

๒๖

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อการทดสอบสมรรถนะของฟีดแบคอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

MECHANICAL LOAD EMULATOR FOR PERFORMANCE TESTING
OF PWM INVERTER FED INDUCTION MOTORS



ธำรงค์ศักดิ์ ศรีวิเศษ
TUMRONGSAK SRIWISAS

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....47668
วัน, เดือน, ปี.....21 ส.ค. 2546

b. 11315714
i. 1225642

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-384-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MECHANICAL LOAD EMULATOR FOR PERFORMANCE TESTING
OF PWM INVERTER FED INDUCTION MOTORS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTROCAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-384-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อทดสอบสมรรถนะของ ฟิตติ้งลิ้นแอมอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ
นักศึกษา	นายธำรงค์ศักดิ์ ศรีวิเศษ
รหัสประจำตัว	43061035
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ การออกแบบและพัฒนา ชุดการจำลองโหลดทางกลเพื่อทดสอบสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตามลักษณะของโหลดชนิดต่างๆ ซึ่งการทดสอบสามารถทำได้สะดวก และง่าย สำหรับหาสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ ลักษณะการออกแบบได้ใช้คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นชุดจำลองโหลด ซึ่งจะมีการเชื่อมต่อโดยตรงกับเพลาลงของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานชุดการจำลองโหลดได้มีการป้องกันกลับของกระแสทางด้านเอาต์พุตเพื่อควบคุมแรงบิดโดยอาศัยการควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ให้สามารถป้องกันฟังก์ชันการทำงานตามโหลดประเภทต่างๆ ด้วยการควบคุมที่เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งในการทดสอบสามารถควบคุมแรงบิดได้ทั้งสองทิศทาง โดยไม่คำนึงถึงทิศทางของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถจำลองสภาวะการทำงานให้เป็นมอเตอร์ที่มีทิศทางแรงบิดเดียวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ ซึ่งสามารถทำให้ความเร็วรอบที่เกิดขึ้นมากกว่าความเร็วเชิงโคจรของเครื่องกลภายใต้การทดสอบดังกล่าว ในการควบคุมลักษณะนี้สามารถทดสอบสภาวะการถ่ายเทพลังงานทางกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์และระบบการเบรกของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดสอบได้

ในตอนท้ายได้นำเครื่องต้นแบบชุดการจำลองโหลดไปทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ เพื่อทดสอบการทำงานของชุดต้นแบบตามประเภทของโหลดชนิดต่างๆ ซึ่งการทดสอบสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์กับชุดการจำลองโหลดสามารถควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์ตัวเดียวกันให้มีการทำงานที่เหมาะสมและมีความสัมพันธ์กัน

ในการทดสอบได้มีการตรวจสอบการทำงานของวงจรการตอบสนองไดนามิกของระบบสมรรถนะการส่งถ่ายกำลังงานประสิทธิภาพของชุดการจำลองโหลดภายใต้ฟังก์ชันโหลดต่างๆ เป็นต้น ซึ่งปรากฏให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Thesis Title	Mechanical Load Emulator for Performance Testing of PWM Inverter fed Induction Motors
Student	Mr. Tumrongsak Sriwisas
Student ID	43061035
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Asst. Prof.Dr. Vijit Kinnares

ABSTRACT

The thesis presents design and development of a mechanical load emulator for performance testing of PWM inverter fed induction motors under various load characteristics. This facility offers the simplicity and convenience for evaluating performance of the inverter under test. This is based on dc motor characteristic acting as the load emulator. The dc motor shaft is directly coupled with the induction motor shaft driven by the PWM inverter. The various load pattern functions can be accessed and appropriately controlled as requirement. In the tests, the bidirectional required torque can be controlled without knowing the direction of rotation. Especially, the capability of motor operation mode of the load emulator which the torque direction is the same as that of the electrical machine under test is achieved. As a consequence, the shaft speed is more than synchronous speed of the machine under test. This characteristic control is capable of testing the electromechanical energy conversion and the inverter braking system.

Finally, the load emulator prototype has been tested with inverter fed induction motor drive for performance testing under various load function types accessed via PC. The load emulator and inverter under test are controlled with the same PC for suitable operation and relationship.

In the tests, the investigation into circuit operation, system dynamic response, power flow performance, load emulator efficiency, etc. under load functions has been made. The experimental results appear satisfactory.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ การเรียนปริญญาตรี จนถึง การเรียนปริญญาโท ซึ่งตลอดเวลาท่านให้โอกาสและชี้แนะแนวทางที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางด้านตำราและเอกสารอ้างอิง รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในด้านอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัยต่างๆ

และที่ขาดไม่ได้สำหรับบ้านหลังใหญ่ที่มีแต่ความรู้และกำลังใจ ทั้งพี่ๆเพื่อนๆและรุ่นน้องในคิก วิศวกรรม L และ เพื่อนกลุ่ม PMC ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแด่ บิดา มารดา และครูอาจารย์ทุกท่าน

ธำรงค์ศักดิ์ ศรีวิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ.....	X
สัญลักษณ์.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมาย.....	2
1.3 วิธีการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
2.2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	5
2.2.2 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	6
2.3 วิธีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรง.....	8
2.3.1 การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์.....	9
2.3.2 การควบคุมที่ขดลวดฟิลด์.....	12
2.3.3 การควบคุมด้วยแรงดันอาเมเจอร์และขดลวดฟิลด์.....	14
2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง 4 ควอดแรนต์.....	16
2.5 การเบรคมอเตอร์.....	17
2.5.1 การคืนพลังงานเข้าสู่ระบบ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.2 การเบรคแบบการถ่ายเทในรูปพลังความร้อน.....	19
2.5.3 การเบรคแบบปลั๊กกิง.....	20
2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21
2.6.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	21
2.6.2 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์.....	22
2.6.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	23
2.6.4 ปฏิกิริยาการลัดวงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะโรเตอร์อยู่กับที่.....	24
2.6.5 ปฏิกิริยาการลัดวงจรของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับภาระ.....	26
2.7 คุณลักษณะแรงบิด.....	27
2.8 การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์.....	28
2.8.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด.....	28
2.8.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด.....	30
2.8.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก.....	30
2.9 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	31
2.9.1 การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่.....	32
2.9.2 การควบคุมแบบเวกเตอร์.....	34
2.9.3 การควบคุมแบบไรต์ตัวตรวจจับความเร็ว.....	35
2.10 สรุป.....	36
บทที่ 3 คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์และประเภทของโหลด.....	37
3.1 บทนำ.....	37
3.2 จุดประสงค์ในการเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์.....	37
3.3 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	38
3.3.1 วงจรเรียงกระแส.....	39
3.3.2 กำจัดกระแสการชาร์จเริ่มต้นของตัวเก็บประจุดีซีลิงค์.....	39
3.3.3 แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง.....	40
3.3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4 ประเภทของโหลด.....	41
3.4.1 แรงบิดจะตรงกันข้ามกับความเร็วรอบ.....	41
3.4.2 แรงบิดคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วรอบ	42
3.4.3 แรงบิดแปรผันตามความเร็วรอบ	44
3.4.4 แรงบิดแปรผันตามความเร็วรอบกำลังสอง	45
3.5 สรุป.....	47
บทที่ 4 ทฤษฎีการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มสำหรับดีซีทูดีซีสวิตชิงโหมด- คอนเวอร์เตอร์.....	48
4.1 บทนำ.....	48
4.2 เทคนิคสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม.....	48
4.2.1 หลักการออกแบบวงจรกำลังแบบฟูลบริดจ์.....	51
4.3 การสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มแบบไบโพลาร์.....	53
4.4 การสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่มีการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์.....	55
4.5 การนำวงจรคอนเวอร์เตอร์ดีซีทูดีซีไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ดีซี.....	56
4.6 หลักการทำงานของแผนการสวิตช์.....	57
4.6.1 โหมดการทำงาน 1.....	60
4.6.2 โหมดการทำงาน 2.....	60
4.6.3 โหมดการทำงาน 3.....	60
4.6.4 โหมดการทำงาน 4.....	61
4.6.1 โหมดการทำงาน 5.....	61
4.6.2 โหมดการทำงาน 6.....	61
4.6.3 โหมดการทำงาน 7.....	61
4.6.4 โหมดการทำงาน 8.....	61
4.7 สรุป.....	62
บทที่ 5 การวิเคราะห์และออกแบบวงจร.....	63
5.1 บทนำ.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2 การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์.....	64
5.3 การออกแบบเลือกขนาดคาปาซิเตอร์ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง.....	64
5.4 การออกแบบวงจรไดนามิกเบรก.....	65
5.5 การออกแบบวงจรสวิตช์กำลัง.....	67
5.6 การออกแบบวงจรประจุเวลา.....	69
5.7 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแส.....	71
5.8 การออกแบบวงจรป้องกัน.....	72
5.9 การออกแบบวงจรที่ดับปลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์.....	73
5.10 การออกแบบวงจรป้องกันกลับแบบกระแส.....	74
5.10.1 ระบบควบคุมแบบพีไอ.....	75
5.10.2 การออกแบบระบบควบคุมพีไอของการป้องกันกลับกระแส.....	75
5.10.3 การออกแบบระบบควบคุมพีไอในรูปวงจรแอนะล็อก.....	77
5.11 พอร์ทขนาน.....	79
5.11.1 โครงสร้างพอร์ทขนาน.....	79
5.11.2 การออกแบบวงจรพอร์ทขนาน.....	81
5.12 การประยุกต์ใช้เคลฟไลต์.....	82
5.12.1 จุดเด่นของการใช้โปรแกรมเคลฟไลต์.....	83
5.12.2 โฟลว์ชาร์ทขั้นตอนการเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงบิดอ้างอิง.....	83
5.13 สรุป.....	85

บทที่ 6 ผลการทดลองของชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อทดสอบสมรรถนะ-

ของพีดับปลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์.....	86
6.1 บทนำ.....	86
6.2 ผลการทดสอบสถานะแรงบิดที่มีความสัมพันธ์กับกระแสอาเมเจอร์.....	87
6.3 การทดลองตรวจสอบผลการป้องกันของกระแสอาเมเจอร์.....	88
6.3.1 การทดสอบการกินพลังงานของชุดการจำลองโหลด.....	89
6.3.2 การทดสอบการทำงานของชุดจำลองโหลดทั้ง 4 ควอเตอร์.....	90

6.4 ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ต่างๆ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

โดยพิจารณาจากแรงดันเอาต์พุต.....	92
6.5 การทดสอบโหลดขณะที่ชุดจำลองโหลดทำงานใน 1 ควอดแรนท์.....	93
6.5.1 การทดสอบสร้างโหลดประเภทเชิงเส้น.....	93
6.5.2 การทดสอบสร้างโหลดประเภทขั้นบันได.....	95
6.5.3 การจำลองโหลดที่แปรค่าอย่างต่อเนื่อง.....	96
6.5.4 การจำลองโหลดแบบขั้นโหลดโดยกำหนดช่วงลงเป็นแบบต่อเนื่อง.....	98
6.5.5 การจำลองโหลดแบบให้แรงบิดคงที่โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงบิด.....	99
6.5.6 การจำลองโหลดแบบขั้น.....	100
6.6 การจำลองโหลดแบบควบคุมทั้ง 4 ควอดแรนท์.....	102
6.6.1 การทดสอบสร้างโหลดในโหมดการทำงานแบบเครื่องกำเนิด.....	102
6.6.2 การทดสอบสร้างโหลดในโหมดการทำงานเป็น- เครื่องกำเนิดและเป็นมอเตอร์.....	105
6.7 การพิจารณาแรงดันดีซีบัลANCEทดสอบโหลดทั้งสองระบบ.....	106
6.8 ประสิทธิภาพของระบบชุดทดสอบโหลดทางกล.....	108
6.9 สรุป.....	111
บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	112
7.1 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	112
7.2 สรุป.....	113
7.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	114
7.3.1 วงจรควบคุม.....	114
7.3.2 วงจรกำลัง.....	114
เอกสารอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก ก.	118
ภาคผนวก ข.	119
ภาคผนวก ค.	121
ภาคผนวก ง.	123

เอกสารผู้เขียนควรที่จะนำไปใช้จนกว่าจะมีการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงนั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต 137

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 รายละเอียดขาสัญญาณ Connector ของพอร์ทขนาน.....	80
5.2 การจัดวางตำแหน่งของพอร์ทขนาน.....	80
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาเมเจอร์และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	88
6.2 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลดเมื่อทำการทดสอบ- ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์- คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 1 kHz.....	109
6.3 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลดเมื่อทำการทดสอบ- ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์- คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 3 kHz.....	109
6.4 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลดเมื่อทำการทดสอบ- ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์- คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 5 kHz.....	109
6.5 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลดเมื่อทำการทดสอบ- ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์- คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 10 kHz.....	110
6.6 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลดเมื่อทำการทดสอบ- การทำงานในโหมดมอเตอร์ โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์- คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 1 kHz.....	111
6.7 การตรวจวัดประสิทธิภาพของระบบชุดจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบ- ในโหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ โดยตรวจวัดจากระบบของชุดทดสอบ- โหลดที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 1 kHz.....	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 6
2.2	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะคงตัว..... 7
2.3	กราฟระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด..... 8
2.4	วงจรสมมูลมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก..... 9
2.5	บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก..... 11
2.6	บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง โดยการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์..... 12
2.7	บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์โดยการควบคุมขดลวดฟิลด์..... 14
2.8	กราฟช่วงการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบแรงดันอาเมเจอร์- และขดลวดฟิลด์..... 15
2.9	วงจรการควบคุมในการทำงานทั้ง 4 ควอดแรนต์..... 16
2.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดการคืนพลังงาน- สู่ระบบในสภาวะการเบรค..... 19
2.11	การเบรคแบบไดนามิกสำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้น..... 19
2.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดแบบไดนามิกเบรคกึ่ง..... 20
2.13	ลักษณะการต่อแบบปลั๊กกิ้ง..... 20
2.14	แหล่งจ่ายและรีแอคแตนซ์..... 22
2.15	วงจรสมมูลของโรเตอร์เมื่อมีการะ R_r 23
2.16	วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 24
2.17	วงจรสมมูลที่ย้ายค่าต่าง ๆ จากด้านโรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์..... 24
2.18	กราฟคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 29
2.19	วงจรคอนเวอร์เตอร์ – อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์..... 31
2.20	กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิด..... 32
2.21	กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนึงถึงผลของค่าความต้านทาน- ด้านสเตเตอร์..... 32
2.22	บล็อกการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่..... 33
2.23	กราฟความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ที่ใช้ในการควบคุม..... 34
2.24	บล็อกการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)..... 35
2.25	บล็อกการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)..... 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.1	โครงสร้างของเอซีไดรฟ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 39
3.2	ระบบตัวอย่างโหลดที่สภาวะแรงบิดตรงแปรผกผันกับความเร็วรอบ..... 42
3.3	กราฟคุณสมบัติของโหลดสภาวะที่แรงบิดจะตรงกันข้ามกับความเร็วรอบ..... 42
3.4	ระบบตัวอย่างโหลดที่สภาวะแรงบิดไม่ขึ้นกับความเร็วรอบ..... 43
3.5	กราฟคุณสมบัติของโหลดสภาวะที่แรงบิดมีค่าที่..... 44
3.6	ระบบตัวอย่างโหลดที่สภาวะแรงบิดแปรตามความเร็วรอบ..... 44
3.7	กราฟคุณสมบัติของโหลดสภาวะที่แรงบิดแปรค่าตามความเร็ว..... 45
3.8	ระบบตัวอย่างโหลดที่สภาวะแรงบิดแปรตามความเร็วรอบกำลัง..... 46
3.9	กราฟคุณสมบัติของโหลดสภาวะที่แรงบิดแปรค่าตามความเร็วรอบกำลังสอง..... 46
4.1	วงจรสวิทช์โหมดคอนเวอร์เตอร์..... 49
4.2	รูปแบบพื้นฐานในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ดับบลิวเอ็ม..... 50
4.3	วงจรแปลงผันดิซิจูติซีแบบฟูลบริดจ์..... 51
4.4	การสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบไบโพลาร์..... 54
4.5	การสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์..... 56
4.6	รูปแบบการไหลของกระแสด้วยการสวิทช์แบบยูนิโพลาร์ที่มีการทำงานในโหมด 1-8.59
5.1	บล็อกการทำงานของชุดการจำลองโหลดทางกล..... 62
5.2	วงจรกำลังของไดนามิกเบรกกิ้ง..... 65
5.3	วงจรควบคุมการทำงานของไดนามิกเบรกกิ้ง..... 66
5.4	สัญญาณขับเคลื่อนของชุดไดนามิกเบรกกิ้ง..... 67
5.5	ไอจีบีทีแบบโมดูล Intelligent Power Module(IPM)..... 67
5.6	วงจรขับเคลื่อนของ IPM และสัญญาณการควบคุม..... 68
5.7	รูปแบบการสวิทช์ของสัญญาณประวิงเวลาใน 1 กิ่ง..... 69
5.8	วงจรประวิงเวลาที่ใช้ในการทดลอง..... 70
5.9	สัญญาณประวิงเวลาที่นำไปสวิทช์..... 70
5.10	วงจรตรวจจับกระแส..... 71
5.11	วงจรป้องกันกระแสเกิน..... 73
5.12	วงจรการสร้างสัญญาณที่ดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์..... 73
5.13	รูปคลื่นสัญญาณแบบยูนิโพลาร์..... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.14	ระบบมอเตอร์กระแสตรง.....75
5.15	บล็อกระบบการป้อนกลับของกระแสอาเมเจอร์..... 75
5.16	แผนภาพโบลของระบบควบคุมกระแสที่ได้ทำการออกแบบ.....77
5.17	วงจรการควบคุมแบบพีไอ..... 78
5.18	สัญญาณการป้อนกลับกระแสอาเมเจอร์ขณะที่มีการสเตรปโหลด..... 78
5.19	สัญญาณกระแสอ้างอิงและกระแสจริงที่มีการป้อนกลับ..... 79
5.20	บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของพอร์ทขนาน..... 79
5.21	วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนาล็อก.....82
5.22	บล็อกโพลีชาร์ทไดอะแกรมระดับขั้นตอนการเขียนโปรแกรม..... 84
5.23	รูปแบบของหน้าจอที่ใช้ในการสร้างแพทเทอร์นโหลดที่สามารถป้อนค่าได้..... 85
6.1	ระบบรวมของชุดจำลองโหลดทางกล..... 86
6.2	ระบบการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด..... 87
6.3	กราฟความสัมพันธ์กระแสอาเมเจอร์กับแรงบิดของมอเตอร์..... 88
6.4	รูปคลื่นผลการตรวจสอบการป้อนกลับของแรงบิดอาเมเจอร์..... 89
6.5	รูปคลื่นผลตรวจสอบการคืนพลังงานของระบบสู่แรงดันดีซี..... 89
6.6	รูปคลื่นแรงดันดีซีที่สถานะชุดการจำลองโหลดทำงานอยู่ใน- โหมคมอเตอร์และโหมคเครื่องกำเนิด..... 90
6.7	รูปคลื่นการตรวจสอบการคืนพลังงานของระบบอินเวอร์เตอร์ขณะที่ ชุดการจำลองโหลดทดสอบในโหมคการทำงานแบบมอเตอร์..... 91
6.8	รูปคลื่นการตรวจสอบสถานะการทำงานของชุดการจำลองโหลด 4 ควอดแรนต์..... 91
6.9	รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ- โดยใช้ความถี่สวิทซ์ที่ 1 kHz และควบคุมความถี่ฟันดาเมนทอล 50 Hz92
6.10	รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ- โดยใช้ความถี่สวิทซ์ที่ 3 kHz และควบคุมความถี่ฟันดาเมนทอล 50 Hz.....92
6.11	รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ- โดยใช้ความถี่สวิทซ์ที่ 5 kHz และควบคุมความถี่ฟันดาเมนทอล 50 Hz..... 93
6.12	รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ- โดยใช้ความถี่สวิทซ์ที่ 10 kHz และควบคุมความถี่ฟันดาเมนทอล 50 Hz.....93

เอกสารนี้เป็นโดยใช้ความถี่สวิทซ์ที่ 10 kHz และควบคุมความถี่ฟันดาเมนทอล 50 Hz. ใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

[illegible]

เอกสารนี้เป็นที่จับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 3 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่.....100 การค้า

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.27	การทดสอบโหลดแบบขั้นแบบต่อเนื่องขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 5 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่.....100
6.28	การทดสอบโหลดแบบขั้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ- ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 1 kHz ขณะที่ความเร็วรอบคงที่.....101
6.29	การทดสอบโหลดแบบขั้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ- ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 3 kHz ขณะที่ความเร็วรอบคงที่.....101
6.30	การทดสอบโหลดแบบขั้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ- ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 5 kHz ขณะที่ความเร็วรอบคงที่.....102
6.31	การทดสอบ โหลดแบบเชิงเส้นที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง.....103
6.32	การทดสอบโหลดแบบขั้นบันไดที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง.....103
6.33	การทดสอบโหลดแบบขั้นแบบต่อเนื่องที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง.....104
6.34	การทดสอบโหลดแบบแรมป์ที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง.....104
6.35	การทดสอบโหลดแบบขั้นที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง.....104
6.36	การทดสอบโหลดในสถานะที่มีโหมดการทำงานทั้งสองโหมดคือ สถานะที่- ชุดทดสอบโหลดทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดและสถานะทำงานในโหมดมอเตอร์..... 106
6.37	การทดสอบโหลดในสถานะที่มีโหมดการทำงานทั้งสองโหมด- โดยพิจารณาจากแรงดันเชื่อม โยกระแสตรงทั้งสองระบบ..... 107
6.38	ระบบการตรวจวัดประสิทธิภาพของชุดจำลองโหลด..... 108
7.1	ระบบทดสอบได้เสนอในการพัฒนาขึ้นไป..... 115

สัญลักษณ์

Z_a	คือ	จำนวนแท่งตัวนำทั้งหมดภายในอาเมเจอร์
T	คือ	แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (นิวตัน-เมตร)
E	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวดอาเมเจอร์ (โวลต์)
P	คือ	จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)
ϕ	คือ	เส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละขั้ว (เวเบอร์)
ω	คือ	ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
I_a	คือ	กระแสไฟฟ้าขดลวดอาเมเจอร์ (แอมป์)
a	คือ	จำนวนวงจรขนาน
V	คือ	แรงดันป้อนขดลวดอาเมเจอร์ (โวลต์)
R_a	คือ	ความต้านทานอาเมเจอร์ (โอห์ม)
ω_m	คือ	ความเร็วเชิงมุมทางกล (เรเดียนต่อวินาที)
K_e	คือ	ค่าคงที่
J	คือ	ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อย (กิโลกรัม-เมตร ²)
B	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
T_M	คือ	แรงบิดจากโหลด (นิวตัน-เมตร)
τ_a	คือ	ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า
τ_m	คือ	ค่าเวลาคงตัวทางกล
V_f	คือ	แรงดันที่ขดลวดฟิลด์ (โวลต์)
R_f	คือ	ความต้านทานที่ขดลวดฟิลด์ (โอห์ม)
I_f	คือ	กระแสที่ขดลวดฟิลด์ (แอมป์)
ω_R	คือ	ความเร็วเชิงมุมที่โรเตอร์ (เรเดียน/วินาที)
E	คือ	แรงดันต้านกลับ EMF (โวลต์)
N_s	คือ	ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed) (รอบ/นาที)
f	คือ	ความถี่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (เฮิรตซ์)
s	คือ	สลลิป
N_r	คือ	ความเร็วโรเตอร์ (รอบ/นาที)
E_r	คือ	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะทำงานปกติ (โวลต์)
E_2	คือ	แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ขณะอยู่กับที่ (โวลต์)
X_r	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ต่อเฟส ขณะโรเตอร์อยู่กับที่ (โอห์ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

f_r	คือ	ความถี่ของโรเตอร์ (เฮิรต)
X_m	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก (โอห์ม)
X_l	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์ (โอห์ม)
X_2	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์ (โอห์ม)
R_1	คือ	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ (โอห์ม)
R_2	คือ	ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ (โอห์ม)
R_c	คือ	ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก (โอห์ม)
I_c	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (แอมป์)
I_m	คือ	กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก (แอมป์)
P_r	คือ	กำลังไฟฟ้าที่ใส่ให้โรเตอร์ (วัตต์)
T_0	คือ	แรงบิดขณะที่อยู่กับที่ (นิวตัน-เมตร)
θ_0	คือ	ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะที่มอเตอร์อยู่กับที่
T_{0max}	คือ	แรงบิดสูงสุด (นิวตัน-เมตร)
Z_2	คือ	อิมพีแดนซ์ที่โรเตอร์ต่อเฟสเมื่อมีภาระ (โอห์ม)
I_2	คือ	กระแสที่โรเตอร์ต่อเฟสเมื่อมีภาระ (แอมป์)
$\cos\theta_2$	คือ	เพาเวอร์แฟกเตอร์เมื่อมีภาระ
P_m	คือ	กำลังที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ (Mechanical Developed) (วัตต์)
P_C	คือ	กำลังที่สูญเสียที่มอเตอร์เนื่องจากขดลวดทองแดง (วัตต์)
T_L	คือ	แรงบิดที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ (นิวตัน-เมตร)
$V_{o(control)}$	คือ	สัญญาณแรงดันควบคุม (โวลต์)
$V_{o(actual)}$	คือ	สัญญาณแรงดันวัดจริง (โวลต์)
$V_{o(desired)}$	คือ	สัญญาณแรงดันอ้างอิง (โวลต์)
V_{tri}	คือ	สัญญาณคลื่นพาหะ (โวลต์)
D	คือ	คาบเวลาการทำงาน
I_{dc}	คือ	กระแสไฟฟ้ากระแสตรง (แอมป์)
$period$	คือ	คาบเวลาที่กระแสผ่านไดโอดแต่ละตัว
$ripple$	คือ	ค่าระดับแรงดันกระเพื่อม (โวลต์)
R_B	คือ	ค่าความต้านทานที่ใช้ในการเบรก (โอห์ม)
V_{dc}	คือ	ค่าแรงดันไฟตรงที่เริ่มทำการเบรก (โวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรใช้อย่างระมัดระวัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

n_1	คือ	ค่าความเร็วรอบก่อนที่มีการลดความเร็ว (รอบต่อนาที)
T_B	คือ	ค่าแรงบิดด้าน(ปกติมีค่าไม่เกิดแรงบิดพิกัดของมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร)
$+v_{control}$	คือ	สัญญาณแรงดันควบคุมด้านซีกบวก (โวลท์)
$-v_{control}$	คือ	สัญญาณแรงดันควบคุมด้านซีกลบ (โวลท์)
ω_{cn}	คือ	ความถี่ตัดคาบ
k_p	คือ	ตัวควบคุมแบบพี
k_i	คือ	ตัวควบคุมแบบไอ
T_L^*	คือ	แรงบิดที่ทดสอบจริง (นิวตัน-เมตร)
T_L	คือ	แรงบิดอ้างอิง (นิวตัน-เมตร)
i_{ac}	คือ	กระแสเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ (แอมป์)
V_{dc}	คือ	แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงสำหรับชุดจำลองโหลด (โวลท์)
$V_{dc(inv)}$	คือ	แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงสำหรับอินเวอร์เตอร์ (โวลท์)
P_o	คือ	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านประสิทธิภาพในการทำงาน ความสามารถในการผลิต รวมถึงต้นทุนการผลิต วัตถุดิบที่มีคุณภาพ จะพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องการเครื่องจักรที่ทันสมัย ซึ่งจะต้องมีการควบคุมความเร็วการทำงานของเครื่องจักรเพื่อให้สอดคล้องกับการผลิต ซึ่งในด้านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนเนื่องจากอินเวอร์เตอร์ ช่วยลดกระแสในช่วงการสตาร์ทของมอเตอร์ พร้อมสามารถเพิ่มแรงบิดเริ่มต้นขณะที่มีโหลดหนัก และสามารถแปรค่าความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับมอเตอร์กระแสตรงที่มีราคาสูง ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงมีบทบาทมากในงานด้านอุตสาหกรรม แต่ถึงอย่างไรก็ตาม งานด้านการผลิตบางชนิดต้องการความเร็วคงที่ขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะต้องมีคุณสมบัติในการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยปัจจุบันได้มีการควบคุมแบบ Sensorless และ Vector Control ซึ่งลักษณะการเลือกอินเวอร์เตอร์ไปใช้งานให้เหมาะสมกับโหลดเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องคำนึงถึงตั้งนั้ก่อนการติดตั้งใช้งานจริงจะต้องมีการทดสอบอินเวอร์เตอร์เพื่อยืนยันว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานควบคู่กับโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับโหลดนั้นมากที่สุด โดยโหลดที่นำมาทดสอบในปัจจุบันส่วนใหญ่ ได้แก่ โหลดทางไฟฟ้า (MG set) และโหลดทางกล ซึ่งจะพบว่าโหลดชนิดต่างๆเหล่านี้ให้ผลตอบสนองทางด้านไคนามิกที่ค่อนข้างช้า และยังมีขีดจำกัดอยู่หลายประการ พร้อมทั้งแรงบิดที่ได้มีค่าผิดพลาดไม่ถูกต้องเท่าที่ควร นอกจากนี้โหลดดังกล่าวไม่สามารถสร้างฟังก์ชันโหลดที่มีความซับซ้อนหลายๆแบบได้ ส่งผลให้ข้อมูลการทดสอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือน้อยลง และทำให้ความไว้วางใจในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ลดลงด้วย ดังนั้นไม่ว่าขบวนการด้านการผลิตจะพัฒนาขึ้นเท่าไรจึงมีความจำเป็นต้องใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนที่เกิดในระบบการผลิตหรือระบบขนส่ง เช่นประเภทโหลดที่เกิดขึ้นบ่อยๆ คือ โหลดประเภทลิฟต์ทั่วไป หรือ โหลดประเภทพัดลม เป็นต้นในการจำลองโหลดแบบประเภทต่างๆ ในปัจจุบันทางด้านการผลิตอินเวอร์เตอร์จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากเมื่อมีการใช้งานในโหลดที่ซับซ้อน ซึ่งเป็นผลทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทำงานควบคู่กับโหลดได้ ทำให้ต้องมีการพัฒนาในการสร้างโหลดทดสอบ ในด้านต่างประเทศซึ่งจะพบว่าได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องที่ออกแบบชุดควบคุมในการจำลองโหลดได้ทั้งหมดเพื่อให้ควบคู่กับระบบการผลิตที่มีการพัฒนาที่ซับซ้อนขึ้น และลดขั้นตอนในการทดสอบพร้อมค่าที่ถูกต้องแม่นยำ[1]-[3] โดยได้ใช้เมชชีนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จำลองโหลดชนิดต่างๆ เพื่อมีฐานการใช้งานและทดสอบได้กว้าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างชุดการจำลองโหนดที่มีสมรรถนะในการทดสอบและให้ผลการตอบสนองของระบบทางด้านไดนามิกที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโหนดได้ดี อีกทั้งยังสามารถสร้างฟังก์ชันของโหนดต่างๆ ได้โดยควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้มีความสะดวกและง่ายสำหรับการใช้งานให้ผลการทดสอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือขึ้น ดังนั้นทำให้ชุดการจำลองโหนดที่ได้ออกแบบมีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมาย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาชุดการจำลองโหนดให้มีการสร้างโหนดตามแพทเทิร์นโหนดแบบต่างๆ และให้ผลการทดสอบมีค่าแม่นยำพร้อมลดขบวนการทดสอบที่ยุ่งยาก
- 1.2.2 เนื่องจากระบบการผลิตที่มีการพัฒนาที่รวดเร็วเป็นผลทำให้โหนดการใช้งานมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ทำให้ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์มีการทำงานไม่เหมาะสมกับโหนดบ่อยครั้ง ดังนั้นในงานวิจัยได้พัฒนา ในการสร้างชุดทดสอบโหนดให้สามารถสร้างโหนดที่ซับซ้อน ในการทดสอบหาสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมควบคู่กับโหนดการใช้งาน
- 1.2.3 เพื่อใช้เป็นระบบทดสอบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโหนดทางกล สำหรับการวิจัยและพัฒนา ระบบขับเคลื่อนในอุตสาหกรรมเพื่อตรวจสอบว่าระบบขับเคลื่อนที่มีการพัฒนาขึ้นนั้นมีผลตอบสนองอย่างไรต่อโหนด

1.3 วิธีการวิจัย

- 1.3.1 ค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวารสารต่างๆ เอกสารและตำราที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคการสร้างชุดการจำลองโหนดที่ใช้กับงานอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมทั้งมาตรฐานของโหนดชนิดต่างๆ และโหนดที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน
- 1.3.2 ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์กระแสตรง เพื่อใช้ในการออกแบบการป้อนกลับของระบบพร้อมทั้งการสร้างคำสั่งจากคอมพิวเตอร์
- 1.3.3 สร้างชุดต้นแบบที่สามารถใช้ทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและผลจากการวัดแรงบิดโดยตรงที่ได้จากเครื่องวัดแรงบิด
- 1.3.4 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์กระแสตรงและทดสอบกับเครื่องวัดแรงบิด(Torque Transducer) เพื่อหาค่าพิกัดของแรงบิดของมอเตอร์ที่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับกระแสอาเมเจอร์เพื่อใช้สำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิง
- 1.4.2 ออกแบบระบบป้อนกลับของกระแสอาเมเจอร์โดยจะคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์และออกแบบวงจรเชื่อมต่อระหว่างพอร์ทขนานของคอมพิวเตอร์ที่มีการควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์
- 1.4.3 จะต้องสร้างเครื่องต้นแบบชุดการจำลองโหลดทางกลเพื่อใช้ทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัด 1 แรงม้า

1.5 หลักการใหม่ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์

- 1.5.1 ในชุดการจำลองโหลดทางกลสามารถควบคุมการทดสอบโหลดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์
- 1.5.2 สามารถจำลองโหลดสภาวะการทำงานเป็นแบบมอเตอร์ให้มีทิศทางเดียวกันกับมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ ส่งผลทำให้ความเร็วรอบที่เกิดขึ้นสูงกว่าความเร็วเชิงโรตัสของมอเตอร์ ดังนั้นชุดการจำลองโหลดสามารถควบคุมการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งสองทิศทาง
- 1.5.3 ชุดการจำลองโหลดได้มีการควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ โดยสามารถป้อนฟังก์ชันการทำงานตามแพทเทอร์นของโหลดชนิดต่างๆ พร้อมทั้งสามารถควบคุมการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างอินเวอร์เตอร์และชุดการจำลองโหลดทั้ง 2 ระบบที่เหมาะสม โดยใช้การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ตัวเดียวกัน

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาและออกแบบชุดการจำลองโหลดทางกลเพื่อใช้ทดสอบกับพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็นบทๆ ได้ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เนื้อหาคร่าว ๆ ในแต่ละบท ที่มาของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ วิธี การวิจัย ขอบเขต โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

บทที่ 2 พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์เหนี่ยวนำและลักษณะการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมแรงดันและควบคุมกระแส พร้อมแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบในการควบคุมแบบต่างๆ พร้อมทั้งสรุปเนื้อหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์และประโยชน์ในการใช้งานอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ พร้อมทั้ง กล่าวถึงประเภทของโหลดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสามารถพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด,ความเร็วรอบ และกำลังงาน

บทที่ 4 จะกล่าวถึงเทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในวงจรฟูลบริดจ์แบบดิซิทูลีซี และคุณสมบัติในการเลือกใช้งานวงจรคอนเวอร์เตอร์ พร้อมการเลือกใช้งานสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ที่ใช้ในงานวิจัยพร้อมทั้งแสดงทิศทางการกระจายของกระแสในโหมดต่างๆขณะมีการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง โดยจะมีการวิเคราะห์การทำงานของระดับการสวิตช์ที่มีความสัมพันธ์ต่อกระแสแอมเพอร์อย่างละเอียด

บทที่ 5 เป็นการออกแบบวงจรควบคุมของชุดจำลองโหลดและการออกแบบการควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ทขนาน โดยใช้โปรแกรม Delphi เบื้องต้นในการป้องกันค่าตั้งแรงบิดแบบต่างๆมีการออกแบบวงจรป้องกันกลับของกระแสแอมเพอร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ได้ทำการทดสอบมาใช้ในการออกแบบของการป้องกันกลับของกระแส และหาเสถียรภาพของระบบที่ได้ออกแบบขึ้นพร้อมทั้งหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ในสภาวะที่ต้องการผลตอบสนองของระบบที่ไวในการเข้าสู่สภาวะคงตัว

บทที่ 6 การทดลองและผลการทดสอบวงจรขณะที่มีการจำลองโหลดทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขณะที่มีการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์โดยการทดสอบจะทดสอบทั้ง 4 ควอดแรนต์ และทดสอบในโหมดการทำงานของระบบทั้งสอง ในโหมดเครื่องกำเนิดและโหมดมอเตอร์และหาประสิทธิภาพของระบบในโหมดการทำงานทั้งสองโหมดของชุดการจำลองโหลดในสภาวะที่สร้างแรงบิดแบบคงที่

บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.7.1 เป็นการศึกษาระบบทางด้านไดนามิกของมอเตอร์เกี่ยวกับการสร้างโหลดที่มีสภาวะการทำงานทั้งทางด้านโหมดเครื่องกำเนิดและโหมดมอเตอร์
- 1.7.2 สามารถสร้างชุดต้นแบบในการจำลองโหลดเพื่อเป็นแนวทางสำหรับนำไปพัฒนาไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการทดสอบอินเวอร์เตอร์ไครฟ์
- 1.7.3 เป็นการศึกษาและออกแบบวงจรป้องกันกลับของระบบมอเตอร์กระแสตรงในสภาวะตอบสนองของระบบที่ดี และเสถียรภาพของระบบที่ใช้ในการควบคุม
- 1.7.4 เป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับพัฒนารูปแบบวงจรให้มีการทำงานที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าจะพบมากทางด้านอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีของการผลิต ดังนั้นการวิเคราะห์และการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าจึงเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความสำคัญและน่าสนใจมาก ระบบการควบคุมตั้งแต่เดิมพบว่าพลังงานจากเครื่องจักรกลที่มีความสำคัญในระบบมักได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า ไฮโดรลิก และเบรค ครัชชนิดต่างๆ แต่ด้วยความเจริญทางด้านเทคโนโลยีของระบบควบคุมมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่มีความสำคัญในระบบคอนโทรลทุกชนิดในปัจจุบัน และในทางเดียวกันกับความก้าวหน้าของระบบควบคุมมอเตอร์ได้มีการประยุกต์ใช้งานใหม่ๆ ทำให้มอเตอร์ได้รับความนิยอย่างกว้างขวาง โดยในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงหลักการทำงานและโมเดลทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ พร้อมทั้งแสดงลักษณะและรูปแบบการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นพลังงานกล โดยมอเตอร์กระแสตรงจะมีซี่คอมมิวเตเตอร์กับแปลงถ่านทำหน้าที่จัดเรียงกระแสจากกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับในขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งจุดเด่นของมอเตอร์กระแสตรงคือสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กของอาเมเจอร์ทำมุมกัน 90 องศา ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปไม่สามารถทำงานในตำแหน่งนี้ได้ และมอเตอร์กระแสตรงจะมีแรงบิดขณะเริ่ม สตาร์ทสูง[6] ในคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงได้มีการออกแบบให้มีลักษณะพิเศษทางด้านแรงบิดของเพลามอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสอาเมเจอร์ ดังนั้นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจะมีปรากฏการณ์เกิดสองอย่างคือ การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและการเกิดแรงบิดจากสนามแม่เหล็ก

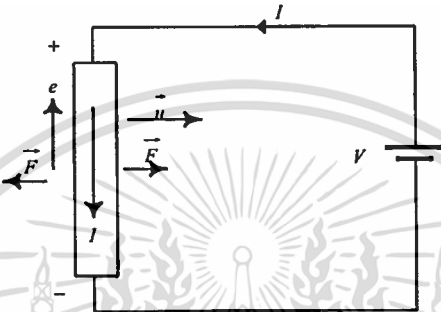
หลักการของการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า คือเมื่อแท่งตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นสามารถอธิบายจากสมการ (2.1)

$$E = \frac{Z_a P}{2\pi a} \phi \omega \tag{2.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก จากหลักที่ว่าเมื่อมีกระแสในแท่งตัวนำตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก จะได้แรงที่กระทำต่อแท่งตัวนำอยู่ในทิศทางเส้นสัมผัสของวงกลมทำให้เครื่องจักรกระแสตรงหมุน สามารถอธิบายแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กได้ตามสมการดังนี้

$$T = \frac{Z_a P}{2\pi a} \phi I_a \tag{2.2}$$



ภาพที่ 2.1 หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อทำการวิเคราะห์สถานะคงตัวของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในรูปแบบวงจรสมมูลของขดลวด อาเมเจอร์สามารถแสดงได้ในภาพที่ 2.2 สำหรับความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยกกับมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานจะเป็นความต้านทานชุดเดียวกัน ส่วนความต้านทานในขดลวดอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมกับมอเตอร์แบบผสมขดลวดจะมีลักษณะการต่อร่วมกับขดลวดฟิลด์จะทำให้ความต้านทานขดลวดเป็นชุดเดียวกัน[11] โดยสมการพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรงคือ

$$E = K_e \phi \omega_m \tag{2.3}$$

$$V = E + R_a I_a \tag{2.4}$$

$$T = K_e \phi I_a \tag{2.5}$$

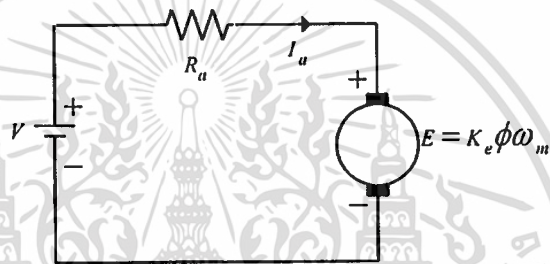
จากสมการ (2.3) ถึง (2.5) เมื่อนำมาเขียนใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_m = \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e \phi} I_a \quad (2.6)$$

$$= \frac{V}{K_e \phi} - \frac{R_a}{(K_e \phi)^2} T \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.3) ถึง (2.5) จะพบว่าสมการดังกล่าวเป็นพื้นฐานสมการของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งได้แก่มอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก, มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน, มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมและมอเตอร์กระแสตรงแบบผสม



ภาพที่ 2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสถานะคงตัว

ในกรณีที่เป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก ถ้ากำหนดให้แรงดันที่ขดลวดฟิลด์มีค่าคงที่ จะทำให้ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ด้วย ในขณะที่แรงบิดของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสามารถกำหนดให้ฟลักซ์มีค่าคงที่ตามสมการดังนี้

$$K_e \phi = K \text{ (Constant)} \quad (2.8)$$

นำสมการ (2.3), (2.5) และ (2.6), (2.8) นำมาเขียนเป็นสมการใหม่ในเทอมของค่าฟลักซ์คงที่คือ

$$E = K \omega_m \quad (2.9)$$

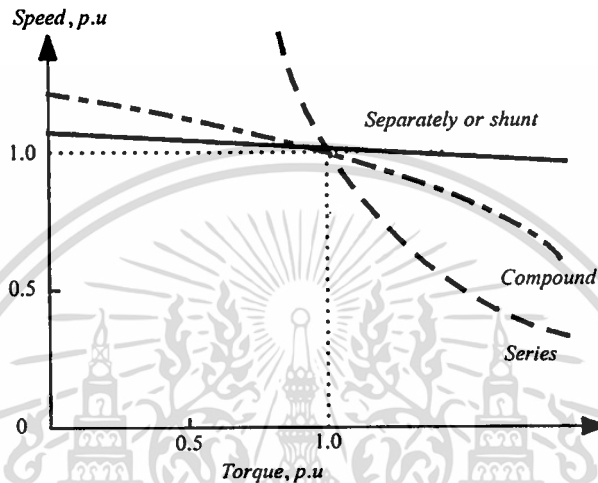
$$T = K I_a \quad (2.10)$$

$$\omega_m = \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K} I_a \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K^2} T \quad (2.12)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงแบบต่างๆ จะได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด

2.3 วิธีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

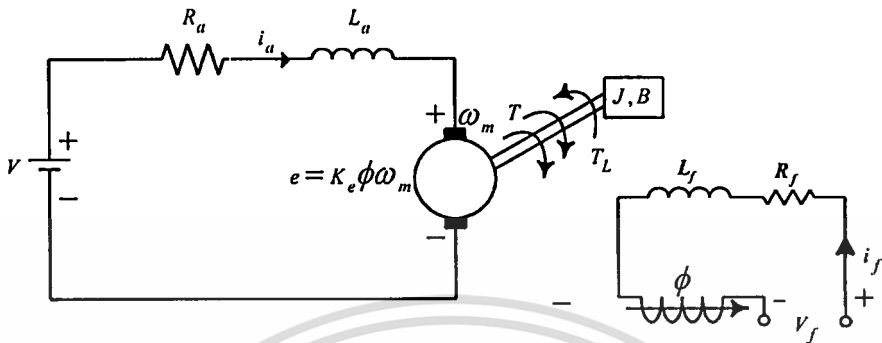
ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ลักษณะการควบคุมจะมีทั้งการควบคุมการทำงานแบบป้อนกลับ (Close loop) หรือไม่มีการป้อนกลับ (Open loop) โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ต้องการความแม่นยำ โดยลักษณะการควบคุมจะเป็นการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับแรงดันที่จ่ายเข้าขดลวดอาเมเจอร์ของมอเตอร์ ดังสมการที่ (2.9) ในการควบคุมดังกล่าวจะนิยมใช้มอเตอร์แบบขดลวดกระตุ้นแยก เนื่องจากมีความเหมาะสมในการออกแบบการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบแบบสถานะคงตัวที่ดี[11] ดังนั้นหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก ที่มีการควบคุมแบบ 2 วิธีคือ

- การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์ (Armature voltage control)
- การควบคุมที่ขดลวดฟิลด์ (Field control)

ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยกจะต้องมีการพิจารณาโมเดลทางคณิตศาสตร์และการป้อนกลับของระบบมอเตอร์ ซึ่งในการป้อนกลับของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เฉพาะในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบจะมีแบบป้อนกลับของแรงดันอาเมเจอร์และแบบป้อนกลับของแรงดันขดลวดฟิลด์ ดังนั้นวงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยกแสดงได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก

2.3.1 การควบคุมแรงดันอาเมเจอร์

ในการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์เมื่อทำการพิจารณาในภาพที่ 2.4 หากต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงจะอาศัยการควบคุมแรงดันที่จ่ายเข้าขดลวดอาเมเจอร์ โดยความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามขนาดของแรงดันที่จ่ายเข้ามอเตอร์ ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับสมการ(2.3) และ(2.4) เมื่อพบว่ากระแสอาเมเจอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของแรงบิดมอเตอร์เพิ่มขึ้นตาม ในการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในย่านที่ไม่กว้าง จะนิยมมีการควบคุมแรงดันเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการเพิ่มแรงดันอาเมเจอร์จะทำให้กระแสอาเมเจอร์เกิดรีปเปิ้ล อาจจะทำให้หน้าสัมผัสของคอมมิวเตเตอร์สึกกร่อนหรือเสียหายได้

ในการพิจารณาสถานะชั่วขณะของสมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก โดยจะทำการวิเคราะห์แบบทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบมอเตอร์จากวงจรสมมูลในภาพที่ 2.4 พิจารณาวงจรทางด้านอาเมเจอร์

$$v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K \omega_m \quad (2.13)$$

พิจารณาวงจรทางด้านเชิงกล

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T - T_M - B \omega_m \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.10) ในสมการ (2.14) และจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = K i_a - T_M - B \omega_m \quad (2.15)$$

นำสมการ (2.13) และ (2.15) มาแปลงลาปลาซและนำมาเขียนสมการใหม่ดังนี้

$$s L_a I_a(s) + R_a I_a(s) + K \omega_m(s) = V(s) \quad (2.16)$$

$$s J \omega_m(s) + B \omega_m(s) + T_M(s) = K I_a(s) \quad (2.17)$$

นำสมการ (2.16) มาจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_a(s) = \frac{V(s)}{R_a(1+s\tau_a)} - \frac{K \omega_m(s)}{R_a(1+s\tau_a)} = \frac{V(s) - K \omega_m(s)}{R_a(1+s\tau_a)} \quad (2.18)$$

เมื่อกำหนดค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.19)$$

นำสมการ (2.17) มาจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

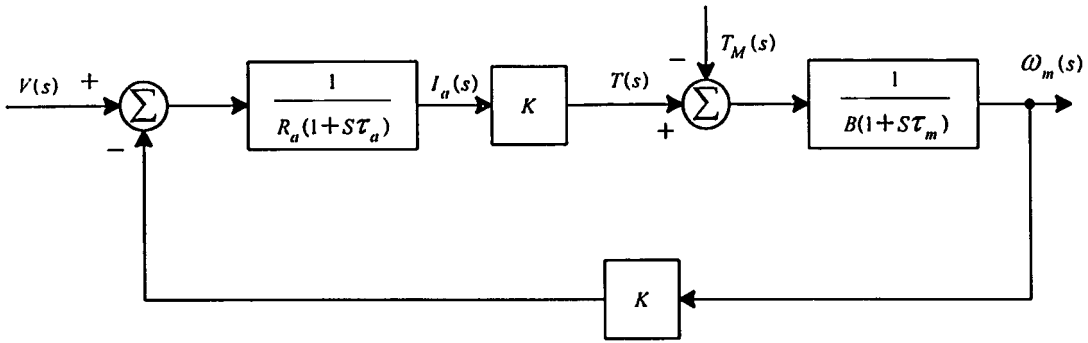
$$\omega_m(s) = \frac{(K/B) I_a(s)}{(1+s\tau_m)} - \frac{1}{B} \frac{T_M(s)}{(1+s\tau_m)} = \frac{1}{B} \frac{T(s) - T_M(s)}{(1+s\tau_m)} \quad (2.20)$$

เมื่อกำหนดค่าเวลาคงตัวทางกล

$$\tau_m = \frac{J}{B} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.18) และ (2.20) สามารถนำไปเขียนบล็อกไดอะแกรมในรูปของมอเตอร์กระแส

ตรงในลักษณะป้อนกลับของความเร็วรอบที่ถูกกำหนดด้วยแรงดัน emf ได้ดังภาพที่ 2.5 โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก

เมื่อพิจารณาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ในระบบป้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมการทำงาน ป้อนกลับของความเร็วรอบและการป้อนกลับของกระแสในระบบทรานเฟอร์ฟังก์ชัน จะถูกแสดงในรูปแบบของแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งในการคำนวณจะต้องหาค่าทั้งสองส่วน คือส่วนแรกกระแสอาเมเจอร์ต่อแรงดันอาเมเจอร์ และส่วนที่สองคือความเร็วรอบต่อกระแสอาเมเจอร์ เมื่อกำหนดให้แรงบิดที่เกิดขึ้นจากโหลดมีค่าเป็นศูนย์ $T_M = 0$ ในสมการ (2.20) นำมาจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\omega_m(s) = \frac{K_m I_a(s)}{(1+sT_m)} \quad (2.22)$$

จัดรูปแบบ K_m ได้สมการใหม่ได้ดังนี้

$$K_m = \frac{K}{B} \quad (2.23)$$

นำสมการ (2.22) แทนในสมการ (2.18) และจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{I_a}{V(s)} = \frac{B(1+sT_m)}{(K^2 + R_a B) + R_a B(T_a + T_m)s + R_a B T_a T_m s^2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{B}{(K^2 + R_a B)} \left[\frac{(1 + s\tau_m)}{1 + \frac{R_a B(\tau_a + \tau_m)}{K^2 + R_a B} s + \frac{R_a B \tau_a \tau_m}{K^2 + R_a B} s^2} \right] \\
&= \frac{K_{m1}(1 + s\tau_m)}{1 + \tau_{m1}(1 + \tau_a/\tau_m)s + \tau_{m1}\tau_a s^2} \quad (2.24)
\end{aligned}$$

จัดรูปแบบ τ_{m1} และ K_{m1} ได้สมการใหม่ได้ดังนี้

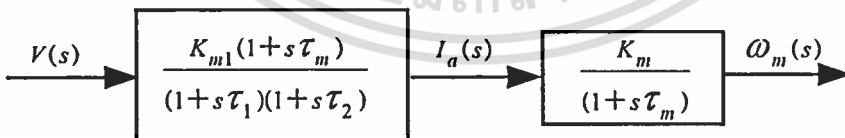
$$\tau_{m1} = JR_a / (BR_a + K^2) \quad (2.25)$$

$$K_{m1} = B / (BR_a + K^2) \quad (2.26)$$

นำสมการ (2.24) มาจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{K_{m1}(1 + s\tau_m)}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)} \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.22) และ (2.27) สามารถนำไปเขียนบล็อกไดอะแกรมในรูปแบบของการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง



ภาพที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรงโดยการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์

2.3.2 การควบคุมที่ขดลวดฟิลด์ (Field flux control)

ในการควบคุมแรงดันที่ขดลวดฟิลด์ลักษณะการควบคุมจะเป็นการป้อนแรงดันอาเมเจอร์ให้มีค่าคงที่และทำการควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้าขดลวดฟิลด์ โดยจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดฟิลด์เพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ป้อนให้ ในการควบคุมจะพบว่าเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าลดลงจะเป็นผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้ามเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง

ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงจะอาศัยการควบคุมแรงดันที่จ่ายเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาให้ผลการตอบสนองของเวลาที่เกิดจากการป้อนกลับของกระแสอาเมเจอร์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าในกระแสอาเมเจอร์จะถูกกำหนดโดยกระแสขดลวดฟิลด์และความเร็วรอบของมอเตอร์จะไม่นำมาพิจารณา จากวงจรสมมูลในภาพที่ 2.4 เมื่อทำการพิจารณาแรงดันที่ป้อนเข้าขดลวดฟิลด์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2.28)$$

เมื่อพิจารณาแรงบิดสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T = K_a I_f \quad (2.29)$$

จากระบบโหลดเชิงกลของมอเตอร์นำมาเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = K_a i_f - T_M - B\omega_m \quad (2.30)$$

ในสมการ (2.28) และ (2.30) ทำการแปลงลาปลาซโดยให้สถานะเริ่มต้นเท่ากับศูนย์และจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$V_f(s) = R_f I_f(s) + L_f s I_f(s) \quad (2.31)$$

$$J s \omega_m(s) = K_a I_f(s) - T_M(s) - B \omega_m(s) \quad (2.32)$$

นำสมการ (2.31) และ (2.32) จัดรูปแบบสมการใหม่ในเทอมสุดท้ายได้ดังนี้

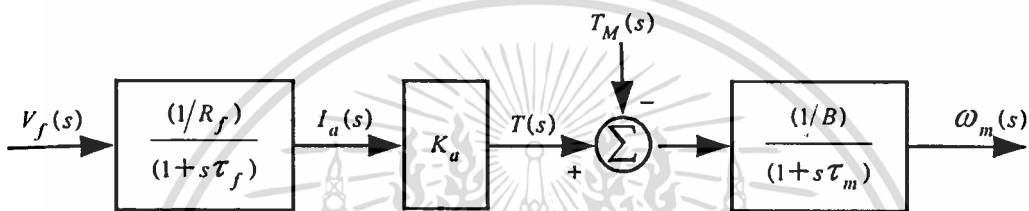
$$I_f = \frac{V_f(s)}{R_f(1 + s\tau_f)} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_m(s) = \frac{(K_a/B)I_f(s)}{(1+s\tau_m)} - \frac{T_M(s)}{B(1+s\tau_m)} \quad (2.34)$$

$$= \frac{T(s) - T_M(s)}{B(1+s\tau_m)} \quad (2.35)$$

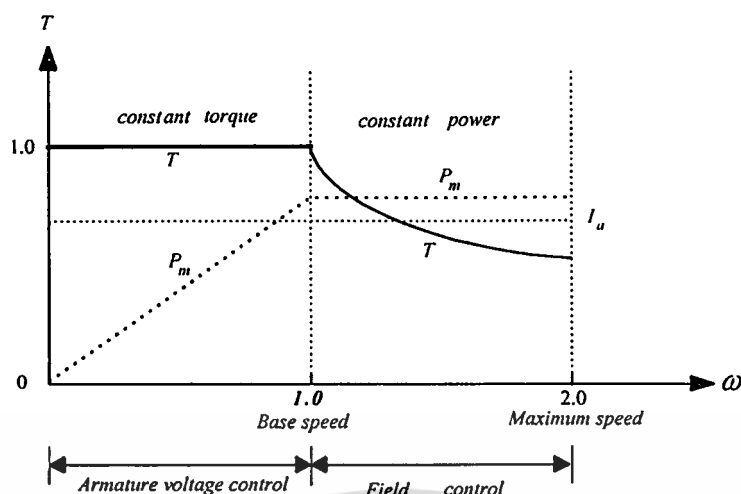
จากสมการ (2.33) และ (2.34) สามารถนำไปเขียนบล็อกไดอะแกรมในรูปแบบของการควบคุมแรงดันขดลวดฟิลด์ของมอเตอร์กระแสตรงได้ดังนี้



ภาพที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์โดยการควบคุมขดลวดฟิลด์

2.3.3 การควบคุมด้วยแรงดันอาเมเจอร์และขดลวดฟิลด์

ในการควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีนี้จะอาศัยการควบคุมแรงดันขดลวดอาเมเจอร์และการควบคุมแรงดันขดลวดฟิลด์ทั้งสองแบบมารวมกัน โดยมีขั้นตอนการควบคุมสองขั้นคือขั้นแรงบิดคงที่และขั้นกำลังไฟฟ้าคงที่ โดยพิจารณาจากภาพที่ 2.8 โดยจะเริ่มพิจารณาความเร็วรอบตั้งแต่ความเร็วเชิงมุมเท่ากับศูนย์จนถึงความเร็วเชิงมุมเท่ากับพิกัด $\omega_R = 1.0 \text{ p.u}$ ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าขั้นแรงบิดคงที่ (Constant torque) ส่วนอีกช่วงเริ่มตั้งแต่ความเร็วเชิงมุมที่พิกัด $\omega_R = 1.0 \text{ p.u}$ ถึงที่สองเท่าของพิกัดความเร็วเรียกขั้นการทำงานช่วงนี้ว่า ขั้นกำลังคงที่ (Constant Power) ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงในช่วงความเร็วรอบเท่ากับศูนย์จนถึงความเร็วรอบถึงพิกัดของมอเตอร์ จะทำการป้อนกระแสเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเป็นค่าที่พิกัด ซึ่งจะมีผลให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วมีค่าคงที่ตลอดการควบคุมในขั้นความเร็วนี้ [6]



ภาพที่ 2.8 กราฟช่วงการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบแรงดันอาร์เมเจอร์และขดลวดฟิลด์

การควบคุมย่านความเร็วรอบตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าความเร็วรอบที่พิกัด ในย่านนี้จะทำให้แรงบิดมีค่าคงที่ การเพิ่มความเร็ว สามารถทำได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ เมื่อกำหนดเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วมีค่าคงที่ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับศักดาไฟฟ้าที่ขั้วตามสมการดังนี้

$$E = k\phi\omega_m \quad (2.36)$$

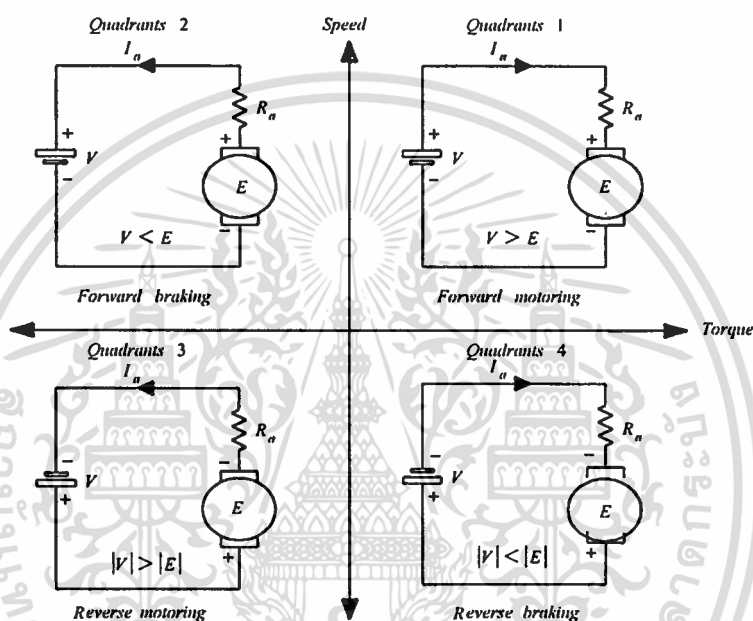
$$T = k\phi I_a \quad (2.37)$$

ในย่านที่แรงบิดคงที่ จะพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้น โดยระบบควบคุมจะต้องมีการป้องกันกระแสไม่ให้เกินค่าพิกัดของมอเตอร์ ในทางปฏิบัติเมื่อลดความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัด จะพบว่าภาระระบายความร้อนที่ใช้ใบพัดติดอยู่กับเพลลาของมอเตอร์ จะทำให้การระบายความร้อนลดต่ำลงขณะที่กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าคงที่ และจะทำให้เกิดการสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์รวมทั้งจะทำให้อุณหภูมิของเครื่องจักรสูงขึ้นด้วย ส่วนในย่านการควบคุมความเร็วตั้งแต่พิกัดจนถึงสองเท่าของพิกัดความเร็วซึ่งย่านนี้คือย่านกำลังคงที่ เมื่อไม่สามารถเพิ่มศักดาไฟฟ้าที่ขั้วสูงกว่าศักดาไฟฟ้าของมอเตอร์ได้ ดังนั้นเมื่อต้องการความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ทำได้โดยการลดเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วให้ต่ำกว่าพิกัด ซึ่งจะมีผลทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กลดลงตามค่าฟลักซ์ ดังสมการ(2.37) โดยค่ากระแสป้อนเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์

มีค่าเท่าเดิมอยู่ เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อสนับสนุนงานวิจัยและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง 4 ควอดแรนท์ (Four quadrants)

จากที่กล่าวมาเมื่อมอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลที่รับพลังงานไฟฟ้าเข้าไปแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานกลออกมาในรูปของความเร็วและแรงบิด ส่วนเจนเนอเรเตอร์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่รับพลังงานกลเข้าไปแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าออกมาในรูปกระแสและแรงดัน สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องจักรกลที่มีคุณสมบัติที่เป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดซึ่งพลังงานที่ได้รับและจ่ายออกมา[11]ซึ่งแบ่งการทำงานได้ทั้งหมด 4 ควอดแรนท์ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 วงจรการควบคุมในการทำงานทั้ง 4 ควอดแรนท์

จากภาพที่ 2.9 สามารถอธิบายการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงทั้ง 4 ควอดแรนท์ โดยพิจารณาจากโหมดการทำงานของมอเตอร์และทิศทางกระแสของกระแสพร้อมแรงดัน ในการควบคุมทิศทางหมุนของมอเตอร์กระแสตรง

- ควอดแรนท์ที่ 1 (Quadrants 1)

ค่าแรงดันแหล่งจ่ายที่ป้อนเข้าขดลวดอาเมเจอร์ V มีค่ามากกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาเมเจอร์ E ทำให้มีกระแสไหลของพลังงานจากแหล่งจ่าย V ไหลเข้าสู่มอเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดและความเร็วที่ตัวมอเตอร์

- ควอดแรนท์ที่ 2 (Quadrants 2)

ค่าแรงดันแหล่งจ่ายที่ป้อนเข้าขดลวดอาเมเจอร์ V มีค่าน้อยกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาเมเจอร์ E ทำให้มีพลังงานไฟฟ้าไหลออกจากตัวมอเตอร์ย้อนกลับไปที่แหล่งจ่าย V ทำให้เกิด

แรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าตรงกันข้ามกับควอดแรนท์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ควอดแรนท์ที่ 3 (Quadrants 3)

ค่าแรงดันแหล่งจ่ายที่ป้อนเข้าขดลวดอามเมอร์ V มีค่ามากกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอามเมอร์ E เหมือนกับควอดแรนท์ที่ 1 แต่มีศักย์ตรงกันข้าม จึงทำให้ทิศทางการหมุนและแรงบิดของมอเตอร์ตรงกันข้ามกับควอดแรนท์ที่ 1

- ควอดแรนท์ที่ 4 (Quadrants 4)

ค่าแรงดันแหล่งจ่ายที่ป้อนเข้าขดลวดอามเมอร์ V มีค่าน้อยกว่าค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอามเมอร์ E ทำให้มีพลังงานจากมอเตอร์ไหลย้อนกลับไปยังแหล่งจ่าย

2.5 การเบรกมอเตอร์

- ในสภาวะการเบรกทางไฟฟ้ามอเตอร์จะทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิดโดยพลังงานที่ได้จากการเบรกก็จะเกิดการไหลกลับสู่ระบบควบคุม โดยทั่วไปการเบรกจะเกิดขึ้นได้หลายวิธี [11]

- เมื่อมอเตอร์มีความเร็วรอบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการจ่ายแรงดันป้อนเข้าหรือแรงบิดมีทิศทางการตรงกันข้าม โดยสาเหตุเกิดจากเมื่อมอเตอร์ขับโหลดประเภทที่มีความเฉื่อยมากและจะพบว่าเมื่อต้องการหยุดมอเตอร์แบบรวดเร็วจะทำให้พลังงานที่สะสมอยู่ในมอเตอร์ถูกจ่ายกลับออกมา ซึ่งการทำงานลักษณะนี้มอเตอร์จะมีโหมดการทำงานแบบเครื่องกำเนิด ซึ่งในการควบคุมเมื่อต้องการให้มอเตอร์หยุดการทำงานแบบอย่างช้าควรมีการควบคุมด้วยความถี่และเมื่อต้องการหยุดมอเตอร์แบบรวดเร็วควรจะต้องอาศัยการเบรกทางไฟฟ้า

- ในการใช้งานโหลดบางชนิด เช่น รถลาก, อุบัติเหตุบางอย่างที่ต้องทำให้มอเตอร์หยุดกระทันหัน ในการเบรกทางไฟฟ้าจะช่วยในการรองรับในการหยุดอย่างนิ่มนวล

- ในการออกแบบใช้งานประเภทที่ต้องการหยุดอย่างนิ่มนวลและแม่นยำเช่น ลิฟต์, เครื่องยกของหนัก และใบจักรของระบบที่ติดอยู่ที่เพลามอเตอร์ในประเภทเครื่องบดหรือเครื่องโม่ต่างๆ หรืองานที่ต้องการประเภทกำลังงานในการควบคุมแรงดันที่มีความแน่นอนมากๆ

- โหลดบางชนิดที่ทำให้เกิดการสั่นซึ่งจะต้องไม่มีข้อผิดพลาด ในการควบคุมความเร็วรอบที่ทำให้ไม่เกินขอบเขตที่อันตรายของระบบ ถ้ามีจะต้องเกิดการเบรกขึ้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิด ในการลดความเร็วรอบให้มอเตอร์หมุนช้าลงและหยุดมอเตอร์อย่างรวดเร็วแบบทันทีทันใดนั้นกำลังงานที่เกิดขึ้นเชิงกลหรือที่เพลามอเตอร์ จะเปลี่ยนสภาวะการทำงานให้อยู่ในรูปเครื่องกำเนิด และจะส่งกำลังที่อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าจากอามเมอร์สู่ระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้กระแสอามเมอร์ที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์กระแสตรงจะตรงกันข้าม ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการเบรกจะมีทิศทางตรงกันข้ามในลักษณะต่อต้านกับแรงบิดหมุนของมอเตอร์ตามปกติ ดังนั้นการเบรกของมอเตอร์กระแสตรงจะไม่ควรสูงเกินไป โดยให้อยู่ในย่าน 1.4 – 1.75 เท่าของพิกัดกระแสสูงสุดของมอเตอร์ขณะพิกัดแรงบิดสูงสุด และจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดสนามแม่เหล็ก จะยังคงมีทิศทางเดิมอยู่ ถึงแม้จะเกิดพลังงานป้อนกลับไม่อาจรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสู่แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสอาเมเจอร์[6] ส่วนใหญ่ในการใช้งานจริงจะมีลักษณะการเบรคมี 3 แบบ

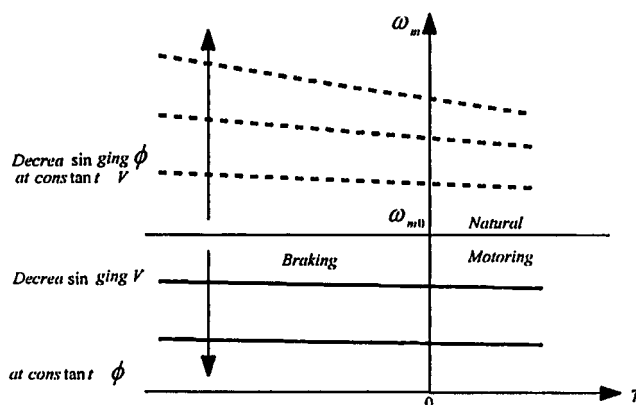
1. การคืนพลังงานเข้าสู่ระบบ(Regenerative braking)
2. การเบรคแบบถ่ายเทในรูปพลังงานความร้อน (Dynamic braking or dissipative braking)
3. การเบรคแบบปลั๊กกิง (Plugging or reverse voltage braking)

2.5.1 การคืนพลังงานเข้าสู่ระบบ

ในการพิจารณามอเตอร์จะเป็นแบบแยกขดกระตุ้น จากสถานะคงตัวในการคืนพลังงานแบบนี้จะพบว่าแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (emf) (e) จะมีค่ามากกว่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายและทิศทางกระแสอาเมเจอร์จะตรงกันข้าม การเกิดในลักษณะนี้มอเตอร์จะอยู่ในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดโดยพลังงานที่เกิดจากการเบรคนี้จะคืนกลับมาเข้าสู่ระบบในลักษณะซึ่งโครไนท์กับแหล่งจ่าย ดังนั้นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ดีควรจะมีการควบคุมกระแสในลักษณะการถ่ายเทพลังงานได้ทั้งสองทิศทาง

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.9 ในการออกแบบการใช้งานขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดแหล่งจ่ายกระแสตรงจะต้องรองรับพลังงานที่คืนกลับมาได้ โดยแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์กระแสตรง V สามารถควบคุมได้โดยกำหนดให้มีแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดอาเมเจอร์ มีค่าต่ำกว่าแรงดันที่ป้อนเข้า ซึ่งจะทำให้อัตราการหมุนโดยมีย่านของความเร็วที่มากกว่าศูนย์ และจะพบว่าความเร็วรอบขณะที่มีโหลดจะต่ำกว่าความเร็วรอบขณะไม่มีโหลด ขณะที่มีการควบคุมกระแสฟลักซ์ให้คงที่ตามอัตรากระแสของแผ่นป้ายมอเตอร์ ดังนั้นในการพิจารณาแรงบิดในสถานะที่เกิดการเบรคจะประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอาเมเจอร์และ แรงดันที่ป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม การพิจารณาสถานะมอเตอร์ไม่มีโหลดจะทำให้ความเร็วรอบสูงขึ้น โดยจะมีการควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้าให้มีค่าคงที่และให้กระแสที่ขดลวดฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลงในการพิจารณาแรงบิดที่เกิดจากการเบรคจะพิจารณาในด้านการเปลี่ยนแปลงของแรงดันป้อนเข้าและในการควบคุมแรงดันที่ขดลวดฟลักซ์ต้องแน่ใจว่าแรงดันที่อาเมเจอร์ จะต้องไม่มากกว่าฟลักซ์ของมอเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.10 สำหรับความเร็วรอบที่สูงหรือความเร็วรอบที่ต่ำจะขึ้นอยู่กับสถานะของโหลดมอเตอร์ ดังนั้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ในภาพที่ 2.10 ย่านการทำงานจะอยู่ในควอดแรนต์ที่ 2 โดยจะต้องมีค่าคงที่ที่เหมาะสมจึงสรุปได้ว่าการเบรคลักษณะนี้จะเป็นการอาศัยหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจากโหมดการทำงานเป็นมอเตอร์เปลี่ยนเป็นโหมดการทำงานของเครื่องกำเนิด โดยพลังงานจลน์ที่ได้จากการหมุนจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วคืนกลับสู่แหล่งจ่ายป้อนเข้า

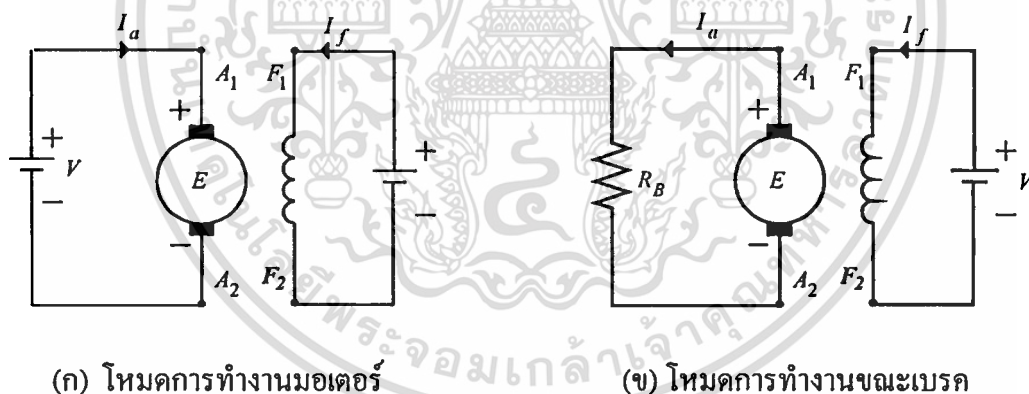
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดการคืนพลังงานสู่ระบบในสถานะการเบรก

2.5.2 การเบรกแบบการถ่ายเทในรูปพลังงานความร้อน

สำหรับการเบรกที่เกิดจากการถ่ายเทในรูปความร้อนของมอเตอร์แบบขดลวดกระตุ้นแยกจะประกอบด้วยความต้านทานที่ต่อขนานกับแรงดันป้อนเข้าสามารถพิจารณาจากภาพที่ 2.11

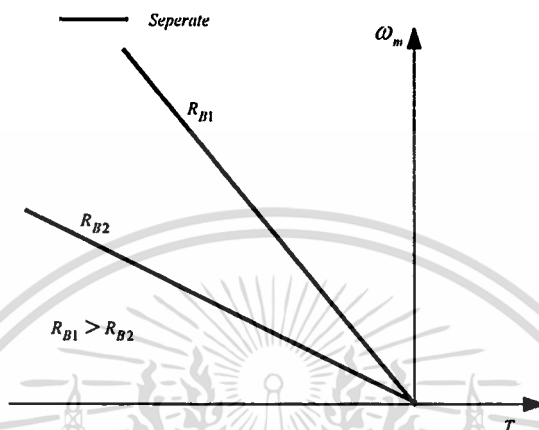


ภาพที่ 2.11 การเบรกแบบไดนามิกสำหรับมอเตอร์กระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก

การเบรกในหัวข้อนี้จะเป็นการหยุดมอเตอร์โดยการทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนการทำงานจากมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจ่ายพลังงานให้ตัวความต้านทานภายนอกที่ต่อขนานกับขดลวดอาเมเจอร์ จากภาพที่ 2.11(ข) ซึ่งความต้านทานจะทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องจักรในสถานะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อนสูญเสียออกภายนอก การที่ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้ เนื่องจากตัวหมุนของเครื่องจักรหมุนอยู่แล้ว เพียงแต่ยังต้องมีกระแสป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ของขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งเมื่อต่อความต้านทานก็จะมีกระแสไหล โดยลักษณะทิศทางของแรงบิดที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

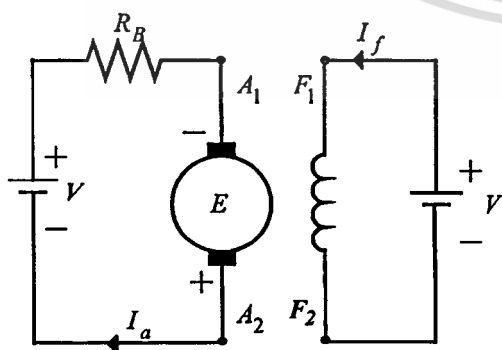
เกิดจากสนามแม่เหล็ก จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุน ดังนั้นทั้งมอเตอร์และภาระจะลดความเร็วลง ซึ่งวิธีการเบรคลักษณะนี้จะเป็นที่นิยมมากคือขอมสูญเสียพลังงานทางด้าน kinetic energy ที่เปลี่ยนรูปมาเป็นความร้อนที่ตัวความต้านทานซึ่งสามารถระบายความร้อนได้ง่ายและรวดเร็ว ยังไปถึงสามารถปรับอัตราการลดความเร็ว[6],[11]



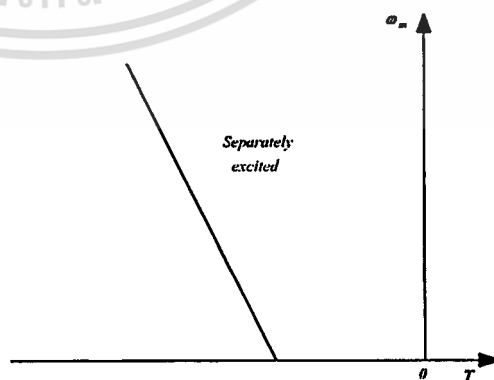
ภาพที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดแบบไดนามิกเบรคกิง

2.5.3 การเบรคแบบปลั๊กกิง

ขณะที่ขั้วอาเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบแยกขดกระตุ้น เมื่อเกิดการหมุนในทิศทางตรงกันข้าม (Reverse) จะพบว่าแรงดันที่ป้อนให้อาเมเจอร์และแรงดันเหนี่ยวนำในสนามแม่เหล็กมีทิศทางเหมือนกันและกระแสอาเมเจอร์จะมีทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดต้านในลักษณะเบรค ซึ่งระบบการเบรคลักษณะแบบนี้เรียกว่า ปลั๊กกิง สำหรับการต่อในมอเตอร์กระแสตรงและความสัมพันธ์ จะแสดงดังภาพที่ 2.13



(ก) วงจรมอเตอร์แบบกระตุ้นแยก



(ข) กราฟความสัมพันธ์ความเร็วรอบและแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.13 ลักษณะการต่อแบบปลั๊กกิง

เมื่อทำการควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่พิกัดสูงสุดจะทำให้แรงดันจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกับแรงดันที่ป้อนเข้าอามเจอร์ เพราะฉะนั้นในช่วงแรกของการเบรคแรงดันทั้งหมดใน อามเจอร์จะมีค่าใกล้เคียงสองเท่า ดังนั้นในการป้องกันกระแสเกินจะต้องทำการลิมิตกระแสโดยค่าความต้านทานในการเบรคจะต้องเป็นสองเท่าของความต้านทานในการสตาร์ท

จากความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบจากกราฟได้บอกถึงสมรรถนะของมอเตอร์แบบขดลวดกระตุ้นแยกสำหรับการเบรคแบบปลั๊กกิง สามารถแสดงโดยสมการ (2.12) โดยความสัมพันธ์จะแสดงได้ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งการเบรคลักษณะแบบนี้แรงบิดด้านจะต้องมากกว่าอัตราความเร็วรอบที่เป็นศูนย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความต้านทานอามเจอร์จะไม่มีผลต่อการเบรค เนื่องจากการเบรคแรงบิดไม่ได้หยุดที่ศูนย์ขณะที่ความเร็วรอบเป็นศูนย์

2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.6.1 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อเกิดการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์จะมีกระแสไฟฟ้าในขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์โดยสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์นี้จะขุดตัวและพองตัวตามการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไซน์ของไฟฟ้ากระแสสลับเป็นสนามแม่เหล็กหมุน คือ สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ และไปตัดกับตัวนำในโรเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำและกระแสเหนี่ยวนำไปสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์นี้จะไปดึงดูดให้สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์หมุนตามไปด้วย จึงทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ซึ่งความเร็วของโรเตอร์ที่หมุนไปนี้จะหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

สลลิป (Slip) คือ อัตราส่วนของความเร็วรอบที่เกิดจากความแตกต่างของความเร็วรอบที่โรเตอร์กับความเร็วรอบที่สนามแม่เหล็กหมุน (Synchronous Speed)

$$N_s = \frac{120f}{P} \tag{2.38}$$

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \tag{2.39}$$

$$N_r = N_s(1-s) \tag{2.40}$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s = 0 \text{ เป็นผลให้ค่า } N_r = N_s$$

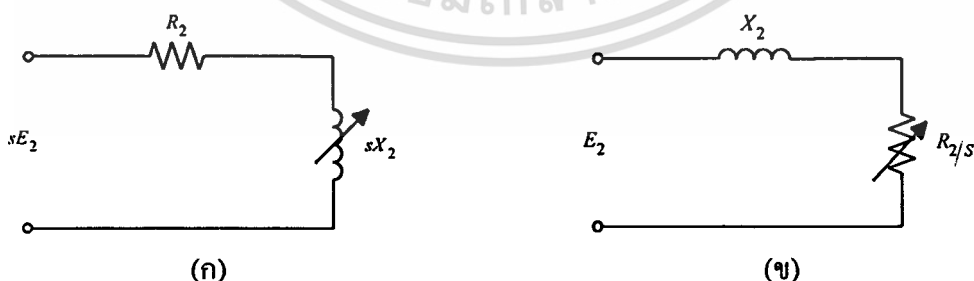
ปกติแล้วมอเตอร์จะมีสลิปประมาณ 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับภาระเต็มที่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์แต่เมื่อภาระที่ได้รับน้อยลงไปก็ทำให้สลิปลดลง

2.6.2 วงจรสมมูลของโรเตอร์ (Equivalent Circuit of Rotor)

เมื่อมอเตอร์ได้รับภาระจะทำให้เกิดกระแสไหลภายในโรเตอร์และยอมทำให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ช้าลงไป เมื่อเป็นเช่นนั้นยอมทำให้ค่าสลิปเพิ่มขึ้น นั่นคือทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โรเตอร์เพิ่มขึ้น เป็น sE_2 อีกค่าหนึ่ง ส่วนค่ารีแอคแตนซ์ X_2 ของโรเตอร์ ก็เปลี่ยนจากค่า X_2 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อขณะอยู่กับที่ไปเป็น sX_2 เช่นกันแต่ค่า R_2 นั้น ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของสลิปเลย ดังนั้นจากความสัมพันธ์นี้ จึงหาสมการของกระแสที่ไหลในโรเตอร์ได้เป็น

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \\ &= \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \end{aligned} \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.41) เขียนวงจรของโรเตอร์ได้โดยที่แหล่งจ่ายไฟ sE_2 ต่อพร้อมกับตัวต้านทาน R_2 ซึ่งมีค่าคงที่ ซึ่งต่ออนุกรมกับค่ารีแอคแตนซ์ที่เปลี่ยนค่าไปมาได้อีกคือ sX_2 ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แหล่งจ่ายและรีแอคแตนซ์

(ก) วงจรแหล่งจ่ายและรีแอคแตนซ์เปลี่ยนค่าตามค่าสลิป

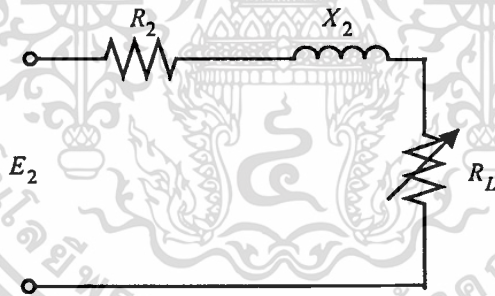
(ข) วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.14(ข) จะได้ E_2 และ X_2 เป็นตัวคงที่แต่ R_2 เปลี่ยนค่า ดังนั้น ความต้านทานของวงจรคือ

$$\begin{aligned}\frac{R_2}{s} &= R_2 + \frac{R_2}{s} - R_2 \\ &= R_2 + R_2 \frac{(1-s)}{s}\end{aligned}\quad (2.42)$$

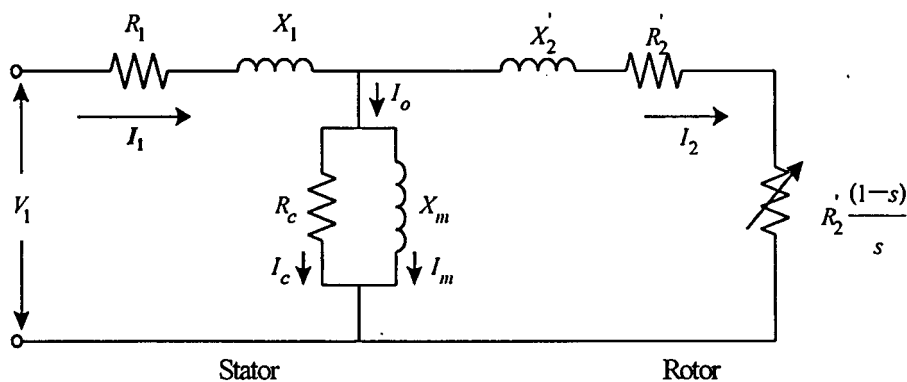
ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานสองส่วนคือ R_2 แทนการสูญเสียของลวดทองแดงในโรเตอร์ (Copper Loss) และอีกส่วนหนึ่งคือ ซึ่งก็คือ $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ ภาระความต้านทาน R_L ที่เป็นสมมูลย์ทางไฟฟ้าแทนภาระทางกล หรือกล่าวได้ว่าภาระทางกลของมอเตอร์ ก็คือความต้านทานจรรมคาคที่มีค่าเท่ากับ $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ของโรเตอร์ที่มีค่าภาระความต้านทาน R_L ได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 วงจรสมมูลย์ของโรเตอร์เมื่อมีภาระ R_L

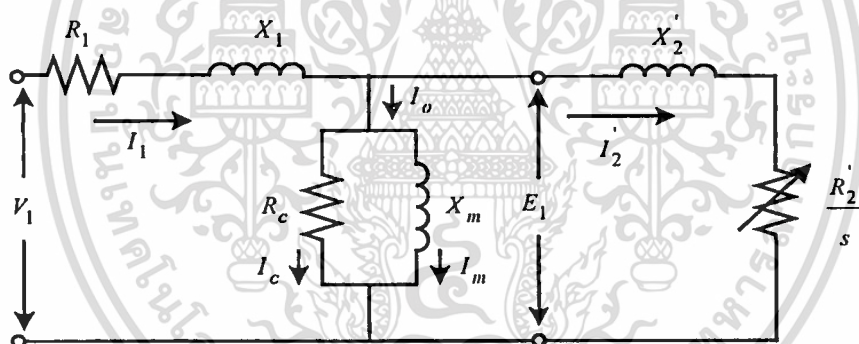
2.6.3 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit of Induction Motor)

เนื่องจากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำอาศัยหลักการในการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลงจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลย์เช่นเดียวกับหม้อแปลง แต่แตกต่างกันที่ขดลวดขั้วของหม้อแปลงนั้นไม่เคลื่อนที่เหมือนกับ โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2.16 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 2.16 นี้สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่โดยการย้ายค่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นทางโรเตอร์ไปไว้ทางด้านสเตเตอร์เพื่อความสะดวกในการคำนวณและวิเคราะห์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.17 ซึ่งการย้ายไปนี้ไม่ได้ทำให้ค่าต่าง ๆ ผิดพลาดไปจากความเป็นจริงมากนัก



ภาพที่ 2.17 วงจรสมมูลที่ย้ายค่าต่างๆ จากด้านโรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์

2.6.4 ปรากฏการณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะโรเตอร์อยู่กับที่

เนื่องจากว่าโรเตอร์นั้นถูกลัดวงจรไม่ว่าจะในขณะอยู่กับที่หรือใช้งานอยู่ก็ตาม ดังนั้นจึงทำให้กระแสไหลขึ้นภายในตัวหมุนอันเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟ E_2 ซึ่งเป็นค่าแรงเคลื่อนขณะอยู่กับที่ ดังนั้น กระแสของโรเตอร์ ตามสมการดังนี้

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ขณะอยู่กับที่นั้นสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากสเตเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (N_s) โดยผ่านตัวโรเตอร์ด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของไฟที่จ่ายเข้าไป ดังนั้น จึงทำให้เกิดแรงบิดขณะที่อยู่กับที่ออกมาทั้งหมดเป็น T_0 นั่นคือ กำลังไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปให้โรเตอร์ทั้งหมดมีค่าเป็นกำลังกล ขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุนตามสมการดังนี้

$$P_r = \frac{2\pi N_s T_0}{60} \quad (2.44)$$

เนื่องจากมอเตอร์ยังไม่หมุน เพราะฉะนั้นกำลังทางกลที่จ่ายออกมาจึงมีค่าเป็นศูนย์ แต่ว่ากำลังที่ไม่ได้จ่ายออกมานี้ได้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของกำลังไฟฟ้าภายในโรเตอร์ตามสมการดังนี้

$$\theta_0 = \cos^{-1} \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.45)$$

นำสมการ (2.45) จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{2\pi N_s T_0}{60} = 3E_2 I_2 \cos \theta_0 \quad (2.46)$$

นำสมการ (2.43) และ (2.45) แทนในสมการ (2.46) และจะได้สมการจัดรูปแบบใหม่ดังนี้

$$T_0 = \left(\frac{60}{2\pi N_s} \right) \left(\frac{3E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \right) \quad (2.47)$$

จากกฎข้อ 3 ของนิวตันกล่าวถึงแรงกิริยาข่มเท่ากับแรงปฏิกิริยานั้นคือ แรงที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ยังมีค่าเท่ากับแรงที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ เพียงแต่มีทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นจึงสังเกตว่า กำลังที่ส่งมาจาก สเตเตอร์คือกำลังที่ป้อนไปให้ยังโรเตอร์นั่นเอง

จากสมการ (2.47) พบว่าแรงบิดขณะอยู่กับที่จะมีค่าสูงเมื่อรีแอกแตนซ์ X_2 มีค่าต่ำ และแรงบิดขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน R_2 ด้วย และถ้าต้องการให้แรงบิดมีค่าสูงสุคนั้นต้องทำให้ค่าความต้านทาน R_2 มีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ X_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.48) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 ปรัชญาการณของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อได้รับภาระ

เมื่อโรเตอร์ได้รับภาระจนตัวมันเองมีความเร็วโรเตอร์ (N_r) ซึ่งช้ากว่าความเร็วซิงโครนัส (N_s) ดังนั้นความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของโรเตอร์ตามสมการดังนี้

$$N_s - N_r = sN_s \quad (2.49)$$

จากความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนช้าลงนี้ ย่อมทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โรเตอร์ลดลงจาก E_2 เป็น sE_2 เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์ลดลงไป และความถี่ของโรเตอร์ลดลงจาก f_s เป็น sf_s และค่ารีแอกแตนซ์ลดลงจาก X_2 เป็น sX_2

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2} \quad (2.50)$$

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} \quad (2.51)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} \text{ (Lagging)} \quad (2.52)$$

$$P_m = (1-s)P_r \quad (2.53)$$

ส่วนกำลังกลที่ตัวหมุนส่งออกมาเพื่อขับภาระนั้นจะมีค่าน้อยกว่ากำลังที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์เนื่องจากว่าต้องการกำลังจำนวนหนึ่งไปชดเชยส่วนที่สูญเสียไป คือแรงเสียดทาน แรงลม และการสูญเสียที่แกนเหล็ก โรเตอร์อีกเล็กน้อยในการทำงานตามปกตินั้น สามารถตัดค่าการสูญเสียภายในโรเตอร์ที่แกนเหล็กทิ้งไปได้เพราะความถี่ที่โรเตอร์มีค่าน้อยมาก

$$P_C = sP_r \quad (2.54)$$

$$P_r : P_m : P_C = 1 : (1-s) : s \quad (2.55)$$

แต่เนื่องจากว่าส่วนที่สูญเสียที่โรเตอร์เนื่องมาจากทองแดงทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ $3I_2^2 R_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_C = \frac{3s^2 E_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \quad (2.56)$$

$$P_r = \frac{P_C}{s} = \frac{3sE_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \quad (2.57)$$

$$P_{mr} = (1+s)P_r = \frac{3s(1-s)E_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \quad (2.58)$$

$$T_L = \left(\frac{60}{2\pi N_s} \right) \left(\frac{3sE_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \right) \quad (2.59)$$

2.7 คุณสมบัติแรงบิด

เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสลลิปนั้น จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นซึ่งหาได้จากสมการ (2.60)

$$T = \left(\frac{3 \times 60}{2\pi N_s} \right) \left(\frac{3sE_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \right) \quad (2.60)$$

จากสมการ (2.60) ค่า $\left(\frac{3 \times 60}{2\pi N_s} \right), E_2, R_2, X_2$ เป็นค่าคงที่ดังนั้นพบว่าแรงบิด T

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสลลิป

$$T_{\max} = \left(\frac{3 \times 60}{2\pi N_s} \right) \left(\frac{E_2^2}{X_2} \right) \quad (2.61)$$

จากสมการ (2.60) พบว่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ R_2 ของโรเตอร์ และจะมีค่าแรงบิดสูงสุดค่าหนึ่งเท่านั้นโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ R_2 ของโรเตอร์แต่ขึ้นอยู่กับค่ารีเอกแตนซ์ X_2 ของโรเตอร์

2.8 การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์

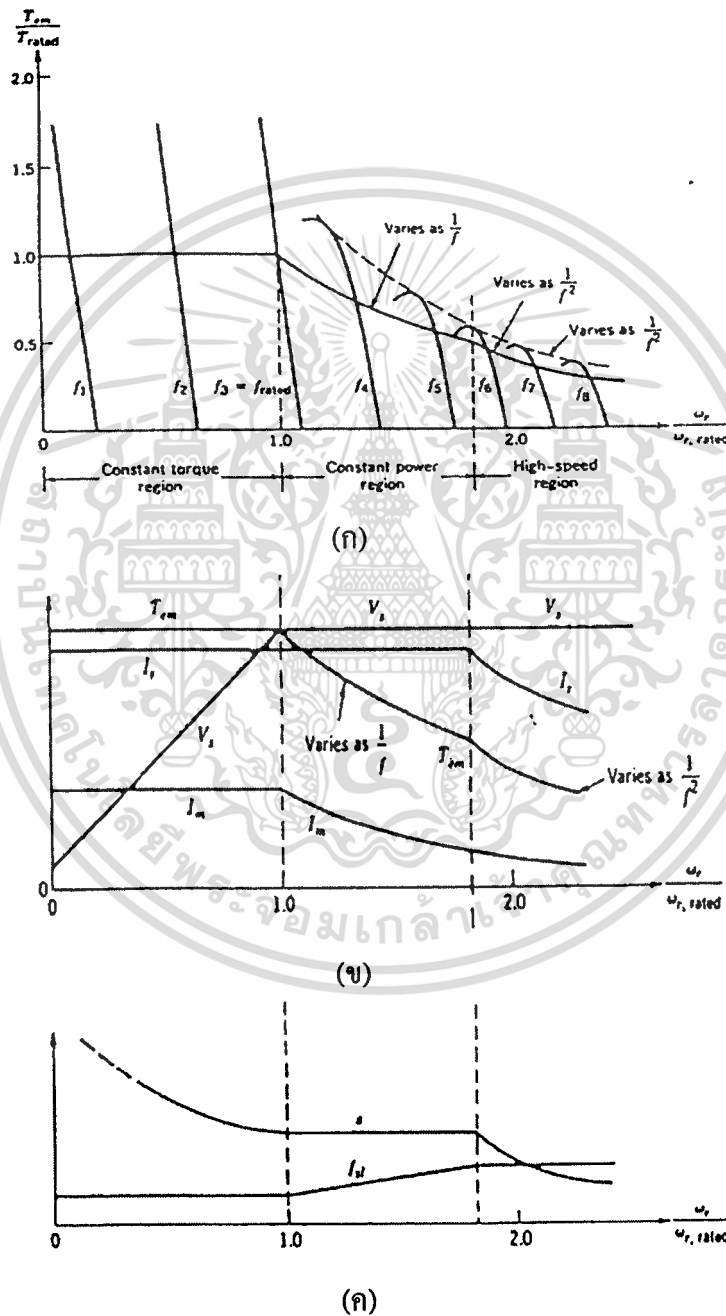
การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์โดยให้มอเตอร์สามารถที่จะทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดหรือสูงกว่าพิกัดได้โดยการควบคุมแรงดันและความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งวิธีการควบคุมดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตเป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยจะทำให้สมรรถนะของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งการทำงานที่ความเร็วต่ำและที่สูงกว่าพิกัด สมรรถนะนี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่แข็งแรงจึงทำให้มันสามารถปฏิบัติงานที่ความเร็วสูงเป็น 2 เท่าของความเร็วที่พิกัดได้โดยไม่มีปัญหาทางกลเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงบิดและกำลังงานซึ่งเป็น ฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาให้ละเอียดและชัดเจน กราฟคุณลักษณะของแรงบิดกับความเร็วจะแสดงอยู่ในภาพที่ 2.18 (ก) และในภาพที่ 2.18 (ข) จะแสดงค่าของแรงดัน, ความถี่, กระแสและแรงบิดซึ่งจะถูกพล็อตให้เป็นฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์ ส่วนในภาพที่ 2.18 (ค) จะเป็นแสดงการพล็อตค่าความถี่ที่โรเตอร์กับค่าของสลิป [7],[13]สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

- ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)
- ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

2.8.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าพิกัดในภาพที่ 2.18 (ก) จะแสดงถึงคุณลักษณะแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าความถี่ที่โรเตอร์ต่ำๆ และค่าฟลักซ์ในแอร์แก๊ปที่มีค่าคงที่โดยการควบคุมค่าแรงดันต่อความถี่ ในภาพที่ 2.18 (ข) จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันที่สเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆ ค่าของกระแสแมกนีไตซิงค์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดแมกนีไตซิงค์ที่ใช้สนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากค่าความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดแมกนีไตซิงค์ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์ เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทานของสเตเตอร์ ในกรณีที่ใช้การควบคุมค่าแรงดันต่อความถี่นั้นหากค่าฟลักซ์ในแอร์แก๊ปถูกรักษาให้คงที่แล้วมอเตอร์ก็สามารถให้แรงบิดที่พิกัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยค่าของกระแสที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด และค่าความถี่ที่โรเตอร์มีค่าคงที่ดังที่แสดงไว้ดังภาพที่ 2.18 (ข) ซึ่งในช่วงการทำงานนี้จะเรียกว่า ช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region) ในช่วงนี้ค่าของความถี่ที่โรเตอร์จะถูกรักษาให้คงที่เท่ากับค่าซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด ดังที่แสดงในภาพที่ 2.18 (ค) และช่วงที่แรงบิดคงที่เท่ากับที่พิกัดนั้นค่ากำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ก็จะมีค่าคงที่ด้วย นั่นหมายความว่าทุกช่วงของการทำงานมอเตอร์จะต้องมีค่ากำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ที่คงที่

หมายถึงค่าของกระแสโรเตอร์ก็มีค่าคงที่เช่นกันอย่างไรก็ตามการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดนั้น จะเกิดปัญหาในเรื่องของการระบายความร้อนขึ้นซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากกำลังงานสูญเสียที่ โรเตอร์หากมีปัญหในเรื่องของความร้อนที่ไม่สามารถระบายได้ทัน (มอเตอร์ที่มีลักษณะระบาย ความร้อนผ่านโครงอย่างเดียว) อาจทำให้แรงบิดที่ได้มีการลดลง



ภาพที่ 2.18 กราฟคุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การปรับเปลี่ยนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดนั้น จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วพิกัดได้ ในงานที่มีการปรับความเร็วของมอเตอร์จะต้องไม่เกินกว่าค่าพิกัดของตัวมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงต้องรักษาค่าของแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับพิกัดที่แหล่งจ่าย โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอัตราส่วนของค่าแรงดันต่อความถี่จะมีค่าลดลง ซึ่งมีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ในแอร์เก็บด้วย โดยจะเห็นได้ว่า ณ การทำงานที่ความถี่สูงกว่าพิกัดแล้วเส้นโค้งแรงบิดกับความเร็วจะมีความชันแปรตามค่า ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (ก) และที่ขีดจำกัดของมอเตอร์ในช่วงนี้ค่าของกระแสที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าที่พิกัดเหมือนกับในช่วงที่แรงบิดคงที่ แต่ในช่วงนี้ค่าของสลิปจะมีค่าคงที่ ส่วนค่าของความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่ามากขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นโดยจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าแปรผันกับความถี่ตามสมการดังนี้

$$T_{ex,max} = \frac{f_{rate}}{f} T_{rated} \quad (2.62)$$

$$P_{en,max} = \omega_r T_{em,max} \quad (2.63)$$

ในสมการ (2.61) จะแสดงถึงค่าคงที่ที่ค่าพิกัดโดยจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบจะแปรตามความถี่ ดังนั้นในช่วงนี้เราจึงเรียกว่าช่วงกำลังงานคงที่ (Constant Power Region) ในทางปฏิบัติแล้วมอเตอร์สามารถจ่ายกำลังสูงกว่าพิกัดโดยไม่เกิดอะไรขึ้นเนื่องจาก

1. ค่าของกระแสแมกนีโตซิงค์ลดลงเป็นผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ดังนั้นค่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์จึงมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่พิกัดจึงทำให้กระแสในโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นได้ ดังนั้นแรงบิดและกำลังก็สูงขึ้นได้
2. เมื่อค่ากระแสแมกนีโตซิงค์ลดลงค่าสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าลดลงในขณะเดียวกันการระบายความร้อนก็จะดีเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูงกว่าที่พิกัด

2.8.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ไฟที่โรเตอร์คงที่)

เมื่อเราให้ค่าของแรงดันทางด้านอินพุต มีค่าเท่ากับที่พิกัด ค่าของความเร็วที่เพิ่มขึ้น 1.5 ถึง 2 เท่า ของพิกัด (ขึ้นอยู่กับกรอกแบบมอเตอร์) จะทำให้ค่าของฟลักซ์ในแอร์เก็บมีค่าลดลงมากซึ่งมอเตอร์จะมีค่าเข้าใกล้ Pull-Out Torque ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (ก) และที่ความเร็วสูงกว่าที่พิกัดมอเตอร์จะจ่ายแรงบิดได้ไม่ถึงค่าพิกัด ในขณะที่ค่าความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่าคงที่ส่งผลทำให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสมอเตอร์จะลดลงในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ภายนอก การนำความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (ข) การรักษาอัตราส่วนของแรงดันทางด้านอินพุตให้คงที่นั้น ค่าไม่จำกัดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

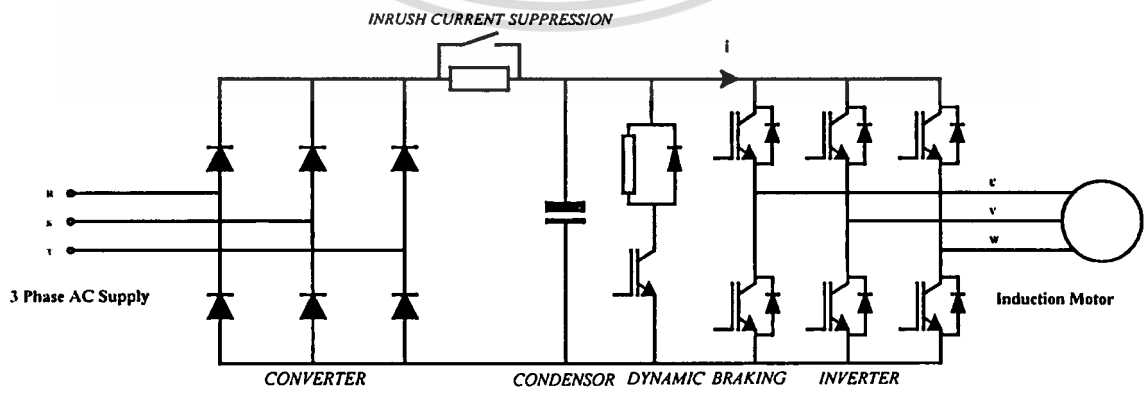
ของแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ได้ถูกจำกัด โดยที่กระแสที่มอเตอร์ได้รับดังนั้นกระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

จากเทคนิคในการควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันความถี่ เป็นวิธีที่สะดวกในแง่ของการปฏิบัติ โดยสามารถเร่งความเร็วจากศูนย์ถึงความเร็วที่ต้องการ โดยให้มีแรงบิดสูงสุดได้และสามารถควบคุมให้มีการทำงานที่เร็วกว่าที่พิกัดหรือต่ำกว่าที่พิกัดได้นอกจากนี้ในตอนที่ต้องการหยุดการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำอาจจะควบคุมให้สลลปมีค่าเป็นลบซึ่งหมายถึงทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานเป็นเครื่องกำเนิดซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการสลายพลังงานหรือคืนพลังงานกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟได้

2.9 การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยพื้นฐานสามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์หรือปรับขนาดของแรงดันหรือกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการทำงานสามารถทำได้โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์-อินเวอร์เตอร์ในการสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.19 วงจรคอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ในการแปลงไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์ก็จะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสามารถปรับเปลี่ยนความถี่และขนาดของแอมป์ปิจูดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดและความถี่ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะมีวิธีการควบคุมการทำงานด้วยกันอยู่หลายภาพที่แบบ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบการควบคุมที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมของขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งได้แก่

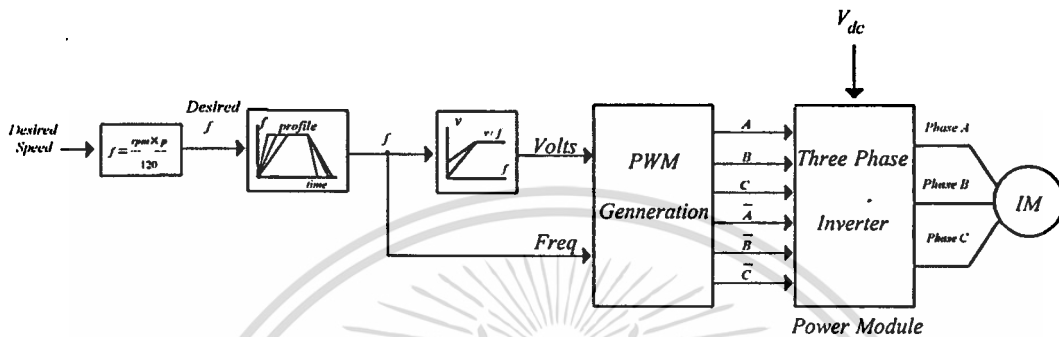
- การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แบบวงรอบเปิด (Open Loop V/F)
- การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)
- การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensor less Vector Control)



ภาพที่ 2.19 วงจรคอนเวอร์เตอร์ – อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

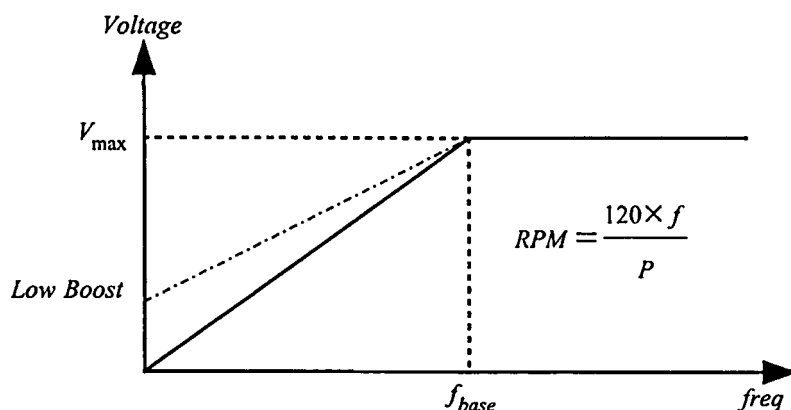
ภาพที่ 2.20 (ข) แสดงถึงการปรับเปลี่ยนแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยคงที่ค่าความถี่ จะสังเกตได้ว่าค่าของแรงบิดที่ได้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าของแรงดัน การควบคุมมอเตอร์ในทางอุดมคติแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เพื่อสร้างแรงบิดที่มีค่าที่พิกัดนั้นจะต้องมีค่าเป็นสัดส่วนกัน แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างของมอเตอร์จะประกอบไปด้วยขดลวดทางด้านสเตเตอร์ซึ่งมีค่าความต้านทานจำนวนหนึ่ง[7]



ภาพที่ 2.22 บล็อกการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่

หากต้องการควบคุมให้มีการทำงานที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้มีการลดลงไป เนื่องจากค่าของแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดังนั้นในการทำงานจริงจะต้องมีการเพิ่มแรงดันบูตในช่วงความถี่ต่ำเพื่อชดเชยในส่วนของคุณค่าแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานสเตเตอร์ของมอเตอร์ในภาพที่ 2.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีค่านี้ถึงผลของค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ ในภาพที่ 2.21 (ก) แสดงค่าแรงบิดที่มีค่าลดลงในกรณีที่มีการทำงานที่ความถี่ต่ำและภาพที่ 2.21 (ข) แสดงค่าแรงบิดที่มีการชดเชยโดยการเพิ่มแรงดันบูตในช่วงความถี่ต่ำ

จากความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่ในข้างต้น การควบคุมการทำงานสามารถแสดงบล็อกการทำงานได้ในภาพที่ 2.22 ขั้นตอนการทำงานจะอาศัยโปรไฟล์ (Profile) และบล็อกความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่ในการควบคุมการทำงาน โดยที่โปรไฟล์นี้เป็นชุดข้อมูลที่ใช้เก็บค่าการเปลี่ยนแปลงค่าคำสั่งความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ในสถานะที่มีการเร่งความเร็วรอบ และลดความเร็วรอบสั่งการอย่างรวดเร็ว ซึ่งโปรไฟล์นี้จะทำหน้าที่เสมือนหน่วงเวลาของความถี่ที่ได้รับจากอินพุต (แป้นคำสั่ง) แล้วค่อยๆ เพิ่ม/ลดความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ เพื่อป้องกันค่ากระแสไม่ให้เกินพิกัดของมอเตอร์ ส่วนบล็อกความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่จะมีหน้าที่ในการปรับค่าของการมอดูเลทให้มีค่าเหมาะสมกับค่าความถี่ที่เลือกในการใช้งานนั้นๆ โดยเฉพาะค่าของแรงดันบูตในช่วงที่มีการใช้งานที่ความถี่ต่ำ ดังภาพที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่



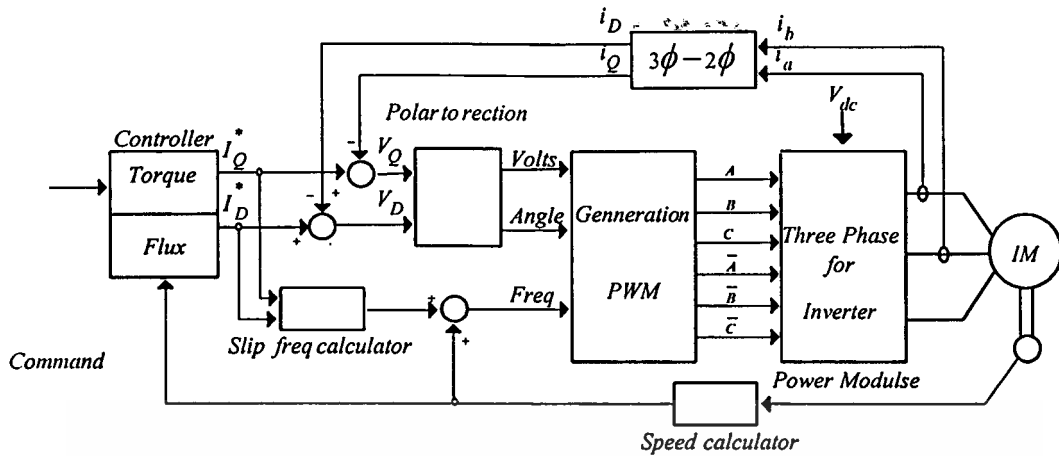
ภาพที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ที่ใช้ในการควบคุม

หลังจากการเลือกค่าของการมอดูเลตแล้วจะได้ขนาดสัญญาณที่มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความถี่สั่งการจากเป็นคำสั่งโดยสัญญาณที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป

2.9.2 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)

การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมที่เสนอมุมมองใหม่ของปริมาณไฟฟ้า 2 เฟส ไปเป็นเวกเตอร์ในระบบ 2 แกน ซึ่งมีพฤติกรรมทำเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก คือมีปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดสนาม (Field winding) เพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กและมีปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงบิด ซึ่งรูปแบบการควบคุมการทำงานจะต้องมีการแปลงแกนจาก 3 แกน (a,b,c) ไปเป็นเวกเตอร์แบบ 2 แกน (d,q) โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ในการแปลงแกน โดยที่เวกเตอร์กระแสในแกน d จะมีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก ในขณะที่เวกเตอร์กระแสในแกน q จะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา ซึ่งหัวใจของการควบคุม คือการควบคุมสนามแม่เหล็กให้คงที่ในระดับพอเหมาะ เพื่อไม่เกิดปัญหาเรื่องการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก รวมทั้งสามารถลดปริมาณสนามแม่เหล็กเพื่อเร่งความเร็วรอบให้เกินค่าความเร็วพิกัดได้ในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมค่าแรงบิดได้โดยตรง และเป็นอิสระจากการควบคุมสนามแม่เหล็กอีกด้วย จากภาพที่ 2.24 เป็นการแสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งการทำงานจะรับคำสั่งสนามแม่เหล็กและคำสั่งแรงบิด ซึ่งผ่านมาจากปริมาณกระแสคำสั่ง I_d^* และ I_q^* แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อทำการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดดังกล่าว โดยการทำงานจะต้องอาศัยการตรวจจับของกระแสจำนวน 3 เฟส ที่มีการแปลงให้อยู่ในภาพที่ d,q และค่าความเร็วมาทำการคำนวณ ซึ่งสมการใช้ในการคำนวณนี้จะขึ้นอยู่กับว่าจะอ้างอิงกับสนามโรเตอร์, สนามสเตเตอร์หรือสนามในช่องว่างอากาศ[7]

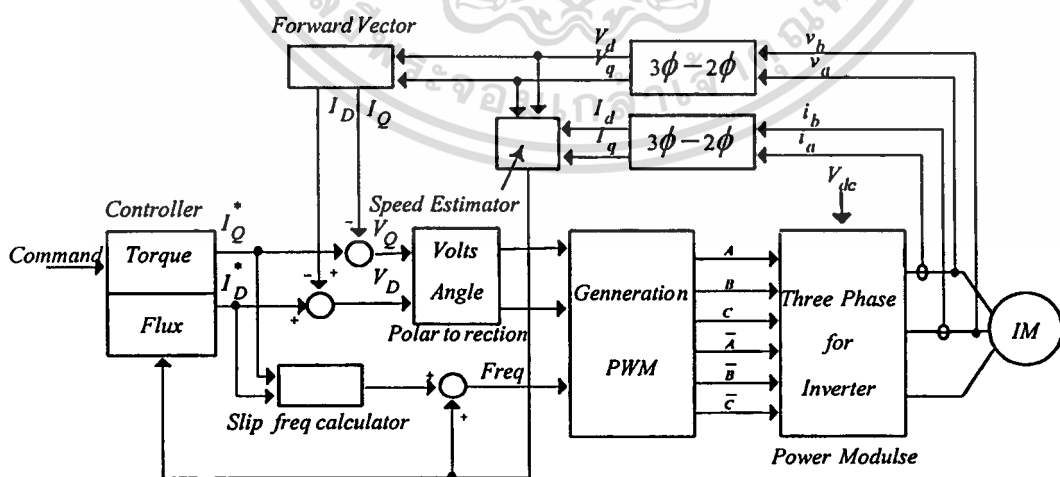
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.24 บล็อกการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)

2.9.3 การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

การควบคุมแบบนี้จะมีการทำงานที่คล้ายกับการควบคุมแบบเวกเตอร์แต่จะไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับค่าความเร็วรอบ โดยการทำงานจะอาศัยการตรวจจับของกระแสและแรงดันแทนซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าความเร็วที่โรเตอร์แทน ดังที่แสดงบล็อกการควบคุมในภาพที่ 2.25 ค่าของความเร็วและค่าฟลักซ์ที่โรเตอร์จะได้อาจการประมาณโดยอาศัยโมเดลพื้นฐานของมอเตอร์ ค่าความถูกต้องจากการวัดจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการคำนวณ เนื่องจากหากค่าที่ได้มีการวัดผิดพลาดเล็กน้อยจะส่งผลไปถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานผิดพลาดไปด้วย[7]



ภาพที่ 2.25 บล็อกการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

2.10 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและโมเดลทางคณิตศาสตร์ในพฤติกรรมของมอเตอร์ทางด้านไดนามิก พร้อมวิธีการควบคุมความเร็วรอบแบบต่างๆของมอเตอร์กระแสตรงและสภาวะการเบรค ส่วนทางด้านมอเตอร์เหนี่ยวนำได้กล่าวถึงพื้นฐาน ของวงจรสมมูลย์ภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำและจะกล่าวถึงระบบควบคุมที่ใช้ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้มีการใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การตรวจสอบและวิเคราะห์การทำงานในบทต่อไป โดยหลักการพื้นฐานดังกล่าวผู้วิจัยจะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการทำงานทั้งสองระบบ



บทที่ 3

คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์และประเภทของโหลด

3.1 บทนำ

การพัฒนาทางด้านขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการพัฒนาของขบวนการผลิต ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวต้นกำลังของการขับเคลื่อนเครื่องจักร ซึ่งจะเห็นว่าในระบบขับเคลื่อนไม่อาจมีเพียงแต่มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการใช้งานอย่างเดียวก็น่าจะรวมถึงคุณสมบัติของระบบควบคุมมอเตอร์ด้วย ที่จะช่วยให้การทำงานของระบบการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบควบคุมในการขับเคลื่อนมอเตอร์นั้นจะมีความสำคัญมาก ในขณะที่บางระบบที่มีการทำงานของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่องหรือโหลดที่ต้องการความแม่นยำสูง ดังนั้นชุดควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์จะต้องมีผลตอบสนองต่อโหลดได้หลากหลาย โดยอาศัยส่วนการป้อนกลับของข้อมูลความเร็วรอบและตำแหน่งของงานที่ต้องการ ไปสู่ระบบการควบคุมให้มีการขับเคลื่อนตามตำแหน่งที่ต้องการ ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงจุดประสงค์ในการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำพร้อมอธิบายหลักการพื้นฐานของระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์แต่ละส่วน คอนทักจะเป็นกล่าวถึงชนิดของโหลดต่างๆที่ใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

3.2 จุดประสงค์ในการเลือกใช้งานอินเวอร์เตอร์และความสามารถของระบบการขับเคลื่อนในปัจจุบัน

- ลดกระแสในการสตาร์ทของมอเตอร์
- ควบคุมความเร็วรอบได้ดี ในการใช้งานจะมีโหลดแต่ละชนิดที่ต้องการความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยความถี่
- สามารถควบคุมแรงบิดในการขับภาระโดยตรงในลักษณะโหมดควบคุมแรงบิด (Torque control mode)
- สามารถสั่งการทำงานในลักษณะเดินหรือหยุดได้ตรงตำแหน่งที่แม่นยำในลักษณะ Position control mode
- ตอบสนองต่อคำสั่งได้รวดเร็ว เช่นเร่งความเร็วถึงพิกัดภายใน 0.1 วินาที
- มีส่วนแสดงผลข้อมูลของตัวขับเคลื่อนทำให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในหลาย ๆ ด้าน เช่น การออกแบบ การป้องกัน การบำรุงรักษา การทำฐานข้อมูลการผลิต และการประกันคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อ การเขียน โปรแกรมการทำงาน การควบคุมการทำงานโดยตรง และการแสดงผลข้อมูลโดยผ่านคอมพิวเตอร์
- สามารถทำงานร่วมกันหลาย ๆ ตัวโดยการเชื่อมโยงข้อมูลทางไฟฟ้า ทำให้มอเตอร์หลาย ๆ ตัวทำงานพร้อมกัน

3.3 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ ในการแปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสสลับ เพื่อนำไปใช้ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือ เอซิมอเตอร์ โดยสามารถควบคุมด้วยการปรับแรงดันและความถี่ (Variable Voltage, Variable frequency, VVVF) หรือ เรียกว่า เอซีไดรฟ์ (AC Drive) เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามต้องการ ดังนั้นในการควบคุมความเร็วรอบของระบบอินเวอร์เตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบ หรือสมการความเร็วเชิง โครนัส ดังต่อไปนี้

$$\text{Synchronous Speed}(N_s) = \frac{120f}{P} \quad (3.1)$$

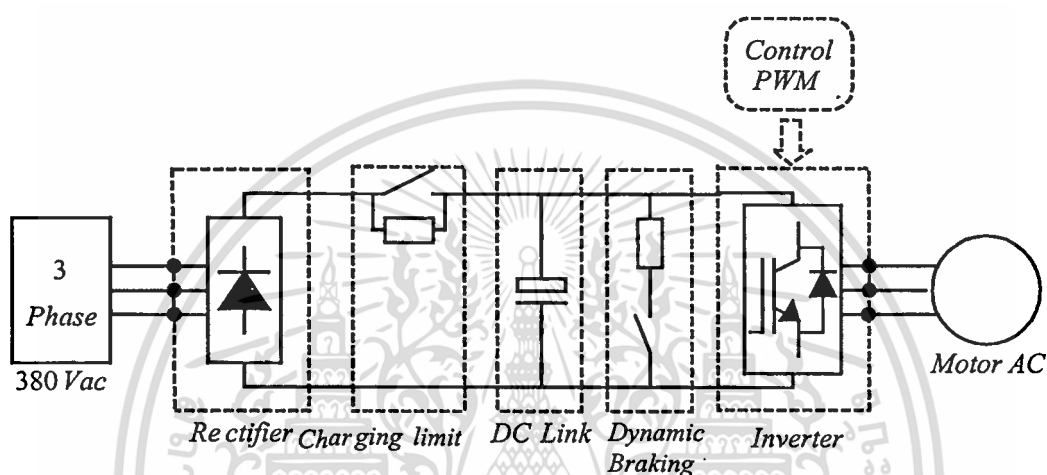
จากสมการ (3.1) จะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 แบบ คือ

- เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก
- เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกันจะเห็นว่า วิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปครั้งละมาก ๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1500 รอบต่อนาที ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ละเอียด จะทำได้เฉพาะในขณะที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญคือต้องใช้มอเตอร์ที่ออกแบบพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับความต้องการของงานในหลายๆประเภทที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในขณะมีโหลดเพื่อให้ความเร็วเหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไปจึงนิยมใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยการปรับความถี่ฟิดาเมนทอลได้ ทำให้สามารถปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วค่าต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า

จากระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาจากบทที่แล้วจากภาพที่ 2.19 จะเป็นวงจรสวิตช์กำลังภายในของระบบอินเวอร์เตอร์ และหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบการทำงานแต่ละส่วนของอินเวอร์เตอร์ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวอร์เตอร์จะพิจารณาจากภาพที่ 3.1 โดยอินพุตของอินเวอร์เตอร์จะรับไฟกระแสสลับที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz โดยไฟกระแสสลับนี้จะถูกแปลงเป็นไฟกระแสตรงโดยวงจรเรียงกระแส (Rectifier) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟสลับที่แปรขนาดแรงดันและความถี่ ได้โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยวงจรทั้งสองส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงรูปคลื่นและส่งผ่านพลังงาน นอกจากนี้วงจรทั้งสองจะถูกควบคุมด้วยชุดคอนโทรลที่สามารถปรับความถี่ เพื่อให้ได้ความเร็วที่เหมาะสม โดยเอซีไดรฟ์ที่ใช้งานจะประกอบด้วยวงจรส่วนหลักๆ 2 ส่วน ด้วยกันคือส่วนวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของเอซีไดรฟ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.3.1 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรกติไฟเออร์ หรือวงจรเรียงกระแส จะทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ลักษณะวงจรจะประกอบด้วย เพาเวอร์ไดโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 1 เฟส หรือมีเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส โดยลักษณะแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง (dc link voltage) ที่ได้จะประมาณ $\sqrt{2}V_{L-L}$ กรณีที่อินพุตเป็นไฟกระแสสลับ 3 เฟสแบบ โลว์ทูล์ไลน์ ส่วนในกรณีที่อินพุตเป็นไฟ 1 เฟส แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงที่ได้จะประมาณ $\sqrt{2}V_L$

3.3.2 กำจัดกระแสการชาร์จเริ่มต้นของตัวเก็บประจุดีซีลิงค์

เป็นวงจรป้องกันกระแสที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานกับวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง เนื่องจากขณะที่ทำการเปิดสวิตช์เข้าวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง สถานะนี้คาปาซิเตอร์จะเปรียบเหมือนการลัดวงจร (Short Circuit) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการต่อโหลดให้สถานะครั้งแรกขณะที่มีการจ่ายไฟเข้าวงจรเพื่อป้องกันการเสียหายจากวงจร โดยส่วนมากโหลดที่ต่อจะเป็นความต้านทานที่มีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่มีวัดต์สูงๆ เนื่องจากถ้ามีความต้านทานมากเกินไปจะมีแรงดันตกคร่อมสูงขึ้น ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นมากหรือความต้านทานอาจขาดได้ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 จากภาพจะมีการต่อสวิทช์คร่อมความต้านทาน เนื่องจากเมื่อมีแรงดันจ่ายเข้าคาปาซิเตอร์เต็มแล้ว สวิทช์ก็จะทำงานทันที ซึ่งจะเป็นหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน

3.3.3 แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง

วงจรเชื่อมโยงกระแสตรงคือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ พักตึงแรงดันไฟฟ้า 400 โวลต์ หรือ 800 โวลต์โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรคหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว สำหรับกรณีที่ใช้งานกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมาก ๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกลับมาตกคร่อมคาปาซิเตอร์และทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรช้อปเปอร์โดยต่อค่าความต้านอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และต่อขนานกับคาปาซิเตอร์ไว้ โดยทรานซิสเตอร์จะทำให้ที่เป็นสวิทช์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

3.3.4 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจาก วงจรดีซีลิงค์) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจะประกอบด้วยอุปกรณ์สวิทช์กำลัง 6 ชุด โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็น ไอจีบีทีแบบ โมดูล หรือเป็นแบบ Intelligent Power Module (IPM) ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse width modulation)

3.3.5 วงจรควบคุม

วงจรควบคุม จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้งาน รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผล และส่งนำเอาท์พุทออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตาม ที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยในปัจจุบันนี้การควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้พัฒนาควบคู่ไปกับเทคโนโลยีทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้ DSP 32 บิต มาช่วยในการประมวลผล ทำให้มีการตอบสนองที่ไวต่อการเปลี่ยนโหลด จนถึงการพัฒนาป้อนกลับของความเร็วรอบ หรือ กระแสและแรงดัน เพื่อให้การควบคุมแม่นยำและมีเสถียรภาพ

3.4 ประเภทของโหลด

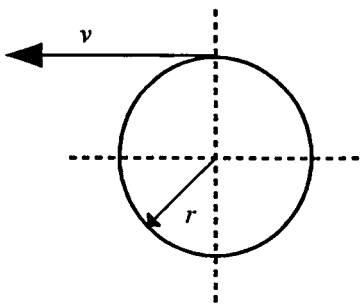
ในโหลดประเภทต่างๆที่ใช้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปมาก เนื่องมาจากขบวนการผลิตที่ซับซ้อน เพื่อให้ได้ระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการพัฒนาเครื่องจักรที่ทันสมัยต่อการผลิต โดยส่วนใหญ่จำเป็นต้องมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้า เพื่อให้มีการทำงานที่ต่อเนื่องและรวดเร็วแม่นยำ ในด้านการผลิต ดังนั้นอุตสาหกรรมที่มีระบบการผลิตที่แตกต่างกัน จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมีการทำงานที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้ระบบการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพในสถานะโหลดที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการควบคุมการใช้งานของการขับเคลื่อนมอเตอร์สิ่งสำคัญจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโหลดโดยโหลดที่ใช้งานในระบบที่ทั่วไปส่วนใหญ่จะแบ่งเป็น 4 ลักษณะ ซึ่งจะทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบมอเตอร์เป็นผลทำให้ในโหลดประเภทต่างๆสถานะแรงบิดจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วนั่นเอง โดยลักษณะแรงบิดโหลดสามารถแบ่งได้ดังนี้

- แรงบิดตรงกันข้ามกับความเร็วนั่นเอง(Inverse Torque)
- แรงบิดคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วนั่นเอง(Constant Torque)
- แรงบิดแปรผันตามความเร็วนั่นเอง(Linear Torque)
- แรงบิดแปรผันตามความเร็วนั่นเองกำลังสอง(Variable Torque)

ลักษณะของแรงบิดโหลดจะมี 4 ลักษณะดังนี้

3.4.1 แรงบิดจะตรงกันข้ามกับความเร็วนั่นเอง

การทำงานของโหลดชนิดนี้จะเป็นโหลดที่ให้แรงบิดจะต้องกันข้ามกับความเร็วนั่นเอง ซึ่งลักษณะการทำงานของโหลดจะพบว่าเมื่อมีแรงบิดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วนั่นเองของมอเตอร์ลดลง โดยระบบการทำงานของโหลดประเภทนี้จะเป็นระบบที่แน่นอนเช่น การชักลาก หรือ เครื่องม้วน ซึ่งระบบจะต้องมีการป้อนกลับ โดยโหลดประเภทนี้ได้แก่ ระบบลิฟต์ (Lift machines), ระบบลูกสูบ (Reciprocating rolling), เครื่องม้วน (Reelers), เครื่องกลึง (Lathes), ระบบเครื่องชักลาก(Wire drawers), เครื่องป้อนชิ้นงาน (Web-feed printing machines) จากระบบการทำงานทั้งหมดนี้กำลังงานที่ได้จะมีค่าคงที่ เนื่องจากขบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงคือแรงบิดกับความเร็วนั่นเอง สามารถพิจารณาจากสมการ (3.2) และ (3.3) จากภาพที่ 3.2 จะเป็นการจำลองระบบการทำงานของแรงบิดที่ตรงกันข้ามกับความเร็วนั่นเอง

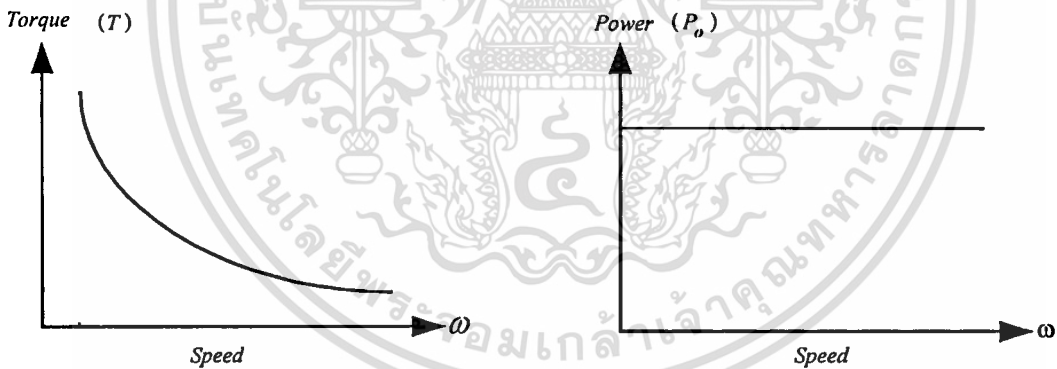


ภาพที่ 3.2 ระบบตัวอย่างโหลดที่สภาวะแรงบิดตรงแปรผกผันกับความเร็วรอบ

จากภาพที่ 3.3 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของลักษณะโหลด พร้อมทั้งได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบ สามารถพิจารณาได้จากสมการดังนี้

$$T \approx \omega^{-1} \tag{3.2}$$

$$P_o = k \tag{3.3}$$



(ก) สัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังงาน

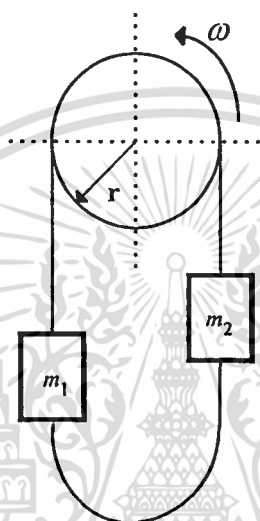
ภาพที่ 3.3 กราฟคุณสมบัติของโหลดสภาวะที่แรงบิดจะตรงกันข้ามกับความเร็วรอบ

3.4.2 แรงบิดคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วรอบ

การทำงานของโหลดประเภทนี้จะพบว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีความทำงานที่อิสระต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งการทำงานของโหลดประเภทนี้จะแบบ การสตาร์ทขณะที่ทำให้แรงบิดมีค่าสูงๆในระบบขนส่งแบบสายพาน หรือ ระบบสายพานที่แรงขนส่งเป็นแนวลาดเอียง โดยลักษณะของโหลดที่เกิดขึ้นจะเป็นโหลด เครื่องจักรที่ใช้ในการเลื่อนกระดาษและการปรีน (Draw-benches Paper and

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

printing), ระบบการทำงานที่ต่อเนื่อง (Continuous machines), การวัดปริมาตรสำหรับปั๊มแบบ
เกียร์ (Volumetric gear pumps), ลูกสูบในการทำงานเกี่ยวกับความดัน (Piston compressors), สาย
พานลำเลียง (Conveyer machines), ลิฟต์ (Lift machines) ซึ่งการทำงานของโหนดประเภทนี้จะพบ
ว่าจะกำลังงานที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน สามารถ
พิจารณาจากสมการ (3.4) และสมการ (3.5) จากภาพที่ 3.4 จะเป็นจำลองระบบการทำงานของโหนด
แรงบิดที่เป็นอิสระกับความเร็วรอบ

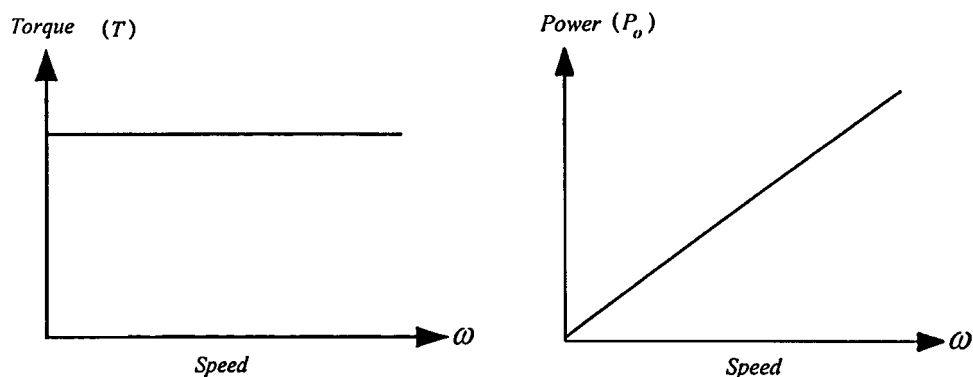


ภาพที่ 3.4 ระบบตัวอย่างโหนดที่สถานะแรงบิดไม่ขึ้นกับความเร็วรอบ

จากภาพที่ 3.5 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของลักษณะโหนด
พร้อมทั้งได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบ โดยสามารถพิจารณาได้
จากสมการดังนี้

$$T = k \quad (3.4)$$

$$P_o \approx \omega \quad (3.5)$$

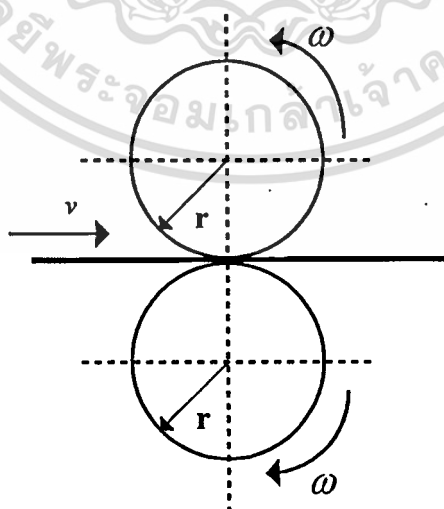


(ก) สัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังงาน

ภาพที่ 3.5 กราฟคุณสมบัติของโหลดสถานะที่แรงบิดมีค่าที่

3.4.3 แรงบิดแปรผันตามความเร็วรอบ

การทำงานของโหลดประเภทนี้ เมื่อให้แรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความเร็วรอบ ซึ่งก็คือเมื่อโหลดมีแรงบิดที่มีค่าเพิ่มก็จะพบว่าความเร็วรอบที่เกิดขึ้นในระบบแปรผันตาม โดยโหลดประเภทนี้จะเกี่ยวกับจำพวกความหนาแน่นหรือของเหลว เช่น โหลดที่เป็นลักษณะเครื่องผสม (Mixers) หรือโหลดที่เกี่ยวกับเครื่องกวน (Stirrers) ซึ่งโหลดที่เกิดขึ้นในระบบแบบนี้จะพบว่ากำลังงานที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบกำลังสอง สามารถพิจารณาจากสมการ (3.5) และสมการ (3.6) จากภาพ ที่ 3.6 จะเป็นจำลองระบบการทำงานของโหลดแรงบิดแปรตามความเร็วรอบ



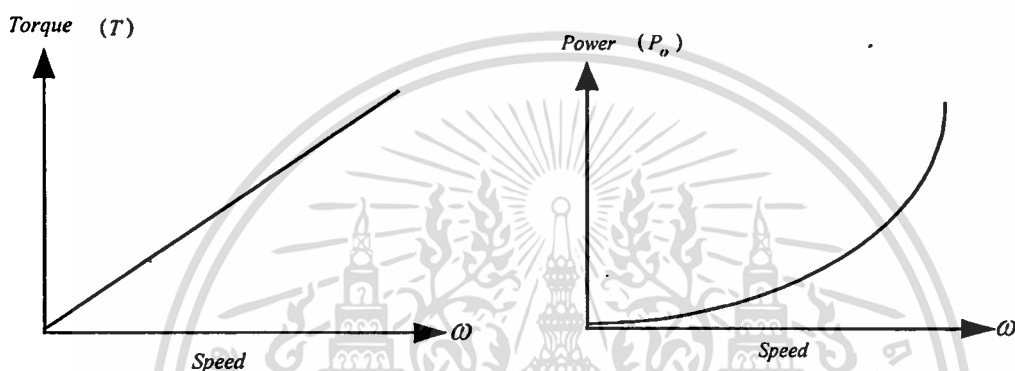
ภาพที่ 3.6 ระบบตัวอย่างโหลดที่สถานะแรงบิดแปรตามความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.7 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของลักษณะโหลด พร้อมทั้งได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบ โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการดังนี้

$$T \approx \omega \quad (3.6)$$

$$P_o \approx \omega^2 \quad (3.7)$$

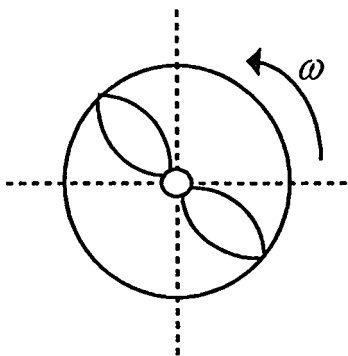


(ก) สัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังงาน

ภาพที่ 3.7 กราฟคุณสมบัติของโหลดสถานะที่แรงบิดแปรค่าตามความเร็วรอบ

3.4.4 แรงบิดแปรผันตามความเร็วรอบกำลังสอง

โหลดประเภทนี้จะทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกากับความเร็วรอบกำลังสอง โดยระบบที่เกิดขึ้นมักจะอยู่ในโหลดที่มีการสตาร์ทขณะที่แรงบิดมีค่าต่ำ หรือเหมาะกับโหลดที่ต้องการประหยัดพลังงาน โดยเฉพาะโหลดเหล่านี้ต้องการระบบขับเคลื่อนที่มีสมรรถนะที่ดีการควบคุมในด้านแรงบิดต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งโหลดการทำงานของโหลดเหล่านี้ได้แก่ โหลดเกี่ยวกับปั๊มที่มีใบพัดในการอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Axial and centrifugal pumps), เครื่องระบายอากาศที่อาศัยการระบายความร้อนด้วยใบพัด (Axial and centrifugal ventilators), ใบพัดและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของเครื่องทำความเย็น (Screw and centrifugal compressors), เป็นต้น ดังนั้นในการทำงานของประเภทแบบนี้จะพบว่า กำลังงานที่ได้จะมีค่าแปรตามความเร็วรอบกำลังสาม สามารถพิจารณาจากสมการ (3.8) และสมการ (3.9) จากภาพที่ 3.8 เป็นจำลองระบบการทำงานของโหลดที่มีแรงบิดแปรตามความเร็วรอบกำลังสอง

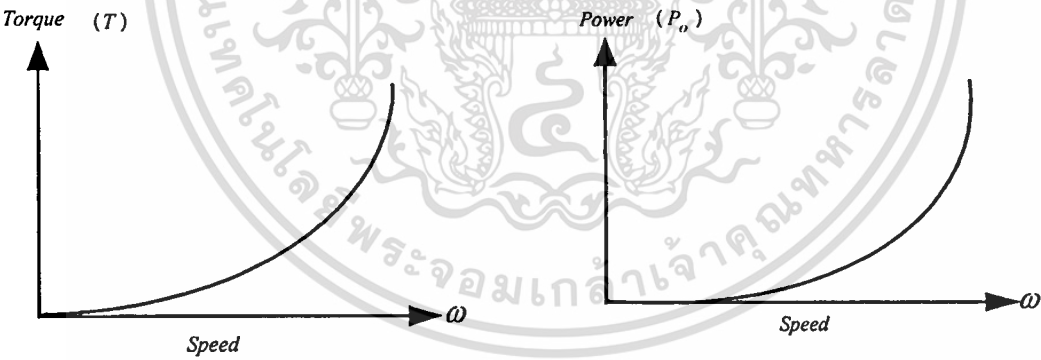


ภาพที่ 3.8 ระบบตัวอย่างโหลดที่สภาวะแรงบิดแปรตามความเร็วรอบกำลัง

จากภาพที่ 3.9 จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของลักษณะโหลด พร้อมทั้งได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับความเร็วรอบ โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการดังนี้

$$T \approx \omega^2 \tag{3.8}$$

$$P_o \approx \omega^3 \tag{3.9}$$



(ก) สัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกำลังกำลัง

ภาพที่ 3.9 กราฟคุณสมบัติของโหลดสภาวะที่แรงบิดแปรค่าตามความเร็วรอบกำลังสอง

3.5 สรุป

ในการใช้งานระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนเพราะสามารถ ควบคุมความเร็วรอบได้ พร้อมทั้งแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และได้มีการพัฒนาขีดความสามารถในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีสมรรถนะในการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดได้ดีไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าดีซีมอเตอร์ อีกทั้งการบำรุงรักษาก็ยังต่ำกว่าดีซีมอเตอร์ ซึ่งข้อดังกล่าวเป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมในการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ และโหลดการใช้งานในด้านอุตสาหกรรมมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้เหมาะสมกับระบบการผลิตที่มีคุณภาพ ทำให้โหลดมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ดังนั้นความสามารถในการคงค่าความเร็วที่ทุกค่าโหลดถือเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของระบบขับเคลื่อนที่ดี โดยพื้นฐานของโหลดได้แสดงในบทนี้แล้วเพื่อป้องกันบอกถึงการเลือกใช้งานของระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับโหลด



บทที่ 4

ทฤษฎีการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มสำหรับควบคุมดีซีบูตัสต์ สวิตชิงโหมดคอนเวอร์เตอร์

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอในส่วนของหลักการและวิธีสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้สำหรับควบคุมวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ในขั้นต้นจะกล่าวถึงเทคนิคและการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ พร้อมการประยุกต์ใช้งานด้านขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่สองจะเป็นลักษณะและคุณสมบัติของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้นำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงในชุดจำลองโพลด ส่วนตอนท้ายจะเป็นการพิจารณาถึงแพทเทิร์นของการสวิตช์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ โดยนำไปใช้ในการควบคุมวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์แบบดีซีบูตัสต์พร้อมอธิบายถึงทิศทางของกระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตของโหมดการทำงานในสภาวะการสวิตช์

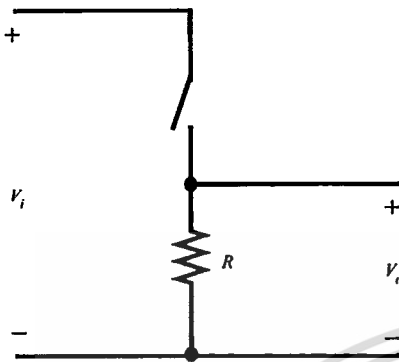
4.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม

ในการเลือกใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปแล้วจะมีลักษณะการควบคุมแรงดันอยู่สองประเภท โดยประเภทแรกจะเป็นการควบคุมแรงดันทางด้านกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง ส่วนมากจะใช้การ โดยควบคุมมุมจุดชนวนของเอสซีอาร์ (Phase Control) ในแต่ละเฟสของสัญญาณกระแสสลับ ส่วนการควบคุมประเภทสองคือการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือที่เรียกว่า ดีซีบูตัสต์ คอนเวอร์เตอร์ เป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับแรงดันหนึ่ง ไปเป็นแรงดันกระแสตรงที่ระดับแรงดันต่าง ๆ โดยการใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาเป็นสวิตช์ควบคุมการถ่ายโอนพลังงานจากอินพุตไปเอาต์พุต โดยอาศัยการควบคุมความกว้างของพัลส์พีดับบลิวเอ็มในการเปิด-ปิดสวิตช์หรือการตัดต่อของสวิตช์ ในการออกแบบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรดีซีบูตัสต์คอนเวอร์เตอร์ ข้อสำคัญประการหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงสามารถลดการแกว่งของกระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตขณะมีโหลด

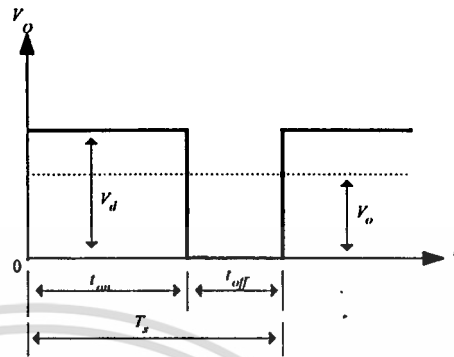
ในการพิจารณาออกแบบพื้นฐานของการสวิตช์วงจรกำลังสามารถพิจารณาในภาพที่ 4.2(ก) โดยกำหนดให้ V_i คือแรงดันอินพุตของไฟฟ้ากระแสตรงและ V_o คือแรงดันเอาต์พุตของไฟฟ้ากระแสตรง จากภาพที่ 4.2 (ข) เป็นรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตที่ถูกควบคุมด้วยการสวิตช์ t_{on} และ ความถี่ในการสวิตช์มีค่าคงที่ จึงมีคาบเวลาทั้งหมด $T_s = t_{on} + t_{off}$ ทำให้สามารถควบคุมแรงดัน

เอาต์พุตด้วยการปรับความกว้างของพัลส์ ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า การควบคุมสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็ม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยดัชนีการมอดูเลต D คือคาบเวลาในการ t_{on} ของหนึ่งคาบเวลาของ T_s ซึ่งในการเปลี่ยนแปลง ดัชนีการมอดูเลตจะทำให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนไป



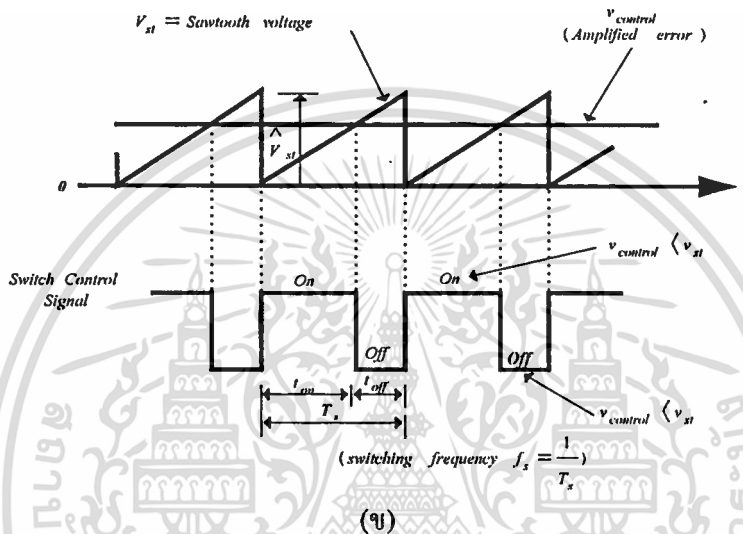
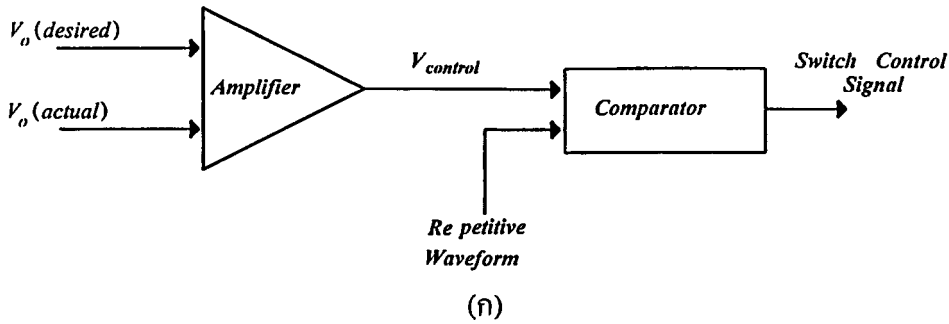
(ก) วงจรสวิตช์กำลัง



(ข) แรงดันที่ได้จากการควบคุม

ภาพที่ 4.1 วงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์

ในการออกแบบวงจรควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ดีซึ่งคอนเวอร์เตอร์จะมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งพื้นฐานในการออกแบบโดยทั่วไปคืออาศัยการเปรียบเทียบของสัญญาณระหว่างสัญญาณควบคุมที่เป็นไฟกระแสตรง $V_{control}$ กับสัญญาณคลื่นพาหะ V_{tri} ที่เป็นสัญญาณฟันเลื่อยโดยกำหนดให้ช่วงเวลาการทำงาน D มีค่าไม่เกิน 90 % ของการสวิตช์ และการกำหนดค่าความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะให้สูง ซึ่งจะสามารถช่วยลดริปเปิลของกระแสและแรงดันได้ แต่จะเกิดการสูญเสียในการสวิตช์พร้อมจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น การออกแบบที่แสดงในภาพที่ 4.2 แสดงถึงการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ ซึ่งกำหนดจากคาบเวลาการ ON และ OFF ของความถี่ของสัญญาณพาหะจากภาพที่ 4.2 (ก) จะแสดงการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มในการสวิตช์ โดยในส่วนทางด้านสัญญาณอินพุตจะมีการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดจริงของแรงดันเอาต์พุต $V_{o(actual)}$ กับสัญญาณอ้างอิง $V_{o(desired)}$ โดยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณความแตกต่าง (Amplifier) ที่มีหน้าที่ในการตรวจวัดความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณความแตกต่าง (Error signal) หรือสัญญาณแรงดันควบคุม ดังนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณคลื่นพาหะ ที่ใช้กำหนดความถี่ในการสวิตช์ โดยจะพบว่าเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่มีการควบคุมความกว้างของพัลส์จากการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณแรงดันควบคุมที่มีผลมาจากสัญญาณอินพุตทั้งสองของวงจรเปรียบเทียบความแตกต่างสัญญาณ



ภาพที่ 4.2 รูปแบบพื้นฐานในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ดับลิวเอ็ม

(ก) บล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ดับลิวเอ็ม

(ข) Comparator signal ในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่ดับลิวเอ็มกำหนดให้ค่าความถี่สวิทช์มีค่าคงที่

ในการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับสัญญาณคลื่นพาหะดังภาพที่ 4.2(ข) จากการมอดูเลตสัญญาณจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ โดยพิจารณาได้จากระดับแอมพลิจูดของแรงดันควบคุม จากการควบคุมจะพบว่าเมื่อระดับแรงดันควบคุมมีค่ามากกว่าศักย์ของสัญญาณคลื่นพาหะ แบบฟันเลื่อย จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวก สวิตช์จะทำงานอยู่ในสถานะ ON แต่ขณะเดียวกันเมื่อศักย์ของแรงดันควบคุมมีค่าต่ำกว่าศักย์ของสัญญาณคลื่นพาหะ จะทำให้สัญญาณพัลส์มีค่าเป็นศูนย์ สวิตช์จะทำงานอยู่ในสถานะ OFF ซึ่งคาบเวลาของการสวิตช์ทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหะ ซึ่งในที่นี้คือความถี่ของสัญญาณฟันเลื่อยที่กำหนดขึ้น[13]

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{v_{control}}{\wedge v_{st}} \quad (4.1)$$

4.2.1 หลักการออกแบบวงจรกำลังแบบฟูลบริดจ์

วงจรฟลูบริดจ์ที่ได้ทำการออกแบบโดยมีการความคุมสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็ม โดยนำไปใช้
 ในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง สามารถแสดงได้จากภาพที่ 4.3 โดยที่แรงดันเชื่อมโยงกระแส
 ตรงทางด้านอินพุตคือ V_d โดยแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงจะมีค่าคงที่ ขณะที่แรงดันเอาต์พุต
 กระแสตรง V_o ที่ได้สามารถควบคุมได้ทั้งขนาด (Magnitude) และทิศทางขั้ว (Polarity)

การทำงานของ สวิตช์ เมื่อพิจารณาจุด A จะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตเมื่อเทียบกับแรงดันคิซีค่าลบของ บัสลบหรือแรงดัน V_{AN} จะปรากฏค่าขึ้น เมื่อสวิตช์ $T_A +$ ต่อวงจร โดยค่ากระแส i_o มีค่าเป็นบวก กระแสนี้จะไหลผ่านสวิตช์ $T_A +$ แต่ถ้า i_o มีค่าเป็นลบกระแสนี้จะไหลผ่าน $D_A +$ และการนำ กระแสแต่ละครั้งของ $T_A +$ ค่าความต่างศักย์ที่จุด A จะเป็นค่าเดียวกับสัญญาณอินพุตด้วย หรือ ทำนองเดียวกันเมื่อ $T_A -$ ต่อวงจรถ้า i_o มีค่าเป็นลบกระแสนี้จะไหลผ่าน $T_A -$ (เนื่องจาก $D_A +$ ไบแอสกลับ) แต่ถ้าหาก i_o มีค่าเป็นบวกกระแสจะไหลผ่าน $T_B -$

$$\text{ถ้า } T_A + \text{ ต่อวงจร และ } T_A - \text{ เปิดวงจร } V_{AN} = V_d$$

$$\text{ถ้า } T_A - \text{ ต่อวงจร และ } T_A + \text{ เปิดวงจร } V_{AN} = 0$$

จากการสวิตช์จะเห็นว่า V_{AN} มีค่าขึ้นอยู่กับสถานะการสวิตช์เท่านั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางการ ไหลของกระแส i_o เพราะฉะนั้นแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยตลอดคาบการสวิตช์ T_s ของวงจรที่จุด A จะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต V_d กับอัตราส่วนของการสวิตช์ $T_A +$ ดังนั้น

$$V_{AN} = V_d D_1 \quad (4.2)$$

D_1 คือ อัตราส่วนของการสวิตช์ $T_A +$

ในทำนองเดียวกับที่จุด B ของวงจรฟูลบริดจ์ได้ V_{BN} ขึ้นอยู่กับการทำงานของสวิตช์ $T_B +$

$$V_{BN} = V_d D_2 \quad (4.3)$$

D_2 คือ อัตราส่วนของการสวิตช์ $T_B +$

ในคอนเวอร์เตอร์ชนิด 1 เฟสก่อนการพิจารณาจะพบว่าขั้วของแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะอยู่ใน ทิศทางเดียวกัน เมื่อสวิตช์ในชุดคอนเวอร์เตอร์ถูกควบคุมด้วยสัญญาณพัลส์บวกลวเอมที่มีการเปรียบ เทียบสัญญาณความถี่สามเหลี่ยมกับระดับแรงดันคิซี สำหรับแรงดันเอาต์พุตของฟูลบริดจ์คอน เวอร์เตอร์เมื่อต้องการกลับขั้วของแรงดัน โดยการควบคุมจะใช้สัญญาณความถี่รูปคลื่นสามเหลี่ยม ในการเปรียบเทียบสำหรับการสวิตช์ ซึ่งสามารถแยกการพิจารณากำหนดการสวิตช์ได้ดังนี้คือ

- สัญญาณพัลส์บวกลวเอมแบบไบโพลาร์ ซึ่งจะมีการสวิตช์ (T_{A+}, T_{B-}) และ (T_{A-}, T_{B+})

โดยการควบคุมสวิตช์ทั้งคู่จะทำงานพร้อมกันโดยในแต่ละคู่จะทำงานพร้อมกัน แต่สัญญาณแต่ละคู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จะทำงานตรงกันข้าม ไม่วาทกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณพีคดับลิเอ็มแบบยูนิโพลาร์ ซึ่งสัญญาณความถี่ในการสวิตช์จะเป็นสองเท่าของสัญญาณพีคดับลิเอ็ม โดยสัญญาณการสวิตช์แต่ละตัวของอุปกรณ์จะถูกควบคุมที่เป็นอิสระต่อกันทุกๆขาของอุปกรณ์

4.3 สัญญาณพีคดับลิเอ็มแบบไบโพลาร์

ในรูปแบบของสัญญาณการสวิตช์ (T_{A+}, T_{B-}) และ (T_{A-}, T_{B+}) ในการทำงานจะทำการเป็นคู่ทั้งคู่จะสลับการทำงานในสถานะ ON และ OFF เสมอ ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์โดยอาศัยการเปรียบเทียบสัญญาณความถี่พหุกับสัญญาณแรงดันควบคุมโดยกำหนดให้ $v_{control} > v_{tri}$ จะพบว่า T_{A+} และ T_{B-} จะทำการ ON และลักษณะตรงกันข้ามคือ T_{A-} และ T_{B+} จะทำการ ON ดังนั้นการมอดูเลตสามารถพิจารณาได้จากสัญญาณในภาพที่ 4.4 โดยสามารถกำหนดคาบเวลาในการควบคุมของสัญญาณการสวิตช์

$$v_{tri} = \hat{V}_{tri} \frac{t}{T_s/4} \quad 0 < t < \frac{1}{4} T_s \quad (4.4)$$

ที่ $t = t_1$ ในภาพที่ 4.4 $v_{control} = v_{tri}$ จากสมการ (4.4) จะได้สมการดังนี้

$$t_1 = \frac{v_{control} T_s}{\hat{V}_{tri} 4} \quad (4.5)$$

จากภาพที่ 4.4 จะพิจารณาช่วงเวลา t_{on} ของการทำงานสวิตช์คู่ คือ (T_{A+}, T_{B-}) จะได้สมการดังนี้

$$t_{on} = 2t_1 + \frac{1}{2} T_s \quad (4.6)$$

เมื่อดัชนีพิจารณาการมอดูเลตของสมการ (4.6) จะได้สมการดังนี้

$$D_1 = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} \right) \quad (T_{A+}, T_{B-}) \quad (4.7)$$

เมื่อพิจารณาดัชนีการมอดูเลตสวิตช์ตัวคู่ที่สอง จาก (T_{A-}, T_{B+}) จะได้สมการดังนี้

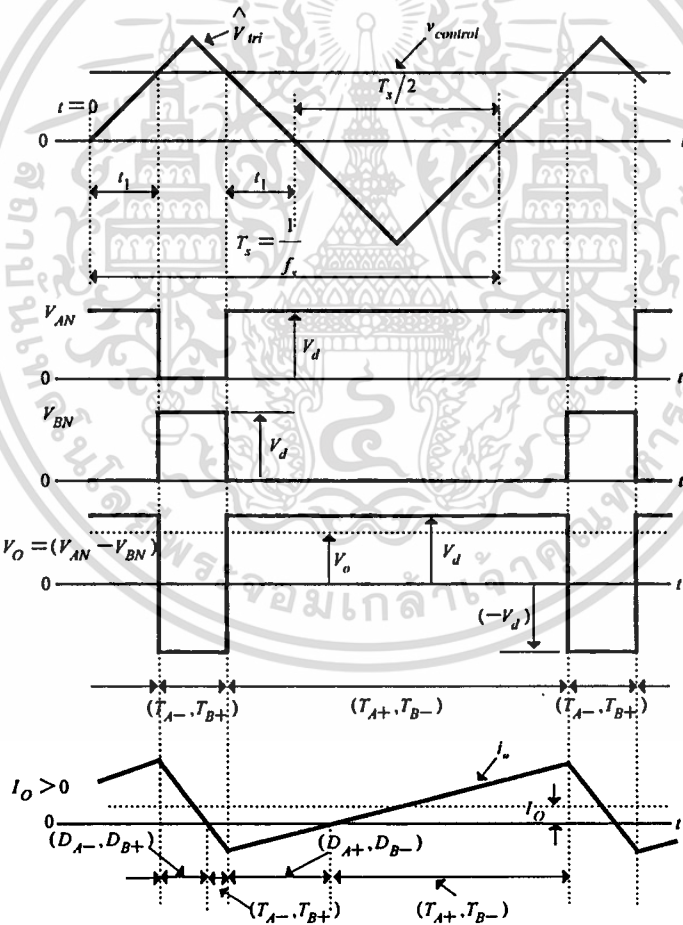
$$D_2 = 1-D_2 \qquad (T_{A-},T_{B+}) \qquad (4.8)$$

จากการหาดัชนีการมอดูเลตที่ผ่านมา สามารถหาสัญญาณแรงดันในการสวิตช์ V_{AN} และ V_{BN} จากภาพที่ 4.4 จะได้ตามสมการ

$$V_o = V_{AN} - V_{BN} = D_1V_d - D_2V_d = (2D_1-1)V_d \qquad (4.9)$$

นำสมการ (4.7) มาแทนในสมการ (4.9) และจัดรูปแบบสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} v_{control} = kv_{control} \qquad (4.10)$$



ภาพที่ 4.4 การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบไบโพลาร์

4.4 การสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

ในภาพที่ 4.5 เป็นการแสดงทิศทางการไหลของกระแส i_o จะพบว่าเมื่อสวิตช์ T_{A+} และ T_{B+} นำกระแสทั้งคู่จะได้แรงดัน $V_o = 0$ ในทำนองเดียวกันถ้าสวิตช์ T_{A-} และ T_{B-} นำกระแสทั้งคู่ก็จะได้แรงดัน $V_o = 0$ เช่นกัน ด้วยคุณลักษณะดังกล่าวนี้ จึงนำไปพัฒนารูปคลื่นแรงดันด้านเอาต์พุต ที่มีการควบคุมการทำงานของสวิตช์แบบพีดับบลิวเอ็มยูนิโพลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 สัญญาณสามเหลี่ยม v_{tri} ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุม ที่เป็นบวก $v_{control}$ และสัญญาณควบคุมที่เป็นลบ $-v_{control}$ เพื่อใช้ในการกำหนดสัญญาณการ สวิตช์ของขา A และ B ตามลำดับ โดยสถานะการสวิตช์ของขา A ได้ถูกมอดูเลตโดยการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่เป็นบวกกับสัญญาณสามเหลี่ยม และในทำนองเดียวกันสถานะการสวิตช์ของขา B ได้ถูกมอดูเลตโดยการเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมที่เป็นลบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ดังนั้นการทำงานต่อไปนี้

ถ้า $v_{control} > v_{tri}$ สวิตช์ T_{A+} นำกระแส (4.11)

และถ้า $-v_{control} > v_{tri}$ สวิตช์ T_{B+} นำกระแส (4.12)

จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตของแต่ละกิ่งในวงจร จะได้ตามภาพที่ 4.5 และจากการเปรียบเทียบระหว่างสวิตช์ทั้งสอง จะเห็นว่าอัตราส่วนการทำงานของ D_1 ของการสวิตช์ T_{A+} สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.7) ด้วยรูปแบบการสวิตช์ดังได้กล่าวมาแล้วและในทำนองเดียวกัน อัตราส่วนการทำงานของ D_2 ของการสวิตช์ T_{B+} สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.8) นั่นคือ

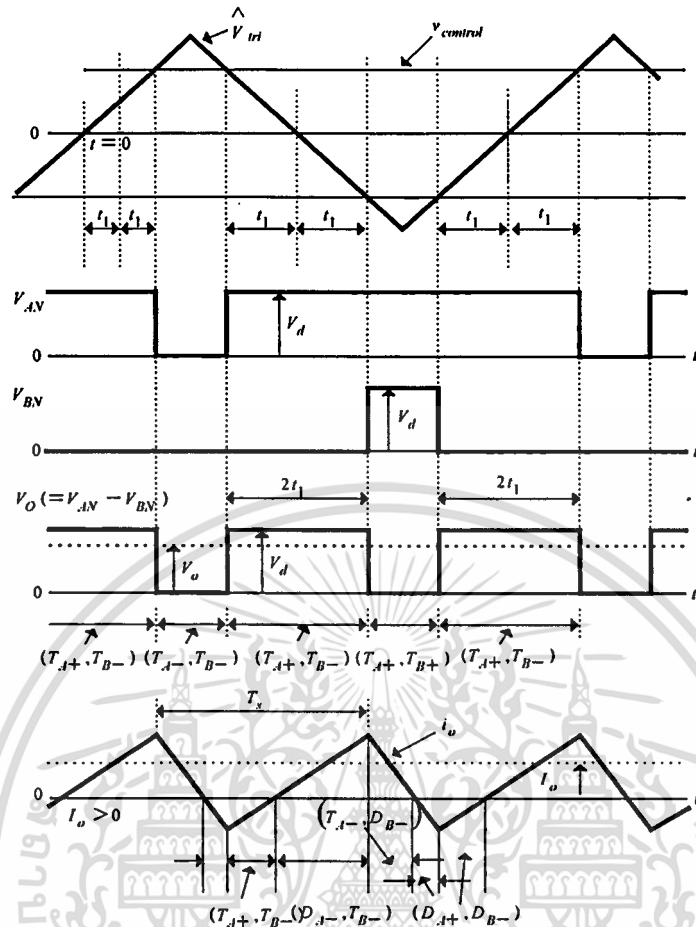
$$D_1 = \frac{1}{2} \left| \frac{v_{control}}{\hat{V}_{tri}} + 1 \right| \quad (\text{สำหรับ } T_{A+}) \quad (4.13)$$

$$D_2 = 1 - D_1 \quad (\text{สำหรับ } T_{B+}) \quad (4.14)$$

เมื่อแทนค่า V_{AN} และ V_{BN} ดังเช่นสมการที่ (4.9) ซึ่งจะให้ค่า V_o ดังสมการต่อไปนี้

$$V_o = V_d(2D_1 - 1) = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} v_{control} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 การสร้างสัญญาณพีคดับลิแวมแบบยูนิโพลาร์

ซึ่งเทคนิคการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์จะพบว่าแรงดันเอาต์พุต V_o มีค่าเป็นลักษณะเชิงเส้น กับ $v_{control}$ จากภาพที่ 4.5 ได้แสดงการนำกระแสของอุปกรณ์และได้รูปกระแสทั้ง $I_o > 0$ และ $I_o < 0$ ตามลำดับ โดยที่แรงดัน V_o มีค่าเป็นบวกทั้ง 2 กรณี และถ้าความถี่สวิตช์ของแผนการสวิตช์แบบพีคดับลิแวมทั้งสองเท่ากัน จะเห็นว่าผลการสวิตช์แรงดันแบบยูนิโพลาร์จะให้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตกับผลการตอบสนองความถี่ดีกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพของการสวิตช์ทำให้ความถี่ของรูปคลื่นเอาต์พุตมีค่าเป็นสองเท่า จึงเป็นผลทำให้rippleทางด้านเอาต์พุตลดลง

4.5 การนำวงจรคอนเวอร์เตอร์ดิซิจิฟูตีซิจิไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ดิซิจิ

การพิจารณาการนำวงจรแบบฟูลบริดจ์ดิซิจิฟูตีซิจิไปใช้ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงเพราะว่าในการควบคุมความเร็วรอบต่ำๆ โดยจะให้แรงบิดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรช้อปเปอร์ และเมื่ออุปกรณ์สวิตช์กำลังทำงานจะปรากฏว่า จะมีแรงดันตกคร่อมภายในตัวน้อยมาก เมื่อขณะที่มีการนำกระแสจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมเท่ากับแรงดันที่ดิซิจิบัส และจะมีกระแสไหลผ่านน้อย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากถือว่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การสูญเสียทางด้านเอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการควบคุมแบบฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จึงได้มีการนำมาใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกการใช่วงจรฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมสัญญาณแบบพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์โดยการควบคุมสามารถกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้พร้อมทั้งเหมาะสมในด้านการคืนพลังงานเข้าสู่ระบบเมื่อเกิดการเบรคแบบฉับพลันของมอเตอร์ พร้อมทั้งสามารถดริฟต์กระแสทางด้านเอาท์พุทเมื่อทำการเพิ่มความถี่ในการสวิตช์ที่สูงขึ้น และความถี่นี้สามารถควบคุมรักษาระดับกระแสสูงๆได้ ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช่วงจรคอนเวอร์ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงสามารถแบ่งข้อสำคัญในการเลือกใช้งานได้ดังนี้

4.5.1 ชุดคอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งสองทิศทางโดยมีการควบคุมแรงดันและกระแสทั้งด้านบวกและด้านลบได้ซึ่งก็คือการควบคุมการทำงานทั้ง 4 ควอดแรนต์

4.5.2 ชุดคอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมโหมดกระแสต่อเนื่องที่พิกัดกระแสสูงสุดได้ และสามารถลิมิตกระแสในสภาวะการคืนพลังงานเข้าสู่ระบบทางด้านไดนามิกของมอเตอร์ในเวลาที่รวดเร็วได้

4.5.3 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการป้อนกลับอย่างแม่นยำ ในด้านแรงดันเอาท์พุท โดยมีผลตอบสนองของระบบที่มีเสถียรภาพ โดยแยกอิสระจากโหลดของมอเตอร์

4.5.4 ชุดคอนเวอร์เตอร์สามารถลดกระแสรีปเปลของอาเมเจอร์ซึ่งจะมีผลทางด้านการลดการแกว่งของแรงบิดและความเร็วรอบ

4.5.5 เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์ควรจะมีผลตอบสนองที่ไวและสามารถชดเชยเอาท์พุทได้และคงที่แรงดันทางด้านเอาท์พุทในระบบมอเตอร์เซอร์โวได้

4.6 หลักการทำงานของแผนการสวิตช์

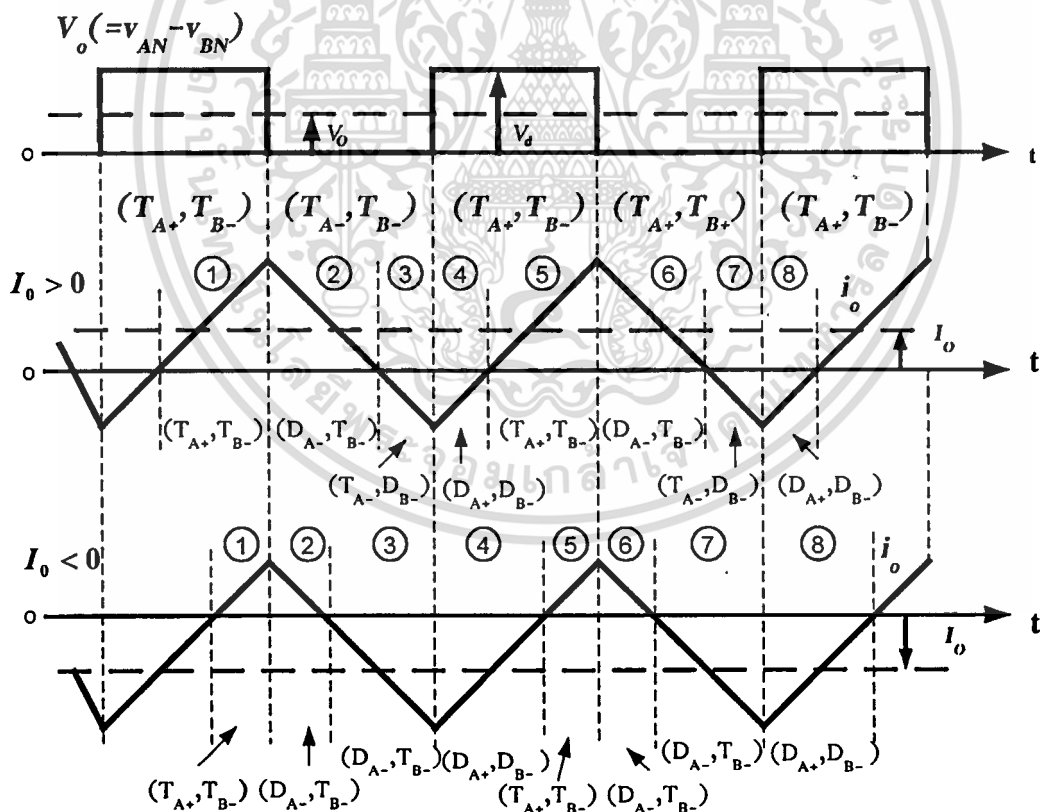
การทำงานของวงจรถูกฟลูบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์แบบเทคนิคพีดับบลิวเอ็มยูนิโพลาร์เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ทำงานจะเกิดการนำกระแสผ่านโหลด โดยในวงจรได้มีไดโอดต่อคร่อมอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งจะถูกใช้เป็นส่วนควบคุมให้มีการถ่ายเทพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นลำดับการทำงานของสวิตช์และไดโอด จะทำให้เกิดกระแสไหลต่อเนื่อง โดยขึ้นอยู่กับโหลดและช่วงเวลาการสวิตช์ โดยโหมดการสวิตช์สามารถจัดแบ่งได้เป็นโหมดการทำงานใหญ่ๆได้ 4 โหมดในแต่ละโหมดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของสวิตช์และไดโอดแต่ละตัวกับผลของทิศทางการไหลของกระแสและสัญญาณแรงดันเอาท์พุท

ในการวิเคราะห์ จะเป็นไปตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเพื่อหาลักษณะการทำงานของงานในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปของคาบเวลาการทำงานของแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนไปตามแต่ละโหมดการทำงาน จากภาพที่ 4.3 เพื่อสะดวกสำหรับการวิเคราะห์หลักการทำงานจะสมมติให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
1. ตัวเหนี่ยวนำและตัวความต้านทานได้จำลองให้เป็นโหลดประเภทมอเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชุดแหล่งจ่ายดีซีไม่มีรีปเปิ้ล
3. อุปกรณ์สวิตช์ทุกตัวเป็นทางอุดมคติ

ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงสำหรับงานวิจัยในระบบควบคุมได้มีสภาวะการทำงานอยู่สองโหมดคือโหมดมอเตอร์และโหมดเครื่องกำเนิด ในการเลือกใช้งานจริงกำลังจะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการรองรับการทำงานทั้งสองโหมดได้อย่างต่อเนื่อง จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น วงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมลักษณะเป็นอย่างดีซึ่งเหมาะสมในการเลือกใช้งานงานวิจัยเกี่ยวกับชุดการจำลองโหลดที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อน โดยการควบคุมได้มีเลือกใช้การควบคุมสัญญาณพัลส์บลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ ดังนั้นจำเป็นจะต้องรู้แพทเทิร์นการทำงานของสวิตช์กำลัง ในขณะที่มีการทำงานทั้งสองโหมด ซึ่งสามารถอธิบายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุตที่มีความสัมพันธ์กันได้จากภาพที่ 4.6 และ 4.7 โดยจะมีโหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ และ โหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด ตามลำดับ

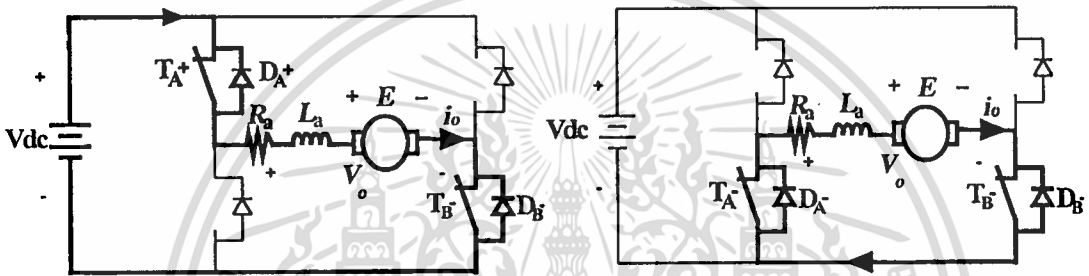


ภาพที่ 4.6 สัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสเอาต์พุตในโหมดการทำงานมอเตอร์และโหมดเครื่องกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

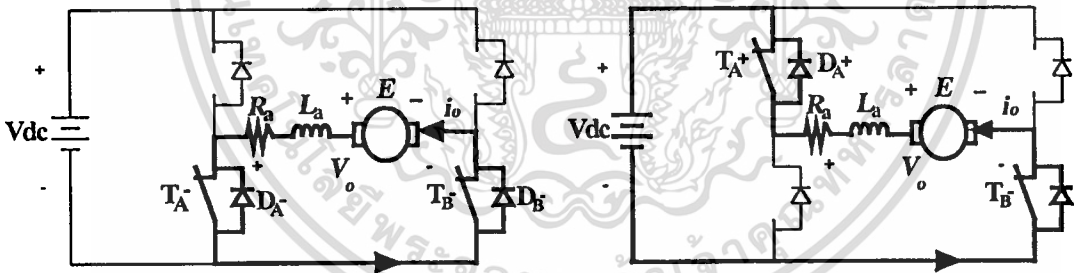
จากภาพที่ 4.6 ได้แสดงโหมดการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองโหมด โดยโหมดแรกจะเป็นโหมดมอเตอร์ซึ่งจะพิจารณาจากทิศทางการไหลของกระแส โดยโหมคนี้อะไรที่เกิดขึ้นจะอยู่ทางซีกบวก $I > 0$ และซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวก ส่วนทางด้านสภาวะอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิดจะพิจารณาจากการไหลของกระแสเช่นกัน โดยพบว่ากระแสที่เกิดขึ้นจะอยู่ทางด้านซีกลบซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นลบ ดังนั้นแพทเทิร์นของการสวิทช์ที่ควบคุมวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองโหมดโดยพิจารณาจากภาพที่ 4.7

แพทเทิร์นการสวิทช์ของสัญญาณแบบยูนิโพลาร์ในโหมคมอเตอร์และโหมดเครื่องกำเนิด



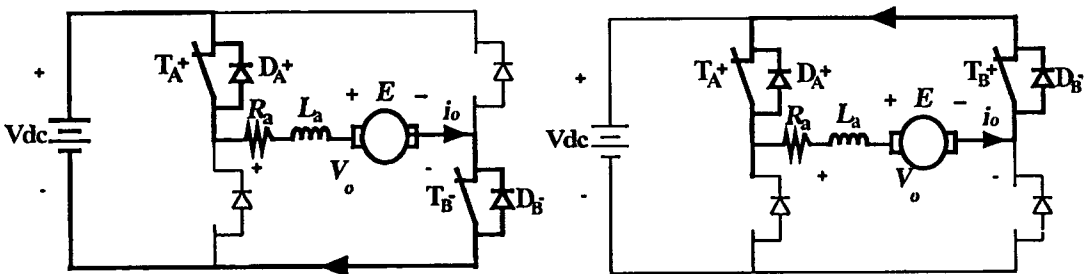
(ก) โหมดที่ 1

(ข) โหมดที่ 2



(ค) โหมดที่ 3

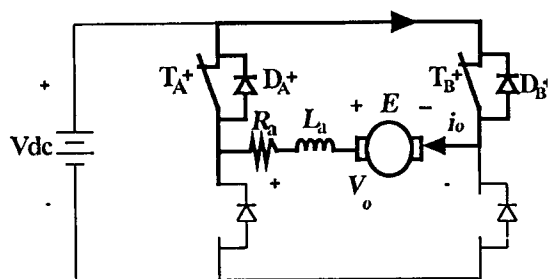
(ง) โหมดที่ 4



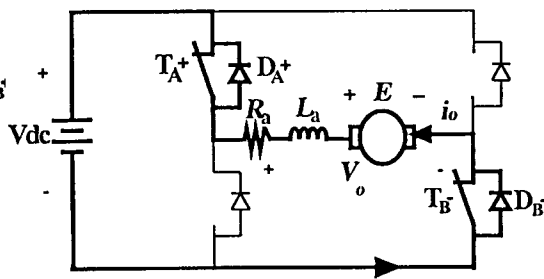
(จ) โหมดที่ 5

(ฉ) โหมดที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) โหมดที่ 7



(ค) โหมดที่ 8

ภาพที่ 4.7 โหมดการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ
ยูนิโพลาร์ในสภาวะการทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิด

4.6.1 โหมดการทำงานที่ 1

โหมดการทำงานที่ 1 สามารถพิจารณาจากแรงดันที่ได้จากสัญญาณแบบยูนิโพลาร์ดังภาพที่ 4.6 โดยแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์จะได้จากสัญญาณการสวิตช์ของ T_{A+} และ T_{B-} และจะมีกระแสไฟฟ้ไหลผ่าน T_{A+} และ T_{B-} จากแหล่งจ่าย V_{dc} สู่อุปกรณ์ V_o ที่มีค่า $I_o > 0$ โดยทิศทางการไหลของกระแสและแรงดันตกคร่อมมอเตอร์สามารถพิจารณาจากภาพที่ 4.7(ก)

4.6.2 โหมดการทำงานที่ 2

โหมดการทำงานที่ 2 เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.5 จะพบว่าสวิตช์ T_{A-} และ T_{B-} จะเกิดการ ON , T_{A+} และ T_{B-} จะเกิดการ OFF ในช่วงนี้จะทำให้แรงทางด้านเอาต์พุต $V_o = 0$ ส่วนกระแสจะมีการไหลต่อเนื่องจากโหมด 1 เนื่องจากเกิดการสะสมพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำภายในของมอเตอร์ ทำให้กระแสไหลผ่าน D_{A-} และ T_{B-} ในทิศทางเดิม โดยสามารถพิจารณาจากภาพที่ 4.6 โดยทิศทางกระแสจะไหลต่อเนื่องจากโหมดที่ 1 มีค่า $I_o > 0$ โดยพิจารณาจากภาพที่ 4.7 (ข) ของการไหลกระแสลูปด้านล่าง

4.6.3 โหมดการทำงานที่ 3

โหมดการทำงานที่ 3 จากทิศทางการไหลของกระแสในภาพที่ 4.5 จะพบว่าสัญญาณการสวิตช์จะเหมือนกับโหมดการทำงานโหมดที่ 2 คือ T_{A-} และ T_{B-} เกิดการ ON ซึ่งจะทำให้ไม่มีแรงดันจากแหล่งจ่ายมาตกคร่อมทางด้านเอาต์พุต $V_o = 0$ ทางด้านทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับโหมด 2 คือ $I_o < 0$ เนื่องจากมีแรงดัน Back EMF ของมอเตอร์เกิดขึ้นมีศักย์สูงกว่าศักย์ของตัวเหนี่ยวนำ ทำให้กระแสอยู่ในทิศทางลบจากภาพที่ 4.6 โดยกระแสจะมีการไหลผ่าน T_{A+} และ D_{B-} โดยพิจารณาจากภาพที่ 4.7 (ค) ของการไหลกระแสลูปล่าง

4.6.4 โหมดการทำงานที่ 4

โหมดการทำงานที่ 4 เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสในภาพที่ 4.6 จะพบว่าสัญญาณการสวิตช์จะเหมือนกับโหมด 1 คือ T_{A+} และ T_{B-} จะเกิดการ ON จะทำให้มีแรงดันเอาต์พุต $V_O = V_{dc}$ ทำให้มีแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ แต่ทิศทางการไหลของกระแสยังคงต่อเนื่องตามโหมดที่ 3 เนื่องจากเกิดจากแรงดัน Back EMF ของมอเตอร์มีศักย์สูงกว่าศักย์ของแหล่งจ่ายชั่วขณะเป็นผลทำให้กระแสไหลเข้าแหล่งจ่าย คือ $I_o < 0$ โดยจะไหลผ่าน D_{A+} และ D_{B-} โดยพิจารณาจากภาพที่ 4.7(ง)

4.6.5 โหมดการทำงานที่ 5

โหมดการทำงานที่ 5 เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสในภาพที่ 4.6 สวิตช์การทำงานของโหมดนี้จะเหมือนกับโหมด 4 คือ T_{A+} และ T_{B-} จะเกิดการ ON โดยจะทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่มอเตอร์ ทำให้แรงดันเอาต์พุต $V_O = V_{dc}$ แต่ทิศทางการไหลของกระแสจะตรงข้ามกับโหมด 4 คือ $I_o > 0$ เนื่องจากแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายมีศักย์สูงกว่าแรงดัน Back EMF ของมอเตอร์ ในโหมด 4 ทำให้กระแสมีทิศทางบวก โดยจะผ่าน T_{A+} และ T_{B-} ซึ่งโหมดการทำงานในช่วงนี้จะเหมือนกับโหมด 1 โดยสามารถพิจารณาจากภาพที่ 4.7(จ)

4.6.6 โหมดการทำงานที่ 6

โหมดการทำงานที่ 6 เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสในภาพที่ 4.6 จะพบว่า จะเกิดการสวิตช์ที่ T_{A+} และ T_{B+} จะเกิดการ ON และ T_{A-} และ T_{B-} จะเกิดการ OFF จะทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมทางด้านเอาต์พุต $V_O = 0$ แต่ทิศทางการไหลของกระแสยังไหลต่อเนื่องตามโหมด 5 เนื่องจากเกิดการสะสมพลังงานจากจากตัวเหนี่ยวนำภายในของมอเตอร์ ทำให้กระแสไหลผ่าน T_{A+} และ D_{B+} เป็นผลทำให้ $I_o > 0$ โดยสามารถพิจารณาการไหลของกระแสในรูปบนของภาพที่ 4.7(ฉ)

4.6.7 โหมดการทำงานที่ 7

โหมดการทำงานที่ 7 เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสในภาพที่ 4.6 จะพบว่าสัญญาณการสวิตช์จะเหมือนกับโหมด 6 โดย T_{A+} และ T_{B+} จะเกิดการ ON ทำให้ไม่มีแหล่งจ่ายตกคร่อมทางด้านเอาต์พุต $V_O = 0$ แต่ทิศทางการไหลของกระแสจะตรงกันข้ามกับโหมด 6 ทำให้ $I_o < 0$ เนื่องจากมีแรงดัน Back EMF ของมอเตอร์เกิดขึ้นมีศักย์สูงกว่าศักย์ของตัวเหนี่ยวนำ ทำให้การไหลของกระแสอยู่ทิศทางลบ โดยจะไหลผ่าน D_{A+} และ T_{B+} โดยสามารถพิจารณาจากภาพที่ 4.7(ซ) ในรูปด้านบน

4.6.8 โหมดการทำงานที่ 8

โหมดการทำงานที่ 8 เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสต่อเนื่องจากโหมด 7 ในรูปที่ 4.6 ทำให้การทำงานในช่วงนี้เหมือนกับโหมด 4 อีกครั้ง คือ T_{A+} และ T_{B-} จะเกิดการ ON และ T_{A-} และ T_{B+} จะเกิดการ OFF ทำให้มีแรงดันจากแหล่งจ่ายตกคร่อมทางด้านเอาต์พุต $V_O = V_{dc}$ ส่วนทิศทางการไหลของกระแสจะไหลต่อเนื่องตามโหมด 7 คือ $I_o < 0$ เนื่องจากมีแรงดัน Back EMF ที่เกิด

จากมอเตอร์มีศักย์สูงกว่าศักย์ของแหล่งจ่ายชั่วขณะ เป็นผลทำให้กระแสไหลเข้าแหล่งจ่าย โดยจะไหลผ่าน D_{A+} และ D_{B-} โดยสามารถพิจารณาการไหลของกระแสจากภาพที่ 4.7(ซ)

จากโหมคการทำงานของสวิตช์กำลังในการควบคุมสัญญาณแบบยูนิโพลาร์ทั้ง 8 โหมคนี้ จะเป็นการพิจารณาการสวิตช์ของสัญญาณ V_{AN} และ V_{BN} ซึ่งสามารถพิจารณาจากภาพที่ 4.5 โดยทั้งสองสัญญาณจะทำให้รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเกิดความถี่ขึ้น 2 เท่า ซึ่งโหมคการทำงานทั้ง 8 โหมคนี้ สามารถอยู่ในสภาวะมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดได้โดยสามารถพิจารณาจากทิศทางของกระแส จากโหมคการทำงานข้างต้นได้กล่าวถึงการทำงานของโหมคกระแสที่ไม่ต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาของโหมคกระแสที่ต่อเนื่องจะพบว่ากระแสไม่เกิดขึ้นทางด้านซีกลบ ทำให้โหมคการทำงานของการไหลกระแสจากภาพที่ 4.7 จากโหมคการทำงานทั้ง 8 โหมคจะลดลงเหลือการทำงาน 4 โหมคคือ โหมค 1, โหมค 2, โหมค 5, โหมค 6 ตามลำดับ

4.7 สรุป

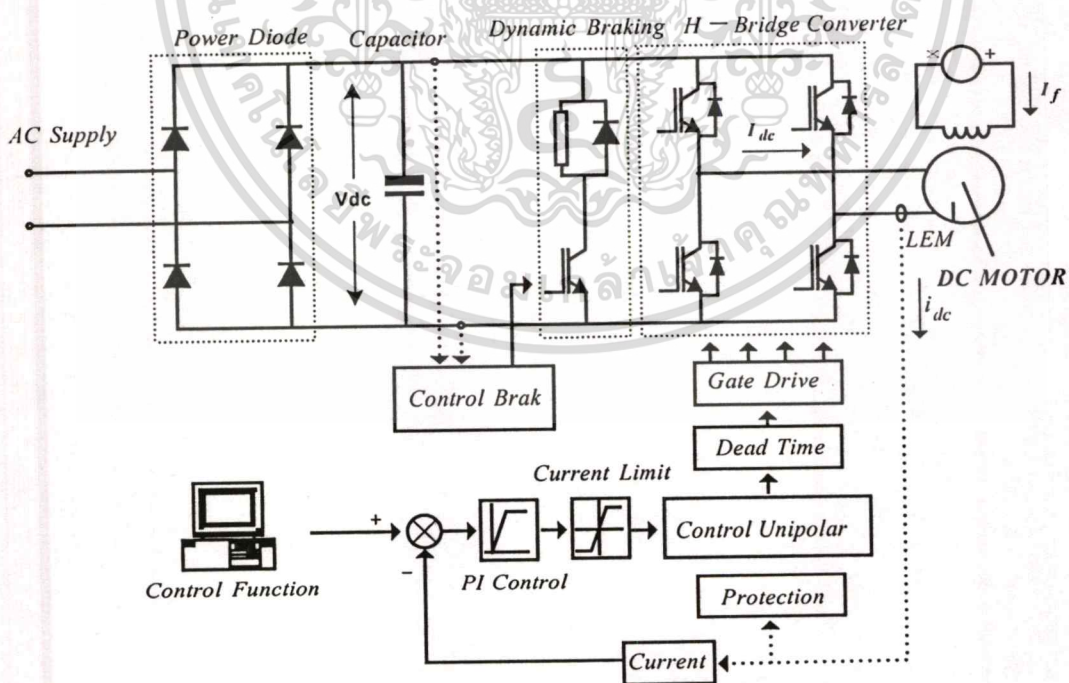
บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่ใช้ในการควบคุมวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงโดยได้อธิบายถึงการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม ทั้งสองแบบคือ การสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มแบบไบโพลาร์และการสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ และจะพูดถึงคุณสมบัติของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ในการใช้งานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมทั้งอธิบายโหมคการนำกระแสของการควบคุมสัญญาณพีคดับลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ซึ่งเป็นสัญญาณที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุม

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์และออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลัง ที่ใช้สำหรับงานวิจัยชุดการจำลองโหลดทางกล โดยการออกแบบทางด้านแมชชีนได้ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวสร้างโหลดโดยมีการทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด ซึ่งจะมีการต่อคัปปลิง (Coupling) กับเพลลาของมอเตอร์ที่ต้องการใช้ทดสอบ ซึ่งจะทำให้พลังงานที่สูญเสียในระบบการทดสอบจะถูกถ่ายเทผ่านความต้านทานเบรกที่ค่าวัตต์สูง โดยจะอาศัยคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยกเป็นชุดสร้างโหลดทางกล [1]-[3] เนื่องจากแรงบิดเริ่มแรกของมอเตอร์กระแสตรงจะมีค่าสูงและพบว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับกระแสแอมเพอร์ทำให้การควบคุมแรงบิดสามารถควบคุมผ่านกระแสแอมเพอร์ได้โดยตรงและมอเตอร์กระแสตรงจะมีงานการควบคุมการทำงานที่กว้าง [6] และในการออกแบบวงจรได้อธิบายหลักการทำงานอย่างละเอียด รวมทั้งได้แสดงถึงขั้นตอนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร และตรวจสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรได้ออกแบบ เพื่อให้มั่นใจว่าวงจรที่ออกแบบมีความเป็นไปได้ และสอดคล้องกับทฤษฎี



ภาพที่ 5.1 บล็อกการทำงานของชุดการจำลองโหลดทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในการถ่ายเทพลังงานที่เกิดจากการทดสอบโหลดในสภาวะที่ชุดทดสอบโหลดทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด จะมีการคืนพลังงานไฟฟ้ากลับสู่ระบบทดสอบ โดยไหลผ่านไดโอดที่ต่อคร่อมสวิตช์กำลัง โดยจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดลงสู่ความต้านทานที่มีค่าวัตต์สูง ดังนั้นการออกแบบทั้งหมดสามารถแสดงได้ในภาพที่ 5.1

5.2 การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์

ในภาพที่ 5.1 จากบล็อกแรกจะแสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์โดยจะมีหน้าที่ แปลงแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง โดยลักษณะวงจรจะใช้เพาเวอร์ไดโอดต่อแบบฟลูบริจค์คอนเวอร์เตอร์ โดยการเลือกพิคคของเพาเวอร์ไดโอดต้องคำนึงถึงพิคคกระแสสูงสุดของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งในงานวิจัยได้มีพิคคของกระแสเอาเมเจอร์ 15 แอมป์ ในการกำหนดพิคคของไดโอดทั่วไป ส่วนหนึ่งจะคำนึงถึงพิคคอุณหภูมิของไดโอดซึ่งจะบอกถึงพิคคความสามารถในการใช้งาน ที่อุณหภูมินั้น ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้งานจริง ในการออกแบบได้ประเมินอุณหภูมิไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากระบบมีการระบายความร้อนคือ พัดลม แผ่นระบายความร้อน ซิลิโคน ซึ่งจากพิคคอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะทำให้ประสิทธิภาพของพิคคลดลงเหลือ 0.8 เท่าของพิคค ดังนั้นการคำนวณจะต้องรวมพิคคที่สูญเสียและการเกิด (Over load) อีก 1.25 เท่า[7]

5.3 การออกแบบเลือกขนาดคาปาซิเตอร์ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรง

ในการออกแบบเลือกใช้คาปาซิเตอร์ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงซึ่งในการเลือกค่าที่ไม่เหมาะสมจะมีผลต่อระบบ เมื่อมีการทดสอบกับโหลดดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไฟเชื่อมโยงกระแสตรงมีค่า 185 โวลท์ เพื่อจะให้กับแรงดันให้กับแรงดันให้ชุดลวดเอาเมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง โดยมีการควบคุมการทำงานแบบสัญญาณยูนีโพลาร์ที่พิคค 130 โวลท์ โดยการออกแบบบริปเปิ้ลจะต้องมีค่าไม่เกิน 2 เปอร์เซนต์ของแรงดันคิซี ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าพิคคของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงได้ดังนี้

$$\text{capacitor value} = \frac{I_{dc} \times \text{period}}{\text{ripple Voltage}} \quad (5.1)$$

ดังนั้นเมื่อทราบพิคคของกระแสเอาเมเจอร์ (I_{dc}) ที่ไหลเข้ามอเตอร์กระแสตรง และเมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (5.1) โดยยอมให้มีแรงดันกระเพื่อมประมาณ 2 เปอร์เซนต์ ของพิคคแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรง 185 โวลท์ ซึ่งจะอยู่ประมาณ 4 โวลท์ จากค่าที่คำนวณได้ในทางปฏิบัติจะใช้ค่าตัวเก็บประจุขนาด 30000 ไมโครฟาราด ที่พิคคแรงดัน 400 โวลท์ โดยคาปาซิเตอร์ที่ใช้จะเป็นชนิดอิเล็กโทรไลต์[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันเกินเชื่อมโยงกระแสตรงสูงเกิน

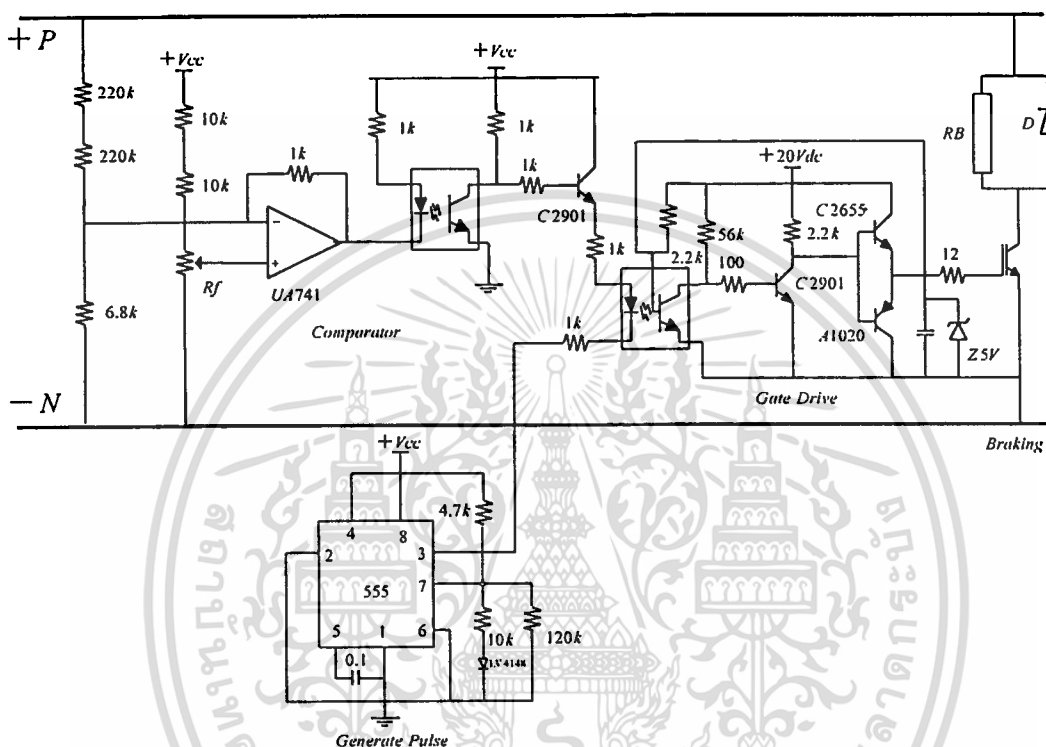
ในงานวิจัยได้ใช้การเบรกแบบไดนามิกจะพบว่าขณะที่มอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่เสมือนเครื่องกำเนิดด้วยการส่งพลังงานกลจากมอเตอร์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านไดโอดที่ต่อพร้อมสวิทช์กำลังของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์กลับเข้าสู่แรงดันเกินเชื่อมโยงกระแสตรงเป็นผลทำให้แรงดันที่คิชิบัสเพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องมีการสลายพลังงานในรูปแรงดันหรือการคายประจุให้กับโหลดที่เป็นความต้านทาน โดยสามารถกำหนดการคายประจุได้โดยสวิทช์กำลังที่ต่ออนุกรมกับความต้านทาน R_B ดังภาพที่ 5.2 ขณะที่มีการทำงานจะพบว่ามีความร้อนเกิดขึ้นที่ความต้านทานสูง สาเหตุเนื่องจากความต้านทานที่คิชิบัสมีค่าน้อย เพราะในการใช้งานจะต้องมีการสลายพลังงานที่คิชิบัสในเวลาที่เราทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีค่าสูง ซึ่งจะเกิดจากการกำหนดเวลาในการสวิทช์ โดยมีการตรวจจับแรงดันที่บัสเชื่อมโยงกระแสตรง จากงานวิจัยได้ควบคุมแรงดันคิชิบัสไม่ให้เกิน 250 โวลต์ แต่เมื่อแรงดันคิชิบัสต่ำลงสู่สภาวะปกติ สวิทช์กำลังก็จะทำการเปิดวงจรทำให้ไม่มีกระแสไหลสู่ความต้านทานเบรก ในการหาความต้านทาน R_B สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$R_B = \frac{V_{dc}^2}{\left[\frac{2\pi n_1}{60} \right] \cdot T_B} \quad (5.2)$$

ภาพที่ 5.2 วงจรกำลังสำหรับควบคุมแรงดันเกินพิกัดของคิชิบัส

ในการออกแบบวงจรควบคุมการเบรกจะต้องมีการตรวจจับแรงดันที่บัสเชื่อมโยงกระแสตรง จากภาพที่ 5.2 โดยลักษณะการต่อวงจรตรวจจับแรงดันจะใช้ความต้านทานขนาด 2 วัตต์เป็นตัวลดทอนแรงดันให้มีค่าต่ำลง จากนั้นได้ใช้ Op-amp เป็นตัวเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากความต้านทานปรับค่าได้ เพื่อการควบคุมพิกัดแรงดันที่ต้องการเบรก จากนั้นได้ทำการแยกกราวด์ระหว่างชุดกำลังและชุดควบคุมโดยใช้ Opto P521 โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะนำไปสวิทช์ทรานซิสเตอร์ C337 ชนิด พีเอ็นพี โดยจะต่ออนุกรมกับขาอินพุตของ Opto P521 ตัวที่ 2 และต่อ

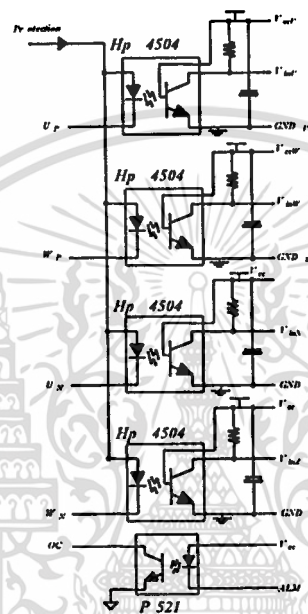
อนุกรมกับขาเอาต์พุตของไอซี 555 ที่มีหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ในการสวิตช์ โดยใช้ความถี่สวิตช์ 1 kHz ขณะที่ duty ของพัลส์ ประมาณ 90 % จากวงจรที่ใช้ในงานวิจัย การทำงานปกติ จะได้แรงดันเชื่อมโยกระแสตรงมีขนาด 185 โวลต์ เมื่อเกิดการคืนพลังงานขึ้นได้มีการตรวจจับแรงดันที่เกินพิกัดไว้ที่ 250 โวลต์



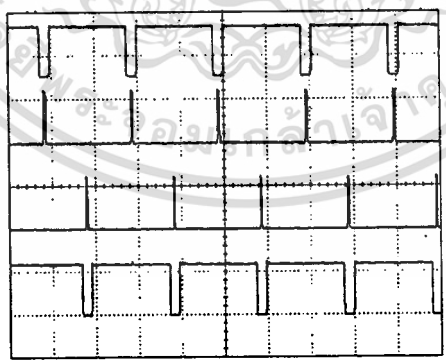
ภาพที่ 5.3 วงจรควบคุมการทำงานแรงดันเกินพิกัดของดีซีบัส

ในการทำงานของวงจร ดังภาพที่ 5.3 เมื่อเกิดแรงดันเกินพิกัดของสัญญาณอ้างอิงที่ตั้งไว้เอาต์พุตของ op-amp จะมีสถานะเป็นศูนย์โวลต์ ทำให้ Opto ตัวที่ 1 มีการไบอัสทรานซิสเตอร์จะทำให้มีแรงดัน 12 โวลต์ ไหลผ่าน Opto ตัวที่ 2 เกิดการทำงาน ขณะที่มีการต่ออนุกรมกับขาเอาต์พุตของไอซีเบอร์ 555 ซึ่งจะทำให้ สถานะการทำงานของ Opto ตัวที่ 2 มีการทำงานตามความถี่ที่เกิดขึ้นของไอซีเบอร์ 555 จากนั้นสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของ Opto จะนำไปขับอุปกรณ์สวิตช์กำลังโดยจะผ่านวงจรขับเคลื่อน ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ได้เมื่อนำไปเข้าวงจรขับเคลื่อนที่ขา IGBT จะมีทิศทางตรงกันข้ามดังภาพที่ 5.4

ในการควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลังจะต้องนำสัญญาณควบคุมผ่านวงจรขับเคลื่อน ก่อนที่จะทำการควบคุมสวิทช์กำลัง เนื่องจากอุปกรณ์สวิทช์กำลัง ในวงจรฟูลบริดจ์แต่ละตัวจะทำงานที่ ศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งจะต้องมีการแยกกราวด์ของอุปกรณ์สวิทช์แต่ละตัวออกจากกัน และนอกจากนี้ยังต้องการแยกส่วนของวงจรควบคุมออกจากส่วนวงจรกำลัง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Opto ที่มีการทำงานความถี่สูงทำหน้าที่แยกกราวด์และจะต้องมีแหล่งจ่ายขนาด +15 โวลท์ ที่เป็นอิสระต่อกันเพื่อจ่ายให้กับส่วนของวงจรขับเคลื่อน



(ก) รูปวงจรขับเคลื่อน



(ข) รูปสัญญาณขับเคลื่อนทั้ง 4 สัญญาณ

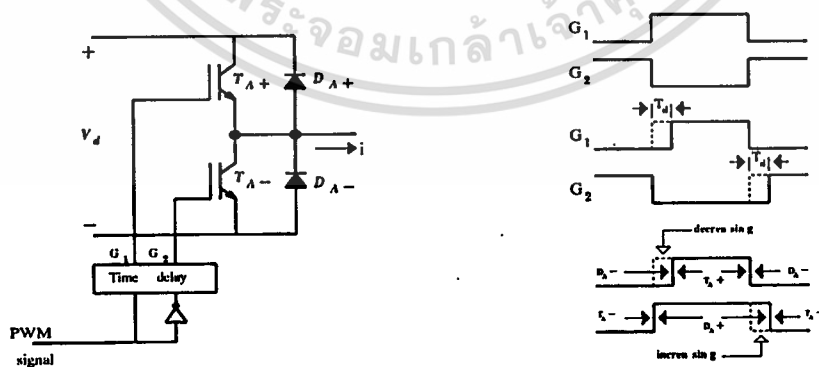
ภาพที่ 5.6 วงจรขับเคลื่อนของ IPM และสัญญาณการควบคุม

วงจรขับเคลื่อนที่ได้แสดงดังภาพที่ 5.6(ก) จะออกแบบใช้สำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์สวิทช์ IPM โดยมีทั้งหมัด 4 ชุด โดยวงจรประกอบด้วยไอซี Opto เบอร์ TLP550 ทำหน้าที่แยกสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ออกให้แต่ละตัว และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณควบคุมออกจากวงจรกำลัง ส่วน Opto เบอร์ P521 ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณ Fluat ที่ได้จากขา Fo ของ ไอจีบีทีโมดูลเพื่อส่งกลับเข้าสู่วงจรควบคุมจากภาพ 5.7(ข) ได้แสดงสัญญาณ พีคัปบลิวเอ็ม ทั้ง 4 กิ่ง ที่ถูกส่งผ่านมาจากวงจรประวิงเวลา เพื่อนำไปแยกกราวด์ โดยใช้หลักการส่งถ่ายสัญญาณด้วยแสง จึงทำให้วงจรมีอิสระต่อกันระหว่างชุดควบคุมและชุดกำลัง สัญญาณที่ส่งผ่าน Opto จะเข้ามาส่วนวงจรจับเกิด โดยลักษณะการทำงานวงจรเมื่อไม่มีสัญญาณการสวิตช์สภาวะที่ขาเกิดของอุปกรณ์สวิตช์ IPM จะเป็นมีไฟขนาด +8 โวลต์ เนื่องจากชุดจับเกิดภายในโมดูลจะมีซีเนอร์ไดโอดขนาด 8 โวลต์ ต่อขนานกับสัญญาณ ในลักษณะเดียวกันเมื่อมีการทำงานของสวิตช์ ที่ขาของไอจีบีทีโมดูลจะเป็นศูนย์ ส่วนวงจรตรวจจับสัญญาณ Fault ที่ขา Fo ของอุปกรณ์สวิตช์ IPM เมื่อมีการทำงานปกติ ที่ขานี้จะมีไฟ +15 โวลต์ แต่เมื่อมีการเกิด Fault ขึ้นที่ขา Fo จะมีค่าเป็นศูนย์ โวลต์ เนื่องจากในงานวิจัยได้ออกแบบใช้งานวงจรกำลังฟลูตริจด์แบบ 1 เฟส ซึ่งอุปกรณ์สวิตช์ IPM ที่ใช้งานจะเป็นชนิด 3 เฟส จึงทำให้กึ่งเพาเวอร์ โมดูลเกิน 1 กิ่งดังนั้นในการใช้งานจำเป็นต้องมีแหล่งจ่าย +15 โวลต์ ให้กับสวิตช์ทั้งสองที่เหลืออยู่

5.6 การออกแบบวงจรประวิงเวลา (Dead – time circuit)

เป็นวงจรแยกสัญญาณที่จะนำไปควบคุมการทำงานของ IPM ในชุดบนและชุดล่างในกิ่งเดียวกัน ในวงจรอินเวอร์เตอร์ตามภาพที่ 5.7 โดยวงจรจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณประวิงเวลา เพื่อป้องกันไม่ให้กิ่งทั้งสองของ IPM ทำงานพร้อมกันในขณะที่การเปลี่ยนสถานะทำงานพร้อมกันในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะทำงาน อันเนื่องมาจากผลของสตอเรจไทม์ของ IPM เองซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรภายในกิ่งชั่วขณะผลก็คืออาจทำให้ IPM เสียหายได้ โดยหลักการออกแบบวงจรประวิงเวลาแสดงได้ดังภาพที่ 5.8 ทำได้โดยสร้างเวลาหน่วงในการทำงานของ IPM ทั้งสองออกไป

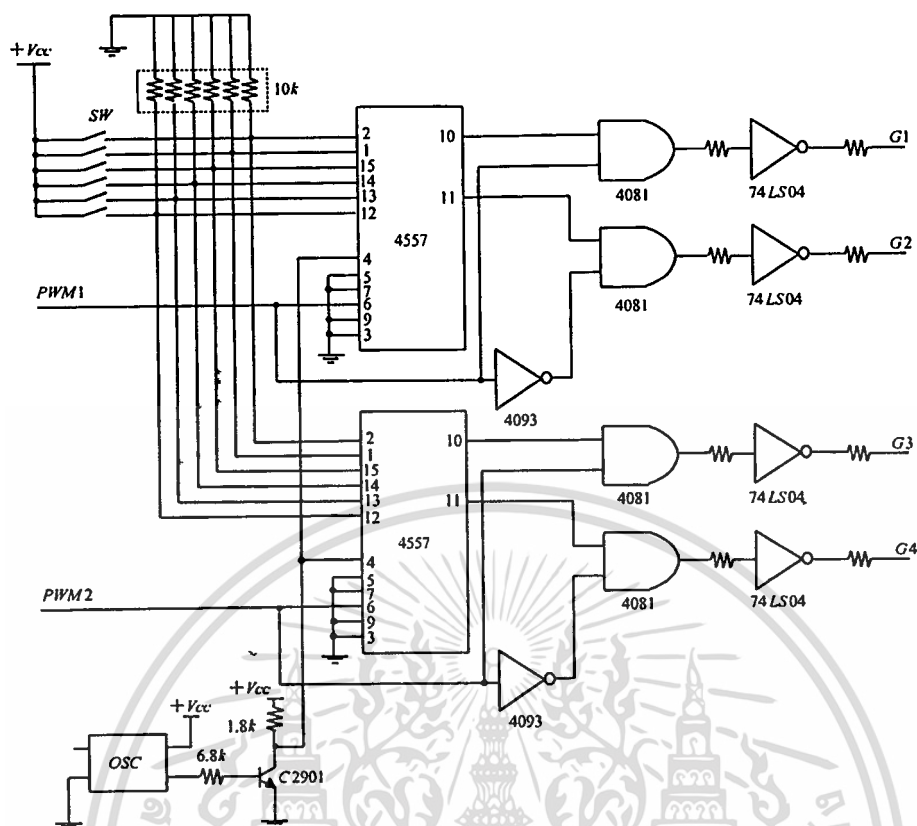


(ก) แสดงวงจรสวิตช์กำลังที่ 1 กิ่ง

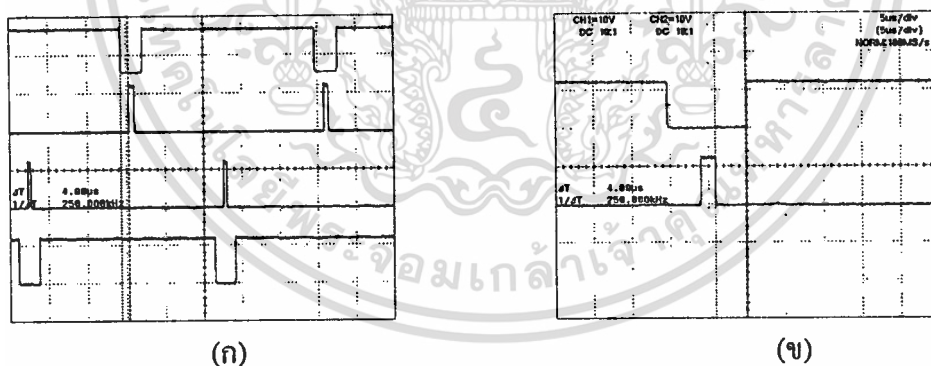
(ข) รูปแบบแพทเทิร์นสวิตช์

ภาพที่ 5.7 รูปแบบการสวิตช์ของสัญญาณประวิงเวลาใน 1 กิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.8 วงจรประวิงเวลาที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 5.9 สัญญาณประวิงเวลาที่นำไปสวิตช์

(ก) สัญญาณ PWM ที่ผ่านวงจรประวิงเวลาทั้ง 4 สวิตช์

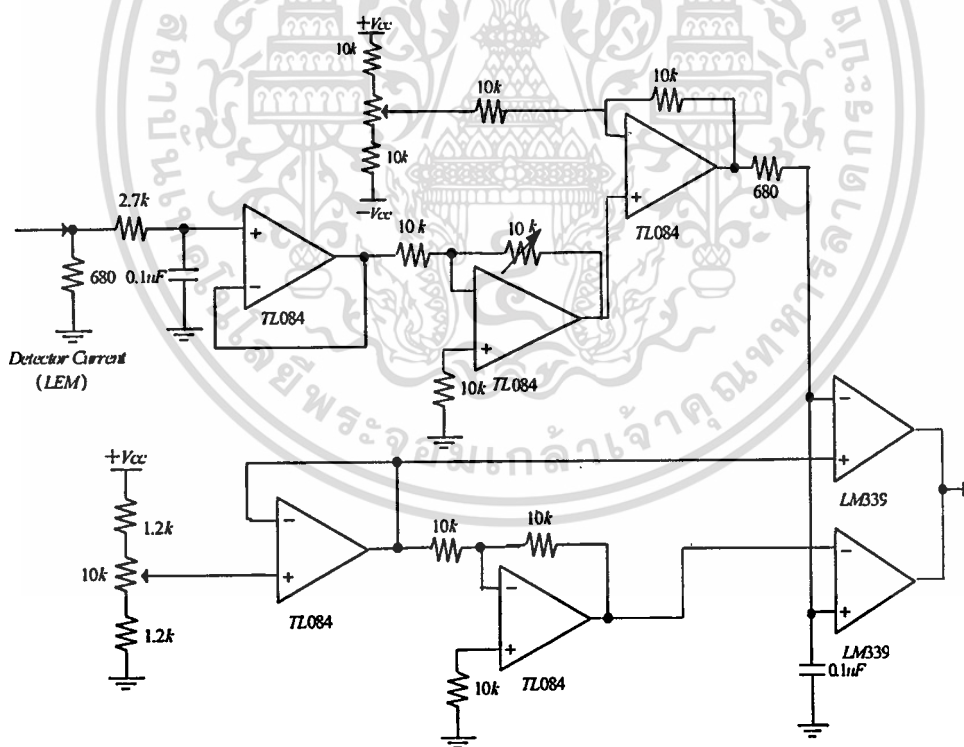
(ข) สัญญาณ PWM ที่ผ่านวงจรประวิงเวลาสำหรับ 1 กิ่ง

จากภาพที่ 5.9 ได้แสดงการทำงานของวงจรประวิงเวลา (Dead Time) โดยสัญญาณอินพุตจะมาจากสัญญาณ PWM แบบชุนีโพลาร์ โดยก่อนที่จะนำสัญญาณไปขับเคลื่อนจะต้องผ่านวงจรประวิงเวลาเสียก่อน จากภาพที่ 5.8 โดยสัญญาณอินพุตจะผ่านไอซีเบอร์ MC14557 ซึ่งมีคุณสมบัติในการเลื่อนบิต ซึ่งการทำงานของไอซีเบอร์นี้จะอาศัยสัญญาณ Clock ที่ได้จากขา 4 ที่ความถี่ 1 MHz โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

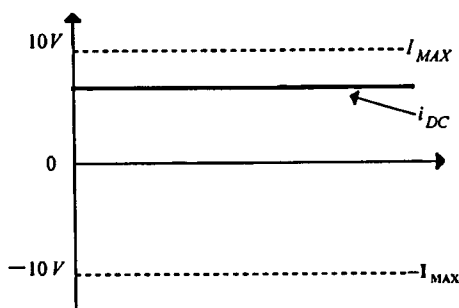
ความกว้างของสัญญาณประวิงเวลาสามารถกำหนดได้จาก L1 ถึง L32 ซึ่งเมื่อต้องการใช้งานต้องเซตให้ค่าเป็น High ซึ่งลักษณะของค่าที่ต้องการจะเป็นไฟบวกตามลำดับของบิตที่เซตคือ 1,4,8,15,32 ซึ่งจะต้องมีการบวกขณะมีการเซต Low เป็น High โดยในงานวิจัยเลือกใช้สัญญาณประวิงเวลา 4 ไมโครวินาที ที่จะต้องให้ L4 มีค่า High ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมี 2 สัญญาณตรงข้ามกันและแต่ละสัญญาณจะนำมาแอนด์เกตกับสัญญาณอินพุต ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณขับเกตทั้งสองสัญญาณที่มีค่าประวิงเวลาเท่ากับ 4 ไมโครวินาที หรือเมื่อต้องการสัญญาณประวิงเวลาที่เพิ่มขึ้นในวงจรก็สามารถปรับเซตที่ขา L1 ถึง L32 ให้อยู่ในสถานะ High ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่วงจรสามารถทำงานได้คือ 64 ไมโครวินาที

5.7 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแส (Current detector)

วงจรนี้จะทำหน้าที่ตรวจจับสนะเพื่อใช้ในการป้องกันกระแสเกินขณะที่มีโหลดมากๆ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ LEM ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการ Hall-effect เป็นตัวตรวจจับสนะโดยสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.10



(ก) วงจรการตรวจจับกระแสน้ำหรือวงจรป้องกันกระแสน้ำ



(ข) รูปการจำลองการตรวจจับกระแสในวงจร

ภาพที่ 5.10 วงจรตรวจจับกระแส

เนื่องจากมีข้อดีกว่า CT (Current transformer) ในด้านที่สามารถตรวจจับได้กับกระแสที่เป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ สามารถตอบสนองกับงานที่มีความถี่สูงได้ ซึ่งในการควบคุมนี้ ใช้ LEM ตรวจจับกระแสแอมเพอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับการใช้งานของ LEM จะต้องมีการควบคุมย่านสเกลระดับของกระแส ซึ่งในงานนี้ได้ตั้งไว้ที่ 1 : 1000 นอกจากนี้ต้องมีวงจรสนับสนุนทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟขนาด +/-15 โวลต์ วงจรบัฟเฟอร์ และวงจรปรับค่าออฟเซต สัญญาณตามภาพที่ 5.10 (ข) เมื่อสัญญาณกระแสที่ผิดปกติจาก LEM เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ จะทำให้เอาต์พุตของ op-amp มีสถานะเป็นศูนย์ ซึ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งไปในวงจรป้องกัน

5.8 การออกแบบวงจรป้องกัน (Protection circuit)

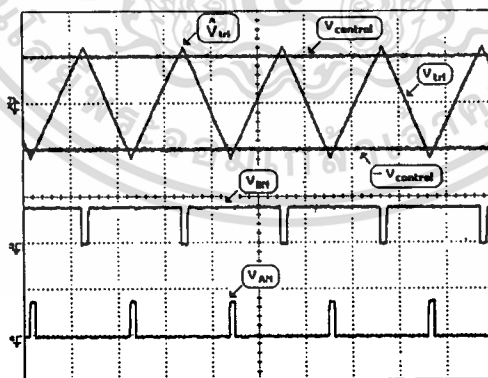
วงจรป้องกันที่สร้างขึ้นตามภาพที่ 5.12 จะทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายขณะที่ระบบทำงานผิดปกติ วงจรป้องกันที่ออกแบบขึ้นนี้จะเป็นส่วนป้องกันกระแสเกินที่โหลดและป้องกันการเกิด Fault ที่ Power Module โดยสัญญาณทั้งสองนี้ปกติจะมีการทำงานอยู่สถานะที่ + 15 โวลต์ โดยมีการนำมาเข้าวงจรแอนด์เกตซึ่งจะได้ค่าเอาต์พุตของไอซีเบอร์ 74HC74 มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ C327 ชนิด PNP มีการทำงาน ในทางเดียวกันเมื่อเกิดมีระบบผิดปกติสัญญาณที่ขาแอนด์เกตจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้แรงดันเอาต์พุตของไอซีเบอร์ 74HC74 ที่นำไปขับทรานซิสเตอร์มีค่าเป็นไฟ +15 โวลต์ ซึ่งไม่สามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ทำงานได้ ทำให้สถานะการทำงานเปิดออกจะไม่มีแรงดัน 5 โวลต์ไป ON Opto ได้

ในงานวิจัยนี้ได้เน้นถึงการป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์เป็นสำคัญ ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงการเกิดริบเบิลของกระแสและริบเบิลแรงบิด ซึ่งในการออกแบบได้เลือกใช้ความถี่ในการสวิตช์ที่ 10 kHz ซึ่งจะทำให้ความถี่ของแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 20 kHz [11] ดังนั้นในการสร้างสัญญาณจะสามารถอธิบายแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ได้ 3 ส่วน ซึ่งจะง่ายต่อการสร้างวงจรและอธิบาย ได้แก่ วงจรสร้างสามเหลี่ยม , วงจรสร้างแรงดันไฟตรง และวงจรเปรียบเทียบ โดยการออกแบบวงจรสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.12

1. วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมได้ออกแบบใช้ไอซีเบอร์ ICL 8038 เป็นตัวสร้างสัญญาณโดยได้ออกแบบความถี่ไว้ที่ 10 kHz

2. วงจรสร้างสัญญาณไฟตรง โดยแรงดันที่ได้จะมาจากวงจรพีไอคอนโทรลซึ่งสัญญาณที่ได้นี้จะนำมาเข้าวงจรบัฟเฟอร์และวงจรอินเวอร์ตซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตทั้งด้านบวกและด้านลบที่มีอัตราส่วนขยาย 1 : 1

3. วงจรเปรียบเทียบ โดยมีหน้าที่ เปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณไฟกระแสตรง ซึ่งในวงจรจะใช้ op-amp เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่ดับบลิวเอ็มซียูนิโพลาร์ ซึ่งลักษณะการเกิดสัญญาณเมื่อแรงดันไฟ DC ($V_{control}$) มีศักย์มากกว่าสัญญาณสามเหลี่ยม(V_{tri}) สถานะของพัลส์ที่เกิดขึ้นจะศักย์เป็นไฟบวก และทำนองเดียวเมื่อแรงดันไฟตรงมีศักย์ต่ำกว่าสัญญาณสามเหลี่ยมสถานะของพัลส์ที่เกิดขึ้นจะมีศักย์เป็นศูนย์โวลต์ ดังนั้นเทคนิคการสร้างสัญญาณยูนิโพลาร์จะมีแรงดันไฟกระแสตรง ทั้งทางด้านซิกบวกและซิกลบคือ $+V_{control}$, $-V_{control}$ ซึ่งจะได้สัญญาณพัลส์ 2 สัญญาณแบบตรงกันข้าม [13] ดังภาพที่ 5.13



ภาพที่ 5.13 รูปคลื่นสัญญาณแบบยูนิโพลาร์

5.10 การออกแบบวงจรป้อนกลับแบบกระแส

ในการออกแบบการป้อนกลับในงานวิจัยได้เลือกการเคราะห์ผลตอบแทนเชิงความถี่ ซึ่งข้อดีของวิธีของผลตอบแทนความถี่คือ ในการเสถียรภาพของระบบเราไม่จำเป็นต้องคำนวณหารากของพหุนามลักษณะเฉพาะที่เสถียรหรือการเชิงเส้นเพื่อการวิเคราะห์เท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสมการสมบัติ โดยใช้สัญญาณเข้ารูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ และวัดออกในช่วงความถี่ที่ต้องการ นอกจากนั้นผลตอบสนองเชิงความถี่สามารถใช้ได้กับระบบไม่เป็นเชิงเส้นได้

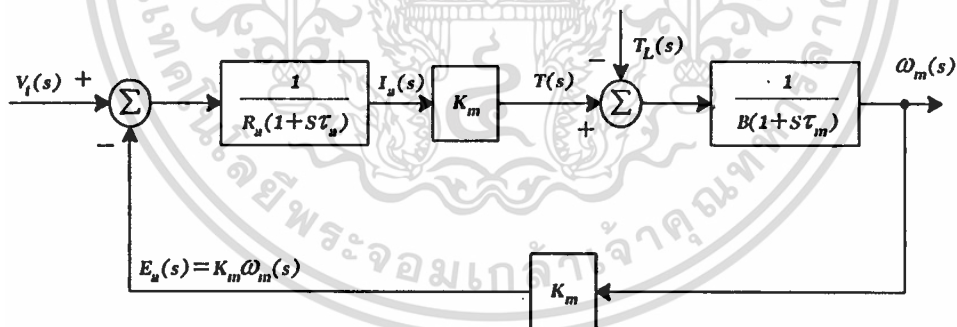
5.10.1 ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค

การควบคุมแบบฟีดแบ็คได้มีการรวมเอาคุณสมบัติเด่นในการควบคุมแบบฟีดแบ็คและโอเพนลูปเข้าด้วยกัน คือ

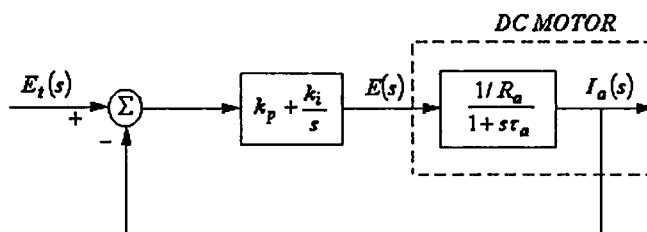
1. มีผลการตอบสนองชั่วขณะ (Transient response) ที่ดีสามารถเข้าสู่เป้าหมายในการควบคุมได้เร็วซึ่งเป็นคุณสมบัติควบคุมแบบฟีดแบ็ค
2. สามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อน ณ สภาพสมดุลใหม่ (steady state error) ซึ่งเป็นค่า (Off set) ที่เกิดขึ้นในขบวนการลงได้ คุณสมบัติข้อนี้ได้จากการควบคุมแบบโอเพนลูป

5.10.2 การออกแบบระบบควบคุมฟีดแบ็คของการป้อนกลับกระแส

การออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนได้เลือกใช้แบบแผนภาพ โปด (Bode diagram) ซึ่งประกอบด้วยกราฟ 2 ชุด คือ กราฟของขนาดเทียบกับความถี่และกราฟของเฟสเทียบกับความถี่ ดังนั้นในงานวิจัยได้มีการออกแบบการป้อนกลับของกระแสแอมเพอเรจของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.14 ดังนั้น เมื่อทำการออกแบบระบบป้อนกลับแบบกระแสเราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมใหม่ดังภาพที่ 5.15



ภาพที่ 5.14 บล็อกระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



เอกภาพที่ 5.15 บล็อกระบบการป้อนกลับของกระแสแอมเพอเรจ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเขียนสมการในวงรอบเปิด

$$\left| \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \times \frac{1/R_a}{(1 + s\tau_a)} \right|_{s=j\omega_0} = 1 \quad (5.3)$$

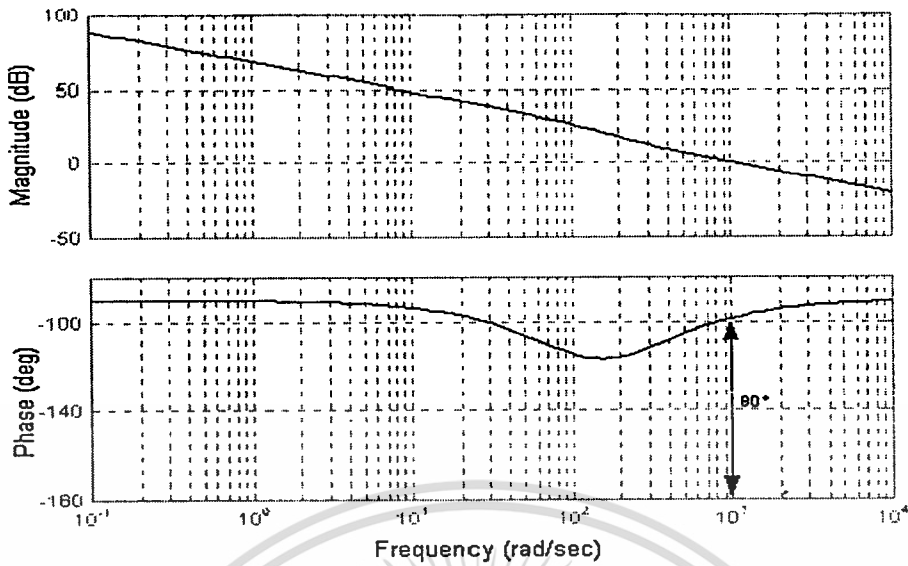
$$\omega_{cn} = \frac{k_i}{k_p} < \omega_0 \quad (5.4)$$

โดยหลักการเลือกค่าความถี่ตัดขัมนั้นจะพิจารณาจากผลตอบสนองเป็นสำคัญเนื่องจากการวิจัยการควบคุมจะเป็นลักษณะต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้การควบคุมกระแสจะต้องมีผลตอบสนองที่ไว ดังนั้นเราต้องเลือกความถี่ตัดขัมนี้นี้มีค่ามากแต่ก็ไม่อาจจะมากเกินไปเพราะอาจจะส่งผลกระทบต่ออัตราขยายของสัญญาณรบกวนได้ ถ้าให้เวลาขาขึ้น (Rise time) มีค่าประมาณ 2.2 ms สามารถประมาณความถี่ตัดขัมนี้นี้เท่ากับ 1000 rad/sec สำหรับการเลือกค่าความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI เราจะพิจารณาเสถียรภาพเป็นหลักโดยระบบต้องมีการเฟื่อเฟสเพียงพอในงานวิจัยนี้เราให้ค่า $\omega_{cn} = \frac{k_i}{k_p} = 250 \text{ rad/s}$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (5.3), (5.4) โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์จากภาคผนวก ก. สามารถหาค่า k_p และ k_i ได้ดังนี้

$$k_p = 14.5 \text{ V/A}$$

$$k_i = 3552 \text{ V/As}$$

เมื่อทำการวิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อไปเขียน โปรแกรมเพื่อหาผลตอบสนองของระบบที่มีต่อสัญญาณรบกวนขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสจากภาพที่ 5.16 จะพบว่าระบบมีการเฟื่อเฟส 80 องศา ซึ่งเพียงพอต่อสัญญาณรบกวนและการออกแบบใช้งาน



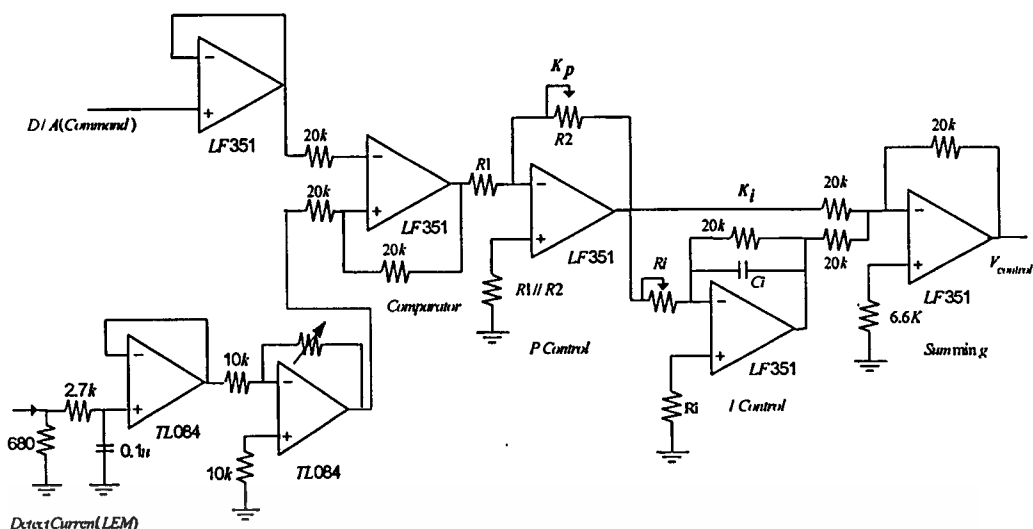
ภาพที่ 5.16 แผนภาพโบดของระบบควบคุมกระแสที่ได้ทำการออกแบบ

5.10.3 การออกแบบระบบควบคุมพีไอในรูปวงจรมอดูล

ในการออกแบบวงจรการป้อนกลับของกระแสเนื่องจากในงานวิจัยได้มีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงซึ่งแรงบิดที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคกับกระแสเอมเจอร์ ดังนั้นในการควบคุมรูปกระแสจะต้องมีผลการตอบสนองชั่วขณะที่สามารถเข้าสู่เป้าหมายและสามารถขจัดค่าคลาดเคลื่อนให้สมดุลดังที่กล่าวมาในตอนต้น ซึ่งในการออกแบบได้ใช้วงจรมอดูล เนื่องจากมีผลตอบสนองที่ไวโดยที่ไม่ต้องมีการคำนวณ แต่อาจจะมีสัญญาณรบกวนมากดังนั้นในการออกแบบได้นำค่า k_p, k_i ที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 5.10.2 มาเป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบหาค่า ค่า R และค่า C ในวงจรพีไอแบบมอดูล ภาพที่ 5.18 จะเห็นว่าจะมีสัญญาณอินพุต คือ สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับ โดยสัญญาณอ้างอิงได้มีการควบคุมมาจากคอมพิวเตอร์ที่สามารถสั่งการทำงาน ส่วนสัญญาณป้อนกลับของกระแสได้มาจาก Current Transducer (LEM) ที่มีการตรวจจับกระแสเอมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรควบคุมแบบพีไอตามสมการต่อไปนี้[11]

$$k_p = \frac{R_2}{R_1} \quad (5.5)$$

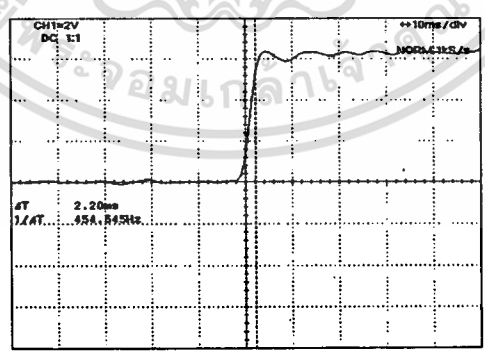
$$k_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{R_i C_i} \quad (5.6)$$



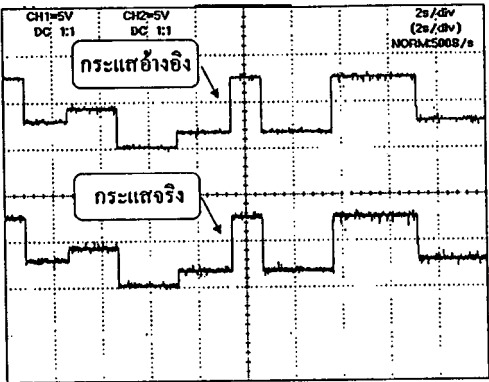
ภาพที่ 5.17 วงจรการควบคุมแบบพีไอ

จากการคำนวณและออกแบบเมื่อทำการทดสอบภายในระบบในสภาวะยูนิตสเตปจะแสดงได้จากภาพที่ 7.18 แสดงสัญญาณของกระแสแอมเพอร์ ในการจำลองโหลดที่มีการสเตปซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของช่วงทรานเซียนของกระแสที่ได้จะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการออกแบบ (Rise time ≈ 2.2 ms) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบมีการทำงานที่ถูกต้อง

จากภาพที่ 7.19 เป็นสัญญาณกระแสอ้างอิงที่มีการควบคุมมาจากคอมพิวเตอร์และกระแสจริงที่มีการป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์ที่มีแรงบิดไม่ต่อเนื่องซึ่งจะพบว่าระบบที่ได้ออกแบบมีผลตอบสนองที่เร็วเมื่อพิจารณาจากการ Step Load



ภาพที่ 5.18 สัญญาณการป้อนกลับกระแสแอมเพอร์ขณะที่มีการสเตปโหลด



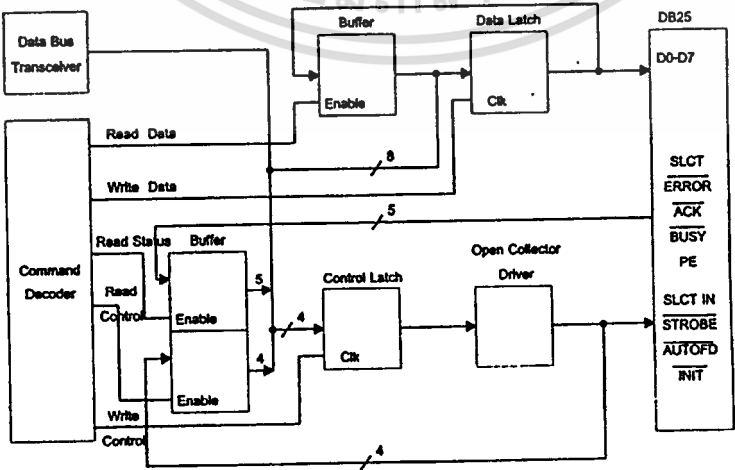
ภาพที่ 5.19 สัญญาณกระแสอ้างอิงและกระแสแรงดันที่มีการป้อนกลับ

5.11 พอร์ทขนาน

พอร์ทขนานของ IBM PC โดยมากจะใช้สำหรับการต่อเครื่องพิมพ์ แต่มีการทำงานหลายอย่างที่ได้ใช้การเชื่อมต่อจาก พอร์ทขนาน เช่น การส่งข้อมูลไฟระหว่างคอมพิวเตอร์ การส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานอุปกรณ์ภายนอก การรับ สัญญาณจากภายนอกเพื่อนำไปประมวลผล และอุปกรณ์ป้องกันของซอฟต์แวร์ (Hard lock) เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นว่าการทำงาน ที่เกิดจากการทำงานที่เกิดจากการเชื่อมต่อจากพอร์ทขนาน

5.11.1 โครงสร้างพอร์ทขนาน

โครงสร้างพอร์ทขนานนั้นเป็น โครงสร้างที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานร่วมกับเครื่องพิมพ์โดยเฉพาะ ดังนั้นสัญญาณต่างๆ จะเป็นสัญญาณที่มีความหมายเกี่ยวกับการติดต่อเครื่องพิมพ์ พอร์ทขนานบน IBM PC จะมีหลายชุด โดยจะใช้สัญลักษณ์ LPT1,LPT2 เป็นต้น[17]



ภาพที่ 5.20 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของพอร์ทขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดขาสัญญาณ Connector ของพอร์ทขนาน

ขาสัญญาณ	สัญลักษณ์	ทิศทาง (จากพอร์ท)	ความหมาย
1	-STROBE	OUT	สัญญาณเป็น Low เพื่อส่งข้อมูลให้เครื่องพิมพ์
2-9	D0-D7	OUT	สัญญาณข้อมูล
10	-ACKNL	IN	สัญญาณ Low แสดงว่าเครื่องพิมพ์ได้รับข้อมูลแล้ว
11	BUSY	IN	สัญญาณ High แสดงว่าเครื่องพิมพ์ไม่พร้อมที่จะรับข้อมูลแล้ว
12	PE	IN	สัญญาณ High แสดงว่าเครื่องพิมพ์กระดาษหมด
13	SLCT	IN	สัญญาณ High แสดงว่าเครื่องพิมพ์อยู่ในสภาวะ Selece
14	-AUTOFD	OUT	สัญญาณ Low เพื่อให้เครื่องพิมพ์เลื่อนกระดาษขึ้น หลังจากพิมพ์เสร็จ
15	-ERROR	IN	สัญญาณ Low แสดงการผิดพลาดจาก Paper End,Off line
15	-INIT	OUT	สัญญาณ Low เพื่อให้เครื่องพิมพ์เริ่มต้นการทำงานใหม่
17	-SLCTIN	OUT	สัญญาณ Low เพื่อให้เครื่องพิมพ์รับข้อมูล โดยปกติอาจมีการกำหนดไว้แล้วที่เครื่องพิมพ์
18-25	GND	-	กราวด์

การจัดวางตำแหน่งต่างๆที่ควบคุมการทำงานพอร์ทขนาน

ตารางที่ 5.2 การจัดวางตำแหน่งของพอร์ทขนาน

LDP	ตำแหน่ง	ความหมาย
1	378H	DATA
	379H	Status
	37AH	Control
2	278H	Data
	279H	Status
	27AH	Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์ข้อมูล (Data) ตำแหน่ง 378H(LPT),278H(LPT2)

D7	D5	D5	D4	D3	D2	D1	D0
----	----	----	----	----	----	----	----

เมื่อต้องการส่งข้อมูลออกที่พอร์ทขนาน ไปยังภายนอก ก็ใช้คำสั่ง OUT ออกที่แอดเดรสนี้โดยตรงคุณสมบัติของขาสัญญาณ D0-D7 นี้จะสามารถจ่ายกระแส(Source) ได้ 2.5 mA และดึงกระแส(Sink) ได้ 24 mA ดังนั้นควรระวังการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกกับขาสัญญาณเหล่านี้ โดยไม่ให้ Short ลงกราวด์เพราะจะทำให้วงจรขนานเสียหายได้

รีจิสเตอร์แสดงสถานะ(Status) ตำแหน่ง 379H(LPT1),279H(LPT2)

ขา 11	ขา 10	ขา 12	ขา 13	ขา 15	-	-	-
-------	-------	-------	-------	-------	---	---	---

รีจิสเตอร์นี้แสดงสถานะการทำงานของพอร์ทโดยที่บิต 7 (ขา 11) เพียงบิตเดียวที่จะแสดงสถานะตรงข้ามกับสัญญาณจริง ที่ได้รับเข้ามา

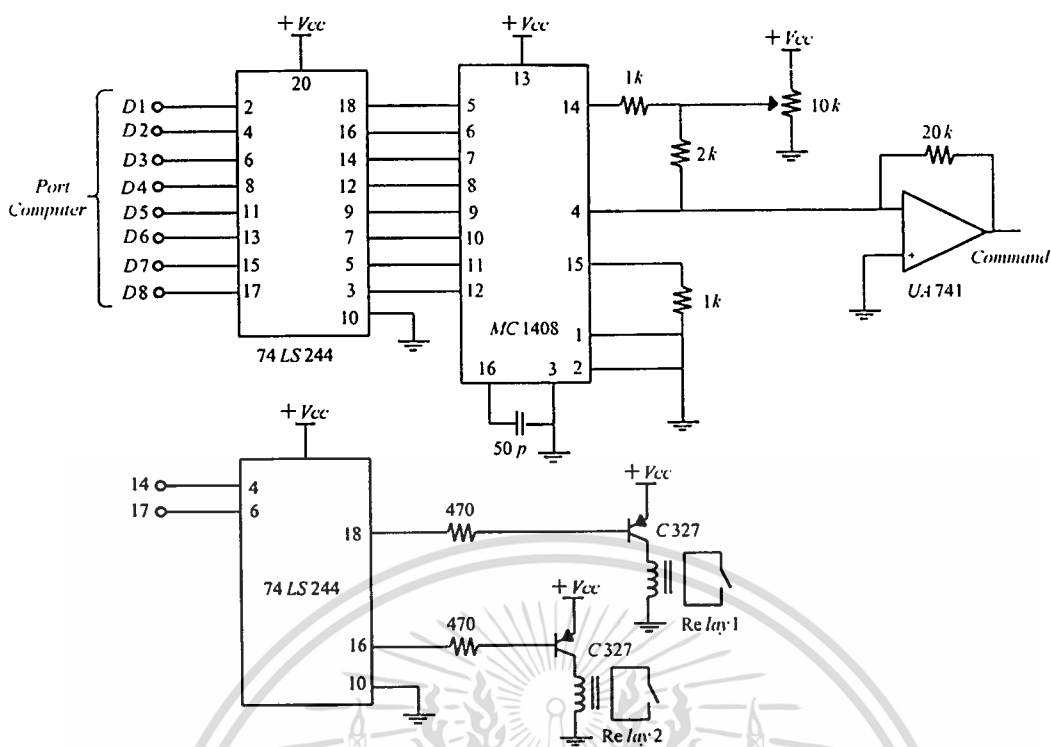
รีจิสเตอร์ควบคุม (Control) ตำแหน่ง 37AH (LPT1),27AH(LPT2)

-	-	-	IRQ	ขา 17	ขา 15	ขา 14	ขา 1
			Enable				

รีจิสเตอร์ตำแหน่งนี้จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมออกไปภายนอก โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของพอร์ท ตำแหน่งจะเป็น Open Collector โดยมี R pull up 4.7 k Ω ซึ่งสามารถได้กระแสประมาณ 7 mA ข้อมูลทั้ง 4 บิตต่างจะตรงกันข้ามกับสัญญาณจริงที่ส่งไปยังภายนอกยกเว้นบิต 2 (15 สัญญาณ initial) ที่ข้อมูล จะตรงกับสัญญาณที่ส่งออกไปภายนอก เช่นกำหนดบิต 1 (Strobe) เป็น 1 แต่สัญญาณที่ส่งออกไปภายนอก จะเป็น 0 และบิต IRQ Enable ทำหน้าที่ สร้างสัญญาณอินเทอร์พรัท CPU เมื่อมีการส่งสัญญาณตอบกลับมา (สัญญาณเป็น Low ที่ขา 10 ACKL/)

5.11.2 การออกแบบวงจรพอร์ทขนาน

ในการควบคุมการทำงานของชุดสร้างโพล ในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างฟังก์ชันการทำงานของโพลแบบต่างๆในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมเดลิฟไฟ์ในการประมวลผล โดยสัญญาณคำสั่งเอาท์พุทจะถูกส่งออกมาทางพอร์ทขนานของคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณที่ส่งออกมาจากพอร์ทขนานนี้จะเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนาล็อก(D/A) โดยใช้วงจร D/A แบบ Bipolar แสดงได้จากภาพที่ 5.22



ภาพที่ 5.21 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

โดยรหัสเลขฐานฐานสองขนาด 8 บิต จะถูกป้อนให้กับอินพุตของ DAC โดยเอาท์พุทที่ได้จากไอซีเบอร์ MC1408 จะเป็นกระแสไฟฟ้าออกมาทางขา 4 ดังนั้นเราจึงต้องใช้ คุณสมบัติของมาเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ได้ให้อยู่ในรูปสัญญาณแรงดันจากแรงดันลบจนถึงแรงดันบวกได้

5.12 การประยุกต์ใช้ Delphi

ในบทความนี้เป็นการแนะนำวิธีการใช้งานซอฟต์แวร์พัฒนาแอปพลิเคชันแบบวิซวลที่มีชื่อว่า เดลไฟล์ (Delphi) โดยเป้าหมายหลักจะมุ่งไปที่การประยุกต์ใช้เดลไฟล์กับการเขียนโปรแกรมทางวิศวกรรม เดลไฟล์จัดได้ว่าเป็นหนึ่งในเครื่องมือสำหรับการสร้างแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์หรือเรียกอีกอย่างว่า เครื่องมือพัฒนาแอปพลิเคชันแบบวิซวลโปรแกรมมิ่ง (Visual Programming) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของภาษาคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างไปจากภาษาคอมพิวเตอร์แบบเดิม ๆ อย่าง ภาษาเบสิก (Basic), ภาษาซี (C), หรือภาษาปาสคาล (Pascal)

ปัจจุบันการพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยวิซวลโปรแกรมมิ่งได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากข้อดีตรงที่โปรแกรมเมอร์สามารถเห็นผลลัพธ์การทำงานไปพร้อม ๆ กับการลงมือสร้าง อีกทั้งยังมีจุดเด่นในแง่ของการลดเวลาที่ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันลงได้อย่างมากเนื่องจากโปรแกรมเมอร์จะไม่ต้องไปเสียเวลากับการออกแบบและทำส่วนติดต่อกับผู้ใช้หรือ GUI (Graphic User Interface) หรืองานอื่น ๆ ที่ไม่จำเป็นอีกต่อไป เพราะภาระเหล่านั้นทั้งหมดจะถูกผลักไปให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลไฟล์แทน ด้วยเหตุนี้โปรแกรมเมอร์จึงสามารถจะทุ่มเวลาให้กับส่วนที่เป็นหัวใจสำคัญของแอปพลิเคชันได้อย่างเต็มที่ แน่นอนว่าวิธีนี้ย่อมช่วยให้การพัฒนาแอปพลิเคชันบนคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งยังช่วยให้การทำงานง่ายขึ้นและรวดเร็วมากขึ้นด้วย

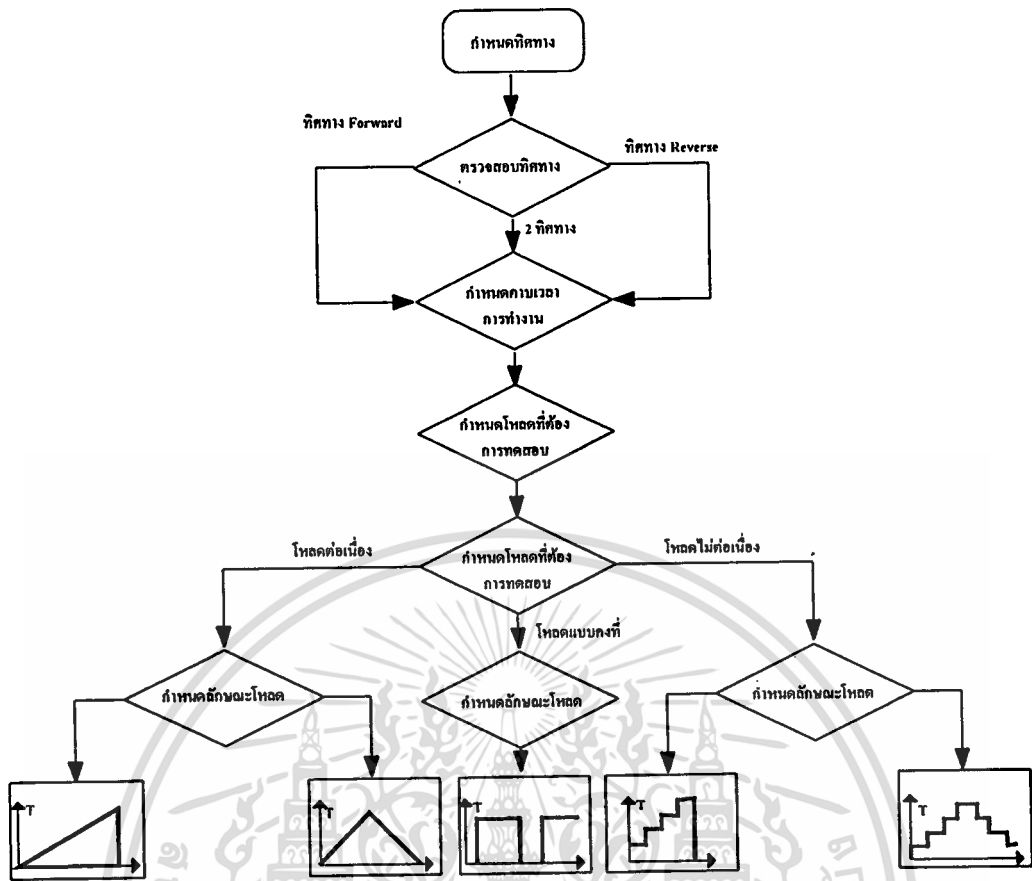
5.12.1 จุดเด่นของเคลไฟล์

นอกจากการใช้งานที่ทำได้ง่ายซึ่งเป็นความโดดเด่นที่ติดตัวมากับซอฟต์แวร์วิชวลโปรแกรมมิ่งก็จริง แต่การที่เคลไฟล์เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์ที่น่าสนใจในการใช้งานนั้นมาจากข้อดีประการอื่น ๆ ที่เหนือกว่าโปรแกรมจำพวกเดียวกันจากบริษัทซอฟต์แวร์ค่ายอื่น ๆ จุดเด่นที่ว่านั้นพอจะยกมากล่าวได้หลายข้อด้วยกันเช่น

- ขนาดไฟล์แอปพลิเคชันที่สร้างโดยใช้เคลไฟล์จะมีขนาดเล็ก, ใช้ทรัพยากรของระบบน้อย และทำงานได้อย่างสมบูรณ์ในตัวโดยไม่ต้องมีไฟล์พิเศษอื่น ๆ เพิ่มเติมนั้นทำให้ความเร็วในการทำงานของแอปพลิเคชันที่พัฒนาโดยเคลไฟล์สามารถเทียบได้กับการพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้ภาษาซีเลยทีเดียว
- โปรแกรมเมอร์สามารถใช้เคลไฟล์ในการสร้างและใช้งานฟังก์ชันไลบรารีที่เรียกว่า DLL ได้ รวมทั้งยังสามารถติดต่อกับ DLL ที่สร้างจากภาษาอื่น ๆ ได้ด้วย
- ความสามารถในการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับทำงานบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นความสามารถที่เคลไฟล์ในเวอร์ชันหลัง ๆ อย่างเคลไฟล์ 5.0 เน้นหนักมากขึ้นเพิ่มเติมจากความสามารถในการพัฒนาแอปพลิเคชันที่เกี่ยวกับฐานข้อมูลและแอปพลิเคชันสำหรับการใช้งานทั่วไป
- สามารถเขียนแอสเซมบลี (Assembly) เพื่อติดต่อกับฮาร์ดแวร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ได้โดยไม่ต้องไปอาศัยพึ่งโปรแกรมอื่น ๆ ช่วย
- เคลไฟล์เปิดโอกาสให้โปรแกรมเมอร์สามารถสร้างคอมโพเนนต์ต่าง ๆ ไว้ใช้งานเองได้อย่างอิสระ
- ถ้าหากเทียบการใช้งานระหว่างเคลไฟล์กับซอฟต์แวร์วิชวลโปรแกรมมิ่งแบบอื่น ๆ เช่น วิซวลเบสิก (Visual Basic) กล่าวได้เลยไม่ว่าวิซวลเบสิกสามารถจะทำอะไรได้บ้าง เคลไฟล์ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้เคลไฟล์ยังสามารถจะนำคอมโพเนนต์หรือไฟล์สกุล OCX ที่มีในวิซวลเบสิกมาใช้งานได้ด้วย

5.12.2 โฟลว์ชาร์ทขั้นตอนการเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงบิดอ้างอิง

ในการสร้างแพทเทอร์นแรงบิดแบบต่างๆ ได้กำหนดให้มีการป้องกันการทำงานจากคอมพิวเตอร์โดยมีการเขียนโปรแกรมเคลไฟล์ซึ่งจะมีการแสดงการป้อนคำสั่งบนหน้าจอซึ่งจะมีโฟลว์ชาร์ทดังนี้



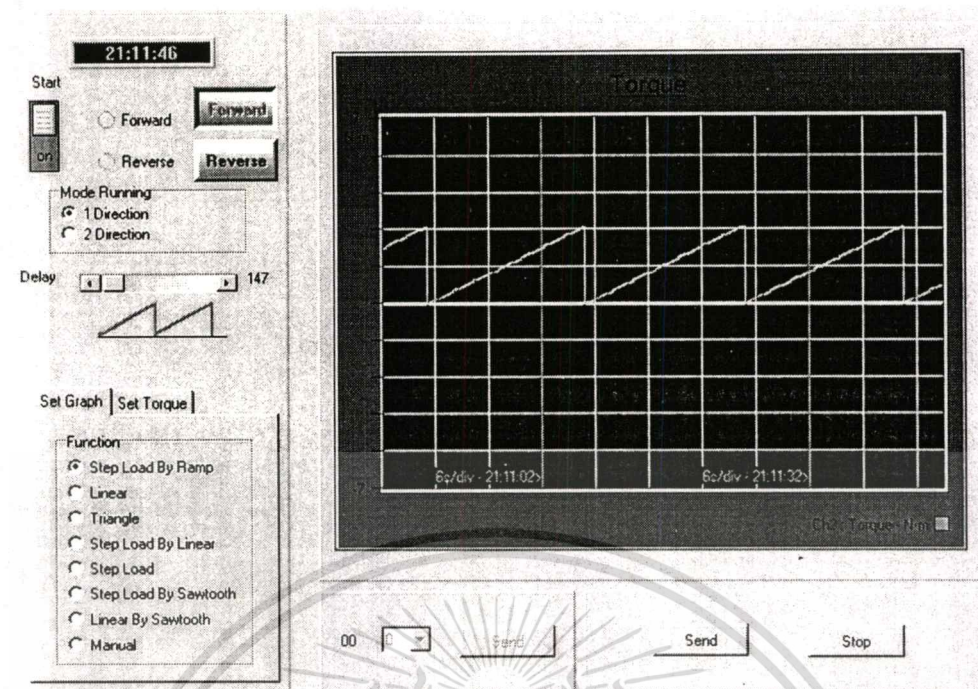
(ฟังก์ชัน โหลดต่างๆ ที่ได้สร้างขึ้นจากคอมพิวเตอร์ โดยสามารถเลือกใช้ทดสอบ)

ภาพที่ 5.22 บล็อกโฟลว์ชาร์ทโคแอมแกรมระดับขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

จากลำดับขั้นตอนการเขียน โปรแกรมได้แสดงในภาพที่ 5.22 โดยการเขียน โปรแกรมจะ กำหนดให้มีการสร้างแพทเทิร์นโหลดได้หลายแบบและสามารถรับค่าข้อมูลต่างๆ โดยผ่านหน้าจอ คอมพิวเตอร์จะสามารถแสดงได้ ในภาพที่ 5.23 ซึ่งสะดวกและง่ายต่อการใช้งานพร้อมทั้งสามารถ กำหนดค่าต่างๆ ได้ดังนี้

- กำหนดค่าแรงบิดที่ใช้ทดสอบ ตั้งแต่ 0.5 นิวตัน-เมตร จนถึง 8 นิวตัน-เมตร โดย สามารถเลือกค่าแรงบิดได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ซึ่งง่ายต่อการใช้งาน
- กำหนดคาบเวลาการสร้างโหลดทางกล ในสภาวะต้องการ โหลดแบบคงที่หรือโหลด ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้า
- กำหนดทิศทางการสร้างโหลดได้สองทิศทาง คือ ทิศทาง Forward หรือ ทิศทาง Reverse และ สามารถกำหนดให้มีการทดสอบทั้งสองทิศทางในคาบเวลาเดียวกันได้
- กำหนดรูปแบบแพทเทิร์นของโหลดต่างๆ ได้ โดยสามารถเลือกค่ารูปแบบของ โหลดในการทดสอบได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.23 รูปแบบของหน้าจอที่ใช้ในการสร้างแพทเทอร์นโหลดที่สามารถป้อนค่าได้

5.13 สรุป

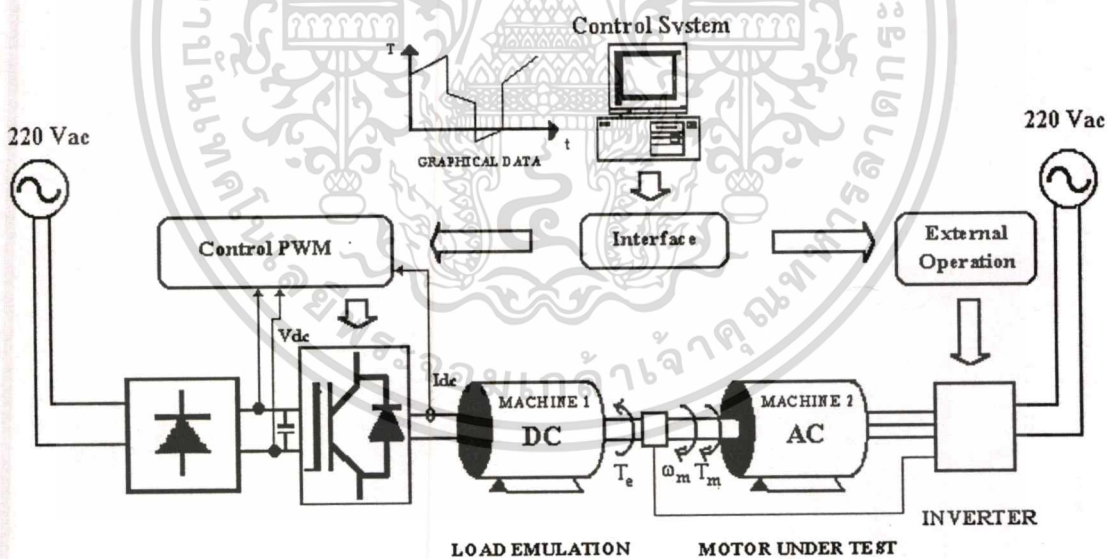
จากการออกแบบระบบวงจรกำลังและระบบควบคุมของชุดการจำลองโหลด ซึ่งจะใช้หลักการออกแบบที่สอดคล้องกับทฤษฎีแบบต่างๆ ในด้านวงจรกำลังมีการใช้วงจรฟูลบริดจ์เข้ามาควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขดลวดกระตุ้นแยก เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างๆ ของด้านการขับเคลื่อนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทางด้านวงจรควบคุมในงานวิจัยได้มีการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างโหลด โดยคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพบว่าแรงบิดเป็นปฏิภาคกับกระแสอาเมเจอร์ ทำให้การควบคุมได้มีการป้อนกลับของกระแสอาเมเจอร์ ส่วนในด้านการควบคุมแรงดันอาเมเจอร์ไม่ได้มีการป้อนกลับ เนื่องจากแรงดันอาเมเจอร์จะมีผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะที่แรงดันขดลวดฟีดคังที่ และในการออกแบบสำหรับการควบคุมความถี่ในการสวิตช์ซึ่งจะต้องคำนึงถึงการเกิดริบเบิลของกระแส โดยจะต้องมีการเลือกความถี่สวิตช์ในการใช้งานที่สูง เพื่อจะลดการแกว่งของกระแสและแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งคุณสมบัติลักษณะนี้จึงได้มีการเลือกใช้การควบคุมสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ ส่วนการสร้างสัญญาณจะใช้แบบวงจรแอนะล็อกพร้อมวงจรการตรวจจับกระแสและวงจรควบคุมแบบพีโอ ซึ่งในการสร้างสัญญาณได้มีการทดสอบการทำงานที่ถูกต้องโดยพิจารณาจากผลการทดลองได้จากภาพแต่ละหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนการควบคุมแรงบิดที่ได้จากคอมพิวเตอร์เพื่อจะสะดวกต่อการใช้งานที่ง่ายและสามารถควบคุมการทำงานของระบบทดสอบได้ทั้งสองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อทดสอบสมรรถนะ ของฟีดแบ็คอินเวอร์เตอร์

6.1 บทนำ

ชุดการจำลองโหลดทางกลที่ได้สร้างขึ้นสามารถทดสอบสร้างโหลดได้สูงสุด 8 นิวตัน-เมตร โดยการทดสอบได้นำชุดการจำลองโหลดที่ได้ออกแบบขึ้น โดยการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ กระแสตรงให้ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างโหลด โดยสามารถสร้างแพทเทิร์นของโหลดที่มีการควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ โดยเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงจะถูกยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนการทำงานของมอเตอร์ โดยมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบจะต้องมีแรงบิดไม่เกินพิกัดของแรงบิดที่มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการสร้างโหลดหรือเท่ากันดังนั้นในงานวิจัยได้ใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า มาใช้ในการทดสอบ โดยมีพิกัดแรงบิดสูงสุด 5 นิวตัน-เมตร



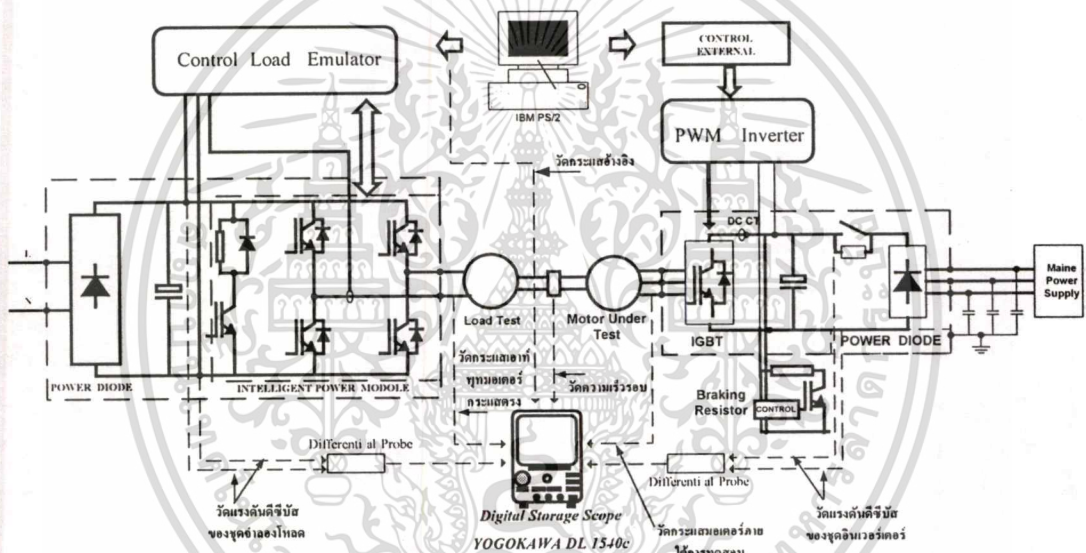
ภาพที่ 6.1 ระบบรวมของชุดจำลองโหลดทางกล

โดยลักษณะการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบจะใช้ฟีดแบ็คอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน โดยพิกัดของอินเวอร์เตอร์จะต้องเท่ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำมาทดสอบหรือสูงกว่า เนื่องจากในสถานะการทดสอบจะต้องมีพิกัดกระแสไหลสูง ซึ่งอาจจะทำให้อินเวอร์เตอร์เสียหายได้

ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ขณะทำการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการควบคุมทิศทางการหมุนของอินเวอร์เตอร์และการหยุดการทำงานของระบบทดสอบ ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานผ่านพอร์ตภายนอกของเมนบอร์ดอินเวอร์เตอร์ โดยการควบคุมการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โดยพอร์ทขนาน ให้สามารถควบคุมการทำงานทั้งสองระบบที่ทดสอบให้มีความสัมพันธ์กันในสภาวะต้องการเปลี่ยนโหมดการทำงานของเมชชีนทั้งสองระบบ โดยปกติแล้วในการจำลองโหลดจะเป็นการสร้างแรงบิดด้าน ดังนั้นจึงทำให้ชุดทดสอบจะมีสภาวะการทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิดและความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าความเร็วรอบขึงโครนส์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจะพบว่าจะเกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานทางกลเป็นรูปพลังงานไฟฟ้ากลับคืนสู่ระบบทดสอบ จำเป็นที่จะต้องมีการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้สลายไปในรูปของความร้อนโดยใช้ความต้านทาน ขณะทำการทดลองจำลองโหลดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถพิจารณาได้จากการตรวจสอบสัญญาณการทำงานของระบบทั้งสองได้ดังภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 ระบบการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

6.2 ผลการทดสอบสภาวะแรงบิดที่มีความสัมพันธ์กับกระแสอาเมเจอร์

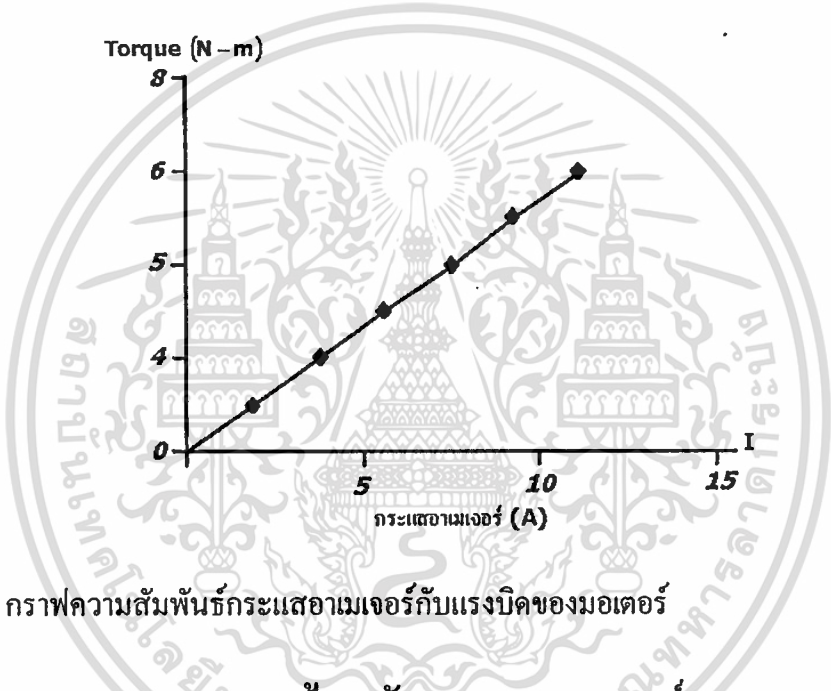
ในการทดลองได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ออกแบบไว้ โดยอันดับแรกจะเป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการสร้างแรงบิดที่เกิดขึ้นที่มีความสัมพันธ์กับกระแสอาเมเจอร์ขณะที่แรงดันที่จ่ายขดลวดกระตุ้นมีค่าคงที่ โดยการทดสอบจะนำเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงไปต่อยึดกับเพลลาของเทคโคเจนมิเตอร์หรือโหลดทางไฟฟ้า โดยการทดสอบจะมีการเพิ่มโหลดความต้านทานให้แก่ขั้วอาเมเจอร์ของเทคโคเจนมิเตอร์จะถึงค่าแรงบิดที่ต้องการเมื่อทำการทดสอบให้แรงบิดมีค่าสูงขึ้น จะพบว่าความเร็วรอบก่อนที่ของมอเตอร์กระแสตรงลดลงแต่กระแสอาเมเจอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยแปรผันตามแรงบิดที่เกิดขึ้น โดยผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงดังตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอมเพอร์และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

T (N-m)	N (rpm)	I_a (A)	V_t (V)	E_a (V)	P (W)	ω (rad/sec)
1.0	1845	1.86	130	126.3	235	193.11
2.0	1820	3.8	130	124.5	473.1	190.4
3.0	1793	5.6	130	121.9	683.1	186.7
4.0	1780	7.5	130	119.2	894.6	186.3
5.0	1760	9.3	130	116.6	1085.4	185.26
6.0	1750	11.15	130	114	1271.84	183.16

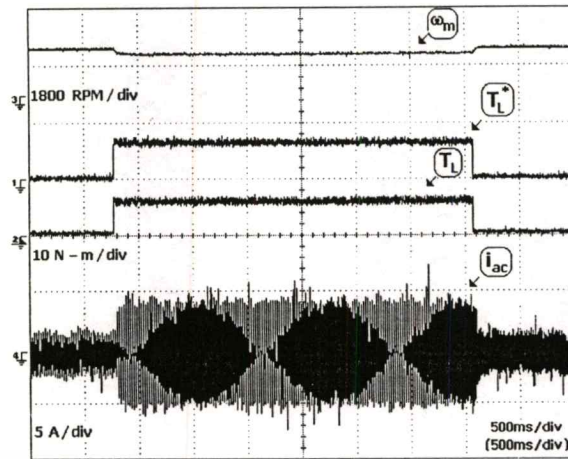


ภาพที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์กระแสแอมเพอร์กับแรงบิดของมอเตอร์

6.3 การทดสอบตรวจสอบผลการป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์

การทดสอบการป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์ ในการทดสอบจะพิจารณาถึงผลตอบสนองของแรงบิดที่ทำการทดสอบจริง (T_L^*) กับแรงบิดอ้างอิง (T_L) เนื่องจากค่าแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสแอมเพอร์ของมอเตอร์ ขณะที่กำหนดให้กระแสฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าคงที่จากสมการ(2.5)ในลักษณะการทดสอบเพื่อดูการป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์ที่มีความสัมพันธ์ต่อแรงบิดและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบขณะทำการทดสอบ โดยสามารถพิจารณาได้จากกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์หนึ่งวินาทีภายใต้การทดสอบขณะขับเคลื่อนด้วยฟีดแบลลวเอมอินเวอร์เตอร์โดยการทดสอบจะเป็นการสร้างโหลดแบบขั้นตามแรงบิดฟีดแบลคของมอเตอร์หนึ่งวินาที ผลการทดสอบดังภาพที่ 6.4 แสดงให้เห็นว่าแรงบิดที่ได้จากการวัดจริงจะมีการติดตามแรงบิดอ้างอิงตลอดช่วงการทดสอบและกระแสที่ได้จากมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ (i_{ac}) จะเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีการทดสอบโหลดแบบขั้นพร้อมความเร็วของมอเตอร์ (ω_m) ก็จะตกลงในช่วงที่มีการทดสอบด้วย

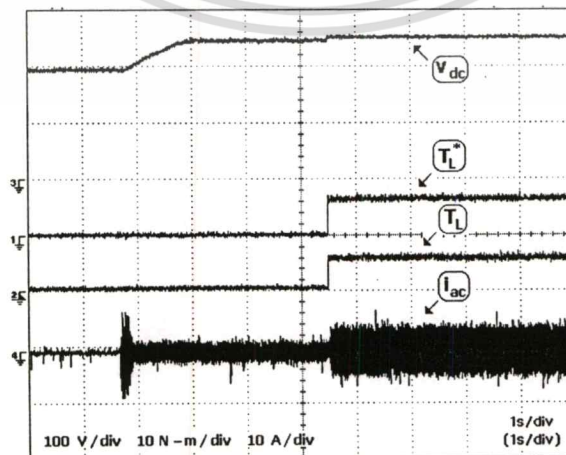
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6.4 รูปคลื่นการตรวจสอบการป้อนกลับของแรงบิดอเมเจอร์

6.3.1 การทดสอบการคืนพลังงานของชุดการจำลองโหลด

จากระบบการทดสอบจะต้องพิจารณาถึงแรงดันที่คิซิปัสของชุดการจำลองโหลด เนื่องจากการทดสอบชุดจำลองโหลดจะทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิดเป็นผลทำให้พลังงานทั้งหมดจะต้องถูกถ่ายเทไปอยู่ที่คิซิปัสเป็นผลทำให้แรงดันสูงเกิน ซึ่งปกติแรงดันคิซิปัสจะมีค่า 185 โวลต์ ขณะที่ทำการทดสอบมอเตอร์กระแสตรงที่ความเร็วรอบพิกัดโดยมีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยพีดีบวลวเอ็มแบบยูนิโพลาร์ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์กระแสตรงอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด จะพบว่าแรงดันคิซิปัสมีค่าเพิ่มขึ้น ในการออกแบบได้กำหนดไว้ที่ 130 % ของแรงดันปกติ โดยจะคงที่แรงดันคิซิปัสประมาณ 250 โวลต์ ผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.5 ซึ่งผลการทดลองจะพิจารณาอยู่ใน 2 ช่วงคือช่วงขณะที่มอเตอร์ภายใต้การทดสอบทำงานขณะที่ไม่มีการทดสอบโหลดซึ่งพบว่าแรงดัน คิซิปัส (V_{dc}) 185 โวลต์ส่วนช่วงสองจะเป็นช่วงที่ทำการป้อน โหลดซึ่งจะทำให้ค่าคิซิปัสมีการเปลี่ยนแปลงและผลของกระแสจ่ายเข้ามอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะเพิ่มขึ้นขณะที่มีโหลดเพิ่มขึ้น

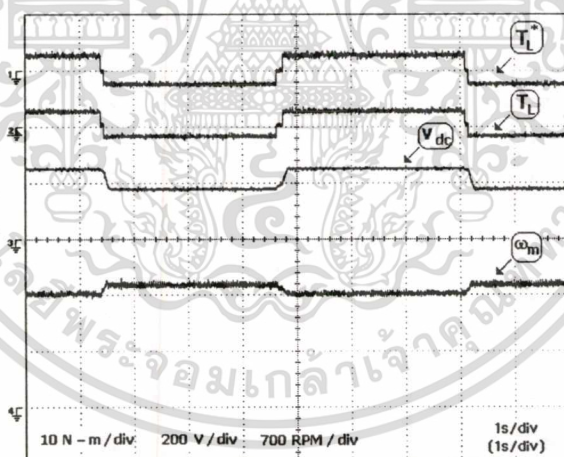


ภาพที่ 6.5 รูปคลื่นผลตรวจสอบการคืนพลังงานของระบบสู่แรงดันคิซิปัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 การทดสอบการทำงานของชุดจำลองโหลดทั้ง 4 ควอเตอร์

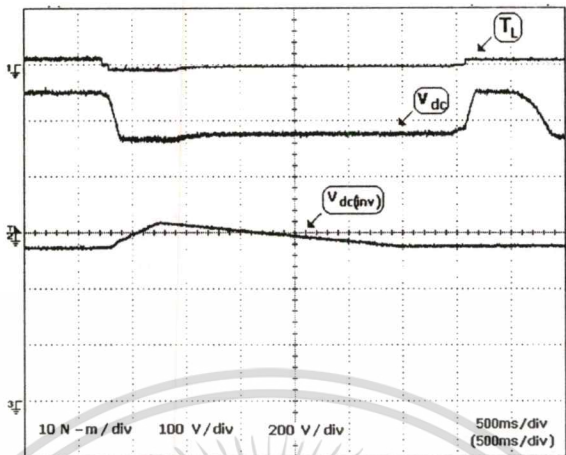
ในการทดสอบการทำงานของชุดการจำลองโหลดขณะที่มีการทำงานทั้ง 4 ควอเตอร์ที่จะพบว่าการทำงานของชุดการจำลองโหลดจะมีการทำงานทั้งสองโหมด คือ โหมดแรกจะเป็นการทดสอบการสร้างโหลดในโหมดการทำงานแบบเครื่องกำเนิด ซึ่งโหมคนี้อัตราเร็วรอบจะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบ ซึ่งพลังงานที่คืนกลับมาจากพลังงานกลเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันดีซีบัสชุดการจำลองโหลดเพิ่มขึ้น ส่วนการทำงานในโหมดที่สองคือ โหมดการทำงานแบบมอเตอร์ซึ่งโหมคนี้อัตราเร็วรอบจะสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบ ซึ่งจะทำให้พลังงานที่คืนกลับมาเข้าสู่วงจรดีซีบัสของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งความสามารถของอินเวอร์เตอร์จะต้องกำจัดพลังงานให้ออกจากดีซีบัส ดังนั้นสภาวะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดีซีบัสของชุดการจำลองโหลดที่มีการทำงานทั้งสองโหมด สามารถแสดงได้จากภาพที่ 6.6 โดยสัญญาณแรงบิดอ้างอิง และสัญญาณแรงบิดที่ได้จากการวัดจริง โดยจะพบว่าเมื่อทำการทดสอบโหลดแรงดันดีซีบัสที่ชุดการจำลองโหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 185 โวลต์ เป็น 250 โวลต์ ทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงจาก 1500 รอบต่อนาที จนถึง 1455 รอบต่อนาที แต่ขณะที่ชุดทดสอบจำลองโหลดทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์จะพบแรงดันดีซีบัสจะตกลงปกติแต่ความเร็วรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 6.6 รูปคลื่นแรงดันดีซีบัสขณะชุดการจำลองโหลดทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์และ โหมดเครื่องกำเนิด

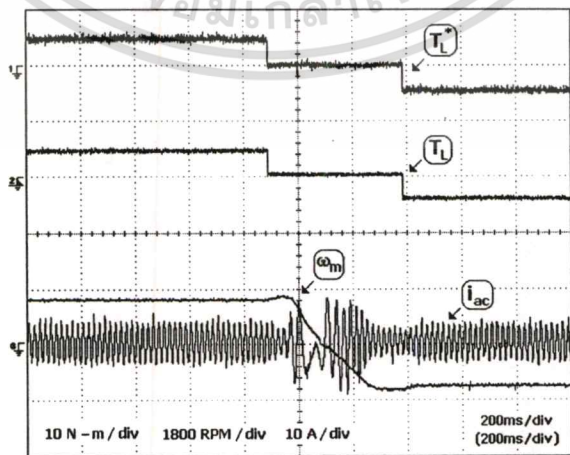
จากภาพที่ 6.7 ได้แสดงการตรวจจับสัญญาณแรงดันดีซีบัสทั้ง 2 ระบบ ขณะที่ชุดจำลองโหลดมีการทดสอบให้มีโหมดการทำงานทั้งสองโหมดคือ โหมดมอเตอร์และ โหมดเครื่องกำเนิด โดยจะทำการตรวจจับที่แรงดันดีซีบัสที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ($V_{dc(inv)}$) และตรวจจับที่แรงดันดีซีบัสในชุดการจำลองโหลด โดยจะพิจารณาจากแรงบิดที่เกิดจากการวัดจริง ซึ่งจะพบว่าในโหมดที่มีการทำงานแบบเครื่องกำเนิดจะทำให้แรงดันดีซีบัสมีค่าสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนดในการเบรก ส่วนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานในโหมดมอเตอร์จะพบว่าแรงดันดีซีบั๊ตจะมีค่าลดลง แต่จะส่งผลทำให้แรงดันดีซีบั๊ตด้านชุดอินเวอร์เตอร์มีค่ามากขึ้น ในช่วงนี้ความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าซิงโครนัส



ภาพที่ 6.7 รูปคลื่นการตรวจสอบการเบรคแบบไดนามิกของระบบอินเวอร์เตอร์ขณะที่ชุดการจ่ายโหลดทดสอบในโหมดการทำงานแบบมอเตอร์

จากภาพที่ 6.8 จะเป็นการทดสอบการทำงาน 4 ควอดแรนต์โดยลักษณะการควบคุมจะใช้คอมพิวเตอรืทำการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้เราสามารถควบคุมการทดสอบโหลดให้มีความสัมพันธ์ต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งจะทำให้ชุดการทดสอบโหลดมีการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างทิศทางการหมุนของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบและทิศทางของมอเตอร์ที่ใช้สร้างโหลดโดยลักษณะการทดสอบจะควบคุมการทำงานให้ชุดจ่ายโหลดสร้างแรงบิดทั้งสองทิศทาง ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุนของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบก็ตาม

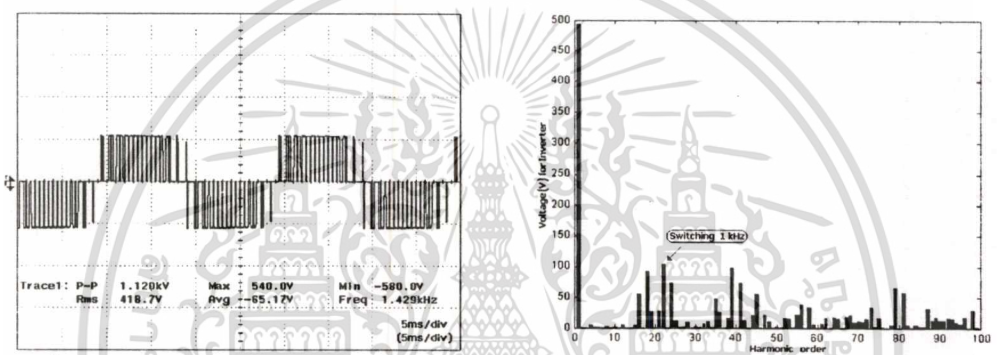


ภาพที่ 6.8 รูปคลื่นการตรวจสอบสภาวะการทำงานของชุดการจ่ายโหลด 4 ควอดแรนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

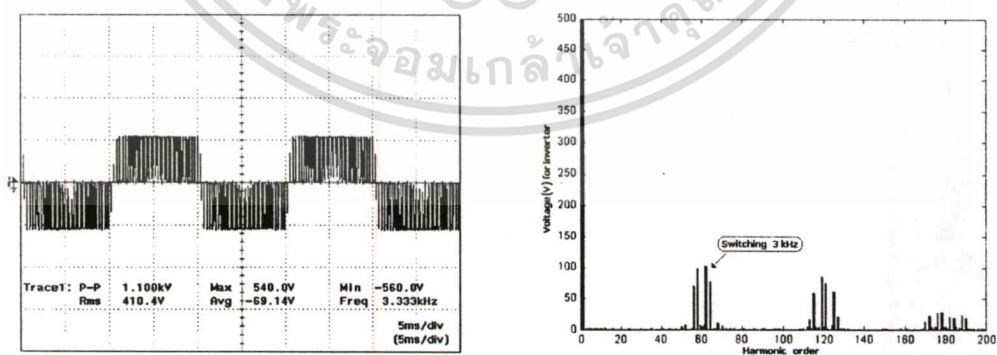
6.4 ทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ต่างๆ โดยพิจารณาจากแรงดันเอาต์พุต

ก่อนการทดสอบโหลดจำเป็นต้องเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมความถี่ในการสวิตช์ ซึ่งจะยืนยันได้ว่าการทดสอบมีการควบคุมความถี่ที่ไม่มีผิดพลาด ดังนั้นในการพิจารณาความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามารถพิจารณาได้จากแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายเข้ามอเตอร์ หรือพิจารณาจากสัญญาณเกทไดรฟ์ของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงาน ในการทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาทางด้านแรงดันเอาต์พุต โดยในการทดสอบจะควบคุมความถี่พินดาคาเมนทอลให้คงที่ 50 Hz โดยเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์จาก 1 kHz ถึง 10 kHz โดยสัญญาณที่ตรวจจับจะเป็นแรงดันไลน์ทูไลน์ที่จ่ายเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ ในการทดสอบในลักษณะนี้จะเป็นการเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์เพื่อดูสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของโหลด



(ก) รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตสำหรับอินเวอร์ 50 Hz (ข) สเปกตรฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน

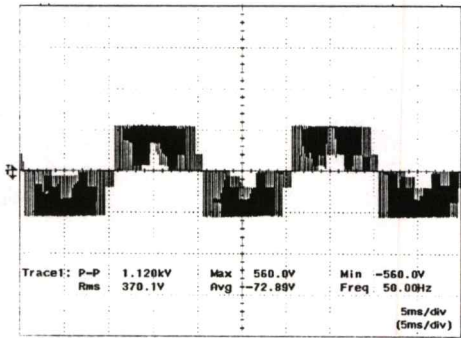
ภาพที่ 6.9 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้การสวิตช์ที่ 1 kHz และควบคุมความถี่พินดาคาเมนทอล 50 Hz



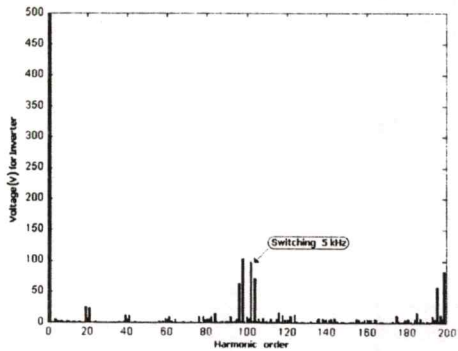
(ก) รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตสำหรับอินเวอร์ 50 Hz (ข) สเปกตรฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน

ภาพที่ 6.10 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ความถี่สวิตช์ที่ 3 kHz และควบคุมความถี่พินดาคาเมนทอล 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

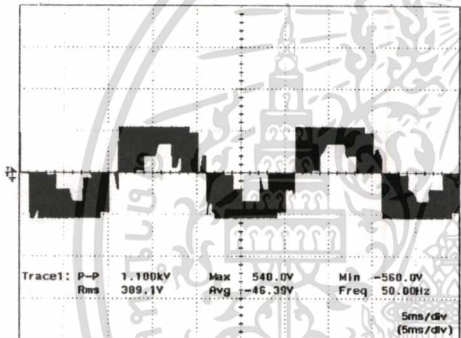


(ก) รูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์สำหรับอินเวอร์ 50 Hz

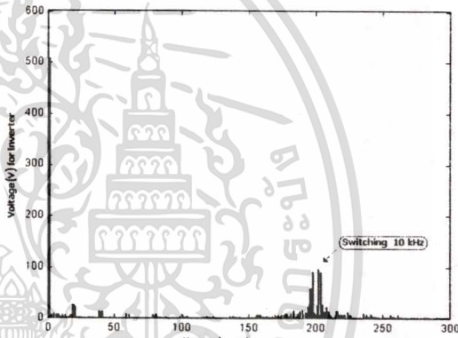


(ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน

ภาพที่ 6.11 รูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์ของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ความถี่สวิตช์ที่ 5 kHz และควบคุมความถี่ฟีดแบ็ก 50 Hz



(ก) รูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์สำหรับอินเวอร์ 50 Hz



(ข) สเปกตรัมฮาร์โมนิกของแรงดัน

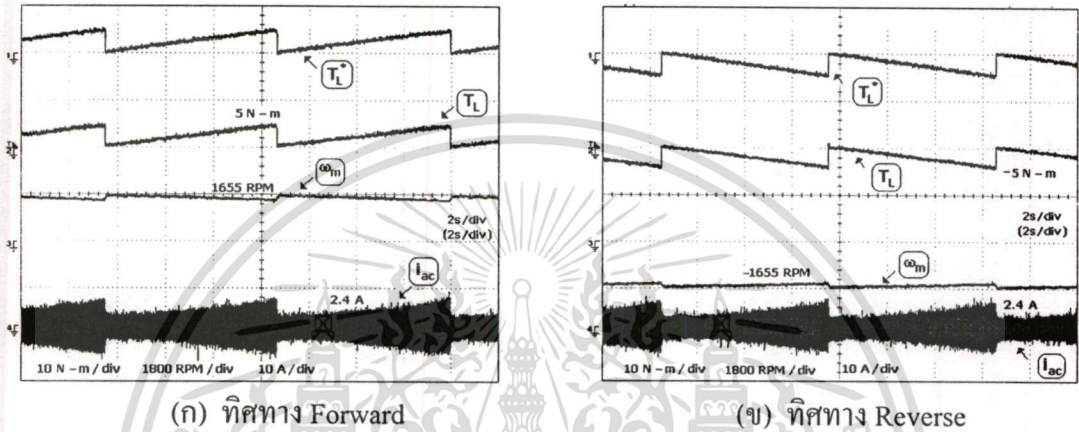
ภาพที่ 6.12 รูปคลื่นแรงดันอินเวอร์เตอร์ของอินเวอร์เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ความถี่สวิตช์ที่ 10 kHz และควบคุมความถี่ฟีดแบ็ก 50 Hz

6.5 การทดสอบโหลดขณะที่ชุดจำลองโหลดทำงานใน 1 ควอดแรนต์

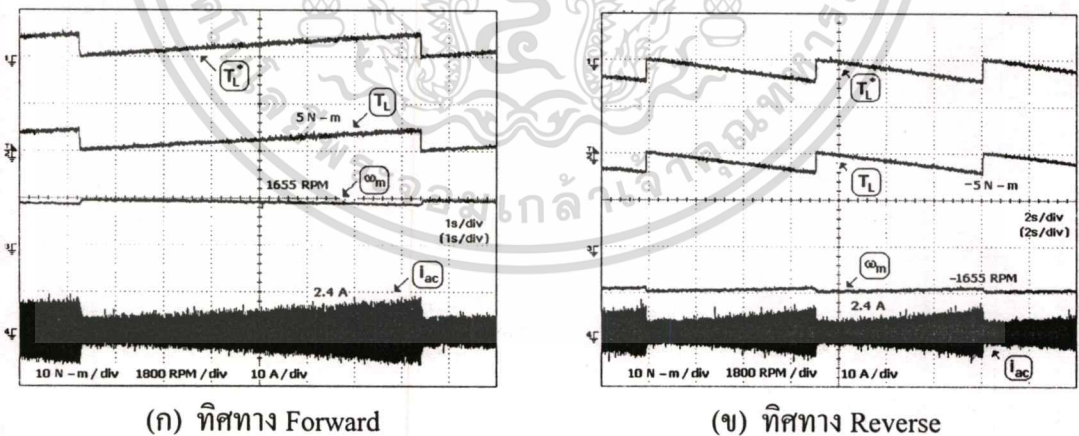
6.5.1 การทดสอบโหลดประเภทเชิงเส้น (เพิ่ม Ramp)

ในการทดสอบลักษณะของโหลดประเภทนี้ จะเป็นการควบคุมการทำงานในทิศทางเดียวโดยโหลดประเภทเชิงเส้นที่ได้ทำการทดสอบ สามารถกำหนดแรงบิดที่ต้องการและคาบเวลาในการทำงาน ซึ่งโหลดประเภทนี้จะพบเจอบ่อยได้แก่ เครื่องม้วน ซึ่งแรงบิดที่ตัวมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดโหลดเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ภายใต้การทดสอบเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ตามแรงบิดที่ทดสอบ ในการทดสอบได้ใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดที่มีการควบคุมการทำงานแบบ V/F ขณะที่มิโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบลดลง จะแสดงได้ดังภาพที่ 6.13 ถึง 6.15 จากภาพจะเป็นการจำลองโหลดทางกลกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ทดสอบโดยมีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน จากการควบคุมได้มีการเปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1kHz 2kHz และ 5kHz ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มโหลด จะทำให้ความเร็วรอบตกลงจาก 1655 รอบต่อนาที จนถึง 1595 รอบต่อนาที โดยจากภาพจะแสดงถึงแรงบิดอ้างอิงและแรงบิดที่วัดได้จริงซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของแรงบิดที่วัดได้จริง จะมีผลตอบสนองได้ไวตามคำสั่งแรงบิดที่ควบคุม และเมื่อทำการทดสอบสามารถพิจารณาได้จากกระแสของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบมีค่าสูงขึ้นแบบเชิงเส้น โดยการทดสอบจะให้ชุดจำลองโหลดสร้างแรงบิดในทิศทาง Forward และในทิศทาง Reverse

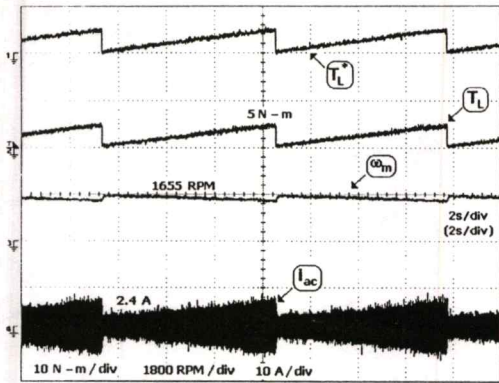


ภาพที่ 6.13 การทดสอบ โหลดแบบเชิงเส้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 1 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

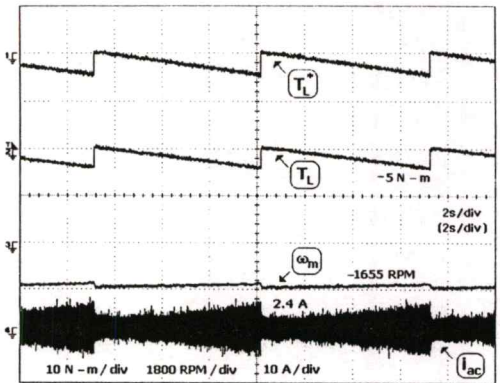


ภาพที่ 6.14 การทดสอบ โหลดแบบเชิงเส้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 3 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ทิศทาง Forward

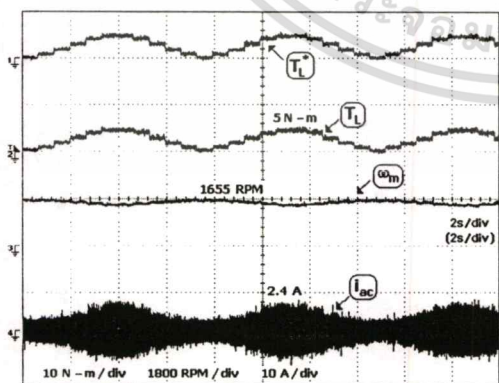


(ข) ทิศทาง Reverse

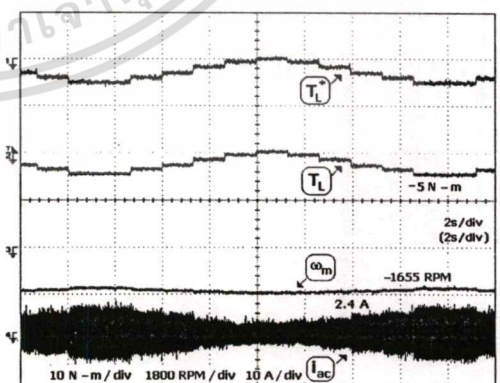
ภาพที่ 6.15 การทดสอบโหลดแบบเชิงเส้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 5 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

6.5.2 การทดสอบโหลดประเภทขั้นบันได (Step ขึ้นลง)

การทดสอบโหลดแบบขั้นบันได เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ว่ามีผลตอบสนองต่อโหลดอย่างไร ซึ่งการทดสอบแบบนี้จะทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจะบอกถึงความแม่นยำในการใช้งานของระบบขับเคลื่อน ดังนั้น โหลดประเภทนี้จะเป็นประเภทเครื่องสั่น โดยแสดงได้จากภาพที่ 6.16 ถึง 6.18 โดยในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนความถี่สวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนตั้งแต่ 1kHz 3kHz และ 5kHz จะพบว่าผลตอบสนองของแรงบิดอ้างอิงและแรงบิดที่วัดได้จริงมีค่าคงตัวตลอดย่านการควบคุม และจะทำให้กระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามแรงบิดทดสอบ จากการทดสอบโหลดเป็นขั้นบันไดครั้งละ 1 นิวตัน-เมตร จนถึง 5 นิวตัน-เมตร เมื่อทดสอบในการเปลี่ยนความถี่ในการสวิทซ์ของอินเวอร์เตอร์จะพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน



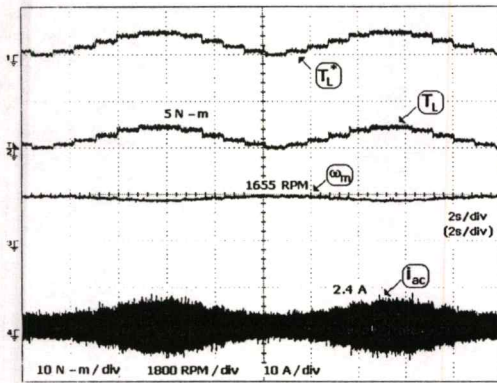
(ก) ทิศทาง Forward



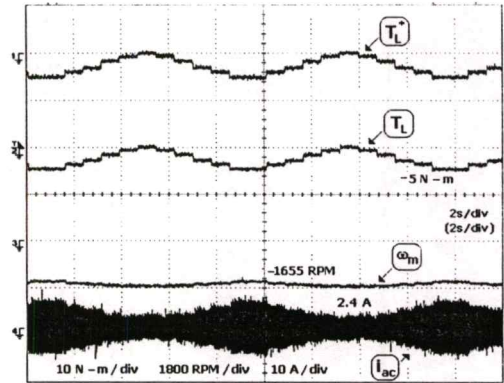
(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.16 การทดสอบโหลดแบบขั้นบันไดที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 1 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

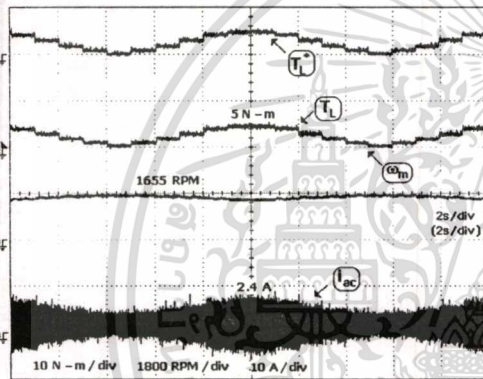


(ก) ทิศทาง Forward

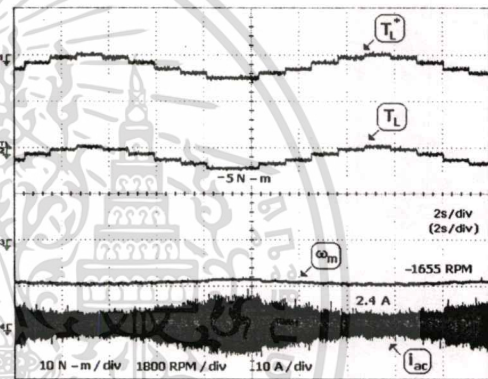


(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.17 การทดสอบโหลดแบบขั้นบันไดที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 3 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่



(ก) ทิศทาง Forward



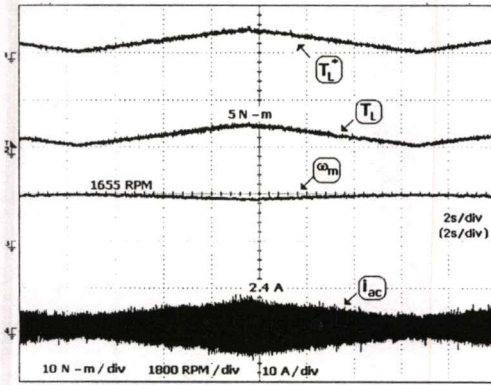
(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.18 การทดสอบโหลดแบบขั้นบันไดที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 5 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

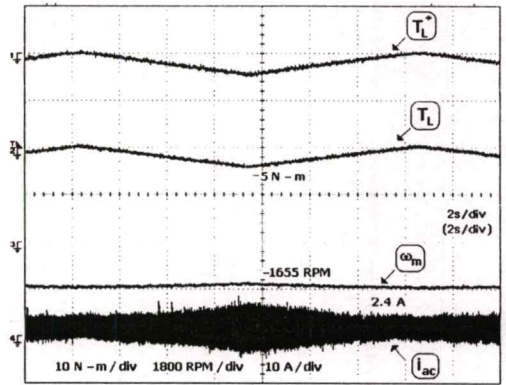
6.5.3 การทดสอบโหลดที่แปรค่าอย่างต่อเนื่อง (ต่อเนื่องขึ้นลง)

การทดสอบโหลดแบบแปรค่าต่อเนื่องจะเป็นการสร้างโหลดที่ให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความเร็วรอบ โดยโหลดประเภทนี้จะพบในประเภทเครื่องกว่น หรือประเภทอุณหภูมิดังนั้นกำลังงานที่เกิดขึ้นจะมีอัตราส่วนต่อความเร็วรอบกำลังสอง จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.19-6.21 จะเป็นการทดสอบโหลดแปรอย่างต่อเนื่อง โดยมีการทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ ขณะที่ใช้ความถี่ในการสวิทซ์ 1 kHz 3 kHz และ 5 kHz จากภาพทั้งหมดจะแสดงถึงการควบคุมแรงบิดอ้างอิง และแรงบิดที่วัดได้จริงเพื่อแสดงถึงผลการตอบสนองสถานะคงตัวตลอดช่วงการควบคุม และจะพบว่าเมื่อมีการควบคุมแรงบิดจะทำให้ความเร็วรอบตกลงจาก 1655 รอบต่อนาที ไปเป็น 1556 รอบต่อนาที ส่วนกระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

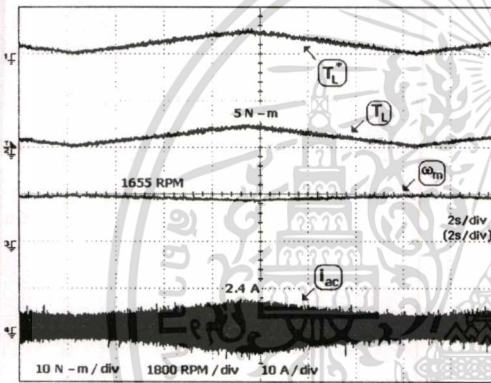


(ก) ทิศทาง Forward

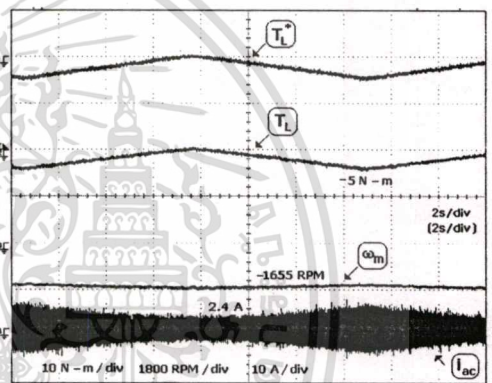


(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.19 การทดสอบโหลดแบบแรมป์ที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 1 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

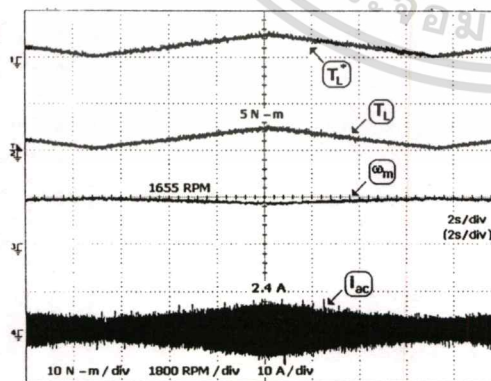


(ก) ทิศทาง Forward

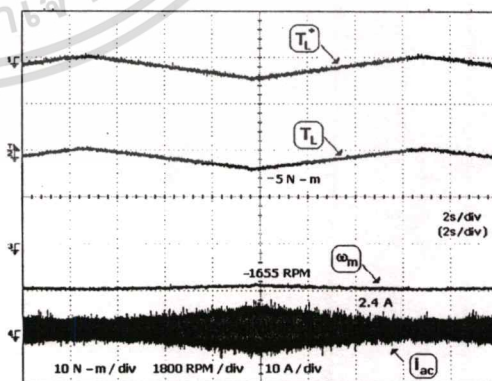


(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.20 การทดสอบโหลดแบบแรมป์ที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 3 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่



(ก) ทิศทาง Forward



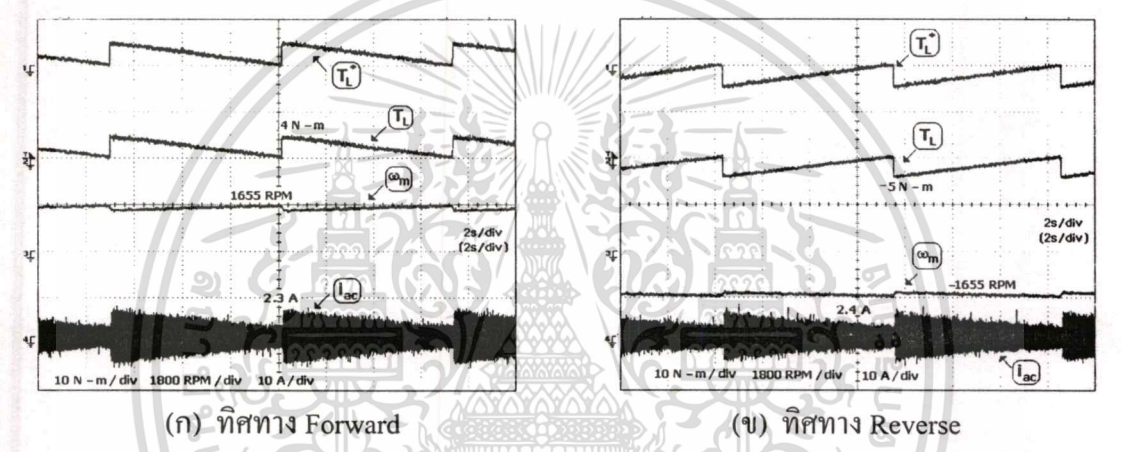
(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.21 การทดสอบโหลดแบบแรมป์ที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 5 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

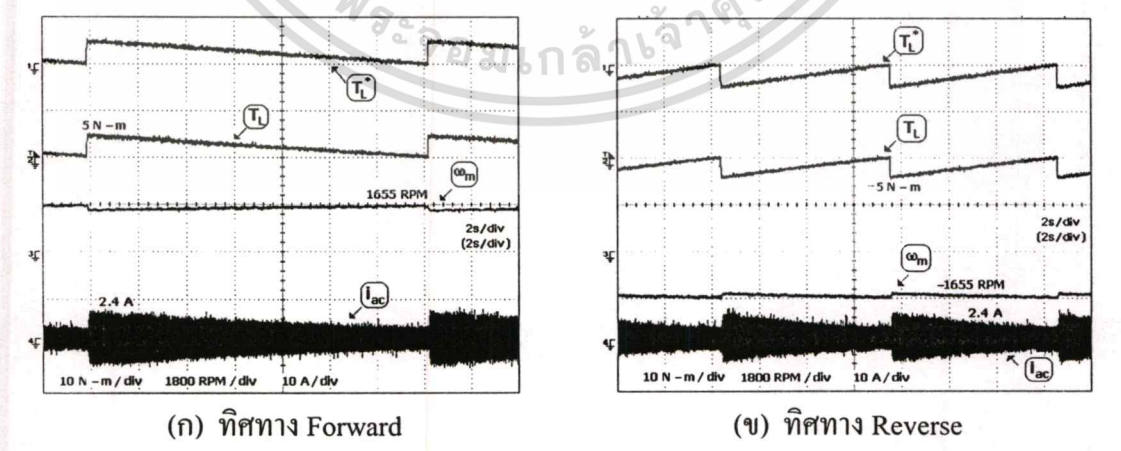
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.4 การจำลองโหลดแบบขั้นโหลดโดยกำหนดช่วงลงเป็นแบบต่อเนื่อง (ลด Ramp)

การทดสอบโหลดประเภทนี้ จะเป็นการขึ้นโหลดโดยช่วงลงจะเป็นเชิงเส้น โดยสามารถควบคุมเวลาช่วงลง โดยการสร้างโหลดประเภทนี้จะทำให้แรงบิดที่สร้างขึ้นแปรผกผันกับความเร็วรอบ (ω_m) ทำให้กำลังงานที่ได้จากการทดสอบแปรตามความเร็วรอบ จากภาพที่ 6.22 ถึง 6.24 ได้แสดงการควบคุมการสร้างแรงบิด โดยในระบบทดสอบได้เปลี่ยนความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์เป็น 1 kHz 3 kHz และ 5 kHz ซึ่งการทดสอบโหลดแบบนี้ จะทำให้กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้นตามโหลดที่ทดสอบ ทำให้ความเร็วรอบตกลงอย่างกะทันหันและช่วงขาลงจะทำให้กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ลดลงพร้อมกับความเร็วรอบมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในลักษณะโหลดประเภทนี้ได้แก่ เครื่องม้วน เครื่องดึงลวด เครื่องป้อนรายผลิต เป็นต้น

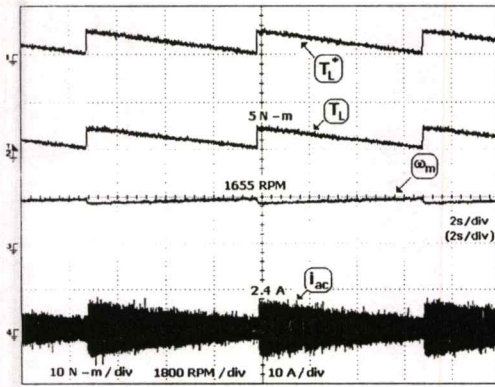


ภาพที่ 6.22 การทดสอบโหลดแบบขั้นช่วงลงแบบแรมป์ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 1 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

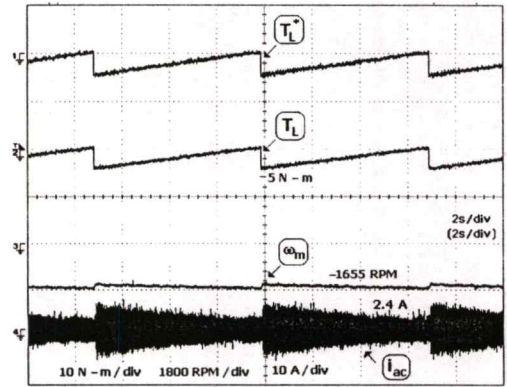


ภาพที่ 6.23 การทดสอบโหลดแบบขั้นช่วงลงแบบแรมป์ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 3 kHz ขณะที่มีความเร็วรอบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ทิศทาง Forward

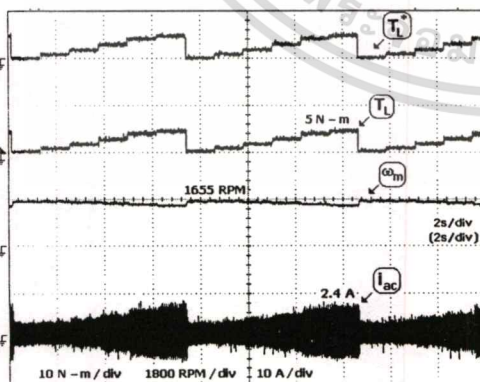


(ข) ทิศทาง Reverse

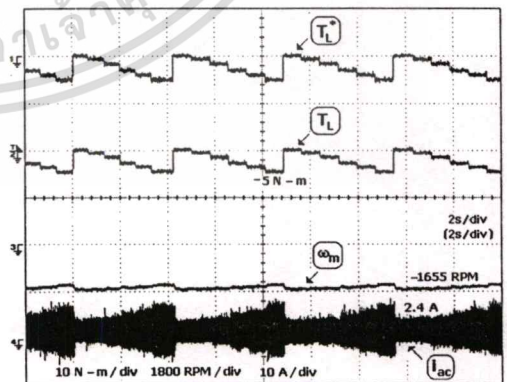
ภาพที่ 6.24 การทดสอบโหลดแบบขั้นช่วงลงแบบแรมปีขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 5 kHz ขณะที่ความเร็วรอบคงที่

6.5.5 การจำลองโหลดแบบให้แรงบิดคงที่โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงบิด (Step ขึ้นต่อเนื่อง)

การทดสอบโหลดแบบให้แรงบิดคงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงบิดตลอดเวลาการทำงานของแรงบิดที่ทดสอบได้สามารถควบคุมคาบเวลาทำงานได้ตามต้องการ โดยให้เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการค่ากำลังงานที่แปรตามความเร็วรอบ โดยโหลดที่ใช้จะเป็นเครื่องต้น หรือโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ ระบบที่มีการขนส่งตลอดเวลา โดยการทดสอบโหลดจะได้ดังภาพที่ 6.25 ถึงภาพที่ 6.27 จากภาพจะเป็นการทดสอบโหลดขณะที่มีการควบคุมความถี่ในการสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ 1 kHz 3 kHz และ 5 kHz และจะแสดงการควบคุมแรงบิดค่าตั้งและแรงบิดที่ได้จากการวัด ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มแรงบิดแต่ละช่วงจะทำให้การกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ภายใต้การทดสอบมีค่าสูงขึ้น และ ปรากฏว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าลดลงจาก 1655 รอบต่อนาที เป็น 1560 รอบต่อนาที



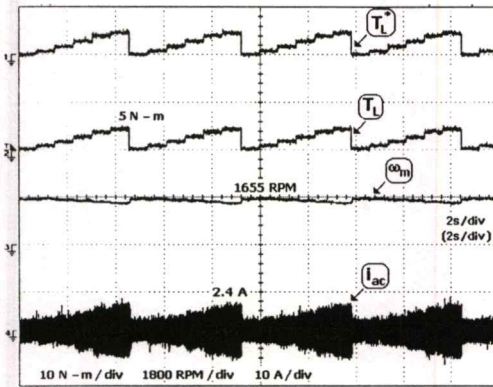
(ก) ทิศทาง Forward



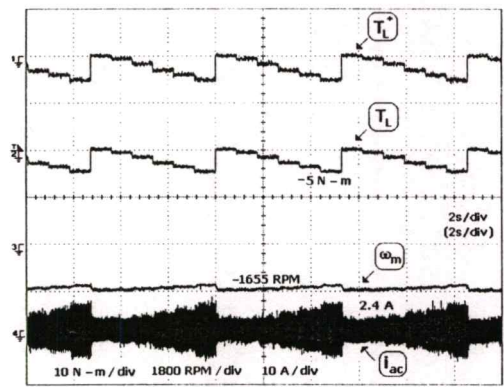
(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.25 การทดสอบโหลดแบบขึ้นแบบต่อเนื่องขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทช์ 1 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

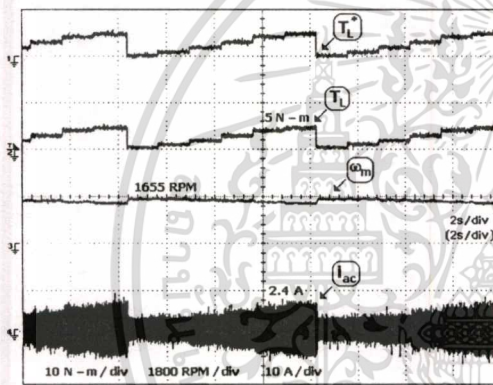


(ก) ทิศทาง Forward

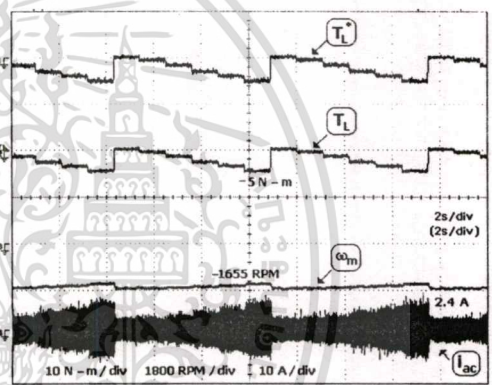


(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.26 การทดสอบโหลดแบบขั้นแบบต่อเนื่อง ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 3 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่



(ก) ทิศทาง Forward



(ข) ทิศทาง Reverse

ภาพที่ 6.27 การทดสอบโหลดแบบขั้นแบบต่อเนื่อง ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 5 kHz ที่ความเร็วรอบคงที่

6.5.6 การจำลองโหลดแบบขั้น(Step)

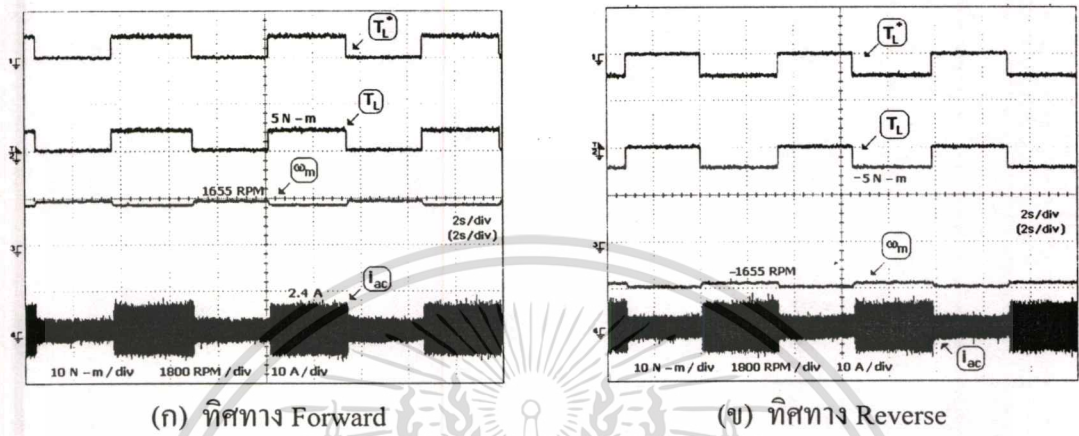
การทดสอบโหลดแบบคงที่ การทดสอบแบบนี้จะเป็นการทดสอบพื้นฐาน เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองว่าระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำมีผลตอบสนองต่อโหลดอย่างไร ไม่ว่าจะเป็นแบบเวกเตอร์คอนโทรลหรือแบบไรต์เวกเตอร์ โดยการทดสอบสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.28 ถึง 6.30 โดยกำหนดให้ชุดทดสอบควบคุมโหลดให้สร้างแรงบิดแบบขั้นและสามารถควบคุมเวลาการทำงานของการทำงานของการทดสอบ จากผลการทดลองได้เปลี่ยนความถี่ในการสวิตช์ของการควบคุมอินเวอร์เตอร์เป็น 1 kHz 3 kHz และ 5 kHz ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการทดสอบโหลด กระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะสูงขึ้น และจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ตกลง จาก 1655 รอบต่อนาที ลดลง

1565 รอบต่อนาที ในการควบคุมโหลดแบบขั้นจะทำให้กำลังงานแปรตามความเร็วรอบต่อนาที ดัง

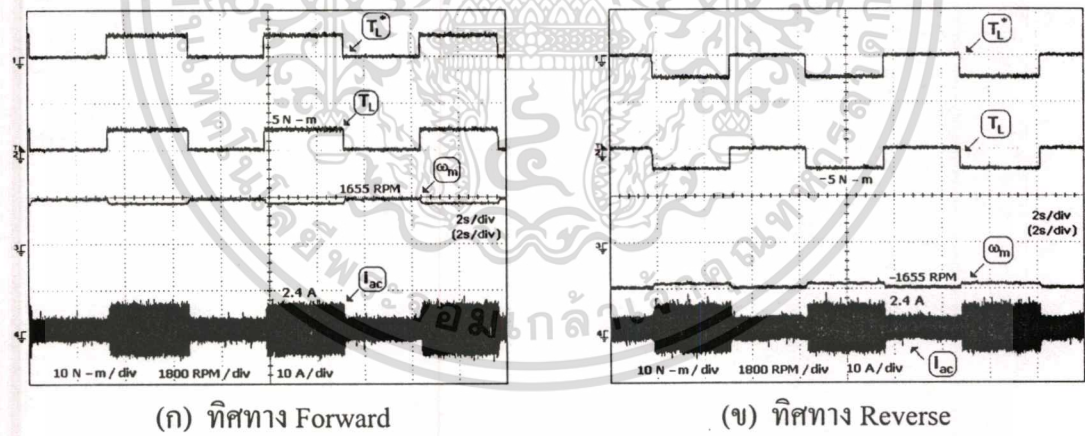
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

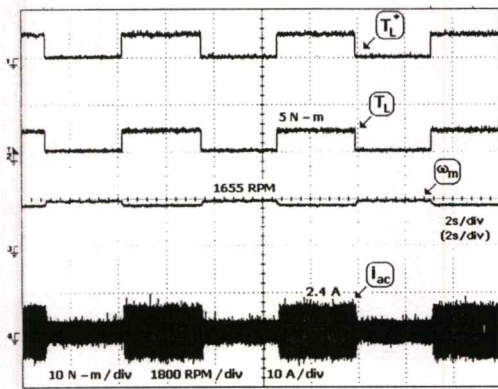
นั้นโหลดที่เกิดขึ้นในลักษณะแบบนี้จะเป็น ระบบที่ใช้ในการขนของ หรือเป็นระบบลูกสูบ ในการทดสอบการเปลี่ยนความถี่ต่างๆจะไม่มีผลต่อกระทบต่อการทดสอบโหลด แต่จะมีผลเมื่อต้องเพิ่มความถี่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียที่สวิทช์ได้ แต่ถ้าความถี่ต่ำเกินไปก็จะทำให้เกิดมีเสียงดังที่ตัวมอเตอร์ได้



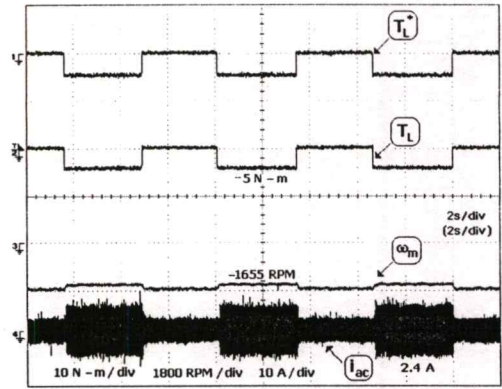
ภาพที่ 6.28 การทดสอบ โหลดแบบขั้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 1 kHz ขณะที่มีความเร็วรอบคงที่



ภาพที่ 6.29 การทดสอบ โหลดแบบขั้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิทซ์ 3 kHz ขณะที่มีความเร็วรอบคงที่



(ก) ทิศทาง Forward



(ข) ทิศทาง Reverse

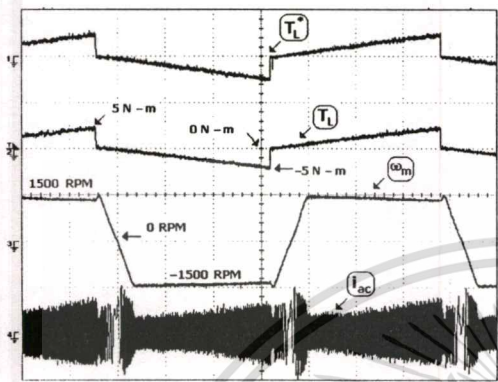
ภาพที่ 6.30 การทดสอบโหลดแบบขั้นที่ขณะที่มีการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ 5 kHz ขณะที่มีความเร็วรอบคงที่

6.6 การจำลองโหลดแบบควบคุมทั้ง 4 ควอดแรนต์

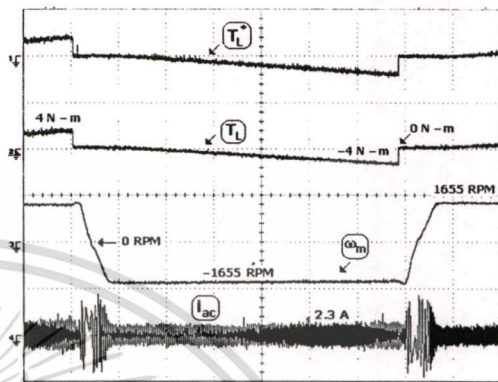
6.6.1 การทดสอบโหลดในโหมดการทำงานแบบเครื่องกำเนิด

โดยกำหนดให้ชุดการจำลองโหลดทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์ ซึ่งจะอาศัยการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีความสัมพันธ์กับการควบคุมฟังก์ชันโหลดแบบต่างๆ โดยสามารถควบคุมจากคอมพิวเตอร์ตัวเดียวกัน ในกรณีที่มีการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะเป็นการควบคุมผ่านจุดต่อภายนอกของเมนบอร์ด โดยจะเป็นการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ซึ่งจะทำให้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์มีการควบคุมการทำงานได้ทั้ง 2 ทิศทาง ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการสร้างโหลดทั้ง 2 ทิศทาง ขณะที่ชุดควบคุมการจำลองโหลด สามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบผ่านอินเวอร์เตอร์ได้ เพื่อในการทดสอบจริงจะไม่ต้องคำนึงถึงทิศทางของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ เพราะชุดสร้างโหลดสามารถสร้างแรงบิดได้ทั้งสองทิศทางเพื่อให้การทำงานทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์ สามารถแสดงการทดสอบดังภาพที่ 6.31 ถึง 6.35 จะเป็นการสร้างโหลดแบบชนิดต่างๆ โดยสภาวะการทำงานทั้งสองระบบเมื่อทำการทดสอบจะอธิบายได้ว่า เมื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้การทดสอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ที่ 1 kHz และ 5 kHz ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที โดยสภาวะการทำงานของมอเตอร์จะอยู่ในโหมดมอเตอร์รีจ (Motoring Mode) เมื่อทำการสร้างโหลดทดสอบในทิศทางตรงกันข้ามโดยมีความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส จะพบว่าพลังงานของระบบจะถูกคืนเข้าสู่ระบบของชุดการสร้างโหลดทำให้ชุดการสร้างโหลดทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด (Generator Mode) และเมื่อทำการทดสอบอีกทิศทางโดยควบคุมให้มอเตอร์ภายใต้การทดสอบกลับทางหมุนและกำหนดให้ชุดสร้างโหลดกลับทิศทางการสร้างโหลดเช่นกันซึ่งจะทำให้โหมดการทำงานทั้งสองระบบเหมือนเดิมแต่จะมีทิศทางตรงกันข้าม ในการทดสอบขณะที่มีการสร้างโหลดแบบต่างๆ จากภาพจะแสดงแรงบิดค่าส่งพร้อมทั้งแรงบิดที่ได้จากการทดสอบจริงขณะที่มีการกลับทิศทางการสร้างโหลด และได้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงความเร็วรอบทั้งสองทิศทางที่มีความสัมพันธ์กับแรงบิดที่ทดสอบและได้แสดงกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ภายใต้การทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบโหลดแบบทั้งสองทิศทางจะเกิดขึ้นกับงานประเภทเครื่องเจาะ หรือ เครื่องกวน ทำให้การทดสอบแบบนี้เพื่อตรวจสอบระบบขับเคลื่อนมีผลตอบสนองต่อโหลดอย่างไร

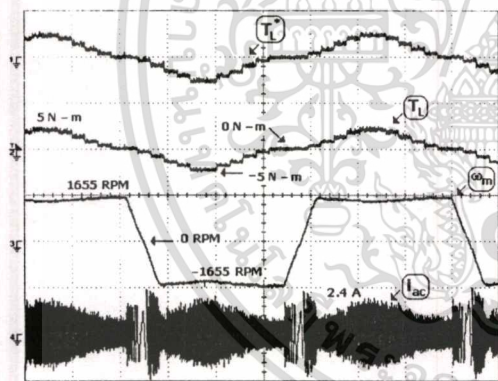


(ก) ความถี่สวิตช์ 1 kHz

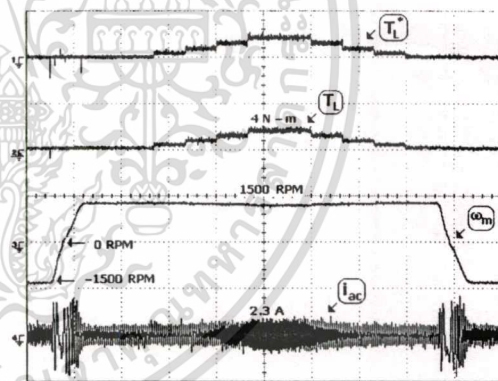


(ข) ความถี่สวิตช์ 5 kHz

ภาพที่ 6.31 การทดสอบ โหลดแบบเชิงเส้นที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง

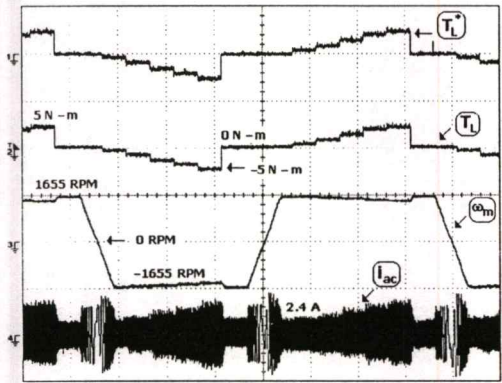


(ก) ความถี่สวิตช์ 1 kHz

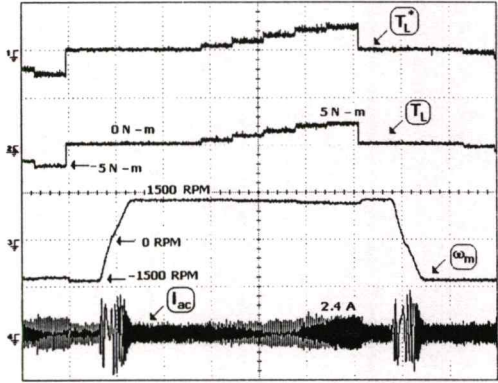


(ข) ความถี่สวิตช์ 5 kHz

ภาพที่ 6.32 การทดสอบ โหลดแบบขั้นบันไดที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง

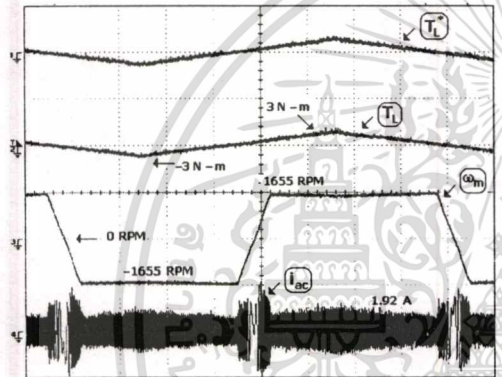


(ก) ความถี่สวิตช์ 3 kHz

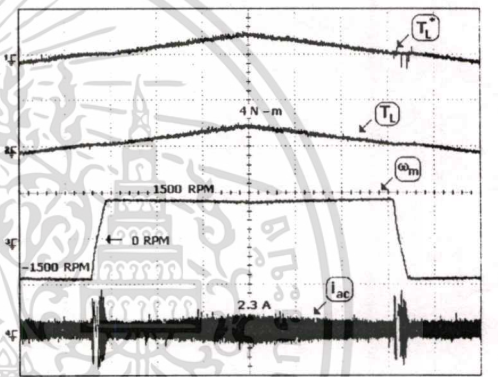


(ข) ความถี่สวิตช์ 5 kHz

ภาพที่ 6.33 การทดสอบโหลดแบบขั้นแบบต่อเนื่องที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง

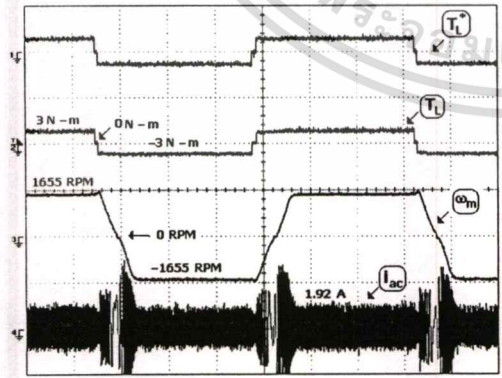


(ก) ความถี่สวิตช์ 3 kHz

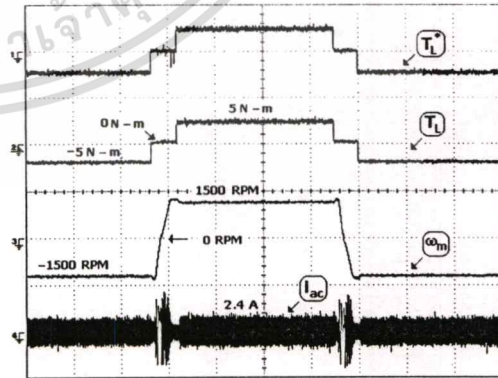


(ข) ความถี่สวิตช์ 5 kHz

ภาพที่ 6.34 การทดสอบโหลดแบบแรมป์ที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง



(ก) ความถี่สวิตช์ 3 kHz



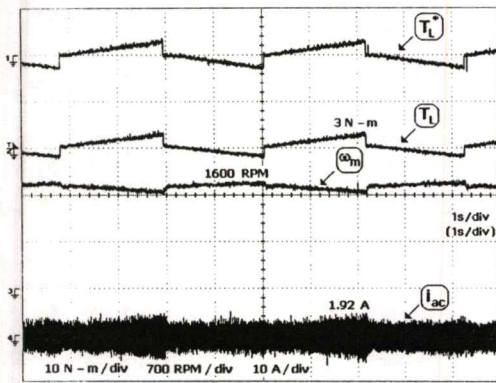
(ข) ความถี่สวิตช์ 5 kHz

ภาพที่ 6.35 การทดสอบโหลดแบบขั้นโหลดที่มีการควบคุมการทำงานทั้ง 2 ทิศทาง

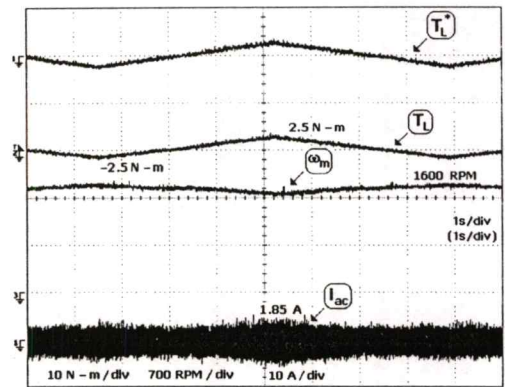
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6.2 การทดสอบชุดจำลองโหลดในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดและโหมดเป็นมอเตอร์

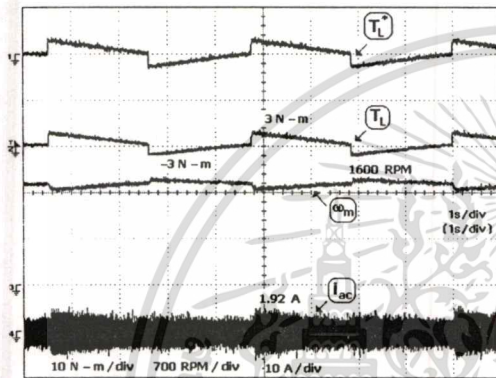
ในการทดสอบโหลดห้วข้อนี้จะเป็นการตรวจสอบสภาวะการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้การทดสอบในสภาวะการทำงานเป็นมอเตอร์และสภาวะการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด เมื่อเกิดการคืนพลังงานเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนทำให้ระบบขับเคลื่อนต้องมีการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนสูญเสียออกภายนอกที่ตัวความต้านทานวัตต์สูงๆที่เรียกว่าการเบรคแบบไดนามิก จากระบบการทดสอบเมื่อทำการควบคุมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้การทดสอบให้มีทิศทางการหมุน Forward และทำการทดสอบสร้างโหลดในทิศทางตรงกันข้ามที่มีความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจากการทดสอบในโหมดการแบบนี้จะพบว่า มอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะทำงานอยู่ในโหมดเป็นมอเตอร์ และชุดสร้างโหลดจะทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด (Generator Mode) ขณะเดียวกันเมื่อทำการทดสอบให้ระบบขับเคลื่อนอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด โดยทำการควบคุมชุดสร้างโหลดให้มีทิศทางการหมุนทางเดียวกับมอเตอร์ภายใต้การทดสอบที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งการทดสอบในโหมดการทำงานแบบนี้จะพบว่า มอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะคืนพลังงานเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนคืออินเวอร์เตอร์ทำให้มอเตอร์ภายใต้การทดสอบมีการทำงานอยู่โหมดเครื่องกำเนิด ซึ่งจะทำให้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ต้องระบายพลังงานของระบบให้อยู่ในรูปความร้อนลงสู่ที่ความต้านทานเบรค ส่วนชุดการจำลองโหลดจะทำงานอยู่ในโหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ การทดสอบทั้งหมดสามารถแสดงได้จากภาพที่ 6.36 โดยจะเป็นการทดสอบที่ความถี่สวิทช์ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ 10 kHz ที่ความถี่ฟันดาเมนทอล 50 Hz จากการทดสอบจะเป็นการสร้างโหลดหลายประเภท จากภาพจะเป็นการแสดงแรงบิดคำสั่ง (T_L^*) พร้อมแรงบิดที่วัดจริง (T_L) ที่สภาวะคงตัวของการสร้างโหลดแบบต่างๆกับความเร็วรอบของระบบ (ω_m) ขณะที่มอเตอร์ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นเครื่องกำเนิดจะทำให้ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และจะพบว่ากระแสทางด้านจ่ายเข้ามอเตอร์ (i_{ac}) ภายใต้การทดสอบจะมีค่าลดลงเนื่องจากไม่มีแรงบิดที่ทดสอบ แต่ขณะเดียวกันเมื่อมอเตอร์ภายใต้การทดสอบทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์ จะทำให้กระแสที่จ่ายเข้ามอเตอร์มีค่าสูงขึ้นตามแรงบิดที่ทดสอบ



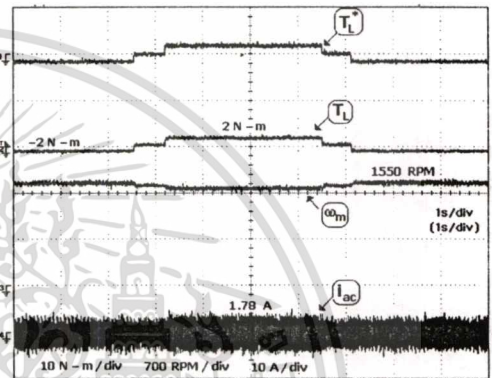
(ก) ความถี่สวิตช์ 10 kHz



(ข) ความถี่สวิตช์ 10 kHz



(ค) ความถี่สวิตช์ 10 kHz



(ง) ความถี่สวิตช์ 10 kHz

ภาพที่ 6.36 การทดสอบโหลดในสถานะที่มีโหมคการทำงานทั้งสองโหมคคือ สภาวะที่ชุดทดสอบ โหลดทำงานในโหมคเครื่องกำเนิดและสภาวะทำงานในโหมคมอเตอร์

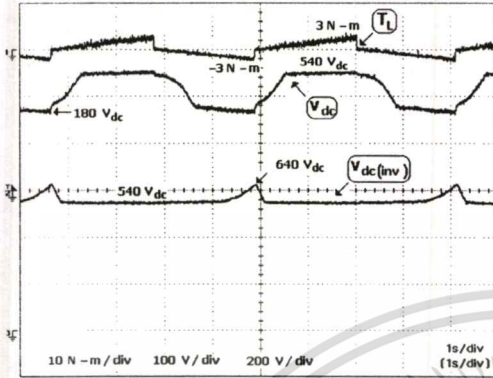
6.7 การพิจารณาแรงดันดีซีบัสขณะทดสอบโหลดทั้งสองระบบ

การจากทดสอบสร้างโหลดแบบชนิดต่างๆ ระบบการทดสอบจะเป็นการต่อเพลาร่วมกัน ระหว่างชุดสร้างโหลดและแมชชีนภายใต้การทดสอบ เมื่อทำการทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งสอง ระบบในสถานะที่ความเร็วรอบมากกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือ ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโคร ซึ่งการทดสอบในระบบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปพลังงานกลให้เป็นรูปของพลังงานไฟฟ้า โดยจะมีการคืนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบขับเคลื่อน ซึ่งจะสามารถพิจารณาสถานะทิศทางการคืนพลังงานไฟฟ้าได้โดยกำหนดจากความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีการควบคุมความเร็วจากชุดขับเคลื่อนและชุดสร้างโหลด จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อมอเตอร์ภายใต้การทดสอบมีทิศทางและความเร็วรอบมากกว่าความเร็วของชุดสร้างโหลดจะทำให้เกิดพลังไฟฟ้าจะคืนเข้าสู่ระบบชุดสร้างโหลดซึ่งจะอยู่ในโหมคการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยเป็นสภาวะปกติของการสร้างโหลด ซึ่งการคืนพลังงานดังกล่าวจะทำให้แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อทำการทดสอบโดยควบคุมให้ความเร็วรอบของชุดสร้างโหลดมีความเร็วที่มากกว่าความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ

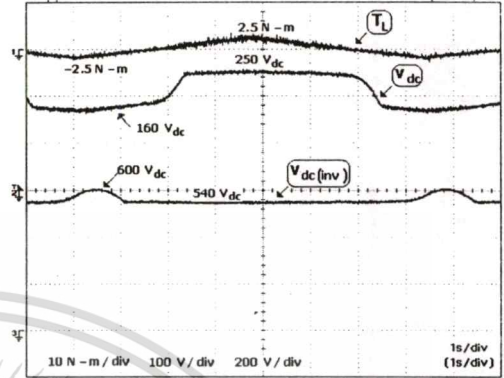
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

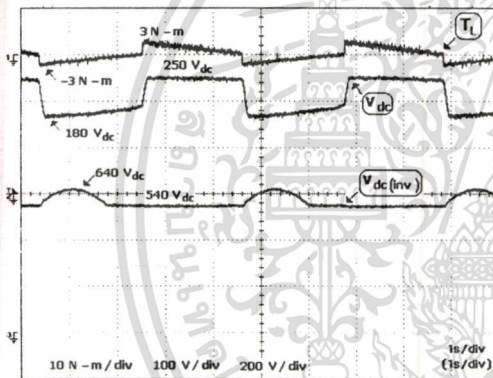
ได้การทดสอบจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าคืบเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ได้แก่อินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะ
ทำให้แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นดังนั้นชุดสร้างโหลดจะมีโหมดการ
ทำงานเป็นมอเตอร์ จะสามารถพิจารณาจากภาพที่ 6.37



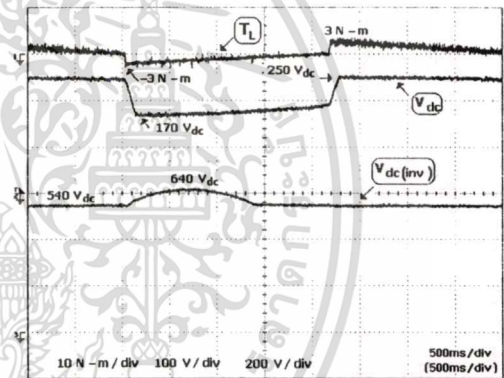
(ก) การทดสอบโหลดแบบเชิงเส้น



(ข) การทดสอบโหลดแบบแปรตามความเร็ว



(จ) การทดสอบโหลดแบบขั้น



(ค) การทดสอบโหลดแบบขั้น

ภาพที่ 6.37 การทดสอบโหลดในสภาวะที่มีโหมดการทำงานทั้งสองโหมดโดยพิจารณาจากแรงดัน
เชื่อมโยงกระแสตรงทั้งสองระบบ

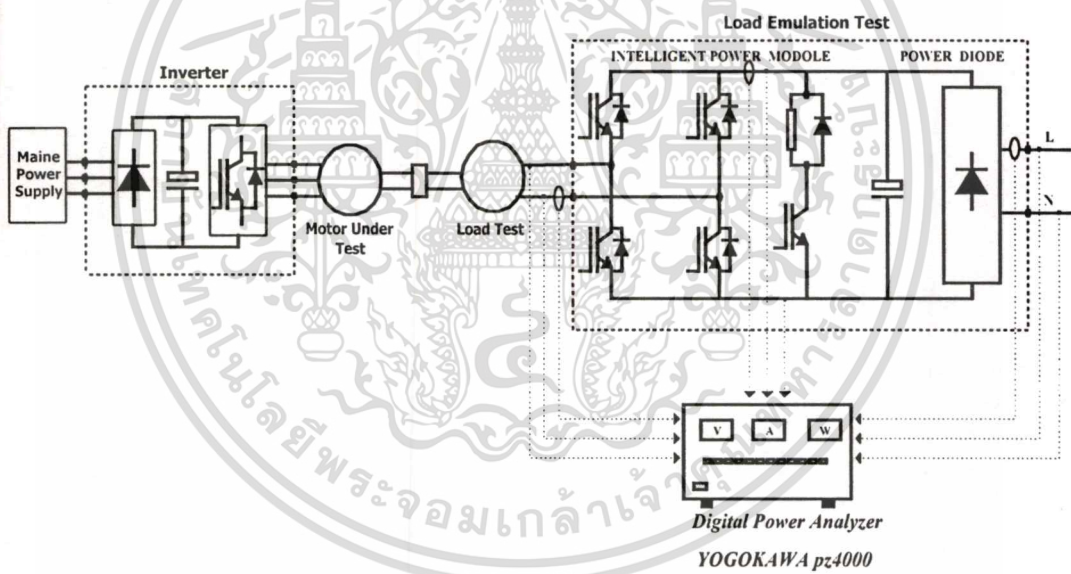
จากภาพที่ 6.37 จะเป็นการพิจารณาแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงของระบบขับเคลื่อนที่เป็นอิน
เวอร์เตอร์ ($V_{dc(inv)}$) และแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงของชุดสร้างโหลด (V_{dc}) ขณะที่ระบบทั้ง 2 มี
สภาวะการทำงานทั้ง 2 โหมด และจากภาพได้แสดงแรงบิดจริง (T_L) ที่ได้จากการทดสอบสร้าง
โหลด จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อชุดสร้างโหลดทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด (Generator
Mode) จะทำให้แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงเพิ่มขึ้นจาก 185 โวลต์ ไปเป็น 250 โวลต์ และเมื่อ
ทดสอบให้ชุดสร้างโหลดอยู่ในโหมดมอเตอร์ (Motoring Mode) จะพบว่าแรงดันเชื่อมโยงกระแส
ตรงจะมีค่าลดลงที่สภาวะปกติ 185 โวลต์ และสภาวะเดียวกันจะทำให้แรงดันเชื่อมโยงกระแส
ตรงของอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่า 540 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.8 ประสิทธิภาพของระบบชุดทดสอบโหลดทางกล

ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบชุดทดสอบสร้างโหลดทางกล สามารถพิจารณาจากการสร้างโหลดแบบคงที่ภายใต้การทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนโดยลำดับการหาประสิทธิภาพ โดยอันดับแรกจะเป็นการหาประสิทธิภาพของชุดฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ขณะที่ชุดสร้างโหลดทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด ดังนั้นอินพุตจากการวัดก็คือเอาต์พุตของชุดฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ส่วนด้านเอาต์พุตของการวัดคือที่แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงขณะที่มีการกินพลังงานเข้าสู่ระบบ จะพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการวัดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2 ถึง 6.5 ขณะที่ทำการทดสอบที่แรงบิด 2 นิวตัน-เมตร ถึง 5 นิวตัน-เมตร พร้อมทั้งทดสอบในการเปลี่ยนความถี่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ขณะที่มีการควบคุมมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ อันดับที่สองจะเป็นการหาประสิทธิภาพของชุดจำลองโหลดขณะทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์ โดยทางด้านอินพุตก็คือด้านเอซีไลน์ของด้านหน้าวงจรบริดจ์เพาเวอร์ไดโอด ส่วนด้านเอาต์พุตก็คือไฟกระแสตรงที่ได้จากวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง



ภาพที่ 6.38 ระบบการตรวจวัดประสิทธิภาพของชุดจำลองโหลด

ตารางที่ 6.2 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 1 kHz

	Input(DC)			Output(DC)			
T(N-m)	P (W)	V(V)	I(A)	P (W)	V(V)	I(A)	η(%)
2.0	314	92	3.66	282	250	1.12	90%
3.0	461	86	5.84	428	251	1.69	90%
4.0	610	82	6.95	556	251	2.19	91%
5.0	664	69	9.06	616	251	2.42	91%

ตารางที่ 6.3 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 3 kHz

	Input(DC)			Output(DC)			
T(N-m)	P (W)	V(V)	I(A)	P (W)	V(V)	I(A)	η(%)
2.0	304	91	3.66	263	250	1.09	90%
3.0	463	86	5.8	422	251	1.66	91%
4.0	612	81	8.0	556	251	2.19	90%
5.0	664	68	9.16	614	251	2.4	91%

ตารางที่ 6.4 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 5 kHz

	Input(DC)			Output(DC)			
T(N-m)	P (W)	V(V)	I(A)	P (W)	V(V)	I(A)	η(%)
2.0	324	94	3.8	293	250	1.16	90%
3.0	486	88.6	5.95	444	251	1.65	91%
4.0	630	82	8.14	564	251	2.26	91%
5.0	695	69	9.3	636	251	2.49	91%

ตารางที่ 6.5 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิด โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 10 kHz

	Input(DC)			Output(DC)			
T(N-m)	P (W)	V(V)	I(A)	P (W)	V(V)	I(A)	η(%)
2.0	328	91	3.9	295	250	1.16	90%
3.0	489	86	6.1	445	251	1.66	91%
4.0	626	80	8.38	560	251	2.25	91%
5.0	686	66.6	9.5	621	251	2.44	90%

ตารางที่ 6.6 การตรวจวัดประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ในชุดการจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบการทำงานในโหมดมอเตอร์ โดยตรวจวัดจากวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 1 kHz

	Input(DC)			Output(DC)			
T(N-m)	P (W)	V(V)	I(A)	P (W)	V(V)	I(A)	η(%)
0.5	141	164	0.81	129	106	1.18	91%
1.0	193	163	1.12	169	108	1.63	93%
1.5	336	168	1.99	316	110	2.84	94%

ตารางที่ 6.7 การตรวจวัดประสิทธิภาพของระบบชุดจำลองโหลด เมื่อทำการทดสอบในโหมดการทำงานเป็นมอเตอร์ โดยตรวจวัดจากระบบทั้งหมดของชุดทดสอบโหลดที่ความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 1 kHz

	Input(AC)			Output(DC)			
T(N-m)	P (W)	V(V)	I(A)	P (W)	V(V)	I(A)	η(%)
0.5	142	131	1.69	126	106	1.18	89%
1.0	193	131	2.22	166	106	1.63	91%
1.5	339	130	3.63	313	109	2.85	92%

จากตารางการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบ จะพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ ในสถานะที่ชุดจำลองโหลดมีการทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด (Generator Mode) จะทำให้ประสิทธิภาพของชุดฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ 90 % และเมื่อทำการทดสอบชุดจำลองโหลดให้มีการทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์

(Motoring Mode) จะทำให้ประสิทธิภาพของชุดฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์มีค่าประมาณ 92% และเมื่อทำการหาประสิทธิภาพของระบบชุดทดสอบสร้างโหลดทั้งหมดจะได้ประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 90 % ของระบบ ซึ่งจะมีการสูญเสียที่ฟูลบริดจ์ไดโอดไปประมาณ 2 %

6.9 สรุป

ในการทดสอบสร้างโหลดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยมีการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ จะพบว่าชุดจำลองโหลดมีการสร้างแรงบิดตามคำสั่งที่ได้จากคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการทดสอบจะทำให้แรงบิดที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่าได้ตามแรงบิดคำสั่ง และมีผลตอบสนองที่ไวเมื่อทำการทดสอบแบบโหลดขึ้น และจะมีสภาวะคงตัวตลอดขั้นตอนการควบคุมเมื่อทดสอบแบบโหลดต่อเนื่องในการป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับแรงบิด โดยได้ทำการทดสอบกับเทคโนโลยีที่แรงบิดต่างๆและความเร็วรอบขณะทดสอบ จะพบว่ากระแสแอมเพอร์จะแปรผันกับแรงบิดดังตารางที่ 6.1 และเมื่อทำการทดสอบจริงในการจำลองโหลดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยมีการเชื่อมต่อที่เพลาทิ้งสองของแมชชีน ในการทดสอบจะพบว่ากระแสแอมเพอร์ของชุดจำลองโหลดจะมีค่าคงตัวเท่ากับกระแสที่ได้จากการทดสอบครั้งแรกกับเทคโนโลยี ทำให้ยืนยันว่ามีการป้อนกลับของกระแสที่ถูกต้อง จากภาพการทดสอบทั้งหมดจะสังเกตว่าสัญญาณแรงบิดคำสั่งจะมีสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณที่ตรวจวัดได้จริงเนื่องจากสัญญาณที่ได้จากคอมพิวเตอร์จะเป็นดิจิทัล และเมื่อทำการเปลี่ยนเป็นสัญญาณแอนาล็อกจะทำให้มีสัญญาณรบกวนเล็กน้อยซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณควบคุม และเมื่อทำการทดสอบการทำงานของชุดจำลองโหลดในโหมดเครื่องกำเนิดจะพบว่าในการคืนพลังงานสู่ระบบจะมีผลต่อความต้านทานเบรค เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบจะมีพิกัด 1 แรงม้า หรือ 0.75 กิโลวัตต์ ดังนั้นจะต้องมีการคำนึงถึงการเลือกใช้ความต้านทานที่เหมาะสม เนื่องจากจะมีผลต่อการจำลองโหลดต่อคาบเวลาการทำงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความต้านทานที่มีค่า 600 วัตต์ ในการทดสอบที่พิกัดสูงสุดจะพบว่าพลังงานที่คืนกลับมาของมอเตอร์เหนี่ยวนำประมาณ 614 วัตต์ และเมื่อทำการทดสอบเป็นเวลานานความต้านทานที่ใช้งานอาจเสียหายได้ ดังนั้นเมื่อต้องการทดสอบคาบเวลายาวนาน จำเป็นจะต้องมีการเพิ่มวัตต์ของความต้านทานเบรค

บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

7.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการสร้างชุดการจำลองโหลดทางกล เพื่อใช้สร้างโหลดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการขับเคลื่อนด้วยฟีดแบ็คลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ และการทดสอบกับระบบจริง ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลทางทฤษฎีที่ได้ทำการวิเคราะห์ จากการทดสอบได้สร้างแพทเทิร์นของโหลดด้วยการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงโดยการควบคุมกระแสอาเมเจอร์ จะพบว่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะเป็นปฏิภาคกับแรงบิดของมอเตอร์ ในการทดสอบระบบควบคุมของชุดจำลองโหลด จะพบว่าคำสั่งกระแสอ้างอิงและกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์จะมีการไต่และติดตามค่าของกระแสอ้างอิงตลอดคาบการทำงาน โดยมีขอบเขตการควบคุมจากฟีดแบ็คของมอเตอร์และค่าที่ระบุไว้ในโปรแกรม ส่วนการทดสอบผลการตอบสนองของระบบควบคุมกระแสจะมีผลตอบสนองต่อการสับโหลดที่ไวตามค่าที่ได้กำหนดนอกแบบไว้ ส่วนการทดสอบสภาวะคงตัว เมื่อทำการควบคุมกระแสอาเมเจอร์ในสภาวะจำลองโหลดเพิ่มขึ้น จะพบว่าค่าแรงดันอาเมเจอร์จะมีค่าลดลง เพื่อจะรักษาให้กระแสอาเมเจอร์มีค่าคงที่ และจะทำให้กำลังงานเพิ่มขึ้นตามฟีดแบ็คแรงบิดและกระแสที่สูงขึ้น ส่วนในการทดสอบเปลี่ยนความถี่สวิทช์ของฟีดแบ็คลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้การทดสอบในทุกย่านความถี่ของการสวิทช์ ขณะที่ความถี่พินดามเมนทอล 50 Hz และ 60 Hz จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 8 % ของฟีดแบ็ค ขณะที่การทดสอบจำลองโหลดที่ 120 % ของฟีดแบ็ค และในการทดสอบเมื่อลดความถี่สวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ต่ำลง ที่ 1 kHz จะทำให้มอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะมีเสียงดังขึ้นแต่เมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้นจะสามารถลดการเกิดเสียงดังที่ตัวมอเตอร์ได้ สำหรับในการทดสอบ โหลดที่ความถี่สวิทช์ต่างๆกันจะพบว่าแรงบิดและกระแสที่เกิดขึ้น อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ตรงตามฟีดแบ็คที่ตั้งไว้ และเมื่อทำการทดสอบจำลองโหลดแรงบิดที่ฟีดแบ็คของมอเตอร์ภายใต้การทดสอบจะพบว่ากระแสที่เกิดขึ้นจะใกล้เคียงกับกระแสที่เนมเพลทของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็นการยืนยันว่าแรงบิดที่สร้างขึ้นจากชุดโหลดมีการทำงานที่ถูกต้อง และสอดคล้องกับกระแสแอมเพอร์ที่มีความสัมพันธ์กับแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง ส่วนในการทดสอบชุดจำลองโหลดในโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดจะพบว่าพลังงานที่คืนกลับสู่ดีซีบัสจะสูงกว่าแรงดันปกติ จากการออกแบบได้เพิ่มเวลาในสลายพลังงานโดยการออกแบบความต้านทานเบรกที่เหมาะสม และจะคำนึงถึงฟีดแบ็คเอมพีของอุปกรณ์สวิทช์กำลัง ซึ่งจากการทดสอบจะมีการสลายพลังงานได้ถูกต้อง และในการทดสอบในการจำลองโหลดทั้ง 4 ควอดแรนท์จะสามารถพิจารณาจากดีซีบัสทั้งสองระบบได้แก่ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะมอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานเสมือนเครื่องกำเนิดซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วที่เกิดจะสูงกว่าความเร็วเชิงโคโรนาส ในการทดสอบในโหมดการทำงานแบบนี้จะพบว่าบ่อยครั้งอินเวอร์เตอร์จะเกิดการทริปเกี่ยวกับแรงดันสูงเกิน เมื่อทำการพิจารณาแรงดันดีซีบัสของชุดจำลองโหลดในโหมดการทำงานเสมือนเครื่องกำเนิด ขณะที่แรงดันดีซีบัสมีค่าสูงขึ้นถึงพิกัดแรงดันที่กำหนดไว้จะถูกสลายออกไปด้วยความต้านทานเบรก ซึ่งความเร็วรอบช่วงนี้จะต่ำกว่าความเร็วเชิงโคโรนาสของมอเตอร์ และจากการทดสอบทั้งสองระบบสามารถถ่ายเทพลังงานออกสู่แรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงได้ทั้งสองทิศทาง จากการจำลองโหลดทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยระบบควบคุมทั้งสองสามารถควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ตัวเดียวกันและสามารถสร้างโหลดได้หลายประเภท ซึ่งจากการทดสอบ สามารถยืนยันได้ว่าการสร้างแรงบิดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบสามารถสร้างโหลดได้ถูกต้องและแม่นยำ

7.2 สรุป

วิทยานิพนธ์ได้ออกแบบชุดการจำลองโหลดทางกล เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะของฟีดแบ็กอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการออกแบบได้ประยุกต์ใช้งานแต่ละส่วนที่สอดคล้องตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนแรกจะเป็นการศึกษาการทำงานด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไม่ว่าจะเป็นด้านวงจรกำลังที่ใช้ IPM ในการสวิตช์ซึ่งมีคุณสมบัติตรวจจับฟอลต์แบบต่างๆของวงจรกำลัง ซึ่งในปัจจุบันได้นิยมใช้ในอินเวอร์เตอร์แทนไอจีบีทีแบบโมดูล ส่วนชุดควบคุม ได้ออกแบบวงจรสร้างสัญญาณแบบยูนิโพลาร์และการตรวจจับกระแสแอมเพอร์ ส่วนที่สอง จะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของแมชชีนที่นำมาควบคุม โดยการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงบิดและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบของแมชชีน และการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแมชชีนเพื่อสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าสำหรับการป้อนกลับของระบบ ส่วนที่สาม เป็นการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมป้อนกลับโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ นำมาคำนวณออกแบบระบบควบคุมพีไอ ของวงจรเพื่อต้องการผลตอบสนองที่ดีในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ และ ส่วนที่สี่ จะเป็นการควบคุมการทำงานโดยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม เดลไฟล์ในการควบคุมการทำงานของการสร้างโหลด โดยสร้างแรงบิดอ้างอิงผ่านพอร์ทขนานและแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อก โดยโปรแกรมจะเก็บค่าแรงบิดต่างๆ และทำการประมวลผลเป็นฟังก์ชันโหลดแบบต่างๆและสามารถควบคุมทิศทางการหมุนจากโปรแกรมได้ ซึ่งจากการสร้างชุดจำลองโหลดในการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะพบว่า พฤติกรรมของมอเตอร์ที่ได้ทดสอบและจะมีผลจะสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบขึ้น

7.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาและแก้ไข

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการป้อนกลับของความเร็วรอบซึ่งในการทดสอบโหลดบ้างชนิด ไม่สามารถทดสอบได้ เช่น โหลด ความเร็วรอบกำลังสอง ได้แก่ประเภทโหลดที่ประหยัคพลังงาน และ ในการทดสอบที่ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วรอบซึ่ง โครนัสในย่านความเร็วรอบสูงๆก็ไม่สามารถทดสอบได้ ดังนั้นในงานวิจัยที่จะพัฒนาต่อไป ควรพิจารณาถึงการนำความเร็วรอบมาใช้ในการควบคุมในการป้อนกลับของลูปนอกของมอเตอร์กระแสตรง

ในการทดสอบสร้างโหลดในงานวิจัยจะพบว่าจะมีข้อจำกัดอยู่ที่พิกัดในการสร้างแรงบิดของมอเตอร์ที่ใช้ในการสร้างโหลดได้แก่มอเตอร์กระแสตรง ซึ่งจะทำให้ย่านการทดสอบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ มีขอบเขตที่จำกัด โดยการพัฒนาควรจะต้องเลือกพิกัดของมอเตอร์จำลองโหลด โดยสามารถสร้างแรงบิดได้สูงหรือไม่ต่ำกว่า 50 นิวตัน-เมตร หรือ ประมาณ 10 แรงม้า เพื่อในการทดสอบไม่เพียงแต่ทดสอบระบบขับเคลื่อนเท่านั้นสามารถทดสอบ กับพวกเครื่องยนต์ในการสร้างแรงทดสอบทดสอบที่เพลาของการขับเคลื่อน

7.3.1 วงจรควบคุม

ในการจำลองโหลดของชุดต้นแบบที่สร้างขึ้นมา จะมีฟังก์ชันการสร้างแรงบิดไม่มาก เนื่องจากในระบบควบคุมบางส่วนได้มีการใช้วงจรแอนะล็อกในการสร้างสัญญาณ ทำให้มีขอบเขตจำกัดในการออกแบบระบบ โดยสัญญาณที่ได้ออกแบบจะมีผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนมาก ทำให้เสถียรภาพของระบบควบคุมค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งต่อไปจะใช้หลักการประมวลผลด้วย DSP 32 บิต โดยจะมีการควบคุมที่ไวและผลตอบสนองที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบโหลด ส่วนการสร้างฟังก์ชันโหลดควรจะให้อยู่ในมาตรฐานของโหลดที่ใช้งาน โดยสามารถควบคุมการทำงานจากอินเวอร์เตอร์อีกชุดได้ ซึ่งการควบคุมควรจะมีการป้อนกลับของความเร็วรอบเพื่อใช้ในการสร้างโหลดที่แปรตามความเร็วรอบที่เป็นโหลดประหยัคพลังงาน

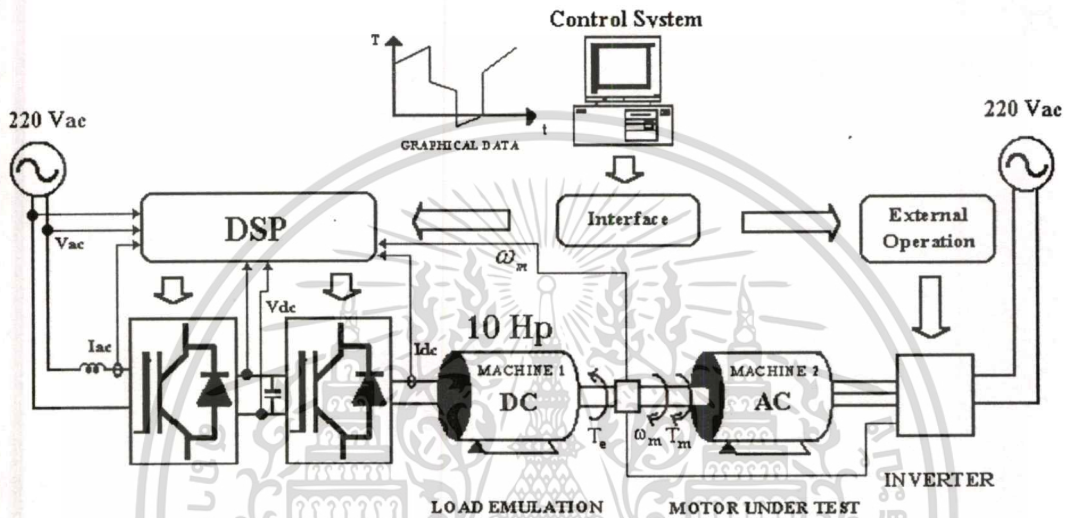
7.3.2 วงจรกำลัง

เมื่อทำการทดสอบจะพบว่าชุดการจำลองโหลดจะการทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด โดยจะมีพลังงานคืนกลับมาในรูปไฟกระแสตรงที่บัสเชื่อม โยงกระแสตรง ซึ่งปกติในการทดสอบจะสลายพลังงานไปสู่ความต้านทานเบรกให้อยู่ในรูปความร้อน ทำให้พลังงานที่สลายไปไม่มีประโยชน์ จึงได้มีการเสนอให้มีการพัฒนาการคืนพลังงานสู่ระบบแหล่งจ่ายกำลัง โดยจะมีการพัฒนาทางด้านชุดคอนเวอร์เตอร์ให้เป็นอุปกรณ์สวิตซ์กำลังโดยมีให้โหมดการทำงานแบบเรกติไฟ์ลิ่งและโหมดอินเวอร์ต ดังนั้นในการพัฒนาสภาวะการคืนพลังงานสู่ระบบ ในงานวิจัยได้มีการทดสอบกับงานวิจัยอีกชิ้นที่มีความสามารถคืนพลังงานสู่ระบบได้ ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบและลดการเกิดฮาร์โมนิกส์ของระบบเนื่องจากกระแสจะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ผลการทดลองสามารถดูจากภาพผนวก ง. ได้ แต่ระบบที่กล่าวมาจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวงจรทดสอบแบบแอนะล็อกซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานและเสถียรภาพของระบบจะค่อนข้างต่ำ เพราะจะเกิดสัญญาณรบกวนสูง ดังนั้นในการพัฒนาควรมีการควบคุมการทำงานทั้งหมดโดยไม่ใช้คอนโทรลเลอร์ ที่มีผลตอบสนองที่ไวต่อการสลายพลังงานที่คืนกลับมา โดยในการควบคุมการทำงานควรมีความสัมพันธ์กับการควบคุมจำลองโพลต์ซึ่งอาจจะใช้ DSP 32 บิต ซึ่งจะสามารถควบคุมการทำงานในตัวเองกันได้และมีการประมวลผลที่ไว ระบบรวมที่เสนอให้มีการพัฒนาขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 ระบบที่ได้เสนอในการพัฒนาขึ้นต่อไป

หนังสืออ้างอิง

- [1] C.R. Hewson, M. Sumner, G.M. Aaher and P.W. Wheeler, "Dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of AC inverters", Power Engineering Journal February, pp.21-28, 2000.
- [2] C.R. Hewson, G.M. Aaher, M. Sumner, "A Dynamic Mechanical Load Emulation Test Facility to Evaluate the Performance of AC Inverter", Conference Publication IEE, No. 456, pp.206-211, 1998.
- [3] C.R. Hewson, G.M. Aaher, M. Sumner, "Dynamometer Control for Emulation of Mechanical Load", IEEE, pp.1511-1518, 1998.
- [4] P. Sandholdt, E. Ritchie, J.K. Pedersen, R.E. Betz, "A Dynamometer Performing Dynamical Emulation of Loads with Non-Linear Friction", IEEE, pp.873-878, 1996.
- [5] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001.
- [6] อ. พิชิต ถ้ายอง, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สิงหาคม 2540.
- [7] จรัส ตั้งวงศ์ชูเกตุ, "การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์ โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงาน", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [8] Z. Hakan Akpolat, Greg M. Asher, Jon C. Clare, "Experimental Dynamometer Emulation of Non-linear Mechanical Load", IEEE, pp.532-539, 1998.
- [9] ชูเกียรติ นิธิโยธาน "ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมกระแสไร้เซนเซอร์วัดความเร็วสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [10] P.C. Sen "Principles of Electronic Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons, 1997
- [11] Gopal K. Dubey, "Power Semiconductor Controlled Drives", Prentice Hall, 1989.
- [12] P.C. Sen, "Thyristor DC Drives", John Wiley & Sons, 1981
- [13] Mohan, Undeland and Robbins, 1995, "Power Electronic", John Wiley and sons
- [14] S.B. Dewan, G.R. Slemon, A. Straughen "Power Semiconductor Drives" John Wiley and sons

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง(ต่อ)

- [15] Newton R.W., Betz R.E. and Penfold H.B., “ Emulating Dynamic load characteristics Using a Dynamometer” Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1995
- [16] Chee-Mun Ong “ Dynamic Simulation of Electric Machinery ” PRENTICE HALL PTR Upper Saddle River, New Jersey 07458
- [17] วรพล ลีลาเกียรติสกุล,พิเชษฐ์ ช่อผกา ,ฐิติรัตน์ สมพงษ์ ,จักรกริช กิตติสุทธ ,มารุต ตามศรี, “ระบบไมโครคอมพิวเตอร์”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2542.
- [18] E.R.Collins,Jr.,Member,IEEE and Y.Huang,“ A Programmable Dynamometer for Testing Rotating Rotating Machinery Using a Three-Phase Induction Machine” ,IEEE,pp.521-527,1994.



ภาคผนวก ก.

รายละเอียดทั่วไปของมอเตอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

1. ข้อมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1.1 ข้อมูลในป้ายของมอเตอร์(Name Plate)

ยี่ห้อ Power Pack DC Motor

เอาต์พุต 1.5 kw แรงดันอาเมเจอร์ 130 โวลต์

กระแสอาเมเจอร์ 15 แอมป์ ความเร็วรอบ 1800 rpm

แรงดันขดลวดกระตุ้น 180 โวลต์

1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากทดสอบ

ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ทำการทดสอบกับเครื่อง Drive Test SIMOREG DC MASTER ยี่ห้อ SIEMENS ซึ่งมีคุณสมบัติในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์กระแสตรงทุกประเภทที่เป็นแบบมอเตอร์ขดลวดกระตุ้นแยกในการทดสอบจะต้องมีการป้อนกลับของความเร็วรอบ และได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์กระแสตรงในหัวข้อที่ 1.1 ซึ่งสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$R_a = 1.429 \, \Omega$$

$$R_f = 180 \, \Omega$$

$$L_a = 15 \, \text{mH}$$

$$J = 0.15 \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$B = 0.31 \, \text{N.m.sec/rad}$$

$$\tau_a = 483 \, \text{msec}$$

$$\tau_m = 10.5 \, \text{msec}$$

$$K\phi = 0.66 \, \text{V.sec/rad}$$

2. ข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

ยี่ห้อ MULLER MOTOR

Hp/Kw 1/0.75 VOLTS 220-240/380-415

POLES 4 Hz 50/60 AMP'S 3.5-3.2/2.0-1.8

RPM 1380/1655

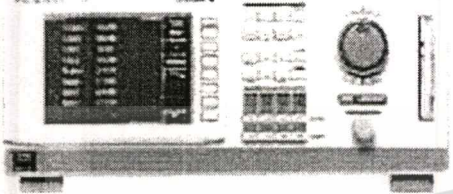
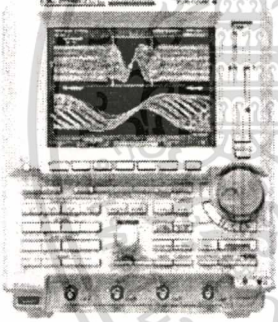
3. ข้อมูลอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

พิกัด 1 Hp 0.75 Kw 380VAC กระแส 3.5 A

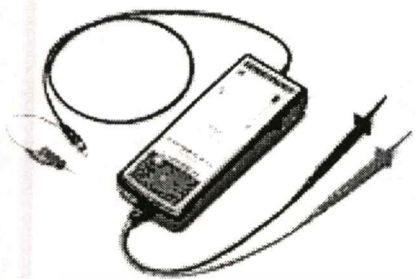
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

	ผลิตภัณฑ์ Power Analyzer (YAKOGAWA) รุ่น PZ4000 รายละเอียด Wide Measurement Bandwidth (DC to 2 MHz) Accurately Simpling 5 MS/s Hamonic Analysis (up to 500th) Order
	ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope(YOKOGA) รุ่น DL1540 /DL (4 Channel) รายละเอียด 150 MHz Analog Bandwidth 120 MS/s on two channele 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V(DC+AC peak)2% DC accuracy, Internal low pass filter
	ผลิตภัณฑ์ Multi Meter (Hewlett Packard) รุ่น 973 A รายละเอียด True RMS 20 kHz Accurarcy = 0.1 % Vac or Vdc : 0 to 1000 Volts Iac or Idc : 0 to 10 Amperes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe รุ่น 700924 รายละเอียด 100 MHz A probe lets you make wide-band differential input measurements
---	--

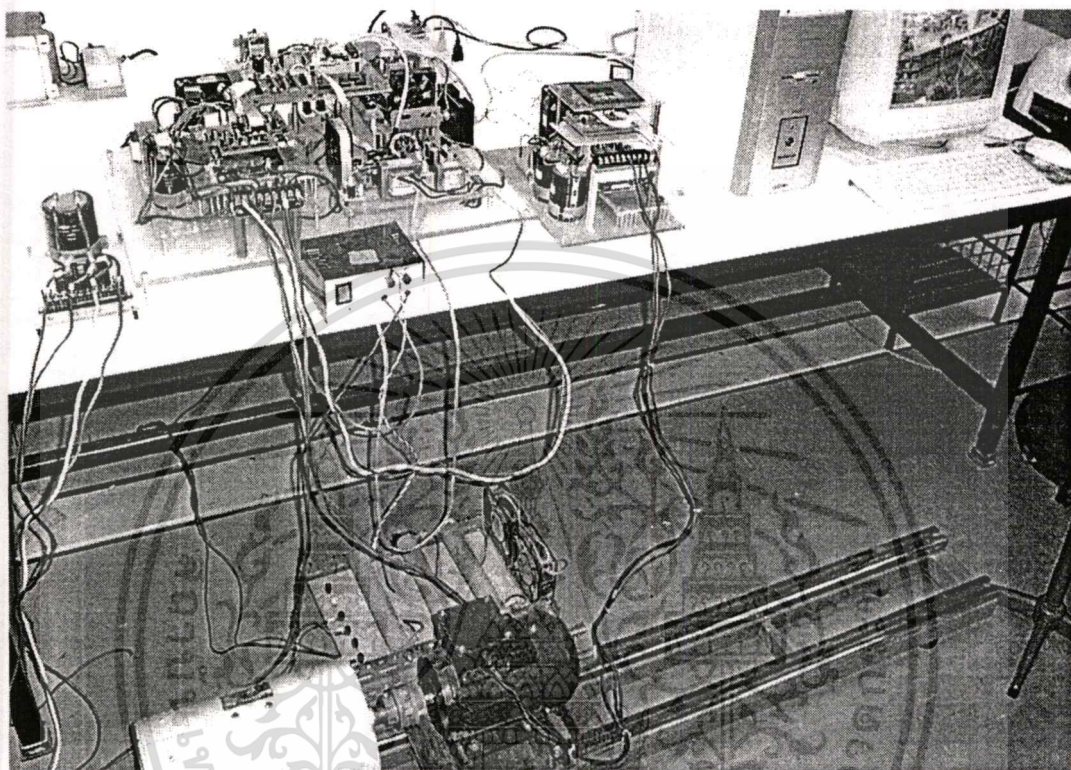
	ผลิตภัณฑ์ Current Probe (CHAUVIN ARNOUX) รุ่น E3N รายละเอียด Current Probe 10-100 Ampere / 1 Volt Input 100 A Peak Max Frequency: DC to 100 kHz .(@3 db) Output 10 mV/A, 100 mV/A CAT III
--	---

	ผลิตภัณฑ์ Digital Tachometers (YOKOGAWA) รุ่น 3631 รายละเอียด Measurement rang : 60.0 to 1999.9 rpm and 60 to 19,999 rpm Detection distance 30 to 300 mm
---	--

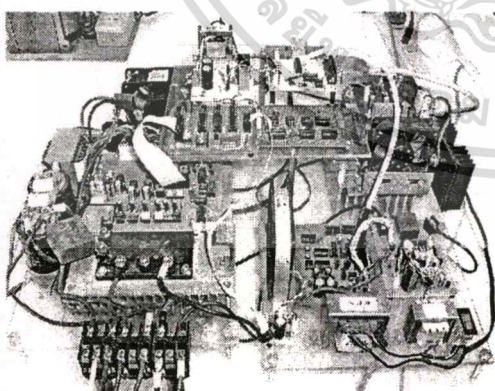
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

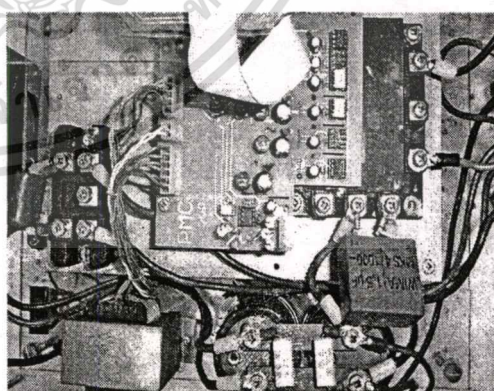
โครงการต้นแบบในงานวิจัย



ภาพที่ 1 แสดงระบบทดสอบโหลดทั้งหมด

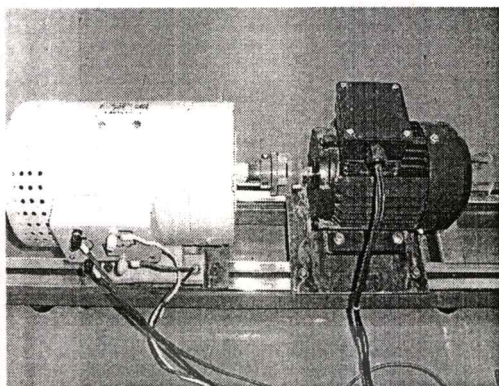


ภาพที่ 2 แสดงวงจรการควบคุม

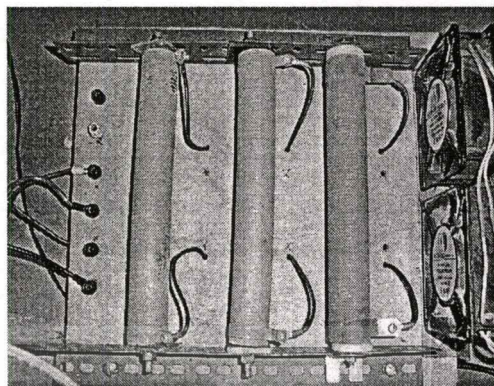


ภาพที่ 3 แสดงวงจรภาคกำลัง (IPM)

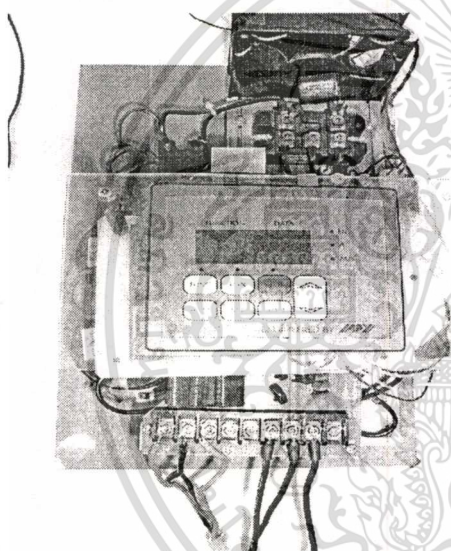
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



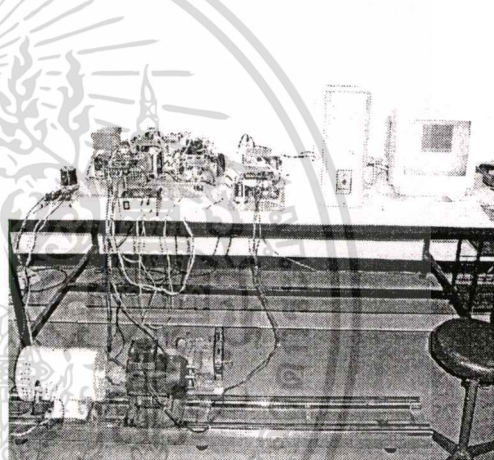
ภาพที่ 4 แสดงมอเตอร์ภายใต้การทดสอบ



ภาพที่ 5 แสดงตัวต้านทานในการเบรก



ภาพที่ 6 แสดงอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อน
มอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 7 ระบบทดสอบที่มีการควบคุมฟังก์ชัน
ของโหลดด้วยคอมพิวเตอร์

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. ชำรงศักดิ์ ศรีวิเศษ กำพล ศิริจันทร์พงศ์ และ วิจิตร กิณเรศ, “ชุดจำลองโหลดทางกลที่มี การคืนพลังงานเข้าสู่ระบบเพื่อการทดสอบสมรรถนะของฟีดแบลลิเอ็มอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อน มอเตอร์เหนี่ยวนำ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 71-75, 21-22 พฤศจิกายน 2545.

2. ชำรงศักดิ์ ศรีวิเศษ และ วิจิตร กิณเรศ, “ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อการทดสอบสมรรถนะ ของฟีดแบลลิเอ็มอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ”, วิศวกรรมลาดกระบัง, หน้าที่ 19-24, ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2545.





การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25



25th Electrical Engineering Conference (EECON - 25)



21-22 พฤศจิกายน 2545

ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Volume

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ระบบควบคุมและกาวัดคุม (CT)

ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดจำลองโหลดทางกลที่มีการคืนพลังงานเข้าสู่ระบบเพื่อการทดสอบสมรรถนะของฟีดแบ็คบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

A Mechanical Load Emulator with Regenerative Operation for Performance Testing of PWM Inverter fed Induction Motors

ธำรงค์ ศรีวิเศษ กำพล ศิริจันทร์พงศ์ วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร/โทรสาร : (02) 737-3000 ต่อ 3058 โทรสาร E-mail : kkwijit@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดการจำลองโหลดทางกลเพื่อการทดสอบสมรรถนะการทำงานของ ฟีดแบ็คบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการควบคุมของชุดการจำลองโหลด ได้ใช้วิธีควบคุมกระแสแอมเพอร์เพื่อสร้างฟังก์ชันแรงบิดตามโหลดประเภทต่างๆและสามารถทำงานได้ 4 ควอดแดรนต์ โดยมีการควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์ซึ่งทำให้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน พร้อมทั้งสามารถสร้างฟังก์ชันโหลดที่มีความซับซ้อนได้ ในส่วนชุดคอนเวอร์เตอร์ด้านหน้าได้ออกแบบเป็นวงจร สวิตช์โหมดแทนวงจรเรกติไฟเออร์แบบทั่วไป ซึ่งทำให้สามารถลดความผิดเพี้ยนกระแสทางด้านเข้าและให้ค่าประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งได้ นอกจากนี้ยังสามารถคืนพลังงานกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่ชุดจำลองโหลดทำงานในโหมดรีเจนเนทีฟ จากการทดสอบการสร้างแรงบิดของชุดจำลองโหลดสามารถให้สมรรถนะที่แม่นยำในสภาวะคงตัวและให้ผลตอบสนองทางด้านไดนามิกต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ไว ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

This paper presents the design and the development of a mechanical load emulator for performance testing of PWM inverter fed induction motors. The control method base on armature current control to generate torque under various load characteristics and operate in all four quadrants. For facility and convenience application load emulator is controlled operation to generate complex load function through computer. For front end converter is designed by switch mode operation instead of common rectifier. This converter can reduce distortion input current and regain the closely unity power factor. The regenerative energy from power system can back transfer to utility through this converter when load emulator operate in regenerative mode. Torque of load emulator provides both accurate performance under steady state

condition and excellent dynamic response for fast varying load which appear satisfactory.

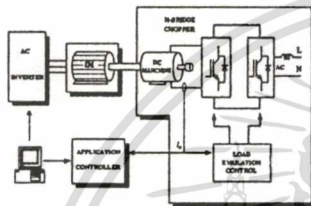
Keywords: load emulator , H-Bridge Converter, Rectifying, Inverting, Motoring Mode, Generator Mode

1. บทนำ

ในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อน โดยมีวิธีการควบคุมได้หลายแบบ เช่น แบบ V/F, Sensorless และ Vector Control เป็นต้น [1] - [2] ซึ่งการเลือกใช้อินเวอร์เตอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของโหลดที่ต้องการ ดังนั้นก่อนการติดตั้งใช้งานจริงจึงจะต้องมีการทดสอบอินเวอร์เตอร์เพื่อยืนยันว่าอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานควบคู่กับ โหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับโหลดนั้นมากที่สุด โดยโหลดที่นำมาทดสอบในปัจจุบันส่วนใหญ่ ได้แก่ โหลดทางไฟฟ้า(MGset) และโหลดทางกล ซึ่งพบว่าโหลดชนิดต่างๆเหล่านี้ให้ผลตอบสนองทางด้านไดนามิกที่ค่อนข้างช้า และยังมีความผิดเพี้ยนหลายประการ พร้อมทั้งแรงบิดที่ได้มีค่าผิดพลาด ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร นอกจากนี้โหลดดังกล่าวไม่สามารถสร้างฟังก์ชันโหลดที่มีความซับซ้อนหลายแบบได้ ส่งผลให้ข้อมูลการทดสอบที่ได้มีความน่าเชื่อถือน้อยลง และทำให้ความไว้วางใจในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดการจำลองโหลดที่มีสมรรถนะในการทดสอบและให้ผลการตอบสนองของระบบทางด้านไดนามิกที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ดียิ่งขึ้นยังสามารถสร้างฟังก์ชันของโหลดต่างๆได้โดยควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้มีความสะดวกและง่ายสำหรับการใช้งาน ให้ผลการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือขึ้น นอกจากนี้ยังได้นำพลังงานคืนกลับที่ได้จากการทดสอบจำลองโหลดจ่ายเข้าระบบกริดไฟฟ้ากำลังซึ่งโดยปกติแล้วพลังงานในส่วนนี้จะส่งมลาย่อยไปกับความต้านทานที่มีวัดที่สูง ดังนั้นทำให้ชุดการจำลองโหลดที่นำเสนอมีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานที่ดีขึ้น

2. หลักการของระบบการจำลองโหลด

จากรูปที่ 1 ซึ่งเป็นระบบจำลองโหลดที่นำเสนอ ลักษณะการออกแบบได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นทำหน้าที่เป็นโหลด เพราะเนื่องจากสามารถควบคุมแรงบิดได้โดยตรงด้วยวิธีการควบคุมกระแสที่โหลดเข้าอามเจอร์โดยจะนำค่าตรงเข้ากับเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้เพื่อทดสอบ โดยระบบการทดสอบจะประกอบด้วย การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการป้อนกลับของกระแสอามเจอร์และควบคุมการทำงานของ อินเวอร์เตอร์ที่นำมาทดสอบ สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยระบบการทดสอบดังกล่าวนี้จะถูกควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ซึ่งในด้านการออกแบบชุดจำลองโหลดสามารถสร้างแรงบิดได้สูงสุดที่ 8 N-m ของที่กักมอเตอร์ภายใต้การทดสอบหรือสามารถทดสอบอินเวอร์เตอร์ได้สูงสุดที่กัก 0.75 Kw

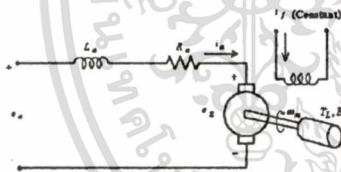


รูปที่ 1 ระบบการจำลองโหลด

3. แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นซึ่งมีวงจรสมมูลแบบไดนามิกแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตามรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการทราฟฟิ่งกั้นของ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้เป็น

$$E_g = \omega_g \cdot R_a \cdot L_a \frac{d}{dt} \quad (1)$$

$$\omega_g = K_g \cdot m \quad (2)$$

$$T_e = T_L + B \cdot m \cdot J \frac{d}{dt} \quad (3)$$

$$T_e = K_g i_a \quad (4)$$

E_g คือ แรงดันคร่อมอามเจอร์ (Volt)

ω_g คือ แรงดัน Back EMF (Volt)

R_a คือ ความต้านทานขดลวดอามเจอร์ (โอห์ม)

i_a คือ กระแสอามเจอร์ (Ampere)

L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดอามเจอร์ (Henry)

K_g คือ ค่าคงที่ทางไฟฟ้า

• คือ ฟลักซ์ต่อขั้ว (Webers)

• ω_g คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rad/sec)

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากมอเตอร์ (N-m)

J คือ ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อย (N-m²)

B คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [(N-m) / (rad/sec)]

T_L คือ แรงบิดจากโหลด (N-m)

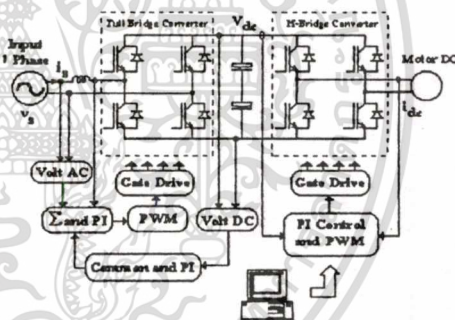
นำสมการที่ (1),(2),(3) และ (4) มาแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนค่าความถี่ของกระแสอามเจอร์ จะได้เป็น

$$I_a \cdot \omega_g = \frac{E_g \cdot \omega_g \cdot E_g \cdot \omega_g}{R_a \cdot \omega_g} \quad (5)$$

โดยกำหนดให้ $\omega_a = \frac{L_a}{R_a}$ ค่าเวลาทางไฟฟ้า (Electrical time constant of Amature Current)

4. การทำงานของวงจรและการออกแบบค่าอัตราขยายของ

ตัวควบคุม PI ในการป้อนกลับกระแสอามเจอร์



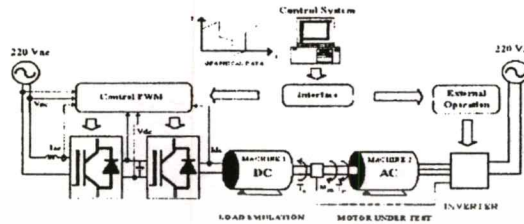
รูปที่ 3 วงจรกำลังและวงจรควบคุมของชุดการจำลองโหลด

จากรูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรควบคุมและวงจรกำลังชุดการจำลองโหลด ที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ โดยมีหน้าที่และหลักการดังต่อไปนี้

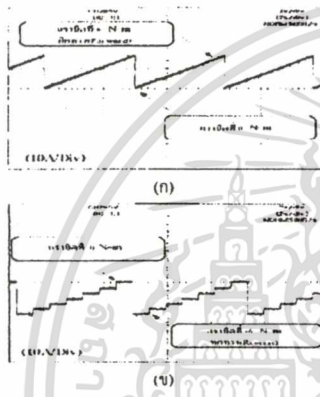
4.1 ภาคคอนเวอร์เตอร์ (Converter) จะประกอบด้วยไอจีบีทีคอตแบบฟูลบริดจ์ เป็นวงจรที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไดโอดเรกติไฟด์ และใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบอะแดปทีฟ (Adaptive) และใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จุดเชื่อมต่อป้อนกลับมาสร้างเป็นแรงดันอ้างอิง ซึ่งหลักการทำงานของวงจรมีอยู่ด้วยกัน 2 โหมด คือ โหมด 1 เรียกว่าโหมดรีก

1.5 kW, 130 V, 18 A ทิศขดลวดกระตุ้น 180 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบพิกัด 3 * 2.2 kW, 4 ขั้ว, 220 V, 9 A, 1450 rpm โดยทดสอบที่ความถี่ฐานของอินเวอร์เตอร์ 50 Hz และได้ทำการเปรียบเทียบ

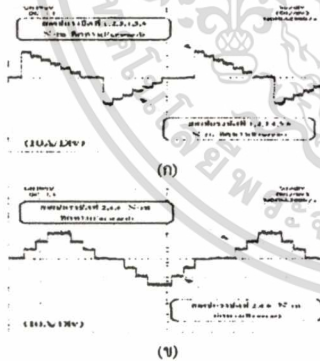
ขนาดของกระแสแม่เหล็กกับค่าแรงบิดที่ได้ด้วยเครื่องวัดไดนามอมิเตอร์ (Dynamometer) และทั้งที่กระแสสลับคิกซ์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไว้



รูปที่ 9 ระบบการจำลองโหนดภายใต้การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน



รูปที่ 10 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของ Load Emulator ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์ (ก)ทดสอบทิศทาง Forward และ (ข) ทดสอบทิศทาง Reverse



รูปที่ 11 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของ Load Emulator ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์ โดยกำหนดการทำงาน

อยู่ในโหมด มอเตอร์วิ่ง (Motoring Mode) ทั้งสองทิศทาง (ความเร็วค่ากำลังโครนิส)

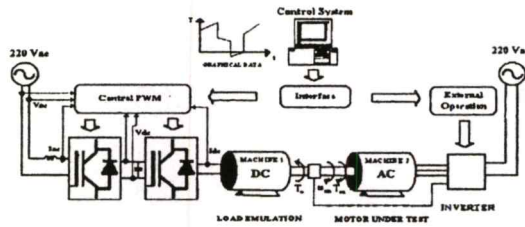


รูปที่ 12 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของ Load Emulator ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์ โดยทิศทาง Forward การทำงานอยู่ในโหมด มอเตอร์วิ่ง(ความเร็วค่ากำลังโครนิส) และทิศทาง Reverse จะทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด (Generator Mode) (ความเร็วสูงค่ากำลังโครนิส)

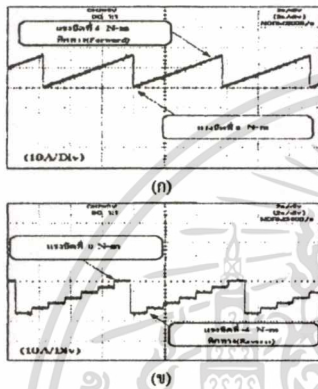
จากรูปที่ 10 เป็นกระแสและแรงดันของ Load Emulator โดยมีฟังก์ชันโหนดที่มีการควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์ จงรูปได้แสดงการสร้างโหนดแบบเชิงเส้นและโหนดไม่เชิงเส้น ซึ่งในการทดสอบสามารถควบคุมแรงบิดได้ทั้งสองทิศทาง โดยไม่คำนึงถึงทิศทางของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ จากรูปที่ 11 เป็นกระแสและแรงดันของ Load Emulator โดยลักษณะการทดสอบสามารถสร้างแรงบิดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทั้งสองทิศทาง ถึงแม้มอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานในทิศทาง Forward ชุดทดสอบสามารถสร้างแรงบิดโดยมีทิศทางตรงกันข้ามและลักษณะเดียวกันเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานในทิศทาง Reverse ชุดทดสอบสามารถสร้างแรงบิด โดยมีทิศทางหมุนตรงข้าม ซึ่งการทดสอบทำงานแบบนี้จะอยู่ใน

1.5 kW, 130 V, 18 A ทักซ์ควอเตอร์ระดับ 180 V และมีมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบที่ 3 * , 2.2 kW, 4 ขั้ว, 220 V, 9 A , 1450 rpm โดยทดสอบที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ 50 Hz และได้ทำการเปรียบเทียบ

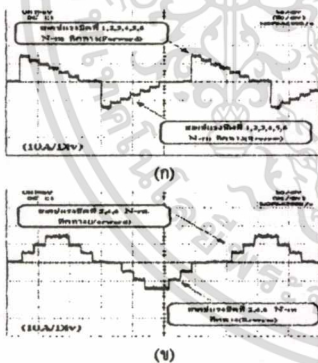
ขนาดของกระแสแอมเพอร์กับค่าแรงบิดที่ได้ด้วยเครื่องวัดไดนามมิเตอร์ (Dynamometer) และคงที่กระแสฟลักซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไว้



รูปที่ 9 ระบบการจำลองโหลดภายใต้การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน

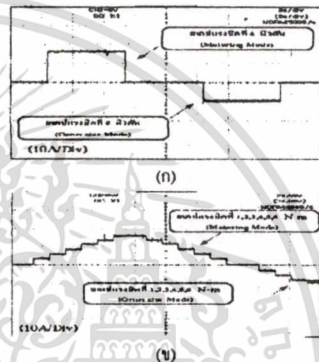


รูปที่ 10 รูปคลื่นกระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์ (ก)ทดสอบทิศทาง Forward และ (ข) ทดสอบทิศทาง Reverse



รูปที่ 11 รูปคลื่นกระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์ โดยกำหนดการทำงาน

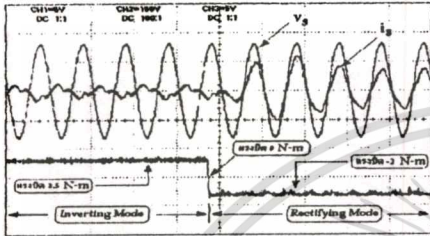
อยู่ในโหมด มอเตอร์รีจ (Motoring Mode) ทั้งสองทิศทาง (ความเร็วต่ำกว่าเชิงโครนิส)



รูปที่ 12 รูปคลื่นกระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์ โดยทิศทาง Forward การทำงานอยู่ในโหมดมอเตอร์รีจ (ความเร็วต่ำกว่าเชิงโครนิส) และทิศทาง Reverse จะทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิด (Generator Mode) (ความเร็วสูงกว่าเชิงโครนิส)

จากรูปที่ 10 เป็นกระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator โดยมีฟังก์ชันโหลดที่มีการควบคุมการทำงานจากคอมพิวเตอร์ จากรูปได้แสดงการสร้างโหลดแบบเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในการทดสอบสามารถควบคุมแรงบิดได้ทั้งสองทิศทาง โดยไม่คำนึงถึงทิศทางของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ จากรูปที่ 11 เป็นกระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator โดยลักษณะการทดสอบสามารถสร้างแรงบิดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ทั้งสองทิศทาง คือเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานในทิศทาง Forward ชุดการทดสอบสามารถสร้างแรงบิดโดยมีทิศทางหมุนตรงกันข้ามและลักษณะเดียวกันเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานในทิศทาง Reverse ชุดการทดสอบสามารถสร้างแรงบิด โดยมีทิศทางหมุนตรงกัน ซึ่งการทดสอบทำงานแบบนี้จะอยู่ใน

โหมดมอเตอร์ (Motoring Mode) จากรูปที่ 12 เป็นกระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator โดยลักษณะการทดสอบสามารถสร้างแรงบิดให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากรูปได้แสดงการสร้างแรงบิดทั้งสองทิศทาง ให้มีการทำงานทั้งสองโหมด คือ โหมดแรกจะเป็นทิศทาง Forward พบว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบจะมีความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะอยู่ในโหมดการทำงานแบบมอเตอร์ (Motoring Mode). ส่วนทิศทางที่สองจะเป็นทิศทาง Reverse ซึ่งพบว่ามีมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบ จะมีความเร็วกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะอยู่ในโหมดการทำงานแบบเครื่องกำเนิด (Generator Mode) โดยระบบทั้งสองสามารถควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 13 แรงดันและกระแสด้านอินพุตเอซีไลน์ของชุดการจำลอง โหลด หรือการสร้างแรงบิดทดสอบ i_a (10A/Div), v , (200V/Div), (20ms/Div)

รูปที่ 13 เป็นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตเอซีไลน์ของภาคคอนเวอร์เตอร์ของชุดการจำลองโหลดขณะที่มีการสร้างแรงบิดทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ จากรูปได้มีการสร้างแรงบิดสองแบบฉับพลันทั้งสองทิศทาง จะพบว่าขณะที่มีการทดสอบระบบการทำงานของภาคคอนเวอร์เตอร์ ที่อาศัยหลักการควบคุมแบบกระแส จะมีการทำงานด้วยอินพุต 2 โหมดคือโหมดอินเวอร์ตติ้งและโหมดเรกติไฟริง โดยโหมดแรก ชุดจำลองโหลดจะสร้างแรงบิดทิศทางบวกขนาด 2.5 N-m โดยโหมดนี้จะมีการคืนพลังงานเข้าสู่ระบบแหล่งจ่าย จะทำให้กระแสอินพุตมีเฟสตรงข้ามกับแรงดันเอซีไลน์ 180 องศา (Out of Phase) ขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานในสภาวะเป็นมอเตอร์ (ความเร็วต่ำกว่าซิงโครนัส) ส่วนลักษณะโหมดที่สองจะเป็นการสร้างแรงบิดทิศทางลบขนาด 3 N-m โดยโหมดนี้จะเป็นการส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟสู่แรงดันไฟฟ้าที่กระแสตรง จะทำให้กระแสอินพุตมีเฟสตรงกับแรงดันเอซีไลน์ที่ 0 องศา (Inphase) ขณะที่มอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานในสภาวะเป็นเครื่องกำเนิด (ความเร็วสูงกว่าซิงโครนัส)

6. สรุป

บทความนี้ได้ออกแบบชุดจำลองโหลดสำหรับการทดสอบ

สมรรถนะที่คืบคลานขึ้นอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีการพัฒนาในการนำเอาพลังงานที่คืนกลับมาของระบบ ขณะที่มีการทดสอบกลับคืนเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง ซึ่งปกติพลังงานนี้จะถูกถ่ายเทให้กับความต้านทาน (Resistor Braking) และอีกประการสามารถออกแบบชุดการจำลองโหลดในการสร้างแรงบิดที่เหมาะสมกับประเภทของโหลดชนิดต่างๆทั้งแบบโหลดต่อเนื่องและโหลดไม่ต่อเนื่อง ด้วยการควบคุมฟังก์ชันแรงบิดจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งการทดสอบสามารถทำได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน จากการทดสอบพบว่าระบบควบคุมให้ผลตอบสนองทางด้านไดนามิกที่เร็วและมีเสถียรภาพขณะเปลี่ยนโหลดแบบต่างๆ หรือทั้งสามารถให้แรงบิดทดสอบที่ถูกต้องและแม่นยำและสะดวกกว่าระบบที่ใช้ทดสอบแบบทั่วไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.R. Hewson, M.Sumner, G.M. Asher and P.W.Wheeler " Dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of AC inverters " Power Engineering Journal February 2000 No. 21
- [2] C.R. Hewson, G.M.Asher, M.Sumner " A Dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of ac inverters " Conference Publication No. 456 IEE 1998
- [3] Z.Hakan Akpolat, Greg M. Asher, Jon C. Iare "Experimental Dynamometer Emulation of Non-linear Mechanical Loads ", IEEE 1998 No. 532
- [4] Mohan, Undeland and Robbins, 1995, "Power Electronic", John Wiley and sons.



ธีรศักดิ์ ศรีวิทย์ จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี พ.ศ.2542 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ สจล.

กัทธ ศรีจันทร์พงศ์ จบการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปี พ.ศ.2540 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ สจล.

วิจิตร กิณเรศ สำเร็จการศึกษา วศ.บ. และวศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก สจล. และ Ph.D. จาก University of Nottingham ประเทศอังกฤษ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ชุดจำลองโหลดทางกลเพื่อการทดสอบสมรรถนะของฟีดแบ็ค
เอ็มอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

Mechanical Load Emulator for Performance Testing of
PWM Inverter Fed Induction Motors

ชารังศักดิ์ ศรีวิเศษ วิจิตร กิมเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาชุดการจำลองโหลดทางกลเพื่อการทดสอบสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำตามลักษณะของโหลดชนิดต่างๆ ซึ่งการทดสอบสามารถทำได้สะดวกและง่าย สำหรับหาสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์และเครื่องกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ลักษณะการออกแบบได้ใช้คุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นชุดจำลองโหลด ซึ่งจะต่อโดยตรงกับเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีตัวขับเอ็มอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ชุดการจำลองโหลดได้มีการป้อนกลับของกระแสทางด้านเอาต์พุตเพื่อควบคุมแรงบิด ซึ่งมีการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ โดยสามารถป้อนฟังก์ชันการทำงานตามโหลดประเภทต่างๆ ด้วยการควบคุมที่เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งในการทดสอบสามารถควบคุมแรงบิดได้ทั้งสองทิศทางทำให้เมชชีนเหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบสามารถทำงานในโหมดมอเตอร์และเจนเนอเรเตอร์ได้ จากการทดสอบชุดสร้างโหลดสามารถให้สมรรถนะที่แม่นยำในสภาวะคงตัวและผลตอบสนองทางด้านไดนามิกต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดที่ไว จึงให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

The paper proposes design and development of a mechanical load emulator for performance testing of PWM inverter fed induction motors under various load characteristics. This facilitates for the simplicity and convenience for evaluating performance of the inverter and induction machines under test. This is based on dc motor characteristics acting as the load emulator. The dc motor shaft is directly coupled with the induction motor shaft driven by the PWM inverter. The output current of the load emulator is fed back for controlling torque via PC. The various load functions can be accessed with requirements. In the test the torque can be controlled, without regarding rotation of test machines resulting in capability of motoring and generating operation. The load emulator provides both accurate performance under steady state condition and fast dynamic load response which appears satisfactory.

1. บทนำ

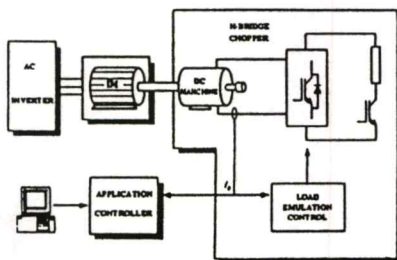
ในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำใน
ง านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับ

เคลื่อน โดยมีวิธีการควบคุมได้หลายแบบ เช่น แบบ V/F
แบบ Sensorless และ Vector Control เป็นต้น [1]-[2] ซึ่ง
ลักษณะการเลือกใช้งานจะเป็นตามประเภทของโหลดแต่

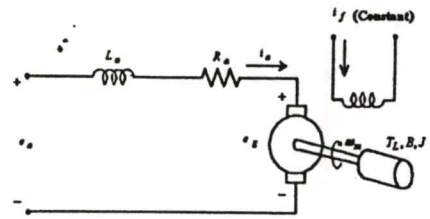
ละชนิด ในการจำลองโหลดเพื่อการทดสอบอินเวอร์เตอร์ก่อนการติดตั้งใช้งานจริงเป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งการจำลองโหลด ในปัจจุบันได้มีการจำลองแรงบิดแบบคงที่ โดยใช้การสร้างโหลดทางไฟฟ้า (MGset) และการสร้างโหลดทางกล ซึ่งจะพบว่า การสร้างโหลดจะให้ผลตอบสนองของระบบทางด้านไดนามิกที่ช้าและมีข้อจำกัดอยู่หลายประการพร้อมแรงบิดที่เกิดขึ้นจะให้ค่าที่ผิดพลาดและความไว้วางใจน้อยลง ในขณะที่มีการทดสอบกับโหลดหลายๆแบบ ดังนั้นในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในภาระที่โหลดต่างกันจำเป็นต้องคำนึงถึงสมรรถนะและผลตอบสนองของอินเวอร์เตอร์ต่อระบบที่ใช้ในการควบคุม ดังนั้นงานวิจัยได้แก้ปัญหาโดยการออกแบบและสร้างชุดการจำลองโหลดให้มีสมรรถนะและผลตอบสนองของระบบทางด้านไดนามิกที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด และบางโหลดที่มีการปรับเปลี่ยนค่าลำบาก สิ่งเหล่านี้จะประกอบด้วยผลที่กระทบกระเทือนของโหลดต่อคาบเวลา โดยเฉพาะโหลดที่มีความต้องการแรงบิดสูงๆ

2. ทฤษฎีหลักการทำงานของการทำงานจำลองโหลด

จากรูปที่ 1 แสดงระบบชุดการจำลองโหลดที่สามารถทดสอบสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งในชุดจำลองโหลดจะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่เพลาของมอเตอร์จะยึดติดกับเพลาของมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นโหลดจำลอง โดยมีการควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกฟังก์ชันในการควบคุมโหลดได้หลายแบบโดยมีการควบคุมกระแสแบบป้อนกลับ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพพร้อมให้คุณลักษณะของแรงบิดที่ถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 1 ระบบการจำลองโหลด



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ดีซี

$$e_a = e_g + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

$$e_g = K_a \phi \omega_m \quad (2)$$

$$T_e = T_L + B \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3)$$

$$T_e = K_a \phi i_a \quad (4)$$

e_a คือ แรงดันตกคร่อมอาร์เมเจอร์ (Volt)

e_g คือ แรงดัน Back EMF (Volt)

R_a คือ ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์

i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (Ampere)

L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์เมเจอร์ (Henry)

K_a คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์

ϕ คือ ฟลักซ์ต่อขั้ว (Webers)

ω_m คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rad/sec)

T_e คือ แรงบิดแม่เหล็กที่เกิดจากมอเตอร์ (N-m)

J คือ ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อย (N-m²)

B คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (N-m/ (rad/sec))

T_L คือ แรงบิดจากโหลด (N-m)

เมื่อสมการที่ (1),(2),(3) และ (4) แปลงให้อยู่ในรูปฟังก์ชันโอนย้าย จะได้สมการต่อไปนี้

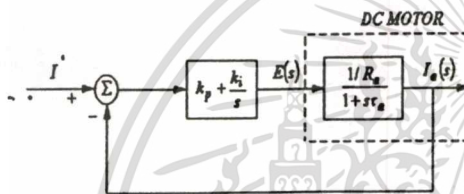
$$i_a(s) = \frac{E_g(s) - E_g(s)}{R_a + sL_a} \quad (5)$$

โดยกำหนดให้ $\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$ ค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า

ไฟฟ้า (Electrical time constant of Amature Current)

3.การออกแบบวงจร ป้อนกลับของกระแสแอมเพอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในงานวิจัยได้มีการป้อนกลับของกระแสที่มีความสัมพันธ์กับแรงบิด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วผลการตอบสนองช้าเมื่อเทียบกับรูปการควบคุมกระแส ดังนั้นการออกแบบการป้อนกลับของกระแสพิจารณาจากรูปที่ 3 การหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมสามารถคำนวณจากสมการที่ (6),(7) แสดงเงื่อนไขอัตราขยายวงรอบเปิดที่ความถี่ตัดข้าม ω_0 (Corner frequency) ของตัวควบคุม PI จะต้องน้อยกว่า ความถี่ตัดข้าม



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการป้อนกลับแบบกระแสของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

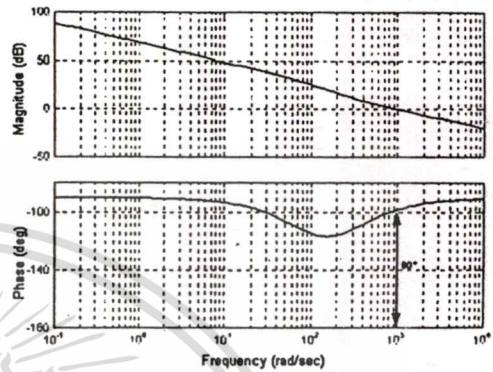
$$\left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \times \frac{1/R_a}{1 + s\tau_a} \bigg|_{s=j\omega_0} = 1 \quad (6)$$

$$\omega_{cn} = \frac{k_i}{k_p} < \omega_0 \quad (7)$$

การควบคุมกระแสซึ่งจะต้องมีผลตอบสนองที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด ดังนั้นเราต้องเลือกความถี่ตัดข้ามที่มีค่ามาก แต่ก็ไม่อาจจะมากจนเกินไปเพราะอาจจะส่งผลกระทบต่ออัตราขยายของสัญญาณรบกวนได้[4] ถ้าให้เวลาขึ้น(Rise time)มีค่าประมาณ 2.2 ms สามารถประมาณความถี่ตัดข้ามได้เท่ากับ 1000 rad/s สำหรับการเลือกค่าความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI เราจะพิจารณาเสถียรภาพเป็นหลักโดยระบบต้องมีการชดเชยเฟสเพียงพองานวิจัยนี้ให้ค่า $\omega_{cn} = \frac{k_i}{k_p} = 250 \text{ rad/s}$

เมื่อแทนลงในสมการที่ (6),(7) โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้จำลองโหลดดังต่อไปนี้

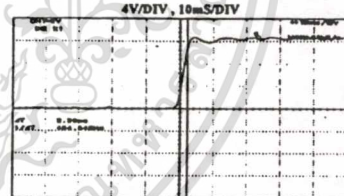
นี้ 1.5 kW, $V_a = 130 \text{ V}$, $V_f = 180 \text{ V}$, $I_a = 15 \text{ A}$,
 $R_a = 1.429 \Omega$, $R_f = 180 \Omega$, $L_a = 15 \text{ mH}$,
 $\tau_a = 10.46 \text{ ms}$



$$k_p = 15 \text{ (V/A)}, \quad k_i = 3687 \text{ (V/As)}$$

รูปที่ 4 แผนภาพโบคของระบบควบคุมกระแสที่ได้ทำการออกแบบ

จากรูปที่ 4 แสดงแผนภาพโบคที่ได้จากการออกแบบระบบป้อนกลับของกระแส พบว่ามีส่วนชดเชยเฟสเท่ากับ 80 องศา ซึ่งเพียงพอสำหรับเสถียรภาพของระบบควบคุม

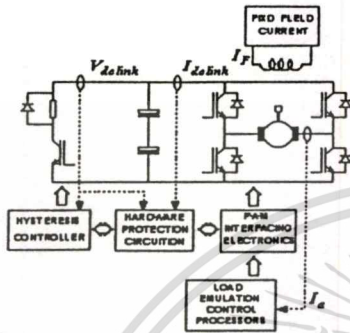


รูปที่ 5 รูปคลื่นสัญญาณผลตอบสนองของกระแสแอมเพอร์ชุดจำลองโหลดขณะมีการ Step Load ที่ 5 N-m

จากรูปที่ 5 แสดงสัญญาณของกระแสจากการจำลองโหลดที่มีการ Step load ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของช่วงทรานเซียนของกระแสที่ได้จะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการออกแบบ (Rise time $\approx 2.2 \text{ ms}$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปกระแสที่ได้ออกแบบมีการทำงานที่ถูกต้อง

4. การออกแบบวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

จากรูปที่ 6 แสดงระบบวงจรกำลังของชุดการจำลองโหลดที่มีการตรวจจับแรงดันที่คิซิปัส ตรวจจับกระแสคิซิปัสและการป้องกันกลับของกระแสแอมเจอร์ [2]

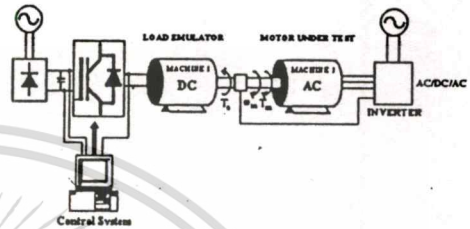


รูปที่ 6 ระบบการทำงานของวงจรกำลัง

ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกขั้ว กระตุ้น ในงานวิจัยได้ใช้วงจรกำลังแบบ H-Bridge Converter มาใช้ในการควบคุมการทำงานโดยสามารถทำงานได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการควบคุมแรงบิด ทางด้านอุปกรณ์การสวิตช์ได้ใช้ Intelligent Power Module(IPM) ซึ่งใช้ IGBTทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ โดยใช้ความถี่ในการสวิตช์ที่ 10 kHz แบบเทคนิคพิคัปบลิวเอ็มยูนิโพลาร์ [3] ซึ่งจะทำความถี่ที่เกิดขึ้นที่แรงดันทางด้านเอพท์พุทเป็น 2 เท่าของความถี่ของอุปกรณ์สวิตช์แต่ละตัว ความถี่ที่สูงขึ้นจะสามารถลดrippleของแรงบิดได้ และในวงจรได้ออกแบบชุดป้องกันกระแสเกินทางด้านอินพุทและเอพท์พุทเพื่อป้องกันความเสียหายของวงจร และขณะที่มอเตอร์กระแสตรงมีสภาวะ

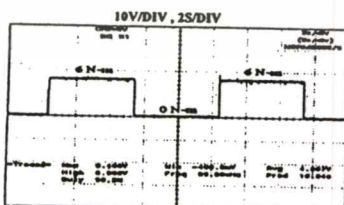
การทำงานเป็นGeneratorจะมีการคืนพลังงานทางกลเป็นพลังงานทางไฟฟ้าซึ่งจะต้องมีการถ่ายเทจากพลังงานให้อยู่ในรูปความร้อนโดยผ่านความต้านทานที่มีวัตต์สูงๆ โดยอาศัยวงจรชอปเปอร์ด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์รีซิส

5. ผลการทดลอง

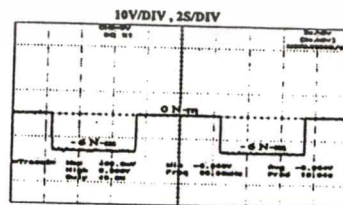


รูปที่ 7 ระบบการจำลองโหลดที่นำเสนอในการทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน

รูปที่ 7 เป็นระบบการทดสอบของชุดการจำลองโหลด โดยมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการจำลองจะเป็นแบบกระแสตรงขนาด 1.5 kW, 130 V, 18 A พิกัดขดลวดกระแสตรงแยก 180 V และมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบพิกัด 3 ϕ , 2.2 kW, 4 ขั้ว, 220 V, 9 A, 1450 rpm โดยทดสอบที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ 50 Hz และได้ทำการปรับเทียบขนาดของกระแสแอมเจอร์กับค่าแรงบิดที่ได้จากเครื่องวัดไดนามอมิเตอร์ (Dynamometer) และในการป้องกันกระแสฟลัดจ์ของ Load Emulator จะมีค่าคงที่และสมมุติว่าไม่มีการอิมิตของฟลักซ์ ดังนั้นจากสมการที่ 4 แสดงให้เห็นว่ากระแสแอมเจอร์จะมีความสัมพันธ์กับแรงบิดโดยตรง โดยกระแสแอมเจอร์ 2.5 A เทียบได้กับแรงบิด 1 N-m จากผลการทดลองแสดงดังรูป



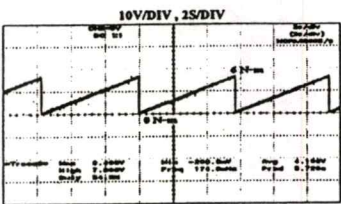
(ก)



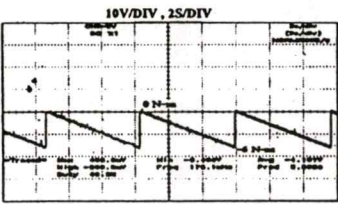
(ข)

รูปที่ 8 กระแสแอมเจอร์ของ Load Emulator แบบสเตปโหลดเมื่อเมชรีน ภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์

(ก) ทิศทาง Forward (ข) ทิศทาง Reverse



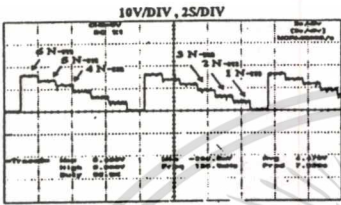
(ก)



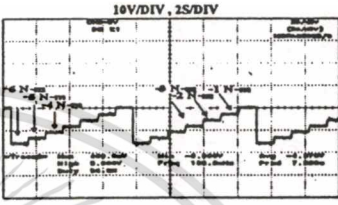
(ข)

รูปที่ 9 กระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator แบบฟันเลื่อยเมื่อแมชชีนภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์

(ก) ทิศทาง Forward (ข) ทิศทาง Reverse



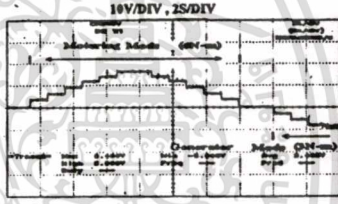
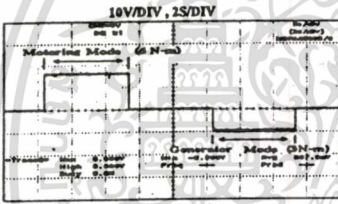
(ก)



(ข)

รูปที่ 10 กระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator สเตปโหลดแบบฟันเลื่อยเมื่อแมชชีน ภายใต้การทดสอบทำงาน

เป็นมอเตอร์ (ก) ทิศทาง Forward (ข) ทิศทาง Reverse

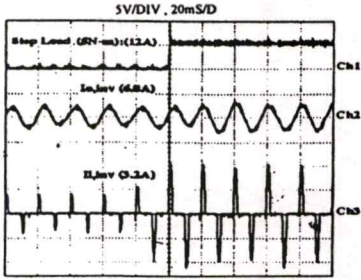


รูปที่ 11 กระแสแอมเพอร์ของ Load Emulator เมื่อแมชชีนเหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำงานเป็นมอเตอร์

(ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครไนส์และเป็นเครื่องกำเนิด (ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครไนส์)

ในรูปที่ 8 เป็นรูปคลื่นกระแสของ Load Emulator แบบ สเตปโหลดหรือโหลดแบบคงที่ ฟังก์ชันการทำงานให้ แรงบิดมีค่าคงที่ที่ลักษณะของโหลดประเภทนี้เช่น สาย พานลำเลียง รอลาก เป็นต้น ในรูปที่ 9. เป็นรูปคลื่น กระแสของ Load Emulator แบบฟันเลื่อย ฟังก์ชันการ ทำงานให้แรงบิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องขณะที่ ความเร็วรอบมีค่าคงที่ ลักษณะของโหลดประเภทนี้เช่น เครื่องรีดเหล็ก เครื่องม้วนลวด เครื่องคัดผลไม้ เป็นต้น ในรูปที่ 10 เป็นรูปคลื่นกระแสของ Load Emulator แบบ โหลดไม่ต่อเนื่อง ฟังก์ชันการทำงานให้แรงบิดมีการ เปลี่ยนแปลงลักษณะของโหลดประเภทนี้เช่น เครื่องถั นเครื่องโม่หิน เป็นต้น ในรูปที่ 11 เป็นรูปคลื่นกระแสของ Load Emulator ในการสร้างแรงบิดทั้งสองทิศทางซึ่งทิศ ทางแรกจะเป็นทิศทาง Forward พบว่าแมชชีนเหนี่ยวนำ ภายใต้การทดสอบจะมีความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็ว

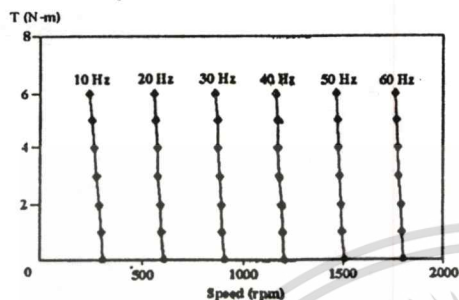
ซิงโครไนส์ ซึ่งจะอยู่ในโหมดการทำงานแบบมอเตอร์ (Motoring Mode). ส่วนทิศทางที่สองจะเป็นทิศทาง Reverse ซึ่งจะพบว่าแมชชีนเหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบ จะมีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครไนส์ ซึ่งจะอยู่ใน โหมดการทำงานเป็นแบบเครื่องกำเนิด (Generator Mode) โดยลักษณะการทดสอบเพื่อดูสมรรถนะและคุณสมบัติด้านผลตอบสนองในรูปการคืนพลังของอินเวอร์ เตอร์ (Dynamic Braking)



รูปที่ 12 รูปสัญญาณกระแสแอมเพอร์ที่ชุดจำลองโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ch1)และสัญญาณกระแสอาห์พุท(Ii,Inv)
(Ch2)และอินพุท(Io,Inv)(Ch3)ของอินเวอร์
เตอร์ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการ
Step load ที่ 5 N-m



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ Torque – Speed Curve

- ของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบ

จากรูปที่ 13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบเมื่อมีการจำลองโหลดทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนความถี่ค่าต่างๆ จะพบว่าช่วงการทำงานที่ความถี่ต่ำเช่น 10Hz เมื่อทำการเพิ่มภาระโหลดจะทำให้ความเร็วรอบลดต่ำลงมาก(ความชันจะน้อย) เนื่องจากเมื่อความถี่ต่ำจะทำให้ผลของแรงดันตกคร่อมความต้านทานในขดลวดสเตเตอร์มีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กลดลง ดังนั้นแรงบิดจะมีค่าลดลง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาในย่านความถี่ต่ำ จึงเลือกโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เป็น Boost Voltage เพื่อเพิ่มแรงดันตกคร่อม(Voltage Drop)ที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ และในช่วง V/f คงที่ความถี่ต่ำกว่า 50Hz พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Torque และ Speed จะเป็นเชิงเส้นมากขึ้นตามทฤษฎี อย่างไรก็ตามขนาดกำลังของ Load Emulator น้อยกว่าพิกัดกำลังของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การทดสอบทำให้แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำยังไม่ถึงค่าพิกัด ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจะมีการเพิ่มขนาดพิกัดกำลังของ Load Emulator เพื่อเพิ่มขนาดของแรงบิดและเพิ่มการป้องกันกลับของความเร็วย้อนให้กับ Load Emulator ซึ่งจะสามารถควบคุมความเร็วรอบให้มีการเปลี่ยนแปลงตามสถานะแรงบิดแบบต่างๆได้

6. สรุป

บทความนี้ได้ออกแบบชุดการจำลองโหลดสำหรับการทดสอบสมรรถนะที่ควบคุมความเร็วอินเวอร์เตอร์ของระบบการขับเคลื่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของโหลด ชนิดต่างๆทั้งแบบโหลดต่อเนื่องและโหลดไม่ต่อเนื่องซึ่งจะพบว่าระบบควบคุมให้ผลตอบสนองที่เร็วและมีเสถียรภาพขณะเปลี่ยนโหลดแบบต่างๆพร้อมทั้งสามารถให้แรงบิดทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำและสะดวกกว่าระบบที่ใช้ทดสอบแบบทั่วไป



รูปที่ 14 ดันแบบชุดการจำลองโหลด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.R. Hewson, M.Sumner, G.M. Asher and P.W.Wheeler " Dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of AC inverters " Power Engineering Journal February 2000 No. 21
- [2] C.R. Hewson,G.M.Asher,M.Sumner " A Dynamic mechanical load emulation test facility to evaluate the performance of ac inverters " Conference Publication No. 456 IEE 1998
- [3] Mohan, Undeland and Robbins, 1995, "Power Electronic", John Wiley and sons.
- [4] ชูเกียรติ นิธิโยธาน " ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบควบคุมกระแสไร้เซนเซอร์วัดความเร็วห้มอเตอร์เหนี่ยวนำ " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

ประวัติผู้เขียน

ธำรงค์ศักดิ์ ศรีวิเศษ เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน 2519 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2542 ปี ในด้านการทํางาน ปีพ.ศ. 2543-2544 ทํางานบริษัท เอพีวาย เอ็นจิเนียริง จำกัด ปี พ.ศ. 2544-2545 ทํางาน บริษัท ซีบีอี เอ็นจิเนียริง จำกัด และปี พ.ศ. 2545-ถึงปัจจุบัน ทํางานบริษัท พีเอ็มซี เอ็นจิเนียริง ดีเวลลอปเม้นต์ จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้