

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ PWM อินเวอร์เตอร์
PWM Induction Motor Drive



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 73010
วัน,เดือน,ปี..... 27 ส.ย. 2550

b. 1127630A
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ PWM อินเวอร์เตอร์

PWM Induction Motor Drive



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

อ. ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ PWM อินเวอร์เตอร์

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย กิตติพงษ์ ยอดหล้า
 2. นาย ชัยวุฒิ ยิ่งมีมา
 3. นาย พันศักดิ์ ทิพย์โกสม
 4. นาย ไพรัช แซ่ลี

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้ PWM อินเวอร์เตอร์

นาย กิตติพงษ์ ยอดหล้า

นาย ชัยวุฒิ ยิ่งมีมา

นาย พันศักดิ์ ทิพย์โกสุม

นาย ไพรัช แซ่ลี

รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

ปริญาานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ space vector pulse width modulation (SVPWM) ควบคุมการสวิตช์ของ MOSFETทำให้การทำงานของสวิตช์แบ่งออกเป็น 8 สถานะ 6 sector และสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมไปถึงสามารถคงที่แรงบิดได้ในช่วงความถี่ต่ำ ๆ ไปจนถึงความถี่เบส โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบ v/f เพื่อควบคุม flux ให้คงที่ส่งผลให้แรงบิดคงที่ตามไปด้วย ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สร้างสัญญาณมอดูเลตก็คือไมโครคอนโทรลเลอร์ DSPIC 30F4011 และยังทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดทั้งวงจรป้องกันและส่วนของการแสดงผล และในส่วนของไฟเลี้ยงจะใช้เป็น Switching power supply ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PWM Induction Motor Drive

Kittipong Yodla

Chaiwut Yingmema

Pusak Tipgosum

Pairat Sealee

Assoc.Prof.Dr. Vijit Kinares Advisor

Chaitat Maneein Advisor

2007

ABSTRACT

This thesis proposes a 3 phase induction motor drive using space vector pulse width modulation (SV PWM) voltage source inverter. The switch control of MOTFET can divide into 8 states and 6 sectors that can control the speed of motor including constant torque in low frequency up to base frequency range by controlling V/f for constant flux resulting in constant torque as well. The equipment for generating PWM signal is a microcontroller DSPIC 30F4011 that controls the whole system including protection circuit and display unit. A switching power supply provides all electronic equipment for electronic source.

กิตติกรรมประกาศ

การที่ปริญญาโทและโครงการสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น กระผมและคณะขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ และ อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนคณะอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุก ๆ ท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำโครงการนี้ เพื่อให้โครงการนี้สามารถที่จะบรรลุผลลุล่วงและสำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้จัดทำโครงการต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือโดยเฉพาะพีตัวเล็กที่ให้การช่วยเหลือเป็นอย่างดีโครงการ รวมไปถึงพี่ปริญญาโทอีกหลาย ๆ คนที่ให้คำปรึกษา และต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการทำโครงการที่คอยช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำโครงการต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของพวกเรา ผู้ที่มีพระคุณสูงสุดที่เป็นผู้ให้โอกาสในการศึกษา ที่คอยส่งเสียเงินให้ผู้จัดทำโครงการศึกษาจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III
สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.2 ขอบเขตโครงการ.....	2
1.2.1 พิกัดกำลังและระบบการควบคุมของวงจร.....	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำเกี่ยวกับทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	3
2.1.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.1.2 วงจรสมมูลย์.....	5
2.1.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูลย์.....	8
2.1.4 วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	10
2.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	17
2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	18
2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	19
2.2.3 อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์.....	19
2.2.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	24
2.2.5 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า สามเฟสแบบพิดับเบิลยูเอ็ม.....	24
2.2.6 เทคนิคการมอดูเลชันขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส.....	29
2.2.7 เทคนิค space vector pulse width modulation (SVPWM).....	29
บทที่ 3 การออกแบบและสร้าง	
3.1 ส่วนวงจรกำลัง.....	40
3.1.1 การออกแบบและสร้างชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	41
3.1.2 การออกแบบและสร้างชุดอินเวอร์เตอร์.....	44
3.2 ฟังก์ชันการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	44
3.3 ส่วนวงจรควบคุม.....	48
3.3.1 การเปลี่ยนค่า V/f	52
3.3.2 การเปลี่ยนค่าความถี่(f).....	52
3.4 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้ทำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลองที่ได้จากอินเวอร์เตอร์เมื่อนำไปควบคุมมอเตอร์.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 บทสรุป.....	69
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.3 เสนอแนวทางที่จะดำเนินการ.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงวงจรสมมุติต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.2 วงจรสมมุติแบบใกล้เคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.3 วงจรอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
2.4 วงจรการควบคุมแรงดันด้านสเตเตอร์.....	11
2.5 กราฟแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	11
2.6 การควบคุมความเร็วแบบป้อนกลับพลังงาน.....	13
2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสสเตเตอร์กับความถี่.....	14
2.8 กราฟแสดงแรงบิด-ความเร็วมอเตอร์เมื่อควบคุมแบบ VVVF.....	15
2.9 บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	16
2.10 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	17
2.11 วงจรกำลังของ PWM อินเวอร์เตอร์.....	19
2.12 การนำคลื่นไซน์ $V_{control}$ กับคลื่น สามเหลี่ยม V_{tri} มาเปรียบเทียบก็จะได้ สัญญาณพัลส์ที่นำมาควบคุมการสวิตช์พิจารณาเพียง 1 เฟส.....	19
2.13 คลื่น PWM แบบโอเวอร์มอดูเลชัน.....	21
2.14 แสดงสเปคตรัมของรูปคลื่นPWMแบบโอเวอร์มอดูเลชัน เมื่อ $ma=1.25$, $mf = 15$	21
2.15 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	22
2.16 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสและสเปคตรัมฮาร์โมนิก.....	25
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{LL}/V_0 กับ ma ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	26
2.18 สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่สถานะนำกระแสและไม่นำกระแส.....	28
2.19 หกเหลี่ยมแรงดันของสเปซเวกเตอร์.....	29
2.20 การวนลูบ ในเซ็คเตอร์.....	31
2.21 timing diagram ของสวิตช์ S1,S3,S5 (กึ่งบน).....	35
2.22 ตัวอย่างของการเปรียบเทียบสัญญาณมอดูเลต.....	36
2.23 ลักษณะของแรงดันเฟสเฉลี่ยและแรงดันเฉลี่ยระหว่างสายที่ได้ (PU).....	37
2.24 ลักษณะของแรงดันไลน์ output/phase.....	37
2.25 ลักษณะของกระแสไลน์ output/phase	38
3.1 วงจรกำลัง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		
3.2	กรณีไม่มีวงจรมีอินริช.....	43
3.3	กรณีมีอินริช.....	43
3.3	MOSFET.....	44
3.4	ทอร์กบุงสต์ด้วยมือ.....	45
3.5	ทอร์กบุงสต์อัตโนมัติ.....	45
3.6	(ก) ตั้งเวลาการเร่งความเร็วไว้วายาวพอ.....	46
	(ข) ตั้งช่วงเวลาการเร่งไว้สั้นเกินไป.....	46
3.7	แสดงการตั้งค่าเวลาในการลดความเร็วเหมาะสม.....	47
3.8	ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้.....	49
3.9	แผนผัง (Flow chart) ของโปรแกรม.....	50
3.10	สามเหลี่ยมผันเสี้ยว.....	51
3.11	วงจรมูลฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์.....	53
4.1	คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 20HZ.....	54
4.1	สเปคตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 20HZ.....	54
4.2	คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 20 HZ.....	55
4.2	สเปคตรัมของกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 20 HZ.....	55
4.3	คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 30HZ.....	56
4.3	สเปคตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 30HZ.....	56
4.4	คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 30 HZ.....	57
4.4	สเปคตรัมของกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 30 HZ.....	57
4.5	คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50HZ.....	58
4.5	สเปคตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50HZ.....	58
4.6	คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 HZ.....	59
4.6	สเปคตรัมของกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 HZ.....	59
4.7	คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 70HZ.....	60
4.7	สเปคตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 70HZ.....	60
4.8	คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 70 HZ.....	61
4.8	สเปคตรัมของกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ที่ความถี่ 70 HZ.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VII

สารบัญรูป(ต่อ)

4.9	สัญญาณแรงดันและกระแสระหว่างไลน์ที่ความถี่ 25 HZ.....	62
4.10	สัญญาณแรงดันและกระแสระหว่างไลน์ที่ความถี่ 50 HZ.....	63
4.11	สัญญาณแรงดันและกระแสระหว่างไลน์ที่ความถี่ 70 HZ.....	63
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงความถี่กับแรงดัน.....	64
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด กับ ความเร็วรอบของมอเตอร์.....	64
4.14	แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 0 %.....	65
4.15	แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 20 %.....	65
4.16	แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 40 %.....	66
4.17	แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 60 %.....	66
4.18	แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 80 %.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIII

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สถานะแรงดันของอินเวอร์เตอร์2.2 สรุปรูปแบบการสวิตช์.....	31
2.2 ค่าเวลาที่ไต่ในแต่ละเซ็คเตอร์.....	34
3.1 เปรียบเทียบ ซี พี ยู ตระกูล dsPIC30Fxxxx.....	47
4.2 ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด(Torque)และความเร็วรอบ(Speed).....	64
4.3 บันทึกค่ากำลังอินพุต กำลังเอาต์พุต และ ค่าประสิทธิภาพ.....	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความจำเป็น และเป็นที่ยอมรับใช้งานกันมากในปัจจุบันทั้งนี้เนื่องมาจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีคุณสมบัติที่ดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกล่าวคือมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนทานมีขนาดเล็กและราคา ถูกกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขนาดพิกัดกำลังเท่าๆกัน และไม่มีปัญหายุ่งยากเกี่ยวกับการบำรุงรักษา แบรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถควบคุมเร็วรอบและควบคุมแรงบิดได้ เพื่อที่จะใช้ในทางด้านอุตสาหกรรม

ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำมีอยู่หลายแบบหลายวิธีด้วยกันที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้งานทั่วไปจะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ในการควบคุม ซึ่งอินเวอร์เตอร์ (inverter) ที่ใช้ควบคุมก็มีอยู่หลายวิธีแต่ที่นิยมใช้ส่วนมากจะเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ซึ่ง จะเป็นการปรับอัตราส่วน V/f ของมอเตอร์ให้คงที่โดยการปรับแอมพลิจูดการมอดูเลตและความถี่ของสัญญาณที่จะนำไปควบคุมลำดับการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ซึ่งข้อดีของ PWM อินเวอร์เตอร์จะมีข้อดี คือ ให้เอาท์พุทใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากกว่าเทคนิคอื่นๆและช่วยลดทอนสัญญาณฮาร์โมนิกอันดับต่ำเนื่องจาก PWM อินเวอร์เตอร์จะเป็นการปรับอัตราส่วน V/f เพื่อรักษา ϕ_{avg} เพื่อที่จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีความคงที่ การลำดับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์จะเกิดจากการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้าง PWM (pulse width modulation) มาควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังคือ มอสเฟต , ไอจีบีที , ทรานซิสเตอร์ แต่ในโรงงานนี้จะใช้มอสเฟตมาใช้ในการนำกระแสและหยุดนำกระแส

ในโรงงานนี้จะเป็นการใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส มาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่เป็น PWM โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM (space vector pulse width modulation) โดยจะเป็นการควบคุมความเร็วรอบแบบ V/f และคงที่ ϕ_{avg}

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM (space vector pulse width modulation)
2. เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้การควบคุมด้วยอัตราส่วน v/f
3. การศึกษาไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC 30F4011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ขอบเขตโครงการ

ศึกษาและออกแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคมอดูเลตแบบ SVPWM ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC โดยใช้อุปกรณ์การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ใช้เป็น MOSFET โมดูลและใช้แหล่งจ่ายสวิตช์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.2.1 พิกัดกำลังและระบบการควบคุมของวงจร

1. ใช้ขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 1 hp 220/360 V แบบ squirrel cage rotor
2. MOSFET พิกัด 500/14 A 180 W
3. ส่วนวงจรควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F4011 ควบคุมการสวิตช์

ของอินเวอร์เตอร์

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
 - 1.1 ทฤษฎีอินเวอร์เตอร์
 - 1.2 ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 - 1.3 การ simulation โดย matlab และ orcad
2. ออกแบบและทดลอง
 - 2.1 ออกแบบวงจร MOSFET
 - 2.2 ออกแบบวงจรแหล่งจ่าย
 - 2.3 ออกแบบวงจร dsPIC 30F4011
 - 2.4 เขียนโปรแกรมและวัดสัญญาณมอดูเลชั่น
 - 2.5 ทดลองและบันทึกผล

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

มีความรู้ในเรื่องของหลักการทำงานอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM (space vector pulse width modulation) รวมไปถึงการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC 30F4011

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำเกี่ยวกับทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนอยู่กับที่ (stator) และ ส่วนหมุน (rotor) ส่วนอยู่กับที่มีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์มาเจอร์ (armature) ที่บรรจุอยู่ในสลอต โรเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. แบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor) แกนโรเตอร์ทำด้วยแผ่นเหล็ก ลามิเนทเซาะผิวด้านนอกให้เป็นร่องโดยรอบเรียกว่า สลอต (slot) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับ สอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล็กนี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ นำแกนโรเตอร์ไปวางในพิมพ์ เพื่อฉีดลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้ลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสลอต และมีครีบยื่นออกไปสองข้าง เพื่อใช้เป็นใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างจาก กรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับสลลิปริง (slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านอยู่ มีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจาก สเตเตอร์

2.1.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ โดยส่วน โรเตอร์จะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟโดยผ่านส่วนสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กอยู่ในแอร์แกป (air gap) ซึ่งอยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และ โรเตอร์ สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ตามสมการ

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

โดยที่ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)
 f คือ ความถี่ที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์ (Hz)
 p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์

โดยขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ แต่ในขณะที่โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของ

สนามแม่เหล็กจะไม่มีแรงเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ดังนั้น จะไม่มีแรงบิด (torque) เกิดขึ้น และขณะที่โรเตอร์มีความเร็ว N_r ใดๆ ที่มีความแตกต่างจากความเร็ว N_s จะทำให้เกิดความเหนี่ยวนำขึ้นบนโรเตอร์และทำให้เกิดแรงบิด ความแตกต่างสัมพัทธ์ของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่า สลิป (slip)

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.2)$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.3)$$

โดยที่ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์
 ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์
 s คือ slip

เมื่อจ่ายแรงดันให้ขดลวดอาร์มาเจอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะหมุนกวาดผ่านขดลวดของโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยความเร็วสูงสุด (ความเร็วซิงโครนัส) แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำนั้นจะมีค่าสูงสุด และขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดในโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง

ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ ($N_r = 0$) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในโรเตอร์จะเท่ากับความถี่ของสาย กรณีนี้สลิปเท่ากับ 1 และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยอัตราที่ฟลักซ์แม่เหล็กกวาดผ่านตัวนำจะช้าลง ค่าสลิปจึงลดลงด้วย ในสภาพเช่นนี้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนกับสลิป เขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = sE_2 \quad (2.4)$$

$$X_r = sX_2 \quad (2.5)$$

ในทำนองเดียวกัน ความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปดังนี้

$$f_r = sf \quad (2.6)$$

เมื่อ	E_1	คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ
	E_2	คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่
	X_r	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟส ขณะโรเตอร์อยู่กับที่
	f_r	คือ ความถี่ของโรเตอร์
	f	คือ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์จะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำกำลังอินพุตของมอเตอร์ไม่ได้เกิดจากการจ่ายไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการถ่ายทอดกำลังผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) ด้วยการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสก็คือ $E_r = SE_2$ ถ้าเอาแรงเคลื่อนจำนวนนี้หารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ต่อเฟสที่โรเตอร์ (Z_2) ก็จะได้กระแสโรเตอร์ต่อเฟส (I_2) ไหลอยู่ในโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ค่าสลิปใด ๆ ได้ดังนี้

$$I_2 = \frac{SE_2}{Z_2} \quad (2.7)$$

$$= \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + S^2 X_2^2}} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.7 ใช้คำนวณหาค่ากระแสโรเตอร์ได้ทั้งขณะมอเตอร์เริ่มหมุน (start) และเมื่อหมุนอยู่ที่ค่าสลิปใด ๆ ก็ได้ โดยขณะเริ่มหมุนให้แทนค่าสลิป $S=1$ ลงในสมการ 2.7 กระแสโรเตอร์ขณะมอเตอร์เริ่มหมุนดังนี้

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.9)$$

2.1.2 วงจรสมมูลย์

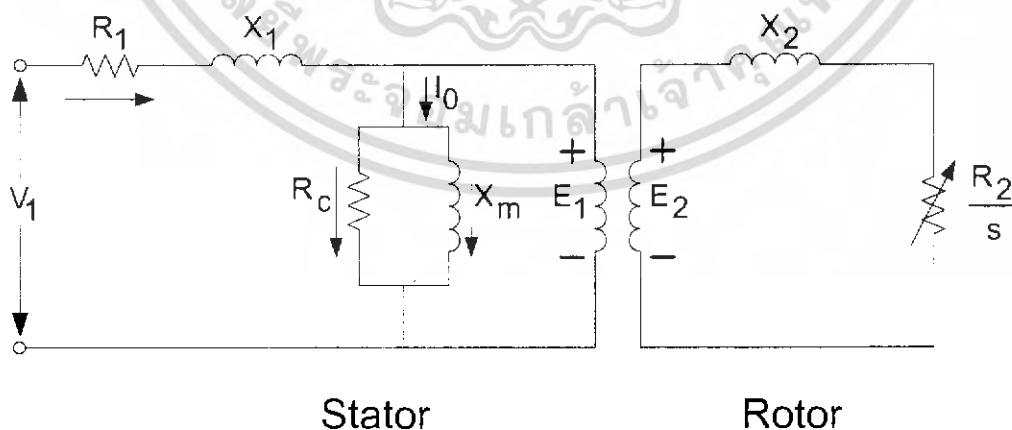
เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำนี้อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลง จะต่างกันก็ตรงที่มอเตอร์มีส่วนที่ 2 (secondary) เคลื่อนที่หรือหมุนได้ ดังนั้น จึงเขียนวงจรสมมูลย์ได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงธรรมดา ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากรูปที่ 2.1 เป็นวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

X_m	คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก
X_1	คือ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
X_2	คือ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
R_1	คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
R_2	คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
R_c	คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก
I_c	คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
I_m	คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 2.1 กระแส I_0 ไหลในขดลวดสเตเตอร์เป็นกระแสส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (core loss) และการสูญเสียในขดลวด (copper loss) การเปลี่ยนแปลงค่าน้อยมากไม่ว่าไหลของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้น ถ้าย้ายวงจรขนานที่ I_0 ไหลผ่านมาไว้ที่ด้านทางของวงจรสมมูลย์จะทำให้วิเคราะห์ทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำง่ายขึ้นโดยมีเหตุผลดังนี้คือ

1. การย้ายวงจรขนานที่กระแส I_0 ไหลผ่านนี้จะทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย เพราะ R_1 และ X_1 มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ X_m แต่จะได้วงจรสมมูลย์ที่พิจารณาง่าย

2. วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะไม่คิดค่า I_0 ซึ่งเป็นส่วนประกอบเล็กๆเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่พิกัด แต่ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำเช่นนั้นไม่ได้ เพราะค่า I_0 มีค่าถึง 30 – 50 % ของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด ทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม X_m เป็นจำนวนมาก จึงต้องคงค่า X_m ไว้ในวงจรสมมูลย์



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถย้ายข้างรวมกันได้ ถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ ในทำนองเดียวกัน ถ้าทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (turn ratio : a) ก็จะสามารถย้ายค่าในวงจรสมมูลย์ขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นกันในที่นี้ต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงโรเตอร์มายังวงจรเทียบเคียงสเตเตอร์ ซึ่งหาค่าต่างๆของวงจรสมมูลย์ได้ดังนี้ คือ

$$E'_2 = aE_2 = E_1 \tag{2.10}$$

เมื่อ E'_2 คือ แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \tag{2.11}$$

เมื่อ I'_2 คือ กระแสของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R'_2 = a^2R_2 \tag{2.12}$$

$$X'_2 = a^2X_2 \tag{2.13}$$

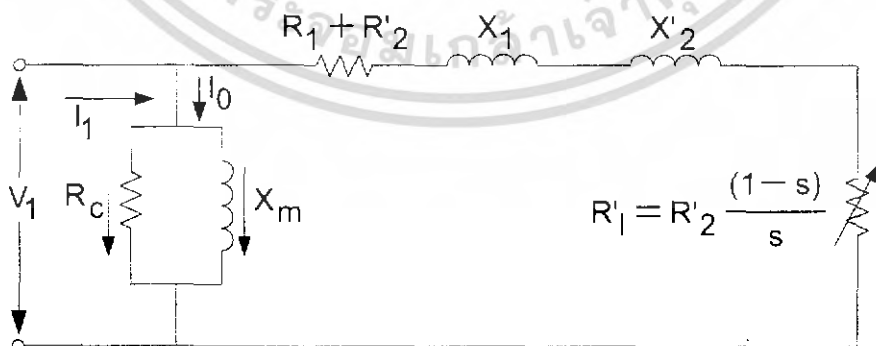
เมื่อ R'_2 คือ ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

X'_2 คือ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.1 ค่าของ $\frac{R_2}{s}$ สามารถแยกแถมออกได้เป็น

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{R_2}{s} + R_2 \tag{2.14}$$

$$= R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s} \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์แบบใกล้เคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.10 – 2.14 มาเขียนวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะ
ได้ดังรูปที่ 2.2 และจากรูปที่ 2.2 ส่วนโหลดความต้านทาน มีค่าเท่ากับ R'_L

$$R'_L = R'_2 \frac{(1-s)}{s} \quad (2.16)$$

2.1.3 การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลย์

กำลังขาเข้าของมอเตอร์ $P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta \quad (2.17)$

กำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ $P_{ls} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.18)$

กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศ (air gap) $P_g = 3I_2'^2 R_2' \quad (2.19)$

กำลังสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ $P_{lr} = 3I_2'^2 R_2' \quad (2.20)$

กำลังไฟฟ้าขาออก $P_o = P_g - P_{lr} = \frac{3I_2'^2 R_2' (1-s)}{s} \quad (2.21)$

กำลังที่เพลลา $P_{sh} = P_o - P_{fw} \quad (2.22)$

P_{fw} คือ กำลังที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและกำลังลมต้าน

แรงบิดของมอเตอร์ $T_e = \frac{P_o}{\omega_r} = \frac{3I_2'^2 R_2' (1-s)}{s(1-s)} \quad (2.23)$

$$= \frac{3I_2'^2 R_2'}{s\omega_s} \quad (2.24)$$

ซึ่ง

$$\omega_s = \frac{2\pi Ns}{60} = \frac{2\pi}{60} \left[\frac{120f}{p} \right] = \frac{4\pi f}{p} \quad (2.25)$$

โดย P คือ จำนวนขั้วของมอเตอร์

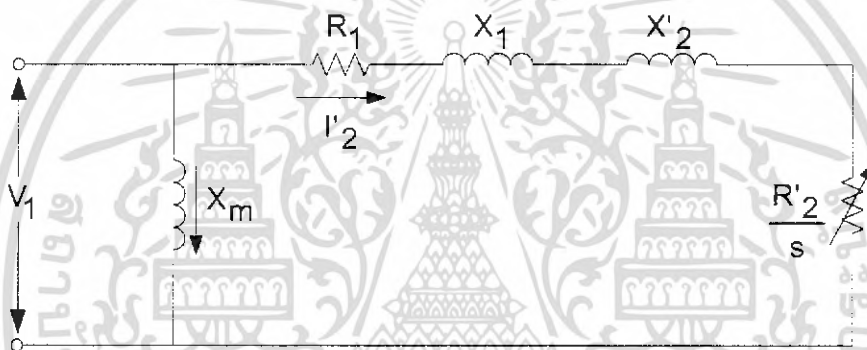
แทนสมการที่ 2.25 ในสมการที่ 2.23 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดของมอเตอร์
$$T = \frac{3I_2^2 R_2'}{4\pi f s} \quad (2.26)$$

วงจรสมมูลย์ที่อยู่ในรูปที่ 2.1 สามารถทำให้ง่ายขึ้นดังในรูปที่ 2.3 ซึ่งกระแส I_2' สามารถหาได้ดังนี้

$$I_2' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.3 วงจรอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สามารถหาค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดจากสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้

$$s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.28)$$

เมื่อไม่คำนึงถึงผลของพารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ คือ R_1 และ X_1 ซึ่งไม่มีผลต่อผลรวมของกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$I_2' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2')^2}} = \frac{SV_s}{\sqrt{(R_2')^2 + s^2 X_2'^2}} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_m = \frac{R_2}{X_2} \quad (2.30)$$

นำสมการที่ (2.29) และ (2.30) แทนในสมการที่ 2.26 จะได้แรงบิดสูงสุดดังสมการ

$$T_m = \frac{3P V_s^2}{8\pi f X_2} \quad (2.31)$$

โดยที่

$$\omega = 2\pi f \quad (2.32)$$

$$X_2 = 2\pi f L_2$$

ทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการ 2.29 จะได้

$$T_m = \frac{3P \left(\frac{V_s}{f} \right)^2}{16\pi^2 L_2} \quad (2.33)$$

จะเห็นได้ว่าแรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ก็ต่อเมื่อ $\left(\frac{V_s}{f} \right)$ หรือ ϕ คงที่ เนื่องจากความสัมพันธ์ $V_s \approx V$ และจาก $V = k\phi f$ หรือ $V/f = k\phi$ นั่นเอง ทำให้ได้ว่าการควบคุมความเร็วโดยการให้แรงบิดคงที่สามารถทำได้โดยรักษาให้ $\frac{V}{f}$ มีค่าคงที่นั่นเอง

2.1.4 วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วิธีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ เมื่อพิจารณาจากสมการความเร็วของมอเตอร์สมการที่ (2.32) ซึ่งมาจากสมการที่ (2.1) และ (2.2)

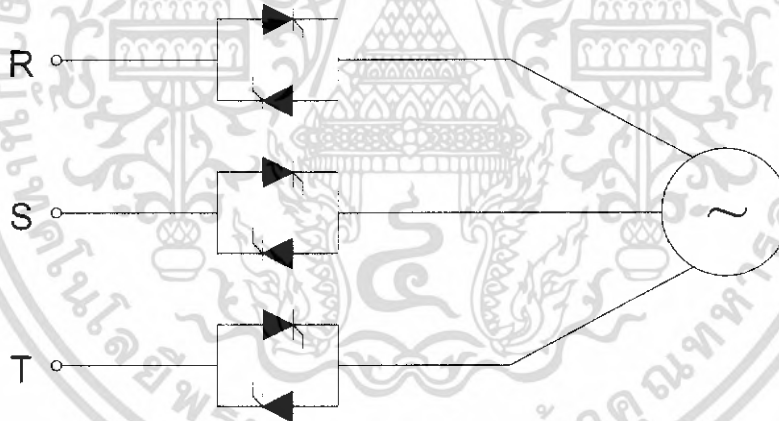
$$N_r = (1-s) \left(\frac{(120f)}{P} \right) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

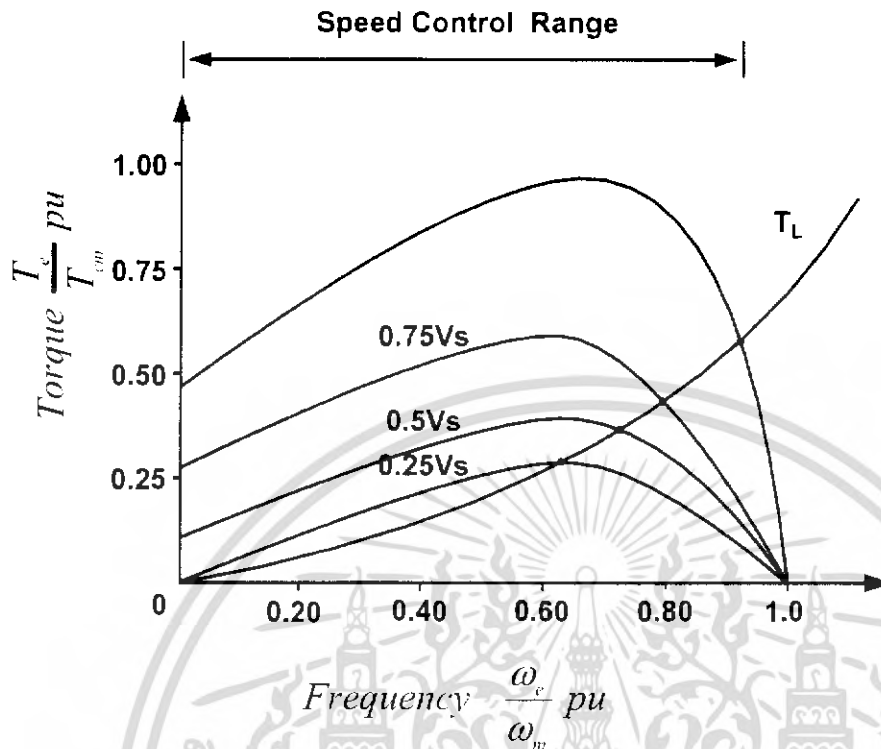
ดังนั้น การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดยการควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้า (f) สลิปของโรเตอร์ (S) และจำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ (p) วิธีที่ง่ายที่สุดคือการควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์ เพราะจะทำให้การควบคุมมีความต่อเนื่องในขณะที่การควบคุมโดยการเปลี่ยนจำนวนขั้วของมอเตอร์จะทำได้จำกัดและไม่ต่อเนื่องและใช้ได้กับมอเตอร์ที่ออกแบบไว้เป็นพิเศษเท่านั้น ส่วนการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการควบคุม สลิป จะทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำลง เพราะประสิทธิภาพของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับค่าสลิป

1. การควบคุมแรงดันของสเตเตอร์

การควบคุมแรงดันของสเตเตอร์นี้ จะควบคุมความเร็วได้ในช่วงแคบ และไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์เห็นย่นย่อที่ได้จากการควบคุมแรงดันสเตเตอร์นี้ แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแรงบิดจะเปลี่ยนตามแรงดันที่จ่ายให้ขดสเตเตอร์ของมอเตอร์ วงจรการควบคุมแรงดันทางด้านสเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรการควบคุมแรงดันด้านสเตเตอร์



รูปที่ 2.5 กราฟแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการควบคุมแรงดันของสเตเตอร์จะใช้การควบคุมแบบควบคุมเฟส (phase control) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีราคาถูก แต่ระบบจะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของกำลังสูญเสียในโรเตอร์ของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าของสลลิป (S) นอกจากนี้แล้วการสูญเสียในสเตเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสในสเตเตอร์ เมื่อสลลิปเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์รวมทั้งแรงบิดจะลดลงมาก โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ เพราะมีค่าสลลิปสูง นอกจากนี้ วิธีนี้ยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้นทั้งใน AC LINE และในตัวมอเตอร์เอง ทำให้มีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้นและยังทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ (power factor) ของระบบลดลงตามความเร็วของมอเตอร์ด้วย

จากข้อเสียที่ได้กล่าวมาทำให้การใช้งานของระบบควบคุมความเร็วโดยใช้การควบคุมแรงดันทางด้านสเตเตอร์ถูกจำกัดอยู่เฉพาะในระบบที่มีขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งต้องการแรงบิดเริ่มต้นต่ำ เช่น พัดลม หรือปั๊ม ซึ่งจะมีแรงบิดเพิ่มตามความเร็วกำลังสอง ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

2. การควบคุมสลลิปเพาเวอร์ (slip power control)

การควบคุมวิธีนี้จะทำโดยการควบคุมกำลังในโรเตอร์ซึ่งจะได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังออก (P_{mech}) และกำลังสูญเสียในโรเตอร์ (P_r) กับกำลังที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ (แอร์แกปเพาเวอร์ : P_g) ดังนี้

$$P_{\text{mech}} = (1-S)P_g \quad (2.35)$$

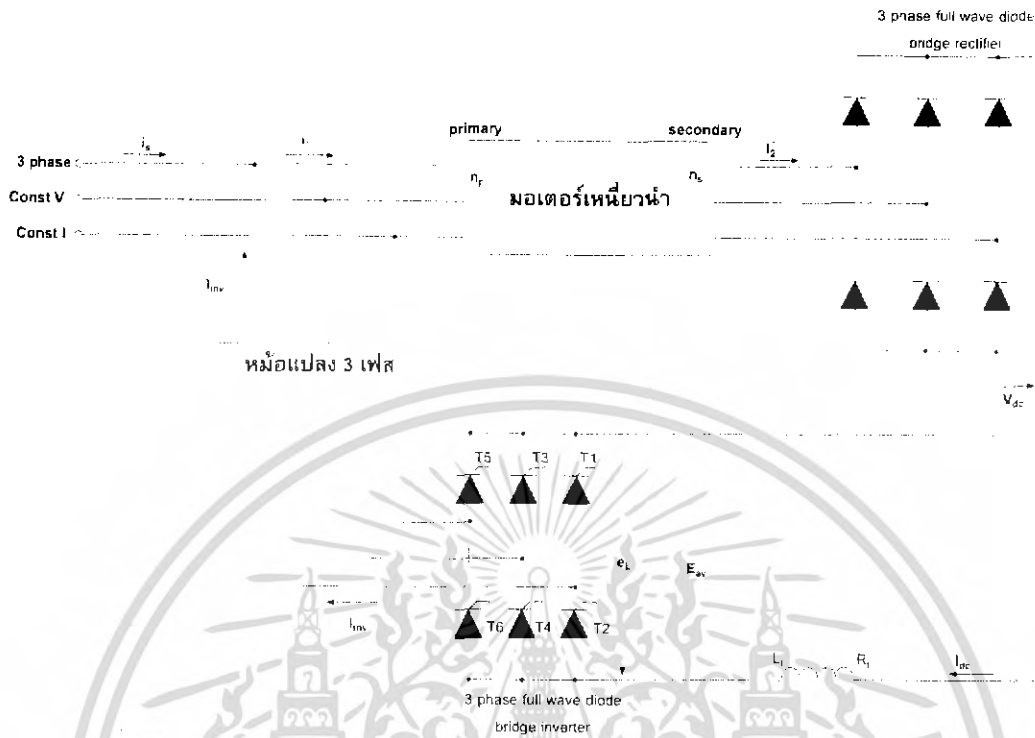
$$P_r = SP_g \quad (2.36)$$

$$\frac{P_g}{P_{\text{mech}}} = \frac{S}{(1-S)} \quad (2.37)$$

จากสมการเหล่านี้จะเห็นว่า ถ้าสามารถควบคุมอัตราส่วนระหว่างกำลังสูญเสียในโรเตอร์กับกำลังออกของมอเตอร์ก็สามารถควบคุมสลลิปของโรเตอร์ได้ เช่นในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาร์โรเตอร์ การควบคุมสลลิปของโรเตอร์ทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่ออยู่กับวงจรรโรเตอร์ การควบคุมวิธีนี้ถึงแม้ว่าจะทำได้ง่าย แต่มีข้อเสียในแง่ประสิทธิภาพ โดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ หรือที่ค่าสลลิปสูงๆ ดังเห็นได้จากอัตราส่วนของโรเตอร์เพาเวอร์ (rotor power ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังออก (P_{mech}) กับกำลังเข้าของโรเตอร์ P_g ตามสมการที่ 2.38

$$\text{rotor power ratio} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_g} = (1-S) \quad (2.38)$$

การที่ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าต่ำในย่านความเร็วต่ำ เนื่องจาก (P_r) เพิ่มขึ้นตามสลลิป อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมความเร็วด้วยการควบคุมสลลิปเพาเวอร์นั้นสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยจะเห็นจากหลักการเดิมว่าการปรับสลลิปจะทำโดยการปรับความต้านทานของโรเตอร์ แต่จะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปความร้อนสูง จึงเปลี่ยนมาเป็นการควบคุมสลลิปแบบป้อนกลับพลังงานแทน (slip energy-recovery) ดังรูปที่ 2.6

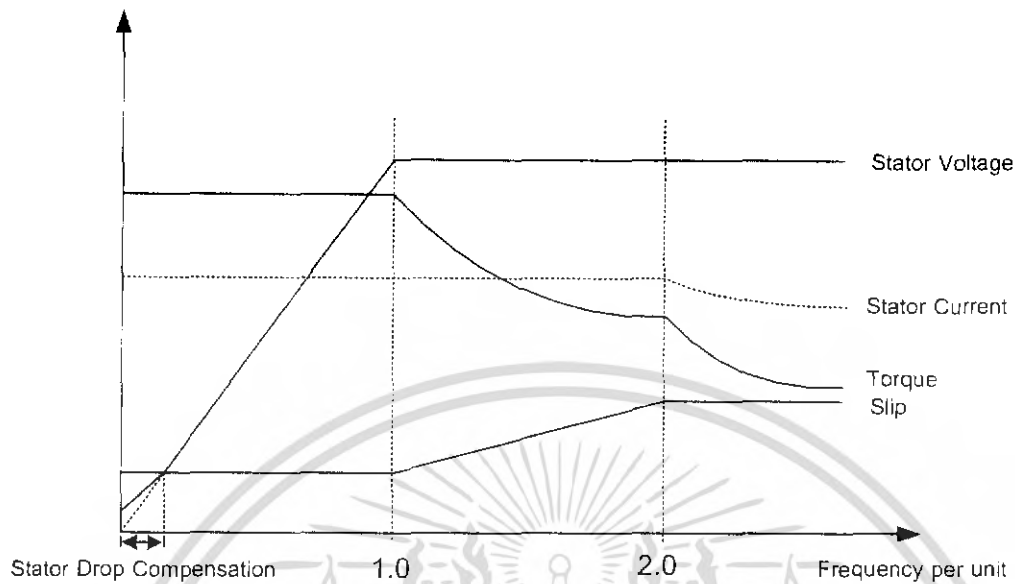


รูปที่ 2.6 การควบคุมความเร็วแบบป้อนกลับพลังงาน

โดยสามารถส่งผ่านกำลังจากโรเตอร์กลับเข้าสายส่ง โดยการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยการปรับมุมทริก (trigger angle) ให้ไทรสเตอร์

3. การควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่

เป็นเทคนิคที่รู้จักกันดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมแรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิด, กระแสเดเตอร์กับความถี่

ชนิดมอเตอร์ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติสลลิปต่ำ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วมอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กในแอร์แกปที่อยู่ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งการที่จะเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสสามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์ การเพิ่มความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเปลี่ยนความถี่ของอินเวอร์เตอร์อย่างเดียวนั้นจะทำให้สนามแม่เหล็กในแอร์แกปของมอเตอร์ลดลงด้วยสังเกตได้จากสมการที่ 2.36

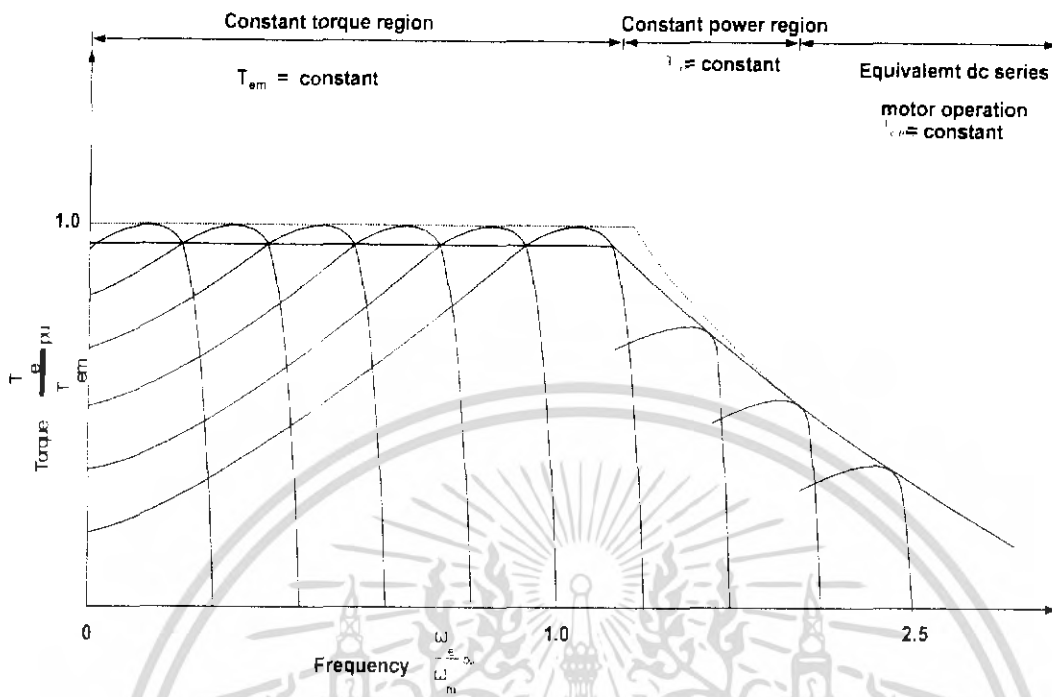
$$E = 4.44Nf\phi \tag{2.39}$$

$$\phi \propto \frac{E}{f}$$

จากสมการ (2.40)

$$T_m \propto \left(\frac{E}{f}\right)^2 \propto \phi^2$$

เมื่อแอร์แกปฟลักซ์ลดลงจะทำให้แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ลดลง แต่ในการที่จะรักษาสถาแม่เหล็กในแอร์แกปและแรงบิดสูงสุดให้คงที่ จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ด้วย เพื่อรักษาความสัมพันธ์ของ E/f ให้คงที่เพื่อให้แรงบิดสูงสุดคงที่นั่นเอง แต่การควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีแรงบิดสูงสุดคงที่ จะทำได้ในย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วพิกัดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงแรงบิด-ความเร็วมอเตอร์เมื่อควบคุมแบบ VVVF.

ในย่านความถี่ต่ำ การรักษาให้ V/f คงที่จะไม่เพียงพอที่จะทำให้แรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ ทั้งนี้ เพราะที่ความถี่ต่ำค่าความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้แรงดันตกคร่อมสูง เป็นผลให้มีการสูญเสีย ดังนั้น จะต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานของสเตเตอร์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความถี่เป็นไปตามเส้นทึบของกราฟรูปที่ 2.7 แทนการเปลี่ยนแปลงตามเส้นประ ซึ่งเป็นกราฟ คงที่

ส่วนในย่านความถี่สูงกว่าความถี่พิกัดจะไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่เนื่องจากไม่สามารถเพิ่มแรงดันให้มากกว่าแรงดันที่พิกัดได้เพราะจะเกิดความเสียหายแก่มอเตอร์ได้ดังนั้นจึงต้องคงที่แรงดันไว้ที่พิกัดเป็นเหตุให้แรงบิดสูงสุดลดลงเนื่องจากการลดลงของ สนามแม่เหล็กในแอร์แกปของมอเตอร์เห็นย่นำดังแสดงในรูปที่ 2.7 การควบคุมความเร็วในย่านนี้ กำลังออกสูงสุดของมอเตอร์เห็นย่นำจะมีค่าคงที่ด้วยการลดความเข้มของสนามแม่เหล็กเรียกว่าเป็นการทำงานในย่านกำลังคงที่ (constant region) หรือ (field weakening region) เนื่องจากการ ควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้จะเป็นการแปรเปลี่ยนทั้งความถี่และแรงดัน ทำให้สามารถเร่งความเร็วจากศูนย์ไปสู่ความเร็วที่ต้องการ โดยมีทอร์คสูงสุดคงที่ได้ แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์แบบนี้ไม่ได้เป็นรูปไซน์ ดังนั้นมอเตอร์จะได้รับแรงดันฮาร์โมนิกส์ ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในแอร์แกปด้วยความเร็วที่สูง

กว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดมาจากความถี่พื้นดามเนทอล (fundamental frequency) มาก แต่แรงดันฮาร์โมนิกของอินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดการสูญเสียในมอเตอร์มากขึ้น

2.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างระบบจ่ายไฟและมอเตอร์ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานที่สอดคล้องกับความต้องการของมอเตอร์ดังต่อไปนี้

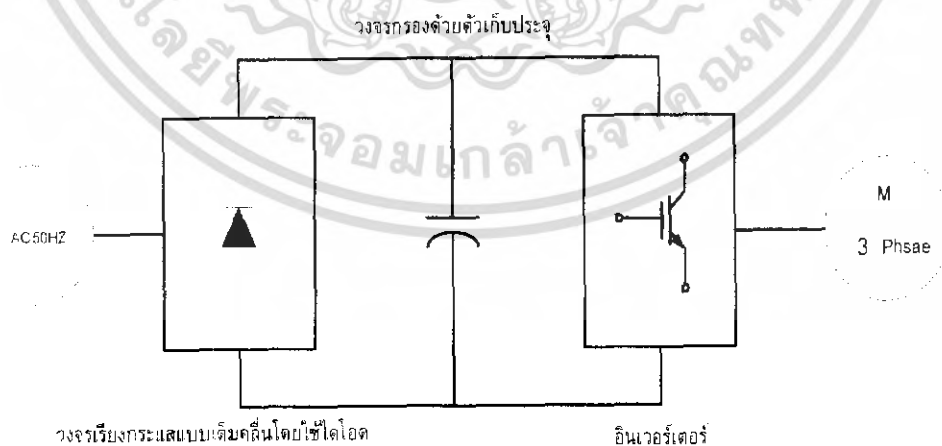
1. สามารถที่จะปรับความถี่ได้เป็นสัดส่วนกับความเร็วมอเตอร์ที่ต้องการ
2. สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตเพื่อรักษาอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ (V/f) ให้คงที่ตลอดช่วงแรงบิดคงที่ตามต้องการ

3. สามารถจ่ายกระแสได้ตามพิกัดที่ความถี่ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดที่ต้องการ

ในรูปที่ 2.9 แสดงหลักการพื้นฐานซึ่งแหล่งจ่ายไฟเข้า เอซี จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันดีซี โดยการใส่เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมแรงดันได้โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จำพวกไทรสเตอร์หรือแบบควบคุมไม่ได้โดยใช้ไดโอดและอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟ ดีซี ให้เป็นเอซี ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถแยกออกตามชนิดของอินเวอร์เตอร์ได้ 2 ประเภทคือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (current – source inverter : CSI)
2. อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage – source inverter : VSI)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย



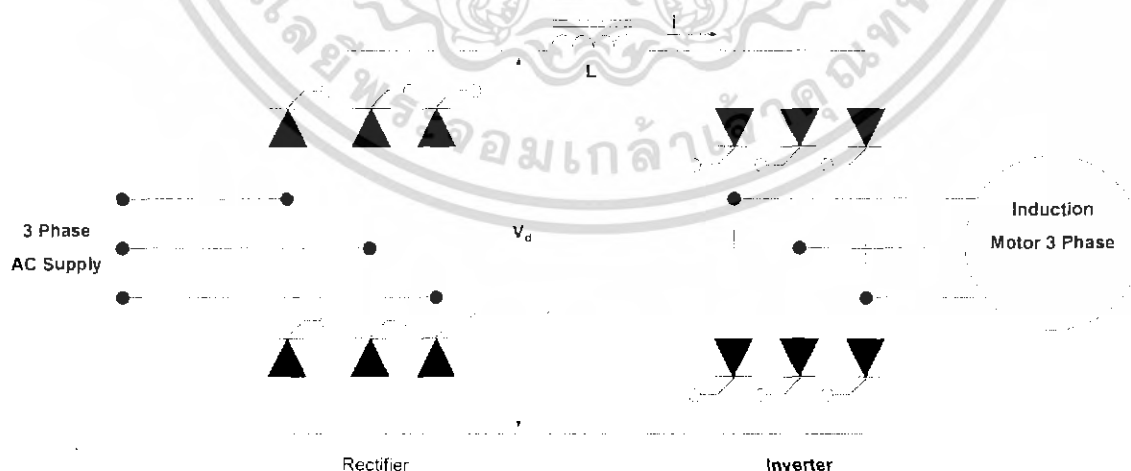
รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

วงจรกำลังของแหล่งจ่ายกระแส (current source) อินเวอร์เตอร์แสดงในรูปที่ 2.10 จะประกอบด้วยไทรสเตอร์เรกติไฟเออร์ที่สามารถควบคุมได้ โดยการควบคุมเฟสของเอซีไลน์ และยังมีอินดักเตอร์ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมอยู่ แต่ไม่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ด้วยเพื่อสร้างแหล่งจ่ายกระแสให้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นข้อแตกต่างของโครงสร้างทางวงจรจากอินเวอร์เตอร์แบบแรงดัน (voltage-source inverter) และในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะมีไทรสเตอร์เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ รูปร่างของกระแสที่จ่ายออกทางด้านเอาต์พุต จะขึ้นอยู่กับแพทเทิร์น (pattern) ของการควบคุมที่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งอาจจะเป็น 6 สเต็ป หรือ พีดับบลิวเอ็ม ก็ได้ แต่ลักษณะของแรงดันเอาต์พุตจะมีรูปร่างเข้าใกล้รูปไซน์ (ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากแบบจ่ายแรงดันในเรื่องของรูปคลื่น) นอกจากนี้แรงดันทางด้านเอาต์พุตจะยังเกิดสไปก์ เนื่องจากการคอมมิวเตทด้วย ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง

ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีมากมายดังที่ได้กล่าวมาแล้วสำหรับอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแส (current - source inverter) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกมากคือ ช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ค่อนข้างต่ำและไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะไร้โหลด ซึ่งต้องมีกระแสไหลดอย่างน้อยที่สุดที่จะทำให้มีการคอมมิวเตทในอินเวอร์เตอร์ได้ และนอกจากนี้ขนาดของดีซีลิงค์อินดักเตอร์ และตัวเก็บประจุของการคอมมิวเตทจะมีขนาดใหญ่ ทำให้อินเวอร์เตอร์แบบนี้ค่อนข้างมีราคาแพง การตอบสนองของการไดร์ฟนี้ค่อนข้างช้าและมีแนวโน้มจะมีปัญหาของการมีเสถียรภาพที่โหลดต่ำ

เนื่องจากโครงงานนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (voltage - source inverter) ที่เกี่ยวข้องกับโครงงานเป็นส่วนใหญ่จึงจะขอกล่าวรายละเอียดอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.10 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน

โครงสร้างแรงดันดีซีลิงค์มีขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก อาจจะทำให้กล่าวได้ว่าแรงดันอินพุทของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด และโดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนั้น เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปจะ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม หรือ อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นขั้นบันได
2. อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์

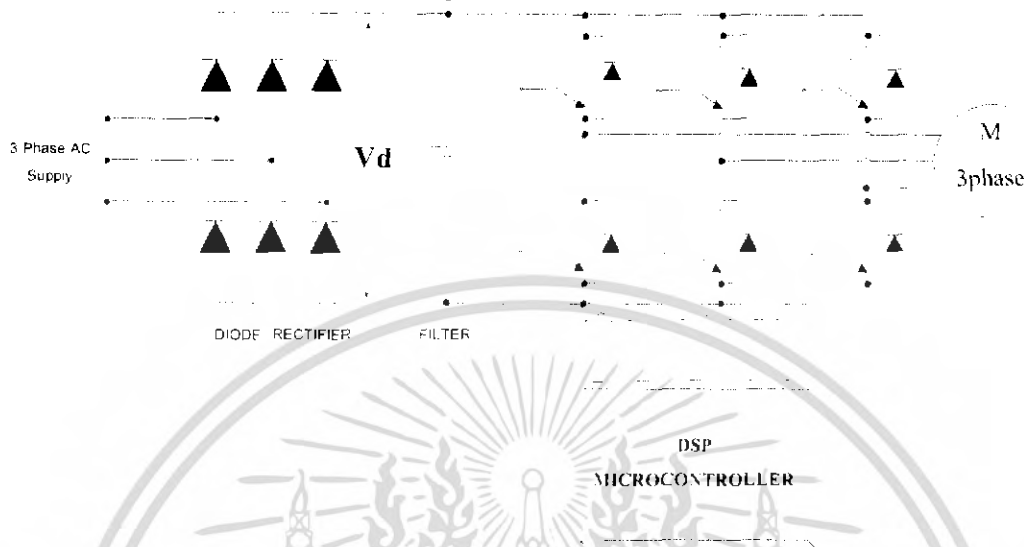
อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมนั้นมักจะใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในภาคกำลัง และยัง แบ่ง ออกเป็น 2 ชนิดย่อยคืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่น 6 ขั้น (six – step inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่น 12 ขั้น (twelve – step inverter) ซึ่งในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้จะไม่ค่อยพบเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีเก่าและในเนื้อหานี้จะกล่าวในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงงานเท่านั้นก็คืออินเวอร์เตอร์แบบ มอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation inverter) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation inverter) จะมีข้อดีคือสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่ายปรับความถี่ได้ในย่านกว้าง ส่วนข้อเสีย มักมีปัญหาในเรื่องการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในกึ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องมีวงจรลอคเอาท์ที่มีการสร้างเดดไทม์ (dead time) เป็นส่วนช่วยในการป้องกัน

2.2.3 อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์

โครงสร้างของพีดีบีลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ในส่วนของแรงดันดีซีลิงค์โดยทั่วไปจะใช้เรกติไฟเออร์ที่เป็นไดโอด ทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟส ทำให้แรงดันดีซีลิงค์มีค่าคงที่ ซึ่งไม่สามารถควบคุมแรงดันดีซีได้ ส่วนความถี่และแรงดันเอาท์พุทของแรงดันมูลฐาน สามารถควบคุมโดยใช้เทคนิคและความสัมพันธ์ของตัวแปรของ PWM แต่ละชนิดซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในส่วนต่อไป เทคนิค PWM นี้จะให้แรงดันเอาท์พุท ที่มีองค์ประกอบอาร์มอิกอันดับต่ำน้อยลง แต่จำนวนครั้งของการสวิตซ์ที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีปัญหาของการสวิตซ์ ซึ่งจะใช้งานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ ทำให้แรงบิดเริ่มต้นมีค่าสูงและลดปัญหาการกระเพื่อมของแรงบิด

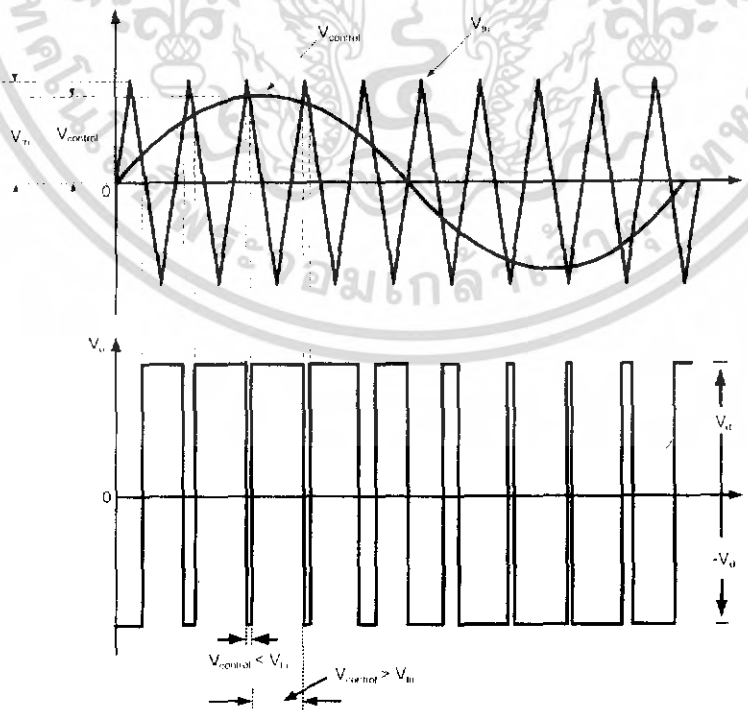
จากรูปที่ 2.11 เป็นการแสดงลักษณะโครงสร้างของ PWM อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันโดยรับแรงดันป้อน 3 เฟส จากแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าผ่านไดโอดเรกติไฟเออร์ซึ่งเป็นวงจรสร้างแรงดัน ดีซี ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์และในส่วนของ PWM อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ทั้งควบคุมความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ หลักการหนึ่งที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ก็คือจะใช้การ

เปรียบเทียบ ระหว่าง แรงดันควบคุมที่เป็นรูปไซน์ 3 เฟส ($V_{control}$) ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และมีคุณสมบัติที่สามารถปรับแอมพลิจูดให้แปรผันไปตามความถี่ได้ด้วยโดยการ



รูปที่ 2.11 วงจรกำลังของ PWM อินเวอร์เตอร์

จะนำสัญญาณควบคุมนี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (triangle waveform) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสวิตซ์ซึ่งตั้งรูปที่ 2.12 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบที่เป็นสัญญาณพัลส์ไปควบคุมลำดับ ของการสวิตซ์อีกที จากรูปที่ 2.12 จะพิจารณาเพียง 1 เฟส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 การนำคลื่นไซน์ V_{control} กับคลื่น สามเหลี่ยม V_{tri} มาเปรียบเทียบก็จะได้ สัญญาณพัลส์ที่นำมาควบคุมการสวิตช์พิจารณาเพียง 1 เฟส จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่ามี การนำคลื่นไซน์ V_{control} กับคลื่น สามเหลี่ยม V_{tri} มาเปรียบเทียบกันหรือเรียกว่าการมอดูเลตซึ่งอัตราการมอดูเลตจะแบ่งออกเป็นอัตรามอดูเลตด้าน แอมพลิจูดและอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

อัตรามอดูเลตด้านแอมพลิจูด

$$m_a = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}} \quad (2.40)$$

อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

$$m_f = \frac{f_s}{f_l} \quad (2.41)$$

เมื่อ

V_{control} คือ ค่ายอดของรูปคลื่นไซน์
 V_{tri} คือ ค่ายอดของรูปคลื่นสามเหลี่ยม
 f_l คือ ค่าความถี่หลักทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
 f_s คือ ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

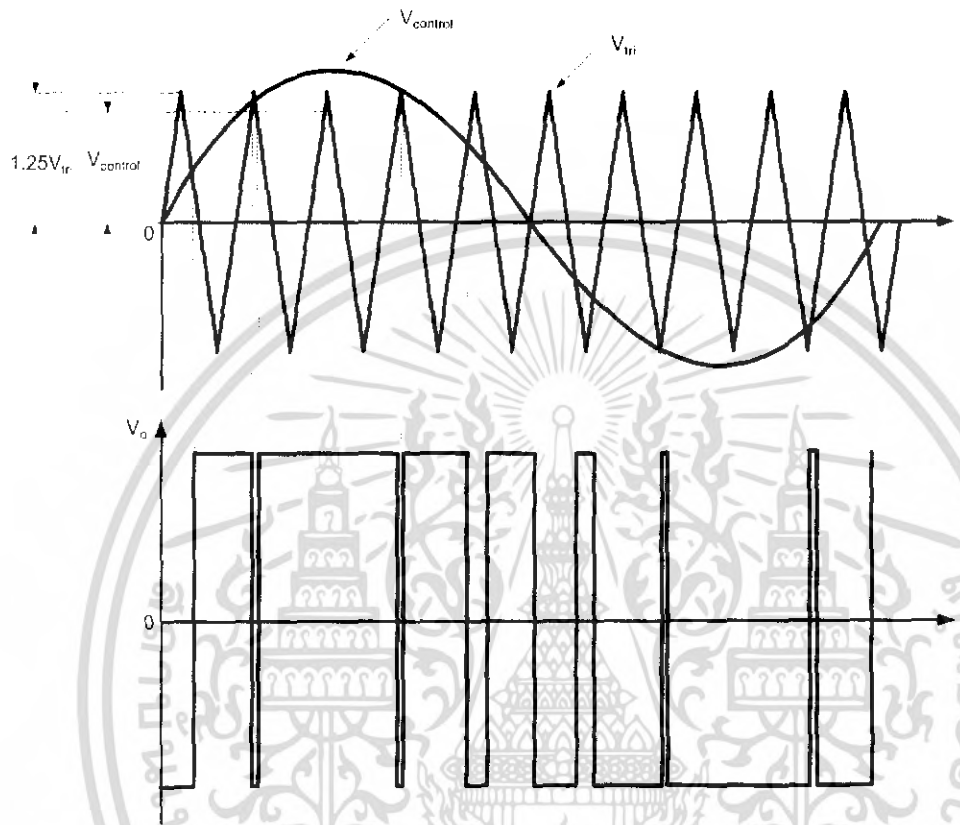
ถ้าค่า m_a อยู่ในช่วง $0 \leq m_a \leq 1$ จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึง องค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (fundamental – frequency component of the output voltage) โดยจะแปรผันเชิงเส้นกับค่า m_a

ถ้าค่า m_a อยู่ในช่วงที่มีค่ามากกว่า 1 ($m_a > 1$) จะเป็นช่วงการควบคุมแบบ โอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงกว่าช่วง มอดูเลตเชิงเส้น

อย่างไรก็ตามข้อเสียกรณีโอเวอร์มอดูเลตก็คือทำให้เกิดฮาร์มอนิกลำดับต่ำๆ ที่อยู่ ใกล้กับฮาร์มอนิกลำดับที่ หนึ่ง หรือความถี่หลักมูล เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3,5,7 เป็นต้น ดังรูปที่ 2.13 ที่แสดงให้เห็นถึงรูปคลื่น PWM แบบโอเวอร์มอดูเลต และรูปที่ 2.14 แสดงสเปคตรัมของ รูปคลื่น PWM แบบโอเวอร์มอดูเลต เมื่อ $m_a=1.25$, $m_f = 15$ จะเห็นว่าเกิด ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3,5,7,9 ซึ่งถ้านำไปใช้งานจะเกิดผลเสียมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์เหนี่ยวนำเพราะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3,5,7 จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้ความเร็วหลายความเร็วในเวลาเดียวกันทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมออาจเกิดผลเสียต่อสมรรถนะของมอเตอร์ได้



รูปที่ 2.13 คลื่น PWM แบบโอเวอร์มอดูเลต



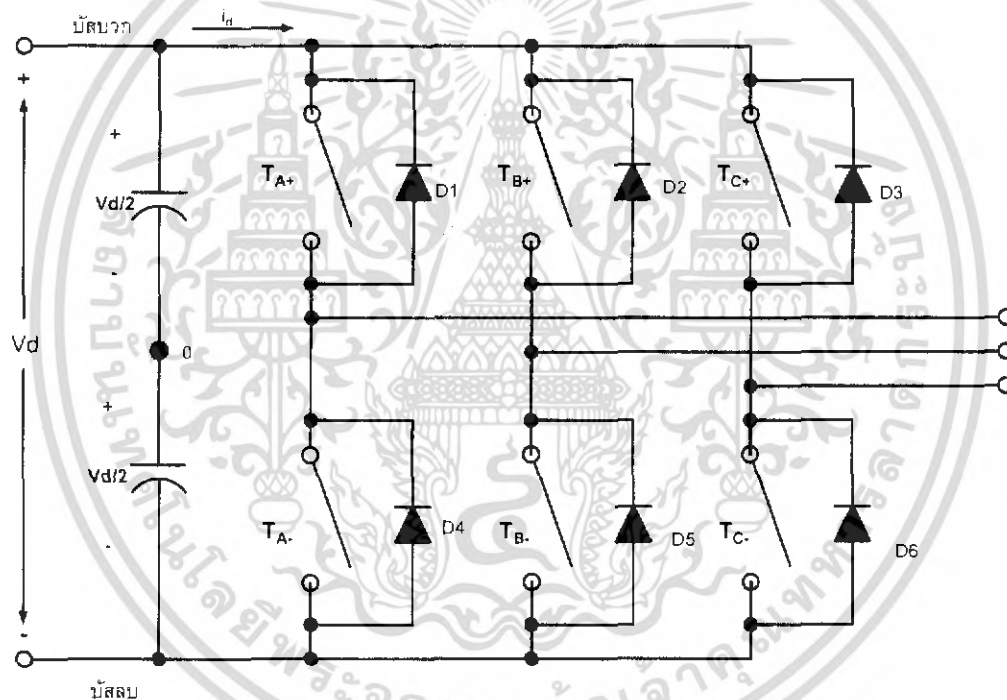
รูปที่ 2.14 แสดงสเปกตรัมของรูปคลื่นPWMแบบโอเวอร์มอดูเลต

เมื่อ $ma=1.25$, $mf = 15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟส

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลด 3 เฟสนิยมแปลงผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งจะเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง เพราะถ้าหากใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวนสามชุดก็ได้แต่ต้องใช้สวิตช์จำนวนถึง 12 ตัว นอกจากนั้นยังต้องอาศัยวงจรควบคุมที่ทำให้แต่ละเฟสต่างกัน 120 องศา ของความถี่หลักมูล จึงไม่เหมาะที่จะใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟลูบริดจ์จำนวน 3 ตัวจึงมีการพัฒนาอินเวอร์เตอร์สามเฟสขึ้นมาใช้ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ทั้งขนาดและความถี่ ซึ่งมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 2.15 จะเห็นว่ามีจำนวนสวิตช์และไดโอดจำนวนอย่างละ 6 ตัว และประกอบไปด้วยสามกิ่งหรือสามเฟส



รูปที่ 2.15 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.2.5 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสจะคล้ายกับอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว ต้องการแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ เพื่อที่จะให้ได้แรงดันด้านออกที่สมดุลและมีเฟสต่างกัน 120 องศาของความถี่หลักมูล จึงต้องใช้รูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมรูปไซน์สามรูปคลื่นที่เฟสต่างกัน 120 องศา ดังรูปที่ 2.16(ก) มีค่า $mf = 15$ ค่าแรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} จะวัด

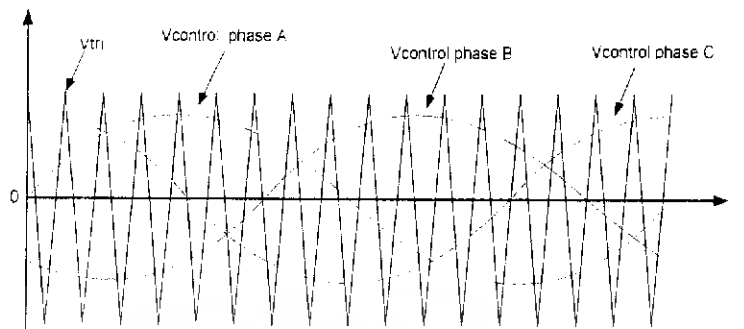
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับบัสลบที่เป็นบัสอ้างอิง ส่วนค่าแรงดันไลน์ V_{AB} ค่าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกหักล้างไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16(ข) เป็นการสวิตชิงแบบ PWM

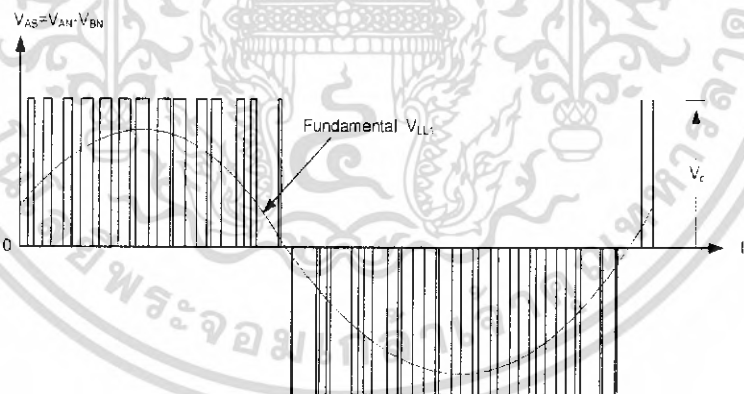
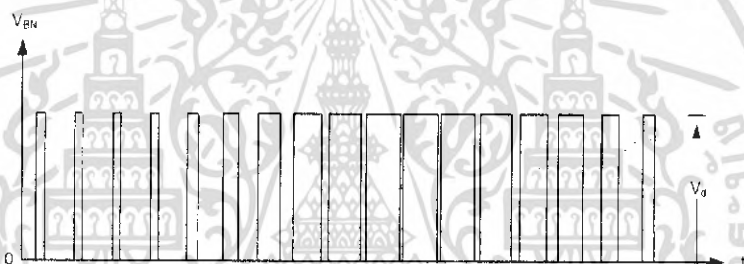
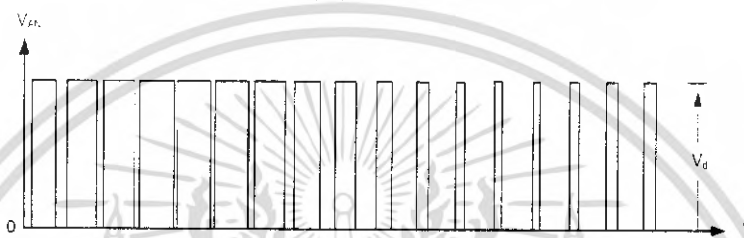
ในอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะพิจารณาฮาร์มอนิกเน้นเฉพาะค่าแรงดันระหว่างสาย (line – to – line voltage) เริ่มจากฮาร์มอนิกของแรงดันเฟส (V_{AN}) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ค) ซึ่งจะมีค่าฮาร์มอนิกเลขคู่เกิดขึ้นที่ค่าไซน์แบนด์ของ m_f และที่จำนวนเท่าของ m_f โดยค่าแรงดันเฟส V_{AN} , V_{BN} จะมีเฟสต่างกัน 120° ดังนั้นเฟสจะเท่ากันหรือต่างกันเฟสเป็นศูนย์ทุก ๆ 3 m_f ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไม่มีฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หารลงตัวที่เป็นเลขคู่ เช่น ฮาร์มอนิกที่ 3,9,15,21 เป็นต้นนอกจากนี้สำหรับในกรณีแรงดันเฟสที่มีโพลสมดุล ค่าแรงดันระหว่างสายจะไม่มีฮาร์มอนิกเลขคู่ เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2,4,6,8 เป็นต้น

สามารถสรุปส่วนสำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟสได้ดังนี้

- 1.) ที่ค่า $m_f \leq 21$ หากต้องการกำจัดฮาร์มอนิกเลขคู่จะต้องใช้การสวิตชิงแบบ PWM ที่ซิงโครไนส์ (หมายถึง m_f ต้องเป็นจำนวนเต็มและความถี่หลักมูลจะเริ่มจนจบ คาบพร้อมกับการสวิตชิงของรูปคลื่นสามเหลี่ยมดูในรูปที่ 2.16(ก))และค่า m_f เป็นจำนวนเลขคู่
- 2.) ที่ค่า $m_f \geq 21$ ฮาร์มอนิกย่อยที่เกิดจากการสวิตชิงแบบ PWM ที่ไม่ซิงโครไนส์ (m_f ต้องไม่เป็นจำนวนเต็ม) จะมีค่าน้อย แต่ต้องตระหนักถึงว่าควรหลีกเลี่ยงการสวิตชิงแบบ PWM ที่ไม่ซิงโครไนส์เพราะจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกย่อยที่ใกล้ความถี่หลักมูล
- 3.) ที่ค่า $m_a > 1$ หากไม่พิจารณาค่าของ m_f จะมีผลเช่นเดียวกับกรณีที่ 1

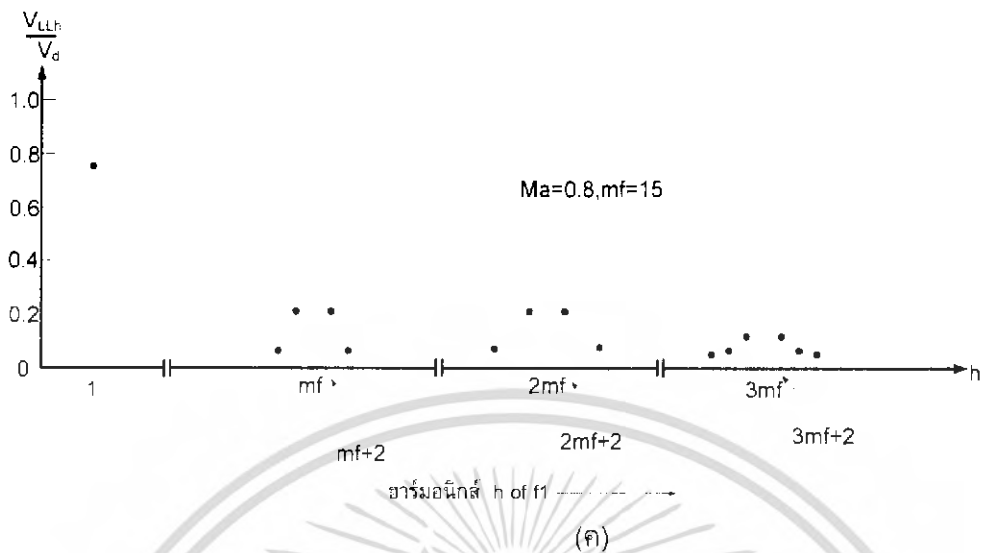


(ก.)



(ข.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสและสเปคตรัมฮาร์มอนิก

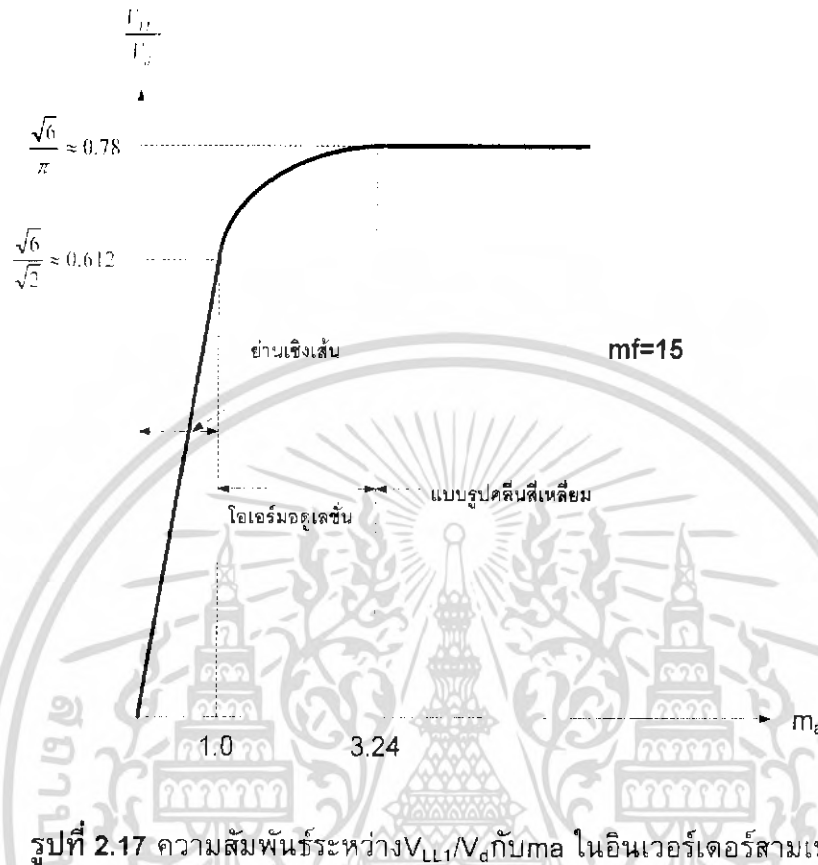
- อินเวอร์เตอร์สามเฟสทำงานในย่านมอดูเลตเชิงเส้น ($m_a \leq 1$)

ในย่าน $m_a \leq 1$ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลในหนึ่งกึ่งหรือหนึ่งเฟส จะเท่ากับสมการดังต่อไปนี้

$$\hat{V}_{AN} = m_a \cdot \frac{V_d}{2} \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1 \quad (2.42)$$

ดังนั้นแรงดันไลน์ที่ความถี่หลักมูลซึ่งต่างเฟสกัน 120 องศา สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{LL1} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \hat{V}_{AN1} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \\ &\approx 0.612 m_a V_d \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1 \end{aligned} \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{LL1}/V_a กับ m_a ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส

ความหมายของการทำงานย่านมอดูเลต ดังรูปที่ 2.17 หากมีแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมโยงมีค่า 311 โวลต์ เมื่อปรับ $m_a = 0.5$ จะได้แรงดันระหว่างสายของระบบไฟฟ้าเฟสเดียวคือ $0.612 \times 0.5 \times 311 = 65.17$ โวลต์ หมายถึงแรงดันที่ความถี่หลักมูล = 95.17 โวลต์ เมื่อปรับ $m_a = 1$ จะได้แรงดันที่มีความถี่หลักมูลเท่ากับ 190.33 โวลต์ นั่นคือ เมื่อปรับ m_a จาก 0.5 ไปเป็น 1 หรือจำนวน 2 เท่า แรงดันก็จะเพิ่มเป็น 2 เท่าด้วยเช่นกัน

2. อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านไอเวอร์มอดูเลต ($m_a > 1$)

ในย่าน ($m_a > 1$) อธิบายการทำงานเหมือนกับอินเวอร์เตอร์ฟาสต์สวิตชิ่งอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลหารกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{LL1}/V_d) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.612 ถึง 0.78 แสดงดังรูปที่ 2.17 สำหรับการดำเนินงานในย่านไอเวอร์มอดูเลตมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล จะมีค่าสูงกว่าในกรณีย่านเชิงเส้น ($m_a \leq 1$) แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าค่าหนึ่งดังรูปที่ 2.17 ข้อเสียของการดำเนินงานในย่านไอเวอร์มอดูเลตคือ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกลำดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกลำดับที่หนึ่ง

2.2.6 เทคนิคการมอดูเลตขั้นสูงสำหรับอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้าสามเฟส

โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะใช้เทคนิคการมอดูเลตด้วยรูปคลื่นไซน์ SPWM ซึ่งมีข้อดีคือง่ายต่อการสร้างสัญญาณควบคุมและการใช้ความถี่สวิตช์ซึ่งเกิดได้ห่างจากความถี่หลักมูลมาก ซึ่งจะทำให้สะดวกและออกแบบวงจรกรองความถี่ทางด้านออกได้ง่าย และขนาดเล็กอย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีของ SPWM จะมีข้อเสียคือแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าต่ำ เช่นในวงจรที่มีแหล่งเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (dc link) ขนาด 100 โวลต์ อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้เทคนิค SPWM ทำงานในย่านเชิงเส้นจะได้แรงดันระหว่างสาย ที่ความถี่หลักมูลสูงสุดที่ 61.2 โวลต์ เป็นต้น

วิธีการเพิ่มแรงดันระหว่างสาย ที่ความถี่หลักมูลในระบบสามเฟสสามารถทำได้ โดยการมอดูเลตสัญญาณควบคุมของเฟสโดยไม่จำเป็นต้องเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เมื่อหาผลต่างของแรงดันระหว่างสาย จะต้องมอดูเลตเป็นรูปไซน์ ซึ่งสามารถทำได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงมุมเฟส โดยที่แต่ละเฟสจะต่างกัน 120 องศา เทคนิคการมอดูเลตขั้นสูงประกอบด้วย

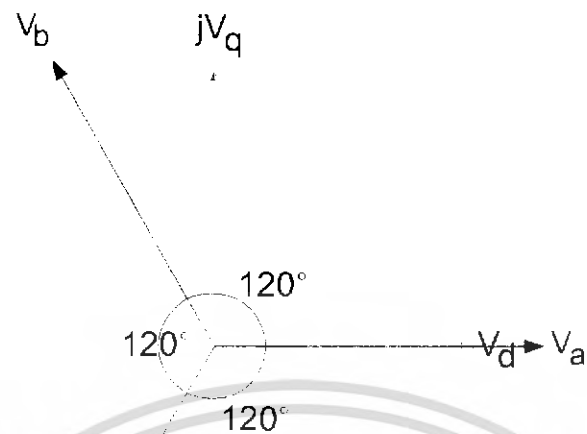
1. Harmonic injection pulsewidth modulation (HIPWM)
2. Space vector pulsewidth modulation (SVPWM)
3. Discontinuous pulsewidth modulation (DPWM)
4. Delta modulation (DM)

เนื่องจากโครงการนี้ได้ศึกษาเฉพาะเทคนิค space vector pulsewidth modulation (SVPWM) เท่านั้นจึงจะขอล่าวแต่เทคนิค space vector เท่านั้น

2.2.7 เทคนิค space vector pulse width modulation (SVPWM)

วัตถุประสงค์ของเทคนิคนี้ก็ต้องการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าด้านออกระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลอีก 15% โดยที่การทำงานของสวิตช์จะแบ่งออกเป็น 8 สถานะ 6 Sector ในกิ่งหนึ่ง ๆ ของวงจรสวิตช์จะสลับกันทำงานดังรูปที่ 2.18 ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส เมื่อแต่ละเฟสเชื่อมต่อกับบัสบวกและบัสลบของวงจรเชื่อมโยงทางไฟตรงจะทำให้เกิดสถานะการสวิตช์แปดสถานะ ดังเงื่อนไขในรูปที่ 2.8 ตัวอย่างเช่นสถานะที่ 1 เฟส A เชื่อมต่อกับบัสบวกและเฟส B กับเฟส C เชื่อมต่อกับบัสลบ

สเปซเวกเตอร์ (vector) เป็นเหมือนการรวมค่าปริมาณต่างๆทางไฟฟ้าที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา จะทำให้ได้เวกเตอร์ในปริภูมิที่ 1 เวกเตอร์ ถ้าแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็นชาयน์ ก็จะได้เวกเตอร์มีขนาดคงที่ และ หมุนเป็นวงกลมเทียบกับแกนอ้างอิงที่อยู่กับที่โดยหมุนด้วยความถี่ของแรงดันที่จ่าย

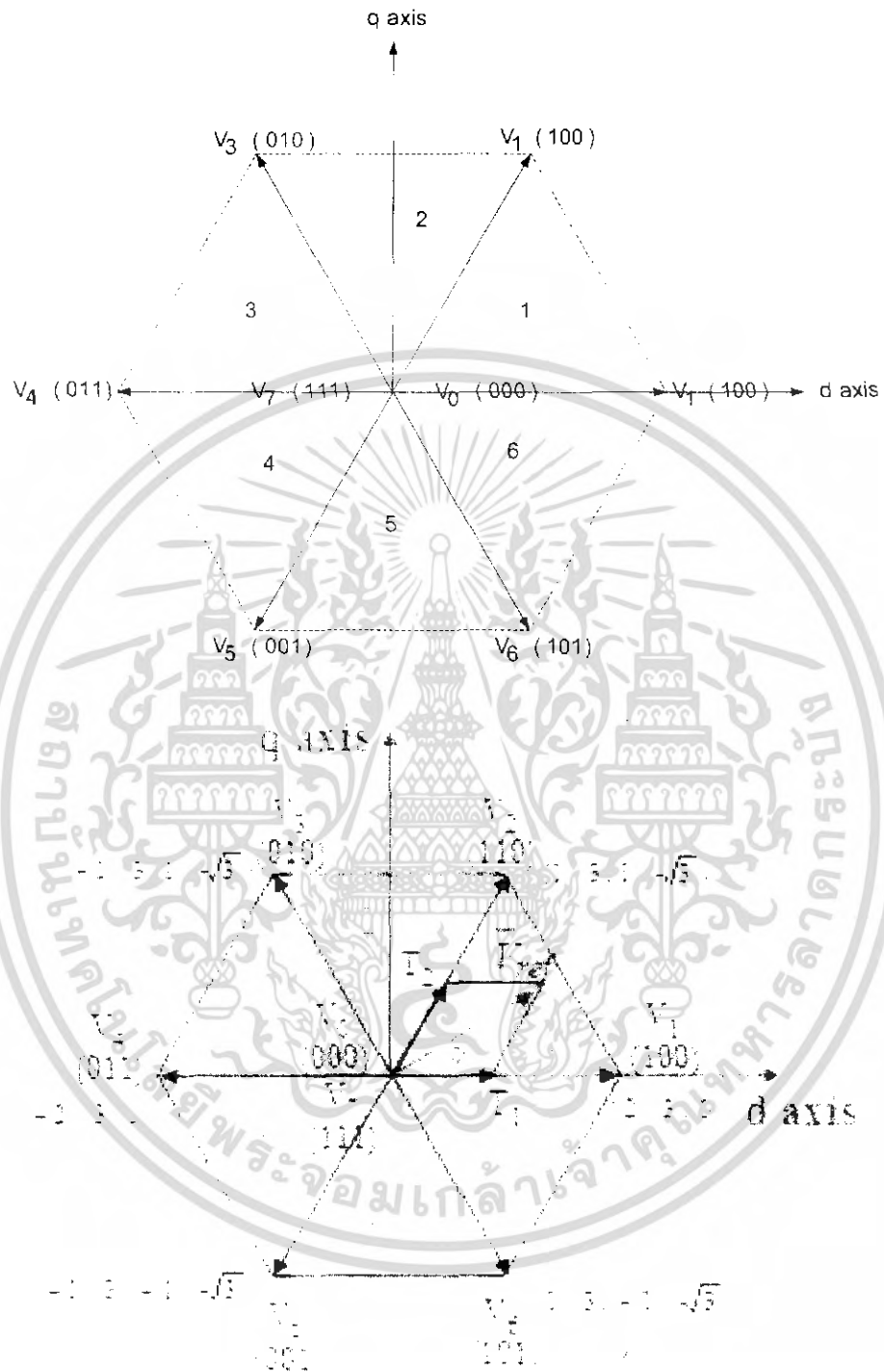


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน 3 เฟส กับ แรงดันสร้างฟลักแม่เหล็ก

การแปลงแรงสามเฟสเป็นสเปซเวกเตอร์ สามารถเขียนในรูปการแปลงโดยใช้เมตริกซ์ การแปลงโดยการมองให้สเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่แปลงได้อยู่บนแกนอ้างอิงที่อยู่กับที่ 2 แกนที่ตั้งฉากกันคือแกน D และแกน Q ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & 3/2 & -3/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

การเกิดสวิตช์ซึ่ง ปิด – เปิด เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ จะทำให้รูปแบบและการสวิตช์ทั้ง 8 แบบสามารถแปลงให้อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ได้ เราเรียกสเปซเวกเตอร์ของแรงดันนี้ว่า เวกเตอร์แรงดัน



รูปที่ 2.19 เวกเตอร์แรงดันที่ขาของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

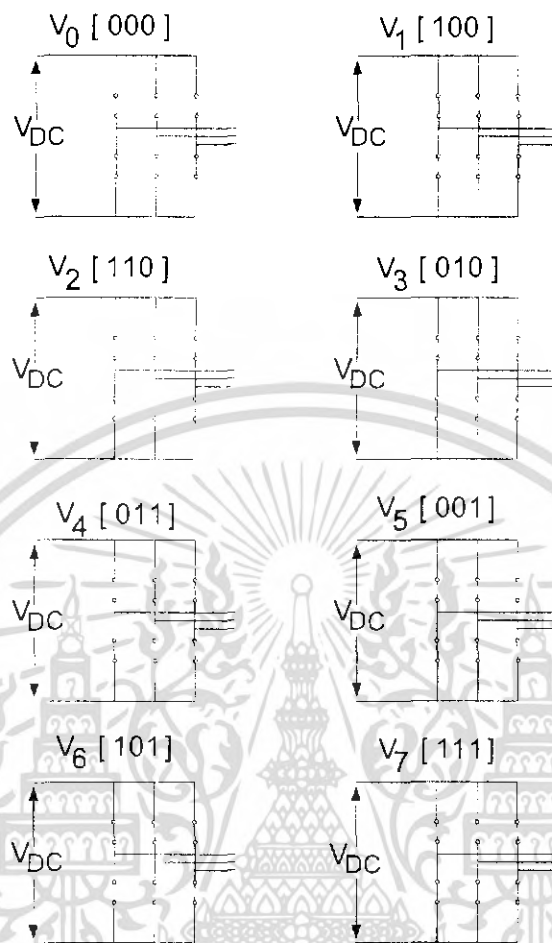
จากรูป แสดงถึงรูปแบบการเปิด- ปิด หมายเลข 1 หมายถึง สวิตช์ตัวบนของอินเวอร์เตอร์
 ปิดวงจร หมายเลข 0 หมายถึง สวิตช์ตัวล่างปิดวงจร การ เปิด – ปิด วงจรของสวิตช์ในเซกเตอร์
 ต่างๆแสดงตาราง

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการสวิตช์กับขนาดแรงดันที่เกิดขึ้นกับ V_{dc}

สวิตช์	สวิตช์ตัวบน			สวิตช์ตัวล่าง			สวิตช์ตัวบน		
	เปิด	ปิด	0	เปิด	ปิด	0	เปิด	ปิด	0
V_{d1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_{d2}	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	0	$-2/3$
V_{d3}	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	$-1/3$
V_{d4}	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
V_{d5}	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	0	1
V_{d6}	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	0	-1	1
V_{d7}	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	0	-1	0
V_{d8}	1	1	1	0	0	0	0	0	0

(Note that the respective voltage is given as a percentage of V_{dc})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

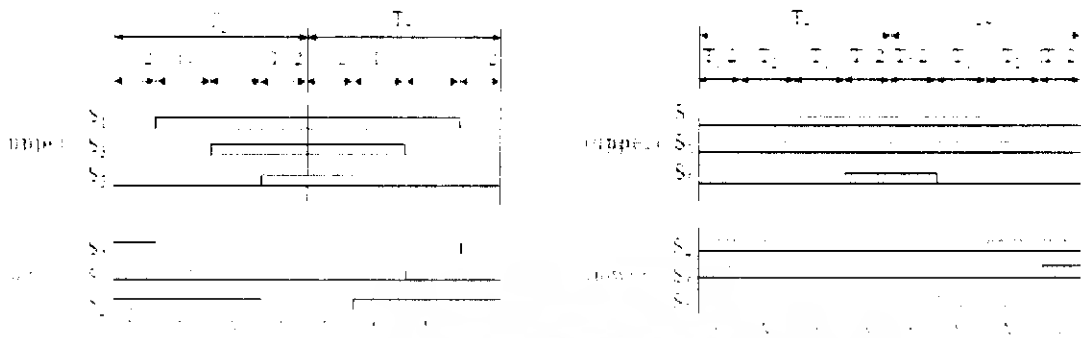


รูปที่ 2.20 ลักษณะการสวิตช์

$$v = V_a + aV_b + a^2V_c$$

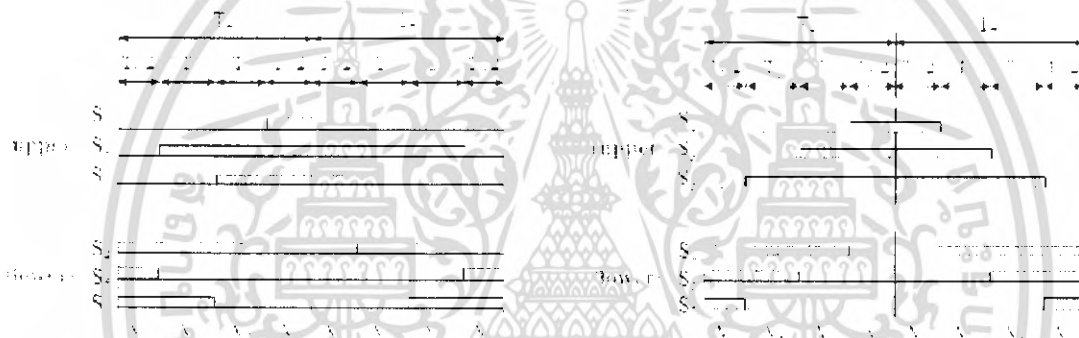
- โดย V_a คือ แรงดันที่ขั้ว a เปรียบเทียบกับจุดสะเทิน (neutral) ของมอเตอร์
 V_b คือ แรงดันที่ขั้ว b เปรียบเทียบกับจุดสะเทิน (neutral) ของมอเตอร์
 V_c คือ แรงดันที่ขั้ว c เปรียบเทียบกับจุดสะเทิน (neutral) ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Sector 1.

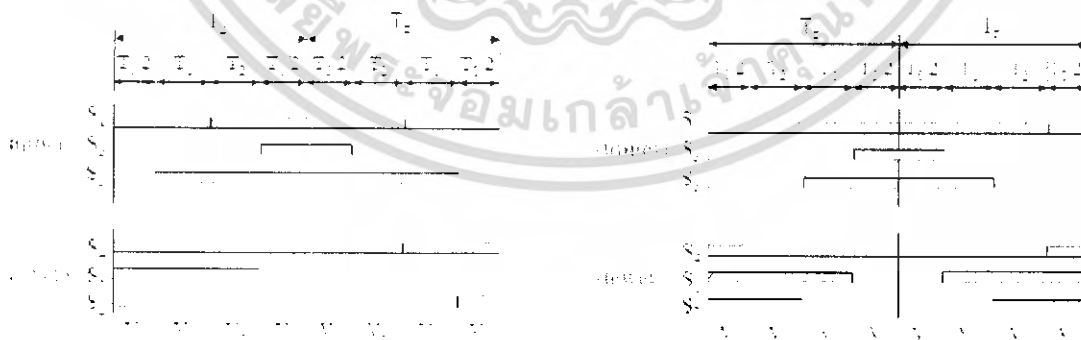
(b) Sector 2.



(c) Sector 3.

(d) Sector 4.

รูปที่ 2.21 รูปแบบการสวิตช์



(e) Sector 5.

(f) Sector 6.

รูปที่ 2.21 รูปแบบการสวิตช์ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $T_1 = M_a \sin(60 - \gamma)$
 $T_2 = M_a \sin \gamma$
 $T_0 = T_Z - T_1 - T_2$

และ T_Z คือ ค่าฐานเวลาของการสวิตช์
 M_a คือ ค่าโมดูลเลชันอินดิเคอร์

$$M_a = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}}$$

โดยจะเห็นว่าสวิตช์จะทำงานเป็นคู่ต่าง ๆ กันไปในแต่ละ sector และ เวลาในการสวิตช์แสดงดังรูปแบบการสวิตช์ในรูปที่ 2.21 โดยสามารถสรุปดังตารางที่ 2.2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 สรุปรูปแบบการสวิตช์

Sector	Upper Switch ($S_1 S_3 S_5$)	Lower Switch ($S_4 S_6 S_2$)
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_0/2$	$S_4 = T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
2	$S_1 = T_1 + T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_0/2$	$S_4 = T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
3	$S_1 = T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_5 = T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_0/2$ $S_2 = T_1 + T_0/2$
4	$S_1 = T_0/2$ $S_3 = T_1 + T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_6 = T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_0/2$
5	$S_1 = T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_0/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_3 = T_0/2$ $S_5 = T_1 + T_0/2$	$S_4 = T_0/2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$ $S_2 = T_2 + T_0/2$
---	---	---

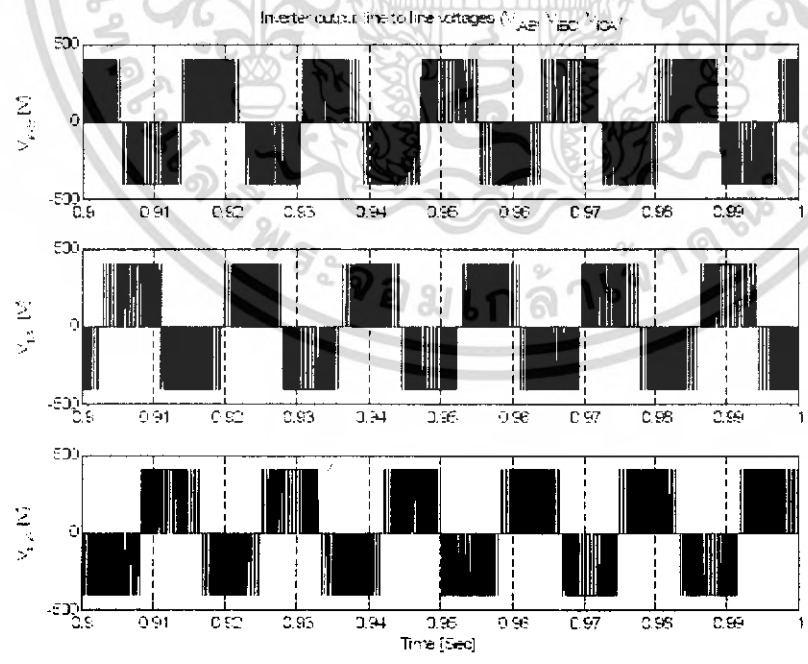
สเปซเวกเตอร์แรงดัน (Voltage space vector) จากหัวข้อที่ 2.1 กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุม โดยอาศัยสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน (voltage space vector) จะเป็นการควบคุมแรงดัน (voltage control) ซึ่งเป็นการง่ายที่จะทำโดยหลักการของเวกเตอร์แรงดัน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญโดยตรงของอินเวอร์เตอร์ที่จะกล่าวถึงทำให้เราสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณพัลส์วิดมอด ซึ่งอธิบายในเรื่องของการออกแบบโปรแกรมต่อไป โดยการกำหนดสัญญาณจะมีลักษณะการเปรียบเทียบดังรูป PWM



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของการเปรียบเทียบสัญญาณมอดดูลเสต

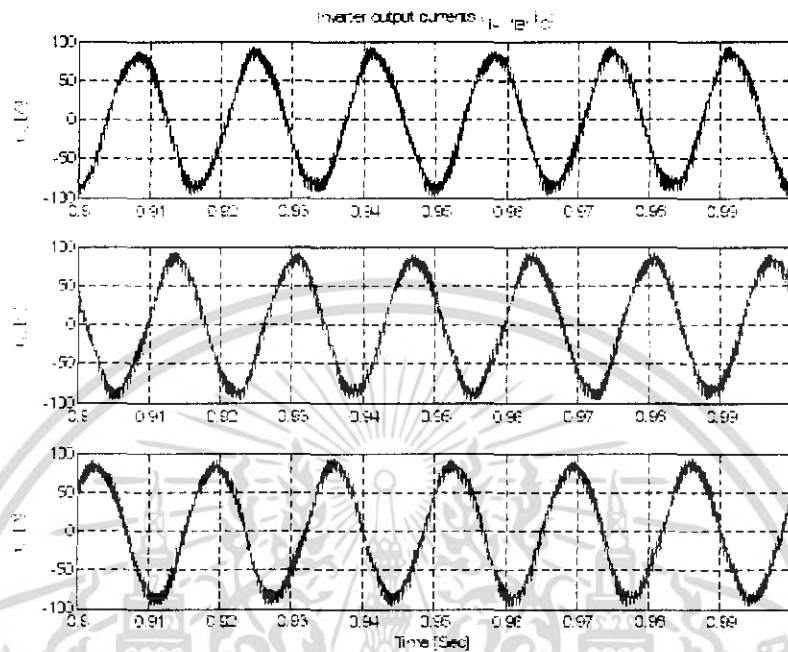


รูปที่ 2.23 ลักษณะของแรงดันเฟสเฉลี่ยและแรงดันเฉลี่ยระหว่างสายที่ได้ (PU)



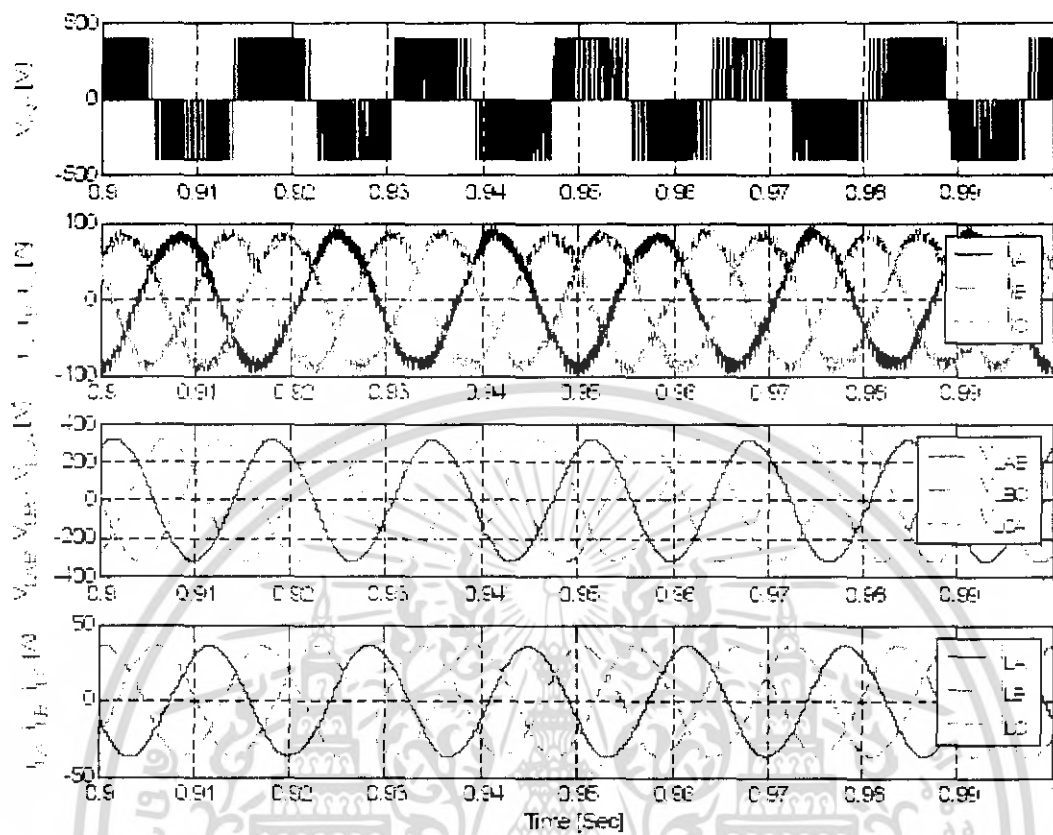
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.24 ลักษณะของแรงดันไลน์ output/phase



รูปที่ 2.25 ลักษณะของกระแสไลน์ output/phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ลักษณะของ output (3 phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

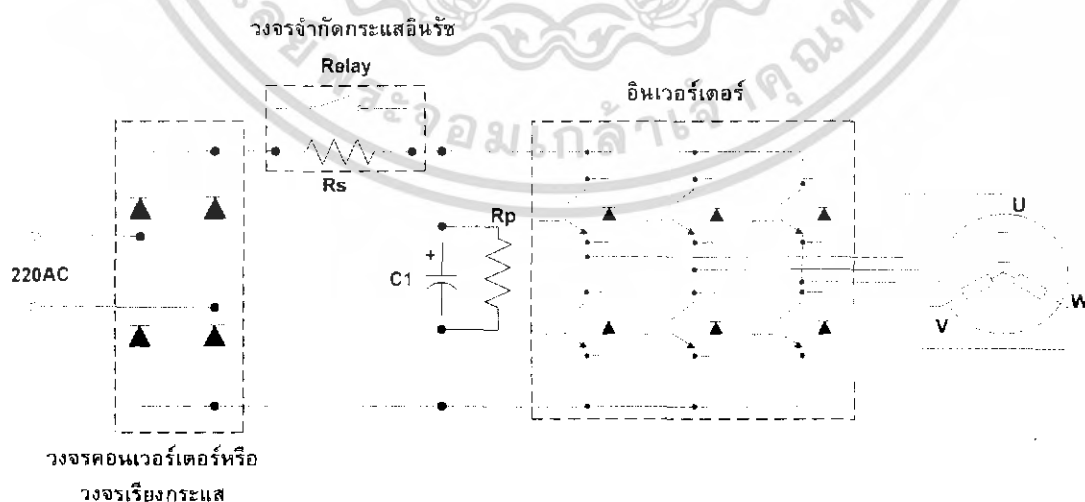
การออกแบบและสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ จะแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

1. ส่วนวงจรกำลัง
2. ฟังก์ชันการทำงานของอินเวอร์เตอร์
3. ส่วนวงจรควบคุม
4. วงจรไฟเลี้ยง

3.1 ส่วนวงจรกำลัง

วงจรกำลังจะประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือ คอนเวอร์เตอร์หรือวงจรเรียงกระแส, วงจรอินริช และวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3.1 ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์จะใช้เป็นบริดจ์ไดโอดที่หน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสซึ่งจะทำให้ แรงดันทางด้าน dc link มีค่าคงที่เสมอ ต่อมาในส่วนของวงจรอินริชจะทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลไปชาร์จตัวเก็บประจุซึ่งในสภาวะเปิดสวิตช์ครั้งแรกจะมีกระแสไหลชาร์จตัวเก็บประจุสูงมากดังนั้นจึงต้องจำกัดกระแสในตอนเปิดสวิตช์ครั้งแรกโดยใช้ตัวต้านทานจำกัดกระแสที่ไหลไปชาร์จตัวเก็บประจุและเมื่อตัวเก็บประจุชาร์จเต็มสวิตช์ก็จะ on ทำให้มีกระแสไหลผ่านได้โดยตรง และในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะเป็นอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยใช้ มอสเฟส เป็นอุปกรณ์สวิตชิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การออกแบบและสร้างชุดวงจรคอนเวอร์เตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับชุดอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ ชุดคอนเวอร์เตอร์นี้จะถูกแสดงไว้ในบล็อกแรกของภาพที่ 3.1 ซึ่งชุดดังกล่าวจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และวงจรกรองที่ใช้ตัวเก็บประจุโดยรับแรงดันทางด้านอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดันไฟตรงทางด้านเอาต์พุตประมาณ 311 โวลต์ ดังแสดงรายละเอียดวงจรไว้ในภาพที่ 3.1 ความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) กับตัวเก็บประจุ จะมีหน้าที่จำกัดกระแสเมื่อเริ่มทำงาน เพราะในขณะนี้ แรงดันที่ตัวเก็บประจุยังมีค่าประมาณศูนย์ โวลต์ทำให้กระแสที่ไหลอัดประจุให้แก่ตัวเก็บประจุมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งกระแสจำนวนนี้จะไหลผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสซึ่งอาจจะทำให้ไดโอดเสียหายได้ และเมื่อแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เหมาะสมแล้วตัวต้านทานนี้จะถูกตัดวงจรด้วยรีเลย์เพื่อไม่ให้เกิดกำลังสูญเสียที่ค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรม (R_s) กับตัวเก็บประจุขณะที่วงจรทำงานและวงจรเรียงกระแสจะได้ส่งผ่านกำลังเต็มๆ ส่วนค่าความต้านทานที่ต่อขนาน (R_p) กับตัวเก็บประจุมีหน้าที่ในการคายประจุทิ้งไปเมื่อกำลังหยุดทำงาน เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายเนื่องจากประจุที่ค้างอยู่ ทั้งนี้เพราะประจุที่ค้างอยู่มีปริมาณมากและมีแรงดัน โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบวงจรเรียงกระแสและการออกแบบเพื่อเลือกขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ไดโอดกำลังขาเข้าโดยทั่วไปจะใช้เป็นไดโอดบริดจ์สำเร็จรูป ความต้านทานอนุกรมที่ใช้จำกัดกระแสขณะเริ่มเปิดเครื่อง และความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่องจะได้กล่าวถึงต่อไป

1. การออกแบบค่าและพิกัดของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง

ในการออกแบบเบื้องต้นจะเป็นการเลือกค่าตัวเก็บประจุ โดยใช้สมการที่(3.1) โดยกำหนดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ เช่น ที่ระดับแรงดัน 220V 1เฟส ซึ่งถ้าแปลงมาเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก็จะได้ 311 V เป็นต้น ต้องรู้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้งานด้านไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอาจจะได้จากการคำนวณหรือดูจากโหลดที่นำไปใช้งาน กำหนดช่วงขอกการกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงเช่น ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์และค่าอีกตัวที่ควรทราบก็คือคาบเวลาของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว ซึ่งถ้าเราทราบค่าที่เราต้องการเหล่านี้ก็จะสามารถหาค่าตัวเก็บประจุได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Capacitor = \frac{I_{dc} \times period}{ripple\ voltage} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ I_{dc} คือค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (แอมแปร์)
 period คือคาบเวลาของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดแต่ละตัว (10 มิลลิวินาที)
 ripple voltage คือค่าแรงดันกระเพื่อม (โวลต์)

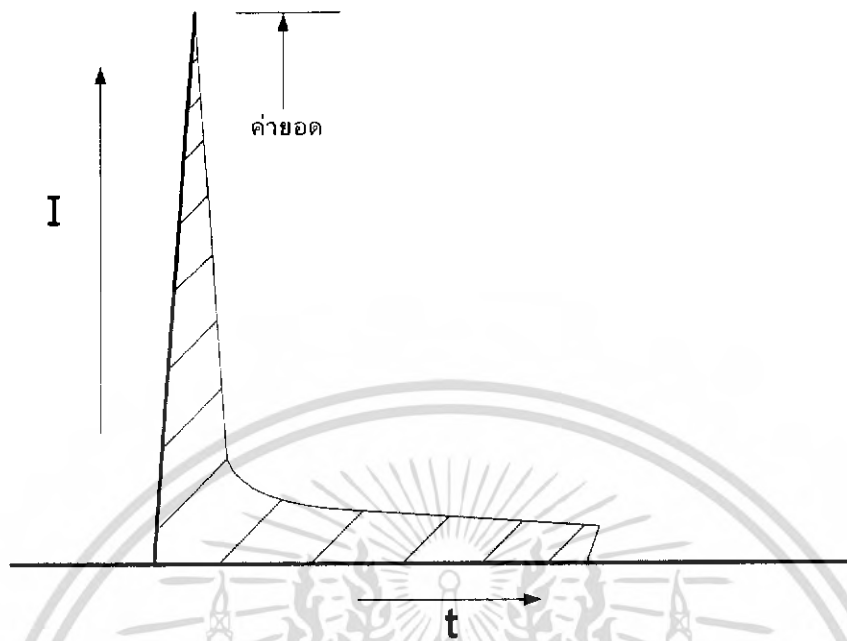
จากสมการ (3.1) ถ้ากำหนดให้พิกัดมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 แรงม้า หรือประมาณ 0.746kW ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 0.8 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ 220 V 1เฟสโดยคิดที่แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเท่ากับ 311V จะได้ค่ากระแสประมาณ 3 A และคิดค่าประสิทธิภาพของซูดอินเวอร์เตอร์ส่วนด้วยแรงดันไฟตรงซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 311 โวลต์ เมื่อนำไปแทนในสมการที่(3.1) โดยยอมให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในช่วง 2 เปอร์เซ็นต์ (ประมาณ 6.22V) จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 4823 ไมโครฟารัด โดยประมาณอาจจะเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าเท่ากับ 4700 ไมโครฟารัด 400V ชนิด อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic) เป็นต้น

2. การเลือกพิกัดของบริดจ์ไดโอดกำลังขาเข้าหรือบริดจ์เรียงกระแส

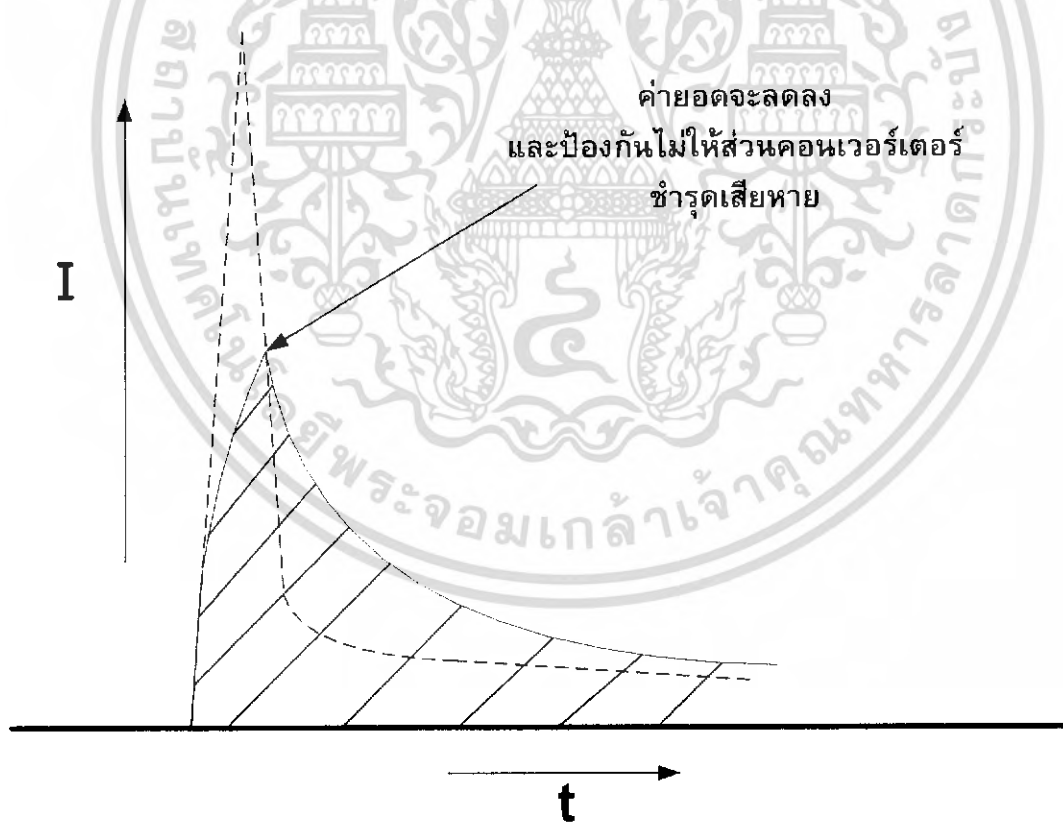
โดยทั่วไปการกำหนดพิกัดของไดโอดจะเป็นการกำหนดพิกัดที่ 25 องศาเซลเซียส แต่การเลือกพิกัดใช้งานต้องคำนึงถึงอุณหภูมิขณะทำงาน โดยที่พิกัดของกระแสไดโอดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะลดลงเหลือประมาณ 0.8 เท่าของพิกัดตั้งนั้นจึงควรจะใช้ไดโอดที่มีพิกัดเป็น 1.50 ของกระแสที่ใช้งานและในส่วนของแรงดันควรเลือกให้ทนแรงดันภาวะชั่วคราวและสภาวะช่วงอยู่ตัวประมาณ 1.25 เท่าของแรงดันใช้งาน

3. การเลือกความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ใช้จำกัดกระแสอัดประจุในวงจรอินรัช

ในการเลือกพิกัดของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมเพื่อจำกัดกระแสในช่วงเริ่มเปิดเครื่องเมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไซน์ จะใช้วิธีการประมาณค่าเบื้องต้นจากการคำนวณแล้วปรับค่าจนกระทั่งกระแสในตอนเริ่มอยู่ในเกณฑ์ที่ไดโอดหรือบริดจ์ไดโอดสามารถทำงานได้โดยไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งจากวงจรในรูปที่ (3.1) ในบล็อกของวงจรอินรัชจะใช้รีเลย์เป็นอุปกรณ์ตัดไฟให้ไหลผ่าน relay แทนที่จะไหลผ่านความต้านทานก็จะไหลผ่าน relay ที่มีค่าความต้านทานต่ำกว่าแทนเพื่อลดการสูญเสียโดยจะกำหนดเป็นช่วงเวลาให้ relay ทำงาน จากรูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงผลของกระแสเมื่อมีวงจรอินรัชและไม่มีการอินรัช



รูปที่ 3.2 กรณีไม่มีวงจรรินรัช



รูปที่ 3.3 กรณีมีวงจรรินรัช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความต้านทานขนานที่ใช้ในการคายประจุเมื่อตอนปิดเครื่อง

การคำนวณหาค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุตามมาตรฐานของ วสท. 408 กำหนดให้ตัวเก็บประจุที่ใช้กับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ จะต้องมีความต้านทานต่ออยู่เพื่อช่วยให้ตัวเก็บประจุคายประจุให้แรงดันเหลือ 50 โวลต์ ภายในเวลา 1 นาที ค่าความต้านทานในการคายประจุสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$e_c = 1.1 V_{DC} e^{\frac{-60}{RC}} \quad (3.2)$$

เมื่อ $V_{DC} = 311$ โวลต์ $e_c = 50$ โวลต์ $C = 1000$ ไมโครฟารัด จากข้อกำหนดข้างต้นจะได้ค่าความต้านทานที่ใช้ในการคายประจุประมาณเท่ากับ 31 กิโลโอห์ม ในทางปฏิบัติเลือกใช้ค่าความต้านทานในการคายประจุขนาด 50 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ จำนวน 1 ตัว โดยต่อผ่านหน้าสัมผัสของรีเลย์ดังที่แสดงวงจรไว้ในภาพที่ 3.1

3.1.2 การออกแบบและสร้างชุดอินเวอร์เตอร์

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่รับไฟฟ้ากระแสตรงจากส่วนของคอนเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ การทำงานคือจะแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับที่ความถี่ต่าง ๆ เพื่อป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในส่วนของอินเวอร์เตอร์นี้จะใช้ มอสเฟส สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าซึ่งมีคุณสมบัติคือ ทนแรงดันได้ 500 โวลต์ รองรับกระแสได้ 14 แอมแปร์ โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของ MOSFET

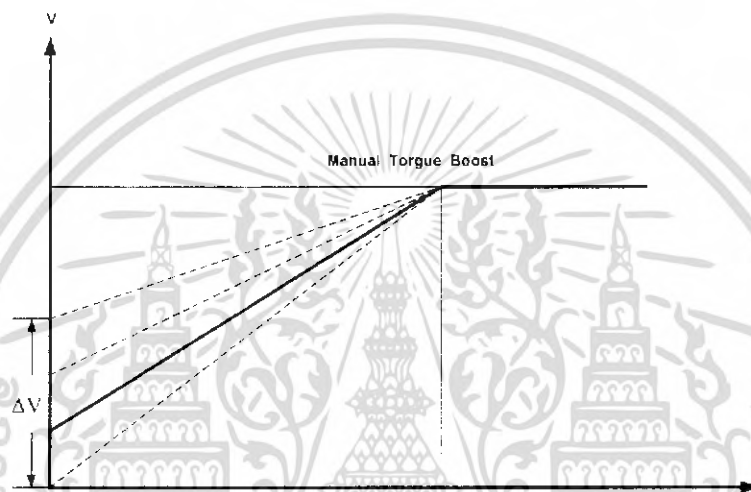
3.2 ฟังก์ชันการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ฟังก์ชันการทำงานโดยทั่ว ๆ ไปของอินเวอร์เตอร์ที่นำมาขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในการสตาร์ทมอเตอร์ ที่ช่วงความถี่ต่ำ ๆ จะมีแรงดันส่วนหนึ่งตกคร่อมอยู่ที่อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จึงทำแรงบิดของมอเตอร์มีขนาดลดลง ถ้าแรงบิดของมอเตอร์ในขณะนั้นมีค่ามากกว่าแรงบิดของโหลดมอเตอร์ก็จะเริ่มหมุน แต่ถ้าแรงบิดของโหลดมีค่าสูงกว่า มอเตอร์ก็จะไม่

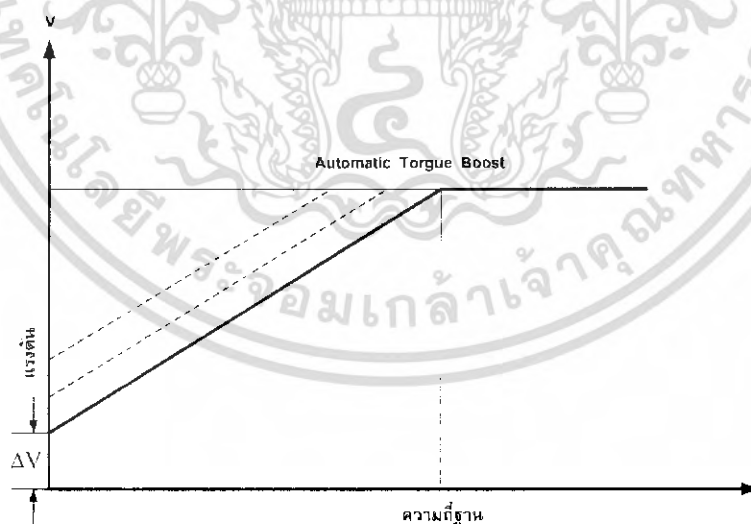
หมუნจะหยุดอยู่ในสภาพล็อก แก้ไขได้โดยการเพิ่มแรงดัน ΔV เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกที่อิมพีแดนซ์ของโหลด เพื่อให้แรงบิดของโหลดมีค่าสูงกว่าแรงบิดของโหลดในย่านความถี่ต่ำๆ การเพิ่มแรงดันนี้เราเรียกว่า “ ทอร์กบูสต์ ” ชนิดของทอร์กบูสต์แบ่งออกได้ดังนี้

1. ทอร์กบูสต์ด้วยมือ ให้แรงดันส่วนที่เพิ่มขึ้นแปรผันกับความถี่ f โดยไม่ขึ้นกับกระแสของมอเตอร์

2. ทอร์กบูสต์อัตโนมัติ ตรวจวัดกระแสของมอเตอร์แล้วนำมากำหนดขนาดส่วนเพิ่มของแรงดันโดยอัตโนมัติ



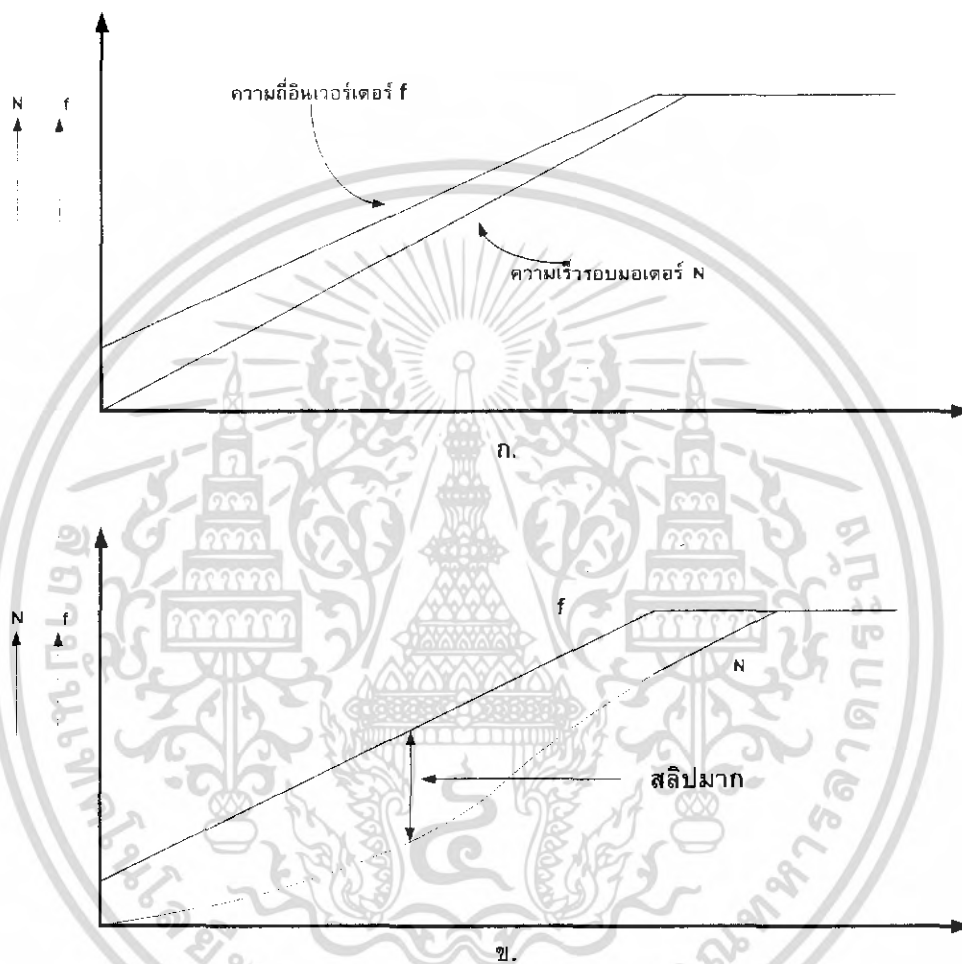
รูปที่ 3.6 ทอร์กบูสต์ด้วยมือ



รูปที่ 3.7 ทอร์กบูสต์อัตโนมัติ

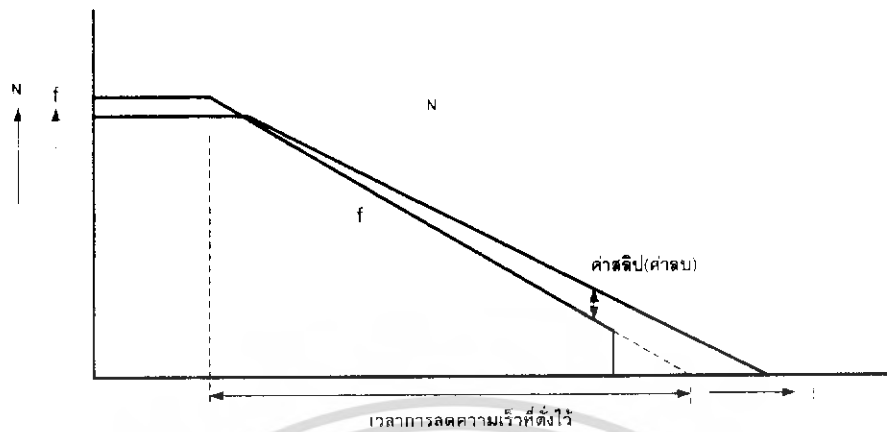
หลังจากที่มอเตอร์เริ่มหมუნแล้ว ก็ทำการควบคุมความถี่ของมอเตอร์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงความถี่ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการควบคุมความถี่ให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นี้เรียกว่า “ เวลาการเร่งความเร็ว ” ถ้าตั้งเวลาการเร่งความเร็วไว้ยาวพอ ความเร็วของมอเตอร์ N ก็จะเพิ่มไล่ตามความถี่

f ด้วยค่าสลิปเสมอ โดยค่าสลิปนี้จะขึ้นอยู่กับค่า GD^2 ของโหลดและของมอเตอร์รวมกัน แต่ถ้าตั้งช่วงเวลาการเร่งไว้สั้นเกินไป ก็จะทำให้ค่า f และ N ต่างกันมากทำให้ค่าสลิป มากกระแสของมอเตอร์ก็จะไหลมากจนกลายเป็นกระแสเกินในที่สุด ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.8 (ก) ตั้งเวลาการเร่งความเร็วไว้ยาวพอ
(ข) ตั้งช่วงเวลาการเร่งไว้สั้นเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการตั้งค่าเวลาในการลดความเร็วเหมาะสม

ในกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ เมื่อลดความเร็วถึงความเร็วของมอเตอร์ก็จะลดลงตามจนกระทั่งหยุดหมุนในที่สุด โดยใช้เวลาในการหยุดตามที่ตั้งค่าไว้ แต่ถ้าตั้งค่าเวลาในการลดความเร็วสั้นเกินไป จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่ามากกว่าความเร็วของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ค่าสลิปเป็นลบ มอเตอร์จะทำงานเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟจ่ายกลับคืนไปให้อินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันไฟตรงที่ตกคร่อมวงจรอินเวอร์เตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เป็นอันตรายกับวงจรอินเวอร์เตอร์

ซึ่งในการทำโครงการนี้ฟังก์ชันของอินเวอร์เตอร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้เพื่อใช้ในการพัฒนาต่อในรุ่นต่อ ๆ ไปประกอบด้วย

1. ความถี่สูงสุดที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์คือ 250 HZ
2. ระดับแรงดันที่ใช้งานหรือแรงดันขาเข้า 220VAC หรือ 311 VDC
3. สามารถปรับทอร์คบูสต์ตั้งแต่ 0 – 20%
4. คาบเวลาการเร่งความเร็ว และลดความเร็ว ในช่วง 5-20 ms

3.3 ส่วนวงจรควบคุม

ในส่วนของการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ข้อมูลจำเพาะของไมโครโปรเซสเซอร์ dsPIC30F4011 ทางด้านฮาร์ดแวร์

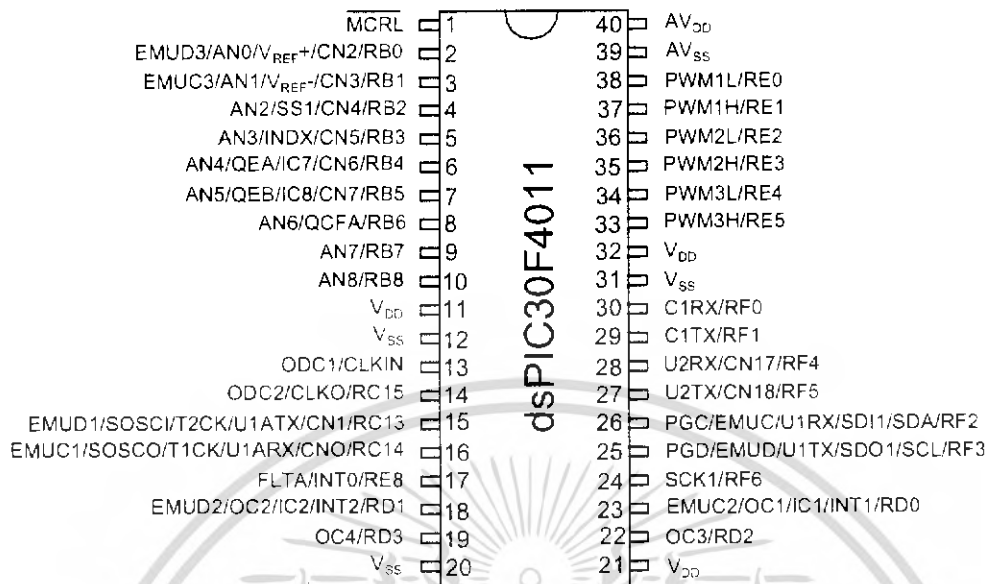
เปรียบเทียบกับ ซี พี ยู ตัวอื่นที่มีความสามารถใกล้เคียงกันทางด้านราคา ถือว่าสมเหตุสมผลทางด้านคุณภาพก็อยู่ในระดับกลางเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่ไม่ซับซ้อนมาก ส่วนคุณสมบัติที่สำคัญคือคุณสมบัติในการสร้างสัญญาณ พี ดับบลิว เอ็ม นั้นถือว่าตรงกับจุดประสงค์ของการนำมาใช้งาน และก็มีจำนวนเพียงพอต่อการใช้งาน จึงได้พิจารณาเลือก dsPIC30F4011 มาใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ สเปซเวคเตอร์

จากการศึกษาในเรื่องอินเวอร์เตอร์ในช่วงต้นจะทราบว่า การจะสร้างสัญญาณทางด้านเอาต์พุตได้นั้นต้องอาศัยการกระตุ้นที่ขาเกต หรือ ทริกเกอร์ เพื่อให้ทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งทำงาน (นำกระแส)

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบ ซี พี ยู ตระกูล dsPIC30Fxxxx

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instruction	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D10-bit 500Ksps	Quad Enc	UART	SPI™	I ² C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



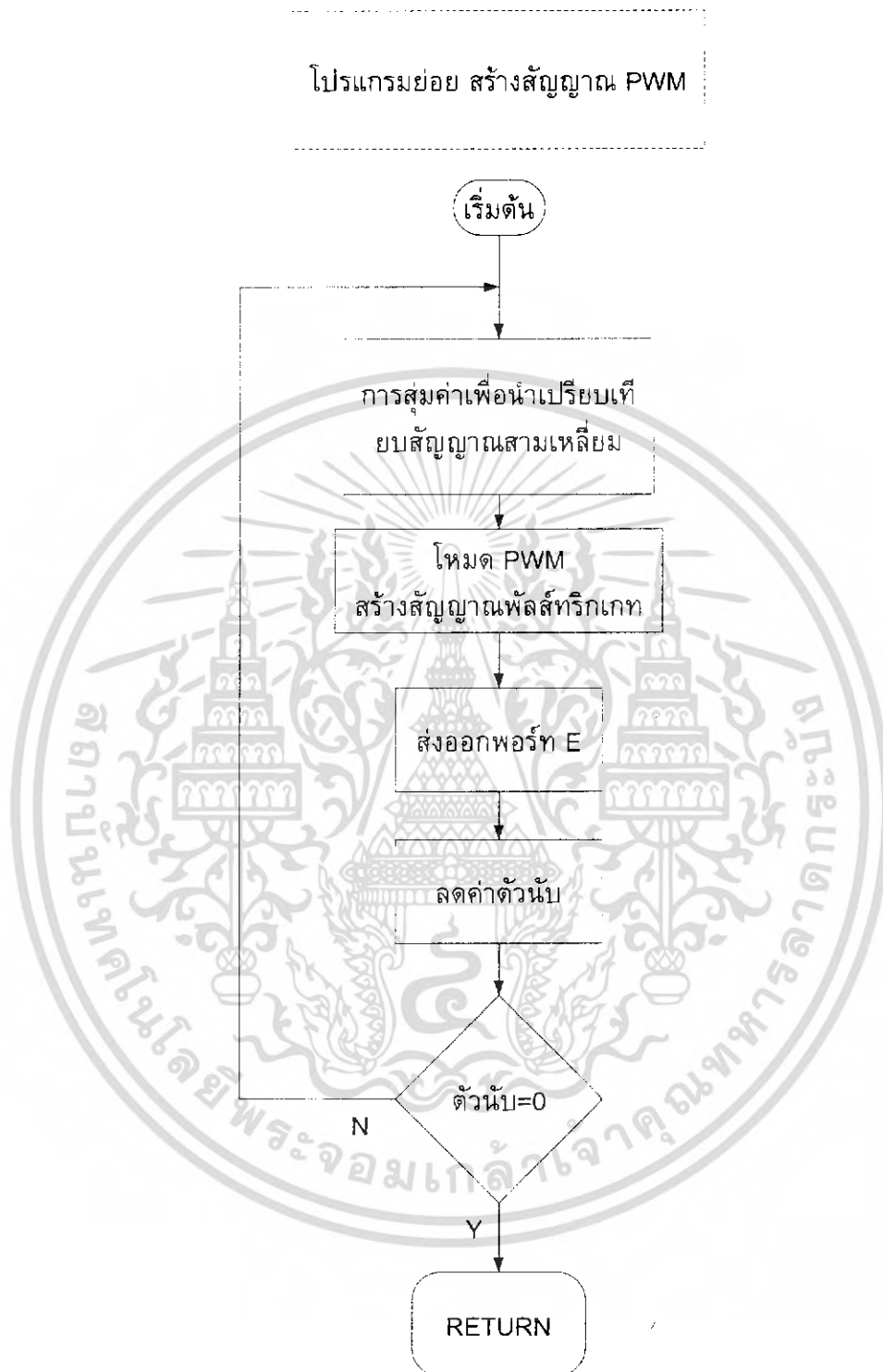
รูปที่ 3.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในโครงการ

จากรูป ซีพียู จะเห็นว่า dsPIC30F4011 จะมีเอาต์พุตพอร์ตของสัญญาณ พีดับเบิลยูเอ็ม อยู่ 1 พอร์ต (พอร์ต E , E1-E8) จำนวน 7 ขา และสำหรับการเขียนโปรแกรมในการควบคุมขาเกตได้แสดงไว้ดังนี้



รูปที่ 3.11 แผนผังแสดง (Flow chart) ของโปรแกรมหลัก

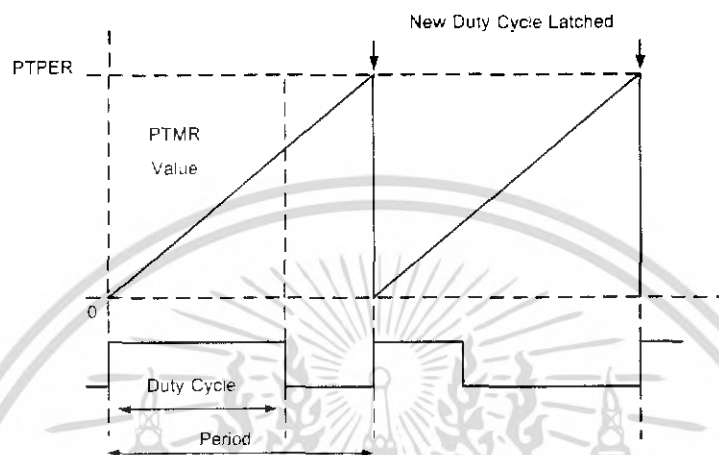
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แผนผังแสดง (Flow chart) ของโปรแกรมย่อย สร้างสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีค่าคาบเวลาของสามเหลี่ยมอ้างอิงในโหมด PWM ซึ่งค่าเวลานั้นอยู่กับรูปแบบของสัญญาณสามเหลี่ยมที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับโหมด PWM



รูปที่ 3.13 สามเหลี่ยมฟันเลื่อย

ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาคาบเวลาได้จากสมการ

$$T_{PWM} = \frac{T_{CY} \cdot (PTPER + 1)}{(PTMR \text{ Prescall Value})}$$

โดย

T_{CY} คือ คาบเวลาของ Crystal Clock ที่นำมาป้อนให้ระบบ

T_{PWM} คือ คาบเวลาของการสวิตช์ในที่นี้กำหนดไว้ที่ 5 kHz หรือ 200 μ s

PTMR Prescall Value ค่าตัวคูณของความเร็วของ Clock ของระบบ

3.3.1 การเปลี่ยนค่า V/f

จะสามารถทำได้ คือจะต้องหาสมการมาใช้ในการคำนวณ ในส่วนของโปรแกรม รอง เพื่อให้ได้ค่า โมดูลเสี้ยนอินเตกซ์ แล้วนำมาคูณกับค่าที่ทำการสุ่มออกมา

3.3.2 การเปลี่ยนค่าความถี่(f)

จะสามารถทำได้ คือสามารถทำได้ด้วยวิธีการ เปลี่ยนระยะห่างของการสุ่มค่าจาก ตารางที่บันทึกค่าลงในหน่วยความจำของไมโครโปรเซสเซอร์ จากทฤษฎีจะเห็นได้ว่าการคำนวณ ค่าเวลาจากรูปแบบของการคำนวณเวลานั้นมีลักษณะเดียวกันเพียงแต่จะมีลำดับการคิดเวลาที่ ต่างกัน โดยมีองค์ประกอบหลักๆดังนี้

$$T_1 = T_Z M_a \sin(60 - \gamma)$$

$$T_2 = T_Z M_a \sin \gamma$$

$$T_0 = T_Z - T_1 - T_2$$

โดย T_Z คือค่าเวลาในการสวิตช์ 200 μ s
 การเปลี่ยนความถี่สามารถเปลี่ยนจากระยะห่างของการสุ่มค่าโดยจะเปลี่ยนจำนวน
 ครั้งในการสุ่มทั้งหมดไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น

จำนวนครั้งในการสุ่ม ที่สัญญาณ PWM ที่สร้างสัญญาณ SIN 50 Hz

จำนวนครั้งในการสุ่ม = ความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม/ความถี่ที่ต้องการทางด้าน

Output

จำนวนครั้งในการสุ่ม = $5,000/50 = 100$ ครั้ง/6เซกเตอร์

หรือประมาณ 17 ครั้ง/1เซกเตอร์

การสุ่มค่า 17 ครั้งจากค่า 256 ค่า จะได้ 15 ค่า/ครั้ง

ถ้าหากความถี่ ที่ 100 Hz จะได้จำนวนการสุ่ม = 50 ครั้ง ($5000/100 = 50$)

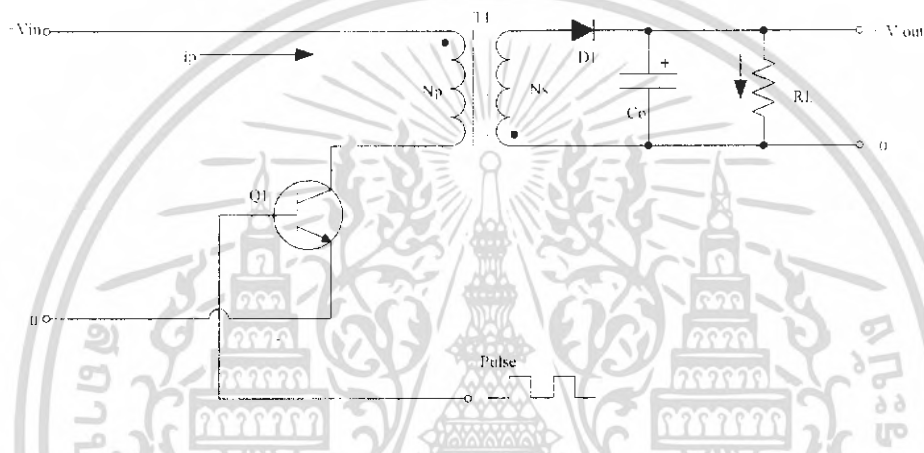
หรือประมาณ 8 ครั้ง/1เซกเตอร์ ($50/6 = 8$)

ระยะห่างในการสุ่มประมาณ 31 ค่า/ครั้ง

ซึ่งในการสุ่มค่า SIN เพื่อหา ค่า $T_1 = M_a \sin(60 - \gamma)$ จะสุ่มค่าจากทางด้านหลัง
 เริ่มนับจากค่าที่ 256 ขึ้นมาหาค่า 1 โดยการเช็คเซกเตอร์จากค่า Address ของค่าสุดท้าย และค่า
 แรกของตาราง หากอยู่นอกเหนือขอบเขต ให้เปลี่ยนเซกเตอร์

3.4 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

วงจรไฟเลี้ยงจะใช้เป็น switching power supply ภายในวงจร Switching จะมีการนำวงจร Bridge Rectifier มารวมอยู่ในวงจร Switching โดยที่ Switching power supply จะทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าเพื่อเลี้ยง Microcontroller และส่วนอื่นภายในระบบทั้งหมด เช่น พัดลมระบายอากาศ ซึ่งวงจรที่ใช้งานก็คือวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter) เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำเมื่อเทียบกับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแบบอื่น ๆ ในช่วง 50 วัตต์ ถึง 150 วัตต์ และมีข้อดีที่สามารถจ่ายไฟได้หลายระดับแรงดันโดยมีวงจรพื้นฐานดังนี้



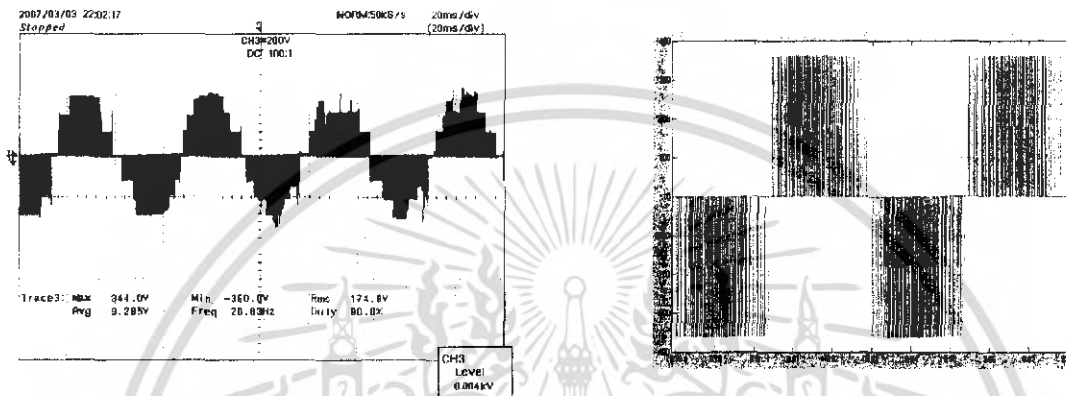
รูปที่ 3.14 วงจรพื้นฐานของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของวงจรคือเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ Q1 จะทำงานนำกระแส (on) และหยุดนำกระแส (off) สลับกันไปตามสัญญาณ Pulse ที่มาจากวงจรควบคุม เมื่อ Q1 ON จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดไพรมารีในขณะที่ทางด้านเซคันดารีขดลวดถูกพันแบบกลับทิศทางกับขดไพรมารีทำให้ขณะที่กระแสไหลผ่านขดลวดไพรมารี จะทำให้ไดโอด D1 ถูกไบแอสกลับและไม่มีกระแสไหลผ่านไปยังโหลด RL ในขณะที่เดียวกันขดไพรมารีก็จะสะสมพลังงาน และเมื่อ Q1 OFF หรือหยุดนำกระแสทำให้กระแสค่อยลดลงหรือยุบตัวลงทำให้ไดโอด D1 นำกระแสเนื่องจากถูกไบแอสตรงพลังงานที่ถูกสะสมในขดไพรมารีในช่วงที่ Q1 นำกระแสจะถูกถ่ายเทไปยังขดเซคันดารีและมีกระแสไหลไปยังโหลดและตัวเก็บประจุและเมื่อ Q1 ON อีกครั้ง ตัวเก็บประจุจะคายประจุจ่ายโหลด RL เพื่อรอ Q1 OFF จะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 สเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์

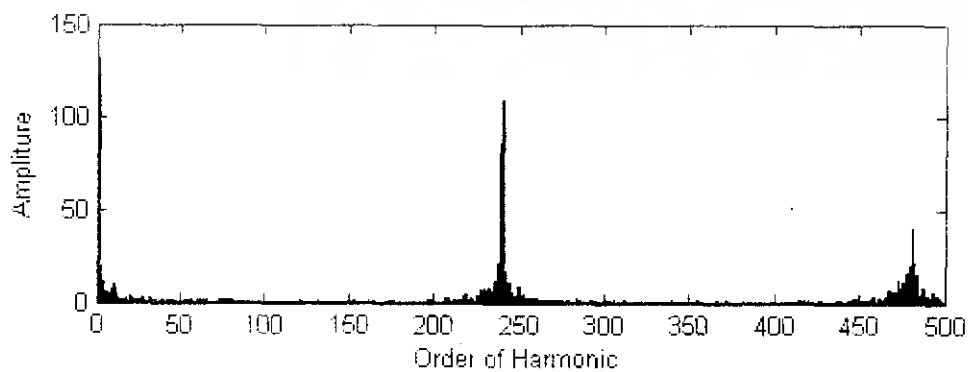
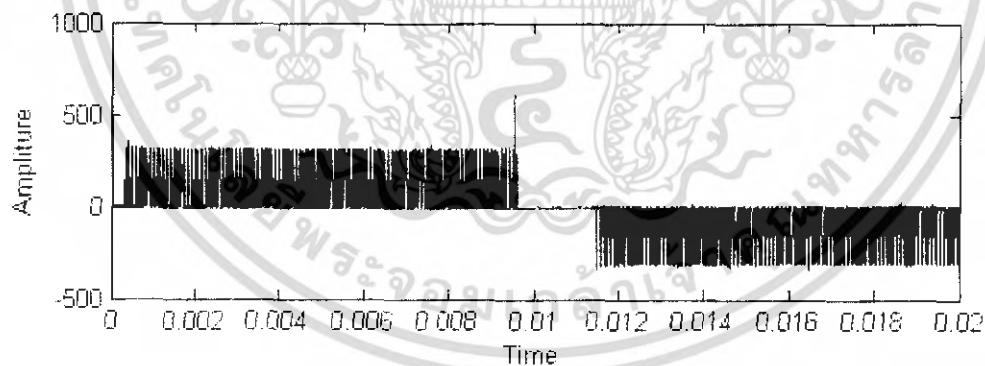
4.1.1 พิจารณาที่ความถี่เอาต์พุต 20 Hz



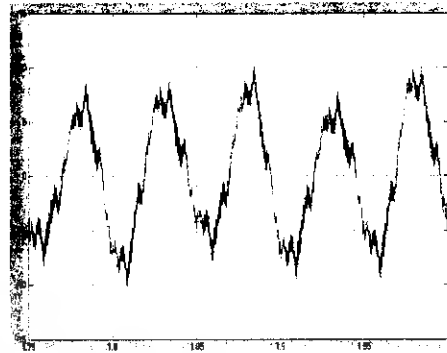
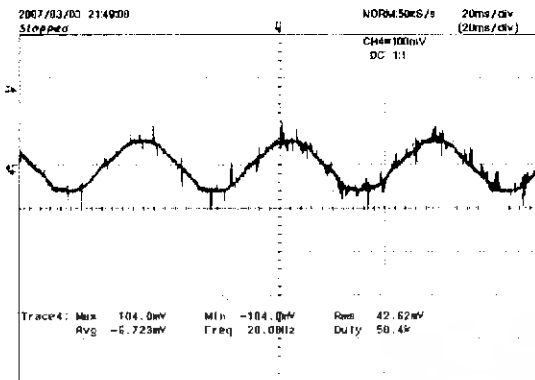
(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

(ข) คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง

รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ความถี่ 20 Hz

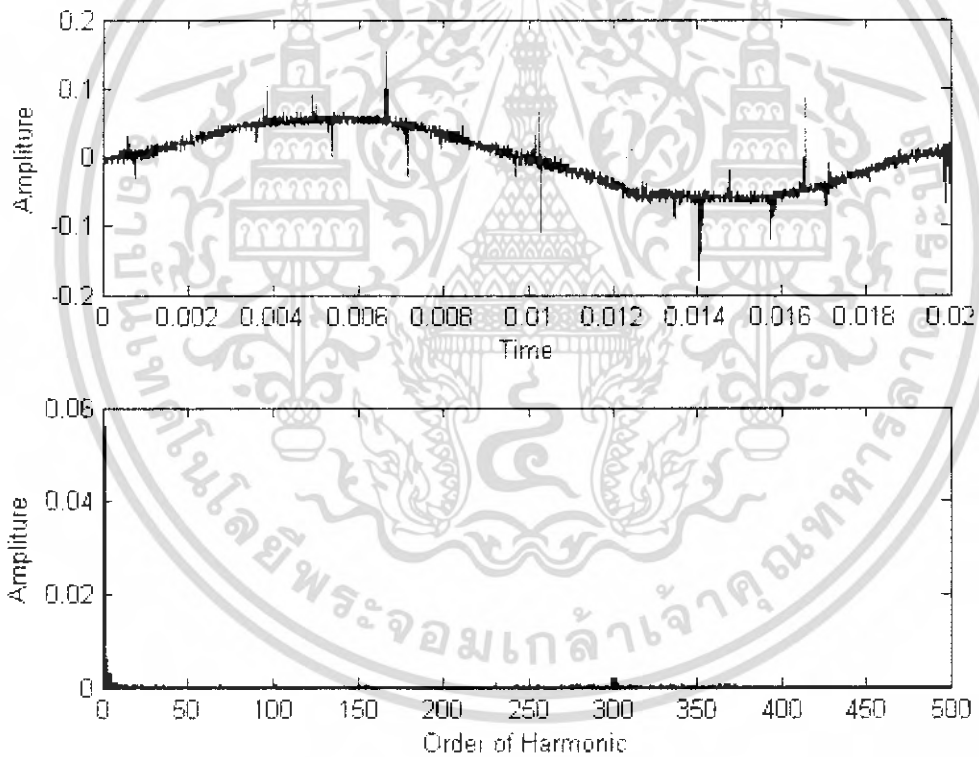


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

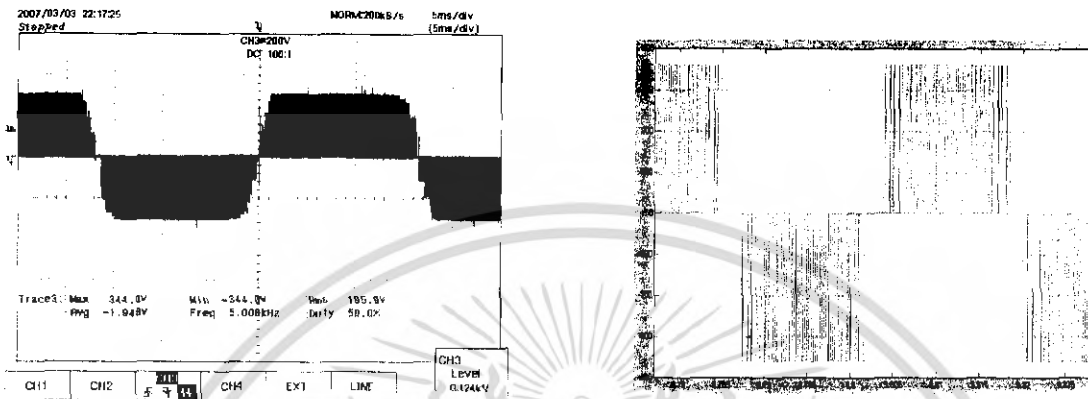
(ข) คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ความถี่ 20 Hz

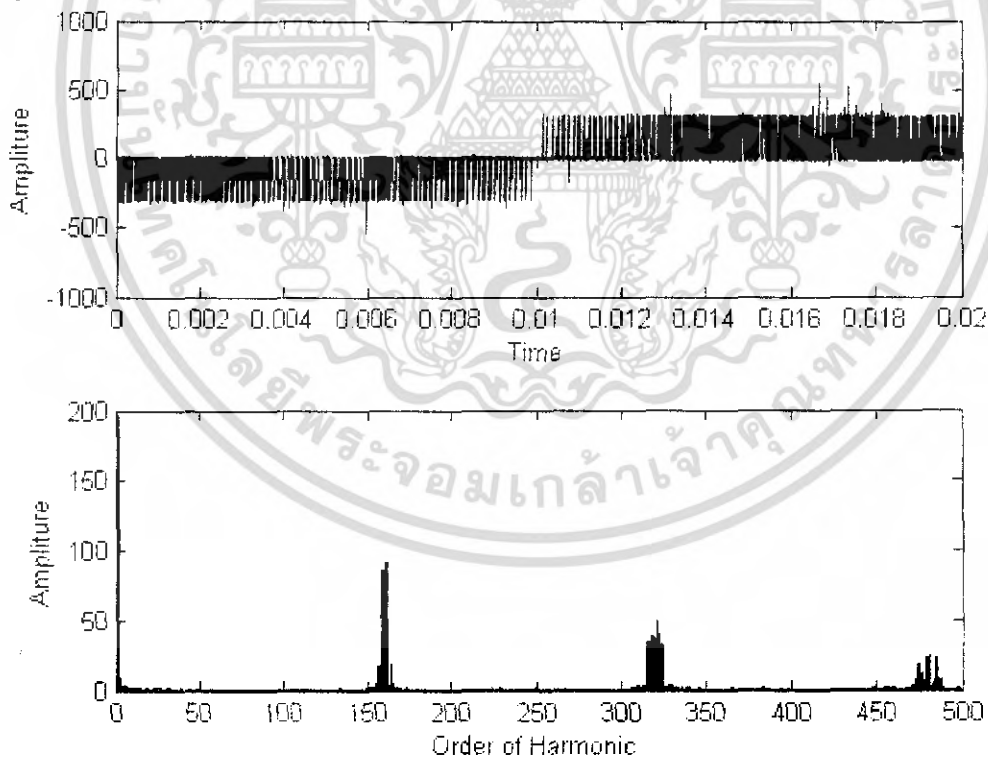
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 พิจารณาที่ความถี่เอาต์พุต 30 Hz



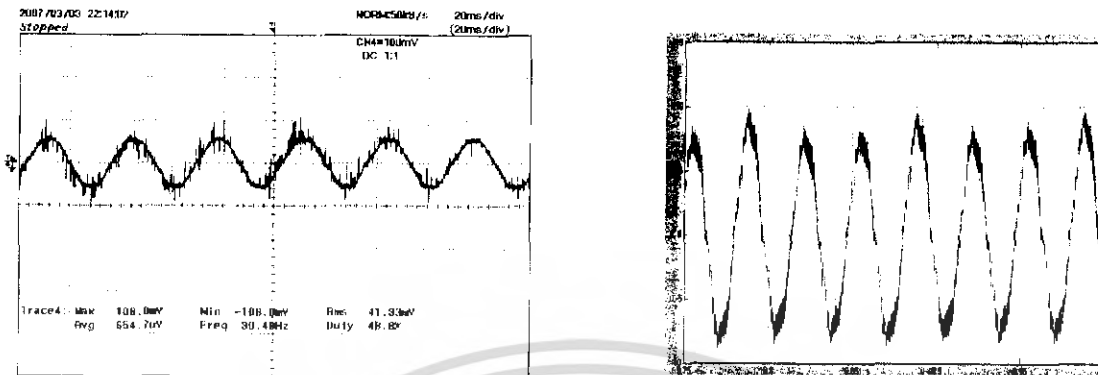
(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

(ข) คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



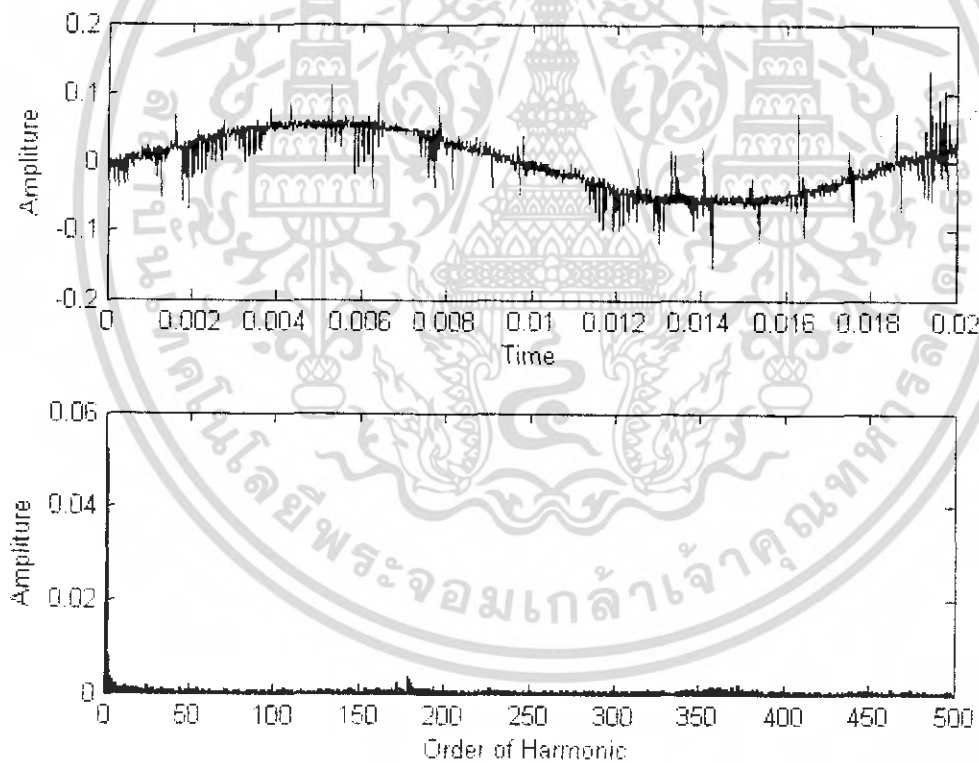
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นกระแสเอาร์ทพุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

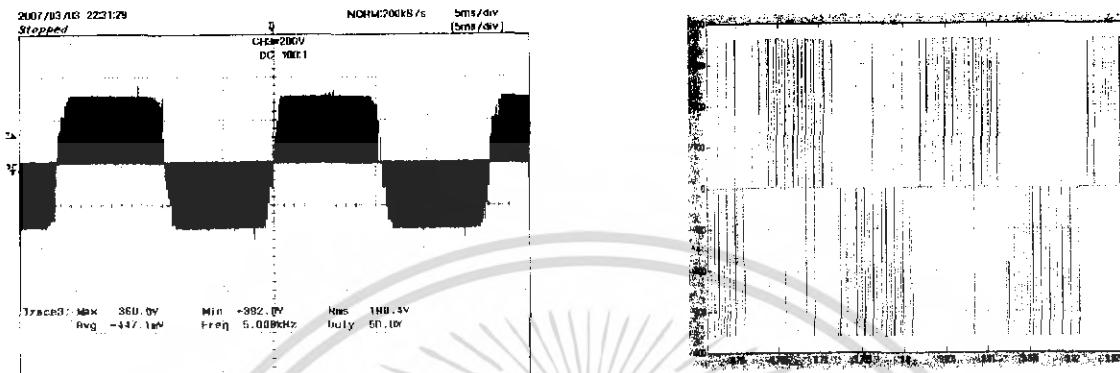
(ข) คลื่นกระแสเอาร์ทพุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของกระแสเอาร์ทพุตระหว่างไลน์ความถี่ 30 Hz

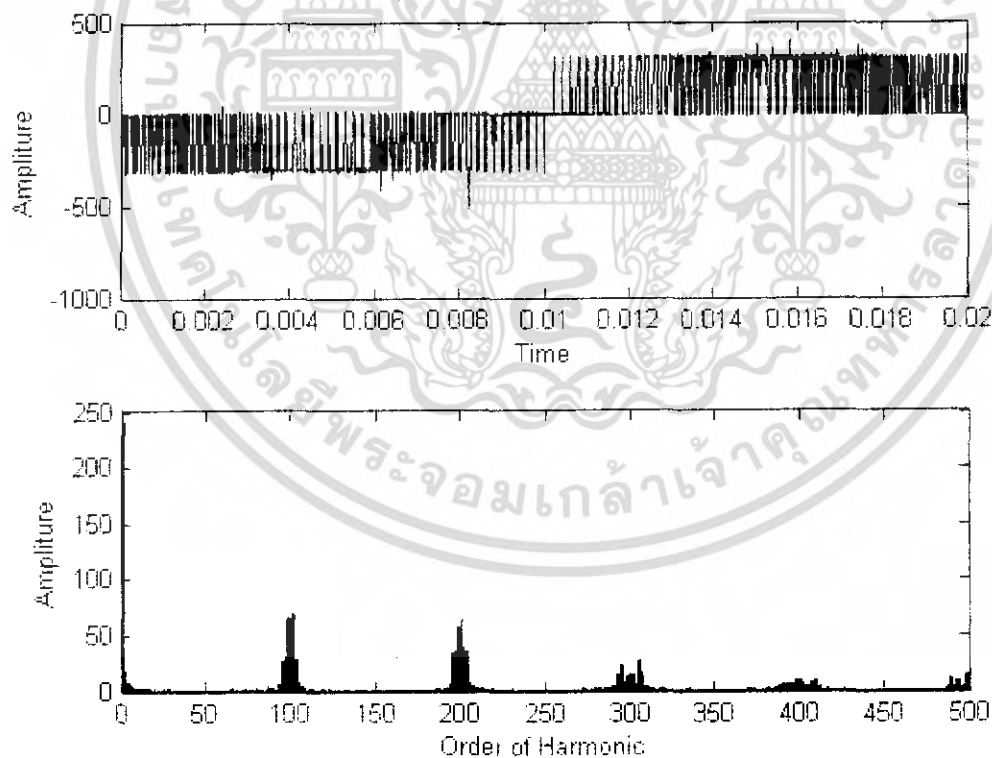
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 พิจารณาที่ความถี่เอาท์พุท 50 Hz



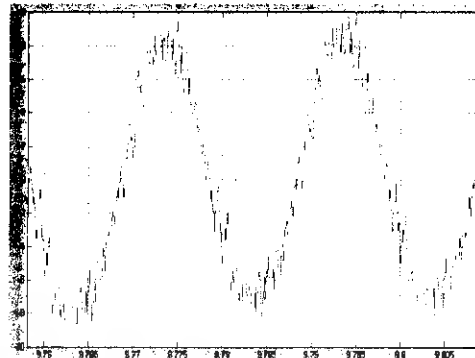
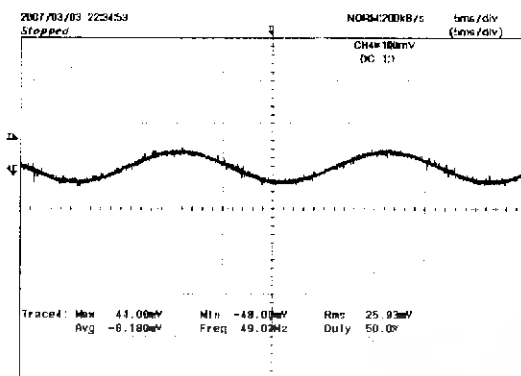
(ก) คลื่นแรงดันเอาท์พุทระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

(ข) คลื่นแรงดันเอาท์พุทระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



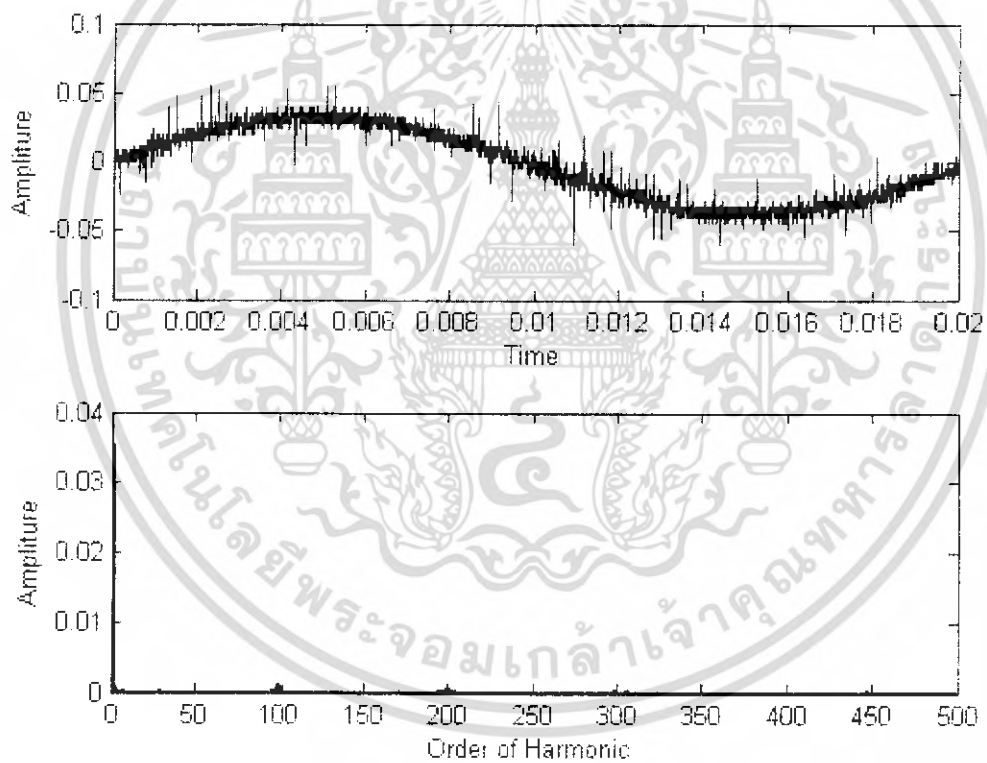
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแรงดันเอาท์พุทระหว่างไลน์ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นกระแสเอาร์ทพุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

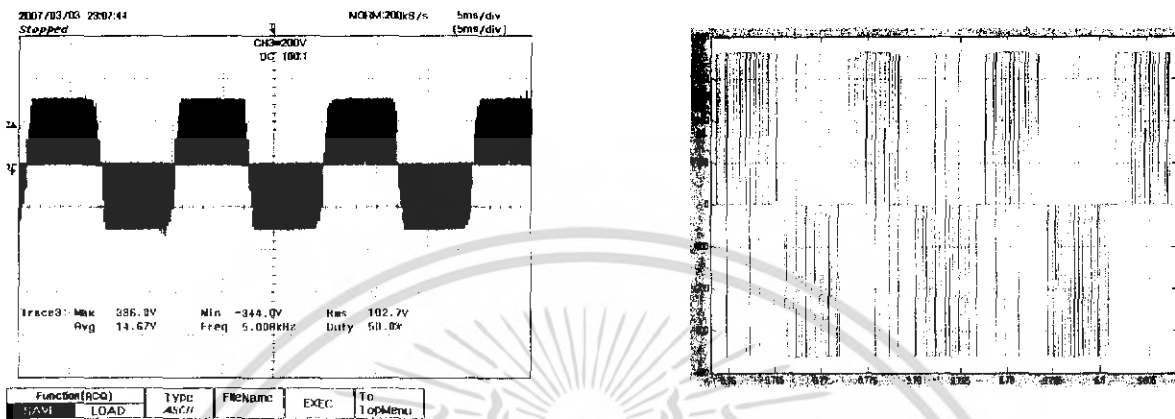
(ข) คลื่นกระแสเอาร์ทพุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของกระแสเอาร์ทพุตระหว่างไลน์ความถี่ 50 Hz

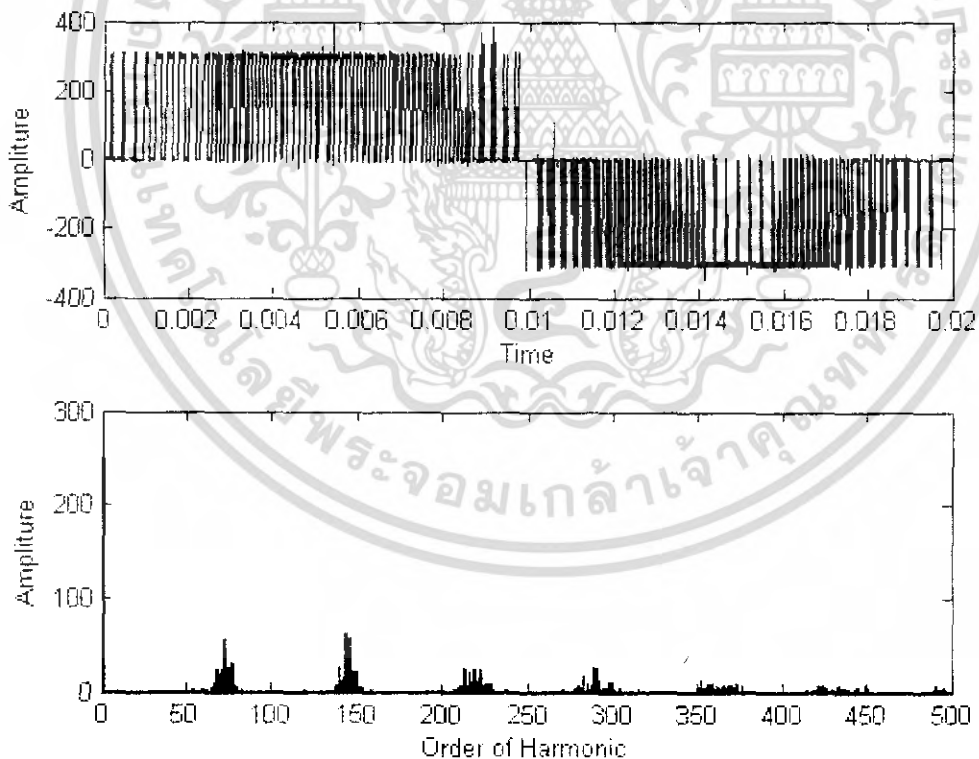
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 พิจารณาที่ความถี่เอาต์พุต 70 Hz



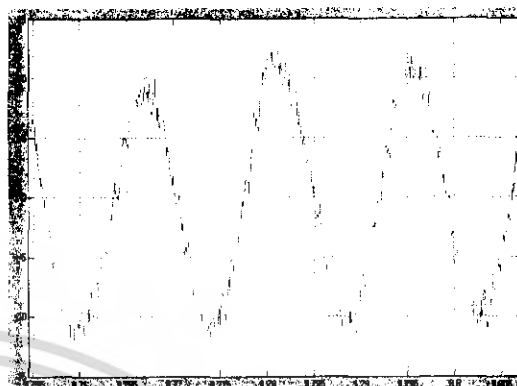
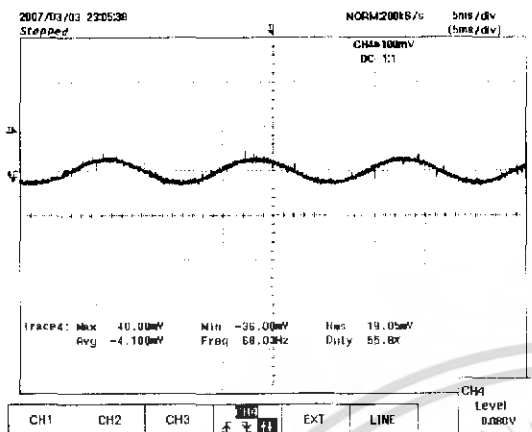
(ก) คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

(ข) คลื่นแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



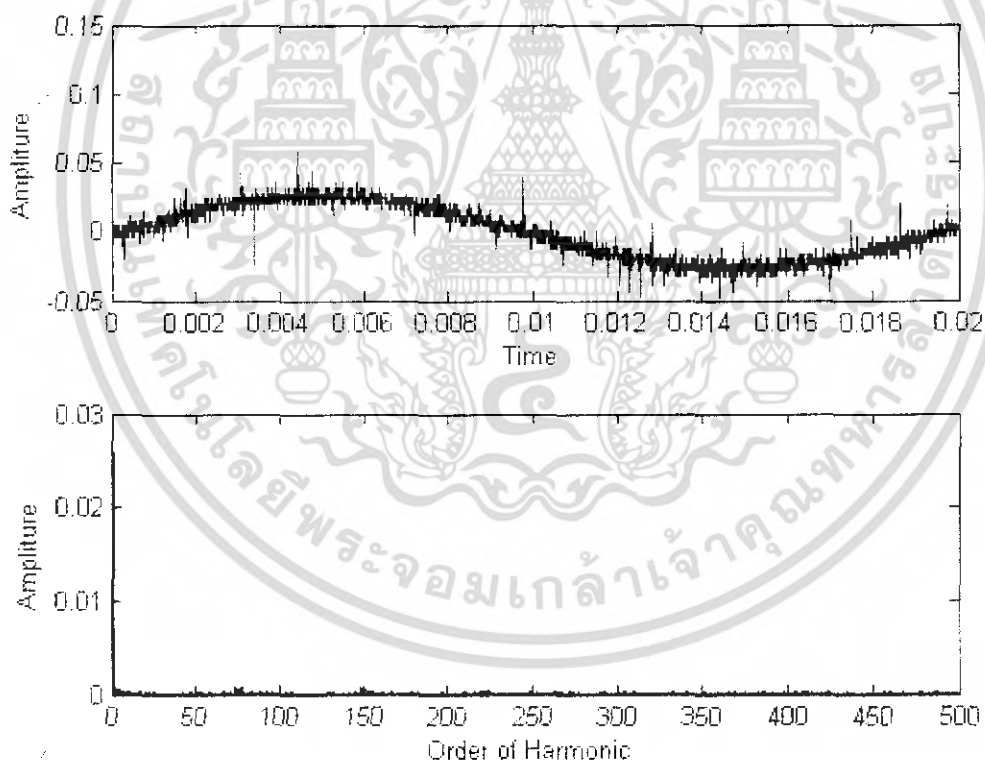
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของแรงดันเอาต์พุตระหว่างไลน์ความถี่ 70 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการวัดจริง

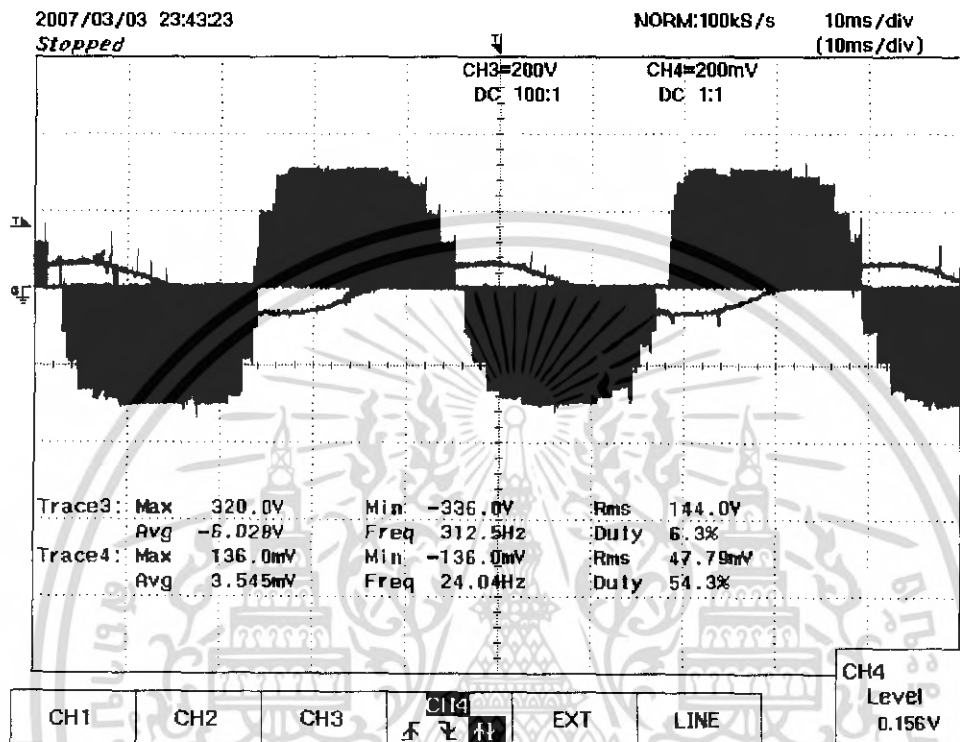
(ข) คลื่นกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์
ที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของกระแสเอาต์พุตระหว่างไลน์ความถี่ 70 Hz

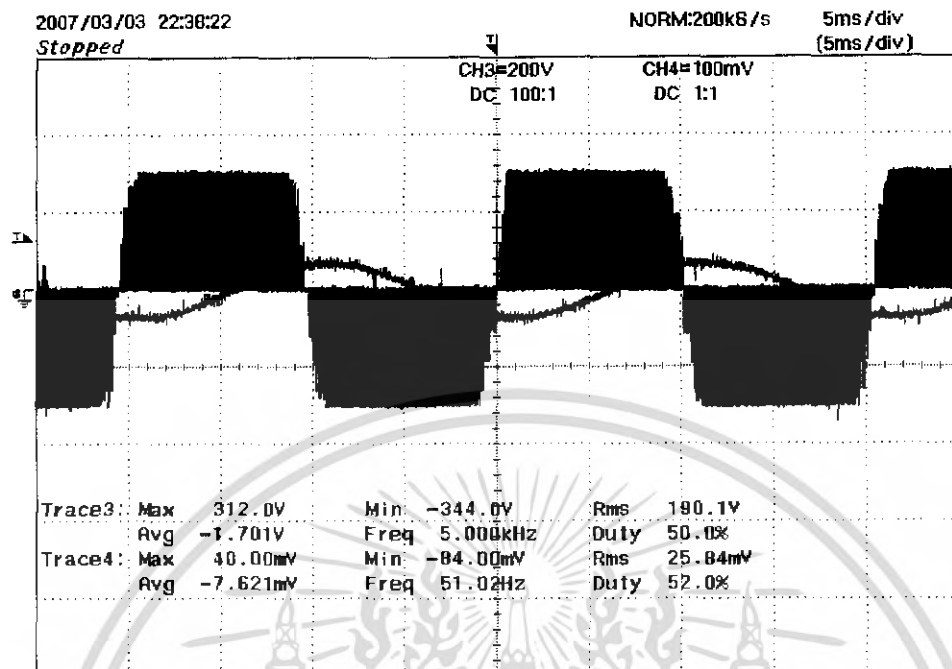
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันและกระแสหว่างไลท์ที่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ ขณะจ่ายโหลดมอเตอร์

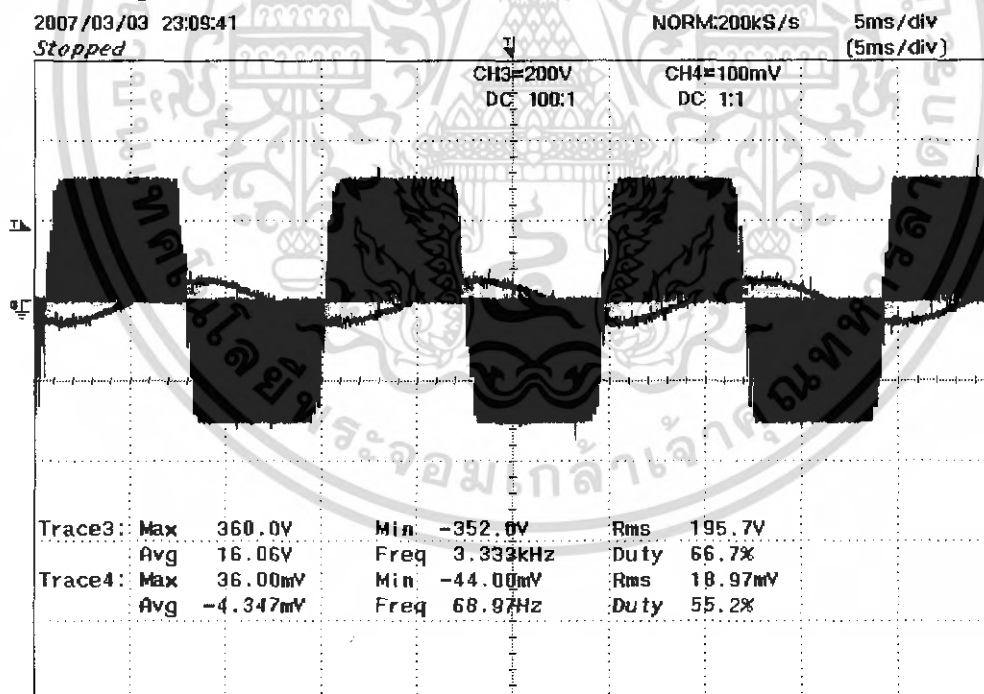


รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันและกระแสระหว่างไลท์ที่ความถี่ 25 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันและกระแสระหว่างไลท์ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันและกระแสระหว่างไลท์ที่ความถี่ 70 Hz

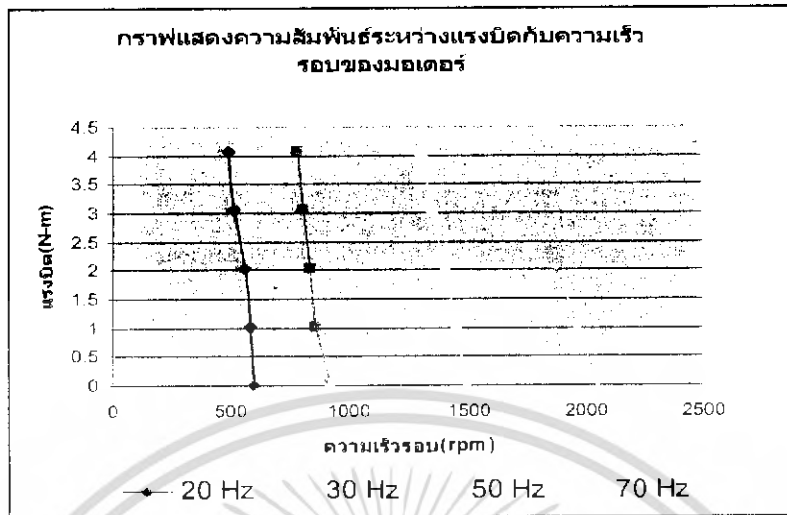
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) และความเร็วรอบ (Speed)
 ตารางบันทึกผลที่ 4.1 ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Torque) และความเร็วรอบ (Speed)

Base Frequency 50 Hz

f (Hz)	T (N-m)	Nr (rpm)
20	0	601
	1.02	584
	2.04	561
	3.06	510
	4.08	490
30	0	918
	1.02	860
	2.04	838
	3.06	807
	4.08	780
50	0	1492
	1.02	1449
	2.04	1402
	3.06	1350
	4.08	1302
70	0	2048
	1.02	1960
	2.04	1870
	3.06	-
	4.08	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



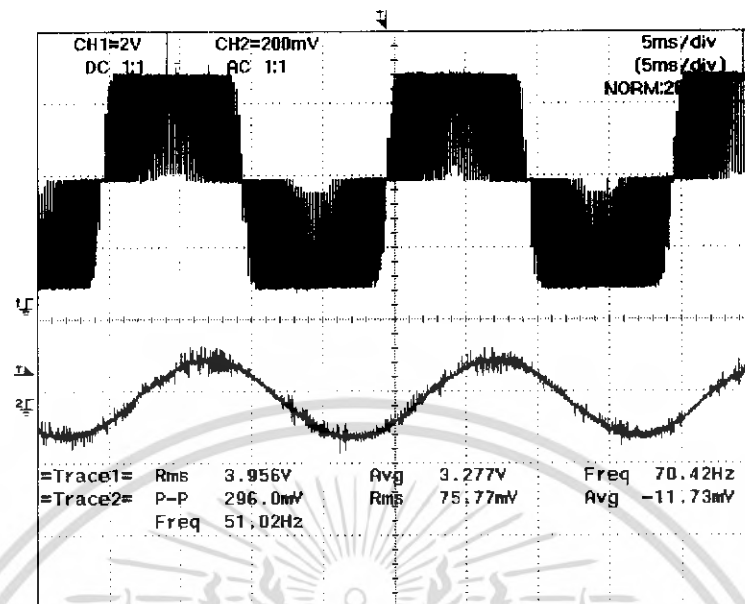
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว

4.5 การทดสอบหาประสิทธิภาพ

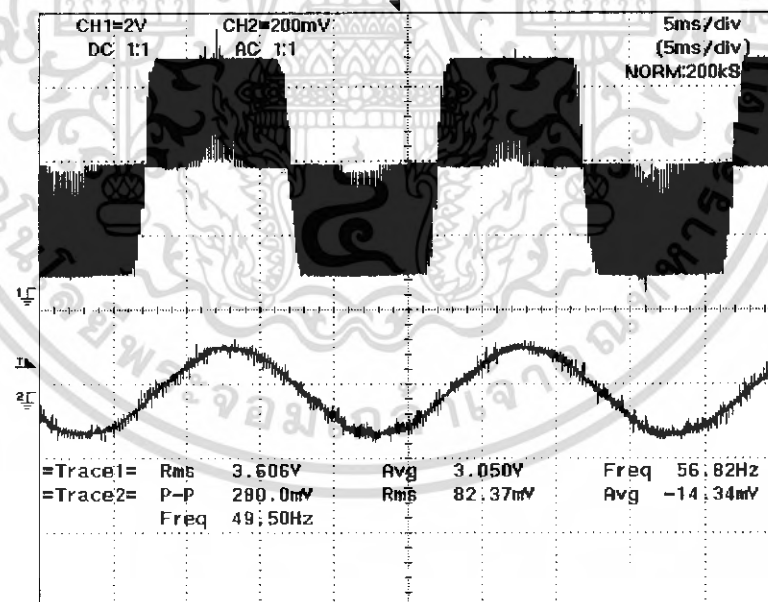
ตารางบันทึกผลที่ 4.3 บันทึกค่ากำลังอินพุต กำลังเอาต์พุต และ ค่าประสิทธิภาพ

f (Hz)	ค่าที่ได้จากการวัด				ค่าที่ได้จากการคำนวณ				
	T (N-m)	V _{in} (V) inverter	I _{in} (A) inverter	N _r (rpm)	P _{in} (W) inverter	P _{out} (W) inverter	P _{out} (W) motor	η % inverter	η % total
50	0	220	0.9	1495	100	90	0	90.00	0
	1.02	210	3.09	1459	370	310	156	83.78	42.16
	2.04	220	4.7	1424	590	420	304	71.18	51.53
	3.06	220	6.8	1374	800	570	440	71.12	55.00
	4.08	220	8	1338	900	680	572	75.55	63.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

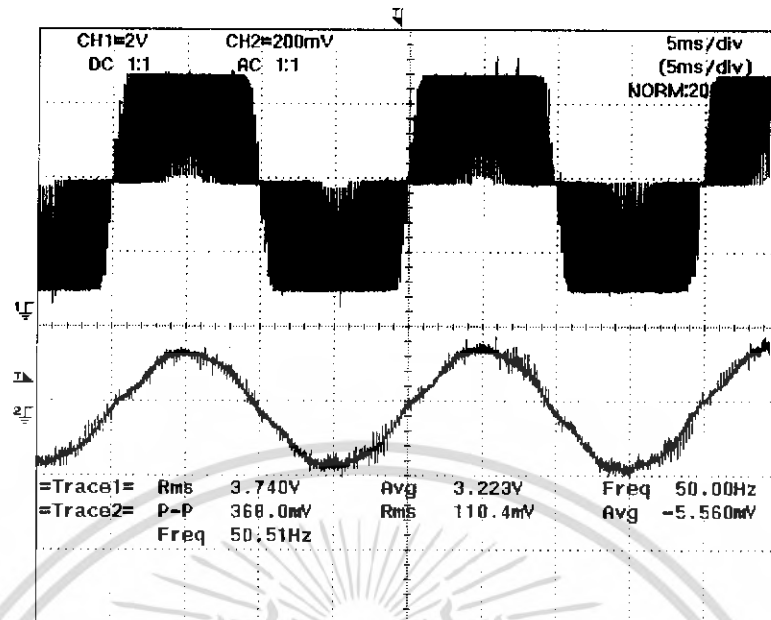


รูปที่ 4.13 แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 0 %

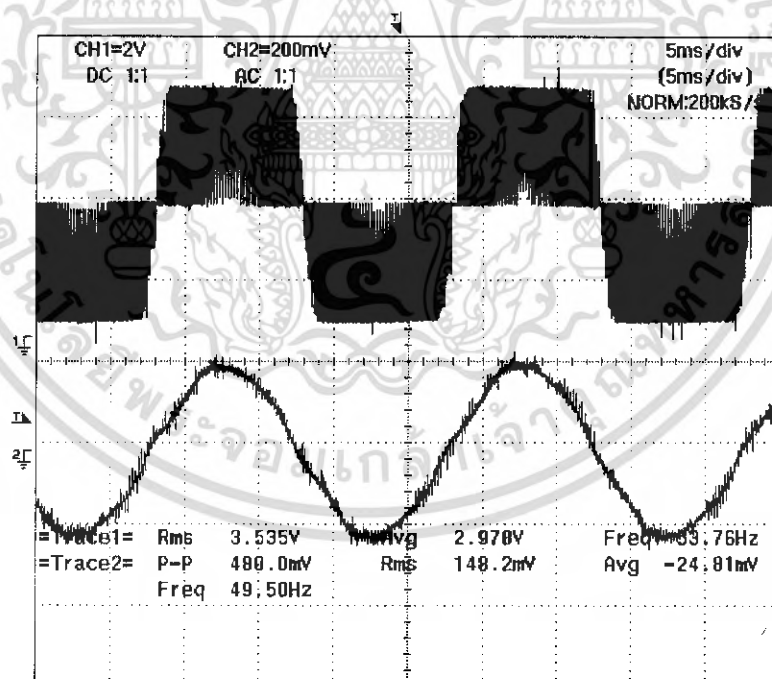


รูปที่ 3.14 แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

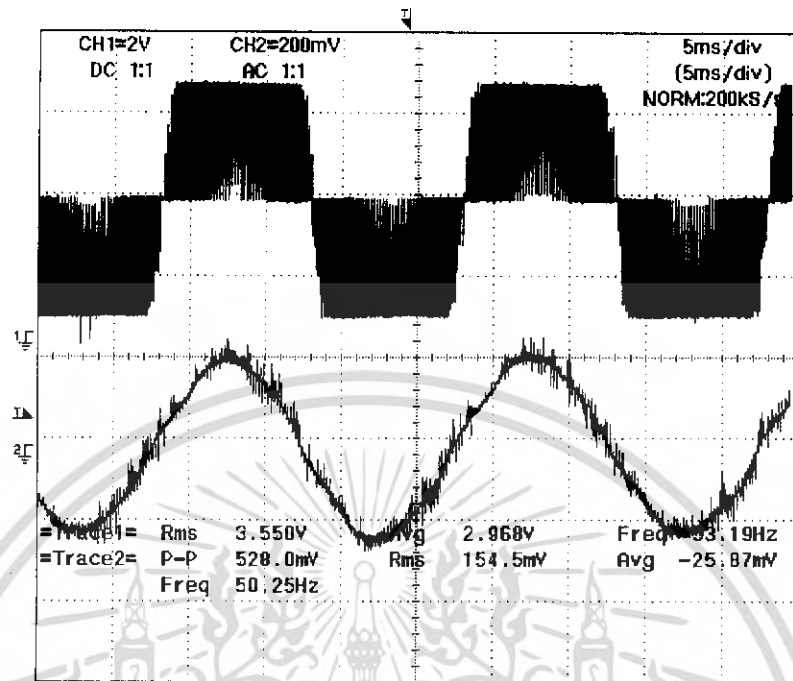


รูปที่ 3.15 แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 40 %



รูปที่ 3.16 แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 60 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แรงดันกับกระแสที่แรงบิดโหลด 80 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและเสนอแนวทางที่จะดำเนินการ

5.1 บทสรุป

สำหรับการศึกษาโครงงานนี้วัตถุประสงค์ก็เพื่อที่จะศึกษาการควบคุมอินเวอร์เตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบ SVPWM (space vector pulse width modulation) รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล dsPIC และศึกษาการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้การควบคุมแบบ V/f ซึ่งจากการศึกษาและทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์จากโครงงานสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และควบคุมมอเตอร์ให้แรงบิดคงที่ที่ความถี่ในย่านคงที่แรงบิดได้และสามารถปรับความถี่ได้สูงสุดถึง 100 HZ

5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจากการทดลองโดยการรักษาอัตราส่วนระหว่าง V/f จะสังเกตเห็นว่าการเพิ่มแรงดันขณะเริ่มหมุน เข้าไปในระบบนั้นจะสามารถทำให้แรงบิดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นได้ แต่ต้องมีการรักษาอัตราส่วนของความถี่ด้วย ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ

$$T = \frac{V_{in}}{f} I_{in}$$

ในการทดลองเรื่องความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์ จะเห็นว่าความถี่เดียวกับ แรงบิดของไหลตจะมีผลกับความเร็วของมอเตอร์

ในการทดลองหาประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้นยังมีค่าต่ำมาก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความผิดเพี้ยนไปของสัญญาณรูปคลื่นของแรงดันที่ออกมาจาก D.C. Link ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากความผิดเพี้ยนของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

5.3 เสนอแนวทางที่จะดำเนินการ

จากที่ได้ศึกษาและทำโครงงานนี้ เห็นได้ถึงความสมบูรณ์ของโครงงานยังไม่สมบูรณ์ครบทั้งหมดอย่าง เช่น ระบบป้องกันเมื่อเกิดข้อผิดพลาดต่าง ๆ เช่น การเกิดลัดวงจรเกิดขึ้นและประสิทธิภาพยังไม่สูงเท่าที่ควร จึงต้องมีการปรับปรุงหรือพัฒนาต่อไปเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ไพเราะ และ คณะ , การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วย PWM – VSI โดยคงที่แอมพลิจูดมีอดดูเลชั่น , ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต , สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543
- [2] ณัฐพงศ์ ศรีเหรียญ และ คณะ , อินเวอร์เตอร์แบบ 4 สวิตช์ สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส , ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต , สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543
- [3] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ , อิเล็กทรอนิกส์กำลัง , พิมพ์ครั้งที่ 1 , กรุงเทพ , สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง , 2547
- [4] ณัฐวัฒน์ กมลพัฒนะ และ คณะ , อินเวอร์เตอร์สามเฟสควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 บิต , ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต , สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543
- [5] นคร ภัคดีชาติ และคณะ , คู่มือการทดลอง dsPIC Microcontroller เบื้องต้นด้วยโปรแกรมภาษาซี กับ MPLAB C30 , บริษัท อินโนเวตีฟ แอ็กเพอริเมนต์ จำกัด
- [6] กฤษดา วิศวธีรานนท์ , INVERTER หลักการทำงานและเทคนิค , พิมพ์ครั้งที่ 6 , กรุงเทพ , โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2544
- [7] ศิวะ หงษ์นภา , การควบคุมและการประยุกต์ใช้งาน เอซีไดรฟ์ , พิมพ์ครั้งที่ 1 , กรุงเทพ , บริษัทกูดวิลส์ไตรีคชั่น จำกัด , 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

:*****
: Author          : stater
: Company         : KMITL
: Filename        : Main Program.s
: Date           : 08/09/2006
: 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 PHASE_C,4
.bss ENDTB_A,4
.bss ENDTB_B,4
.bss ENDTB_C,4
.bss STARTTBL,4
.bss PRESCALE,4
.bss DELAY1,4
```

:Global Declarations Variable:

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

:Global Declarations Constants:

:Code Section in Program Memory

```
.text ;Start of Code section
__reset: MOV #__SP_init, W15 ;Initialize the Stack Pointer
MOV #__SPLIM_init, W0 ;Initialize the Stack Pointer Limit
Register
MOV W0, SPLIM
NOP ;Add NOP to follow SPLIM
initialization
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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CALL Init_PWM
CALL Init_ADC1
BSET LATF,#RF0
LOOP0: CALL SW_DELAY
BTSS PORTD,#RD1
BSET LATF,#RF6
CALL SW_DELAY
BTSS 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
BTSS PORTD,#RD1 ;วนลูปรอการ Interrupt 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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

INTI_TABLE:      CALL SINETABLE
SEND_DUTY:      BCLR ADCON1,#DONE
LOOP3:          BTSS ADCON1,#DONE          ;DONE
                GOTO LOOP3
                MOV ADCBUF0.W0
                MOV #37.W2
                MUL.UU    W0.W2,W10        ;ได้ผลลัพธ์ของ 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.PDC2                ; AMPLIUDE SINEWAVE
                MOV PHASE_C.W13
                TBLRDL    [W13++],W0
                MOV W13.PHASE_C
                CALL MULPRE
                MOV W0.PDC3                ; AMPLIUDE SINEWAVE
                INC W12.W12                ;นับรอบการทำงาน/นับการเลื่อนตำแหน่ง
                                        ของค่า sinetable
                MOV ENDTB_C.W0            ;ใส่ค่าที่เฟส C จะสุดตาราง คือ 33
                CPSEQ    W12,W0          ;เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการเลื่อน
                                        ตำแหน่ง
                BRA EXIT0                ;ถ้าเปรียบเทียบแล้วค่าเท่ากัน แสดงว่าค่า
                                        มาถึงจุดสุดตาราง ต้องมีการกำหนดค่า
                                        ตัวชี้ตำแหน่งของเฟส C ใหม่
                MOV STARTTBL,W0          ;กำหนดค่าของตัวชี้ตำแหน่งเฟส C เป็นค่า
                                        เริ่มต้นตาราง

EXIT0:          MOV W0,PHASE_C
                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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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
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 TICON ; 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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV #0,W12
MOV W13.STARTTBL           :ใส่ค่าเริ่มต้นขอลดตัวชี้ตำแหน่ง
MOV W13.PHASE_A
MOV W13.PHASE_B
MOV W13.PHASE_C
BTSC PORTF,#RF6
GOTO REVERST
GOTO FORWARD
FORWARD: MOV PHASE_B,W0
ADD #240,W0
MOV W0.PHASE_B             :จีเฟส B ไป 120 องศา
MOV PHASE_C,W0
ADD #480,W0
MOV W0.PHASE_C             :จีเฟส C ไป 240 องศา
MOV #360,W0
MOV W0.ENDTB_A
MOV #240,W0
MOV W0.ENDTB_B             :อีก 66 ค่า เฟส B จะสุดตาราง
MOV #120,W0
MOV W0.ENDTB_C             :อีก 33 ค่า เฟส C จะสุดตาราง
GOTO END1
REVERST: MOV PHASE_B,W0
ADD #480,W0
MOV W0.PHASE_B             :จีเฟส B ไป 120 องศา
MOV PHASE_C,W0
ADD #240,W0
MOV W0.PHASE_C             :จีเฟส C ไป 240 องศา
MOV #360,W0
MOV W0.ENDTB_A
MOV #120,W0
MOV W0.ENDTB_B             :อีก 66 ค่า เฟส B จะสุดตาราง
MOV #240,W0
MOV W0.ENDTB_C             :อีก 33 ค่า เฟส C จะสุดตาราง
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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.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:
    MOV #0x5432109876543210
    MOV #0b0000000000000010,W0
    MOV W0,PTCON
    MOV #0x063F,W0
    MOV W0,PTPER
    MOV #0x5432109876543210
    MOV #0b0000000000000000,W0
    MOV W0,SEVTCMP
    MOV #0x5432109876543210
    MOV #0b0000000011111111,W0
    MOV W0,PWMCON1
    MOV #0x5432109876543210
    MOV #0b0000000000000010,W0
    MOV W0,PWMCON2
    MOV #0x5432109876543210
    MOV #0b0000000000111111,W0
    MOV W0,DTCON1
    CLR FLTACON
    RETURN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

:Subroutine:Init_ADC 10 BIT

```
.global      Init_ADCI
Init_ADCI:  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
              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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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
```

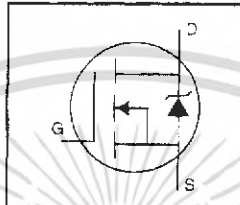
```
-----
:Subroutine: Delay_2ms
-----
```

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HEXFET® Power MOSFET

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

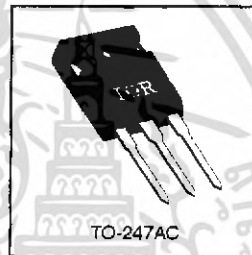


$V_{DSS} = 500V$
$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$
$I_D = 20A$

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.



DATA SHEETS

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	A
I_{DM} Pulsed Drain Current ①	80	A
$P_D @ T_C = 25^\circ C$ Power Dissipation	280	W
Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS} Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS} Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR} Avalanche Current ③	20	A
E_{AR} Repetitive Avalanche Energy ④	28	mJ
dv/dt Peak Diode Recovery dv/dt ⑤	3.5	V/ns
T_J Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°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_{JC} Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
R_{JCS} Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	°C/W
R_{JA} Junction-to-Ambient	—	—	40	°C/W

IRFP460



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	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 ②
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 ③
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	—	ns	I _D =20A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	110	—	ns	R _G =4.3Ω
t _f	Fall Time	—	58	—	ns	R _D =13Ω See Figure 10 ⑤
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	—	nH	
C _{iss}	Input Capacitance	—	4200	—	pF	V _{GS} =0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	870	—	pF	V _{DS} =25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	350	—	pF	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)	—	—	20	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	80	A	
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.8	V	T _J =25°C, I _S =20A, V _{GS} =0V ②
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	570	860	ns	T _J =25°C, I _S =20A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	5.7	8.6	μC	di/dt=100A/μs ③
t _{con}	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 I_{SP}≤20A, di/dt≤160A/μs, V_{DS}≤V_{(BR)DSS}, T_J≤150°C
- ③ V_{DD}=50V, starting T_J=25°C, L=4.3mH, R_G=25Ω, I_{AS}=20A (See Figure 12)
- ④ Pulse width ≤ 300 μs; duty cycle ≤2%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

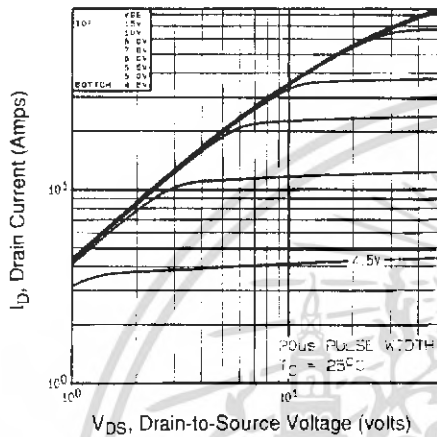


Fig 1. Typical Output Characteristics, $T_C=25^\circ\text{C}$

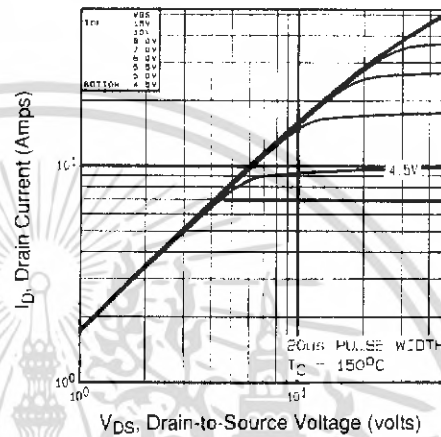


Fig 2. Typical Output Characteristics, $T_C=150^\circ\text{C}$

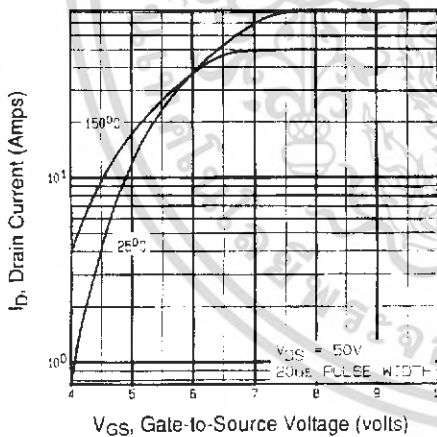


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

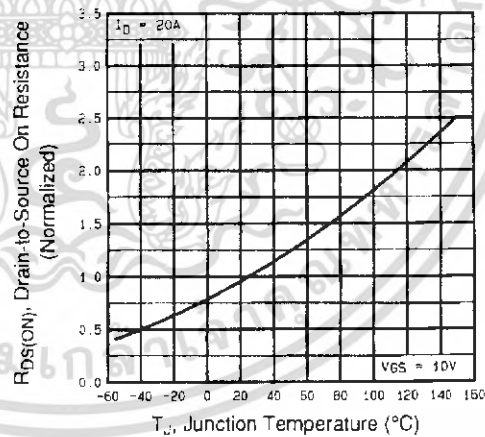


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

DATA SHEET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

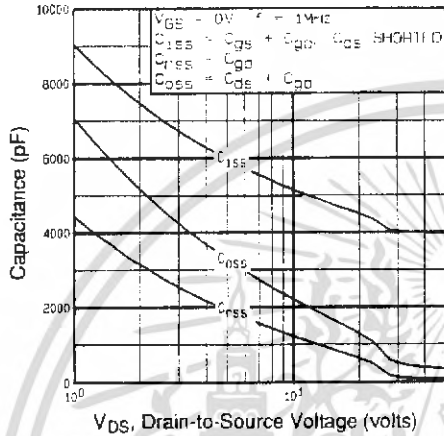


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

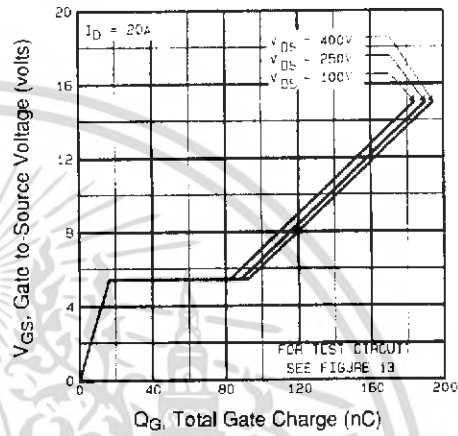


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

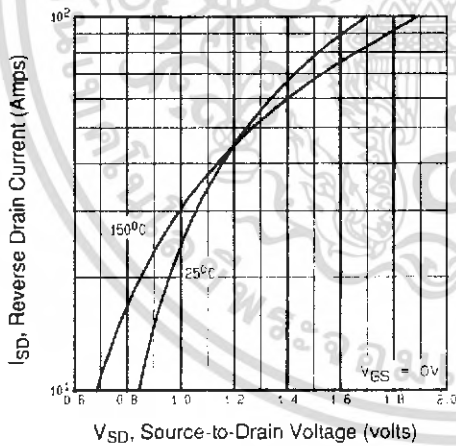


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

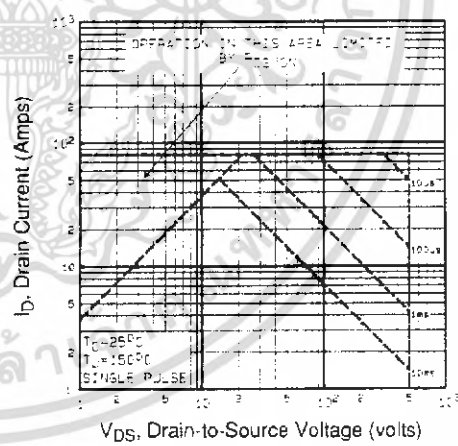


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

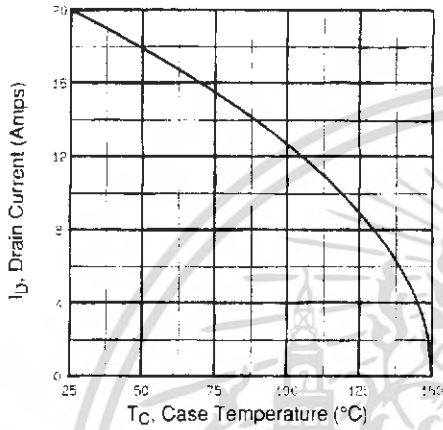


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

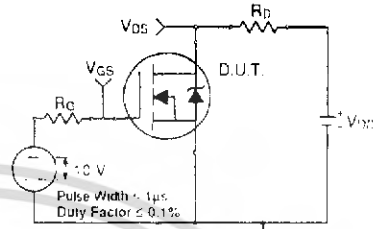


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

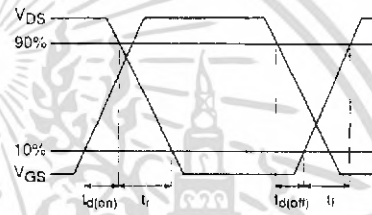


Fig 10b. Switching Time Waveforms

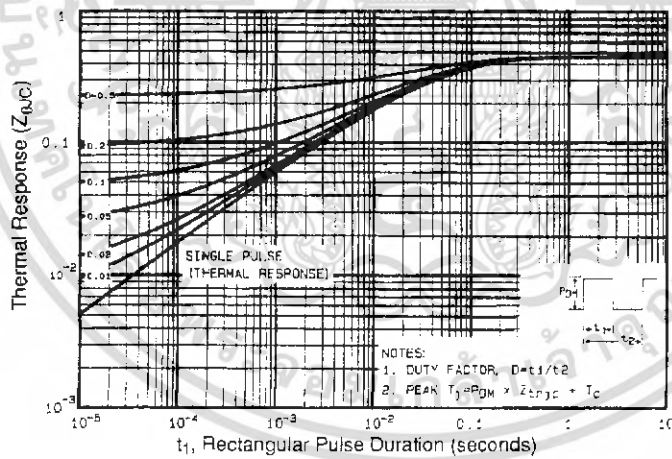


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

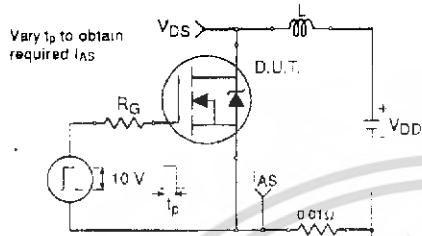


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

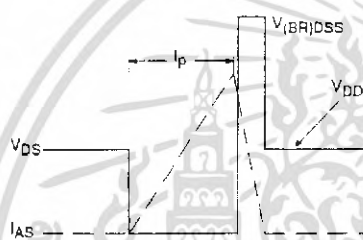


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

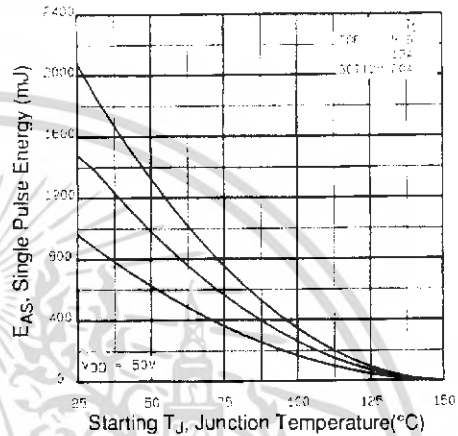


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

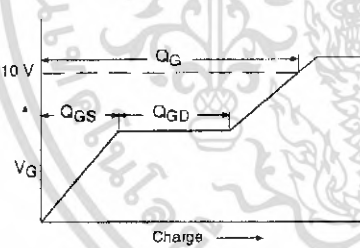


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

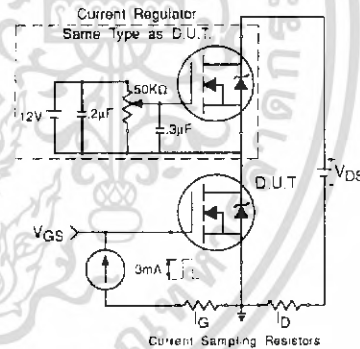


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

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

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1511

Appendix C: Part Marking Information – See page 1517