

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟตรง – ไฟตรงแบบสวิตช์โหมดฟูลบริดจ์
สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง**

**Development of a Full-Bridge DC-DC Switch-Mode Converter
for DC Motor Drive**



๒๗.
๐/๑๘๗ก
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 82948
วัน,เดือน,ปี... 29 ก.ค. 2551

b. 119 56793
i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2550

การพัฒนาวงจรแปลงผันไฟตรง - ไฟตรงแบบสวิตช์โหมดฟูลบริดจ์สำหรับการ
ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง

Development of a Full-Bridge DC-DC Switch-Mode Converter
for DC Motor Drive



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข
ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

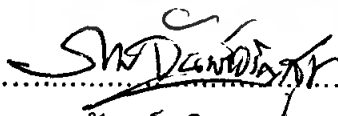
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

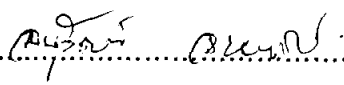
เรื่อง การพัฒนางจรแปลงผันไฟตรง – ไฟตรงแบบสวิตช์โหมดพูลบริดจ์สำหรับการ
ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง

ผู้จัดทำ



- | | |
|-------------------|-------------|
| 1. นายอนุชา | พัฒนาผล |
| 2. นางสาวเพลินพิศ | ลีอวนิชวงศ์ |
| 3. นายอาทิตย์ | จันทพรโสสม |


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ภาพ จันทร์เจริญสุข)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนางจรแปลงผันไฟตรง – ไฟตรงแบบสวิตช์โหมคฟูลบริดจ์สำหรับการ ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง

นายอนุชา พัฒนาผล
นางสาวเพลินพิศ ลีอวนิชวงศ์
นายอาทิตย์ จันทพรโสม
ดร.ภพ จันท์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้เสนอผลการวิจัยและพัฒนา ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรให้สามารถทำงานได้ทั้ง 4 จุดภาค พิกัดของมอเตอร์ 300 วัตต์ ความเร็ว 2500 รอบต่อนาที การควบคุมแรงดันที่ขดอาร์มาเจอร์ใช้วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ควบคุมขนาดของแรงดัน และทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยใช้การปรับจูนพีซีเคิล จากสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ทั้งแบบไบโพลาร์ และแบบยูนิโพลาร์ ที่ความถี่การสวิตซ์ 5 kHz ในส่วนของสวิตซ์เลือกใช้ไอจีบีทีเนื่องจากมีการสูญเสียขณะนำกระแสต่ำและทำงานที่ความถี่สูงได้ดี การเบรกของมอเตอร์ใช้การเบรกแบบคืนพลังงาน ในส่วนการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ใช้การควบคุมแบบวงรอบปิดโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI และยังแสดงผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีหน้าต่างโปรแกรม Visual Basic โดยสามารถสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ได้ ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Simulink

Development of a Full-Bridge DC-DC Switch-Mode Converter for DC Motor Drive

ANUCHAR	PATANAPHON	47010928
PLERNPID	LUEWANICHWONG	47012044
ATIT	JANTAPORNSOM	47012047
Dr. PHOP	CHANCHARROENSOOK	Supervisor
Asst.Prof.ANUWAT	JANGWANITLERT	Supervisor

2007

ABSTRACT

This thesis presents the development of a four – quadrant drive of a permanent DC motor. Its rated output power is 300W at 2500rpm. The armature voltage of the motor was controlled by using a full – bridge DC – DC switch – mode converter in Bipolar and Unipolar switching schemes. The switching frequency of the PWM converter was 5kHz, IGBTs were chosen as switches due to their low conduction losses and good performance at high switching frequency. The drive system worked very well in both motoring and regenerative modes. In such close – loop control of motor speed, the PI regulator was implemented in Atmel microcontroller. The Visual Basic Program was used for interfacing between computer and the microcontroller. Good agreement between experimental results and computer simulation has been found.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้ไม่ได้มาจากความตั้งใจ ความรู้ ความสามารถและความสามัคคีของสมาชิกในกลุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ได้มาจากความร่วมมือและความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน จึงขออนุญาติกล่าวถึงเพื่อเป็นการขอบพระคุณและให้เกิดระลึกถึง

ดร.ภพ จันท์เจริญสุข และ ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ชี้นำแนวทางในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ คอยผลักดันให้การทำโครงการมีความคืบหน้า และเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการนี้ รวมถึงความเอาใจใส่ที่อาจารย์มอบให้อย่างเสมอมา

บิดา มารดา ของสมาชิกในกลุ่มที่ทำโครงการนี้ เพราะท่านเป็นผู้ที่สมาชิกทุกคนในกลุ่มรักและเคารพยิ่ง ท่านเป็นผู้มอบความรัก ความเอาใจใส่ และโอกาสทางการศึกษาจนเราได้มาถึงในขณะนี้ ไม่ว่าจะอุปสรรคจะยากหนักหนาสักเพียงใด กำลังใจจากท่านจะคอยเป็นแรงผลักดันให้เราทุกคนลุกขึ้นและก้าวเดินใหม่อีกครั้ง อีกทั้งทุกๆคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ในพระคุณอันหาที่เปรียบมิได้

สถาบันและครูบาอาจารย์อันเป็นที่เคารพรักทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าทั้งหลายตั้งแต่เยาว์วัยจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

คุณป้าแม่บ้านประจำชั้น 4 ตึก ECC ที่คอยเก็บกวาดเช็ดถูห้องให้ดูสะอาดอยู่เสมอ , สมาชิกในกลุ่มโครงการที่ร่วมแรง ร่วมใจกันทำโครงการนี้ตั้งแต่ต้นจนบรรลุผลสำเร็จ รวมถึงเพื่อนๆ 4B และทุกๆคนที่คอยเป็นกำลังใจให้และคอยช่วยเหลือในทุกๆด้าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วงจรขับไอจีบีที.....	5
2.1.1 การขับไอจีบีทีด้วยไอซี TTL.....	5
2.1.2 การขับไอจีบีทีด้วยไอซี CMOS.....	6
2.1.3 การขับไอจีบีทีด้วยหม้อแปลง.....	7
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	7
2.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	8
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร.....	11
2.5 การควบคุมอัตราเร็ว.....	13
2.5.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์.....	13
2.6 การเบรกแบบคืนพลังงาน.....	14
2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบพูลบริดจ์.....	16
2.7.1 PWM WITH BIPOLAR VOLTAGE SWITCHING.....	18
2.7.2 PWM WITH UNIPOLAR VOLTAGE SWITCHING.....	21
2.8 ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	23

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จุดภาค.....	24
2.9.1 ส่วนประกอบของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า.....	24
2.9.2 แรงบิดและอัตราเร็วในการทำงานหลายจุดภาค.....	25
2.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน.....	26
2.10.1 คุณสมบัติและข้อต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	26
2.10.2 โครงสร้างภายนอกและตำแหน่งขา.....	27
2.10.3 รายละเอียดของขาสัญญาณและการใช้งาน.....	28
2.10.4 พิงก์ชั้น ADC.....	29
2.10.5 พิงก์ชั้น PWM.....	30
2.11 การใช้งานติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port).....	33
2.11.1 มาตรฐาน RS-232.....	33
2.11.2 รูปแบบการสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม.....	34
2.11.3 คอนเนคเตอร์แบบ D-Type	34
2.11.4 การจัดเรียงขาสัญญาณ.....	35
2.11.5 Visual Basic.....	36
2.12 การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์.....	37
2.13 อธิบายการทำงานของวงจร.....	38
2.14 การจำลองการทำงานของวงจร Full-Bridge Converter ด้วย Simulink.....	46
2.15 การทดสอบโดยใช้มอเตอร์ขนาด 5Hp 240V 1750rpm Field 200V.....	51
2.16 การทดสอบโดยใช้มอเตอร์ขนาด 11W 110V 2000rpm.....	58
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจร.....	63
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของโครงการ.....	63
3.2 วงจรกำลัง.....	64
3.3 วงจรควบคุม.....	64
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	68
4.1 การทดลองหาค่า R_s โดยวิธี V-I Method.....	69
4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์ กับแรงดันไฟฟ้า ที่ป้อนเข้าขณะไร้ภาระ.....	70

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดลองการทำงานและวัดสัญญาณเอาต์พุตทั้งระบบ.....	71
4.3.1 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณ PWM.....	72
4.3.2 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจร Dead Time.....	73
4.3.3 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจร Gate Drives.....	73
4.3.4 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของ Converter.....	74
4.4 ผลจากการวัดสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ ขณะไม่มีภาระ เทียบกับมีภาระ แบบลูปเปิด.....	76
4.5 ผลจากการวัดสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ ขณะไม่มีภาระ เทียบกับมีภาระ แบบลูปปิด.....	100
4.6 การตอบสนองต่อความเร็วของมอเตอร์.....	149
4.7 สัญญาณแรงดัน กระแสของการทำงานของ Converter ทั้ง 4 จุดภาค.....	152
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	154
บรรณานุกรม.....	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการขับไอจีบีทีด้วยไอซี TTL.....	5
2.2 วงจรขับไอจีบีทีด้วยไอซี CMOS	6
2.3 วงจรขับไอจีบีทีด้วยหม้อแปลง.....	7
2.4 มอเตอร์กระแสตรง.....	9
2.5 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์กระแสตรง.....	10
2.6 การทำงาน 4 จุดภาคของมอเตอร์กระแสตรง.....	11
2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร.....	12
2.8 การเบรกแบบคืนพลังงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก.....	15
2.9 Full-bridge dc-dc converter.....	17
2.10 PWM with Bipolar Voltage Switching.....	20
2.11 PWM with Unipolar Voltage Switching.....	22
2.12 แรงดันกระเพื่อมเฉลี่ยใน full-bridge converter using PWM.....	23
2.13 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จุดภาค.....	24
2.14 ส่วนประกอบของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า.....	25
2.15 การขับเคลื่อนหลายจุดภาค.....	26
2.16 แสดงขาของไอซี ATMEGA16.....	28
2.17 การจัดขาต่างๆ ของ DB9 และ DB25.....	35
2.18 หน้าตาของแอมพลิฟายเออร์.....	36
2.19 วงจรการทำงานของมอเตอร์ 4 จุดภาค.....	38
2.20(ก) สวิตช์ S1 และสวิตช์ S4 เริ่มนำกระแส.....	40
2.20(ข) สวิตช์ S1 หยุดนำกระแส สวิตช์ S4 ยังคงนำกระแส.....	40
2.20(ค) สวิตช์ S2 เริ่มนำกระแส สวิตช์ S4 ถูกลัดวงจรโดย D4.....	41
2.20(ง) S2 หยุดนำกระแส S4 ถูกลัดวงจรโดย D4.....	41
2.21 แสดงการสวิตช์แรงดัน และกระแส.....	42
2.22(ก) สวิตช์ S2 และสวิตช์ S3 เริ่มนำกระแส.....	43
2.22(ข) สวิตช์ S2 เริ่มหยุดนำกระแส สวิตช์ S3 ยังคงนำกระแส.....	43
2.22(ค) สวิตช์ S1 เริ่มนำกระแส สวิตช์ S2 ถูกลัดวงจรโดยไดโอด D2.....	44
2.22(ง) สวิตช์ S1 เริ่มหยุดนำกระแส สวิตช์ S2 ถูกลัดวงจรโดยไดโอด D2.....	44
2.23 แสดงการสวิตช์แรงดัน และกระแส.....	45
2.24 กระแสที่อาร์มาเจอร์ Bipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	46
2.25 แรงดันที่อาร์มาเจอร์ Bipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	47

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
2.26 ความเร็วของมอเตอร์ Bipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	47
2.27 แรงบิดของมอเตอร์ Bipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	48
2.28 กระแสที่อาร์มาเจอร์ Unipolar ควบคุมแบบ Open Loop..	49
2.29 แรงดันที่อาร์มาเจอร์ Unipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	50
2.30 ความเร็วของมอเตอร์ Unipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	50
2.31 แรงบิดของมอเตอร์ Unipolar ควบคุมแบบ Open Loop.....	51
2.32 กราฟความเร็วรอบที่ป้อนเข้า Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	52
2.33 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	53
2.34 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	53
2.35 กราฟกระแสไฟฟ้า Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	54
2.36 กราฟแรงบิด Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	54
2.37 กราฟความเร็วรอบที่ป้อนเข้า Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	55
2.38 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	56
2.39 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	56
2.40 กราฟกระแสไฟฟ้า Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	57
2.41 กราฟแรงบิด Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	57
2.42 กราฟความเร็วรอบที่ป้อนเข้า Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	58
2.43 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	59
2.44 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	59
2.45 กราฟกระแสไฟฟ้า Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	60
2.46 กราฟแรงบิด Unipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	60
2.47 กราฟความเร็วรอบที่ป้อนเข้า Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	61
2.48 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	62
2.49 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	62
2.50 กราฟกระแสไฟฟ้า Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	63
2.51 กราฟแรงบิด Bipolar ควบคุมแบบ Close Loop.....	63
3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงาน และการควบคุมของโครงการ.....	64
3.2 วงจรกำลัง.....	65
3.3(ก) วงจรแหล่งจ่ายไฟ 5V.....	66
3.3(ข) วงจรคอนโทรล.....	66
3.3(ค) วงจร Dead Time.....	66

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
3.3(ง) วงจรขับ IGBT ด้วย TLP250.....	67
4.1 การต่อวงจรเพื่อหาค่า R_{θ}	69
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และสัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์.....	69
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	71
4.4 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	71
4.5 สัญญาณ PWM แบบ Bipolar ที่ความถี่ 5 kHz.....	72
4.6 สัญญาณ PWM แบบ Unipolar ชดชั้ 1 และ ชดชั้ 2 ที่ความถี่ 5 kHz.....	72
4.7 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจร Dead time ที่มีช่วงเวลา $3.5 \mu S$	73
4.8 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจร Gate Drives.....	73
4.9 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตทกคร่อมฮาร์มาเจอร์ในทิศ Forward.....	74
4.10 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตทกคร่อมฮาร์มาเจอร์ในทิศ Reverse.....	74
4.11 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตทกคร่อมฮาร์มาเจอร์ในทิศ Forward.....	75
4.12 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตทกคร่อมฮาร์มาเจอร์ในทิศ Reverse.....	75
4.13 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ.....	76
4.14 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	76
4.15 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ... ..	77
4.16 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	77
4.17 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ.....	78
4.18 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	78
4.19 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ.....	79
4.20 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	79
4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขณะมีภาระ และ ไม่มีภาระ (Bipolar switching).....	81
4.22 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ.....	82
4.23 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	82
4.24 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ... ..	83
4.25 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	83
4.26 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ... ..	84
4.27 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	84
4.28 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ... ..	85
4.29 สัญญาณแรงดัน กระแสฮาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	85
4.30 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และ ไม่มีภาระ (Bipolar switching).....	87

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

4.31	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ.....	88
4.32	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	88
4.33	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ....	89
4.34	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	89
4.35	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ....	90
4.36	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	90
4.37	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ....	91
4.38	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	91
4.39	กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Unipolar Switching	93
4.40	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ.....	94
4.41	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	94
4.42	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ...	95
4.43	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	95
4.44	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ...	96
4.45	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	96
4.46	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ...	97
4.47	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ.....	97
4.48	กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Unipolar Switching.....	99
4.49	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	100
4.50	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที มีภาระ.....	100
4.51	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	101
4.52	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที มีภาระ.....	101
4.53	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	102
4.54	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีภาระ.....	102
4.55	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	103
4.56	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที มีภาระ.....	103
4.57	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	104
4.58	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที มีภาระ.....	104
4.59	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	105
4.60	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที มีภาระ.....	105
4.61	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	106

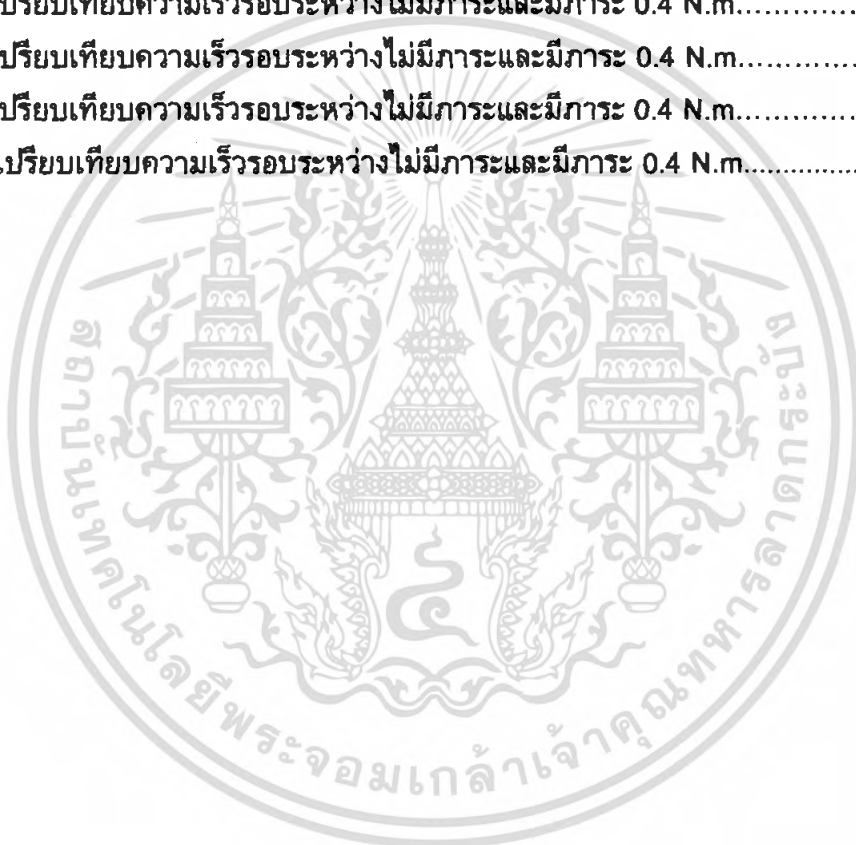
สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

4.124	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	143
4.125	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	144
4.126	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	144
4.127	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ.....	145
4.128	กราฟเปรียบเทียบความรีวขณะมีภาระ และไม่มีภาระ.....	147
4.129	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะ Forward Braking.....	148
4.130	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะ Reverse Braking.....	148
4.131	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะ Forward Braking.....	149
4.132	สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะ Reverse Braking.....	149
4.133	สัญญาณแรงดันและกระแสขาเข้า ขณะไม่มีโหลด.....	150
4.134	สัญญาณแรงดันและกระแสขาเข้า ขณะมีโหลด.....	150
4.135	การตอบสนองความเร็วที่ 500 รอบต่อนาที.....	151
4.136	การตอบสนองความเร็วที่ -500 รอบต่อนาที.....	151
4.137	การตอบสนองความเร็วระหว่าง 2700 กับ -2700 รอบต่อนาที.....	152
4.138	การตอบสนองความเร็วที่ 500 รอบต่อนาที.....	152
4.139	การตอบสนองความเร็วที่ -500 รอบต่อนาที.....	153
4.140	การตอบสนองความเร็วระหว่าง 2700 กับ -2700 รอบต่อนาที.....	153
4.141	การทำงานของมอเตอร์ บนระนาบแรงดันและกระแส.....	154
4.142	การทำงานของมอเตอร์ บนระนาบแรงดันและกระแส.....	155

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการจัดเรียงขาสัญญาณ.....	35
4.1 ค่าแรงดัน และกระแสอาร์มาเจอร์.....	69
4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ ที่ความเร็วรอบต่างๆ.....	70
4.3 ผลการทดลอง Bipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Forward.....	84
4.4 ผลการทดลอง Bipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Reverse.....	86
4.5 ผลการทดลอง Unipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Forward.....	96
4.6 ผลการทดลอง Unipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Reverse.....	98
4.7 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m.....	110
4.8 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m.....	121
4.9 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m.....	134
4.10 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m.....	146



บทที่ 1

บทนำ

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จตุภาคด้วย IGBT ควบคุมผ่านทาง Visual Basic และจำลองระบบด้วย Simulink

การศึกษาเทคนิคการควบคุมด้วย DC – DC CONVERTER แบบ FULL – BRIDGE โดยใช้ไอจีบีที 4 ตัวเป็นสวิตช์ แบ่งโหมตการทำงานเป็น 4 จตุภาค สามารถสั่งให้มอเตอร์หมุนในทิศทางที่ต้องการได้รวมถึงการเพิ่ม – ลด และการเบรกโดยการควบคุม Duty cycle ของสัญญาณ PWM การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผลคำสั่งร่วมกับชุดขับที่เป็นวงจรฟลูบริดจ์ ซึ่งการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นมีข้อดีตรงที่มีขนาดกะทัดรัด การทำงานมีประสิทธิภาพสูง ทำให้มีความสะดวกในการพัฒนามากขึ้น ส่วนโปรแกรม Visual Basic นั้นจะนำมาช่วยกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำให้เกิดความสะดวกในการควบคุมและขับเคลื่อนมากขึ้นไปอีก

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์นั้นถือได้ว่าเป็นส่วนสำคัญหลักในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการควบคุมติซึมอเตอร์จะพบได้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ส่วนมาก ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสร้างแม่เหล็กถาวรที่มีคุณภาพสูงทำให้ติซึมอเตอร์กลายเป็นพลังงานที่สำคัญในระบบคอนโทรลเกือบทุกชนิดในปัจจุบัน ตลอดถึงเครื่องจักรกลที่ทำงานโดยอัตโนมัติแทบทุกชนิด ซึ่งข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือ ปรังความเร็วย่าง มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูง และสามารถควบคุมความเร็วได้ในย่านที่กว้าง และจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำมีความก้าวหน้าไปมากทั้งขนาดกำลัง ความเร็วในการสวิตช์ และมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ดังนั้นการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถสร้างความไว้วางใจและลดพลังงานที่สิ้นเปลือง ลดขนาดให้ความเที่ยงตรง และผลตอบสนองได้ดีจึงส่งผลให้การทำงานของระบบควบคุมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้การประยุกต์ใช้อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์มีความก้าวหน้าตามไปด้วยซึ่งมีผลดีต่อการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีประสิทธิภาพสูง และการพัฒนาไมโครคอมพิวเตอร์ทำให้การควบคุมนั้นมีความซับซ้อนน้อยลง โดยนำมาใช้ร่วมกันกับชุดคอนเวอร์เตอร์จะทำให้มีความสะดวกในการควบคุมมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นในปริญญาณิพนธ์นี้จึงได้รวบรวมข้อดีต่าง ๆ มาเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อที่จะให้เกิดประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอย่างสูงสุด

1.1.1 โครงการที่นำเสนอ

โครงการนี้เป็นการจำลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมจากคาบของสัญญาณ PWM และมีส่วนป้อนกลับด้วย PI Controller เพื่อดูความสามารถของชุดขับ และส่วนควบคุมว่าเหมาะสมหรือไม่ในการออกแบบของจริง

ส่วนการสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะเป็นแบบ FULL BRIDGE DC – DC CONVERTER ใช้ IGBT 4 ตัวเป็นสวิตช์ ประมวลผลและสร้างสัญญาณ PWM ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต RS-232 โดยใช้ Visual Basic

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จตุภาค โดยใช้วงจร FULL BRIDGE CONVERTER โดยใช้ IGBT เป็นสวิตช์
2. เพื่อประยุกต์การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบควบคุมได้ทั้ง 4 จตุภาค
3. เพื่อศึกษาระบบควบคุม การวิเคราะห์ระบบเพื่อออกแบบคอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสม
4. เพื่อศึกษาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม และประมวลผลรับ – ส่งค่าไปแสดงที่คอมพิวเตอร์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ศึกษาการทำงานและสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยเริ่มจากการจำลองระบบเพื่อดูความสามารถของชุดขับเคลื่อน และสร้างชิ้นงานเพื่อการทดลองโดยนำผลการทดลองทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบเพื่อดูความถูกต้องและยืนยันผลการทดลอง การควบคุมรับ – ส่งค่าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยการป้อนข้อมูลผ่านโปรแกรม Visual Basic ผ่านทางพอร์ตอนุกรม ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. จำลองระบบด้วยโปรแกรม Simulink เพื่อดูความเป็นไปได้ และเพื่อสร้างวงจรควบคุมที่เหมาะสม
2. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ ใช้วงจร FULL BRIDGE DC – DC CONVERTER โดยใช้สัญญาณ PWM ทำการปรับคาบการทำงาน Duty cycle
3. การควบคุมความเร็วจะนำสัญญาณพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์มาแปลงเป็นแรงดันเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการป้อนข้อมูลจากโปรแกรม VB แสดงผลออกทางคอมพิวเตอร์

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงนั้นจะใช้วงจร FULL BRIDGE CONVERTER โดยที่มี IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์โดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 เป็นตัวขับ IGBT เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรด้วยการควบคุมชุดกำเนิดสัญญาณ PWM ที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ของ ATMAL เพื่อควบคุมแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนทางด้านวงจรบริดจ์เรกติไฟร์นั้นจะใช้ IC เบอร์ GBPC 40 SERIES ซึ่งทนกระแสได้ถึง 40 แอมแปร์ แรงดัน 1000 โวลต์ โดยมีการป้องกันเพื่อควบคุมความเร็วให้คงที่โดยการรับสัญญาณพัลส์จากเอ็นโค้ดเดอร์มาประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PI CONTROLLER และยังมีการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต RS-232 โดยการใช้โปรแกรม Visual Basic 6 ในการสื่อสาร

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาขอบเขตการทำงานของโครงการ
2. ศึกษาทฤษฎีของ DC – DC CONVERTER
3. ศึกษาวิธีการสร้าง และควบคุมสัญญาณ PWM
4. ศึกษาวงจรควบคุมที่ใช้ในโครงการ
5. สร้างชุดวงจรกำลัง และวงจรควบคุม
6. เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์
7. สร้างการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม VB
8. ทดลองชุดวงจรทั้งหมด
9. สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. เข้าใจถึงหลักการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจร DC – DC CONVERTER แบบ FULL BRIDGE โดยการใช้ IGBT เป็นสวิตช์
2. เข้าใจหลักการการควบคุมระบบแบบป้อนกลับแบบ PI
3. เข้าใจการติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์
4. สามารถสร้างชุดขับเคลื่อนโดยรวมความเข้าใจทั้งหมดจนเกิดเป็นชิ้นงานที่สามารถใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์เรื่องนี้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บท โดยกล่าวถึงความเป็นมาของโครงการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย โดยที่มีทั้งการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ การออกแบบและทดลอง โดยเนื้อหาต่างๆได้แบ่งเป็นบทต่างๆดังนี้

บทที่ 1 บทนำจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงการ และวิธีการที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์นี้

บทที่ 2 เป็นพื้นฐานของทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการทำปฏิญานิพนธ์ โดยจะกล่าวถึงพื้นฐานของไอจีบีที พื้นฐานของการควบคุม DC – DC CONVERTER แบบ FULL- BRIDGE ทั้งแบบ Bipolar และ Unipolar พื้นฐานทฤษฎีการควบคุมระบบแบบป้อนกลับด้วย PI CONTROLLER

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์และส่วนประกอบโดยรวม โดยแบ่งเป็นวงจรกำลัง วงจรควบคุมผล และจำลองระบบด้วย Simulink

บทที่ 4 แสดงผลการทดลองที่เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง และแนวทางในการพัฒนา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

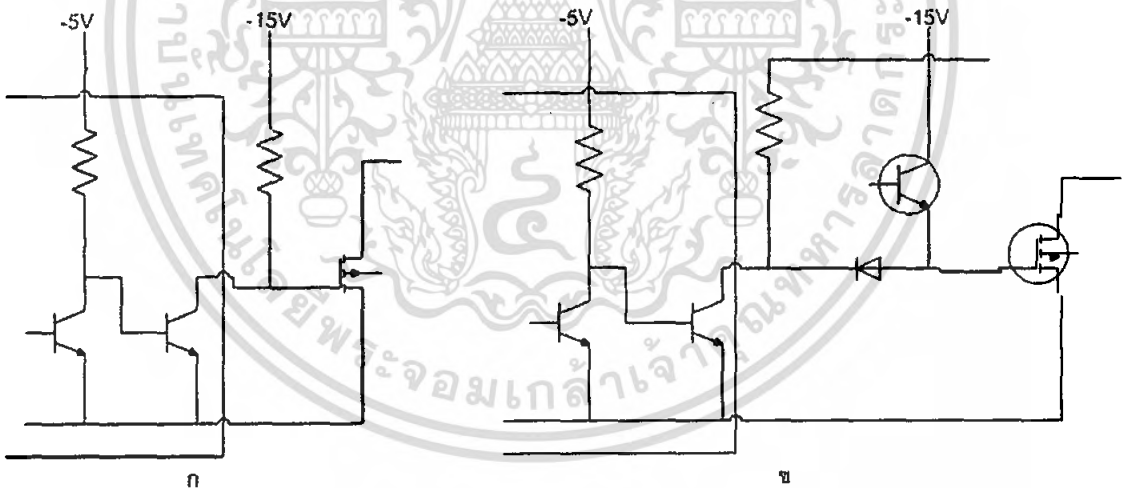
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรขับไอจีบีที

การขับไอจีบีทีให้นากระแสที่แตกต่างจากขับกระแสไบอัสในเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ สำหรับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ กระแสจะไหลผ่านคอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ได้ก็ต่อเมื่อมีกระแสไบอัสไหลผ่านที่เบสและอิมิตเตอร์ แต่ไอจีบีทีจะมีกระแสไหลผ่านเดรนและซอร์สได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมที่ขาเกต และซอร์สมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) แต่ใช้กระแสต่ำ การขับไอจีบีทีให้นากระแสจึงทำได้ง่าย และยุ่งยากน้อยกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มาก

2.1.1 การขับไอจีบีทีด้วยไอซี TTL

การขับไอจีบีทีด้วยไอซี TTL โดยตรงนั้นสามารถทำได้แต่ไอซี TTL มีขีดจำกัดในการจ่ายกระแสและรับกระแสที่เอาท์พุท ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของไอจีบีที และทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียสูงได้ การต่อวงจรขับชนิดนี้จึงจำเป็นต้องเพิ่มตัวอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อช่วยในการเปลี่ยนสถานะของไอจีบีทีเป็นไปอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.1 แสดงการขับไอจีบีทีด้วยไอซี TTL

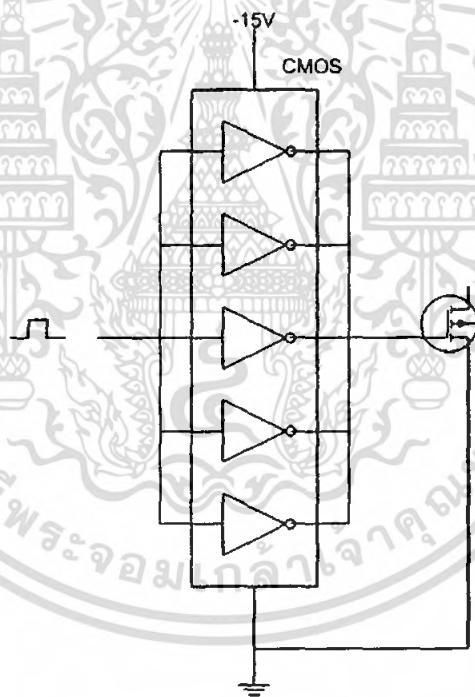
รูปที่ 2.1 (ก) แสดงวงจรขับด้วยไอซี TTL ที่มีเอาท์พุทเป็นแบบคอลเล็กเตอร์เปิด การต่อพูล์อัฟริซิสเตอร์เข้าช่วย เพื่อให้มีแรงดันสูงพอที่จะขับไอจีบีทีให้ทำงานและการหยุดนำกระแสไอจีบีทีเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น แต่ความเร็วขณะเริ่มนำกระแสยังมีค่าจำกัดอยู่เนื่องจากกระแสยังถูกจำกัดด้วยพูล์อัฟริซิสเตอร์

รูปที่ 2.1 (ข) ทรานซิสเตอร์จะช่วยในการจ่ายกระแสได้มากขึ้นทำให้ความเร็วในการนำกระแสของไอจีบีทีดีขึ้น และลดกำลังสูญเสียในตัวไอซี TTL ด้วย และวงจรขับจะเพิ่มทรานซิสเตอร์เข้ามาอีกหนึ่งตัวเพื่อให้การคายประจุที่ขาเกตเป็นไปอย่างรวดเร็วและทำให้ความเร็วขณะเริ่มหยุดนำกระแสเป็นไปอย่างรวดเร็วมากขึ้น

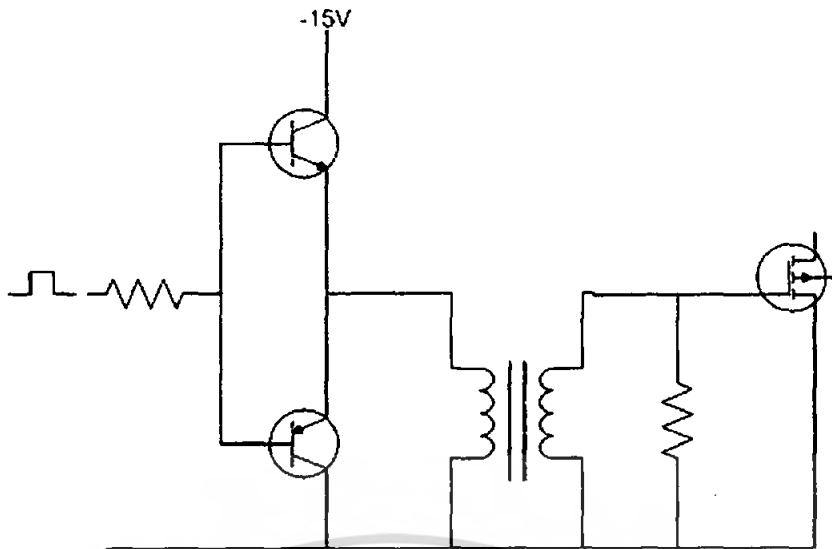
2.1.2 การขับไอจีบีทีด้วยไอซี CMOS

การขับไอจีบีทีด้วยไอซี CMOS ไอจีบีทีสามารถต่อโดยตรงเข้ากับไอซี CMOS ได้ในส่วนเอาต์พุตของไอซี CMOS จะเป็นเฟสต่อกันในลักษณะคอมพลิเมนต์ ซึ่งสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟเลี้ยง 2 ถึง 8 โวลต์ โดยทั่วไปจะใช้ 12 ถึง 15 โวลต์ เพื่อให้เหมาะสมกับการขับไอจีบีที

สำหรับการขับไอจีบีทีที่ต้องนำกระแสสูง ๆ การต่อ CMOS ในลักษณะขนานกันจะสามารถเพิ่มกระแสที่ขาเกต และทำให้ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของไอจีบีทีเป็นไปอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.2 วงจรขับไอจีบีทีด้วยไอซี CMOS



รูปที่ 2.3 วงจรขับไอจีบีทีด้วยหม้อแปลง

2.1.3 การขับไอจีบีทีด้วยหม้อแปลง

ในกรณีของคอนเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ วงจรขับไอจีบีทีที่ตัวบน ตัวล่าง จะต้องมีการแยกกราวด์ออกจากกัน จึงจำเป็นต้องให้หม้อแปลงหรือในกรณีที่ต้องขับไอจีบีทีมากกว่า 1 ตัว พร้อมกัน ก็จะต้องใช้หม้อแปลงช่วย

การต่อหม้อแปลงฟิลส์เข้ากับขาเกตและวงจรควบคุมโดยตรง อาจเกิดปัญหาการเลื่อนระดับของแรงดันเอาต์พุตที่หม้อแปลง และอาจมีปัญหาในการทำงานของไอจีบีทีได้ การต่อวงจรขับไอจีบีทีด้วยหม้อแปลงจึงควรทำในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในงานอุตสาหกรรมทั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ยังคงเป็นเครื่องจักรต้นกำลังที่มีความสำคัญและใช้งานกันอย่างแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน โดยทั่วไประบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะนิยมใช้กับงานที่ต้องการควบคุมทั้งความเร็วและตำแหน่ง และข้อดีของมอเตอร์กระแสตรงคือสามารถให้แรงบิดออกตัวที่สูง และยังสามารถควบคุมอัตราเร็วในย่านที่กว้างอีกด้วย อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแนวโน้มในอนาคตจะมีการใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆก็ตาม แต่สำหรับงานที่ต้องการเงินลงทุนเริ่มต้นต่ำและมีคุณสมบัติในการทำงานดีมาก แต่มีข้อเสียคือมีค่าซ่อมบำรุงสูงและไม่เหมาะกับงานที่อัตราเร็วสูงมากๆ ก็ยังคงนิยมใช้ระบบขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่

2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในมอเตอร์กระแสตรง เส้นแรงแม่เหล็กถูกสร้างจากสเตเตอร์ (ϕ_f) แม้ว่าเป็นแม่เหล็กถาวรดังรูป 2.4k ที่ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ หรือขดลวดสนามดังรูป 2.4ข ที่ซึ่งกระแสสนาม I_f ควบคุมเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าไม่คำนึงถึงแม่เหล็กที่สร้างสนามแม่เหล็กอิมิตัว ดังนั้น

$$\phi_f = k_f I_f \quad (2.1)$$

ที่ซึ่ง k_f คือ ค่าคงที่เส้นแรงแม่เหล็ก

โรเตอร์จะมีขดลวดพันรอบตัวโรเตอร์ เรียกว่า ขดลวดอาร์มาเจอร์ (armature winding) ที่รับพลังงานไฟฟ้า นี่คือการแตกต่างอย่างมากกับมอเตอร์กระแสสลับที่ซึ่งขดลวดที่รับพลังงานไฟฟ้าอยู่บนสเตเตอร์ที่รับพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ขดลวดอาร์มาเจอร์ในเครื่องจักรกระแสตรงโรเตอร์ เพื่อเรียงแรงดันและกระแสในตัวนำขดลวดอาร์มาเจอร์ ดังนั้นการผลิตแรงดันกระแสตรง และกระแสกระแสตรงที่ขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์ ในความจริงขดลวดอาร์มาเจอร์เป็นขดลวดที่ต่อเนื่องปราศจากการเชื่อมต่อ และมันถูกต่อกับซีคอมมิวเตเตอร์ ซีคอมมิวเตเตอร์เหล่านี้ทำจากทองแดง มีฉนวนกันระหว่างชั้น และมีฉนวนกันระหว่างเพลานุ่มด้วย แปลงถ่านหนึ่งคู่ถูกใช้เป็นหน้าสัมผัสระหว่างซีคอมมิวเตเตอร์ และขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์ที่จ่ายแรงดันและไฟฟ้ากระแสตรง

ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงบิด (electromagnetic torque) ถูกสร้างจากความสัมพันธ์ของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_f) และกระแสอาร์มาเจอร์ (i_a)

$$T_{em} = k_t \phi_f i_a \quad (2.2)$$

โดยที่ k_t คือ ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ ในวงจรอาร์มาเจอร์แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ (back emf) ถูกสร้างโดยการหมุนของตัวนำอาร์มาเจอร์ที่ความเร็ว ω_m ในเส้นแรงแม่เหล็ก

$$e_a = k_e \phi_f \omega_m \quad (2.2)$$

ในหน่วย SI k_t และ k_e มีค่าเท่ากัน ที่ซึ่งสามารถดูได้จากสมการพลังงานไฟฟ้า $e_a i_a$ และกำลังไฟฟ้าทางกล $\omega_m T_{em}$ กำลังไฟฟ้าคำนวณจาก

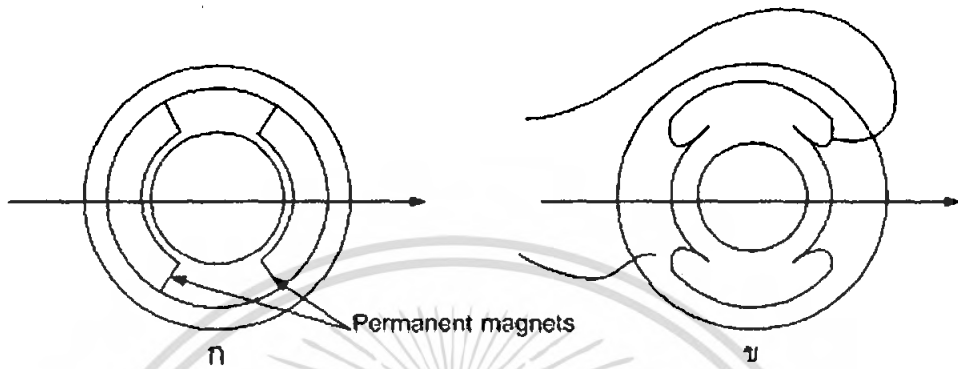
$$P_e = e_a i_a = k_e \phi_f \omega_m i_a \quad (2.4)$$

และกำลังไฟฟ้าทางกล คือ

$$P_m = \omega_m T_{em} = k_t \phi_f \omega_m i_a \quad (2.5)$$

ในสภาวะอยู่ตัว

$$P_e = P_m \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.4 มอเตอร์กระแสตรง (ก) แบบแม่เหล็กถาวร (ข) แบบขดลวดสนาม

ดังนั้น จากสมการข้างต้น

$$k_t \left[\frac{Nm}{A \cdot Wb} \right] = k_e \left[\frac{v}{Wb \cdot rad/s} \right] \quad (2.7)$$

ในทางปฏิบัติ การควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า v , ป้อนที่ขั้วอาร์มาเจอร์โดยกระแสอาร์มาเจอร์ i_a ดังนั้นกระแส i_a ในวงจรอาร์มาเจอร์คำนวณโดย ค่าแรงดันไฟฟ้า (v), ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ (e_a), ค่าความต้านทานขดลวดอาร์มาเจอร์ (R_a), และค่าความเหนี่ยวนำของอาร์มาเจอร์ (L_a)

$$v = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.8)$$

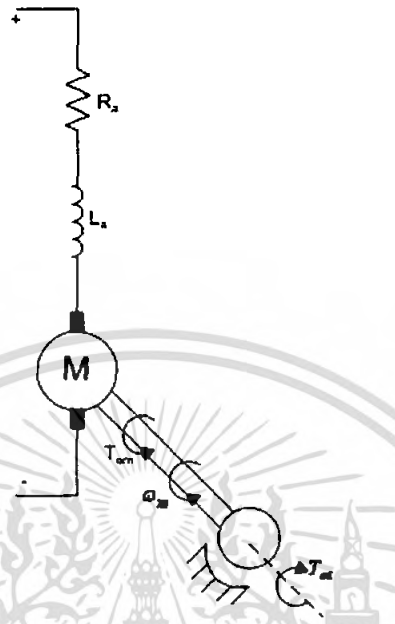
สมการ 2.8 ถูกแสดงด้วยรูปวงจรมูลในรูป 2.5

ในความสัมพันธ์ของแรงบิด (T_{em}) กับแรงบิดโหลด เท่ากับ

$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_{ol}(t) \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

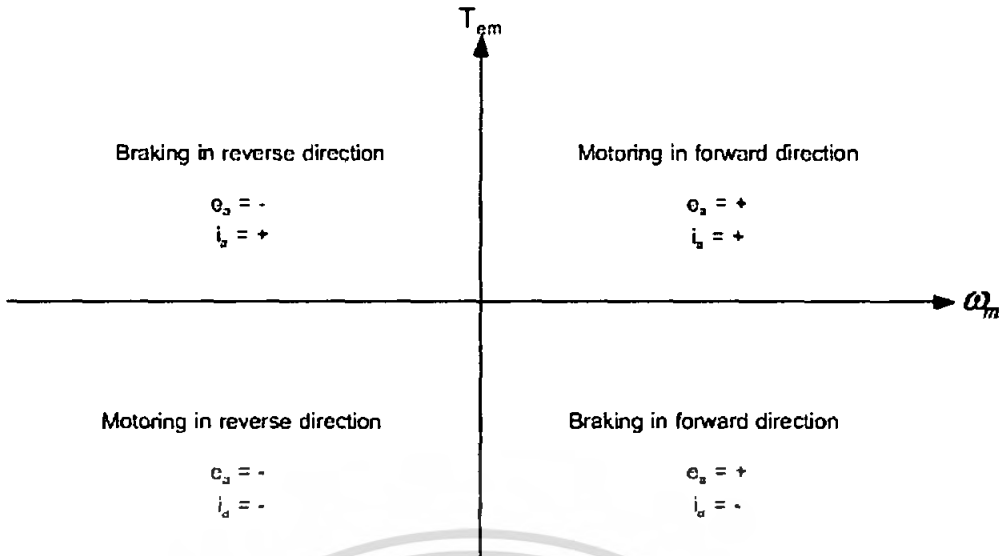
โดยที่ J และ B คือ ผลรวมวงจรมูลความเฉื่อย และผลรวมวงจรมูลของการแกว่งตามลำดับ ของมอเตอร์ และโหลดรวมกัน และ T_{oL} คือ วงจรมูลของแรงบิดที่โหลดต้องการทำงาน



รูปที่ 2.5 วงจรมูลของมอเตอร์กระแสตรง

ไม่บ่อยนักที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงถูกใช้เป็นการกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ขณะที่ทำการเบรก เครื่องจักรกลนั้น จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในขณะที่มีความเร็วเริ่มลดลง ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณากรณีที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อพิจารณาขณะเบรก โดยสมมติว่าเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ และมอเตอร์ขับโหลดที่ความเร็ว (ω_m) ถ้าค่าแรงดัน (v_i) มีค่าต่ำกว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ (e_o) แล้วความเร็วมอเตอร์ลดลง ในรูปที่ 2.5 จากนั้นกระแสอาร์มาเจอร์ (i_a) จะไหลกลับทิศทาง ค่าแรงบิด (T_{em}) ที่ได้จากสมการ 2.2 ตอนนี้จะกลับทิศทาง และพลังงานจลน์ที่เกิดจากแรงเฉื่อยของโหลด จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตอนนี้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว พลังงานบางส่วนจะไหลไปยังแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (v_i) หรือบางส่วนจะกระจายในรูปความร้อนโดยผ่านตัวต้านทานระหว่างที่ทำการเบรก ขั้วของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ (e_o) ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากทิศทางหมุนไม่เปลี่ยนแปลง สมการ 2.2 ยังคงใช้คำนวณขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับ ขณะที่โรเตอร์มีความเร็วลดลง e_o มีค่าลดลง(สมมติให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กมีค่าคงที่) จนกระทั่งหยุดหมุน ถ้าขั้วของแรงดันกลับทิศทาง ทิศทางการหมุนของมอเตอร์จะหมุนกลับทิศด้วย ดังนั้นมอเตอร์กระแสตรงสามารถทำงานได้ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และแรงบิดสามารถกลับทิศได้ตอนเบรก โดยแสดงการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงทั้งสี่จุดภาคบนระนาบของแรงบิด-ความเร็ว ดังรูป 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การทำงาน 4 จุดภาคของมอเตอร์กระแสตรง

2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

บ่อยครั้งในมอเตอร์กระแสตรงขนาดเล็ก ที่สเตรเตอร์จะใช้แม่เหล็กถาวรในรูป 2.5ก ในการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ ในสถานะอยู่ตัว เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) มีค่าคงที่ จากสมการ 2.2, 2.2, และ 2.8 ผลลัพธ์คือ

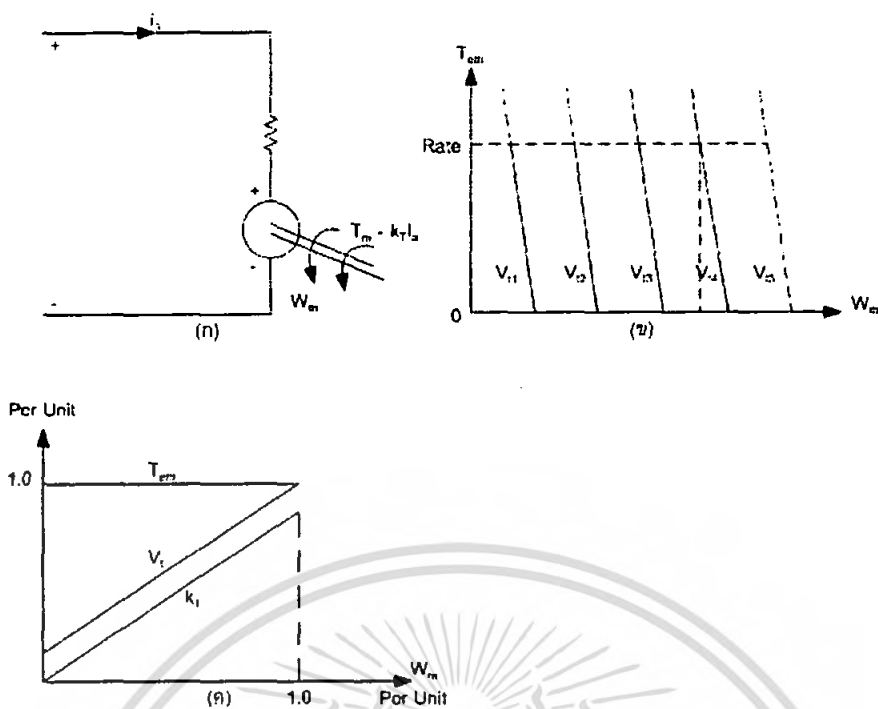
$$T_{em} = k_T I_a \quad (2.10)$$

$$E_a = k_E \omega_m \quad (2.11)$$

$$V_t = E_a + R_a I_a \quad (2.12)$$

โดยที่ $k_T = k_f \phi_f$ และ $k_E = k_f \phi_f$ สมการ 2.10 ถึงสมการ 2.12 สอดคล้องกับวงจรสมมูลในรูป 2.7ก จากสมการด้านบนสามารถหาความเร็ว (ω_m) ในสถานะอยู่ตัว ที่เป็นฟังก์ชันของ T_{em}

$$\omega_m = \frac{1}{k_E} \left(V_t - \frac{R_a}{k_T} T_{em} \right) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร (ก) วงจรสมมูล (ข) คุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วรอบ (ค) สมรรถภาพของแรงบิด-ความเร็วแบบต่อเนื่อง

กราฟของสมการ 2.12 แสดงดังรูป 2.7ข แสดงว่า แรงบิดเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วรอบ ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า (V_t) ที่มีรูปร่างเกือบเป็นเส้นตรงขนานกับแกนแรงบิด (T_{em}) ยกเว้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานอาร์มาเจอร์ $I_a R_a$ นอกจากนั้น คุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วรอบสามารถเลื่อนไปมาในแนวนอนได้ด้วยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (V_t) ดังนั้นความเร็วรอบของโหลดที่คุณสมบัติของแรงบิดต่อความเร็วรอบใดๆ จะสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (V_t) ที่ป้อนให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

อย่างไรก็ตาม ค่ากระแสอาร์มาเจอร์และแรงบิดไม่ควรจะสูงเกินกว่าค่ากระแสและแรงบิดที่พิกัดค่าที่เกินจากค่าที่พิกัดได้แสดงไว้ด้วยเส้นปะ ดังรูป 2.7ข จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าสูงกว่าค่าที่พิกัด จะเป็นผลทำให้ต้องเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า (V_t) สูงกว่าค่าที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้างดงกล่าว ทำให้เป็นข้อจำกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร ว่าความเร็วรอบสูงสุดจะมีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้างดงกล่าวเท่านั้น กราฟแรงบิดต่อความเร็วและแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ว แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับต่อความเร็ว ได้แสดงไว้ในรูป 2.7(ข) ซึ่งจะแสดงข้อจำกัดของแรงบิดและกระแสไฟฟ้าขณะสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติค่ากระแสอาร์มาเจอร์และแรงบิดดงกล่าว สามารถสูงเกินกว่าขีดจำกัดได้ในช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น

2.5 การควบคุมอัตราเร็ว

จากความสัมพันธ์ของแรงบิดและอัตราเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการ 2.2, สมการ 2.2, และสมการ 2.8 คือ

$$\omega_m = (V / K_e \phi) - [R_o / (K_e \phi)^2] I \quad (\text{เมื่อ } T = K_e \phi I_o) \quad (2.14)$$

จากสมการก็พอที่จะทำให้เราทราบได้ว่าอัตราเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถควบคุมได้ 4 วิธีด้วยกันคือ

1. ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์
2. ควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กที่ฟิลด์
2. ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์และเส้นแรงแม่เหล็กที่ฟิลด์
4. ควบคุมค่าความต้านทานที่อาร์มาเจอร์

ในปริภูมิตฤษฎีนี้จะกล่าวเพียงการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์เท่านั้น

2.5.1 ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์

จากสมการที่ 2.14 ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์หรือ V ของมอเตอร์ทำงานที่สภาวะอัตราเร็วคงที่แล้วถูกลดแรงดันไฟฟ้า V ลง (เพียงเล็กน้อย) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าก็จะลดลงด้วย และเป็นผลต่อเนื่องให้แรงบิดลดลงตามไปด้วย นั่นคือแรงบิดของมอเตอร์จะน้อยกว่าแรงบิดโหลด อัตราเร็วของมอเตอร์จะลดลงซึ่งเป็นสาเหตุให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับมีค่าลดลงตามไปด้วย สุดท้ายแล้วอัตราเร็วจะลดต่ำลงที่ซึ่งแรงบิดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับแรงบิดโหลด ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์ของมอเตอร์แยกกระตุ้มมีการลดค่าลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นที่มาของการลดค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่มากด้วย กระแสไฟฟ้าของอาร์มาเจอร์จะกลับทิศทางและมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สร้างแรงบิดเป็นลบ การทำงานจะเป็นไปในลักษณะดังกล่าวจนกระทั่งอัตราเร็วของมอเตอร์ตกลงจนมีค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย และหากแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมการ $V = E + I_o R_o$ และ $T = k_E I_o$ กระแสไฟฟ้าและแรงบิดของมอเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้อัตราเร็วของมอเตอร์มีค่าที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกันให้แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย และอัตราเร็วจะมีค่าตรงที่แรงบิดของมอเตอร์มีค่าเท่ากับแรงบิดโหลด

ในขณะที่ทำการเพิ่มหรือลดอัตราเร็ว แรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์ควรที่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในช่วงน้อย ๆ หรือมีความละเอียดในการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงค่ามาก ๆ จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าอาร์มาเจอร์มีค่าที่สูง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของแปลงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ลดน้อยลง จากที่กล่าวมาในข้างต้นเราสามารถที่จะกล่าวได้ว่าอัตราเร็วจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $\omega_m = (V / K) - (R_o / k^2) I$ อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่

จ่ายให้กับอาร์มาเจอร์โดยทั่วไปนิยมใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในการปรับเปลี่ยนกล่าวคือ ใช้วงจรเรียงกระแสที่ควบคุมได้ (controlled rectifier or ac to dc converter) และใช้วิธีการสับแรงดันไฟตรงหรือ วงจรดีซี ช็อปเปอร์(chopper or dc to dc converter)

2.6 การเบรกแบบคืนพลังงาน

ในการเบรกแบบคืนพลังงาน มอเตอร์จะทำงานเสมือนเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพลังงานจลน์ของมอเตอร์และโหลดจะย้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ หลักการส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายกระแสตรงหนึ่งไปยังอีกแหล่งจ่ายหนึ่งที่มีระดับแรงดันสูงกว่า สามารถนำมาอธิบายการเบรกแบบคืนพลังงานในมอเตอร์กระแสตรง

การประยุกต์ใช้วงจร dc chopper ในการเบรกแบบคืนพลังงานสามารถอธิบายดังรูปที่ 2.8 สมมติให้อาร์มาเจอร์คือส่วนที่หมุนเนื่องจากแรงเฉื่อยของมอเตอร์(และโหลด) และในกรณีของระบบขนส่ง พลังงานจลน์ของยานยนต์หรือรถไฟจะหมุนเพลาของอาร์มาเจอร์ จากนั้นถ้าทรานซิสเตอร์นำกระแส กระแสอาร์มาเจอร์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่ขั้วของมอเตอร์ถูกตัดวงจร ถ้าทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสไดโอด D_m จะนำกระแส และพลังงานที่เก็บในวงจรอาร์มาเจอร์จะส่งกลับไปแหล่งจ่าย ในรูป 2.8 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยสมมติว่ากระแสอาร์มาเจอร์ต่อเนื่องและไม่มีการกระเพื่อม

แรงดันเฉลี่ยของวงจร chopper คือ

$$V_{ch} = (1-k)V_s \quad (2.15)$$

ถ้า I_a คือกระแสอาร์มาเจอร์เฉลี่ย กำลังที่เบรกกลับคืนสามารถคำนวณจาก

$$P_g = I_a V_s (1-k) \quad (2.16)$$

แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นจากมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ

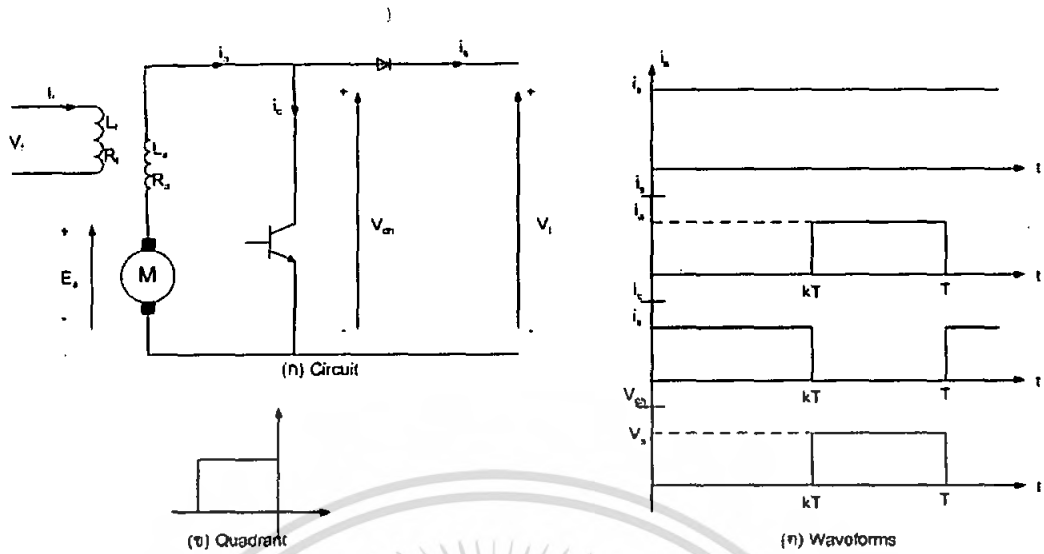
$$E_g = K_v I_f \omega \quad (2.17)$$

$$= V_{ch} + R_m I_a = (1-k)V_s + R_m I_a$$

โดยที่ K_v คือค่าคงที่ของเครื่องจักร และ ω คือความเร็วของเครื่องจักร rad/s ดังนั้นสมการของความต้านทานโหลดของมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ

$$R_{eq} = \frac{E_g}{I_a} = \frac{V_s}{I_a} (1-k) + R_m \quad (2.18)$$

โดยที่ k คือ duty cycle ความต้านทานสามารถมีค่าตั้งแต่ R_m ถึง $(V_s / I_a + R_m)$



รูปที่ 2.8 การเบรกแบบคืนพลังงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก

แรงดันและขั้วที่ขอมรับได้อยู่ระหว่าง

$$0 \leq (E_g - R_m I_a) \leq V_s \tag{2.17}$$

ที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำการเบรกของมอเตอร์คือ

$$E_g = K_v \omega_{\min} I_f = R_m I_a \tag{2.20}$$

หรือ

$$\omega_{\min} = \frac{R_m I_a}{K_v I_f} \tag{2.21}$$

และ $\omega \leq \omega_{\max}$ ความเร็วสูงสุดที่ทำการเบรกของมอเตอร์แบบอนุกรมสามารถหาได้จากสมการ (2.20)

$$K_v \omega_{\max} I_f - R_m I_a = V_s$$

หรือ

$$\omega_{\max} = \frac{V_s}{K_v I_f} + \frac{R_m I_a}{K_v I_f} \tag{2.22}$$

และ $\omega \leq \omega_{\max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเบรกแบบคืนพลังงานจะมีประสิทธิภาพสูงสุดถ้าความเร็วของมอเตอร์จำกัดที่เพียง 2 ความเร็ว เท่านั้น ($\omega_{\min} < \omega < \omega_{\max}$) ที่ความเร็วอื่นที่น้อยกว่า ω_{\min} ควรเลือกการเบรกด้วยวิธีอื่น

2.7 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบฟลูบริดจ์

การประยุกต์ใช้งานของ full-bridge switch-mode converters แสดงดังรูปที่ 2.9 มี 2 ลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้

- dc motor drives
- dc-to-ac (sine-wave)
- dc-to-ac (ความถี่ปานกลาง)

แม้ว่าเทคโนโลยีของ full-bridge ที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งานทั้ง 2 ลักษณะยังคงเหมือนกัน ชนิดของการควบคุมขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน แม้ว่า full-bridge converter ที่ใช้ในการขับมอเตอร์กระแสตรงจะครอบคลุมทั่ว ๆ ไปในบทนี้เพราะเป็นพื้นฐานที่ดีในการทำความเข้าใจ dc-to-dc (sine wave) converters

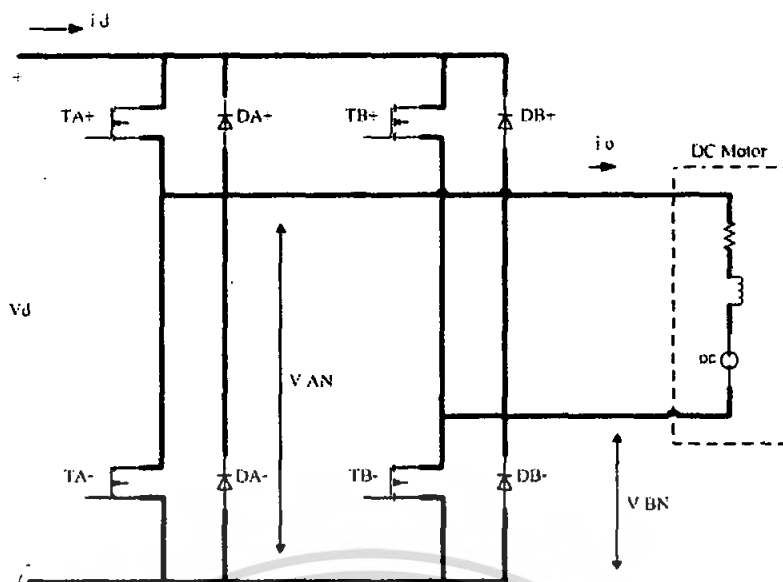
ใน full-bridge converter ที่แสดงดังรูปที่ 2.9 ด้านเข้าเป็นแรงดันกระแสตรงที่จำกัดขนาดของแรงดัน ด้านออกเป็นแรงดันกระแสตรง V_o ที่สามารถควบคุมขนาด และขั้วของแรงดันได้ ในทำนองเดียวกันขนาดและทิศทางของกระแสด้านออก i_o ต้องสามารถควบคุมได้ด้วย ดังรูปที่ 2.9 สามารถทำงานได้ 4 จุดภาค บนระนาบ i_o - v_o และการไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านตัวแปลงผันมีทิศทางเดียว จากสองทิศทาง

ในตัวแปลงผันกำลังอย่างเช่นดังรูป 2.9 ที่มีไดโอดต่ออยู่เป็นลักษณะพิเศษที่ต้องทำระหว่างสถานะเริ่มนำเปรียบเทียบกับสถานะการนำกระแสของสวิตช์ เพราะไดโอดที่ต่ออยู่ขณะที่สวิตช์เริ่มนำกระแส มันอาจนำหรือไม่นำกระแส ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสด้านออก i_o ถ้าสวิตช์นำกระแส ไดโอดจะอยู่ในสถานะนำกระแสด้วย

Full-bridge converter ประกอบด้วยกึ่ง 2 กิ่ง A และ B แต่ละกิ่งประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว สวิตช์ทั้งสองที่อยู่ในกิ่งเดียวกันจะไม่นำกระแสพร้อมกัน ในทางปฏิบัติสวิตช์ทั้งสองใช้เวลาในการหยุดนำกระแสสั้นมากเรียกว่า blanking time เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรทางด้านเข้า แต่ในการจำลองเพื่อการวิเคราะห์ที่จะไม่สนใจ blanking time เนื่องจากสมมติว่าสวิตช์ทำงานเป็นอุดมคติ

เราสังเกตเห็นว่า ถ้าสวิตช์สองตัวที่อยู่คนละกิ่งนำกระแสพร้อมกันจะมีกระแส i_o เกิดขึ้น ดังรูป 2.9 เป็นกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นแรงดันด้านออกสามารถดูได้จากสถานะของสวิตช์ ตัวอย่างพิจารณาที่กิ่ง A ในรูป 2.9 แรงดัน v_{AN} ตรวจได้จากสถานะของสวิตช์ดังนี้ เมื่อ T_{A+} นำกระแส จะมีกระแสไหลผ่าน T_{A+} ถ้า i_o เป็นบวก หรือจะมีกระแสไหลผ่าน D_{A+} ถ้ากระแส i_o เป็นลบ ในแต่ละกรณีต้องแน่ใจว่าแรงดันที่จุด A ในรูป 2.9 ต้องมีแรงดันเท่ากับแรงดันด้านบวกของแรงดันกระแสตรงด้านเข้า จะได้ว่า

พ่วงหม้อแปลงกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.9 Full-bridge dc-dc converter.

$$v_{AN} = V_d \quad (\text{ถ้า } T_{A+} \text{ นำกระแส และ } T_{A-} \text{ หยุดนำกระแส}) \quad (2.22ก)$$

ทำนองเดียวกัน เมื่อ T_{A-} นำกระแส กระแส i_o ด้านลบจะไหลผ่าน T_{A-} (เนื่องจาก D_{A+} ถูกไบอัสย้อนกลับ) และกระแส i_o ด้านบวกจะไหลผ่าน ดังนั้น

$$v_{AN} = 0 \quad (\text{ถ้า } T_{A-} \text{ นำกระแส และ } T_{A+} \text{ หยุดนำกระแส}) \quad (2.22ข)$$

สมการ 2.22ก และ สมการ 2.22ข แสดงให้เห็นว่า v_{AN} ขึ้นกับสถานะของสวิตช์เท่านั้น และไม่ขึ้นกับทิศทางกระแสของ i_o ดังนั้น แรงดันด้านออกของ converter กิ่ง A หนึ่งคาบของความถี่สวิตซ์ ขึ้นกับแรงดันด้านเข้า V_d และ duty ratio ของ T_{A+} เท่านั้น

$$v_{AN} = \frac{v_{o1}t_{on} + 0t_{off}}{T_s} = V_d \cdot \text{duty ratio of } T_{A+} \quad (2.24)$$

เมื่อ t_{on} และ t_{off} คือช่วงเวลานำกระแส และหยุดนำกระแสตามลำดับ

ในลักษณะเดียวกัน converter กิ่ง B และ v_{AN} ขึ้นกับ V_d และ duty ratio ของสวิตซ์ T_{B+} .

$$v_{BN} = V_d \cdot \text{duty ratio of } T_{B+} \quad (2.25)$$

ไม่ขึ้นกับทิศทางของ i_o ดังนั้นแรงดันด้านออกของ converter $V_o (=V_{AN} - V_{BN})$ สามารถควบคุมได้จาก duty ratio ของสวิตซ์ และไม่ขึ้นกับขนาดและทิศทางของกระแส i_o

(อาจเป็นไปได้ว่าการควบคุมแรงดันต้านทานออกของ converter ทำให้สวิตช์ในกึ่งเดียวกันหยุดนำกระแสในช่วงเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้อาจทำให้เกิดแรงดันขึ้นกับทิศทางของกระแส i_o ในรูปที่ 2.9 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับแรงดันเฉลี่ยต้านทานออก ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจะไม่พิจารณาโครงสร้างนี้)

ใน single-switch converters ขั้วของแรงดันต้านทานออกจะมีเพียงทิศทางเดียว แต่ใน converter แบบ pulse-width modulated โดยการเปรียบเทียบรูปคลื่นฟันเลื่อยกับสัญญาณควบคุม $v_{control}$ จะแตกต่างกันตรงที่แรงดันต้านทานออกสามารถกลับขั้วได้ รูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ใช้ใน converter แบบ PWM มีลักษณะที่แตกต่างกันสองแบบดังนี้

1. PWM แบบ *bipolar voltage switching* โดยที่ (T_{A+}, T_{B-}) และ (T_{A-}, T_{B+}) ทำงานเป็นคู่สวิตช์ซึ่งกัน สวิตช์แต่ละคู่จะนำกระแส และหยุดนำกระแสพร้อมกัน
2. PWM แบบ *unipolar voltage switching* อาจกล่าวได้ว่าเป็น *double-PWM Switching* สวิตช์แต่ละกึ่งถูกควบคุมโดยไม่ขึ้นกับกึ่งอื่น

ใน full-bridge converter ดังรูป 2.9 กระแสต้านเข้า i_d เปลี่ยนแปลงทิศทางทันทีทันใด ดังนั้นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงต้านเข้า converter ต้องมีอิมพีแดนซ์ภายในต่ำๆ ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุกรองกระแสขนาดใหญ่ต้องมีอิมพีแดนซ์ต่ำ

2.7.1 PWM WITH BIPOLAR VOLTAGE SWITCHING

ในกรณีสวิตซ์แรงดันแบบนี้ สวิตซ์ (T_{A+}, T_{B-}) และ (T_{A-}, T_{B+}) ทำงานเป็นคู่สวิตซ์ (สวิตซ์ทั้งสองตัวที่เป็นคู่กันนำกระแส และหยุดนำกระแส พร้อมกัน)

สัญญาณสวิตซ์ถูกสร้างจากการเปรียบเทียบระหว่าง รูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สวิตซ์กับแรงดันควบคุม $v_{control}$ เมื่อ $v_{control} > v_{tri}$, T_{A+} และ T_{B-} นำกระแส แต่ถ้า $v_{control} < v_{tri}$, T_{A-} และ T_{B+} นำกระแส duty ratio ของสวิตซ์ได้มาจากรูปคลื่นดังรูป 2.10 พิจารณาที่เวลาเริ่มต้นดังรูป

$$v_{tri} = \hat{V}_{tri} \cdot \frac{t}{T_s/4} \quad 0 < t < \frac{1}{4}T_s \quad (2.26)$$

ให้ $t = t_1$ ในรูป 2.10, $v_{tri} = v_{control}$ ดังนั้นจากสมการ (2.26)

$$t_1 = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} \cdot \frac{T_s}{4} \quad (2.27)$$

จากรูป 2.10 พบว่าช่วงเวลา t_{on} ของสวิตซ์คู่ที่ 1 (T_{A+}, T_{B-}) คือ

$$t_{on} = 2t_1 + \frac{1}{2}T_s \quad (2.28)$$

ดังนั้น duty ratio ของสวิตช์คู่ที่ 1 จากสมการ (2.26) คือ

$$D_1 = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} \right) \quad , (T_{A+}, T_{B-}) \quad (2.29)$$

ดังนั้น duty ratio D_2 ของสวิตช์คู่ที่ 2 (T_{A-} , T_{B+}) คือ

$$D_2 = 1 - D_1 \quad , (T_{B+}, T_{A-}) \quad (2.20)$$

โดยใช้ duty ratio ดังกล่าว และหา V_{AN} และ V_{BN} ในรูป 2.10 จากสมการ (2.24) และ (2.25) ตามลำดับ ดังนี้

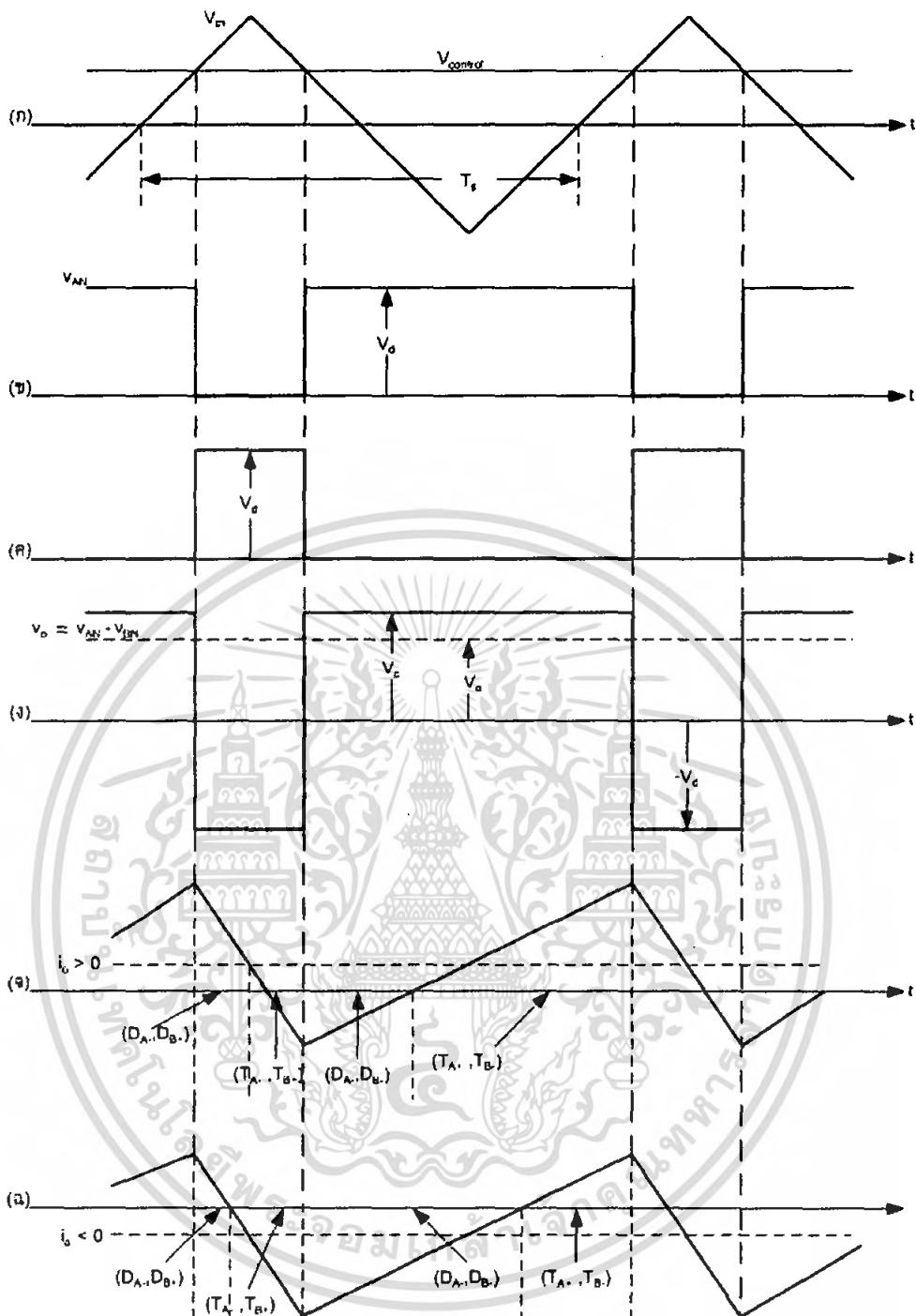
$$V_o = V_{AN} - V_{BN} = D_1 V_d - D_2 V_d = (2D_1 - 1)V_d \quad (2.21)$$

แทนค่า D_1 จากสมการ (2.29) ลงในสมการ (2.21) ได้ว่า

$$V_o = \frac{V_d}{V_{tri}} v_{control} = k v_{control} \quad (2.22)$$

โดยที่ $k = V_d/V_{tri} = \text{const.}$ สมการนี้แสดงว่า แรงดันเฉลี่ยด้านออกแปรผันเป็นเชิงเส้นกับ สัญญาณควบคุมด้านเข้า เหมือน linear amplifier รูปคลื่นแรงดันด้านออกในรูป 2.10 แสดงว่า แรงดันกระโดดระหว่าง $+V_d$ และ $-V_d$ นี้เป็นเหตุผลว่าทำไมการสวิตช์ขั้วแบบนี้เรียกว่า *bipolar voltage-switching PWM*.

เราควรสังเกตด้วยว่า duty ratio D_1 ในสมการ (2.29) สามารถเปลี่ยนค่าระหว่าง 0 และขึ้นอยู่กัขนาด และขั้วของ $v_{control}$ ดังนั้น V_o สามารถต่อเนื่องในช่วงตั้งแต่ $-V_d$ ถึง V_d แรงดันด้านออกของ converter ไม่ขึ้นกับกระแสด้านออก i_o เนื่องจากไม่สนใจ blanking time กระแสด้านออกเฉลี่ย i_o สามารถเป็นแคบวก หรือลบอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่สำหรับกระแส i_o ค่าเล็กๆ i_o ระหว่าง cycle เป็นได้ทั้งบวก และลบ ดังแสดงในรูป 2.10 สำหรับ $i_o > 0$ ที่ค่าเฉลี่ยของกำลังที่ไหลจาก V_d ถึง V_o และรูปที่ 2.12 สำหรับ $i_o < 0$ ที่ค่าเฉลี่ยของกำลังที่ไหลจาก V_o ถึง V_d



รูปที่ 2.10 PWM with Bipolar Voltage Switching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 PWM WITH UNIPOLAR VOLTAGE SWITCHING

ตรวจดูรูป 2.9 และพิจารณาทิศทางของกระแส i_o , $v_o = 0$ ถ้า T_{A+} และ T_{B+} นำกระแสทั้งคู่ ทำนองเดียวกัน $v_o = 0$ ถ้า T_{A-} และ T_{B-} นำกระแสทั้งคู่ คุณลักษณะเฉพาะนี้ใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันต้านออก

ในรูป 2.11 รูปคลื่นสามเหลี่ยมถูกเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุม $v_{control}$ และ $-v_{control}$ สำหรับจำนวนสัญญาณสวิตชิงของกิ่ง A และกิ่ง B ตามลำดับ การเปรียบเทียบ $v_{control}$ กับ v_{tri} ควบคุมสวิตชิงกิ่ง A ในขณะที่สวิตชิงกิ่ง B ถูกควบคุมโดยการเปรียบเทียบ $-v_{control}$ กับ v_{tri}

$$T_{A+} \text{ นำกระแส ถ้า } v_{control} > v_{tri} \quad (2.22)$$

และ

$$T_{B+} \text{ นำกระแส ถ้า } -v_{control} > v_{tri} \quad (2.24)$$

แรงดันต้านออกของแต่ละกิ่ง และ v_o แสดงดังรูป 2.11 ตัวอย่างในรูป 2.10 เปรียบเทียบกับรูป 2.11 จะเห็นว่า duty ratio D_1 ของสวิตชิง T_{A+} ที่ได้จากสมการ (2.29) ของการสวิตชิงแบบ bipolar ทำนองเดียวกัน duty ratio D_2 ของสวิตชิง T_{B+} ที่ได้จากสมการ (2.20) ว่า

$$D_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} + 1 \right) \quad (2.25)$$

และ

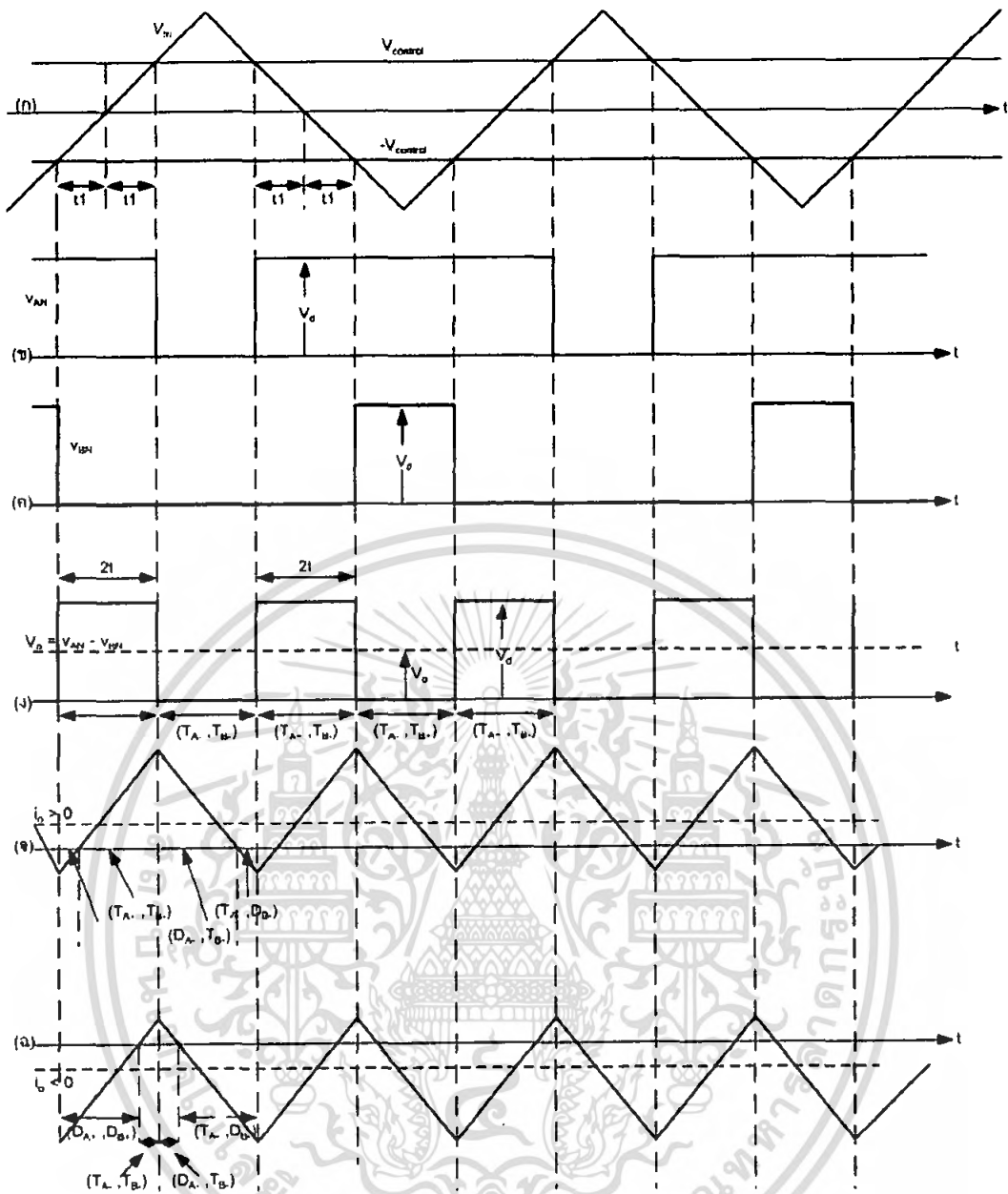
$$D_2 = 1 - D_1 \quad (2.26)$$

ดังนั้น จากสมการ 2.22 ที่ซึ่งมีเหตุผลเดียวกับกรณีนี้

$$V_o = (2D_1 - 1)V_d = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} v_{control} \quad (2.27)$$

ดังนั้น แรงดันต้านออกเฉลี่ย V_o ในการสวิตชิงแบบนี้เท่ากับการสวิตชิงแบบ bipolar switching และแปรผันเป็นเชิงเส้นกับ $v_{control}$

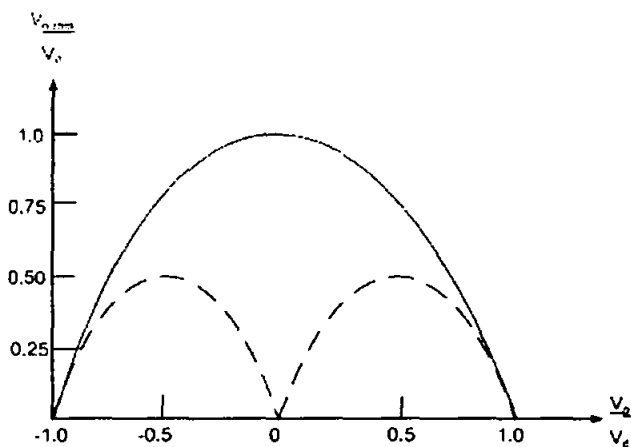
รูป 2.1จ และ 2.11จ แสดงรูปคลื่นกระแส และการนำกระแสของอุปกรณ์สำหรับ $I_o > 0$ และ $I_o < 0$ ตามลำดับ ที่ซึ่ง V_o เป็นบวกทั้งสองกรณี



รูปที่ 2.11 PWM with Unipolar Voltage Switching

ถ้าที่ความถี่สวิตซิ่งของการสวิตช์มีค่าเท่ากันทั้งแบบ bipolar และ unipolar การสวิตซิ่งแบบ unipolar จะให้ผลลัพธ์ของรูปคลื่นแรงดันด้านออกและผลตอบสนองความถี่ที่ดีกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพความถี่สวิตซิ่งของแรงดันด้านออกเป็นสองเท่า และการกระเพื่อมลดลง

รูปที่ 2.12 แสดงที่ความถี่สวิตซิ่งเดียวกัน PWM แบบ unipolar voltage switching ผลลัพธ์แรงดันด้านออกมีการกระเพื่อมน้อยกว่า



รูปที่ 2.12 แรงดันกระแสเพื่อเฉลี่ยใน full-bridge converter using PWM:

(a) bipolar voltage switching: (b) unipolar voltage switch

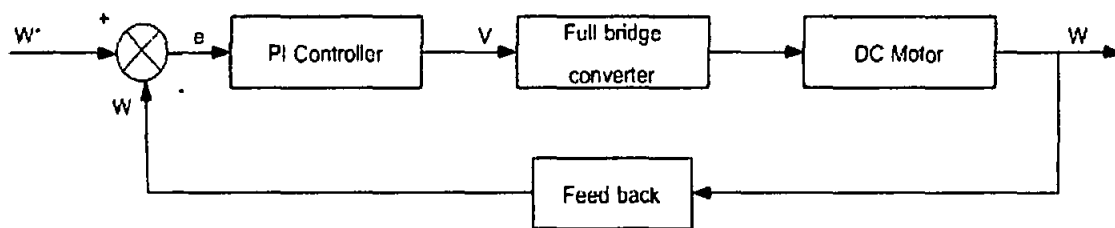
2.8 ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนิยมแบบลูปปิด (Close Loop) เนื่องจากมีข้อดีมากคือผลตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์ที่สูง ค่าความผิดพลาดของสภาวะคงตัวน้อย และระบบควบคุมมอเตอร์นั้นมีเสถียรภาพสูง ซึ่งดีกว่าการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด (Open Loop) นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์แบบลูปปิด เป็นที่นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ทั้งแรงบิดคงที่ ความเร็วรอบคงที่ หรือควบคุมได้ทั้งความเร็วรอบและตำแหน่งตามต้องการที่เรียกว่า เซอร์โว

แต่การควบคุมมอเตอร์นั้นเป็นการควบคุมที่ต้องวิเคราะห์ผลตอบสนองทางไดนามิกส์ ซึ่งโดยทั่วไปการควบคุมมอเตอร์ทุกประเภท สมควรที่จะมีระบบชดเชยป้อนกลับเพื่อทำให้ผลตอบสนองไดนามิกส์ของระบบอยู่ในระดับที่ดีที่สุด และระบบชดเชยป้อนกลับที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์คือ ระบบชดเชยแบบ PI หรือระบบควบคุมแบบ PI (PI controller)

สำหรับโครงการนี้สนใจการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบดังรูปที่ 2.12

จากบล็อกไดอะแกรมอธิบายการทำงานคือ เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโหลดที่เปลี่ยนแปลงไฟความเร็วรอบย่อมเปลี่ยนแปลงในทิศทางผกผันกัน จากนั้นแอนโคดเดอร์ (Encoder) แปลงความเร็วรอบที่ได้เป็นสัญญาณแรงดันเพื่อป้อนกลับสู่ระบบควบคุมแบบ PI ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณชดเชยที่สามารถควบคุมวงจรถูกแปลงอินเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์มากหรือน้อย เพื่อให้มอเตอร์นั้นกลับสู่ความเร็วรอบเดิมได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จุดภาค

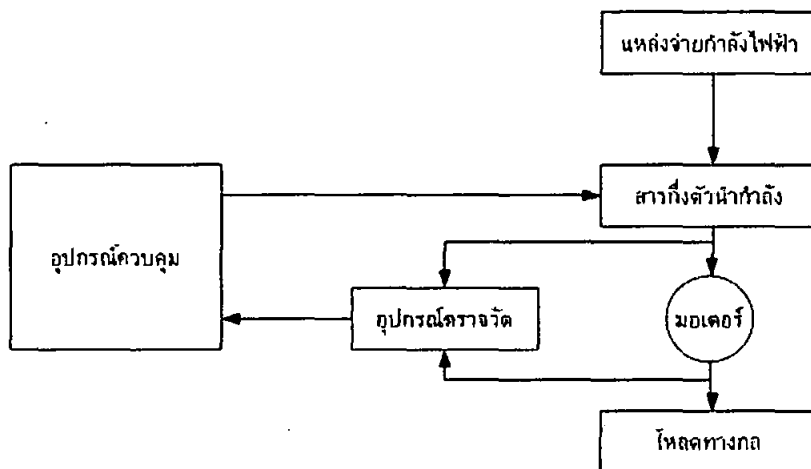
การหาผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ให้คงที่นั้นต้องทำการถ่ายโอนฟังก์ชันของระบบ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันของความถี่โดยใช้วิธีการแปลง Laplace ดังนั้นส่วนที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอน คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและระบบชดเชยชนิด PI ในส่วนของวงจรถูปรับจูนคอนเวอร์เตอร์และระบบป้อนกลับ (Feed back) นั้นจะให้ค่าเป็น 1 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

2.9 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 จุดภาค

ในปัจจุบันการควบคุมดีซีมอเตอร์จะพบได้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ส่วนมาก ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสร้างแม่เหล็กถาวรที่มีคุณภาพสูงทำให้ดีซีมอเตอร์กลายเป็นพลังงานที่สำคัญในระบบคอนโทรลเกือบทุกชนิดในปัจจุบัน จากเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน ตลอดถึงภายในรถยนต์ ในเครื่องคอมพิวเตอร์ หุ่นยนต์ เครื่องมือวัดคุมต่างๆ ตลอดถึงเครื่องจักรกลที่ทำงานโดยอัตโนมัติทุกชนิด เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำคือกัญแจสำคัญในการควบคุมดีซีมอเตอร์ที่สามารถสร้างความไว้วางใจและลดพลังงานที่สิ้นเปลืองลดขนาด ให้ความเที่ยงตรง และผลตอบสนองได้ดี

2.9.1 ส่วนประกอบของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

ปัจจุบันระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าได้เปลี่ยนแปลงจากระบบและรูปแบบเดิมไปอย่างมาก จากระบบทางกลรวมถึงอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง ไปเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังและไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการพัฒนาทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีการผลิตสารกึ่งตัวนำได้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ยังผลทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับการพัฒนาให้มีขีดความสามารถทั้งขนาดกำลัง ความเร็วในการสวิตช์ และมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ดังนั้นการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าจึงส่งผลให้การทำงานของระบบควบคุมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สำหรับส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.14 ต่อไปนี้



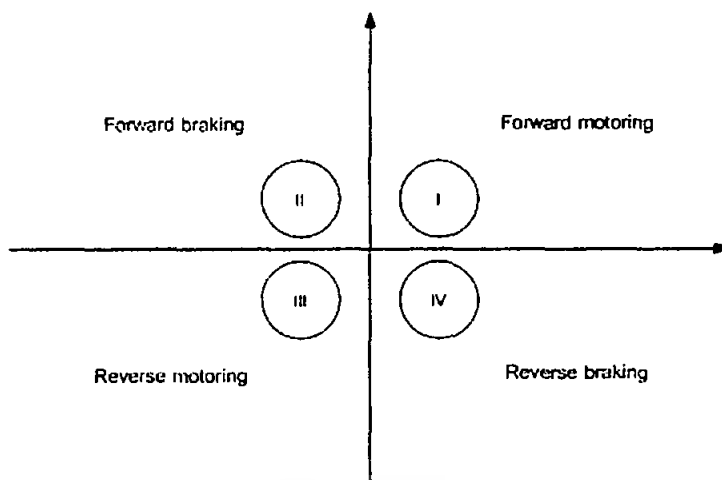
รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของการขับเคลื่อนทางไฟฟ้า

2.9.2 แรงบิดและอัตราเร็วในการทำงานหลายจุดภาค

การทำงานหลายจุดภาคหรือการทำงานหลายควอดแรนต์นั้น โดยทั่วไปในการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าจะยึดเอาระนาบของแรงบิดและอัตราเร็วเป็นเกณฑ์ในการแบ่งภาค กล่าวคือ แรงบิด (T) จะอยู่ในแนวแกน X และอัตราเร็ว (W_m) จะอยู่ในแนวแกน Y ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.15

การทำงานของมอเตอร์โดยทั่วไปมีอยู่สองรูปแบบด้วยกันคือ การหมุน (motoring) และการเบรก (braking) กรณีของการหมุน มอเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลเพื่อสนับสนุนการเคลื่อนที่และกรณีของการเบรก มอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิด (generator) ที่เปลี่ยนพลังงานกลกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งถูกนำมาใช้ในบางส่วนของวงจรและส่งผลให้มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ นอกจากนั้นในการหมุนและการเบรกของมอเตอร์สามารถกระทำได้ทั้งสองทิศทางคือ เดินหน้า (forward) และกลับทิศทาง (reverse)

จากรูปที่ 2.15 ในจุดภาคที่ I กำลังซึ่งก็คือผลของแรงบิดและอัตราเร็วมีค่าเป็นบวก ดังนั้นมันจึงทำงานเป็นมอเตอร์จ่ายพลังงานทางกลและการทำงานในจุดภาคนี้เรียกว่าการหมุนเดินหน้า (forward motoring) ในจุดภาคที่ II กำลังจะเป็นลบดังนั้นมอเตอร์จะทำงานภายใต้การเบรกที่มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่และเรียกการทำงานในจุดภาคนี้ว่าการเบรกเดินหน้า (forward braking) ส่วนจุดภาคที่ III จะเป็นการหมุนกลับทิศทาง (reverse motoring) และสำหรับจุดภาคที่ IV สุดท้าย เป็นการเบรกในการหมุนกลับทิศทางของมอเตอร์



รูปที่ 2.15 การขับเคลื่อนหลายจุดภาค

2.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน

AVR เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์(MCU)ที่ได้รวบรวมอุปกรณ์สนับสนุนการทำงานของ CPU ไว้มากมาย อาทิเช่น Analog to Digital , SPI , UART , Timer , Counter , PWM ซึ่งอุปกรณ์สนับสนุนการทำงานเหล่านี้ทำให้ MCU สามารถทำงานได้กว้างและใช้อุปกรณ์ต่อรวมจากภายนอกน้อยมาก และสามารถประมวลคำสั่งได้ภายใน 1 clock ในบทนี้จะนำเสนอข้อมูลบางส่วนที่เป็นการทำงานภายในของ AVR - MCU แนะนำคุณสมบัติและข้อต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ สถาปัตยกรรมภายในและรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป ตำแหน่ง I/O รีจิสเตอร์สถานะและการใช้งาน EEPROM การรีเซ็ตและการอินเตอร์รัพท์ การสื่อสารอนุกรม การเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อก และการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล การทำงานของพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตการทำงานของ Timer / Counter & Watch dog และการใช้กลุ่มคำสั่งต่าง ๆ

2.10.1 คุณสมบัติและข้อต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์

คุณสมบัติ

1. สถาปัตยกรรมภายในถูกออกแบบให้ใช้สถาปัตยกรรมแบบ RISE (Reduce Instruction Set Computer) RISE คือ ทำให้การประมวลผลมีความเร็ว 1 คำสั่ง / 1 Clock หรือ CPU สามารถประมวลคำสั่งได้ 1 MIPS / MHz
2. มีคำสั่งในการควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 118 คำสั่ง
3. หน่วยความจำแบบ FLASH สำหรับบันทึก PROGRAM MEMORY ขนาด 32 Kbyte
4. หน่วยความจำแบบ EEPROMสำหรับบันทึก DATA MEMORY ขนาด 1024 Byte
5. หน่วยความจำแบบ RAM ขนาด 2K Byte

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ระบบการเปลี่ยนสัญญาณ ANALOG TO DIGITAL ขนาด 10 บิต จำนวน 8 CHANNEL

7. กลุ่มรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว

8. พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตขนาด 8 บิต จำนวน 4 พอร์ต

9. ระบบการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอะซิงโครนัส(UART) 1 CHANNEL

10. ระบบการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบซิงโครนัส(SPI) 1 CHANNEL

11. ความถี่สัญญาณนาฬิกา 0 - 16 MHz (ATMEGA 32)

12. ระบบการรีเซ็ตแบบอัตโนมัติเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ (Power on reset)

13. ระบบการกำเนิดความถี่สัญญาณแบบ PWM จำนวน 4 CHANNEL (ATMEGA 32)

14. ระบบการตรวจจับระดับสัญญาณอนาล็อก(Analog Comparator)

15. 6 SLEEP MOD:IDEL ,POWER SAVE , POWER DOWN ,ADC Noise , Reduction , Standby, and Extended stanby 5

16. ระบบการป้องกันการ COPY ข้อมูลภายในหน่วยความจำ (LOCK FOR SOLFWARE SECURITY)

17. ระบบตรวจจับการทำงานผิดพลาดของ CPU (WATCHDOG TIMER WITH ON-CHIP OSCILATOR)

18. ระบบการอินเตอร์รัพท์จากภายนอก (EXTERNAL INTERRUPT)

19. TIMER/COUNTER ขนาด 16 บิต 1 CHANNEL

20. TIMER/COUNTER ขนาด 8 บิต 2 CHANNEL

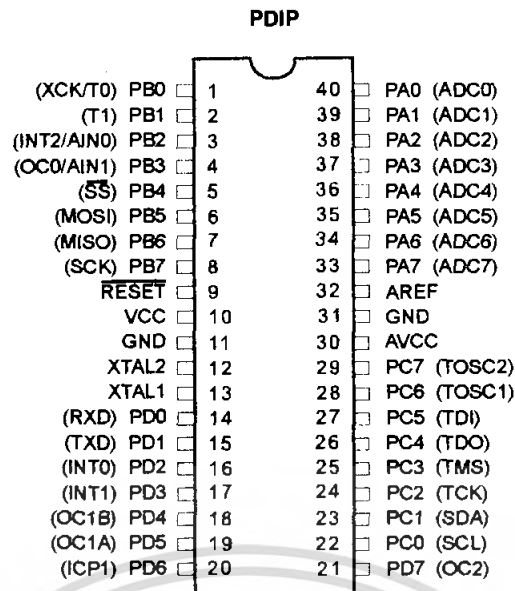
21. Vcc: 4.5 - 5.5 for ATMEGA 16

รายละเอียด

ATMEGA 16 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 10 บิตที่มีสถาปัตยกรรมแบบ RISE (reduce instruction set computer) ซึ่งทำให้การประมวลผลมีความเร็ว 1 คำสั่ง/ 1 clock หรือ CPU สามารถประมวลคำสั่งได้ 1 MIPS / MHz

2.10.2 โครงสร้างภายนอกและตำแหน่งขา

ภายในประกอบด้วยรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัวซึ่งแต่ละตัวจะต่อเข้ากับ ALU โดยตรง ทำให้การประมวลผล ต่อ 1 คำสั่งมีความเร็วกว่า CPU ที่มีสถาปัตยกรรมแบบCISC



รูปที่ 2.16 แสดงขาของไอซี ATMEGA16

2.10.3 รายละเอียดของขาสัญญาณและการใช้งาน

VCC คือ ขาจ่ายไฟให้กับ CPU และ GND คือ กราวด์

Port A (PA7..PA0) เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ตสามารถ PULL UP ภายในแยกจากกันซึ่งสามารถรับกระแส SINK 20mA โดยพอร์ต A ยังใช้เป็นขาอินพุตเพื่อรับสัญญาณอนาลอกในส่วนของการทำงาน ANALOG TO DIGITAL

Port B (PB7..PB0) เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ตสามารถ PULL UP ภายในอิสระแยกจากกันซึ่งแต่ละขาสามารถรับกระแส SINK 20mA และยังสามารถนำไปใช้งานอื่นๆ อีก

Port C (PC7..PC0) เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ตสามารถ PULL UP ภายในอิสระแยกจากกันซึ่งแต่ละขาสามารถรับกระแส SINK 20mA และยังสามารถนำไปใช้งานอื่นๆ อีก

Port D (PD7..PD0) เป็นพอร์ต 2 ทิศทางขนาด 8 บิต โดยสามารถกำหนดให้แต่ละขาของพอร์ตสามารถ PULL UP ภายในอิสระแยกจากกันซึ่งแต่ละขาสามารถรับกระแส SINK 20mA และยังสามารถนำไปใช้งานอื่นๆ อีก

Reset คือ ขารีสเซ็ต

XTAL 1 เป็นขาอินพุตของ OSE

XTAL 2 เป็นขาเอาต์พุตของ OSE

AVcc ใช้จ่ายไฟให้กับวงจร Analog to Digital

AREF เป็นขาแรงดันอ้างอิงที่ใช้งานในส่วนของวงจร Analog to Digital

AGND เป็นขากราวด์ของวงจร Analog to Digital

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 ฟังก์ชัน ADC

การแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นมีความจำเป็นมากเพราะว่าในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถประมวลผลแบบอนาล็อกได้มันจะประมวลผลแบบดิจิทัลเท่านั้นดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

ปกติใน CPU ของ AVR – ATMEGA16 นั้นจะมีฟังก์ชัน ADC อยู่ภายในตัวไอซี ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ ไอซี ADC ต่อภายนอก สำหรับฟังก์ชัน ADC นี้สามารถรับสัญญาณอนาล็อกได้สูงสุด 8 Channel โดยรับสัญญาณเข้ามาทาง พอร์ต A เราสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกที่ละ Channel อย่างต่อเนื่อง หรือจะให้ทำการแปลงสัญญาณเฉพาะ channel ที่เราต้องการ ก็ได้เช่นกัน โดยสัญญาณดิจิทัลที่แปลงได้จะมีความละเอียด 10 บิต โดยการรับสัญญาณแต่ละขาของพอร์ต A โดยจะมีวงจร SAMPLE AND HOLD เพื่อช่วยให้สัญญาณอนาล็อกที่รับเข้ามาเพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีระดับสัญญาณคงที่โดยปกติการใช้งานฟังก์ชันนี้เราจำเป็นต้องจัดแรงดัน AVCC AREF และ AGND ให้กับฟังก์ชันด้วย 7

คุณสมบัติ

1. 10bit resolution
2. 0.5LSB integral non-linearity
3. ± 2 LSB Absolute Accuracy
4. 65-260 μs Conversion Time
5. Up to 15KSPS at Maximum Resolution
6. 8 Multiplexed Single Ended Input Channels
7. 7 Differential Input Channels
8. 2 Differential Input Channels With Gain of 10x and 200x⁽¹⁾
9. Optional left adjustment for ADC result readout
10. 0-Vcc ADC Input Voltage Range
11. selectable 2.56V ADC Reference Voltage
12. Free Running or Single conversion Complete
13. Sleep mode noise Canceler

การทำงาน

ในส่วนของการแปลงสัญญาณ อนาล็อก เป็นดิจิทัล สามารถทำได้ 2 mode คือ

1. Single Conversion Mode
2. Free Running Mode

การทำงาน Single Conversion Mode ผู้ใช้ต้องเป็นผู้กำหนดการใช้งานขึ้นเอง แต่ในส่วนของ Free Running Mode วงจร Analog to digital จะเป็นตัวจัดการอ่านข้อมูลและเก็บใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADC Data Register ซึ่งบิต ADFR ใน Register ADCSR จะเป็น บิตที่ใช้เลือก Mode การใช้งานของวงจร Analog to digital สำหรับการกำหนดให้วงจร Analog to digital ทำงานนั้นสามารถทำได้โดยการเซตบิต ADEN ในรีจิสเตอร์ ADCHRA ให้เป็น 1 โดยบิตนี้จะเป็น 1 ไปตลอดจนกระทั่ง Conversion ของสัญญาณจะเรียบร้อยแล้วจึงทำให้บิตนี้เป็น 0 โดยอัตโนมัติ แต่ถ้าเป็นการเปลี่ยน Channel ของการแปลงสัญญาณขณะที่ Channel เดิมยัง Conversion อยู่ วงจร Analog to digital จะ Conversion สัญญาณ Channel เดิมให้เสร็จก่อนแล้วจึง Conversion สัญญาณ Channel ถัดไป โดยข้อมูลที่ได้จากการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลจะเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ ADCH และ ADCL

2.10.5 ฟังก์ชัน PWM

การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (PWM) เป็นเทคนิคสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับ PWM จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอินเวอร์เตอร์ เพื่อที่อินเวอร์เตอร์จะได้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น เนื่องจากว่า PWM เป็นฟังก์ชันการทำงานหนึ่งในโหมด PWM 8 ของ Timer/Counter ที่อยู่ภายใน AVR - ATMEGA32 ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะแนะนำเกี่ยวกับการทำงานของ Timer/Counter ของ AVR - ATMEGA32

Timer /Counter

ภายใน AVR - ATMEGA32 จัดให้มี Timer/Counter 3 ชุด โดยจัดเป็น Timer/Counter ขนาด 8 บิต 2 ชุด และ Timer/Counter ขนาด 16 บิต 1 ชุด ดังนี้คือ Timer/Counter2 และ Timer/Counter0 และ Timer/Counter1 ซึ่ง Timer/Counter2 สามารถรับสัญญาณ Clock จากภายนอก ซึ่งเป็น Option ที่จะนำ Timer/Counter2 มาทำเป็น RTC โดยใช้ XTAL ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 32.768KHz มาเป็นฐานเวลา และ Timer/Counter0 และ Timer/Counter1 ใช้วงจร Prescaling ขนาด 10 บิตร่วมกัน ส่วน Timer/Counter2 ใช้วงจร Prescaling แยกออกต่างหาก

แนะนำการใช้งาน Timer/Counter แต่ละประเภท

1. Timer/Counter0

โครงสร้างของ Timer/Counter0 ขนาด 8 บิต แสดงในรูปที่ 50 ซึ่งสามารถเลือกสัญญาณ Clock ได้จาก CK (Clock ของระบบ) หรือสัญญาณ Clock ของระบบที่ถูกหาร (Prescaling) หรือ สัญญาณจากภายนอก โดยการใช้งานจะอธิบายในรีจิสเตอร์ TCCR0 และ TIFR ส่วนสัญญาณควบคุมสามารถทราบรายละเอียดได้จาก รีจิสเตอร์ TCCR0 ซึ่งการควบคุมการอินเตอร์รับจะควบคุมได้จาก รีจิสเตอร์ TIMSK เมื่อ Timer/Counter0 ได้รับสัญญาณจากภายนอก ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะซิงโครไนซ์(Synchronized) กับสัญญาณนาฬิกาภายใน CPU โดย TIMER/COUNTER 0 จะเป็นวงจรนับขึ้นที่สามารถเขียนและอ่านข้อมูลได้ตลอดเวลา โดย

เมื่อทำการเขียนข้อมูลลงใน TIMER/COUNTER 0 ในขณะที่มีสัญญาณ Clock จะทำให้ TIMER/COUNTER 0 นับค่าต่อเนื่องจากค่าที่ถูกเขียนลงไป

2. Timer/Counter 1

จะมีขนาด 16 บิต โดยสามารถเลือกสัญญาณนาฬิกาได้จาก CK หรือสัญญาณที่ได้รับ การหารจาก CK (Prescelling) ซึ่งการหยุด Timer/Counter 1 จะอธิบายไว้ในรีจิสเตอร์ TCCR1A (Timer/Counter 1 Control Register) และ TCCR1B โดยแฟร็กที่แสดงสถานะต่างๆ (Overflow, Compare math, Capture even) ส่วนสัญญาณควบคุมจะอธิบายไว้ในรีจิสเตอร์ TCCR1A และ TCCR1B การควบคุมสัญญาณอินเทอร์รัพท์จะควบคุมได้จากรีจิสเตอร์ TIMSK (TIMER/COUNTER INTERRUPT MASK REGISTER)

เมื่อ TIMER1/COUNTER1 จะประกอบด้วยส่วนของการเปรียบเทียบเอาต์พุต (Output Compare Function) 2 ฟังก์ชัน โดยจะใช้ รีจิสเตอร์ OCR1A (Output Compare Register 1 A) และ OCR1B (Output Compare Register 1B) เป็นส่วนของการเก็บค่าข้อมูลของการ เปรียบเทียบ TIMER1/COUNTER1 จะสามารถเลือกใช้ฟังก์ชัน PWM ได้ทั้ง 8,9 และ 10 บิต

The Timer/Counter Control Register

Bits 7,6-COM1A1,COM1A0: Compare Output Mode 1A, bit 1 and 0 บิต COM1A1 และ COM1A0 เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ขา OC1A เมื่อ Timer/Counter1 เกิด 9 Compare Match ซึ่งเมื่อใช้ฟังก์ชัน Output Compare Match ของ Timer/Counter1 จะต้องควบคุมให้ขา OC1A มีสถานะเป็นเอาต์พุต

Bit 5,4-OM1B1,COM1B0: Compare Output Mode 1 B, bit 1 and 0 บิต Com1A1 และ COM1A0 เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ขา OC1A เมื่อ Timer/Counter1 เกิด Compare Match ซึ่งเมื่อใช้ฟังก์ชัน Output Compare Match ของ Timer/Counter1 จะต้องควบคุมให้ขา OC1A มีสถานะเป็นเอาต์พุต

Bit 3...2-Res: Reserved bits ในส่วนของ AT mega32 จะสงวนบิตในกลุ่มนี้ไว้

Bit 1...0 - PWM11,PWM10: Pulse Width Modulator Select Bit

เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของ PWM

The Timer/Counter1 Control Register B-TCCR1B

Bit 7-ICN1: Input Capture 1 Noise Canceler (4 CKs) บิตนี้เป็นบิตที่กำหนดให้ Input Capture 1 Noise Canceler ทำงานหรือไม่ทำงาน โดยเมื่อบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการ กำหนดให้ Input Capture 1 Noise Canceler ทำงาน แต่เมื่อบิตนี้เป็น 0 จะเป็นการกำหนด ไม่ให้ Input Capture 1 Noise Canceler ทำงาน ชุต Noise Canceler จะถูกกำหนดให้ทำงาน โดยการ Sampling สัญญาณที่เข้ามาที่ชุต Input Capture 1 โดยสัญญาณ Sampling แรกจะเริ่ม

ที่ขอบแรกของสัญญาณขาขึ้นหรือขาลงขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในบิต ICES1 โดยชุด Noise Canceler จะ Sampling ด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของ XTAL ซึ่งจะ Sampling ทั้งหมด 4 ครั้ง โดยลอจิกที่ได้จากการ Sampling จะต้องมิลลิวินาทีเดียวกันกับลอจิกที่กำหนดในบิต ICES1

Bit 6-ICES1: Input Capture 1 Edge Select เป็นบิตที่ใช้กำหนดให้ชุด Input Capture 1 จะต้อง Detect ถ้าบิต ICES1 เซ็ต เป็น 1 จะเป็นการกำหนดให้ชุด Input Capture1 ทำหน้าที่ Detect สัญญาณที่ขอบขาขึ้น แต่ถ้าบิต ICES 1 ถูกเคลียเป็น 0 จะเป็นการกำหนดให้ชุด Input Capture 1 ทำหน้าที่ Detect สัญญาณที่ขอบขาลง

Bit 5,4-RES:Reserved bits บิตนี้ถูกสงวนไว้

Bit 3: CTC1:Clear Timer1/Counter1 on Compare Match บิตนี้เป็นที่ใช้ในการกำหนดว่าเมื่อเกิด Output Compare แล้วจะให้เกิดการนับต่อไปหรือจะให้มีการรีเซ็ตค่าให้เป็น 00000 แล้วจึงทำการนับต่อไป โดยถ้าเป็นบิตนี้เป็น 1 จะเป็นการกำหนดให้มีการรีเซ็ตค่าให้เป็น 0 ขมเมื่อเกิดการ Output Compare แต่ถ้าบิตนี้เคลียร์เป็น 0 จะเป็นการกำหนดให้มีการนับค่าต่อเมื่อเกิด Output Compare

Bit 2,1,0-CS12,CS11,CS10:Clock Select1,bit 2,1 and 0 เป็นบิตที่ใช้ในการเลือกสัญญาณ Clock

The Timer/Counter In Capture Register – ICR1H AND ICR1L

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 ที่ใช้เก็บค่า Timer/Counter1 ที่อยู่ในรีจิสเตอร์ TCNT1 เมื่อ Input Capture สามารถ Detect ได้ เมื่อ Input Capture สามารถ Detect สัญญาณได้ตามที่กำหนดในบิต ICES1 จะทำให้ CPU โหลดค่าในรีจิสเตอร์ TCNT1 ลงในรีจิสเตอร์ และในเวลาเดียวกับบิต ICFจะเซ็ตเป็น 1 โดยการอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ ICR1 ของ CPU จะใช้รีจิสเตอร์ TEMP เป็นรีจิสเตอร์พักข้อมูล ซึ่งการใช้รีจิสเตอร์ TEMP ช่วยในการอ่านข้อมูลเพื่อให้ค่าที่อยู่ในรีจิสเตอร์ ICR1H และ ICR1L เสมือนถูกอ่านออกมาพร้อมกัน การอ่านค่าจาก 10 รีจิสเตอร์ ICR1 จะต้องอ่านค่าจากรีจิสเตอร์ ICR1L ก่อน โดยเมื่อ CPU อ่านค่าจาก ICR1L จะทำให้ค่าในรีจิสเตอร์ ICR1H ถูกโหลดลงในรีจิสเตอร์ TEMP เมื่อ CPU อ่านค่าจาก ICR1H จะทำให้ค่าในรีจิสเตอร์ TEMP ถูกส่งให้ CPU

การใช้งาน Timer/Counter1 ในโหมด PWM

การทำงานในโหมด PWM ของ Timer/Counter1 จะสามารถเลือกใช้งานได้ 8,9 หรือ 10 บิต โดยเอาท์พุทที่ได้จะออกที่ขา PD5(OC1A) และขา PD(OC1B) ในการทำงาน Timer/Counter1 จะนับขึ้นและนับลง ซึ่งจะนับขึ้นจาก 0000 ถึงค่าสูงสุด และจะนับจากค่าสูงสุด ลงมาที่ 0000 แล้วจึงนับขึ้นอีกครั้งเมื่อค่าใน Timer/Counter1 เท่ากับค่าในรีจิสเตอร์ OCR1A หรือ OCR1B จะทำให้ขา PD5(OC1A)/PD1(OC1B) เปลี่ยนแปลงตามที่กำหนดในบิต COM1A/CoM1A0 หรือ CoM1B/COM1B0 เมื่อ OCR1 มีค่าเท่ากับ 0000 หรือค่าสูงสุดจะทำให้

เอาท์พุทขา OC1A/OCA1B มีลอจิกเป็น LOW หรือ HIGH ตามที่กำหนดในบิต COM1A1/COM1A0 หรือ COM1B1/COM1B0 และเมื่อ Timer/Counter1 เกิด Overflow และค่าการนับเป็น 0000 จะทำให้บิต TOV1 เซ็ตเป็น 1

Timer2&Counter

เป็น Timer / Counter ขนาด 8 บิต ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของรีจิสเตอร์ใช้งานใน Timer/Counter 2

The Timer/Counter 2 Control Register – TCCR2

Bit 7 - Res:Reserved Bit ใน AT90S4434/8535 บิตนี้สงวนไว้

Bit 6 - PWM2:Pulse Width Modulator Enable เป็นบิตที่ใช้ Enable ให้โหมด PWM ใน Timer/Counter2 ให้ทำงาน โดยถ้าบิตนี้เซ็ตเป็น 1 จะเป็นการกำหนดให้โหมด PWM ถูก Enable ให้ทำงาน แต่ถ้าบิตนี้ถูกเคลียเป็น 0 จะเป็นการ Disable ไม่ให้โหมด PWM ใน Timer/Counter2 ทำงาน

Bit 5,4 - Com21,Com20:Compare Output Mode,bit 1 and 0 เป็นบิตที่ใช้กำหนดลักษณะสัญญาณที่ขา PD7(OC2) เมื่อ Timer/Counter2 ทำงานในโหมด Compare โดยเมื่อ Compare Output Match จะทำให้ขา PD7(OC2) เป็นไปตามที่กำหนดในบิต Com21 และ Com20

Bit 3-CTC2:Clear Timer/Counter on Compare Match เป็นบิตที่ใช้กำหนดให้ Timer2/Counter2 ทำการ RESET ค่าเป็น 00 หลังจากที่ค่าในรีจิสเตอร์ TCNT2 มีค่าเท่ากับค่าที่ตั้งไว้ในรีจิสเตอร์ OCR หรือ Compare Output Match ถ้าบิตนี้เซ็ตเป็น 1 จะทำให้ Timer/Counter2 รีเซ็ต

Bits 2,1,0-CS22,CS21,CS20:Clock Select bit 2,1 and 0 เป็นบิตใช้ในการกำหนดค่า Prescaling

2.11 การใช้งานติดต่อสื่อสาร ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port)

ในการเชื่อมต่อตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกหรือกับคอมพิวเตอร์ โดยวิธีการติดต่อสื่อสารแบบผ่านพอร์ตอนุกรมมาตรฐาน RS-232 ซึ่งในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีรีจิสเตอร์ในการติดต่อสื่อสารแบบผ่านพอร์ตอนุกรมอยู่แล้ว จึงง่ายในการใช้งาน

2.11.1 มาตรฐาน RS-232

RS-232 เป็นมาตรฐานการสื่อสารอนุกรมระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองในการสื่อสารข้อมูล ซึ่งมาตรฐานการสื่อสารด้วย RS-232 จะสามารถสื่อสารข้อมูลได้ไกลประมาณ 50 เมตร ถ้าจะ

ขยายระยะห่างให้การสื่อสารข้อมูลได้ไกลยิ่งขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเลือกใช้สายที่มีการสูญเสียน้อย มาตรฐานการสื่อสารอนุกรม RS-232 นั้น จะมีข้อกำหนดพารามิเตอร์อยู่ 4 ค่าคือ

1. ค่าอัตราบอดเรต (Baud Rate) คือค่าอัตราความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลต่อ 1 วินาที หน่วยเป็น บิตต่อวินาที (Bit per second) ซึ่งอัตราบอดเรตในการสื่อสารข้อมูลจะมีค่าตั้งแต่ 110 ถึง 76,800 เช่น ถ้าอัตราบอดเรต 9,600 ก็หมายถึง การรับ-ส่งข้อมูล 9,600 บิตต่อ 1 วินาที

2. ค่าความกว้างข้อมูล (Data Width) คือ ข้อมูลที่รับส่งข้อมูลเป็นกลุ่มโดยมีขนาด 7 บิต หรือ 8 บิต ขึ้นอยู่กับการสื่อสารรับส่งข้อมูลว่าจะเลือกขนาดใดในการสื่อสารระหว่างกัน

3. ค่าพาริตีบิต (Parity Bit) พาริตีบิต เป็นบิตสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ในการรับ-ส่งข้อมูล โดยการนับจำนวนบิตที่เป็น "1" ในข้อมูลเป็นจำนวนเลขคู่หรือจำนวนเลขคี่ การกำหนดพาริตีบิตในการสื่อสารข้อมูลมีรูปแบบการกำหนด เช่น พาริตีคู่ (Even Parity) พาริตีคี่ (Odd Parity) หรือไม่มีพาริตี (None)

4. ค่าบิตจบ (Stop Bit) เป็นบิตสำหรับบิตท้ายข้อมูล โดยอาจมี 1 บิต หรือ 2 บิต

2.11.2 รูปแบบการสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม

ในการสื่อสารอนุกรม จะมีรูปแบบการสื่อสารข้อมูลเป็นกลุ่มบิตซึ่งเรียกว่า เฟรม ซึ่งใน 1 เฟรม นั้นจะประกอบด้วย คือ

1. บิตเริ่มต้น (Start Bit) มีขนาด 1 บิต เป็นบิตเริ่มต้นที่ทำหน้าที่บอกอุปกรณ์ภาครับ ข้อมูลว่าข้อมูลกำลังจะมาถึงมีขนาด 1 บิต

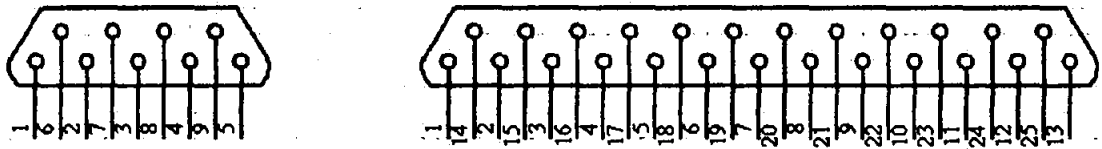
2. บิตข้อมูล (Data Bit) มีขนาด 7-8 บิต เป็นกลุ่มบิตที่เป็นข้อมูล ในการสื่อสารระหว่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ กับคอมพิวเตอร์มักจะใช้ข้อมูลเป็นรหัสแอสกี

3. บิตพาริตี (Parity Bit) มีขนาด 1 บิต เป็นบิตในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

4. บิตจบการสื่อสาร (Stop Bit) มีขนาด 1-2 บิต เป็นบิตที่บอกว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว

2.11.3 คอนเนคเตอร์แบบ D-Type

ในการสื่อสารแบบอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้มาตรฐาน RS-232 หัวต่อแบบ D-Type จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือแบบ 9 ขา และแบบ 25 ขา หรืออาจจะเรียกว่า DB9 และ DB25 ตามลำดับ ซึ่งหัวต่อทั้ง 2 แบบ จะมีลักษณะการทำงานของสัญญาณต่างๆ เหมือนกัน แต่การจัดเรียงขาไม่เหมือนกัน สังเกตการณจัดวางขาต่างๆ จากรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การจัดขาต่างๆ ของ DB9 และ DB25

2.11.4 การจัดเรียงขาสัญญาณ

ตารางที่ 2.1 แสดงการจัดเรียงขาสัญญาณ

อธิบายสัญญาณ	สัญญาณ	9 ขา	25 ขา
Carrier detect	CD	1	8
Receive data	RD	2	3
Transmit data	TD	3	2
Data terminal ready	DTR	4	20
Signal ground	SG	5	7
Data set ready	DSR	6	6
Request to send	RTS	7	4
Clear to send	CTS	8	5
Ring indicator	RI	9	22

อธิบายขาสายสัญญาณต่างๆ ที่หัวต่อ D-Type

SG : เป็นขาสัญญาณกราวนด์

RD : เป็นขาใช้รับสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรม โดยสามารถสื่อสารได้ 2 ทาง

TD : เป็นขาใช้ส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนุกรม โดยสามารถสื่อสารได้ 2 ทาง

RTS : เป็นขาที่ส่งสัญญาณเพื่อยืนยันขอให้อุปกรณ์ปลายทางส่งข้อมูลกลับมา

CTS : เป็นขาที่ส่งสัญญาณเพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อพร้อมจะรับข้อมูล

DTR : เป็นขาที่ส่งสัญญาณเพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์พร้อมในการติดต่อ

DSR : เป็นขาที่ส่งสัญญาณตรวจสอบการเชื่อมต่อเพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์ปลายทางพร้อมในการติดต่อ

CD : เป็นขาที่ส่งสัญญาณบอกว่ามีสัญญาณพาหะ (Carrier) จากโมเด็ม

ในการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ด้วยมาตรฐาน RS-232 แบบอนุกรมสายสัญญาณที่ใช้มีแค่ 3 สาย คือ SG สัญญาณกราวนด์, RD สายสัญญาณรับข้อมูล, TD สายสัญญาณส่งข้อมูล ตามลำดับ

2.11.5 Visual Basic

Visual Basic ถือกำเนิดขึ้นมาในโลกของดอส (ระบบปฏิบัติการที่ใช้การป้อนคำสั่ง) แต่มาดั่งสุดขีดในเวอร์ชัน 3.0 กับ Window 3.1 ซึ่งรูปแบบที่ประสบความสำเร็จก็คือ การสร้างแอปพลิเคชันโดยใช้ฟอร์ม (Form) เป็นหลัก ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น Form-Based Application

การสร้างแอปพลิเคชันด้วยฟอร์มนั้น เราจะนำคอนโทรล หรือคอมโพเนนต์ชนิดต่างๆ ที่อยู่ใน Toolbox มาวางไว้ในฟอร์ม แล้วเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของคอนโทรล (หรือคอมโพเนนต์) แต่ละตัวให้ตอบสนองกับการทำงานรูปแบบต่างๆ ได้

การสร้างแอปพลิเคชัน

1. ให้ทำการเปิด Project ใหม่โดยคลิกที่ File > New Project ให้เลือก Windows Application เพื่อเปิดฟอร์มขึ้นมา
2. เมื่อมีฟอร์มขึ้นมา ให้นำเอาคอนโทรล มาวางบนฟอร์มดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 หน้าตาของแอปพลิเคชัน

3. กำหนด Properties ให้กับ Control/Object ต่างๆ
4. เขียนโค้ดหรือโปรแกรมเพื่อใช้งานแอปพลิเคชันหรือโปรแกรมควบคุมการหมุน DC Motor
5. เมื่อเขียนโค้ดหรือโปรแกรมเสร็จแล้วจะต้องทำการทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชัน โดยการกดปุ่ม F5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

จุดประสงค์คือการอธิบายบทบาทของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จะอธิบายกระบวนการจำลอง และโปรแกรมที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งาน

ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง กระบวนการแปลงผันกำลัง ประกอบด้วยส่วนประกอบ พาสซีฟ , ไดโอด , ไทริสเตอร์ และ อุปกรณ์สวิตช์กึ่งตัวนำอื่นๆ ดังนั้น Circuit topology เปลี่ยนแปลงขณะที่สวิตช์เปิด และปิด โดยเป็นฟังก์ชันของเวลาภายใต้การควบคุม ปกติมันเป็นไปไม่ได้ และไม่เป็นสิ่งที่ต้องการบ่อยนัก ผลเฉลยของวงจร (แรงดัน และ กระแส) ที่จะเข้าใกล้รูปแบบฟังก์ชันของเวลา อย่างไรก็ตามการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์สามารถจำลองได้ทุกวงจร

ในปริศยานี้พจนานุกรมนี้จะใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งหมด การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปใช้เพื่อ การวิจัยเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรใหม่ ที่ถูกปรับปรุงเพื่อความเข้าใจในวงจรนั้น ๆ มากขึ้น

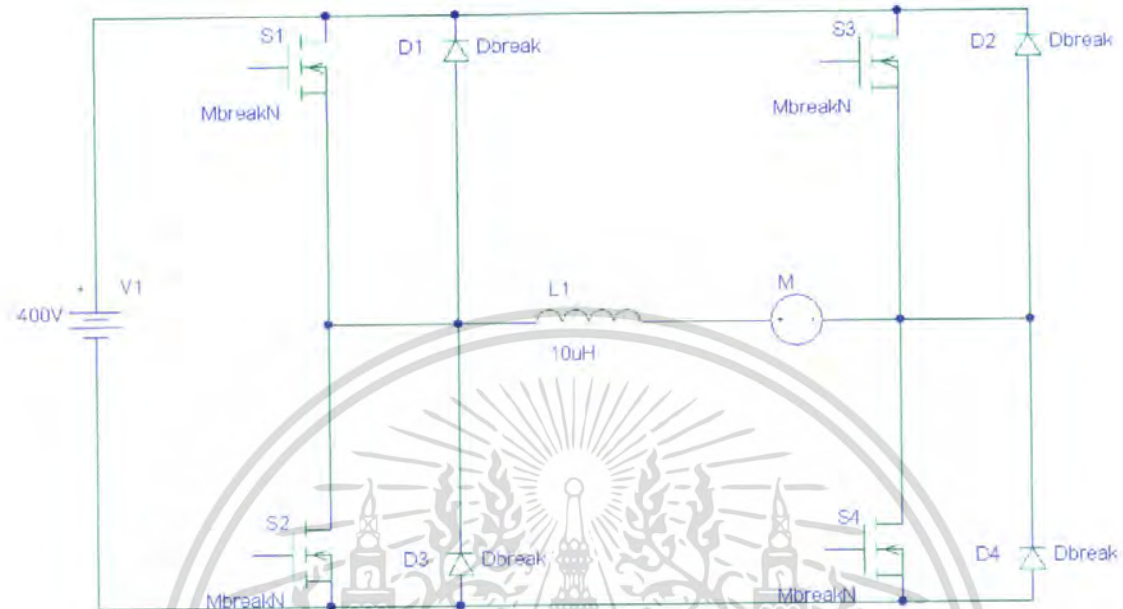
การจำลองรูปคลื่นของวงจรจะดูการทำงานทั้งแบบไดนามิกส์ และสถานะอยู่ตัว และการเปลี่ยนแปลงของกระแส และแรงดันที่แปลงตามค่าพารามิเตอร์

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต้องการวิธีการคำนวณการทำงานของวงจรที่ต้องการ เพราะวงจรรวม (IC) สมัยใหม่มีความซับซ้อนมาก การวิเคราะห์วงจรด้วยคอมพิวเตอร์ จำเป็นที่ต้องเตรียมข้อมูล และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ซึ่งอาจได้มาจากห้องทดลอง ความสามารถในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์มีดังนี้:

1. คำนวณผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงในอุปกรณ์ เช่น ตัวต้านทาน , ทรานซิสเตอร์ และหม้อแปลง
2. ประเมินการทำงานว่าควรปรับปรุงให้ดีขึ้นหรือลดบางอย่างออกไป
2. คำนวณผลกระทบของสัญญาณรบกวน และสัญญาณผิดเพี้ยนที่ไม่ต้องการสำหรับ อุปกรณ์เครื่องมือวัดราคาแพง
4. วิเคราะห์ความสามารถในการทนทานของอุปกรณ์เนื่องจากค่าหรือพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แอกทีฟ
5. วิเคราะห์ฟลูเรียร์
6. คำนวณผลกระทบของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น
7. ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด

2.13 อธิบายการทำงานของวงจร

วงจรดังรูป 2.19 ให้ตัวเหนี่ยวนำ L ประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำอาร์มาเจอร์ และตัวเหนี่ยวนำภายใน วิธีการควบคุมที่เป็นไปได้สำหรับการทำงานแสดงด้านล่าง



รูปที่ 2.19 วงจรการทำงานของมอเตอร์ 4 จตุภาค

วิธีที่ 1

วงจรทำงานเสมือนแบบ 2 - quadrant chopper ซึ่งได้มาจากการทำงานจตุภาคที่ 1 และจตุภาคที่ 2 และได้มาจากการทำงานจตุภาคที่ 2 และจตุภาคที่ 4

ลำดับที่ 1 สวิตช์ S_4 อยู่ในสภาวะนำกระแสตลอดเวลา ที่จุด a และจุด b ลัดวงจรถึงกันตลอดเวลา เพื่อให้แน่ใจว่าสวิตช์ S_4 หรือไอโอด D_4 นำกระแส และที่จุด a และจุด c เปิดวงจรตลอดเวลา สวิตช์ S_1 และสวิตช์ S_2 ถูกควบคุมตามขั้นตอนดังนี้

(ก) ถ้าสวิตช์ S_1 และ S_4 อยู่ในสภาวะเริ่มนำกระแสที่เวลา $t=0$ แรงดันแบตเตอรี่ V จะจ่าย ให้กับโหลด และกระแสไฟฟ้าจะไหลจากจุด X ถึง Y แสดงดังรูป 2.20(ก) โดยที่ทิศทางเป็นบวก ระหว่างนี้แรงดันที่โหลดมีค่าเป็น $+V$

(ข) เมื่อสวิตช์ S_1 เริ่มหยุดนำกระแส กระแสที่เกิดจากพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำ $(1/2) Li^2$ จะไหลผ่านไอโอด D_2 และสวิตช์ S_4 ดังรูป 2.20(ข) สวิตช์ S_2 ที่ซึ่งอยู่ในสภาวะเริ่มนำกระแสซึ่งจะยังไม่นำกระแสเพราะถูกลัดวงจรด้วยไอโอด D_2

(ค) สวิตช์ S_2 ที่นำกระแส นำกระแสเมื่อทิศทางของกระแสกลับทิศดังรูป 2.20(ค)

(ง) สุดท้าย เมื่อสวิตช์ S_2 เริ่มหยุดนำกระแสที่ กระแสไหลผ่าน ขั้วลบของแบตเตอรี่ ไอโอด D_4 , มอเตอร์, ตัวเหนี่ยวนำ L , ไอโอด D_1 , และขั้วบวกของแบตเตอรี่ แสดงดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

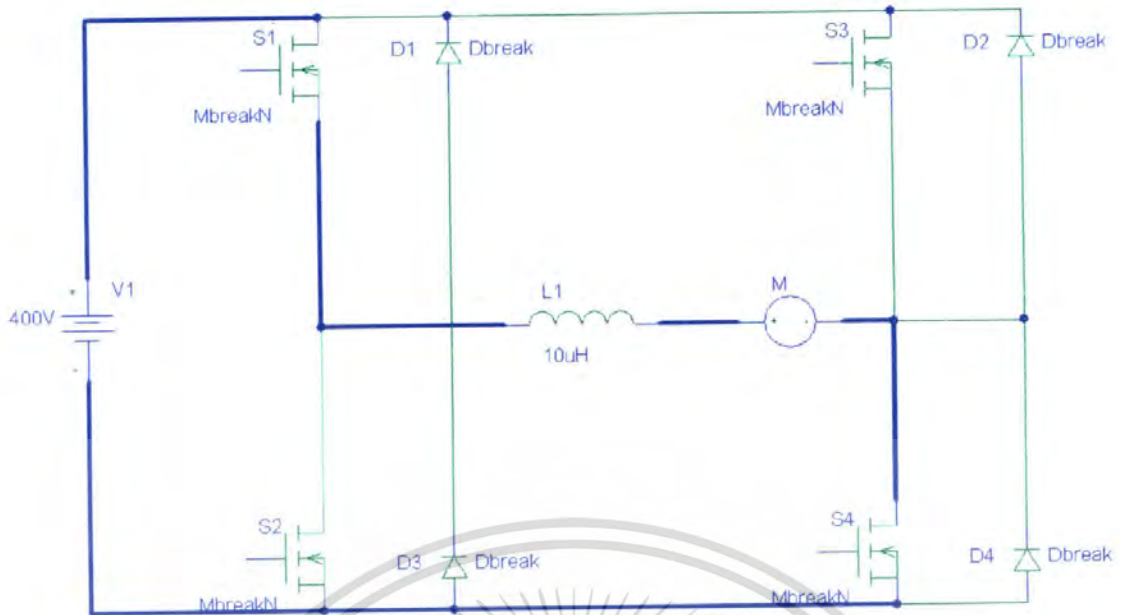
รูป 2.20(ง) ถ้าเครื่องจักรทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรนี้ช่วยให้มีการคืนพลังงาน ขณะเบรก จะสังเกตได้ว่าสวิตช์ S1 จะไม่นำกระแสจนกว่ากระแส i_{1d} มีค่าเป็นบวก และ สวิตช์ S2 จะไม่นำกระแสจนกว่ากระแส i_{1d} ไหลในทิศทางลบ ไดโอด D4 จะนำกระแส ช่วงกระแสไหลกลับทิศทาง

อุปกรณ์ที่นำกระแสระหว่างการทำงานที่เกี่ยวข้องแสดงดังรูปที่ 2.21 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของลำดับการทำงานนี้

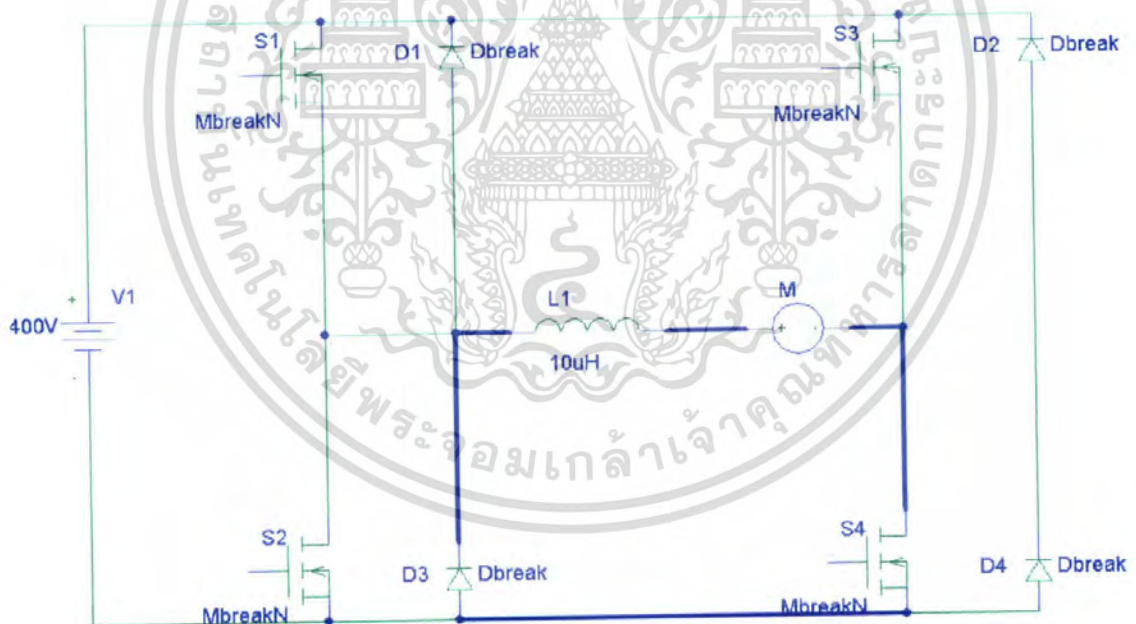
ลำดับที่ 2 สำหรับวงจรเตรียมจากการทำงานในจุดภาคที่ 2 และจุดภาคที่ 4 สวิตช์ S2 นำกระแสตลอดเวลา ที่จุด a และจุด c ยังคงลัดวงจรเนื่องจากการนำกระแสของสวิตช์ S2 หรือ ไดโอด D2 ที่จุด a และจุด b ถูกเปิดวงจรตลอด ซึ่งตรงกับรูปคลื่นที่แสดงดังรูปที่ 2.22(ก)-(ง) มีขั้นตอนดังนี้

- (ก) สวิตช์ S2 ถูก trig ที่เวลา $t = 0$ แต่เริ่มการนำกระแสในช่วงกระแสไฟฟ้าไหลกลับทิศทางเท่านั้น และไหลผ่านขั้วบวกของแบตเตอรี่ สวิตช์ S3 , มอเตอร์ , ตัวเหนี่ยวนำ L, สวิตช์ S2, และขั้วลบของแบตเตอรี่ แรงดันที่จ่ายให้กับโหลดเท่ากับ $-V$
- (ข) เมื่อสวิตช์ S2 เริ่มหยุดนำกระแส กระแสในตัวเหนี่ยวนำยังคงไหลในทิศทางกลับทิศทางผ่านสวิตช์ S3, มอเตอร์, ตัวเหนี่ยวนำ L และไดโอด D1 ตอนนี้แรงดันที่โหลดมีค่าเป็นศูนย์
- (ค) สวิตช์ S1 ถูก trig แต่เริ่มนำกระแสเมื่อกระแสไหลในทิศทางบวกเท่านั้น กระแสไหลในลูปปิดผ่านสวิตช์ S1, ตัวเหนี่ยวนำ L, มอเตอร์, และไดโอด D2
- (ง) เมื่อสวิตช์ S1 เริ่มหยุดนำกระแส แรงดันลบของแบตเตอรี่จะถูกจ่ายให้กับโหลด แต่กระแสบวกไหลผ่านขั้วลบของแบตเตอรี่, ไดโอด D2, ตัวเหนี่ยวนำ L, มอเตอร์, ไดโอด D2 และไหลกลับขั้วบวกของแบตเตอรี่

จะเห็นว่าสวิตช์ S1 นำกระแสเมื่อ i_{1d} เป็นบวก และสวิตช์ S2 นำกระแสเมื่อ i_{1d} เป็นลบที่แรงดันคร่อมโหลดเป็นศูนย์ ไดโอด D1 และไดโอด D2 ถูกไบอัสย้อนกลับ อุปกรณ์ที่นำกระแสระหว่างการทำงานที่เกี่ยวข้องแสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งแสดงรูปคลื่นของลำดับการทำงานนี้

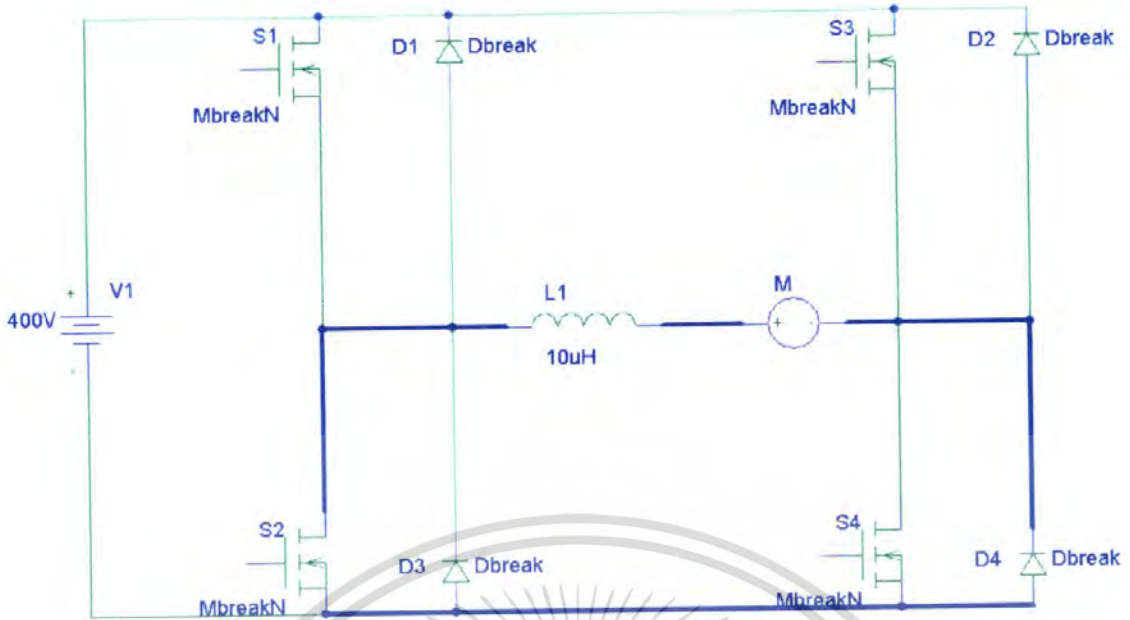


รูปที่ 2.20(ก) สวิตช์ S1 และสวิตช์ S4 เริ่มนำกระแส

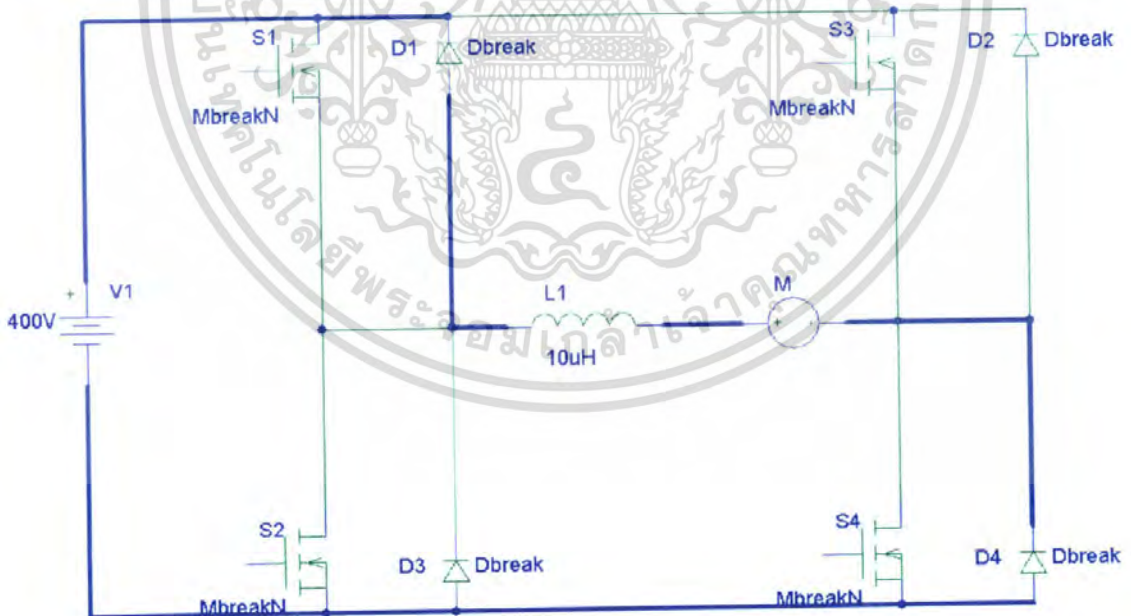


รูปที่ 2.20(ข) สวิตช์ S1 หยุดนำกระแส สวิตช์ S4 ยังคงนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

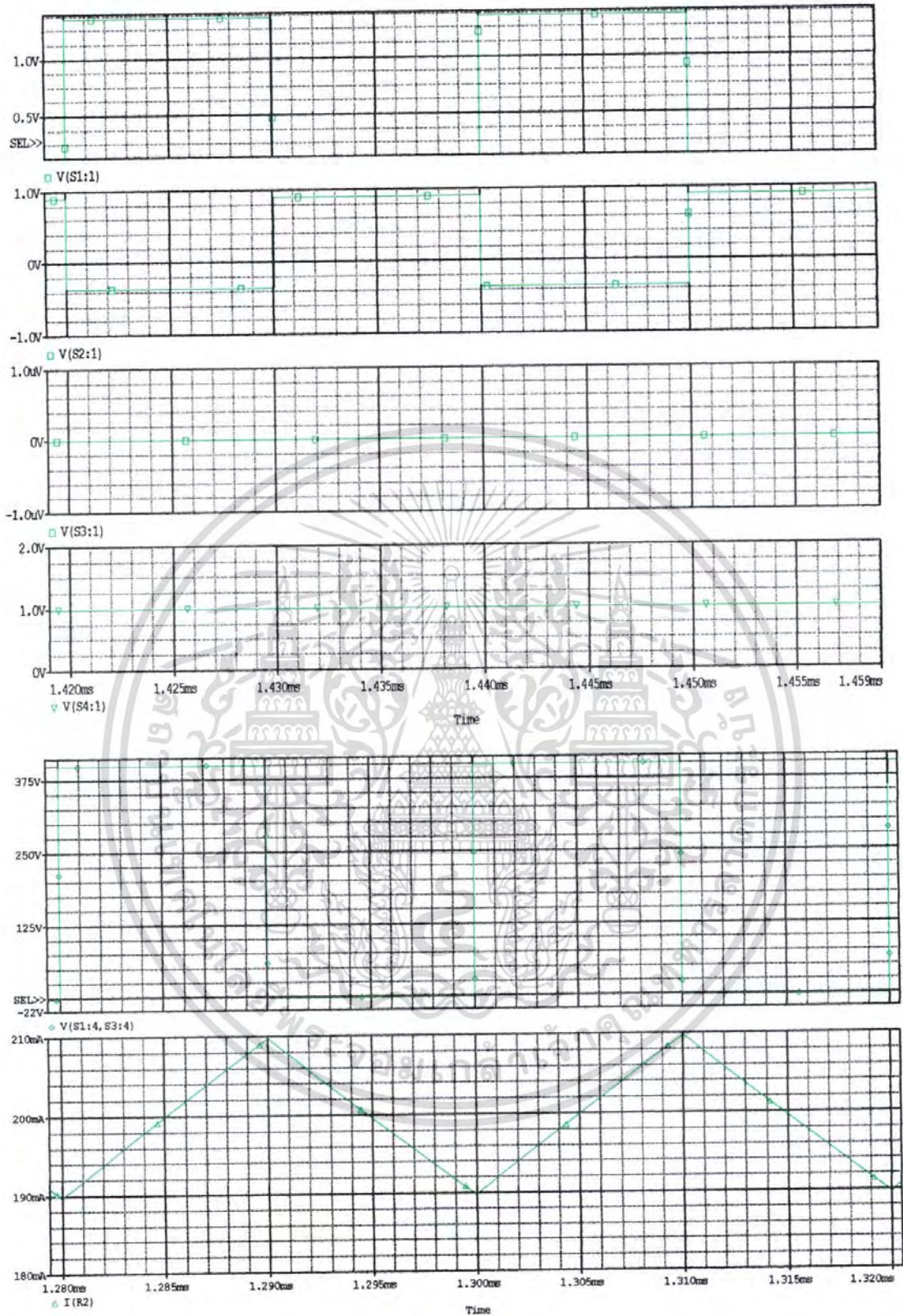


รูปที่ 2.20(ค) สวิตช์ S2 เริ่มนำกระแส สวิตช์ S4 ถูกลัดวงจรโดย D4



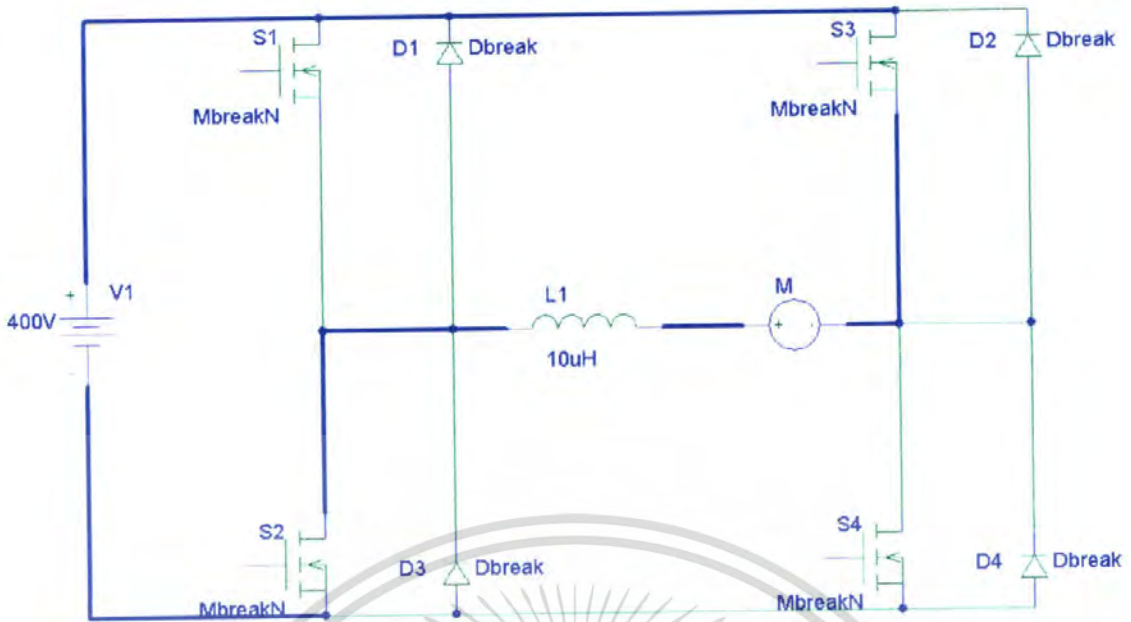
รูปที่ 2.20(ง) S2 หยุดนำกระแส S4 ถูกลัดวงจรโดย D4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

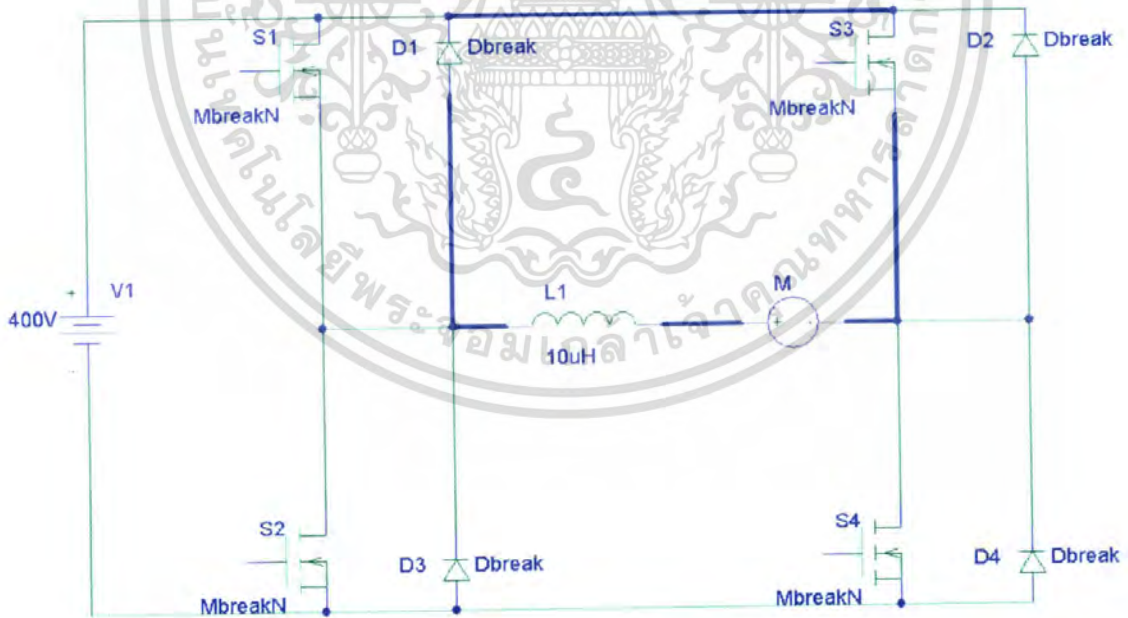


รูปที่ 2.21 แสดงการสวิตช์แรงดัน และกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

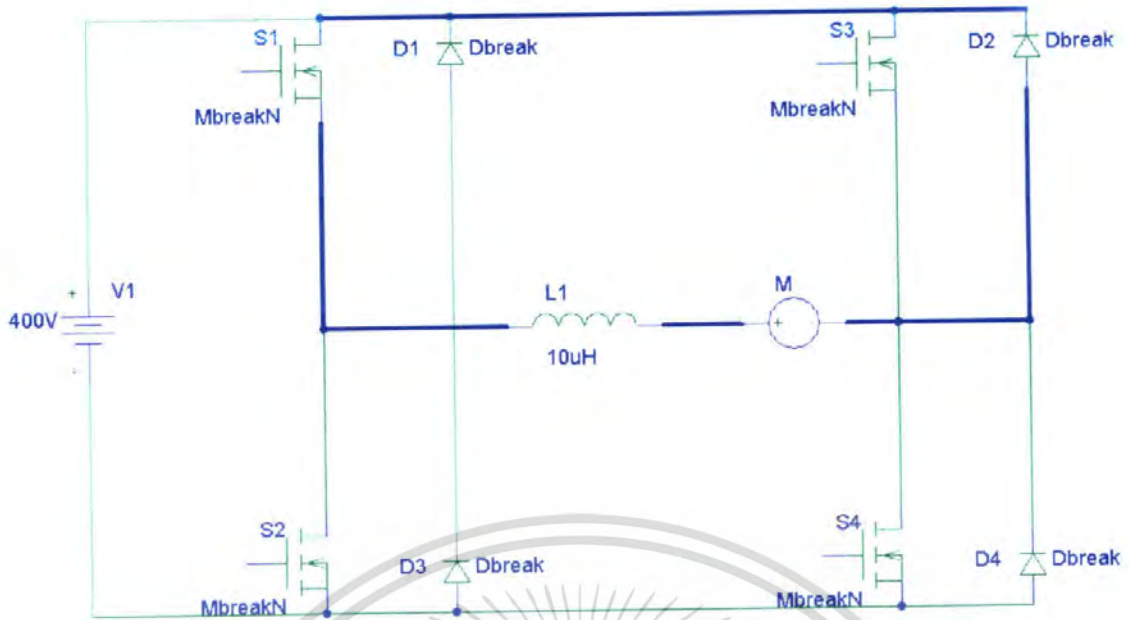


รูปที่ 2.22(ก) สวิตช์ S2 และสวิตช์ S3 เริ่มนำกระแส

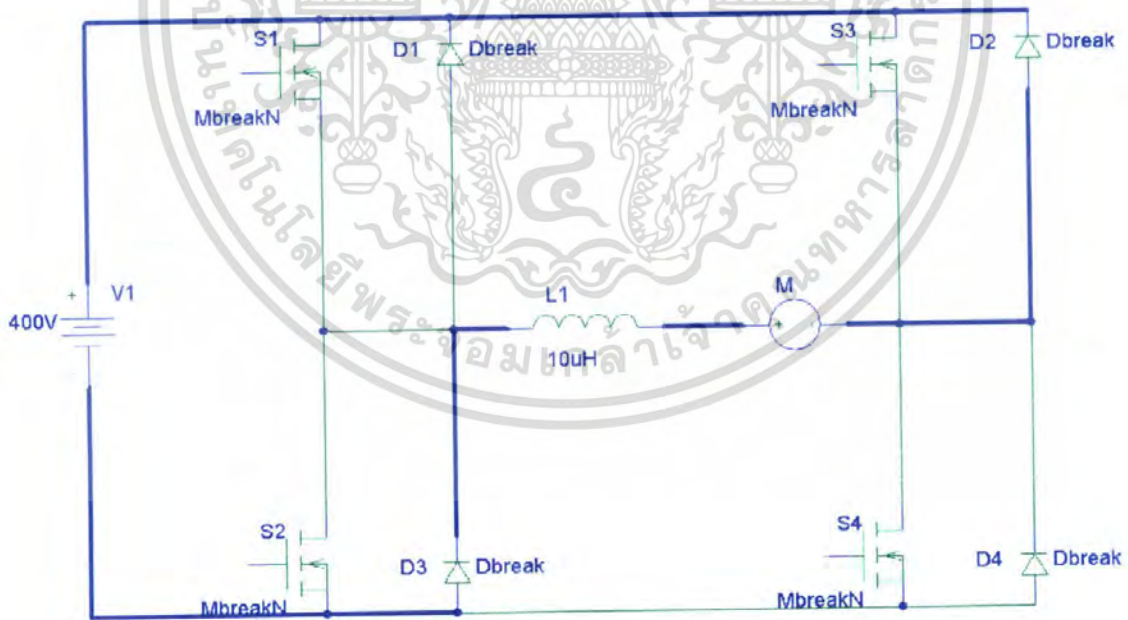


รูปที่ 2.22(ข) สวิตช์ S2 เริ่มหยุดนำกระแส สวิตช์ S3 ยังคงนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

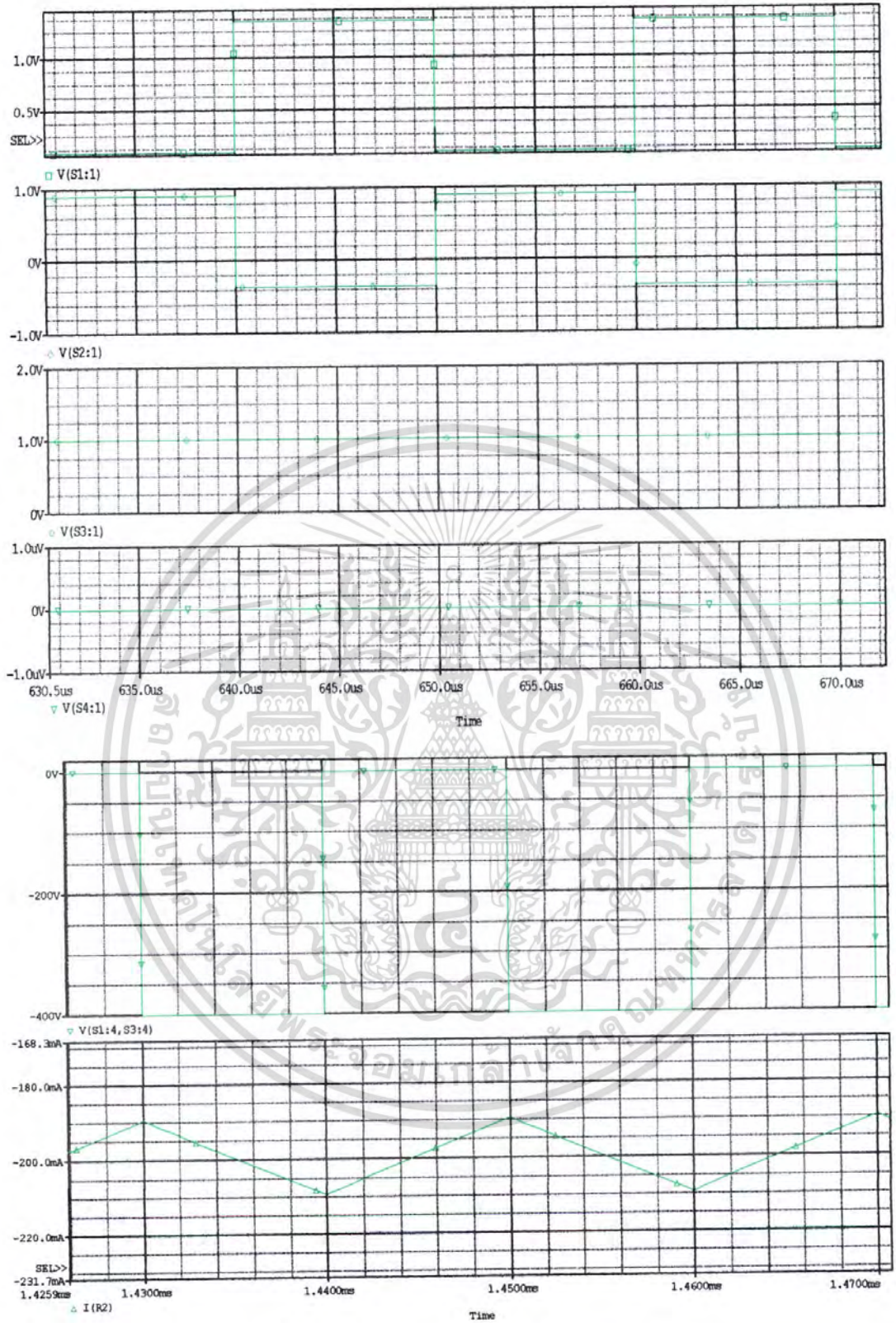


รูปที่ 2.22(ค) สวิตช์ S1 เริ่มนำกระแส สวิตช์ S2 ถูกลัดวงจรโดยไดโอด D2



รูปที่ 2.22(ง) สวิตช์ S1 เริ่มหยุดนำกระแส สวิตช์ S2 ถูกลัดวงจรโดยไดโอด D2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

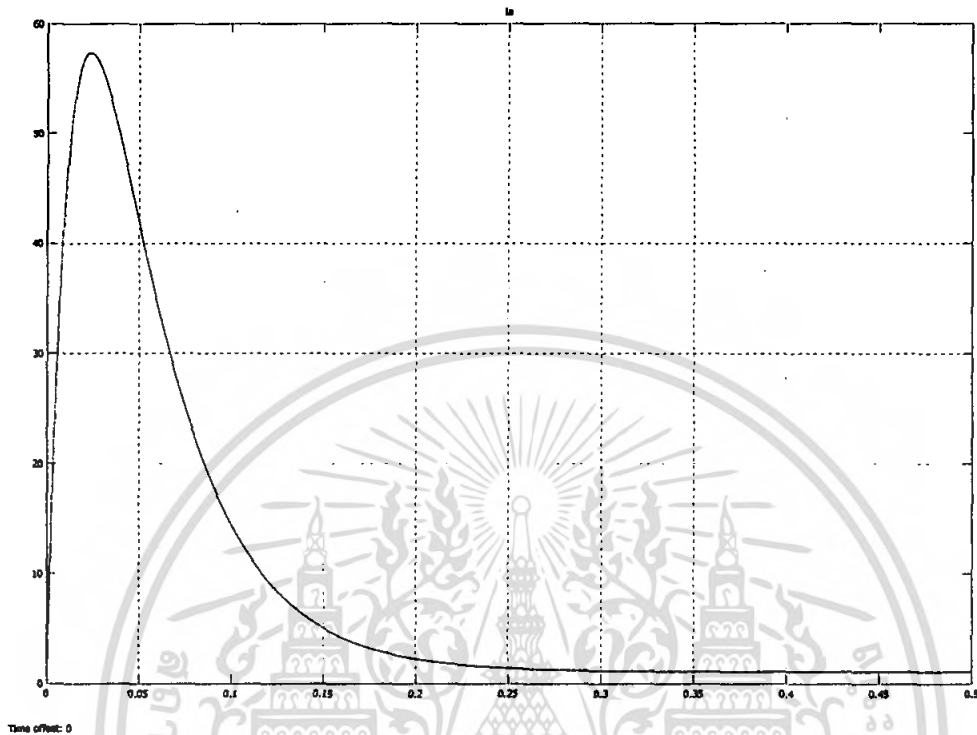


รูปที่ 2.23 แสดงการสวิตช์แรงดัน และกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

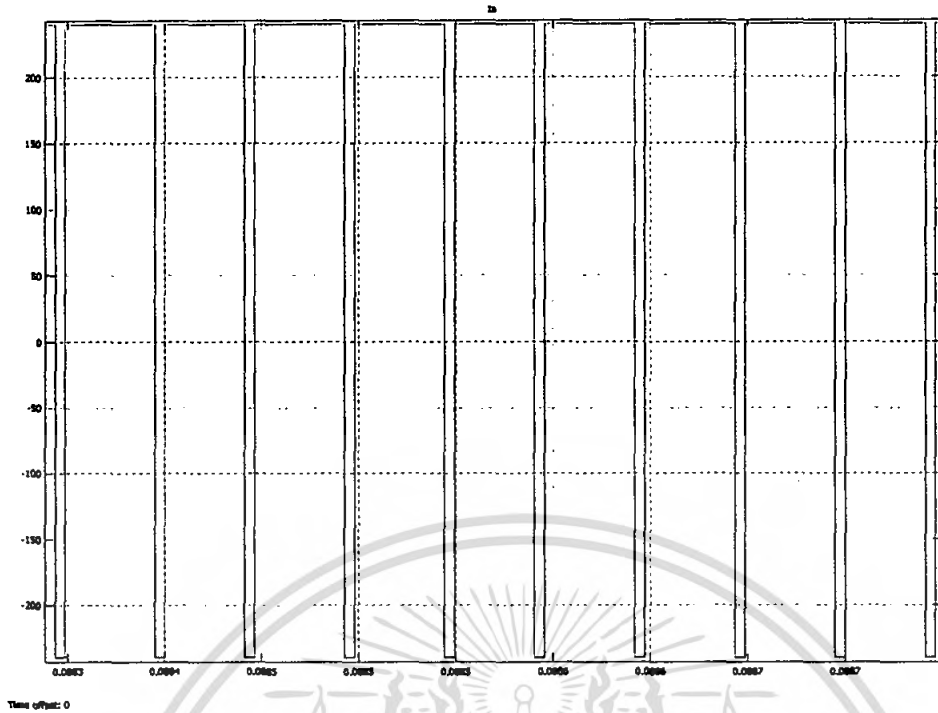
2.14 การจำลองการทำงานของวงจร Full - Bridge Converter ด้วย Simulink

วงจร Bipolar ควบคุมแบบ Open Loop (Motor 5 hp 240 V 1750 rpm Field 200 V)

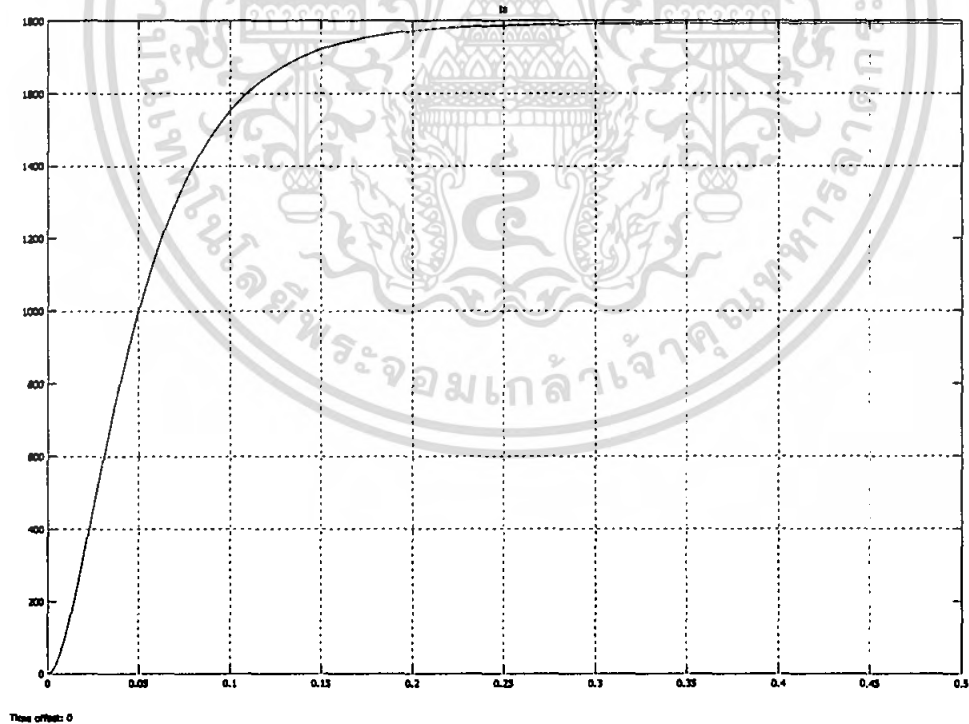


รูปที่ 2.24 กระแสที่อาร์มาเจอร์ Bipolar Open Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

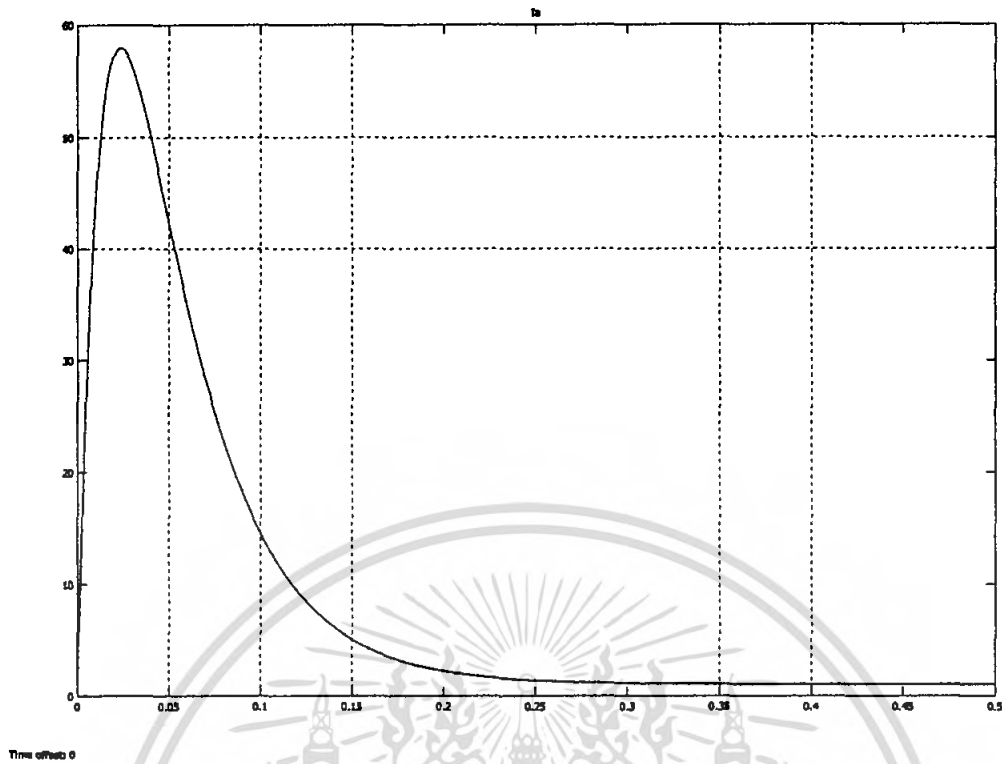


รูปที่ 2.25 แรงดันที่อาร์มาเจอร์ Bipolar Open Loop



รูปที่ 2.26 ความเร็วของมอเตอร์ Bipolar Open Loop

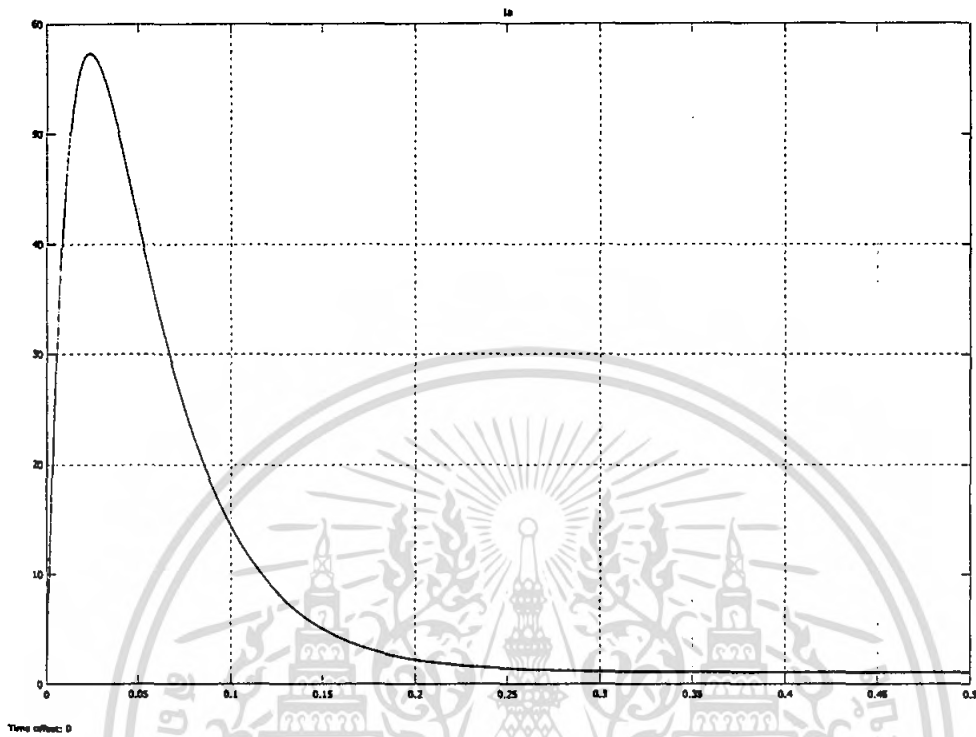
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แรงบิดของมอเตอร์ Bipolar Open Loop

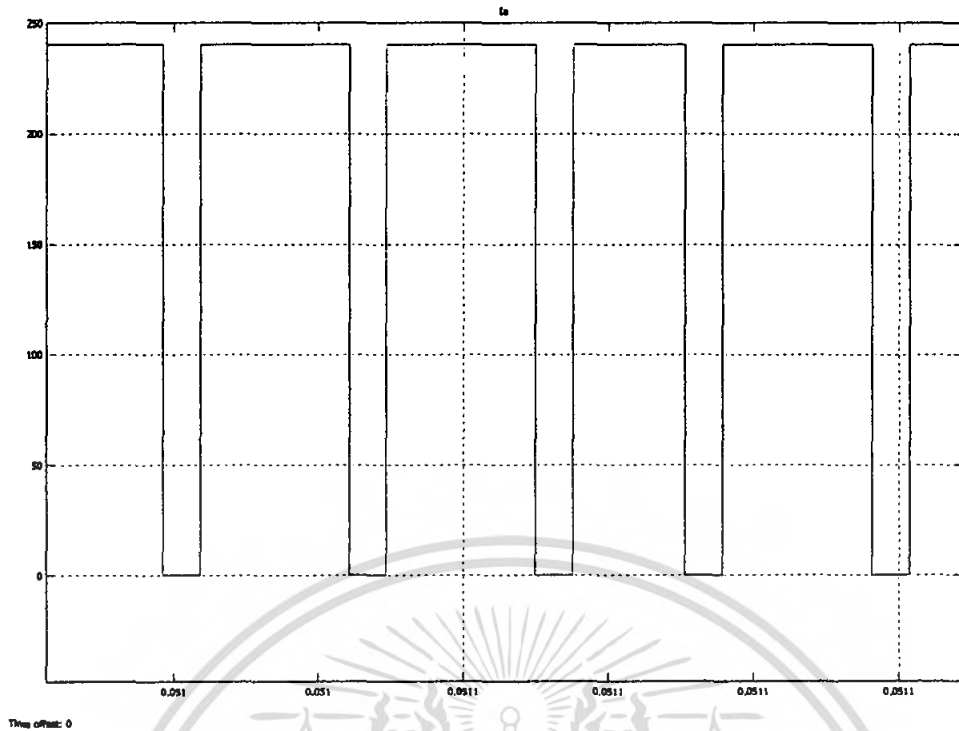
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร Unipolar ควบคุมแบบ Open Loop (Motor 5 hp 240 V 1750 rpm Field 200 V)

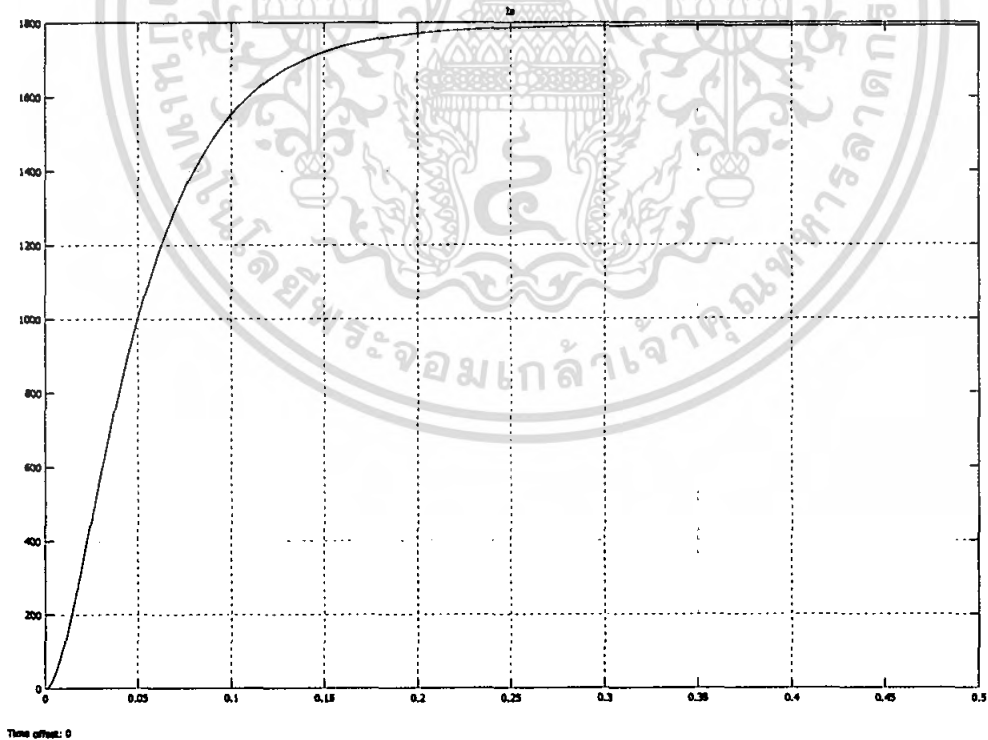


รูปที่ 2.28 กระแสที่อาร์มาเจอร์ Unipolar Open Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

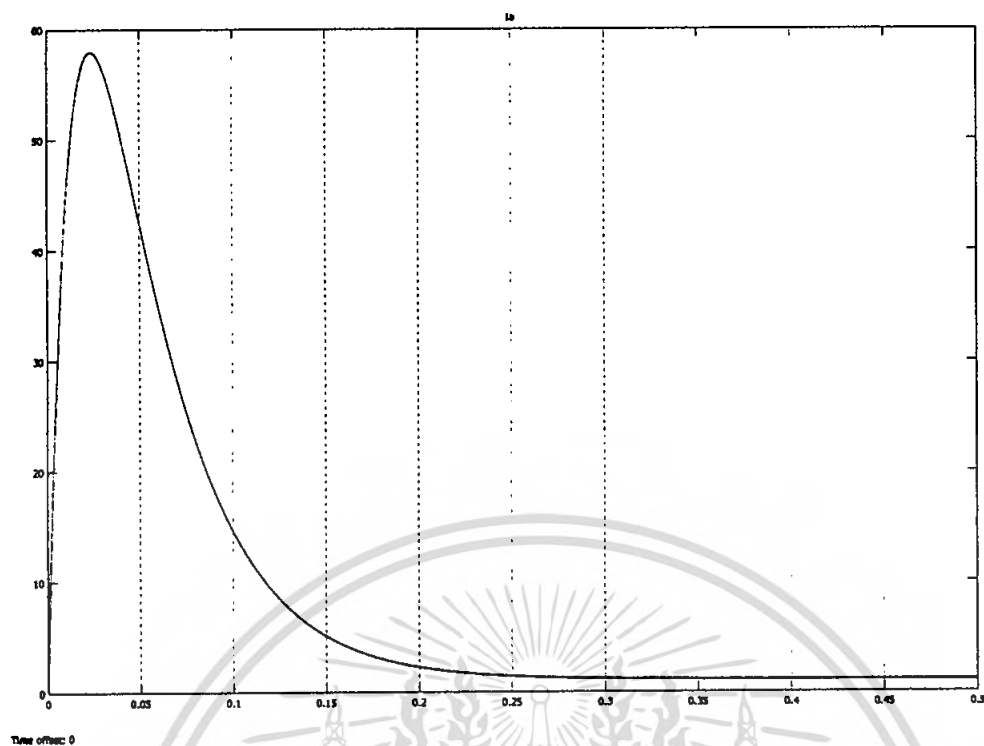


รูปที่ 2.29 แรงดันที่อาร์มาเจอร์ Unipolar Open Loop



รูปที่ 2.30 ความเร็วของมอเตอร์ Unipolar Open Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



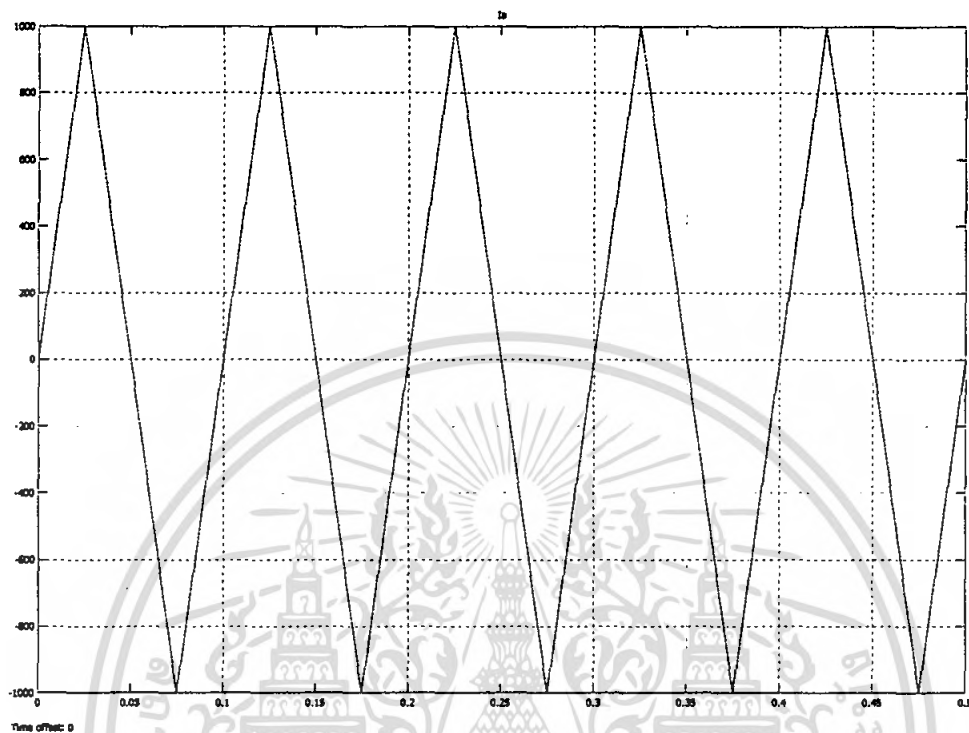
รูปที่ 2.31 แรงบิดของมอเตอร์ Unipolar Open Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 การทดสอบโดยใช้มอเตอร์ขนาด 5Hp 240 V 1750 rpm Field 200V

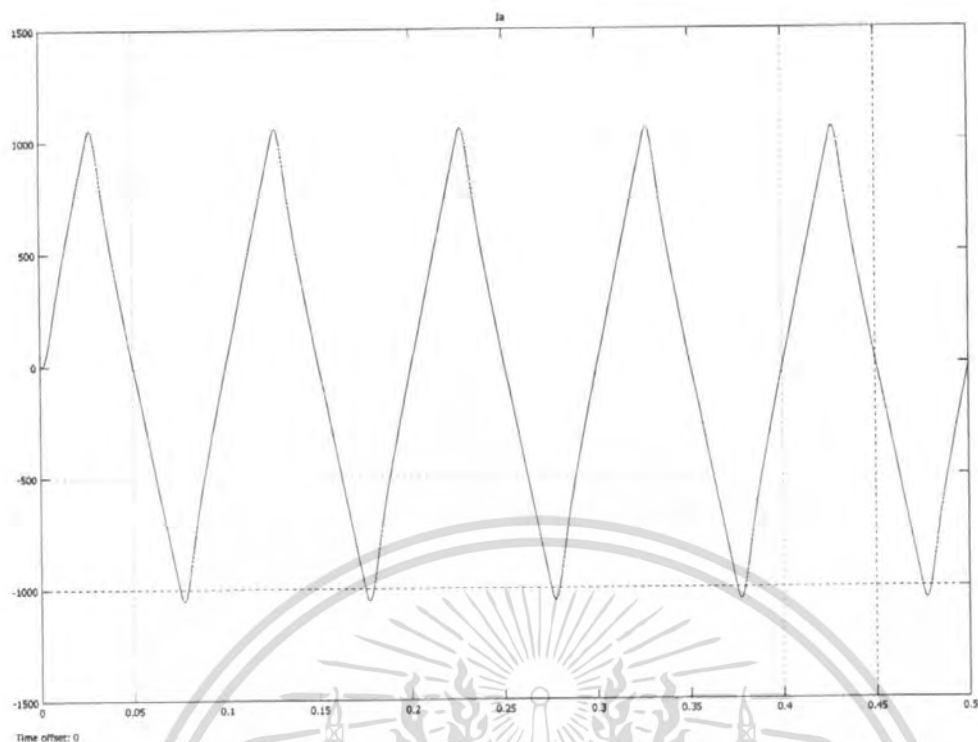
ผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ Close Loop 1000 รอบถึง -1000 รอบ

การสวิตช์แบบ Unipolar

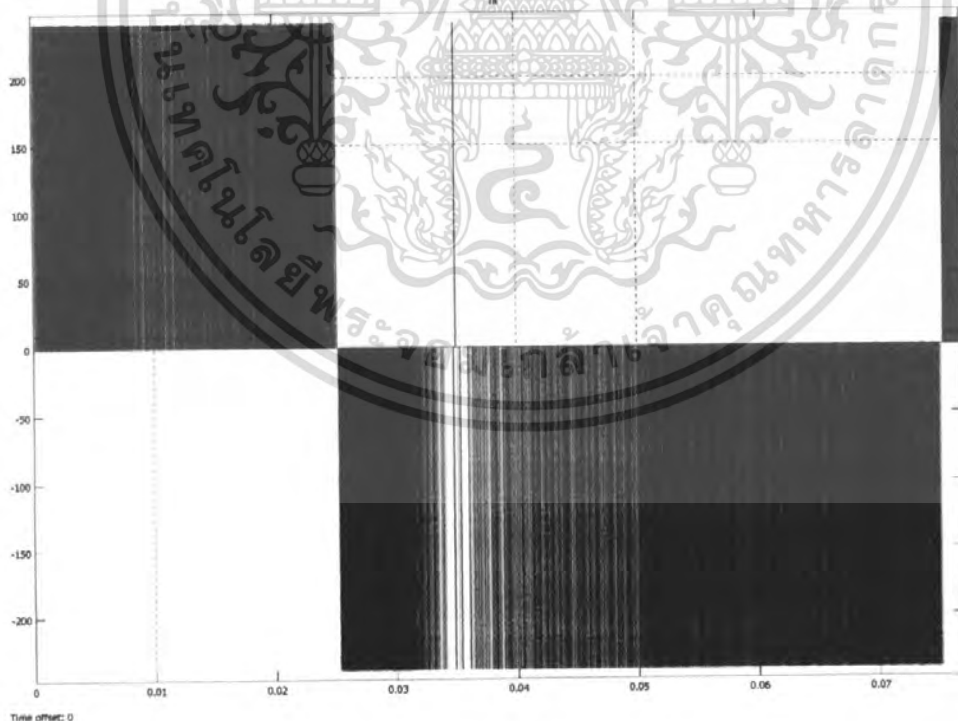


รูปที่ 2.32 กราฟความเร็วรอบที่ป้อนเข้า Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

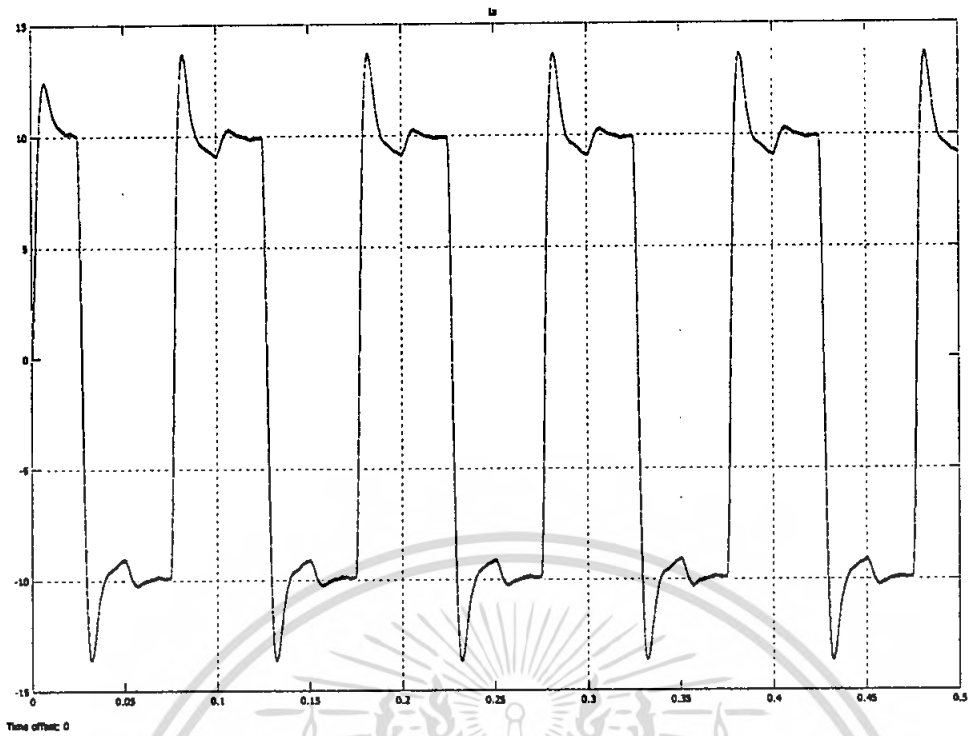


รูปที่ 2.33 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Unipolar Close Loop

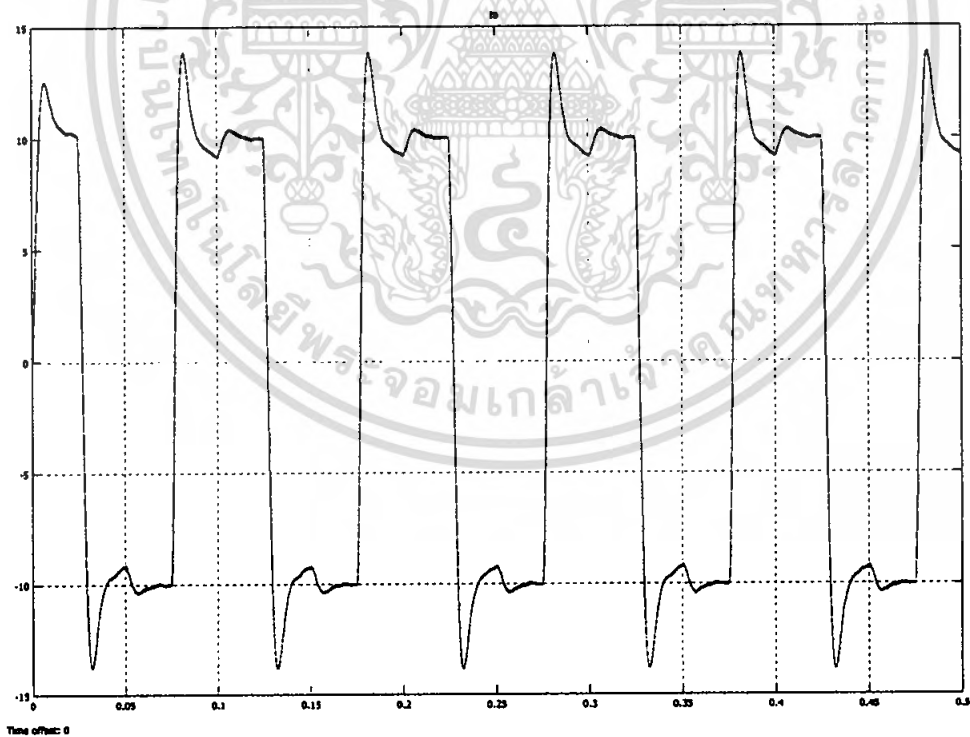


รูปที่ 2.34 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



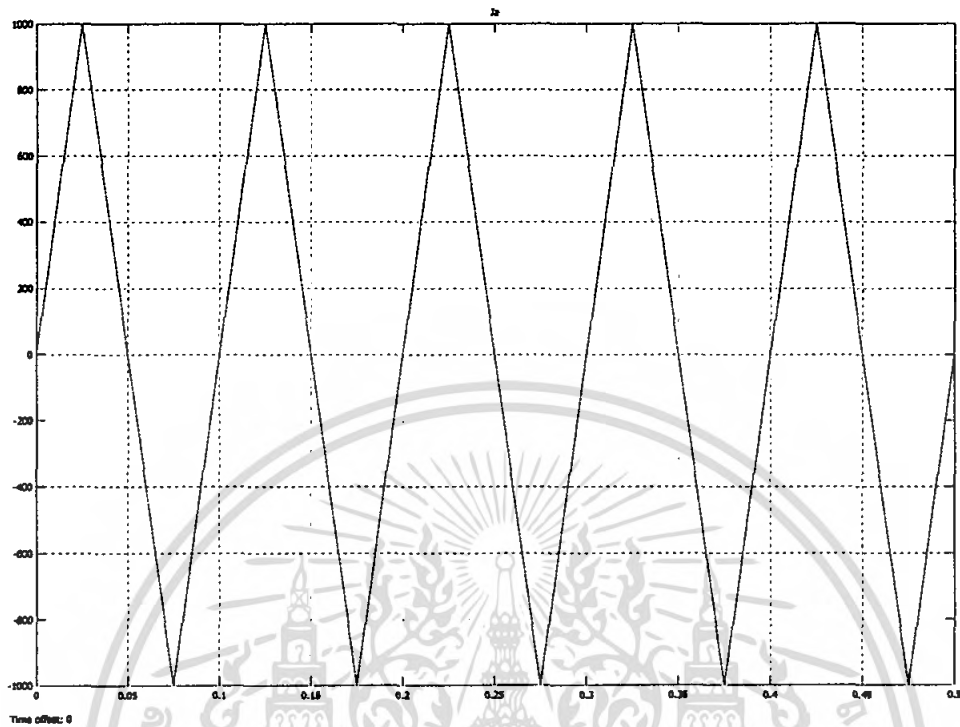
รูปที่ 2.35 กราฟกระแสไฟฟ้า Unipolar Close Loop



รูปที่ 2.36 กราฟแรงบิด Unipolar Close Loop

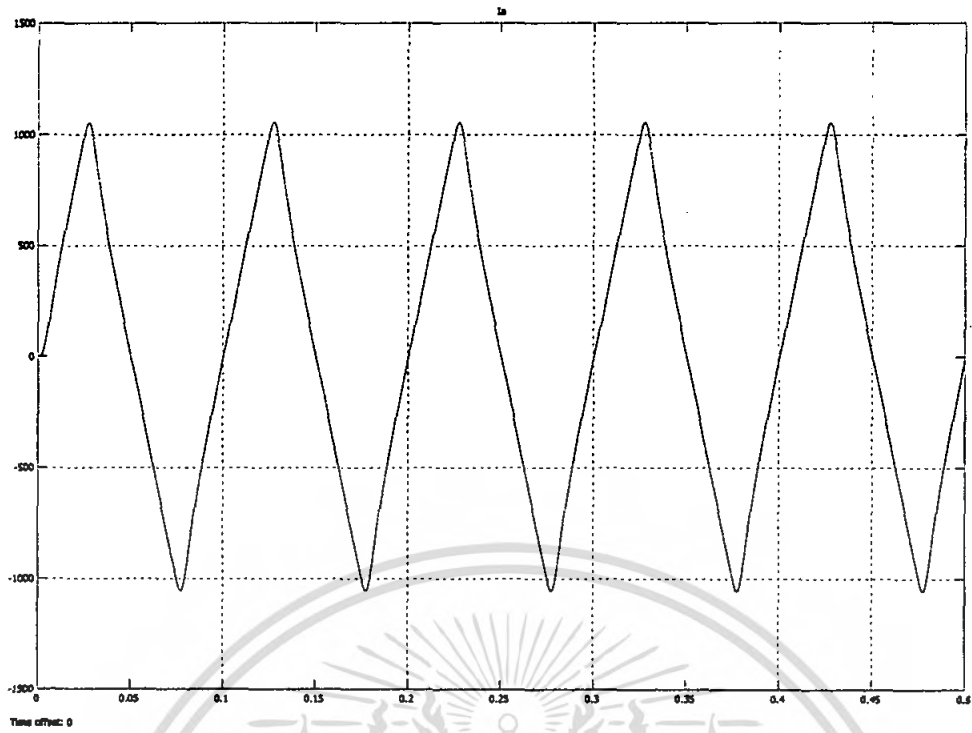
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ Close Loop 1000 รอบถึง -1000 รอบ
การสวิตช์แบบ Bipolar

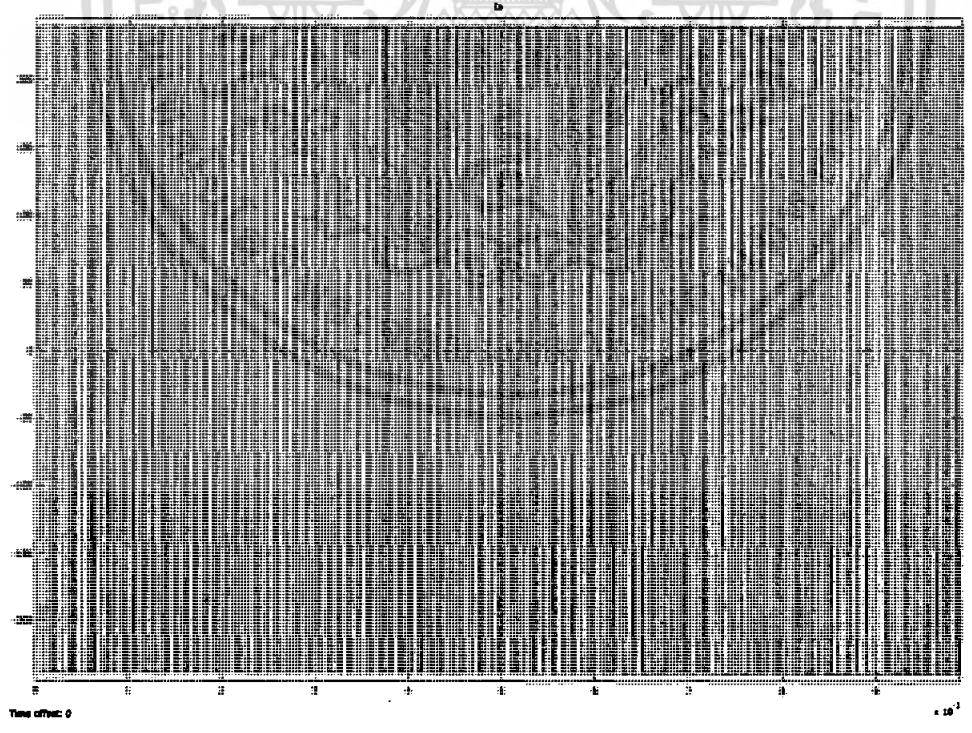


รูปที่ 2.37 กราฟความเร็วรอบที่ป้อนเข้า Bipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

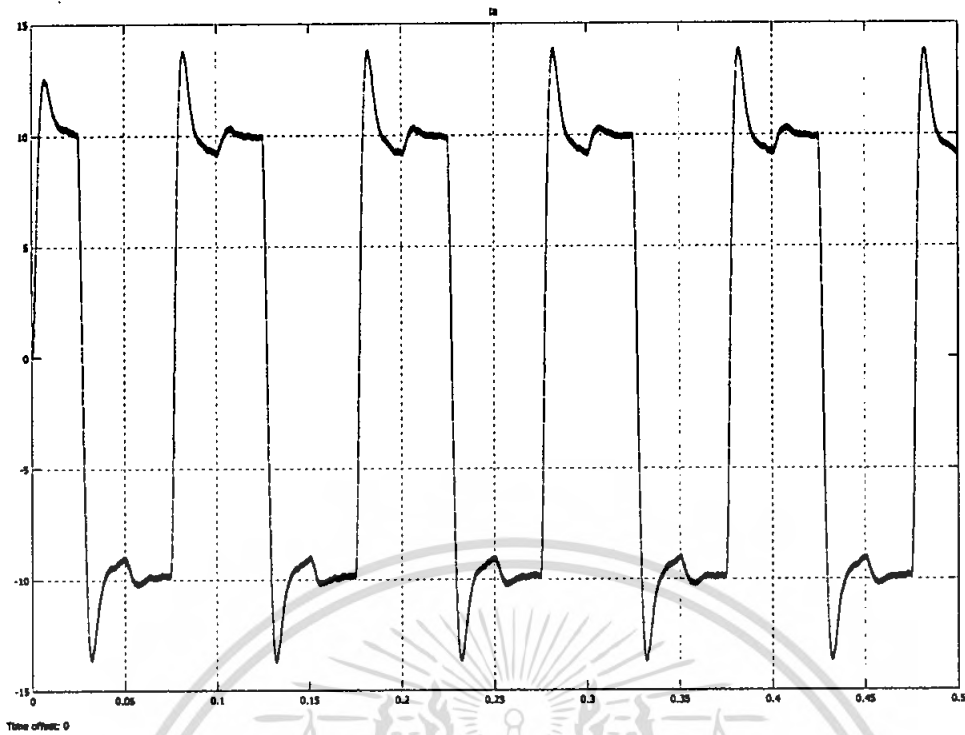


รูปที่ 2.38 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Bipolar Close Loop

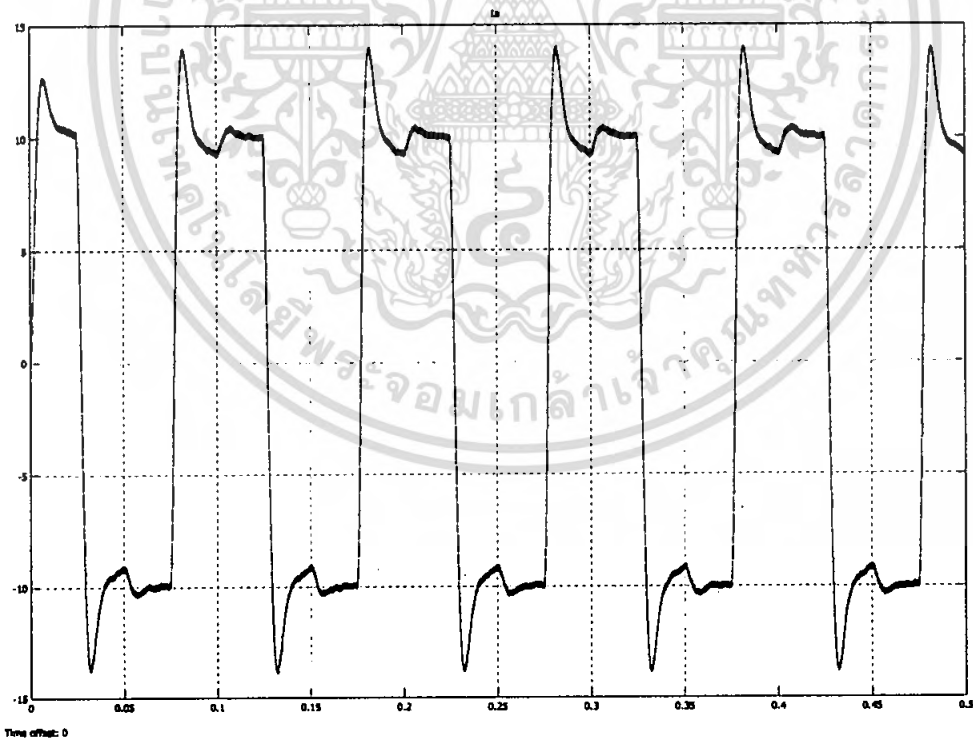


รูปที่ 2.39 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Bipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 กราฟกระแสไฟฟ้า Bipolar Close Loop

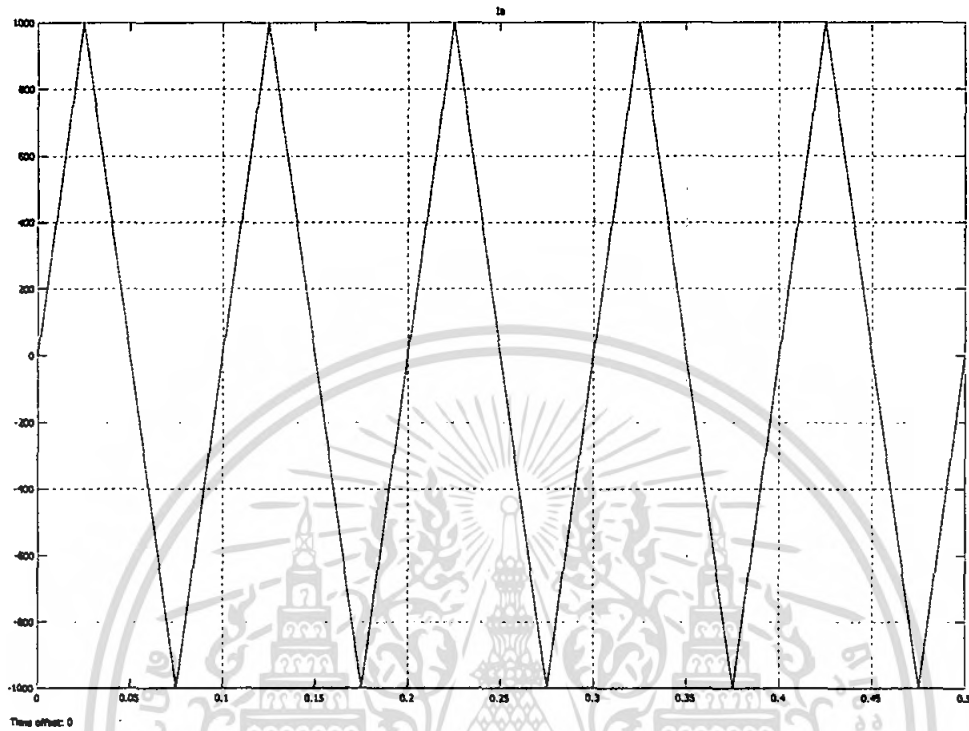


รูปที่ 2.41 กราฟแรงบิด Bipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

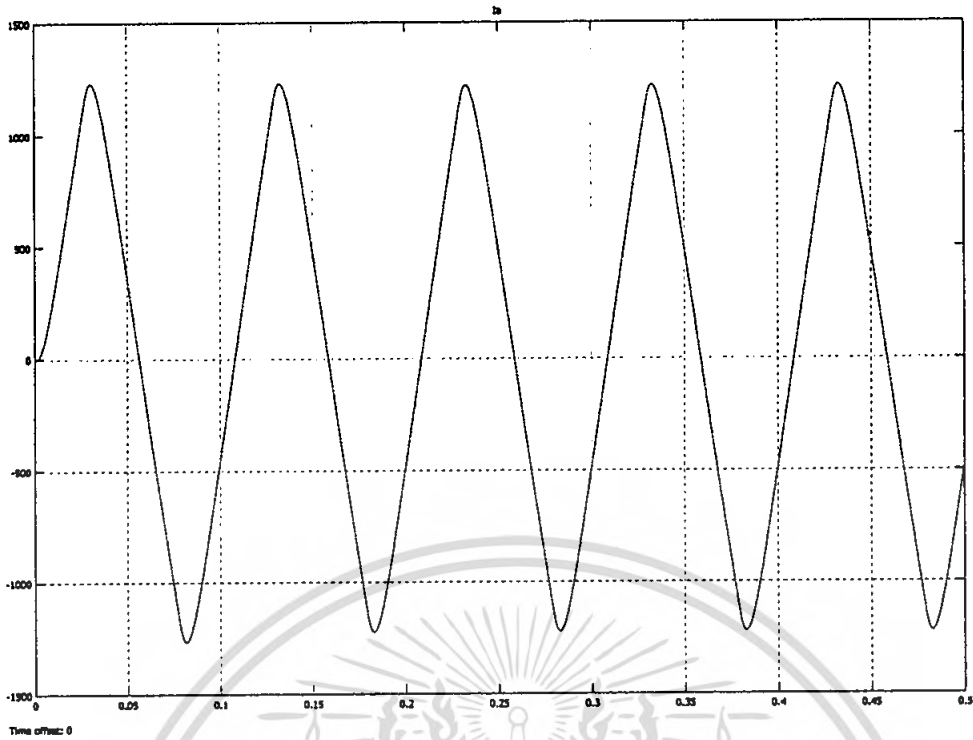
2.16 การทดสอบโดยใช้มอเตอร์ขนาด 11W 110 V 2000 rpm

ผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ Close Loop 1000 รอบถึง -1000 รอบ
การสวิตช์แบบ Unipolar

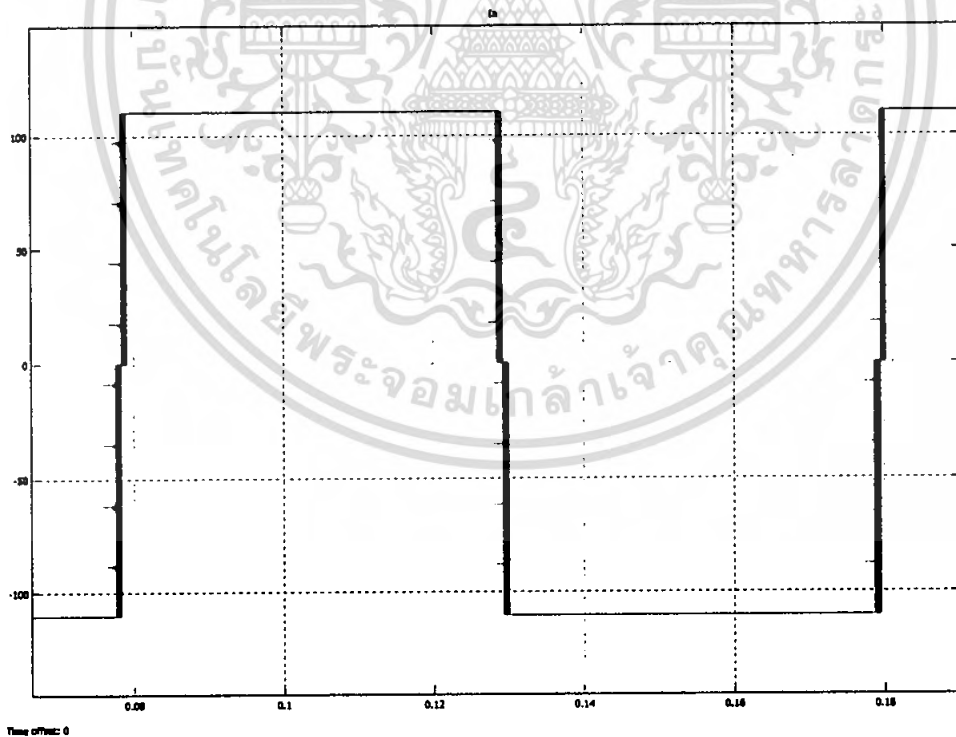


รูปที่ 2.42 กราฟความเร็วรอบที่มือนเข้า Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

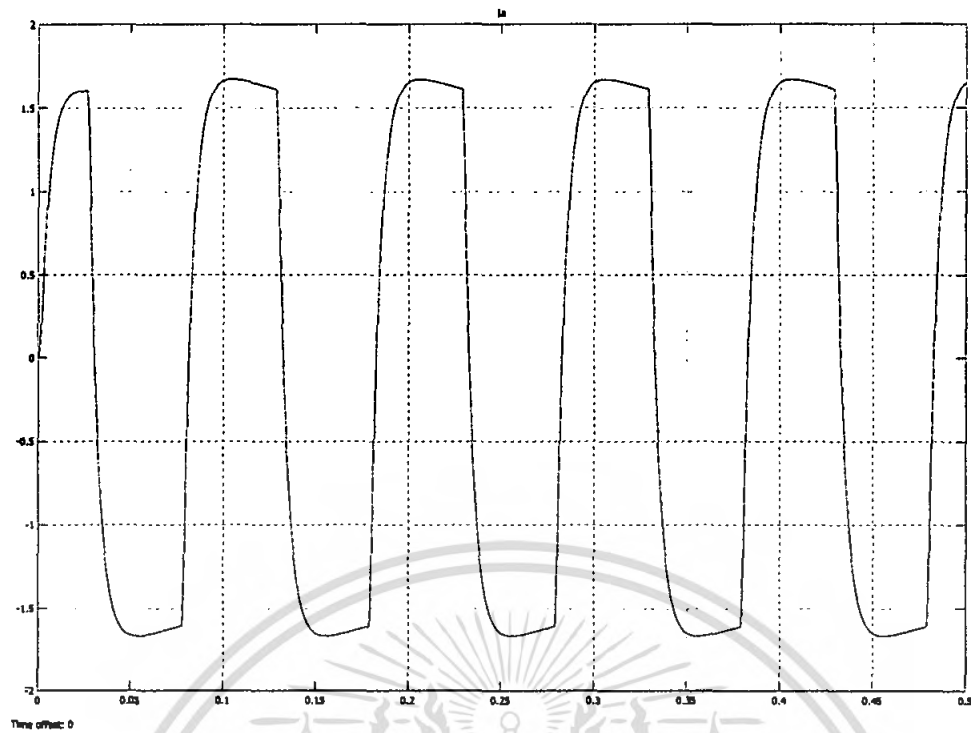


รูปที่ 2.43 กราฟความเร็วรอบที่ได้จริง Unipolar Close Loop

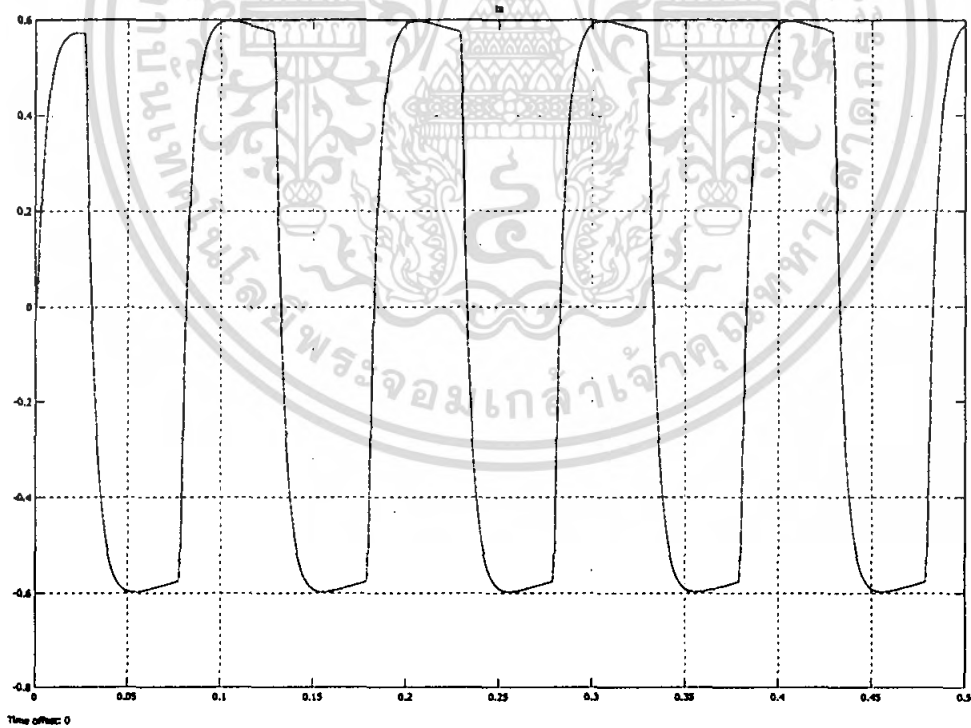


รูปที่ 2.44 กราฟแรงดันตกคร่อมขดอาร์มาเจอร์ Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



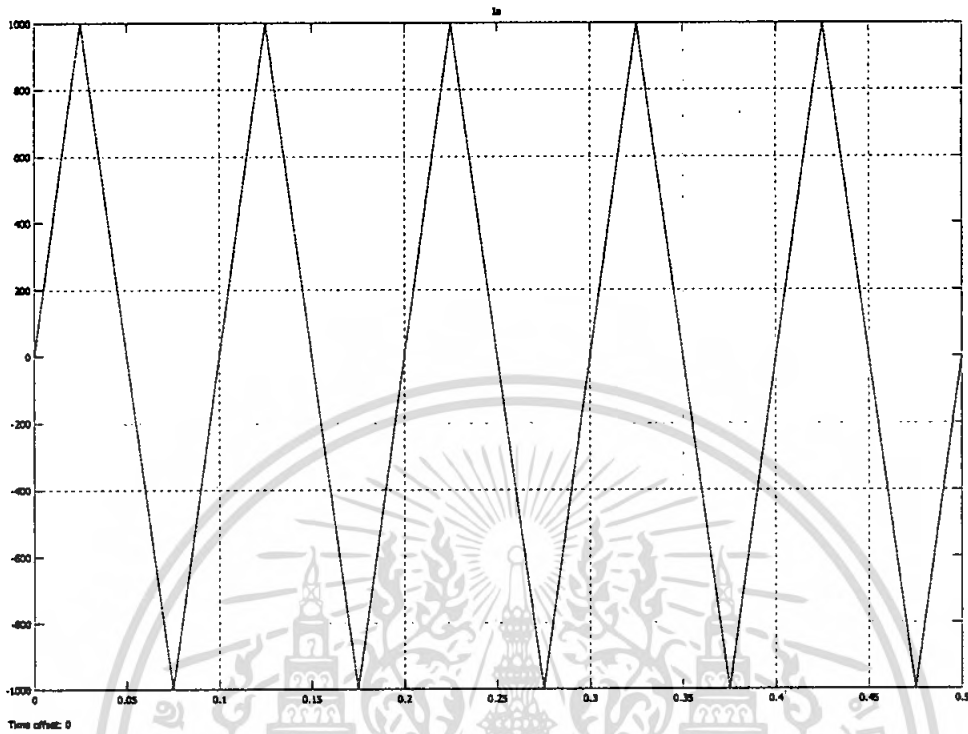
รูปที่ 2.45 กราฟกระแสไฟฟ้า Unipolar Close Loop



รูปที่ 2.46 กราฟแรงบิด Unipolar Close Loop

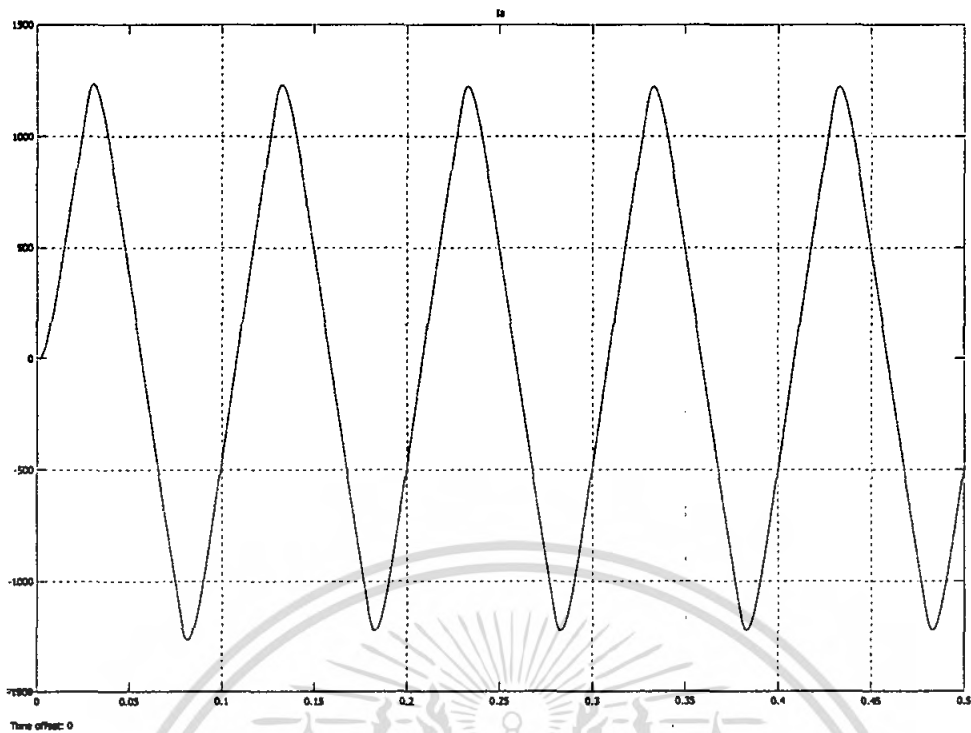
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ Close Loop 1000 รอบถึง -1000 รอบ
การสวิตช์แบบ Bipolar

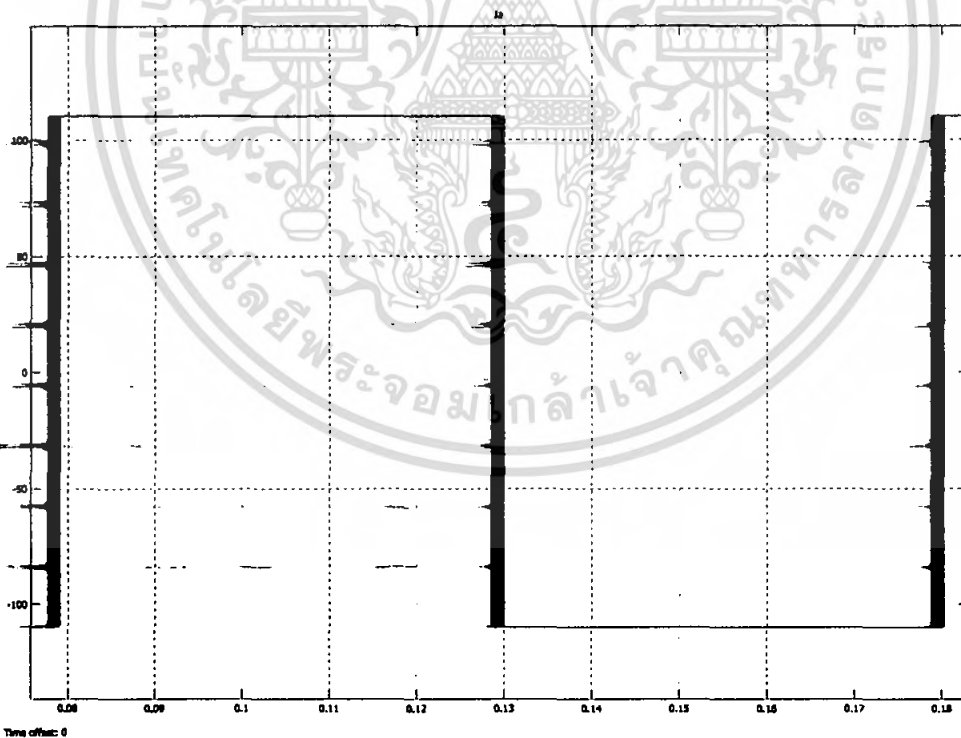


รูปที่ 2.47 กราฟความเร็วรอบที่บิโพลาร์ Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

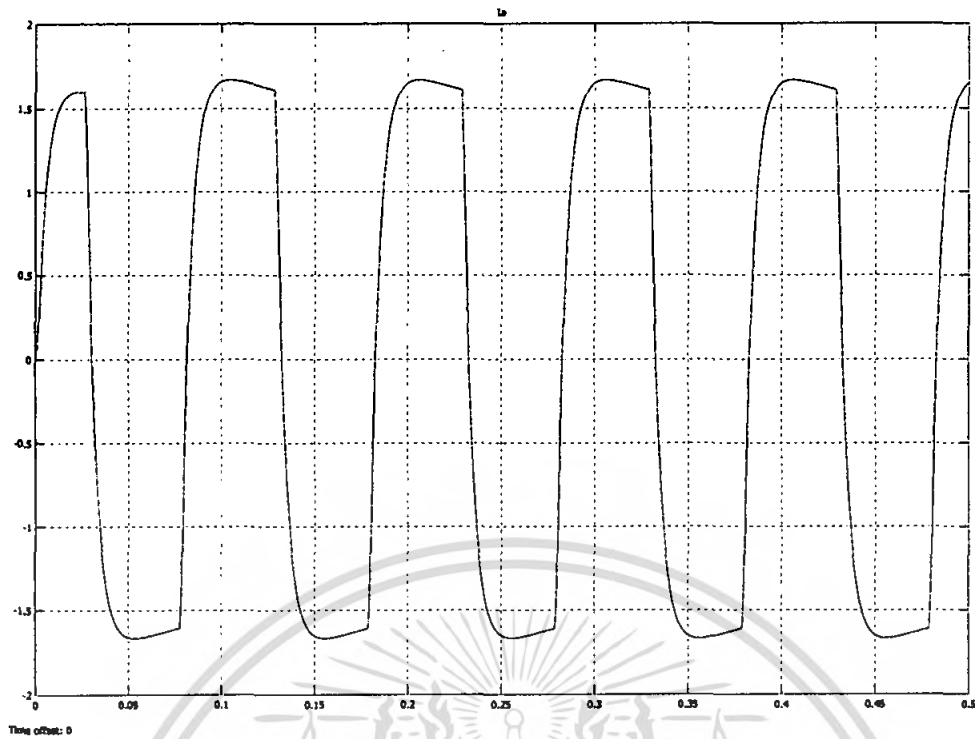


รูปที่ 2.48 กราฟความเร็วยกที่ได้จริง Unipolar Close Loop

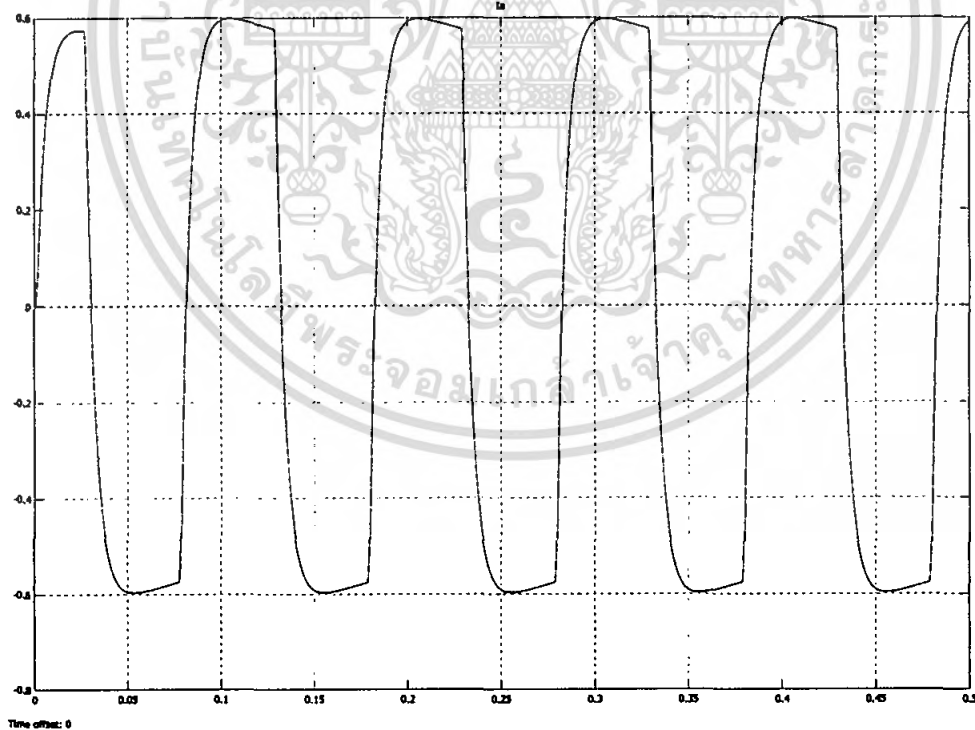


รูปที่ 2.49 กราฟแรงดันตกคร่อมขดขั้วมาเจอร์ Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.50 กราฟกระแสไฟฟ้า Unipolar Close Loop



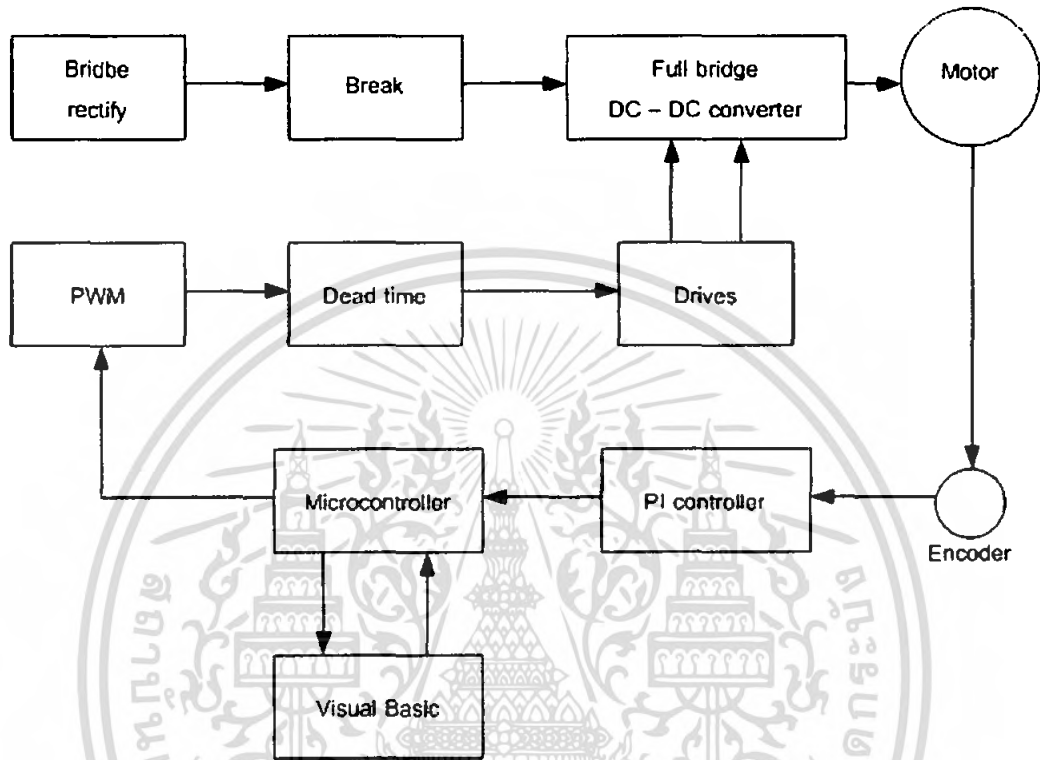
รูปที่ 2.51 กราฟแรงบิด Unipolar Close Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ และสร้างวงจร

3.1 โครงสร้าง และส่วนประกอบของโครงการ

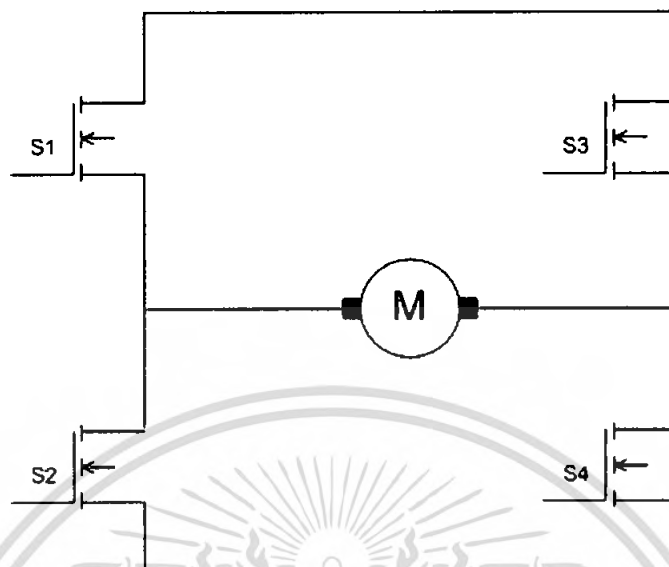


รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงาน และการควบคุมของโครงการ

โครงการนี้สามารถแบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนของวงจรกำลัง
2. ส่วนของวงจรควบคุม

3.2 วงจรกำลัง



รูปที่ 3.2 วงจรกำลัง

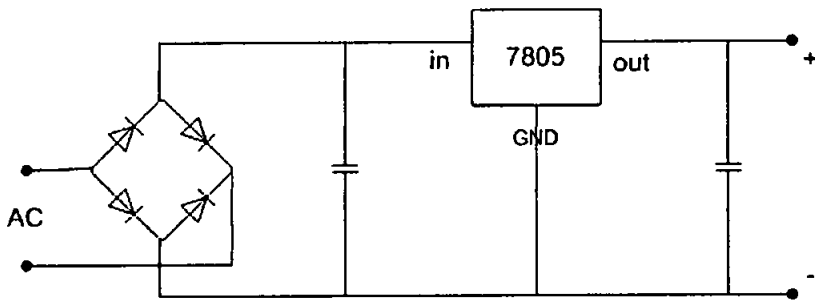
วงจรกำลังจะรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V 50 Hz และถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่วงจร Full Bridge Rectify จากนั้นผ่านการกรองแรงดันโดย C-Filer แล้วจ่ายให้กับวงจร Full Bridge DC-DC converter เพื่อควบคุมแรงดันให้กับมอเตอร์

3.3 วงจรควบคุม

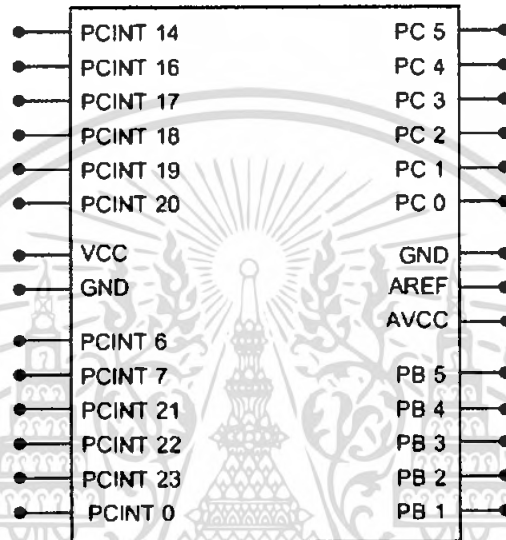
วงจรถูกกำเนิดสัญญาณ Pulse - Width - Modulation (PWM) หลักการสร้างสัญญาณแบบ PWM สร้างมาจากการเปรียบเทียบแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม V_{tri} กับสัญญาณควบคุม $V_{control}$ รูปคลื่นสามเหลี่ยมที่ใช้ใน converter แบบ PWM มีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบ ดังนี้

1. PWM แบบ Bipolar voltage switching
2. PWM แบบ Unipolar voltage switching

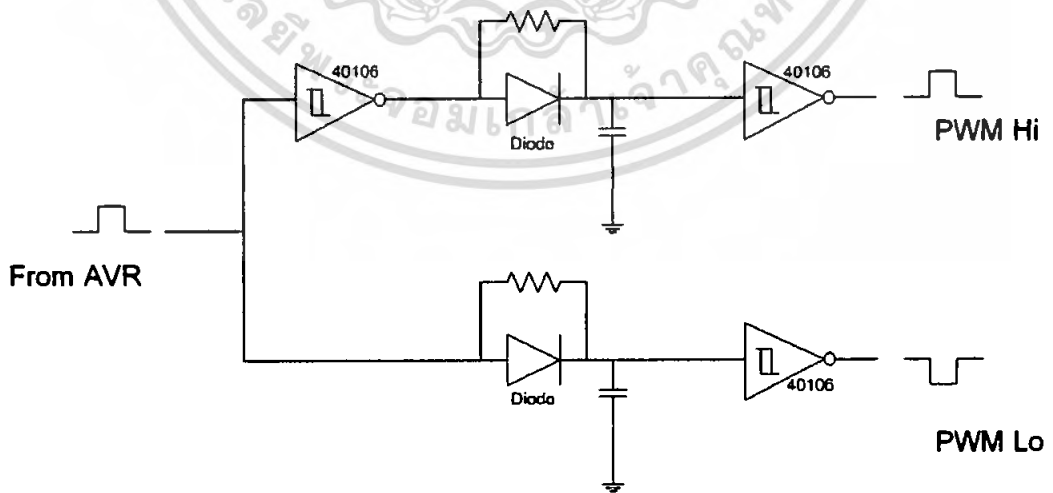
โดยที่โครงการนี้จะใช้ Microcontroller ATmega16 ของบริษัท Atmel เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ PWM ทั้งสองแบบ



รูปที่ 3.3 (ก) วงจรแหล่งจ่ายไฟ 5V

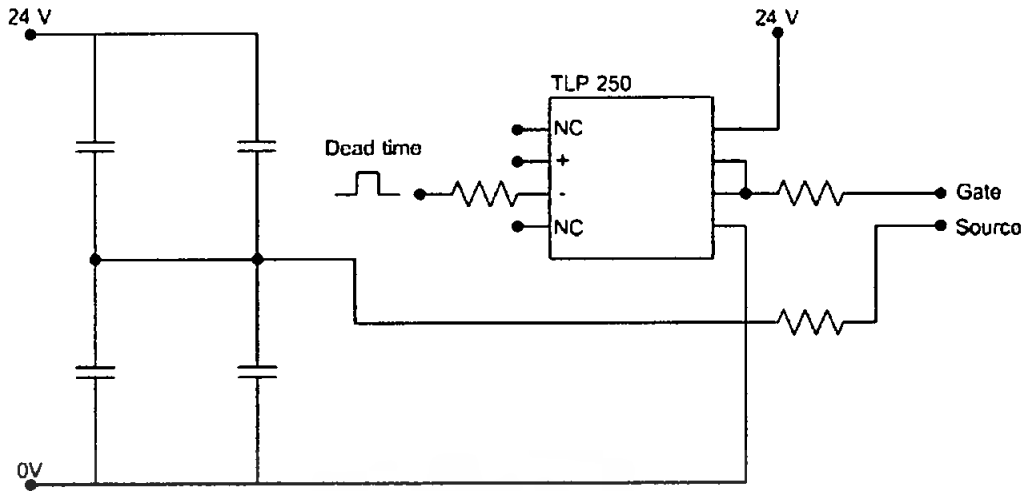


รูปที่ 3.3 (ข) วงจรคอนโทรล



รูปที่ 3.3 (ค) วงจร Dead Time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 (ง) วงจรขับ IGBT ด้วย TLP250



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

จากที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบสร้างวงจรครบทุกส่วนแล้ว ก็จะทำการทดลองเพื่อเก็บผลการทดลอง แล้วนำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะทำการทดลองในหัวข้อต่อไปนี้

- การทดลองหาค่า R_s โดยวิธี V-I Method
- การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์ กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขณะไร้ภาระ
- การทดลองการทำงาน และวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรทั้งระบบ
- การทดลองขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปเปิด
- การทดลองขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลูปปิด
- การตอบสนองต่อความเร็ว

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

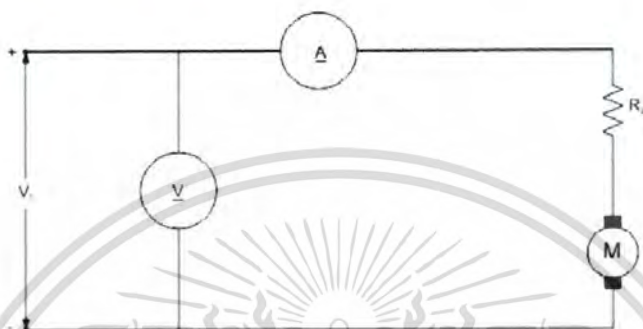
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet DC Motor) ซึ่งมีพิกัดดังนี้
 - พิกัดแรงดันอาร์มาเจอร์ : 80 V
 - พิกัดกระแสอาร์มาเจอร์ : 4 A
 - พิกัดกำลังไฟฟ้า : 300 W
 - พิกัดความเร็วโรเตอร์ : 2500 rpm
2. Digital Storage Oscilloscope YOGOGAWA
3. 1- ϕ Variac 0-260 V 5A
4. Multimeter SANWA
5. Differential Probe
6. Current Probe
7. Encoder
8. Tacho-meter
9. ชุดทดสอบ สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดลองหาค่า R_a โดยวิธี V-I Method

ขั้นตอนการทดลองหาค่า R_a

1. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.1 ซึ่งจะป้อนแรงดันให้เฉพาะในส่วนของขดอาร์มาเจอร์
2. ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขดขจร โดยการเพิ่มแรงดันที่ป้อนเข้าจนถึงค่าที่ตั้งไว้
3. ทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า และกระแสอาร์มาเจอร์

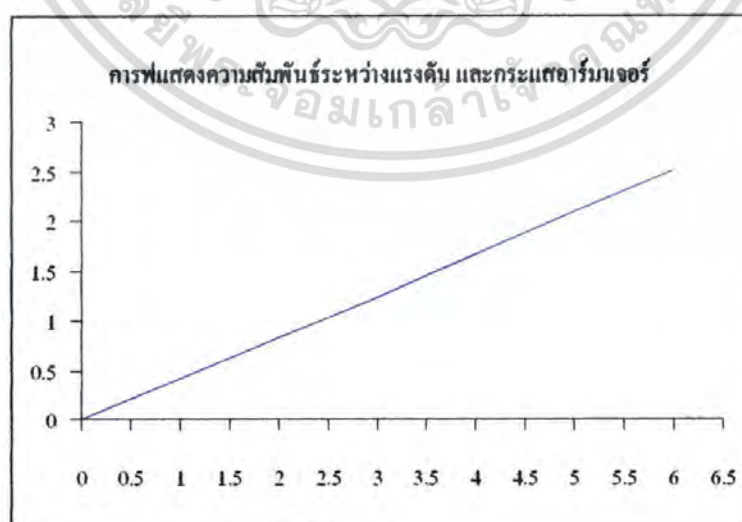


รูปที่ 4.1 การต่อวงจรเพื่อหาค่า R_a

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดัน และกระแสอาร์มาเจอร์

V_t (V)	1	2	3	4	5	6
I_a (A)	0.41	0.83	1.23	1.66	2.09	2.51



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการคำนวณหาค่า R_a จาก

$$R_a = \frac{\Delta V_t}{\Delta I_a} \quad (4.1)$$

$$R_a = 2.38$$

$$R_a = 2.38 \ \Omega$$

4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วโรเตอร์ กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า ขณะไ้ภาระ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการต่อวงจรการทดลองตามรูปที่ 4.1
2. ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามที่กำหนด
3. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า และกระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบต่างที่กำหนด

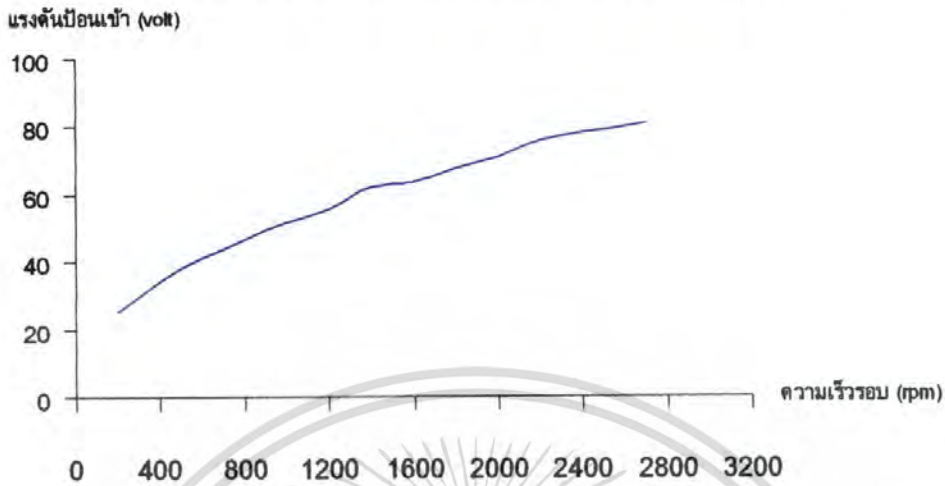
ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ ที่ความเร็วรอบต่างๆ

N_r (rpm)	V_t (V)	I_a (A)
200	25.63	1.04
400	34.34	1.25
600	41.12	1.38
800	46.52	1.50
1000	51.40	1.50
1200	55.31	1.67
1400	61.77	2.04
1600	63.60	1.71
1800	67.57	1.25
2000	70.72	1.17
2200	75.41	1.54
2400	77.56	1.08
2700	80.50	1.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า ที่ความเร็วรอบต่างๆ

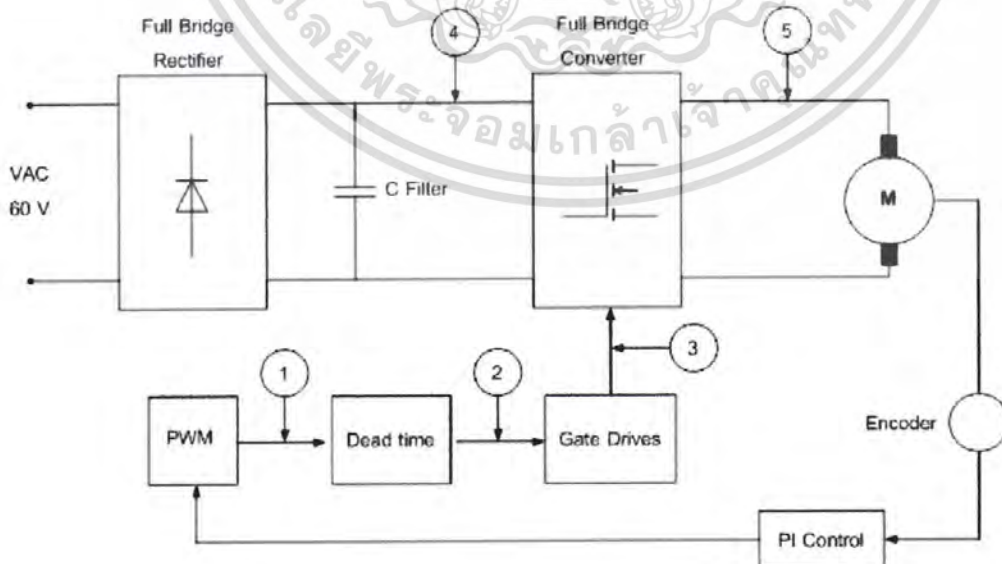


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันป้อนเข้า ที่ความเร็วรอบต่างๆ

4.3 การทดลองการทำงาน และวัดสัญญาณเอาต์พุต ทั้งระบบ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการจัดวงจรการทดลองทั้งระบบตามรูปที่ 4.4
2. ทำการวัดสัญญาณ และบันทึกค่าสัญญาณตามลำดับหมายเลข โดยใช้ Digital Storage Oscilloscope

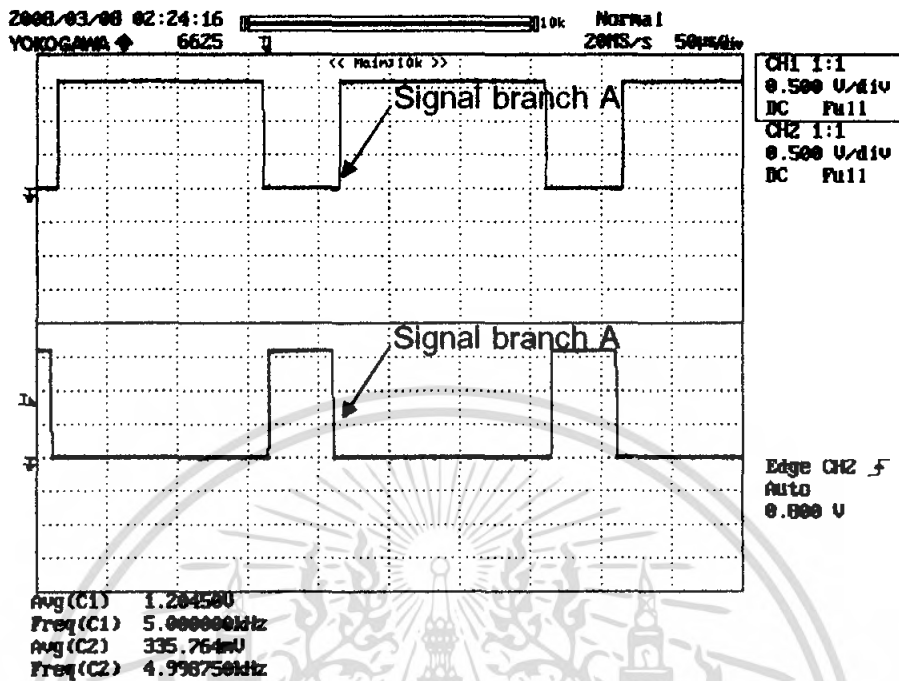


รูปที่ 4.4 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

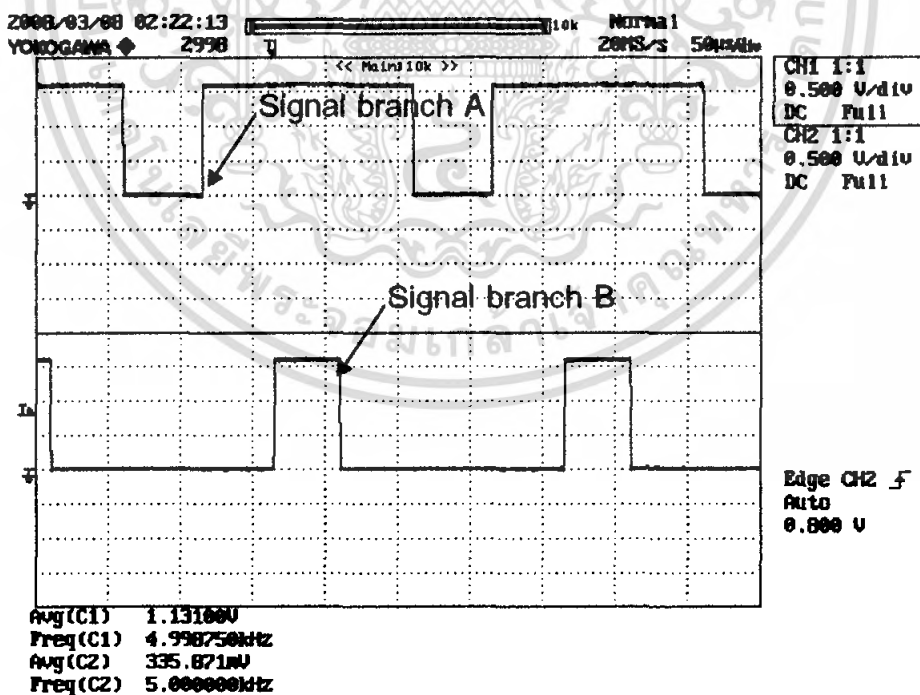
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

4.3.1 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณ PWM



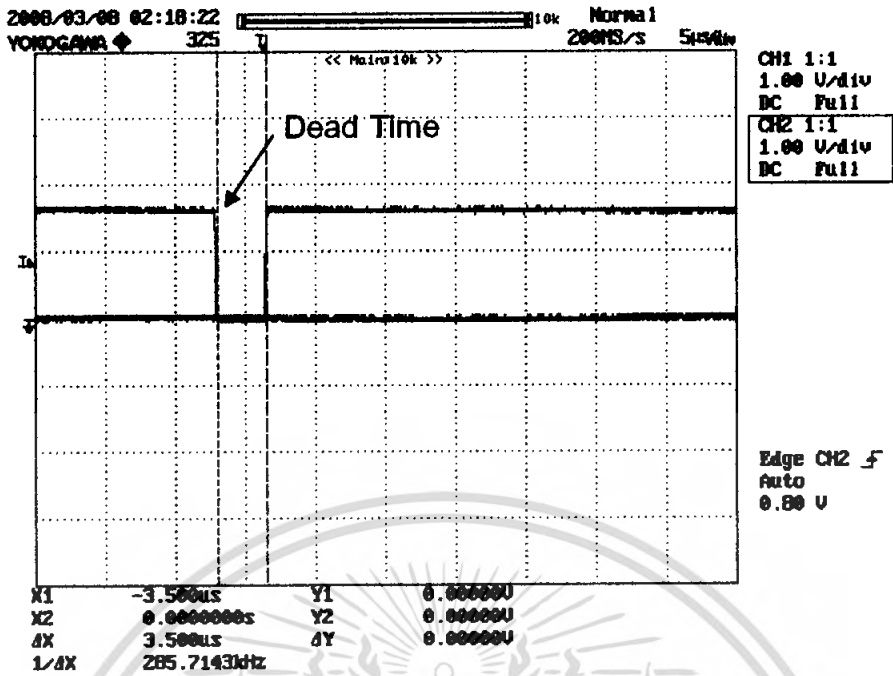
รูปที่ 4.5 สัญญาณ PWM แบบ Bipolar ที่ความถี่ 5 kHz



รูปที่ 4.6 สัญญาณ PWM แบบ Unipolar ชุตที่ 1 และ ชุตที่ 2 ที่ความถี่ 5 kHz

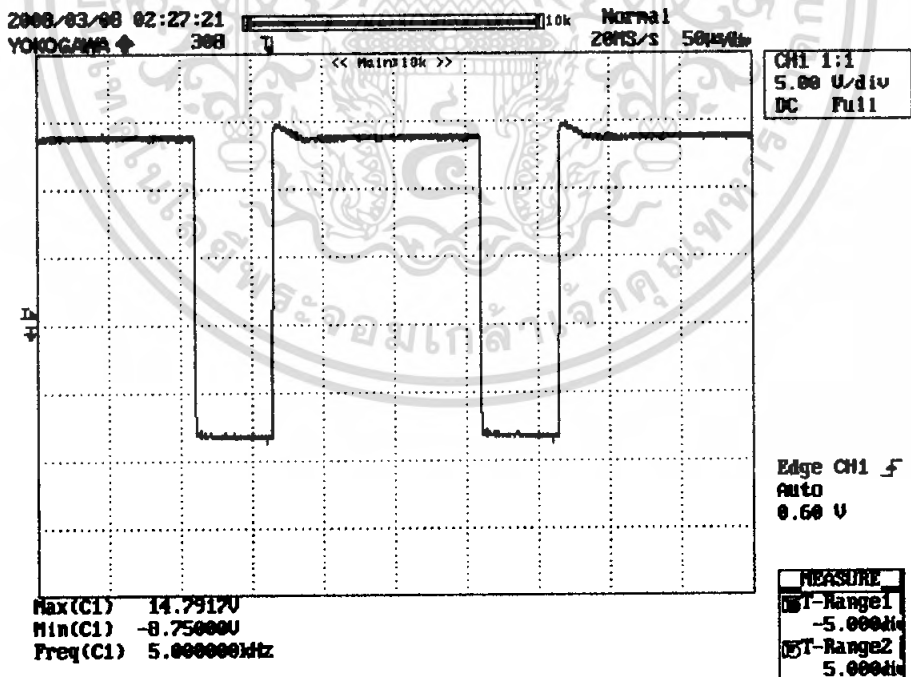
4.3.2 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจร Dead Time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจร Dead time ที่มีช่วงเวลา $3.5 \mu S$

4.3.3 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วนของวงจร Gate Drives



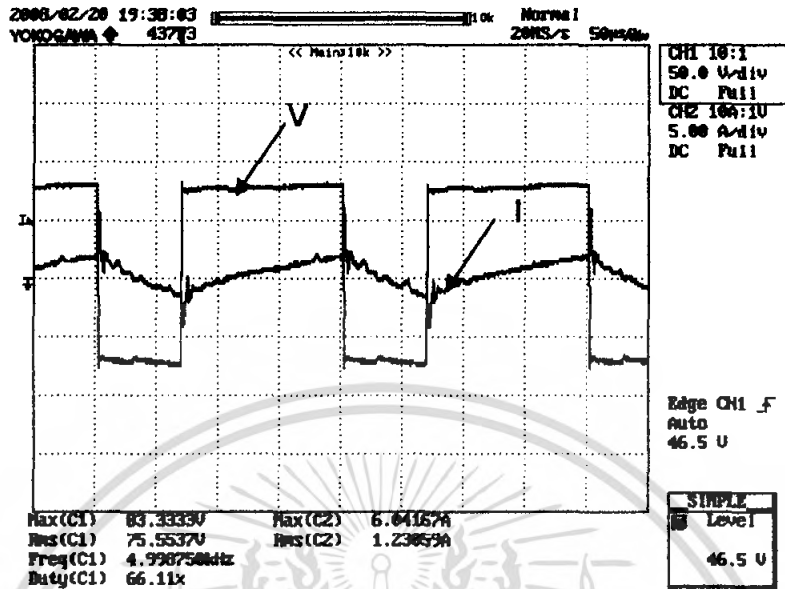
รูปที่ 4.8 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจร Gate Drives

4.3.4 ผลจากการวัดสัญญาณในส่วน Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

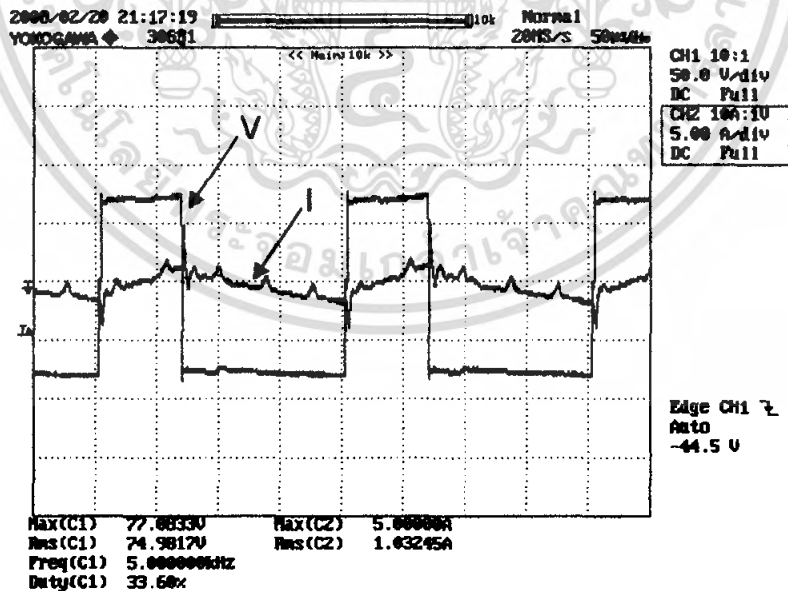
1. PWM แบบ Bipolar

แรงดันตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศทาง Forward



รูปที่ 4.9 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศ Forward

แรงดันตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศทาง Reverse

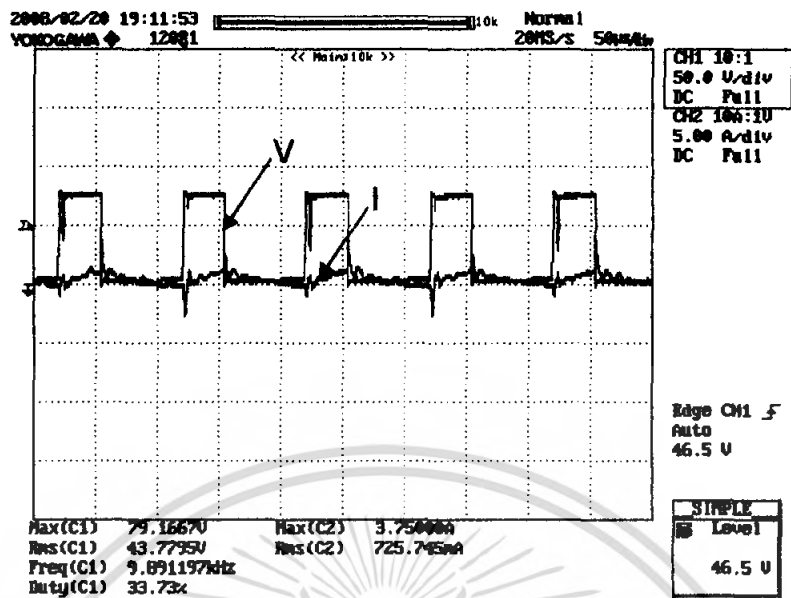


รูปที่ 4.10 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศ Reverse

2. PWM แบบ Unipolar

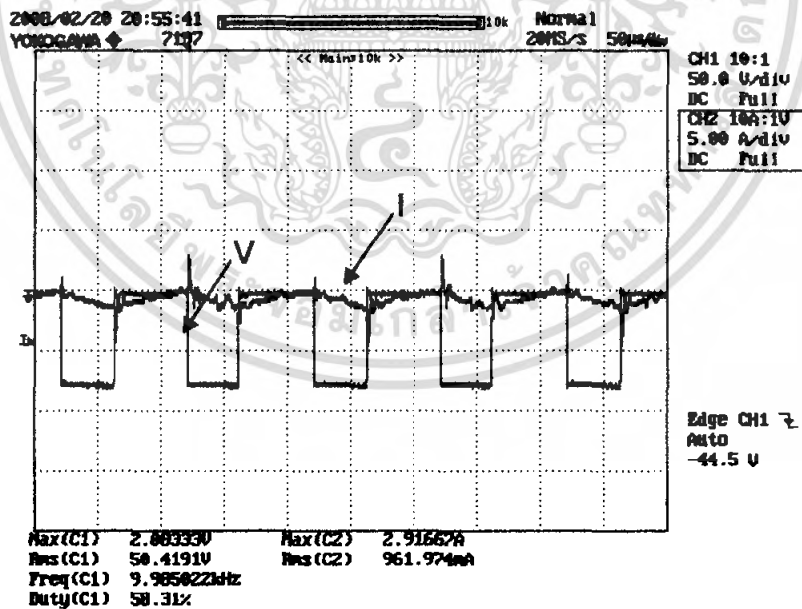
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศทาง Forward



รูปที่ 4.11 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศ Forward

แรงดันตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศทาง Reverse



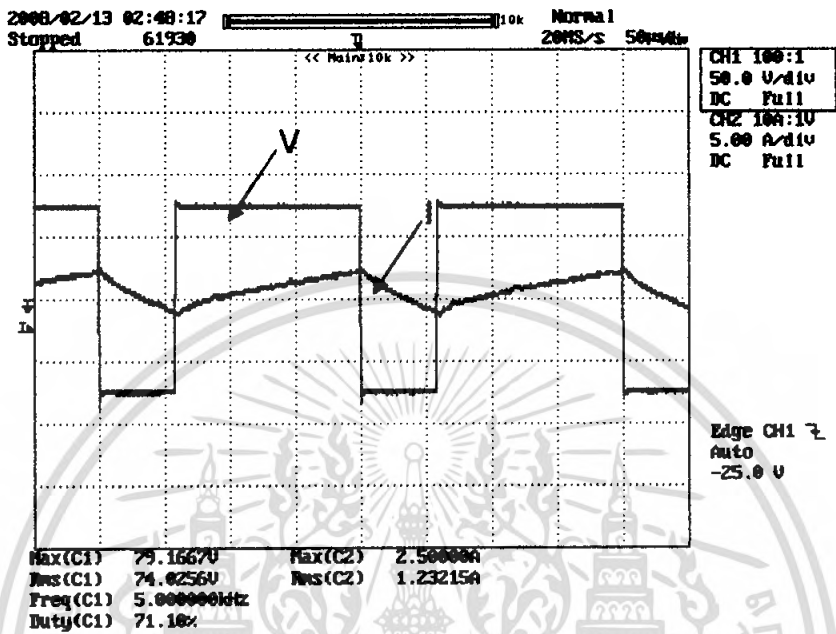
รูปที่ 4.12 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมอาร์มาเจอร์ในทิศ Reverse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

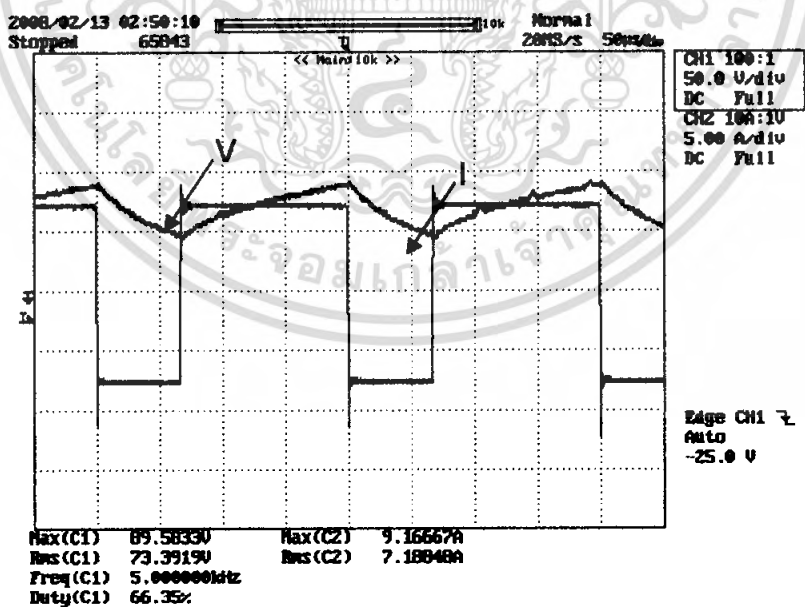
4.4 ผลจากการวัดสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ ขณะไม่มีภาระเทียบกับขณะมีภาระ แบบรูปเปิด

1. PWM แบบ Bipolar Open Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทาง Forward

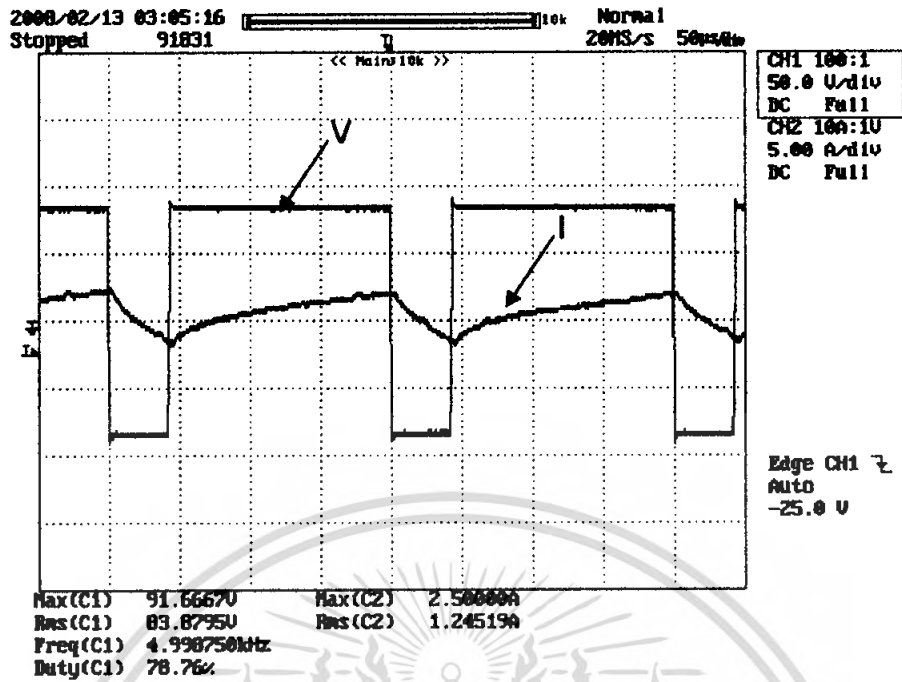


รูปที่ 4.13 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

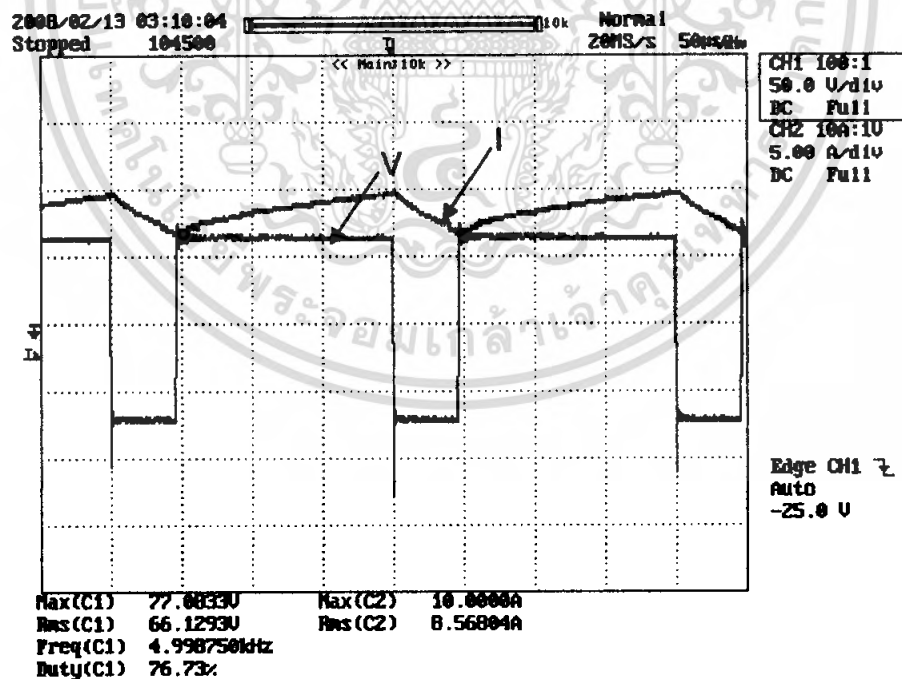


รูปที่ 4.14 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

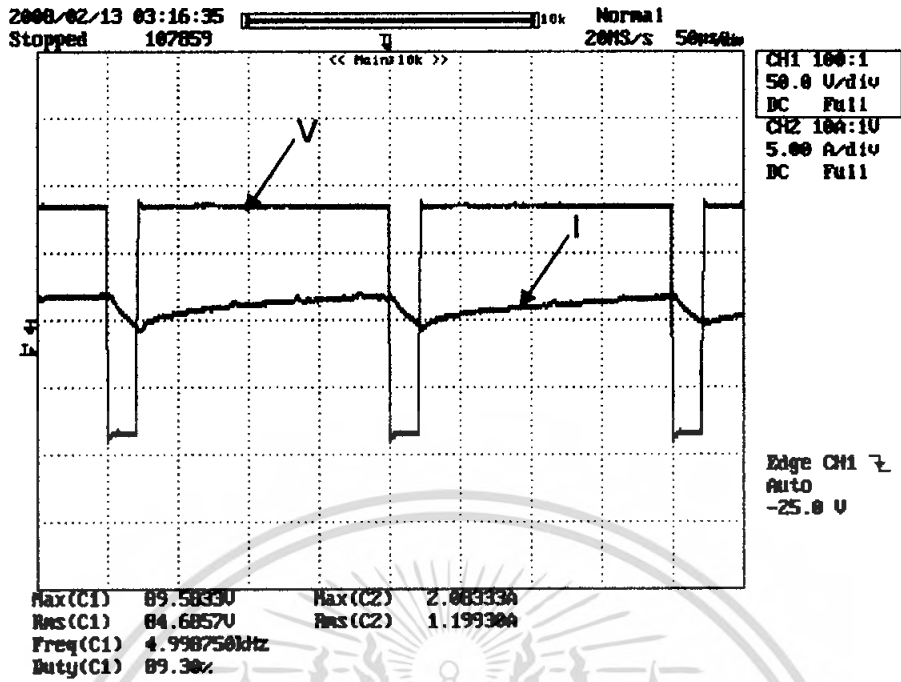


รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

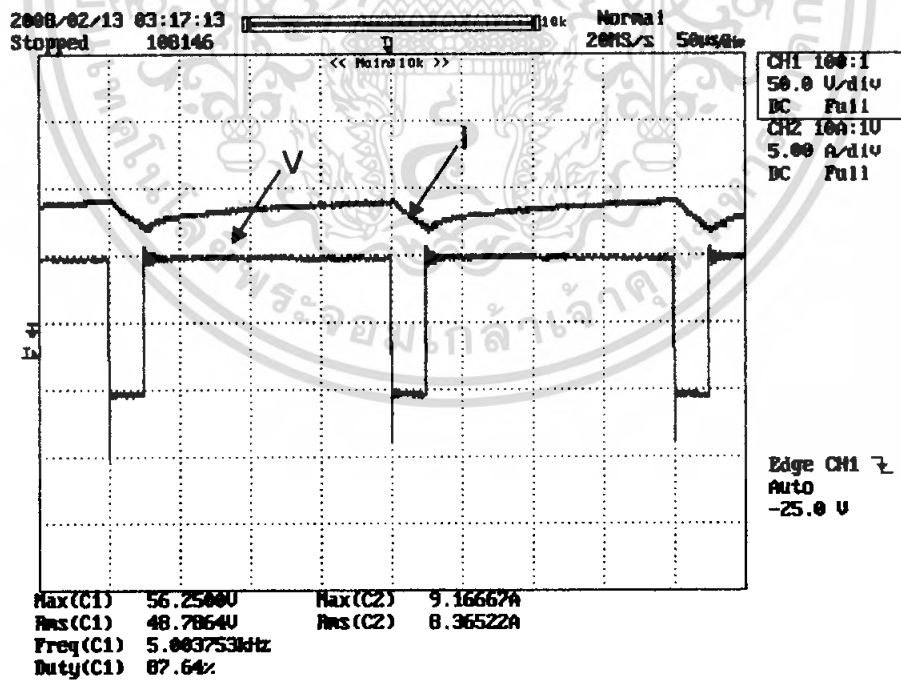


รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

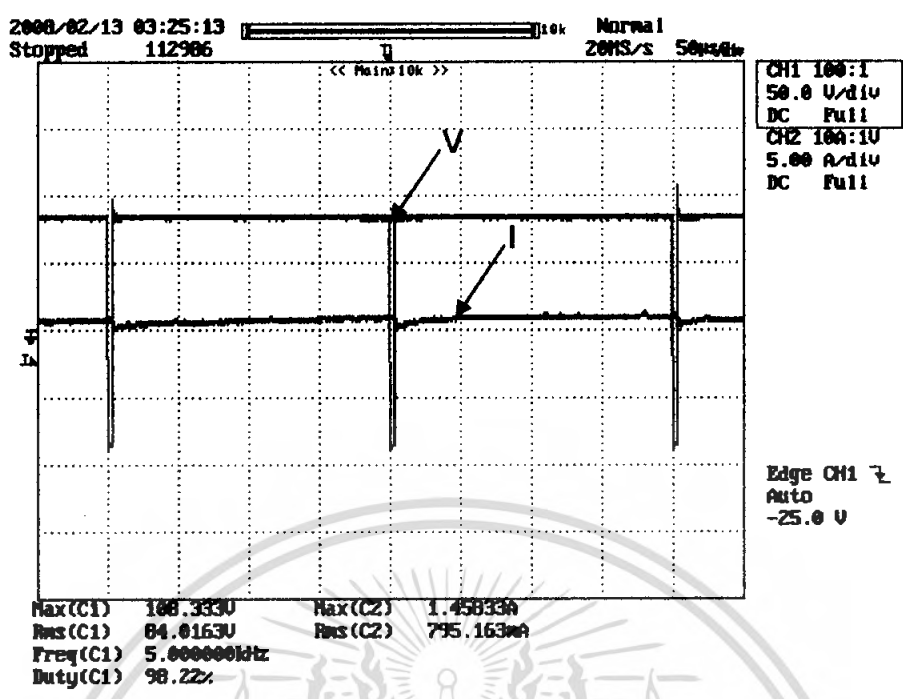


รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

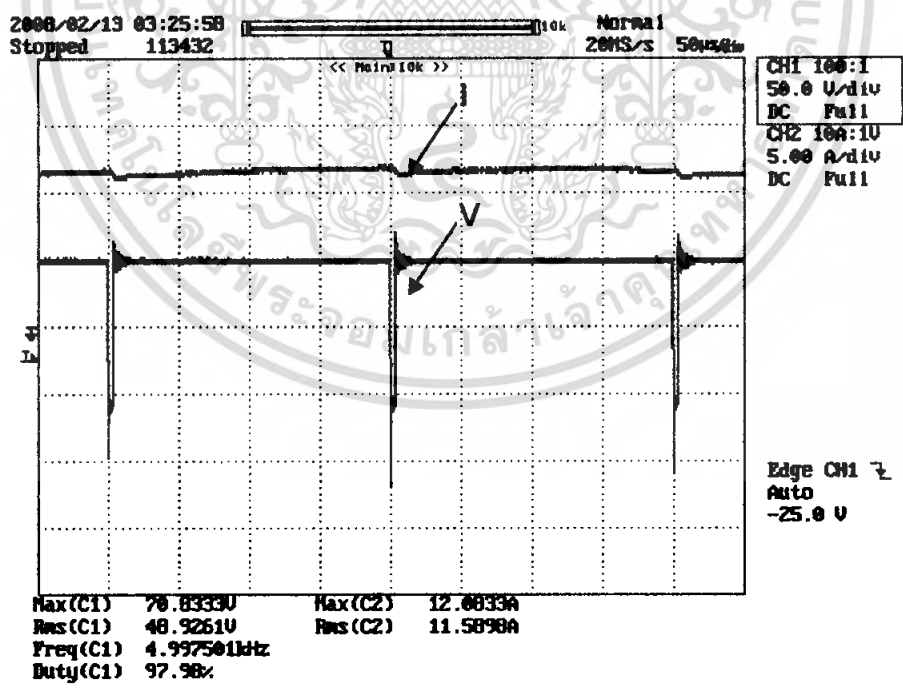


รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ



รูปที่ 4.20 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

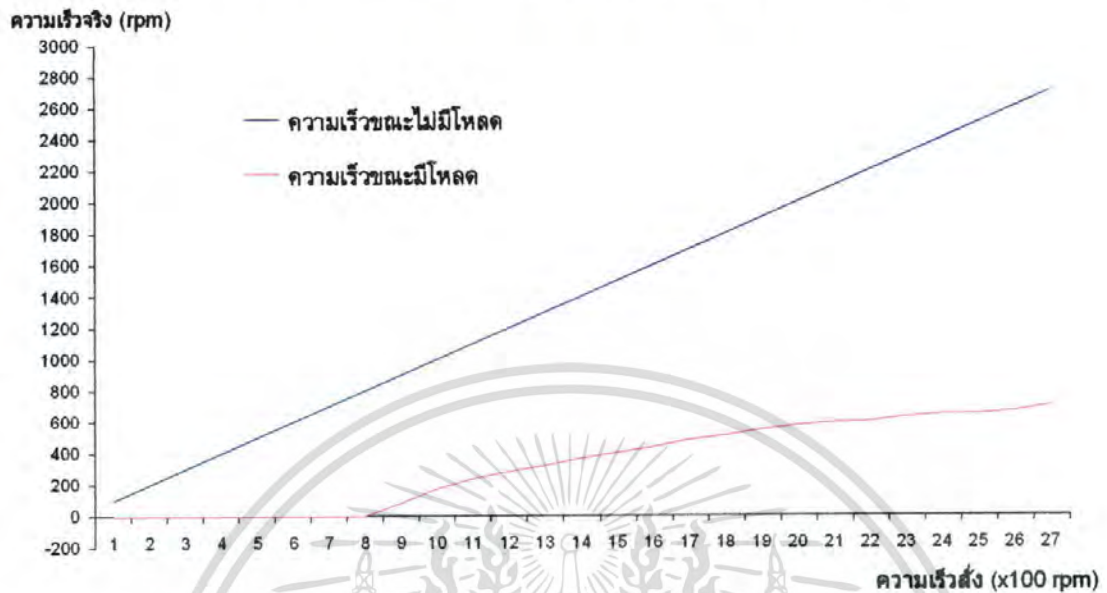
ตารางผลการทดลอง Bipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Forward

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลอง Bipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Forward

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	100	75.07	1.32	-	74.04	2.03
200	200	74.52	1.23	-	73.79	2.37
300	300	74.62	1.22	-	72.03	3.20
400	400	74.39	1.41	-	70.86	4.15
500	500	74.23	1.19	-	67.61	5.14
600	600	73.43	1.11	-	66.30	5.87
700	700	73.86	1.19	-	64.25	7.08
800	800	74.34	1.15	-	58.49	7.55
900	900	74.40	1.20	82	58.21	6.42
1000	1000	74.03	1.23	171	73.39	7.18
1100	1100	83.95	1.32	235	67.76	7.41
1200	1200	83.83	1.17	286	71.05	7.34
1300	1300	84.15	1.18	321	66.03	7.29
1400	1400	84.30	1.26	365	67.38	8.19
1500	1500	84.58	1.30	399	66.75	8.18
1600	1600	83.88	1.25	436	66.13	8.57
1700	1700	84.68	1.43	480	62.35	9.05
1800	1800	84.68	1.14	512	63.19	8.91
1900	1900	85.09	1.00	544	62.08	9.55
2000	2000	84.42	0.94	570	61.38	9.73
2100	2100	84.85	0.77	590	51.35	8.22
2200	2200	84.69	1.20	601	48.78	8.37
2300	2300	83.88	0.69	631	48.51	8.58
2400	2400	84.49	0.76	645	54.15	10.52
2500	2500	84.83	1.15	650	43.33	8.96
2600	2600	84.29	1.19	664	51.47	10.98
2700	2700	84.23	0.13	700	48.93	11.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบความเร็วขณะมีโหลด และไม่มีโหลด(Bipolar switching)

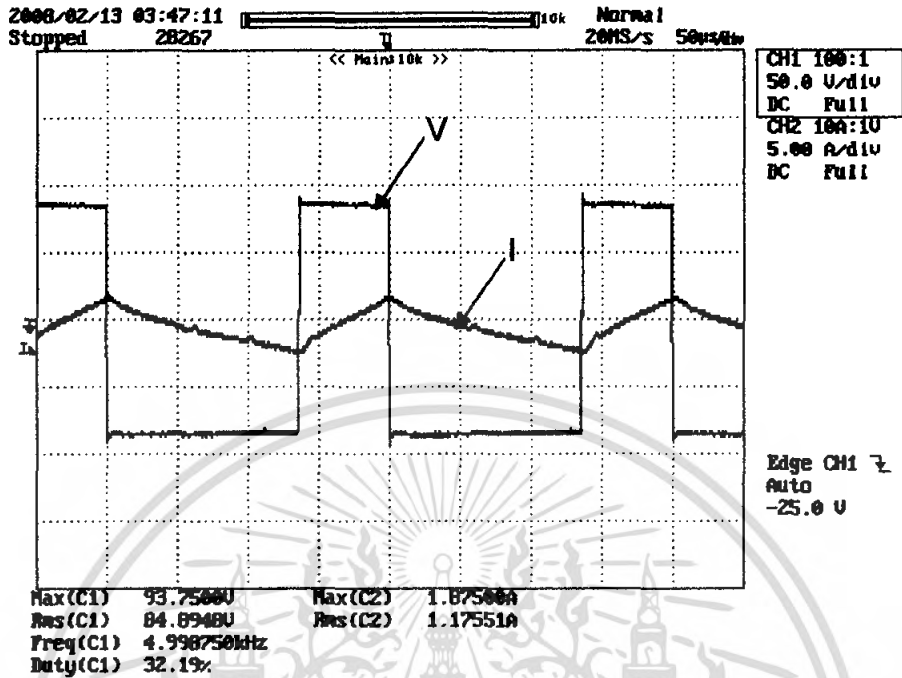


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขณะมีภาระ และไม่มีภาระ (Bipolar switching)

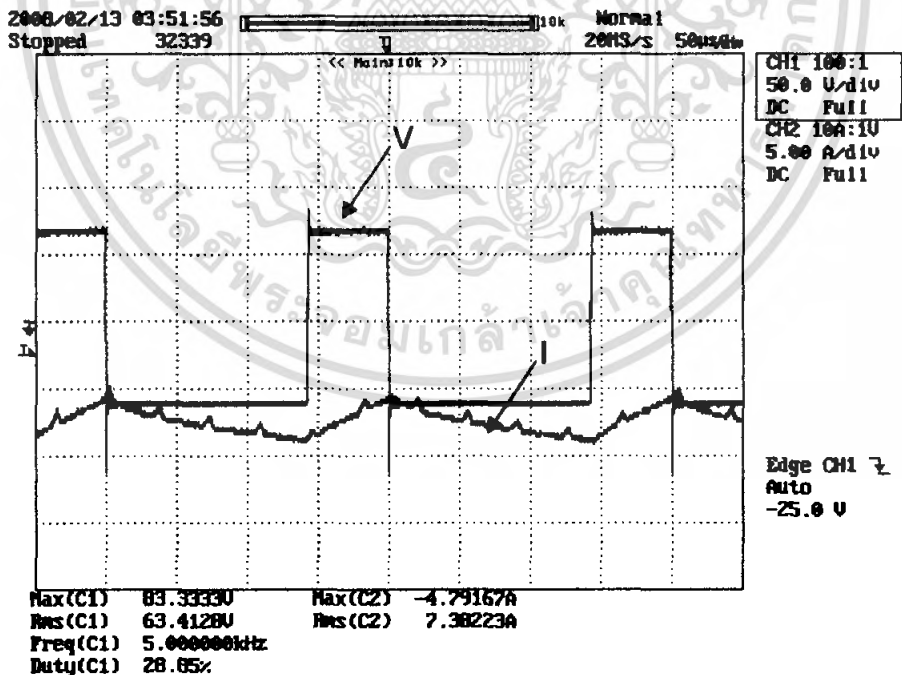
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. PWM แบบ Bipolar Open Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse

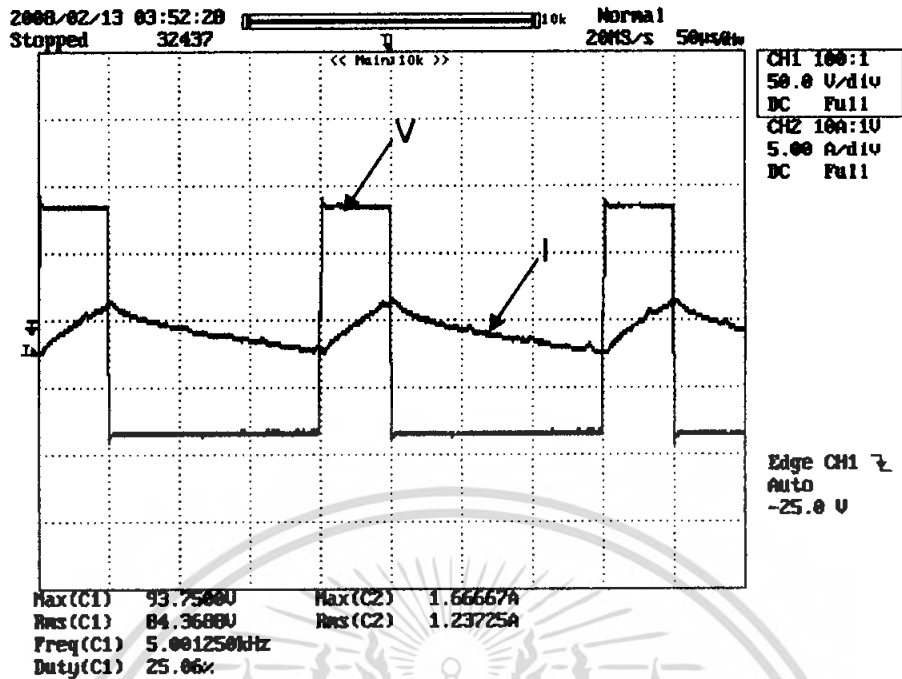


รูปที่ 4.22 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

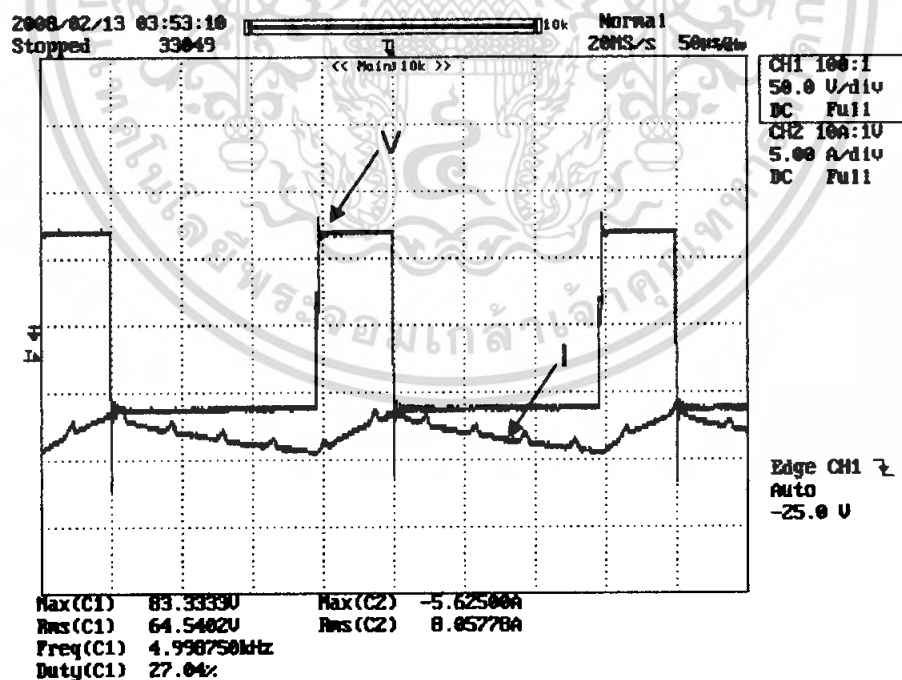


รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

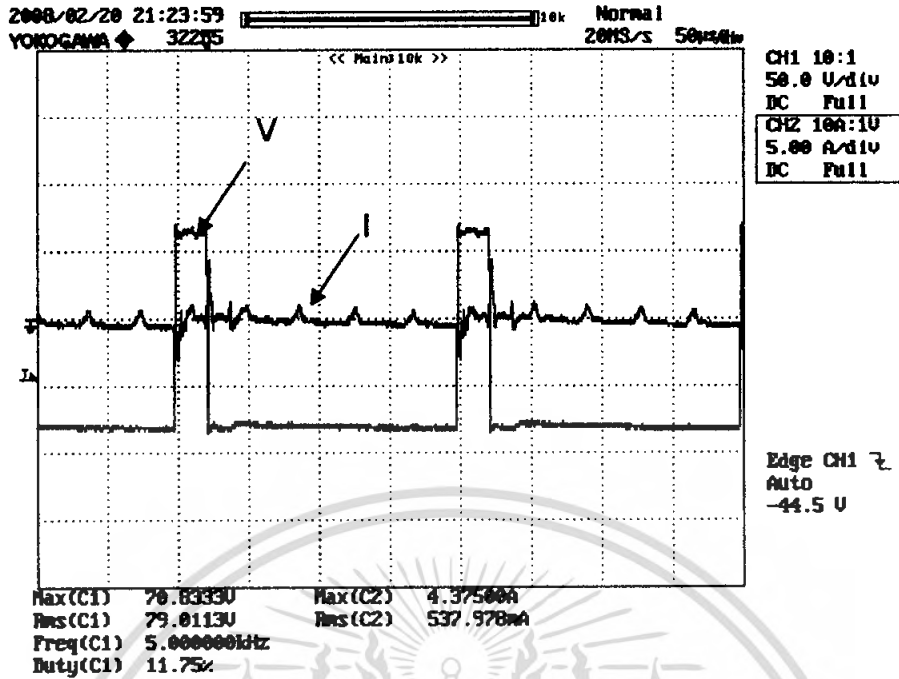


รูปที่ 4.24 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

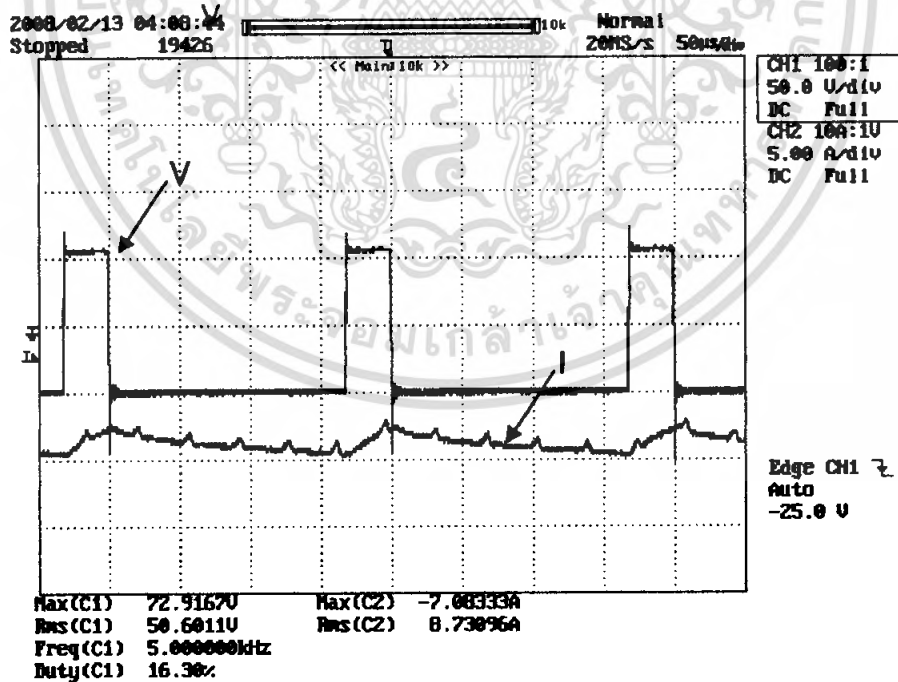


รูปที่ 4.25 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

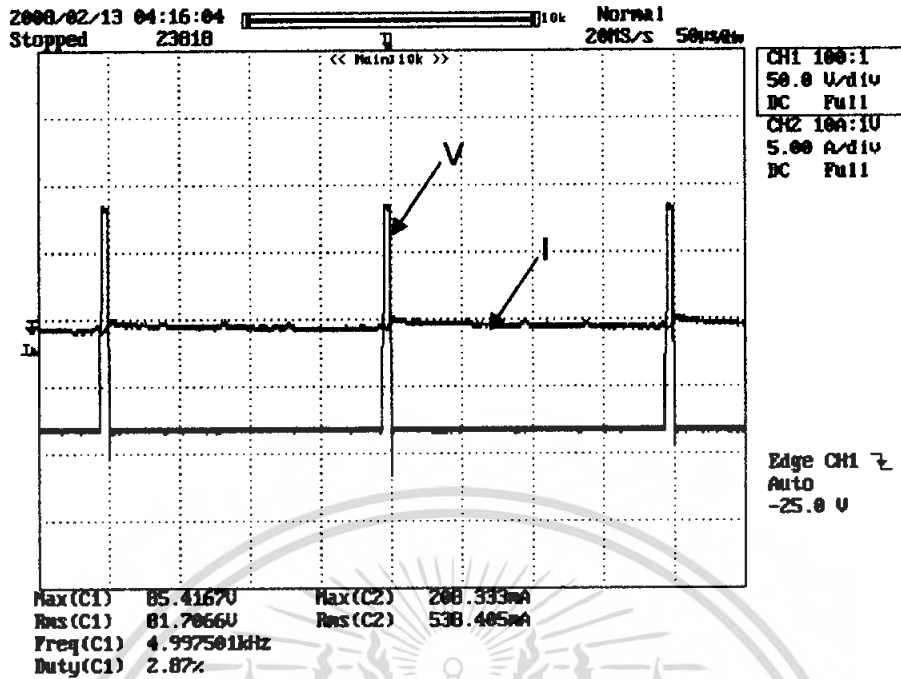


รูปที่ 4.26 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

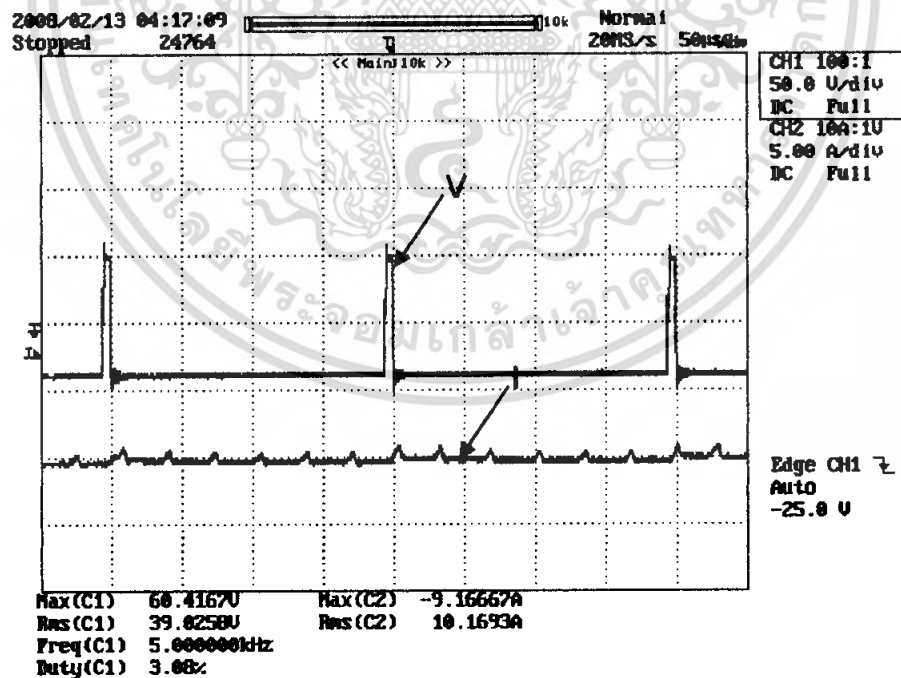


รูปที่ 4.27 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ



รูปที่ 4.29 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

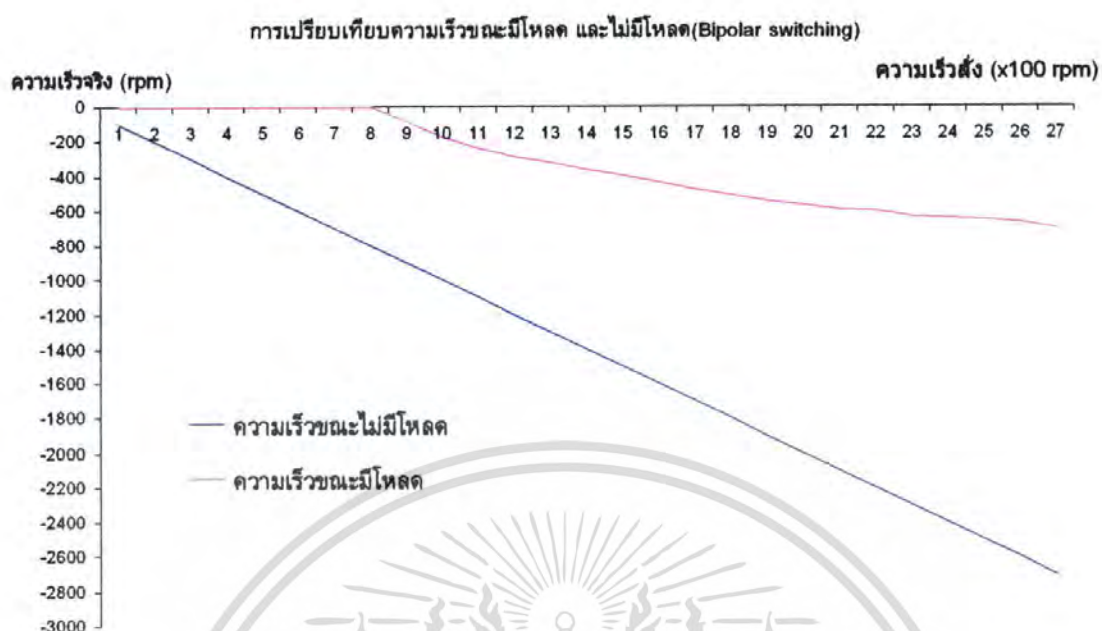
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง Bipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Reverse

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลอง Bipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Reverse

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	100	85.23	1.51	-	82.51	1.94
200	200	85.33	1.64	-	84.61	2.33
300	300	84.55	1.37	-	81.88	2.79
400	400	85.22	1.26	-	81.93	3.61
500	500	85.05	1.39	-	79.36	4.70
600	600	84.21	1.47	-	78.81	5.86
700	700	84.18	1.32	-	76.20	6.70
800	800	84.93	1.36	-	72.83	6.76
900	900	84.75	1.41	112	73.57	7.50
1000	1000	84.89	1.18	185	70.07	6.97
1100	1100	84.38	1.44	238	70.73	6.98
1200	1200	84.18	1.15	278	68.75	7.27
1300	1300	84.79	1.05	320	63.41	7.38
1400	1400	84.37	1.24	360	64.54	8.06
1500	1500	84.07	1.13	400	62.81	8.79
1600	1600	84.46	1.04	425	58.59	8.70
1700	1700	84.75	1.42	463	63.76	9.38
1800	1800	83.47	0.92	491	62.18	10.08
1900	1900	84.97	1.17	506	55.42	9.21
2000	2000	83.41	0.85	530	50.60	8.73
2100	2100	83.54	0.92	550	50.13	9.32
2200	2200	84.14	0.94	572	55.86	10.89
2300	2300	82.77	1.09	584	52.37	11.71
2400	2400	84.20	1.19	590	45.15	10.59
2500	2500	82.74	0.67	597	46.91	10.42
2600	2600	81.71	0.54	600	39.03	10.17
2700	2700	81.76	0.76	605	43.96	10.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

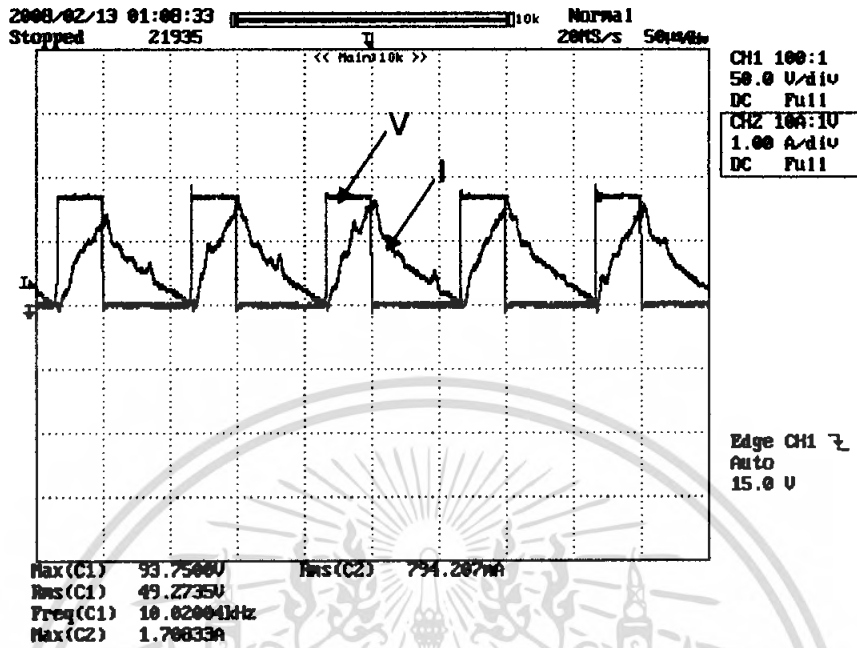


รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระ (Bipolar switching)

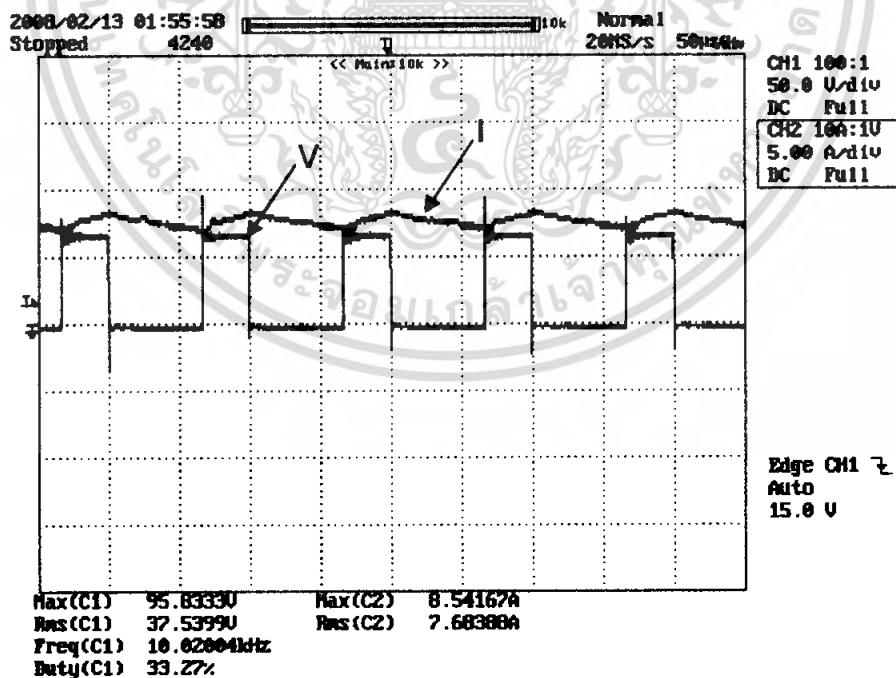
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. PWM แบบ Unipolar Open Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทาง Forward

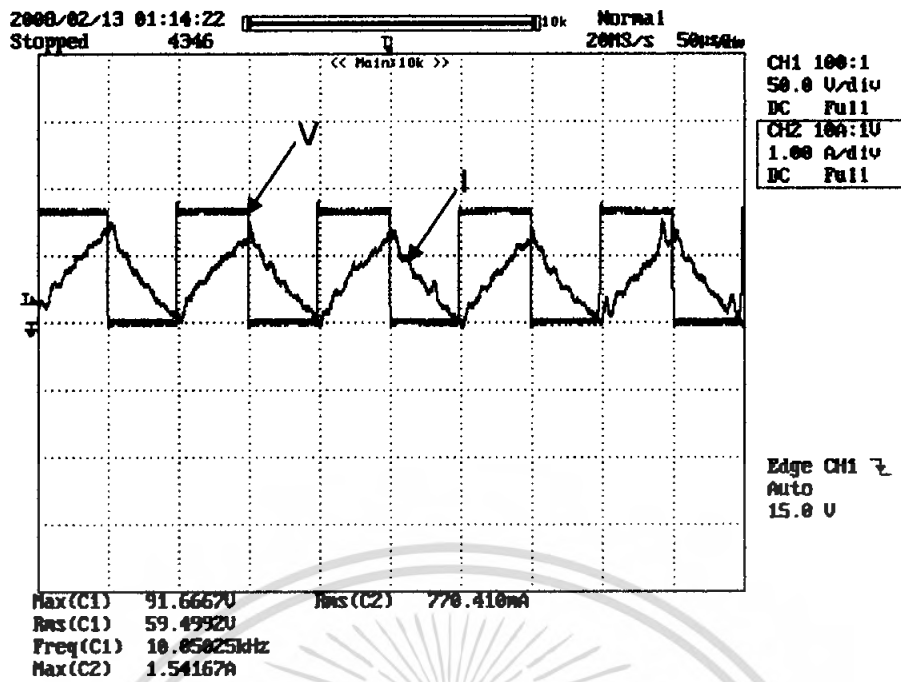


รูปที่ 4.31 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

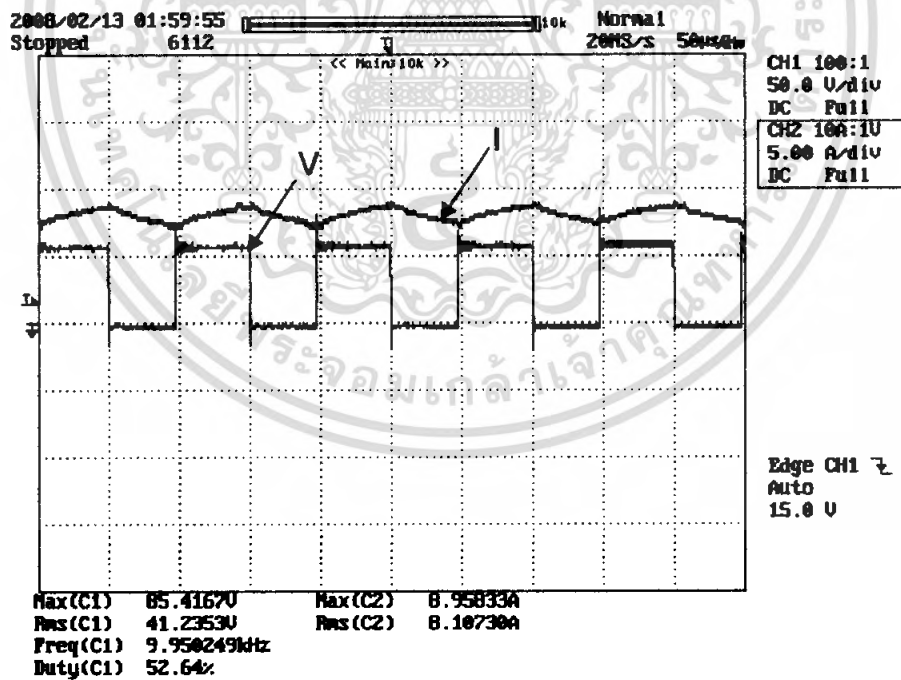


รูปที่ 4.32 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

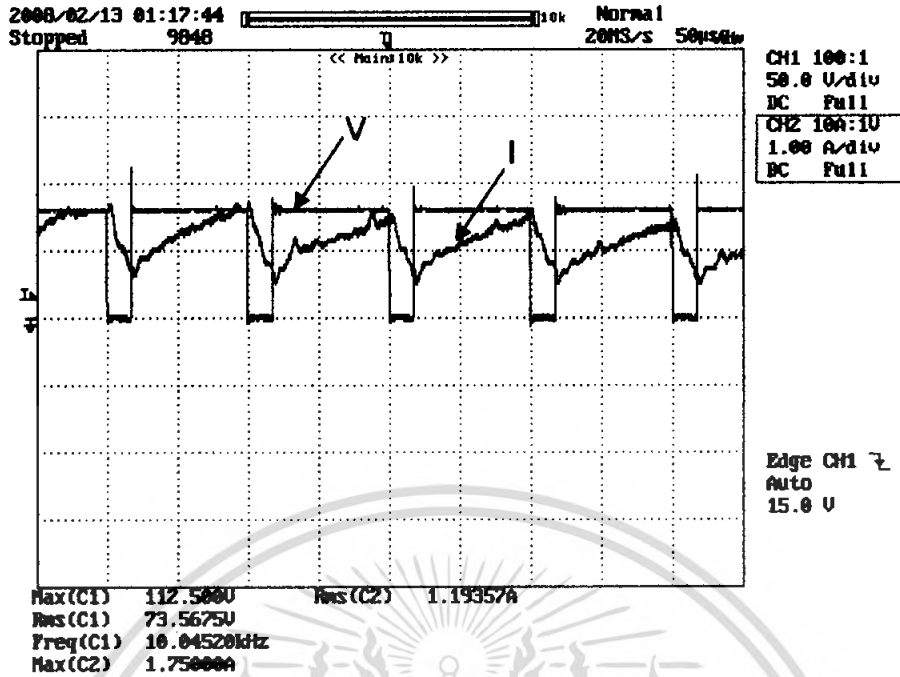


รูปที่ 4.33 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

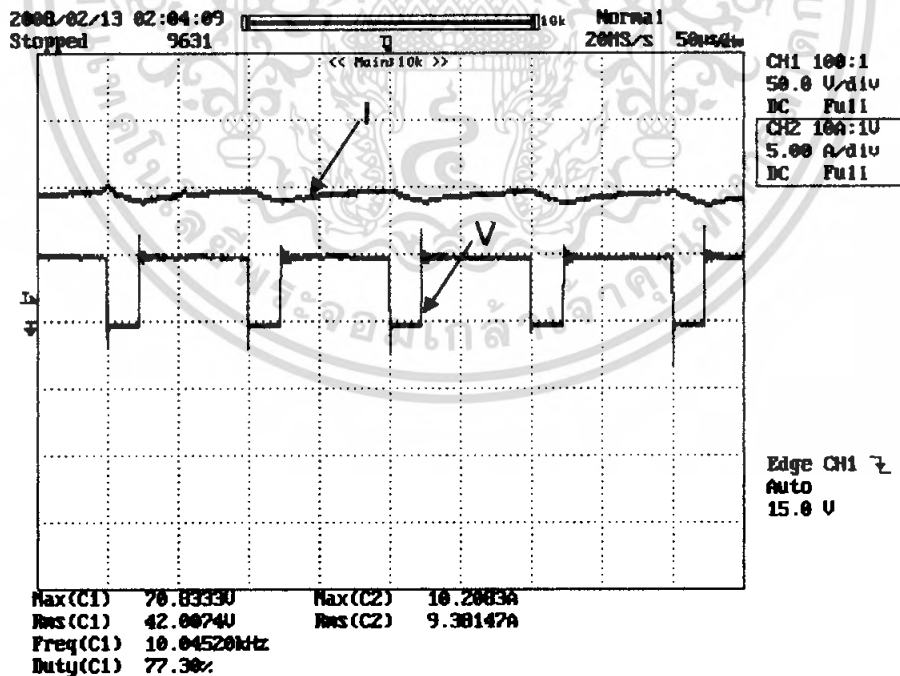


รูปที่ 4.34 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

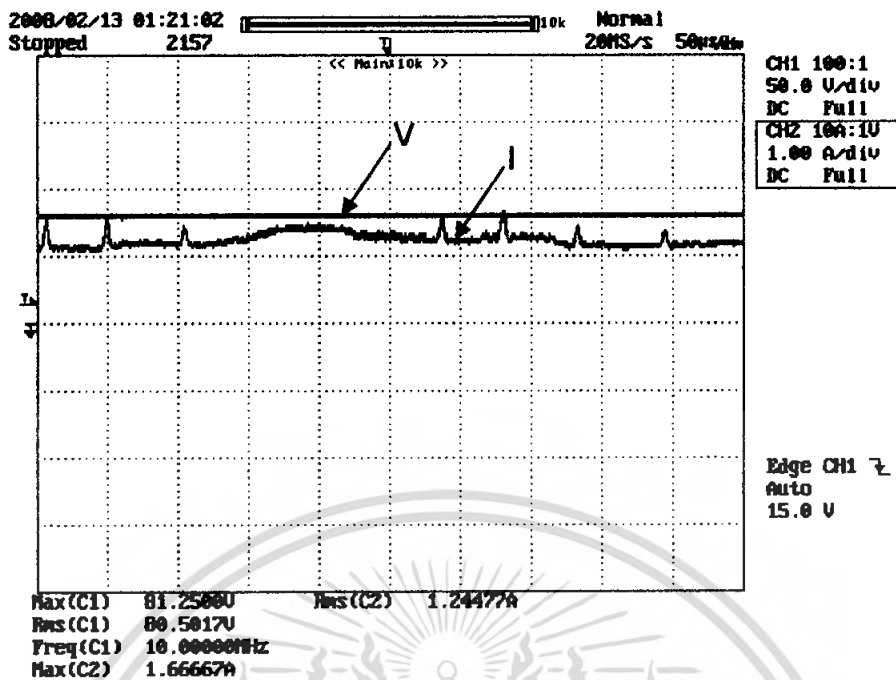


รูปที่ 4.35 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

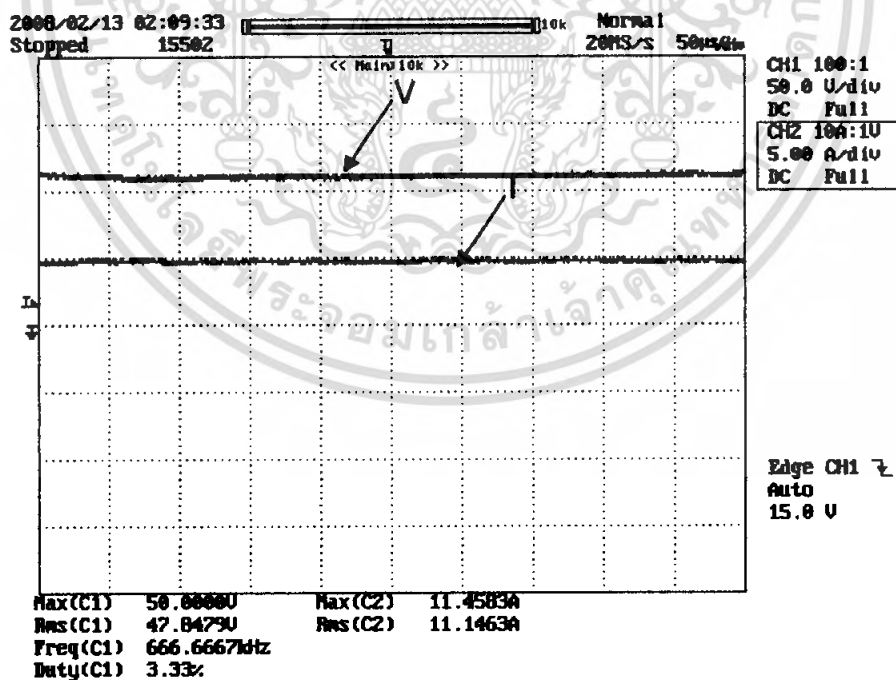


รูปที่ 4.36 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ



รูปที่ 4.38 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

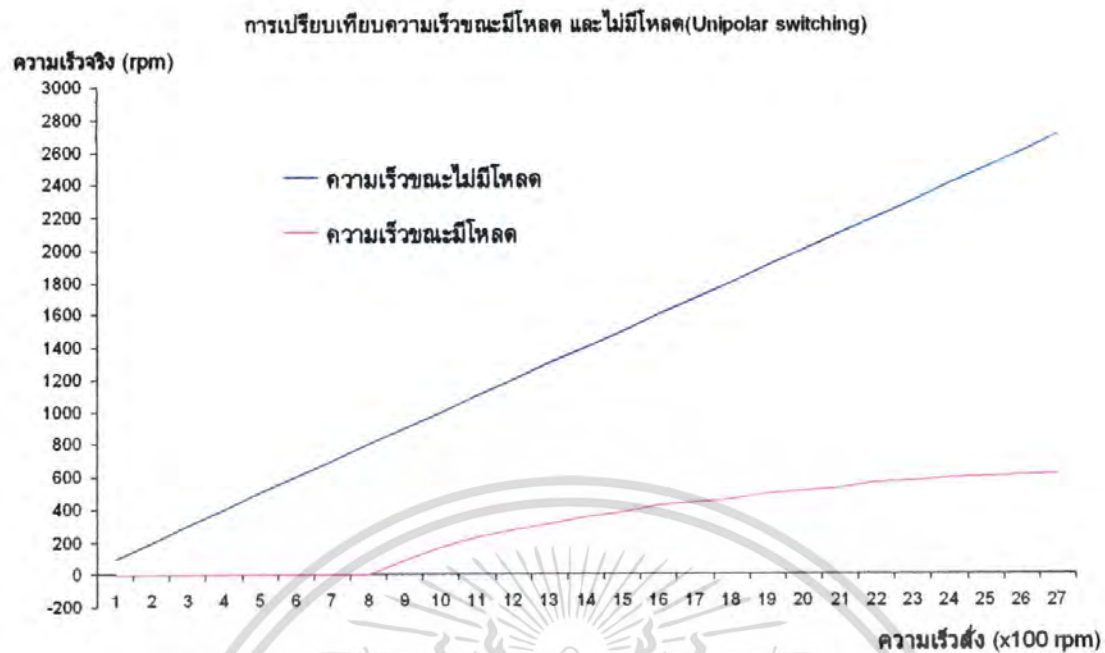
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง Unipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Forward

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลอง Unipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Forward

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	100	19.05	0.30	-	19.23	1.68
200	200	25.63	0.43	-	24.77	3.03
300	300	30.38	0.46	-	28.29	4.31
400	400	34.34	0.53	-	31.08	5.51
500	500	37.95	0.56	-	33.06	6.42
600	600	41.12	0.65	-	33.75	6.93
700	700	43.59	0.64	-	34.43	7.98
800	800	46.52	0.67	-	34.47	8.32
900	900	49.27	0.79	90	37.54	7.68
1000	1000	51.04	0.71	173	37.62	7.31
1100	1100	53.67	0.68	230	41.70	7.60
1200	1200	55.37	0.86	271	39.96	7.45
1300	1300	57.38	0.80	313	39.62	7.88
1400	1400	61.77	1.00	350	44.32	8.12
1500	1500	59.50	0.77	382	41.24	8.11
1600	1600	63.60	0.91	421	42.94	8.36
1700	1700	65.23	0.70	445	40.43	8.25
1800	1800	67.57	0.71	455	45.75	9.59
1900	1900	68.51	0.81	492	44.85	9.51
2000	2000	70.72	0.61	510	47.13	9.66
2100	2100	73.57	1.19	533	42.00	9.38
2200	2200	75.41	1.10	566	47.12	9.96
2300	2300	75.72	0.73	570	47.55	10.51
2400	2400	77.56	0.74	590	44.41	8.89
2500	2500	80.21	0.76	600	46.20	10.73
2600	2600	80.50	1.24	611	46.12	10.39
2700	2700	81.23	0.89	615	47.85	11.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

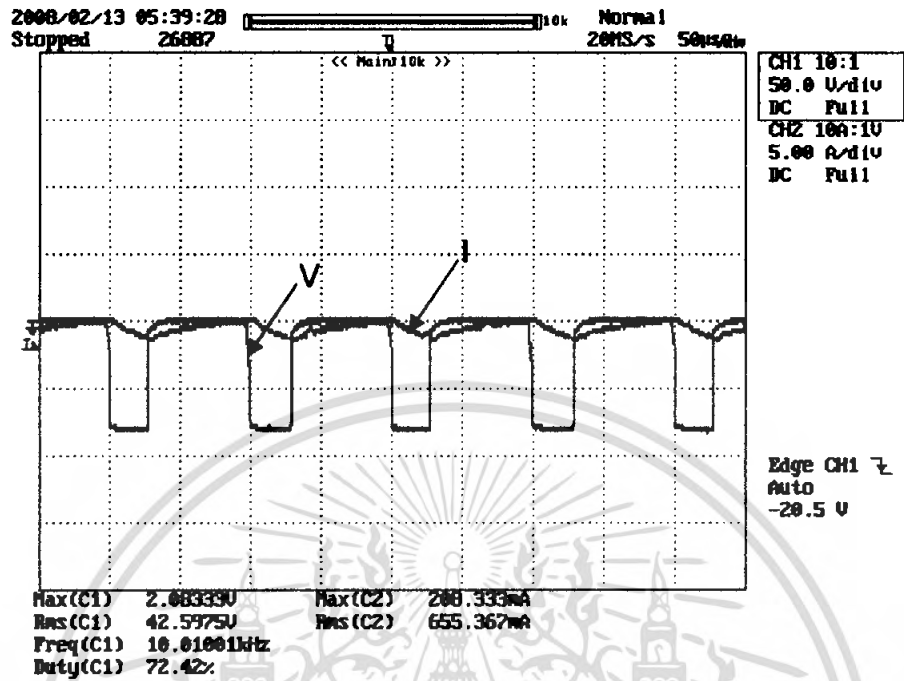


รูปที่ 4.39 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Unipolar Switching

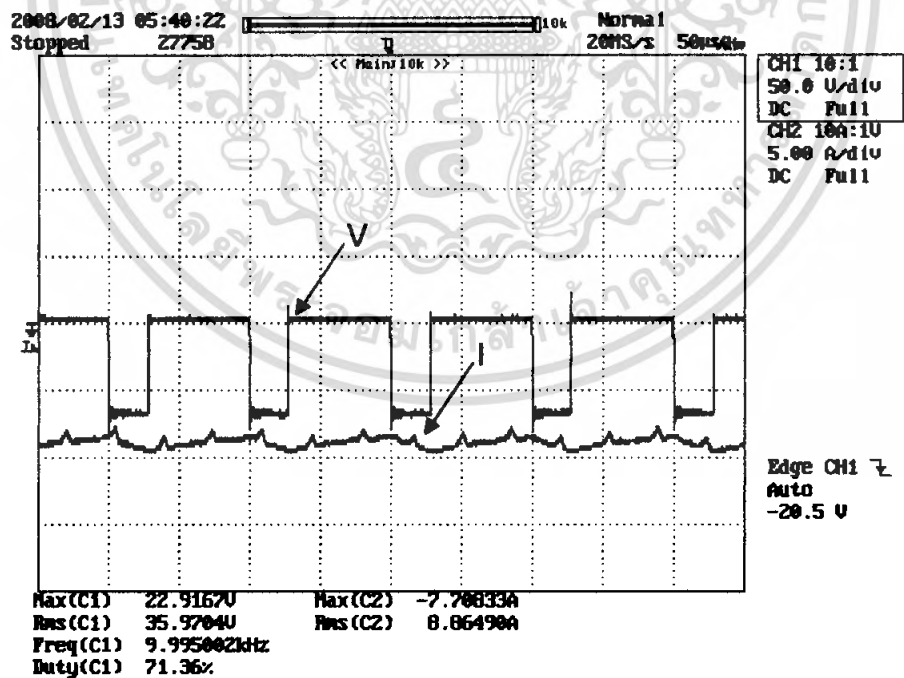
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. PWM แบบ Unipolar Open Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขั้วมอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse

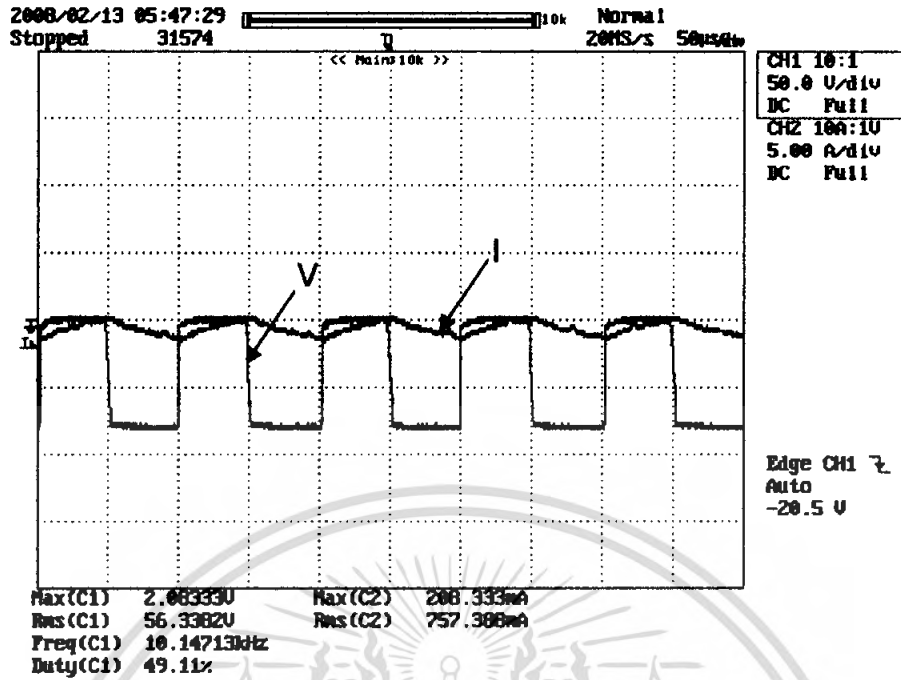


รูปที่ 4.40 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

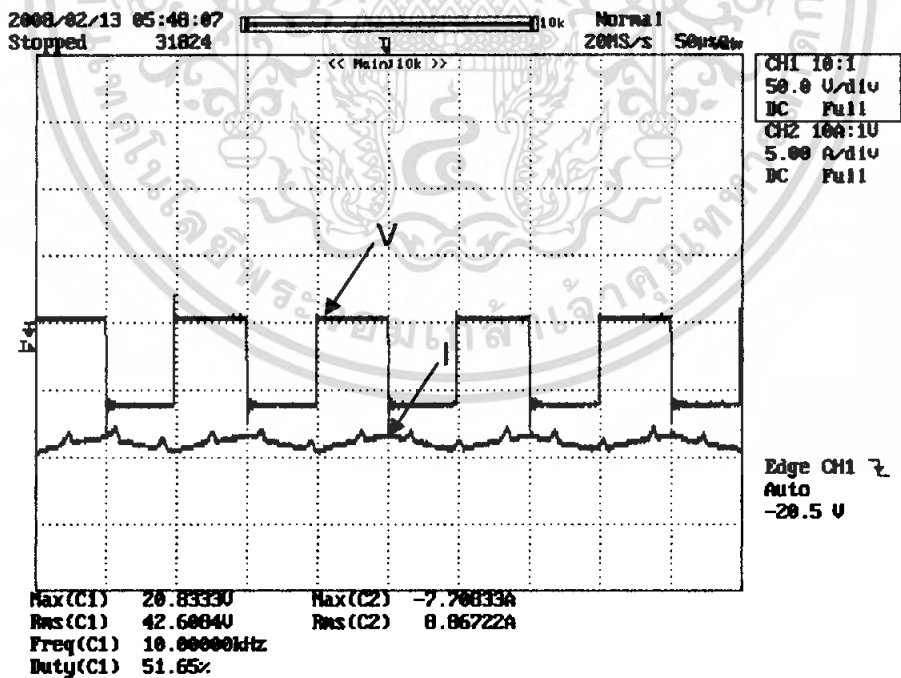


รูปที่ 4.41 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

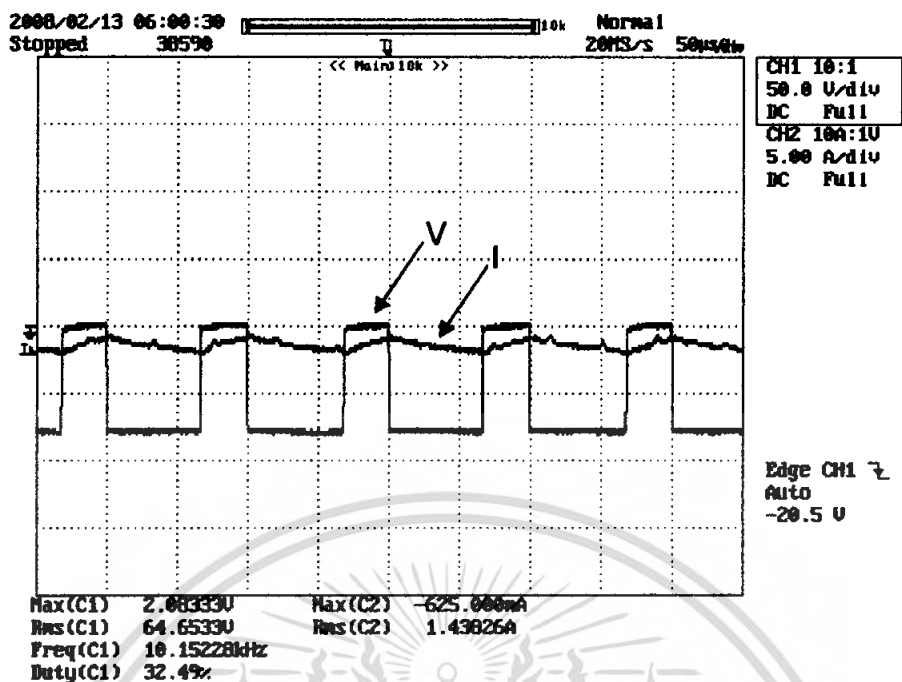


รูปที่ 4.42 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

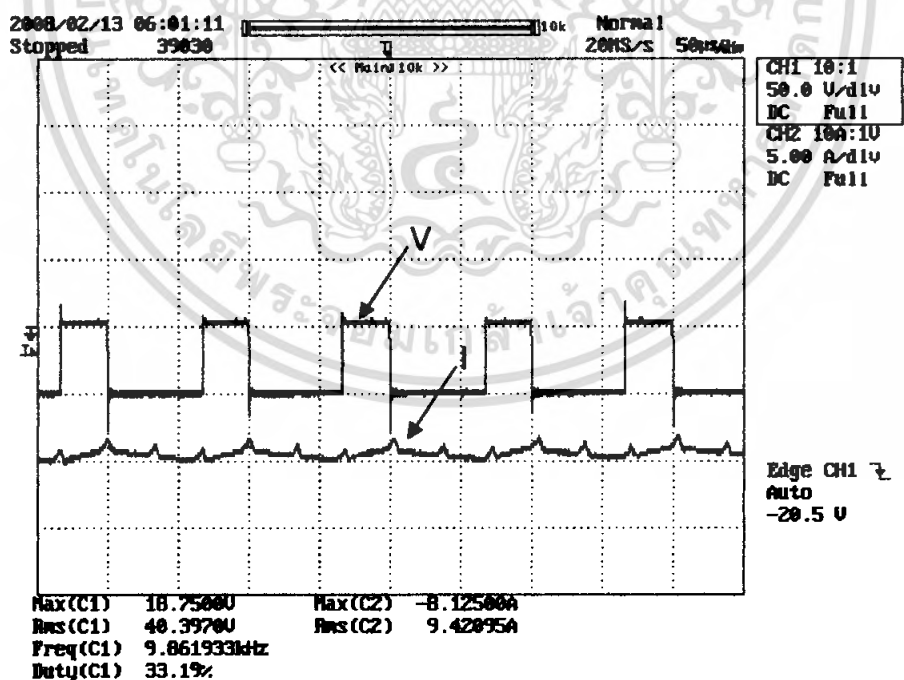


รูปที่ 4.43 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

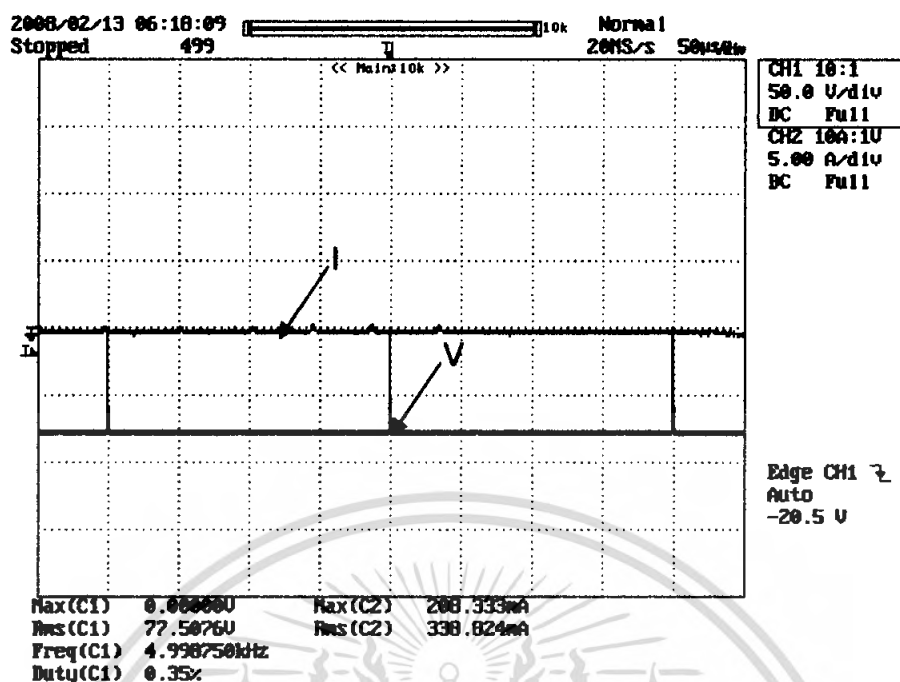


รูปที่ 4.44 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ

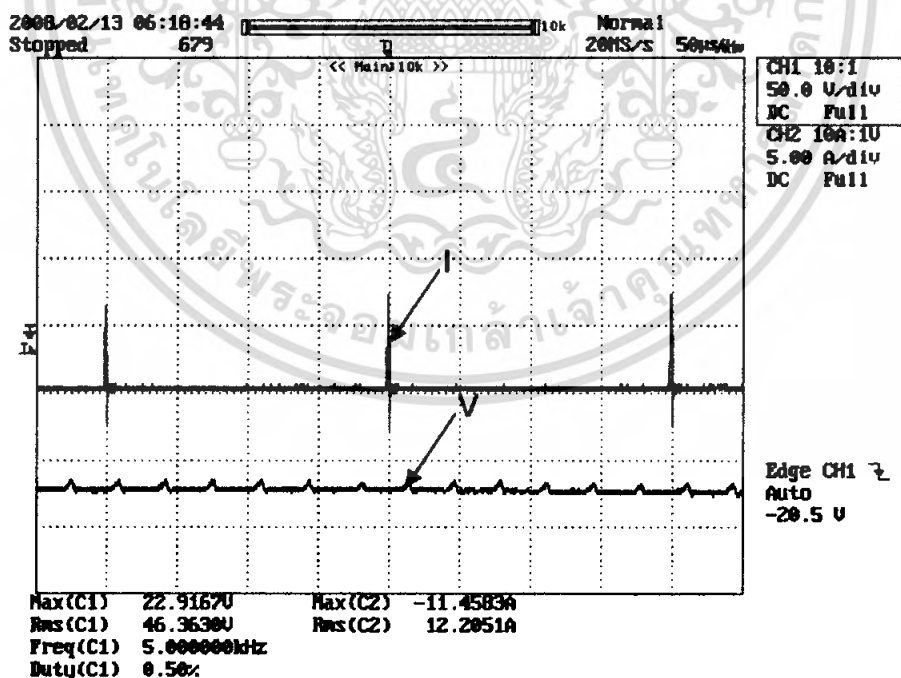


รูปที่ 4.45 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะไม่มีภาระ



รูปที่ 4.47 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบ/นาที ขณะมีภาระ

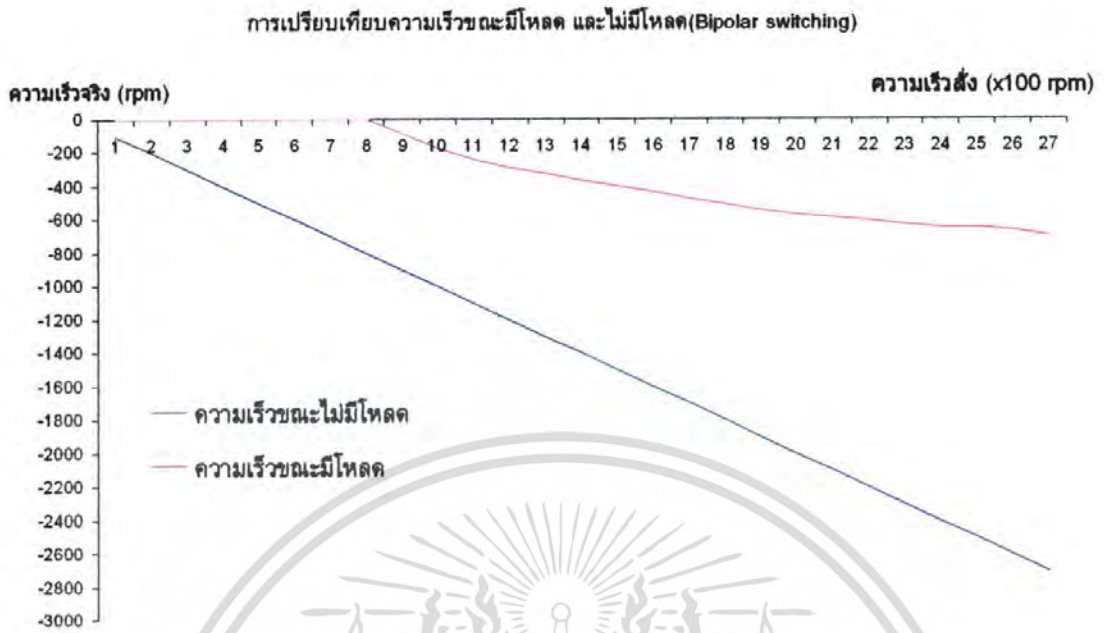
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง Unipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Reverse

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลอง Unipolar แบบ Open Loop ทิศทาง Reverse

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	100	16.82	0.21	-	15.93	1.41
200	200	16.39	0.27	-	16.20	1.44
300	300	22.68	0.38	-	21.79	2.61
400	400	26.88	0.44	-	26.08	3.74
500	500	30.43	0.48	-	29.19	4.89
600	600	34.40	0.44	-	31.96	6.00
700	700	36.97	0.48	-	33.26	6.99
800	800	39.69	0.68	-	35.38	7.93
900	900	42.60	0.66	90	35.97	8.86
1000	1000	45.07	0.67	173	37.85	7.99
1100	1100	47.31	0.77	230	37.99	7.77
1200	1200	50.20	0.79	271	41.61	8.49
1300	1300	52.57	0.63	313	41.43	8.53
1400	1400	54.12	0.94	350	43.60	8.87
1500	1500	56.34	0.76	382	42.61	8.87
1600	1600	58.27	0.92	421	41.54	8.90
1700	1700	60.21	1.11	445	44.84	9.16
1800	1800	62.35	0.95	455	40.77	8.52
1900	1900	62.59	0.77	492	40.73	8.45
2000	2000	64.65	1.44	510	40.39	9.42
2100	2100	65.47	1.12	533	39.98	9.09
2200	2200	67.44	0.84	566	46.31	10.61
2300	2300	68.94	0.75	570	40.22	8.78
2400	2400	70.66	0.71	590	43.26	10.80
2500	2500	71.91	0.77	600	42.49	11.10
2600	2600	73.41	0.71	611	46.70	11.57
2700	2700	75.13	0.85	615	46.36	12.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



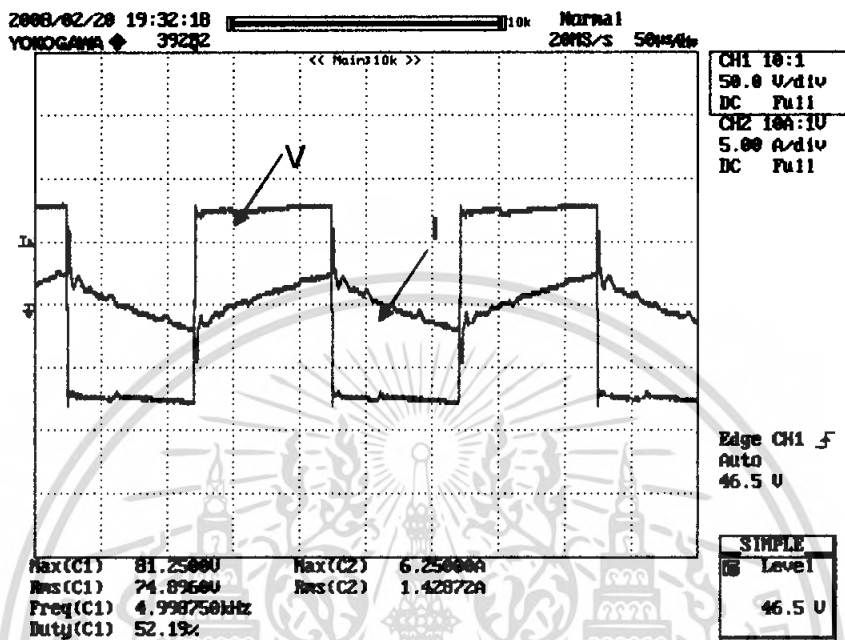
รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Unipolar Switching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

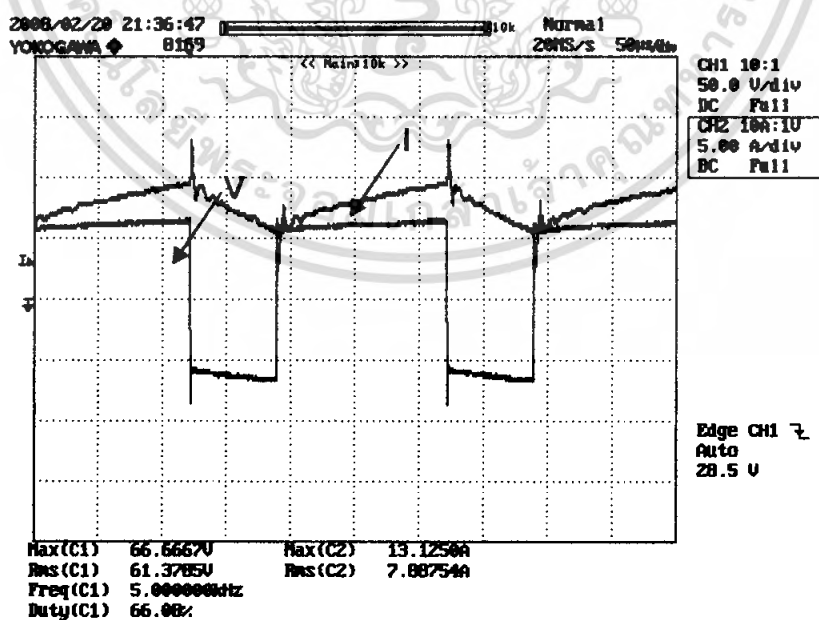
4.5 ผลจากการวัดสัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ ขณะไม่มีภาระเทียบกับขณะมีภาระ แบบรูปปิด

1. PWM แบบ Bipolar Close Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทาง Forward

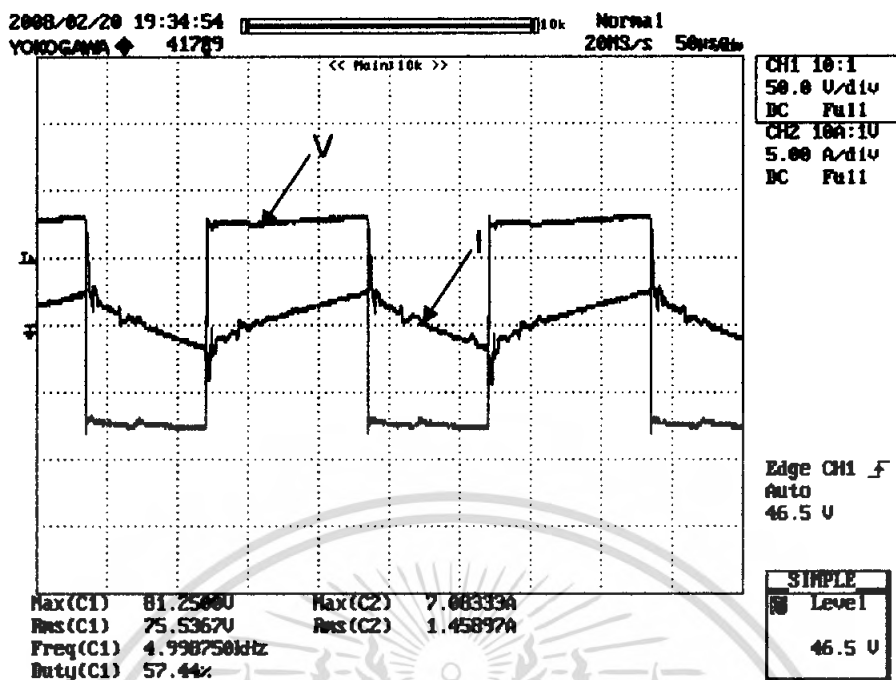


รูปที่ 4.49 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

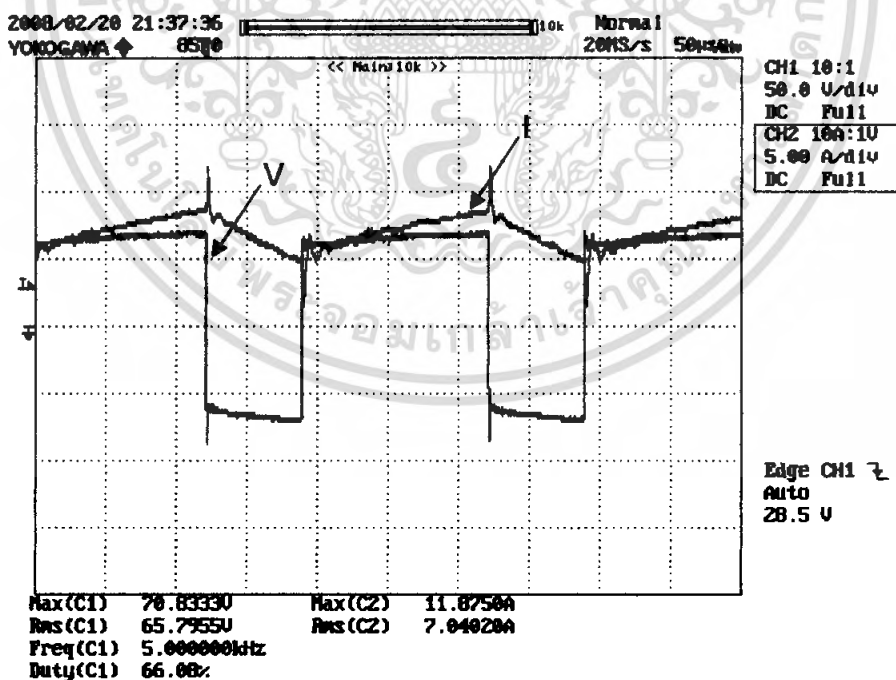


รูปที่ 4.50 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

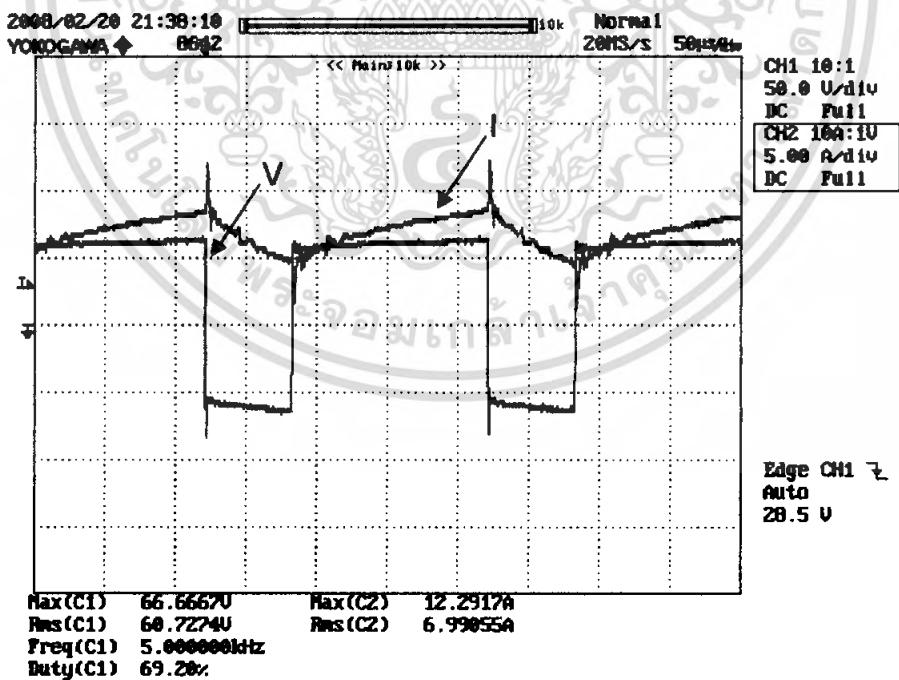


รูปที่ 4.52 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

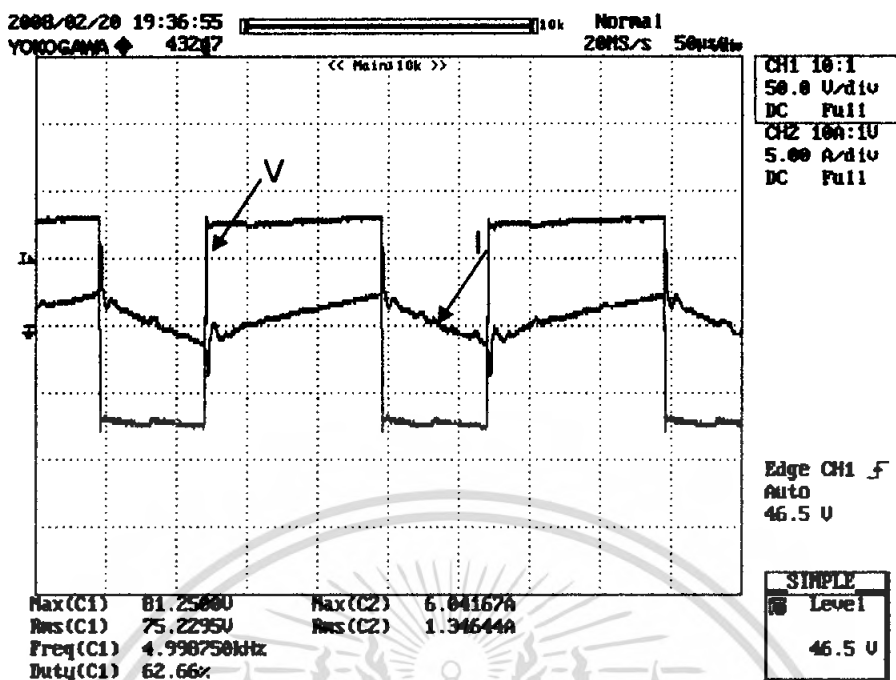


รูปที่ 4.53 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

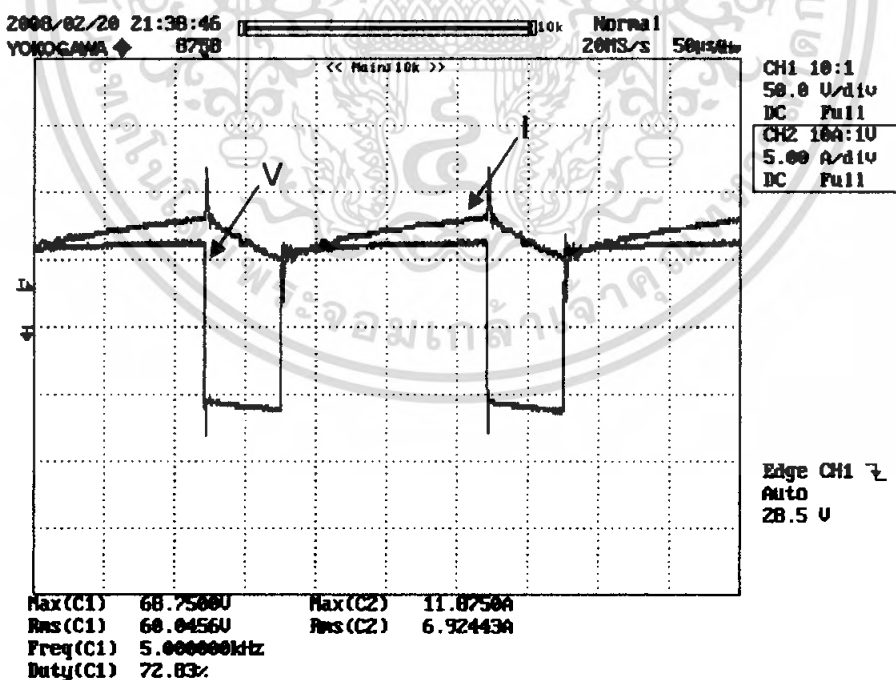


รูปที่ 4.54 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

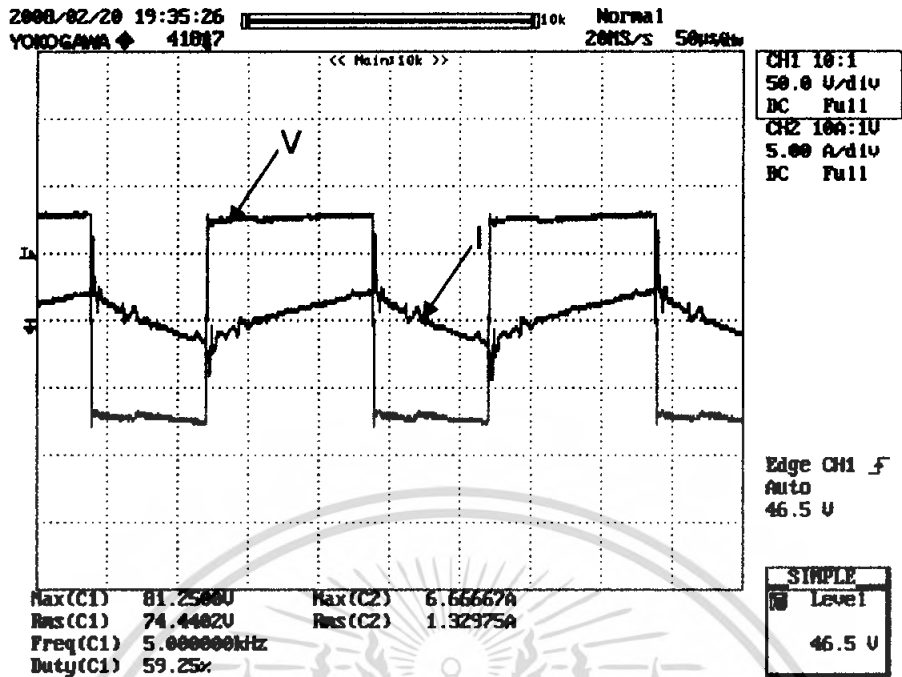


รูปที่ 4.55 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

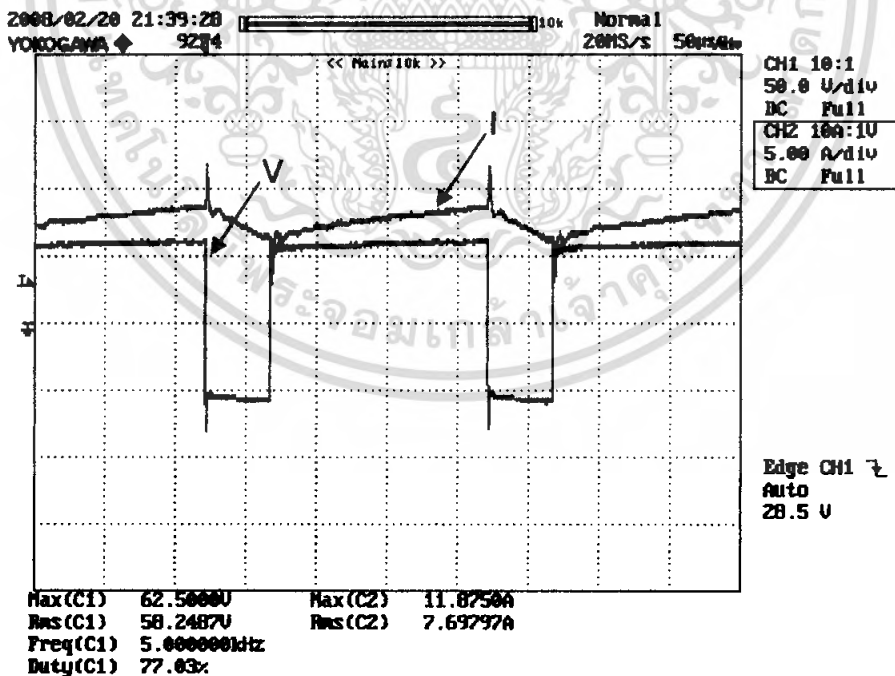


รูปที่ 4.56 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

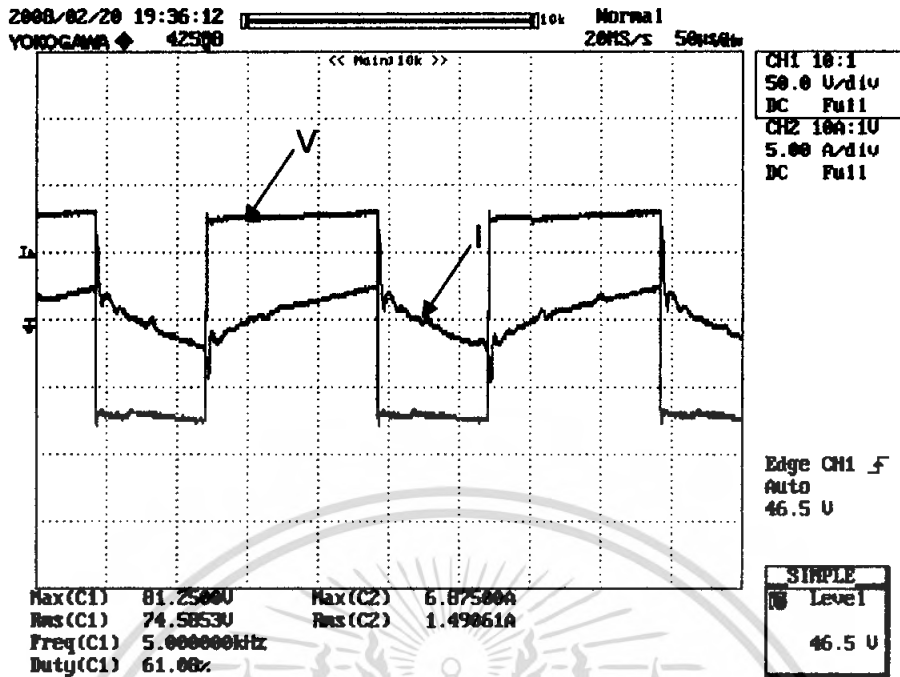


รูปที่ 4.57 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

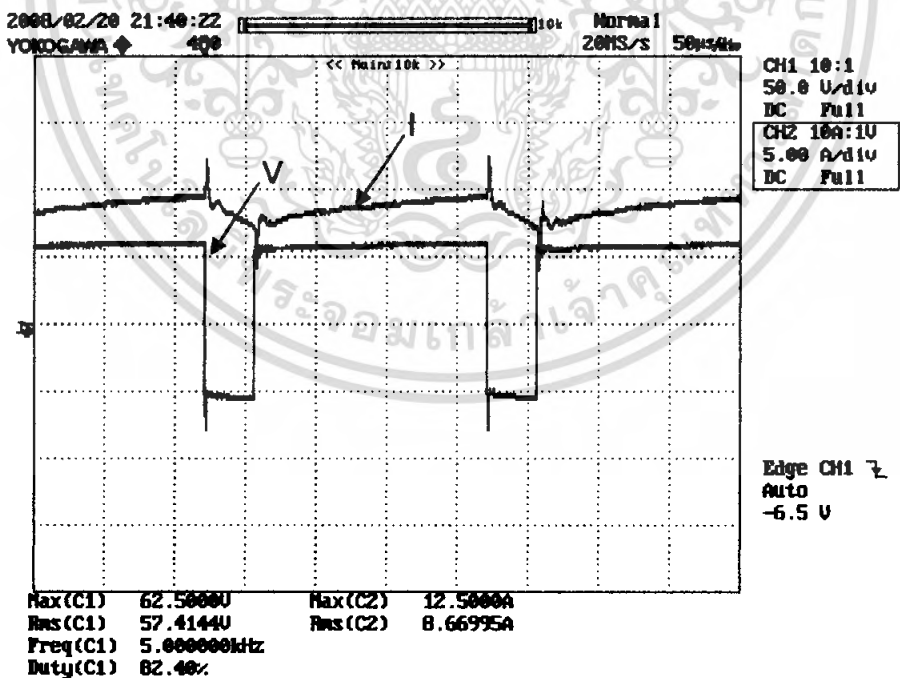


รูปที่ 4.58 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

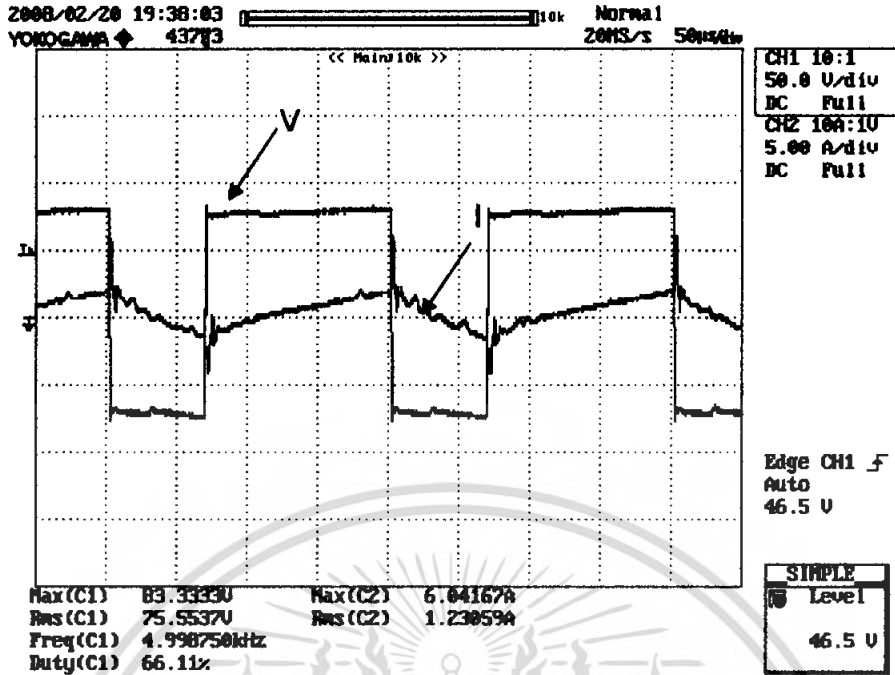


รูปที่ 4.59 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

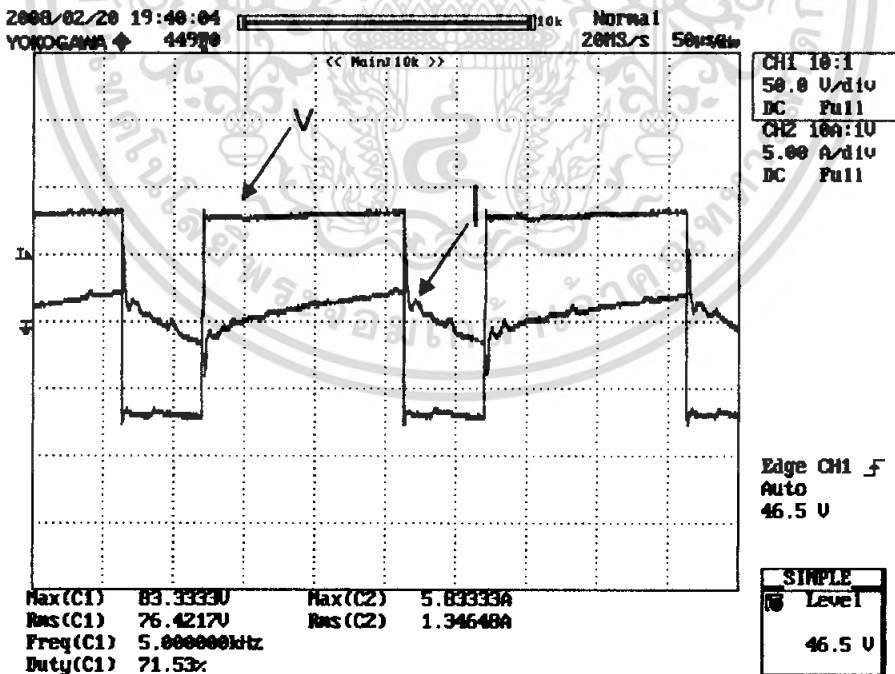


รูปที่ 4.60 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

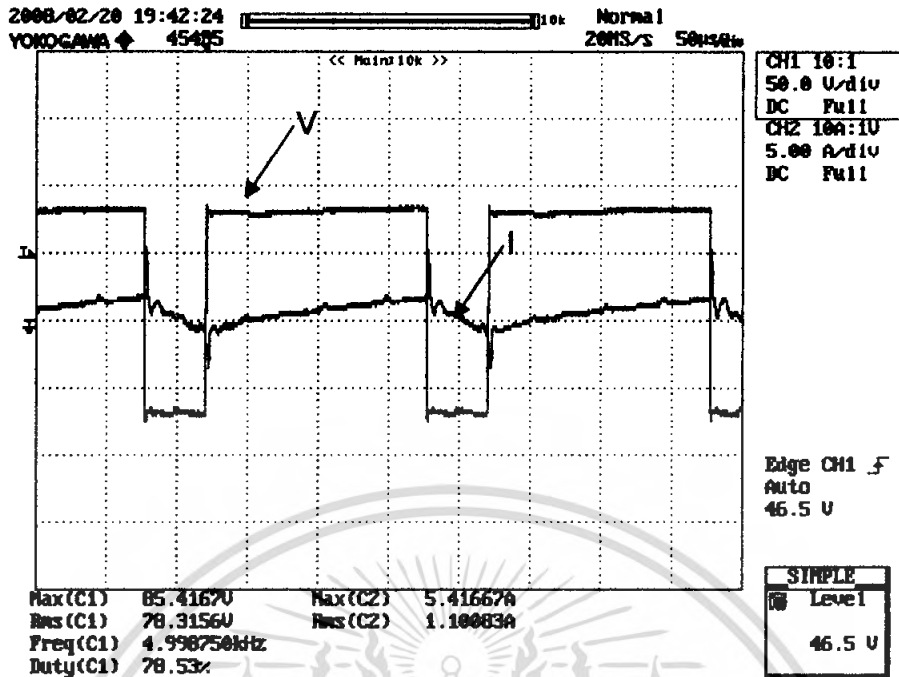


รูปที่ 4.61 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

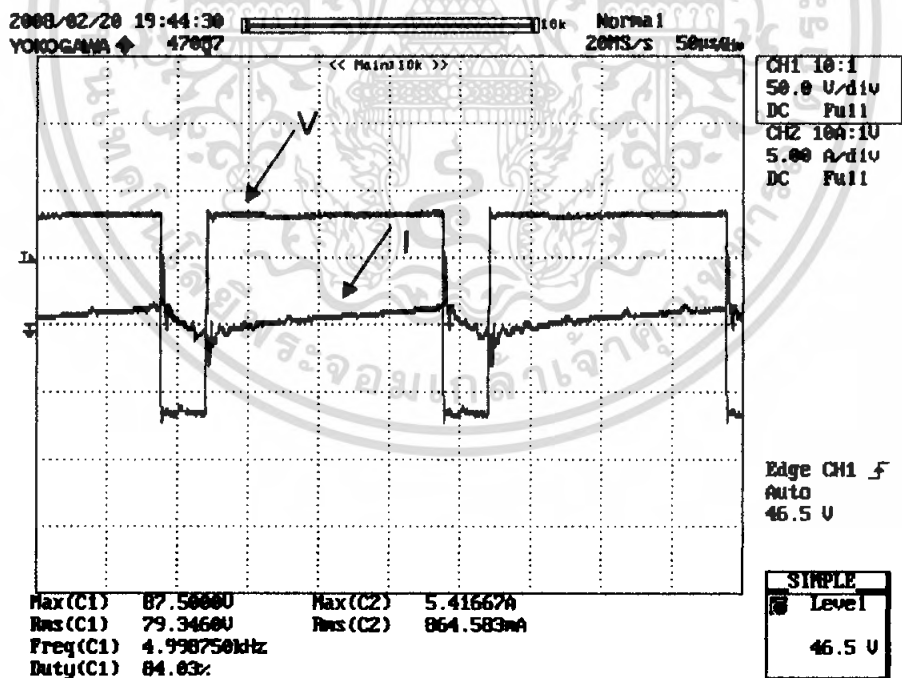


รูปที่ 4.62 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

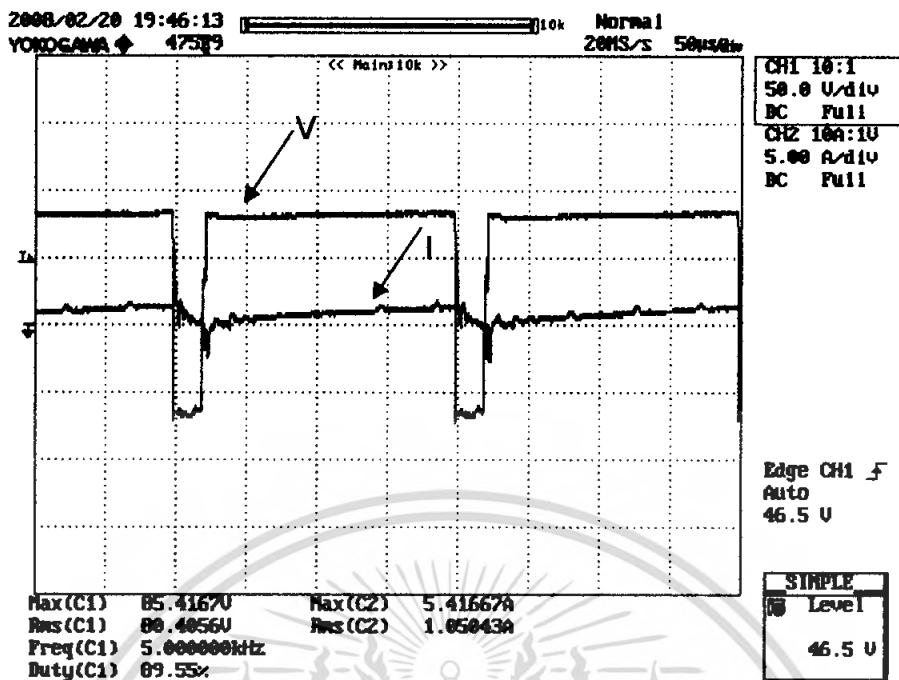


รูปที่ 4.63 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

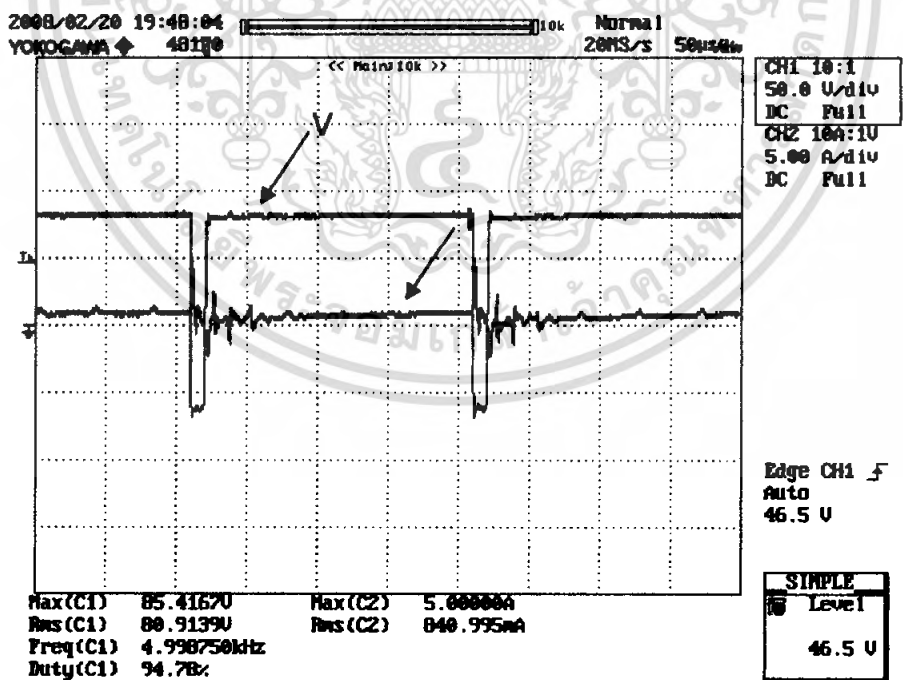


รูปที่ 4.64 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

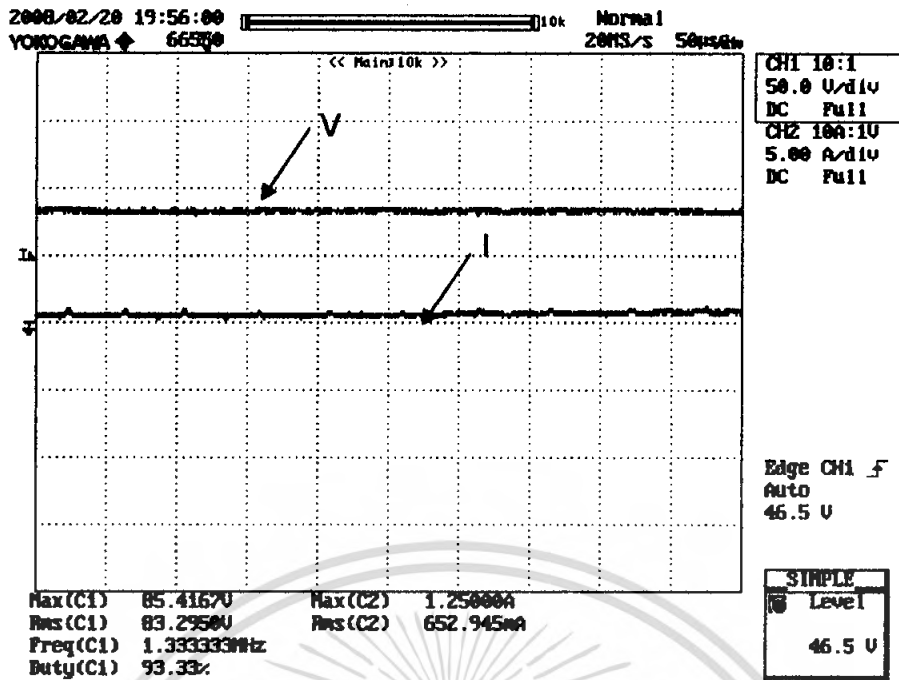


รูปที่ 4.65 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ



รูปที่ 4.66 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ



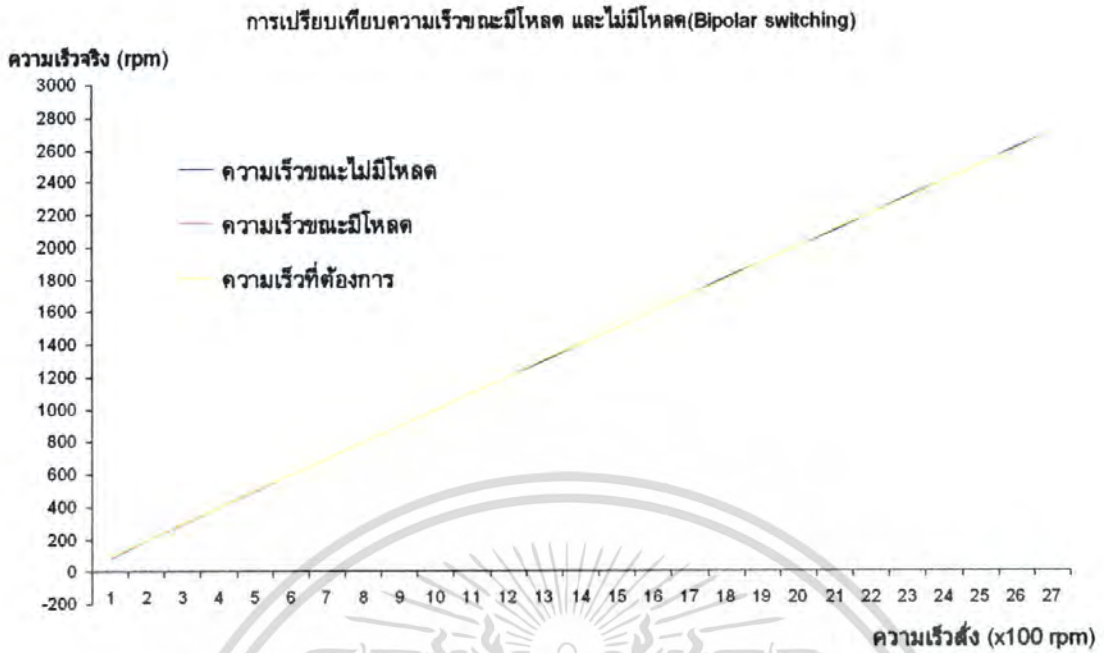
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง Bipolar แบบ Close Loop ทิศทาง Forward

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	97	74.89	1.43	85	64.07	7.70
200	192	74.32	1.45	196	61.37	7.88
300	290	74.15	1.67	293	65.79	7.05
400	398	75.54	1.46	397	60.04	6.92
500	492	74.44	1.32	496	58.24	7.69
600	597	74.56	1.50	599	57.41	8.66
700	693	75.22	1.35	-	-	-
800	798	75.22	1.50	-	-	-
900	899	75.55	1.23	-	-	-
1000	998	75.77	1.12	-	-	-
1100	1101	76.37	1.56	-	-	-
1200	1198	76.42	1.34	-	-	-
1300	1298	76.13	1.41	-	-	-
1400	1401	77.20	1.22	-	-	-
1500	1499	78.32	1.10	-	-	-
1600	1598	78.49	1.08	-	-	-
1700	1701	78.15	1.06	-	-	-
1800	1802	79.35	0.85	-	-	-
1900	1901	78.87	1.15	-	-	-
2000	2002	80.00	0.96	-	-	-
2100	2098	80.40	1.05	-	-	-
2200	2200	80.85	0.97	-	-	-
2300	2303	81.43	0.90	-	-	-
2400	2399	80.91	0.84	-	-	-
2500	2499	82.81	1.01	-	-	-
2600	2601	81.51	0.57	-	-	-
2700	2700	83.24	0.65	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

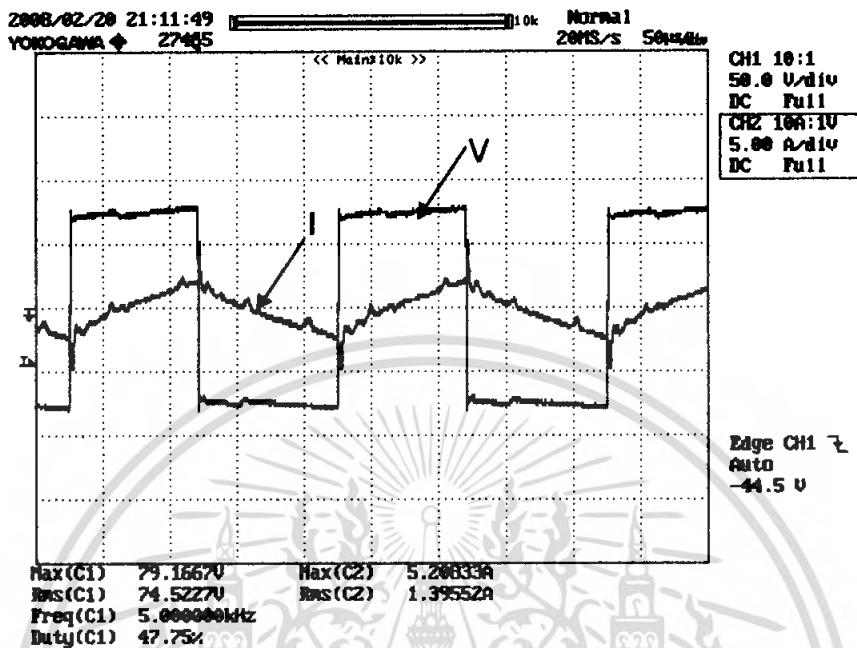


รูปที่ 4.68 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Bipolar Switching

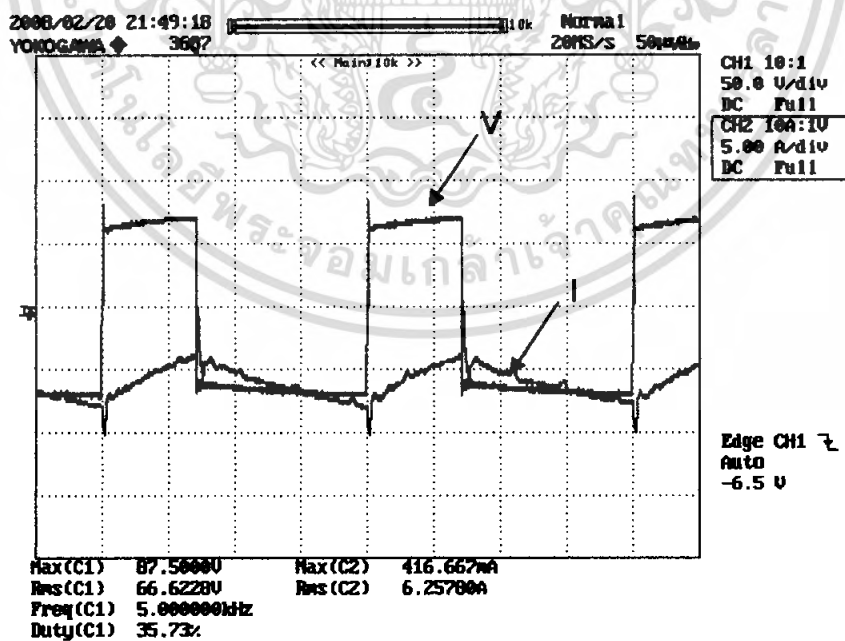
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. PWM แบบ Bipolar Close Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์บนมอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse

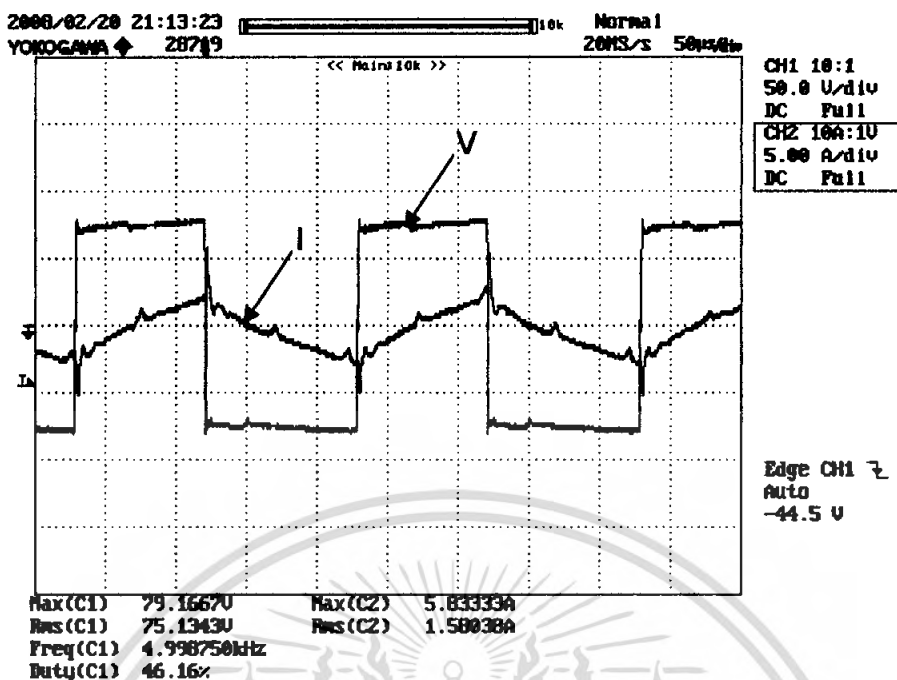


รูปที่ 4.69 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

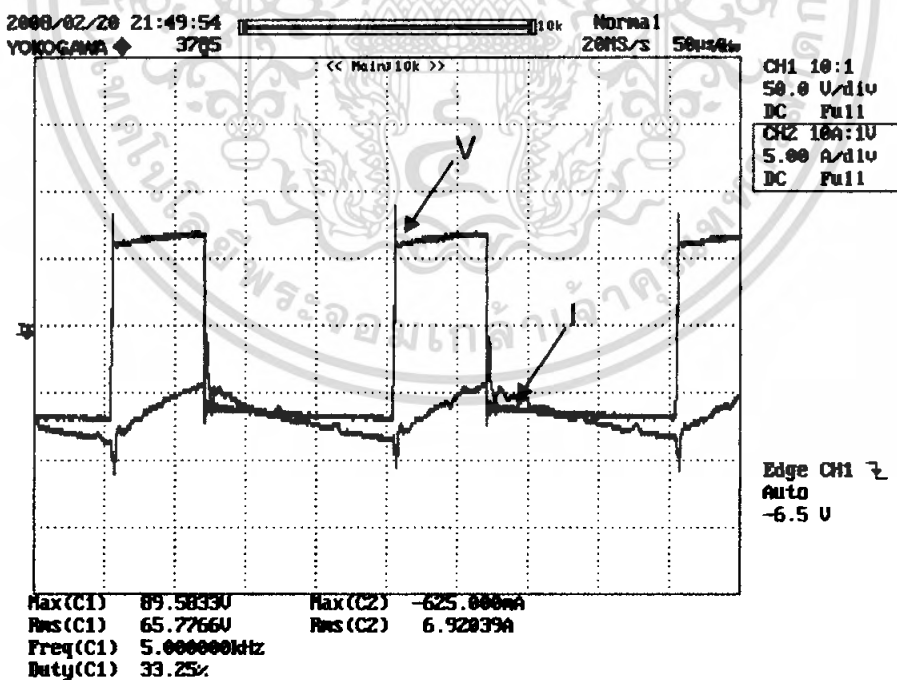


รูปที่ 4.70 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -100 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

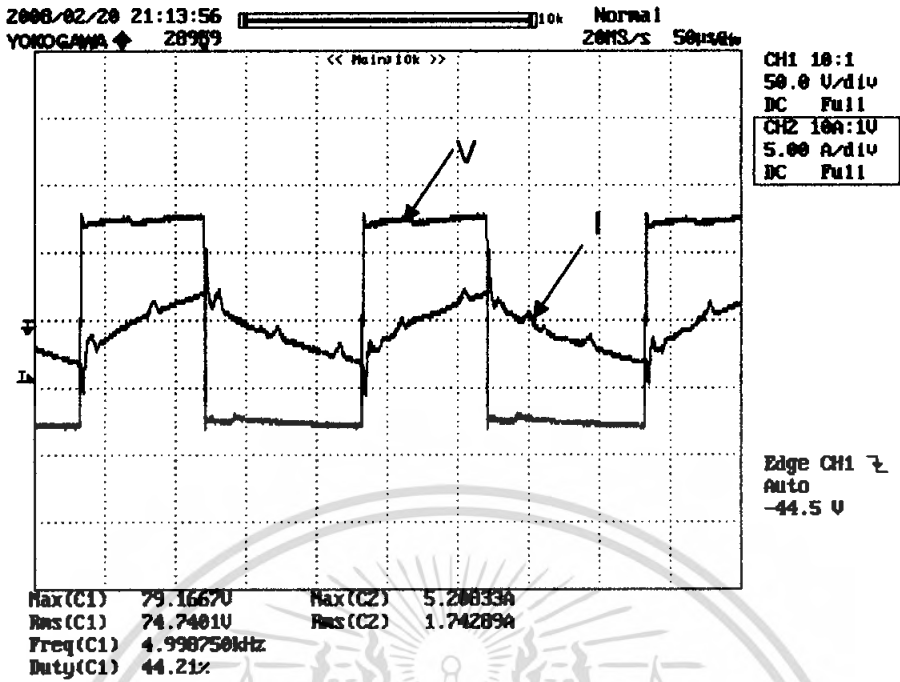


รูปที่ 4.71 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

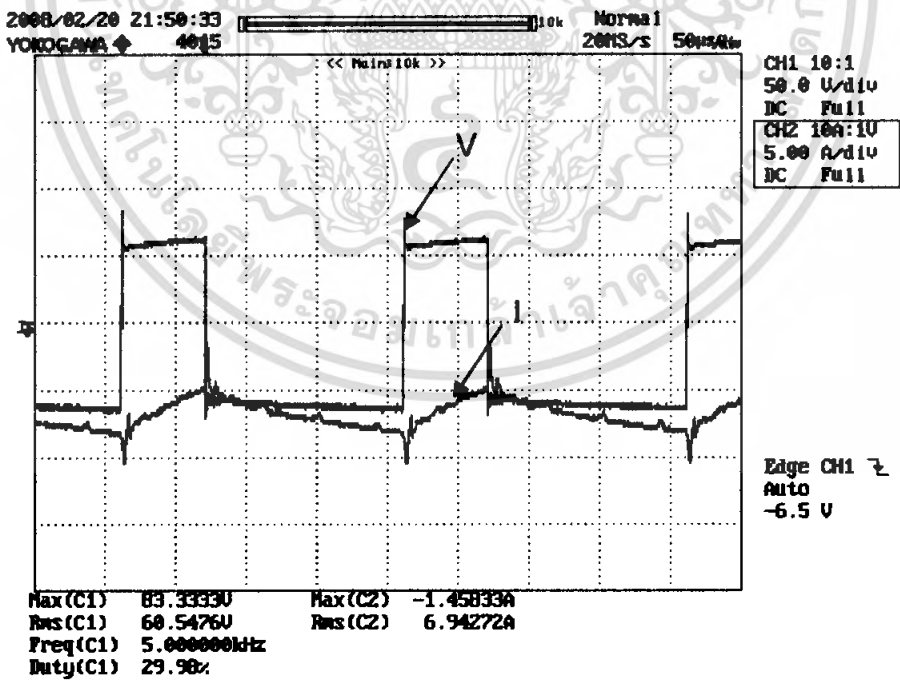


รูปที่ 4.72 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -200 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

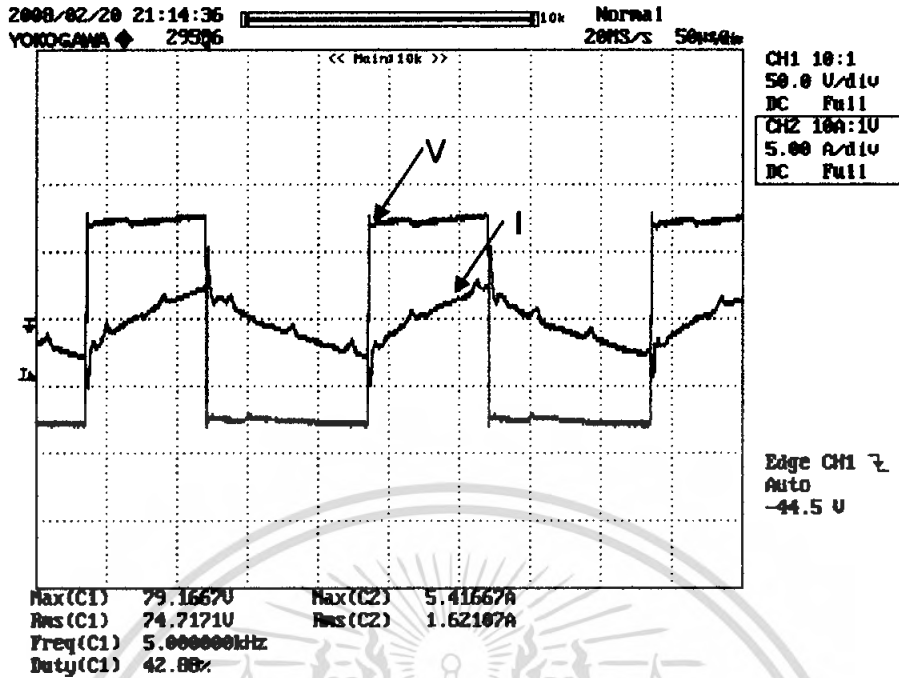


รูปที่ 4.73 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -300 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

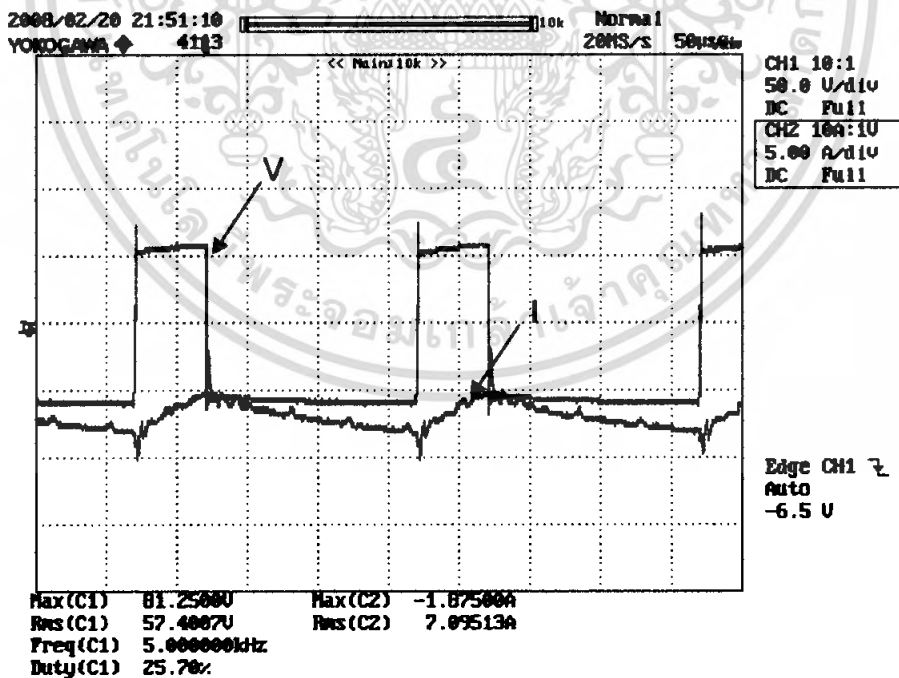


รูปที่ 4.74 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -300 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

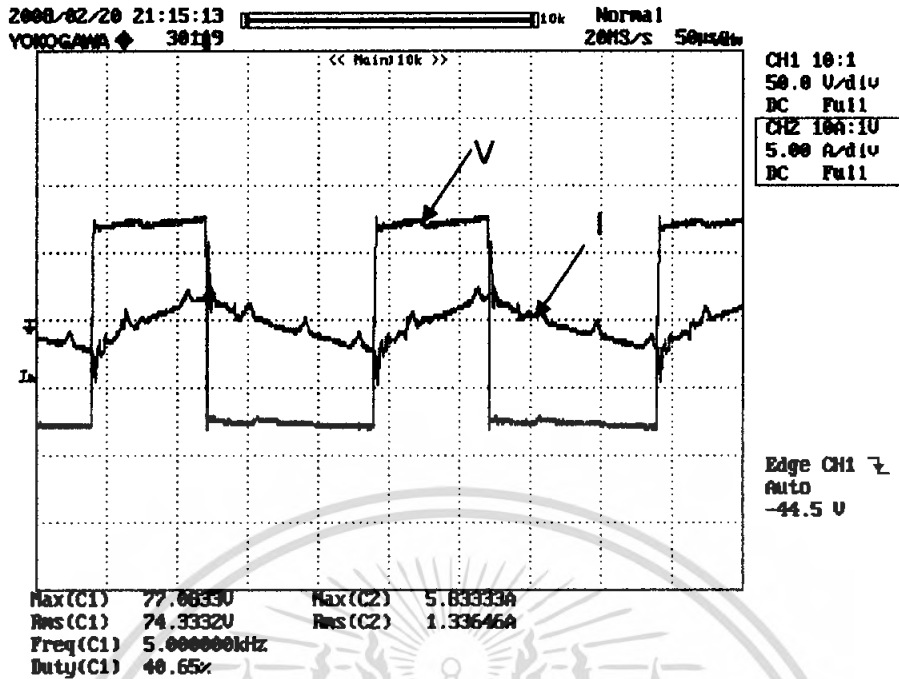


รูปที่ 4.75 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

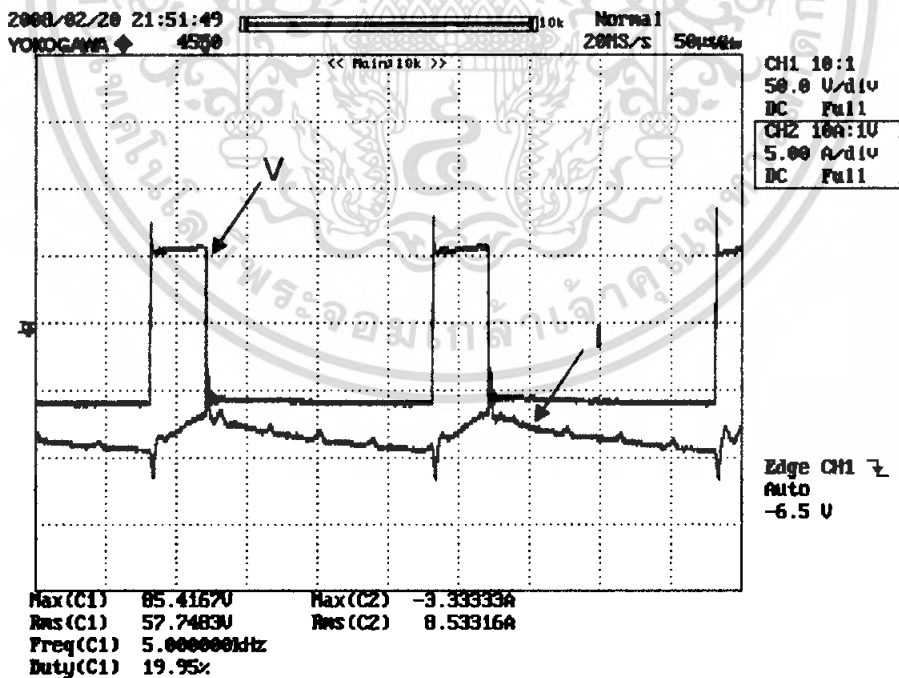


รูปที่ 4.76 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -400 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

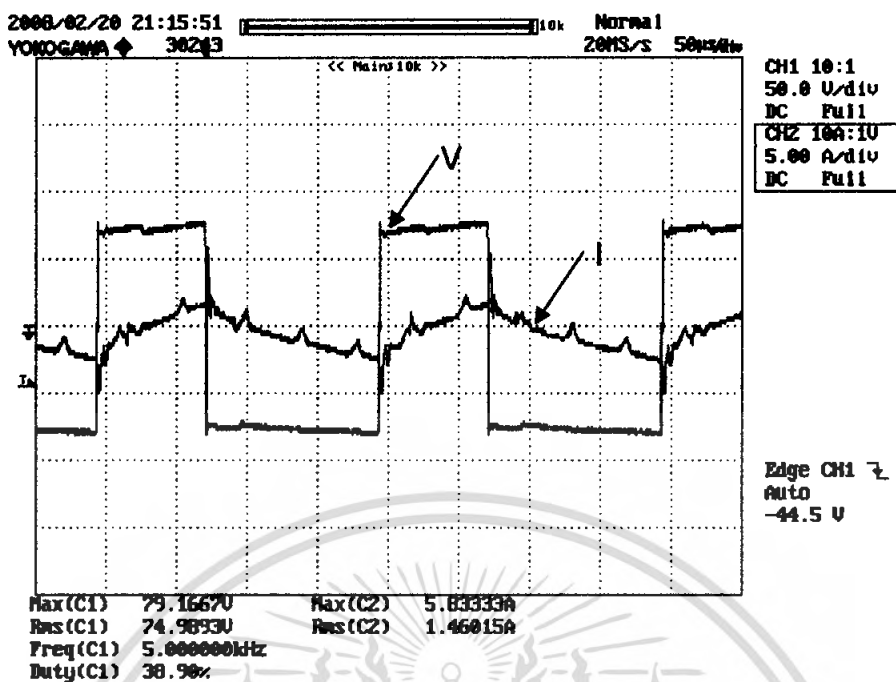


รูปที่ 4.77 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

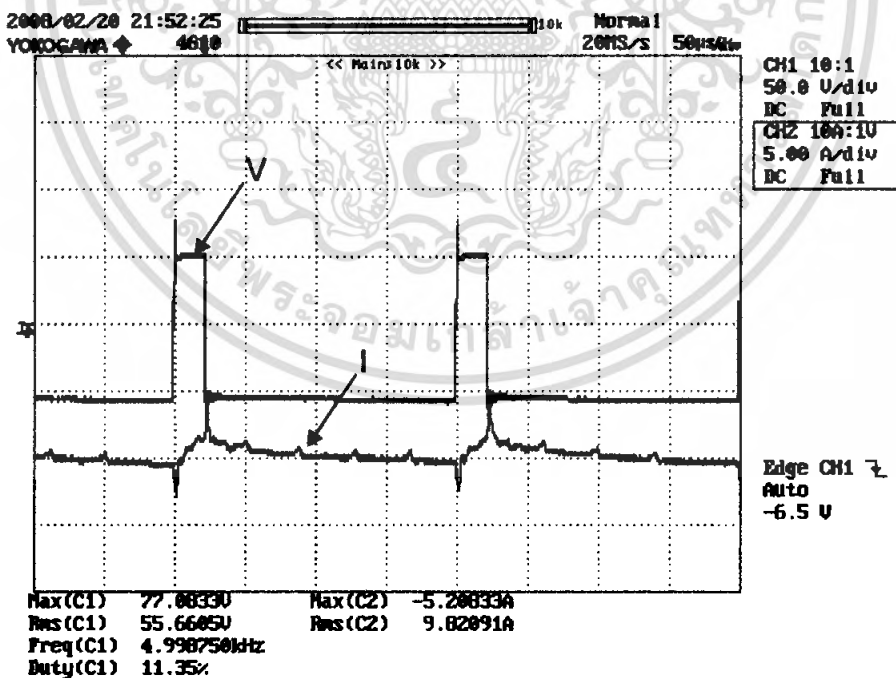


รูปที่ 4.78 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -500 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

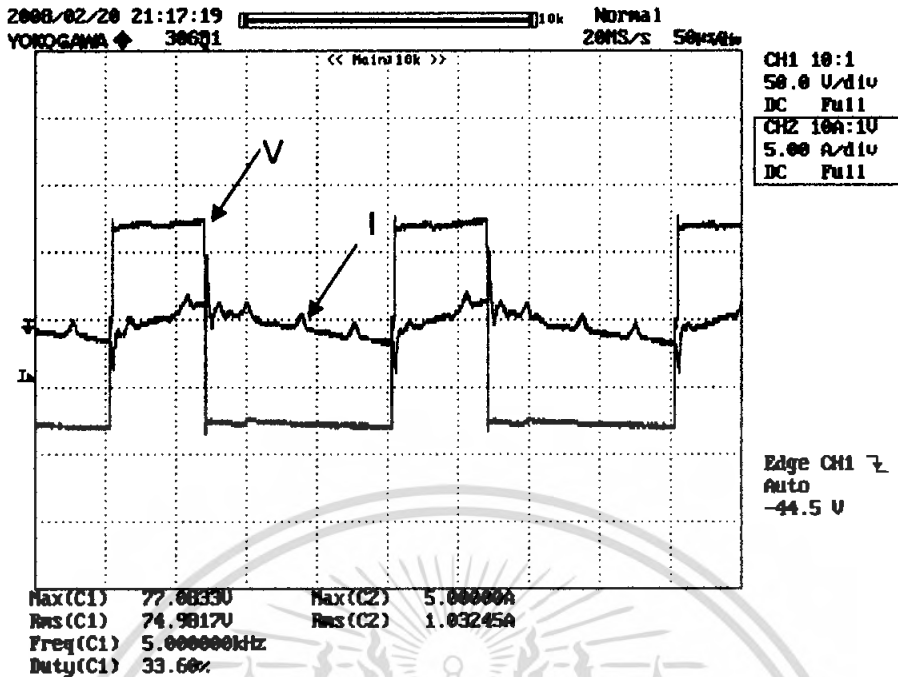


รูปที่ 4.79 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -600 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

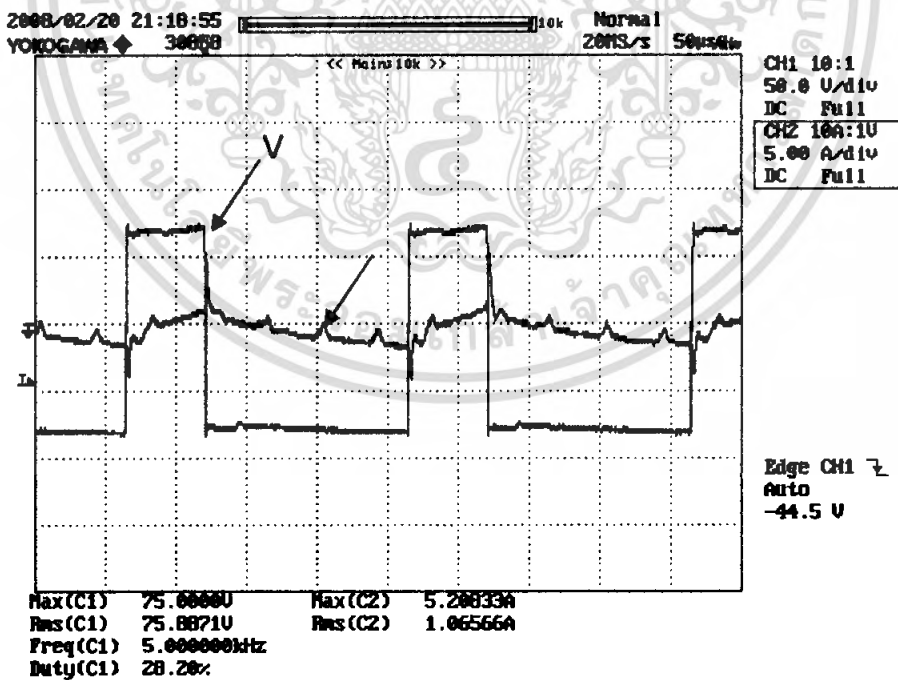


รูปที่ 4.80 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -600 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

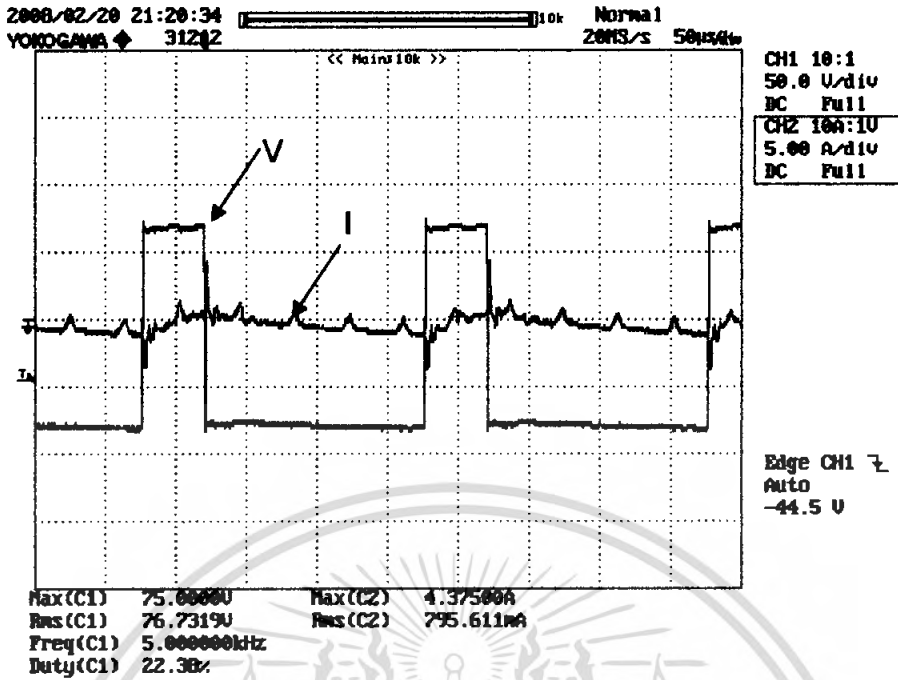


รูปที่ 4.81 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

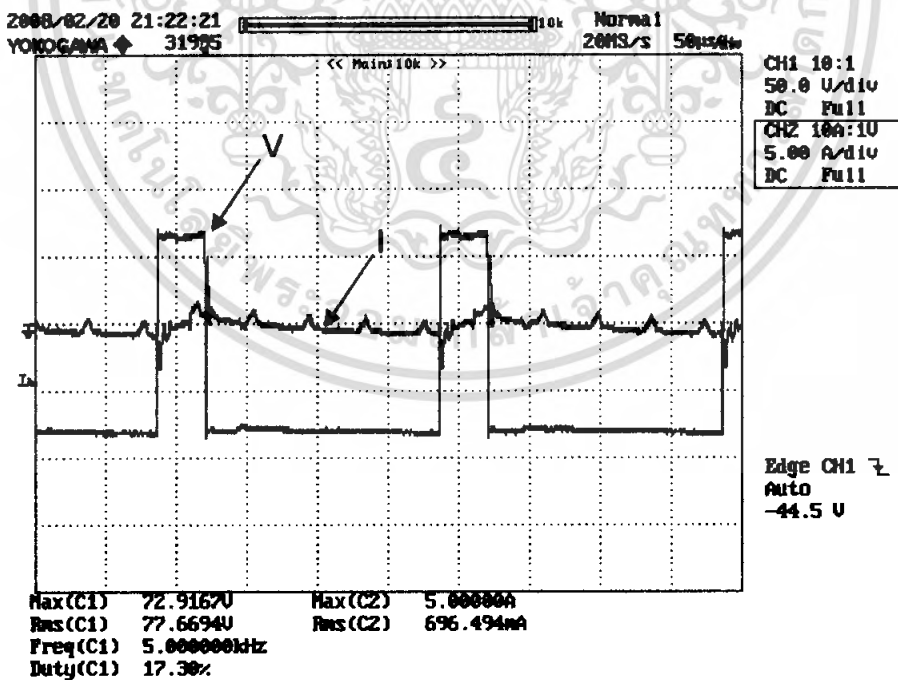


รูปที่ 4.82 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

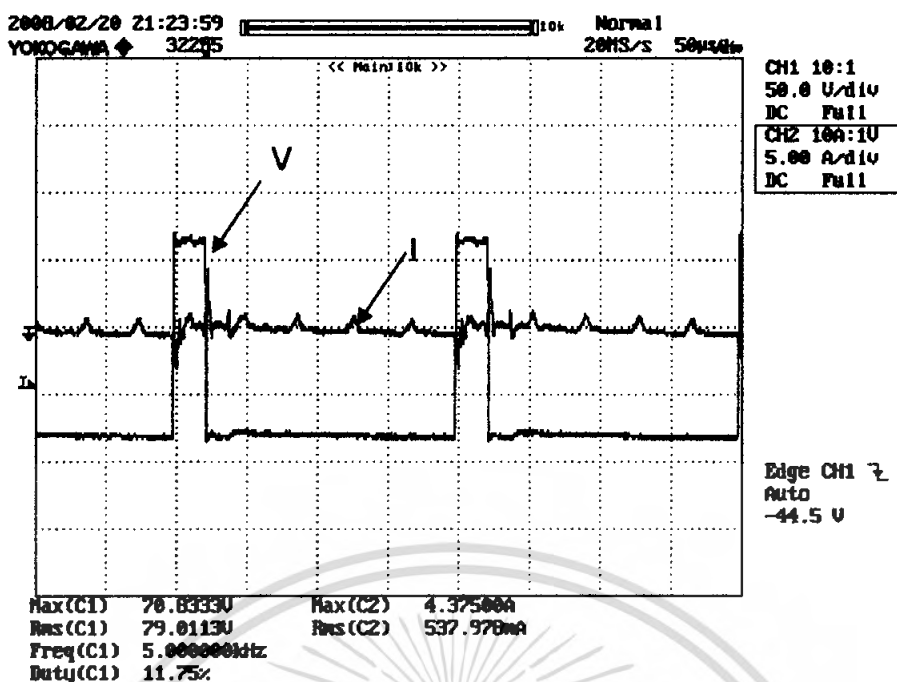


รูปที่ 4.83 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

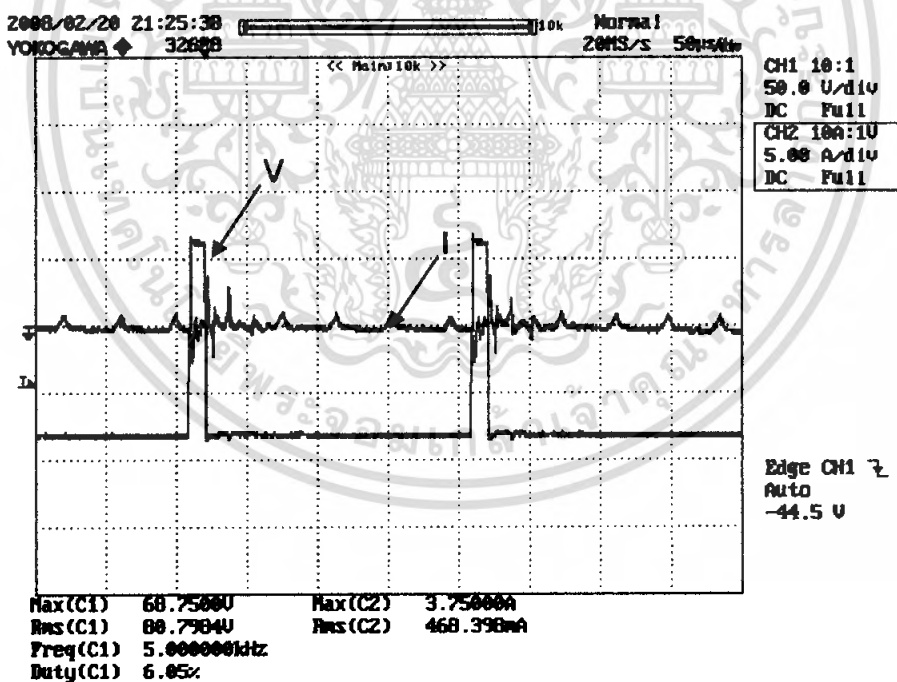


รูปที่ 4.84 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1800 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

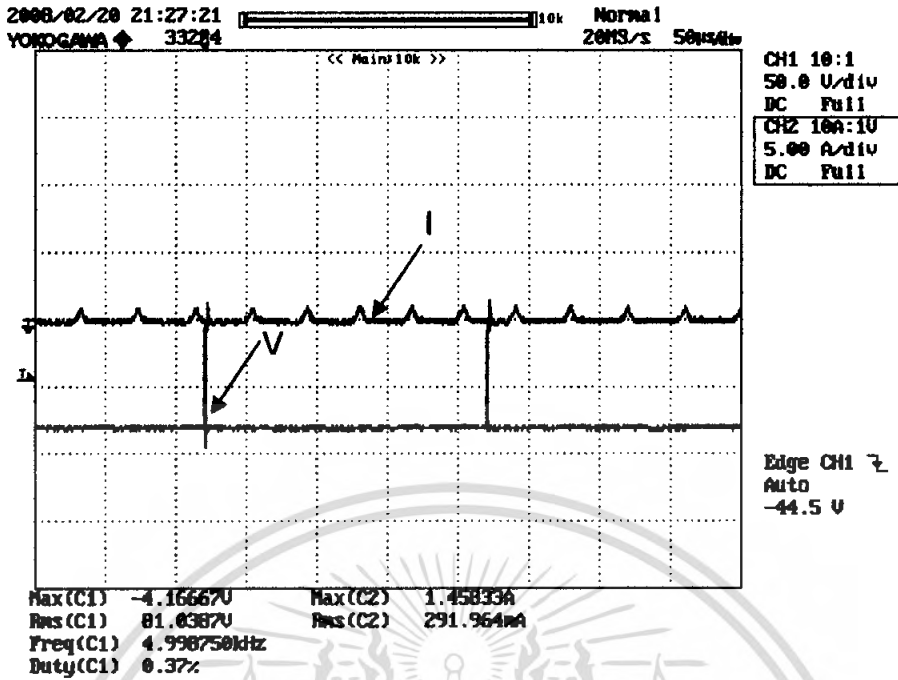


รูปที่ 4.85 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ



รูปที่ 4.86 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2400 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.87 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2700 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

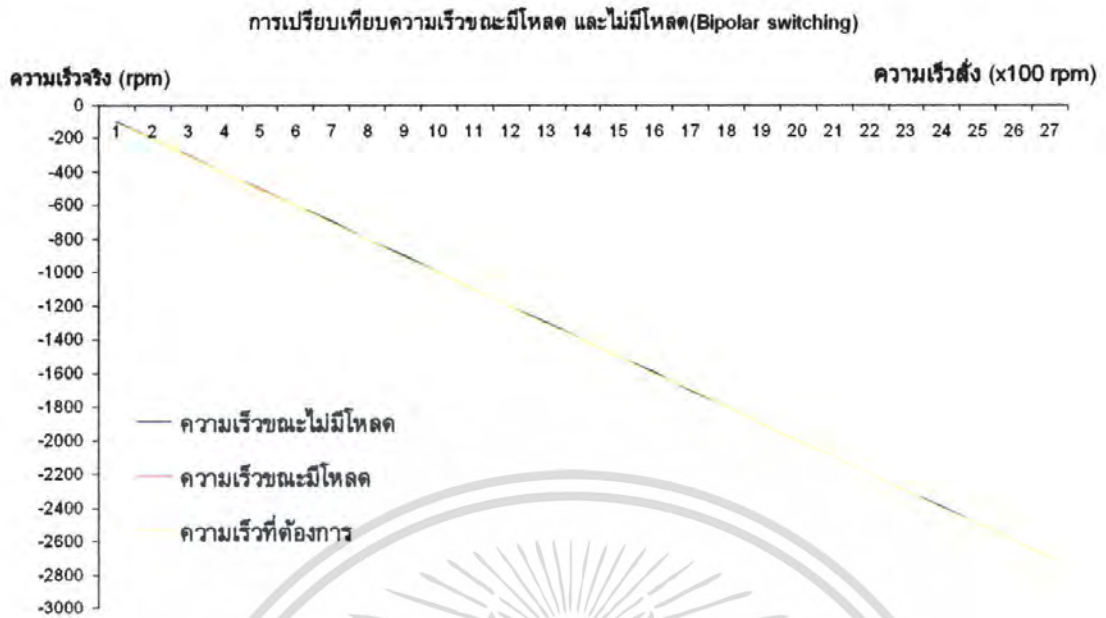
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง Bipolar แบบ Close Loop ทิศทาง Reverse

ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	90	74.52	1.40	81	66.25	6.25
200	196	75.13	1.58	196	65.77	6.92
300	299	74.74	1.74	295	60.54	69.45
400	401	74.72	1.62	398	57.40	7.09
500	499	74.33	1.34	492	57.04	8.53
600	598	74.99	1.46	598	55.66	9.82
700	693	75.20	1.35	-	-	-
800	793	75.41	1.11	-	-	-
900	898	74.98	1.03	-	-	-
1000	1000	75.17	1.02	-	-	-
1100	1099	75.28	1.07	-	-	-
1200	1198	75.89	1.07	-	-	-
1300	1298	75.66	0.85	-	-	-
1400	1400	76.61	0.91	-	-	-
1500	1499	76.73	0.79	-	-	-
1600	1595	76.65	0.64	-	-	-
1700	1702	77.69	0.72	-	-	-
1800	1794	77.67	0.70	-	-	-
1900	1899	77.40	0.61	-	-	-
2000	2002	78.15	0.58	-	-	-
2100	2101	79.01	0.54	-	-	-
2200	2198	78.92	0.55	-	-	-
2300	2299	79.65	0.49	-	-	-
2400	2402	80.79	0.47	-	-	-
2500	2503	80.00	0.46	-	-	-
2600	2604	80.92	0.54	-	-	-
2700	2702	81.04	0.29	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

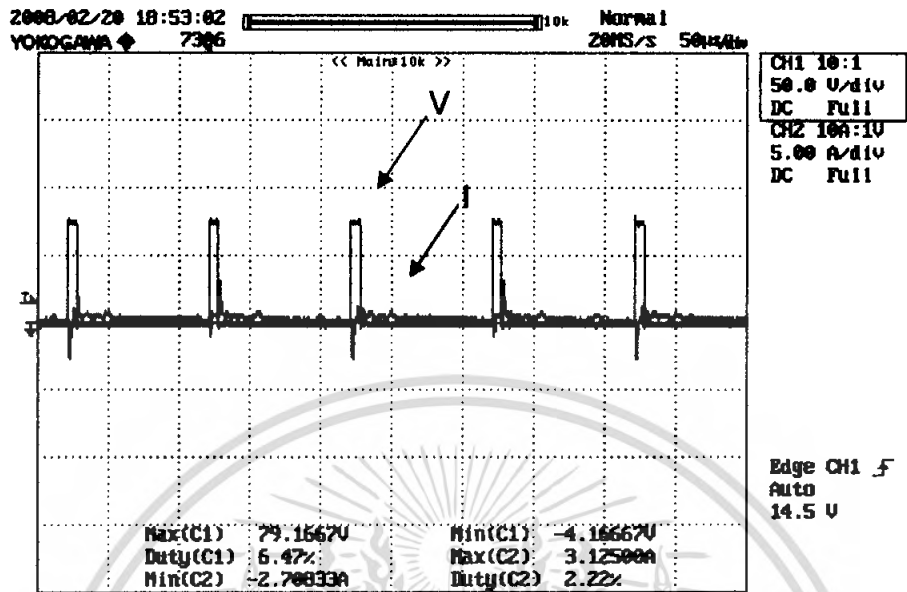


รูปที่ 4.88 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Bipolar Switching

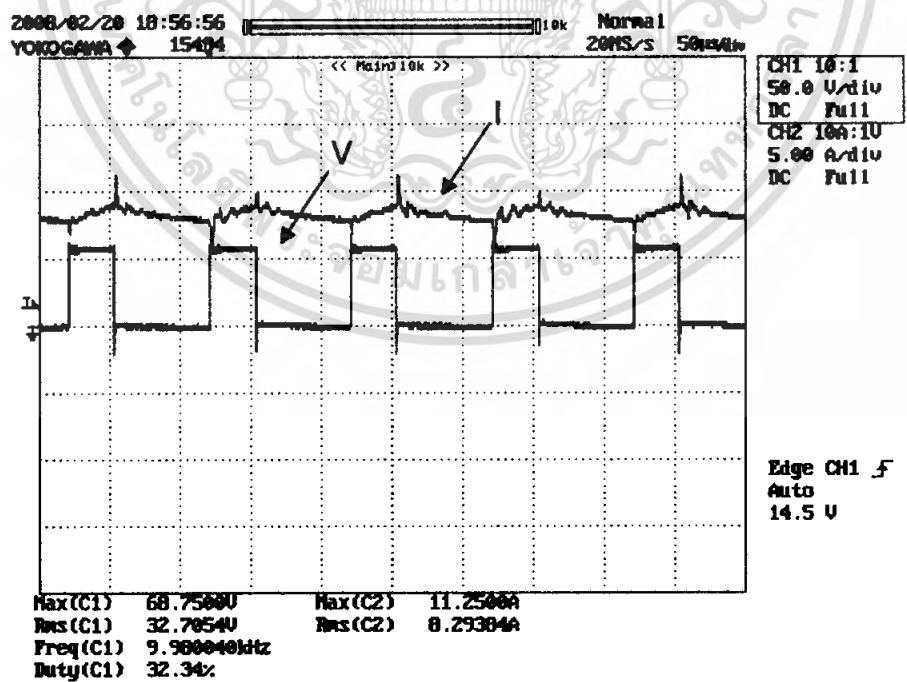
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. PWM แบบ Unipolar Close Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขั้วมอเตอร์หมุนในทิศทาง Forward

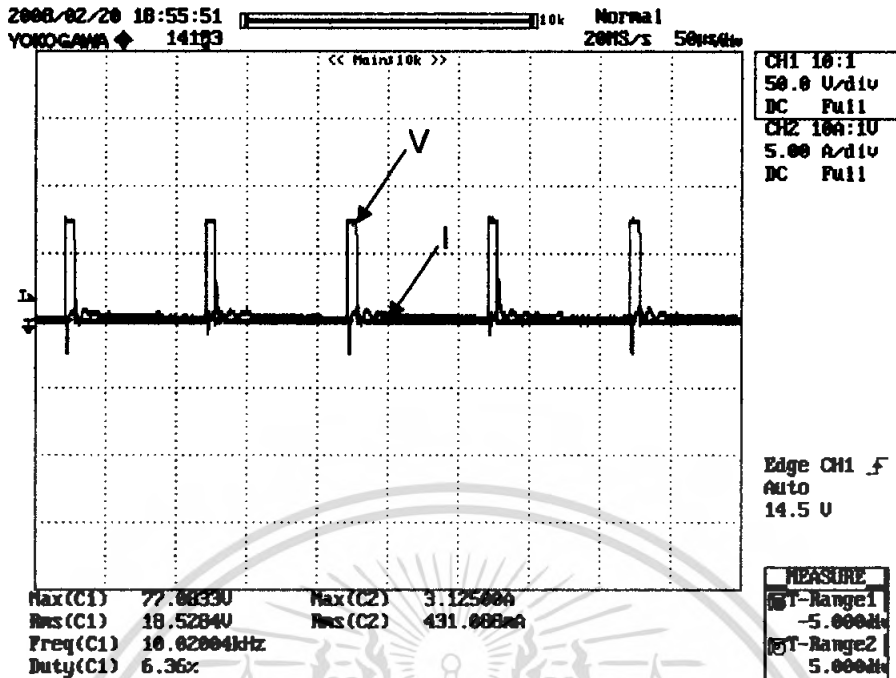


รูปที่ 4.89 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

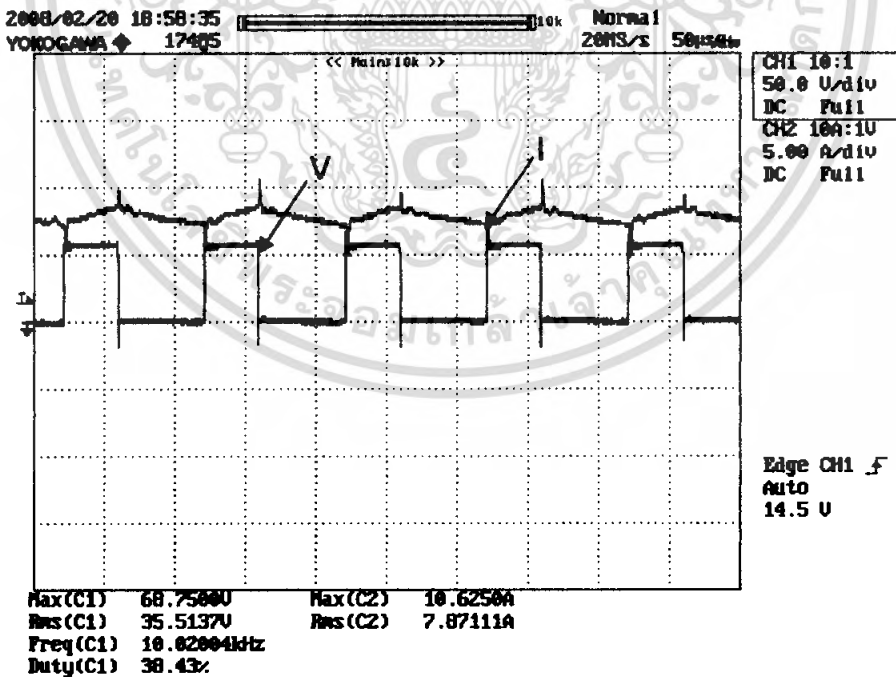


รูปที่ 4.90 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

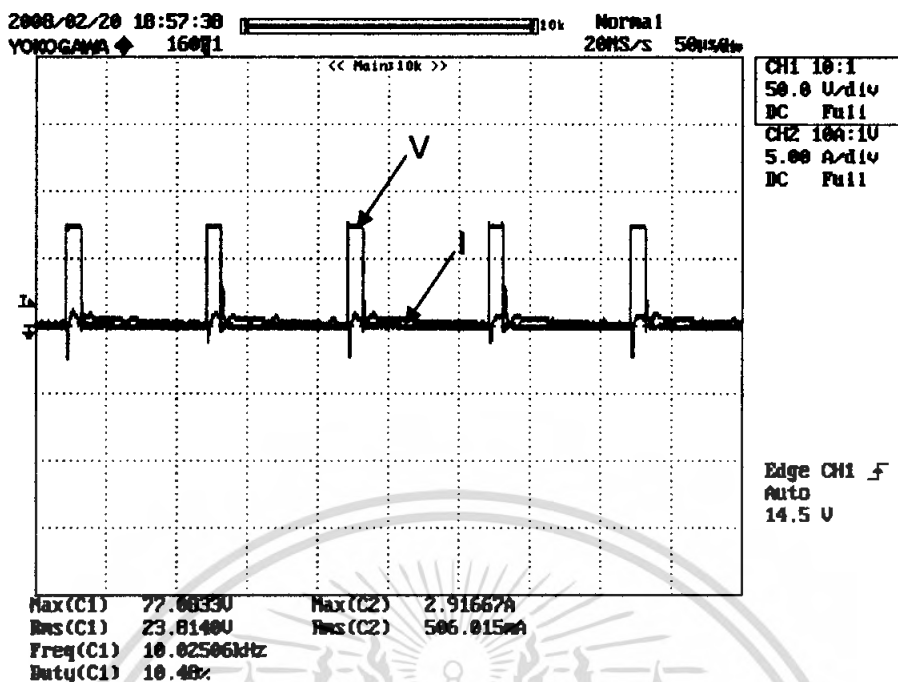


รูปที่ 4.91 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

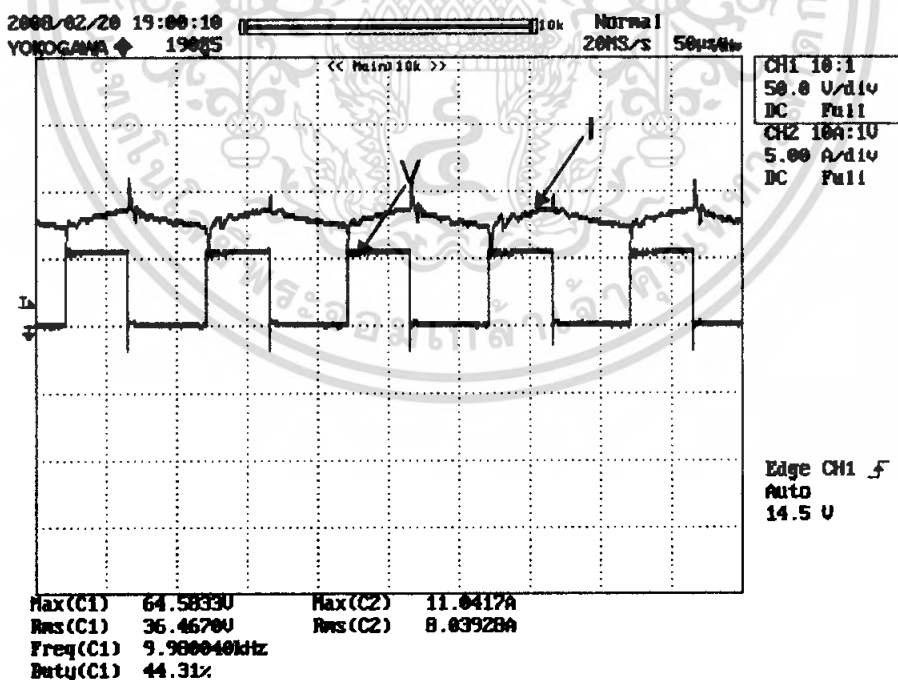


รูปที่ 4.92 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

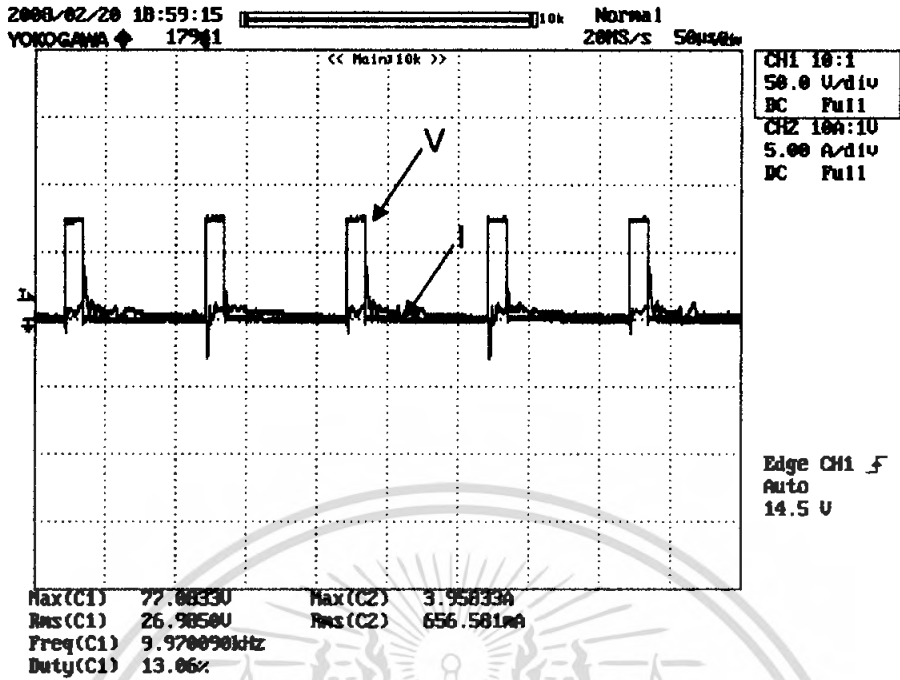


รูปที่ 4.93 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ

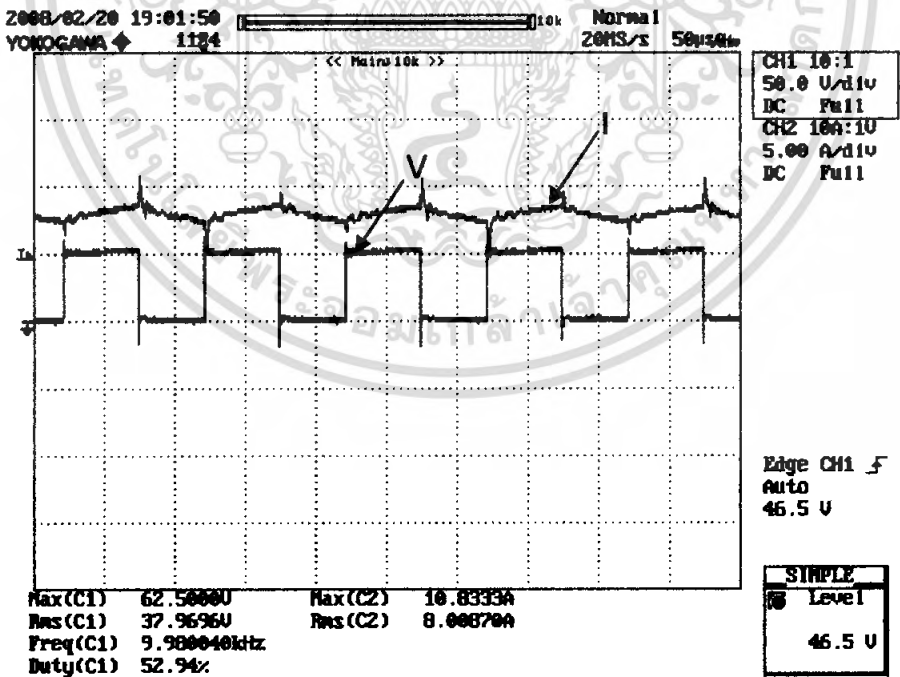


รูปที่ 4.94 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที มีภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

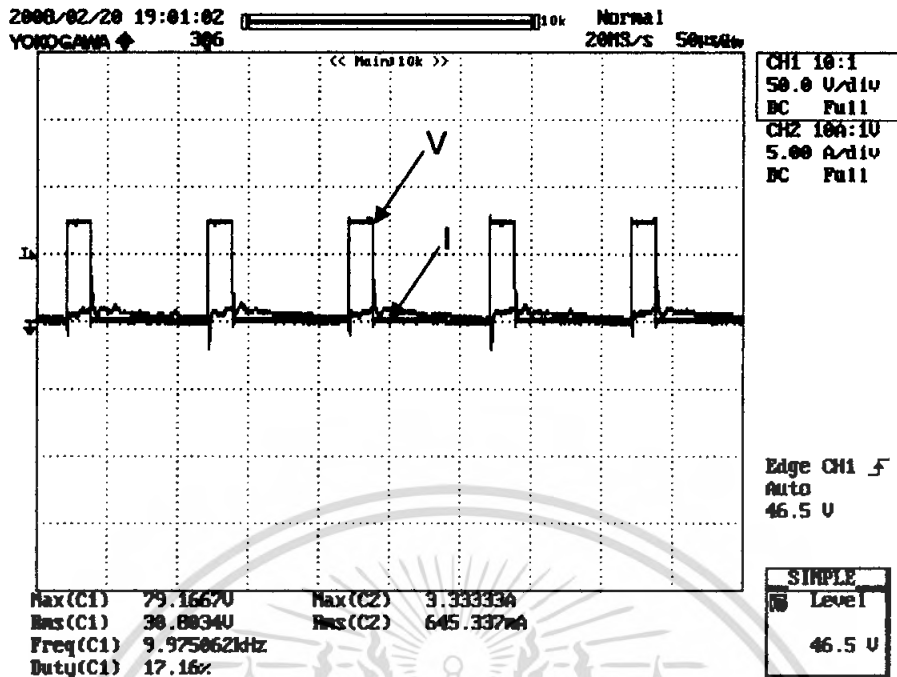


รูปที่ 4.95 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

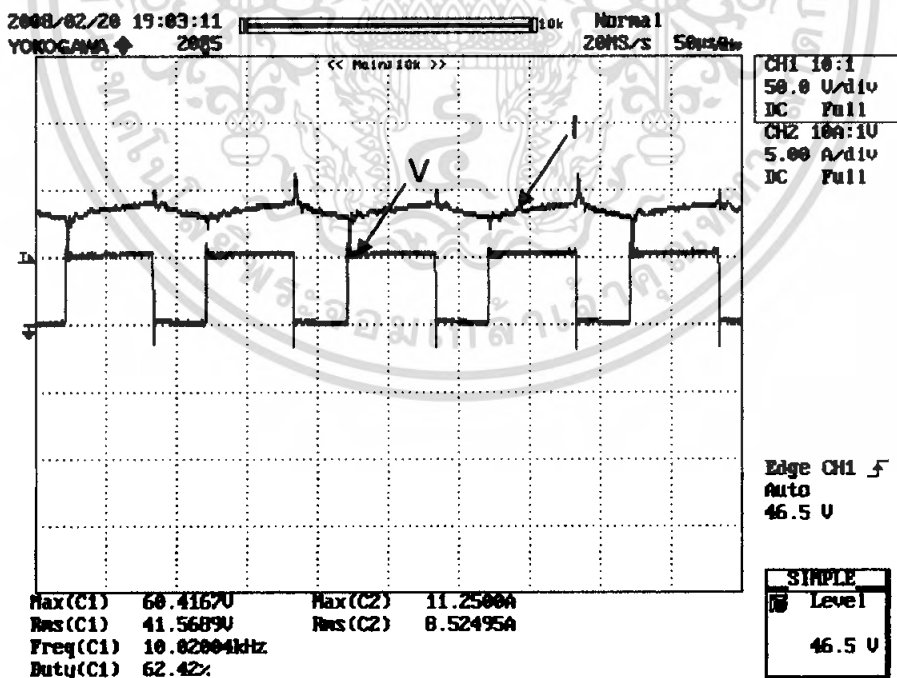


รูปที่ 4.96 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

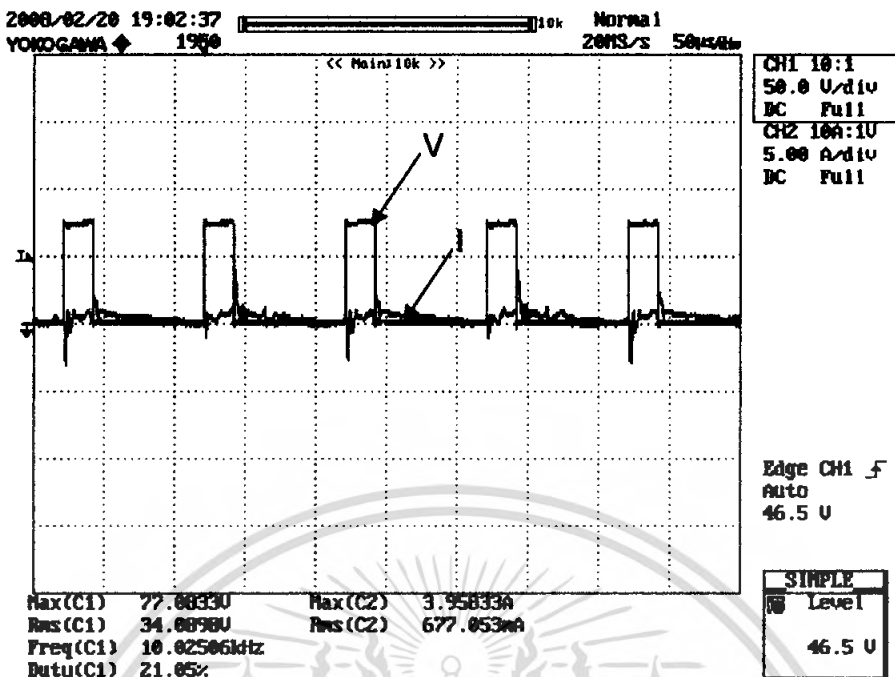


รูปที่ 4.97 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

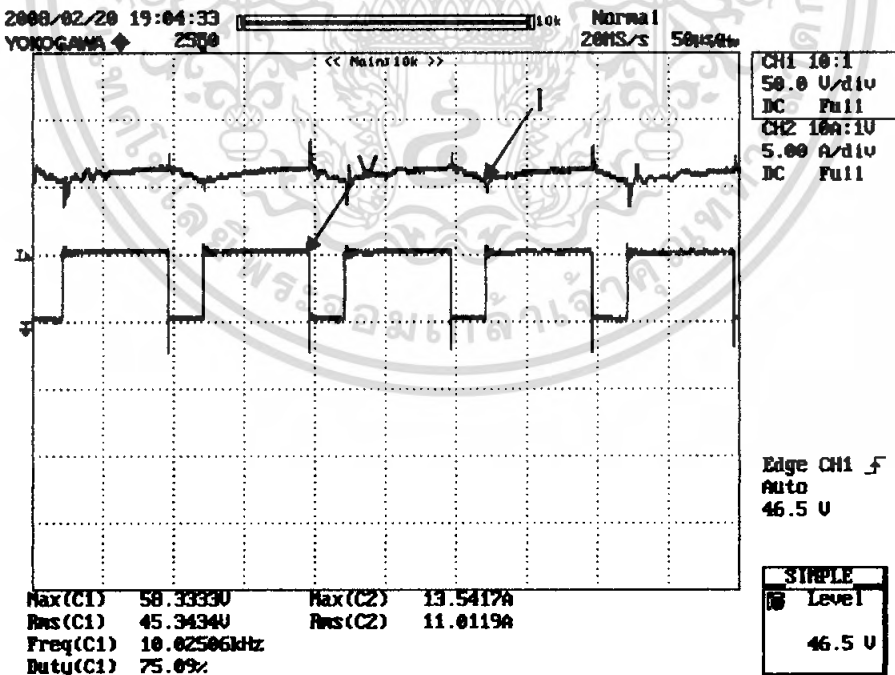


รูปที่ 4.98 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

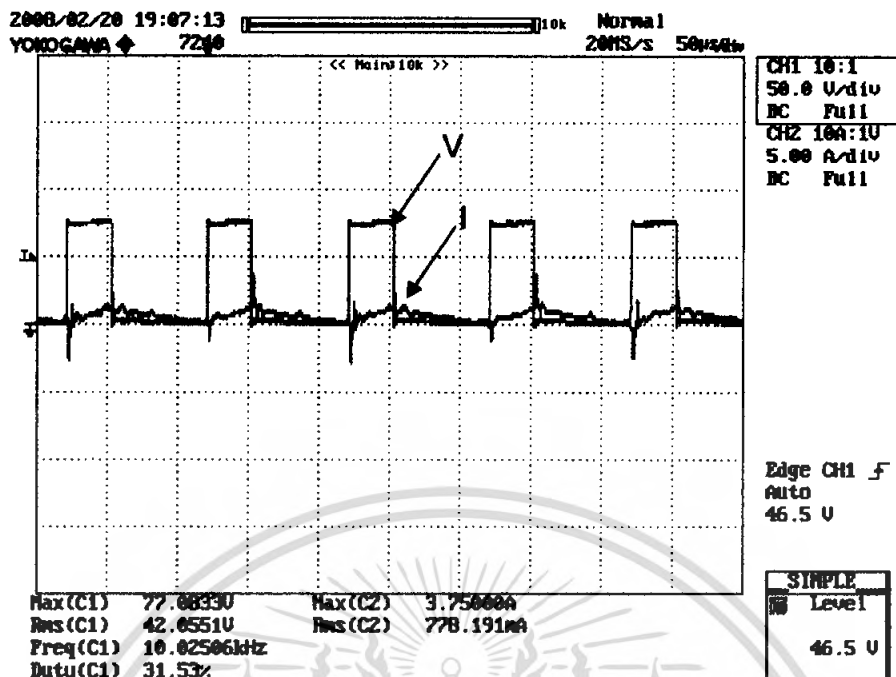


รูปที่ 4.99 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

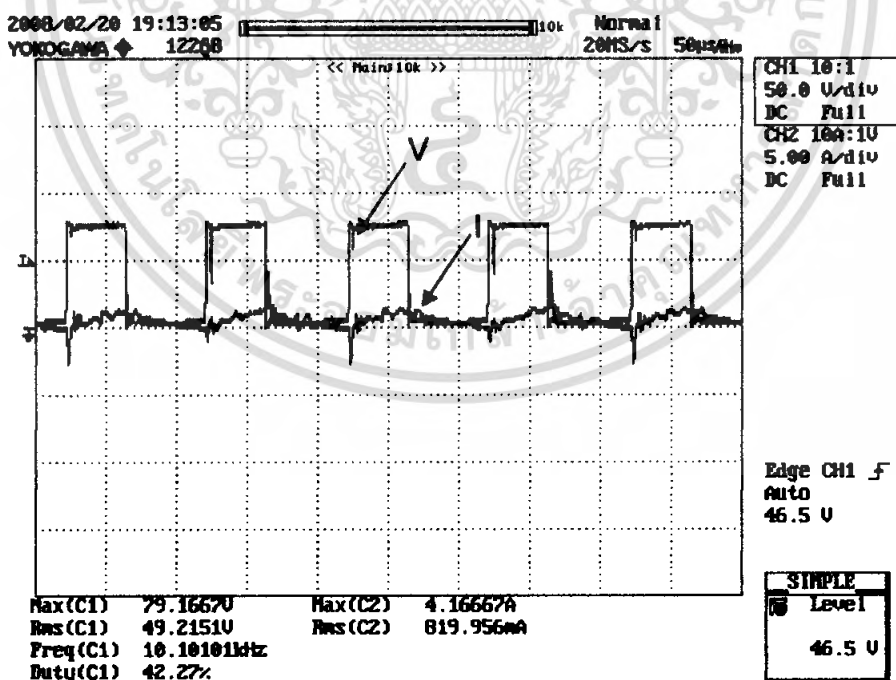


รูปที่ 4.100 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

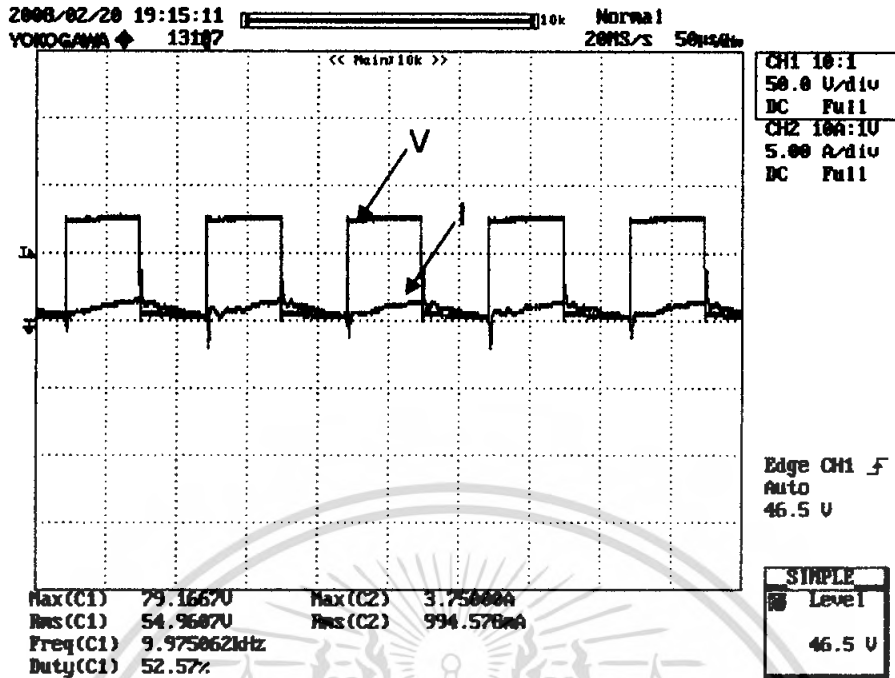


รูปที่ 4.101 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

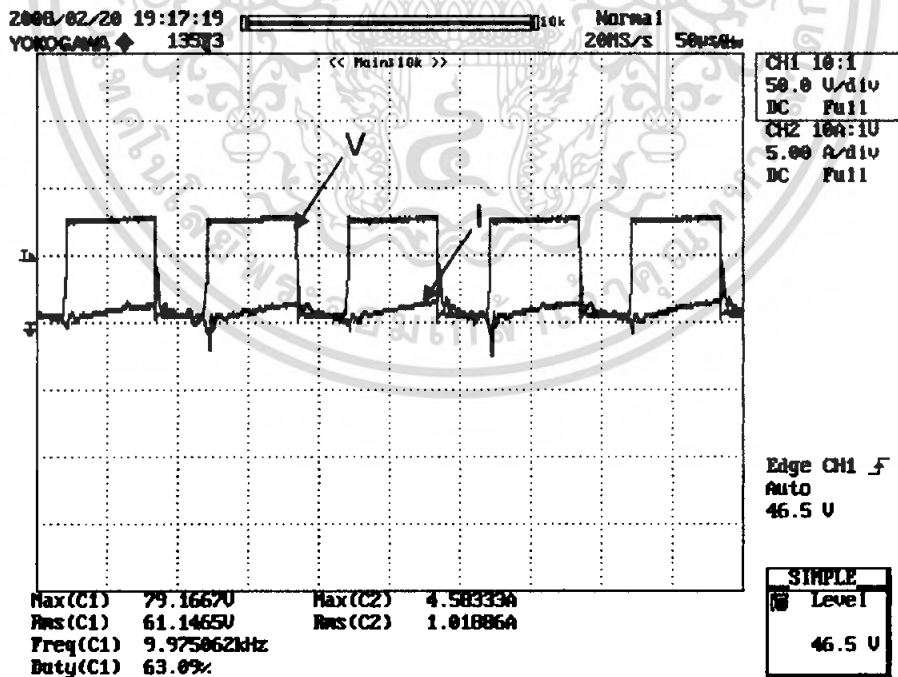


รูปที่ 4.102 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

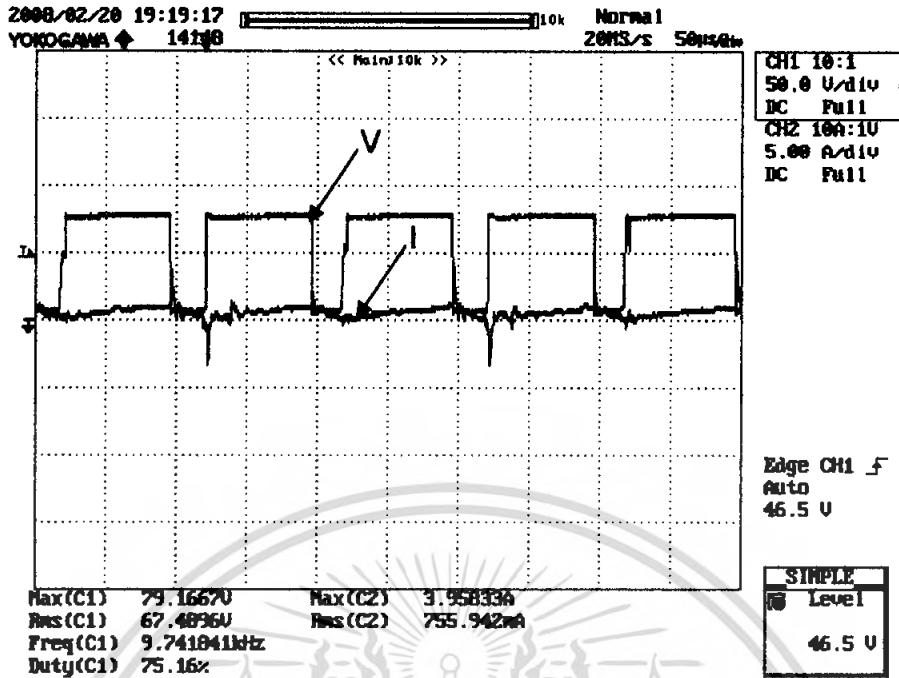


รูปที่ 4.103 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

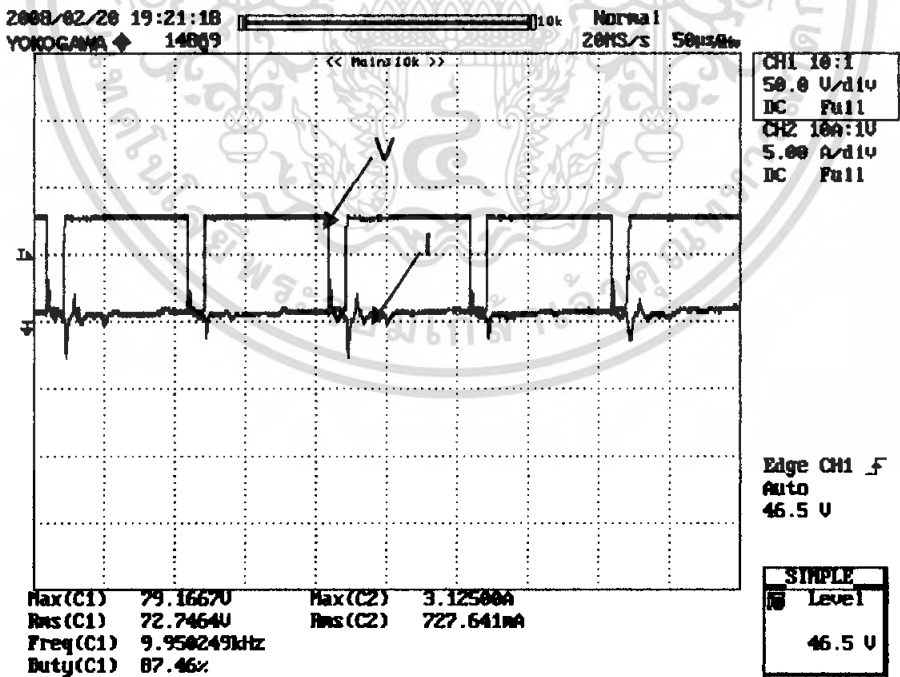


รูปที่ 4.104 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

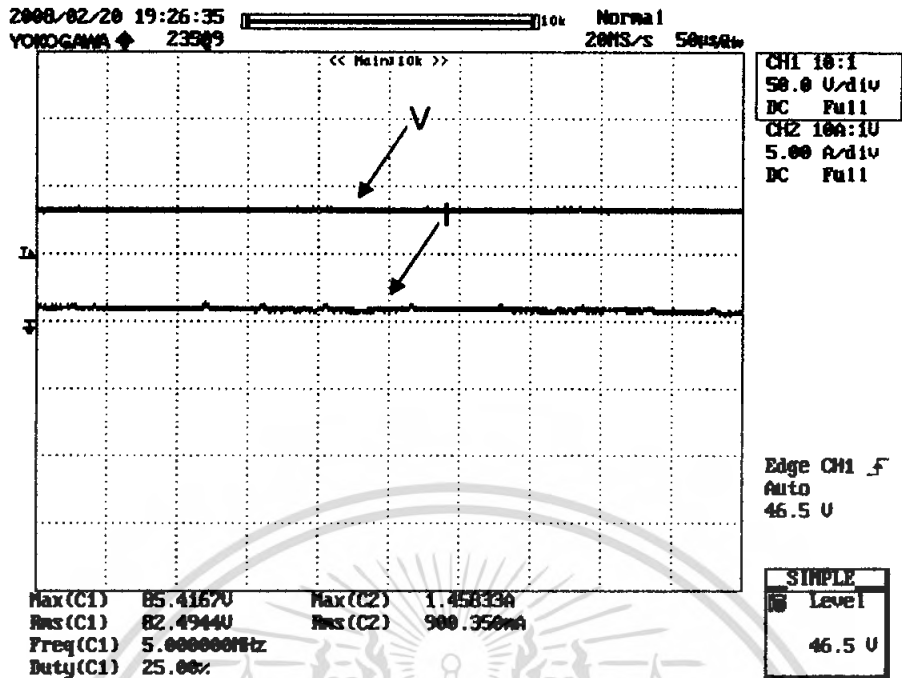


รูปที่ 4.105 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2100 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ



รูปที่ 4.106 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.107 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

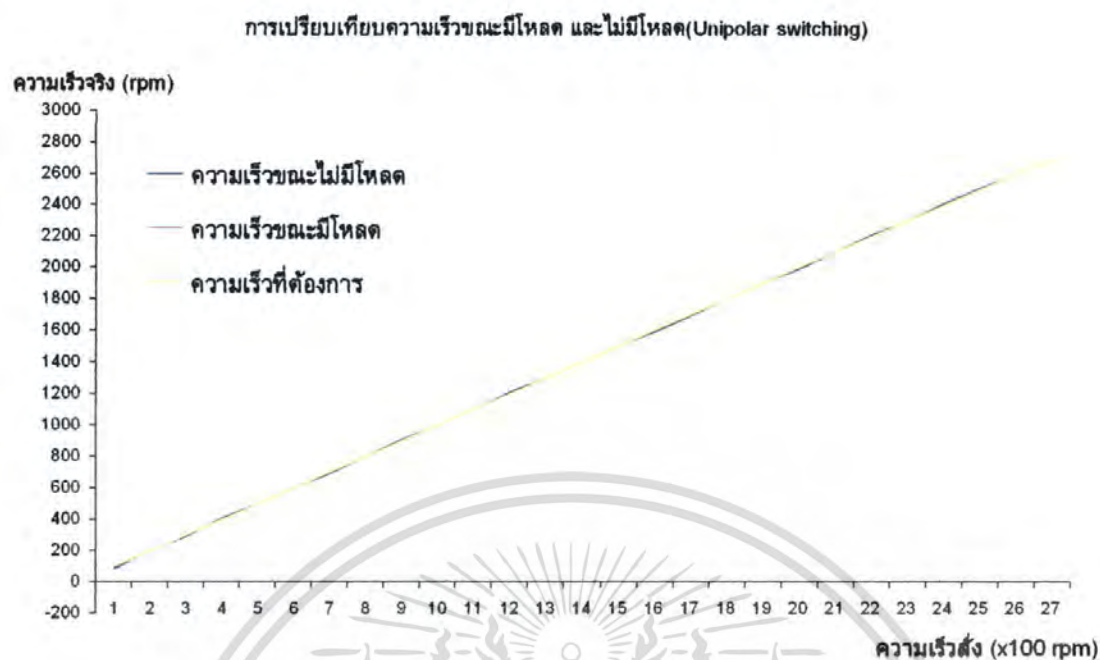
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลอง Unipolar แบบ Close Loop ที่ทิศทาง Forward

ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	93	18.52	0.43	84	32.70	7.29
200	198	23.81	0.51	194	35.51	7.87
300	295	26.99	0.66	296	36.46	8.03
400	406	30.80	0.65	398	37.98	8.05
500	501	34.09	0.68	498	41.56	8.52
600	601	35.31	0.60	599	45.34	11.01
700	691	42.06	0.78	-	-	-
800	799	43.78	0.73	-	-	-
900	908	46.19	0.79	-	-	-
1000	1002	49.22	0.82	-	-	-
1100	1104	51.89	0.78	-	-	-
1200	1209	53.65	0.83	-	-	-
1300	1301	54.96	0.99	-	-	-
1400	1404	57.65	0.86	-	-	-
1500	1503	61.02	0.91	-	-	-
1600	1592	61.15	1.02	-	-	-
1700	1695	63.10	0.93	-	-	-
1800	1802	64.98	1.05	-	-	-
1900	1901	67.49	0.76	-	-	-
2000	1993	68.89	1.27	-	-	-
2100	2102	70.68	0.96	-	-	-
2200	2205	72.75	0.73	-	-	-
2300	2304	75.07	1.15	-	-	-
2400	2405	76.87	0.75	-	-	-
2500	2509	77.97	0.63	-	-	-
2600	2602	80.09	0.74	-	-	-
2700	2699	82.89	0.90	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

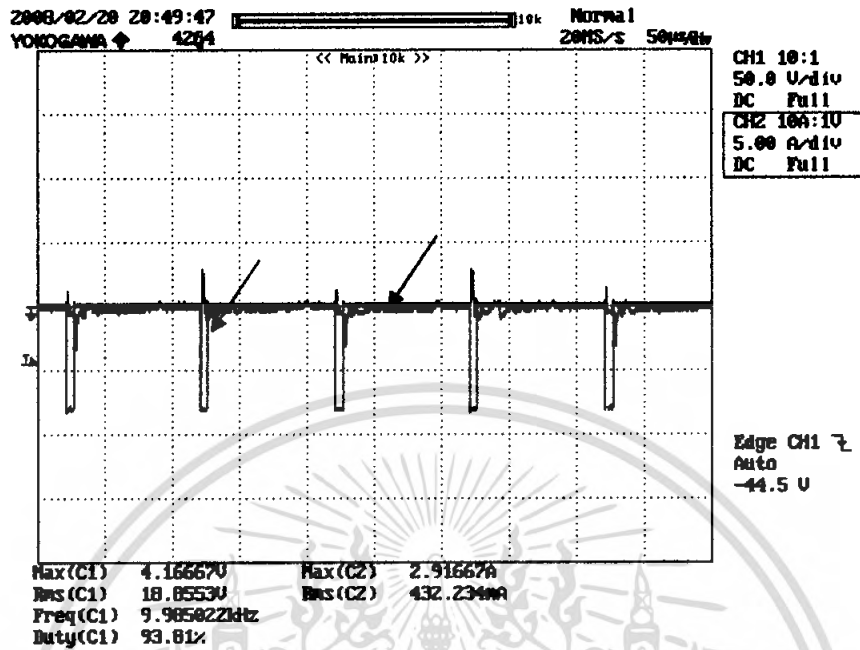


รูปที่ 4.108 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Unipolar Switching

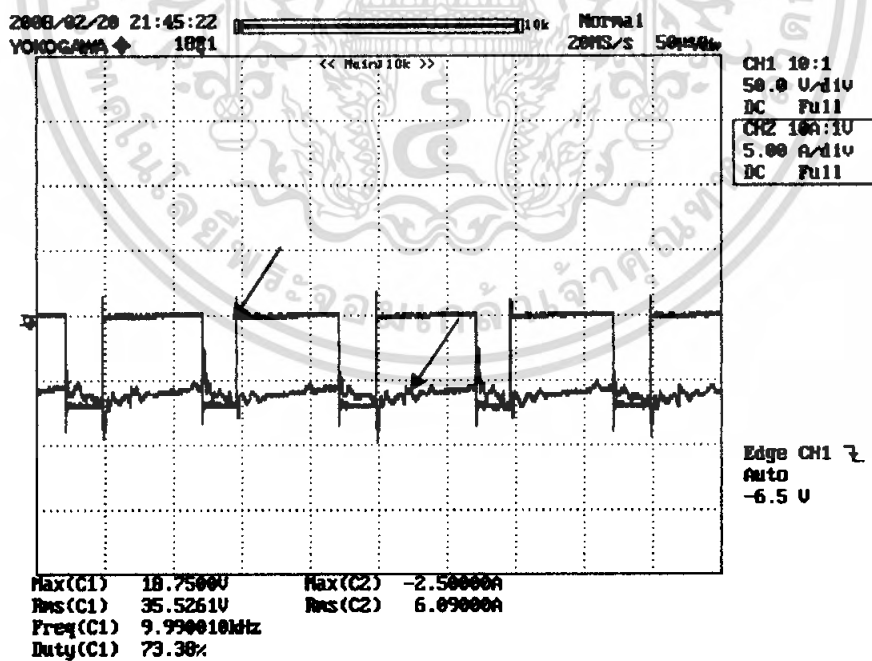
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. PWM แบบ Unipolar Close Loop

สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ขณะมอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse

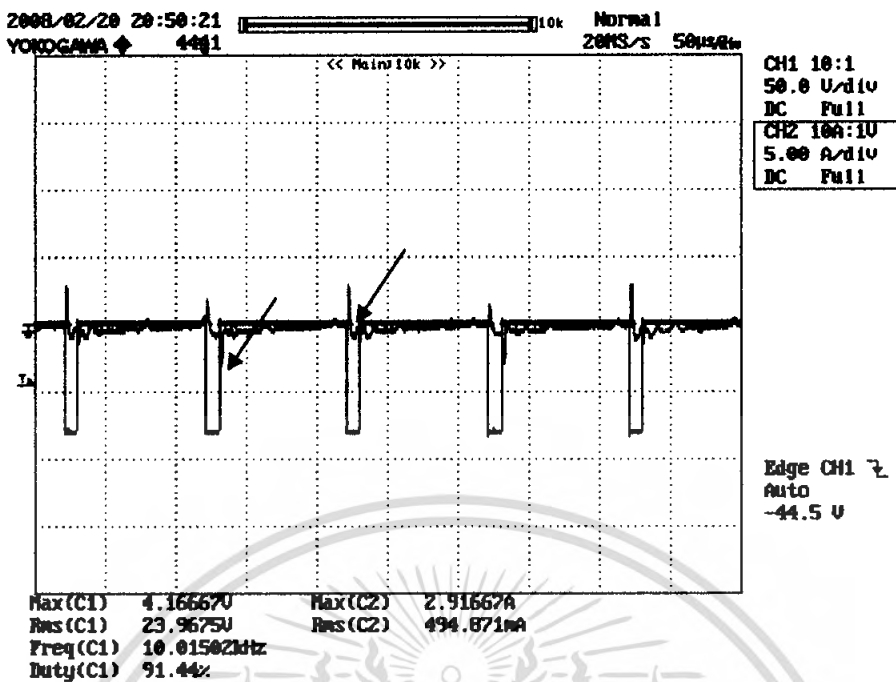


รูปที่ 4.109 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -100 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ

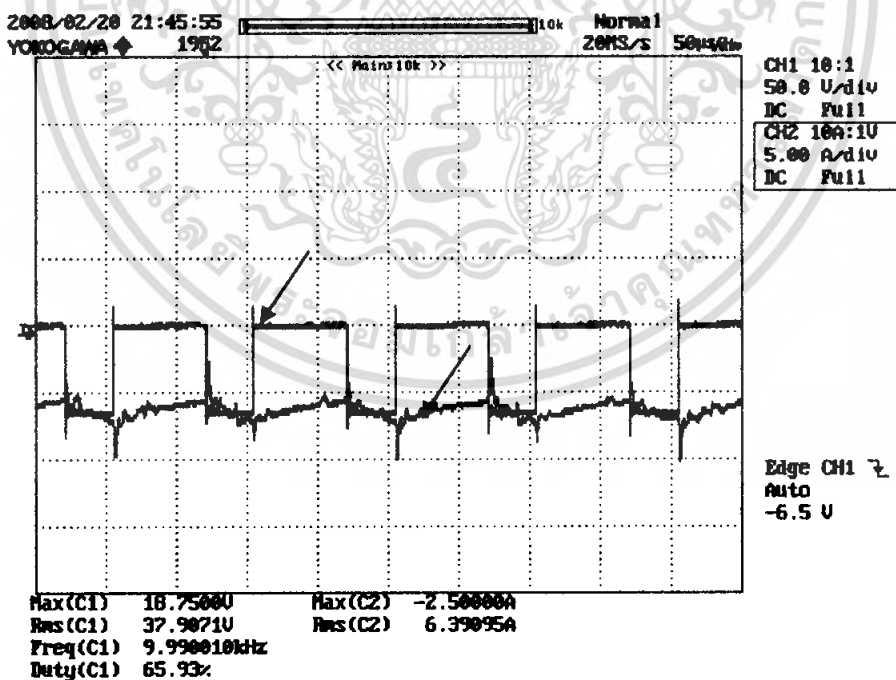


รูปที่ 4.110 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -100 รอบต่อนาที มีภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

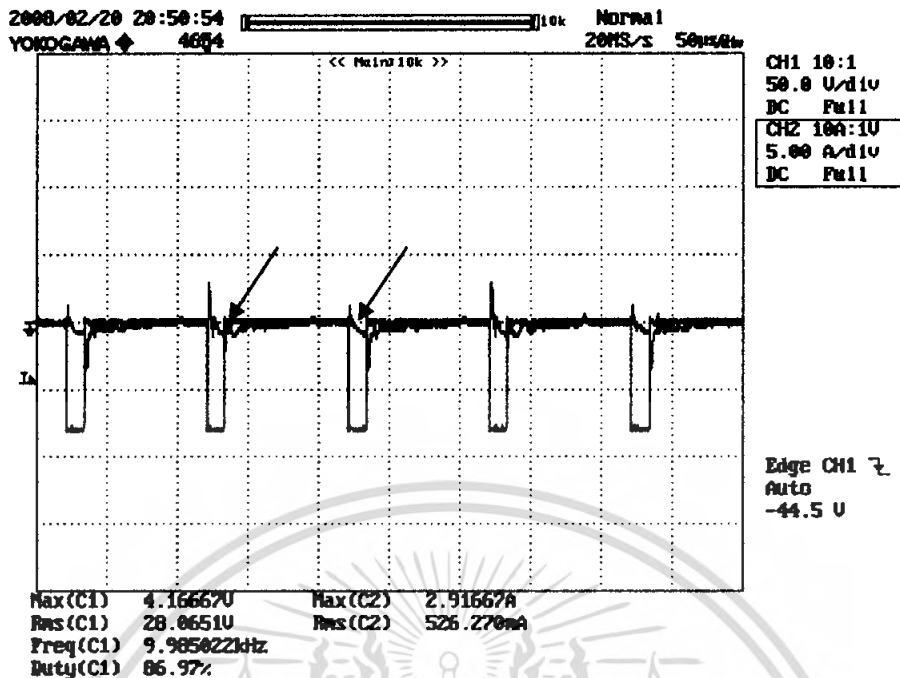


รูปที่ 4.111 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

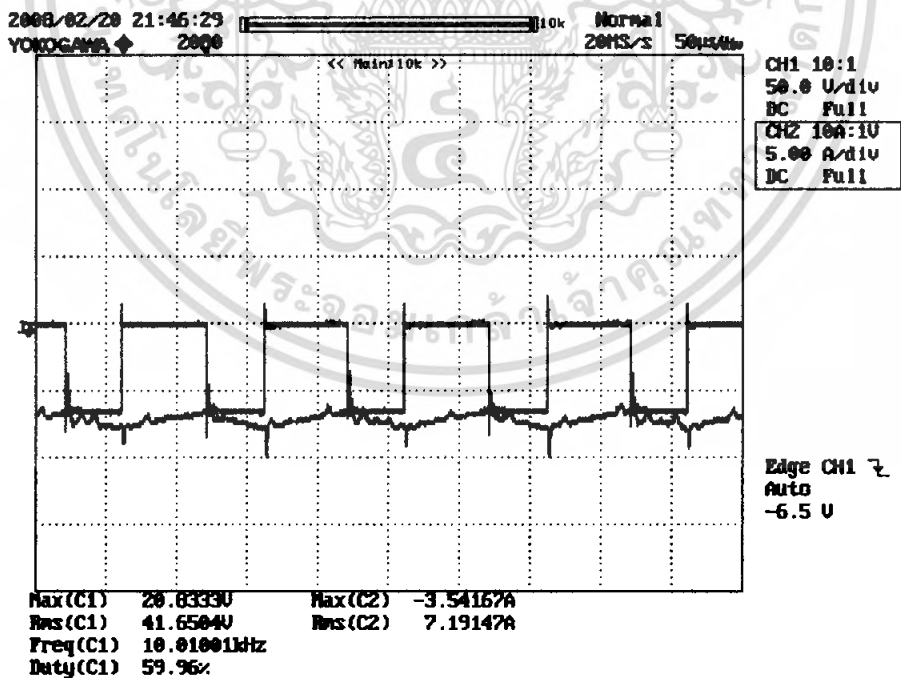


รูปที่ 4.112 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -200 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

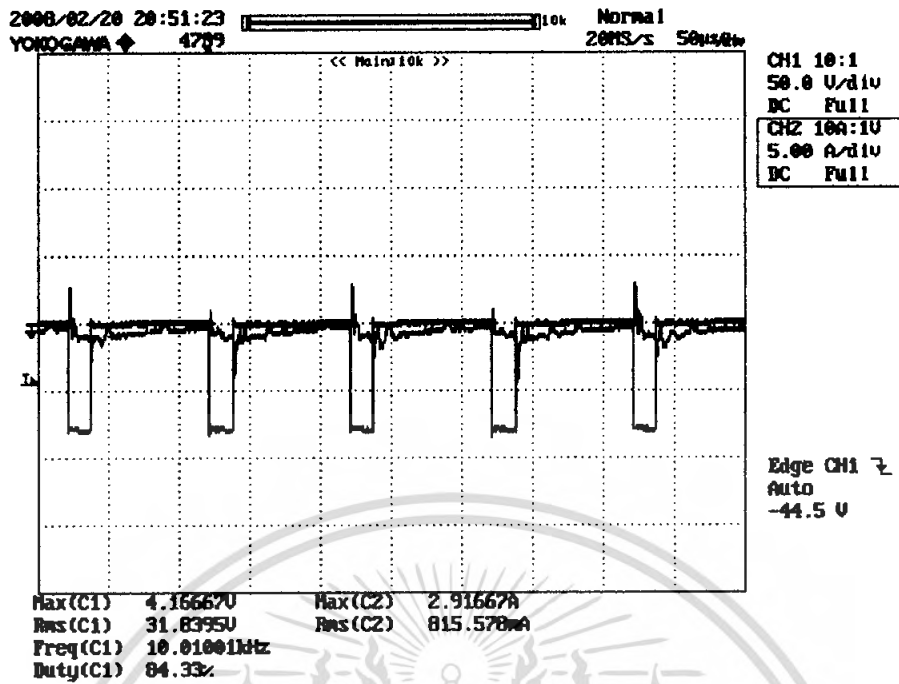


รูปที่ 4.113 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -300 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

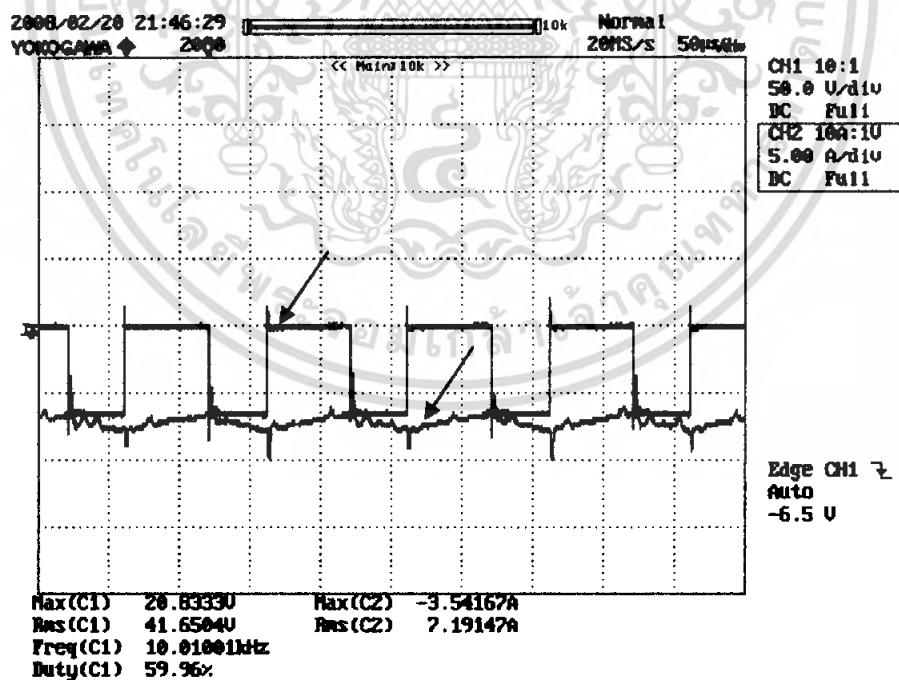


รูปที่ 4.114 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -300 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

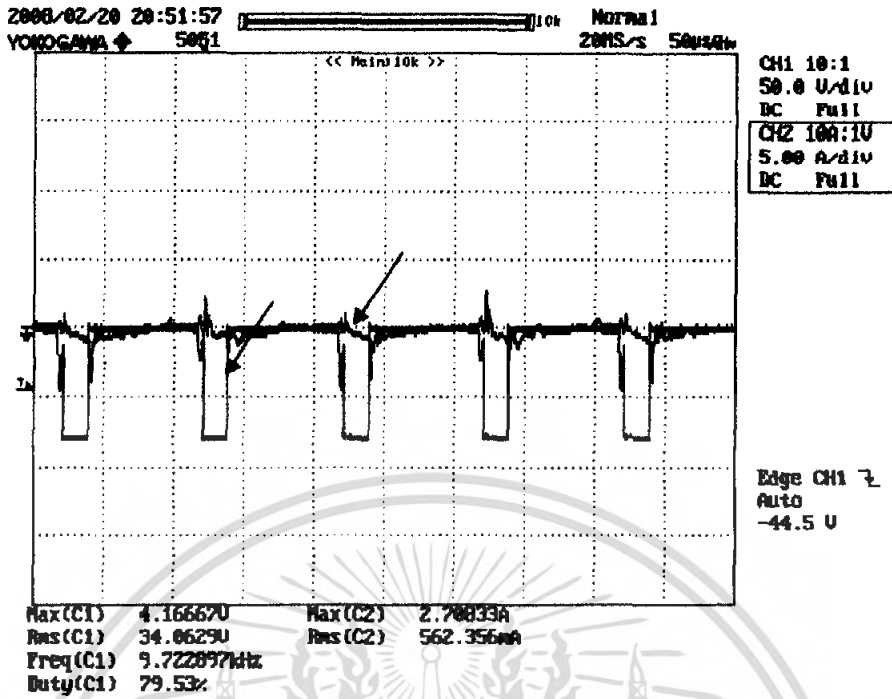


รูปที่ 4.115 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -400 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

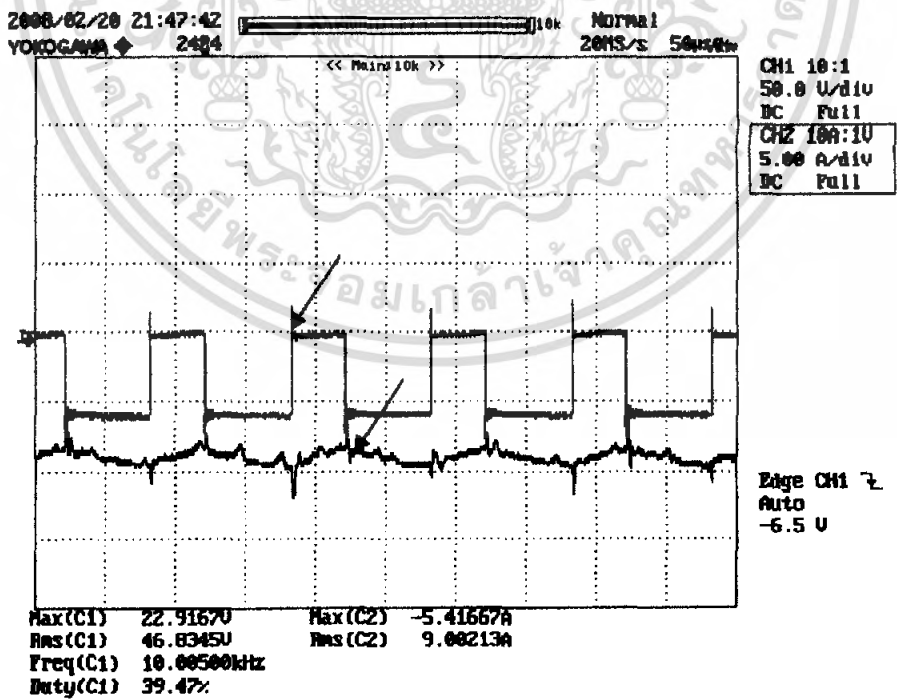


รูปที่ 4.116 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -400 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

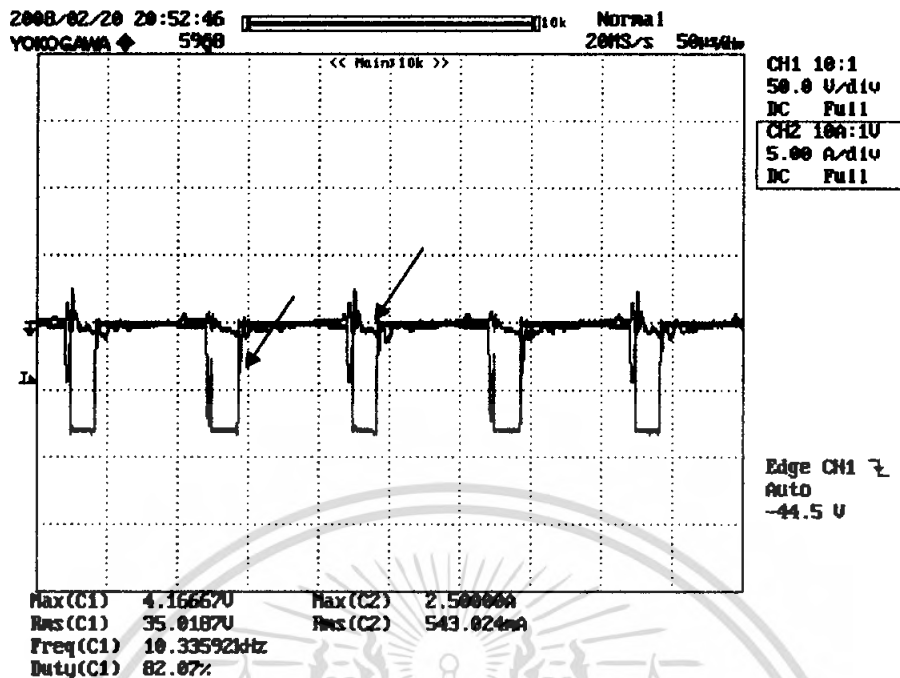


รูปที่ 4.117 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -500 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ

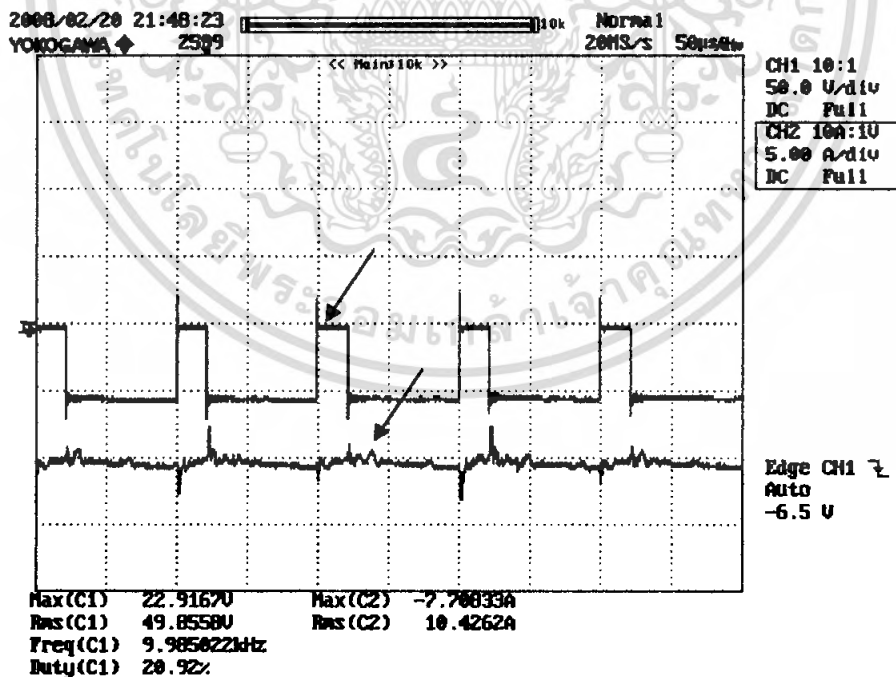


รูปที่ 4.118 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -500 รอบต่อนาที มีภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

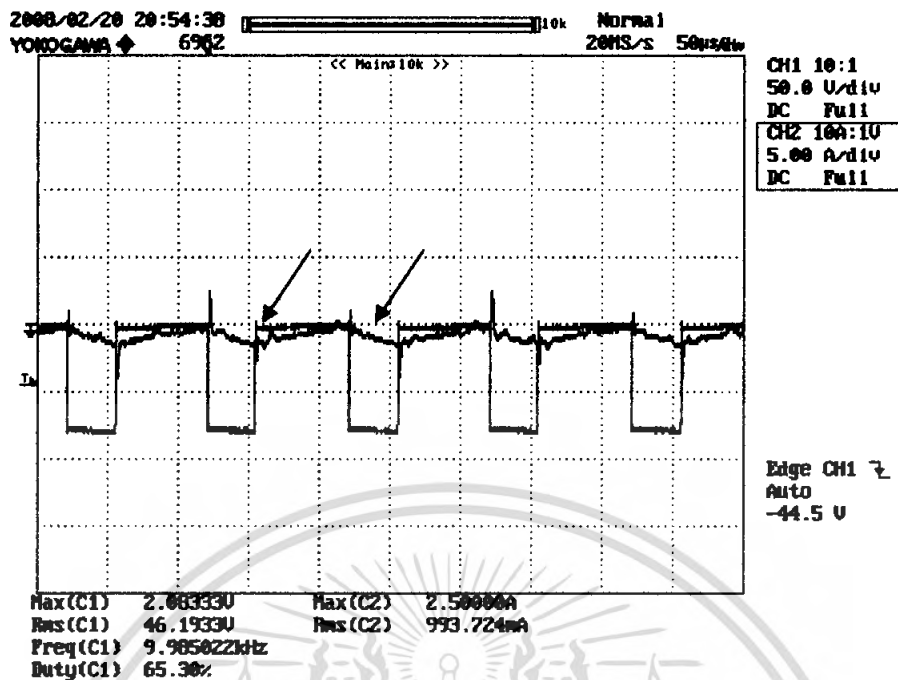


รูปที่ 4.119 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -600 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

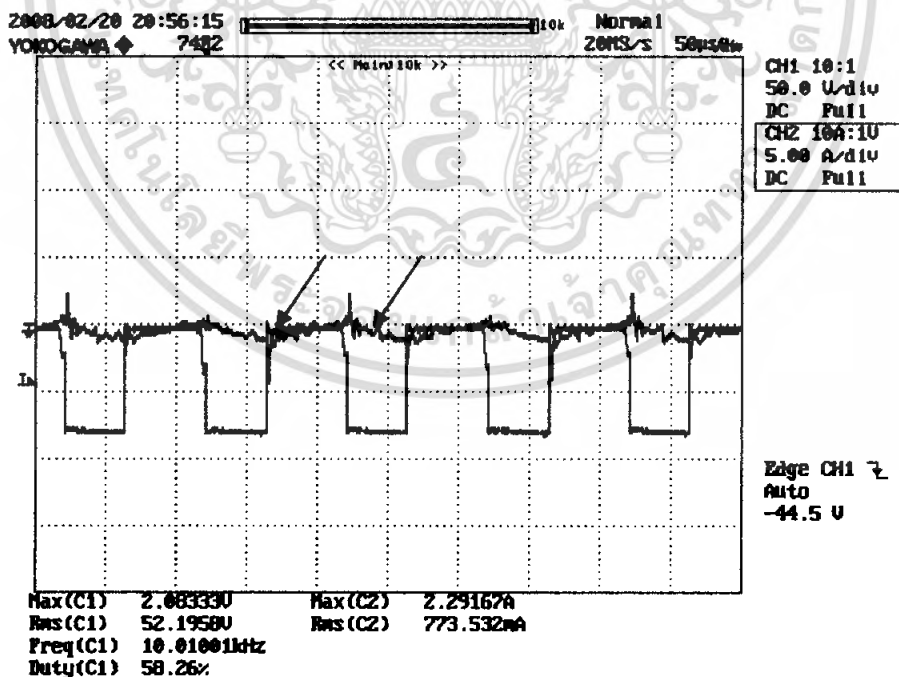


รูปที่ 4.120 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -600 รอบต่อนาที มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

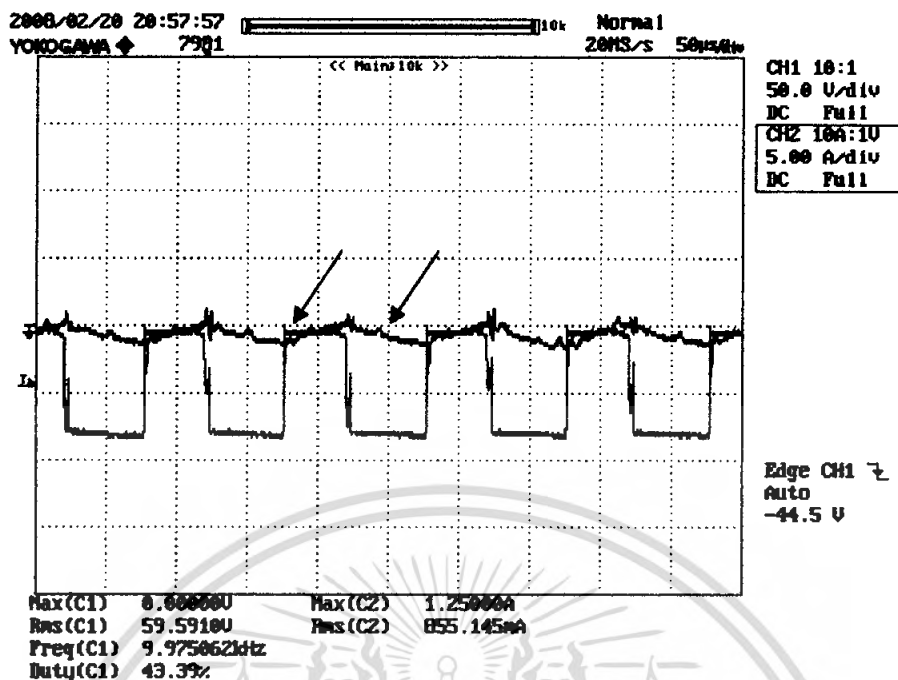


รูปที่ 4.121 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -900 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

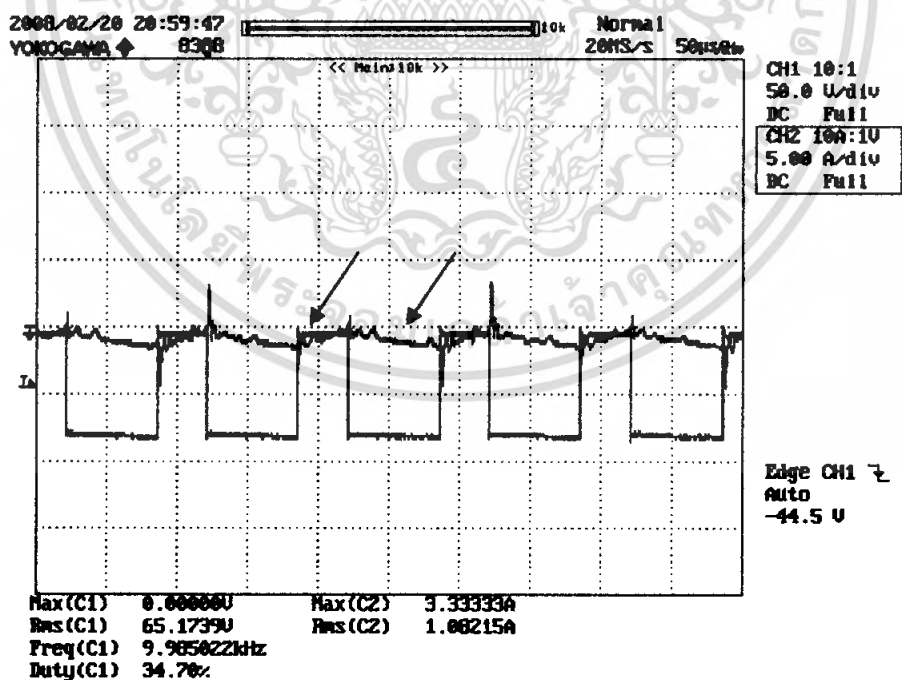


รูปที่ 4.122 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1200 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

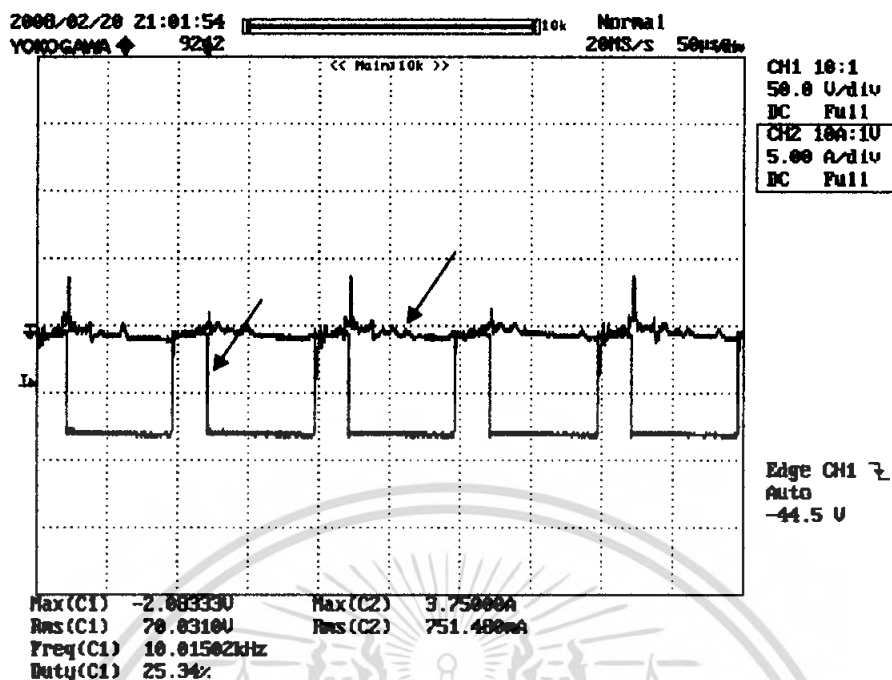


รูปที่ 4.123 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1500 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

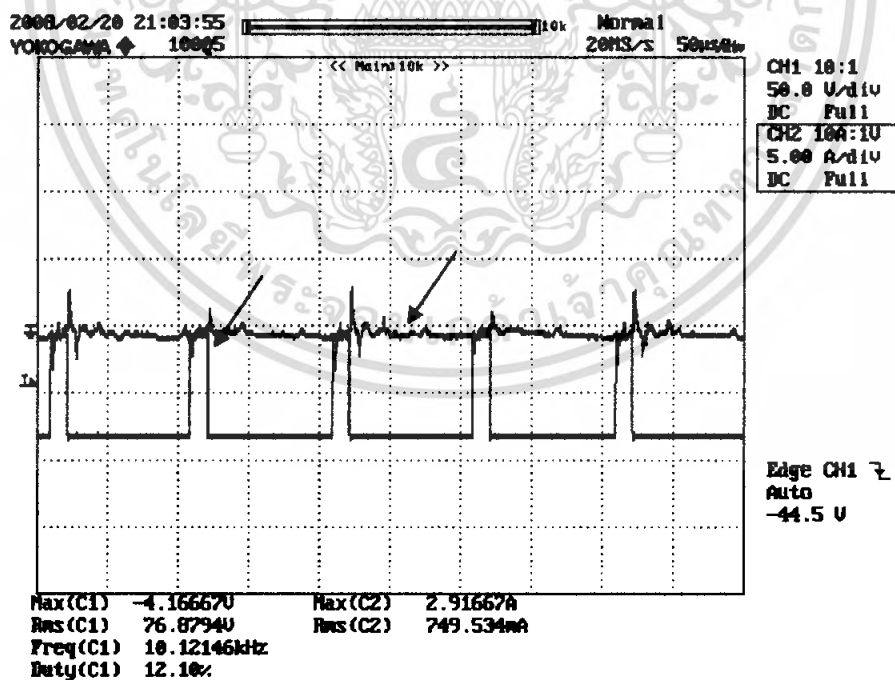


รูปที่ 4.124 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -1800 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

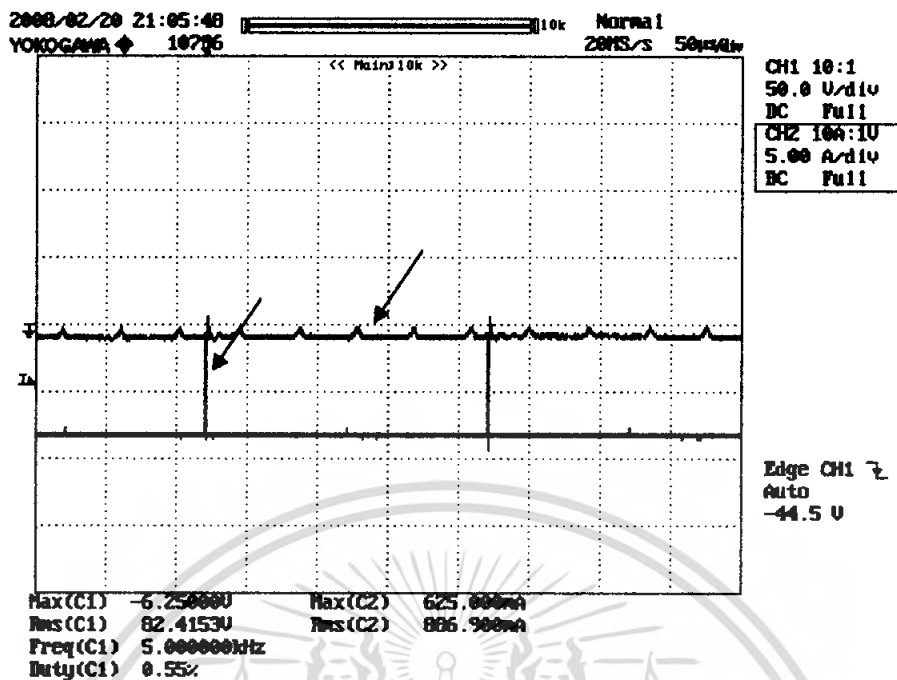


รูปที่ 4.125 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ -2100 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ



รูปที่ 4.126 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ไม่มีภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.127 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ที่ความเร็วรอบ 2700 รอบต่อนาที ไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

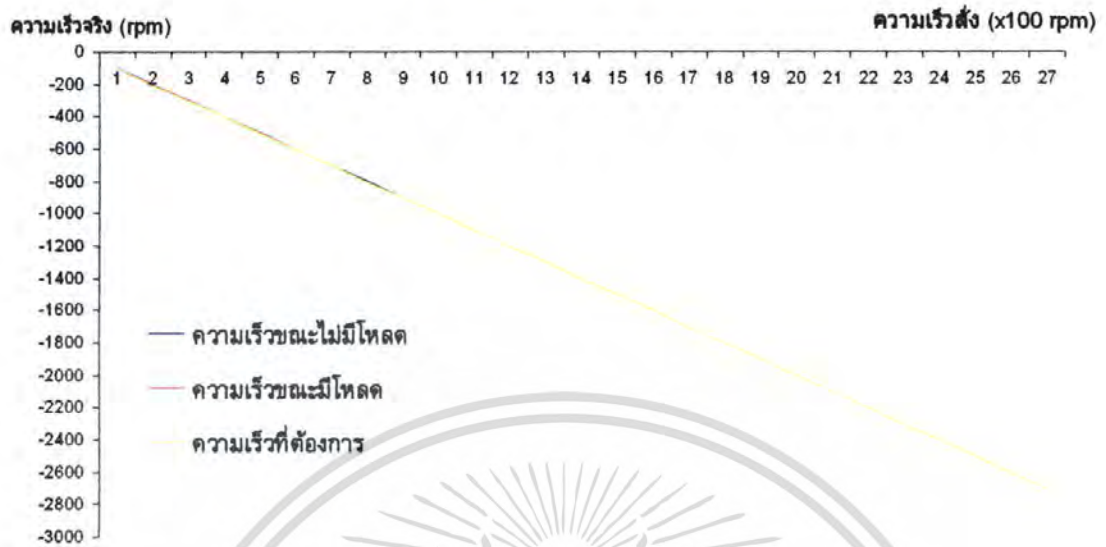
ตารางผลการทดลอง Unipolar แบบ Close Loop ทิศทาง Reverse

ตารางที่ 4.10 ตารางเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างไม่มีภาระและมีภาระ 0.4 N.m

ความเร็วที่ ต้องการ (rpm)	No Load			Load		
	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)	ความเร็วที่วัดจริง	แรงดัน V_a (V)	กระแส I_a (A)
100	96	18.86	0.43	92	35.52	6.05
200	198	23.97	0.49	193	37.9	6.39
300	301	28.07	0.53	298	41.15	7.19
400	398	31.84	0.82	399	41.84	7.44
500	496	34.06	0.56	497	46.83	9.02
600	606	35.02	0.54	598	49.85	10.42
700	702	41.11	0.80	-	-	-
800	799	43.27	0.67	-	-	-
900	902	46.19	0.99	-	-	-
1000	1004	48.00	0.89	-	-	-
1100	1104	50.42	0.96	-	-	-
1200	1202	52.19	0.77	-	-	-
1300	1297	53.70	0.86	-	-	-
1400	1403	56.78	0.97	-	-	-
1500	1499	59.59	0.85	-	-	-
1600	1598	60.36	0.84	-	-	-
1700	1697	62.84	0.97	-	-	-
1800	1802	65.17	1.08	-	-	-
1900	1899	67.41	0.81	-	-	-
2000	2002	68.95	1.17	-	-	-
2100	2101	70.03	0.75	-	-	-
2200	2200	73.09	1.14	-	-	-
2300	2301	75.07	1.15	-	-	-
2400	2398	76.87	0.75	-	-	-
2500	2503	77.97	0.63	-	-	-
2600	2598	80.09	0.74	-	-	-
2700	2683	82.42	0.88	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบความเร็วขณะมีโหลด และไม่มีโหลด(Unipolar switching)

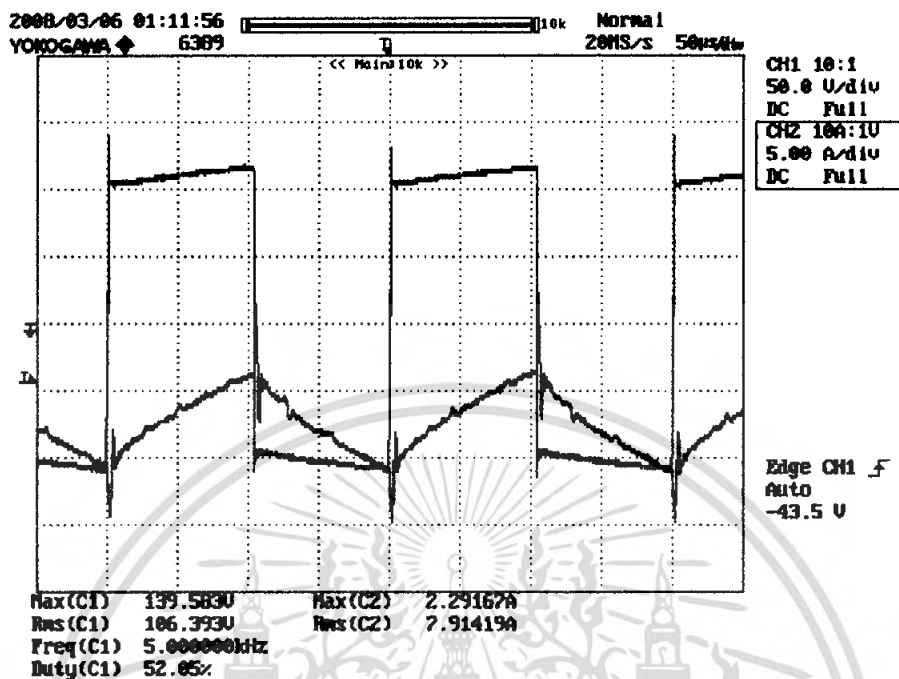


รูปที่ 4.128 กราฟเปรียบเทียบความเร็วขณะมีภาระ และไม่มีภาระแบบ Unipolar Switching

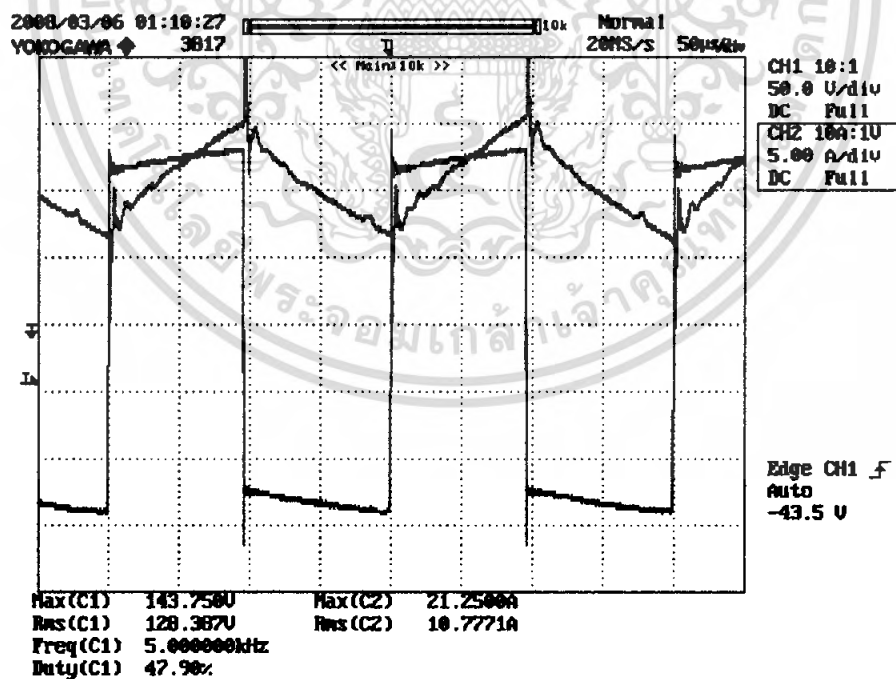
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทำงานในขณะเบรก

1. การทำงานแบบ Bipolar



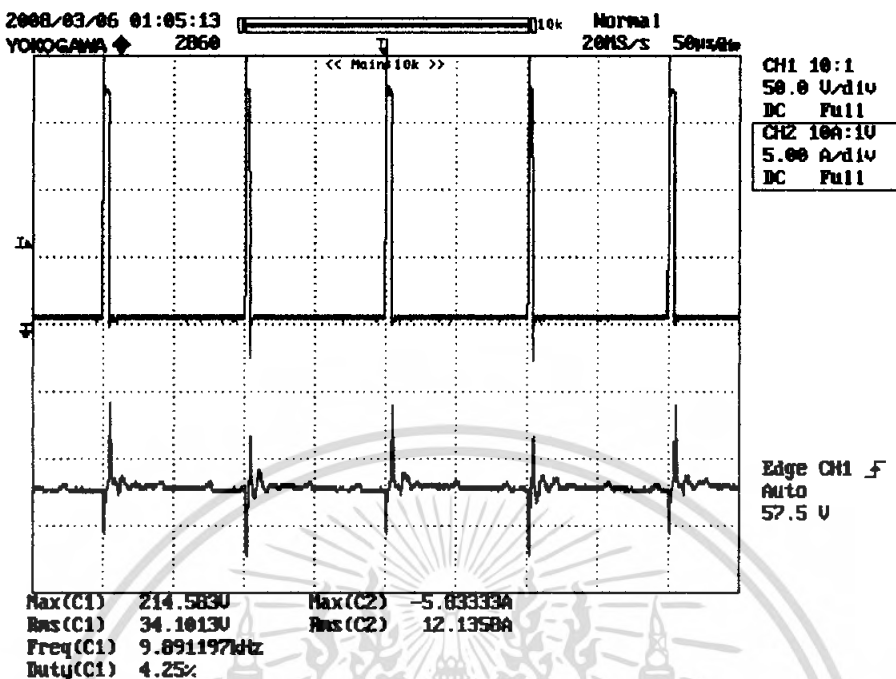
รูปที่ 4.129 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะ Forward Braking



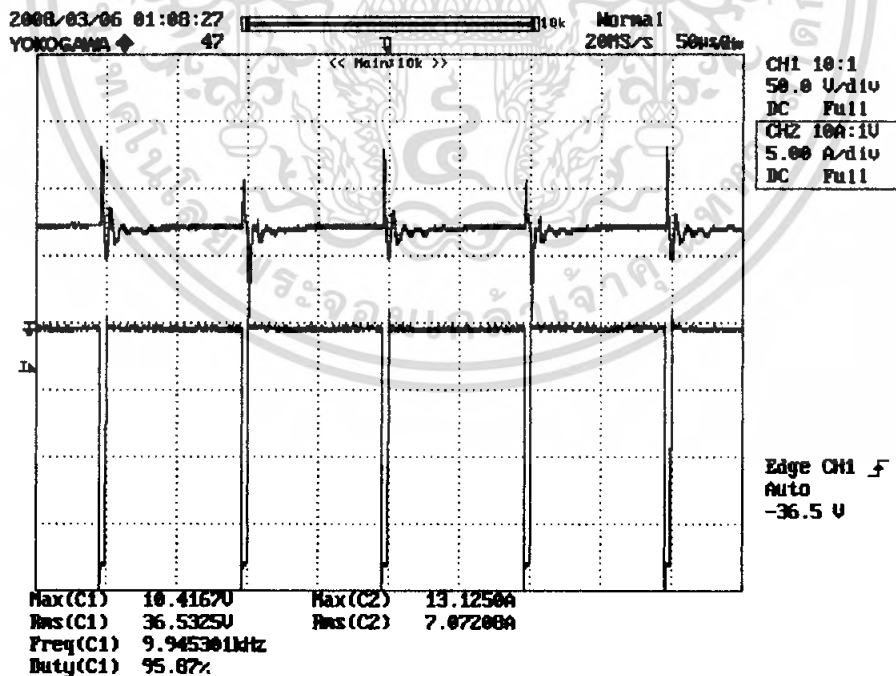
รูปที่ 4.130 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะ Reverse Braking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.การทำงานแบบ Unipolar



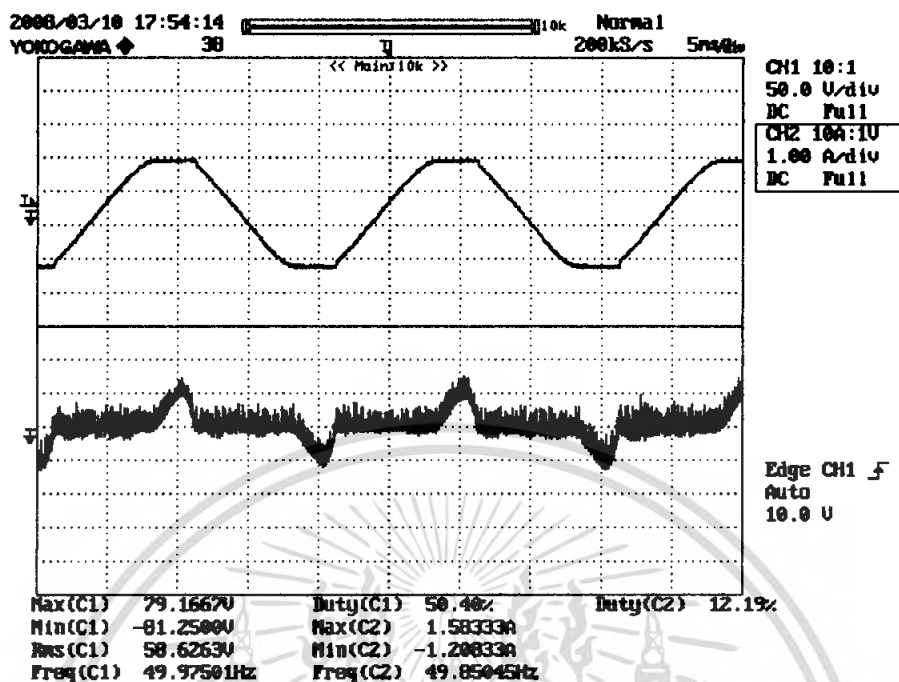
รูปที่ 4.131 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะที่ Forward Braking



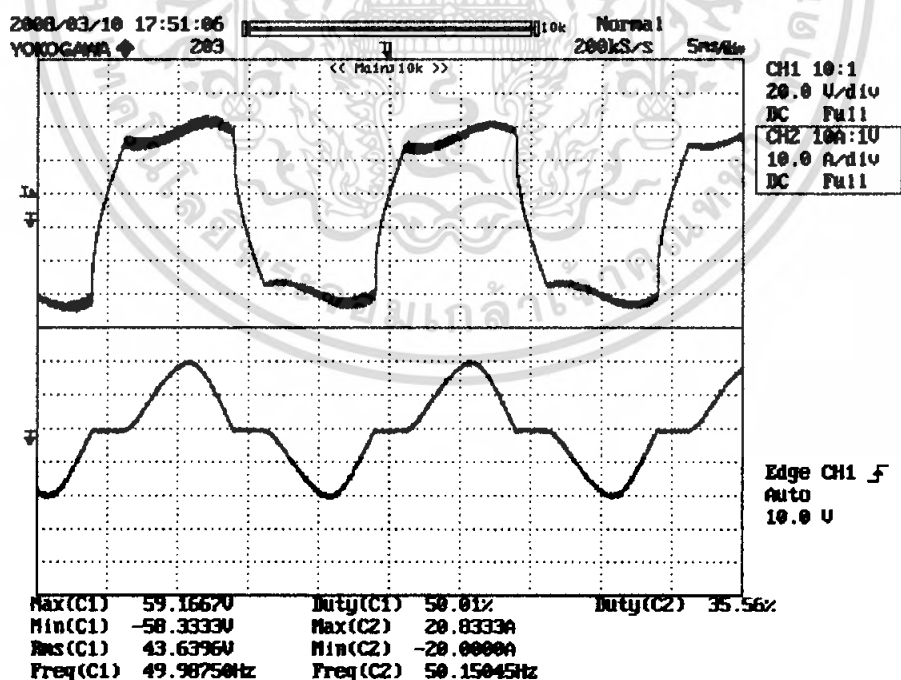
รูปที่ 4.132 สัญญาณแรงดัน กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในขณะที่ Reverse Braking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปกระแสและแรงดันขาเข้า



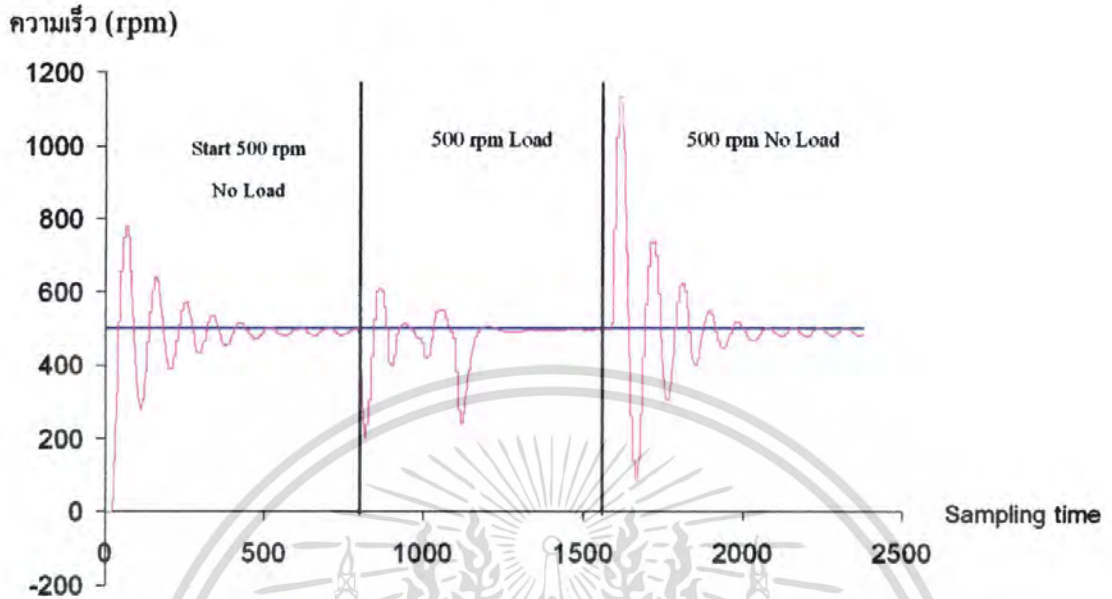
รูปที่ 4.133 สัญญาณแรงดันและกระแสขาเข้า ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 4.134 สัญญาณแรงดันและกระแสขาเข้า ขณะมีโหลด

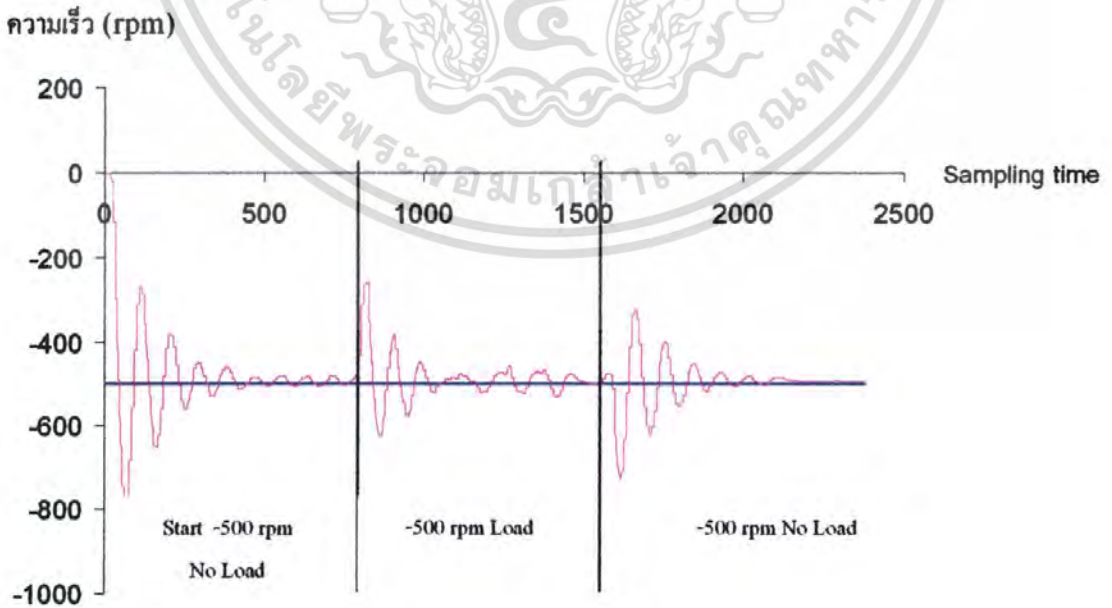
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การตอบสนองต่อความเร็วของมอเตอร์ การสวิตช์แบบ Bipolar ทิศทาง Forward



รูปที่ 4.135 การตอบสนองความเร็วที่ 500 รอบต่อนาที

การสวิตช์แบบ Bipolar ทิศทาง Reverse

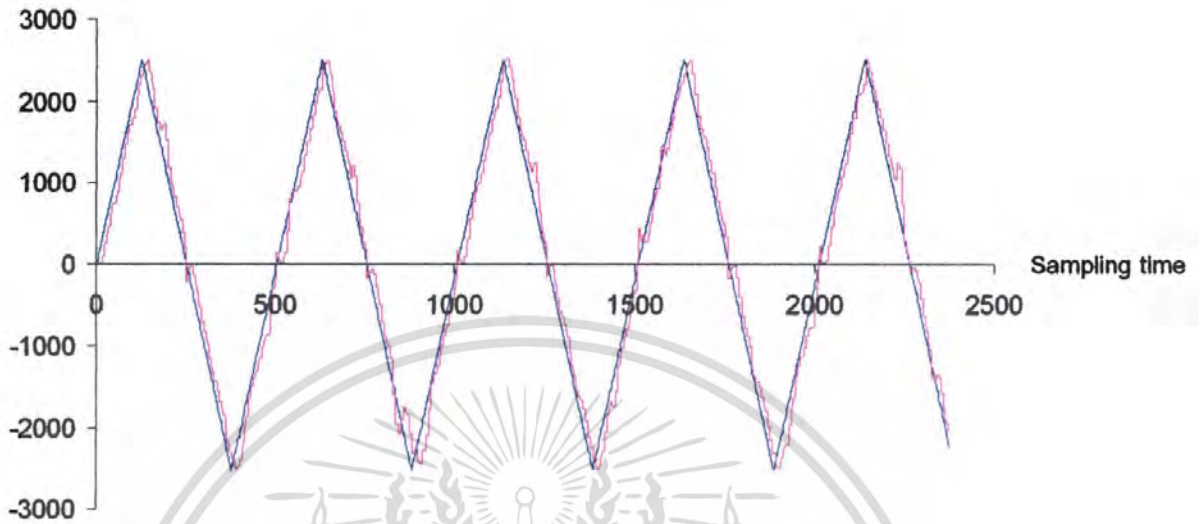


รูปที่ 4.136 การตอบสนองความเร็วที่ -500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสวิตช์ Bipolar แบบ Ramp

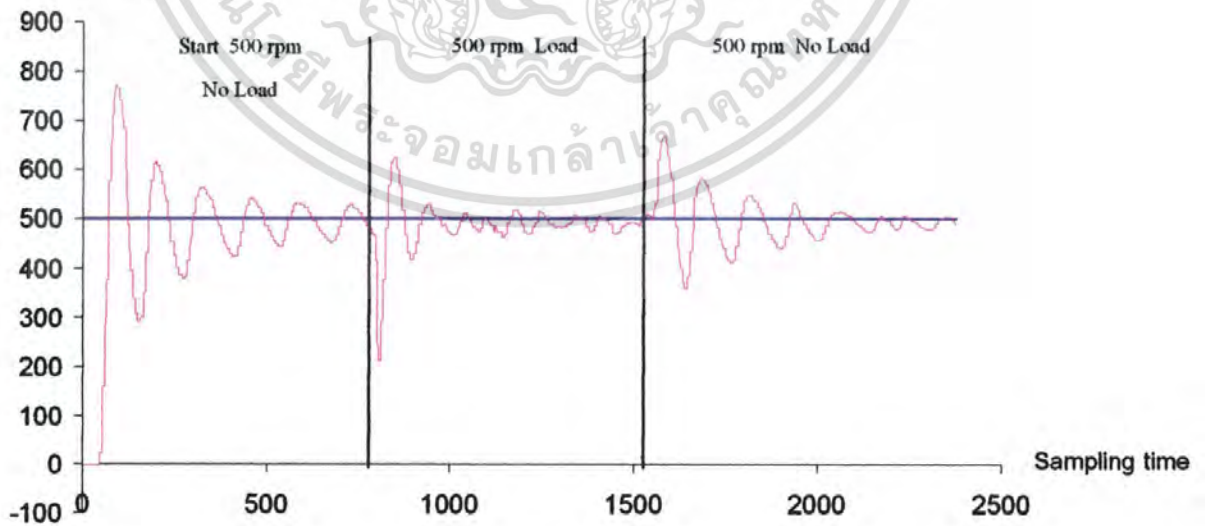
ความเร็ว (rpm)



รูปที่ 4.137 การตอบสนองความเร็วระหว่าง 2700 กับ -2700 รอบต่อนาที

การสวิตช์แบบ Unipolar ทิศทาง Forward

ความเร็ว (rpm)

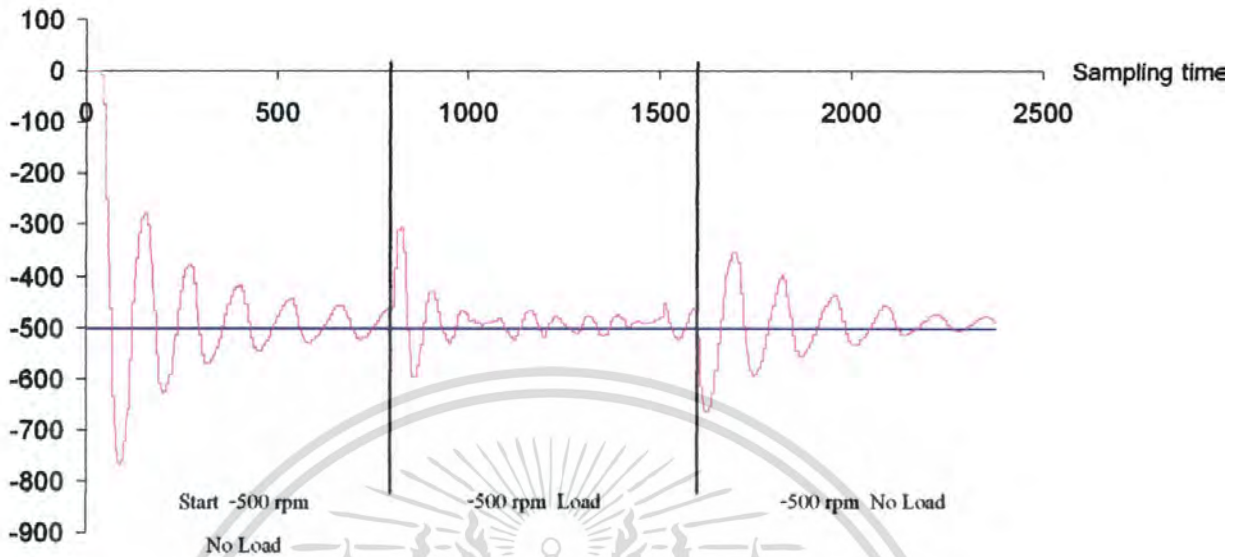


รูปที่ 4.138 การตอบสนองความเร็วที่ 500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสวิตช์แบบ Unipolar ทิศทาง Reverse

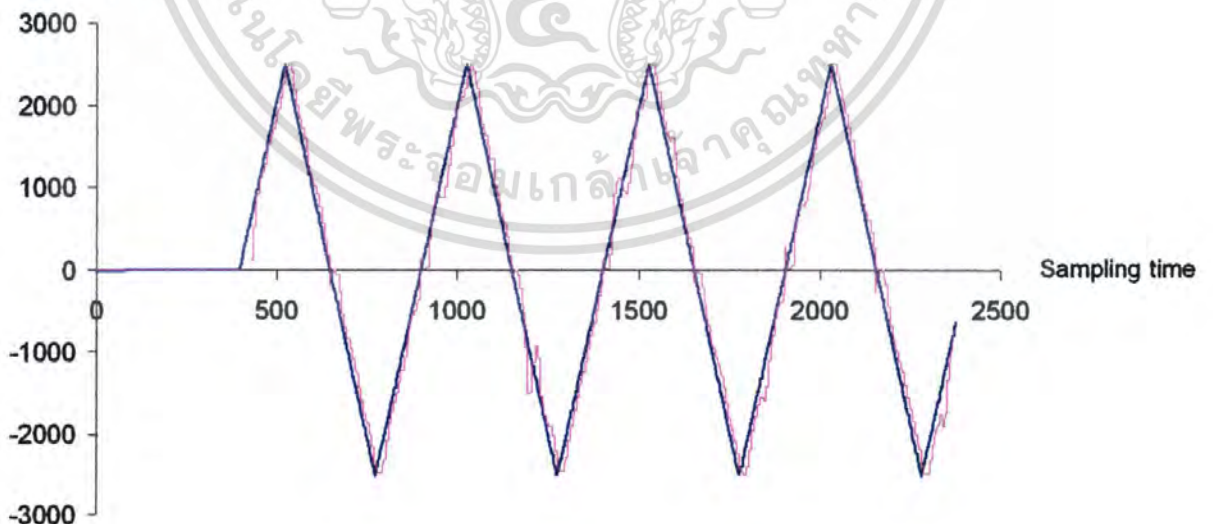
ความเร็ว (rpm)



รูปที่ 4.139 การตอบสนองความเร็วที่ -500 รอบต่อนาที

การสวิตช์แบบ Unipolar แบบ Ramp

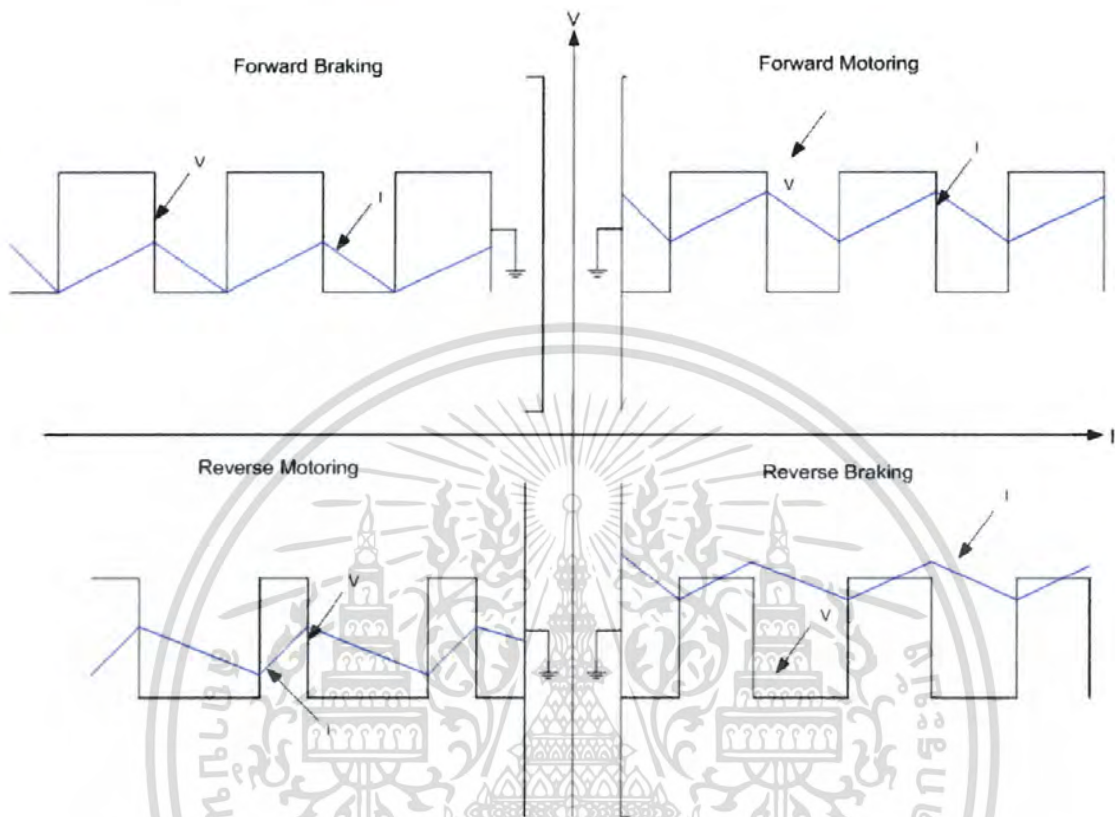
ความเร็ว (rpm)



รูปที่ 4.140 การตอบสนองความเร็วระหว่าง 2700 กับ -2700 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

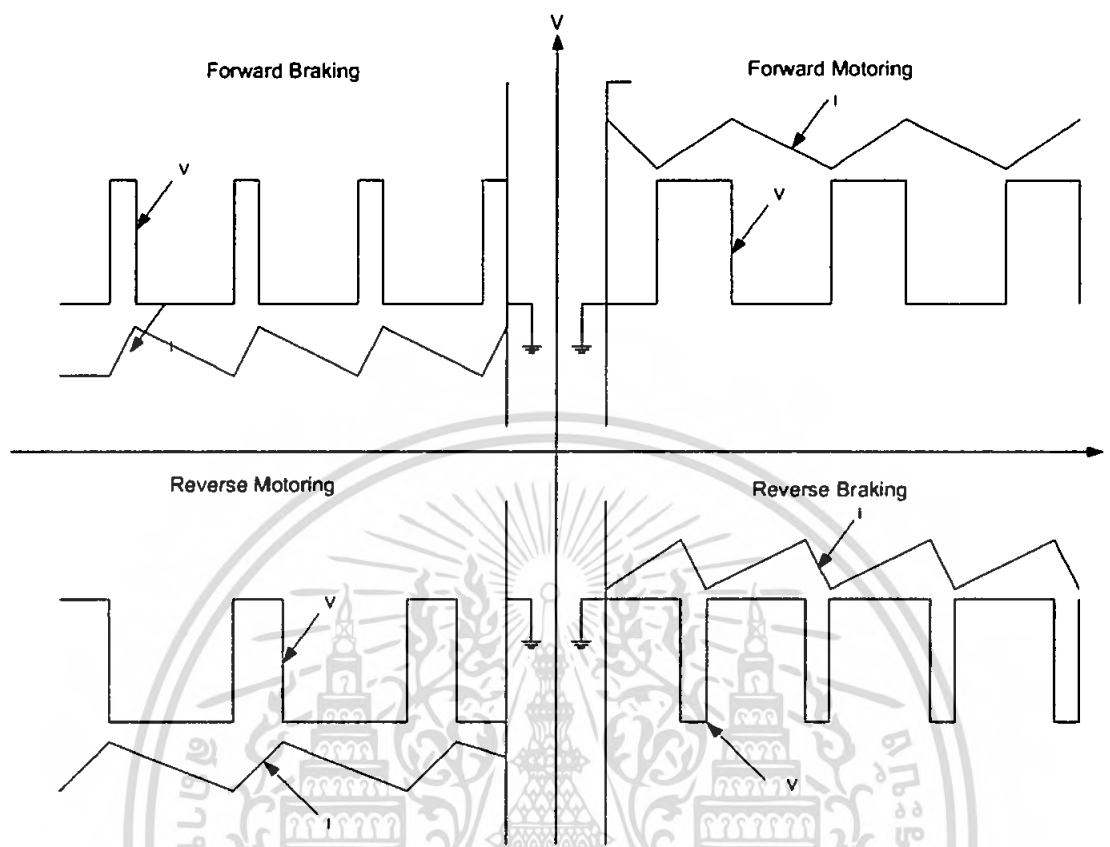
4.7 สัญญาณแรงดัน และกระแสของการทำงานของ Converter ที่ 4 จุดภาค การทำงานแบบ Bipolar Switching



รูปที่ 4.141 การทำงานของมอเตอร์ บนระนาบแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานแบบ Unipolar Switching



รูปที่ 4.142 การทำงานของมอเตอร์ บนระนาบแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

โครงการการพัฒนาชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนี้ ประกอบไปด้วยการออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อนให้สามารถควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีประสิทธิภาพ โดยที่สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ทั้งสี่จุดภาคการทำงาน ซึ่งการออกแบบวงจรนั้นจะอาศัยความรู้พื้นฐานในการออกแบบ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้วงจรมีความซับซ้อนน้อยที่สุด เพื่อการทำงานที่มีเสถียรภาพ ประสิทธิภาพดีขึ้น ประหยัด อีกทั้งยังใช้งานได้ง่ายเนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายและสามารถใช้ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้หลายฟังก์ชันการควบคุมนั้นสามารถควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ บันทึกค่าความเร็วได้แบบ Real time ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น และยังเพิ่มความสะดวกด้วยการมีจอแสดงผลที่ตัวเครื่องด้วยเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ส่วนในการควบคุมความเร็วให้คงที่นั้นจะใช้การควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งใช้ PI controller เป็นตัวควบคุมความเร็วที่เที่ยงตรง

ในการทดลองได้ทำการทดสอบการขับมอเตอร์โดยใส่โหลดและไม่ใส่โหลด แล้วทำการป้อนความเร็วอ้างอิงและวัดความเร็วจริง ผลปรากฏว่าความเร็วที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเร็วที่ป้อนแต่การแกว่งเล็กน้อย เนื่องจากผลของโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีค่ามาก ในการทดสอบให้ชุดขับทำงานทั้งแบบ Bipolar และแบบ Unipolar ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา พบว่าการทำงานแบบ Bipolar เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแรงดันจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบ Unipolar ส่วนในเรื่องของกระแสพบว่ากระแสของการทำงานแบบ Unipolar จะมีการกระเพื่อมของกระแสที่ต่ำกว่าการทำงานแบบ Bipolar ทำให้แรงบิดกระเพื่อมน้อยกว่า

สำหรับการตอบสนองต่อความเร็วพบว่าการทำงานแบบ Bipolar จะเข้าสู่ Steady State ได้เร็วกว่าเนื่องจากการทำงานแบบ Bipolar มีแรงดันซิกกลับจึงสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ดีกว่า

จากนั้นทำการทดสอบขับมอเตอร์ทั้งสี่จุดภาคพบว่ามอเตอร์สามารถทำงานได้ดีในทุกจุดภาคทั้งสี่โหมดการทำงาน มีการเบรกแบบคืนพลังงานที่มองเห็นได้จากการวัดแรงดันที่ DC Bus ที่เพิ่มมาเป็น 150% จากแรงดันที่พิกัด

การติดต่อกับคอมพิวเตอร์สามารถติดต่อกันได้ดี ค่าข้อมูลไม่ผิดพลาด แต่ข้อมูลที่แสดงผล มีความล่าช้าเล็กน้อย

ปัญหาระหว่างทำโครงการ

1. ปัญหาจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ผิดพลาด
2. การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่
3. การวัดความเร็ว ใช้ Encoder ซึ่งตอนแรกไม่มี Shield ทำให้ความเร็วที่ได้มาไม่ถูกต้อง
4. การป้อนกลับกระแสยังไม่สามารถทำได้เพราะกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ทำให้กระแสที่วัดได้ไม่ถูกต้อง ทำให้ไม่สามารถป้อนกลับกระแสได้
5. การแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ยังตอบสนองไม่เร็วเท่าที่ควร กราฟความเร็วยังไม่ค่อยดีเนื่องจากความเร็วยังไม่อยู่ตรงกลาง

ข้อเสนอแนะ

- จากโครงการ การป้อนกลับแบบ PI จะควบคุมเฉพาะการป้อนกลับความเร็วรอบของมอเตอร์เท่านั้น โดยไม่มีการป้อนกลับกระแสทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงบิดให้คงที่ตามต้องการได้ ดังนั้นการควบคุมความเร็วจึงยังไม่ละเอียดพอเนื่องจากข้อจำกัดของไมโครคอนโทรลเลอร์ การติดต่อกับคอมพิวเตอร์ยังใช้การติดต่อแบบ SERIAL PORT ซึ่งทำงานช้าและไม่ค่อยมีการใช้งาน ควรเปลี่ยนเป็น USB PORT ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและใช้งานง่าย
- ควรมีการจัดการกับพลังงานที่ได้จากการเบรกมอเตอร์แบบคืนพลังงาน เพื่อรักษาระดับแรงดัน DC – link ให้คงที่ เช่นการใช้ Dynamic Braking
- อาจใช้ DSP แบบ floating – point เป็น controller เพื่อความแม่นยำของการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟตรง
- จัดหาโหลดทางกลที่เหมาะสมเพื่อให้มอเตอร์ไฟตรงสามารถขับโหลดที่พิกัดได้จนถึงความเร็วรอบพิกัด

บรรณานุกรม

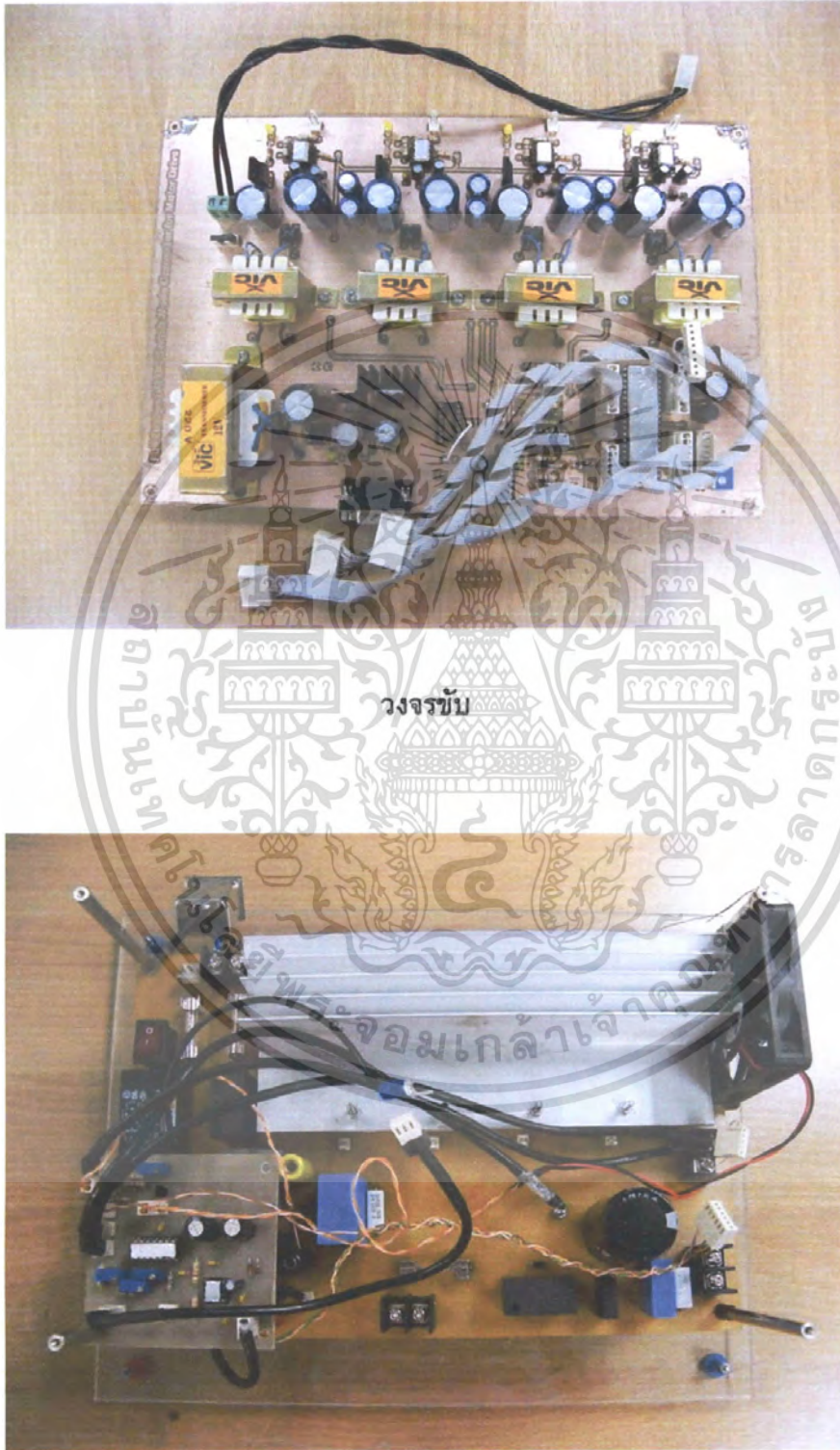
- [1] Muhammad H. Rashid, **SPICE for Power Electronics and Electric Power**, Prentice-Hall, Inc., 1993
- [2] Raymond Ramshaw, and Derek Schuurman, **PSpice Simulation of Power Electronics Circuits**, 1st Ed, London, Chapman & Hall, Inc., 1997
- [3] W. Bolton, **Control Engineering**, 2nd Ed, New York, Addison Wesley Longman Publishing, 1998.
- [4] Robert N. Bateson, **Introduction to Control System Technology**, 7th Ed, New Jersey, Prentice-Hall, 2002.
- [5] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, **Electric Machinery**, 6th Ed, Singapore, McGraw-Hill, 2003.
- [6] N. Mohan, T .M. Underland, and W.P. Robins, **Power Electronics Converter, Application and Design**, 3rd Ed, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [7] V.R. Moorthi, **Power Electronics Devices Circuit and Industrial Applications**, India, Oxford University Press, 2005.
- [8] โยธิน เปรมปราณีรัชต์, วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์, กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2526.
- [9] มนัส สัจจวิเศษ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์** กรุงเทพฯ, สนพ. อินโฟเพรส, 2543.
- [10] พรจิต ประทุมสุวรรณ, **พื้นฐานการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, เรือนแก้วการพิมพ์, 2547.
- [11] นภัทร วัฒนเทพินทร์, **การจำลองการทำงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยโปรแกรม PSpice**, ปทุมธานี, สนพ. สกายบุ๊คส์, 2548
- [12] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ชารินทร์เศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, สนพ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินต์ติ้ง, 2549.
- [13] สัจจะ จรัสรุ่งเรือง, **คู่มือการเขียนโปรแกรม Visual Basic 6 ฉบับผู้เริ่มต้น**, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ไอดีซี อินโฟเน ดิสทริบิวเตอร์ เซ็นเตอร์ จำกัด, 2548.



ภาคผนวก

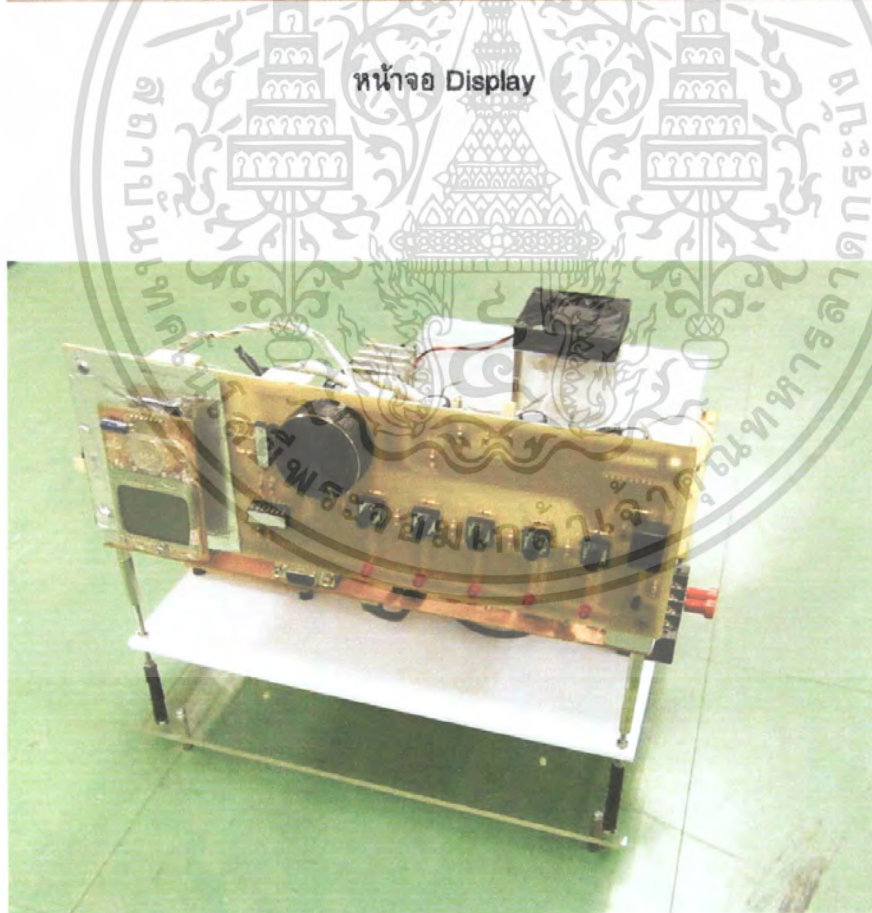
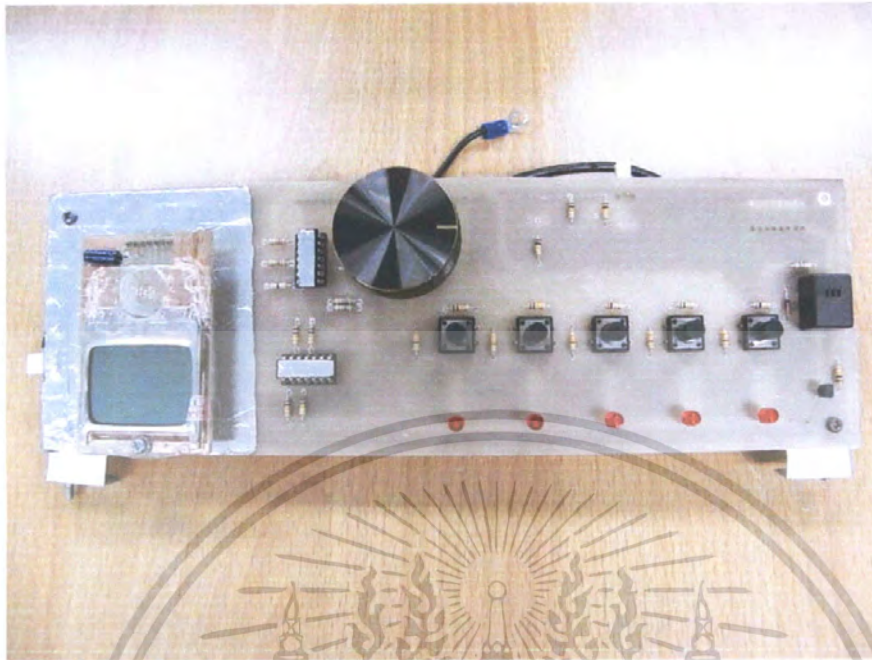
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
รูปภาพชิ้นงาน



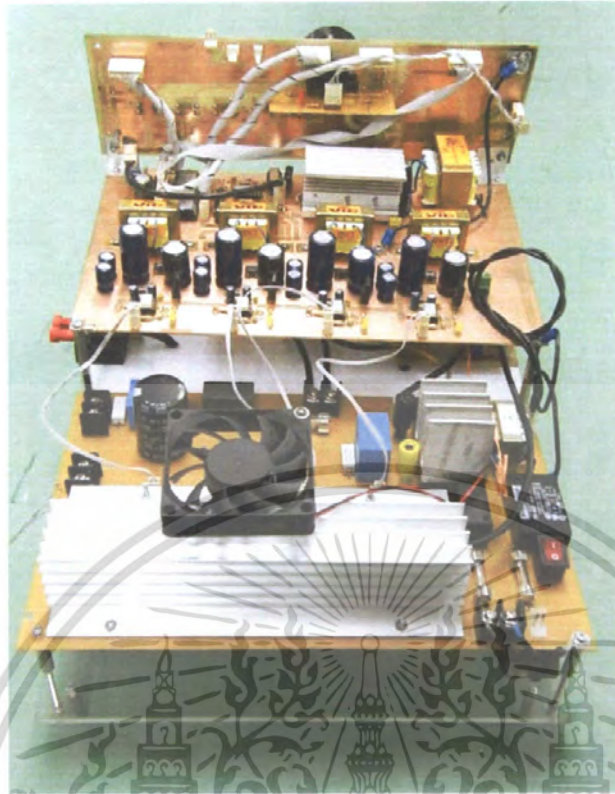
วงจรถ้าล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

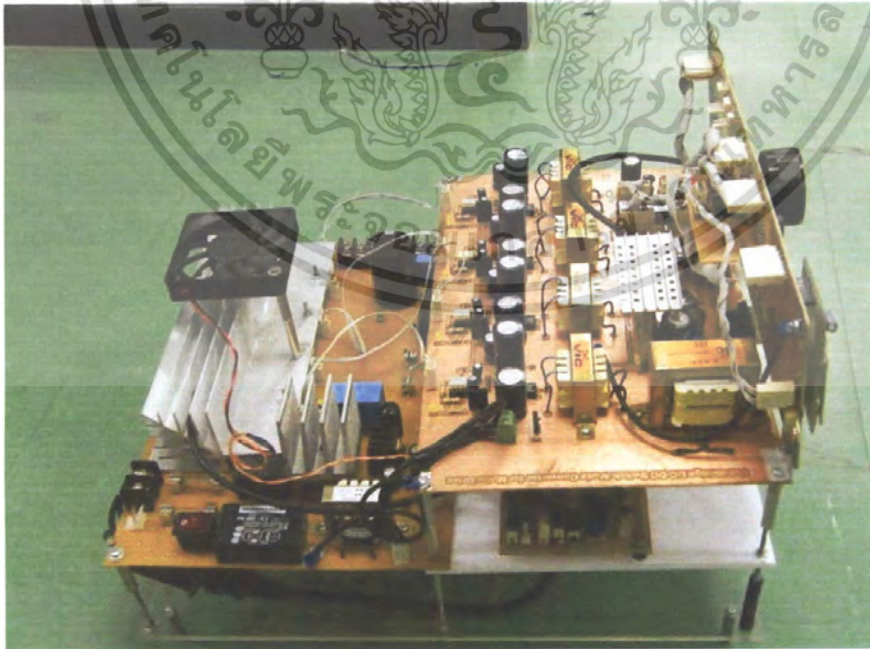


ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ มองจากด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

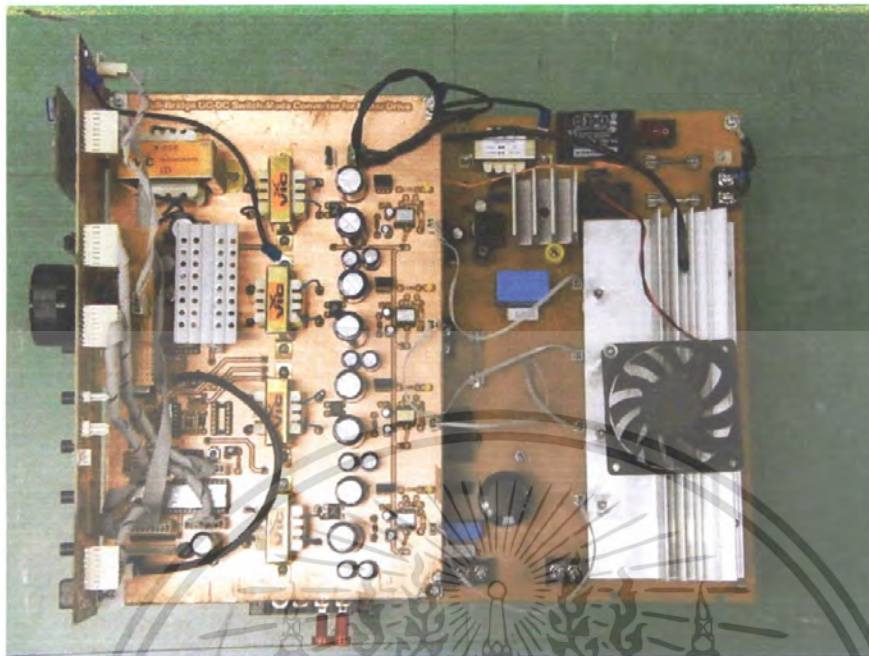


ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ มองจากด้านหลัง

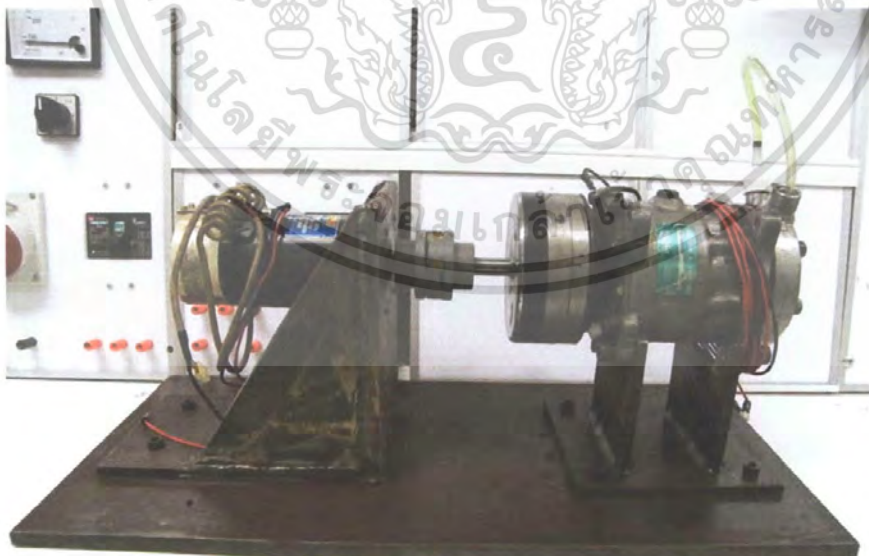


ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ มองจากด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ มองจากด้านบน



มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบในโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
Data Sheet



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

High-performance, Low-power AVR[®] 8-bit Microcontroller

Advanced RISC Architecture

- 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
- 32 x 8 General Purpose Working Registers
- Fully Static Operation
- Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
- On-chip 2-cycle Multiplier

Nonvolatile Program and Data Memories

- 16K Bytes of In-System Self-Programmable Flash
Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
- Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
In-System Programming by On-chip Boot Program
True Read-While-Write Operation
- 512 Bytes EEPROM
Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
- 1K Bytes Internal SRAM

Programming Lock for Software Security

JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface

- Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
- Extensive On-chip Debug Support
- Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface

Peripheral Features

- Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
- One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
- Real Time Counter with Separate Oscillator
- Four PWM Channels
- 8-channel, 10-bit ADC
8 Single-ended Channels
7 Differential Channels in TQFP Package Only
2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x

Byte-oriented Two-wire Serial Interface

Programmable Serial USART

Master/Slave SPI Serial Interface

Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator

On-chip Analog Comparator

Special Microcontroller Features

- Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
- Internal Calibrated RC Oscillator
- External and Internal Interrupt Sources
- Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby

I/O and Packages

- 32 Programmable I/O Lines
- 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad QFN/MLF

Operating Voltages

- 2.7 - 5.5V for ATmega16L
- 4.5 - 5.5V for ATmega16

Speed Grades

- 0 - 8 MHz for ATmega16L
- 0 - 16 MHz for ATmega16

Power Consumption @ 1 MHz, 3V, and 25°C for ATmega16L

- Active: 1.1 mA
- Idle Mode: 0.35 mA
- Power-down Mode: < 1 µA



8-bit AVR[®] Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash

ATmega16 ATmega16L Summary

2486MS-AVR-04/06

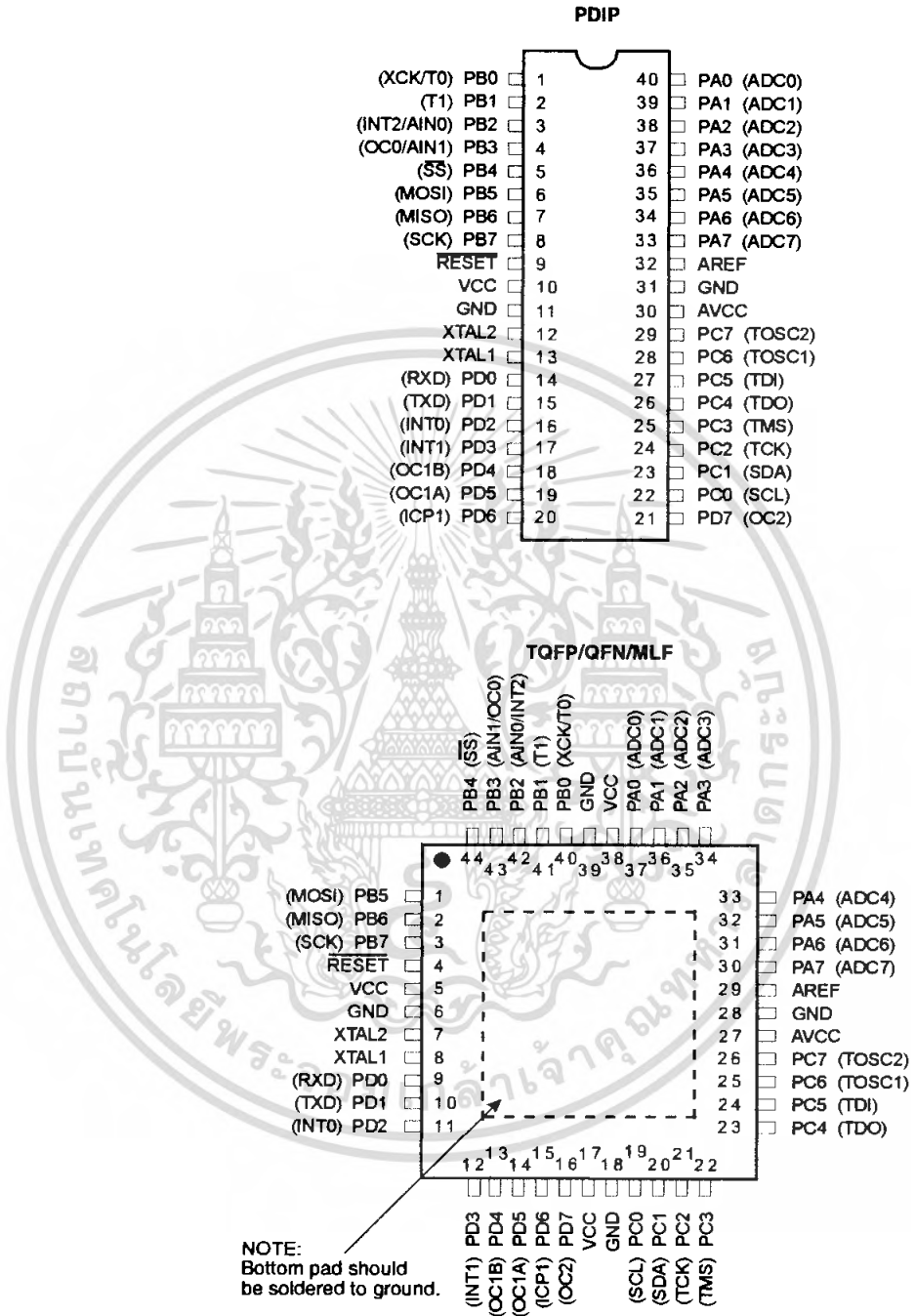


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



in Configurations

Figure 1. Pinout ATmega16



Disclaimer

Typical values contained in this datasheet are based on simulations and characterization of other AVR microcontrollers manufactured on the same process technology. Min and Max values will be available after the device is characterized.

ATmega16(L)

2466MS-AVR-04/06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TLP250

- Transistor Inverter
- Inverter For Air Conditionor
- IGBT Gate Drive
- Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.

This unit is 8-lead DIP package.

TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option(D4)

VDE Approved : DIN EN60747-5-2

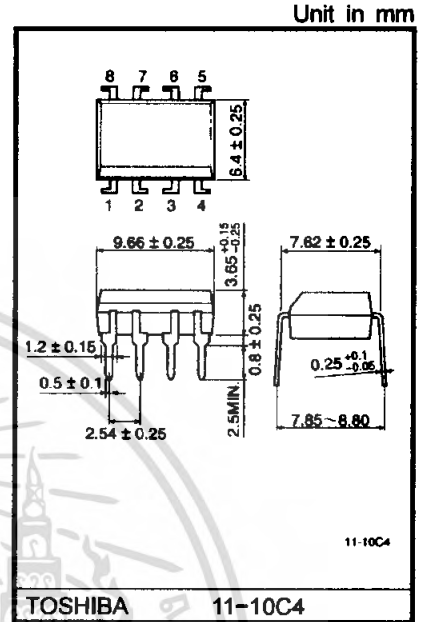
Maximum Operating Insulation Voltage : 890V_{PK}

Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}

(Note):When a EN60747-5-2 approved type is needed,
Please designate "Option(D4)"

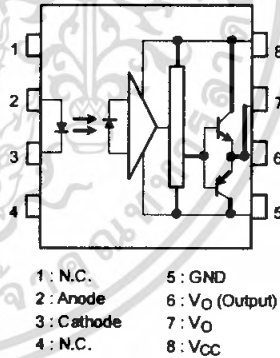
Truth Table

		Tr1	Tr2
		On	Off
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

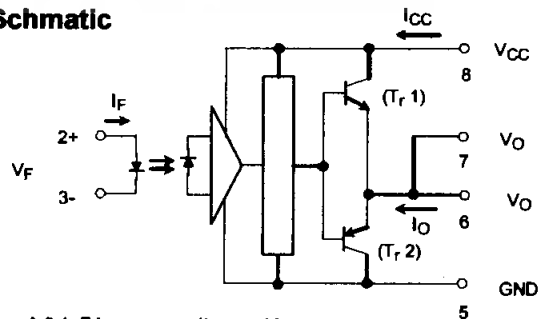


Weight: 0.54 g(Typ.)

Pin Configuration (top view)



Schematic



A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

International IOR Rectifier

PD - 9.1576

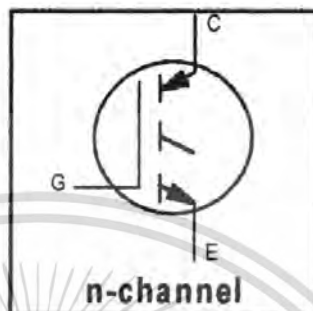
IRG4PH50K

INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

Short Circuit Rated
UltraFast IGBT

Features

- High short circuit rating optimized for motor control, $t_{sc} = 10\mu s$, $V_{CC} = 720V$, $T_J = 125^\circ C$, $V_{GE} = 15V$
- Combines low conduction losses with high switching speed
- Latest generation design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than previous generations



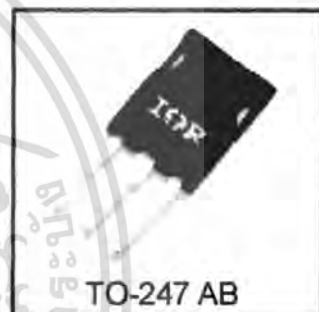
$$V_{CES} = 1200V$$

$$V_{CE(on) \text{ typ.}} = 2.77V$$

$$@V_{GE} = 15V, I_C = 24A$$

Benefits

- As a Freewheeling Diode we recommend our HEXFRED™ ultrafast, ultrasoft recovery diodes for minimum EMI/Noise and switching losses in the Diode and IGBT
- Latest generation 4 IGBTs offer highest power density motor controls possible
- This part replaces the IRGPH50K and IRGPH50M devices



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Voltage	1200	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	45	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	24	
I_{CM}	Pulsed Collector Current ①	90	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current ②	90	
t_{sc}	Short Circuit Withstand Time	10	
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
E_{ARV}	Reverse Voltage Avalanche Energy ③	190	mJ
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	200	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	78	
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	$^\circ C$
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.64	$^\circ C/W$
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	40	
Wt	Weight	6 (0.21)	—	g (oz)

www.irf.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-1

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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{BR(CES)}	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	1200	—	—	V	V _{GE} = 0V, I _C = 250μA
V _{BR(ECS)}	Emitter-to-Collector Breakdown Voltage	18	—	—	V	V _{GE} = 0V, I _C = 1.0A
ΔV _{BR(CES)/ΔT_J}	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.91	—	V/°C	V _{GE} = 0V, I _C = 2.0mA
V _{CE(ON)}	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	2.77	3.5	V	I _C = 24A, V _{GE} = 15V see figures 2, 5
		—	3.28	—		
		—	2.54	—		
V _{GE(th)}	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		I _C = 24A, T _J = 150°C V _{CE} = V _{GE} , I _C = 250μA
ΔV _{GE(th)/ΔT_J}	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-10	—	mV/°C	V _{CE} = V _{GE} , I _C = 2.0mA
g _{fs}	Forward Transconductance	13	19	—	S	V _{CE} = 100V, I _C = 24A
I _{CES}	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	250	μA	V _{GE} = 0V, V _{CE} = 1200V
		—	—	2.0		V _{GE} = 0V, V _{CE} = 10V, T _J = 25°C
		—	—	5000		V _{GE} = 0V, V _{CE} = 1200V, T _J = 150°C
I _{GES}	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	±100	nA	V _{GE} = ±20V

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

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q _g	Total Gate Charge (turn-on)	—	180	270	nC	I _C = 24A V _{CC} = 400V, see figure 8 V _{GE} = 15V
Q _{ge}	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	25	38		
Q _{gc}	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	70	110		
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	36	—	ns	T _J = 25°C I _C = 24A, V _{CC} = 960V V _{GE} = 15V, R _G = 5.0Ω
t _r	Rise Time	—	27	—		
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	200	300		
t _f	Fall Time	—	130	190		
E _{on}	Turn-On Switching Loss	—	1.21	—	mJ	Energy losses include "tail" see figures 9, 10, 14
E _{off}	Turn-Off Switching Loss	—	2.25	—		
E _{ts}	Total Switching Loss	—	3.46	4.1		
t _{ec}	Short Circuit Withstand Time	10	—	—	μs	V _{CC} = 720V, T _J = 125°C V _{GE} = 15V, R _G = 5.0Ω
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	35	—	ns	T _J = 150°C, I _C = 24A, V _{CC} = 960V V _{GE} = 15V, R _G = 5.0Ω Energy losses include "tail" see figures 10, 11, 14
t _r	Rise Time	—	29	—		
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	380	—		
t _f	Fall Time	—	280	—		
E _{ts}	Total Switching Loss	—	7.80	—	mJ	
L _E	Internal Emitter Inductance	—	13	—	nH	Measured 5mm from package
C _{iss}	Input Capacitance	—	2800	—	pF	V _{GE} = 0V V _{CC} = 30V, see figure 7 f = 1.0MHz
C _{oss}	Output Capacitance	—	140	—		
C _{res}	Reverse Transfer Capacitance	—	53	—		

Notes:

- ① Repetitive rating; V_{GE} = 20V, pulse width limited by max. junction temperature. (see figure 13b)
- ② V_{CC} = 80% (V_{CES}), V_{GE} = 20V, L = 10μH, R_G = 5.0Ω, (see figure 13a)
- ③ Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature.
- ④ Pulse width ≤ 80μs; duty factor ≤ 0.1%.
- ⑤ Pulse width 5.0μs, single shot.

+5V Powered, Dual RS-232 Transmitter/Receiver

The ICL232 is a dual RS-232 transmitter/receiver interface circuit that meets all EIA RS-232C and V.28 specifications. It requires a single +5V power supply, and features two onboard charge pump voltage converters which generate +10V and -10V supplies from the 5V supply.

The drivers feature true TTL/CMOS input compatibility, slew-rate-limited output, and 300Ω power-off source impedance. The receivers can handle up to +30V, and have a 3kΩ to 7kΩ input impedance. The receivers also have hysteresis to improve noise rejection.

Ordering Information

PART NUMBER	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE	PKG. DWG. #
ICL232CPE	0 to 70	16 Ld PDIP	E16.3
ICL232CBE	0 to 70	16 Ld SOIC	M16.3
ICL232CBET		16 Ld SOIC Tape and Reel	M16.3
ICL232CBEZ (See Note)	0 to 70	16 Ld SOIC (Pb-free)	M16.3
ICL232CBEZT (See Note)		16 Ld SOIC Tape and Reel (Pb-free)	M16.3
ICL232IPE	-40 to 85	16 Ld PDIP	E16.3
ICL232IBE	-40 to 85	16 Ld SOIC	M16.3
ICL232IBET		16 Ld SOIC Tape and Reel	M16.3
ICL232MJE	-55 to 125	16 Ld CERDIP	F16.3

NOTE: Intersil Pb-free plus anneal products employ special Pb-free material sets; molding compounds/die attach materials and 100% matte tin plate termination finish, which are RoHS compliant and compatible with both SnPb and Pb-free soldering operations. Intersil Pb-free products are MSL classified at Pb-free peak reflow temperatures that meet or exceed the Pb-free requirements of IPC/JEDEC J STD-020.

Features

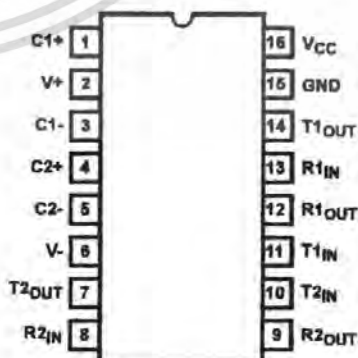
- Meets All RS-232C and V.28 Specifications
- Requires Only Single +5V Power Supply
- Onboard Voltage Doubler/Inverter
- Low Power Consumption
- 2 Drivers
 - ±9V Output Swing for +5V Input
 - 300Ω Power-off Source Impedance
 - Output Current Limiting
 - TTL/CMOS Compatible
 - 30V/μs Maximum Slew Rate
- 2 Receivers
 - ±30V Input Voltage Range
 - 3kΩ to 7kΩ Input Impedance
 - 0.5V Hysteresis to Improve Noise Rejection
- All Critical Parameters are Guaranteed Over the Entire Commercial, Industrial and Military Temperature Ranges
- Pb-Free Plus Anneal Available (RoHS Compliant)

Applications

- Any System Requiring RS-232 Communications Port
 - Computer - Portable and Mainframe
 - Peripheral - Printers and Terminals
 - Portable Instrumentation
 - Modems
- Dataloggers

Pinout

ICL232 (PDIP, CERDIP, SOIC)
TOP VIEW



POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

- OUTPUT CURRENT TO 1.5A
- OUTPUT VOLTAGES OF 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 10; 12; 15; 18; 24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION

DESCRIPTION

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, TO-220FM, TO-3 and D²PAK packages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.

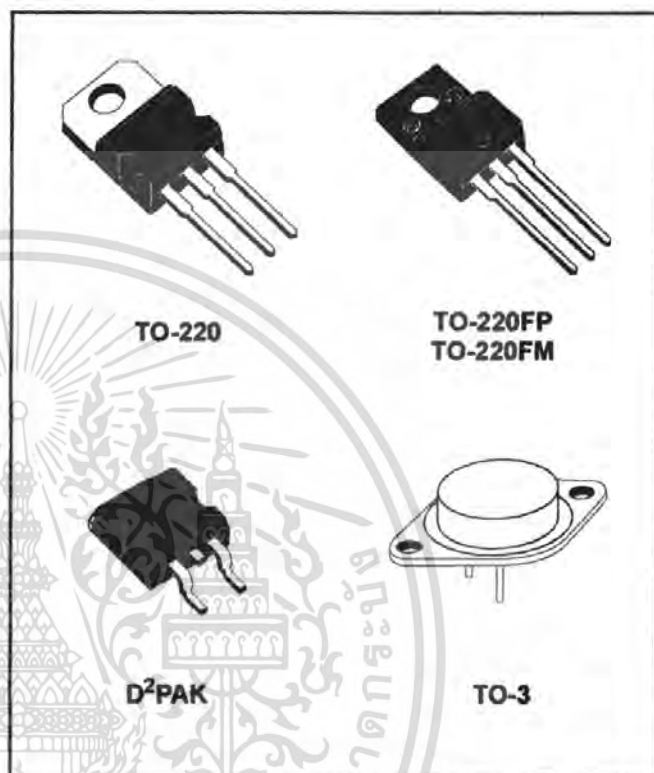
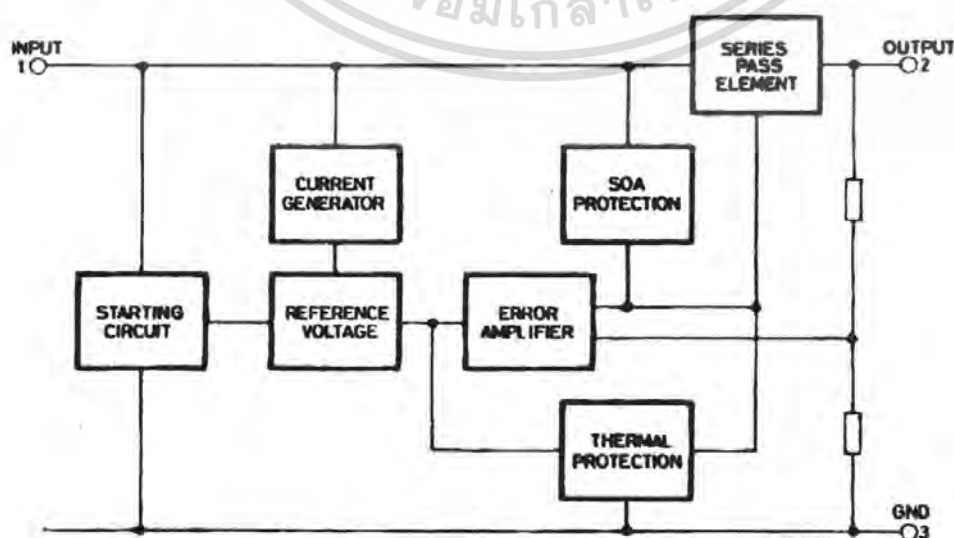


Figure 1: Schematic Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

L7800 SERIES

Table 1: Absolute Maximum Ratings

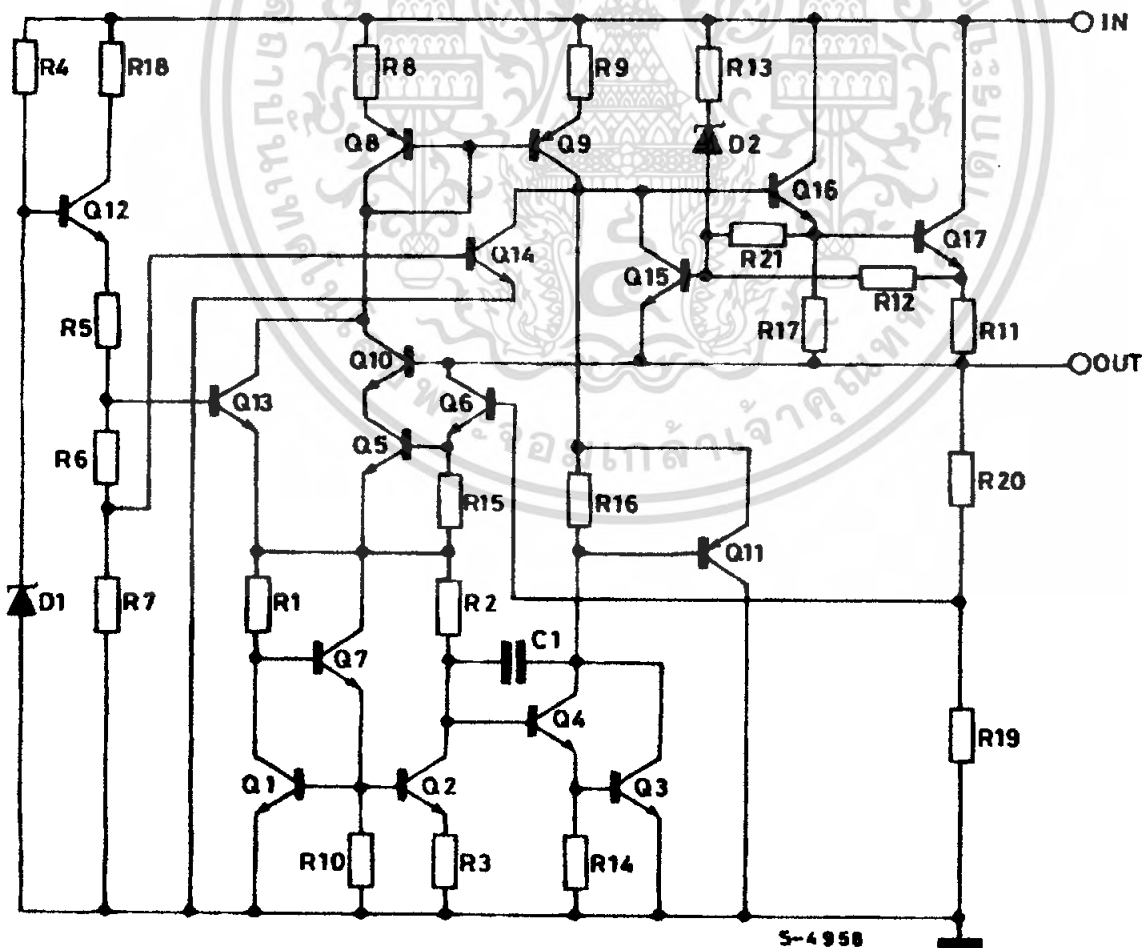
Symbol	Parameter		Value	Unit
V_i	DC Input Voltage	for $V_o = 5$ to $18V$	35	V
		for $V_o = 20, 24V$	40	
I_o	Output Current		Internally Limited	
P_{tot}	Power Dissipation		Internally Limited	
T_{stg}	Storage Temperature Range		-65 to 150	°C
T_{op}	Operating Junction Temperature Range	for L7800	-55 to 150	°C
		for L7800C	0 to 150	

Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

Table 2: Thermal Data

Symbol	Parameter	D ² PAK	TO-220	TO-220FP	TO-220FM	TO-3	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case Max	3	5	5	5	4	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	62.5	50	60	60	35	°C/W

Figure 2: Schematic Diagram



CD40106B Types

CMOS Hex Schmitt Triggers

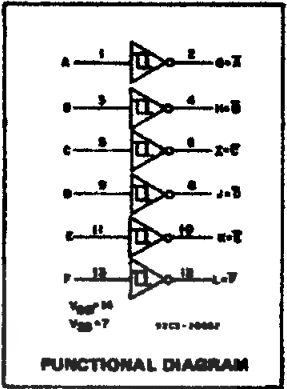
High-Voltage Types (20-Volt Rating)

■ CD40106B consists of six Schmitt-trigger circuits. Each circuit functions as an inverter with Schmitt-trigger action on the output. The trigger switches at different points for positive- and negative-going signals. The difference between the positive-going voltage (V_P) and the negative-going voltage (V_N) is defined as hysteresis voltage (V_H) (see Fig.8).

The CD40106B types are supplied in 14-lead hermetic dual-in-line ceramic packages (D and F suffixes), 14-lead dual-in-line plastic package (E suffix), 14-lead small-outline package (NSR suffix), and in chip form (H suffix).

Features:

- Schmitt-trigger action with no external components
- Hysteresis voltage (typ.) 0.9 V at $V_{DD} = 5\text{ V}$, 2.3 V at $V_{DD} = 10\text{ V}$, and 3.5 V at $V_{DD} = 15\text{ V}$
- Noise immunity greater than 50%
- No limit on input rise and fall times
- Standardized, symmetrical output characteristics
- 100% tested for quiescent current at 20 V
- Maximum input current of 1 μA at 18 V over full package-temperature range; 100 nA at 18 V and 25°C
- Low V_{DD} to V_{SS} current during slow input ramp
- 5-V, 10-V, and 15-V parametric ratings
- Meets all requirements of JEDEC Tentative Standard No. 19B, "Standard Specifications for Description of 'B' Series CMOS Devices"



Applications:

- Wave and pulse shapers
- High-noise-environment systems
- Monostable multivibrators
- Astable multivibrators

MAXIMUM RATINGS, Absolute-Maximum Values:

DC SUPPLY-VOLTAGE RANGE, (V_{DD}) (Voltages referenced to V_{SS} Terminal)	-0.5V to +20V
INPUT VOLTAGE RANGE, ALL INPUTS	-0.5V to $V_{DD} + 0.5\text{ V}$
DC INPUT CURRENT, ANY ONE INPUT	$\pm 10\text{ mA}$
POWER DISSIPATION PER PACKAGE (P_D):	
For $T_A = -55^\circ\text{C}$ to $+100^\circ\text{C}$	500mW
For $T_A = +100^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	Derate Linearly at 12mW/ $^\circ\text{C}$ to 200mW
DEVICE DISSIPATION PER OUTPUT TRANSISTOR	
FOR $T_A = \text{FULL PACKAGE-TEMPERATURE RANGE (All Package Types)}$	100mW
OPERATING-TEMPERATURE RANGE (T_A)	-55°C to $+125^\circ\text{C}$
STORAGE TEMPERATURE RANGE (T_{stg})	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
LEAD TEMPERATURE (DURING SOLDERING):	
At distance 1/16 \pm 1/32 inch (1.59 \pm 0.79mm) from case for 10s max	+260°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

For maximum reliability, nominal operating conditions should be selected so that operation is always within the following ranges:

CHARACTERISTIC	LIMITS		UNITS
	MIN.	MAX.	
Supply-Voltage Range (For T_A Full Package-Temperature Range)	3	18	V

DYNAMIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

At $T_A = 25^\circ\text{C}$, Input $t_r, t_f = 20\text{ ns}$, $C_L = 80\text{ pF}$, $R_L = 200\text{ k}\Omega$

CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	LIMITS		UNITS	
		V_{DD} (V)	TYP.		MAX.
Propagation Delay Time:	t_{PHL}	5	140	280	ns
	t_{PLH}	10	70	140	
	t_{PLH}	15	60	120	
Transition Time:	t_{THL}	5	100	200	ns
	t_{TLH}	10	50	100	
	t_{TLH}	15	40	80	
Input Capacitance, C_{IN}	Any Input		6	7.5	pF

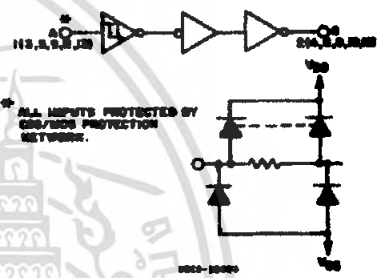


Fig.1 - Logic diagram (1 of 6 Schmitt triggers).

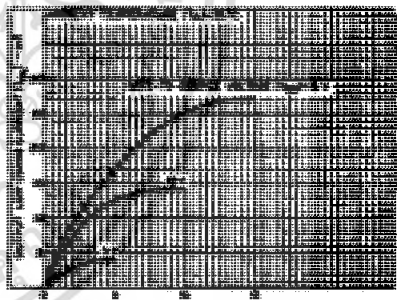


Fig.2 - Typical output low (sink) current characteristics.



Fig.3 - Minimum output low (sink) current characteristics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1N4728A to 1N4764A

Vishay Semiconductors

Zener Diodes

Features

- Silicon Planar Power Zener Diodes
- For use in stabilizing and clipping circuits with high power rating
- Standard Zener voltage tolerance is $\pm 5\%$
- Lead (Pb)-free component
- Component in accordance to RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



17173

Applications

- Voltage stabilization

Mechanical Data

Case: DO-41 Glass case

Weight: approx. 310 mg

Packaging Codes/Options:

TR / 5 k per 13" reel, 25 k/box

TAP / 5 k per Ammo pack (52 mm tape), 25 k/box

Absolute Maximum Ratings

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Power dissipation		P_{tot}	1.3 ¹⁾	W
Z-current		I_z	P_V/V_Z	mA

¹⁾ Valid provided that leads at a distance of 4 mm from case are kept at ambient temperature.

Thermal Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Thermal resistance junction to ambient air		R_{thJA}	110 ¹⁾	K/W
Junction temperature		T_J	175	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	- 65 to + 175	$^{\circ}\text{C}$

¹⁾ Valid provided that leads at a distance of 4 mm from case are kept at ambient temperature.

Electrical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Forward voltage	$I_F = 200\text{ mA}$	V_F			1.2	V

1N4728A to 1N4764A



Vishay Semiconductors

Electrical Characteristics

1N4728A...1N4764A

Partnumber	Nominal Zener Voltage ¹⁾	Test Current	Maximum Dynamic Impedance			Maximum Reverse Leakage Current		Surge Current ³⁾ at T _A = 25 °C	Maximum Regulator Current ²⁾
			Z _{ZT} at I _{ZT}	Z _{ZK} at I _{ZK}	I _{ZK}	I _R	Test Voltage V _R		
	V	mA	Ω	Ω	mA	μA	V	mA	mA
1N4728A	3.3	76	10	400	1	100	1	1380	276
1N4729A	3.8	69	10	400	1	100	1	1260	252
1N4730A	3.9	64	9	400	1	50	1	1190	234
1N4731A	4.3	58	9	400	1	10	1	1070	217
1N4732A	4.7	53	8	500	1	10	1	970	193
1N4733A	5.1	49	7	550	1	10	1	890	178
1N4734A	5.8	45	5	600	1	10	2	810	162
1N4735A	6.2	41	2	700	1	10	3	730	146
1N4736A	6.8	37	3.5	700	1	10	4	660	133
1N4737A	7.5	34	4	700	0.5	10	5	605	121
1N4738A	8.2	31	4.5	700	0.5	10	6	550	110
1N4739A	9.1	28	5	700	0.5	10	7	500	100
1N4740A	10	25	7	700	0.25	10	7.6	454	91
1N4741A	11	23	8	700	0.25	5	8.4	414	83
1N4742A	12	21	9	700	0.25	5	9.1	380	76
1N4743A	13	19	10	700	0.25	5	9.9	344	69
1N4744A	15	17	14	700	0.25	5	11.4	304	61
1N4745A	16	15.5	16	700	0.25	5	12.2	285	57
1N4746A	18	14	20	750	0.25	5	13.7	250	50
1N4747A	20	12.5	22	750	0.25	5	15.2	225	45
1N4748A	22	11.5	23	750	0.25	5	16.7	205	41
1N4749A	24	10.5	25	750	0.25	5	18.2	190	38
1N4750A	27	9.5	35	750	0.25	5	20.6	170	34
1N4751A	30	8.5	40	1000	0.25	5	22.8	150	30
1N4752A	33	7.5	45	1000	0.25	5	25.1	135	27
1N4753A	36	7	50	1000	0.25	5	27.4	125	25
1N4754A	39	6.5	60	1000	0.25	5	29.7	115	23
1N4755A	43	6	70	1500	0.25	5	32.7	110	22
1N4756A	47	5.5	80	1500	0.25	5	35.8	95	19
1N4757A	51	5	95	1500	0.25	5	38.8	90	18
1N4758A	56	4.5	110	2000	0.25	5	42.6	80	16
1N4759A	62	4	125	2000	0.25	5	47.1	70	14
1N4760A	68	3.7	150	2000	0.25	5	51.7	65	13
1N4761A	75	3.3	175	2000	0.25	5	56	60	12
1N4762A	82	3.0	200	3000	0.25	5	62.2	55	11
1N4763A	91	2.8	250	3000	0.25	5	69.2	50	10
1N4764A	100	2.5	350	3000	0.25	5	76.0	45	9

¹⁾ Based on dc-measurement at thermal equilibrium while maintaining the lead temperature (T_L) at 30 °C + 1 °C, 9.5 mm (3/8") from the diode body.

²⁾ Valid provided that electrodes at a distance of 4 mm from case are kept at ambient temperature.

³⁾ T_P = 10 ms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DB101G THRU DB107G

Single Phase 1.0 AMP. Glass Passivated Bridge Rectifiers



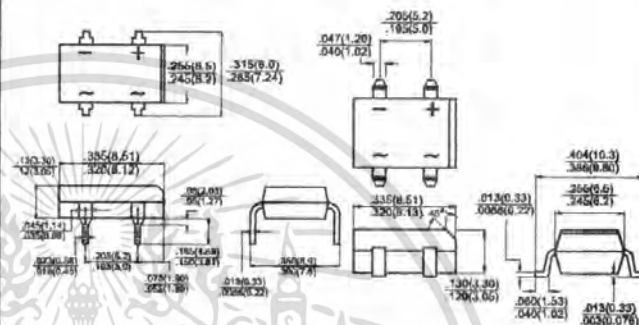
Voltage Range
50 to 1000 Volts
Current
1.0 Ampere

Features

- UL Recognized File # E-96005
- Ideal for printed circuit board
- Reliable low cost construction utilizing molded plastic technique
- High temperature soldering guaranteed:
250°C / 10 seconds / 0.375" (9.5mm)
lead length at 5 lbs., (2.3 kg) tension
- Small size, simple installation
- Leads solderable per MIL-STD-202,
Method 208
- High surge current capability

DB

DBS



Dimensions in inches and (millimeters)

Maximum Ratings and Electrical Characteristics

Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%

Type Number	DB101G	DB102G	DB103G	DB104G	DB105G	DB106G	DB107G	Units
	DBS 101G	DBS 102G	DBS 103G	DBS 104G	DBS 105G	DBS 106G	DBS 107G	
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current @ T _A = 40°C	1.0							A
Peak Forward Surge Current, 8.3 ms Single Half Sine-wave Superimposed on Rated Load (JEDEC method)	50							A
Maximum Instantaneous Forward Voltage @ 1.0A	1.1							V
Maximum DC Reverse Current @ T _A =25°C at Rated DC Blocking Voltage @ T _A =125°C	10 500							uA uA
Operating Temperature Range T _J	-55 to +150							°C
Storage Temperature Range T _{STG}	-55 to +150							°C

Note: DBS for Surface Mount Package.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES (DB101G THRU DB107G)

FIG.1- MAXIMUM DERATING CURVE FOR OUTPUT RECTIFIED CURRENT

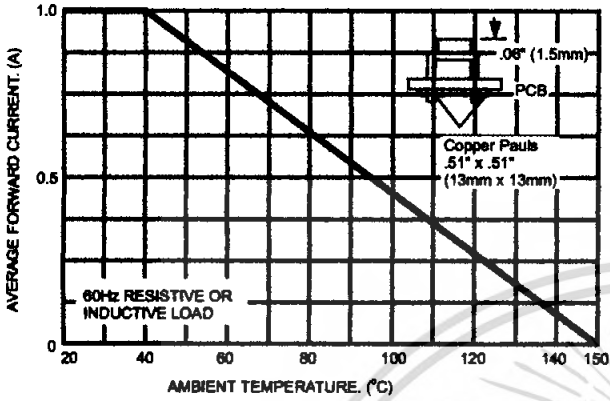


FIG.2- MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT

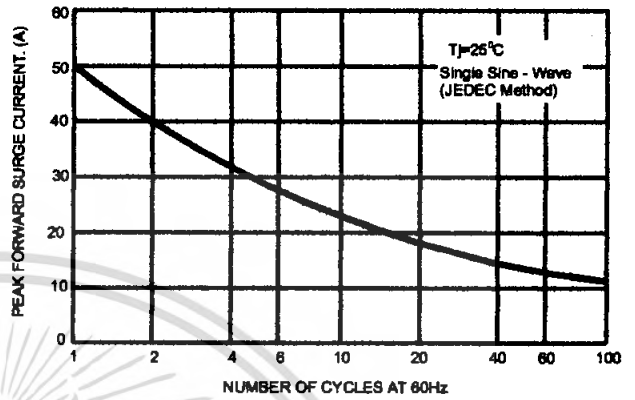


FIG.3- TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS PER BRIDGE ELEMENT

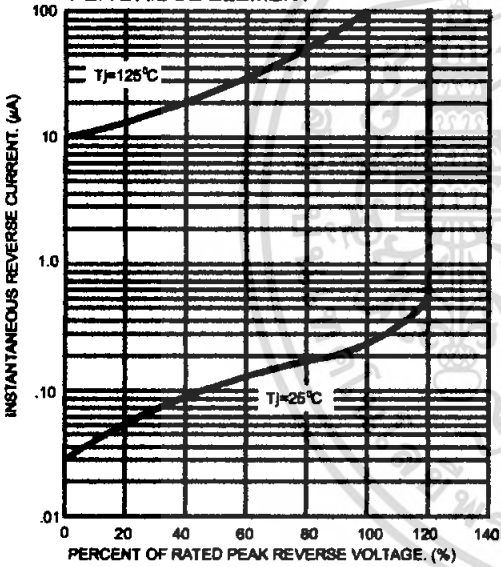


FIG.4- TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS PER BRIDGE ELEMENT

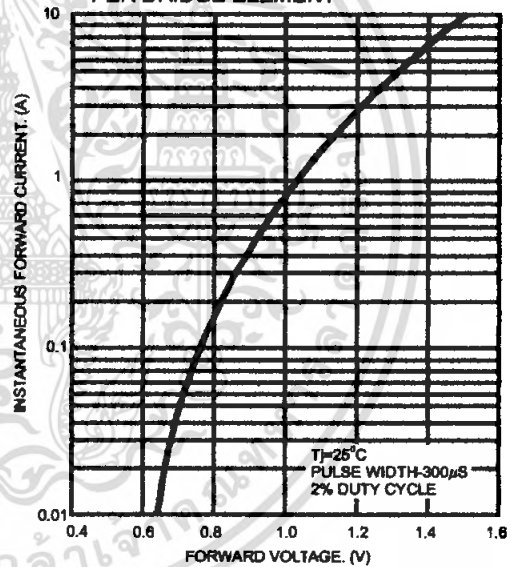
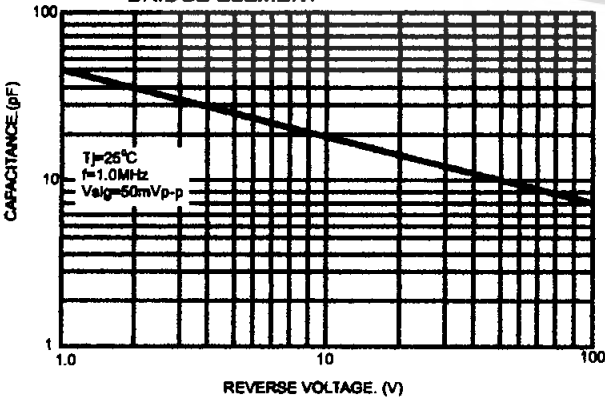


FIG.5- TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE PER BRIDGE ELEMENT



ภาคผนวก ค
โปรแกรม

```
Public Speed As String
Public Count_Graph As Integer
Public text1 As String
Public text2 As String
Public buff_count_speed As Integer
Public count_s As Integer
Dim mspeed As Integer
Public Main_data As String
Public up_down As Integer
Public Ramp_Count As Integer
Dim ramp_o As Integer
Dim count_Timer5 As Integer
Dim ramp_all As Integer
Option Explicit
```

```
Private Type MotorRecord
    CarId As String
    Model As String
    Rated As String
    SpeedCommand As Double
End Type
```

```
Dim MyMotor As clsMotor
Dim Motor As MotorRecord
Dim strOut As String
```

```
Private Sub Auto_Click()
    Timer5.Enabled = True
    Timer5.Interval = 10
    Count_Graph = 0
    HScroll1.Value = speed_in.Text
    TEXT_START_Click
End Sub
```

```
Private Sub btnAccDown_Click()
    Accelerate (-1)
End Sub
```

```
Private Sub btnAccUp_Click()
    Accelerate (1)
End Sub
```

```
Private Sub btnBrakeMotor_Click()
```

```
    btnStartMotor.Enabled = True
    btnBrakeMotor.Enabled = False
    btnNameplate.Enabled = False
    btnRated.Enabled = False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

btnAccUp.Enabled = False
btnAccDown.Enabled = False
Command2.Enabled = True
Command3.Enabled = True
Command4.Enabled = True
Command5.Enabled = True
Timer1.Enabled = False
MSComm1.Output = "P"
Speed = 0
End Sub
Private Sub btnExit_Click()
    End
End Sub

Private Sub btnLoad_Click()
    MSComm1.Output = "L"
End Sub

Private Sub btnNameplate_Click()
    btnNameplate.Enabled = False
    btnRated.Enabled = True
    btnStartMotor.Enabled = False
    lblState.Enabled = True
    strOut = "CarId :" & Motor.CarId & vbNewLine
    strOut = strOut & "Model :" & Motor.Model & vbNewLine
    strOut = strOut & "Rated Speed :" & Motor.Rated & vbNewLine

    lblState.Caption = strOut
End Sub
Private Sub btnRated_Click()
    btnNameplate.Enabled = False
    btnRated.Enabled = False
    btnStartMotor.Enabled = True
    btnAccUp.Enabled = False
    btnAccDown.Enabled = False
    btnBrakeMotor.Enabled = False

    Motor.CarId = InputBox("Type of Motor", "CarId", "AC/DC Motor")
    Motor.Model = InputBox("Rate Voltage and Rate Current", "Model", "xxxV xxA")
    Motor.Rated = InputBox("Rate Speed", "RatedSpeed", "xxxxrpm")

    strOut = "CarId : " & Motor.CarId & vbNewLine
    strOut = strOut & "Model : " & Motor.Model & vbNewLine
    strOut = strOut & "Rated Speed : " & Motor.Rated & " rpm "

    lblState.Caption = strOut

End Sub
Private Sub SpeedError(Motor As MotorRecord)
    Dim Result As Single

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Result = Val(SpeedCommand) - Val(ActualSpeed)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnStartMotor_Click()
```

```
    btnStartMotor.Enabled = True
```

```
    btnBrakeMotor.Enabled = True
```

```
    btnNameplate.Enabled = False
```

```
    btnRated.Enabled = False
```

```
    btnAccUp.Enabled = True
```

```
    btnAccDown.Enabled = True
```

```
    Command4.Enabled = True
```

```
    Command5.Enabled = True
```

```
    MSComm1.Output = "G"
```

```
    Timer1.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Sub Sent()
```

```
Dim num(0 To 4) As Integer
```

```
MSComm1.Output = "C"
```

```
num(0) = iSevenSegmentIntegerX2.Value
```

```
num(1) = Int(num(0) / 1000)
```

```
num(2) = num(0) Mod 1000
```

```
num(3) = num(2) Mod 100
```

```
num(4) = num(3) Mod 10
```

```
num(2) = Int(num(2) / 100)
```

```
num(3) = Int(num(3) / 10)
```

```
MSComm1.Output = Chr(num(1) + 48)
```

```
MSComm1.Output = Chr(num(2) + 48)
```

```
MSComm1.Output = Chr(num(3) + 48)
```

```
MSComm1.Output = Chr(num(4) + 48)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
```

```
    iLedRoundX1.Active = True
```

```
    iLedRoundX2.Active = False
```

```
    btnNameplate.Enabled = True
```

```
    MSComm1.Output = "U"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
```

```
    iLedRoundX2.Active = True
```

```
    iLedRoundX1.Active = False
```

```
    btnNameplate.Enabled = True
```

```
    MSComm1.Output = "B"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command4_Click()
```

```
    iLedRoundX3.Active = True
```

```
    iLedRoundX4.Active = False
```

```
    MSComm1.Output = "F"
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()
```

```
    iLedRoundX4.Active = True
```

```
    iLedRoundX3.Active = False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MSComm1.Output = "R"  
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()  
Set MyMotor = New clsMotor  
MSComm1.Settings = "19200,N,8,1"  
MSComm1.CommPort = 1  
MSComm1.InputLen = 0  
MSComm1.PortOpen = True  
MSComm1.RThreshold = 1  
Command4.Enabled = False  
Command5.Enabled = False  
btnNameplate.Enabled = False  
btnRated.Enabled = False  
btnStartMotor.Enabled = False  
btnAccUp.Enabled = False  
btnAccDown.Enabled = False  
btnBrakeMotor.Enabled = False  
Timer1.Enabled = True  
Timer1.Interval = 10  
lblState.Enabled = True  
SpeedGraph1.ClearGraph  
Speed = 0  
End Sub
```

```
Private Sub HScroll1_Scroll()  
HScroll1_Change  
End Sub
```

```
Private Sub HScroll1_Change()  
iKnobX1.Position = Format(HScroll1.Value, "###")  
Label3.Caption = Format(HScroll1.Value, "###")  
iSevenSegmentIntegerX2.Value = Format(HScroll1.Value, "###")  
text2 = iSevenSegmentIntegerX2.Value  
iAngularGaugeX1.Position = Format(HScroll1.Value, "###")  
Sent  
End Sub
```

```
Private Sub MSComm1_OnComm()  
Dim StrData As String  
Dim char_command As String  
Dim buff_speed As String  
Dim f_string1 As String  
Dim f_string2 As String  
Dim a As String  
StrData = MSComm1.Input  
T4.Text = StrData  
If StrData = "a" Then  
MSComm1.Output = StrData  
End If  
If StrData = "b" Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

iLedRoundX2.Active = True
iLedRoundX1.Active = False
End If
If StrData = "u" Then
    iLedRoundX2.Active = False
    iLedRoundX1.Active = True

End If
If StrData = "f" Then
    iLedRoundX3.Active = True
    iLedRoundX4.Active = False
End If
If StrData = "r" Then
    iLedRoundX3.Active = False
    iLedRoundX4.Active = True

End If
If Left(StrData, 1) = "S" And Len(StrData) < 6 Then
    buff_speed = Right(StrData, Len(StrData) - 1)
    f_string1 = InStr(buff_speed, "S")
    If (f_string1 = 0 And InStr(Right(StrData, Len(StrData) - 1), "C") = 0 And
InStr(Right(StrData, Len(StrData) - 1), "f") = 0 And InStr(Right(StrData,
Len(StrData) - 1), "r") = 0) Then
        buff_count_speed = buff_count_speed + buff_speed
        count_s = count_s + 1
        If iLedRoundX4.Active = True Then
            iSevenSegmentIntegerX1.Value = -buff_speed
        Else
            iSevenSegmentIntegerX1.Value = buff_speed
        End If
        text1 = buff_speed
        iAngularGaugeX2.Position = buff_speed
        iSevenSegmentIntegerX3.Value = mspeed - buff_speed
        If count_s = 5 Then
            Speed = buff_count_speed / 5
            buff_count_speed = 0
            count_s = 0

        End If
    End If
End If
a = InStr(StrData, "E")
If a = 1 And Len(StrData) < 6 Then
    If (InStr(Right(StrData, Len(StrData) - 1), "C") = 0 And InStr(Right(StrData,
Len(StrData) - 1), "f") = 0 And InStr(Right(StrData, Len(StrData) - 1), "r") = 0) Then
        Main_data = Right(StrData, Len(StrData) - 1)
        iKnobX1.Position = Main_data
    End If
End If
'Debug.Print Main_data

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'Debug.Print iKnobX1.Position
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnStopPlot_Click()
```

```
    Timer1.Enabled = False
```

```
    Timer4.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnClsGraph_Click()
```

```
    SpeedGraph1.ClearGraph
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btnStartPlot_Click()
```

```
    SpeedGraph1.ClearGraph
```

```
    Timer2.Enabled = True
```

```
    Timer2.Interval = 50
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Ramp_Click()
```

```
    Timer4.Enabled = True
```

```
    Timer4.Interval = 1
```

```
    up_down = 1
```

```
    ramp_o = 1
```

```
    ramp_all = speed_in.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub speed_Change()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub TEXT_START_Click()
```

```
    Timer3.Enabled = True
```

```
    Timer3.Interval = 1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub TEXT_STOP_Click()
```

```
    Timer3.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
```

```
    Dim SomeNumber As Single
```

```
    Dim data As String
```

```
    Dim old As Integer
```

```
    data = iKnobX1.Position
```

```
    If data < 1 Then
```

```
        data = 1
```

```
    End If
```

```
    HScroll1.Value = data
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mspeed = data
Label3.Caption = data
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Accelerate(ByVal NewSpeed As String)
    mspeed = mspeed + NewSpeed
```

```
    If mspeed > 3000 Then
        mspeed = 3000
```

```
    End If
```

```
    If mspeed < 1 Then
        mspeed = 1
```

```
    End If
```

```
    Label3.Caption = mspeed
```

```
    HScroll1.Value = mspeed
```

```
    mspeed = iKnobX1.Position
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer2_Timer()
```

```
    SpeedGraph1.AddNewValue (Speed)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer3_Timer()
```

```
    Count_Graph = Count_Graph + 1
```

```
    Open "c:\command.txt" For Append As #1
```

```
    Write #1, text2
```

```
    Close #1
```

```
    Open "c:\current.txt" For Append As #1
```

```
    If iLedRoundX4.Active = True Then
```

```
        Write #1, -text1
```

```
    Else
```

```
        Write #1, text1
```

```
    End If
```

```
    Close #1
```

```
    Open "c:\count.txt" For Append As #1
```

```
    Write #1, Count_Graph
```

```
    Close #1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer4_Timer()
```

```
    Dim sp As Integer
```

```
    sp = 20
```

```
    If up_down = 1 Then
```

```
        Ramp_Count = Ramp_Count + sp
```

```
        If Ramp_Count > 0 Then
```

```
            iKnobX1.Position = Abs(Ramp_Count)
```

```
            iLedRoundX3.Active = True
```

```
            iLedRoundX4.Active = False
```

```
        End If
```

```
        If Ramp_Count < 0 Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        iKnobX1.Position = Abs(Ramp_Count)
        iLedRoundX3.Active = False
        iLedRoundX4.Active = True
    End If
    If Ramp_Count > ramp_all Then
        up_down = 0
    End If
End If
If up_down = 0 Then
    Ramp_Count = Ramp_Count - sp
    If Ramp_Count > 0 Then
        iKnobX1.Position = Abs(Ramp_Count)
        iLedRoundX3.Active = True
        iLedRoundX4.Active = False
    End If
    If Ramp_Count < 0 Then
        iKnobX1.Position = Abs(Ramp_Count)
        iLedRoundX3.Active = False
        iLedRoundX4.Active = True
    End If
    If Ramp_Count < -ramp_all Then
        up_down = 1
    End If
End If
If Ramp_Count > 0 And ramp_o = 1 Then
    MSComm1.Output = "F"
    ramp_o = 0
End If
If Ramp_Count < 0 And ramp_o = 0 Then
    MSComm1.Output = "R"
    ramp_o = 1
End If
Count_Graph = Count_Graph + 1
Open "c:\R_command.txt" For Append As #1
If iLedRoundX4.Active = True Then
    Write #1, -text2
Else
    Write #1, text2
End If
Close #1
Open "c:\R_current.txt" For Append As #1
If iLedRoundX4.Active = True Then
    Write #1, -text1
Else
    Write #1, text1
End If
Close #1
Open "c:\R_count.txt" For Append As #1
Write #1, Count_Graph
Close #1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Debug.Print Ramp_Count  
Debug.Print iKnobX1.Position  
End Sub
```

```
Private Sub Timer5_Timer()  
    count_Timer5 = count_Timer5 + 1  
    If count_Timer5 > 800 And count_Timer5 < 802 Then  
        MSComm1.Output = "L"  
    End If  
    If count_Timer5 > 1600 And count_Timer5 < 1602 Then  
        MSComm1.Output = "L"  
    End If  
    If count_Timer5 > 2500 And count_Timer5 < 2502 Then  
        Timer3.Enabled = False  
        Timer5.Enabled = False  
        count_Timer5 = 0  
        Count_Graph = 0  
    End If
```



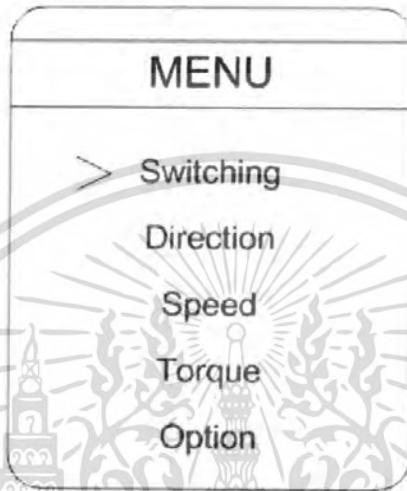
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การใช้งานชุดควบคุม DC Drives

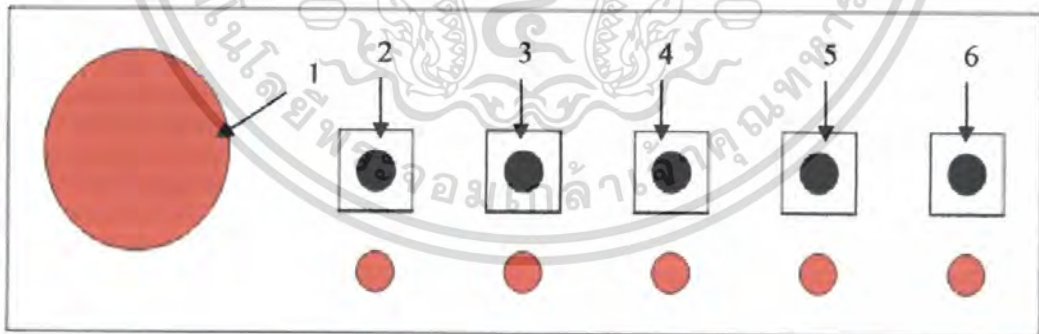
การเริ่มต้นเข้าสู่การควบคุม หลังจากเชื่อมต่อชุดควบคุมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟและมอเตอร์เรียบร้อยแล้ว การควบคุมสามารถทำได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เมื่อเริ่มใช้งานหน้าจอควบคุมจะปรากฏขึ้นดังรูป



รูปที่ 1 หน้าจอเครื่องควบคุม

2. การสั่งงาน และเลือกคำสั่ง สามารถควบคุมจากสวิตช์ควบคุม ดังรูป



รูปที่ 2 สวิตช์ควบคุม

หมายเลข 1 คือ ปุ่มปรับความเร็ว

หมายเลข 2 คือ สวิตช์เปิด - ปิดรีเลย์

หมายเลข 3 คือ ปุ่ม select

หมายเลข 4 คือ ปุ่มเลื่อนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 5 คือ ปุ่มเลื่อนลง

หมายเลข 6 คือ ปุ่ม exit

การใช้งาน Menu

Menu ในชุดควบคุมมีอยู่ด้วยกัน 5 เมนูหลักๆ คือ Switching, Direction, Speed, Torque, Option ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีคำสั่งย่อยภายใน ซึ่งคำสั่งที่มีเครื่องหมาย > หน้าคำสั่ง หมายถึง คำสั่งนี้ถูกเลือกแล้ว ซึ่งแต่ละคำสั่งของเมนูสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมนู Switching

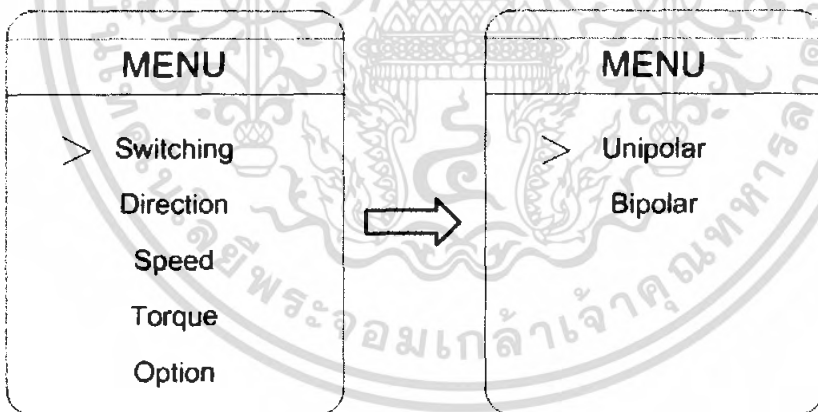
เป็นเมนูแรกที่พบอยู่ด้านบนของหน้าจอแสดงผล มีเมนูย่อยๆ อีก คือ Unipolar และ Bipolar ซึ่งมีการทำงานดังนี้

Unipolar

คำสั่ง Unipolar เป็นคำสั่งที่ใช้กำหนดวิธีการสวิตช์ของชุด converter เพื่อให้ทำงานแบบ Unipolar โดยลำดับการสั่งงานเป็นดังนี้ Menu >>> Switching >>> Unipolar

Bipolar

คำสั่ง Bipolar เป็นคำสั่งที่ใช้กำหนดวิธีการสวิตช์ของชุด converter เพื่อให้ทำงานแบบ Bipolar โดยลำดับการสั่งงานเป็นดังนี้ Menu >>> Switching >>> Bipolar



รูปที่ 3

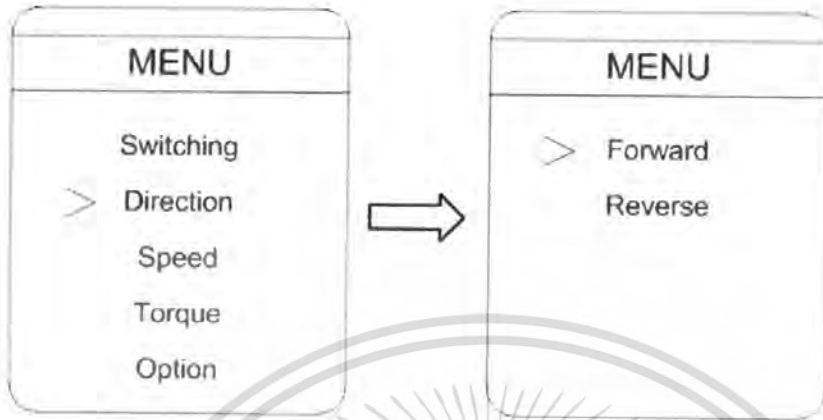
เมนู Direction

เป็นเมนูที่สอง สำหรับกำหนดทิศทางของการหมุนของมอเตอร์ซึ่งมีเมนูย่อย คือ Forward และ Reverse

Forward เป็นคำสั่งย่อยที่มีไว้ใช้กำหนดทิศทางของมอเตอร์ให้หมุนไปในทิศทางข้างหน้า โดยมีลำดับการสั่งงานดังนี้ Direction >>> Forward

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

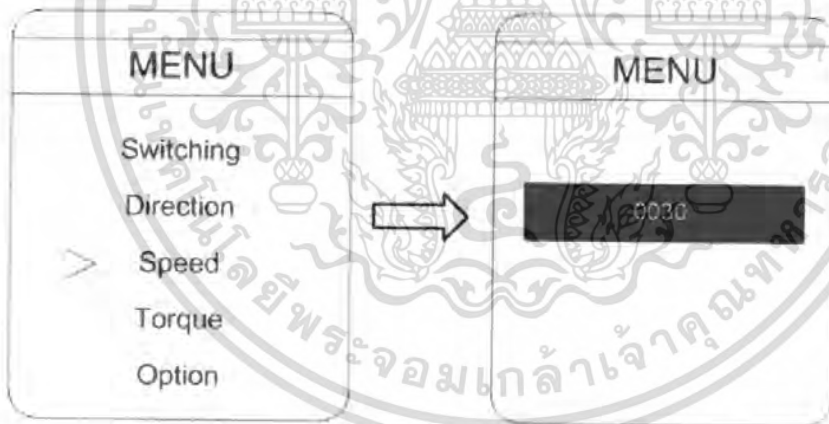
Reverse เป็นคำสั่งย่อยที่มีไว้ใช้กำหนดทิศทางของมอเตอร์ให้หมุนกลับทิศทาง โดยมีลำดับการสั่งงานดังนี้ Direction >>> Reverse



รูปที่ 4

เมนู Speed

เป็นเมนูที่มีไว้สำหรับการกำหนดความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการ

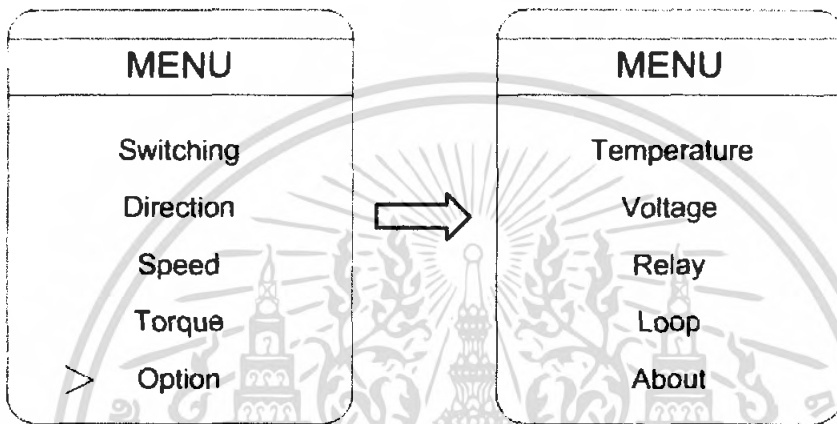


รูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

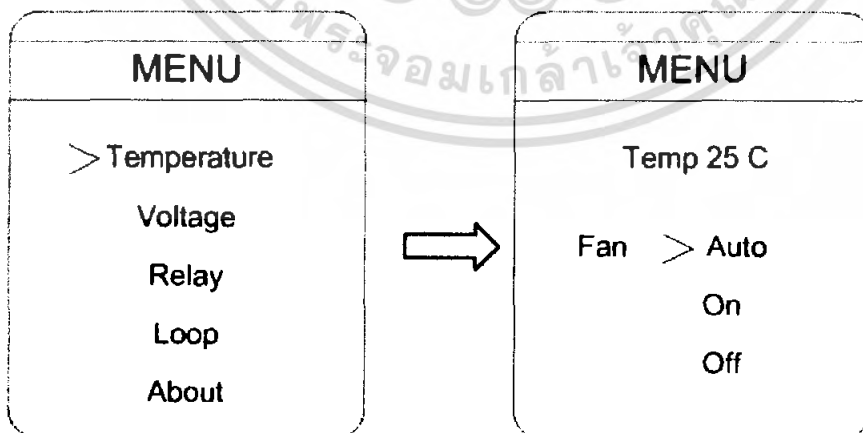
เมนู Option

เป็นเมนู Accessories ที่มีไว้สำหรับกำหนดค่า และอ่านค่า ตัวแปรต่างๆ ซึ่งมีเมนูย่อยที่สำคัญดังนี้ คือ Temperature, Voltage, Relay, Loop



รูปที่ 6

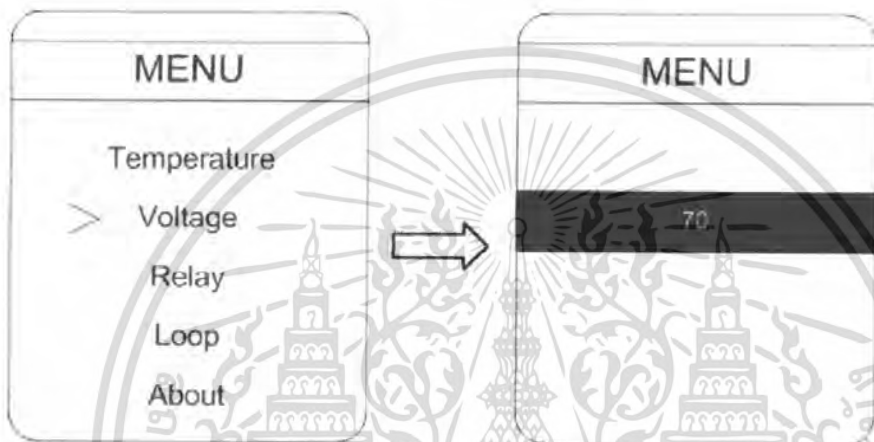
Temperature เป็นคำสั่งย่อยที่ใช้ดูอุณหภูมิของสวิตช์ IGBT และกำหนดอุณหภูมิการทำงานของพัดลมระบายความร้อน โดยมีลำดับการสั่งงานดังนี้ Option >>> Temperature สำหรับดูค่าอุณหภูมิ และ Option >>> Temperature >>> Fan



รูปที่ 7

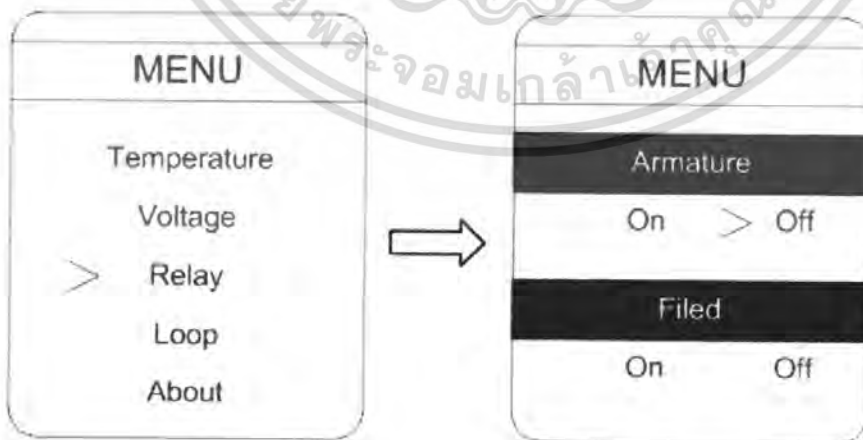
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage เป็นคำสั่งย่อยที่มีไว้สำหรับดูแรงดันที่ DC Bus



รูปที่ 8

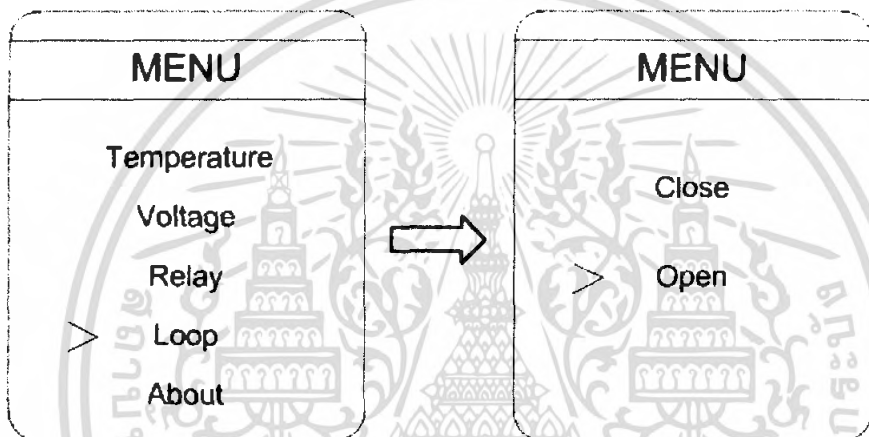
Relay เป็นคำสั่งย่อยที่มีไว้สำหรับควบคุมการเปิด - ปิดรีเลย์ ซึ่งมีสองชุดที่อาร์มาเจอร์ และที่แหล่งจ่าย โดยมีลำดับการสั่งงานดังนี้ Option >>> Relay >>> Armature >>> Off



รูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loop เป็นคำสั่งย่อยที่มีไว้สำหรับควบคุมการทำงานแบบรูปปิด และรูปเปิด โดยมีลำดับการสั่งงานดังนี้ Option >>> Loop >>> Open



รูปที่ 10

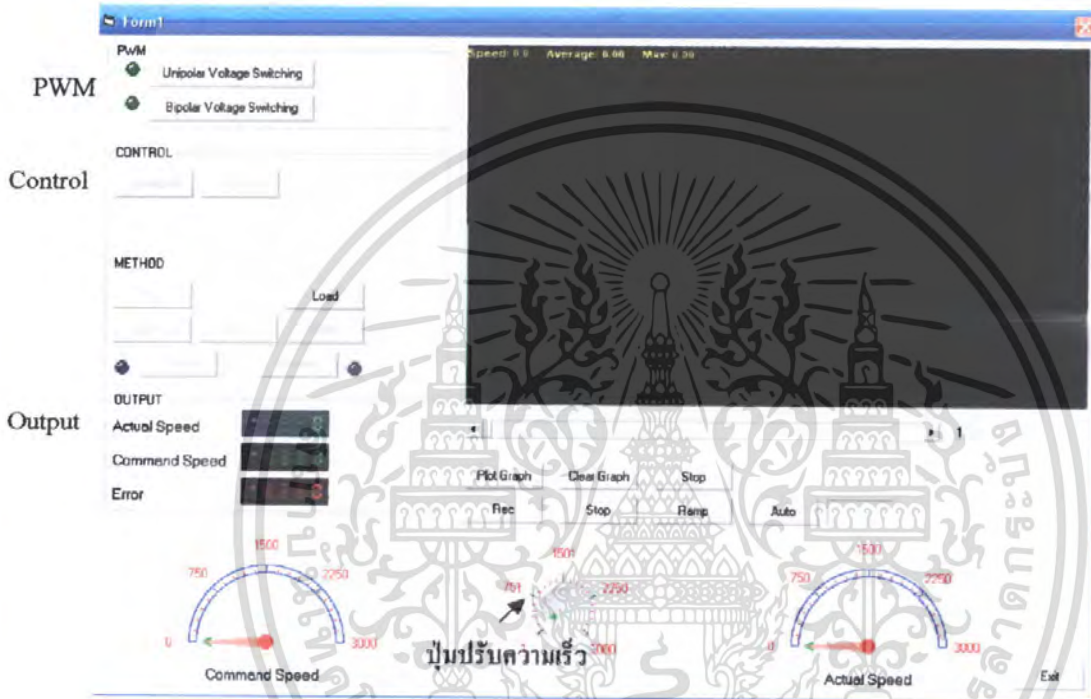
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การใช้งานโปรแกรม Visual Basic ควบคุมการทำงานของ DC Drives

ขั้นตอนการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จุดมุ่งหมายของการควบคุมด้วย Visual Basic เพื่อสร้างความสวยงาม ทำให้การใช้งานควบคุมมีสะดวกมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1

ขั้นตอนของการควบคุม

1. ในกรอบ PWM เลือกวิธีการสวิตช์ซึ่งมีสองวิธี โดยปุ่มที่ถูกเลือกจะมีไฟสีเขียวติด
2. ในกรอบ Control กำหนดพิกัดของมอเตอร์ตาม Nameplate โดยคลิกที่ปุ่ม Nameplate และ Rated ตามลำดับจะปรากฏกรอบ messenger ให้พิมพ์ข้อมูล
3. ในส่วนของ Method เลือกการควบคุมทิศทางของมอเตอร์
4. การสั่งความเร็วสามารถสั่งได้จากการหมุนปุ่มควบคุมที่ถูกครีซี
5. ในส่วน Output จะแสดงความเร็วของมอเตอร์ที่สั่ง ความเร็วจริงในขณะนั้น และ ค่าคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ่ม Option เป็นปุ่มที่ประกอบด้วยคำสั่งที่เป็นออฟชั่นให้เลือก สำหรับการแสดงผล และ ฟังก์ชันของการใช้งาน มีดังนี้

- Plot Graph เมื่อเลือกปุ่มนี้ จะทำการพล็อตกราฟของความเร็วที่วัดได้ ขณะนั้น
- Clear graph เลือกเพื่อเคลียร์กราฟให้เริ่มพล็อตกราฟใหม่
- Stop หยุดการทำงาน
- Rec เมื่อต้องการบันทึกค่าของความเร็ว โดยที่จะเก็บไว้ที่ไดร์ C:1
- Ramp กำหนดให้มอเตอร์เร่งความเร็วถึงค่าพิคกในทิศทางหนึ่ง จากนั้น เร่งความเร็วถึงค่าพิคกในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเดิม
- Auto เมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุน 10 วินาที และจากนั้นจ่ายโหลดให้ มอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

NampPage ของมอเตอร์

300 Watt

80 VDC

4.8 Amp

2500 RPM

Paramiter ของมอเตอร์

ป้อน ความเร็วและหาแรงดัน

Volt(V) Speed(red/s)

-2.90 -10.68

-5.90 -21.05

-8.70 -31.42

-11.70 -42.10

-14.70 -52.67

-17.50 -62.83

-20.50 -73.62

-23.30 -83.78

-26.30 -94.25

-29.20 -104.82

-32.20 -115.30

-35.10 -125.87

-38.00 -136.14

-40.90 -146.71

-43.90 -157.29

-46.90 -167.87

-49.70 -178.02

-52.60 -188.50

-55.40 -198.97

-58.40 -209.54

-61.30 -219.91

-64.30 -230.49

-67.30 -240.96

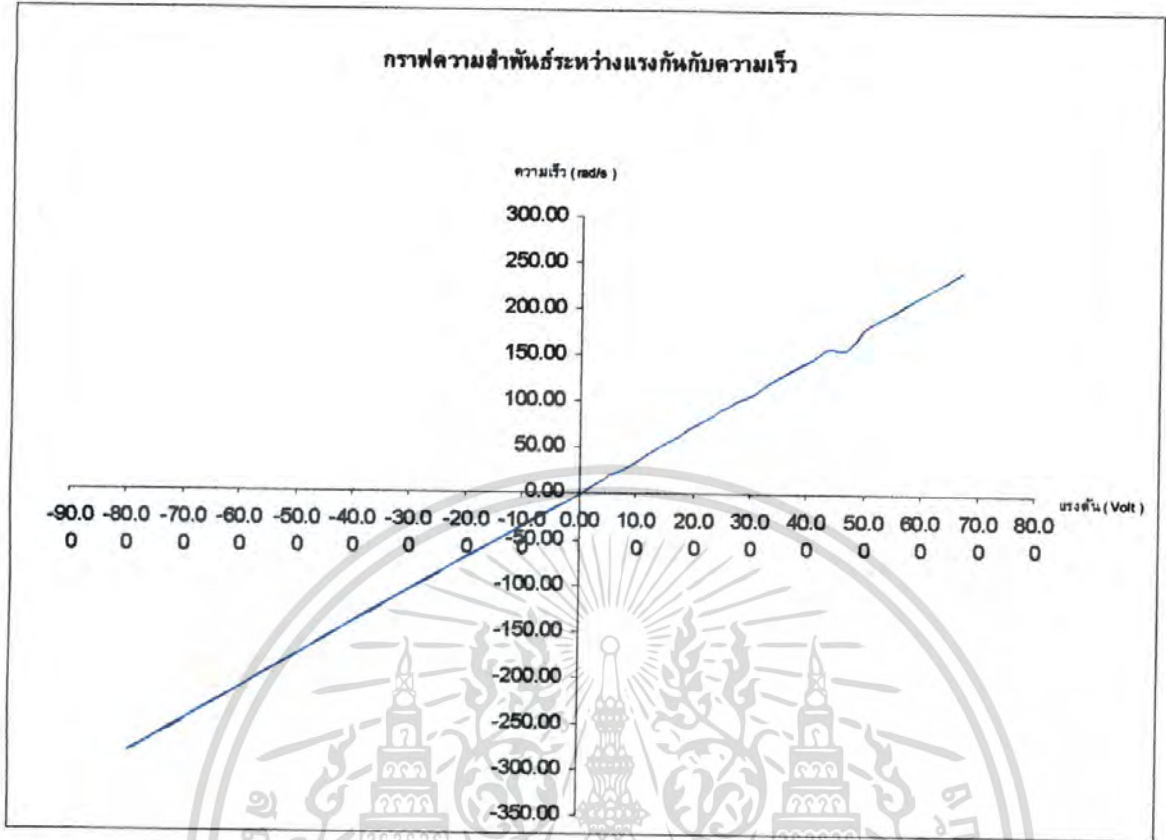
-70.00 -251.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-72.90	-261.80
-75.50	-272.38
-78.80	-282.74
3.00	11.10
5.80	20.84
8.90	31.42
11.80	42.20
14.70	52.67
17.40	62.83
20.60	73.83
23.40	84.09
26.20	94.28
29.20	105.03
32.10	115.30
35.10	126.29
37.90	136.14
40.90	146.71
43.80	158.00
46.70	157.29
49.60	178.02
52.50	188.50
55.40	198.97
58.40	210.07
61.30	220.12
64.30	230.38
67.30	241.69
70	251.54
72.9	261.9
75.7	373.48
78.7	283.27
Slope	
dy/dx	3.644827586

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเร็ว



$L_a = 0.323$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ นายอนุชา พัฒนาผล เกิดวันที่ 10 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2529
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียน สตรีนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์
สำเร็จมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน สตรีนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์
นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ปีการศึกษา พ.ศ. 2547 - พ.ศ. 2555

มีความสนใจ และความถนัดในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์ และการใช้โปรแกรม
ทักษะทางภาษาอังกฤษ ฟัง พูด อ่าน เขียน ปานกลาง
ฝึกงานที่ Thai Summit Auto parts Industry CO.,LTD.



ชื่อ นางสาวเพลินพิศ ลีวนิชวงศ์ เกิดวันที่ 21 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2528
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียน สุโขทัย จังหวัดนครราชสีมา
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน ทาดใหญ่วิทยาลัย
จังหวัดสงขลา
นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ปีการศึกษา พ.ศ. 2547 - พ.ศ. 2550

มีความสนใจ และความถนัดในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์
ทักษะทางภาษาอังกฤษ ฟัง พูด อ่าน เขียน ปานกลาง
ทักษะทางภาษาจีน ฟัง พูด อ่าน เขียน ปานกลาง
ฝึกงานที่บริษัท Syndrome Electronic Industry CO.,LTD.



ชื่อ นายอาทิตย์ จัยทพรโสม เกิดวันที่ 2 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2528
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียน ราชวินิตบางแก้ว
จังหวัดสมุทรปราการ
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน ราชวินิตบางแก้ว
จังหวัดสมุทรปราการ

นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา พ.ศ. 2547 - พ.ศ. 2550

มีความสนใจ และความถนัดในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
ความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์ และโปรแกรม
ทักษะทางภาษาอังกฤษ ฟัง พูด อ่าน เขียน ปานกลาง

ฝึกงานที่บริษัท Syndrome Electronic Industry CO.,LTD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้