

ระบบการคืนพลังงานกลับเพื่อใช้ปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
แบบพาวส์โมเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับ

SLIP ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR WOUND ROTOR
INDUCTION MOTOR VARIABLE SPEED DRIVE USING
INVERTER-CHOPPER CONTROL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-725-6

ระบบการคืนพลังงานสลิปเพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
แบบवादต์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

SLIP ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR WOUND ROTOR
INDUCTION MOTOR VARIABLE SPEED DRIVE USING
INVERTER-CHOPPER CONTROL



วท.
ย 3355
2545
ชหม.....
ชทะเบียน... 43269
เดือน, ปี 1 ส.ค. 2545

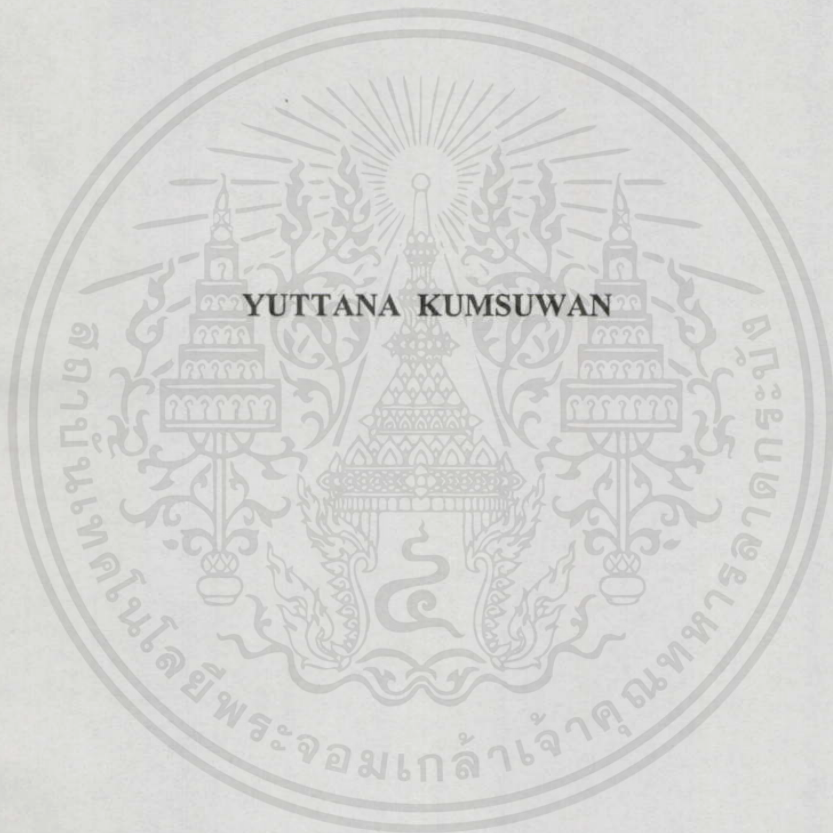
b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา พ.ศ. 2545 อึ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-648-725-6

**SLIP ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR WOUND ROTOR
INDUCTION MOTOR VARIABLE SPEED DRIVE USING
INVERTER-CHOPPER CONTROL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

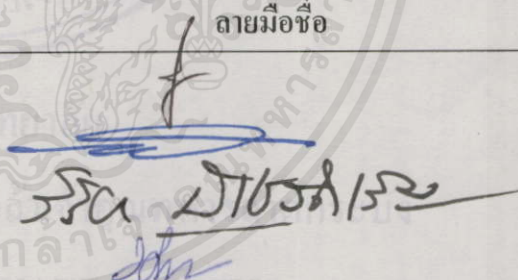
2002

ISBN 974-648-725-6

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบการคืนพลังงานสลิปเพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
แบบวาวด์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์
SLIP ENERGY RECOVERY SYSTEM FOR WOUND ROTOR
INDUCTION MOTOR VARIABLE SPEED DRIVE USING
INVERTER-CHOPPER CONTROL

ชื่อนักศึกษา นายยุทธนา ขำสุวรรณ
รหัสประจำตัว 43061122
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ร.อ.ดร.วิระเชษฐ ขันเงิน	
ผศ.พิชิต ล้ายอง	
รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ	
ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 เมษายน 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้าง
ที่มาที่การนำไปใช้
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 17 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2545

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบการคืนพลังงานสลิปเพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์
นักศึกษา	นายยุทธนา ขำสุวรรณ
รหัสประจำตัว	43061122
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบการคืนพลังงานสลิป เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีการคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชี่ด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอชี่ โดยการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ทำงานในโหมด PWM ในขณะที่ปรับรอบมอเตอร์ สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอนี้สามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบเซอร์เบีส ที่มอเตอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์ ค่าสลิปในช่วง 0.2-0.7 ตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนถึงค่าโหลดพิกัด ซึ่งที่ค่าสลิป 0.7 จะได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงกว่าระบบเซอร์เบีสถึง 85.71% และกระแสเอชี่ PWM ของอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดลดลงทำให้กระแสไลน์ของระบบขับเคลื่อนนี้ลดลงอย่างมาก โดยที่สามารถคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชี่ เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ใกล้เคียงกับระบบเซอร์เบีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Slip Energy Recovery System for Wound Rotor Induction Motor Variable Speed Drive Using Inverter-Chopper Control
Student	Mr. Yuttana Kumsuwan
Student ID	43061122
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assist. Prof. Dr. Vijit Kinnares
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Viriya Pichetjamroen

ABSTRACT

This thesis proposes the design and development of a slip energy recovery system, for the purpose of motor speed control by using an inverter-chopper circuit to feedback the slip energy to AC line. The aim of this research is to improve the AC line input power factor by operating the inverter-chopper in a PWM mode with variable pulse-width, while changing the motor speed. The performance improvement of this proposed system can be shown by comparing with the conventional scherbius system by experiment, using a 1 kW motor with the slip values variable in the range of 0.2-0.7 and load torque from no-load to full load. It is found that slip value of the inverter-chopper system at 0.7 can really improve the AC line input power factor to be 85.71% higher than the scherbius system and the PWM AC current of the inverter is also reduced, causing the total AC line input current of the drive system to be greatly reduced, where as slip energy recovered back to AC line in order to maintain the efficiency of the working system close to scherbius system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

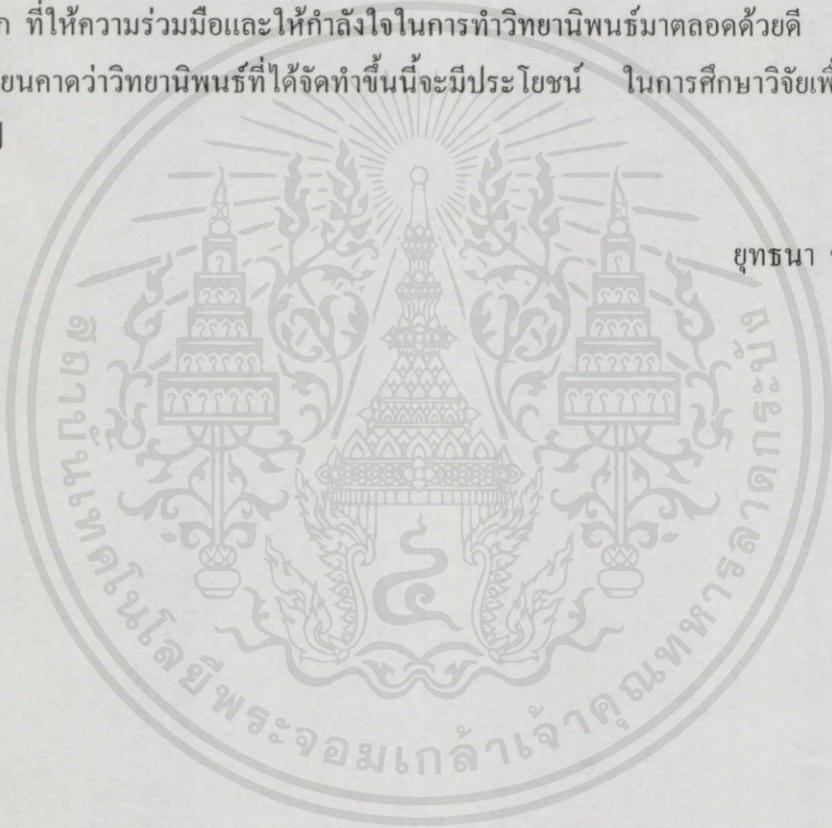
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ เพราะได้รับความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้เขียน ท่านทั้งสองได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีอย่างต่อเนื่องตลอด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนร่วมงานอาจารย์ประจำแผนกวิชาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก ที่ให้ความร่วมมือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาตลอดด้วยดี

ผู้เขียนคาดว่าวิทยานิพนธ์ที่ได้จัดทำขึ้นนี้จะมีประโยชน์ ในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาให้ดีขึ้นสืบต่อไป

ยุทธนา ขำสุวรรณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำและคอนเวอร์เตอร์.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	6
2.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์.....	6
2.2.2 หลักการปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ด้วยสลิป.....	12
2.2.3 หลักการปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยความถี่.....	14
2.3 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเทต.....	16
2.3.1 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะเรกติไฟเออร์.....	16
2.3.2 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะอินเวอร์เตอร์.....	19
2.3.3 การพิจารณาแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ ขณะทำงานแบบเรกติไฟเออร์.....	20
2.3.4 การพิจารณาแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ ขณะทำงานแบบอินเวอร์เตอร์.....	22
2.4 สรุป.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการคั่นพลังงานสลิป ด้วยระบบทั่วไปแบบเซอร์เบียส.....	24
3.1 บทนำ.....	24
3.2 การพิจารณาค่าสลิปขณะไร้อโหลดและความเร็วรอบมอเตอร์ของระบบ การคั่นพลังงานด้วยสลิปในระบบทั่วไปแบบเซอร์เบียส.....	25
3.3 การพิจารณาค่าประสิทธิภาพของระบบการควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป.....	29
3.4 การพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบการควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป.....	32
3.5 สรุป.....	33
บทที่ 4 การวิเคราะห์ระบบการคั่นพลังงานสลิป โดยการควบคุมแบบใหม่ ด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 ระบบการคั่นพลังงานสลิป โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	35
4.3 การวิเคราะห์ระบบควบคุม ด้วยวงจรสมมูลย์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	38
4.3.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและค่าสลิป.....	39
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส.....	42
4.3.3 ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์.....	43
4.4 การออกแบบระบบควบคุม.....	45
4.5 การพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบที่มีการปรับปรุงให้ดีขึ้น.....	49
4.6 สรุป.....	52
บทที่ 5 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการคั่นพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี ของระบบการควบคุมทั่วไปแบบเซอร์เบียสและแบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	53
5.1 บทนำ.....	53
5.2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุม ความเร็วรอบด้วยสลิป.....	54
5.3 การทดสอบปริมาณการคั่นพลังงานสลิปเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การทำงานของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสและแบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	79
5.4 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของ ระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสและแบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบเซอร์เบียส และแบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	87
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก	
ภาคผนวก (ก) เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ.....	96
ภาคผนวก (ข) รายละเอียดวงจรภาคควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	100
ภาคผนวก (ง) ข้อมูลการทดสอบระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	106
ภาคผนวก (ค) วิธีคำนวณกำลังไฟฟ้าสลิป, ประสิทธิภาพ.....	113
ภาคผนวก (ง) บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ผ.1 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.7 ความเร็วรอบ 450 rpm ของระบบระบบควบคุม อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	107
ผ.2 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.6 ความเร็วรอบ 600 rpm ของระบบระบบควบคุม อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	108
ผ.3 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.5 ความเร็วรอบ 750 rpm ของระบบระบบควบคุม อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	109
ผ.4 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.4 ความเร็วรอบ 900 rpm ของระบบระบบควบคุม อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	110
ผ.5 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.3 ความเร็วรอบ 1,050 rpm ของระบบระบบควบคุม อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	111
ผ.6 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.2 ความเร็วรอบ 1,450 rpm ของระบบระบบควบคุม อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์.....	7
2.2 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์.....	8
2.3 แสดงไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	10
2.4 แสดงประสิทธิภาพเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์.....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์.....	12
2.6 แสดงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ด้วยระบบเซอร์เบียด.....	13
2.7 แสดงทิศทางการถ่ายพลังงานในระบบเซอร์เบียด.....	14
2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิดและกระแสเตเตอร์กับความถี่.....	14
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อใช้วิธีการควบคุมแบบเปลี่ยนแรงดันและความถี่.....	15
2.10 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท.....	16
2.11 แสดงมุมจุดชนวนของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท.....	17
2.12 แสดงคลื่นแรงดันดีซีเอาต์พุตและกระแสดีซี เมื่อทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์.....	18
2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดีซีเอาต์พุตกับมุมจุดชนวนเอสซีอาร์.....	19
2.14 แสดงคอนเวอร์เตอร์ ชนิดไลน์คอมมิวเตท เมื่อทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์.....	19
2.15 แสดงคลื่นแรงดันดีซีเอาต์พุตและกระแสดีซี เมื่อทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์.....	20
2.16 แสดงความสัมพันธ์ของ แรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ในสภาวะเรกติไฟเออร์ (ก) รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ความถี่มูลฐาน (ข) องค์กรประกอบแอกติฟและรีแอกติฟของกระแสที่ความถี่มูลฐาน (ค) วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของกำลังไฟฟ้า	
2.17 แสดงความสัมพันธ์ของ แรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ในสภาวะอินเวอร์เตอร์.....	21
(ก) รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ความถี่มูลฐาน (ข) องค์กรประกอบแอกติฟและรีแอกติฟของกระแสที่ความถี่มูลฐาน (ค) วงจรสมมูลย์ต่อเฟสของกำลังไฟฟ้า	
3.1 แสดงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ด้วยระบบเซอร์เบียด.....	24
3.2 แสดงทิศทางการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในระบบเซอร์เบียด.....	25
3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสโรเตอร์เทียบกับแรงดันต่อเฟสด้านโรเตอร์.....	28
3.4 แสดงคุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสและไลน์.....	30
3.6 แสดงไดอะแกรมการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี.....	31
3.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบเซอร์เบียส.....	32
4.1 แสดงระบบการคืนพลังงานสลิปโดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	35
4.2 แสดงการทำงานในสภาวะคงตัว เมื่อมอสเฟตกำลังต่อวงจร.....	36
4.3 แสดงการทำงานในสภาวะคงตัว เมื่อมอสเฟตกำลังตัดวงจร.....	37
4.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์กับสัญญาณ PWM ของวงจรช้อปเปอร์.....	38
4.5 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสที่โอนย้ายมาด้านดีซีโดยผ่านวงจรโรเตอร์.....	39
4.6 แสดงวงจรสมมูลย์เชื่อมโยงดีซีของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	41
4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์กับสัญญาณ PWM ของวงจรช้อปเปอร์.....	48
(ก) ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200 rpm) คิวดีไอเกิด $D = 69.9\%$	
(ข) ค่าสลิป $s = 0.7$ (450 rpm) คิวดีไอเกิด $D = 4.9\%$	
4.8 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์.....	49
4.9 แสดงคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ด้านเอซีไลน์เทียบกับแรงดันต่อเฟส.....	50
5.1 แสดงไดอะแกรมการต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	53
5.2 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวดีไอเกิด $D = 23.2\%$	54
5.3 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวดีไอเกิด $D = 58.2\%$	55
5.4 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวดีไอเกิด $D = 85.7\%$	56
5.5 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 137.88^\circ$	57
5.6 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 114.12^\circ$	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 99.72^\circ$	59
5.8 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวตี้ไซเกิล $D = 39\%$	60
5.9 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวตี้ไซเกิล $D = 72.5\%$	61
5.10 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวตี้ไซเกิล $D = 96.4\%$	62
5.11 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 122.76^\circ$	63
5.12 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 105.84^\circ$	64
5.13 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 92.16^\circ$	65
5.14 แสดงค่าคิวตี้ไซเกิล (D) ของระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ที่แรงบิด 50% และแรงบิด 100% กับค่าสลิป (s) ที่ค่ามุมจุดชนวนคงที่ $\alpha = 160^\circ$	66
5.15 แสดงค่ามุมจุดชนวน (α) ของระบบเซอร์เบียสที่แรงบิด 50% และแรงบิด 100% กับค่าสลิป (s)	66
5.16 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่	68
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $D = 23.2\%$	
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $D = 23.2\%$	
(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $D = 39\%$	
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $D = 39\%$	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่.....	69
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $D = 58.2\%$	
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $D = 58.2\%$	
(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $D = 72.5\%$	
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $D = 72.5\%$	
5.18 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่.....	70
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $D = 85.7\%$	
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $D = 85.7\%$	
(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $D = 96.4\%$	
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $D = 96.4\%$	
5.19 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm	71
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $\alpha = 137.88^\circ$	
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $\alpha = 137.88^\circ$	
(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสด้านHV. ที่แรงบิด 100% $\alpha = 122.76^\circ$	
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $\alpha = 122.76^\circ$	
5.20 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm	72
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $\alpha = 114.32^\circ$	
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $\alpha = 114.32^\circ$	
(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $\alpha = 105.84^\circ$	
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $\alpha = 105.84^\circ$	
5.21 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm	73
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $\alpha = 99.72^\circ$	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $\alpha = 99.72^\circ$	
(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสด้านHV ที่แรงบิด 100% $\alpha = 92.16^\circ$	
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $\alpha = 92.16^\circ$	
5.22 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%	
ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm	74
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) ระบบเซอร์เบียด	
5.23 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%	
ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm	74
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) ระบบเซอร์เบียด	
5.24 แสดงแถบสเปกตรัมของกระแสไลน์ ที่แรงบิด 100%	
ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm	75
(ก) THD _i = 11.2 %,ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) THD _i = 22 %,ระบบเซอร์เบียด	
5.25 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%	
ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm	75
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) ระบบเซอร์เบียด	
5.26 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%	
ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm	76
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) ระบบเซอร์เบียด	
5.27 แสดงแถบสเปกตรัมของกระแสไลน์ ที่แรงบิด 100%	
ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm	76
(ก) THD _i = 10.8 %,ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) THD _i = 20.7 %,ระบบเซอร์เบียด	

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1,200 rpm	77
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) ระบบเซอร์เบียด	
5.29 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1,200 rpm	77
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) ระบบเซอร์เบียด	
5.30 แสดงแถบสเปกตรัมของกระแสไลน์ ที่แรงบิด 100% ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1,200 rpm	78
(ก) $THD_i = 8.1\%$, ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์	
(ข) $THD_i = 10.2\%$, ระบบเซอร์เบียด	
5.31 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอไลน์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450rpm)	79
5.32 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอไลน์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ (900rpm)	80
5.33 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอไลน์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1200rpm)	80
5.34 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟารีแเอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450rpm)	81
5.35 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟารีแเอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ (900rpm)	81
5.36 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟารีแเอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200rpm)	82
5.37 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ กับแรงบิด ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450rpm)	82
5.38 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ กับแรงบิด ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ (900rpm)	83

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.39 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ กับแรงบิด ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200rpm).....	83
5.40 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสอง 2 แบบ.....	84
(ก) แรงบิด 50 %	
(ข) แรงบิด 100 %	
5.41 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450rpm).....	85
5.42 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ (900rpm).....	85
5.43 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200rpm).....	86
5.44 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ.....	87
(ก) แรงบิด 50 %	
(ข) แรงบิด 100%	
5.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบและค่าสลิปของมอเตอร์ของ ระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์.....	88
5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบและค่าสลิปของมอเตอร์ของ ระบบควบคุมเซอร์เบียด.....	88
ก-1 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	97
ก-2 เซอร์โวเบรก สำหรับจ่ายภาระหรือแรงบิดให้กับมอเตอร์ และมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาร์ดโรเตอร์ ที่ใช้ในการทดสอบ.....	97
ก-3 ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป รุ่น DL 1520 ยี่ห้อโยโกกาวา.....	98
ก-4 เครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์ สเปกตรัม รุ่น OR300 ยี่ห้อโยโกกาวา.....	98
ก-5 เครื่องมือวัด วัดคัมมิเตอร์, เพาเวอร์แฟกเตอร์มิเตอร์, โวลท์และแอมมิเตอร์ ยี่ห้อลูคัส.....	98
ก-6 หม้อแปลงของชุดอินเวอร์เตอร์และตัวเหนี่ยวนำ.....	99
ก-7 ภาควงจรกำลังชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทกัับวงจรถ็อบเปอร์ และภาควงจรรวมคอนเวอร์เตอร์กับวงจรถ็อบเปอร์.....	99
ข-1 แสดงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจุดชนวนคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตท.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข-2 แสดงวงจรภาคขยายสัญญาณจุดชนวน.....	103
ข-3 แสดงภาคกำเนิดสัญญาณPWMของวงจรช้อปเปอร์.....	105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบการขับเคลื่อนทางกลขนาดใหญ่ด้วยมอเตอร์ ที่โหลดเป็นประเภทใบพัดเช่นปั๊มน้ำ ซึ่งการปรับความเร็วรอบจะอยู่ในย่านไม่กว้างนัก และความเร็วรอบที่ควบคุมจะต่ำกว่าความเร็วของ สนามแม่เหล็กหมุน (Subsynchronous speed) ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบ วาวด์โรเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนต้นกำลัง เพราะเป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูงความเร็วรอบ สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่อเข้ากับวงจรรโรเตอร์ แต่ปัญหาของการ ควบคุมความเร็วรอบโดยการปรับความต้านทานคือประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง เนื่องจากค่า กำลังไฟฟ้าสลิปจากจวงจรโรเตอร์ไปสูญเสียบนตัวต้านทานในรูปของความร้อน ดังนั้นในการปรับ ประสิทธิภาพดังกล่าวสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส (Scherbius system) โดยระบบควบคุมนี้จะนำกำลังไฟฟ้าสลิปป้อนกลับคืนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอช ีไลน์ เพื่อช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเอช ีไลน์ป้อนให้กับ ระบบขับเคลื่อนชนิดนี้ลดต่ำลงเป็นผลทำให้เกิดการประหยัดค่าใช้จ่ายขึ้นและเป็นการรักษาประ สสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยรวมไว้ไม่ให้ต่ำลงตามค่าสลิปที่เพิ่มขึ้น [3,4,5] ซึ่งการป้อนคืน กำลังไฟฟ้างดังกล่าวได้อาศัยวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท ที่ทำงานในสภาวะอิน เวอร์เตอร์และสามารถควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการปรับมุมจุดชนวน (α) ของเอสซีอาร์ในย่าน $90^\circ - 160^\circ$ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสลิปที่ป้อนกลับคืนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอช ีไลน์นี้จะ ขึ้นอยู่กับค่าสลิปหรือย่านความเร็วรอบที่ควบคุม แต่ปัญหาที่สำคัญของระบบควบคุมแบบเซอร์ เบียสก็คือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอช ีไลน์มีค่าค่อนข้างต่ำและรูปคลื่นกระแสอิน เวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม [4,5,6] ซึ่งผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์และขนาดของกระแสไลน์ เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบโดยตรง จากข้อด้อยดังกล่าว ได้มีงานวิจัยที่นำเสนอแนวทางแก้ไขปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจากแหล่งจ่ายเอช ีไลน์และปรับ ปรุงคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ให้มีลักษณะใกล้เคียงคลื่นไซน์ เช่น การใช้ตัวเก็บประจุเพิ่มเข้าไป ในวงจรโรเตอร์และการใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบฟลายวีลลิง (Flywheelind control)[10] หรือการคัดแปลงพันซุดชดลวดสเตรเตอร์ขึ้นใหม่ในลักษณะของจุดแท็บหลายจุด เพื่อเลือกอัตรา ส่วนแรงดันของตัวมอเตอร์ให้เหมาะสมกับย่านสลิปที่ควบคุมและควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าสลิป ดังกล่าวกลับคืนเข้าระบบที่จุดแท็บของมอเตอร์โดยตรง[9] และใน [5] ได้นำเสนอระบบควบคุม โดยการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส(CSI) ควบคุมแบบ PWM ใช้งานแทนซุด คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทของระบบเซอร์เบียสแบบเดิม โดยสามารถป้อนคืน

กำลังไฟฟ้ารีแเอ็คติฟของอินเวอร์เตอร์กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ได้และแก้ไขลักษณะคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ให้มีลักษณะเป็น PWM ซึ่งช่วยทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์ดีขึ้น แต่วิธีการที่นำเสนอใน[5] ยังมีปัญหาในเรื่องความซับซ้อนของภาคกำลังและภาคควบคุมซึ่งส่งผลทำให้ต้นทุนของระบบขับเคลื่อนด้วยวิธีการดังกล่าวสูง

จากปัญหาซึ่งเป็นข้อด้อยของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบแหล่งจ่ายเอซีไลน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบใหม่โดยการประยุกต์ให้หลักการควบคุมด้วยวงจรถ้อปเปอร์ที่ใช้สวิตช์มอสเฟทกำลังเพียงตัวเดียวโดยออกแบบให้ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทของระบบควบคุมเซอร์เบียสแบบเดิม โดยควบคุมค่ามุมจุดชนวน (α) เอสซีอาร์ให้คงที่ ที่ค่ามุมสูงสุดเท่ากับ 160° ตลอดเวลา การควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถกระทำได้โดยการปรับดิวิตไชเกิล (D) ของวงจรถ้อปเปอร์ที่ทำงานในโหมด PWM แทนวิธีการควบคุมมุมจุดชนวน (α) ของระบบควบคุมเซอร์เบียสแบบเดิม และเทคนิคที่ได้นำในงานวิจัยนี้สามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้กับอุปกรณ์ควบคุมและภาควงจรถ้อปเปอร์ของระบบเซอร์เบียสแบบเดิม ซึ่งทำให้ต้นทุนของระบบควบคุมดังกล่าวต่ำ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการอื่น ๆ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงข้อด้อยของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยระบบเซอร์เบียสแบบเดิมให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น โดยได้ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ โดยการประยุกต์ใช้วงจรถ้อปเปอร์ที่ทำงานในโหมด PWM ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทแบบเดิม เพื่อช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีและปรับปรุงลักษณะคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ให้ดีขึ้น โดยที่ยังรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบไว้ไม่ให้อ่่าลงตามค่าสลิป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1) การควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์โดยวิธีการป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ที่สร้างขึ้นสามารถรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยรวมได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสแบบเดิม

2) การควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถกระทำได้โดยการปรับดิวิตไชเกิลของวงจรถ้อปเปอร์ในโหมด PWM ที่ทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิว

เทพโดยปรับค่ามุมจุดชนวนในตำแหน่งมุมยกที่ค่าสูงสุดตลอดเวลา โดยสามารถควบคุมย่านสลีปเป็นบวก ตั้งแต่ 0.2 – 0.7 เมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลดจนถึงค่าพิคคโหลด

3) ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่สร้างขึ้น จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอชี่สูงขึ้นกว่าระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสแบบเดิม โดยปรับปรุงคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ให้มีลักษณะเป็น PWM ส่งผลทำให้ขนาดของกระแสไลน์ด้านแหล่งจ่ายเอชี่ลดลง และจากหลักการควบคุมดังกล่าวยังสามารถจำกัดค่ากำลังไฟฟ้รีแอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ให้ลดลงได้มากกว่าค่ากำลังไฟฟ้รีแอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ในระบบควบคุมเซอร์เบียสแบบเดิม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ระบบการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ในการป้อนคั้นพลังงานสลีปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชี่ไลน์ ที่ได้ออกแบบและสร้างในงานวิจัยนี้ โดยได้ออกแบบใช้สวิตช์มอสเฟทกำลังเพียงตัวเดียวที่ควบคุมการทำงานด้วยวิธีการช้อปเปอร์ทำงานในโหมด PWM ซึ่งต่อคร่อมขนานกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตท โดยจะออกแบบปรับมุมจุดชนวน (α) ในตำแหน่งค่ามุมสูงสุดเท่ากับ 160° ไว้ตลอดเวลา วัตถุประสงค์เพื่อจำกัดค่ากำลังไฟฟ้รีแอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ให้ลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้รีแอคตีฟรวมทั้งระบบแหล่งจ่ายเอชี่ไลน์ จ่ายกับกับมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ลดลง ในขณะที่ยังสามารถป้อนคั้นกำลังไฟฟ้าแอคตีฟซึ่งเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสลีปจากวงจรโรเตอร์ได้ในปริมาณมากเช่นเดิม [4,6,7] จากแนวคิดและหลักการดังกล่าวทำให้ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่สร้างขึ้นสามารถช่วยแก้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอชี่ไลน์ซึ่งเป็นข้อด้อยของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสเดิมให้มีค่าที่สูงขึ้นได้ และระบบควบคุมดังกล่าวยังคงรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยรวมซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีการควบคุมแบบเซอร์เบียสไว้ได้ โดยผลที่ตามมาอีกประการหนึ่งคือลักษณะคลื่นของกระแสอินเวอร์เตอร์จะได้รับการปรับปรุงให้เป็นลักษณะคลื่น PWM ส่งผลทำให้กระแสไลน์โดยรวมที่แหล่งจ่ายเอชี่ไลน์จ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนชนิดนี้ลดลงต่ำกว่าระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสเดิม โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมที่สร้างกับระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสเดิม ในย่าน สลีปที่ควบคุมตั้งแต่ 0.2 – 0.7 ตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนถึงค่าพิคคโหลด

1.5 ขอบเขตการศึกษา

โดยได้ออกแบบและสร้างระบบขับเคลื่อนเพื่อควบคุมการปรับรอบมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ขนาด 1 kW และทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการทำงานต่างๆของระบบการคั้นพลังงานสลีปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชี่ไลน์กับระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสแบบเดิม

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการศึกษาและขั้นตอนการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ และหลักการปรับความเร็วรอบด้วยสลิปและด้วยความถี่ หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด ไลน์คอมมิวเตท

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการคืนพลังงานสลิปด้วยระบบทั่วไปแบบเซอร์เบียด การพิจารณาค่าสลิปขณะไร้อโหลดและความเร็วรอบมอเตอร์ของระบบการคืนพลังงานด้วยสลิปในระบบทั่วไปแบบเซอร์เบียด การพิจารณาค่าประสิทธิภาพของระบบควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป และการพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบการควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ระบบการคืนพลังงานสลิปโดยการควบคุมแบบใหม่ด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ โดยอธิบายโครงสร้างหลักการทำงานและการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของระบบควบคุมดังกล่าว ด้วยวงจรสมมูลย์เชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบภาควงจรกำลังและ ภาควงจรควบคุมด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ทำงานร่วมกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ พร้อมแสดงผลการทดสอบระบบควบคุมที่สร้างขึ้น และการพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบที่มีการปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ของระบบควบคุมทั่วไปแบบเซอร์เบียดและแบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่สร้างขึ้น โดยแสดงผลการวัดและทดสอบเพื่อคุณลักษณะรูปคลื่นแรงดัน, กระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป การทดสอบปริมาณการคืนพลังงานสลิปเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมและการทดสอบหาสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ

บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ศึกษาและค้นคว้าคุณลักษณะการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ โดยวิธีการป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ด้วยระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด เพื่อนำหลักการดังกล่าวมาวิเคราะห์และออกแบบที่จะแก้ไขปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์ โดยการประยุกต์ใช้วงจรช้อปเปอร์ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด ไลน์คอมมิวเตทแบบเดิม ทำการออกแบบและสร้างวงจรภาคกำลังและภาควงจรควบคุมของ

เครื่องต้นแบบที่สามารถทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสและสรุป
วิเคราะห์ผลการทดสอบพร้อมทั้งวิจารณ์ผลทางทฤษฎีตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ และคอนเวอร์เตอร์

2.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ การวิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานด้วยวงจรมุมลู่และหลักการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยวิธีที่ควบคุมด้วยสลิปและควบคุมความถี่ และได้กล่าวถึงคุณลักษณะการทำงานของคอนเวอร์เตอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้ โดยในระบบการขับเคลื่อนทางกลด้วยมอเตอร์ขนาดใหญ่เช่น ปั่นน้ำ ปั่นจั่นสำหรับยกของหนัก หรือเครื่องยกชักรอก ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์เพราะเป็นมอเตอร์ที่มีแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง โดยสามารถควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้จากการควบคุมสลิป ซึ่งปัจจุบันการพัฒนาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดนี้สามารถกระทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงเพราะเป็นระบบแบบสแตติก

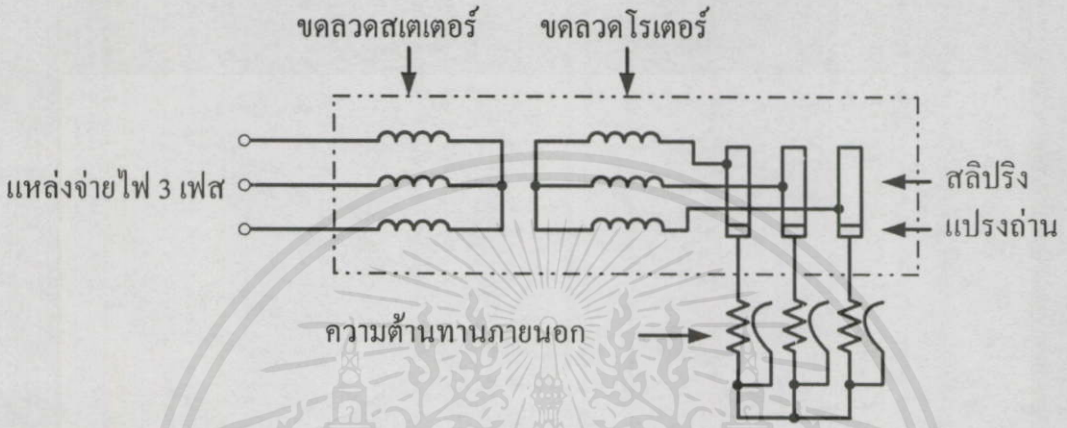
2.2 ทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ประกอบด้วยส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ โดยที่โรเตอร์ของมอเตอร์ชนิดนี้จะพันด้วยขดลวดทองแดงอบน้ำยาฉนวนไฟฟ้าจำนวนสามชุดพันลงในร่องสลิตของแกนโรเตอร์ ขดลวดแต่ละเฟสจะพันเรียงห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า และต้องพันให้เกิดจำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์เท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ปลายสายของขดลวดทั้ง 3 เฟสจะต่อรวมกันเป็นแบบสตาร์ ปลายสายอีกด้านที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับวงแหวนหรือเรียกว่าสลิปริงจำนวนสามอัน โดยบนวงแหวนแต่ละอันจะมีแปรงถ่านแต่ละสัมผัสอยู่ตลอดเวลา แปรงถ่านทั้งสามจะเป็นส่วนที่ตรงอยู่กับที่ และมีสายต่อจากแปรงถ่านออกไปยังภายนอกเพื่อต่อกับความต้านทานที่ปรับค่าได้จำนวนสามตัวซึ่งตัวต้านทานจะต่อแบบสตาร์ เพื่อใช้ในการเริ่มสตาร์ทมอเตอร์และปรับรอบของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ส่วนของโรเตอร์จะทำหน้าที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟผ่านส่วนสเตเตอร์โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ส่วนสเตเตอร์เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส โดยที่ค่าของความเร็วซิงโครนัสจะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ตามสมการ

$$n_s = \frac{120 f_1}{P} \quad (2.1)$$

- เมื่อ n_s คือ ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)
 f_1 คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ (Hz)
 P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์



รูปที่ 2.1 แสดงไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขดลวดโรเตอร์

สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะไปเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่โรเตอร์ ซึ่งกระแสเหนี่ยวนำนี้จะไหลผ่านความต้านทานจากภายนอกที่ต่อร่วมกับขดลวดโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ โดยจะปรับค่าความต้านทานจากภายนอก ไว้ในตำแหน่งที่มีค่าความต้านทานสูงสุดเพื่อช่วยทำให้แรงบิดเริ่มหมุนเพิ่มขึ้นและช่วยลดกระแสขณะสตาร์ทของมอเตอร์ เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นแล้วจึงค่อยๆ ลดค่าความต้านทานจากภายนอกลง มอเตอร์จะมีอัตราเร่งเพิ่มขึ้น เมื่อลดค่าความต้านทานจากภายนอกจนหมด สลีสปรिंगจะถูกตัดวงจรที่จุดต่อสตาร์ทของความต้านทานจากภายนอก ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเต็มพิกัด ถ้าต้องการปรับรอบของมอเตอร์ชนิดนี้สามารถทำได้โดยการปรับเพิ่มหรือลดค่าความต้านทานจากภายนอก ซึ่งการปรับความเร็วรอบจะปรับได้ต่ำกว่าความเร็วรอบพิกัดและไม่สามารถปรับความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วรอบพิกัดได้ โดยที่ความแตกต่างของความเร็วซิงโครนัส (n_s) กับความเร็วรอบโรเตอร์ (n_r) เรียกว่า ความเร็วสลีป (n_{ls}) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$n_{ls} = n_s - n_r \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเร็วซิงโครนัสต่อความเร็วสลีปเรียกว่า สลีส หรือ การไถล (slip, s) หาได้จากสมการ

$$s = \frac{n_{ls}}{n_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{2.3}$$

$$= \frac{\omega_{ls}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

เมื่อ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมของสเตเตอร์ (stator angular frequency)
 ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rotor angular frequency)
 ω_{ls} คือ ความถี่เชิงมุมสลลิป (slip angular frequency)

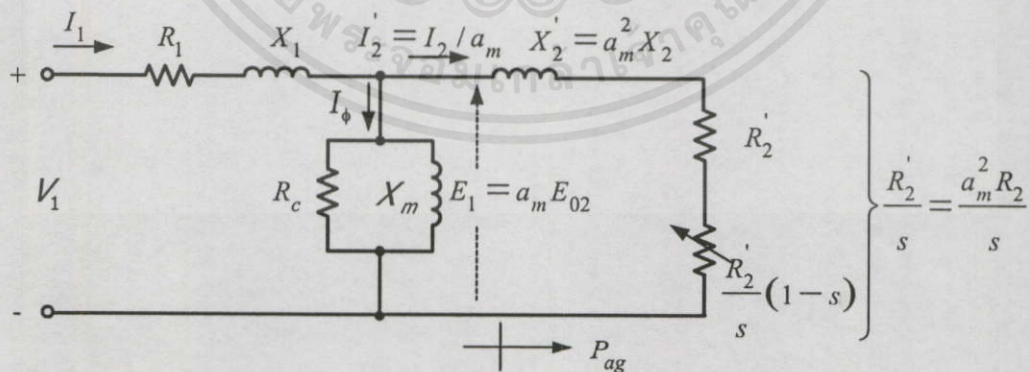
จากสมการ (2.3) ถ้า $s=0$ ทำให้โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วเชิงโคจรของสนามแม่เหล็ก และในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งค่าสลลิป $s=1$ ซึ่งความเร็วรอบโรเตอร์จะถูกจำกัดด้วยค่าสลลิป (s) ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยความเร็วรอบโรเตอร์ (n_r) หาได้จาก

$$n_r = (1-s)n_s \tag{2.4}$$

หรือ
$$\omega_r = (1-s)\omega_s \tag{2.5}$$

การวิเคราะห์คุณลักษณะจากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถที่จะวิเคราะห์คุณลักษณะของปริมาณต่างๆ ด้วยวงจรสมมูลย์ที่มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งรูปที่ 2.2 ได้แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ โดยอ้างอิงปริมาณต่างๆ ทางด้านโรเตอร์เข้ากับด้านสเตเตอร์ด้วยหลักการเทียบเท่าวิธีการที่ใช้ในหม้อแปลง ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ด้านโรเตอร์ที่ย้ายมาด้านสเตเตอร์จะต้องคูณด้วยอัตราส่วนจำนวนรอบของมอเตอร์ a_m^2 ส่วนกระแสโรเตอร์ต้องหารด้วย a_m



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลย์รูปที่ 2.2 ถ้ามอเตอร์อยู่กับที่หรือกำลังจะเริ่มหมุนค่าความเร็วรอบโรเตอร์ $n_r = 0$ และค่าสลลิป $s=1$ จะทำให้ความถี่ของโรเตอร์ (f_2) เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (f_1) ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$f_2 = sf_1 \quad (2.6)$$

ในขณะสภาวะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะมีค่าสูงสุดเพราะว่าสนามแม่เหล็กจากสเตเตอร์จะตัดกับโรเตอร์ด้วยอัตราความเร็วสูงสุด เมื่อโรเตอร์เริ่มหมุนที่ค่าสลิป (s) ใดๆ สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์จะตัดกับโรเตอร์ด้วยอัตราความเร็วที่ต่ำลง เป็นผลทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ลดลงด้วย ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่โรเตอร์ (E_2) ได้จาก

$$E_2 = sE_{02} \quad (2.7)$$

เมื่อ E_{02} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่โรเตอร์ขณะหยุดนิ่ง โดยหาได้จาก

$$E_{02} = \frac{E_1}{a_m} \quad (2.8)$$

และจากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ เมื่อไม่คิดแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่ด้านสเตเตอร์ ($R_1 + jX_1$) และกระแสแมกเนโตซ์ (I_ϕ) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสเต็มพิกัด สามารถที่จะหากระแสโรเตอร์ (I_2) ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณได้จาก

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.9)$$

และสามารถวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆ โดยได้แสดงไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าในตัวมอเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.3

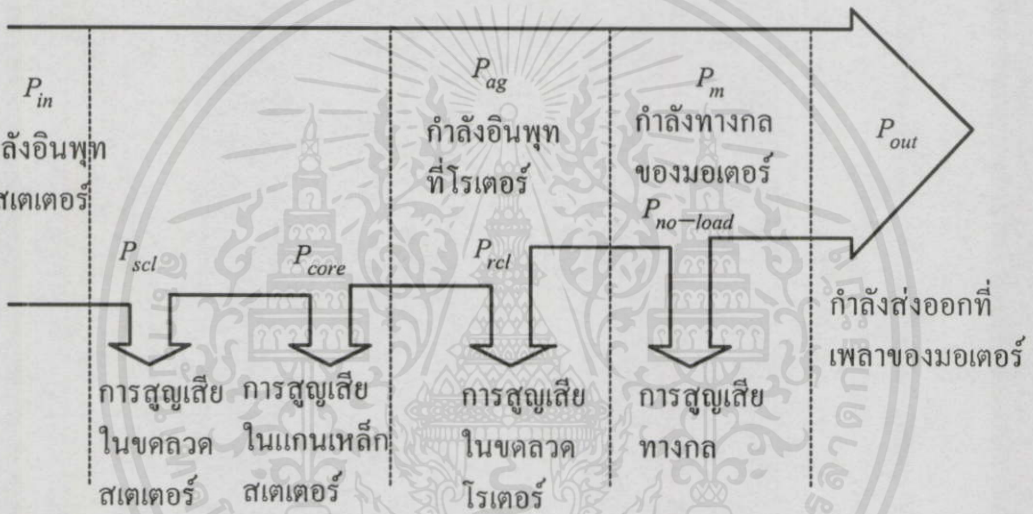
กำลังอินพุท P_{in} (Input power)	$= 3V_1 I_1 \cos \phi_1$
การสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์ P_{scl} (Stator copper loss)	$= 3R_1 I_1^2$
การสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์ P_{core} (Core loss)	$= 3 \frac{E_1^2}{R_c}$
การสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ P_{rcl} (Rotor copper loss)	$= 3R_2 I_2^2$
$P_{no-load}$ = กำลังที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน และกำลังลมต้าน	

กำลังไฟฟ้าที่ส่งจากสเตเตอร์ผ่านแอร์เก็บไปยังโรเตอร์ เรียกว่า ซิงโครนัสวัตต์ (Synchronous watt) หรือเรียกว่า กำลังอินพุทที่โรเตอร์ (P_{ag}) (Airgap power) ดังมีค่าตามสมการ

$$P_{ag} = P_{in} - P_{scl} - P_{core} \tag{2.10}$$

ซึ่งกำลังอินพุทที่โรเตอร์สามารถแสดงในเทอมของความต้านทานในโรเตอร์ (R_2'/s) ได้จาก

$$P_{ag} = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.3 แสดงไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังทางกลของมอเตอร์ (P_m) (Mechanical power) หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_m &= P_{ag} - P_{rcl} \\ &= 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} - 3I_2'^2 R_2' \\ P_m &= (1-s)P_{ag} \end{aligned} \tag{2.12}$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเพลลาของมอเตอร์ (P_{out}) หาได้จากสมการ $P_{out} = P_m - P_{no-load}$ โดยที่ $P_{no-load}$ เป็นกำลังที่สูญเสียไปใช้ประโยชน์ด้านการกำเนิดความร้อนในมอเตอร์ ซึ่งค่านี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{out} = P_m - P_{no-load} \tag{2.13}$$

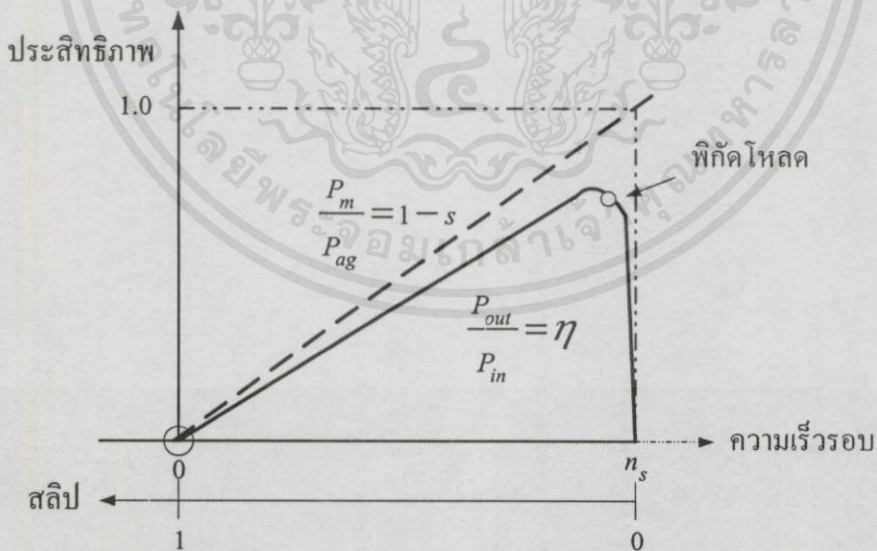
ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η) หาได้จาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_m - P_{no-load}}{P_{ag} + P_{scl} + P_{core}} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) เมื่อไม่คิดค่าการสูญเสียจากกำลังไฟฟ้าด้านสเตเตอร์และการสูญเสียเนื่องจากมอเตอร์ทำงานในขณะที่ไม่มีโหลด จะได้สมการประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยประมาณดังนี้

$$\eta \approx \frac{P_m}{P_{ag}} = \frac{(1-s)P_{ag}}{P_{ag}} = (1-s) \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.14) และ (2.15) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความเร็รรอบของมอเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.4 โดยถ้ามอเตอร์ทำงานใกล้ความเร็วซิงโครนัสหรือความเร็วรอบพิกัด จะทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูง แต่ถ้ามอเตอร์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำๆ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์จะลดลงเป็นสัดส่วนตามค่าสลิปที่เพิ่มขึ้น เพราะกำลังงานส่วนหนึ่งของมอเตอร์จะไปสูญเสียบนความต้านทานในรูปของความร้อนในวงจรรอเตอร์ ขณะที่ปรับรอบด้วยความต้านทานจากภายนอกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการควบคุมย่านความเร็วรอบโดยวิธีการปรับความต้านทานในวงจรรอเตอร์



รูปที่ 2.4 แสดงประสิทธิภาพเทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แรงบิดของมอเตอร์ (T) (developed torque) หาได้จากสมการข้างของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (2.16)$$

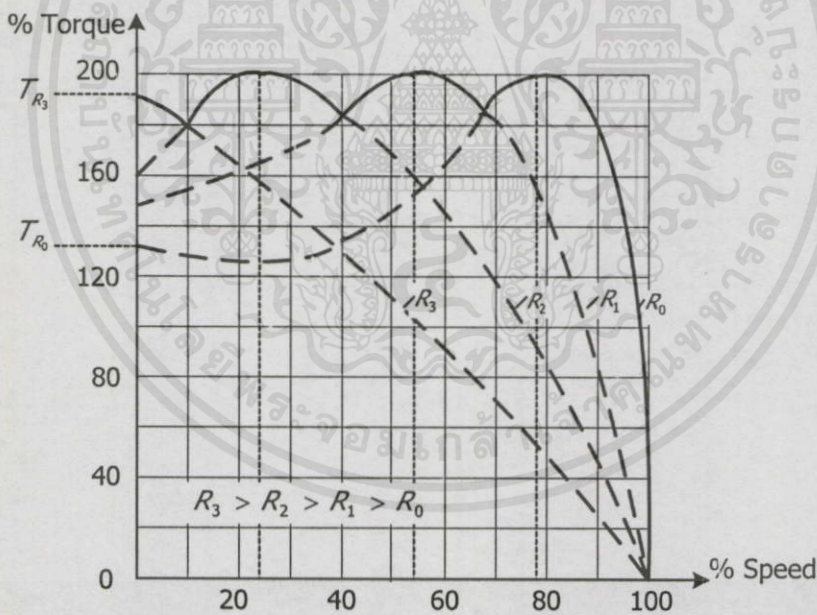
ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (2.5) และ (2.12) ในสมการ (2.16) จะได้แรงบิดของมอเตอร์ในเทอมของเชิงโครนัสวัดกับความเร็วเชิงโครนัส ดังสมการ

$$T = \frac{(1-s)P_{ag}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (2.17)$$

คุณลักษณะระหว่างแรงบิดกับความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ค่าความต้านทานในวงจรโรเตอร์สามารถที่จะปรับค่าได้ โดยการต่อความต้านทานจากภายนอกอนุกรมกับขดลวดโรเตอร์ผ่านทางสลิง สำหรับปรับความเร็วรอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ภายนอก ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มความต้านทานของวงจรโรเตอร์จะช่วยเพิ่มค่าแรงบิดขณะสตาร์ท และอัตราเร่งเป็นไปอย่างราบรื่น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วยุโรปได้ดังรูปที่ 2.5

แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรของโรเตอร์มากๆ จะทำให้มอเตอร์มีการสูญเสียมากขึ้นและมีค่าสลิปสูงขึ้นหรือความเร็วรอบลดลง เป็นผลทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำลง



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

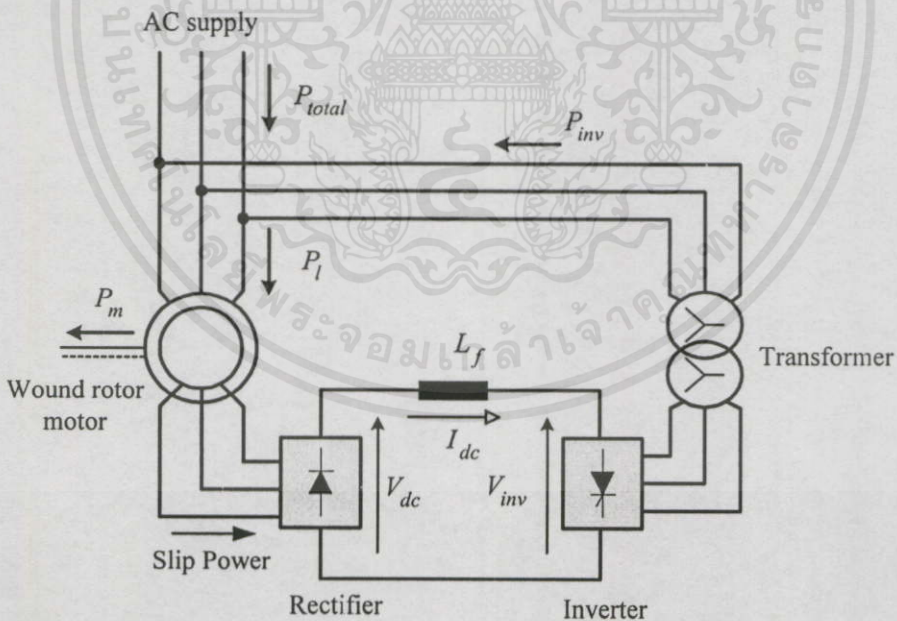
2.2.2 หลักการปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ด้วยสลิป

จากคุณลักษณะระหว่างแรงบิดกับความเร็วยุโรปของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ในรูปที่ 2.5 โดยการปรับความต้านทานในวงจรโรเตอร์ ถึงแม้จะทำได้ง่ายแต่มีข้อเสียในแง่ของประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ โดยกำลังไฟฟ้าอินพุตที่โรเตอร์ (\$P_{ag}\$) จะมีค่าเกือบคงที่เมื่อโหลดที่มอเตอร์ขับเคลื่อนมีค่าคงที่ และนั่นคือ การสูญเสียในขดลวดโรเตอร์จะแปรผันโดยตรงกับสลิป

ซึ่งการปรับเพิ่มความต้านทานภายนอกที่ต่อกับวงจรวอร์เตอร์จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง เนื่องจากเกิดพลังงานไปสูญเสียบนตัวความต้านทานของวงจรวอร์เตอร์ในรูปของความร้อนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพลังงานที่สูญเสียดังกล่าวเรียกว่า กำลังสลลิป (P_2) (slip power)

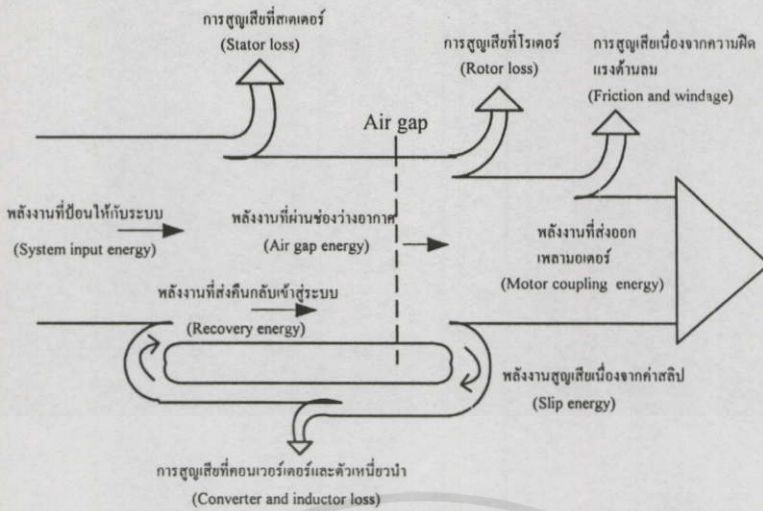
$$P_2 = sP_{ag} = 3I_2'^2 R_2 \quad (2.18)$$

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดนี้สามารถที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยอาศัยหลักการควบคุมสลลิป เนื่องจากกำลังสลลิปส่วนนี้สามารถเอาออกจากวงจรวอร์เตอร์เพื่อใช้ประโยชน์ เช่น การส่งคืนกำลังสลลิป กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี แทนการสูญเสียบนความต้านทานในรูปของความร้อนซึ่งเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับใช้กับโหลดประเภทที่มีแรงบิดคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสูงขึ้นโดยวิธีการดังกล่าว เรียกว่า ระบบเซอร์เบียด โดยค่ากำลังสลลิปจะถูกส่งออกโดยผ่านวงจรวอร์เตอร์กระแสด้วยไดโอดต่อแบบบริดจ์และถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงส่งผ่านคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท ที่ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ ส่งผ่านหม้อแปลงกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวอร์เตอร์ด้วยระบบเซอร์เบียด

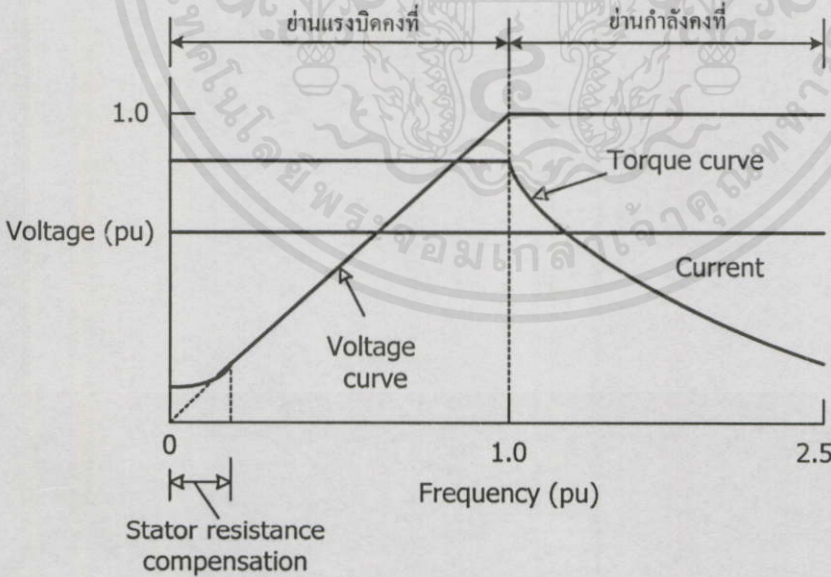
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าหรือนำกำลังสลลิปไปขับเคลื่อนมอเตอร์ตัวอื่นซึ่งก็ปปลิงอยู่เพลาหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดนี้วิธีการนี้เรียกว่า ระบบเครเมอร์ ซึ่งเหมาะสมสำหรับโหลดประเภทที่มีกำลังใช้งานคงที่ โดยที่มีการเพิ่มกำลังทางกลศาสตร์ให้แก่เพลาขับ โดยอาศัยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการถ่ายพลังงานในระบบเซอร์เบียด

2.2.3 หลักการปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยความถี่

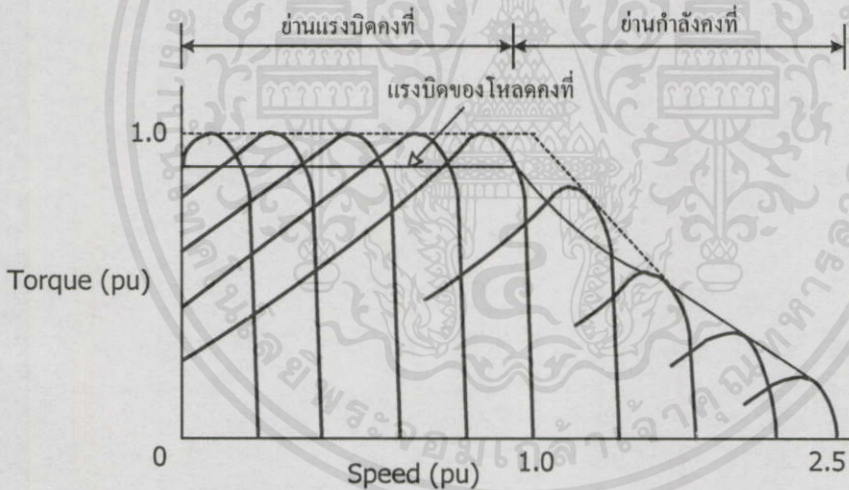
วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการปรับเปลี่ยนแรงดันและความถี่ (Variable voltage variable frequency) หรือเทคนิค VVVF ซึ่งเป็นวิธีการที่รู้จักกันดีที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไป ซึ่งจะใช้อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตเป็นไปตามที่ต้องการของหลักการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, แรงบิดและกระแสเตเตอร์กับความถี่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ชนิดของมอเตอร์ที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติสลิปต่ำซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนความเร็วรอบซึ่งโรตอร์ของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่อยู่

ระหว่างส่วนสเตเตอร์และโรเตอร์ การที่จะเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสได้นี้สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งลักษณะการควบคุมความถี่นั้นจะคล้ายกับการควบคุมดีซีมอเตอร์ กล่าวคือ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ แต่การเพิ่มความถี่อย่างเดียวจะทำให้แอร์เก็บฟลักซ์ของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากการลดลงของกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing current) อันเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มของแมกนิไตซิง รีแอกแตนซ์ (Magnetizing reactance) ซึ่งเมื่อแอร์เก็บฟลักซ์ลดลงจะทำให้แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ลดลง เพื่อที่จะรักษาฟลักซ์ในแอร์เก็บ และแรงบิดสูงสุดให้คงที่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามค่าความถี่คือ รักษาอัตราส่วนของแรงดันออก (V) ต่อความถี่ (f) หรือ (V/f) ให้คงที่ที่จะทำให้แรงบิดคงที่เช่นเดียวกับการควบคุมดีซีมอเตอร์ ที่ควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์และรักษาสนามแม่เหล็กให้คงที่ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นการขับเคลื่อนที่ให้แรงบิดที่คงที่ การควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีแรงบิดสูงสุดคงที่จะทำได้ในย่านความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วรอบปกติ (Base speed) หรือความถี่ต่ำกว่าความถี่กำหนด (Base frequency) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
เมื่อใช้วิธีการควบคุมแบบเปลี่ยนแรงดันและความถี่

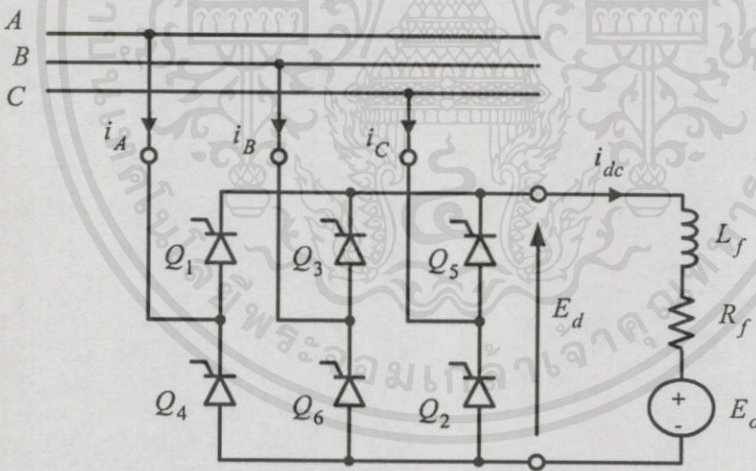
ในย่านความถี่ต่ำ ๆ การรักษาให้แรงดันต่อความถี่ที่จะไม่เป็นการเพียงพอ ที่จะทำให้แรงบิดสูงสุดมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำ ๆ กระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing current) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetizing reactance) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ดังนั้นจะต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อไปชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ ทำให้การเปลี่ยน

แปลงแรงดันกับความถี่เป็นไปตามเส้นทึบของกราฟรูปที่ 2.8 แทนการเปลี่ยนแปลงตามเส้นประซึ่งเป็นกราฟแรงดันต่อความถี่มีค่าคงที่

ส่วนในย่านความเร็วรอบที่สูงกว่าความเร็วรอบพิกัด (Base speed) ไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่ เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์ทำงานเกินกำลัง (Over load) ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นจึงรักษาให้คงที่ที่กำหนดซึ่งจะทำให้แรงบิดสูงสุดลดลง เนื่องจากการลดลงของแอมป์ฟลักซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.8 การควบคุมความเร็วในย่านนี้กำลังออกสูงสุดของมอเตอร์จะมีค่าคงที่เช่นเดียวกับดีซีมอเตอร์ ด้วยการลดความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นการทำงานที่ให้กำลังคงที่

2.3 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท

การแปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตท สามารถทำงานได้ 2 ควอดแรนต์กล่าวคือทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์และสภาวะอินเวอร์เตอร์โดยขึ้นอยู่กับ การควบคุมมุมจุดชนวน (angle control) ของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถพิจารณาหลักการของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตทได้ดังต่อไปนี้

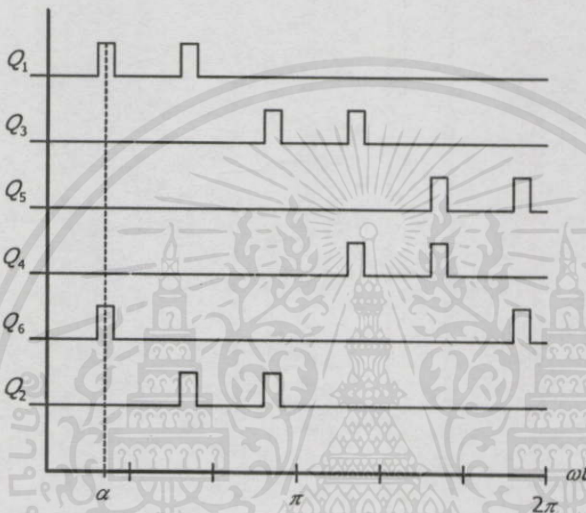


รูปที่ 2.10 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท

2.3.1 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะเรกติไฟเออร์

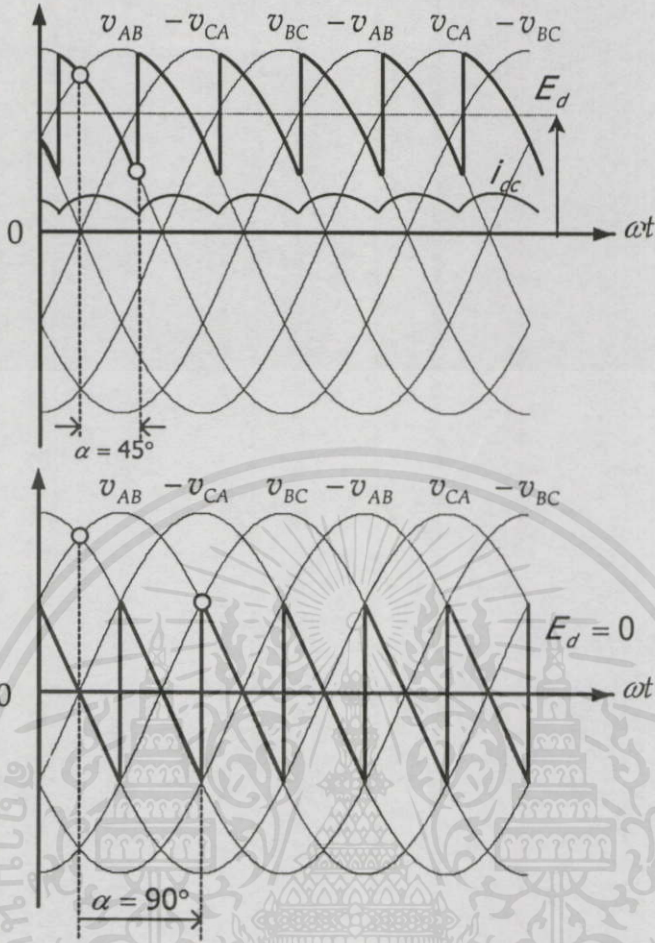
ในรูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส เมื่อนำเอาเอสซีอาร์มาต่อเป็นวงจรแบบบริดจ์ ซึ่งประกอบไปด้วยเอสซีอาร์ทั้งหมด 6 ตัว โดยมีเอสซีอาร์ Q_1, Q_3 และ Q_5 ทำหน้าที่แปลงไฟช่วงซีกบวก ส่วน Q_2, Q_4 และ Q_6 ทำหน้าที่แปลงไฟช่วงซีกลบ การนำกระแสของเอสซีอาร์จะขึ้นอยู่กับศักดาของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเอสซีอาร์ทำให้ต้องใช้มุมจุดชนวนถึง 6 จุดใน 1 รอบของแรงดันทางเข้า เพื่อจุดชนวนเอสซีอาร์ทั้ง 6 ตัว ทำให้เรียกว่า วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ว่าเป็นวงจรแบบ 6 พัลส์ (Six pulse) ตามจำนวนมุมจุดชนวนเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในการต่อเอสซีอาร์แบบบริดจ์นั้น อาจมองง่ายๆ เป็น เอสซีอาร์ 2 ชุด ต่อกันแบบสตาร์แต่กลับทิศกันแล้ว นำมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน โดยมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าระหว่างจุดต่อทั้งสาม โดยแรงดันไฟฟ้าสลับสามเฟสที่ต่อเข้ามา (V_a, V_b, V_c) ตามลำดับโดยถือว่าจุดสับเปลี่ยนของแรงดันไลน์ (Point of commutation) เป็นจุดที่มุมจุดชนวน α เท่ากับศูนย์ ทำให้แรงดันทางออกสูงสุด ซึ่งจะทำให้เอสซีอาร์ แต่ละตัวมีโอกาสนำกระแสได้ 120 องศา แต่ทุกๆ 60 องศา กระแสจะต้องถูกสับเปลี่ยนทางจากเอสซีอาร์ตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งเสมอ



รูปที่ 2.11 แสดงมุมจุดชนวนของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.10 ในช่วงแรกของการเริ่มต้นเมื่อแรงดันไลน์ A เป็นบวกเมื่อเทียบกับแรงดันไลน์ B ทำให้ เอสซีอาร์ Q_1 จะนำกระแสผ่านโหลดและโหลดมาครบวงจรที่ เอสซีอาร์ Q_6 แต่ 60 องศาต่อมาแรงดันระหว่างไลน์ A และแรงดันไลน์ B (V_{AB}) เริ่มมีค่าน้อยกว่าแรงดันภาระการไหลของกระแสที่ผ่าน เอสซีอาร์ Q_6 จะหยุด ขณะเดียวกันแรงดันระหว่างไลน์ A และแรงดันไลน์ C (V_{AC}) จะสูงขึ้นแทน ทำให้การนำกระแสโดย เอสซีอาร์ Q_1 ถูกสับเปลี่ยนมาทางเอสซีอาร์ Q_2 และจะสับเปลี่ยนตัวกันในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ จนครบ 360 องศา ด้วยวิธีการนำกระแสและหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์ด้วยวิธีการดังกล่าว จึงเรียกว่าคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้ว่า 'ไลน์คอมมิวเตท' เนื่องจากการนำกระแสสลับทางกันนี้เอง จึงจำเป็นต้อง จัดลำดับ ของสัญญาณจุดชนวนให้ถูกต้อง โดยเริ่มต้นจากจุดชนวน Q_1 และ Q_6 พร้อมกัน 60 องศา ต่อมาจะต้องจุดชนวน Q_1 และ Q_2 อีกครั้งหนึ่งเพื่อสลับกระแสให้ไหลในเส้นทางที่ถูกต้องและในทำนองเดียวกัน 60 องศา ต่อ Q_1 จะหยุดนำกระแสร่วมกับ Q_2 แต่ Q_2 จะนำกระแสร่วมกับ Q_3 แทน จึงต้องมีสัญญาณจุดชนวน สำหรับ Q_2 กับ Q_3 อีกคู่หนึ่งสลับกันเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ดังนั้นสัญญาณจุดชนวนในแบบเต็มคลื่นจึงต้องเป็นแบบคู่ที่ห่างกัน 60 องศา และต้องควบคุมสัญญาณจุดชนวนนี้ ทุกๆ 360 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.11



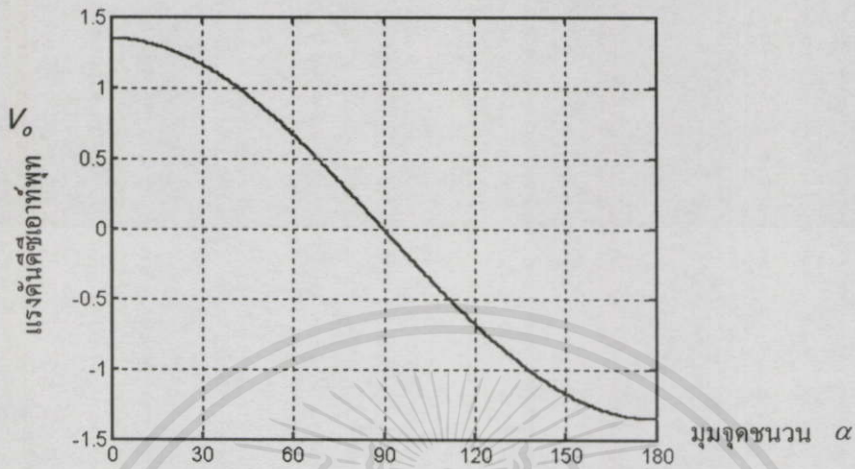
รูปที่ 2.12 แสดงคลื่นแรงดันดีซีเอาต์พุตและกระแสดีซี เมื่อทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์

ในรูปที่ 2.12 แสดงรูปคลื่นของแรงดันดีซีเอาต์พุต (E_d) กับกระแสดีซี เมื่อควบคุมมุมจุดชนวน (α) ที่ 45° และ $\alpha = 90^\circ$ โดยคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์ ซึ่งสามารถหาสมการแรงดันได้จาก

$$\begin{aligned}
 E_d &= \frac{6}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_{LL} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) d\omega t \\
 &= 1.35V_{LL} \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากสมการ (2.19) จะเห็นว่า แรงดันดีซีเอาต์พุต (E_d) จะเปลี่ยนแปลงไปตาม ฟังก์ชันโคไซน์ ดัง นั้นในวงจรการสร้างสัญญาณจุดชนวนที่จะไปจุดชนวนเอสซีอาร์จะต้องนำฟังก์ชันโคไซน์นี้ไปทำให้เกิดสัญญาณจุดชนวนเสมอ โดยความสัมพันธ์ของมุมจุดชนวน (α) กับ แรงดันดีซีเอาต์พุต

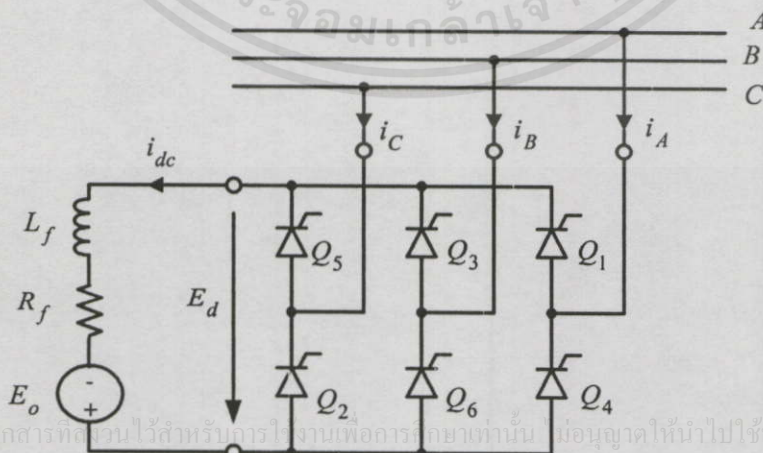
(E_d) แสดงได้ในรูปที่ 2.13 โดยถ้ามุมจุดชนวน (α) ควบคุมอยู่ระหว่าง $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ องศา คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์ คือ แรงดันคิซีเอาท์พุท (E_d) มีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคิซีเอาท์พุทกับมุมจุดชนวนเอสซีอาร์

2.3.3 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะอินเวอร์เตอร์

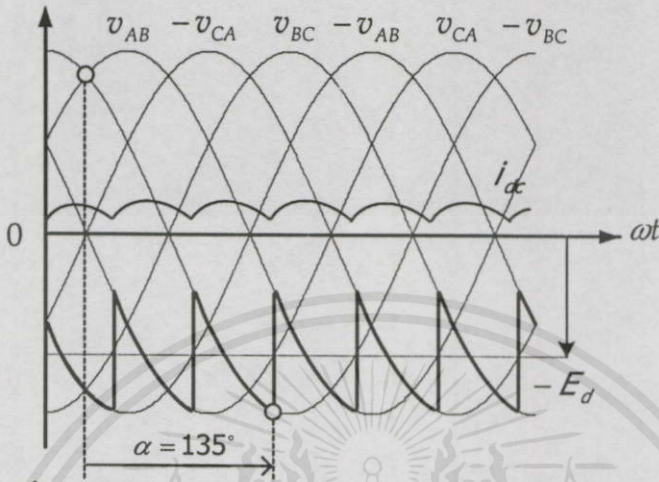
ในรูปที่ 2.14 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ ค่าแรงดันคิซีเอาท์พุท (E_d) ในสมการที่ (2.19) จะมีค่าเป็นลบ เมื่อควบคุมมุมจุดชนวน (α) ของคอนเวอร์เตอร์มากกว่ามุม 90 องศา โดยที่มุมจุดชนวนจะถูกควบคุมในช่วง $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ นั้นหมายถึง คอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนหน้าที่จากเรกติไฟเออร์ไปเป็นอินเวอร์เตอร์ เพื่อป้อนพลังงานจากระบบส่วนที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงกลับสู่ระบบส่วนที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับหรือแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 แสดงคอนเวอร์เตอร์ ชนิดไลน์คอมมิวเตท เมื่อทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์

เช่นที่มุมจุดชนวนเท่ากับ 135 องศา สามารถแสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีเอาท์พุทและกระแสดีซีได้ดังรูปที่ 2.15 โดยที่คลื่นของแรงดันดีซีเอาท์พุทมีค่าเป็นลบแต่กระแสดีซียังคงไหลในทิศทางเดียวกับสภาวะเรกติไฟเออร์ คือมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.15 แสดงคลื่นแรงดันดีซีเอาท์พุทและกระแสดีซี เมื่อทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์

2.3.3 การพิจารณาแรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานแบบเรกติไฟเออร์

จากรูปที่ 2.12 เมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์ และตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองมีขนาดใหญ่มากซึ่งจะทำให้กระแสดีซีเฉลี่ยที่เอาท์พุทไหลอย่างต่อเนื่อง แรงดันดีซีเอาท์พุทและกระแสทางด้านดีซี จะมีค่าเป็นบวก โดยมีมุมจุดชนวนอยู่ระหว่าง $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ซึ่งหาค่าเฉลี่ยของกระแสดีซี (I_{dc}) ดังสมการ

$$I_{dc} = \frac{E_d - E_o}{R_f} = \frac{1}{R_f} (1.35V_{LL} \cos \alpha - E_o) \quad (2.20)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.19) และ (2.20) จะได้กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านจากระบบที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับไปยังระบบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าดีซีเฉลี่ย (P_{dc}) ได้จากสมการ

$$P_{dc} = E_d I_{dc} \quad (\text{ด้านดีซี}) \quad (2.21)$$

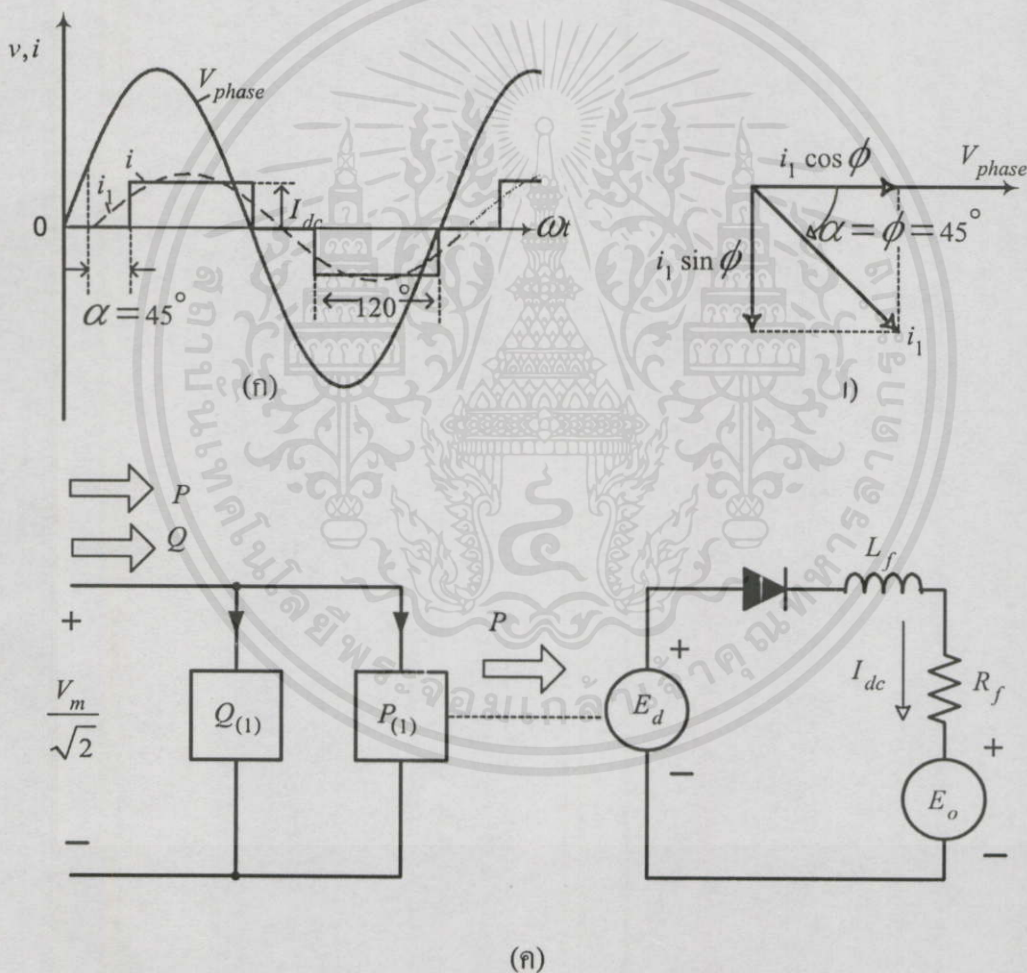
โดยในรูปที่ 2.16 แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันเฟสและองก์ประกอบแอกติฟและรีแอกทีฟของกระแสที่ความถี่มูลฐาน และวงจรสมมูลย์ต่อเฟสของการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากด้านเอซิมายังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ เมื่อทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์

กำลังไฟฟ้าแอกติฟที่ไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซี หาได้จากสมการ

$$P_{(1)} = 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_{(1)} \cos \phi \tag{2.22}$$

และกำลังไฟฟารีแอกติฟที่ไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีได้จากสมการ

$$Q_{(1)} = 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_{(1)} \sin \phi \tag{2.23}$$



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของ แรงดัน,กระแสและกำลังไฟฟ้า ในสภาวะเรกติไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่นำมาใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ก) รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ความถี่มูลฐาน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำมิให้ข้อมูลนี้เป็นอา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

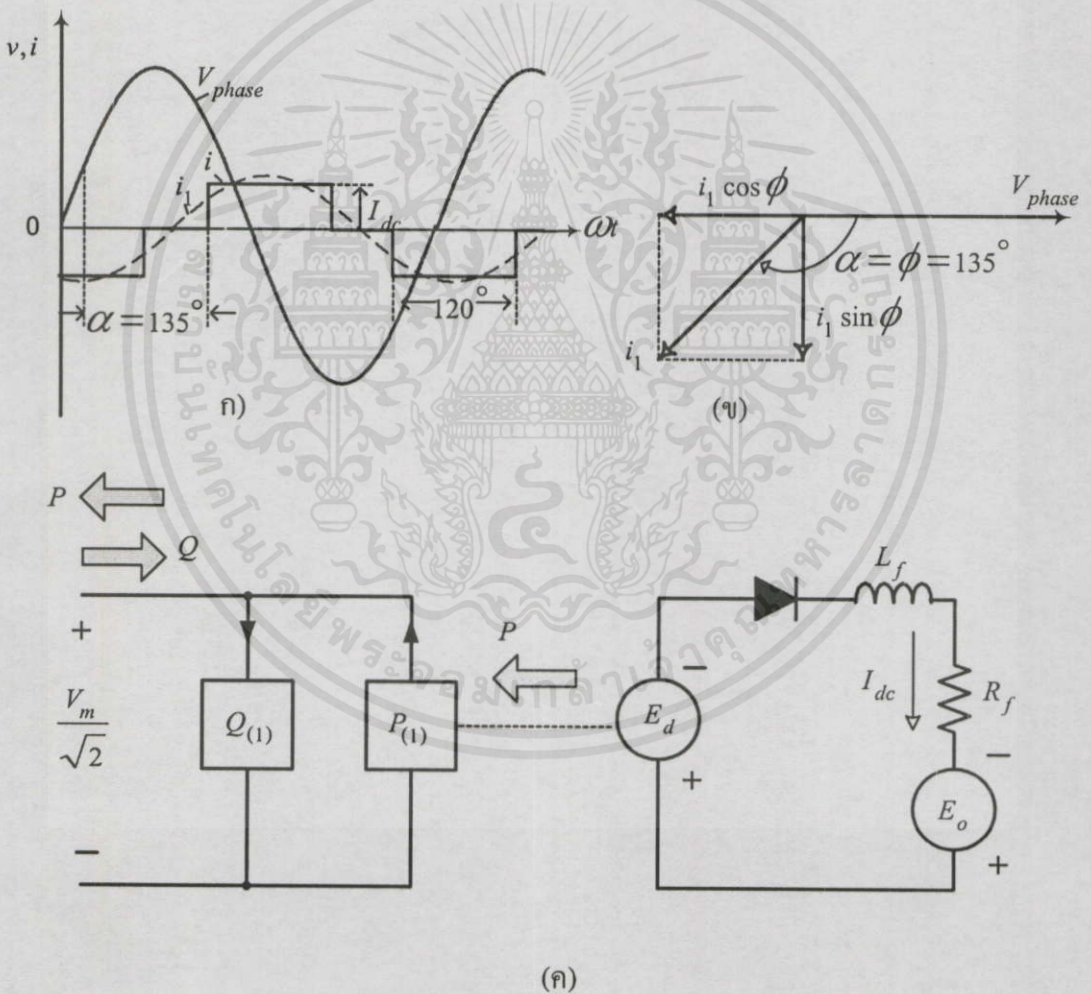
(ข) องค์ประกอบแอกติฟและรีแอกติฟของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

(ค) วงจรสมมูลต่อเฟสของกำลังไฟฟ้า

2.3.4 การพิจารณาแรงดัน, กระแส, กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานแบบอินเวอร์เตอร์

เมื่อมุมจุดชนวน $\alpha > 90^\circ$ ค่าแรงดันดีซีเอาต์พุต (E_d) จะมีค่าเป็นลบ พิจารณาจากรูปที่

2.15 เมื่อคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดกระแสดีซีเอาต์พุตไหลอย่างต่อเนื่องโดยที่ทิศทางของกระแสยังมีค่าเป็นบวก ซึ่งส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้านี้จะเฉลี่ยในสมการที่ (2.21) มีค่าเป็นลบ นั่นคือกำลังไฟฟ้านี้จะเฉลี่ยของคอนเวอร์เตอร์จะถูกป้อนคืนเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายด้านเอซี โดยสามารถพิจารณาได้จากเวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันเฟสและองค์ประกอบแอกตีฟและรีแอกตีฟของกระแสที่ความถี่มูลฐาน ด้วยหลักการเดียวกัน กับคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่องค์ประกอบของกระแสแอกตีฟจะมีเฟสที่ล่าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงตามมุมจุดชนวน (α) ของคอนเวอร์เตอร์ในช่วง $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ องศา



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของ แรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ในสภาวะอินเวอร์เตอร์ ด้านการคำนวณ

ไม่จำกัด (ก) รูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสที่ความถี่มูลฐานของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) องค์ประกอบแอกตีฟและรีแอกตีฟของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

(ค) วงจรสมมูลต่อเฟสของกำลังไฟฟ้า

ในรูปที่ 2.17 สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการกำลังไฟฟ้าดีซีเฉลี่ยกับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายด้านเอซีได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_{dc} &= \frac{E_o - E_d}{R_f} \\
 &= \frac{1}{R_f} (E_o - 1.35V_{LL} |\cos \alpha|)
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

ในรูปที่ 2.19 (ข) แสดงวงจรสมมูลย์ของกำลังไฟฟ้าแอกติฟและกำลังไฟฟารีแอกติฟเมื่อทำงานแบบอินเวอร์เตอร์โดยกำลังไฟฟ้าดีซีเฉลี่ยจะไหลจากด้านดีซีกลับไปยังด้านเอซีหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 P_{dc} &= E_d I_{dc} \quad (\text{ด้านดีซี}) \\
 P_{(1)} &= 3 \frac{V_m}{\sqrt{2}} I_{(1)} \cos \phi \quad (\text{ด้านเอซี})
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

ส่วนกำลังไฟฟารีแอกติฟหาได้จากสมการ (2.23) เนื่องจากประกอบของกระแสรีแอกติฟมีเฟสลักษณะเดียวกันกับการทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำและคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตท ที่ทำงานในสภาวะเรกติไฟเออร์และสภาวะอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้สำหรับประยุกต์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์ โดยวิธีการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลับกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ โดยจะนำหลักการดังกล่าวไปพิจารณาในการวิเคราะห์การทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีควบคุมแบบเซอร์เบียสในบทที่ 3 และนำไปพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยครั้งนี้ในบทที่ 4 ต่อไป

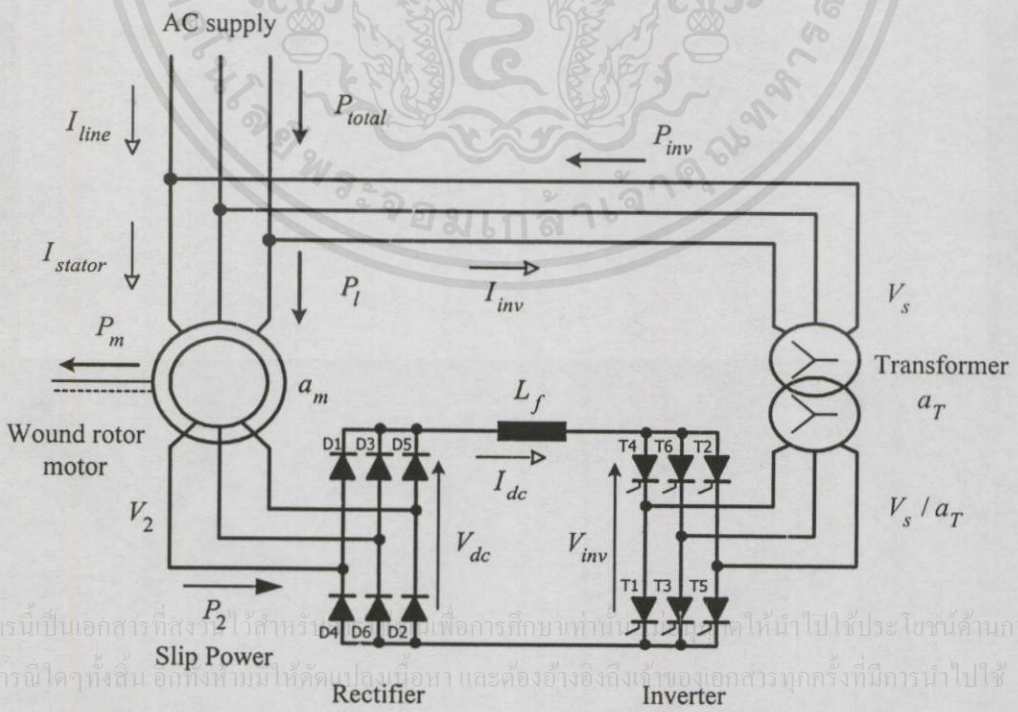
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการคืนพลังงานสลลิป ด้วยระบบทั่วไปแบบเซอร์เบียส

3.1 บทนำ

ในระบบการขับเคลื่อนทางกลขนาดใหญ่ด้วยมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสามารถทำได้โดยการปรับความต้านทานในวงจรโรเตอร์ซึ่งความเร็วรอบจะถูกควบคุมให้อยู่ในย่านต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ปัญหาของการควบคุมความเร็วรอบโดยวิธีการปรับความต้านทานในวงจรของโรเตอร์คือประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง เนื่องจากกำลังงานที่เกิดจากค่าสลลิปไปสูญเสียบนตัวต้านทานในรูปของความร้อน ดังนั้นจึงได้มีวิธีการที่จะพยายามนำพลังงานที่สูญเสียดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยประยุกต์ใช้ระบบสแตติกเซอร์เบียส (Static Scherbius Drive) ซึ่งเป็นวิธีการคืนพลังงานสลลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสูงขึ้น ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการพิจารณาคุณลักษณะการทำงานของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดีซีเฉลี่ยกับสลลิป, แรงบิดกับความเร็วรอบในขณะที่มีการป้อนกำลังไฟฟ้าสลลิปกลับเข้าสู่ระบบ และการพิจารณาค่าประสิทธิภาพกับค่าตัวประกอบกำลังของระบบควบคุมชนิดนี้

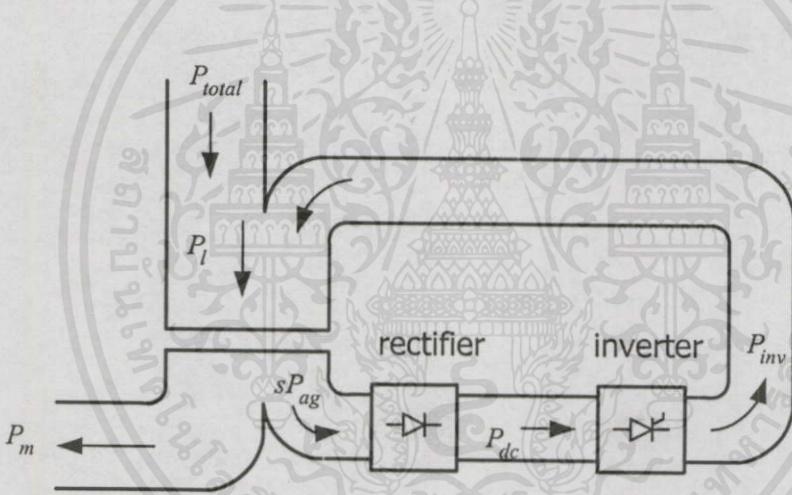


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ด้วยระบบเซอร์เบียส

3.2 การพิจารณาค่าสลิปขณะไร้โหลดและความเร็วรอบมอเตอร์ของระบบการคืนพลังงานด้วยสลิปในระบบทั่วไปแบบเซอร์เบียด

ในรูปที่ 3.1 แสดงวิธีการควบคุมด้วยระบบเซอร์เบียด ในการส่งคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ ซึ่งในระบบควบคุมนี้ย่านความเร็วรอบจะถูกควบคุมต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Subsynchronous speed) คือค่าสลิป (s) มีค่าเป็นบวก ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสลิป (sP_{ag}) จึงมีค่าเป็นบวกด้วย โดยในระบบควบคุมนี้กำลังไฟฟ้าสลิปจะถูกส่งออกจากด้าน โรเตอร์ผ่านวงจร 3 เฟส บริดจ์เรกติไฟเออร์และถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (P_{dc}) ส่งผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทที่ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันดีซีด้านอินเวอร์เตอร์ (V_{inv}) มีค่าเป็นลบ โดยที่ค่ามุมจุดชนวน α ไทริสเตอร์ควบคุมอยู่ระหว่าง $90^\circ - 180^\circ$ องศาและส่งกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีโดยผ่านหม้อแปลงที่ต่ออยู่ระหว่างวงจรคอนเวอร์เตอร์กับเอซีไลน์ของระบบ ดังแสดงทิศทางการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในระบบเซอร์เบียดได้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงทิศทางการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในระบบเซอร์เบียด

จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาการทำงานในสภาวะคงตัว (Steady-state operation) สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันด้านโรเตอร์ที่ถูกเรกติไฟร์แล้วกับค่าสลิป (s) เมื่อไม่คิดการโอเวอร์แล็ปซึ่งเกิดในระหว่างการคอมมิวเตทและไม่คิดค่าแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ด้านสเทเตอร์และด้านโรเตอร์ จะได้แรงดันดีซีโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) ดังนี้

$$V_{dc} = 1.35V_{02} = \frac{1.35}{a_m} sV_s \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เมื่อ a_m คือ อัตราส่วนแรงดันขั้วมอเตอร์ (Stator-to-rotor turn ratio) , V_s คือแรงดันไลน์ด้านสเทเตอร์ และ V_{02} คือแรงดันไลน์ด้านโรเตอร์ในขณะหยุดนิ่ง

สำหรับแรงดันดีซีด้านอินเวอร์เตอร์ (V_{inv}) หาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{inv} &= 1.35V_{LV} \cos \alpha \\ &= \frac{1.35}{a_T} V_s \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.2)$$

เมื่อ a_T คือ อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง (line side-to-inverter ac side turn ratio)

V_{LV} คือ แรงดันไลน์ด้านอินเวอร์เตอร์โดยที่มุมจุดชนวน (α) ควบคุมไว้ในช่วง $90^\circ - 180^\circ$

ในขณะที่ไม่มีโหลด แรงบิดของมอเตอร์จะมีค่าน้อยมาก ทำให้กระแสโรเตอร์ที่ไหลผ่านเรกติไฟเออร์จะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ทำให้แรงดันดีซีจากสมการ (3.1) และ (3.2) จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{dc}, V_{inv} ได้จาก

$$V_{dc} + V_{inv} = 0 \quad (3.3)$$

แทนค่าจากสมการ (3.1), (3.2) ลงในสมการ (3.3)

$$\begin{aligned} \frac{1.35}{a_m} s V_s + \frac{1.35}{a_T} V_s \cos \alpha &= 0 \\ s &= -\frac{a_m}{a_T} \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.4)$$

แทนค่าในเทอมของความถี่รอบโรเตอร์ ω_r (rad/sec.)

$$\omega_r = \left(1 + \frac{a_m}{a_T} \cos \alpha \right) \omega_s \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.4), (3.5) ทำให้ทราบว่าสามารถควบคุมค่าสลิปและความถี่รอบของมอเตอร์ได้โดยการควบคุมมุมจุดชนวน (α) ของไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์ในฟังก์ชันของโคไซน์ ซึ่งย่านของสลิปที่ควบคุมนั้นขึ้นอยู่กับ การออกแบบ a_m และ a_T ตามลำดับ โดยถ้ากำหนดให้ $a_m/a_T = 1$ ความถี่รอบของมอเตอร์ก็สามารถควบคุมได้จากสถานะหยุดนิ่งจนถึงความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (ω_s) ซึ่งในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งทำให้ค่าแรงดันดีซีด้านโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) มีค่าสูงสุด นั่นคือมุมจุดชนวน $\alpha = 180^\circ$ และโรเตอร์จะทำงานที่ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (ω_s) ที่มุมจุดชนวน $\alpha = 90^\circ$ ทำให้ค่าแรงดันดีซี V_{dc} มีค่าเป็น 0

การออกแบบควบคุมย่านสลิป ในทางอุดมคติมุมจุดชนวน (α) ของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด ไลน์คอมมิวเตทที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ สามารถควบคุมได้ตั้งแต่ 90° ไปจนถึง 180° แต่ในทางปฏิบัติจะต้องเผื่อช่วงเวลาในการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์และผลของโอเวอร์แล็ปที่เกิดขึ้นในระหว่างการคอมมิวเตทของอินเวอร์เตอร์ โดยจะจำกัดค่ามุมจุดชนวน (α) สูงสุดไว้ที่ 160° จากสมการ (3.4) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมจุดชนวน (α) กับย่านของสลิป (s) ได้จาก

$$\begin{aligned} 90^\circ &\leq \alpha \leq 160^\circ \\ 0 &\leq s \leq 0.976 \left[\frac{a_m}{a_T} \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

และสามารถคำนวณหาค่ามุมจุดชนวน (α) โดยกำหนดย่านสลิป (s) ที่ควบคุมในขณะมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้อโหลดได้จากสมการ

$$\alpha = \cos^{-1} \left[-s \frac{a_T}{a_m} \right] \quad (3.7)$$

จากรูปที่ 3.1 ถ้าตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ในวงจรเชื่อมโยงคิซีซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองและมีขนาดใหญ่เพียงพอที่ทำให้กระแสคิซี (I_{dc}) ไหลได้อย่างต่อเนื่อง จะทำให้รูปคลื่นกระแสโรเตอร์ (I_2) มีลักษณะเป็นสลับที่มีช่วงกว้างของพัลส์เป็น $2\pi/3$ โดยที่ขนาดของกระแสนี้จะเท่ากับขนาดของกระแสคิซี (I_{dc}) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเทียบกับแรงดันเฟสด้านโรเตอร์ โดยค่าองค์ประกอบมูลฐานของกระแสโรเตอร์ ($I_{2(1)}$) จะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดแรงบิดของตัวมอเตอร์ ดังนั้นจึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบและกระแสคิซี (I_{dc}) ถ้าไม่คิดค่ากำลังสูญเสียในวงจรเชื่อมโยงคิซี สามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าสลิป (sP_{ag}) กับกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงคิซี (P_{dc}) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} sP_{ag} &= P_{dc} \\ &= V_{inv} I_{dc} \end{aligned} \quad (3.8)$$

ในสมการที่ (3.8) ค่ากำลังไฟฟ้าสลิปนี้คือพลังงานส่งกลับคืนเข้าสู่แหล่งจ่ายด้านเอซีไลน์และจะแปรผันโดยตรงกับค่าสลิป (s) เช่นถ้ามอเตอร์ทำงานที่สลิป $s=0.5$ ระบบควบคุมชนิดนี้จะสามารถส่งคืนพลังงานสลิปได้ประมาณ 50% ของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศจากส่วนสเตเตอร์มายังส่วนโรเตอร์ (P_{ag}) (Air gap power) และแทนค่าลงในเทอมของกำลังทางกลของมอเตอร์ (P_m) ในสมการ (2.12) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_m &= (1-s)P_{ag} \\
 &= T\omega_r \\
 &= T\omega_s(1-s)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

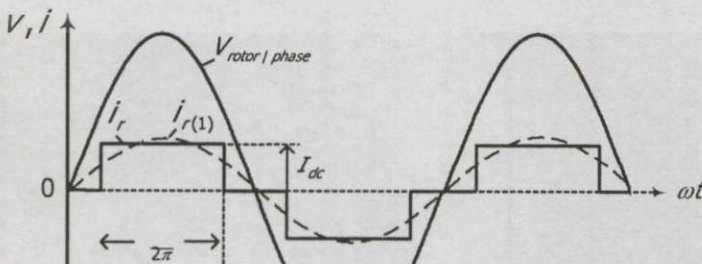
จากสมการ(3.9) สามารถหาความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบกับค่าแรงบิดของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$T = \frac{V_{inv} I_{dc}}{s\omega_s} \tag{3.10}$$

แทนค่าแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ (V_{inv}) จากสมการ (3.2) และสลิป (s) จากสมการ (3.4) จะได้

$$T = \frac{1.35V_s}{\omega_s a_m} I_{dc} \tag{3.11}$$

สมการนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแรงบิดของมอเตอร์จะแปรผัน โดยตรงกับกระแสดีซี (I_{dc}) (เมื่อ V_s กับ ω_s มีค่าคงที่) และกระแสจำนวนนี้เป็นสัดส่วนตามผลต่างระหว่างแรงดันดีซีด้าน โรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) กับแรงดันดีซีด้านอินเวอร์เตอร์ (V_{inv}) ดังนั้นสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ด้วยการปรับมุมจุดชนวน (α) ของอินเวอร์เตอร์เพื่อรักษาแรงดันดีซีด้านอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ และในขณะที่มอเตอร์ขับโหลดกำลังไฟฟ้าสลิปจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตามค่าแรงบิดของโหลด ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเป็นไปในลักษณะเดียวกับของดีซีมอเตอร์ชนิดกระตุ้นแยกซึ่งควบคุมการทำงานด้วยแรงดันอาร์เมเจอร์ ในทางปฏิบัติคุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบจะมีลักษณะของเคอร์ฟในรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นกระแสโรเตอร์เทียบกับแรงดันต่อเฟสด้านโรเตอร์

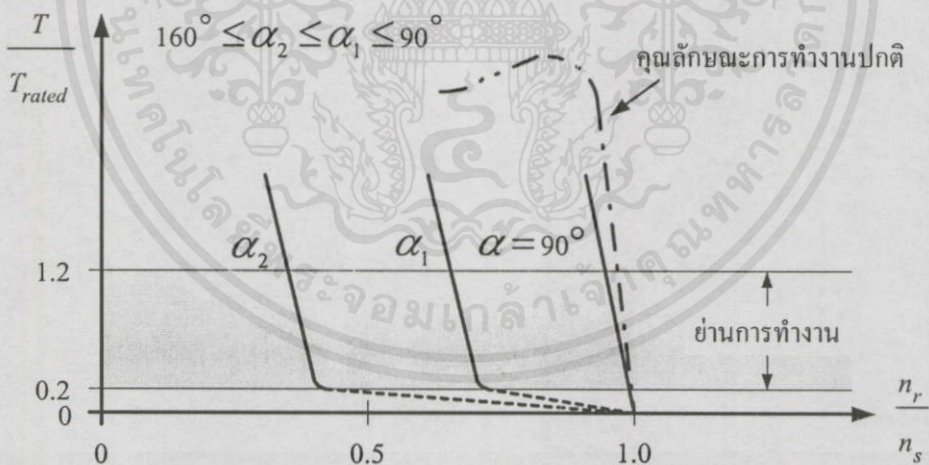
จากรูปที่ 3.3 สามารถหาค่าประกอบมูลฐานของกระแสโรเตอร์ได้จาก

$$I_{2(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} \tag{3.12}$$

แทนสมการ (3.12) ลงในทอมแรงบิดของมอเตอร์โดยโอนย้ายกระแส $I_{2(1)}$ ไปยังด้านสเตเตอร์โดยหารด้วยอัตราส่วนแรงดัน a_m นั่นคือจะได้รับความสัมพันธ์ของแรงบิดเมื่อคิดทางด้านสเตเตอร์ดังนี้

$$\begin{aligned} T &= \frac{1.35V_s}{\omega_s a_m} * \frac{\pi}{\sqrt{6}} a_m I_{r(1)} \\ &= \sqrt{3} \frac{V_s I_{r(1)}}{\omega_s} \end{aligned} \tag{3.13}$$

เมื่อ $I_{2(1)}' = \frac{I_{2(1)}}{a_m}$ คือ องค์ประกอบมูลฐานของกระแสโรเตอร์ที่โอนย้ายมาด้านสเตเตอร์

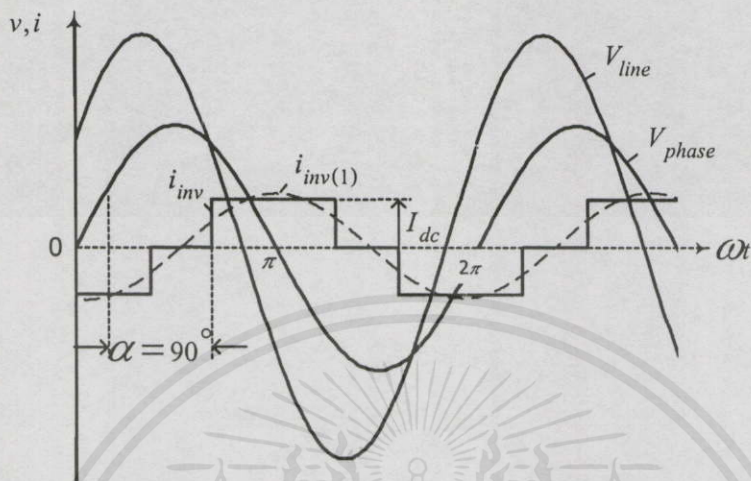


รูปที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของระบบควบคุมแบบเซอร์เบ็ช

3.3 การพิจารณาค่าประสิทธิภาพของระบบการควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงวิธีการควบคุมการปรับความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีการปรับความต้านทานในวงจรโรเตอร์ ถึงแม้จะทำได้ง่ายแต่จะมีข้อเสียในแง่ของประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ โดยเฉพาะในย่านความเร็วรอบต่ำๆ หรือที่สลิป (s) ค่าสูงๆ เพราะพลังงานส่วนหนึ่งจะไปสูญเสียบนตัวความต้านทานในรูปของความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสลิป (s)

ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ต่ำลง แต่หลักการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลับกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ของระบบขับเคลื่อนชนิดนี้จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบดีขึ้น



รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสและไลน์

ระบบขับเคลื่อนด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถควบคุมการปรับความเร็วรอบมอเตอร์โดยการปรับมุมจุดชนวน (α) โดยที่คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในรูปที่ 3.5 ได้แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสและแรงดันไลน์ โดยที่ค่ามุมจุดชนวน (α) จะต้องจำกัดไว้ไม่ให้มุมต่ำกว่า 90° องศา เพราะถ้ามุมจุดชนวนต่ำกว่าค่ามุมดังกล่าว จะทำให้แรงดันดีซีด้านอินเวอร์เตอร์ (V_{inv}) มีค่าเป็นบวกและจะเกิดการลัดวงจรกับขั้วของแรงดันดีซีด้านโรเตอร์ (V_{dc}) ในวงจรเชื่อมโยงดีซี ส่งผลให้อินเวอร์เตอร์เสียหายได้ และเมื่อควบคุมมุมจุดชนวน (α) สูงกว่าค่ามุมดังกล่าวนั้น ทำให้กระแสอินเวอร์เตอร์ล้าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงตามค่ามุมจุดชนวน (α) เช่นกัน โดยกำลังไฟฟ้าสลับจากสมการที่ (3.8) จะถูกถ่ายเททางด้านดีซีไปยังด้านเอซีไลน์ ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี} (P_{inv}) &= \text{กำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงดีซี} (P_{dc}) \\ P_{inv} &= P_{dc} \end{aligned} \quad (3.14)$$

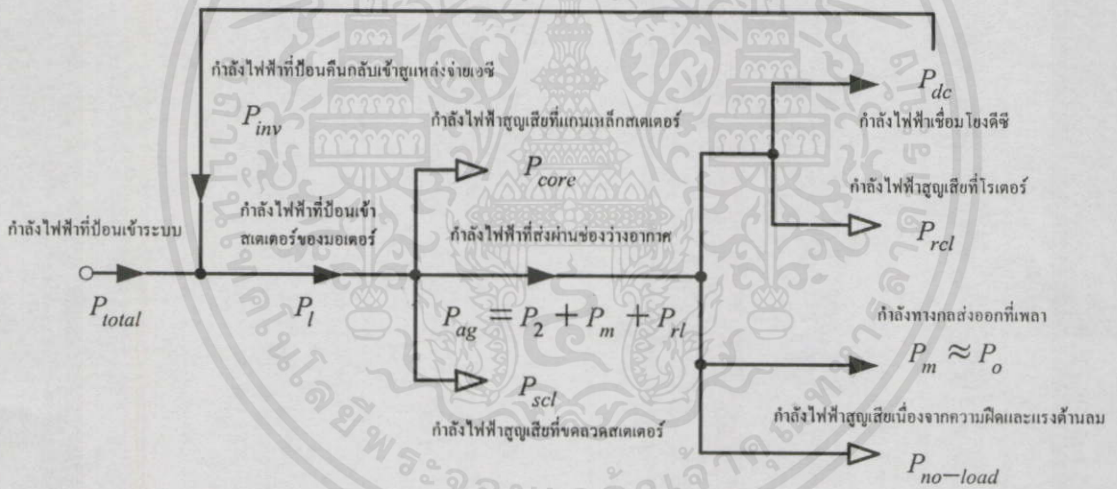
จากรูปที่ 3.5 สามารถหาค่าประกอบมูลฐานของกระแสอินเวอร์เตอร์ ($I_{inv(1)}$) ได้จากขั้นตอนการคำนวณว่าค่าเฉลี่ยค่าทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{inv(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} \quad (3.15)$$

แทนสมการที่ (3.2) กับ สมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้กำลังไฟฟ้าแอกติฟด้านเอซี

$$P_{inv(1)} = \frac{1.35}{a_T} V_s \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} \cos \alpha \quad (3.16)$$

จากสมการที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงบิดโหลดของมอเตอร์มีค่าคงที่ที่จะทำให้กระแสดีซี (I_{dc}) คงที่ด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชัน โครโซไนซ์ของมุมจุกชนวน (α) และอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง (a_T) ที่ต่ออยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายเอซีไลน์ของระบบ ซึ่งจะต้องพิจารณาออกแบบมุมจุกชนวน (α) กับ (a_T) ให้เหมาะสมกับย่านในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยได้อธิบายหลักการดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงทิศทางการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าในระบบเซอร์เบิซ สามารถที่จะเขียนไดอะแกรมการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.6 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกับกำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆของระบบ เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้จากสมการต่อไปนี้ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบทั้งหมด (P_{total}) หาได้จาก

$$P_{total} = P_1 - P_{inv} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ P_{total} เป็น P_1 เอกสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่สเตเตอร์ของมอเตอร์ (P_1) หาได้จาก

$$P_l = P_m + P_{inv} + (P_{scl} + P_{core}) + P_{rcl} \quad (3.18)$$

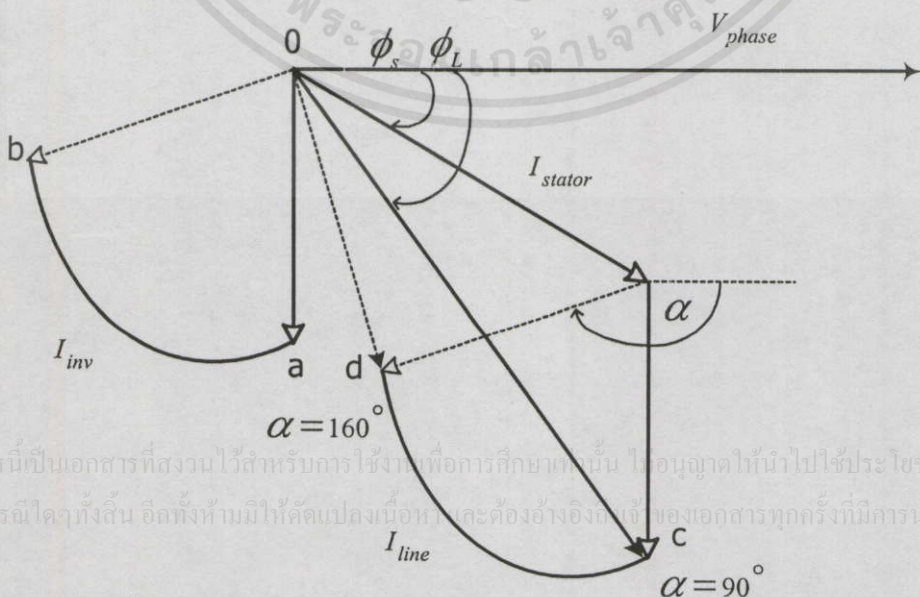
ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ (η) โดยรวมของระบบขับเคลื่อนนี้จะหาได้จาก

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_m}{P_{total}} \\ &= \frac{P_m}{P_l - P_{inv}} > \frac{P_m}{P_l} \end{aligned} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ 3.19 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ (η) ในระบบขับเคลื่อนชนิดนี้จะมีค่าที่สูงกว่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ (P_m / P_l) ของระบบการควบคุมความเร็วรอบโดยการปรับความต้านทานในวงจรโรเตอร์แบบเดิม เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสลิปได้ถูกป้อนคืนกลับสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ ส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบทั้งหมด (P_{total}) ของระบบการขับเคลื่อนนี้ลดลง

3.4 การพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบการควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป

ในข้อนี้ได้กล่าวถึงการพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนแบบเซอร์เบีส โดยพิจารณาจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในส่วนต่างๆซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7 ในเงื่อนไขที่แรงบิดโหลดของมอเตอร์คงที่ โดยที่เฟสเซอร์ของกระแสจะอ้างอิงกับแรงดันเฟส ด้านสเตเตอร์หรือด้านแหล่งจ่ายเอซีไลน์



รูปที่ 3.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบเซอร์เบีส

เมื่อพิจารณาให้มอเตอร์ทำงานที่แรงบิดของมอเตอร์คงที่ ค่ากระแสเดเตอร์ (I_{stator}) จะมีมุมเฟสที่ ล้าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงด้วยมุม (ϕ_s) ซึ่งเป็นมุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ส่วน กระแสด้านอินเวอร์เตอร์ ($I_{inv(1)}$) จะมีมุมเฟสล้าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงด้วยมุมจุดชนวน (α) ตั้ง แต่ $90^\circ - 160^\circ$ ตามเส้นโค้ง ab โดยจะต้องเผื่อค่ามุมไว้ประมาณ 20° เพื่อใช้ในการคอมมิวเตท ของไทรสเตอร์ ซึ่งผลรวมระหว่างเฟสเซอร์กระแสเดเตอร์ (I_{stator}) กับกระแสอินเวอร์เตอร์ ($I_{inv(1)}$) คือกระแสไลน์ (I_{line}) ทั้งหมดของระบบ โดยมีมุมล้าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงด้วยมุม (ϕ_L) โดยเคลื่อนที่ตามเส้นโค้ง cd ซึ่งเป็นมุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นสามารถ หาความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบทั้งหมดกับกระแสในส่วนต่างๆได้จาก

$$\begin{aligned} \bar{I}_{line} &= \bar{I}_{stator} + \bar{I}_{inv(1)} \\ I_{line} \angle -\phi_L &= (I_{stator} \angle -\phi_s) + \left(\frac{\sqrt{6} I_{dc}}{\pi a_T} \angle -\alpha \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

จากสมการกล่าวจะเห็นได้ว่ากระแสไลน์ (I_{line}) ของระบบขับเคลื่อนนี้ ที่แหล่งจ่ายเอชียจ่ายเข้า ระบบทั้งหมดจะมีขนาดที่เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าขนาดของกระแสที่สเตเตอร์ ในขณะที่มุมเฟส (ϕ_L) ก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่ามุมจุดชนวน (α) เพื่อที่จะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไว้ให้ได้ ตามค่าที่ต้องการ ส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนนี้ลดต่ำลง เนื่องจาก แหล่งจ่าย เอชีย ยังคงต้องจ่ายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับตัวมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ ทำให้กำลัง ไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยรวมทั้งหมด (Q_{total}) เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟของระบบทั้ง หมด (P_{total}) ที่จ่ายเข้าระบบขับเคลื่อนนี้ลดลง เนื่องจากได้ป้อนคืนค่ากำลังไฟฟ้าสลับกับเข้าไป ช่วยจ่ายให้กับมอเตอร์ ดังหลักการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา จากหลักการทั้งหมดจะเห็นได้ ว่าระบบขับเคลื่อน โดยควบคุมแบบเซอร์เบียส ยังมีข้อด้อยที่สำคัญในเรื่องของค่าตัวประกอบกำลัง ไฟฟ้าที่มีค่าค่อนข้างต่ำ ถ้าระบบควบคุมได้รับการออกแบบให้ทำงานในย่านความเร็วรอบต่ำลง มากๆ หรือค่าสลิป (s) เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอหลักการคืนพลังงานที่เกิดขึ้นจากสลิปกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายเอชียไลน์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาค์โรเตอร์ ด้วยวิธีการควบคุมแบบเซอร์เบียส ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วย รักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบไม่ให้ต่ำลงตามสลิป (s) ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสลิปดังกล่าวจะ ถูกควบคุมอยู่ในย่านไม่กว้างนักและความเร็วรอบจะต้องต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน แต่ อย่งไรก็ตามระบบควบคุมนี้ยังมีจุดด้อยที่จะต้องทำการแก้ไขคือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจาก

แหล่งจ่ายเอซีไลน์จะมีค่าค่อนข้างต่ำและรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ที่ไหลคืนกลับสู่ระบบมีลักษณะเป็นสตีป ส่งผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์และขนาดของกระแสไลน์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบโดยตรง ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำเสนอแนวทาง การแก้ไขและปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวของระบบเซอร์เบีสแบบเดิม ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ช้อเปอร์ ดังจะได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

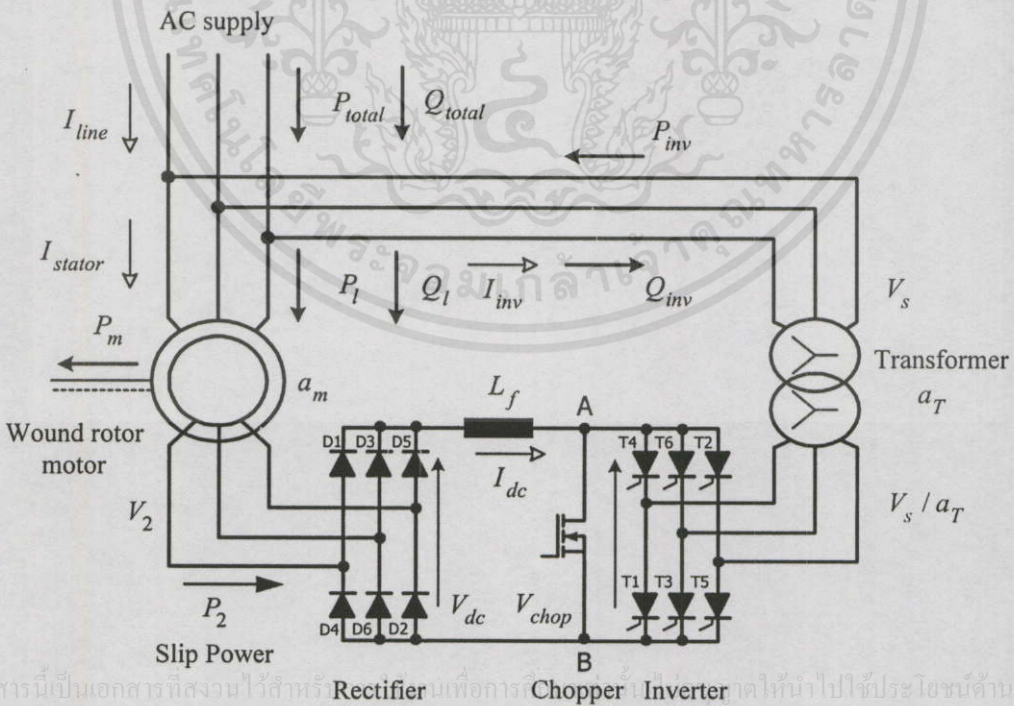
บทที่ 4

การวิเคราะห์ระบบการคืนพลังงานสลลิปโดยการควบคุมแบบใหม่ ด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้อธิบายถึงการออกแบบ สร้างและวิเคราะห์ระบบการคืนพลังงานสลลิป โดยการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ โดยได้ประยุกต์ให้หลักการช้อปเปอร์ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตท เพื่อป้อนคืนพลังงานดังกล่าวกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบควบคุมแบบใหม่ที่นำเสนอและการพิจารณาออกแบบระบบควบคุม การวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะการทำงานด้วยวงจรสมมุติเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง และการพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบที่มีการปรับปรุงให้ดีขึ้น

4.2 ระบบการคืนพลังงานสลลิป โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

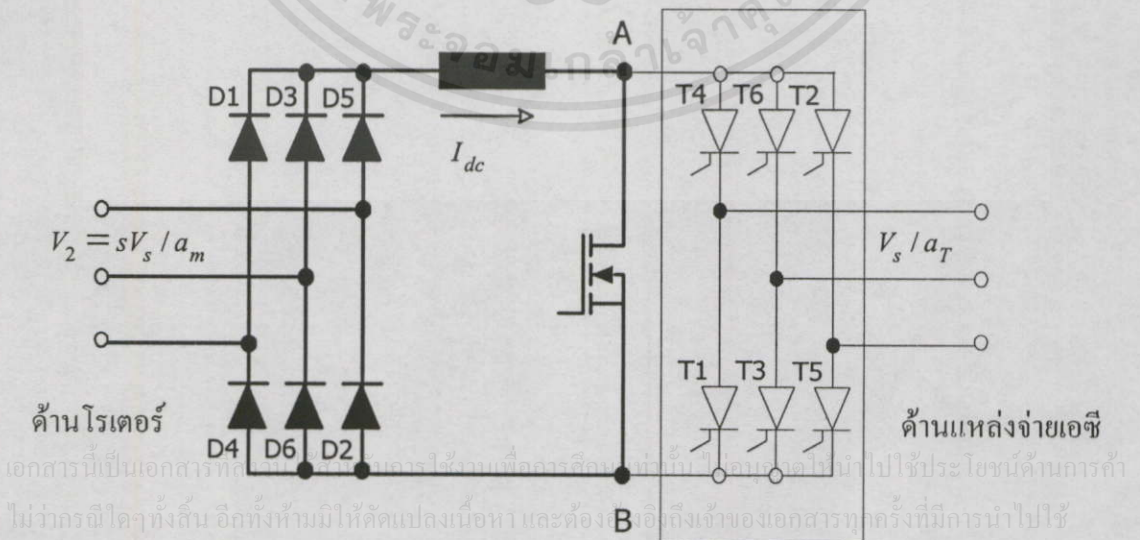


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ Rectifier เพื่อการ Chopper Inverter แต่ให้ผ่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

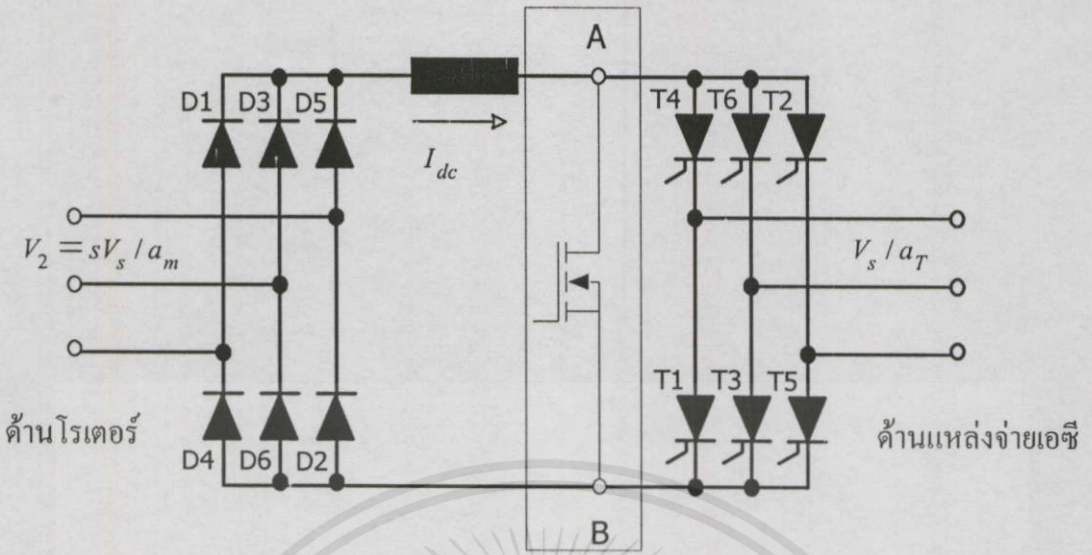
รูปที่ 4.1 แสดงระบบการคืนพลังงานสลลิปโดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

ในรูปที่ 4.1 ได้แสดงระบบการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ในการคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี ซึ่งในระบบควบคุมนี้ค่าความเร็วรอบจะถูกควบคุมต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน โดยภาควงจรกำลังของระบบจะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส 3 เฟสด้วยไดโอดต่อแบบบริดจ์ต่อเข้ากับวงจรด้านโรเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองเพื่อรักษาให้กระแสดีซีเชื่อมโยงที่ได้จากวงจรบริดจ์ไดโอดเรกติไฟเออร์ไหลเรียบและต่อเนื่อง ภาคอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทที่ทำงานในสภาวะอินเวอร์เตอร์ซึ่งต่ออยู่ทางด้านแหล่งจ่ายเอซีไลน์ของระบบโดยผ่านหม้อแปลงแบบลดแรงดัน(step down transformer) ที่ต่อแบบสตาร์/สตาร์ โดยมีมอสเฟทกำลังต่อพร้อมขนานกับชุดคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวเพียงตัวเดียว และทำการควบคุมมอสเฟทกำลังนี้ด้วยวิธีการซ็อบเปอร์ที่ทำงานในโหมด PWM ซึ่งจะทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยการออกแบบควบคุมค่ามุมจุดชนวน(α) ให้คงที่ค่ามุมสูงสุดเท่ากับ 160° ตลอดเวลา วัตถุประสงค์เพื่อผลทางค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ดีและควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีให้มีค่าสูงสุด [4,7] วิธีการป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีของระบบขับเคลื่อนนี้ เริ่มจากค่ากำลังไฟฟ้าสลิปจากวงจรโรเตอร์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงผ่านวงจรเชื่อมโยงดีซีด้วยวงจรเรกติไฟเออร์แล้วส่งผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ผ่านหม้อแปลงกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายเอซี เพื่อช่วยรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้ดีขึ้น

ในรูปที่ 4.1 เมื่อควบคุมมอสเฟทกำลังด้วยวงจรซ็อบเปอร์แบบ PWM ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่ควบคุมมุมจุดชนวน (α) ไว้ให้มีค่าคงที่ ซึ่งสามารถพิจารณาโหมดการทำงานของภาคอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ในสภาวะคงตัวแบ่งออกได้ 2 โหมดดังนี้



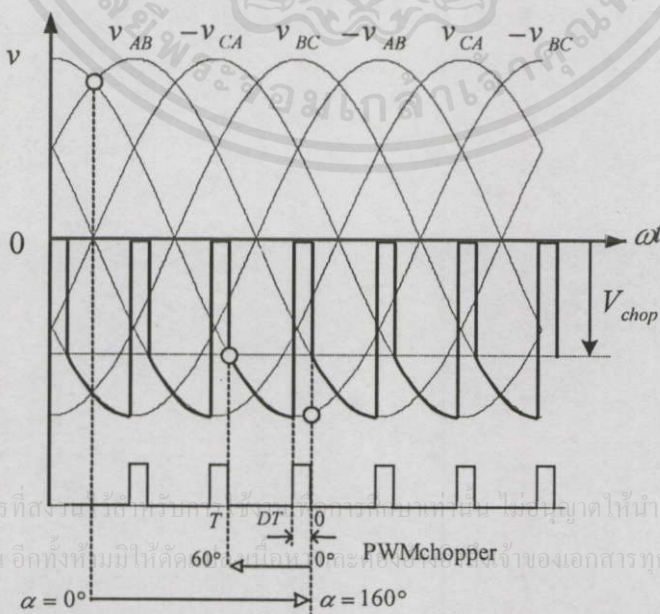
รูปที่ 4.2 แสดงการทำงานในสภาวะคงตัว เมื่อมอสเฟทกำลังต่อวงจร



รูปที่ 4.3 แสดงการทำงานในสภาวะคงตัว เมื่อมอเตอร์กำลังตัดวงจร

โหมด 1 เมื่อสวิตช์มอเตอร์กำลังตัดวงจร (turn on) กระแสดีซี (I_{dc}) จะไหลผ่านมอเตอร์กำลัง ซึ่งในขณะที่สวิตช์ตัดวงจรนี้จะไม่มีการป้อนกำลังไฟฟ้ากลับเข้าสู่ระบบ แสดงในรูปที่ 4.2

โหมด 2 เมื่อสวิตช์มอเตอร์กำลังตัดวงจร (turn off) กระแสดีซี (I_{dc}) จะไหลผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ เพื่อป้องกันกำลังไฟฟ้างอกกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชซี โดยในโหมดที่ 2 นี้เองที่ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะทำงานเหมือนกับระบบเซอร์เบียดแบบเดิม [4,7] ดังแสดงในรูปที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส... ไม่ว่าการมีใจหาทั้งสั้น อีกทั้งห้บมีให้คัด 60% ... PWMchopper ...

รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์กับสัญญาณ PWM ของวงจรช็อปเปอร์

จากหลักการทำงานอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยควบคุมการตัดต่อของสวิตช์มอสเฟทกำลังที่ความถี่ f คงตัวทำให้คาบเวลาในการช็อบเปอร์คงที่เท่ากับ $T=1/f$ ด้วยเช่นกัน โดยที่สัญญาณควบคุมการช็อบเปอร์จะต้องซิงโครไนซ์กับคลื่นของแรงดันดีซี ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยที่สวิตช์มอสเฟทกำลังจะต่อวงจร (turn on) ในช่วงเวลา $0 \leq t \leq DT$ และสวิตช์จะตัดวงจร (turn off) ที่ช่วงเวลา $DT \leq t \leq T$ โดยที่คาบเวลาจะมีค่าเท่ากับ $0^\circ \leq T \leq 60^\circ$ หรือดีวีดีไซเกิล (D) อยู่ระหว่าง $0\% \leq D \leq 100\%$ ที่ซิงโครไนซ์กับคลื่นของแรงดันดีซีที่ได้จากวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดไลน์คอมมิวเตท และสามารถคำนวณหาค่าแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ (V_{chop}) ซึ่งเป็นแรงดันดีซีที่ตกคร่อมมอสเฟทกำลังที่จุด AB ในรูปที่ 4.1 ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{chop} &= \frac{1}{T} \int_{DT}^T V_{inv} dt \\ &= \frac{V_{inv}}{T} t \Big|_{DT}^T \\ V_{chop} &= (1-D)V_{inv} \end{aligned} \quad (4.1)$$

แทนค่า V_{inv} จากสมการ (3.2) ในบทที่ 3 ลงสมการ (4.1)

$$V_{chop} = \frac{1.35}{a_T} (1-D)V_s \cos \alpha \quad (4.2)$$

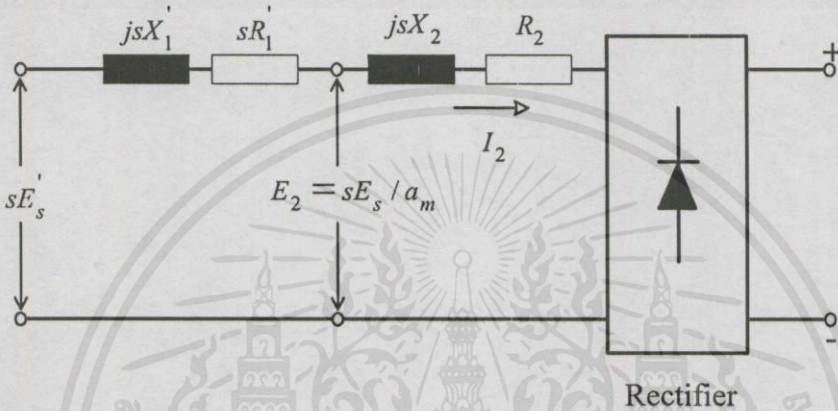
จากสมการ (4.2) จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้มุมจุดชนวน (α) มีค่าคงที่สูงสุดเท่ากับ 160° ตลอดเวลา ดังนั้นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ซึ่งทำหน้าที่ไปควบคุมแรงดันต้านกลับในวงจรโรเตอร์ จะขึ้นอยู่กับ การควบคุมการปรับดีวีดีไซเกิล (D) ตั้งแต่ $0\% \leq D \leq 100\%$ ในโหมด PWM ของวงจรช็อบเปอร์ โดยค่าแรงดันดีซีนี้จะนำไปพิจารณาหาความสัมพันธ์ในการควบคุมค่าสลิป และควบคุมการป้อนคืนพลังงานกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.3 การวิเคราะห์ระบบควบคุม ด้วยวงจรสมมูลย์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงการวิเคราะห์ระบบควบคุม ของระบบขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดีซีเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงกับค่าสลิป และการวิเคราะห์คุณลักษณะของแรงบิดกับความถี่ของระบบควบคุมดังกล่าวด้วยวงจรสมมูลย์ไฟฟ้ากระแสตรง

4.3.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและค่าสลิป

ในรูปที่ 4.5 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์โดยโอนย้ายค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆ จากด้านสเตเตอร์มาไว้ทางด้านโรเตอร์ และทำการโอนย้ายพารามิเตอร์ต่างๆดังกล่าวนี้จากด้านโรเตอร์เพื่อไปไว้ทางด้านคิซีของวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสโดยผ่านวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์[4,5,6] วัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ที่ส่งออกมาจากด้านวงจรโรเตอร์



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรสมมูลต่อเฟสที่โอนย้ายมาด้านคิซีโดยผ่านวงจรโรเตอร์

ถ้าออกแบบให้ตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าเป็นตัวกรองของระบบขับเคลื่อนในงานวิจัยครั้งนี้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่ทำให้กระแสคิซี (I_{dc}) ไหลต่อเนื่อง ดังนั้นจะหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสด้านคิซีกับกระแสโรเตอร์ (I_2) ได้จาก

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi/3} I_{dc}^2 d\omega t} \\
 &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในตัวมอเตอร์ที่โอนย้ายมายังด้านโรเตอร์ ในรูปที่ 4.5 และทำการโอนย้ายกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียดังกล่าวไปไว้ทางด้านวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ (P_{R12})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{R12} = 3I_2^2 (sR'_1 + R_2) \tag{4.4}$$

เมื่อทำการโอนย้ายค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปไว้ทางด้านวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง โดยแทนค่ากระแสโรเตอร์ (I_2) ด้วยกระแสดีซี (I_{dc}) ในสมการ (4.3) ลงสมการ (4.4) จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากขดลวดของมอเตอร์ทั้งส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ ไปไว้ด้านดีซี ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{R12} &= 3 \left(\sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc} \right)^2 (sR_1' + R_2) \\ &= 2 (sR_1' + R_2) I_{dc}^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

เมื่อ $2(sR_1' + R_2)$ คือ ความต้านทานสมมูลย์ของขดลวดมอเตอร์ทั้งส่วนสเตเตอร์และส่วนโรเตอร์ ที่ได้โอนย้ายไปทางด้านดีซีเชื่อมโยง

พิจารณาผลของคาร์รีแอนด์แดนซ์ของตัวมอเตอร์จากวงจรสมมูลย์ต่อเฟสในรูปที่ 4.5 โดยจะมีผลทำให้ค่าแรงดันดีซีโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) ลดลง เนื่องจากคาร์รีแอนด์แดนซ์ของมอเตอร์นี้จะทำให้เกิดการโอเวอร์แล็ปในระหว่างการคอมมิวเตทของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ [4,5,6] หาได้จากสมการ

$$V_{drop} = \frac{3s(X_1' + X_2)}{\pi} I_{dc} \quad (4.6)$$

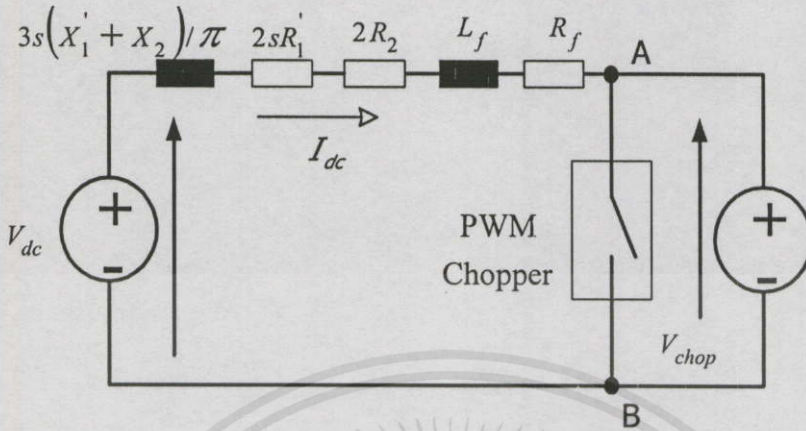
และทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าไปสูญเสียเนื่องสาเหตุโอเวอร์แล็ปนี้โดยหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_{drop} &= V_{drop} I_{dc} \\ &= \left[\frac{3s(X_1' + X_2)}{\pi} I_{dc} \right] I_{dc} \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ $\frac{3s(X_1' + X_2)}{\pi}$ คือ ความต้านทานสมมูลย์ที่เกิดจากการโอเวอร์แล็ปในระหว่างการคอมมิวเตทของวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ ที่โอนย้ายไปทางด้านดีซี

ดังนั้นระบบการคืนพลังงานสลิปโดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ในส่วนต่างๆของมอเตอร์ที่ได้โอนย้ายมาทางด้านดีซี ดังรูปที่ 4.5 สามารถนำไปวิเคราะห์โดยเขียนเป็นวงจรสมมูลย์เชื่อมโยงดีซีได้ดังรูปที่ 4.6 เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความ

สัมพันธ์ระหว่างแรงดันดีซีโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) และแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ (V_{chop}) กับค่าสลิป (s)



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรสมมูลย์เชื่อมโยงดีซีของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

พิจารณาในกรณีที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด จะทำให้กระแสโรเตอร์ (I_2) และกระแสดีซี (I_{dc}) ในวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 4.6 มีค่าน้อยมากโดยเกือบจะมีค่าเป็นศูนย์และไม่คิดค่าแรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ (R_f) เนื่องจากจะมีค่าน้อยมากเช่นเดียวกัน สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสลิป (s) ในขณะที่ยังทำงานไร้โหลด ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{dc} + V_{chop} &= 0 \\ V_{dc} &= -|V_{chop}| \end{aligned} \quad (4.8)$$

เมื่อแทนค่า V_{dc} จากสมการ (3.1) และ V_{chop} จากสมการ (4.2) ลงในสมการ (4.8) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1.35}{a_m} s V_s + \frac{1.35}{a_T} (1-D) V_s \cos \alpha &= 0 \\ s &= -\frac{a_m}{a_T} (1-D) \cos \alpha \end{aligned} \quad (4.9)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการควบคุมค่าสลิป (s) หรือความเร็วรอบของมอเตอร์ ทำได้โดยการปรับดิฟฟ์ไซเกิล (D) ของวงจรช้อปเปอร์ในโหมด PWM ทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไดรฟ์คอมมิวเตท โดยควบคุมมุมจุดชนวน (α) ให้คงที่ไว้ตลอดเวลา ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้ได้ออกแบบควบคุมค่าสลิป (s) ไว้ในย่าน 0.2–0.7 หรือควบคุมความเร็วรอบที่ทำงานได้ตั้งแต่ 450–1200rpm โดยกำหนดให้มุมจุดชนวน (α) มีค่าสูงสุดไว้ที่มุม 160°

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส

จากวงจรสมมูลย์เชื่อมโยดจ์ซีในรูปแบบที่ 4.6 สามารถคำนวณหาค่ากระแสดีซี (I_{dc}) ได้จากค่าความแตกต่างของแรงดันดีซีโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) กับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ (V_{chop}) หารด้วยค่าความต้านทานทั้งหมดในวงจรสมมูลย์เชื่อมโยดจ์ซี (R_m) โดยหาได้จากสมการ

$$R_m = \left(2R_1' + \frac{3}{\pi} (X_1' + X_2') \right) s + 2R_2 + R_f \quad (4.10)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc} - V_{chop}}{R_m} = \frac{\left(\frac{1.35}{a_m} s V_s - \frac{1.35}{a_T} (1-D) V_s |\cos \alpha| \right)}{R_m} \quad (4.11)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าในวงจรโรเตอร์ในส่วนต่างๆ ที่ส่งผ่านวงจรเชื่อมโยดจ์ซีกับค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T) โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าสลิป (P_2) ในเทอมของวงจรสมมูลย์เชื่อมโยดจ์ซีไฟตรง หาค่าได้จากสมการ

$$P_2 = \left[V_{dc} - \left(\frac{3s}{\pi} (X_1' + X_2') \right) I_{dc} \right] I_{dc} - (2sR_1' + 2R_2 + R_f) I_{dc}^2 \quad (4.12)$$

จากสมการ 4.12 สามารถแทนค่าในเทอมของกำลังไฟฟ้าอินพุตโรเตอร์ (P_{ag}) ซึ่งเป็นค่าซิงโครนัสวัตต์ (Synchronous watt) [4,5] ได้จากสมการ

$$P_{ag} = \frac{P_2}{s} = \left[\frac{V_{dc}}{s} - \frac{3}{\pi} (X_1' + X_2') I_{dc} \right] I_{dc} - 2R_1' I_{dc}^2 - \left(\frac{2R_2 + R_f}{s} \right) I_{dc}^2 \quad (4.13)$$

แรงบิดของมอเตอร์ (T) หาได้จาก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{P_{ag}}{\omega_s}$$

$$= \frac{\left[\frac{V_{dc}}{s} - \frac{3}{\pi} (X_1' + X_2') I_{dc} \right] I_{dc} - 2R_1' I_{dc}^2 - \left(\frac{2R_2 + R_f}{s} \right) I_{dc}^2}{\omega_s} \quad (4.14)$$

เพื่อแทนค่า V_{dc} จากสมการ(3.1) และ I_{dc} จากสมการ (4.11) ลงในเทอมของแรงบิดมอเตอร์ในสมการที่ (4.14) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมด้วยระบบที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถที่จะควบคุมได้จากการปรับคิวดั้ไซเกิล (D) ของวงจรถ้อปเปอร์และมุมจุดชนวน (α) ของชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท โดยที่ค่าแรงบิด (T) ดังกล่าวจะแปรผันโดยตรงกับกระแสดีซี (I_{dc}) ในวงจรถ้อปเปอร์ที่สภาวะแรงบิดค่าต่างๆ

4.3.3 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ในระบบขับเคลื่อนที่ได้นำเสนองานวิจัยนี้สามารถพิจารณาหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้จาก โคอะแกรมการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลับกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี ตามรูปที่ 3.6 โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนกลับคืนสู่แหล่งจ่ายเอซี (P_{inv}) ด้วยระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าดีซี (P_{dc}) ในวงจรถ้อปเปอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_{inv} &= P_{dc} \\ &= V_{chop} I_{dc} \end{aligned} \quad (4.15)$$

เมื่อแทนค่า V_{chop} และ I_{dc} จากสมการ (4.2) และ (4.11) ลงในสมการ (4.15) ซึ่งจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนดังกล่าวของระบบขับเคลื่อนในงานวิจัยนี้

$$P_{inv} = \left(\frac{1.35}{a_T} (1-D) V_s \cos \alpha \right) \left[\frac{\left(\frac{1.35}{a_m} s V_s - \frac{1.35}{a_T} (1-D) V_s |\cos \alpha| \right)}{R_m} \right] \quad (4.16)$$

จากสมการดังกล่าว เมื่อแรงบิดโหลดของมอเตอร์คงที่จะทำให้กระแสดีซี (I_{dc}) คงที่ด้วยเช่นกัน ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนกลับคืนสู่แหล่งจ่ายเอซี (P_{inv}) จะขึ้นอยู่กับคิวดั้ไซเกิล (D) ของวงจรถ้อปเปอร์ และค่ามุมจุดชนวน (α) ในฟังก์ชันของโครไซน์ โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบค่ามุมดังกล่าวไว้ที่มุม 160° ตลอดเวลา เพื่อให้ปริมาณการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าได้จำนวนมาก ซึ่งจะส่ง

ผลทำให้แหล่งจ่ายเอชียจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนนี้ลดลง ในขณะที่กำลังไฟฟ้าอินพุทที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ (P_l) ของมอเตอร์ยังคงมีปริมาณเท่าเดิม เนื่องจากมอเตอร์ยังคงขับเคลื่อนค่าแรงบิดโหลดในปริมาณเท่าเดิม จากวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบทั้งหมด (P_{total}) จากแหล่งจ่ายเอชียไลน์ของการไฟฟ้า มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ของมอเตอร์ ที่เป็นเช่นนี้ได้ก็เพราะระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ได้ป้อนคืนกำลังไฟฟ้าสลิป (sP_{ag}) จากส่วนโรเตอร์ของมอเตอร์เข้าไปช่วยจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์นั่นเอง โดยหาค่าได้จากสมการ

$$P_{total} = P_l - P_{inv} \quad (4.17)$$

เมื่อไม่คิดค่าการสูญเสียทางกลและค่าการสูญเสียในแกนเหล็กของตัวมอเตอร์ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังทางกล (P_m) ของมอเตอร์ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ (η) โดยรวม จะหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_m}{P_{total}} \\ &= \frac{P_m}{P_l - P_{inv}} > \frac{P_m}{P_l} \end{aligned} \quad (4.18)$$

เมื่อค่ากำลังทางกล (P_m) ที่ปลายเพลลาของมอเตอร์ หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} P_m &= T\omega_r \\ &= T \frac{2\pi}{60} n_r \end{aligned} \quad (4.19)$$

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ในงานวิจัยครั้งนี้ สามารถที่จะป้อนคืนพลังงานสลิปกับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชียไลน์ เพื่อช่วยรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบไม่ให้ต่ำลงตามค่าสลิป (s) ที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ ($\eta = P_m / P_l$) ที่ควบคุมการปรับความเร็วรอบโดยวิธีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในวงจรโรเตอร์แบบเดิม และการป้อนคืนพลังงานดังกล่าวในระบบใหม่นี้จะเปลี่ยนจากการควบคุมมุมจุดชนวน (α) ตั้งแต่ $90^\circ - 160^\circ$ ในระบบเซอร์เบีสแบบเดิม มาเป็นการควบคุมควิตีไซท์เกิด

(D) ตั้งแต่ 0–100% ของวงจรช้อปเปอร์ที่ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทของระบบเดิม โดยปรับมุมให้คงที่ ค่าสูงสุดเท่ากับ 160° ตลอดเวลา

4.4 การออกแบบระบบควบคุม

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบภาควงจรกำลังและภาควงจรควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่สร้างขึ้น โดยในการวิจัยครั้งนี้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบวาวด์โรเตอร์ขนาด 1kW แรงดัน 220/380V กระแส 5/2.7 A ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ 0.7 ความเร็วรอบ 1420 rpm แรงดันที่โรเตอร์ระหว่างขั้วขนะโรเตอร์หยุดนิ่ง (V_{02})

$$127 \text{ V} \text{ กระแสโรเตอร์ } (I_2) 4.9\text{A} \text{ และอัตราส่วนแรงดันมอเตอร์เท่ากับ } a_m = \frac{V_s}{V_{02}} = \frac{380}{127} \approx 3$$

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบควบคุมย่านสลิป (s) สูงสุดที่ 0.7 และต่ำสุดอยู่ที่ 0.2 ความเร็วรอบมอเตอร์ปรับได้ตั้งแต่ 450–1200rpm โดยกำหนดให้มอเตอร์ทำงานตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนถึงค่าพิกัดโหลด การพิจารณาออกแบบหาขนาดอุปกรณ์กำลังแบ่งออก 2 ส่วนคือ

1. ภาควงจรบริดจ์ไดโอดเรกติไฟเออร์ โดยพิจารณาได้จากพิกัดกระแสในวงจรโรเตอร์สูงสุด เมื่อระบบขับเคลื่อนนี้ทำงานที่ค่าพิกัดโหลด ถ้าแรงบิดโหลดคงที่จะทำให้กระแสโรเตอร์ (I_2) และกำลังไฟฟ้าอินพุทในวงจรโรเตอร์ (P_{ag}) จะมีค่าคงที่เช่นกัน ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสลิป ($P_2 = sP_{ag}$) ที่ส่งออกจากวงจรโรเตอร์ผ่านวงจรบริดจ์ไดโอดเรกติไฟเออร์ จะถูกกำหนดให้มีค่าสูงสุดด้วยค่าสลิป (s_{\max}) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบควบคุมไว้ที่ $s_{\max} = 0.7$ ส่งผลทำให้แรงดันดีซีโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_{dc}) มีค่าสูงสุดเช่นเดียวกัน จากการทำงานดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบหาพิกัดของวงจรบริดจ์ไดโอดเรกติไฟเออร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ดังนี้ กำหนดให้ค่าสลิปสูงสุด (s_{\max}) = 0.7 แรงดันดีซีโรเตอร์เรกติไฟเออร์สูงสุด ($V_{dc(\max)}$) หาได้จาก

$$V_{dc(\max)} = \frac{1.35}{a_m} s_{\max} V_s \quad (4.20)$$

เมื่อมอเตอร์รับภาระโหลดสูงสุดที่ 100% ของค่าพิกัดโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าสลิป ($P_2 = sP_{ag}$) ในวงจรโรเตอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงดีซี (P_{dc}) ที่ผ่านวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์

$$\begin{aligned} \text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ } P_{dc} = P_2 \text{ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า} \\ \text{ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง } V_{dc(\max)} I_{dc} = \sqrt{3} V_{2(\max)} I_{2(\text{rated})} \text{ ก็ยังหมายถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้} \\ = \sqrt{3} s_{\max} V_{02} I_{2(\text{rated})} \quad (4.21) \end{aligned}$$

เมื่อ V_{02} คือแรงดันที่โรเตอร์ระหว่างช่วงขณะโรเตอร์หยุดนิ่งและจากสมการดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่าพิกัดกระแสดีซี (I_{dc}) ได้จากสมการ

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3} s_{\max} V_{02} I_2(\text{rated})}{V_{dc(\max)}} \quad (4.22)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (4.20) และค่าพารามิเตอร์แรงดันและกระแสของตัวมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบลงในสมการที่ (4.22) สามารถคำนวณหากระแสดีซี (I_{dc}) เพื่อนำไปออกแบบหาค่ากระแสใช้งานของไดโอดเรกติไฟเออร์ (I_{Frms}) ได้จากสมการ

$$I_{Frms} > \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.23)$$

การพิจารณาออกแบบหาค่าแรงดันไดโอดเรกติไฟเออร์ (V_{RRM}) หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} V_{RRM} &> 1.1 K s_{\max} V_{02} \\ &> 1.1 k s_{\max} \sqrt{2} V_{02} \end{aligned} \quad (4.24)$$

เมื่อ K คือ ค่าตัวประกอบความปลอดภัย (Safety factor) มีค่าระหว่าง 1.5.....2.5

1.1 คือ ค่าเพื่อความปลอดภัยของแรงดัน (Tolerances) โดยคิดที่ 10 % ของค่า V_{RRM}

2. ภาควงจรอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ซึ่งในระบบควบคุมที่ได้นำเสนอนี้ ได้ออกแบบควบคุมการทำงานร่วมกันระหว่างชุดคอนเวอร์เตอร์ชนิดไลน์คอมมิวเตท โดยปรับมุมจุดชนวน (α) สูงสุดที่มุม 160° ไว้ตลอดเวลา กับวงจรถ้อปเปอร์ด้วยสวิตช์มอสเฟทกำลังทำงานในโหมด PWM โดยควบคุมการปรับดิ้วดีไซเกิล (D) ตั้งแต่ 0–100% ในการออกแบบพิกัดกำลังภาควงจรอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์จะต้องพิจารณาถึงย่านสลิป (s) สูงสุดและต่ำที่สุดที่ระบบนี้สามารถขับเคลื่อนควบคุมการปรับความเร็วรอบได้ เพื่อนำไปออกแบบเลือกอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง (a_T) ให้เหมาะสมกับย่านความเร็วรอบที่สามารถควบคุมได้ โดยพิจารณาได้จากสมการ (4.8)

กำหนดให้ค่าสลิปสูงสุด (s_{\max}) = 0.7 และ ค่าสลิปต่ำสุด (s_{\min}) = 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ = $-|V_{chop}|$ จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} &= -\frac{1.35}{a_T} V_s (1-D) \cos \alpha \end{aligned} \quad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.25) สามารถหาอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง (a_T) ได้จากการกำหนดให้ตัวดีไซเกิล (D) ของวงจรช็อบเปอร์มีค่าต่ำที่สุดคือเป็นศูนย์ และมุมจุกชนวน (α) ในฟังก์ชันของโคไซน์สูง 160° ดังนั้น (a_T) จะหาได้จากสมการ

$$a_T = \frac{-1.35V_s(1-D)\cos 160^\circ}{V_{dc(\max)}} \quad (4.26)$$

พิจารณาหาขนาดพิกัดของหม้อแปลง (P_{TR}) ได้จากสมการ (4.21) และ (4.22)

$$P_{TR} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc} \sqrt{3} \frac{V_s}{a_T} \quad (4.27)$$

แทนค่า a_T จากสมการ (4.26) ลง สมการ (4.27) จะได้ขนาดพิกัดของหม้อแปลง (P_{TR}) ดังนี้

$$P_{TR} = 1.05 \frac{V_{dc(\max)} I_d}{(1-D)\cos 160^\circ} \quad (4.28)$$

ขนาดพิกัดของเอสซีอาร์ ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทสามารถหาได้โดยอาศัยหลักการเดียวกันกับภาควงจรบริดจ์ไดโอดเรกติไฟเออร์ โดยมีสมการดังต่อไปนี้ ค่ากระแสใช้งานของเอสซีอาร์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ (I_{Trms}) ได้จากสมการ

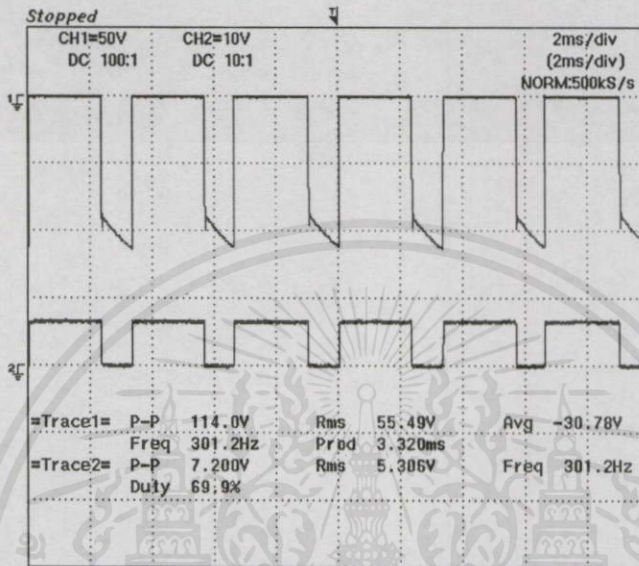
$$I_{Trms} > \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (4.29)$$

ค่าแรงดันเอสซีอาร์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ (V_{RRM}) หาได้จากสมการ

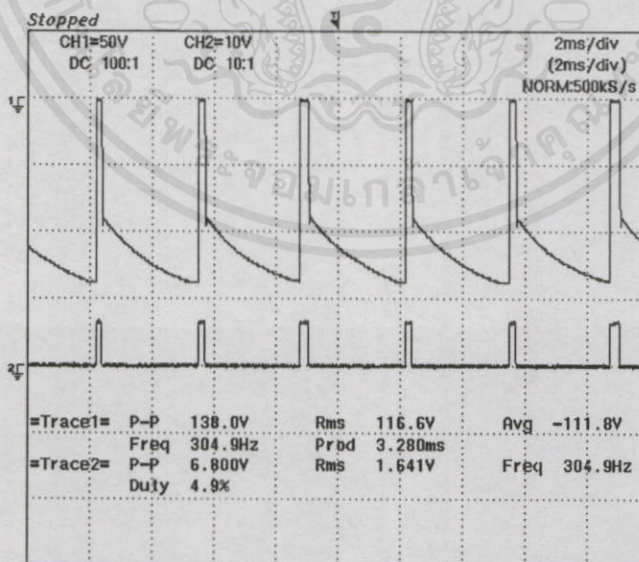
$$V_{RRM} > 1.1K \sqrt{2} \frac{V_s}{a_T} \quad (4.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในรูปที่ 4.7 ได้แสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์กับสัญญาณควบคุม PWM ของวงจรช็อบเปอร์ที่สร้างขึ้นที่ใช้สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งทำการวัดในขณะที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลด ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1200rpm) ปรับดีไซเกิลควบคุมที่

$D = 69.9\%$ และค่าสลิป $s = 0.7$ (450 rpm) ปรับความเร็วให้เกิดควบคุมที่ $D = 4.9\%$ โดยปรับมุมจุดชนวน (α) ของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตทในตำแหน่งคงที่ ที่ค่ามุม 160° ตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก) และ 4.7(ข) ตามลำดับ และได้แสดงไดอะแกรมพร้อมหลักการการทำงานของวงจรภาคควบคุมอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ที่สร้างขึ้นไว้ในภาคผนวก ข.



(ก) ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200 rpm) ควบคุมความเร็วให้เกิด $D = 69.9\%$



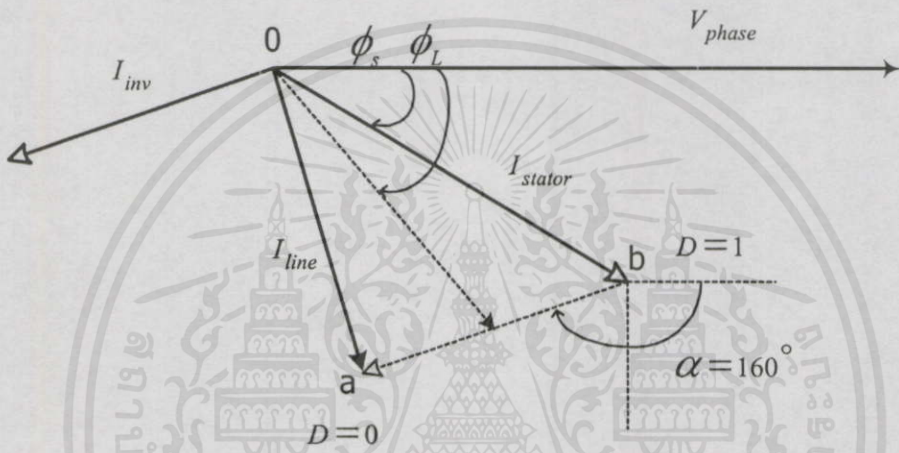
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ค่าสลิป $s = 0.7$ (450 rpm) ควบคุมความเร็วให้เกิด $D = 4.9\%$

รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์กับสัญญาณ PWM ของวงจรซ็อบเปอร์

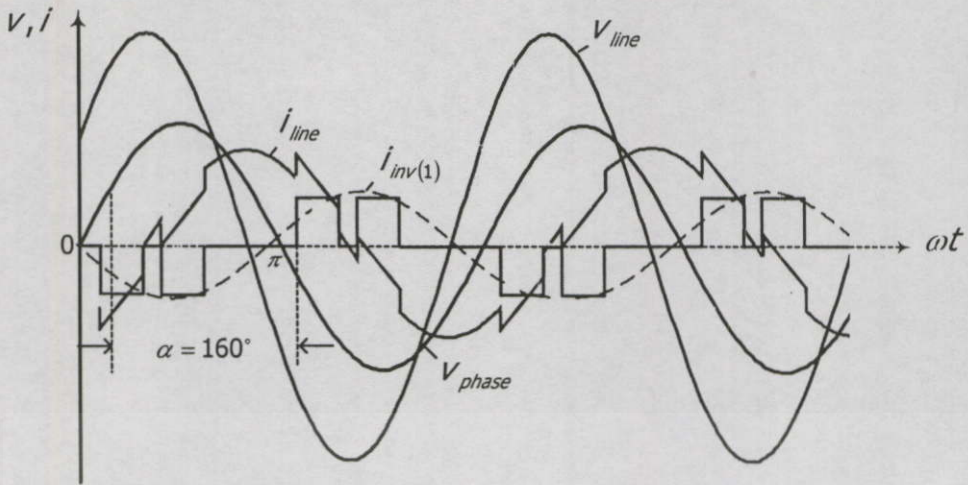
4.5 การพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบที่มีการปรับปรุงให้ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสด้านเอซีไลน์หรือด้านสเตเตอร์กับกระแสที่ไหลในส่วนของระบบขับเคลื่อนนี้ ด้วยเฟสเซอร์โคออร์เดเนตของกระแสที่ความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งระบบขับเคลื่อนนี้ได้ประยุกต์ใช้วงจรช้อปเปอร์ด้วยสวิตช์มอสเฟตกำลังควบคุมการปรับดิ้วไซเกิล (D) ในโหมด PWM ทำงานร่วมกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไลน์คอมมิวเตท ที่ได้ออกแบบควบคุมมุมจุดชนวน (α) ปรับให้คงที่ตำแหน่งมุมสูงสุดเท่ากับ 160° ตลอดเวลา



รูปที่ 4.8 แสดงเฟสเซอร์โคออร์เดเนตของกระแส ในระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

จากรูปเฟสเซอร์โคออร์เดเนตของกระแสดังกล่าวได้พิจารณาในเงื่อนไขที่แรงบิดของโหลดมอเตอร์คงที่และไม่คิดค่าการสูญเสียจากแกนเหล็กของตัวมอเตอร์ จะทำให้ขนาดและมุมเฟส ϕ_s ของกระแสสเตเตอร์ (I_{stator}) ที่ล่าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงมีค่าคงที่เนื่องจากโหลดของมอเตอร์คงที่ ส่วนขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์ (I_{inv}) จะเปลี่ยนแปลงอยู่บนเส้นตรง ab ซึ่งขนาดกระแสนี้จะขึ้นอยู่กับค่าควบคุมดิ้วไซเกิล (D) ของวงจรช้อปเปอร์ในการที่จะปรับความเร็วรอบให้ทำงานที่สลลิป (s) ค่าต่างๆ และมุมเฟสของกระแสอินเวอร์เตอร์จะล่าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงด้วยมุมจุดชนวน (α) เท่ากับ 160° ตลอดเวลา ผลรวมระหว่างเฟสเซอร์กระแสอินเวอร์เตอร์ (I_{inv}) กับกระแสสเตเตอร์ (I_{stator}) ก็คือกระแสไลน์ (I_{line}) ที่ด้านแหล่งจ่ายเอซีจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนนี้ โดยวิธีควบคุมดังกล่าวจะทำให้ขนาดและมุมเฟสของกระแสไลน์ (I_{line}) ลดลงและมุมเฟส (ϕ_L) ของกระแสไลน์ที่ล่าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงก็จะเปลี่ยนแปลงเคลื่อนที่อยู่บนเส้นตรง เช่นกัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเฟสเซอร์โคออร์เดเนตของระบบเซอร์เบียสแบบเดิม ในรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงค่ามุมเฟส (ϕ_L) ที่เป็นมุมของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบที่ได้รับการแก้ไขให้มีค่าที่ดีขึ้น [4,7]



รูปที่ 4.9 แสดงคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ด้านเอซีไลน์เทียบกับแรงดันต่อเฟส

เมื่อพิจารณาจากรูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมกระแสของระบบที่ได้นำเสนอนี้สามารถนำมาเขียนเป็นรูปคลื่นกระแสได้ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งกระแสทั้ง 3 ที่ได้แสดงอ้างอิงกับแรงดันเฟสของแหล่งจ่ายเอซี ถ้ากระแสดีซี (I_{dc}) ไหลอย่างต่อเนื่องหรือไม่มีรีปเปิลเกิดขึ้นในวงจรเชื่อมโยงดีซี เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ (L_f) มีขนาดใหญ่เพียงพอ จะทำให้คลื่นของกระแสอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นสตีปและล่าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงด้วยมุมจุดชนวน (α) คงที่ ที่ตำแหน่ง 160° อยู่ตลอดเวลาและขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะสตีปนี้จะถูกแก้ไขให้มีลักษณะเป็นพัลส์วีดร์มอดูเลตชันที่มีขนาดเท่ากับ $(1-D)I_{dc}/a_T$ ด้วยระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ที่สร้างขึ้น ในขณะที่คลื่นกระแสสเตเตอร์ยังคงมีลักษณะที่เป็นคลื่นไซน์ และผลรวมของคลื่นกระแสทั้ง 2 คือ คลื่นกระแสไลน์ของระบบที่มีขนาดที่ลดลงตามขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์เช่นเดียวกัน เมื่อกระแสอินเวอร์เตอร์ที่มีความถี่มูลฐาน ($I_{inv(1)}$) หาได้จากสมการ

$$\bar{I}_{inv(1)} = (1-D) \frac{\sqrt{6} I_{dc}}{\pi a_T} \angle -\alpha \quad (4.31)$$

กระแสสเตเตอร์ (I_{stator}) หาได้จากสมการ

$$\bar{I}_{stator} = I_{stator} \angle -\phi_s \quad (4.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ดังนั้นกระแสไลน์ (I_{line}) หาได้จากสมการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{I}_{line} = \bar{I}_{stator} + \bar{I}_{inv(1)}$$

$$I_{line} \angle -\phi_L = (I_s \angle -\phi_s) + \left((1-D) \frac{\sqrt{6} I_{dc}}{\pi a_T} \angle -\alpha \right) \quad (4.33)$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดของกระแสไลน์ (I_{line}) ที่ระบบจะมีค่าที่ลดลง และในระบบควบคุมที่นำเสนอนี้จะช่วยลดค่ากำลังไฟฟารีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์ด้วยการปรับมุมจุดชนวน (α) ในตำแหน่งมุมที่สูงสุดดังที่ออกแบบไว้ในงานวิจัยนี้ ส่งผลทำให้กำลังไฟฟารีแอคทีฟที่ระบบจ่ายให้กับมอเตอร์และชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตท ที่ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์มีลดลง จากหลักการดังกล่าวสามารถพิจารณาหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนนี้ได้จาก

$$\begin{aligned} \cos \phi_L &= \frac{P_{total}}{\sqrt{(P_{total})^2 + (Q_{total})^2}} \\ &= \frac{P_l - P_{inv(1)}}{\sqrt{(P_l - P_{inv(1)})^2 + (Q_l + Q_{inv(1)})^2}} \end{aligned} \quad (4.34)$$

โดยค่ากำลังไฟฟารีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน ($Q_{inv(1)}$) และค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟที่ความถี่มูลฐาน ($P_{inv(1)}$) ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าดีซีเชื่อมโยง (P_{dc}) ในสมการที่ (4.15) หาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{inv(1)} &= 3 \frac{E_s \sqrt{6}}{a_T \pi} (1-D) I_{dc} \cos \alpha \\ &= 2.34 \frac{E_s}{a_T} (1-D) I_{dc} \cos \alpha \quad (\text{ด้านเอซีไลน์}) \end{aligned} \quad (4.35)$$

เมื่อ E_s คือ แรงดันไฟฟ้าต่อเฟสด้านแหล่งจ่ายเอซีหรือด้านสเตเตอร์ กำลังไฟฟารีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน ($Q_{inv(1)}$)

$$\begin{aligned} Q_{inv(1)} &= 3 \frac{E_s \sqrt{6}}{a_T \pi} (1-D) I_{dc} \sin \alpha \\ &= 2.34 \frac{E_s}{a_T} (1-D) I_{dc} \sin \alpha \end{aligned} \quad (4.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ประโยชน์ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอหลักการวิเคราะห์ระบบการคืนพลังงานสลิปโดยการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิดไดน์คอมมิวเตททำงานร่วมกับวงจรช้อปเปอร์ในโหมด PWM และได้แสดงผลการทดสอบในการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งภาคกำลังและภาควงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ขนาด 1kW โดยทดสอบการทำงานในสภาวะไร้อโหลด ตั้งแต่ย่านสลิป (s) 0.2 – 0.7 หรือความเร็วรอบที่ 1,200 – 450 rpm เพื่อยืนยันหลักการดังกล่าวที่ได้นำเสนอในงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง โดยจะนำระบบที่ออกแบบ สร้างดังกล่าวไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับระบบเซอร์เบีสแบบเดิมในบทที่ 5 ต่อไป



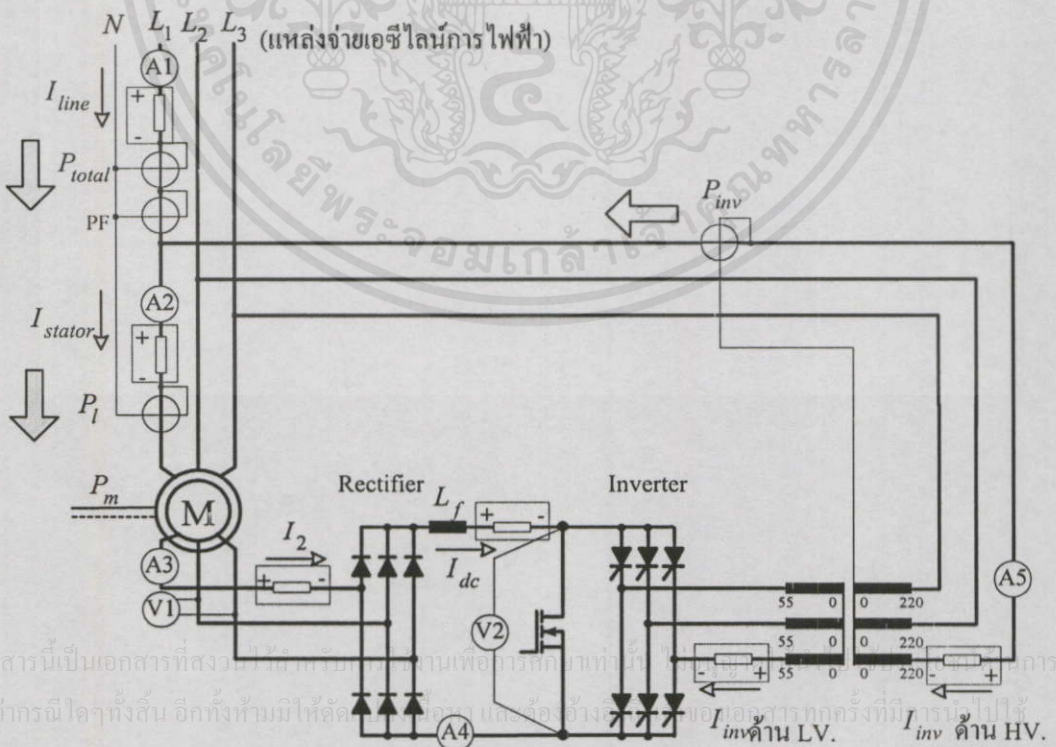
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการคืนพลังงานสลิป กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีของระบบควบคุมทั่วไปแบบเซอร์เบียด และแบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์

5.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบระบบการคืนพลังงานสลิป เพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์ ด้วยระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ที่สร้างขึ้น โดยทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับระบบการควบคุมทั่วไปแบบเซอร์เบียด และได้แสดงไดอะแกรมการต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

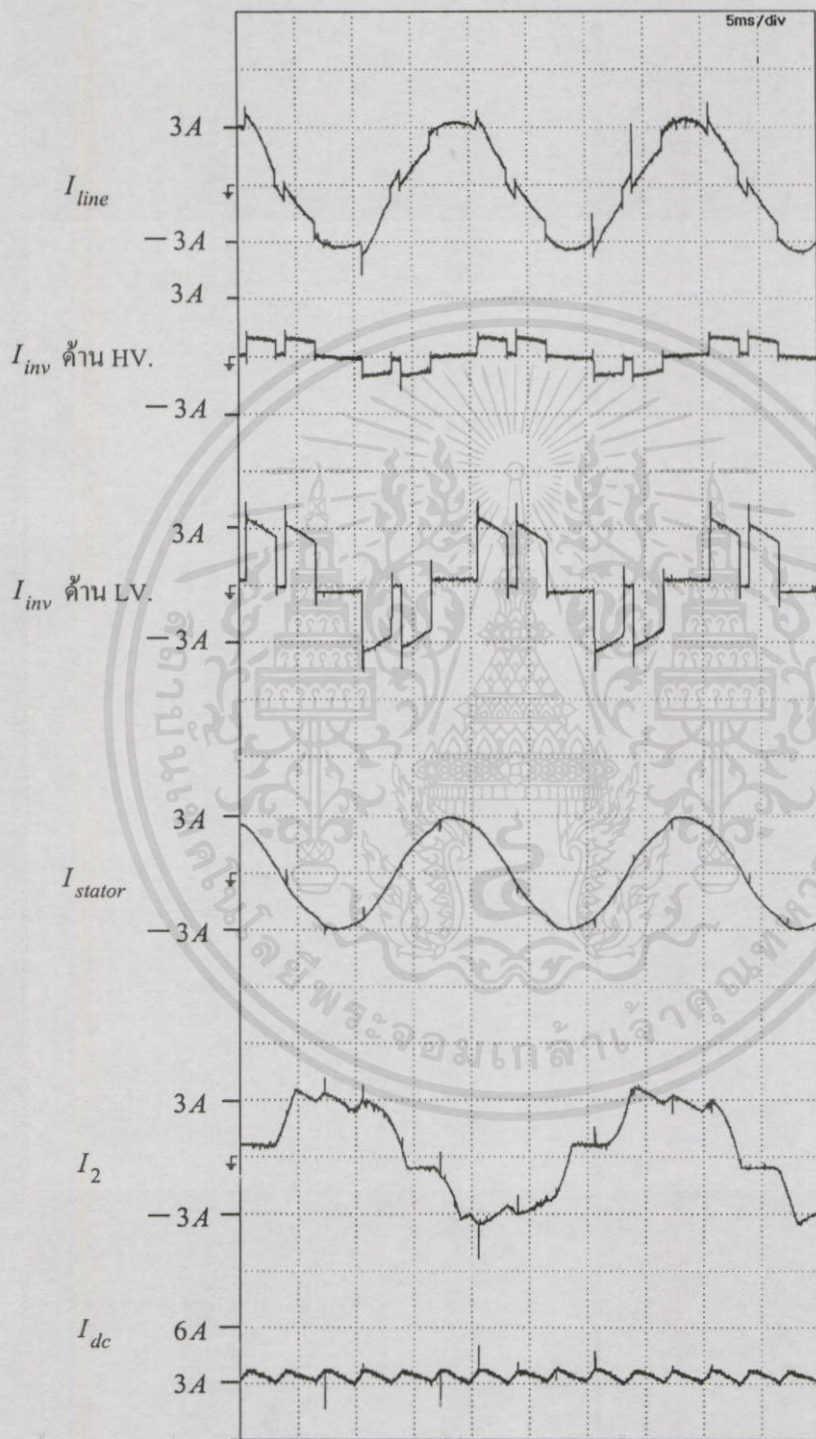
- 1 การทดสอบเพื่อแสดงลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบ
- 2 การทดสอบปริมาณการคืนพลังงานสลิปเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ
- 3 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ
- 4 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบสลิปของระบบ



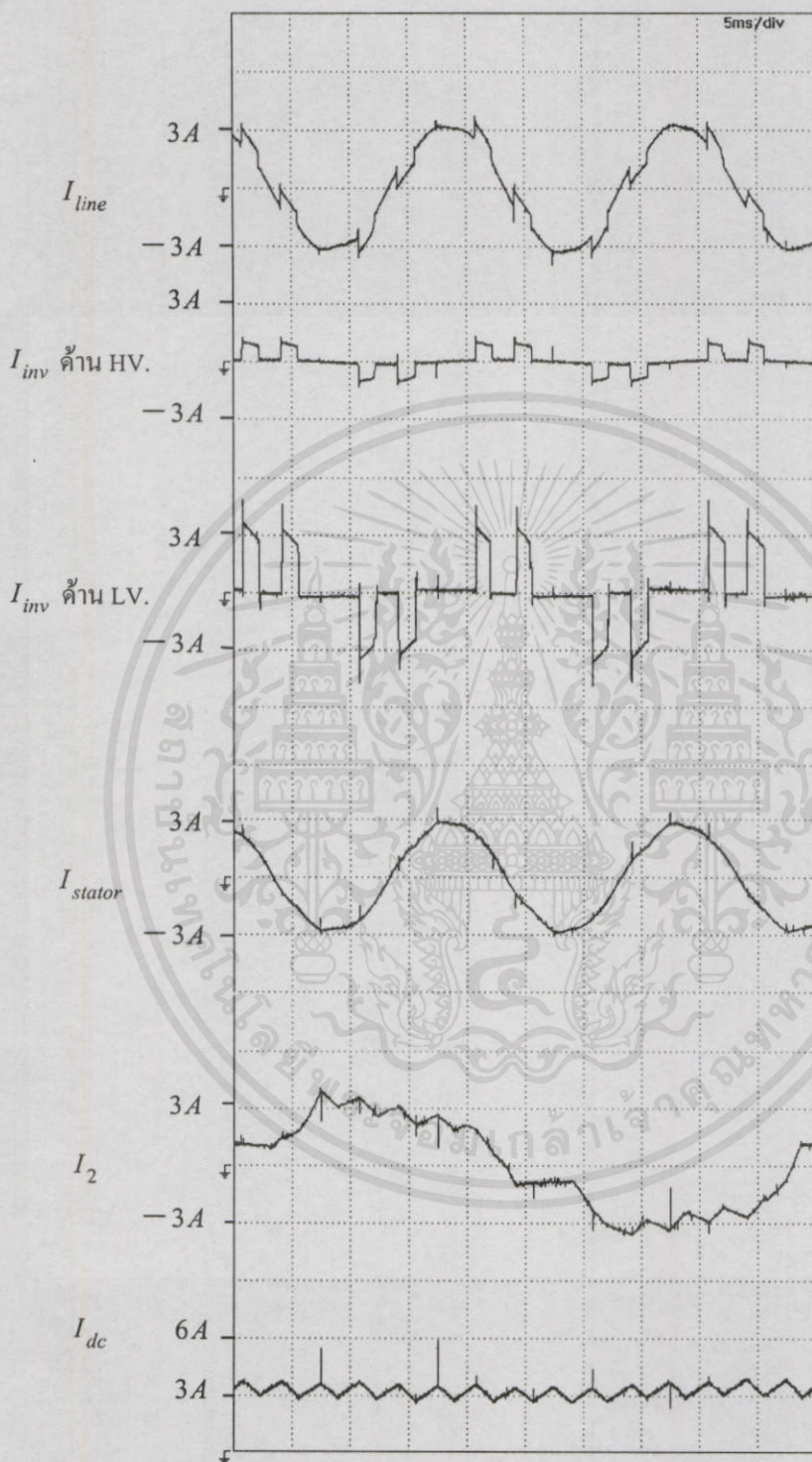
รูปที่ 5.1 แสดงไดอะแกรมการต่อเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

5.2 ลักษณะคลื่นแรงดัน,กระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมความเร็วรอบด้วยสลิป

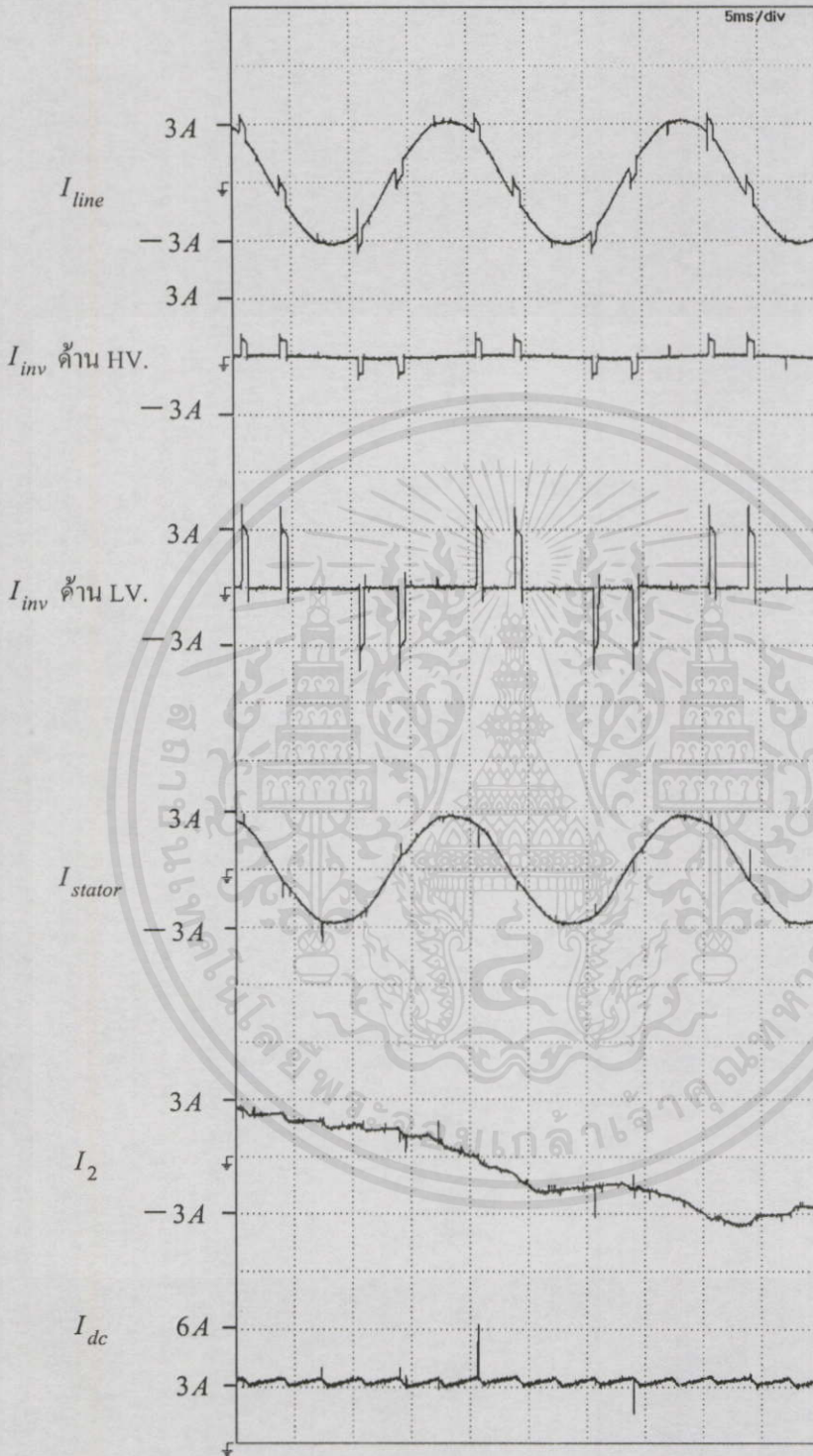
5.2.1 รูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ที่แรงบิด 50 % ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซิปเปอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.2 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ซิปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.7$
ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวดีไอเกิด $D = 23.2\%$

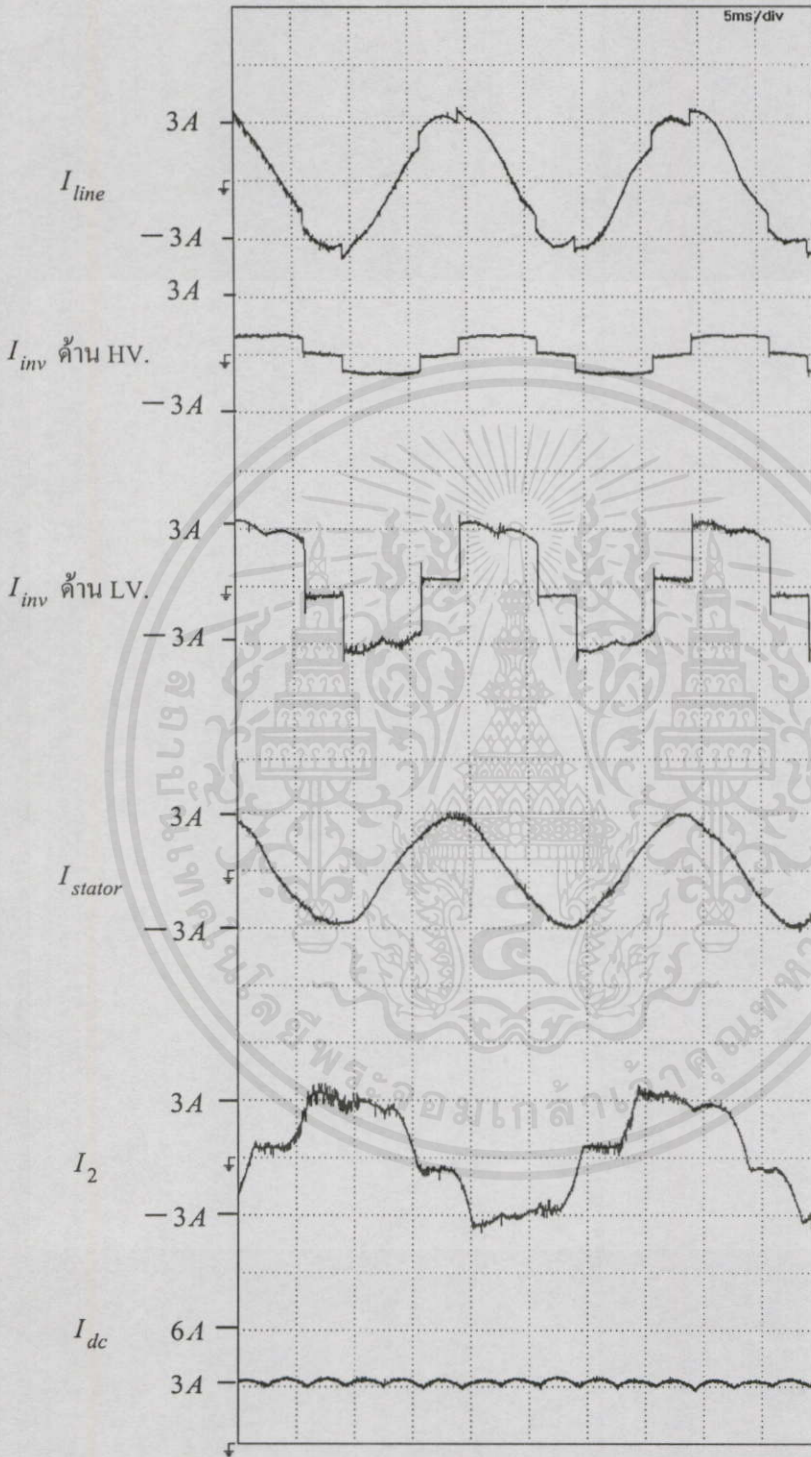


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.3 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.4$
 ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ ดิวตี้ไซเคิล $D = 58.2\%$



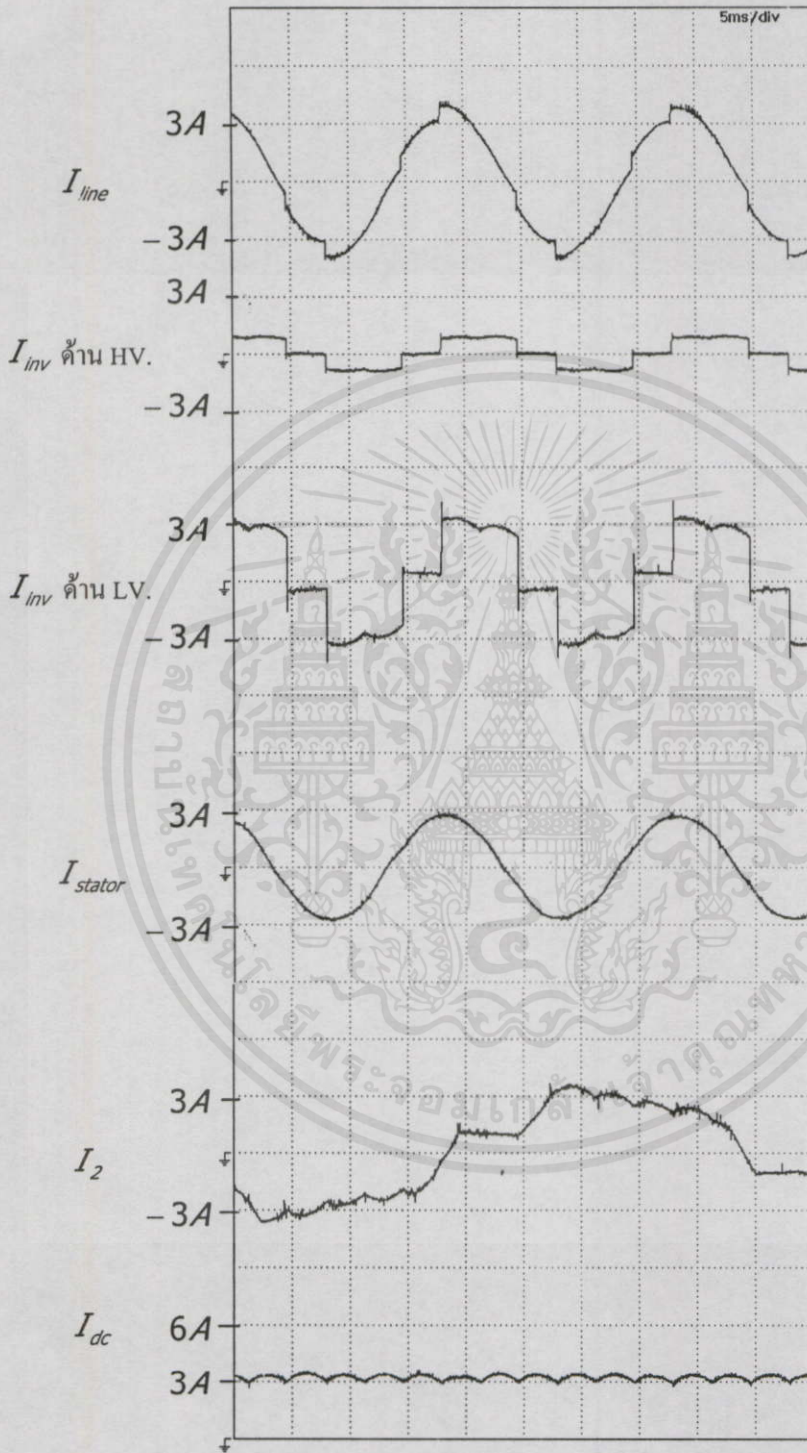
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์ทั้งสั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.4 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$
 ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ ดิวตี้ไซเคิล $D = 85.7\%$

5.2.2 รูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ที่แรงบิด 100 % ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบีส



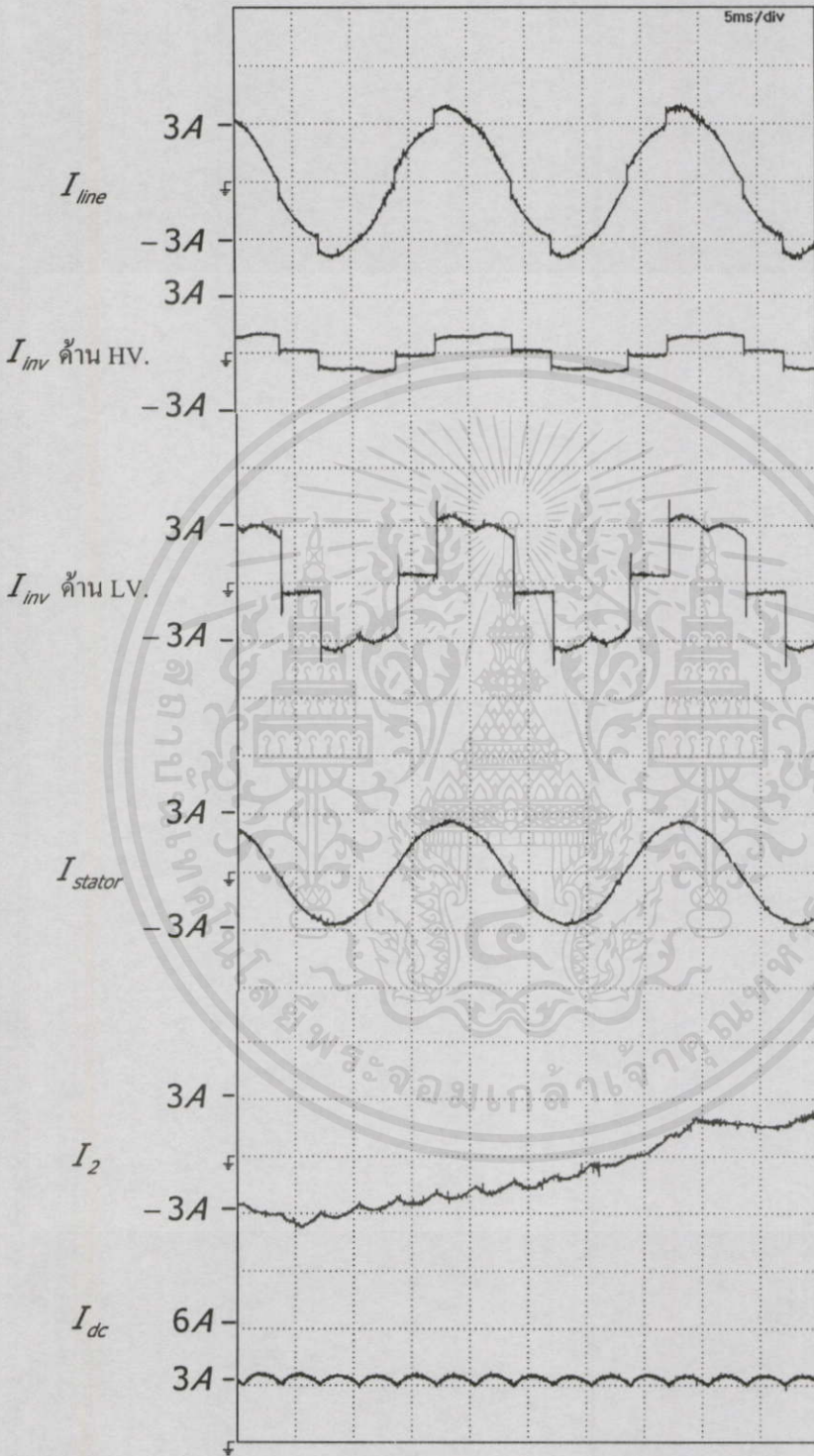
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.5 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบีส ที่ค่าสลิป $s = 0.7$

ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 137.88^\circ$



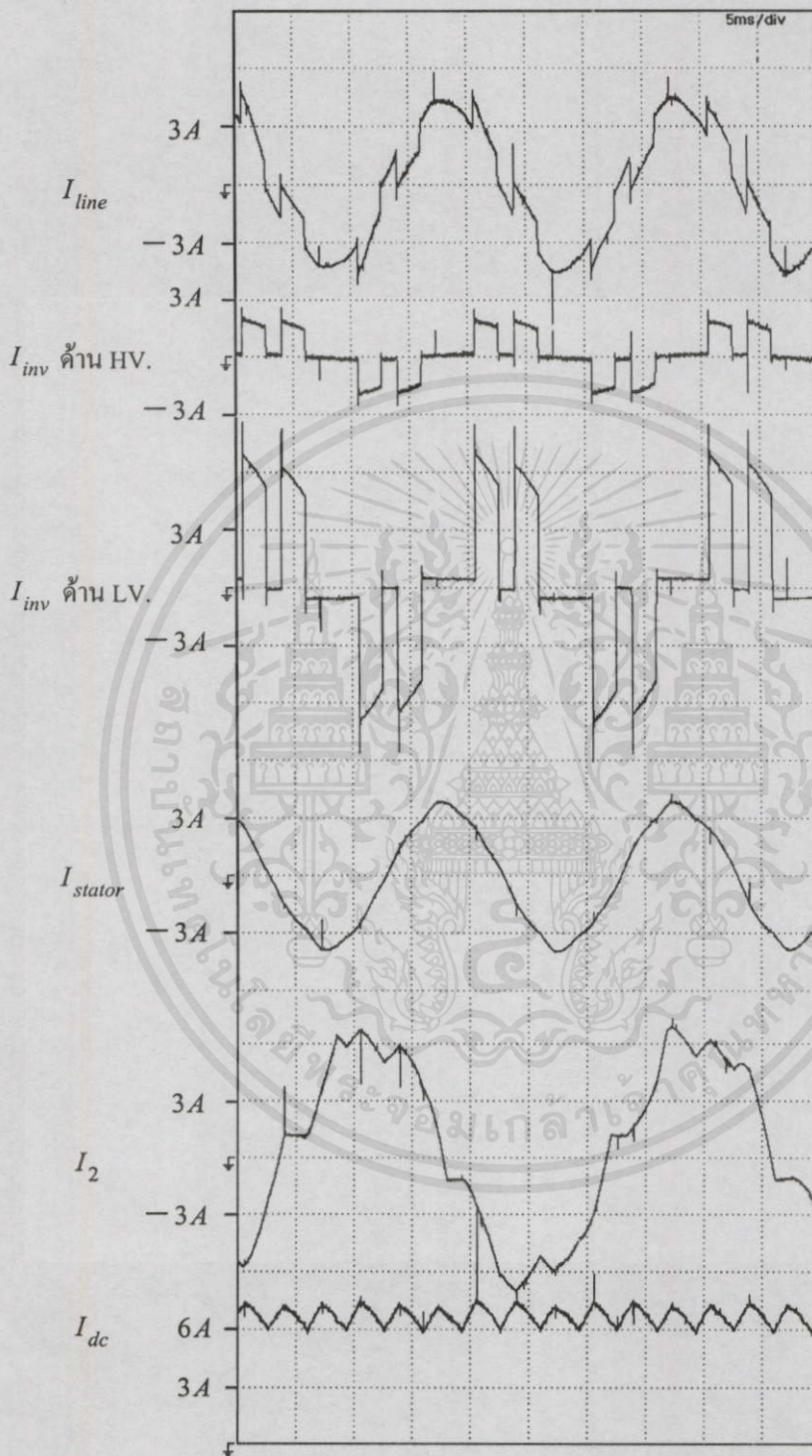
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.6 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด ที่ค่าสลิป $s = 0.4$

ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 114.12^\circ$



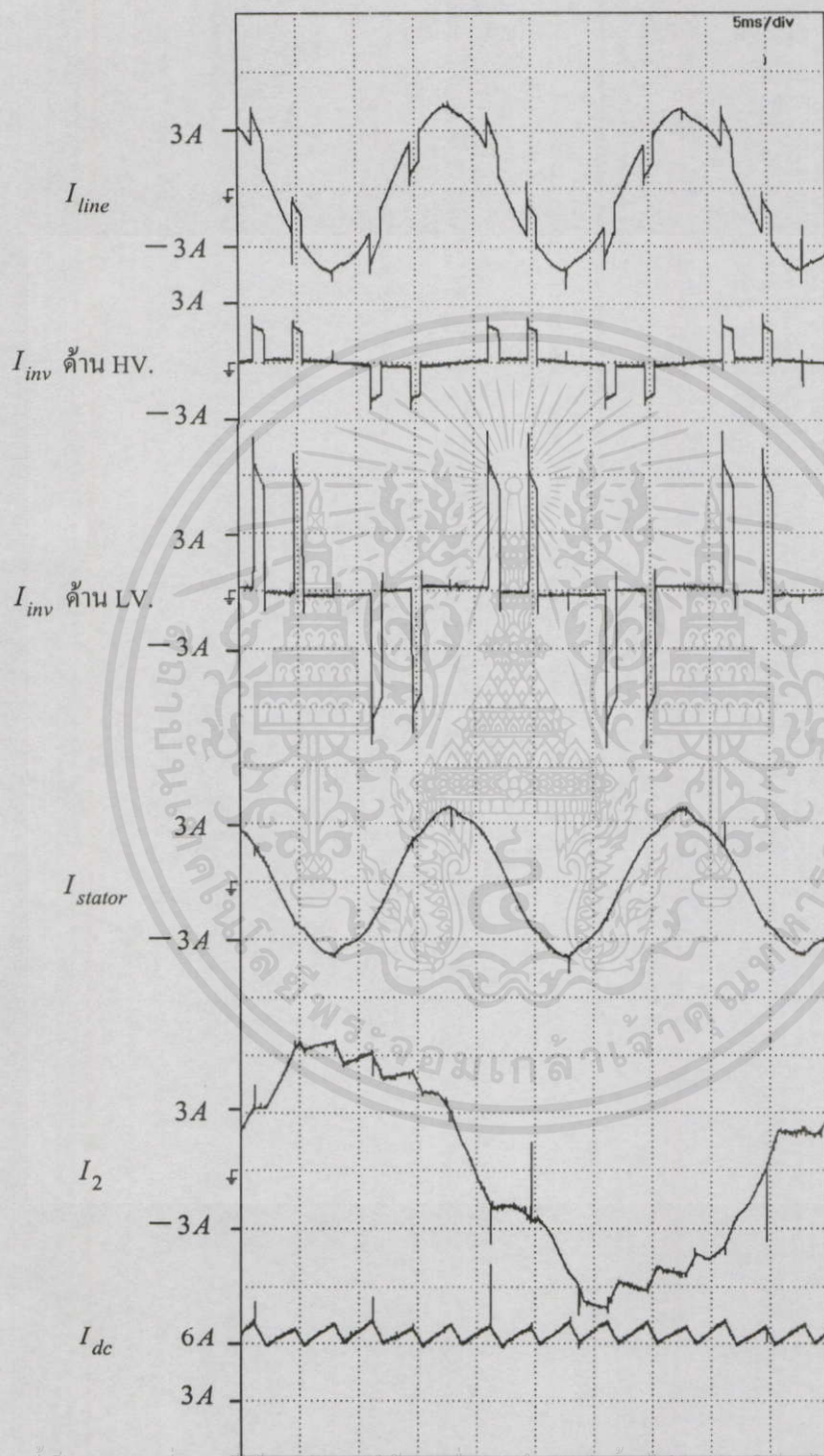
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.7 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียด ที่ค่าสลิป $s = 0.2$
ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 99.72^\circ$

5.2.2 รูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ที่แรงบิด 100 % ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

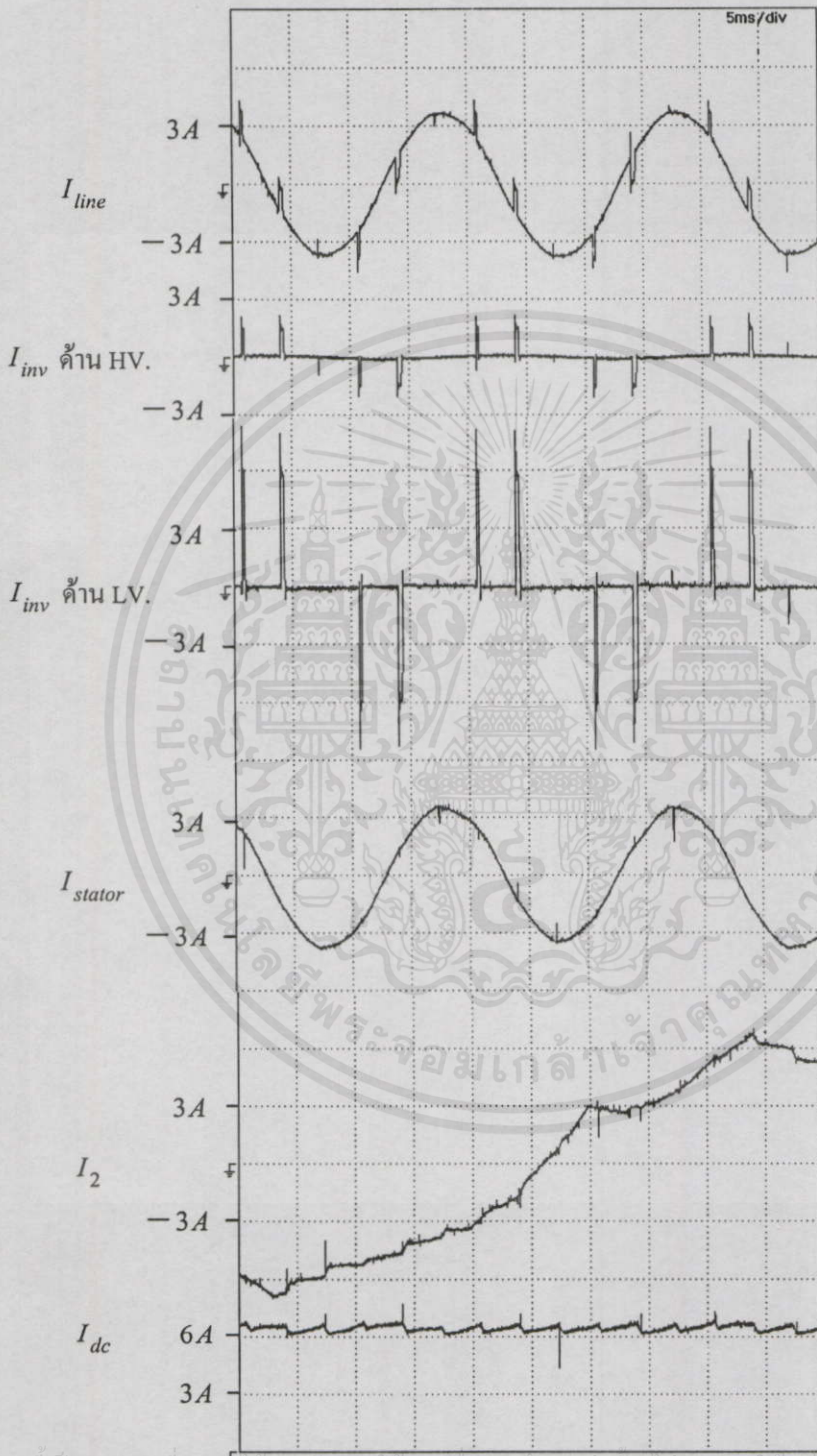


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.8 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.7$

ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวดีไซเกิล $D = 39\%$

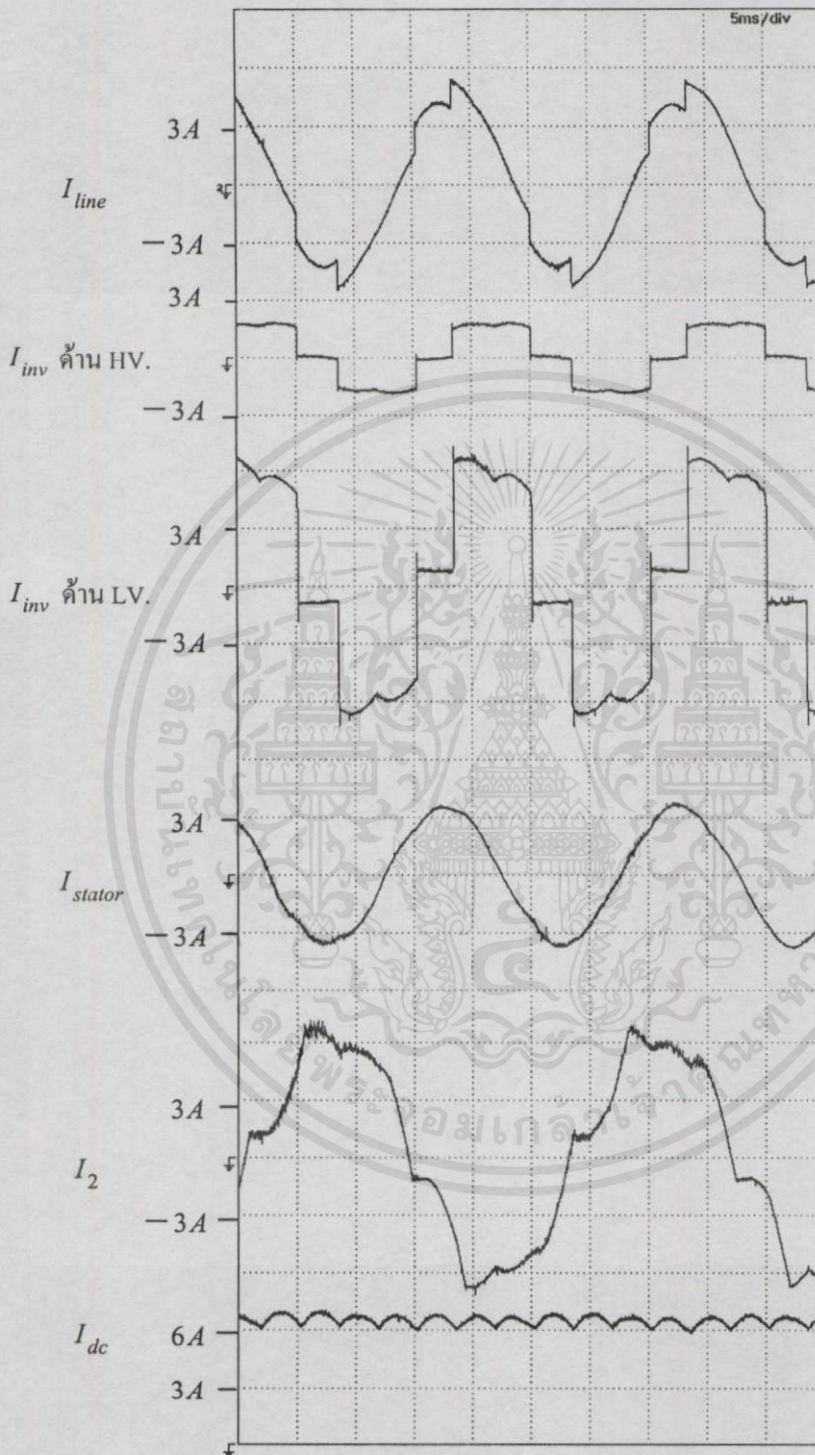


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.9 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.4$
 ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ ดิวตี้ไซเคิล $D = 72.5\%$



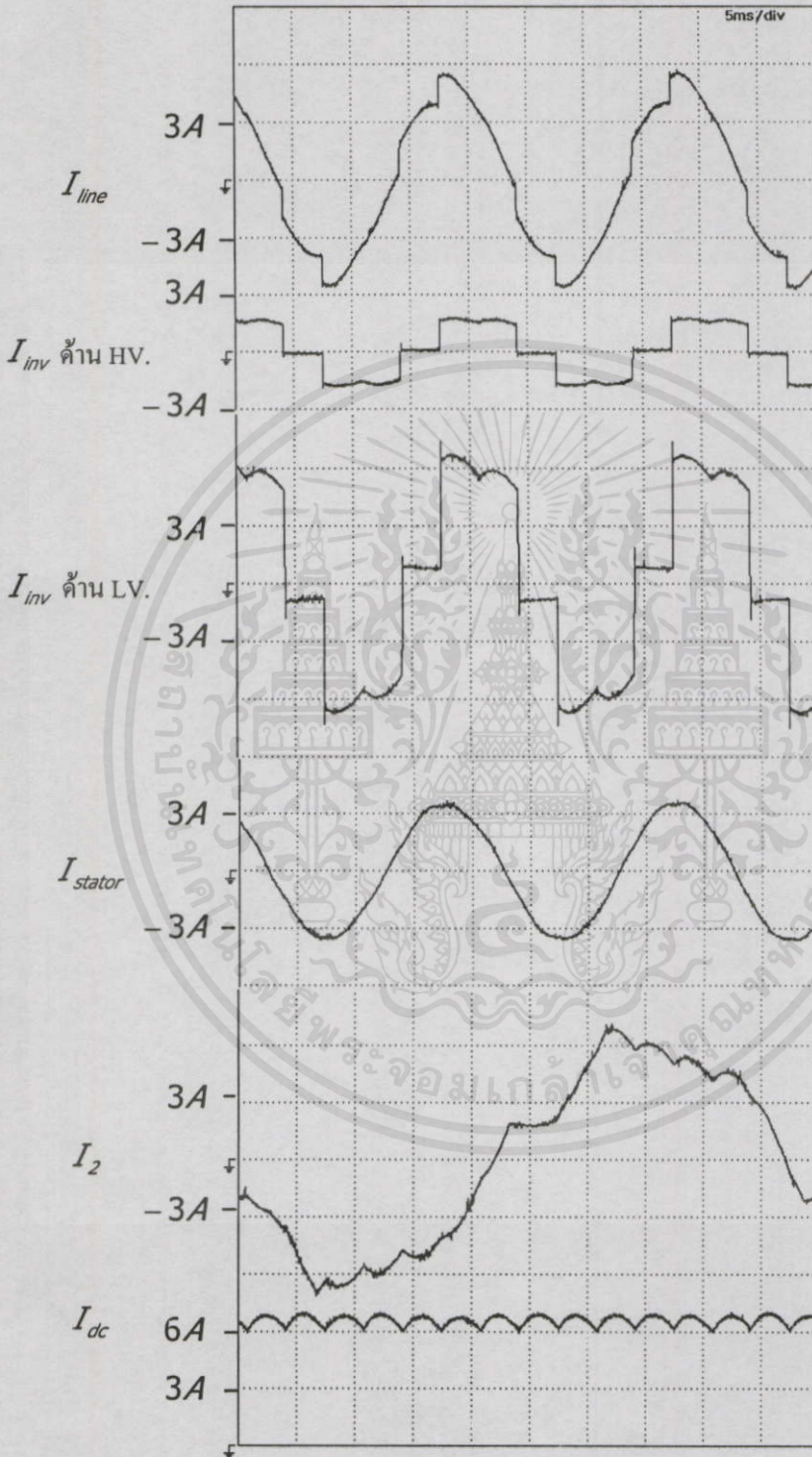
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 5.10 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$
 ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 160^\circ$ คงที่ คิวดีไอเกิด $D = 96.4\%$

5.2.4 รูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ที่แรงบิด 100 % ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบีส

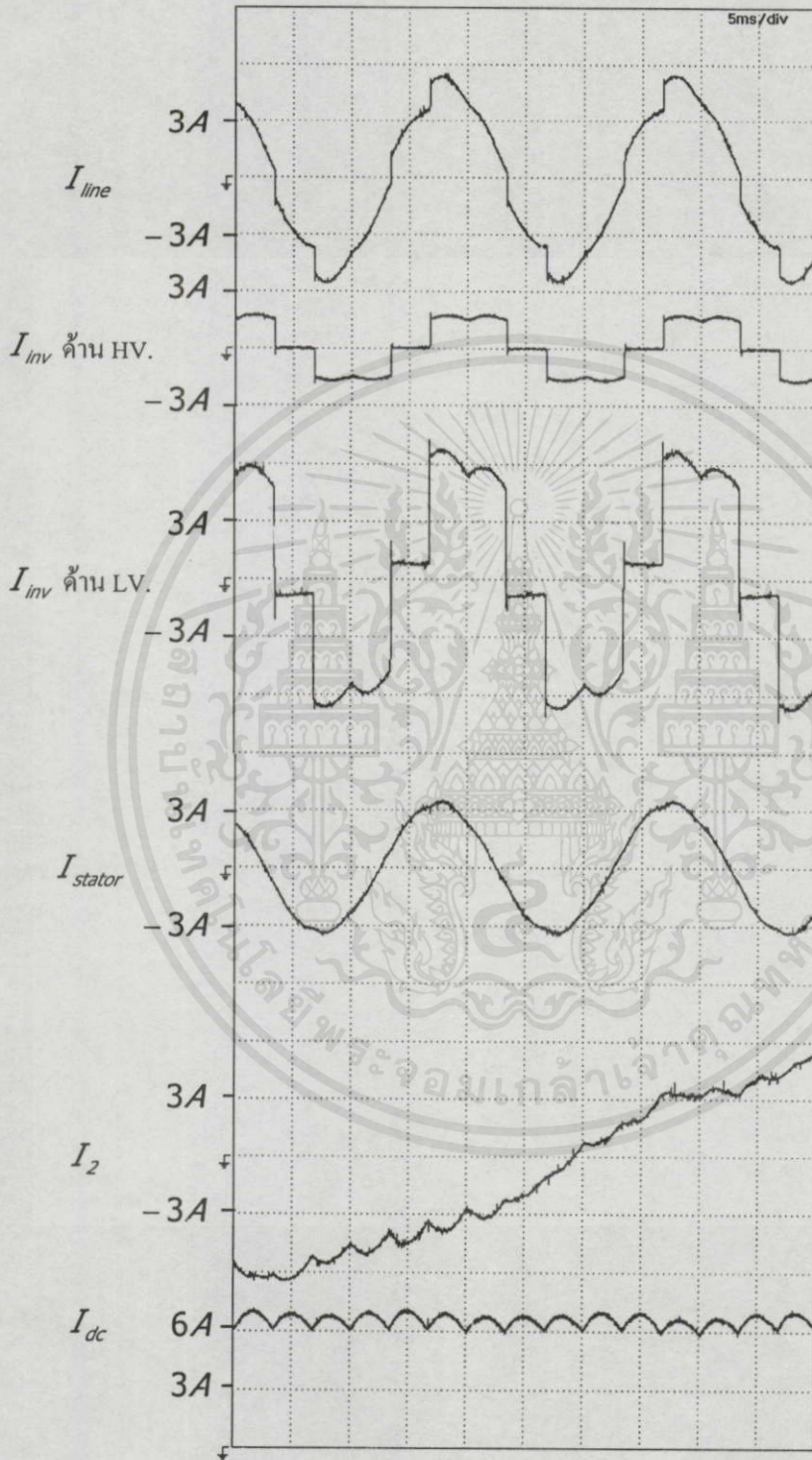


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.11 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบีส ที่ค่าสลิป $s = 0.7$

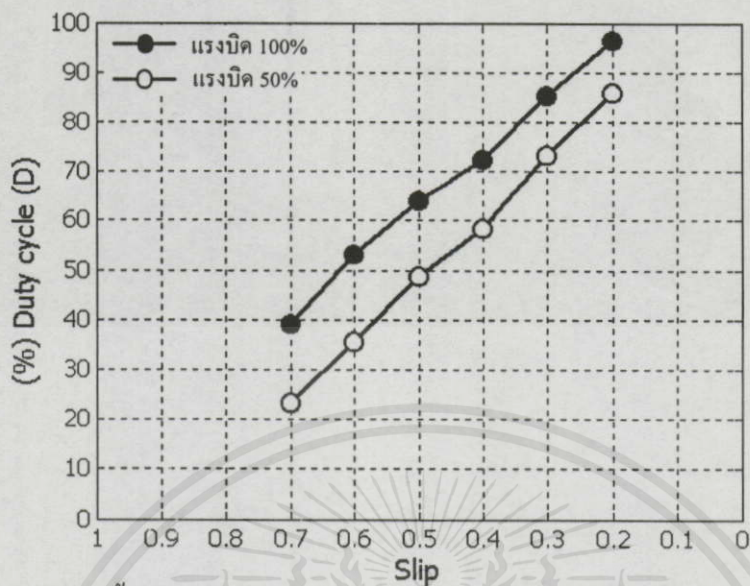
ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 122.76^\circ$



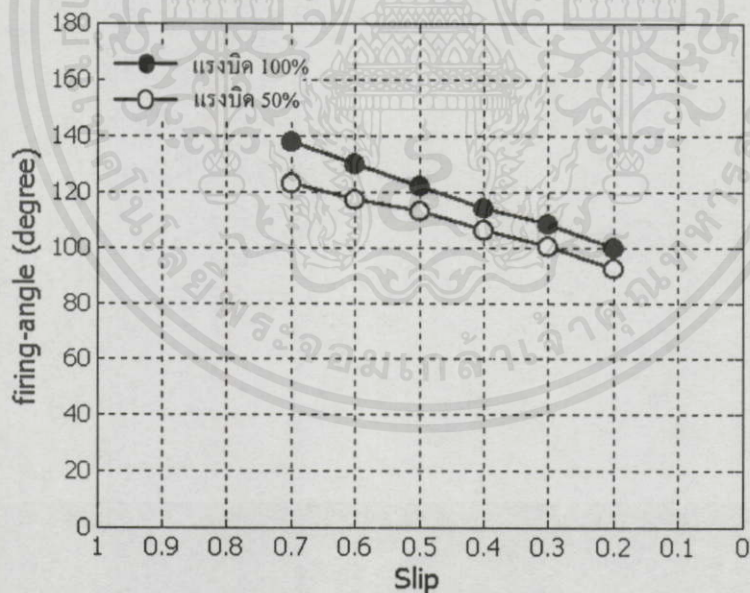
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.12 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบิซส ที่ค่าสลิป $s = 0.4$
ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 105.84^\circ$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้
 รูปที่ 5.13 แสดงรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมแบบเซอร์เบีส ที่ค่าสลิป $s = 0.2$
 ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha = 92.16^\circ$



รูปที่ 5.14 แสดงค่าตัวชี้ไซเคิล (D) ของระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ที่แรงบิด 50% และแรงบิด 100% ของค่าพิกัด กับค่าสลิป (s) ที่ค่ามุมจุดชนวนคงที่ $\alpha = 160^\circ$



รูปที่ 5.15 แสดงค่ามุมจุดชนวน (α) ของระบบเซอ์เบิสที่แรงบิด 50% และแรงบิด 100% ของค่าพิกัด กับค่าสลิป (s)

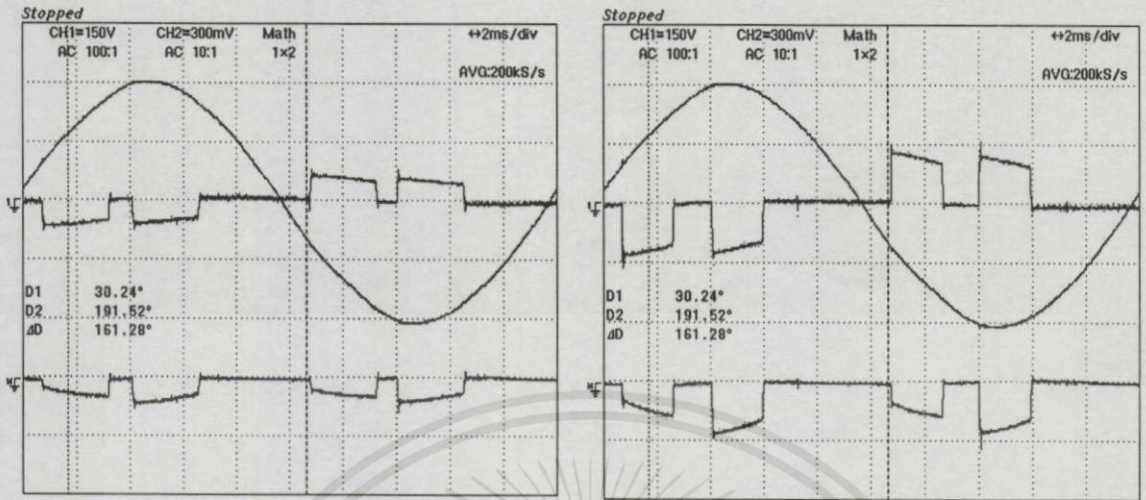
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบในการเปรียบเทียบลักษณะรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นกับลักษณะรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมเซอร์เบียด ที่แรงบิด 50% ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ถึง รูปที่ 5.7 และที่แรงบิด 100% ของค่าพิกัด ตามรูปที่ 5.8 ถึง รูปที่ 5.13 ที่สลิป 0.7, 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า กระแสอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการแปลงผันของกระแสดีซีจะถูกเปลี่ยนใช้เป็นกระแสลับที่ความถี่ 50 Hz ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นจะได้รับการแก้ไขจากคลื่นกระแสที่เป็นสตีปในระบบเซอร์เบียดเดิมให้มีลักษณะเป็นคลื่น PWM และส่งผ่านหม้อแปลงกลับเข้าไปรวมกับกระแสสเตเตอร์ ส่งผลทำให้กระแสไลน์ของระบบแหล่งจ่ายเอซีไลน์มีขนาดที่ลดลง ส่วนกระแสโรเตอร์นั้นจะมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิป พบว่าที่ค่าสลิปสูงขึ้นกระแสโรเตอร์นี้จะมีความถี่สูงขึ้นตาม และลักษณะคลื่นของกระแสโรเตอร์จะเป็นแบบสตีป เนื่องจากวงจรด้านโรเตอร์ได้ต่อกับวงจรบริดจ์ไดโอดเรกติไฟเออร์ โดยจะมีขนาดของค่ากระแสเท่ากับขนาดของกระแสดีซีในวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปคลื่นกระแสในส่วนต่างๆที่ได้แสดง ในการควบคุมค่าสลิปหรือควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ สามารถกระทำได้โดยการปรับคิวดี้ไซเกิล (D) ของวงจรช็อบเปอร์ ในโหมด PWM โดยในรูปที่ 5.14 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปรับคิวดี้ไซเกิล (D) กับค่าสลิป ที่ควบคุมได้ตั้งแต่ 0.2–0.7 โดยควบคุมมุมจุดชนวน (α) ของคอนเวอร์เตอร์คงที่ ตำแหน่งค่ามุม 160° ตลอดเวลา พบว่าที่ค่าสลิป 0.2 (1,200 rpm) ปรับค่าคิวดี้ไซเกิลเท่ากับ $D = 85.7\%$ และ $D = 96.4\%$ ที่แรงบิด 50% และแรงบิด 100% ของค่าพิกัด และที่ค่าสลิป 0.7 (450 rpm) ปรับค่าคิวดี้ไซเกิลเท่ากับ $D = 23.2\%$ และ $D = 39\%$ ที่แรงบิด 50% และแรงบิด 100% ของค่าพิกัดตามลำดับ ซึ่งการควบคุมค่าคิวดี้ไซเกิลดังกล่าวเพื่อรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามค่าที่ต้องการ ส่วนในรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ของการควบคุมการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในระบบเซอร์เบียดด้วยวิธีการปรับมุมจุดชนวน (α) ตั้งแต่ $90^\circ - 160^\circ$ ค่าแรงบิด 50% และแรงบิด 100% ของค่าพิกัด

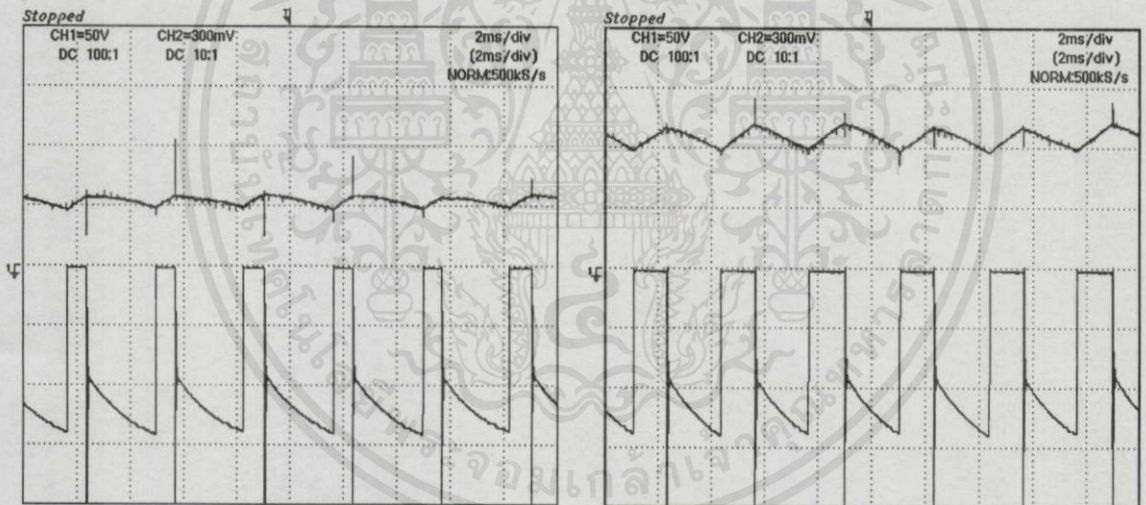
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์



(ก)

(ค)



(ข)

(ง)

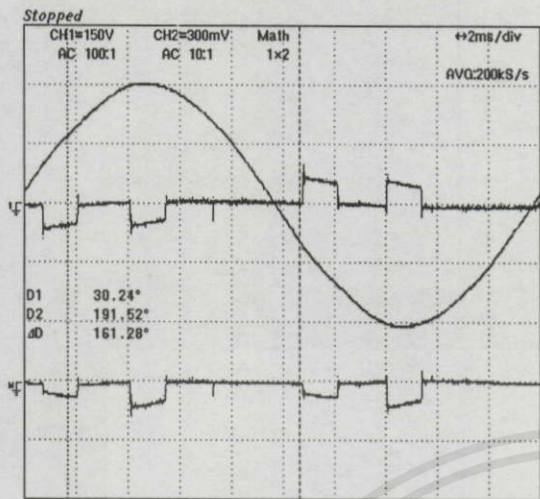
รูปที่ 5.16 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์
ที่ค่าสลิป $s=0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm มุมจุดชนวน $\alpha=160^\circ$ คงที่

(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $D=23.2\%$

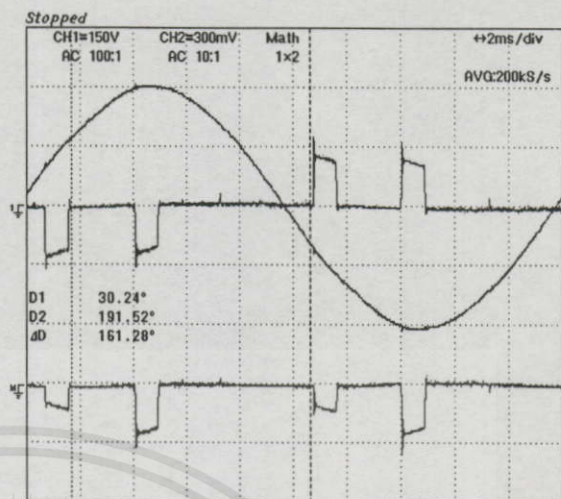
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $D=23.2\%$

(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $D=39\%$

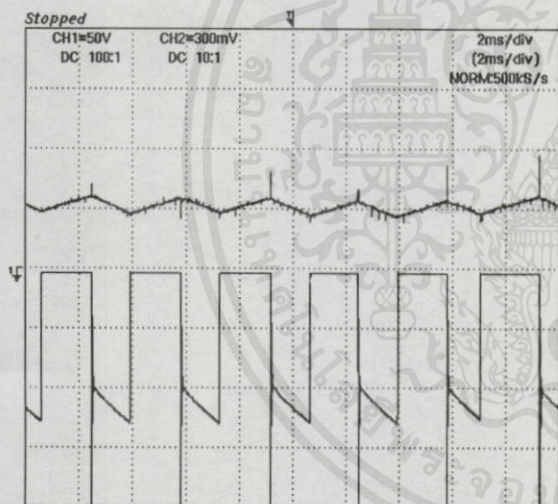
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $D=39\%$



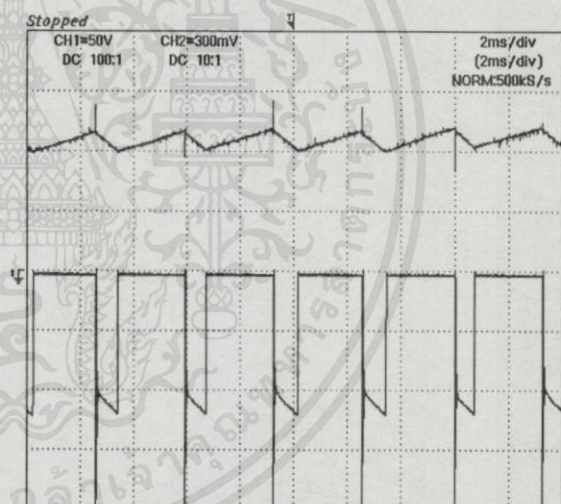
(ก)



(ค)



(ข)



(ง)

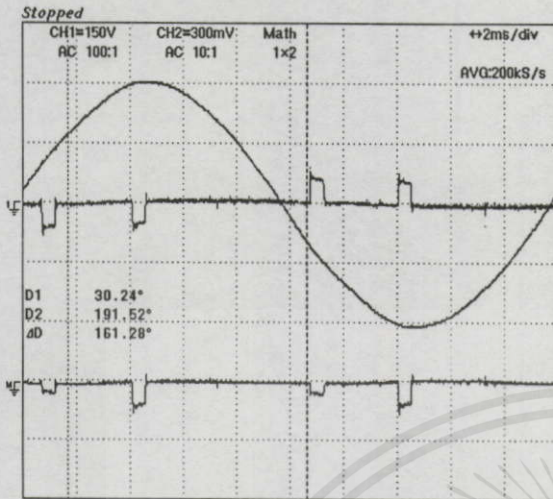
รูปที่ 5.17 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์
ที่ค่าสลิป $s=0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm มุมจุดชนวน $\alpha=160^\circ$ คงที่

(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $D=58.2\%$

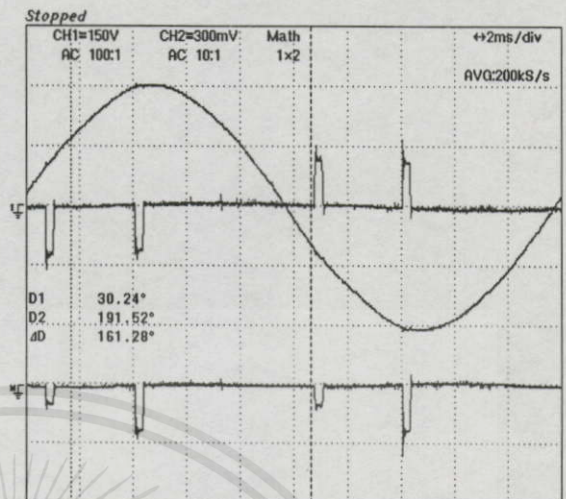
(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์. ที่แรงบิด 50% $D=58.2\%$

(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $D=72.5\%$

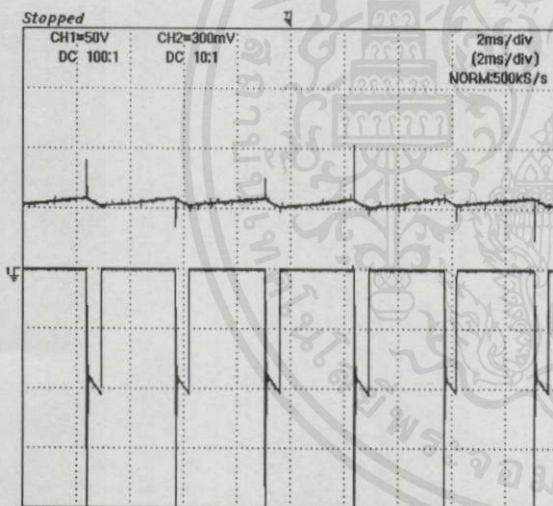
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์. ที่แรงบิด 100% $D=72.5\%$



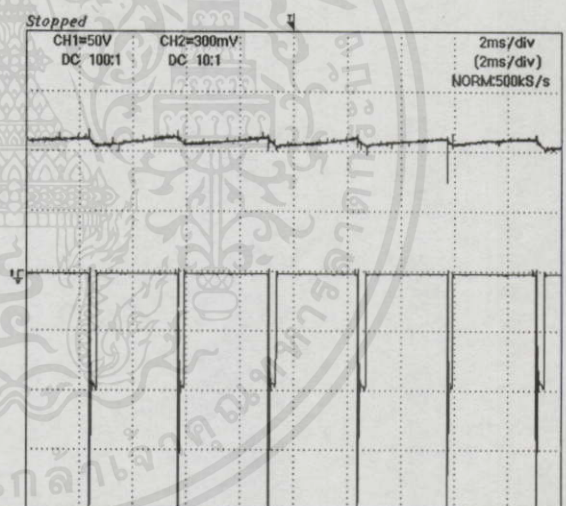
(ก)



(ค)



(ข)



(ง)

รูปที่ 5.18 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์
ที่ค่าสลิป $s=0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm มุมจุดชนวน $\alpha=160^\circ$ คงที่

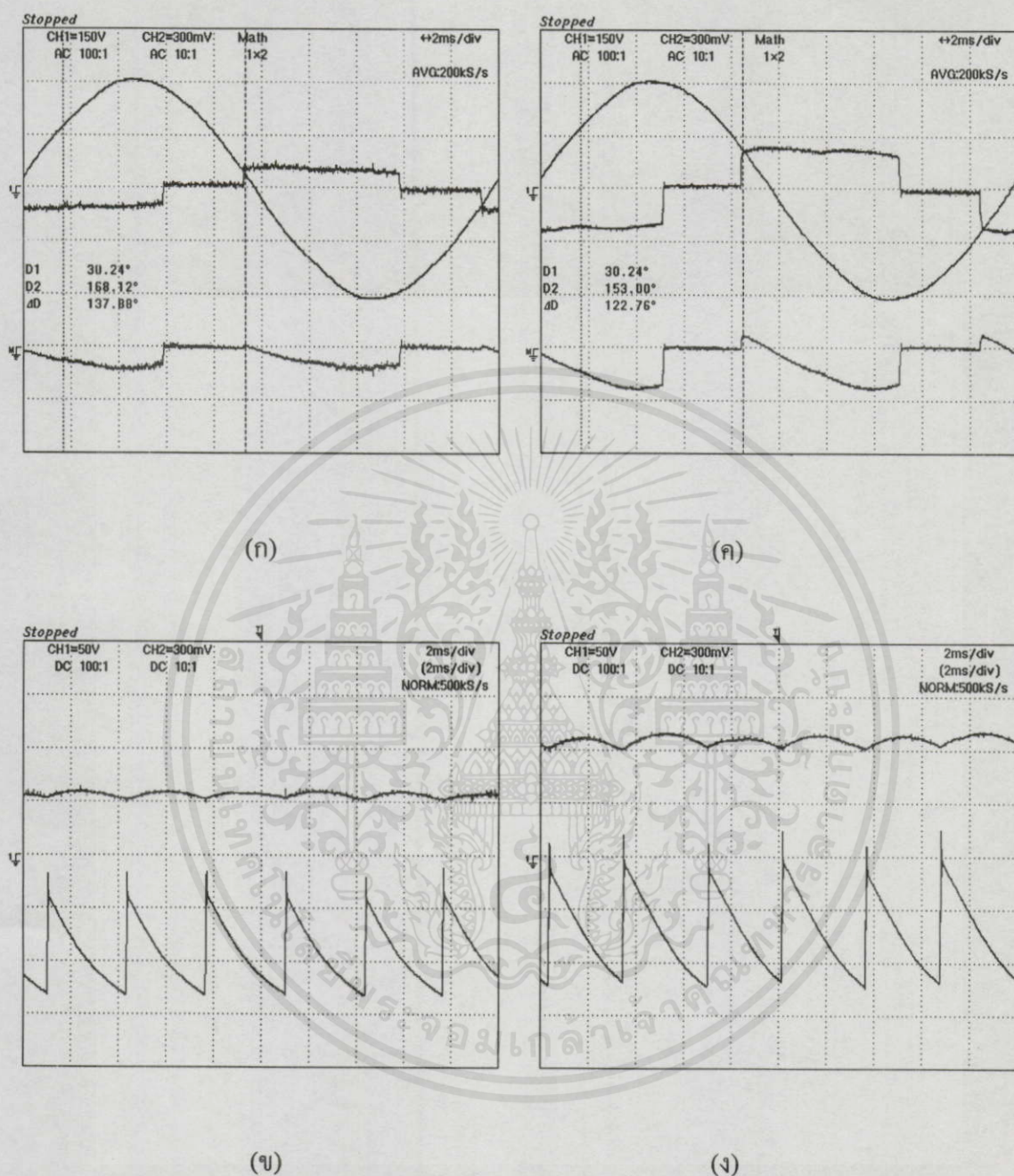
(ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $D=85.7\%$

(ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $D=85.7\%$

(ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $D=96.4\%$

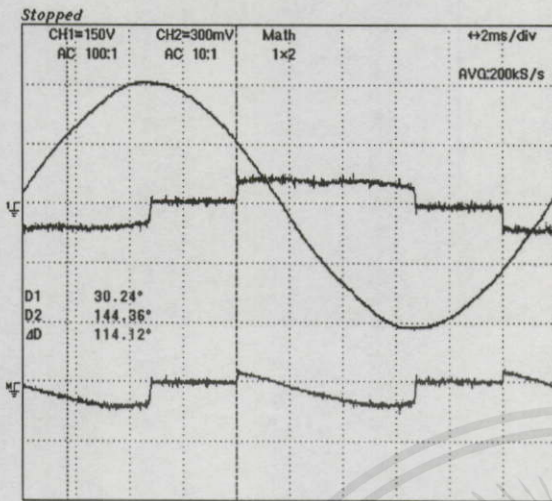
(ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $D=96.4\%$

5.2.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส

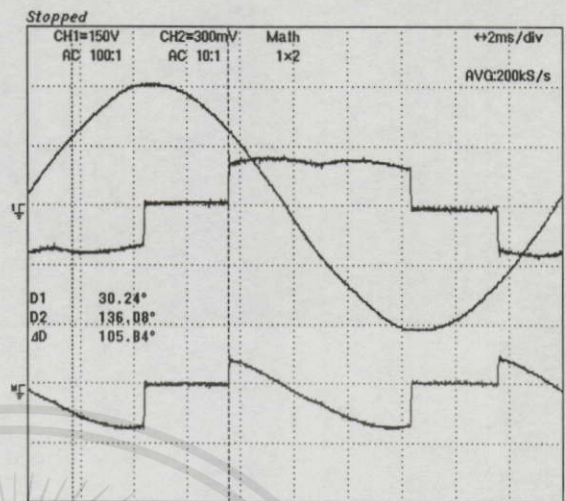


รูปที่ 5.19 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส
ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm

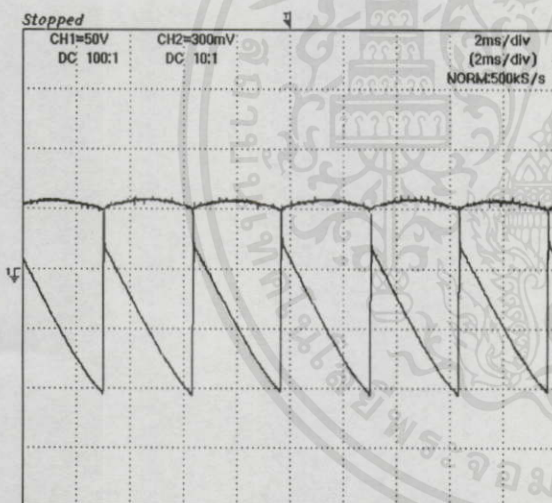
- (ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $\alpha = 137.88^\circ$
 (ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $\alpha = 137.88^\circ$
 (ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสด้านHV. ที่แรงบิด 100% $\alpha = 122.76^\circ$
 (ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $\alpha = 122.76^\circ$



(ก)



(ค)



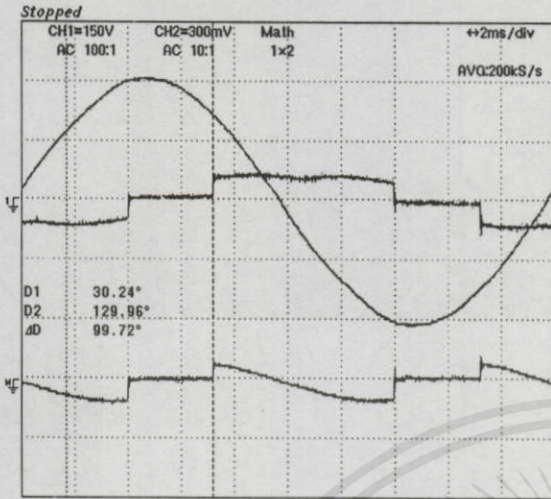
(ข)



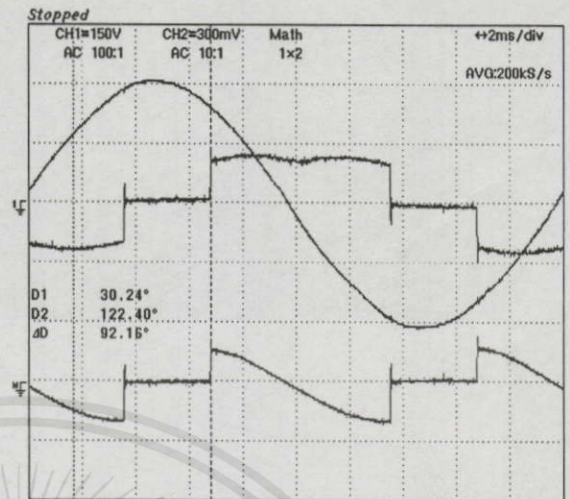
(ง)

รูปที่ 5.20 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส
ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm

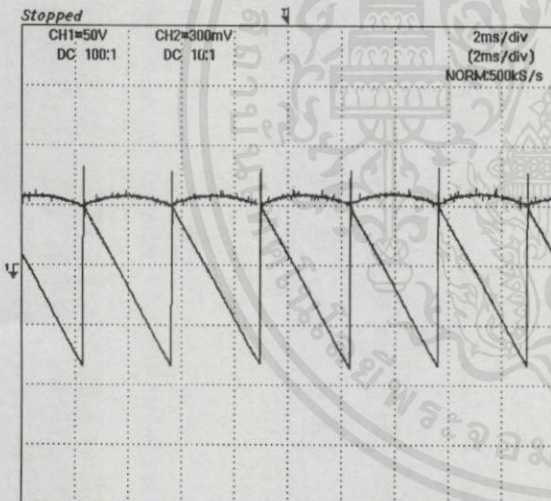
- (ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $\alpha = 114.32^\circ$
 (ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $\alpha = 114.32^\circ$
 (ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100% $\alpha = 105.84^\circ$
 (ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $\alpha = 105.84^\circ$



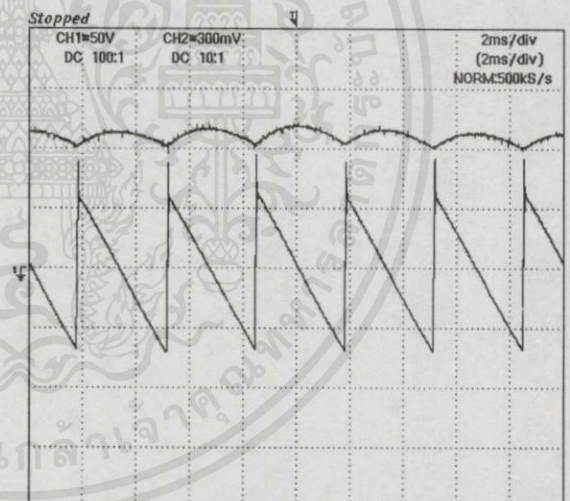
(ก)



(ค)



(ข)

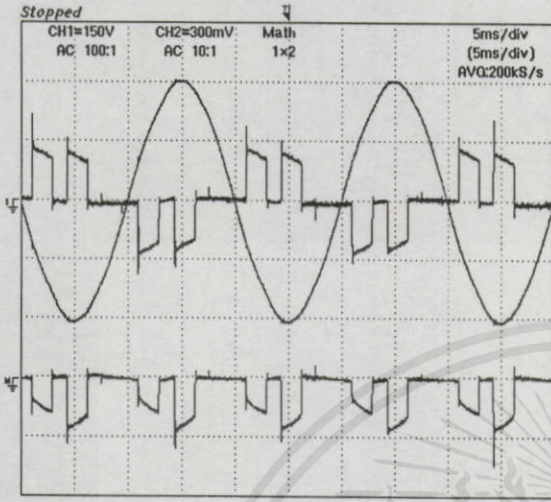


(ง)

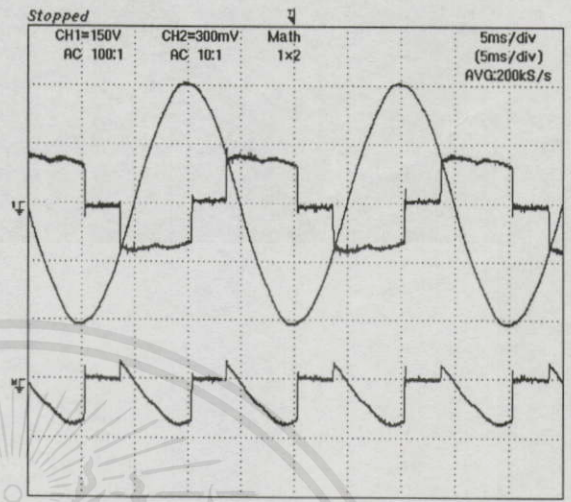
รูปที่ 5.21 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส
ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1200 rpm

- (ก) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 50% $\alpha = 99.72^\circ$
 (ข) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 50% $\alpha = 99.72^\circ$
 (ค) รูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟสด้านHV ที่แรงบิด 100% $\alpha = 92.16^\circ$
 (ง) รูปคลื่นกระแสดีซีเทียบกับแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ ที่แรงบิด 100% $\alpha = 92.16^\circ$

5.2.7 รูปคลื่นแรงดันเฟสกับกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสไลน์, แดสเปกตรัมของกระแสไลน์ ของระบบควบคุมทั้ง 2



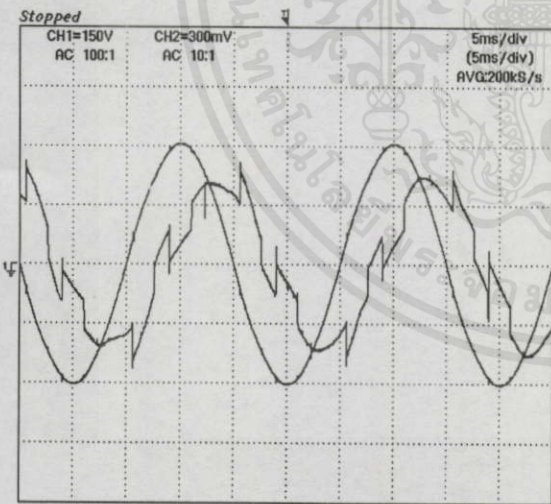
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์



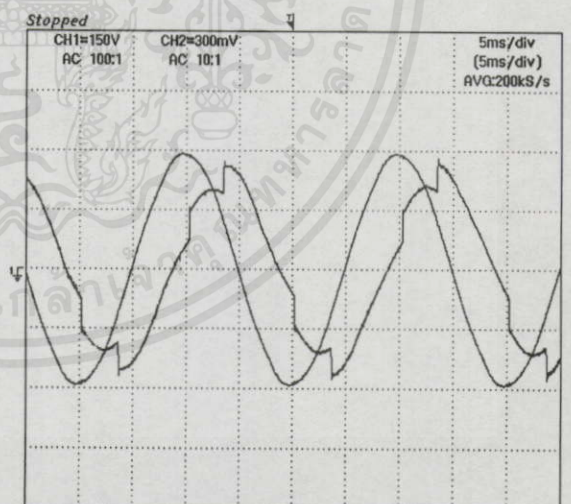
(ข) ระบบเซอร์เบีส

รูปที่ 5.22 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%

ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm



(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์



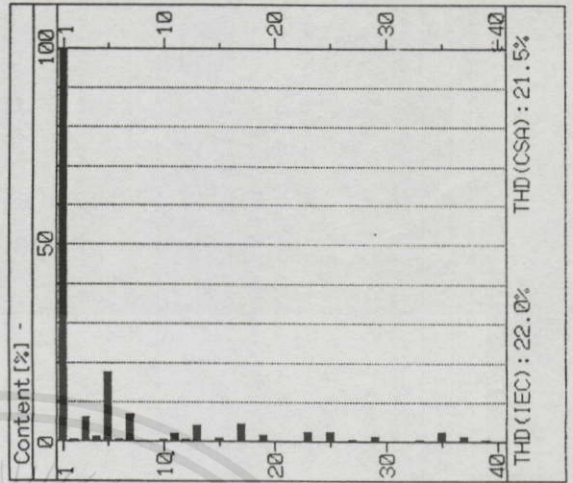
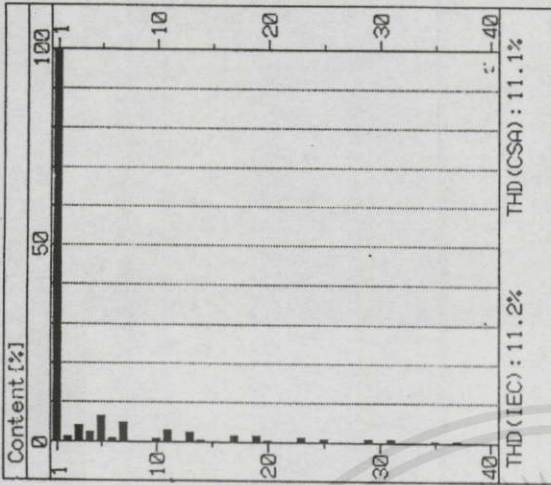
(ข) ระบบเซอร์เบีส

รูปที่ 5.23 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%

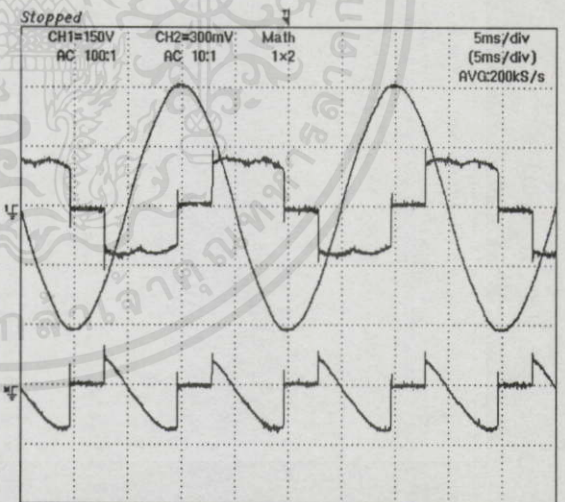
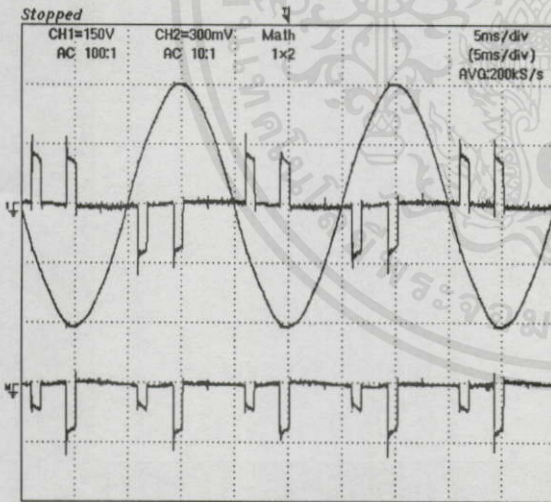
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) $THD_i = 11.2\%$, ระบบอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์ (จ) $THD_i = 22\%$, ระบบเซอร์เบียง
รูปที่ 5.24 แสดงแถบสเปกตรัมของกระแสไลน์ ที่แรงบิด 100%
ค่าสลิป $s = 0.7$ ความเร็วรอบ 450 rpm

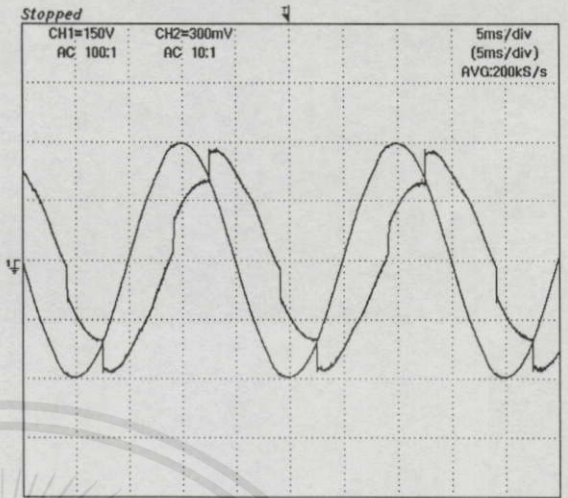
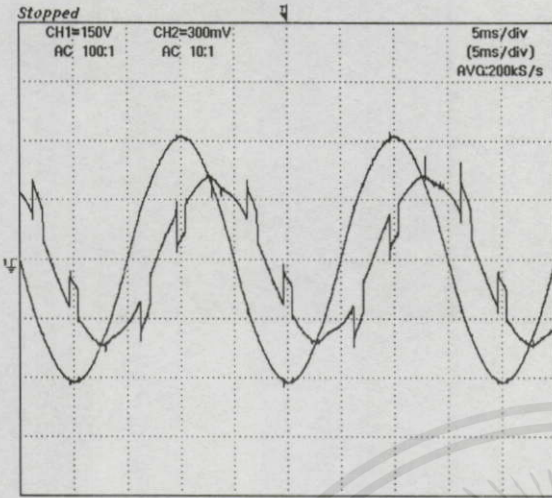


(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์

(จ) ระบบเซอร์เบียง

รูปที่ 5.25 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

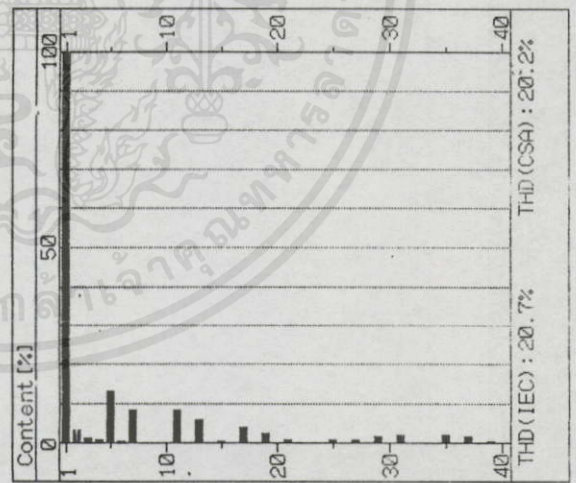
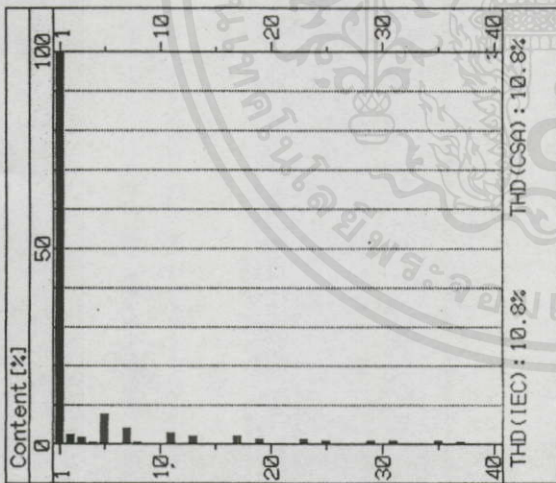


(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

(ข) ระบบเซอร์เบีส

รูปที่ 5.26 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%

ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm



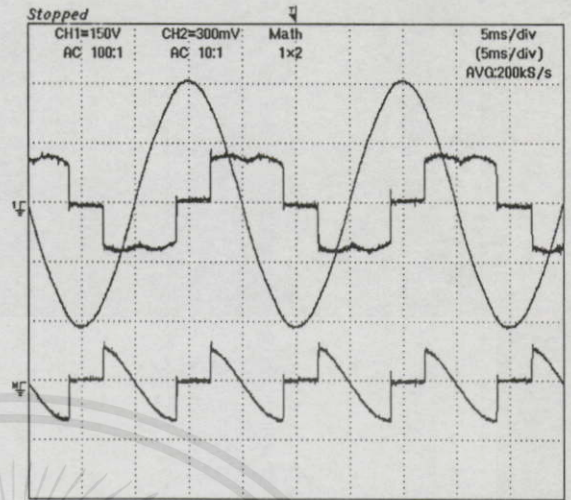
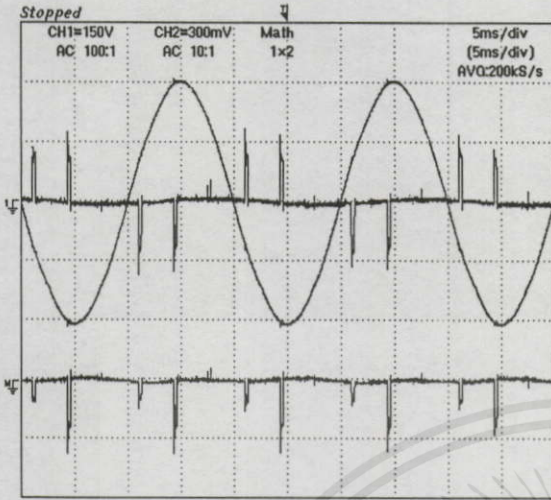
(ก) $THD_i = 10.8\%$, ระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

(ข) $THD_i = 20.7\%$, ระบบเซอร์เบีส

รูปที่ 5.27 แสดงแถบสเปกตรัมของกระแสไลน์ ที่แรงบิด 100%

ค่าสลิป $s = 0.4$ ความเร็วรอบ 900 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

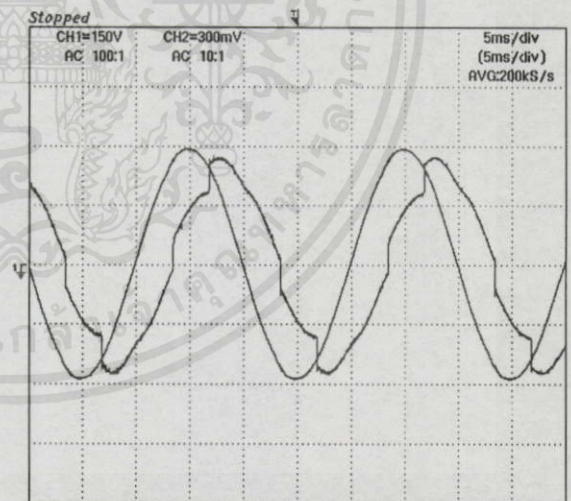
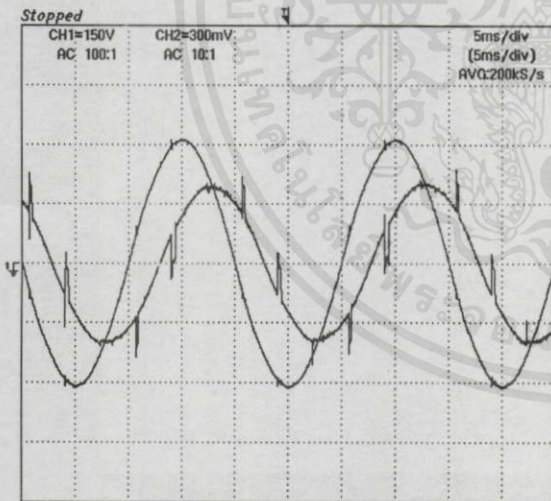


(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

(ข) ระบบเซอร์เบีส

รูปที่ 5.28 แสดงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%

ค่าสลิป $s=0.2$ ความเร็วรอบ 1,200 rpm



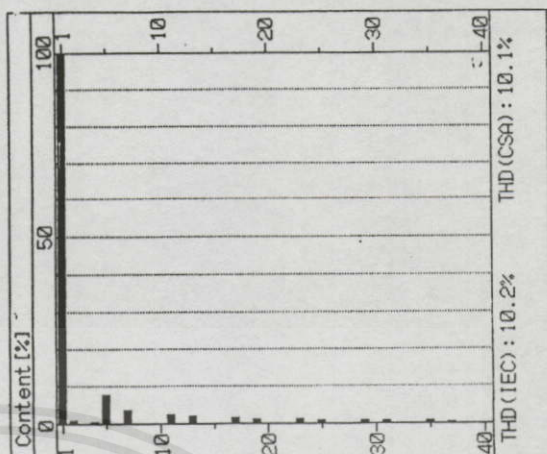
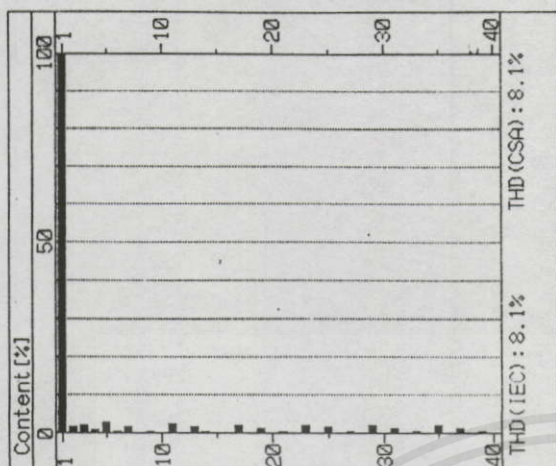
(ก) ระบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

(ข) ระบบเซอร์เบีส

รูปที่ 5.29 แสดงรูปคลื่นกระแสไลน์เทียบกับแรงดันเฟส ด้านHV. ที่แรงบิด 100%

ค่าสลิป $s=0.2$ ความเร็วรอบ 1,200 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (ก) $THD_T = 8.1\%$, ระบบอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ รูปที่ 5.30 แสดงแถบสเปกตรัมของกระแสไลน์ ที่แรงบิด 100%
 ค่าสลิป $s = 0.2$ ความเร็วรอบ 1,200 rpm
- (ข) $THD_T = 10.2\%$, ระบบเซอร์เบียส

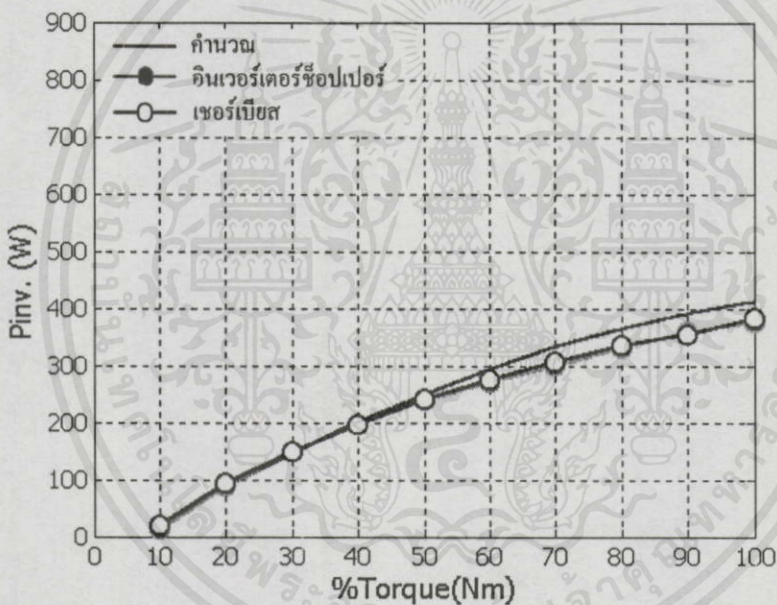
สรุปผลการทดสอบ ในรูปที่ 5.16, 5.17 และ 5.18 แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟสอ้างอิงเทียบกับกระแสอินเวอร์เตอร์ด้าน HV ของหม้อแปลง ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นโดยได้แสดงค่ามอดูลุสจำนวนซึ่งปรับไว้คงที่เท่ากับ $\alpha = 160^\circ$ ตลอดเวลาและได้แสดงรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์เทียบกับกระแสดีซี ที่ 50% และ 100% ของค่าแรงบิดพิกัด ที่ค่าสลิป 0.7, 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันเฟสกับกระแสอินเวอร์เตอร์และรูปคลื่นแรงดันดีซีอินเวอร์เตอร์กับกระแสดีซีของระบบควบคุมเซอร์เบียส ดังแสดงในรูปที่ 5.19, 5.20 และ 5.21 ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.22 ถึง 5.30 แสดงผลการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงเฟสอ้างอิงกับกระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสไลน์ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นกับระบบควบคุมเซอร์เบียส ที่ค่าแรงบิด 100% โดยลักษณะคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับการแก้ไขให้มีลักษณะเป็น PWM ส่งผลทำให้กระแสไลน์ของระบบที่แหล่งจ่ายเอชเอ็มไอขนาดที่ลดลงดังแสดงในรูปดังกล่าว และมีค่าเปอร์เซ็นต์การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไลน์ (THD_T) ต่ำกว่าระบบควบคุมเซอร์เบียส โดยมีค่าเท่ากับ 11.2%, 10.8% และ 8.1% ในขณะที่ระบบเซอร์เบียสจะมีค่าดังกล่าวเท่ากับ 22%, 20.7% และ 10.2% ที่ค่าสลิป 0.7, 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดสอบปริมาณการคืนพลังงานสลิปเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสและแบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์

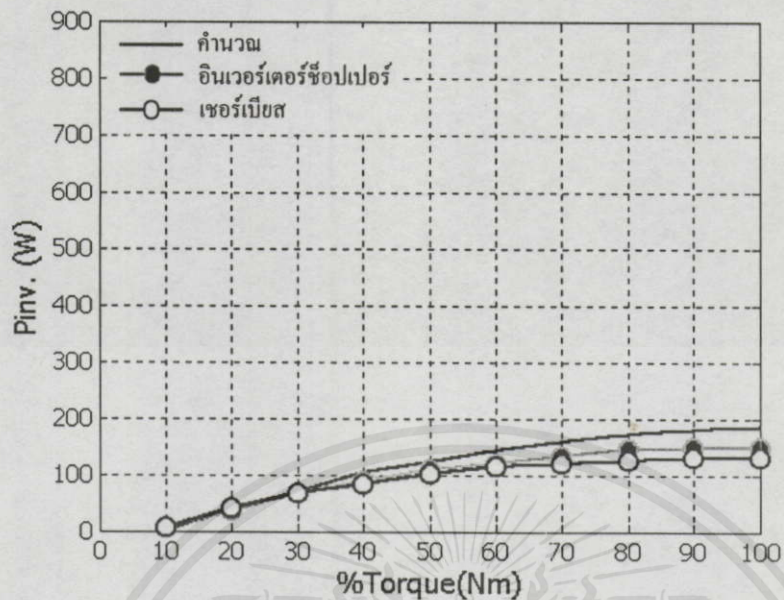
5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนสู่แหล่งจ่ายเอชกับแรงบิดมอเตอร์

ทำการทดสอบโดยการป้อนแรงบิดโหลดให้กับมอเตอร์ตั้งแต่สภาวะไร้แรงบิดโหลดจนถึงค่าแรงบิดพิกัดโดยทำการควบคุมย่านสลิปให้คงที่ (s) ตั้งแต่ 0.2 – 0.7 ค่าความเร็วรอบที่ควบคุม 1200 – 450 rpm และได้แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไลน์ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียส โดยในรูปที่ 5.31, รูปที่ 5.32 และรูปที่ 5.33 ได้แสดงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนดังกล่าวในฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.7, 0.4, 0.2$ ตามลำดับ

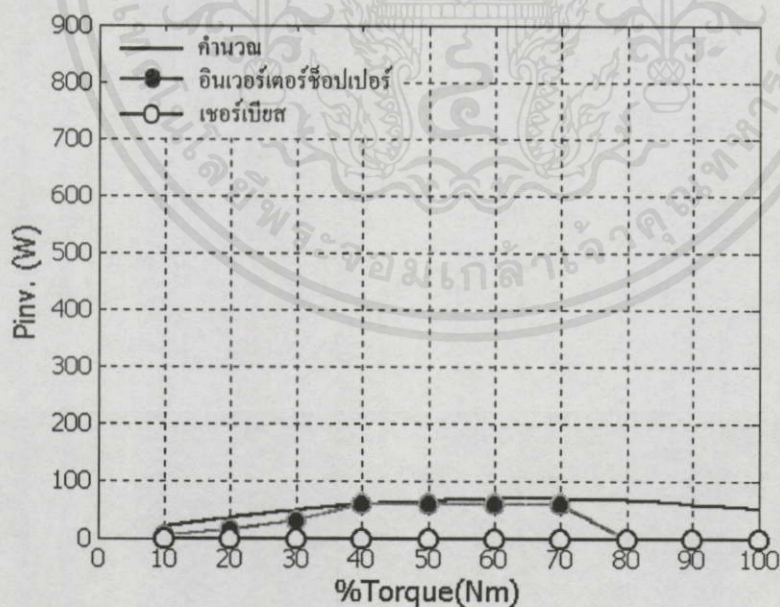


รูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไลน์กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450 rpm)

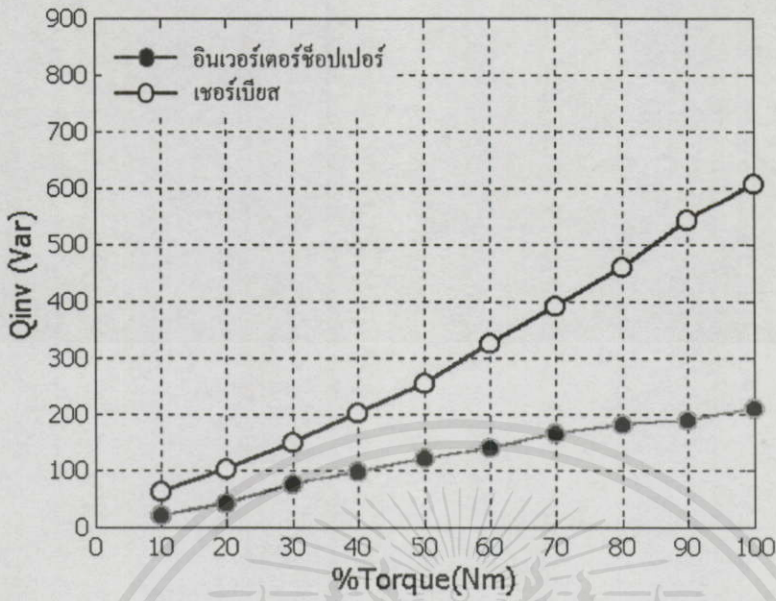
ส่วนในรูปที่ 5.34 , 5.35 และรูปที่ 5.36 ได้แสดงปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอ็คทีฟของอินเวอร์เตอร์ ในระบบควบคุมทั้ง 2 แบบในฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดโหลดมอเตอร์ตั้งแต่ 10%-100% ของค่าแรงบิดพิกัด โดยแสดงที่ค่าสลิป 0.7, 0.4, 0.2 ตามลำดับ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



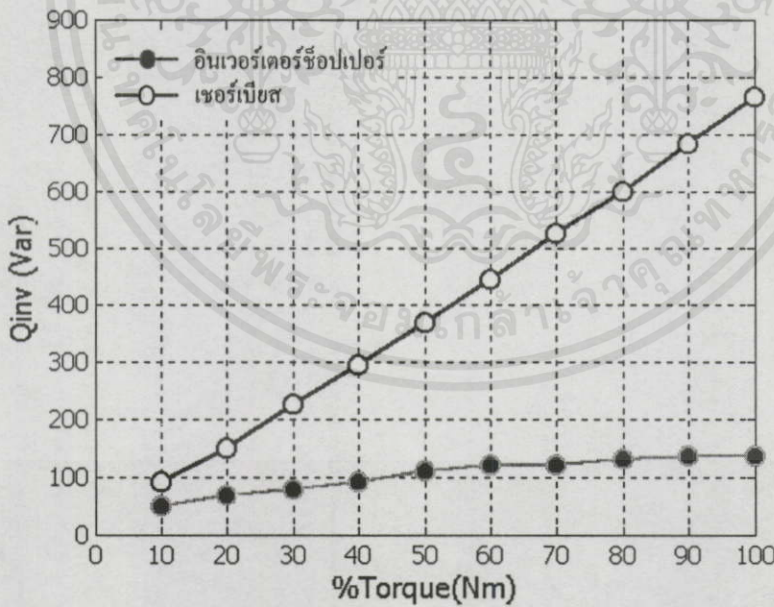
รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอไลน์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ (900rpm)



รูปที่ 5.33 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอไลน์ กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1200rpm)

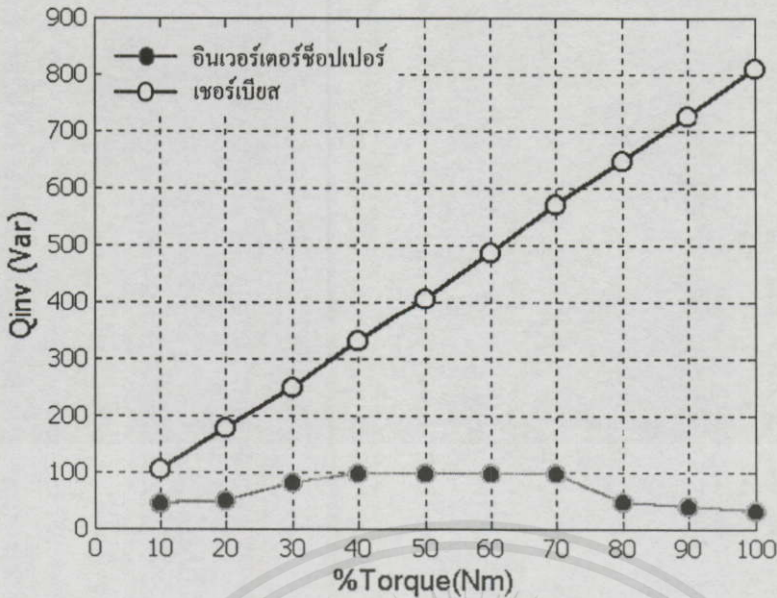


รูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450rpm)



รูปที่ 5.35 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์กับแรงบิดของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.4$ (900rpm)

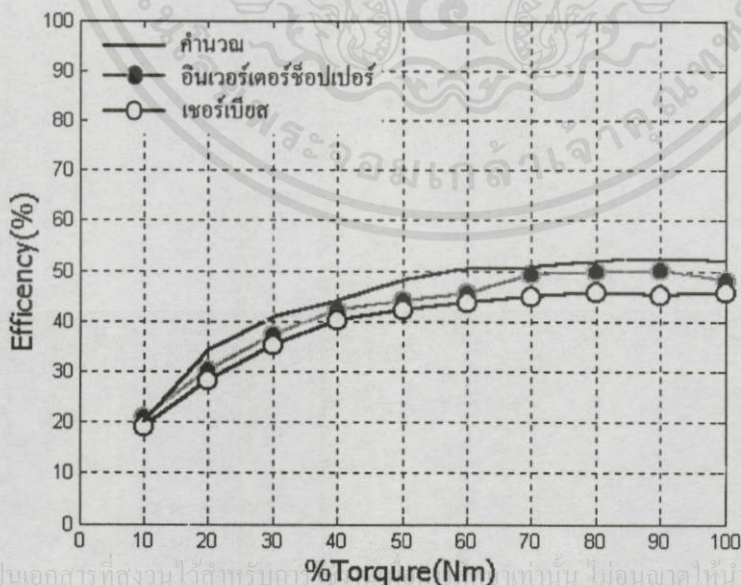
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงนอกราย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



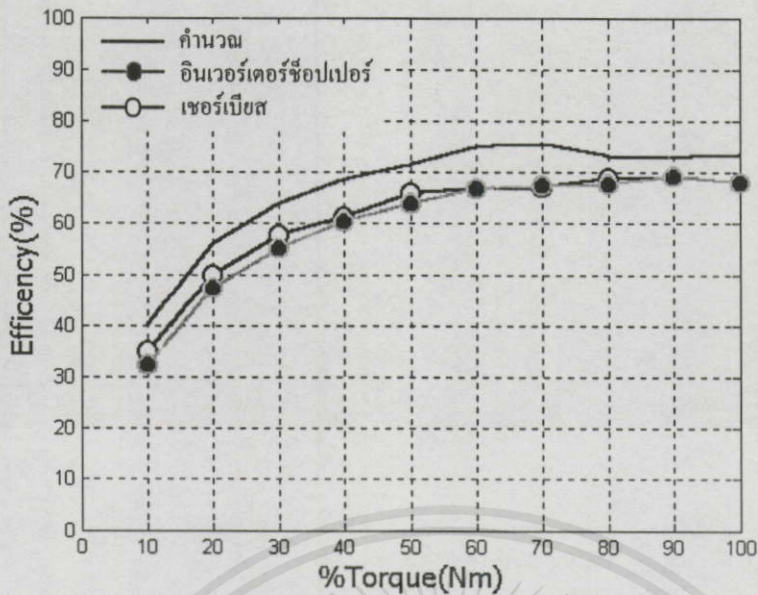
รูปที่ 5.36 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์กับแรงบิด ของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200rpm)

5.3.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

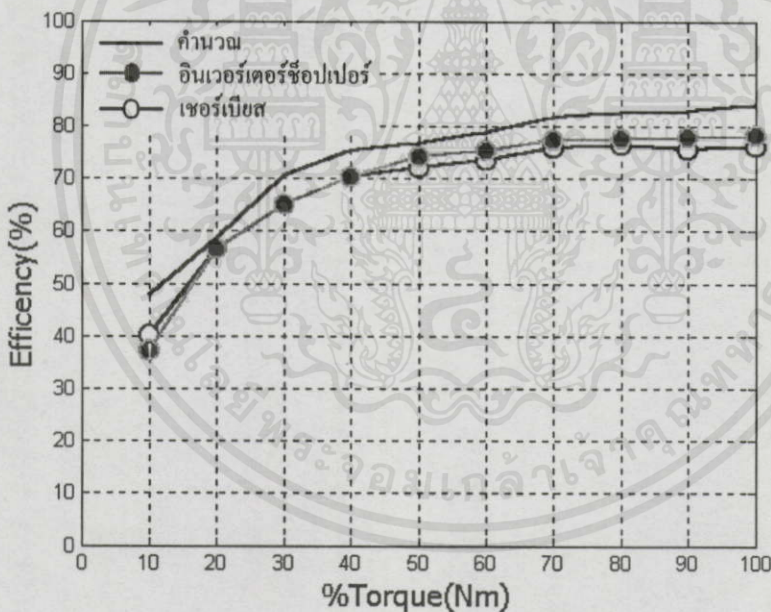
ในรูปที่ 5.37, 5.38 และรูปที่ 5.39 ได้แสดงรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบกับค่าแรงบิด โหลดตั้งแต่สภาวะไร้อะไรแรงบิดถึงค่าแรงบิดพิกัดที่ค่าสลิป 0.7, 0.4, 0.2 โดยได้เปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบีส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค่า $s = 0.7$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.37 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ
กับแรงบิด ที่ค่าสลิป $s = 0.7$ (450rpm)

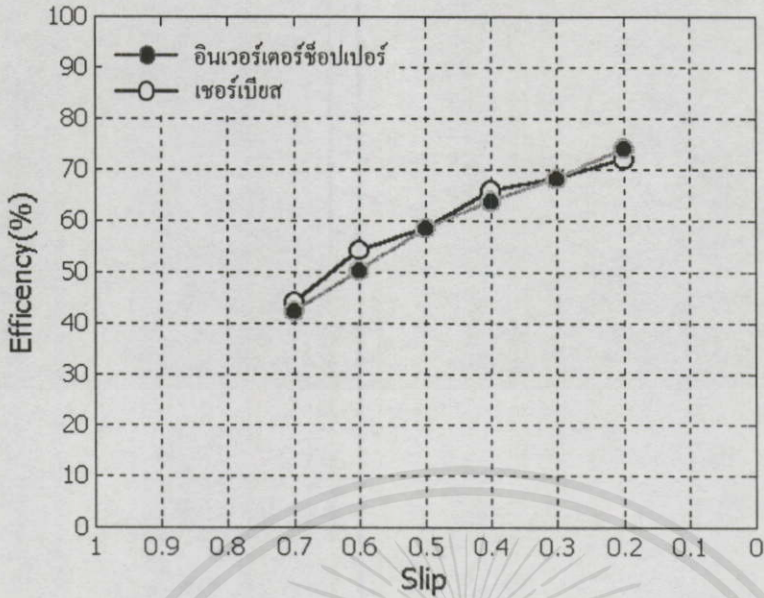


รูปที่ 5.38 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ กับแรงบิด ที่ค่าสลลิป $s = 0.4$ (900 rpm)

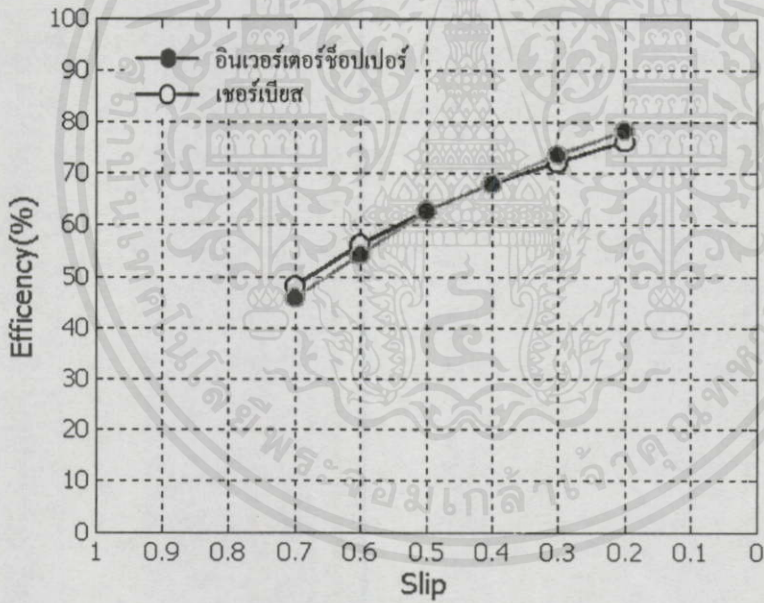


รูปที่ 5.39 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ กับแรงบิด ที่ค่าสลลิป $s = 0.2$ (1,200 rpm)

ส่วนในรูปที่ 5.40(ก) และ (ข) แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นกับระบบควบคุมเซอร์เบีส ที่แรงบิด 50% และที่แรงบิด 100% ของค่าพิกัด ในฟังก์ชันของค่าสลลิป (s) ที่ได้ควบคุมในงานวิจัยนี้



ก) แรงบิด 50 %



ข) แรงบิด 100 %

รูปที่ 5.40 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสอง 2 แบบ

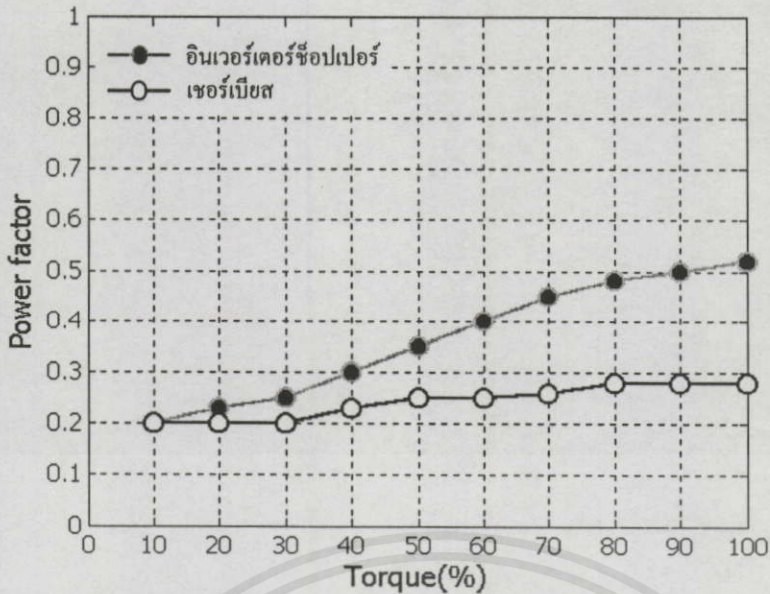
5.4 การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมแบบเซอร์

เบีสและแบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงงานไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

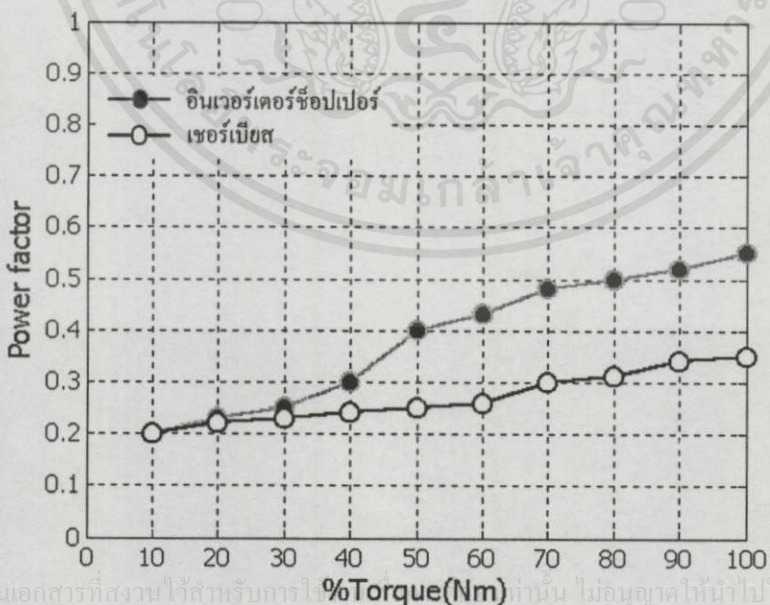
ไม่ว่ากร ใดก็ตาม การทดสอบโดยการป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ตั้งแต่สภาวะไร้แรงบิดจนถึงพิกัด โดย

ทำการควบคุมย่านสลลิป s ให้คงที่ตั้งแต่ 0.2 – 0.7 ค่าความเร็วรอบที่ควบคุม 1200 – 450rpm



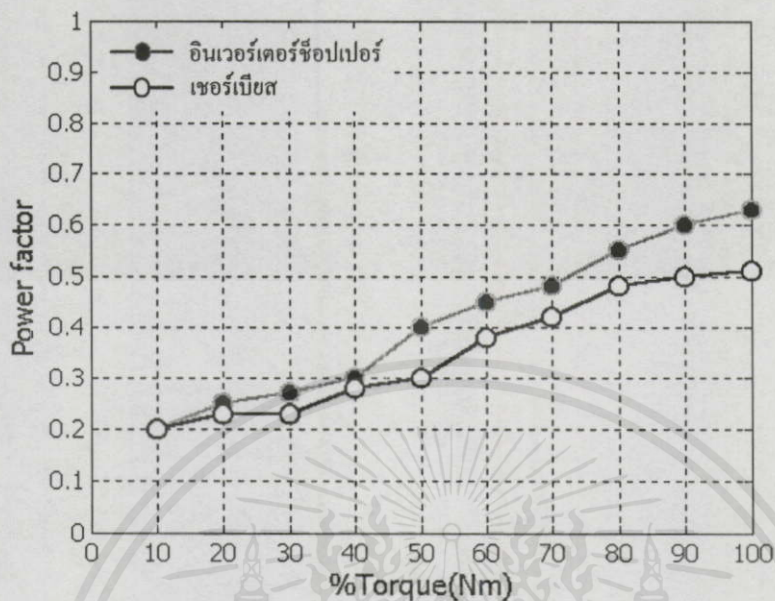
รูปที่ 5.41 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับแรงบิด
ของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ค่าสลลิป $s = 0.7$ (450rpm)

และได้แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบเซอร์เบ็ช โดยในรูปที่ 5.41, รูปที่ 5.42 และรูปที่ 5.43 ได้แสดงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดโหลดของระบบควบคุมทั้ง 2 ที่ค่าสลลิป $s = 0.7, 0.4, 0.2$ ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5.44 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบในฟังก์ชันของค่าสลลิป (s) ที่แรงบิด 50% และ 100% ตามลำดับ

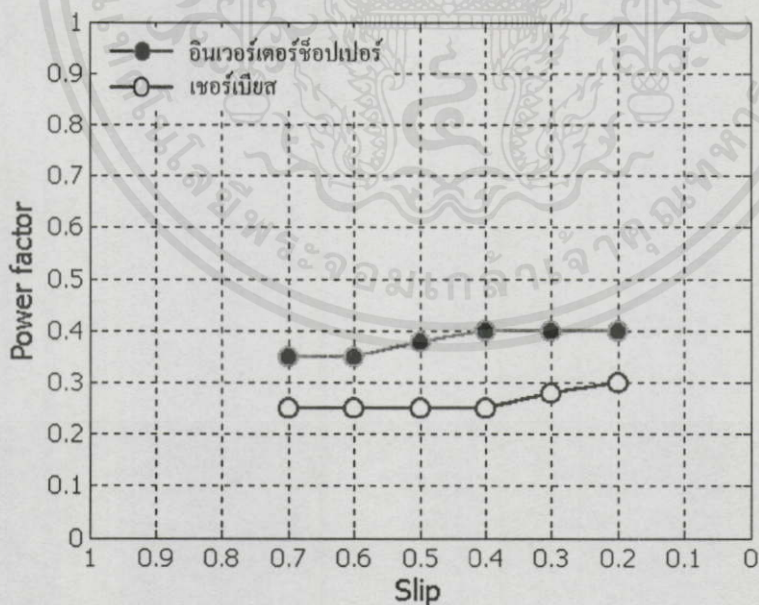


รูปที่ 5.42 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับแรงบิด
ของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ค่าสลลิป $s = 0.4$ (900rpm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

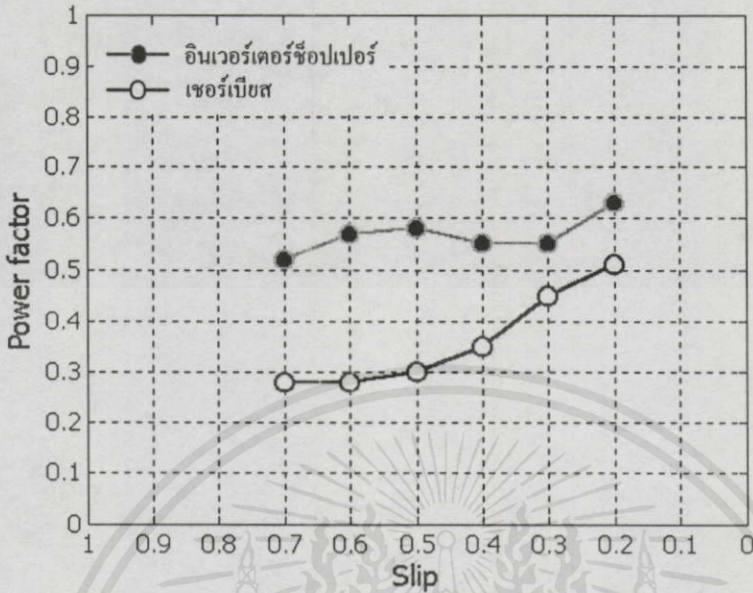


รูปที่ 5.43 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ากับแรงบิดของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่ค่าสลิป $s = 0.2$ (1,200rpm)



ก) แรงบิด 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

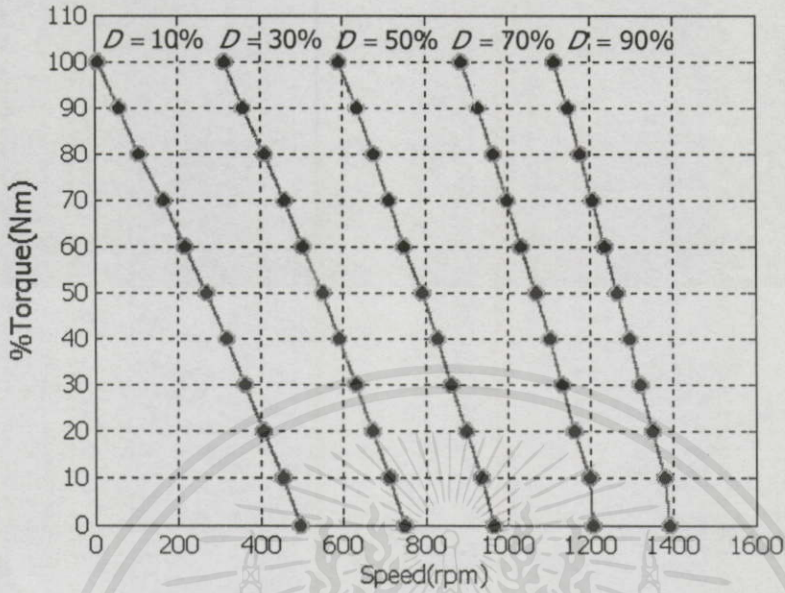


(ข) แรงบิด 100 %

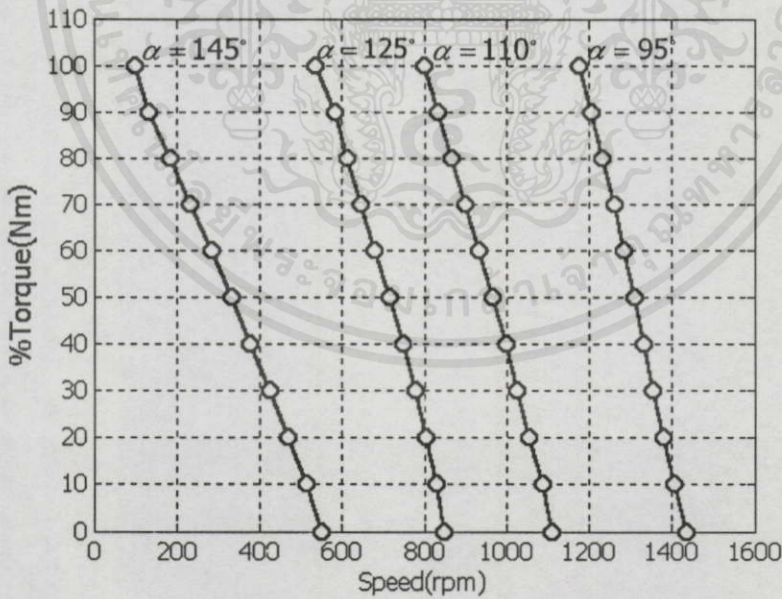
รูปที่ 5.44 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมทั้ง 2 แบบ

5.5 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของระบบควบคุมความเร็วรอบแบบเซอร์เบียสและแบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์

ในรูปที่ 5.45 และรูปที่ 5.46 แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ของระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ซ็อบเปอร์ที่สร้างขึ้นและระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสตามลำดับ ทำการทดสอบโดยการป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ตั้งแต่สภาวะไร้แรงบิดโหลดจนถึงค่าแรงบิดพิกัด โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบควบคุมย่านสลลิป (s) ในช่วงระหว่าง 0.2–0.7 ค่าความเร็วรอบที่ควบคุม 1200–450 rpm วัตถุประสงค์ของการทดสอบในหัวข้อนี้เพื่อแสดงสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียสแบบเดิม สำหรับระบบควบคุมที่สร้างขึ้นจะปรับวิถีไซเคิล (D) ของวงจรถ็อบเปอร์ไว้ที่ 10%, 30%, 50%, 70%, 90% ตามลำดับ โดยปรับมุมจุดชนวน (α) คงที่ไว้ที่มุม 160° ส่วนระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสจะทำการทดสอบในทำนองเดียวกันโดยการปรับมุมจุดชนวน (α) ไว้ที่มุม $\alpha = 95^\circ, 110^\circ, 125^\circ, 145^\circ$ ตามลำดับ จากผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ได้จริง



รูปที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบและค่าสลลิปของมอเตอร์ของระบบควบคุมแบบอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์



รูปที่ 5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบและค่าสลลิปของมอเตอร์ของระบบควบคุมเซอร์เบียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบ จากรูปที่ 5.31, 5.32 และ 5.33 ได้แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์กับค่าแรงบิดโหลดของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียสแบบเดิม จากการทดสอบพบว่า ค่าสลิป 0.7 ที่แรงบิด 100% ของค่าพิกัด ในรูปที่ 5.31 ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถป้อนคืนกำลังไฟฟ้าแเอ็คตีฟกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ได้เท่ากับ 375 W โดยคิดเป็น 36.76% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ของมอเตอร์ และที่สลิป 0.4 สามารถป้อนคืนกำลังไฟฟ้างดงกล่าวได้ 150 W ซึ่งคิดเป็น 14.49% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าที่สเตเตอร์ ในขณะที่ค่าสลิป 0.2 ที่ค่าแรงบิดพิกัดพบว่าระบบควบคุมที่สร้างขึ้นไม่สามารถป้อนคืนกำลังไฟฟ้างดงกล่าวกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ได้ เนื่องจากการปรับค่าควิต์ไซเกิลในวงจรช้อปเปอร์ที่ทำหน้าควบคุมความเร็วรอบให้ทำงานที่ค่าสลิปดังกล่าวคือ 1,200rpm มีค่าสูงมากซึ่งเท่ากับ $D = 96.4\%$ ส่งผลทำให้ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นไม่สามารถป้อนคืนพลังงานได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าในระบบเซอร์เบียสเดิมพบว่าระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถป้อนคืนค่ากำลังไฟฟ้างดงกล่าวได้ใกล้เคียงกับวิธีการของระบบเซอร์เบียส

ส่วนในรูปที่ 5.34, 5.35 และ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณกำลังไฟฟารีแเอ็คตีฟของอินเวอร์เตอร์กับแรงบิดโหลดของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียสที่สลิป 0.7, 0.4, 0.2 ตามลำดับ พบว่า ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถช่วยจำกัดการรับปริมาณกำลังไฟฟารีแเอ็คตีฟของอินเวอร์เตอร์จากแหล่งจ่ายเอซีไลน์ได้ดีกว่าระบบควบคุมเซอร์เบียส โดยที่ค่าสลิป 0.7 ที่ค่าพิกัดโหลด ค่ากำลังไฟฟารีแเอ็คตีฟของอินเวอร์เตอร์ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับ 201 Var. ในขณะที่ระบบควบคุมเซอร์เบียสจะมีค่ากำลังไฟฟ้างดงกล่าวเท่ากับ 606 Var. ซึ่งสามารถช่วยจำกัดค่ากำลังไฟฟารีแเอ็คตีฟของอินเวอร์เตอร์ลดลง 65.35% เมื่อคิดเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียสเดิม และที่สลิป 0.4 ลดลง 81.35%, ที่สลิป 0.2 ลดลง 96.29% ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.34, 5.35 และ 5.36

ในรูปที่ 5.37, 5.38 และ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพกับแรงบิดโหลดที่ค่าสลิป 0.7, 0.4, 0.2 ตามลำดับ ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียส พบว่า ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถช่วยรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนโดยรวมไม่ให้ตกลงตามค่าสลิป ได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุมเซอร์เบียส โดยที่ค่าสลิป 0.7 จะมีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 45.89 % ค่าสลิป 0.4 ประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 68.10% และค่าสลิป 0.2 จะมีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 78.19 % และได้แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพดังกล่าวในฟังก์ชันของค่าสลิปที่ควบคุมตั้งแต่ 0.2–0.7 ที่แรงบิดคงที่ 50% และ 100% ของค่าแรงบิดพิกัด ดังในรูปที่ 5.40(ก) และ(ข) ตามลำดับ

ส่วนในรูปที่ 5.44(ก) และ(ข) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่วากรณ์ไค้ค่าทั้งสาม ลึกทั้งหม้บให้คิดแปลงเนื้อหาและต่อเององถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้งที่มการนำ ไปใช้ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นกับค่าสลิปที่แรงบิดคงที่ 50% และ 100% ของค่าแรงบิดพิกัด เปรียบเทียบกับระบบควบคุมเซอร์เบียส พบว่าระบบควบคุมเซอร์เบียสจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ

ลงเมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านสลิปที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ เช่นที่ค่าสลิป 0.7 จะพบว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงกว่าระบบควบคุมเซอร์เบีส จาก 0.25 เป็น 0.35 และ 0.28 เป็น 0.52 ที่โหลด 50% และ 100% ของค่าพิกัด โหลดตามลำดับ โดยสูงขึ้นคิดเป็น 40% และ 85.71% ของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบควบคุมเซอร์เบีสเดิม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบการคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาค์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ เพื่อช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นข้อด้อยที่สำคัญของระบบเซอร์เบีส โดยได้ออกแบบใช้กับมอเตอร์ขนาดไม่เกิน 1 kW และสามารถแบ่งภาควงจรออกได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. ภาควงจรกำลัง โดยจะใช้ไดโอดกำลังต่อวงจรแบบบริดจ์เรกติไฟเออร์ 3 เฟสทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสลิปจากวงจร โรเตอร์ให้อยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าดีซี ผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งหน้าที่เป็นตัวกรองและรักษาให้กระแสดีซีไหลได้อย่างต่อเนื่อง ค่ากำลังไฟฟ้าดีซีจะถูกส่งผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ ที่ทำงานร่วมกันระหว่างวงจรช็อบเปอร์กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตทที่ทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์แบบเดิมและส่งผ่านหม้อแปลงกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์

2. ภาควงจรควบคุมการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยใช้มอสเฟทกำลังต่อคร่อมขนานกับชุดคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวเพียงตัวเดียวและทำการควบคุมมอสเฟทกำลังนี้ด้วยวิธีการช็อบเปอร์ที่ทำงานในโหมด PWM ซึ่งจะทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยการออกแบบควบคุมค่ามุมจุดชนวน (α) ให้คงที่ ค่ามุมสูงสุดเท่ากับ 160° ตลอดเวลา

ผลการทดสอบกับมอเตอร์ขนาด 1 kW ตั้งแต่ในสถานะไร้โหลดจนถึงค่าพิคคโหลด พบว่าที่ย่านสลิป 0.2-0.7 หรือที่ความเร็วรอบระหว่าง 1,200 – 450 rpm ระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นกว่าระบบเซอร์เบีสแบบเดิม โดยรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็น PWM ซึ่งช่วยทำให้กระแสไลน์ของระบบลดลงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไลน์ดีกว่าระบบเซอร์เบีส โดยสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ในโหมด PWM ซึ่งค่าสลิปได้ควบคุมไว้ในย่าน 0.2-0.7 โดยสามารถป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ได้ใกล้เคียงกับระบบเซอร์เบีสแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อภิปรายผลการวิจัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การควบคุมระบบการป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น สามารถรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยรวมได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุม

แบบเซอร์เบียสเคิม ซึ่งได้ผลตามสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ในข้อที่ 1 โดยความเร็วรอบสามารถควบคุมได้จากวงจรช้อปเปอร์ที่ทำงานร่วมกับชุดคอนเวอร์เตอร์ ในย่านสลิปเป็นบวกตั้งแต่ 0.2- 0.7 ได้ผลตามสมมติฐานในข้อที่ 2 เช่นที่ค่าพิคคโพลค่าสลิปเท่ากับ 0.7 พบว่าระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถป้องกันกำลังไฟฟ้ากลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอได้ประมาณ 375W ซึ่งคิดเป็น 36.76% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ของมอเตอร์ ในขณะที่ระบบเซอร์เบียสเคิม สามารถป้องกันค่ากำลังไฟฟ้างดงกล่าวได้ประมาณ 384 W ซึ่งคิดเป็น 37.64% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสเตเตอร์ โดยจะเห็นได้ว่าควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถป้องกันกำลังไฟฟ้ากลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอ เพื่อช่วยรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยรวมได้ใกล้เคียงกับระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส และที่เงื่อนไขการทำงานดังกล่าวระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์สามารถลดค่ากำลังไฟฟารีแเอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ลงได้โดยมีค่าประมาณ 210Var. ในขณะที่ระบบควบคุมเซอร์เบียสรับค่ากำลังไฟฟารีแเอคตีฟดังกล่าวเท่ากับ 606 Var. โดยค่ากำลังไฟฟารีแเอคตีฟที่ลดลงนี้คิดเป็น 65.35% ของค่ากำลังไฟฟารีแเอคตีฟของอินเวอร์เตอร์ในระบบควบคุมแบบเซอร์เบียสเคิม ส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเอชไอสูงขึ้นจาก 0.28 มาเป็น 0.52 โดยเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น 85.71% ของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนเซอร์เบียสเคิม ได้ตามกับสมมติฐานในข้อที่ 3 และรูปคลื่นกระแสเอชไออินเวอร์เตอร์จะมีลักษณะเป็น PWM ซึ่งช่วยทำให้กระแสไลน์ของระบบควบคุมที่สร้างขึ้นนี้ลดลง จาก 3.5 A ในระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ลดลงเหลือ 3.1 A โดยค่ากระแสที่ลดลงนี้คิดเป็น 11.43% ของค่ากระแสไลน์ในระบบควบคุมแบบเซอร์เบียส ระบบเดิม

ปัญหาที่พบในการวิจัย

ในการทดสอบระบบการป้องกันพลังงานสลิปกลับคืนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอไลน์ของระบบเซอร์เบียสและระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสลิปที่ป้อนคืนกับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอกับค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ที่ได้จากการวัดและทดสอบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในข้อมูลตารางใน ภาคผนวก ข. , ในรูปที่ 5.31 – 5.32 และ รูปที่ 5.37 – 5.39 ซึ่งสามารถสรุปสาเหตุของปัญหาที่พบได้ดังนี้

1. ในเงื่อนไขของการทดสอบ ไม่ได้นำผลของการสูญเสียทางกลของมอเตอร์ เนื่องจากค่าความฝืดและแรงลมด้าน รวมทั้งค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงมาพิจารณา
2. ในงานวิจัยครั้งนี้ พิจารณาการทำงานของอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ แบบอุดมคติ โดยไม่คิดผลของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น วงจรเรกติไฟเออร์ 3 เฟส , มอสเฟสกำลังที่ใช้เป็นสวิทช์ตัด ต่อในวงจรช้อปเปอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเทท ที่ใช้เอสซีอาร์ ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ พร้อมทั้งวงจรสับเบอที่ต่อระหว่างเอสซีอาร์แต่ละตัว

3. ในงานวิจัยครั้งนี้ มิเตอร์ที่ใช้ประกอบในการวัดเพื่อบันทึกผลการทดสอบ เป็นมิเตอร์แบบวัดค่าใช้งานจริง (true RMS) ชนิดสเกลแสดงผลแบบเข็ม ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการบันทึกค่าที่แสดงผล

จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและคำนวณเพื่อเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าสลิปที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์และค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่พบในงานวิจัยครั้งนี้

ข้อเสนอแนะ

ระบบควบคุมที่สร้างขึ้น จะเห็นได้ว่าสามารถช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์ให้มีค่าที่สูงขึ้นและสามารถป้อนคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี เพื่อช่วยรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้ใกล้เคียงกับระบบเซอร์เบิส ข้อดีของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์กำลังและอุปกรณ์ภาคควบคุมของระบบเซอร์เบิสเดิมได้ โดยในระบบการควบคุมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น กระทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของสวิตช์มอสเฟทกำลังที่ใช้ในวงจรช้อปเปอร์ไปเป็นสวิตช์ที่มีขนาดพิกัดกำลังสูงขึ้น เช่น GTO ซึ่งจะใช้เพียงแค่ตัวเดียวเท่านั้น ทำให้ต้นทุนของระบบการควบคุมนี้ต่ำ

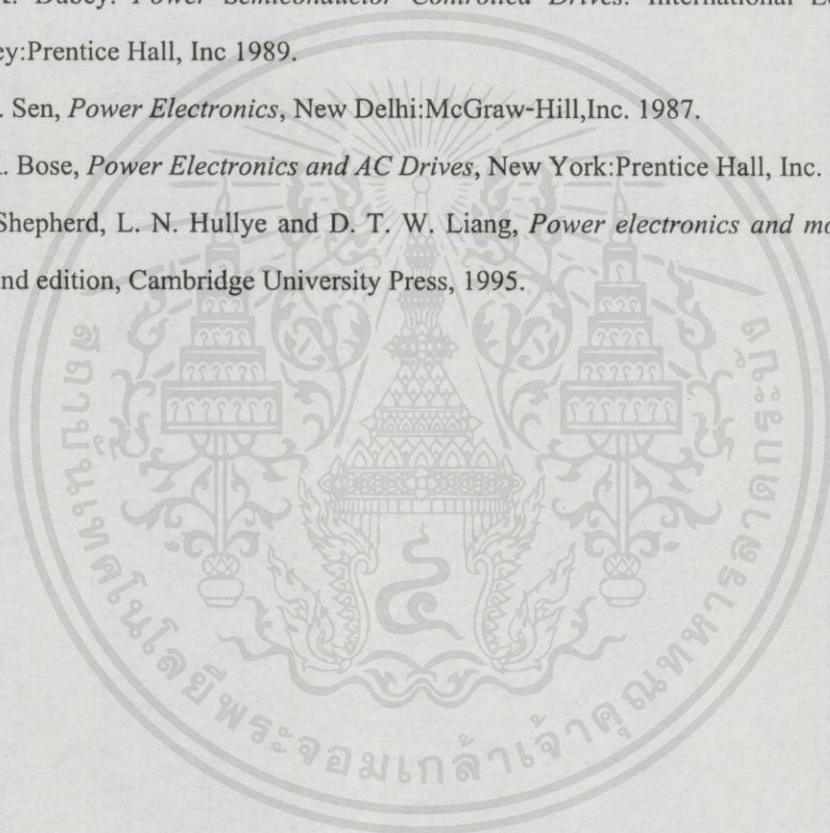
แต่อย่างไรก็ตามระบบควบคุมที่สร้างขึ้น ยังพบปัญหา เช่นยังเกิดฮาร์โมนิกส์ในกระแสไลน์ และระบบควบคุมนี้ไม่สามารถป้อนคืนกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของตัวอินเวอร์เตอร์กลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ ทำได้เพียงช่วยจำกัดปริมาณการรับค่ากำลังไฟฟ้าดังกล่าว ดังนั้นควรประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน(VSI) ควบคุมแทนชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตทเพื่อควบคุมการป้อนคืนกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายเอซี ซึ่งจะสามารถช่วยลดฮาร์โมนิกส์ในอันดับต่ำๆลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยุทธนา ขำสุวรรณ, วิจิตร กิณเรศ, วิริยะ พิเชษฐจำเรญ. “ระบบการคืนพลังงานสลิปเพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, 2544, หน้า 399-403.
- [2] ยงยุทธ นาราษฎร์ และ วิริยะ พิเชษฐจำเรญ. “การประยุกต์ใช้พีคดับลิเอ็มอินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการคืนกำลังไฟฟ้าสลิป.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22, 2542, หน้า 689-692.
- [3] เสถียร รัชญศรีรัตน์, พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล, ขจร อินวงษ์. “การควบคุมความเร็วมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ โดยวิธีการคืนพลังงานที่เกิดขึ้นจากสลิปกลับเข้าสู่ระบบ.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15, 2535, หน้า 29-35.
- [4] K. Taniguchi and H. Mori. “Application of a power chopper to the thyristor Scherbius.” IEE Proc., vol.133,Pt B, no.4, July 1986, pp. 255-229.
- [5] Seshagiri R. Doragla, Sudarshan Chakravorty, and Kashinath E. Hole. “A New Slip Power Recovery Scheme with Improved Supply Power Factor.” IEEE Trans. Power Electron.,vol. 3, no.2, April 1986, pp. 200-207.
- [6] K. Taniguchi, Y. Takeda and T. Hirasa. “High-performance slip-power recovery induction motor.” IEE Proc., vol 134, Pt B, no. 4, July 1987, pp. 193-197.
- [7] Zhu Zutong, Hong Dingguo, Chen Yusheng. “A new PWM type GTO scherbius industrial device with high power factor.”, Industry Applications Society Annual Meetind, 1989, vol.1, Conference Record of the 1989 IEEE, pp.843-847.
- [8] B.A.T. Al Zahawi, B.L. Jones and W. Drury. “Electrical characteristics of alternative recovery convertors for slip-energy recovery drives.”, IEE Proc., vol.138, Pt B, no.4, July 1991, pp. 193-203.
- [9] F. Liao, J. Sheng, and T. A. Lipo. “A New Recovery Scheme for Doubly fed Adjustable Speed Induction Motor Drives”., IEEE Trans.on Ind Appl., vol. 27, no. 4, July/August 1991, pp. 728-733.
- [10] W. Drury, B.L. Jones and J. E. Brown. “Application of controlled flywheeling to the recovery bridge of a static Kramer Drive.” IEE Proc., vol 130, Pt B, no.2, March 1983, pp. 73-85. อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

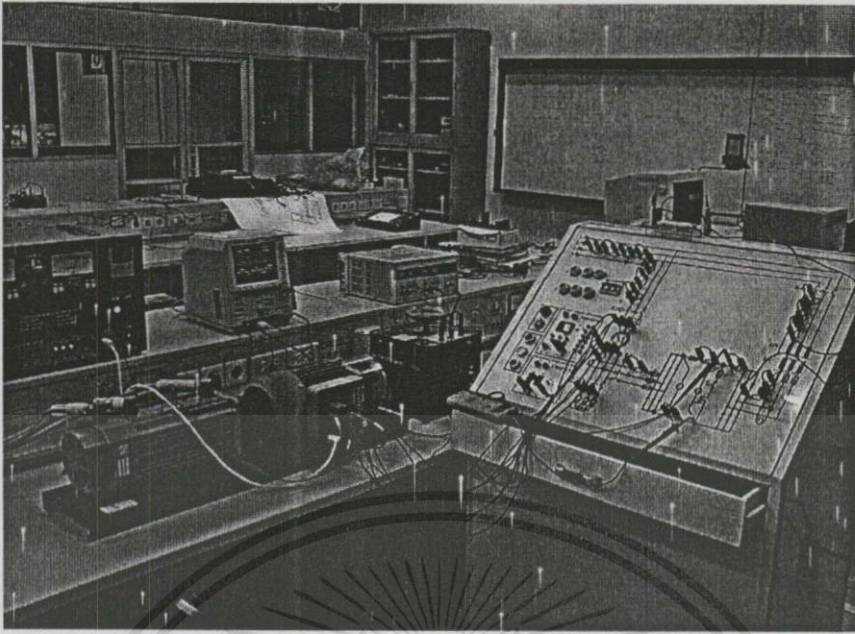
- [11] P. Pillay. "Calculation of Slip Energy Recovery Induction Motor Drive Behavior Using the Equivalent Circuit.", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. 30, no, 1, January/February 1994, pp. 154-163.
- [12] G.D. Marques. "Numerical simulation method for the slip power recovery system.", IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol.146. no. 1, January 1999, pp.17-24.
- [13] J. Faid, H. Barati, E. Akpınar. "Harmonic Analysis and Performance Improvement of Slip Energy Recovery Induction Motor Drives." IEEE Trans. Power Electron.,vol.16, no.3, May 2001, pp. 404-417.
- [14] G. K. Dubey. *Power Semiconductor Controlled Drives*. International Edition. New Jersey:Prentice Hall, Inc 1989.
- [15] P. C. Sen, *Power Electronics*, New Delhi:McGraw-Hill,Inc. 1987.
- [16] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drives*, New York:Prentice Hall, Inc. 1989
- [17] W. Shepherd, L. N. Hullye and D. T. W. Liang, *Power electronics and motor control*, second edition, Cambridge University Press, 1995.



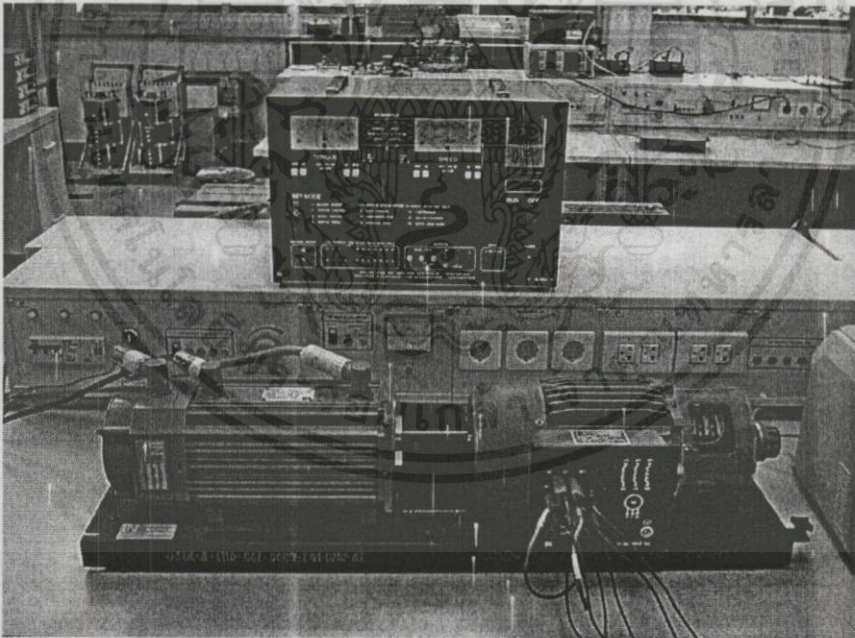
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะตีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



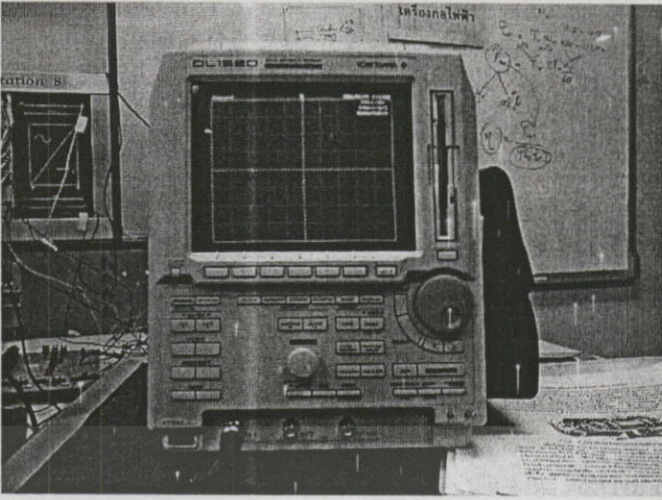
รูปที่ ก-1 ชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์ที่ใช้ในการทดสอบ



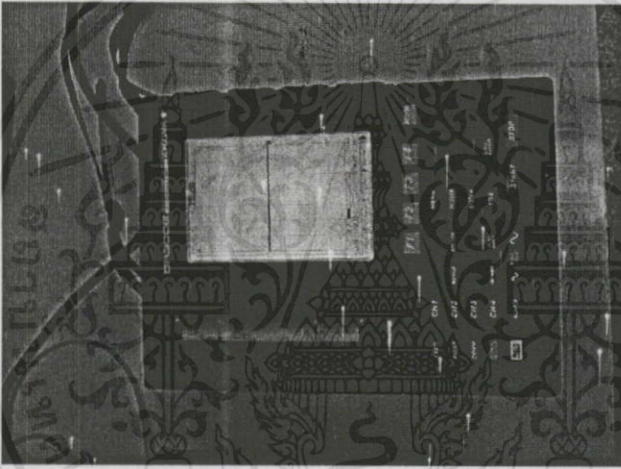
รูปที่ ก-2 เซอร์โวเบรก สำหรับจ่ายภาระหรือแรงบิดให้กับมอเตอร์

และมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ที่ใช้ในการทดสอบ

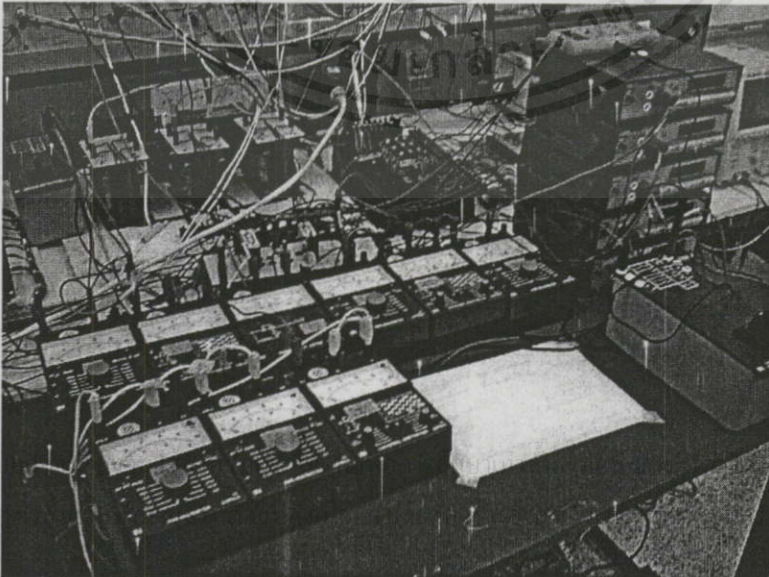
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป รุ่น DL 1520 ยี่ห้อโยโกกาวา



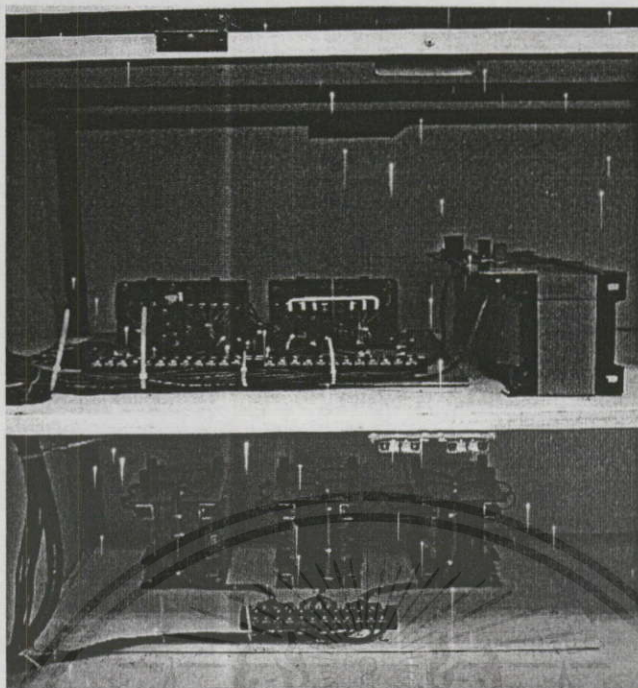
รูปที่ ก-4 เครื่องมือวัดซาร์โมนิกส์ สเปกตรัม รุ่น OR300 ยี่ห้อโยโกกาวา



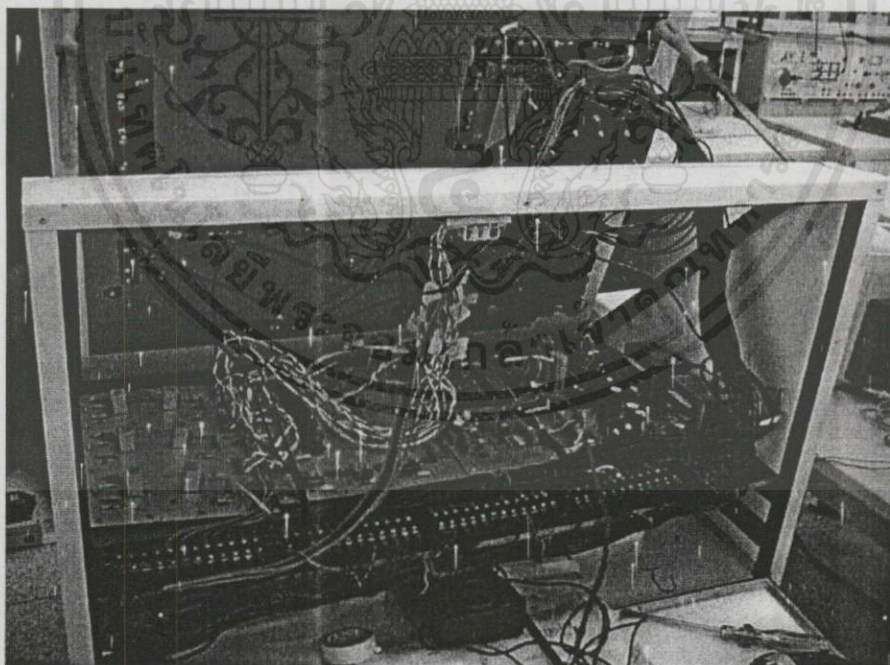
เอกสารนี้เป็น
ไม่ว่ากรณีใด

ที่ประโยชน์ด้านการค้า
ที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-5 เครื่องมือวัด วัดคัมมิเตอร์, เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์, โวลท์และแอมมิเตอร์ ยี่ห้อลูคัส



รูปที่ ก-6 หม้อแปลงของชุดอินเวอร์เตอร์และตัวเหนี่ยวนำ



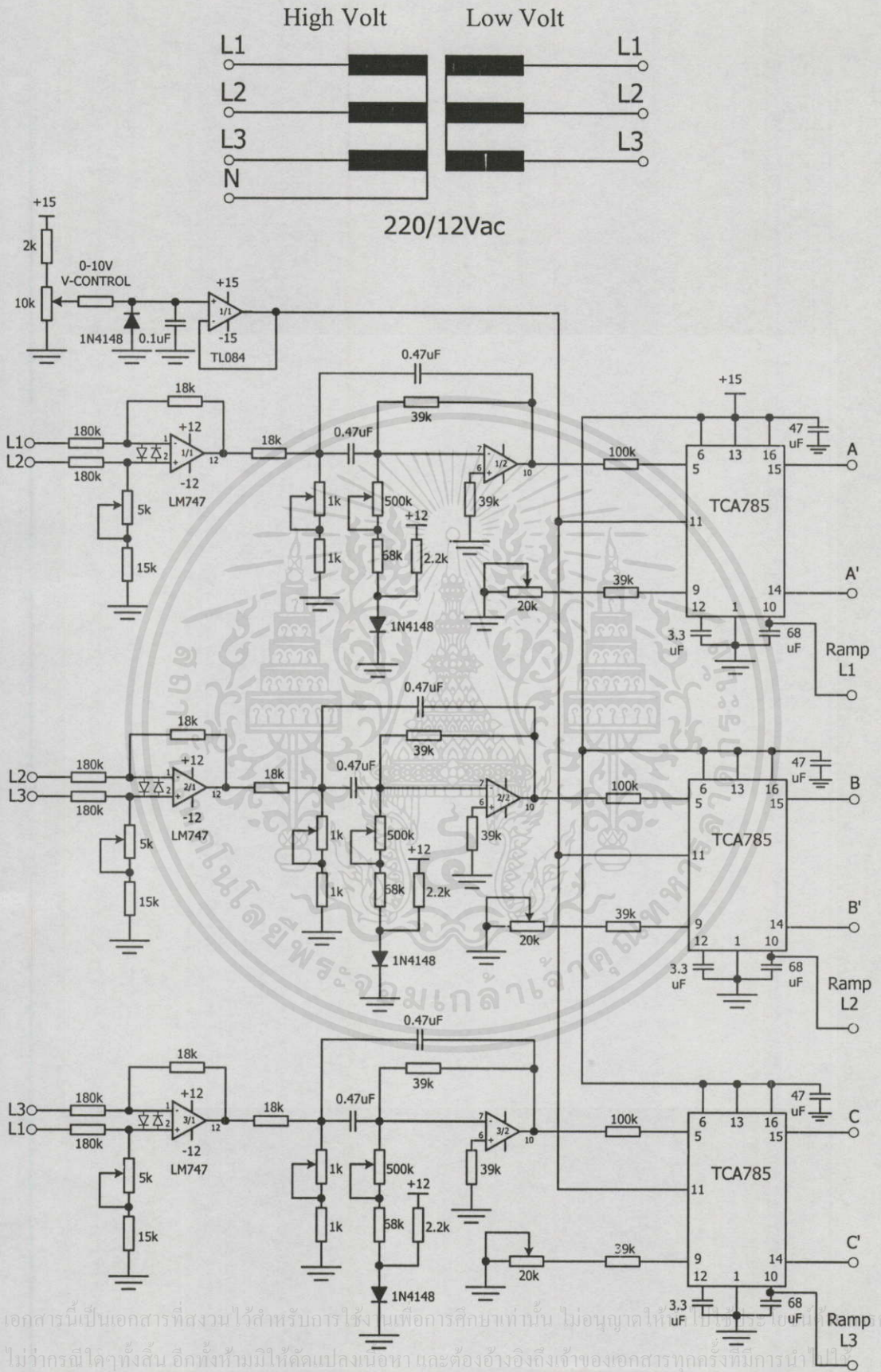
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-7 ภาควงจรกำลังชุดคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด ไลน์คอมมิวเตทกับวงจรช้อปเปอร์
ไมวาทกรพ ใค้ทงสน อักทงหมม ใค้คคเบลงเนอหา และตององงองค้จ้จองเอกสารทุคคทงทงการน้ไปใ้
และภาควงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์กับวงจร PWM ช้อปเปอร์



ภาคผนวก ข.

รายละเอียดวงจรถามข้อมูลอินเทอร์เน็ตชื่อปเปอร์

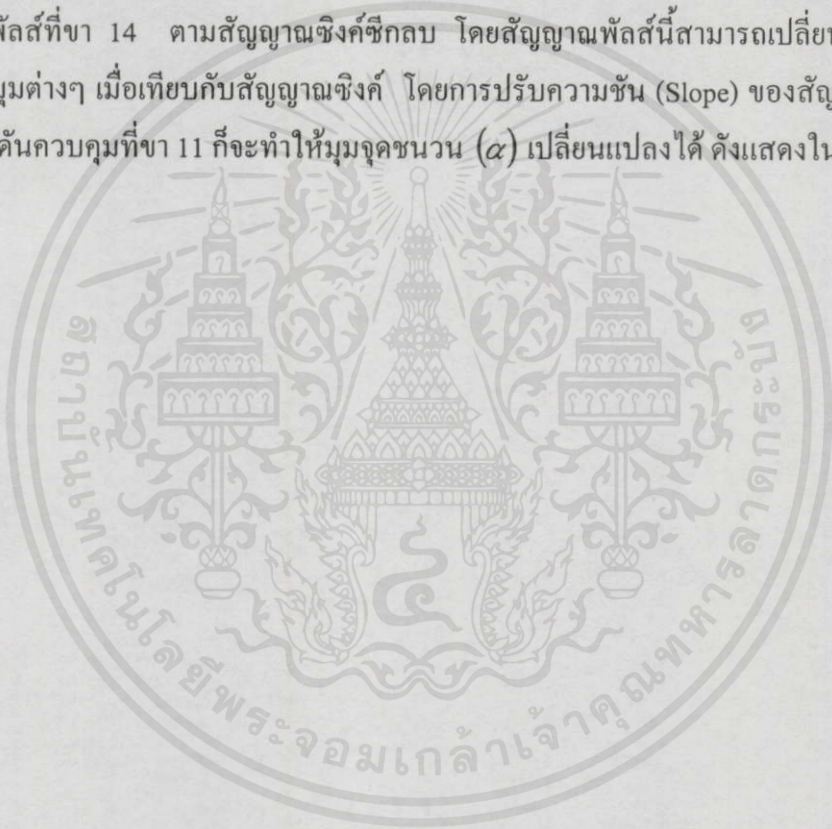
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



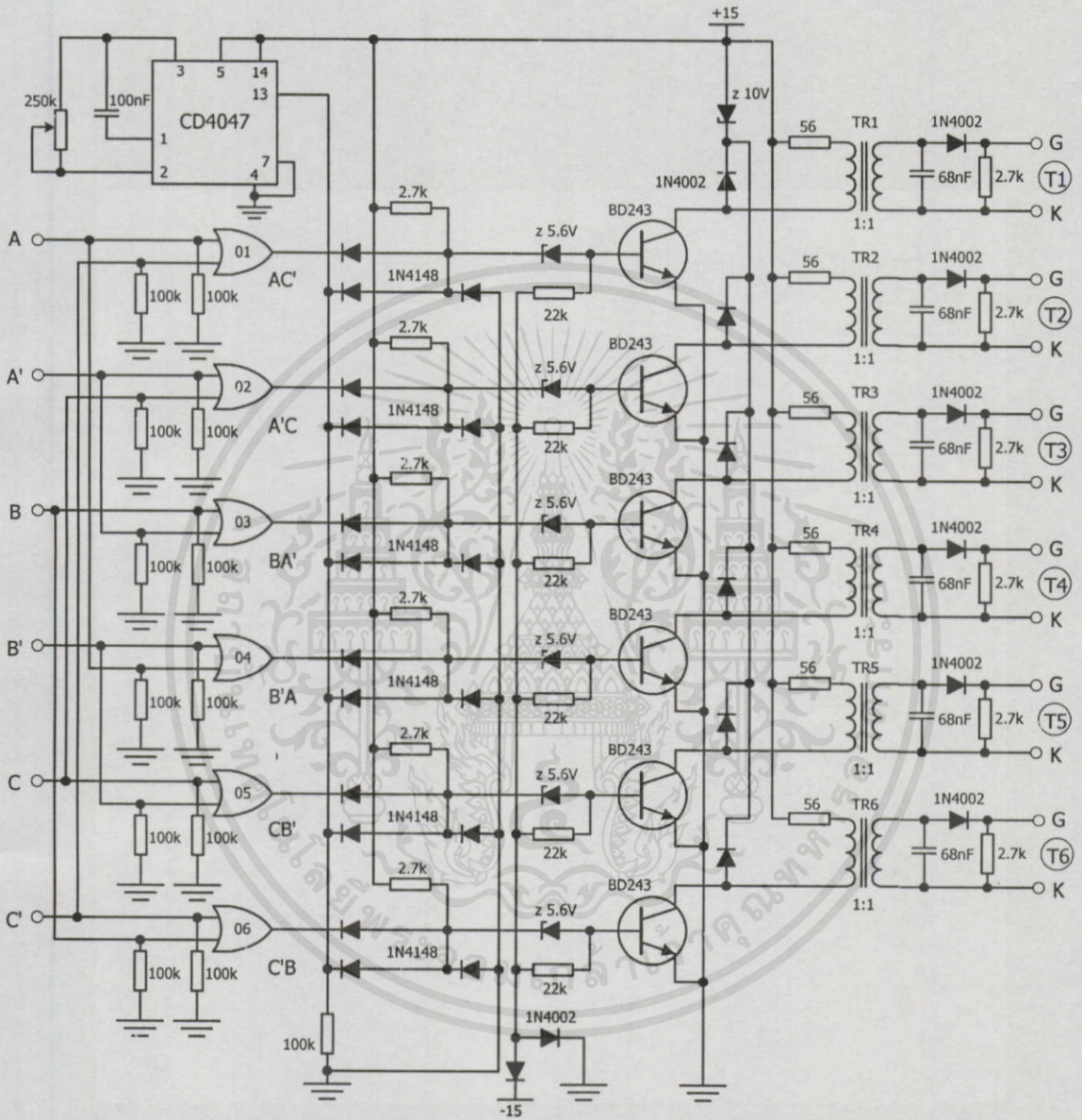
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้
 ไม่ทำการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

รูปที่ ข-1 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณจุดชนวนคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไดรฟ์คอมมิวเตท

ภาควงจรควบคุมการทำงานในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ภาคกำเนิดสัญญาณจุดชนวนคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิดไลน์คอมมิวเตทและภาคกำเนิดสัญญาณPWMของวงจรถ้อปเปอร์ โดยที่วงจรถ้ากำเนิดสัญญาณจุดชนวนเอสซีอาร์ จะใช้ไอซีเฟสคอนโทรลเบอร์ TCA785 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณโดยอาศัยสัญญาณซิงค์โครไนซ์ ที่ได้มาจากหม้อแปลง 1 เฟส 3 ลูกลดขนาดแรงดันระบบลงโดยต่อแบบสตาร์/สตาร์ แล้วเข้าวงจรตรวจสอบสัญญาณซิงค์ วงจรนี้จะใช้ออปแอมเบอร์ 747 เปรียบเทียบสัญญาณไลน์ ต่อวงจรแบบวงจรขยายผลต่าง(Differential amplifier)ที่สามารถปรับอัตราขยายได้ จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวผ่านวงจรเลื่อนเฟส(Phase shift) ซึ่งสามารถปรับระดับ (offset) เพื่อยกระดับสัญญาณซิงค์ได้ สัญญาณซิงค์นี้จะต่อเข้ากับขา 5 ของไอซีเบอร์ TCA785 ส่วนทางด้านเอาท์พุทจะเกิดสัญญาณพัลส์(Pulse) ที่ขา 15 ตามสัญญาณซิงค์ซีกบวกและเกิดสัญญาณพัลส์ที่ขา 14 ตามสัญญาณซิงค์ซีกลบ โดยสัญญาณพัลส์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงหรือเลื่อนไปตามมุมต่างๆ เมื่อเทียบกับสัญญาณซิงค์ โดยการปรับความชัน (Slope) ของสัญญาณแรมป์หรือปรับแรงดันควบคุมที่ขา 11 ก็จะทำให้มุมจุดชนวน (α) เปลี่ยนแปลงได้ ดังแสดงในรูปที่ ข-1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-2 แสดงวงจรภาคขยายสัญญาณจุดขนวน

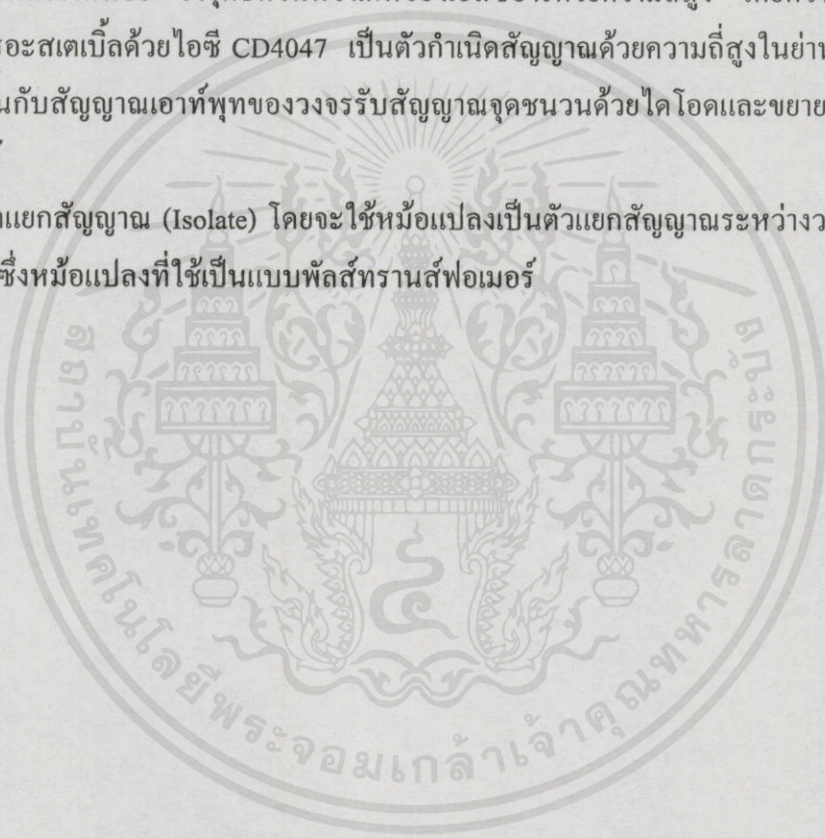
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในรูปที่ ข-2 แสดงวงจรภาคขยายสัญญาณจุดชนวน (Pulse amplifier) วงจรส่วนนี้มีไว้เพื่อช่วยในการจ่ายกระแสให้กับเกตเอสซีอาร์อย่างเพียงพอ ที่จะทำให้ออสซีลาร์นำกระแสได้โดยปกติแล้วสัญญาณที่ออกจากวงจรภาคกำเนิดสัญญาณจุดชนวน จะไม่สามารถจ่ายกระแสให้ออสซีลาร์ได้เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณมาขยายก่อน เพื่อให้จ่ายกระแสได้สูงขึ้นซึ่งวงจรนี้จะประกอบด้วย

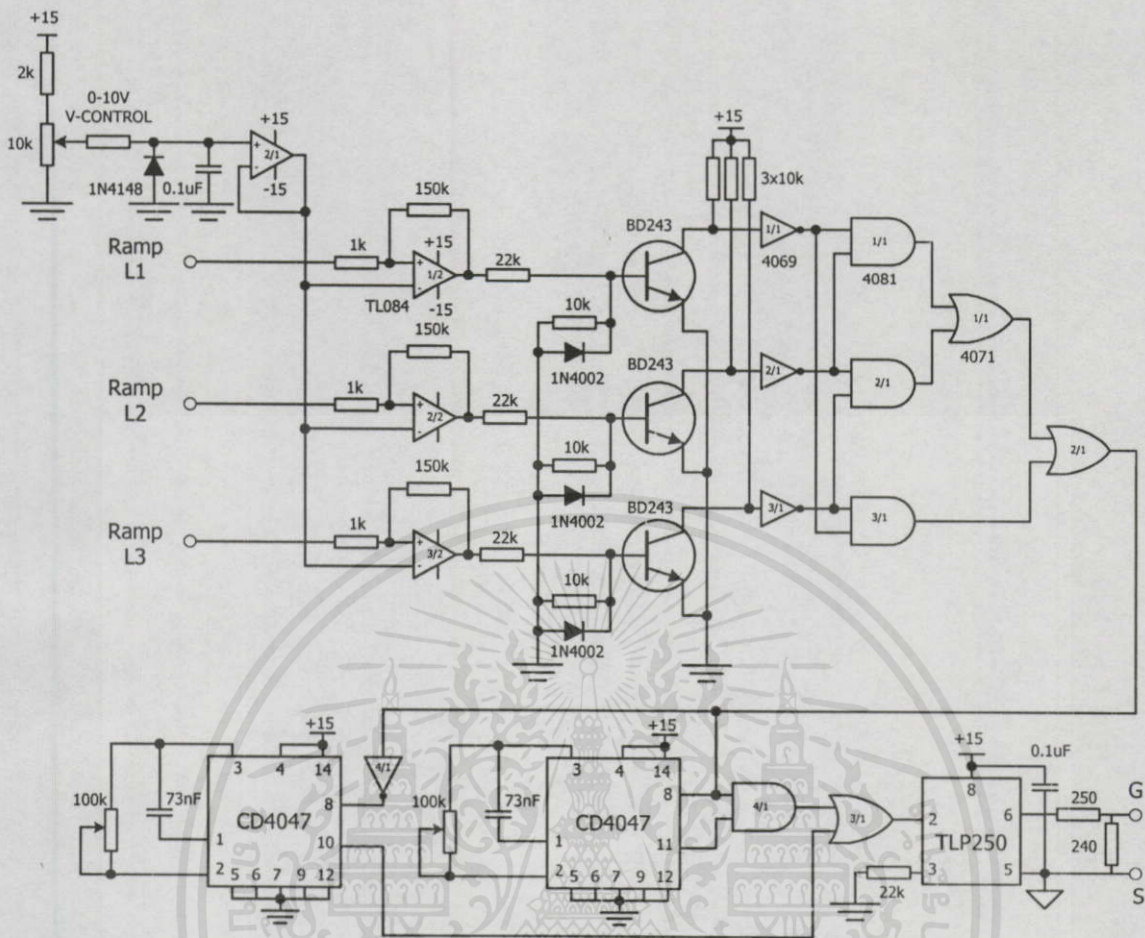
- ภาครับสัญญาณจุดชนวน ภาคนี้จะรับสัญญาณจากวงจรมกำเนิดสัญญาณ นำสัญญาณมาขยายกัน โดยผ่านออร์เกต เพื่อทำให้สัญญาณจุดชนวนของเอสซีอาร์นำกระแสห่างกัน 60°

- ภาคมอดูเลทความถี่สูง เนื่องจากต้องการความแน่นอนในการจุดชนวนให้ออสซีลาร์นำกระแสและใช้พลังงานน้อย จึงจุดชนวนที่ขาเกตของเอสซีอาร์ด้วยความถี่สูง โดยความถี่ดังกล่าวสร้างจากวงจรอะอสเตเบิลด้วยไอซี CD4047 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณด้วยความถี่สูงในย่าน 0-10 kHz แล้วนำไปแอนกับสัญญาณเอาต์พุทของวงจรรับสัญญาณจุดชนวนด้วยไดโอดและขยายกระแสด้วยทรานซิสเตอร์

- ภาคแยกสัญญาณ (Isolate) โดยจะใช้หม้อแปลงเป็นตัวแยกสัญญาณระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรมกำเนิดซึ่งหม้อแปลงที่ใช้เป็นแบบฟิลส์ทรานส์ฟอเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 แสดงภาคกำเนิดสัญญาณPWMของวงจรช้อปเปอร์

ส่วนในรูปที่ ข-3 แสดงภาคกำเนิดสัญญาณ PWM ของวงจรช้อปเปอร์โดยสัญญาณที่สร้างนี้จะต้องซิงค์โครไนซ์กับแรงดันคัตซีของคอนเวอร์เตอร์ที่ได้จากภาคกำเนิดสัญญาณจุดชนวน ซึ่งในภาควงจรนี้จะใช้สัญญาณแรมป์จากขา 9 ของไอซีเฟสคอนโทรลเบอร์ TCA 785 ทั้ง 3 เฟส มาเป็นสัญญาณซิงค์อ้างอิงให้กับวงจรช้อปเปอร์ และสร้างสัญญาณ PWM โดยการเปรียบเทียบแรงดันที่ควบคุมกับสัญญาณแรมป์ทั้ง 3 ด้วยออปแอมเบอร์ TL084 จากนั้นนำสัญญาณ PWM ดังกล่าวผ่านวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อตัดแรงดันด้านลบป้องกันไม่ให้เกทแอนกับอร์ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบและรวมสัญญาณ PWM เสียหาย นำสัญญาณ PWM ที่ได้ดังกล่าว ผ่านวงจรควบคุมการหน่วงเวลาการต่อวงจร (turn on) และตัดวงจร (turn off) ที่สร้างจากวงจรอะเสต์เบิลด้วยไอซี CD4047 เพื่อให้สัญญาณ PWM ที่สร้างสามารถปรับค่าได้ตามมุมจุดชนวน (α) ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำสัญญาณที่ได้นี้ไปขยายด้วยไอซี TLP250 ซึ่งเป็นวงจรขับนำ (Driver) เพื่อควบคุมการช้อปเปอร์มอเตอร์กำลัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ-1 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.7 ความเร็วรอบ 450 rpm ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซีโพลาร์

T (Nm)	ค่าที่ได้จากการวัด											ค่าที่ได้จากการคำนวณ						
	Iline (A)	Istator (A)	Iinv(LV) (A)	Iinv(HV) (A)	Idc (A)	Ir (A)	Vdc (V)	Vchop (V)	Ptotal (W)	Pstator (W)	Pinv (W)	PF	Qinv (VAR)	Qtotal (VAR)	Duty (%)	Pm (W)	Pm/Ptotal (%)	Pinv (W)
0.67	2.25	1.9	0.45	0.12	0.62	0.49	111.8	110.8	165	180	13	0.2	3	1440	9.8	31.57	19.14	21.95
1.35	2.28	1.95	0.95	0.23	1.24	0.9	109.3	107.3	225	270	88	0.23	6.6	1500	14.5	63.62	28.27	82.88
2.02	2.37	2.1	1.4	0.34	1.85	1.4	105.9	102.7	270	360	150	0.25	75	1560	18.1	95.19	35.26	138.3
2.69	2.45	2.2	1.8	0.45	2.45	1.9	103.6	99.6	315	480	195	0.3	96	1620	20.7	126.76	40.24	191.35
3.36	2.5	2.15	2.22	0.55	3.06	2.4	99.5	94.5	375	570	237	0.35	120	1635	23.2	158.34	42.22	240.92
4.04	2.6	2.25	2.62	0.65	3.7	2.9	96.5	90.3	435	660	270	0.4	138	1710	26.8	190.38	43.77	282.67
4.71	2.75	2.35	2.96	0.74	4.33	3.3	92.4	85.3	495	750	300	0.45	165	1770	31.7	221.95	44.84	311.43
5.38	2.85	2.49	3.3	0.83	4.92	3.7	91.7	83.4	555	840	330	0.48	180	1830	33.7	253.53	45.68	350.22
6.05	2.98	2.6	3.6	0.91	5.53	4.2	89.3	80	630	930	360	0.5	189	1920	35.4	285.10	45.25	388.04
6.72	3.1	2.75	3.9	0.98	6.13	4.7	86.4	76	690	1020	375	0.52	210	1980	39	316.67	45.89	409.2

ตารางที่ ๕-2 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.6 ความเร็วรอบ 600 rpm ของระบบควบคุมเวกเตอร์ช็อบเปอร์

T (Nm)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ											ค่าที่ได้จากการคำนวณ						
	Iline (A)	Istator (A)	Iinv(LV) (A)	Iinv(HV) (A)	Idc (A)	Ir (A)	Vdc (V)	Vchop (V)	Ptotal (W)	Pstator (W)	Pinv (W)	PF	Qinv (VAR)	Qtotal (VAR)	Duty (%)	Pm (W)	Pm/Ptotal (%)	Pinv (W)
0.67	2.22	1.9	0.45	0.12	0.63	0.49	95.5	94.3	180	180	24	0.2	48	1455	22	42.10	23.39	27.9
1.35	2.3	2	0.88	0.22	1.24	0.95	92.6	90.2	240	285	75	0.23	69	1530	25.6	84.82	35.34	81.28
2.02	2.36	2.1	1.28	0.33	1.85	1.4	89.6	86.4	300	360	120	0.25	84	1660	28.9	126.92	42.31	129.13
2.69	2.45	2.2	1.68	0.42	2.45	1.92	87.5	83.4	360	480	159	0.3	105	1605	31.7	169.02	46.95	173.57
3.36	2.55	2.2	2.05	0.52	3.07	2.4	84.9	79.5	420	570	192	0.35	126	1650	35.4	211.12	50.27	210.5
4.04	2.65	2.26	2.42	0.61	3.69	2.9	82	75.5	480	660	222	0.4	144	1710	39.9	253.84	52.88	239.03
4.71	2.75	2.36	2.74	0.64	4.29	3.3	79.9	72.6	555	900	249	0.45	162	1770	42.9	295.94	53.32	267.98
5.38	2.88	2.49	3	0.76	4.94	3.75	76.5	67.8	630	930	264	0.48	180	1845	46.4	338.04	53.66	289.51
6.05	2.93	2.6	3.2	0.81	5.62	4.2	74.2	64.5	690	1005	279	0.55	162	1860	49.4	380.13	55.09	309.19
6.72	3.1	2.71	3.4	0.86	6.17	4.7	71.5	66.7	780	1020	300	0.55	150	1950	53	422.23	54.13	319.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้
 ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้ หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ

ไม่มีการตีพิมพ์ในส่วนนี้ หากมีให้ตีพิมพ์ กรุณาแจ้งให้ทราบ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ-3 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.5 ความเร็วรอบ 750 rpm ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

T (Nm)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ										ค่าที่ได้จากการคำนวณ							
	Iline (A)	Istator (A)	Iinv(LV) (A)	Iinv(HV) (A)	Idc (A)	Ir (A)	Vdc (V)	Vchop (V)	Ptotal (W)	Pstator (W)	Pinv (W)	PF	Qinv (VAR)	Qtotal (VAR)	Duty (%)	Pm (W)	Pm/Ptotal (%)	Pinv (W)
0.67	2.2	1.92	0.4	0.1	0.55	0.45	79	77.8	180	180	4.5	0.2	42	1440	37.3	52.62	29.23	16.54
1.35	2.25	1.95	0.78	0.2	1.22	0.9	75.6	73.5	270	270	57	0.24	57	1470	41	106.03	39.27	58.25
2.02	2.3	2	1.15	0.29	1.85	1.45	74.3	71	300	360	90	0.3	72	1500	43.4	158.65	52.88	96.68
2.69	2.35	2.05	1.5	0.38	2.45	1.9	72.6	68.4	390	465	123	0.35	87	1530	44.6	211.27	54.17	135.12
3.36	2.48	2.15	1.83	0.45	3.09	2.4	69.5	64.1	450	555	150	0.38	102	1620	48.8	263.89	58.64	160.61
4.04	2.6	2.25	2.15	0.53	3.72	2.9	67.2	60.7	540	660	168	0.48	114	1680	51.2	317.30	58.76	188.44
4.71	2.65	2.3	2.4	0.61	4.37	3.3	65.9	58.6	600	750	192	0.51	126	1680	53	369.92	61.65	215.28
5.38	2.8	2.5	2.65	0.66	4.96	3.8	61.4	52.6	690	840	195	0.52	135	1740	58	422.55	61.24	220.36
6.05	2.9	2.58	2.9	0.73	5.55	4.2	61.5	50.7	750	930	225	0.55	150	1830	59.7	475.17	63.36	240.15
6.72	3	2.7	3	0.77	6.14	4.7	57.7	46.9	840	1020	225	0.55	210	1890	63.8	527.79	62.83	239.54

ตารางที่ 4- ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.4 ความเร็วรอบ 900 rpm ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์

T (Nm)	Iline (A)	Istator (A)	Iinv(LV) (A)	Iinv(HV) (A)	Idc (A)	Ir (A)	Vdc (V)	Vchop (V)	Ptotal (W)	Pstator (W)	Pinv (W)	PF	Qinv (VAR)	Qtotal (VAR)	Duty %	Pm (W)	Pm/Ptotal %	ค่าที่ได้จากการคำนวณ	
																		Pm (W)	% (W)
0.67	2.25	1.99	0.36	0.11	0.6	0.49	62.5	61.3	195	165	6	0.2	48	1500	48.2	63.15	32.38	7.58	7.58
1.35	2.3	2	0.7	0.19	1.24	0.95	59.7	57.6	270	270	36	0.23	66	1530	51.5	127.23	47.12	42.73	42.73
2.02	2.35	2.04	1.05	0.26	1.67	1.45	58.4	55.1	345	360	66	0.25	78	1560	54.2	190.38	55.18	62.5	62.5
2.69	2.45	2.1	1.35	0.35	2.46	1.95	56.2	51.9	420	465	87	0.3	90	1605	57.7	253.53	60.36	95.84	95.84
3.36	2.5	2.15	1.65	0.42	3.09	2.4	55.5	49.8	495	570	108	0.4	108	1635	58.2	316.67	63.97	126.2	126.2
4.04	2.6	2.2	1.93	0.48	3.71	2.9	52.8	46.2	570	660	120	0.43	120	1680	59.3	380.76	66.80	152.61	152.61
4.71	2.72	2.35	2.1	0.54	4.31	3.3	50.5	43	660	750	132	0.48	120	1740	61.7	443.91	67.26	169.63	169.63
5.38	2.8	2.45	2.34	0.59	4.9	3.7	49	40.4	750	840	147	0.5	129	1770	62.5	507.05	67.61	147.77	147.77
6.05	2.9	2.56	2.55	0.64	5.52	4.2	47	37.5	825	945	150	0.52	135	1830	70.9	570.20	69.12	164.26	164.26
6.72	3	2.7	2.68	0.67	6.15	4.7	44.8	34.1	930	1035	150	0.55	135	1920	72.5	633.35	68.10	174.53	174.53

ตารางที่ ๗-5 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.3 ความเร็วรอบ 1050 rpm ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์

T (Nm)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ											ค่าที่ได้จากการคำนวณ						
	iline (A)	lstator (A)	linv(LV) (A)	linv(HV) (A)	ldc (A)	lr (A)	Vdc (V)	Vchop (V)	Ptotal (W)	Pstator (W)	Pinv (W)	PF	Qinv (VAR)	Qtotal (VAR)	Duty (%)	Pm (W)	Pm/Ptotal (%)	Pinv (W)
0.67	2.2	1.95	0.28	0.095	0.54	0.42	45.3	44.3	180	150	6	0.2	43.5	1440	61.3	73.67	40.93	3.72
1.35	2.25	1.95	0.62	0.16	1.24	0.96	43.9	41.7	270	270	18	0.23	60	1470	64.9	148.44	54.98	27.5
2.02	2.33	2.01	0.92	0.23	1.86	1.45	41.3	38	360	360	39	0.25	66	1530	66.7	222.11	61.70	49.53
2.69	2.38	2.06	1.15	0.29	2.47	1.94	40.5	36.3	444	450	54	0.3	78	1560	67.9	295.78	66.62	70.67
3.36	2.48	2.12	1.35	0.35	3.8	2.4	37.2	31.9	540	555	60	0.4	87	1605	73.1	369.45	68.42	75.14
4.04	2.55	2.22	1.58	0.4	3.7	2.86	36.7	30.3	630	660	75	0.42	93	1620	75.9	444.22	70.51	82.88
4.71	2.65	2.32	1.75	0.44	4.34	3.28	35	27.5	720	750	75	0.45	99	1680	77.8	517.89	71.93	90.85
5.38	2.75	2.43	1.88	0.47	4.9	3.7	33.9	25.5	810	840	75	0.5	99	1710	80.2	591.56	73.03	93.03
6.05	2.85	2.55	1.99	0.25	5.53	4.2	32.8	23.2	900	930	75	0.5	102	1800	82.7	665.23	73.91	90.97
6.72	2.96	2.68	2	0.27	6.17	4.7	31.1	20.4	1005	1035	81	0.55	102	1830	85.1	738.90	73.52	85.94

ตารางที่ ๕-6 ผลการทดสอบที่ค่าสลิป 0.2 ความเร็วรอบ 1200 rpm ของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซีโพลาร์

T (Nm)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ											ค่าที่ได้จากการคำนวณ						
	Iline (A)	Istator (A)	Iinv(LV) (A)	Iinv(HV) (A)	Idc (A)	Ir (A)	Vdc (V)	Vehop (V)	Ptotal (W)	Pstator (W)	Pinv (W)	PF	Qinv (VAR)	Qtotal (VAR)	Duty (%)	Pm (W)	Pm/Ptotal (%)	Pinv (W)
0.67	2.05	1.9	0.27	0.095	0.62	0.49	29.3	28.2	225	165	4.5	0.2	43.5	1410	74.4	84.19	37.42	19.45
1.35	2.18	1.905	0.48	0.135	1.25	0.95	24.8	22.6	300	255	13.5	0.25	48	1410	78	169.65	56.55	35.92
2.02	2.25	1.91	0.69	0.183	1.86	1.45	25.1	21.7	390	360	30	0.27	180	1470	81	253.84	65.09	48.94
2.69	2.33	2.03	0.88	0.201	2.47	1.93	24.5	20.2	480	450	60	0.3	195	1500	82.7	338.04	70.42	58.77
3.36	2.4	2.1	1	0.256	3.7	2.35	22.5	17.2	570	540	60	0.4	195	1530	85.7	422.23	74.08	65.43
4.04	2.48	2.17	1.1	0.28	3.72	2.85	21.1	14.8	675	654	60	0.45	195	1575	87.6	507.68	75.21	68.86
4.71	2.55	2.26	1.18	0.29	4.31	3.2	20.7	13.2	765	735	60	0.48	195	1605	90.5	591.88	77.37	69.06
5.38	2.6	2.35	1.05	0.27	4.92	3.6	18.8	10.3	870	825	-	0.55	45	1620	92.8	676.07	77.71	66.06
6.05	2.72	2.45	0.93	0.24	5.54	4.2	17.5	8	975	915	-	0.6	39	1650	95.2	760.27	77.98	59.87
6.72	2.8	2.7	0.8	0.21	6.15	4.7	18.1	7.2	1080	1020	-	0.63	30	1680	96.4	844.46	78.19	50.48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าสลิป (P_2)

$$P_2 = sP_{ag} \quad (\text{ด้านโรเตอร์})$$

$$P_2 = \left[V_{dc} - \left(\frac{3s}{\pi} (X_1' + X_2) \right) I_{dc} \right] I_{dc} - (2sR_1' + 2R_2 + R_f) I_{dc}^2$$

กำลังไฟฟ้าเชื่อมโยงดีซี (P_{dc})

$$P_2 = P_{dc} \quad (\text{ด้านดีซี})$$

$$= V_{chop} I_{dc}$$

$$= \left(\frac{1.35}{a_T} (1-D) V_s \cos \alpha \right) \left[\frac{\left(\frac{1.35}{a_m} s V_s - \frac{1.35}{a_T} (1-D) V_s |\cos \alpha| \right)}{R_m} \right]$$

กำลังไฟฟ้าที่ป้อนคืนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีไลน์ (P_{inv})

$$P_{inv(1)} = P_{dc} = P_2 \quad (\text{ด้านแหล่งจ่ายเอซี})$$

$$= 3 \frac{E_s \sqrt{6}}{a_T \pi} (1-D) I_{dc} \cos \alpha$$

กำลังทางกล (P_m) ที่ปลายเพลลาของมอเตอร์

$$P_m = T \omega_r$$

$$= T \frac{2\pi}{60} n_r$$

ประสิทธิภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อน

$$\eta = \frac{P_m}{P_{total}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

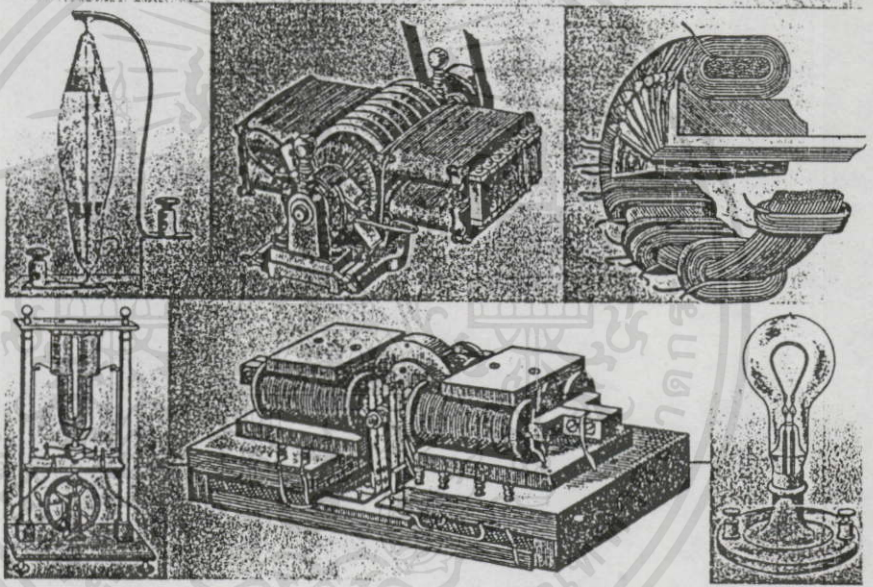
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม $\frac{P_m}{P_l - P_{inv}}$ ใดดแปลงเป็น $\frac{P_m}{P_l}$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_m}{P_l - P_{inv}} > \frac{P_m}{P_l}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



EECON-24 KMUTT



Volume 1

สำนักพิมพ์เทคโนโลยี (PT)
ศูนย์บริการเทคโนโลยี (CT)
หน่วยที่ดูแลงาน
วิชาการ (GN)

ดำเนินการโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

งานไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการคืนพลังงานสลลิปเพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

Slip Energy Recovery System for Wound Rotor Induction Motor Variable Speed Drive Using Inverter - Chopper Control

ยุทธนา ขำสุวรรณ วิจิตร กิณเรศ วิริยะ พิเชษฐจำเริญ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร.(02)7372541 ต่อ 3516 E-Mail : s3061122@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบการคืนพลังงานสลลิป เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีการคืนพลังงานสลลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอชไอ โดยการควบคุมให้อินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ทำงานในโหมด PWM ในขณะที่ปรับรอบมอเตอร์ สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอนี้สามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบเซอร์เบีส ที่มอเตอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์ ค่าสลลิปในช่วง 0.2-0.6 ตั้งแต่สภาวะไร้โหลดจนถึงค่าโหลดพิกัด ซึ่งจะได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงกว่าระบบเซอร์เบีสถึง 50% และกระแสเอชไอ PWM ของอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดลดลงทำให้กระแสไลน์ของระบบขับเคลื่อนลดลงอย่างมาก

Abstract

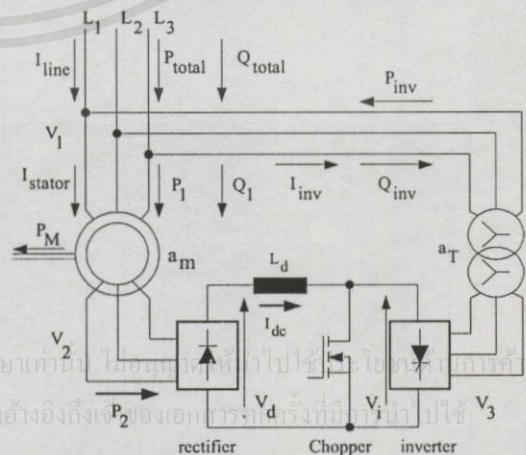
This paper presents the design and development of a slip energy recovery system, for the purpose of motor speed control by using an inverter-chopper circuit to feedback the slip energy to AC line. The aim of this research is to improve the AC line input power factor by operating the inverter-chopper in a PWM mode with variable pulse-width, while changing the motor speed. The performance improvement of this proposed system can be shown by comparing with the conventional scherius system by experiment, using a 1 kW motor with the slip values variable in the range of 0.2-0.6 and load torque from no-load to full load. The test results show that the inverter-chopper system can really improve the AC line input power factor to be 50% higher than the scherbius system and the PWM AC current of the inverter is also reduced, causing the total AC line input current of the drive system to be greatly reduced.

Keywords: slip, speed control, inverter - chopper

1. บทนำ

ระบบการขับเคลื่อนทางกลขนาดใหญ่ด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ เมื่อต้องการปรับความเร็วรอบสามารถทำได้โดยการปรับความต้านทานในวงจรวอเตอร์ ซึ่งความเร็วรอบจะถูกควบคุมให้อยู่ในย่านต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน โดยที่สลลิปมีค่าเป็นบวก ปัญหาของการควบคุมความเร็วรอบโดยวิธีการปรับความต้านทานในวงจรวอเตอร์คือประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลง เนื่องจากพลังงานที่เกิดจากค่าสลลิปไปสูญเสียบนตัวความต้านทานในรูปของความร้อน ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยใช้ระบบเซอร์เบีส ซึ่งเป็นวิธีการนำพลังงานสลลิปกลับคืนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชไอ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์สูงขึ้น แต่ข้อด้อยที่สำคัญของระบบเซอร์เบีสคือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำและรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมส่งผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ในกระแสไลน์ [1] ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบโดยตรง

บทความนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบ สร้างและทดสอบระบบการคืนพลังงานสลลิปเพื่อใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์ เพื่อช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ให้ดีขึ้น และได้แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบเซอร์เบีส



รูปที่ 1 การคืนพลังงานสลลิปโดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช้อปเปอร์

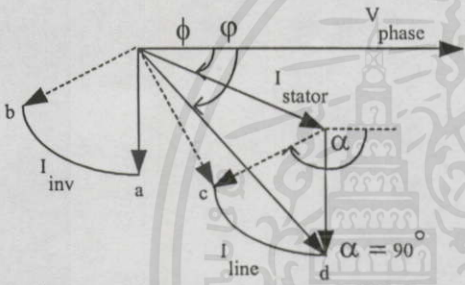
2. หลักการและทฤษฎี

2.1 การคืนพลังงานสลิปในระบบเซอร์เบียส

ระบบเซอร์เบียสเป็นวิธีการคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชอี ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสลิปจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ส่งผ่านชุดทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลงกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายเอชอีซึ่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ดีขึ้น การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถกระทำได้โดยปรับมุมทริกอินเวอร์เตอร์ในย่าน 90° - 150° ซึ่งจะได้ผลการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์

$$V_i = 1.35V_3 \cos\alpha \tag{1}$$

- เมื่อ V_i : แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์
- V_3 : แรงดันระหว่างขั้วที่หม้อแปลงด้านทุติยภูมิ
- α : มุมทริกอินเวอร์เตอร์



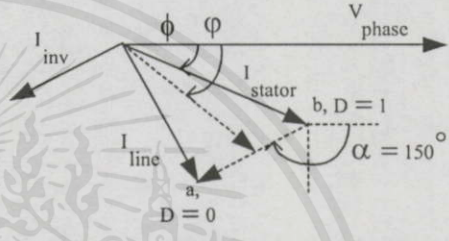
รูปที่ 2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบเซอร์เบียส

จากรูปที่ 2 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบเซอร์เบียส ในเงื่อนไขที่แรงบิดของโหลดคงที่ กระแสอินเวอร์เตอร์จะมีขนาดคงที่และค่าหลังแรงดันเฟสอ้างอิงด้วยมุมทริกอินเวอร์เตอร์ (α) ในย่าน 90° - 150° ตามเส้นโค้ง ab ส่วนกระแสเดเตอร์จะมีขนาดและมุมเฟส (ϕ) คงที่ ซึ่งผลรวมระหว่างเฟสเซอร์กระแสอินเวอร์เตอร์และกระแสเดเตอร์คือกระแสไลน์ที่จ่ายให้กับระบบซึ่งมีขนาดที่เพิ่มสูงขึ้นและมุมเฟส (ϕ) ของกระแสไลน์จะล้าหลังแรงดันอ้างอิง โดยเคลื่อนที่ตามเส้นโค้ง cd ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงค่ามุมเฟส (ϕ) ของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบที่ต่ำลงตามค่ามุมทริกของอินเวอร์เตอร์ [2-3]

2.2 การคืนพลังงานสลิปโดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์

ในรูปที่ 1 แสดงระบบการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ในการคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายเอชอี ซึ่งในระบบควบคุมนี้ความเร็วรอบจะถูกควบคุมต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน โดยใช้ออสเฟทกำลังต่อรอมขนานกับชุดทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์ การควบคุมด้วยวงจรช็อบเปอร์ที่ทำงานในโหมด PWM ส่วนมุมทริกอินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมไว้ที่มุมคงที่ที่ค่ามุมสูงสุดเท่ากับ 150° ตลอดเวลา เพื่อผลทางค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ดี ดังนั้นการควบคุมความเร็วรอบของ

มอเตอร์สามารถกระทำได้โดยปรับควิตีไซเคิลของวงจรถ็อบเปอร์ เมื่อวงจรถ็อบเปอร์ทำงานจะทำให้มอเตอร์ถูกดึงควงจรผ่านวงจรเรกติไฟเออร์ มอเตอร์จะเร่งความเร็วรอบสูงขึ้น แต่ถ้าววงจรถ็อบเปอร์หยุดทำงาน มอเตอร์ ก็จะลดความเร็วรอบลงและความเร็วรอบนี้จะเข้าสู่สภาวะคงตัวก็ต่อเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากโรเตอร์เรกติไฟเออร์มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถ็อบเปอร์ โดยแรงดันจากด้านโรเตอร์จะสูงกว่าด้านอินเวอร์เตอร์เล็กน้อย ค่ากำลังไฟฟ้าสลิปจะถูกส่งออกไปผ่านวงจรเรกติไฟเออร์ผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งเป็นตัวกรองและรักษากระแสให้ไหลอย่างต่อเนื่อง ค่ากำลังไฟฟ้าสลิปจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงส่งผ่านชุดอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ผ่านหม้อแปลงกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายเอชอี

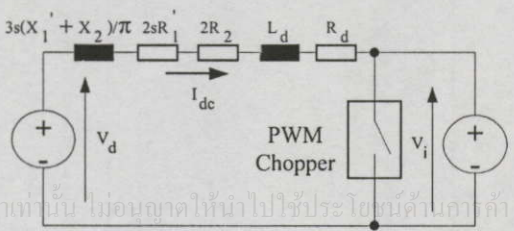


รูปที่ 3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์

จากรูปที่ 3 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในการควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อบเปอร์ ในเงื่อนไขที่แรงบิดของโหลดคงที่และมุมทริกอินเวอร์เตอร์ (α) ได้ปรับให้คงที่ตำแหน่งมุมสูงสุดเท่ากับ 150° ตลอดเวลา โดยขนาดของกระแสอินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนแปลงอยู่บนเส้นตรง ab ซึ่งขนาดของกระแสจะขึ้นอยู่กับการควบคุมควิตีไซเคิล (D) ของวงจรถ็อบเปอร์ ส่งผลทำให้กระแสไลน์ที่จ่ายให้กับระบบมีขนาดลดลงและมุมเฟส (ϕ) ของกระแสไลน์ที่ล้าหลังแรงดันอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงเคลื่อนที่อยู่บนเส้นตรง ab เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสในระบบเซอร์เบียส ตามรูปที่ 2 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงค่ามุมเฟส (ϕ) ที่เป็นมุมของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการแก้ไขให้มีค่าที่ดีขึ้น [2-3]

3. การวิเคราะห์ระบบควบคุม

3.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและค่าสลิป



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของช็อบเปอร์

ระบบการคืนพลังงานสลิปโดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ ในรูปที่ 1 สามารถวิเคราะห์ได้จากวงจรสมมูลย์เชื่อมโยงไฟตรง ดังรูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโรเตอร์เรกติไฟเออร์ (V_d) หาได้จาก (2)

$$V_d = 1.35SV_2 = 1.35S \frac{V_1}{a_m} \quad (2)$$

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ (V_i)

$$V_i = 1.35 \frac{V_1}{a_T} (1-D) \cos\alpha \quad (3)$$

เมื่อ S : ค่าสลิป

a_m : อัตราส่วนแรงดันของมอเตอร์

a_T : อัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลง

D : คิวตี้ไซเกิล

V_1 : แรงดันระหว่างขั้วสเตเตอร์

V_2 : แรงดันระหว่างขั้วโรเตอร์

ในขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลด กระแสโรเตอร์ที่ไหลผ่านวงจรเรกติไฟเออร์มีค่าน้อยมากโดยจะมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการ(2),(3)จะมีค่าเท่ากัน เมื่อไม่คิดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสลิปได้จากสมการ

$$V_d + V_i = 0 \quad (4)$$

และ
$$S = -\frac{a_m}{a_T} (1-D) \cos\alpha \quad (5)$$

ดังนั้นการควบคุมสลิปหรือความเร็วรอบมอเตอร์จากสมการ(5) สามารถทำได้โดยการปรับคิวตี้ไซเกิลของวงจรถ็อปเปอร์ในโหมด PWM โดยควบคุมมุมทริกอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ไว้ตลอดเวลา [2-3]

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส

จากวงจรสมมูลย์ไฟตรงรูปที่ 4 เมื่อตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่พอที่ทำให้กระแสไฟตรงไหลได้อย่างต่อเนื่องโดยค่ากำลังสูญเสียของมอเตอร์ทั้งสามเฟสและผลของมุมโอเวอร์แลปจากค่าลิกเกอินดักแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโรเตอร์เรกติไฟเออร์ลดลง สามารถแสดงได้จากค่าความต้านทานสมมูลย์ไฟฟ้กระแสตรงโดยหาค่าความสัมพันธ์ของกระแสไฟตรงและแรงบิดได้จาก

$$R_m = \left\{ 2R_1 + \frac{3(X_1' + X_2)}{\pi} \right\} S + 2R_2 + R_d \quad (6)$$

เมื่อ R_m : ค่าความต้านทานสมมูลย์ไฟฟ้กระแสตรง

R_1 : ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ที่โอนย้ายไปในวงจรโรเตอร์ต่อเฟส

R_d : ค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ

R_2 : ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ต่อเฟส

X_1' : ค่าลิกเกอินดักแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์ที่โอนย้ายไปในวงจรโรเตอร์ต่อเฟส

X_2 : ค่าลิกเกอินดักแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ต่อเฟส

กระแสไฟตรงเชื่อมโยง (I_{dc})

$$I_{dc} = \frac{V_d - V_i}{R_m} \quad (7)$$

กำลังไฟฟ้สลิป (P_2)

$$P_2 = \left\{ V_d - \frac{3S}{\pi} (X_1' + X_2) I_{dc} \right\} I_{dc} - 2SR_1 I_{dc}^2 \quad (8)$$

แรงบิดของมอเตอร์ (T) แทนค่าได้จากสมการ(7),(8)

$$T = \frac{\left\{ V_d - \frac{3S}{\pi} (X_1' + X_2) I_{dc} \right\} I_{dc} - 2SR_1 I_{dc}^2}{S\omega_s} \quad (9)$$

จากสมการ(9) พบว่ากระแสไฟตรงเชื่อมโยงจะแปรผันโดยตรงกับแรงบิดของมอเตอร์ที่สภาวะโหลดต่างๆ [3]

3.2 ประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ระบบการคืนพลังงานสลิปด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ในรูปที่ 1 โดยค่ากำลังไฟฟ้สลิปจะถูกส่งกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีตามค่าสลิป ดังนั้นกำลังไฟฟ้เอคิตที่ระบบป้อนให้กับมอเตอร์จะลดลง ซึ่งเป็นการรักษาประสิทธิภาพของมอเตอร์ไม่ให้ลดลงตามค่าสลิป หาได้จาก (10)

$$\eta = \frac{P_{total} - P_{inv}}{P_M} = \frac{P_1 - P_{inv}}{P_M} \quad (10)$$

และในระบบควบคุมนี้จะช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้รีเอคิตฟของอินเวอร์เตอร์ได้จากการตั้งค่ามุมทริกอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ในตำแหน่งสูงสุด ส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้รีเอคิตฟที่ระบบจ่ายให้กับมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ลดลง ซึ่งสามารถหาสมการค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้จาก (11)

$$\begin{aligned} \text{Power factor} &= \frac{P_{total}}{S_{total}} \\ &= \frac{P_1 - P_{inv}}{\sqrt{(P_1 - P_{inv})^2 + (Q_1 + Q_{inv})^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ S_{total} : กำลังไฟฟ้เอาแรงแทนทั้งหมดของระบบ

P_{total} : กำลังไฟฟ้เอคิตฟรวมของระบบ

P_1 : กำลังไฟฟ้เอคิตฟของมอเตอร์

P_M : กำลังทางกลส่งออกที่เพลามอเตอร์

P_{inv} : กำลังไฟฟ้เอคิตฟที่ส่งกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี

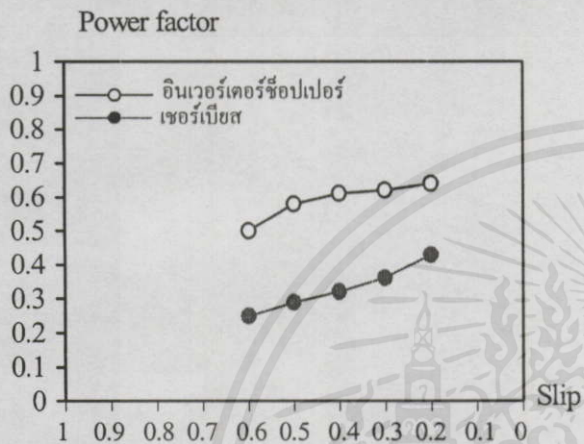
Q_1 : กำลังไฟฟ้รีเอคิตฟของมอเตอร์

Q_{inv} : กำลังไฟฟ้รีเอคิตฟของอินเวอร์เตอร์

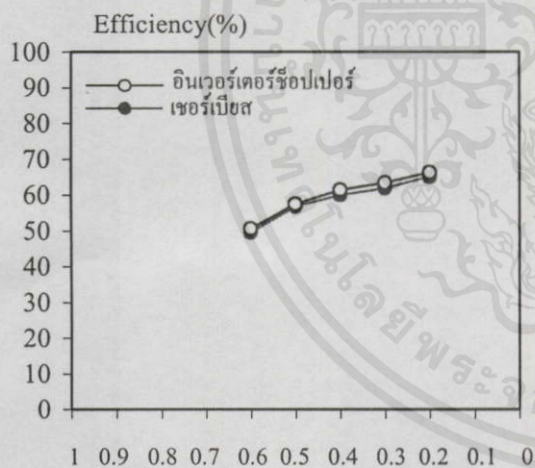
4. ผลการทดสอบ

ทำการทดสอบโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ขนาด 1 kW แรงดัน 220/380 V กระแส 5/2.7 A ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.7 ความเร็วรอบ 1420 rpm แรงดันที่โรเตอร์ระหว่างช่วงขณะโรเตอร์หยุดนิ่ง 127 V กระแสโรเตอร์ 4.9A โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่สร้างกับระบบเซอร์เบีส ได้ผลดังนี้

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ - ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ค่าที่คิดโหลด

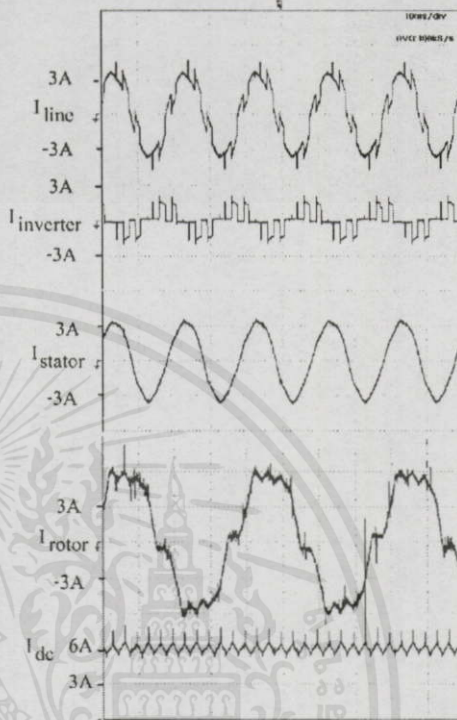


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์

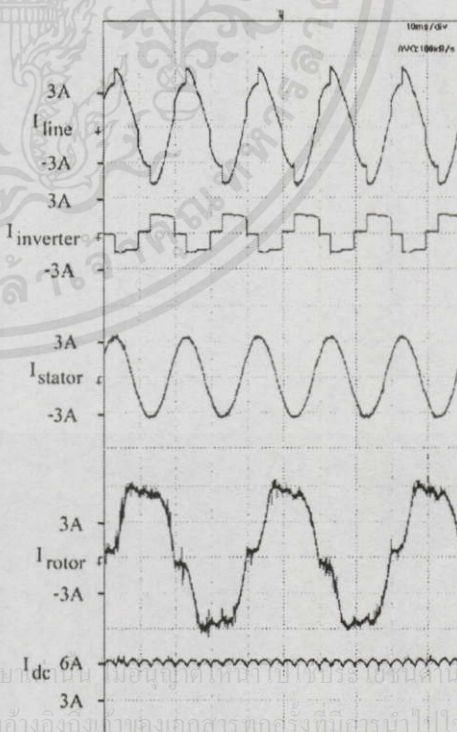
จากรูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบกับค่าสลิปที่โหลดพิกัด จะพบว่าระบบเซอร์เบีสจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำลง เมื่อมอเตอร์ทำงานในย่านสลิปเพิ่มสูงขึ้น แต่ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์สามารถช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ เช่นที่ค่าสลิป 0.5 จะพบว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงกว่าระบบเซอร์เบีส ถึง 50% และระบบควบคุมที่สร้างขึ้นนี้ ยังคงรักษาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ได้ใกล้เคียงกับระบบเซอร์เบีส โดยที่ค่าสลิป 0.6 จะมีประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์

ประมาณ 50% และค่าสลิป 0.2 ประมาณ 66.26% ซึ่งค่าสลิปได้ควบคุมไว้ในช่วง 0.2-0.6 ดังแสดงในรูปที่ 6

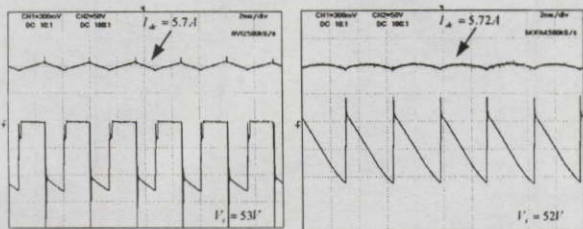
4.2 ผลการทดสอบ รูปคลื่นในส่วนต่างๆ



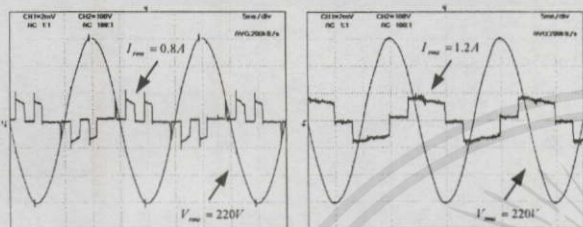
รูปที่ 7 คลื่นกระแสกรณีควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ซีออปเปอร์ที่สลิป 0.5



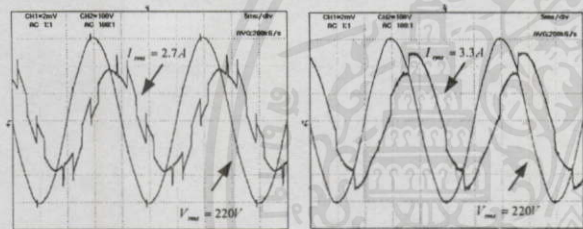
รูปที่ 8 คลื่นกระแสกรณีควบคุมด้วยระบบเซอร์เบีสที่สลิป 0.5



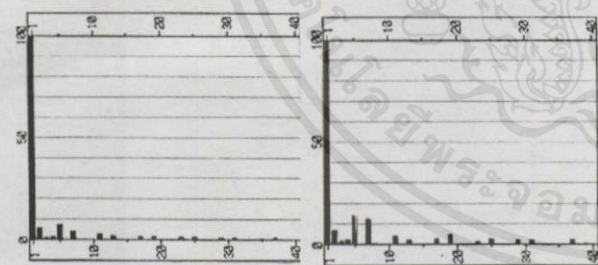
(a) ระบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์
รูปที่ 9 คลื่นกระแสไฟตรง,แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอินเวอร์เตอร์



(a) ระบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์
รูปที่ 10 คลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์เทียบกับแรงดันเฟส



(a) ระบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์
รูปที่ 11 คลื่นกระแสไลน์ของระบบเทียบกับแรงดันเฟส



(a) %THD, ช็อปเปอร์ = 11.8% (b) %THD, เซอร์เบียส = 22.7%
รูปที่ 12 สเปกตรัมของกระแสไลน์

จากการทดสอบเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันและกระแสในส่วนต่างๆของระบบ ที่โหลดพิกัดและค่าสลิป 0.5 ของระบบอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์กับระบบเซอร์เบียส พบว่าคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ของระบบเซอร์เบียส ได้รับการแก้ไขให้มีลักษณะเป็น PWM ส่งผลทำให้กระแสไลน์ของระบบมีขนาดที่ลดลงซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 7-11 และมีเปอร์เซ็นต์การคิดเทียบของรูปคลื่นกระแสไลน์(THD) ต่ำกว่าระบบเซอร์เบียส ตามรูปที่ 12 โดยที่กระแสไลน์(THD) ของระบบเซอร์เบียส มีค่าเท่ากับ 22.7% แต่ในการควบคุมแบบช็อปเปอร์ มีค่าเท่ากับ 11.8%

5.สรุป

การคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชซีของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์โดยควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ เพื่อช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นข้อด้อยที่สำคัญของระบบเซอร์เบียส จากการทดสอบนั้นปรากฏว่าระบบควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถช่วยแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นกว่าระบบเซอร์เบียส โดยรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็น PWM ซึ่งช่วยทำให้ขนาดกระแสไลน์ของระบบลดลงและมีค่าเปอร์เซ็นต์การคิดเทียบของรูปคลื่นกระแสไลน์ดีกว่าระบบเซอร์เบียส โดยสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้จากวงจรอินเวอร์เตอร์ช็อปเปอร์ในโหมด PWM ซึ่งค่าสลิปได้ควบคุมไว้ในช่วง 0.2-0.6 โดยสามารถคืนพลังงานสลิปกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเอชซี เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ได้ใกล้เคียงกับระบบเซอร์เบียส

เอกสารอ้างอิง

- [1] เสถียร รัชญศรีรัตน์, พนาฤทธิ เศรษฐกุล และชจร อินวณิช "การควบคุมความเร็วมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ โดยวิธีการคืนพลังงานที่เกิดขึ้นจากสลิปกลับเข้าสู่ระบบ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 15, 2535
- [2] Zhu Zutong, Hong Dingguo, Chen Yusheng "A new PWM type GTO scherbius industrial device with high power factor", Industry Applications Society Annual Meeting, 1989, Conference Record of the 1989 IEEE, 1989 Page(s):843-847, vol.1
- [3] TANIGUCHI, K., and MoRI, H. "Application of a power chopper to the thyristor Scherbius", IEE Proc. B, Electr. Power Appl., 1986, 133 (4), pp. 225-229.
- [4] W.Shepherd, L.N.Hullyc and D.T.W.Liang "Power electronics and motor control" second edition, Cambridge University Press, 1995

ประวัติผู้ร่วมวิจัย



นายยุทธนา จำสุวรรณ์ นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



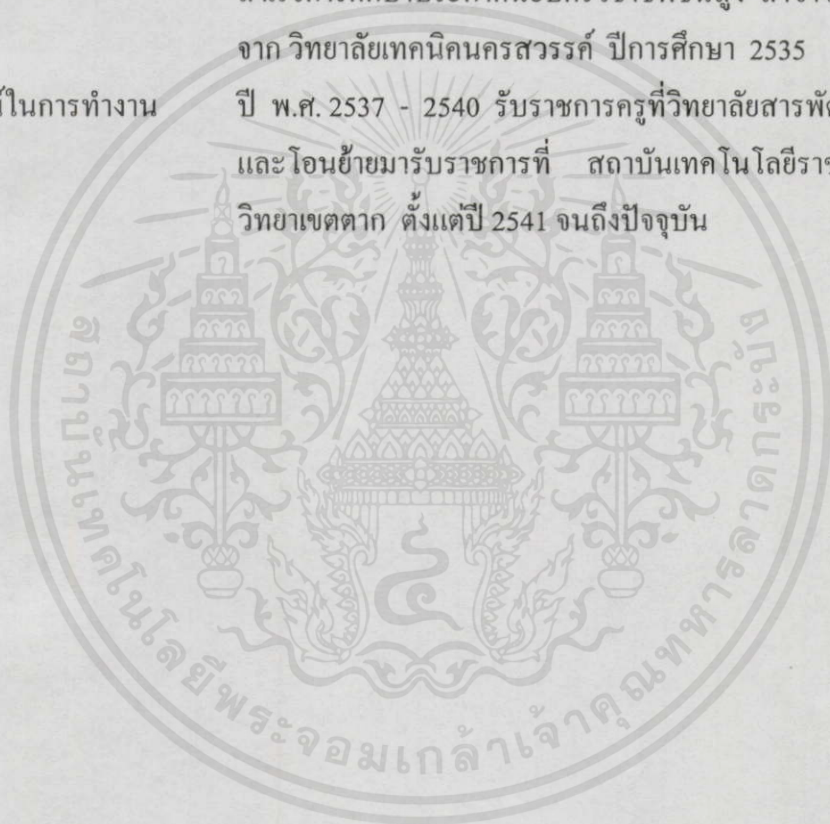
ผศ.ดร. วิจิตร ทิณเรศ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ (เกียรตินิยมอันดับสอง) ปริญญาโท วศ.ม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ Ph.D. The University of Nottingham UK.



รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำริณ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ(เกียรตินิยมอันดับสอง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาโท มหาวิทยาลัยโดกัย และ D.Eng. มหาวิทยาลัยเมจิ ประเทศญี่ปุ่น

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายยุทธนา ขำสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	21 กุมภาพันธ์ 2514
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตตาก ปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้ากำลัง จาก วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์ ปีการศึกษา 2535
ประสบการณ์ในการทำงาน	ปี พ.ศ. 2537 - 2540 รับราชการครูที่วิทยาลัยสารพัดช่างตาก และโอนย้ายมารับราชการที่ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตตาก ตั้งแต่ปี 2541 จนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้