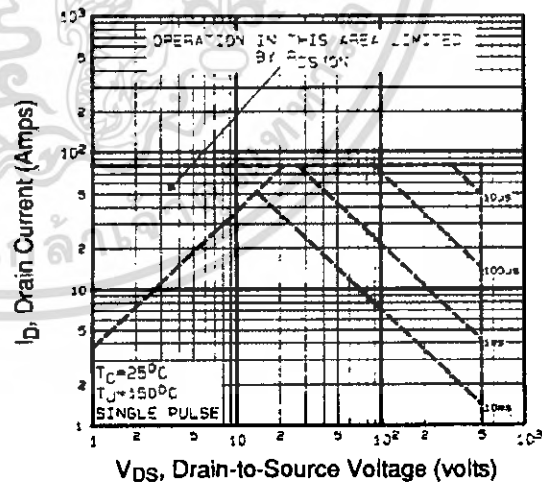


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

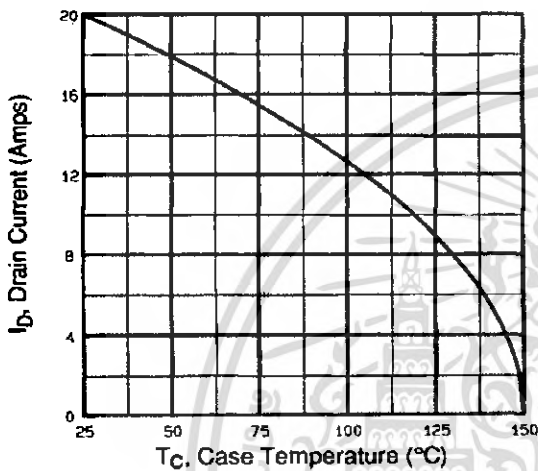


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

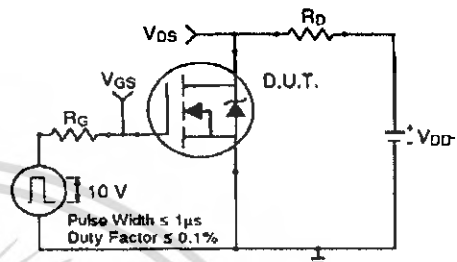


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

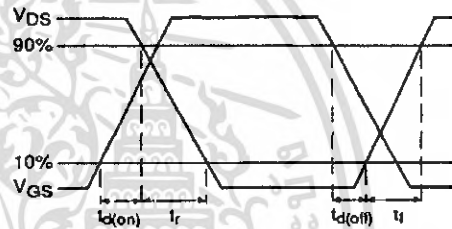


Fig 10b. Switching Time Waveforms

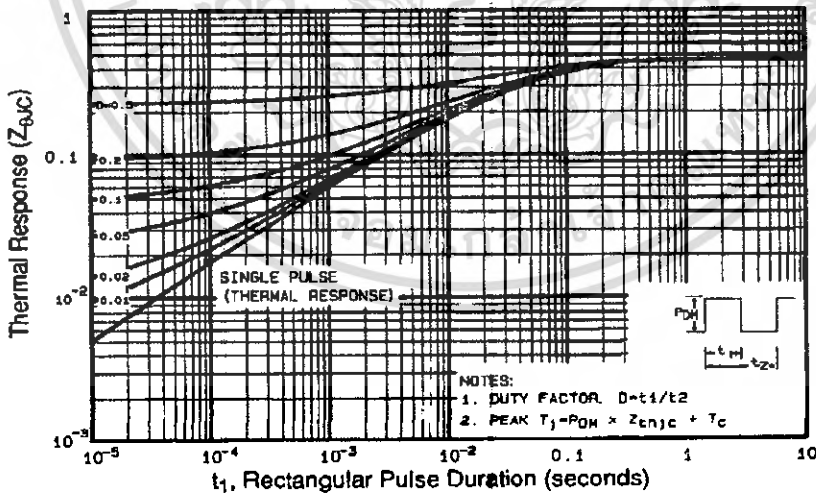


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRFP460PbF

International
IR Rectifier

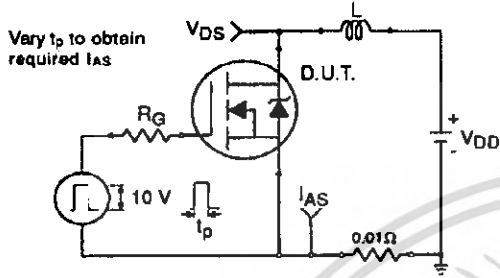


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

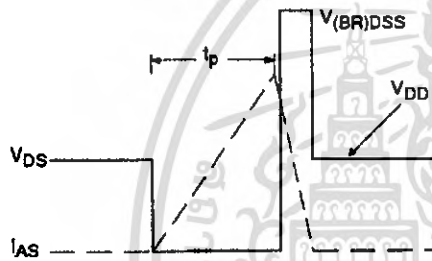


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

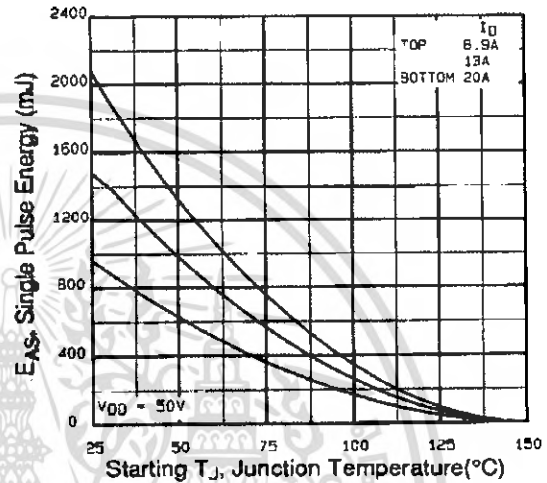


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

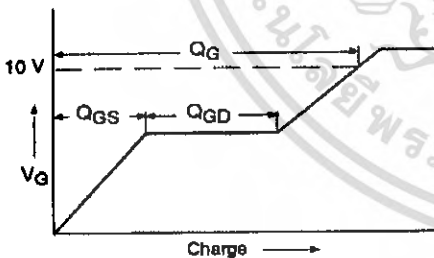


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

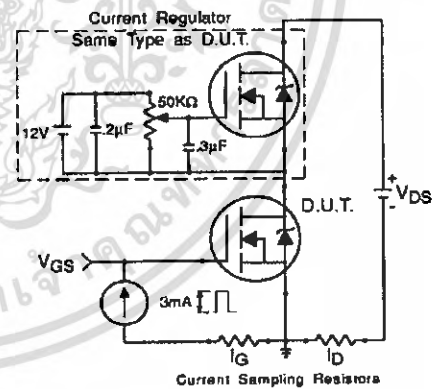


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

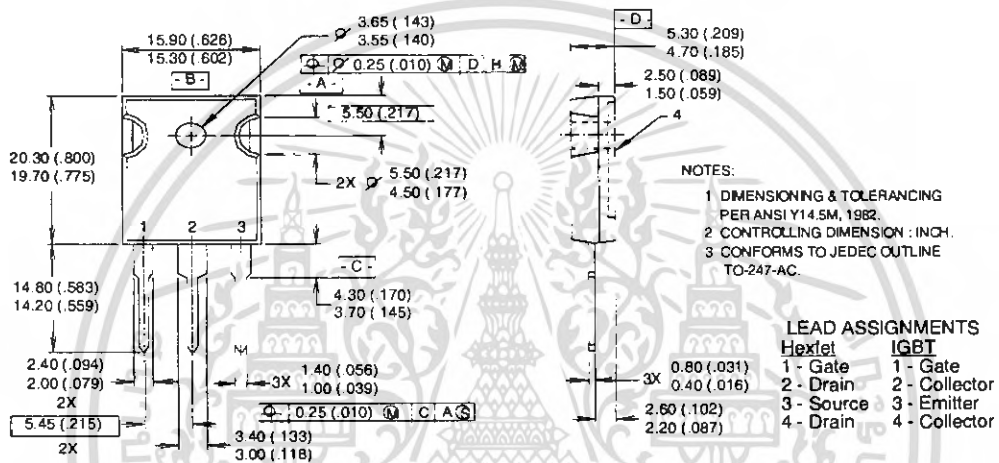
Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

International
IR Rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TO-247AC Package Outline

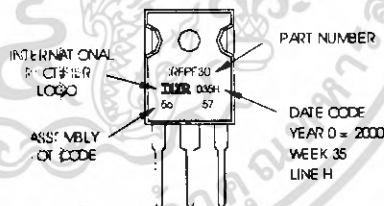
Dimensions are shown in millimeters (inches)



TO-247AC Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRFP460 WITH ASSEMBLY LOT CODE 5657 ASSEMBLED ON WW 35, 2000 IN THE ASSEMBLY LINE "H"

Note: "P" in assembly line position indicates "Lead-Free"



Data and specifications subject to change without notice.

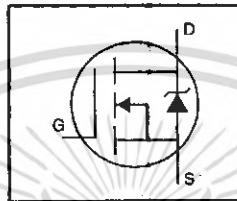
International
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at www.irf.com for sales contact information.12/03

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$V_{DSS} = 100V$

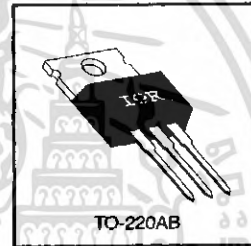
$R_{DS(on)} = 0.54\Omega$

$I_D = 5.6A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contributes to its wide acceptance throughout the industry.



DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units	
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	5.6	A	
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	4.0		
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	20		
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	43	W	
	Linear Derating Factor	0.29	W/°C	
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V	
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	100	mJ	
I_{AR}	Avalanche Current ③	5.6	A	
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ④	4.3	mJ	
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ⑤	5.5	V/ns	
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C	
T_{STG}		Soldering Temperature, for 10 seconds		300 (1.6mm from case)
		Mounting Torque, 6-32 or M3 screw		10 lbf·in (1.1 N·m)


Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	3.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	62	


IRF510



Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

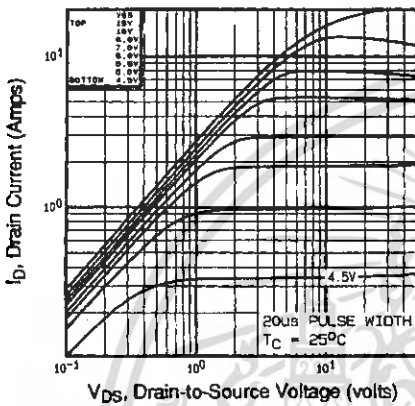
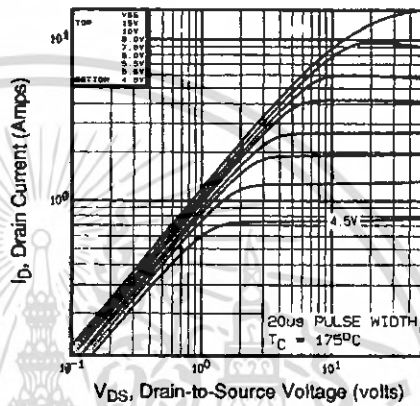
Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	V _{GS} =0V, I _D =250μA
ΔV _{(BR)DSS} /ΔT _J	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D =1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.54	Ω	V _{GS} =10V, I _D =3.4A ③
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} =V _{GS} , I _D =250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	1.3	—	—	S	V _{DS} =50V, I _D =3.4A ④
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} =100V, V _{GS} =0V
		—	—	250		V _{DS} =80V, V _{GS} =0V, T _J =150°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} =20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V _{GS} =-20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	8.3	nC	I _D =5.6A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	2.3		V _{DS} =80V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	3.8		V _{GS} =10V See Fig. 6 and 13 ④
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	6.9	—	ns	V _{DD} =50V
t _r	Rise Time	—	16	—		I _D =5.6A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	15	—		R _G =24Ω
t _f	Fall Time	—	9.4	—		R _D =8.4Ω See Figure 10 ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact 
L _S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	180	—	pF	V _{DS} =0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	81	—		V _{DS} =25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	15	—		f=1.0MHz See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

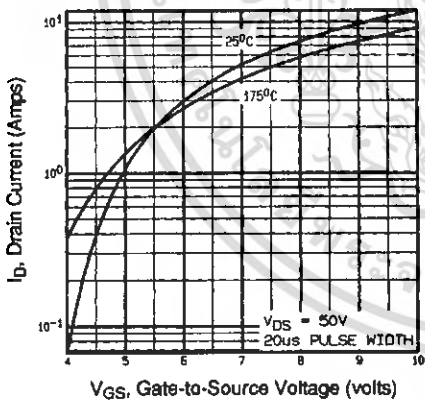
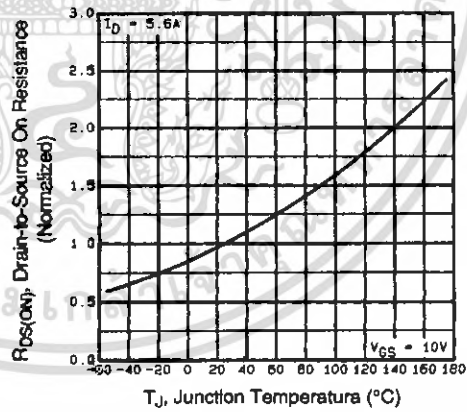
Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	5.6	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	20		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	2.5	V	T _J =25°C, I _S =5.6A, V _{GS} =0V ②
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	100	200	ns	T _J =25°C, I _F =5.6A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	0.44	0.88	μC	di/dt=100A/μs ③
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S +L _D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② V_{DD}=25V, starting T_J=25°C, L=4.8mH R_G=25Ω, I_{AS}=5.6A (See Figure 12)
- ③ I_{SDS}5.6A, di/dt575A/μs, V_{DD}≤V_{(BR)DSS}, T_J≤175°C
- ④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=175^\circ\text{C}$

DATA SHEETS


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

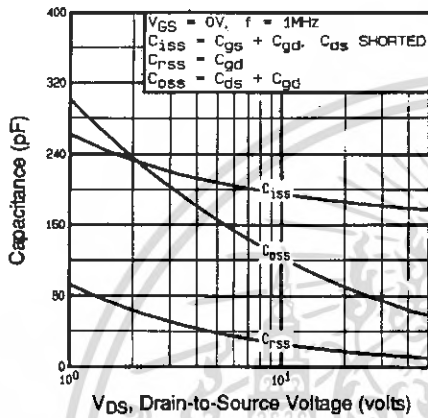


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

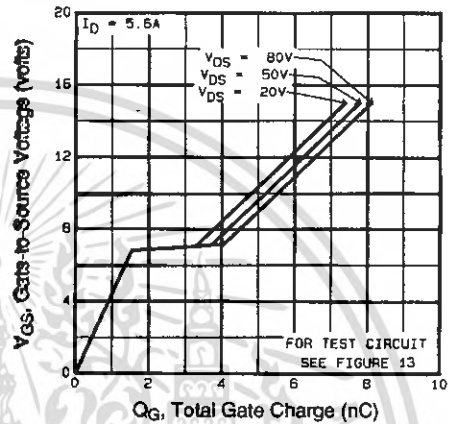


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

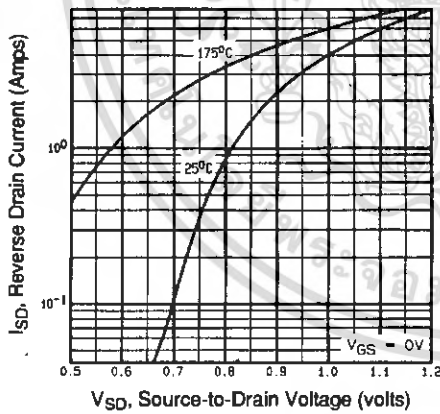


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

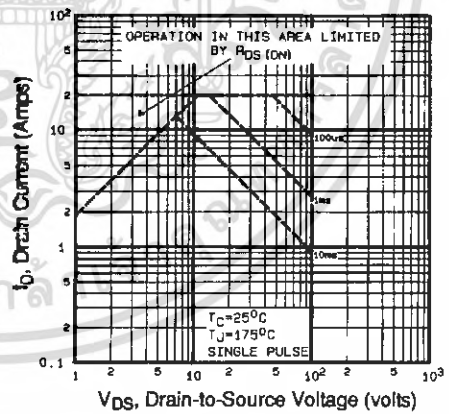


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

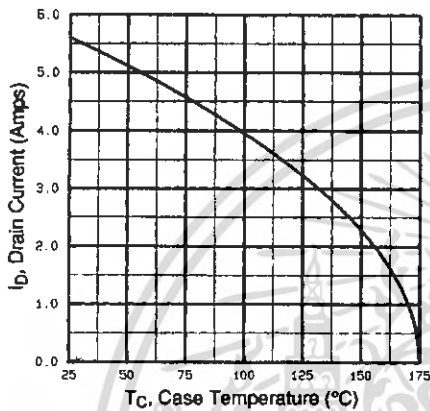


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

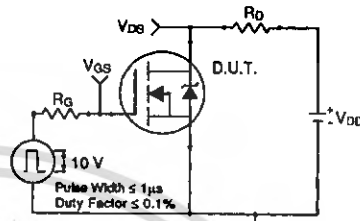


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

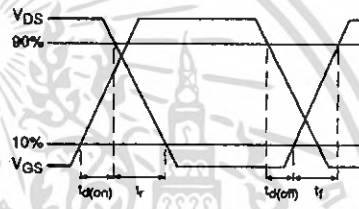


Fig 10b. Switching Time Waveforms

DATA SHEETS

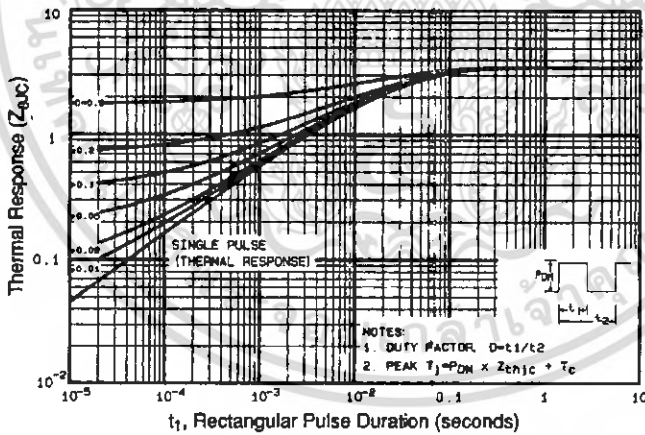


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

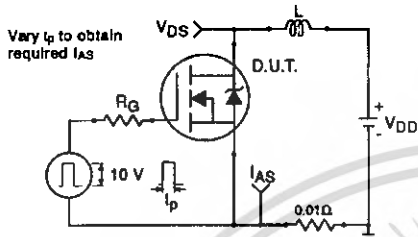


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

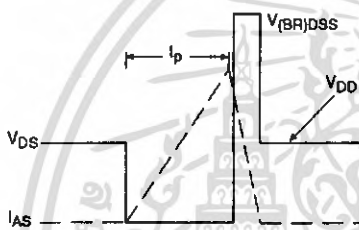


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

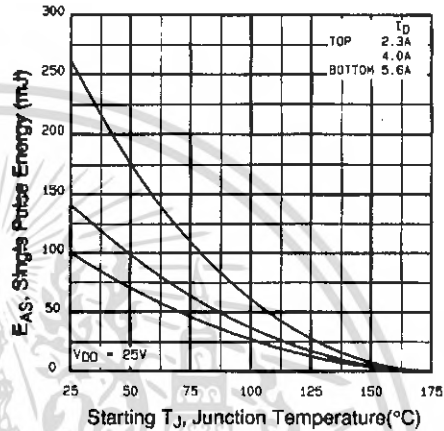


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

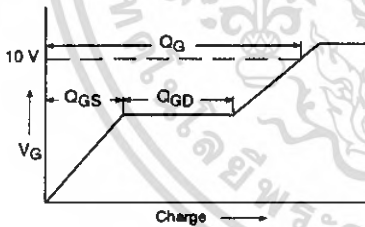


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

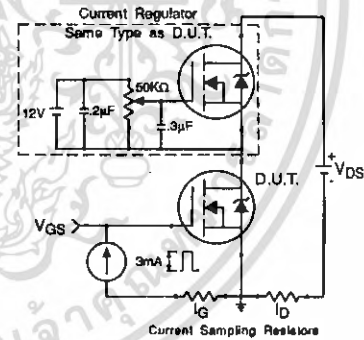


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1509

Appendix C: Part Marking Information – See page 1516

Appendix E: Optional Leadforms – See page 1525

**International
IGR Rectifier**