

การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งถูกป้อนด้วยพีคดับเบิลยูเอ็ม

อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

PERFORMANCE EVALUATION OF A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR  
FED BY A SINGLE-PHASE PWM INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-020-192

การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งถูกป้อนด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม  
อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

PERFORMANCE EVALUATION OF A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR  
FED BY A SINGLE-PHASE PWM INVERTER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-020-192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE EVALUATION OF A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR  
FED BY A SINGLE-PHASE PWM INVERTER



BENYATHIP Phiphitsuthon

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

KMITL-2015-EN-M-020-192

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2015**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งถูกป้อนด้วย  
พีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว  
Thesis Title Performance Evaluation of a Three-phase Induction Motor Fed  
by a Single-phase PWM Inverter  
นักศึกษานางสาวเบญญทิพย์ พิพิธสุนทร  
รหัสประจำตัว 55601071  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-020-192

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.สมภาพ	ผลไม่
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์ สัจจา
ดร.พุทธร	เศวตสกุลานนท์
ดร.ภพ	จันทร์เจริญสุข
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งถูกป้อนด้วยพี- ดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส
นักศึกษา	นางสาวเบญญทิพย์ พิพิธสุนทร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ถูกป้อนด้วยพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์ เพื่อประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ พิจารณากระแสแรงดัน ประสิทธิภาพ ความเร็ว และแรงบิด มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสามารถทำงานด้วยการป้อนพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมเข้าที่ขั้วของมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแส และขนาดไม่สมดุล ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนประกอบด้วยส่วนลำดับบวกและลำดับลบนำไปสู่การเกิดแรงบิดกระเพื่อม นอกจากนี้พิจารณาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมาใช้ต่อคร่อมเฟสหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสได้ และให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเพิ่มเทคนิคการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบนุ่มนวลเพื่อช่วยลดกระแสในช่วงเริ่มหมุนมอเตอร์ โดยเปลี่ยนอัตราเร่งในช่วงเริ่มหมุนมอเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไปในช่วงเริ่มหมุนมอเตอร์ โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบขนาด 2 แรงม้า, 50เฮิร์ตซ์, 4 ขั้ว, 220/380โวลต์, 6.1/3.4 แอมป์, ต่อแบบ เดลต้า ความถี่สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์คงที่ที่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ความถี่ของอินเวอร์เตอร์เปลี่ยนตามค่า 20 เฮิร์ตซ์, 30 เฮิร์ตซ์, 40 เฮิร์ตซ์, 50 เฮิร์ตซ์, 60 เฮิร์ตซ์ด้วยอัตราแรงดันโวลต์ต่อเฮิร์ตซ์คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Performance Evaluation of A three-Phase Induction Motor Fed By A Single-Phase PWM Inverter
<b>Student</b>	Miss Benyathip Phiphitsuthon
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

## ABSTRACT

This thesis proposes performance evaluation of a 3-phase induction motor supplied with 1-phase type bipolar PWM inverter such as current, voltage, efficiency, speed and torque. Generally, a delta connected 3 phase induction motor can be operated with a 1-phase Inverter by connected a capacitor with suitable value across the motor terminals. As, a consequence, there are phase shift among voltages, thus producing resultant rotating magnetic field consisting of positive and negative components leading to electromagnetic torque pulsation. Moreover, suitable capacitance value to allow the motor operated with a 1-phase PWM inverter, which gives a better performance compared with 1-phase AC supply to 3-phase induction motor. In addition, soft start with variable voltage and frequency is given in order to reduce starting current by changing acceleration time. The soft start can reduce energy loss in starting motor period. The ratings of an under test 3-phase induction motor rating are 2HP, 50Hz, 4Pole, 220/380 volts, 6.1/3.4 A, delta/star connected. The switching frequency of the inverter is 5 kHz and the inverter is varied at 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz and 60Hz with constant volt-per-hertz control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดมา และขอขอบคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์วิณโณ ยีดำ นายชวพร บำรุงพลกษั นายวัชรินทร์ พรหมคุณ อาจารย์ประหยัด กองสุข และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องวิจัยPMC (ห้อง ECC 405) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยคำแนะนำและหยิบยื่นความช่วยเหลือให้ตลอดเวลาที่อยู่ที่ห้องวิจัยนี้

สุดท้ายนี้การศึกษาระดับปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีไม่ได้หากขาดการสนับสนุนจากนางปรารถนา พิพิธสุนทร (มารดา) และนายอภิสิทธิ์ พิพิธสุนทร (บิดา) ของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณความดีอื่นที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เบญญทิพย์ พิพิธสุนทร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส.....	4
2.2.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	5
2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส.....	5
2.2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส.....	6
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส.....	8
2.3.1 วงจรสมมูลเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	8
2.3.2 วงจรสมมูลเหนี่ยวนำโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	12
2.4 สนามแม่เหล็กหมุน.....	14
2.4.1 พิจารณาป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	14
2.4.2 พิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนเนื่องจากไฟฟ้า 2 เฟสที่ป้อนเข้าสู่สเตเตอร์.....	17
2.4.3 พิจารณาป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส.....	18
2.4.4 พิจารณาป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การต่อตัวเก็บประจุเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน.....	20
2.5.1 การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนจากตัวเก็บประจุ.....	20
2.6 การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสมาใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส .....	22
2.7 การคำนวณแรงบิดเอาต์พุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ 1 เฟส.....	27
2.8 ประเภทภาระทางกล.....	29
บทที่ 3 ระบบทฤษฎีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์.....	33
3.1 บทนำ.....	33
3.2 เอซี ซอปเปอร์.....	33
3.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรซอปเปอร์.....	33
3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบวงจรซอปเปอร์.....	37
3.2.3 ผลการประเมินสมรรถนะมอเตอร์.....	38
3.2.4 สรุป.....	40
3.3 อินเวอร์เตอร์.....	41
3.4 อินเวอร์เตอร์แบบพุก-พูล.....	41
3.5 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว.....	43
3.6 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	44
3.7 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์.....	45
3.8 การสวิตช์แบบไซน์พีคดับเบิ้ลยูเอ็ม.....	47
3.8.1 ช่วงมอดูเลตเป็นเชิงเส้น ( $0 \leq m_a \leq 1$ ).....	48
3.8.2 ช่วงการมอดูเลตแบบโอเวอร์มอดูเลต.....	49
3.9 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์.....	51
3.10 ขอบเขตการทำงานของระบบขับเคลื่อน.....	54
3.11 หลักการทำงานการเริ่มต้นเครื่องแบบนิ่มนวล.....	55
บทที่ 4 ขั้นตอนและการออกแบบการทดลอง.....	57
4.1 บทนำ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 สร้างสัญญาณสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	57
4.3 วงจรขั้วเกิด.....	59
4.4 วงจรกำลัง.....	60
4.5 การออกแบบการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล.....	62
4.6 การทดสอบขั้วโพลด์โดยใช้รอก.....	63
บทที่ 5 ผลการจำลองและการทดสอบ.....	66
5.1 บทนำ.....	66
5.2 ผลการคำนวณค่าตัวเก็บประจุ.....	67
5.3 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์.....	68
5.3.1 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 20Hz ตัวเก็บประจุ 100 $\mu$ F.....	68
5.3.2 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ 70 $\mu$ F.....	72
5.3.3 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ 50 $\mu$ F.....	75
5.3.4 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F.....	79
5.3.5 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F.....	83
5.4 ผลการทดลองเมื่อเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล.....	90
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก ก โค้ดที่ใช้แก่สมการเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ.....	97
ภาคผนวก ข อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	99
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปลักษณะสมบัติของภาระทางกล.....	29
3.1 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าด้านนอกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์.....	46
5.1 พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส.....	5
2.2 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าขดลวดอามาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	8
2.3 วงจรสมมูลที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	8
2.4 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนมาอยู่ที่สเตเตอร์ที่ความเร็ว $n_r = 0$ .....	10
2.5 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนมายังสเตเตอร์ด้วยความเร็ว $n_r > 0$ .....	11
2.6 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส .....	11
2.7 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	12
2.8 วงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส.....	23
2.9 อิมพีแดนซ์อนุพันธ์ลำดับบวกของมอเตอร์.....	24
2.10 อิมพีแดนซ์อนุพันธ์ลำดับลบของมอเตอร์.....	24
2.11 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 1 (ก) ทิศทางแรงดึงภาระทางกล (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว .....	30
2.12 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 2 (ก) ลักษณะการใส่มวลน้ำหนัก ทิศทางแรงดึงภาระทางกลและทิศทางการหมุน (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว.....	31
2.13 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 3 (ก) ทิศทางแรงดึงภาระทางกลและทิศทางการหมุน (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว.....	31
2.14 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 4 (ก) ลักษณะภาระทางกลและทิศทางการหมุน (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว.....	32
3.1 วงจรชอปเปอร์ที่มีโหลดตัวต้านทาน.....	34
3.2 แสดงวงจรชอปเปอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ.....	35
3.3 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
3.4 แสดงสัญญาณขั้วเกิดสวิตซ์ทั้ง 2 ตัว.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่เข้ามอเตอร์.....	38
3.6 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลภายในขดลวดทั้ง 3 เฟส.....	39
3.7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ 1 เฟส กับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง.....	49
3.8 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ 1 เฟส กับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง.....	40
3.9 วงจรพุก-พุลอินเวอร์เตอร์.....	42
3.10 อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส (ก.) แบบฮาล์ฟบริดจ์ (ข.) แบบฟูลบริดจ์.....	44
3.11 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	45
3.12 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์.....	47
3.13 การสร้างสัญญาณสวิตช์แบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม.....	48
3.14 รูปคลื่นพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน.....	51
3.15 แสดงสวิตช์ในโหมดจ่ายกำลังงาน.....	51
3.16 แสดงสวิตช์ในโหมดคืนพลังงาน.....	52
3.17 แสดงสวิตช์ในโหมดจ่ายกำลังงาน.....	52
3.18 แสดงสวิตช์ในโหมดคืนพลังงาน.....	53
3.19 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ใน 4 ควอดแรนต์.....	53
3.20 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วเมื่อมอเตอร์ถูกจ่ายด้วย VSI แบบ 53 ความถี่คงที่.....	54
3.21 การชดเชยแรงดันเพื่อรักษาแรงบิดคงที่เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายความถี่ต่ำ.....	55
3.22 อัตราการเร่งและการหน่วงของการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล.....	56
4.1 แสดงภาพสัญญาณไบโพลาร์ที่ได้จากการจำลองเพื่อนำไปซิปเกต.....	57
4.2 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณไบโพลาร์.....	58
4.3 แสดงสัญญาณไบโพลาร์ที่ออกจากพอร์ต ePWM1A และ ePWM1B.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงเดดไทม์สัญญาณสวิตช์ $4\mu s$ .....	59
4.5 แสดงไดอะแกรมภายในไอซีออปโตไอโซเลเตอร์ TLP 250.....	59
4.6 แสดงวงจรขับนำสัญญาณเกต.....	60
4.7 แสดงไดอะแกรมวงจรภายในเพาเวอร์โมดูล PM25RSB120.....	61
4.8 แสดงวงจรกำลังที่ใช้ในการทดสอบ.....	61
4.9 บล็อกไดอะแกรมการเริ่มต้นเครื่องแบบนิมนวล.....	62
4.10 ชุดทดสอบโพลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้รอก.....	63
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและโพลด.....	64
4.12 วงจรที่ใช้ในการทดสอบขั้วภาระทางกลโดยใช้รอก.....	65
5.1 ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ต่างๆซึ่งได้จากการคำนวณ.....	67
5.2 ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง.....	68
5.3 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโพลดทางกล ที่ความถี่ $20Hz$ ตัวเก็บประจุ $100\mu F$ .....	69
5.4 แรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ $20Hz$ ตัวเก็บประจุ $100\mu F$ .....	69
5.5 (ก.) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข.)รูปคลื่นแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ ที่ความถี่ $20Hz$ ตัวเก็บประจุ $100\mu F$ .....	70
5.6 กราฟเปรียบเทียบผลค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ $20Hz$ ตัว เก็บประจุ $100\mu F$ .....	70
5.7 กราฟเปรียบเทียบผลค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ $20Hz$ ตัวเก็บประจุ $100\mu F$ .....	71
5.8 สเปกตรัมกระแส $I_m$ ที่ความถี่ $20Hz$ ค่าตัวเก็บประจุ $100\mu F$ .....	71
5.9 สเปกตรัมแรงดัน $V_m$ ที่ความถี่ $20Hz$ ค่าตัวเก็บประจุ $100\mu F$ .....	72
5.10 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโพลดทางกล ที่ความถี่ $30Hz$ ตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 แรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	73
5.11 แรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	73
5.12 (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข.) รูปคลื่นแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ ที่ ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	73
5.13 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บ ประจุ $70\mu F$ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล .....	74
5.14 กราฟเปรียบเทียบผลค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	74
5.15 สเปกตรัมกระแส $I_m$ ที่ความถี่ 30Hz ค่าตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	75
5.16 สเปกตรัมกระแส $V_m$ ที่ความถี่ 30Hz ค่าตัวเก็บประจุ $70\mu F$ .....	75
5.17 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ $50\mu F$ .....	76
5.18 แรงดันตกคร่อมขดลวดทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ $50\mu F$ .....	76
5.19 (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข) รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ ที่ ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ $50\mu F$ .....	77
5.20 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บ ประจุ $50\mu F$ .....	77
5.21 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ $50\mu F$ .....	78
5.22 สเปกตรัมกระแสไหลเข้ามอเตอร์ $I_m$ ที่ความถี่ 40Hz ค่าตัวเก็บประจุ $50\mu F$ .....	78
5.23 สเปกตรัมแรงดันที่เข้ามอเตอร์ $V_m$ ที่ความถี่ 40Hz ค่าตัวเก็บประจุ $50\mu F$ .....	79
5.24 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโหลดทางกล ที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ $40\mu F$ .....	80
5.25 แรงดันตกคร่อมขดลวดทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ $40\mu F$ .....	80
5.26 (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข) รูปคลื่นแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ ที่	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F .....	81
5.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บ ประจุ 40 $\mu$ F .....	81
5.28 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F .....	82
5.29 สเปกตรัมกระแสไหลเข้ามอเตอร์ $I_m$ ที่ความถี่ 50Hz ค่าตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F .....	82
5.30 สเปกตรัมแรงดันที่เข้ามอเตอร์ $V_m$ 50Hz ค่าตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F .....	83
5.31 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโหลดทางกล ที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F .....	83
5.32 แรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F .....	84
5.33 (ก.) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข.) รูปคลื่นแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ ที่ ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F .....	84
5.34 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 60Hz .....	85
5.35 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F .....	85
5.36 สเปกตรัมกระแสไหลเข้ามอเตอร์ $I_m$ ที่ความถี่ 60Hz ค่าตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F .....	86
5.37 สเปกตรัมแรงดันที่เข้ามอเตอร์ $V_m$ ที่ความถี่ 60Hz ค่าตัวเก็บประจุ 35 $\mu$ F .....	86
5.38 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส และอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	87
5.39 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ ค่าความถี่ต่างๆ.....	87
5.40 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ ค่าความถี่ต่างๆ.....	88
5.41 การเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็วที่ค่าความถี่ต่างๆ.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.42 รูปคลื่นกระแส (ก) สตาร์ทโดยตรง (ข) ซอฟท์สตาร์ทที่เวลา 2 วินาที .....	90
5.43 รูปคลื่นกระแสและแรงดันซอฟต์แวร์สตาร์ทที่ความถี่ 50 Hz ที่เวลา (ก) 1.5 วินาที (ข) 2 วินาที (ค) 2.5 วินาที และ (ง) 3 วินาที.....	91
5.44 รูปคลื่นกระแสสตาร์ทโดยตรง (ก) ค่าตัวเก็บประจุ $40\mu F$ (ข) ค่าตัวเก็บประจุ.....	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## ที่มาและความสำคัญ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าใช้สำหรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ซึ่งเป็นเครื่องต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ให้ทำงานตามวัตถุประสงค์ โดยถือได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเป็นประเภทของโหลด (Load) หรืออุปกรณ์ที่มีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ประเภทอื่นๆ เช่น อุปกรณ์ให้ความร้อน และ อุปกรณ์ให้แสงสว่าง โดยส่วนใหญ่แล้ว มีใช้มากในภาคอุตสาหกรรม หรือผู้ใช้ไฟที่ใช้ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังนั้นมอเตอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่จึงเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสด้วยเช่นกัน สำหรับที่פקอาศัยหรือผู้ใช้ไฟในภาคการเกษตรรายย่อยที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ก็จะใช้ระบบไฟฟ้า 1 เฟส ตลอดจนในถิ่นทุรกันดารชนบทในพื้นที่ห่างไกล ก็มักจะใช้มีแต่ระบบไฟฟ้า 1 เฟสใช้งาน เนื่องจากระบบ 3 เฟสอาจจะไม่คุ้มกับการลงทุนในการขยายเขตบริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของมอเตอร์ ก็จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟสไปด้วยเช่นกันซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้มีข้อดีคือ มีส่วนประกอบน้อย บำรุงรักษาง่าย และราคาไม่สูง

อย่างไรก็ตาม หากผู้ใช้ไฟระบบไฟฟ้า 1 เฟสมีมอเตอร์ไฟฟ้าอยู่แล้ว แต่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ก็จะไม่สามารถนำมาใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟสที่มีอยู่ได้โดยตรง แต่มีความจำเป็นจะต้องใช้มอเตอร์ 3 เฟส ดังกล่าวกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส โดยไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ด้วยเหตุผลใดก็ตาม เช่นสถานที่ที่อยู่ห่างไกลที่จำเป็นจะต้องส่งจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบสายส่งเส้นเดียว (Single wire earth return) [1] และในภายหลังเมื่อมีความคุ้มค่าที่จะขยายระบบส่งจ่ายเป็น 3 เฟส ก็สามารถที่จะปรับเปลี่ยนวงจรควบคุมและใช้มอเตอร์ตัวเดิมได้ ดังนั้นหากสามารถนำมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสที่มีอยู่แล้วมาใช้ได้ ก็ถือว่าเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงวิธีการที่จะสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสดังกล่าวให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ได้มีบทความที่น่าเสนอเรื่องวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวใน [2] - [4]

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน 1 เฟส จะไม่มีแรงบิดเริ่มหมุนเกิดขึ้นเหมือนการจ่ายด้วยระบบไฟฟ้า 3 เฟสเข้ากับขดลวดทั้ง 3 ชุดของมอเตอร์ แต่สามารถทำให้เกิดแรงบิดได้โดยการต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนานกับเฟสใดเฟสหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมอเตอร์ เพื่อให้เกิดการนำหน้า (Leading) ของกระแสเฟสดังกล่าว ดังนั้นมอเตอร์จึงทำงานคล้ายกับมอเตอร์แบบสองเฟสสมดุล (Balance two phase motor) ด้วยเหตุผลนี้ค่าของตัวเก็บประจุจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกใช้เพื่อให้เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ แต่เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกค่าตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับสภาวะทั้งมอเตอร์กำลังเริ่มหมุนและขณะหมุน

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการเพื่อออกแบบหาวิธีการหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟสให้สามารถใช้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟสได้อย่างเหมาะสม โดยพิจารณาถึงความสามารถในการขับโหลด ประสิทธิภาพ ตลอดจนเมื่อนำมอเตอร์ดังกล่าวไปใช้งานในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วด้วยการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่าย โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนออินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์มาเป็นตัวควบคุมและขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสมีข้อดีคือสามารถปรับแรงดันและความถี่ได้ ทำให้ประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังที่ได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับบ่อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง และด้วยปัญหาที่สืบเนื่องมาจากการควบคุมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยคอนแทคเตอร์แบบสตาร์ทโดยตรงทำให้เกิดปัญหาเรื่องกระแสในขณะเริ่มหมุนมอเตอร์สูง 5-7 เท่า ทำให้การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรไม่ว่าจะเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ คอนแทคเตอร์ สายไฟ ฯลฯ ต้องเผื่อไว้เพื่อรองรับกระแสที่สูงมากในช่วงเริ่มต้นหมุน การเกิดปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ และปัญหานี้ยังส่งผลถึงผลกระทบทางกลที่อาจเกิดขึ้นกับมอเตอร์เนื่องจากในช่วงที่กระแสสูงอาจเกิดการกระชากหรือแรงฉุด ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์อื่นๆเสื่อมไวขึ้น ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอเพิ่มเติมเกี่ยวกับการลดกระแสในช่วงเริ่มต้นหมุนมอเตอร์โดยใช้เทคนิคเริ่มเดินเครื่องแบบนุ่มนวล (Soft Starter) มาช่วยแก้ปัญหา

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาและนำเสนอการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์ ซึ่งโดยปกติแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสไม่สามารถทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสได้ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุมาต่อคร่อมขดลวดเฟสหนึ่งของมอเตอร์เพื่อให้เกิดกระแสไหลในขดลวดทำให้เกิดนามแม่เหล็กหมุน และนำหลักการอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์มาใช้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบ

กับจ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสที่สภาวะโหลดเบา รวมถึงการใช้เทคนิคเริ่มเดินเครื่องแบบ  
นุ่มนวลมาช่วยลดกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การวิเคราะห์ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ  
ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส การพิจารณาการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน และระบบขับเคลื่อนมอเตอร์  
เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยได้แนวคิดจากบทความวิชาการ “Three-phase induction motor  
operating from single-phase supply with an electronically controlled capacitor”[1]  
และวิทยานิพนธ์ “การพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อใช้กับไฟเฟสเดียวโดยการต่อแบบแยก  
เฟส”[5] ซึ่งจาก 2 บทความที่กล่าวมานี้ปรับเพียงแรงดันที่ความถี่เดียว ในการวิจัยนี้จึงได้พัฒนาต่อ  
โดยการใช้อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวซึ่งสามารถปรับได้ทั้งขนาดของแรงดันและความถี่ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่ม  
สมรรถนะของมอเตอร์ได้อีกวิธีหนึ่ง และงานวิจัยนี้ยังเพิ่มเติมในส่วนของการเริ่มเดินเครื่องแบบ  
นุ่มนวลเพื่อลดขนาดกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดโอกาสที่จะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ  
รวมถึงลดผลกระทบทางไฟฟ้าและและทางกล ซึ่งมีส่วนช่วยประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งาน  
ของอุปกรณ์

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เริ่มศึกษาจากทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิจารณาการ  
เกิดสนามแม่เหล็กหมุน และระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส เพื่อนำมา  
วิเคราะห์และทำความเข้าใจและสามารถขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส  
ชนิดโพลาร์ได้ โดยพิจารณาที่สภาวะโหลดเบา รวมถึงการวิเคราะห์หาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม  
กับความถี่ต่างๆ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังศึกษาการเริ่มเดินเครื่องแบบนุ่มนวลอีกด้วย โดยพิกัด  
ของมอเตอร์ที่ศึกษา คือ มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก พิกัด 2 แรงม้า แรงดัน  
220/380 V กระแส 6.1/3.5 A ความถี่ 50 Hz จำนวนขั้วแม่เหล็ก 4 P ความเร็วรอบ 1420 รอบต่อ  
นาที

## บทที่ 2

# ทฤษฎีมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

### 2.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำถือว่าเป็นเครื่องต้นกำลังที่มีความสำคัญมากในงานอุตสาหกรรม ซึ่งเครื่องต้นกำลังในงานอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดเป็น มอเตอร์เหนี่ยวนำ และใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่า 90% ของเครื่องจักรกลที่ใช้สำหรับเป็นเครื่องต้นกำลัง เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส คือ โครงสร้างแข็งแรง ทนทาน บำรุงรักษาง่าย การเริ่มเดินไม่ยุ่งยาก การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าน้อยและมีราคาถูก ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เรียกชื่อตามระบบไฟฟ้าที่ใช้ เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะ โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีข้อดีคือ สามารถควบคุมทิศทางการหมุน ความเร็วรอบ แรงบิด ฯลฯ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สนามแม่เหล็กหมุน การสร้างสนามแม่เหล็กหมุน รวมถึงการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

### 2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส [6]

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยอาศัยหลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งสนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed,  $n_s$ ) แต่ตัวโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส โดยที่การพันขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมือนกับ การพันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งจะมีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กหมุนและปกติจะอยู่ที่สเตเตอร์ และด้านตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีแท่งตัวนำซึ่งเมื่อสนามแม่เหล็กหมุนจากสเตเตอร์เคลื่อนตัดผ่านจะเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังนั้นการที่เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าความเร็วของตัวโรเตอร์ต้องไม่เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อวงจรทางด้านตัวโรเตอร์ครบวงจรจะเกิดกระแสไหลในขดลวดตัวนำที่ตัวโรเตอร์ ดังนั้นเมื่อมีกระแสไหลในแท่งตัวนำที่อยู่ภายในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ในขณะที่ความเร็วรอบของตัว

โรเตอร์น้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะทิศไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน

### 2.2.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ ส่วนโรเตอร์ไม่ได้รับพลังงานไฟฟ้าโดยตรงแต่จะได้ออกมาจากการเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเรียกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำตามซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

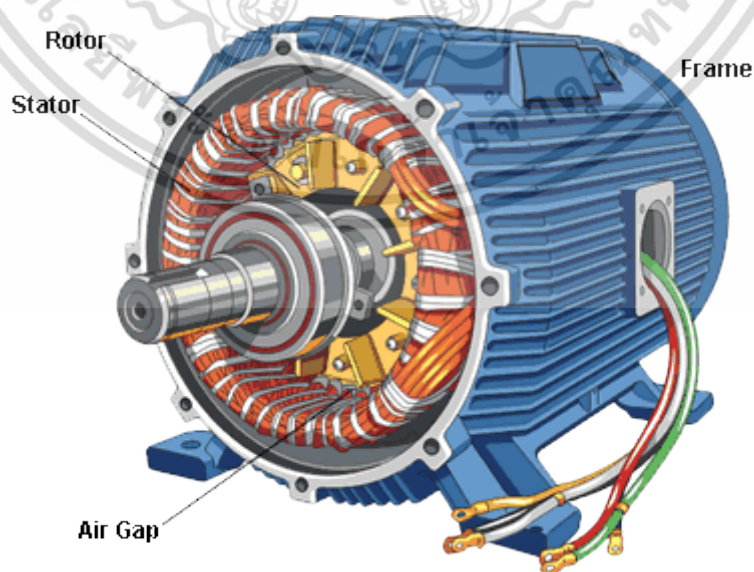
1. มอเตอร์ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) ซึ่งเป็นแบบที่ไม่ต้องการใช้วงแหวนหรือสลีปริง (slip ring)
2. มอเตอร์ชนิดขดลวดพันหรือชนิดวาวด์หรือมอเตอร์สลีปริง มอเตอร์แบบนี้จะมีจำนวนขั้วที่ตัวโรเตอร์เท่ากับจำนวนขั้วที่ตัวสเตเตอร์ และใช้วงแหวนติดไว้ที่โรเตอร์ เพื่อนำปลายของขดลวดที่พันอยู่บนตัวโรเตอร์ออกมาข้างนอกวงจร

### 2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

โดยทั่วไป มอเตอร์ทุกประเภทจะมีส่วนประกอบหลักคล้ายกัน 2 ส่วน คือ

1. สเตเตอร์หรือส่วนที่อยู่กับที่
2. โรเตอร์หรือส่วนที่เคลื่อนที่

แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส ใช้หลักการเดียวกับซิงโครนัสมอเตอร์ โดยทำจากแผ่นเหล็กบางอัดซ้อนเข้าด้วยกันแล้วทำเป็นวงสล็อตเพื่อใส่ขดลวด โดยมีจำนวนขั้วแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งด้วยความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าในตัวโรเตอร์ซึ่งเป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนำ

โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. โรเตอร์แบบกรงกระรอก ประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก เพราะโรเตอร์ชนิดนี้ผลิตง่ายและทนที่สุด โดยมอเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ ที่เรียกว่าแผ่นเหล็กลามิเนต ซึ่งจะเป็แผ่นเหล็กชนิดเดียวกับสเตเตอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นกลม ๆ เซาะร่องผิวภายนอกเป็นร่องโดยรอบ ตรงกลางจะเจาะรูสำหรับสวมเพลลา และจะเจาะรูรอบ ๆ รูตรงกลางที่สวมเพลลาทั้งนี้เพื่อช่วยให้ในการระบายความร้อน และยังทำให้โรเตอร์มีน้ำหนักเบาลง เมื่อนำแผ่นเหล็กไปสวมเข้ากับแกนเพลลาแล้วจะได้เป็นแกนเหล็กโรเตอร์ หลังจากนั้นก็จะใช้แท่งตัวทองแดงหรือแท่งอะลูมิเนียมหล่ออัดเข้าไปในร่องของแกนเหล็กโรเตอร์เข้าไปวางทั้งสองด้านด้วยวงแหวนตัวนำทั้งนี้เพื่อให้ขดลวดครบวงจรไฟฟ้าหรืออาจนำแกนเหล็กโรเตอร์เข้าไปในแบบพิมพ์แล้วฉีดอะลูมิเนียมเหลวเข้าไปในร่อง ก็จะได้อะลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องจนเต็มและจะได้ขดลวดตัวนำแบบกรงกระรอกฝังอยู่ในแกนเหล็ก ขดลวดในโรเตอร์นั้นจะมีลักษณะของตัวนำที่เป็นแท่งซึ่งอาจใช้ทองแดง หรืออะลูมิเนียมประกอบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะคล้ายกรงนกหรือกรงกระรอก

ข. โรเตอร์แบบใช้ขดลวดพันรอบตัวหมุน โรเตอร์ชนิดนี้จะมีส่วนประกอบคล้ายๆกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก คือ มีแกนเหล็กที่เป็นแผ่นลามิเนตอัดเข้าด้วยกันแล้วสวมเข้าที่เพลลา แต่จะแตกต่างกันตรงที่ขดลวด จะเป็นเส้นลวดชนิดที่หุ้มด้วยน้ำยาฉนวนอื่นาเมลพันลงไปในร่องสล็อตของโรเตอร์จำนวน 3 ชุด ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับที่พันบนสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟสแล้วต่อวงจรขดลวดเป็นแบบสตาร์ โดยนำปลายทั้ง 3 ที่เหลือต่อเข้ากับวงแหวนตัวนำ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถต่อวงจรของขดลวดของโรเตอร์เข้ากับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ที่อยู่ภายนอกตัวมอเตอร์ เพื่อการปรับค่าความต้านทานของโรเตอร์ ซึ่งจะสามารถควบคุมความเร็วของโรเตอร์ได้

### 2.2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับไม่มีวงจรเชื่อมต่อกันระหว่างตัวโรเตอร์และสเตเตอร์

กระแสที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ที่ไหลอยู่ภายในแท่งตัวนำเกิดจากสนามแม่เหล็กที่มาจากตัวสเตเตอร์ซึ่งได้รับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก โดยขนาดแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนตัวนำของตัวโรเตอร์ และทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับลำดับเฟสแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ โดยจะหมุนตัดกับตัวนำโรเตอร์ที่วางอยู่ในสลอตที่โรเตอร์ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำของโรเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่โรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่ตัวนำและทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ โดยที่ความเร็วรอบของโรเตอร์จะหมุนต่ำกว่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_s = \frac{2\omega}{P} \quad (2.1)$$

$$N_s = \frac{60\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{P} \quad (2.2)$$

$N_s$  คือความเร็วซิงโครนัส (rpm)

$\omega_s$  คือความเร็วซิงโครนัส (rap/s)

$\omega$  คือความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า (rad/s)

$f$  คือความถี่ของแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Hz)

$P$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

สลลิป (slip) คืออัตราส่วนของความเร็วที่เกิดจากความเร็วสลลิปต่อความเร็วซิงโครนัส โดยที่ความเร็วสลลิปมีค่าเท่ากับความต่างระหว่างความเร็วสเตเตอร์และความเร็วโรเตอร์

$$s = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} \quad (2.3)$$

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (2.4)$$

$s$  คือ สลลิป

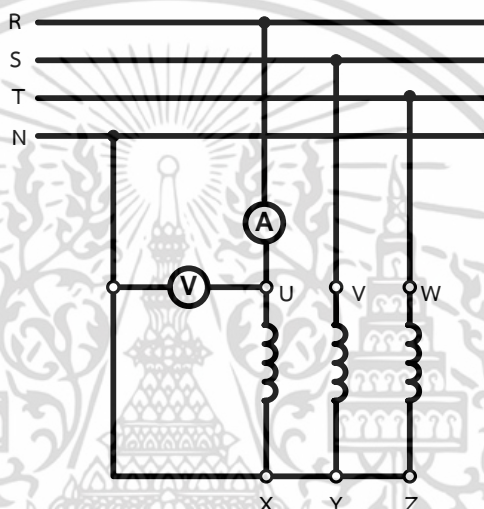
$\omega_{sl}$  คือ ความเร็วสลลิป

$\omega_r$  คือ ความเร็วโรเตอร์

## 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส (Equivalent Circuit of three-Phase Induction Motor) [6]

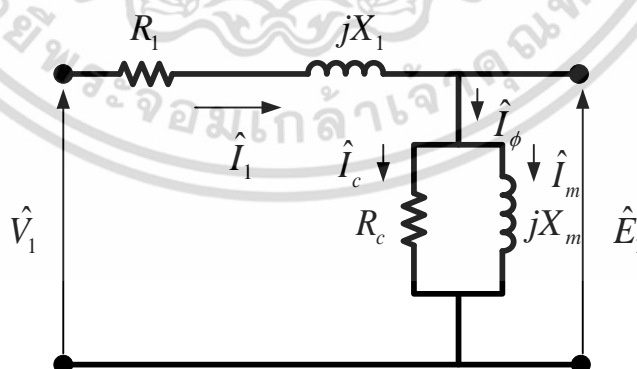
### 2.3.1 วงจรสมมูลเหนี่ยวนำของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า 3 เฟส

เมื่อป้อนไฟฟ้า 3 เฟสเข้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อแสดงเป็นการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าขดลวดในแต่ละเฟสดังแสดงตามรูปที่ 2.2 ซึ่งขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟสต่อแบบสตาร์



รูปที่ 2.2 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าขดลวดอามาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลของสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสดังแสดงตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\hat{I}_\phi$  คือกระแสกระตุ้น (Exciting current) (A)

$\hat{I}_m$  คือส่วนประกอบของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current component) (A)

$I_c$  คือส่วนประกอบของกระแสที่สูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss current component) (A)

$\hat{I}_1$  คือกระแสที่สเตเตอร์ (Stator load current) (A)

จากวงจรสมมูลสามารถคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำที่ตัวสเตเตอร์ (Stator induced emf:  $E_1$ ) จากการป้อนเข้าแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ( $V_1$ ) ได้จากสมการ

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_1 + \hat{I}_1 (R_1 + jX_1) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $V_1$  คือแรงดันที่สเตเตอร์ (Stator terminal voltage) (V)

$E_1$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำคางที่ (Stator induce emf)

$I_1$  คือกระแสที่ขดลวดสเตเตอร์ (Stator current) (A)

$R_1$  คือค่าความต้านทานที่สเตเตอร์ (Stator resistance) ( $\Omega$ )

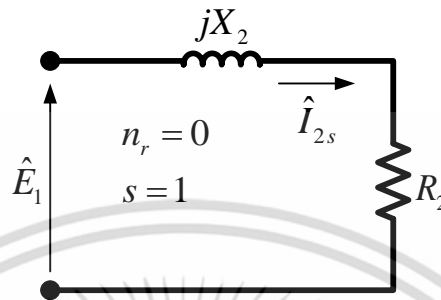
$X_1$  คือค่าStator leakage reactance

โดยที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวสเตเตอร์เกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก ( $\phi_R$ ) เคลื่อนตัวตัดผ่านขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E_1 = 4.44 f N_{ph} K_w \phi_R \quad (2.6)$$

ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลที่สเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.3 โดยแสดงผลของวงจรแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของค่าความต้านทานการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core lose resistance,  $R_c$ ) และค่าความเหนี่ยวนำสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing reactance,  $X_m$ )

ทางด้านตัวโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งทำงานโดยอาศัยการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแท่งตัวนำที่โรเตอร์ ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่งความเร็วโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับศูนย์  $n_r = 0$  ฉะนั้น  $\hat{E}_{2s} = \hat{E}_1$  จะได้วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถ่านโอนมาอยู่ที่สเตเตอร์ที่ความเร็วโรเตอร์เท่ากับศูนย์แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถ่านโอนมาอยู่ที่สเตเตอร์ที่ความเร็ว  $n_r = 0$

$$\hat{E}_{2s} = a\hat{E}_{rotor} \quad (2.7)$$

$$\hat{I}_{2s} = \frac{\hat{I}_{rotor}}{a} \quad (2.8)$$

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}}$$

$$Z_{2s} = a^2 \frac{\hat{E}_{rotor}}{\hat{I}_{rotor}}$$

$$Z_{2s} = a^2 Z_{rotor}$$

$$Z_{2s} = R_2 + jX_2 \quad (2.9)$$

เมื่อ  $a$  : Transformer ratio

$E_{2s}$  : Rotor induced emf transfer to stator

$I_{2s}$  : Rotor current transfer to stator

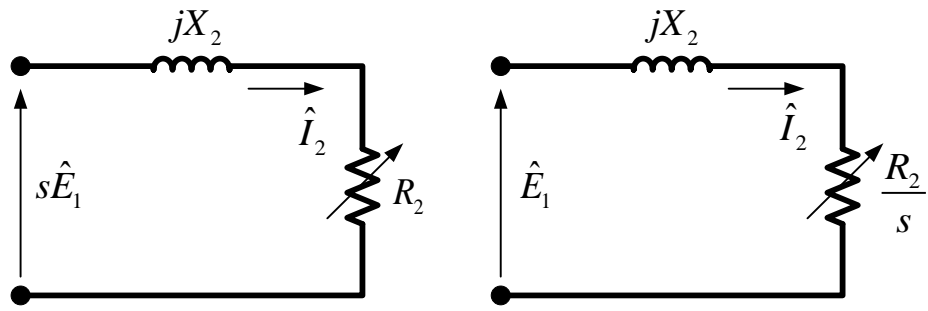
$Z_{2s}$  : Rotor impedance transfer to stator

$R_2$  : Rotor resistance transfer to stator

$X_2$  : Rotor leakage reactance transfer to stator at  $s = 1$  (ที่สภาวะโรเตอร์หยุดนิ่ง)

และกรณีโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วใดๆ โดยที่ความเร็วโรเตอร์มีค่ามากกว่าศูนย์  $n_r > 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่ถ่ายโอนมายังสเตเตอร์ด้วยความเร็ว  $n_r > 0$

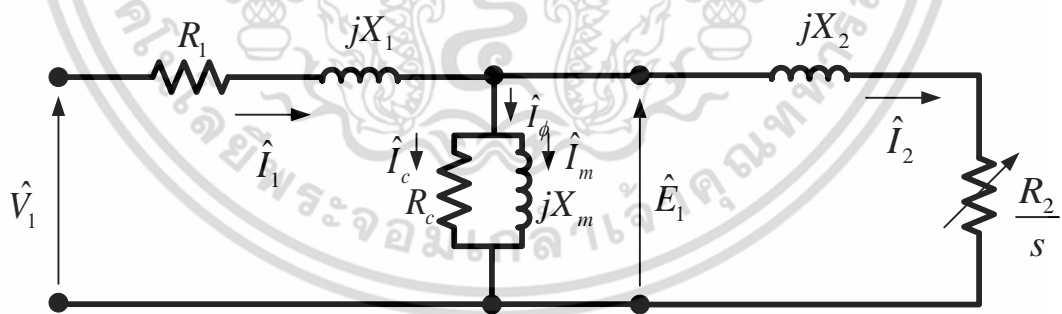
ดังนั้น 
$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_1 \tag{2.10}$$

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \tag{2.11}$$

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \tag{2.12}$$

$$\hat{I}_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{R_2 + jsX_2} = \frac{s\hat{E}_1}{R_2 + jsX_2} = \frac{\hat{E}_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} = \hat{I}_2 \tag{2.13}$$

จากที่กล่าวมาสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งสามารถถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์จากตัวโรเตอร์มาอยู่ที่ตัวสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะเขียนเป็นค่าต่อเฟส



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

ซึ่งกระแสไฟฟ้าป้อนเข้า ( $I_1$ ) จะประกอบด้วยกระแส 2 ส่วน คือ กระแสทางด้านตัวโรเตอร์ที่ถ่ายโอนมาที่สเตเตอร์ ( $I_2$ ) และกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ( $I_\phi$ )

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 + \hat{I}_\phi \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ( $I_\phi$ ) ยังประกอบด้วยกระแสที่มาจาก Magnetizing current component ( $I_m$ ) และ Core loss current component ( $I_c$ ) ซึ่งในวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสจะแทนค่าของพารามิเตอร์ของวงจรเป็น จากวงจรสมมูลรูปที่ 2.6 จะได้ Magnetizing reactance ( $X_m$ ) และ Core lose resistance ( $R_c$ )

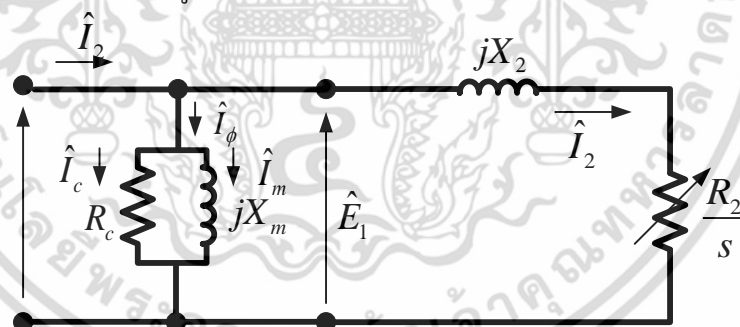
$$\hat{I}_\phi = \hat{I}_c + \hat{I}_m = \frac{\hat{E}_1}{R_c} + \frac{\hat{E}_1}{jX_m} \quad (2.15)$$

โดยที่ค่าของ  $R_c$  และ  $X_m$  เป็นค่าคงที่ เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า ค่า  $R_c$  และ  $X_m$  จะเปลี่ยนเนื่องจากคุณสมบัติของแกนเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่จุดทำงานของมอเตอร์

### 2.3.2 วงจรสมมูลเหนี่ยวนำโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

(Proximated Equivalent Circuit of Three-Phase Induction Motor)

ในกรณีที่ต้องการหาค่าวงจรสมมูลโดยประมาณซึ่งเป็นการย้ายส่วนที่เป็นกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กและส่วนของความสูญเสียในแกนเหล็กให้ติดกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าป้อนเข้าดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ค่ากระแสป้อนเข้า ( $I_1$ )

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 + \hat{I}_\phi \quad (2.16)$$

ค่ากระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ( $I_\phi$ ) ในกรณีวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

$$\hat{I}_\phi = \frac{\hat{E}_1}{R_c} + \frac{\hat{E}_1}{jX_m} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่ากระแสต้านโรเตอร์ที่โอนย้ายมาอยู่ทางด้านสเตเตอร์ ( $\hat{I}_2$ )

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) + j(X_1 + X_2)} \quad (2.18)$$

เมื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังส่งผ่านช่องอากาศ ( $P_g$ ) จะได้ดังสมการที่ 2.19

$$P_g = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.19)$$

ซึ่งสามารถหาค่า Electromagnetic torque ( $T_e$ ) ได้จาก

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} P_g = \frac{1}{\omega_s} \times 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.20)$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{3V_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \times \frac{R_2}{s} \quad (2.21)$$

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ( $P_i$ )

$$P_i = 3V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.22)$$

กำลังไฟฟ้าขาเข้า ( $P_o$ )

$$P_o = T_e \omega_r \quad (2.23)$$

สรุปจากการคำนวณจากวงจรสมมูลโดยประมาณของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ค่าของแรงบิดขาออก ( $T_o$ ) จะเท่ากับแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด ( $s_{\max,t}$ ) ได้จาก

$$S_{\max,t} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดสูงสุดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ( $T_{e,max}$ ) จากสมการ

$$T_{e,max} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{\sqrt{3|V_1|^2 (R_1^2 + (X_1 + X_2)^2)}}{\left( R_1 + \left( R_1^2 + (X_1 + X_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (2.25)$$

ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าป้อนเข้าและแรงบิดที่ค่าความเร็วต่างๆของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเป็นแบบใด เป็นวงจรสมมูลแบบมาตรฐานหรือแบบประมาณ

## 2.4 สนามแม่เหล็กหมุน [5]

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับทำงานโดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กหมุน คือเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับที่มากกว่า 1 เฟสให้กับขดลวดสเตเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน หรือในทางกลับกันถ้าหมุนขั้วแม่เหล็กภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าจะเลื่อนเฟสกันตามตำแหน่งของขดลวดที่พันบนสเตเตอร์สล็อตซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนเช่นกัน เรียกลักษณะนี้ว่าการวางตัวของarmature winding

โดยปกติเมื่อเราป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสเข้าไปยังขดลวดสเตเตอร์ 2 เฟส คือมีขดลวดจำนวน 2 ชุดวางห่างกัน 90 องศา จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในลักษณะ forward field และ backward field โดยที่สนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุดมีขนาดเท่ากัน เป็นผลให้หักล้างกันหมด ทำให้สนามแม่เหล็กลัพธ์มีค่าเท่ากับศูนย์

ดังนั้นการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมาใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส เพื่อให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสามารถทำงานได้ จึงต้องสร้างสนามแม่เหล็กหมุนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ซึ่งป้อนเข้าสู่สเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส

### 2.4.1 พิจารณาป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เข้าไปยังขดลวดสเตเตอร์ 3 ชุดที่วางห่างกัน 120 องศา

$$I_a = I_p \cos \omega t \quad (2.26)$$

$$I_b = I_p \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_b = I_p \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.28)$$

จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กในแต่ละเฟส

$$F_A = F_p \cos \omega t \cos \theta \quad (2.29)$$

$$F_B = F_p \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \quad (2.30)$$

$$F_C = F_p \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \quad (2.31)$$

จาก 
$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \quad (2.32)$$

จะได้ 
$$F_A = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta) \quad (2.33)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$  อยู่ในเทอมของ  $F_A^+$  (Forward field) และ  $\frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta)$  อยู่ในเทอมของ  $F_A^-$  (Backward field) จากสมการจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด มีทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{F_p}{2}$  ดังนั้น  $F_A = F_A^+ + F_A^-$

เมื่อพิจารณาเฟส B

$$F_B = \frac{F_p}{2} [\cos[(\theta - 120^\circ) - (\omega t - 120^\circ)] + \cos[(\theta - 120^\circ) + (\omega t - 120^\circ)]]$$

$$F_B = \frac{F_p}{2} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)]$$

$$F_B = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ) \quad (2.34)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$  อยู่ในเทอมของ  $F_B^+$  (Forward field) และ  $\frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta + 120^\circ)$  อยู่ในเทอมของ  $F_B^-$  (Backward field) จากสมการจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด มีทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{F_p}{2}$  ดังนั้น  $F_B = F_B^+ + F_B^-$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาเฟส C

$$F_C = \frac{F_p}{2} [\cos[(\theta + 120^\circ) - (\omega t + 120^\circ)] + \cos[(\theta + 120^\circ) + (\omega t + 120^\circ)]]$$

$$F_C = \frac{F_p}{2} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 120^\circ)]$$

$$F_C = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.35)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$  อยู่ในเทอมของ  $F_C^+$  (Forward field) และ  $\frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta - 120^\circ)$  อยู่ในเทอมของ  $F_C^-$  (Backward field) จากสมการจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด มีทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{F_m}{2}$  ดังนั้น  $F_C = F_C^+ + F_C^-$

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ Forward field} \quad F^+ &= F_A^+ + F_B^+ + F_C^+ \\ F^+ &= \frac{3}{2} F_p \cos(\theta - \omega t) \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \text{ Backward field} \quad F^- &= F_A^- + F_B^- + F_C^- \\ F^- &= \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta + 120^\circ) + \frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta - 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\text{จาก} \quad \cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} F^- &= \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos 120^\circ - \sin(\theta + \omega t) \sin 120^\circ] \\ &+ \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos(-120^\circ) - \sin(\theta + \omega t) \sin(-120^\circ)] \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} F^- &= \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos 120^\circ] - \frac{F_p}{2} [\sin(\theta + \omega t) \sin 120^\circ] \\ &+ \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos(120^\circ)] + \frac{F_p}{2} [\sin(\theta + \omega t) \sin(120^\circ)] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F^- = \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos 120^\circ] \\ + \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos(120^\circ)]$$

$$F^- = \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + F_p \cos(\theta + \omega t) \cos 120^\circ$$

$$F^- = \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) - \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t)$$

$$F^- = 0$$

ดังนั้นจะเหลือแต่ Forward field ของแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กทั้ง 3 เฟส แสดงว่าสนามแม่เหล็ก หมุนไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีขนาดเท่ากับ  $\frac{3}{2}$  เท่าของสนามแม่เหล็กแต่ละเฟส

#### 2.4.2 พิจารณาสถาณแม่เหล็กหมุนเนื่องจากไฟฟ้า 2 เฟสที่ป้อนเข้าสู่สเตเตอร์ 2 เฟส

$$I_a = I_p \cos \omega t \quad (2.40)$$

$$I_b = I_p \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (2.41)$$

เกิดแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็กดังนี้

$$F_A = F_p \cos \theta \cos \omega t \quad (2.42)$$

$$F_A = \cos(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (2.43)$$

จาก 
$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

จะได้ 
$$F_A = F_p \cos(\theta - \omega t) + F_p \cos(\theta + \omega t) \quad (2.44)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$  อยู่ในเทอมของ  $F_A^+$  (Forward field) และ  $\frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta)$  อยู่ในเทอมของ  $F_A^-$  (Backward field) จากสมการจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด มีทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{F_p}{2}$  เพราะฉะนั้น  $F_A = F_A^+ + F_A^-$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาเฟส B จะได้

$$F_B = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ) + \frac{F_p}{2} [\cos(\theta - 90^\circ) + \cos(\omega t - 90^\circ)]$$

$$F_B = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t - 180^\circ) \quad (2.45)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$  อยู่ในเทอมของ  $F_B^+$  (Forward field) และ  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t - 180^\circ)$  อยู่ในเทอมของ  $F_B^-$  (Backward field) จากสมการจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ชุด มีทิศทางตรงกันข้าม แต่มีขนาดเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{F_p}{2}$  เพราะฉะนั้น  $F_B = F_B^+ + F_B^-$  ฉะนั้นผลรวม Forward Field มีค่าเท่ากับ

$$F^+ = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

$$F^+ = F_p \cos(\theta - \omega t) \quad (2.46)$$

และผลรวม Backward Field มีค่าเท่ากับ

$$F^- = \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t - 180^\circ) \quad (2.47)$$

$$F^- = 0$$

ดังนั้นจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางเดียว และขนาดสนามแม่เหล็กในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน

### 2.4.3 พิจารณาป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

$$F = F_p \cos \theta \cos \omega t$$

$$F = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.48)$$

จะเห็นว่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กมีทั้งทิศทาง Forward Field และ Backward Field ซึ่งมีขนาดเท่ากัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในลักษณะขึ้นๆลงๆ หรือที่เรียกว่า Pulsating field เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.4 พิจารณาป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

$$F_A = F_p \cos \theta \cos \omega t \quad (2.49)$$

$$F_B = F_p \cos(\theta - 120^\circ) \cos \omega t \quad (2.50)$$

$$F_C = F_p \cos(\theta + 120^\circ) \cos \omega t \quad (2.51)$$

จาก 
$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \quad (2.52)$$

จะได้ 
$$F_A = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.53)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t)$  อยู่ในเทอมของ  $F_A^+$  (Forward field) และ  $\frac{F_p}{2} \cos(\omega t + \theta)$  อยู่ในเทอมของ  $F_A^-$  (Backward field)

$$F_B = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t - 120^\circ) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.54)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t - 120^\circ)$  อยู่ในเทอมของ  $F_B^+$  (Forward Field) และ ในเทอมของ  $F_B^-$  (Backward

Field)  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ)$

$$F_C = \frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t + 120^\circ) + \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ) \quad (2.55)$$

โดย  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta - \omega t + 120^\circ)$  อยู่ในเทอมของ  $F_C^+$  (Forward Field) และ ในเทอมของ  $F_C^-$  (Backward

Field)  $\frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)$

พิจารณารวม Forward field แต่ละเฟส  $F^+ = F_A^+ + F_B^+ + F_C^+$

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B \quad (2.56)$$

$$F^+ = \frac{F_p}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_p}{2} [\cos(\theta + \omega t) \cos(-120^\circ) + \sin(\theta - \omega t) \sin(120^\circ)] \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+\frac{F_p}{2}[\cos(\theta-\omega t)\cos 120^\circ - \sin(\theta-\omega t)\sin 120^\circ]$$

$$F^+ = \frac{F_p}{2}[\cos(\theta-\omega t) + 2\cos(\theta-\omega t)\cos 120^\circ]$$

$$F^+ = 0$$

ดังนั้น เมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟส เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส จะไม่เกิดสนามแม่เหล็ก

## 2.5 การต่อตัวเก็บประจุเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน [5]

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะสามารถหมุนได้เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กหมุน และเมื่อต่อขดลวดสเตเตอร์ในลักษณะกลับทิศทาง เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จะเกิด Pulsating field ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถหมุนได้ ดังนั้นจึงใช้ตัวเก็บประจุเข้ามาช่วยโดยต่อเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ เพื่อให้กระแสไหลในแต่ละเฟสเกิด Phase shift ซึ่งเป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน

### 2.5.1 การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนจากตัวเก็บประจุ

กระแสที่ไหลในขดลวดเฟส A, B และ C เลื่อนเฟสต่างกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแต่ละเฟส มีค่าดังนี้

$$F_A = F_1 \cos \theta \cos(\omega t + \phi) \quad (2.58)$$

$$F_B = F_2 \cos(\theta - 120^\circ) \cos \omega t \quad (2.59)$$

$$F_C = F_2 \cos(\theta + 120^\circ) \cos \omega t \quad (2.60)$$

จากสมการที่ (2.58) – (2.60) Forward Field มีค่าเท่ากับ

$$F_A^+ = \frac{F_1}{2} \cos(\theta - \omega t - \phi)$$

$$F_B^+ = \frac{F_2}{2} \cos(\theta - \omega t - 120^\circ)$$

$$F_C^+ = \frac{F_2}{2} \cos(\theta - \omega t + 120^\circ)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F^+ = F_A^+ + F_B^+ + F_C^+ \quad (2.61)$$

และ Backward field

$$F_A^- = \frac{F_1}{2} \cos(\theta + \omega t + \phi)$$

$$F_B^- = \frac{F_2}{2} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ)$$

$$F_C^- = \frac{F_2}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)$$

$$F^- = F_A^- + F_B^- + F_C^- \quad (2.62)$$

จะได้ Forward Field

$$F^+ = \frac{F_1}{2} \cos(\theta - \omega t - \phi) + \frac{F_2}{2} \cos(\theta - 120^\circ - \omega t) - \frac{F_2}{2} \cos(\theta + 120^\circ - \omega t)$$

จาก  $\cos A - \cos B = -2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{A-B}{2}\right)$  (2.63)

$$F^+ = \frac{F_1}{2} \cos(\theta - \omega t - \phi) + \frac{F_2}{2} - 2 \sin\left(\frac{\theta - 120^\circ - \omega t + \theta - 120^\circ - \omega t}{2}\right) \times \sin\left(\frac{\theta - 120^\circ - \omega t - \theta - 120^\circ - \omega t}{2}\right)$$

$$F^+ = \frac{F_1}{2} \cos(\theta - \omega t - \phi) + \frac{F_2}{2} (-2 \sin(\theta - \omega t) \sin(-120^\circ))$$

$$F^+ = \frac{F_1}{2} \cos(\theta - \omega t - \phi) + \sqrt{3} \frac{F_2}{2} \sin(\theta - \omega t)$$

จาก  $\cos(A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$

$$F^+ = \frac{F_1}{2} [\cos(\theta - \omega t) \cos \phi + \sin(\theta - \omega t) \sin \phi] + \frac{\sqrt{3}}{2} F_2 \sin(\theta - \omega t) \quad (2.64)$$

จะได้ Backward Field

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F^- = \frac{F_1}{2} \cos(\theta + \omega t + \phi) + \frac{F_2}{2} \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) - \frac{F_2}{2} \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)$$

$$F^- = \frac{F_1}{2} \cos(\theta + \omega t + \phi) + \frac{F_2}{2} \left[ -2 \sin\left(\frac{\theta + \omega t - 120^\circ + \theta + \omega t + 120^\circ}{2}\right) \right. \\ \left. \times \sin\left(\frac{\theta + \omega t - 120^\circ - \theta - \omega t - 120^\circ}{2}\right) \right]$$

$$F^- = \frac{F_1}{2} \cos(\theta + \omega t + \phi) + \frac{F_2}{2} \left[ -2 \sin(\theta + \omega t) \sin(-120^\circ) \right]$$

$$F^- = \frac{F_1}{2} \cos(\theta + \omega t + \phi) + \frac{\sqrt{3}}{2} F_2 \sin(\theta + \omega t)$$

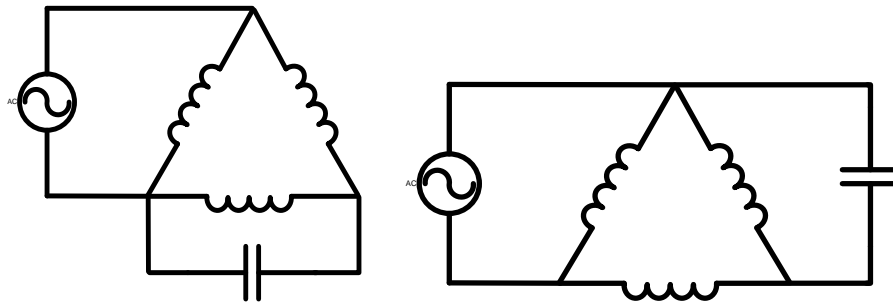
จาก  $\cos(A+B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$

$$F^- = \frac{F_1}{2} \left[ \cos(\theta + \omega t) \cos \phi - \sin(\theta + \omega t) \sin \phi \right] + \frac{\sqrt{3}}{2} F_2 \sin(\theta + \omega t) \quad (2.65)$$

ขนาดของสนามแม่เหล็กในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากกระแสที่ไหลเข้าขดลวดแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้ผลรวม Forward Field และ Backward Field มีค่าไม่เท่ากันทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน โดยสนามแม่เหล็กที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอเหมือนกับมอเตอร์ 3 เฟสที่ใช้งานทั่วไป คือ สนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยการต่อตัวเก็บประจุเพื่อเลื่อนเฟสกระแสในแต่ละเฟส โดยมีลักษณะการหมุนเป็นวงรี

## 2.6 การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส มาใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส [5]

มีงานวิจัยหลายชิ้นได้ศึกษาการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยวงจรรูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อแบบเดลต้าและต่อตัวเก็บประจุคร่อมเฟสของมอเตอร์



รูปที่ 2.8 วงจรมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

โดยใช้หลักซิมเมตริกัล คอมโพเนนซ์ (Symmetrical Component) ในการวิเคราะห์วงจร เมื่อใช้หลักการ Symmetrical Component จะพบว่ากระแสส่วนที่เป็นอันดับบวก (Positive sequence) เป็นตัวสร้าง MMF ที่เป็น Forward Field และกระแสส่วนที่เป็นลำดับลบ (Negative sequence) จะเป็นตัวสร้าง MMF ที่เป็น Backward Field ดังนั้นในการวิเคราะห์การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสที่ทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว ต้องแยกวิเคราะห์วงจรมวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำออกเป็น 2 ชุด คือ วงจรมวลที่เป็นอันดับบวก และวงจรมวลที่เป็นลำดับลบ โดยวิเคราะห์ดังนี้

ให้  $V_0, V_1, V_2$  คืออ้างอิงกับเฟส A ซึ่งมีค่าดังนี้  $V_0 = V_a^0, V_1 = V_a^+, V_2 = V_a^-$

$$V_1 = I_1 Z_1$$

$$V_2 = I_2 Z_2$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1}$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2}$$

อนุพันธ์ขององค์ประกอบลำดับศูนย์ ( $V_0, I_0$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์

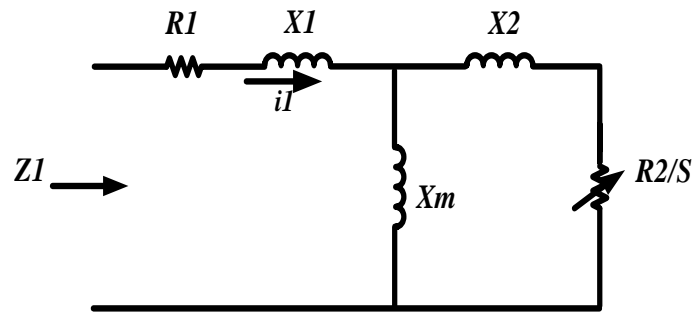
$Z_1$  = อิมพีแดนซ์อนุพันธ์ลำดับบวก

$Z_2$  = อิมพีแดนซ์อนุพันธ์ลำดับลบ

$Y_1$  = แอดมิตแตนซ์อนุพันธ์ลำดับบวก

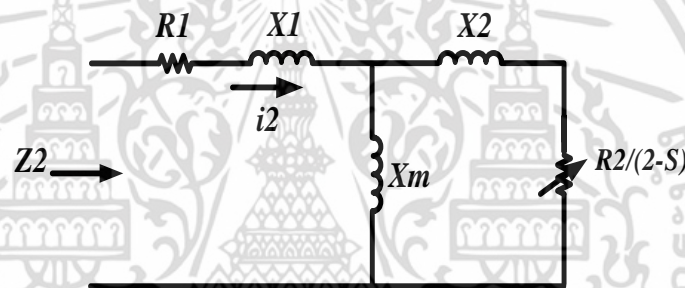
$Y_2$  = แอดมิตแตนซ์อนุพันธ์ลำดับลบ

ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์จากข้อมูลการทดสอบแบบไม่มีโหลดและลอคโรเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซอร์โฮนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 อิมพีแดนซ์อนุพันธ์ลำดับบวกของมอเตอร์

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) + \frac{[(jX_m)(\frac{R_2}{S} + jX_2)]}{[\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)]} \quad (2.66)$$



รูปที่ 2.10 อิมพีแดนซ์อนุพันธ์ลำดับลบของมอเตอร์

$$Z_2 = (R_1 + jX_1) + \frac{[(jX_m)(\frac{R_2}{(2-s)} + jX_2)]}{[\frac{R_2}{(2-s)} + j(X_2 + X_m)]} \quad (2.67)$$

ดังนั้นการวิเคราะห์ทำตามดังต่อไปนี้

$$\frac{d\eta}{dX_c} = \frac{d\eta}{dU} \times \frac{dU}{dX_c} \quad (2.68)$$

ฉะนั้น  $\frac{d\eta}{dX_c} = 0$  จากสมการที่ (2.68) หมายถึงตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดโดย

พิจารณาจากค่าความสูญเสียที่แกนเหล็กและค่าความสูญเสียทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \left| \frac{V_2}{V_1} \right| \quad (2.69)$$

ตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.9 ต่อข้ามของลวดสเตเตอร์ทางด้านแรงดันด้านออกของเฟส B และเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$V = V_a$$

$$V_c = V_z$$

$$I_z = I_c - I_b$$

$$V_c - jX_c(I_c - I_b) = 0 \quad (2.70)$$

ที่  $V$  มีค่าเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดัน

$X_c$  มีค่าเท่ากับรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

จากสมการที่ 2.70 สามารถแก้สมการสำหรับหาค่า  $V_1, V_2$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} aV_1 + a^2V_2 &= jX_c(aV_1Y_1 + a^2V_2Y_2 - a^2V_1Y_1 - aV_2Y_2) \\ (a + \sqrt{3}jX_cY_1)V_1 &= (\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)V_2 \end{aligned} \quad (2.71)$$

และแทนค่า  $Z_1, Z_2$  ในสมการ

$$V_1 = \left[ \frac{(\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)}{a + \sqrt{3}jX_cY_1} \right] \times V_2$$

$$V_2 = \left[ \frac{(a + \sqrt{3}X_cY_1)}{(\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)} \right] \times V_1$$

$$V = V_a = V_1 + V_2 \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า  $V_1$  ด้วยการแทนในสมการที่ 2.71 ด้วยสมการที่ 2.72

$$V_1 = \left[ \frac{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j - \sqrt{3}X_c Y_2 \right)}{\left( -\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c (Y_1 + Y_2) \right)} \right] \times V \quad (2.73)$$

จัดรูปสมการจะได้

$$V = V_1 + \left[ \frac{(a + \sqrt{3}X_c Y_1)}{(\sqrt{3}X_c Y_2 - a^2)} \right] \times V_1$$

$$V = V_2 + \left[ \frac{(\sqrt{3}X_c Y_2 - a^2)}{(a + \sqrt{3}X_c Y_1)} \right] \times V_2$$

$$V_2 = \left[ \frac{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j + \sqrt{3}X_c Y_1 \right)}{\left( -\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c (Y_1 + Y_2) \right)} \right] \times V \quad (2.74)$$

แทนสมการที่ 2.69 ด้วยสมการที่ 2.73 และ 2.74 จะได้

$$U = \frac{\left[ -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j + \sqrt{3}X_c Y_1 \right]}{\left[ -\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j - \sqrt{3}X_c Y_2 \right]} \quad (2.75)$$

$Y_1, Y_2$  คือการจัดเรียงขนาดและมุมใหม่

$Y_1$  เท่ากับขนาดของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_1$ ),  $\phi_1$  เท่ากับมุมของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_1$ )

$Y_2$  เท่ากับขนาดของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_2$ ),  $\phi_2$  เท่ากับมุมของแอดมิตแตนซ์ ( $Y_2$ )

$$U = \frac{\left[ -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j + \sqrt{3}X_c Y_1 (\cos \phi_1 + \sin \phi_1) \right]}{\left[ -\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j - \sqrt{3}X_c Y_2 (\cos \phi_2 + \sin \phi_2) \right]} \quad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \frac{\sqrt{[1+3X_c^2Y_1^2 - X_cY_1K_1]}}{\sqrt{[1+3X_c^2Y_1^2 + X_cY_1K_1]}} \quad (2.77)$$

$$\text{ที่ } K_1 = \sqrt{3} \cos \phi_1 - 3 \sin \phi_1$$

$$K_2 = \sqrt{3} \cos \phi_2 - 3 \sin \phi_2$$

เงื่อนไขคือ  $\frac{dU}{dX_c} = 0$  สำหรับค่าน้อยที่สุดที่ไม่สมดุลเหมือนกับการหาค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด

$$3Y_1Y_2(Y_1K_2 + Y_2K_1)X_c^2 + 6(Y_1^2 - Y_2^2)X_c - (Y_1K_1 + Y_2K_2) = 0$$

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0 \quad (2.78)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สมการที่ (2.78) แสดงดังนี้

$$A = 3Y_1Y_2(Y_1K_2 + Y_2K_1)$$

$$B = 6(Y_1^2 - Y_2^2)$$

$$C = -(K_1Y_1 + K_2Y_2)$$

## 2.7 การคำนวณแรงบิดเอาต์พุตของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส [5]

คำนวณกำลังพลสายเพลลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ทำงานที่สภาวะสมดุลจากสมการ

$$P_{out} = (1-s)P_g \quad (2.79)$$

เมื่อ  $P_g$  คือกำลังงานที่ถูกถ่ายผ่าน Air gap ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ

$$P_g = \frac{I_R^2 R_2}{s} \quad (2.80)$$

อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกำลัง เราจะสามารถคำนวณแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (2.81)$$

$$T_{out} = \frac{I_R^2 R_2 (1-s)}{s\omega} \quad (2.82)$$

โดยที่

$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} \quad (2.83)$$

$$N_r = (1-s)N_s \quad (2.84)$$

ดังนั้น

$$\omega = (1-s)\omega_s \quad (2.85)$$

ฉะนั้น

$$T_{out} = \frac{I_R^2 R_2 (1-s)}{s(1-s)\omega_s} \quad (2.86)$$

$$T_{out} = \frac{I_R^2 R_2}{s\omega_s}$$

เนื่องจากเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากขดลวดทั้ง 3 เฟสจึงมีค่าดังนี้

$$T_{out} = \frac{3I_R^2 R_2}{s\omega_s} \quad (2.87)$$

เมื่อ  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุม หาได้จาก

$N_r$  คือความเร็วโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$N_s$  คือความเร็วซิงโครนัส

แต่เมื่อเรานำมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มาทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ลักษณะการทำงานของมอเตอร์จะเปลี่ยนไป โดยจะมีผล Backward field ซึ่งเกิดจากกระแสส่วนที่เป็นลำดับลบ ส่งผลให้เกิดแรงบิดต้านการหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละเฟสจะแยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

- 1) แรงบิดในทิศทางการหมุน เกิดจากกระแสในส่วนของลำดับบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{e^+} = \frac{I_{R1}^2 R_2}{s\omega_s} \quad (2.88)$$

2) แรงบิดในทิศทางการหมุน เกิดจากกระแสในส่วนของลำดับลบ

$$T_{e^-} = \frac{I_{R2}^2 R_2}{(2-s)\omega_s} \quad (2.89)$$

ฉะนั้นแรงบิดลัพธ์ที่เกิดจะมีค่าเท่ากับ

$$T_{out} = \frac{I_{R1}^2 R_2}{s\omega_s} - \frac{I_{R2}^2 R_2}{(2-s)\omega_s} \quad (2.90)$$

## 2.8 ประเภทภาระทางกล [10]

ภาระทางกลของมอเตอร์มีอยู่หลายประเภทด้วยกัน แต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 ชนิด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

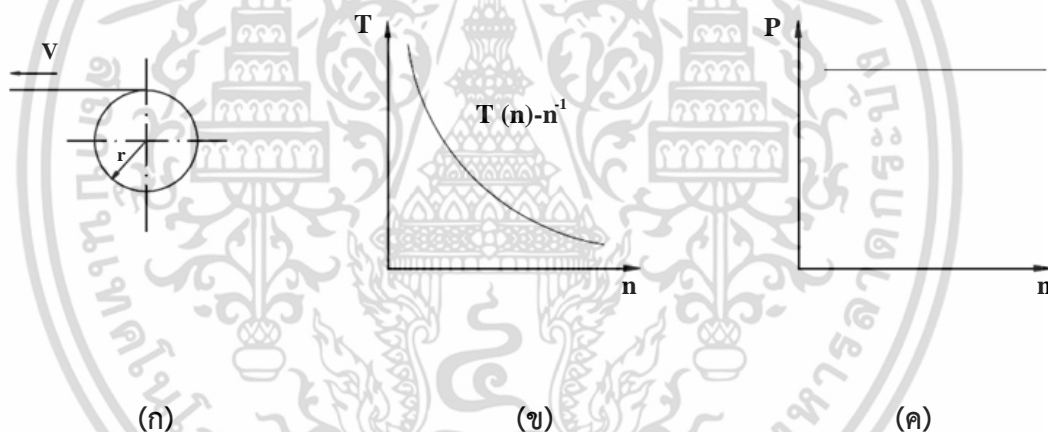
ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติของภาระทางกล

กลุ่มที่	คุณสมบัติโหลด	ตัวอย่างโหลด
กลุ่มที่ 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงบิดแปรผันตามส่วนกลับของความเร็ว</li> <li>- กำลังจะมีค่าคงที่</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เครื่องม้วนวัสดุ</li> <li>- เครื่องกลึง</li> <li>- เครื่องเจาะ, สว่าน, มือช่างต่างๆ</li> </ul>
กลุ่มที่ 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โหลดประเภทแรงบิดมีค่าเกือบคงที่</li> <li>- กำลังแปรผันตามความเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สายพานส่งของ</li> <li>- เครื่อง</li> <li>- ลิฟท์</li> <li>- บั้มประเภทที่อัตราการไหลคงที่</li> <li>- โหลดประเภทที่มีความฝืดต่างๆ</li> </ul>
กลุ่มที่ 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงบิดแปรผันตามความเร็ว</li> <li>- กำลังแปรผันตามความเร็วยกกำลังสอง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โรลเลอร์ (Roller)</li> <li>- เครื่องจักรประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ, อุตสาหกรรม</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

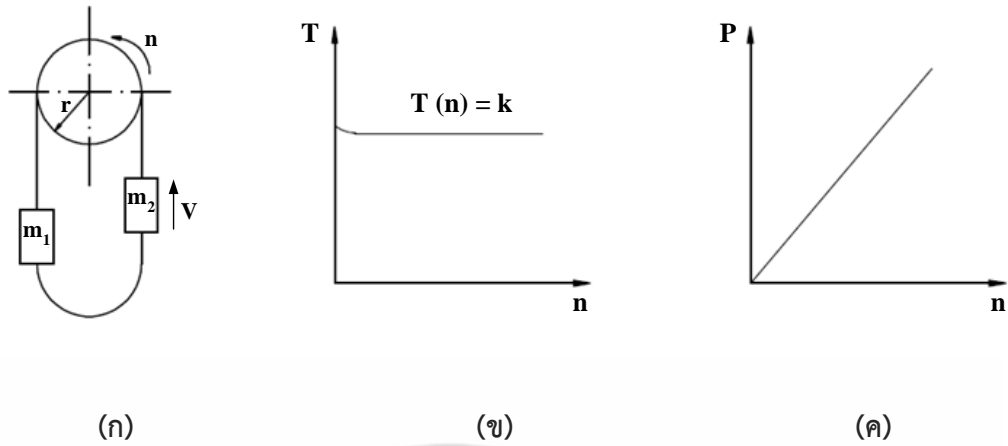
		ปีเตอร์เคมี เป็นต้น
กลุ่มที่ 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- แรงบิดแปรตามความเร็วยกกำลังสอง</li> <li>- กำลังจะแปรตามความเร็วยกกำลังสาม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โหลดประเภทของไหล</li> <li>- ปั๊มแรงเหวี่ยง</li> <li>- โหลดพัดลม</li> <li>- คอมเพรสเซอร์</li> </ul>

จากตารางที่ 2.1 สามารถสรุปเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์คุณสมบัติของโหลดได้ดังรูปที่ 2.11 – 2.14 โดยกลุ่มที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2. คุณสมบัติของโหลดในกลุ่มที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของโหลดในกลุ่มที่ 3 ดังตารางที่ 2. แสดงดังรูปที่ 2. และโหลดในกลุ่มที่ 4 ประเภทโหลดกลุ่มสุดท้ายความสัมพันธ์คุณสมบัติของโหลดแสดงดังรูปที่ 2. ซึ่งสามารถอธิบายกราฟรูปที่ 2. – 2. ด้วยตารางที่ 2.

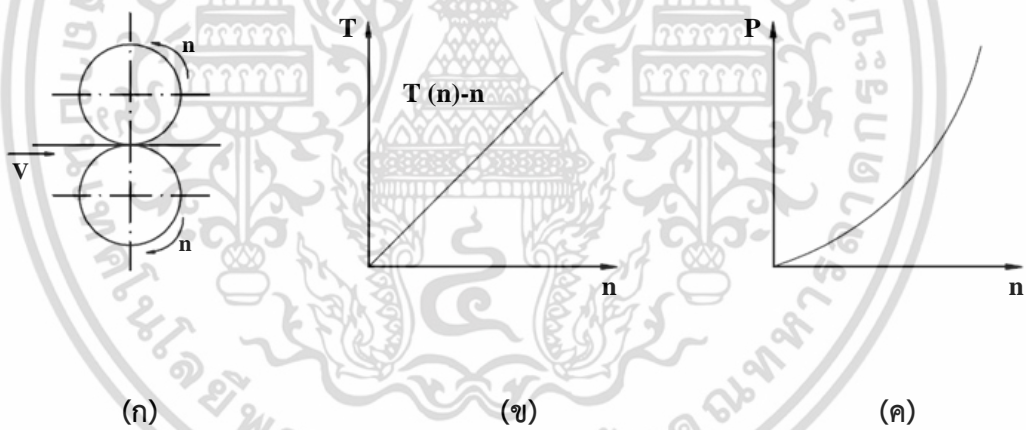


รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 1 (ก) ทิศทางแรงดึงภาระทางกล

(ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว

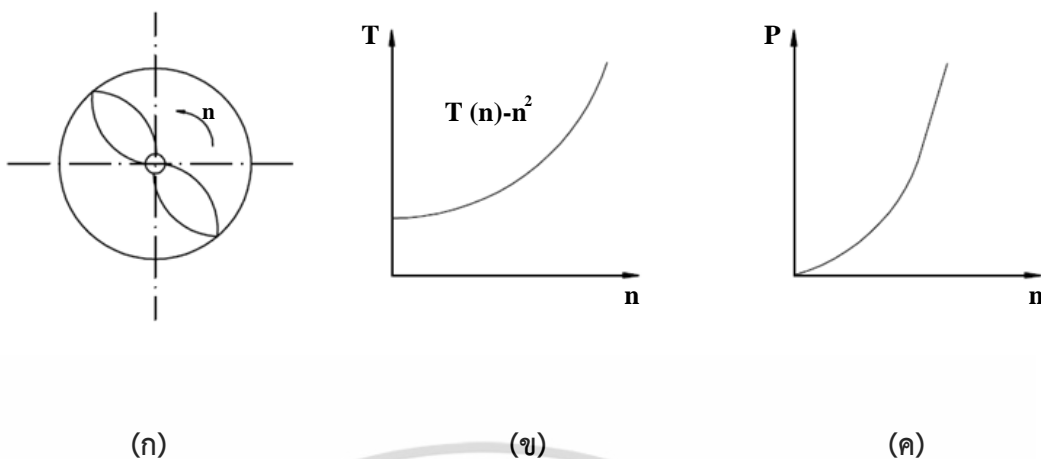


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 2 (ก) ลักษณะการใส่มวลน้ำหนัก ทิศทางแรงดึงภาระทางกลและทิศทางการหมุน (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 3 (ก) ทิศทางแรงดึงภาระทางกลและทิศทางการหมุน (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์คุณสมบัติภาระทางกลของกลุ่มที่ 4 (ก) ลักษณะภาระทางกลและทิศทางการหมุน (ข) กราฟเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็ว (ค) กราฟเปรียบเทียบกำลังและความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 3.1 บทนำ

โดยปกติแล้วคอนเวอร์เตอร์แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่

1. AC-DC Converter คือ วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือเรียกว่าวงจรเรียงกระแส (Rectifiers)

2. AC-AC Converter คือ วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ รั้งแปรการทำงานออกเป็นควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage Control) และการเปลี่ยนแปลงความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (Cycloconverters and Matrix Converter)

3. DC-DC Converter คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดแรงดันระดับหนึ่งไปยังแรงดันอีกระดับหนึ่ง โดยจะเรียกว่า ซอปเปอร์ (Chopper)

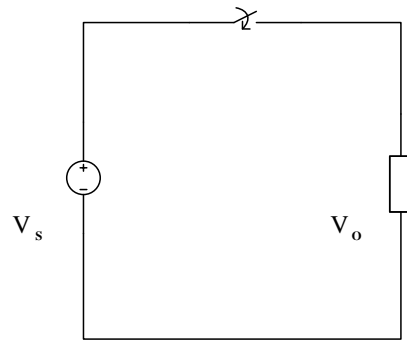
4. DC-AC Converter คือ วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดแรงดันและความถี่ได้ โดยจะเรียกว่า อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ในตอนแรกของงานวิจัยได้เริ่มศึกษาจากการใช้ซอปเปอร์มาปรับปรุงสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ถัดมาจึงได้พัฒนามาเป็นใช้อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ชนิดไบโพลาร์

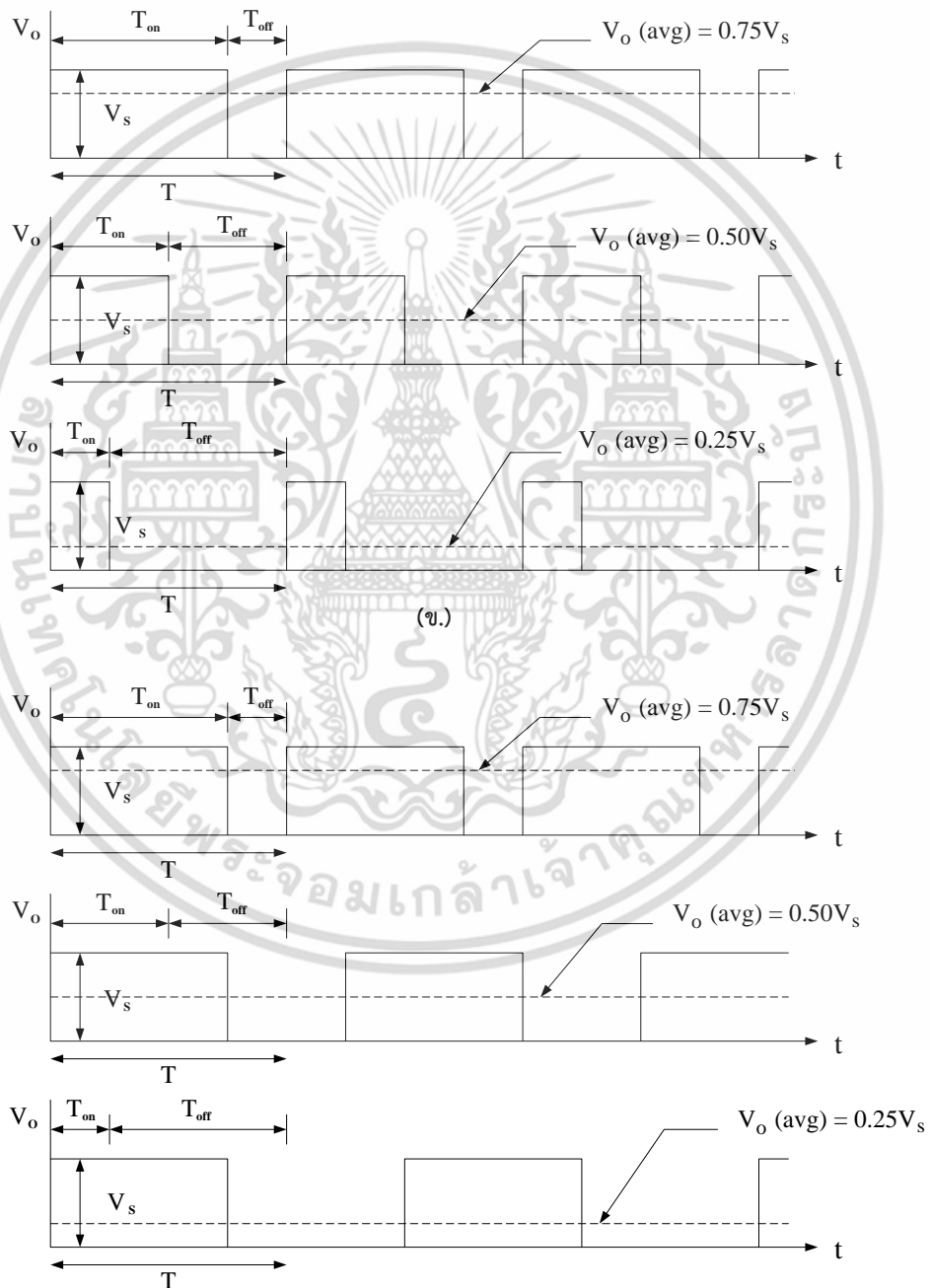
### 3.2 เอซี ซอปเปอร์

#### 3.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานวงจรซอปเปอร์

ขั้นแรกของงานวิจัยเริ่มจากศึกษาซอปเปอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ซึ่งจะช่วยในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยหลักการเบื้องต้นของวงจรซอปเปอร์มีดังนี้



(ก.)



(ค.)

รูปที่ 3.1 วงจรชอปเปอร์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการเปิด-ปิดสวิตช์ในวงจรขอปเปอร์ ชั้นพื้นฐานในรูป 3.1 (ก) สามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ คือ

1)  $T_{ON}$  เปลี่ยนแปลงและ  $T_{OFF}$  เปลี่ยนแปลง แต่  $T$  คงที่ เรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า วิธีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ (Pulse width modulation) รูปร่างของแรงดันเอาต์พุต (output) ดังแสดงในรูป 3.1 (ข) แรงดันที่โหลดจะลดลงเมื่อ  $T_{ON}$  น้อยลง

2)  $T_{ON}$  คงที่ และ  $T_{OFF}$  เปลี่ยนแปลง แต่  $T$  เปลี่ยนแปลง เรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า วิธีการเปลี่ยนแปลงความถี่ (frequency modulation) ดังแสดงรูปร่างของแรงดันเอาต์พุต (output) ในรูป 3.1 (ค) แรงดันที่โหลดจะลดลงเมื่อ  $T_{OFF}$  มากขึ้น

3) ลักษณะการทำงานของวิธีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ และเปลี่ยนแปลงความถี่ สามารถแบ่งได้ 2 กรณี คือ

ก)  $T_{ON}$  เปลี่ยนแปลง และ  $T_{OFF}$  คงที่ แต่  $T$  เปลี่ยนแปลง

ข)  $T_{ON}$  เปลี่ยนแปลง และ  $T_{OFF}$  เปลี่ยนแปลง และ  $T$  เปลี่ยนแปลง

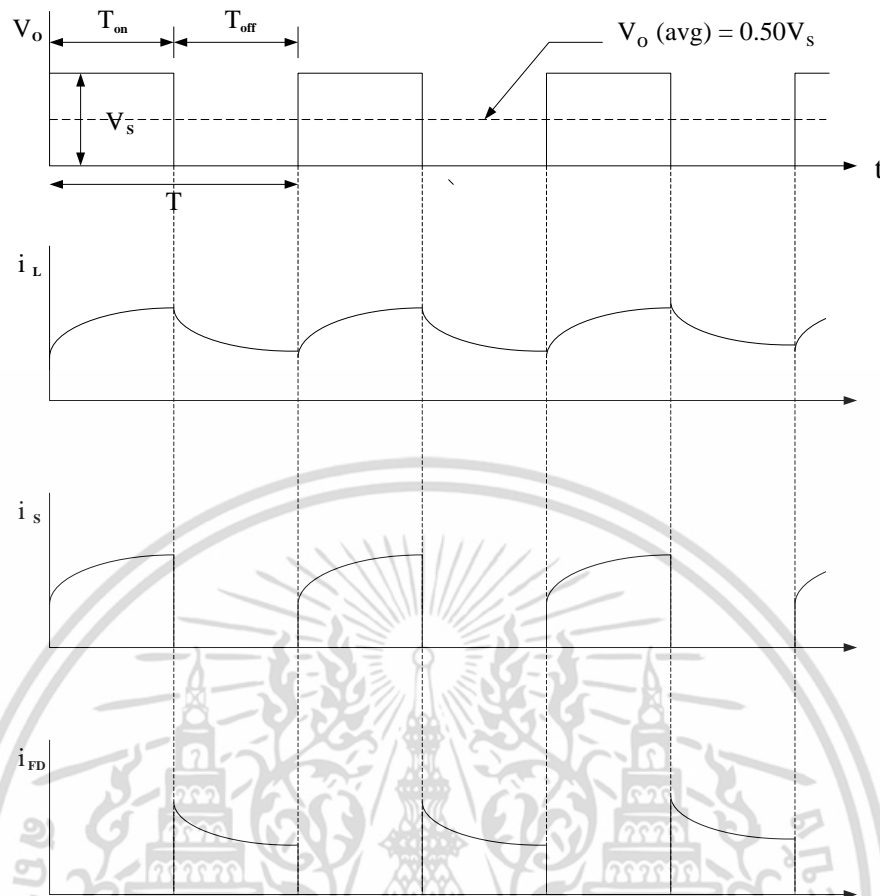
ซึ่งหากวงจรขอปเปอร์มีโหลดเป็นตัวความต้านทาน กระแสที่ไหลเข้าโหลดจะมีรูปคลื่นกระแสเหมือนกับแรงดันที่โหลด ดังแสดงในรูป 3.1 (ข) และ (ค)

แต่ถ้าเป็นโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (Inductive load) กระแสที่ไหลเข้าโหลดจะไหลอย่างต่อเนื่อง โดยต่อ Flywheel-diode ( $D_F$ ) ดังแสดงในรูป 3.2 (ก) ในกรณีที่ต้องการให้แรงดันเอาต์พุตมีริปเปิล (ripple) น้อยๆ จำเป็นจะต้องมีวงจรฟิลเตอร์เพื่อกรองสัญญาณให้ได้สัญญาณที่เรียบมากขึ้น



(ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข.)

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรชอปเปอร์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

ในรูป 3.2 เป็นวงจรชอปเปอร์ที่มีโหลดเป็นตัวความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ( $L_F$ ) และมี Flywheel-diode ( $D_F$ ) เพื่อให้กระแสที่ไหลในโหลดเรียบขึ้น กระแสจะไหลผ่านไดโอด  $D_F$  เมื่อสวิตช์  $S_1$  เปิดวงจร อินดักเตอร์จึงมีคุณสมบัติเป็นฟิลเตอร์ ถ้าทำการสวิตช์ด้วยความถี่สูงๆ สามารถใช้ อินดักเตอร์ คำน้อยลงกว่าทำการสวิตช์ที่ความถี่ต่ำเมื่อสวิตช์  $S_1$  ปิด แร่สไหลจากแหล่งจ่ายไฟเข้า โหลด โดยกระแสจะค่อยๆ เพิ่มจนกระทั่งสวิตช์  $S_1$  เปิด และจะเกิดแรงดันที่โหลดในทิศทางตรงข้าม ( $V\alpha - \frac{di}{dt}$ ) ทำให้ไดโอด  $D_F$  ได้รับฟอร์เวิร์ดไบอัสนำกระแสจากโหลด โดยแสดงการไหลของกระแสดัง รูป 3.2 (ข)

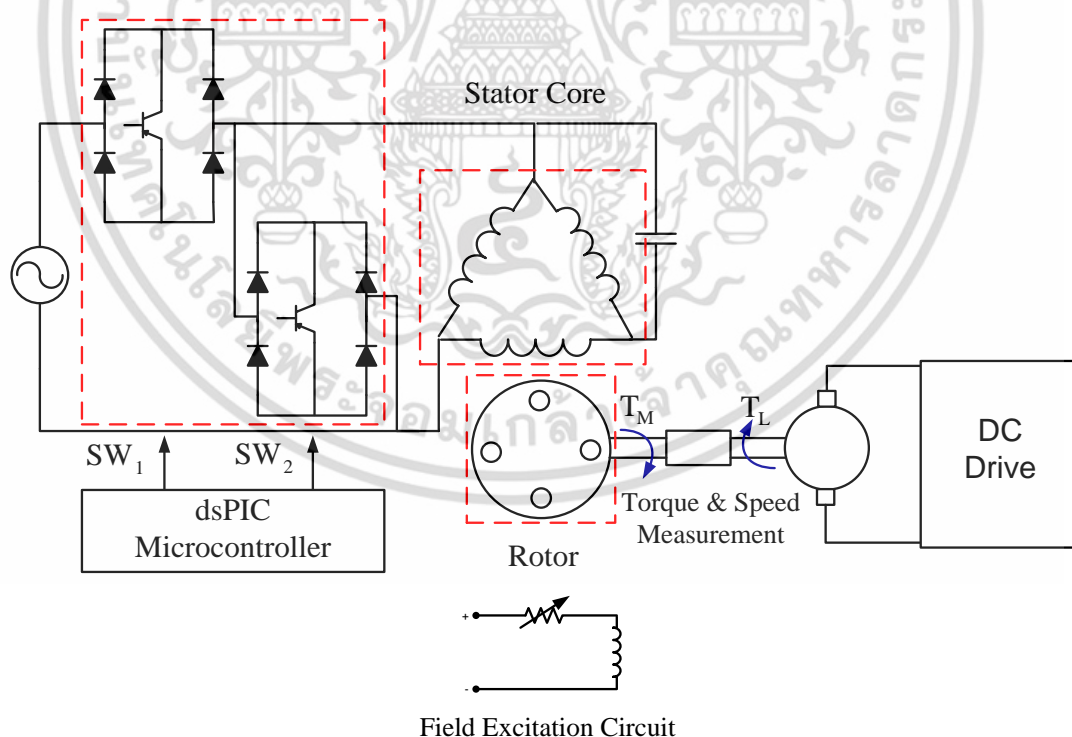
วงจรชอปเปอร์ใช้ในการช่วยลดกระแสในการเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งใช้ แทนการเริ่มเดินเครื่องโดยการต่อความต้านทานอนุกรมกับอาร์มาเจอร์ เป็นการลดแรงดันไฟฟ้าและ กระแสในช่วงเริ่มเดินเครื่อง ทั้งนี้วงจรชอปเปอร์ยังเป็นวงจรที่ใช้ในการปรับและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรงได้ และยังใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถควบคุมให้มีแรงดันคงที่ได้ หรือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมกระแสเข้าโพลดให้คงที่ โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ให้ความกว้างของพัลส์หรือความถี่เปลี่ยนแปลงไป (เปลี่ยนแปลงเวลา  $T_{ON}$  และ  $T_{OFF}$ ) นิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ต่อแบบอนุกรม (D.C. Series Motor) เพื่อใช้ในงานชุลลากด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Traction System) ในรถยนต์ไฟฟ้า และรถไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้าขับเคลื่อน

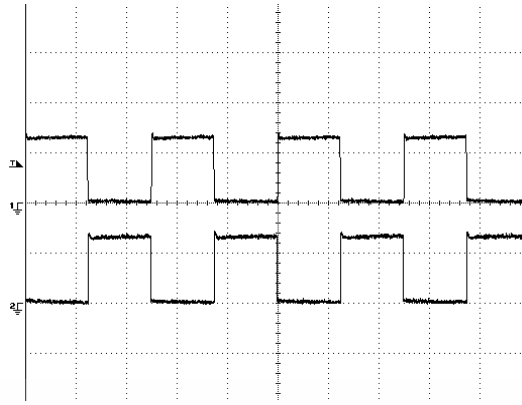
### 3.2.2 ขั้นตอนการทดสอบวงจรขอปเปอร์

จากทฤษฎีข้างต้นเมื่อนำมาทดสอบโดยใช้วงจรแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส, เอซี ขอปเปอร์เฟสเดียวที่ควบคุมโดยดีเอสพีค (dsPIC) ไมโครคอนโทรลเลอร์ และมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการทดสอบขนาด 2 แรงม้า, 220 โวลต์, 4 โพล, 50 เฮิร์ตซ์ โดยต่อตัวเก็บประจุค่า  $50\mu F$  คล่อมเฟสหนึ่งของมอเตอร์ เพื่อช่วยให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถทำงานร่วมกับระบบไฟฟ้า 1 เฟสได้ และในส่วนวงจรกำลังของเอซี ขอปเปอร์ 1 เฟส ประกอบด้วยไบนารีรีเลย์ 2 ตัว คือ ไอจีบีทีซึ่งต่อร่วมกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบไดโอด โดยสัญญาณขับเคลื่อนไอจีบีทีทั้งสองตัวแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยสัญญาณด้านบนเป็นสัญญาณขับเคลื่อนสวิตช์ตัวที่ 1 และสัญญาณด้านล่างเป็นสัญญาณขับเคลื่อนสวิตช์ตัวที่ 2



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

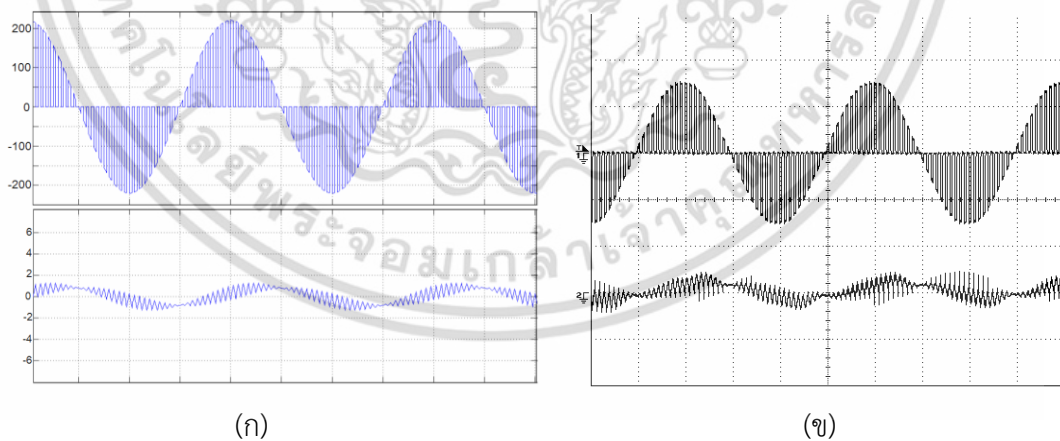
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณขั้วเกตสวิตซ์ทั้ง 2 ตัว

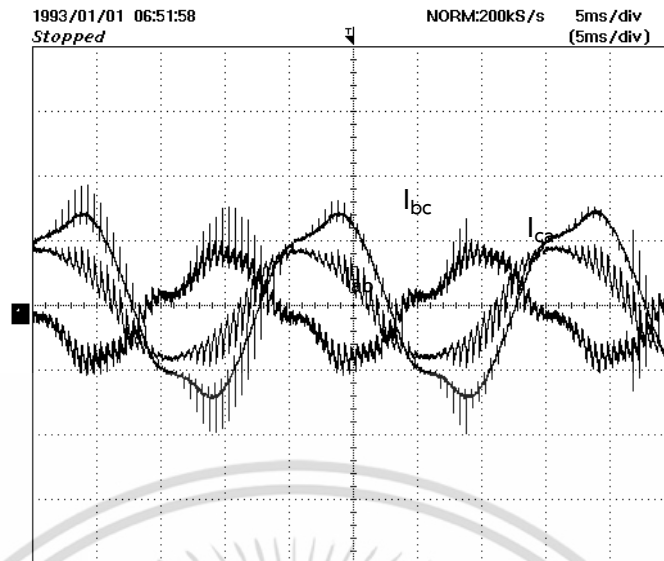
### 3.2.3 ผลการประเมินสมรรถนะมอเตอร์

ซึ่งเมื่อพิจารณาสมรรถนะของมอเตอร์จะได้ค่ากระแสและแรงดันที่เข้ามอเตอร์จะได้รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการจำลองดังรูปที่ 3.5 (ก) โดยรูปคลื่นด้านบนเป็นรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ รูปคลื่นด้านล่างเป็นรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ รูปที่ 3.5 (ข) แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการทดลอง โดยรูปคลื่นด้านล่างเป็นรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ รูปคลื่นด้านบนเป็นรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์ และรูปคลื่นกระแสที่ไหลภายในขดลวดทั้ง 3 เฟส แสดงดังรูปที่ 3.6



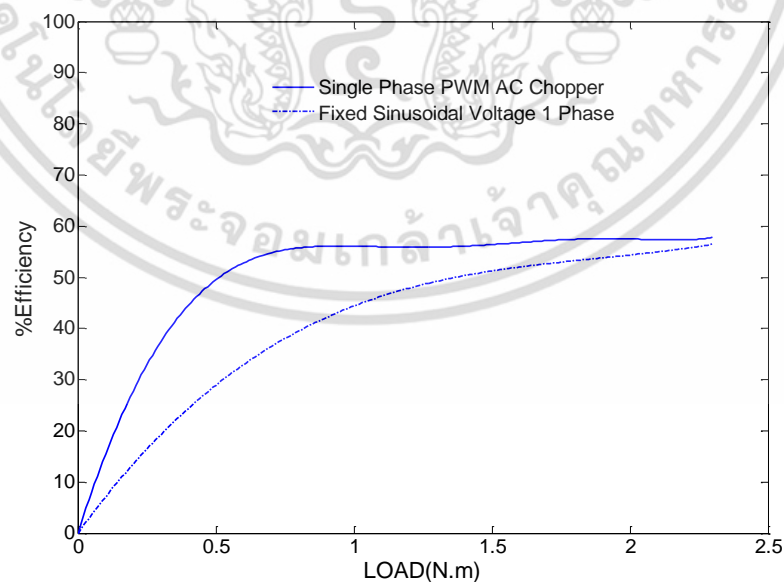
รูปที่ 3.5 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่เข้ามอเตอร์ (ก) ผลที่ได้จากการจำลอง (ข) ผลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



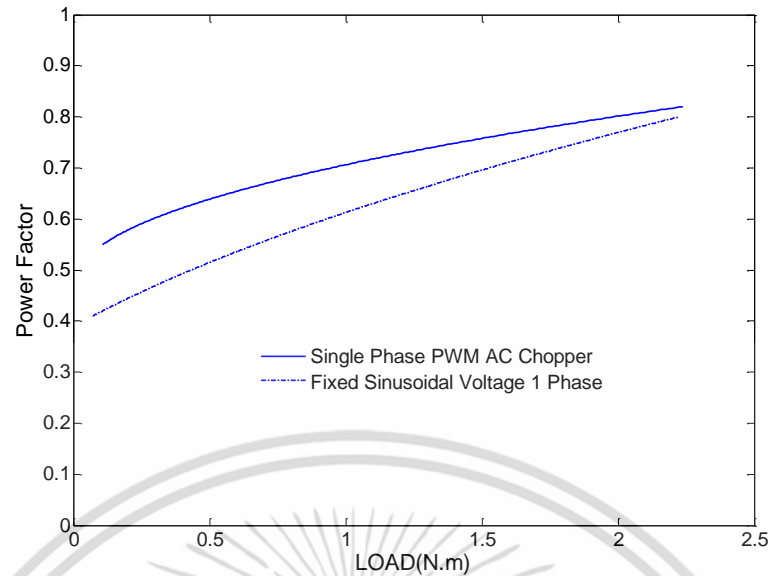
รูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลภายในขดลวดทั้ง 3 เฟส

จากรูปที่ 3.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ 1 เฟส กับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง ที่ต่อตัวเก็บประจุค่า  $50\mu F$  จะเห็นว่าเมื่อควบคุมด้วยพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ที่สภาวะโหลดเบาประสิทธิภาพจะมีค่าดีกว่าเมื่อเทียบกับจ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ให้กับมอเตอร์โดยตรง โดยที่  $0.5 \text{ N.m}$ . ให้ค่าประสิทธิภาพสูงถึง 55%



รูปที่ 3.7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ 1 เฟส

เปรียบเทียบกับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ 1 เฟส กับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง

จากรูปที่ 3.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ 1 เฟส กับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อควบคุมด้วยพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ ที่สภาวะโหลดเบาจะได้ค่าตัวประกอบกำลังที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรง ที่โหลด 0.5 N.m. ค่าตัวประกอบกำลังที่ได้มีค่า 0.65 ในขณะที่ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสโดยตรงได้ค่าตัวประกอบกำลังเพียง 0.5

### 3.2.4 สรุป

ดังนั้นเมื่อป้อนพีดีบีเบิลยูเอ็ม เอซี ซอปเปอร์ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ต่อตัวเก็บประจุค่า  $50\mu F$  ที่สภาวะโหลดเบา เอซี ซอปเปอร์ให้ค่าประสิทธิภาพและค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยตรง เนื่องจากเอซี ซอปเปอร์สามารถควบคุมแรงดันที่เข้ามอเตอร์ได้โดยการปรับดิวิตีไซเคิล เป็นผลให้สมรรถนะของมอเตอร์ดีขึ้น

### 3.3 อินเวอร์เตอร์

โดยปกติงานในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อให้ได้สมรรถนะของมอเตอร์สูงขึ้น โดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมเพื่อให้ได้ความเร็วรอบ แรงบิด และให้ประสิทธิภาพที่ดีตามที่ต้องการ และไม่รบกวนระบบอื่นๆภายในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงมีบทบาทอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมและความต้องการใช้อินเวอร์เตอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเหตุนี้ในการวิจัยจึงเปลี่ยนจากการใช้ซออปเปอร์มาใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งแรงดันและความถี่ ซึ่งจะช่วยให้สมรรถนะของมอเตอร์ดีกว่าเมื่อเทียบกับควบคุมได้เพียงแรงดันหรือป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส โดยตรง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกวิจัยอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวโดยเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์ซิงแบบไบโพลาร์ โดยเมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์และยูนิโพลาร์แล้วพบว่าข้อดีของการสวิตช์แบบไบโพลาร์คือการควบคุมที่ง่ายและไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับการควบคุมการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นที่พื้นฐานการควบคุมอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว อย่างไรก็ตามการสวิตช์แบบไบโพลาร์จะให้ฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำกว่า และความผิดเพี้ยนของกระแสสูงกว่าเมื่อเทียบกับการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ แต่ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นไม่ได้ส่งผลให้สมรรถนะ แรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้อยลง เนื่องจากงานวิจัยนี้เลือกใช้ความถี่ในการสวิตช์ที่สูง แต่หากเป็นการสวิตช์ที่ความถี่ต่ำผลกระทบของความผิดเพี้ยนของกระแสจะส่งผลให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด จึงจำเป็นจะต้องเปลี่ยนมาใช้ในการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

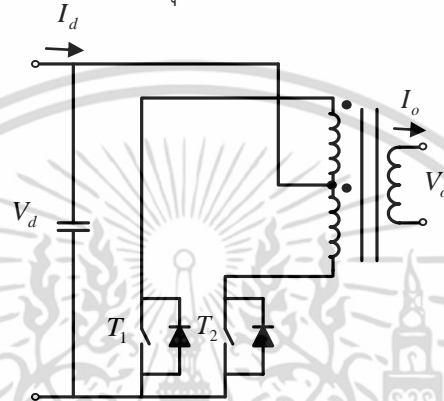
ดังนั้นต่อจากนี้จะอธิบายพื้นฐานอินเวอร์เตอร์โดยเริ่มจากอินเวอร์เตอร์แบบพุก-พูล อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์ พื้นฐานการสวิตช์ การสวิตช์ซิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ก่อนจะอธิบายการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส โดยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมาก และที่ใช้งานกันมากคือพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ (Pulsewidth-Modulation inverter: PWM Inverter)

### 3.4 อินเวอร์เตอร์แบบพุก-พูล [7]

วงจรพุก-พูลอินเวอร์เตอร์ (Push-Pull inverters) ในรูปที่ 3.9 ต้องการหม้อแปลงแบบมีแท่ง

ปกกลางด้านปฐมภูมิ โดยจะสมมติให้กระแสไฟฟ้าด้านออก  $i_o$  ไหลอย่างต่อเนื่องและ เมื่อสวิตช์  $T_1$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเซอร์viceขึ้นต้นการกั  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกระแส และสวิตช์  $T_2$  ต้องไม่นำกระแส สวิตช์  $T_1$  จะนำกระแสขณะ  $i_o$  เป็นบวก และ  $D_1$  จะนำกระแสขณะ  $i_o$  เป็นลบ ซึ่งหากไม่พิจารณาทิศทางของกระแส  $i_o$  จะได้แรงดันไฟฟ้าด้านนอก  $V_o = \frac{V_d}{n}$  เมื่อ  $n$  เป็นอัตราส่วนจำนวนรอบด้านปฐมภูมิต่อรอบทุติยภูมิของหม้อแปลง ในทำนองเดียวกันเมื่อสวิตช์  $T_2$  นำกระแส ซึ่งสวิตช์  $T_1$  ต้องไม่นำกระแส จะได้แรงดันไฟฟ้าด้านนอก  $V_o = -\frac{V_d}{n}$  วงจรพุก-พูล อินเวอร์เตอร์สามารถสวิตช์ซึ่งในแบบพีดับเบิลยูเอ็ม หรือรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สำหรับแรงดันไฟฟ้าด้านนอกจะสามารถควบคุมได้จากสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.9 วงจรพุก-พูลอินเวอร์เตอร์

$$\hat{V}_{o1} = m_a \frac{V_d}{n} \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (3.1)$$

$$\frac{V_d}{n} < \hat{V}_{o1} < \frac{4V_d}{\pi n} \quad \text{เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (3.2)$$

สวิตช์จะต้องทนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามพิกัดที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$V_T = 2V_d \quad \text{และ} \quad I_T = \frac{i_{o,peak}}{n} \quad (3.3)$$

หลักการของวงจรพุก-พูลอินเวอร์เตอร์มีข้อดีคือ

1. ในการนำกระแสแต่ละครั้งจะมีสวิตช์เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่นำกระแส จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่มีระดับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าต่ำๆ เช่น วงจรประจุแบตเตอรี่ เพื่อลดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ให้น้อยที่สุด หรือหมายถึงลดการสูญเสียจากการนำกระแสผ่านอุปกรณ์สวิตช์ที่เรียกว่าความสูญเสียจากการนำกระแส (Conduction Loss)

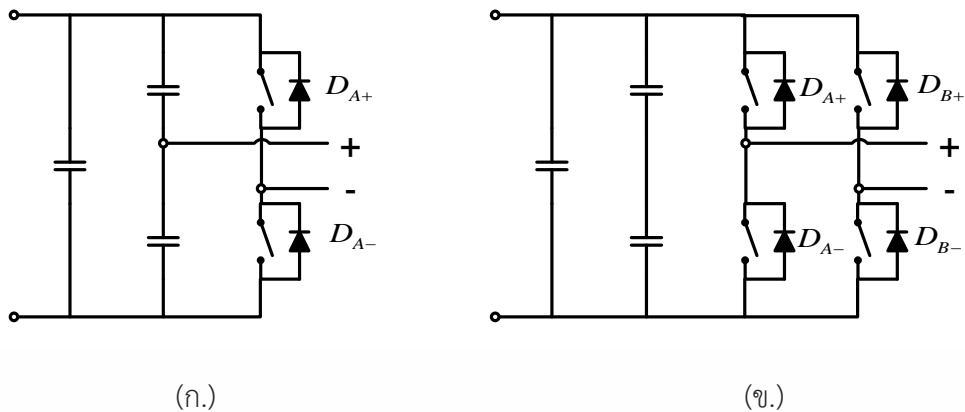
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อุปกรณ์สวิตช์ทั้งสองตัวจะมีกราวด์ร่วมกัน (Common Ground) แต่ข้อเสียของวงจรพุก-พูลอินเวอร์เตอร์ก็คือ ยากที่จะหลีกเลี่ยงการอิมพัลส์ของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนของหม้อแปลงเนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงในหม้อแปลงของพุก-พูลอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง 3. มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านแหล่งจ่ายกับด้านโหลดออกจากกัน

วงจรพุก-พูลอินเวอร์เตอร์ มีข้อควรระวังคือ กระแสไฟฟ้าด้านออกจะทำให้วงจรควบคุมไม่ซึบซ็อนโดย  $i_o$  จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นเมื่อมีการสวิตช์เกิดขึ้น กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากครึ่งขดแรกไปยังครึ่งขดหลังของขดปฐมภูมิ ซึ่งจะต้องออกแบบให้หม้อแปลงมีการเชื่อมต่อ (Coupling) ของเส้นแรงแม่เหล็กอย่างดีที่ขดปฐมภูมิทั้งสองขดเพื่อที่จะลดค่าความเหนี่ยวนำรั่ว พลังงานดังกล่าวนี้ก็จะกระจายไปยังสวิตช์หรือวงจรสับเบอที่ใช้อยู่ป้องกันสวิตช์ และพลังงานรั่วดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ หรืออินเวอร์เตอร์ทุกวงจรที่ใช้หม้อแปลงในการแยกกันไฟฟ้าระหว่างด้านแหล่งจ่ายกับด้านโหลดออกจากกัน โดยการบังคับให้กระแสของแต่ละขดลดลงเป็นศูนย์ ทุกๆ การสวิตช์ ซึ่งมีความสำคัญมากในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์

### 3.5 อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว [7]

อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ฮาล์ฟบริดจ์ (Half Bridge) และฟูลบริดจ์ (Full Bridge) โดยอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์มีตัวเก็บประจุ 2 ตัวต่ออนุกรมกันอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและหากใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากัน จะทำให้แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ  $\frac{V_d}{2}$  ที่จุดกึ่งกลางแรงดัน ดังรูปที่ 3.10 (ก.) และอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จะประกอบไปด้วยกิ่ง A และ กิ่ง B ดังรูปที่ 3.10 (ข.) อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จะให้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบฮาล์ฟบริดจ์ เหมาะที่จะใช้กับโหลดสูงขึ้น โดย  $SW_{A+}$  และ  $SW_{A-}$  จะต้องทำงานสลับกันและไม่ทำงานพร้อมกันในทุกช่วงเวลา เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างบัสบวกและบัสลบ



รูปที่ 3.10 อินเวอร์เตอร์ฟัซเฟส (ก.) แบบฮาล์ฟบริดจ์ (ข.) แบบฟูลบริดจ์

### 3.6 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ [7]

การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์คือการควบคุมให้สวิตช์แบบบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข.) การทำงานของสวิตช์  $SW_{A+}$  และ  $SW_{B-}$  จะถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกัน และ  $SW_{A-}$  กับ  $SW_{B+}$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A มีค่าเท่ากับ

$$\text{เมื่อ } V_{control} > V_{tri} \quad v_{Ao} = \frac{1}{2}V_d \quad \text{สวิตช์ } SW_{A+} \text{ และ } SW_{B-} \text{ นำกระแส} \quad (3.4)$$

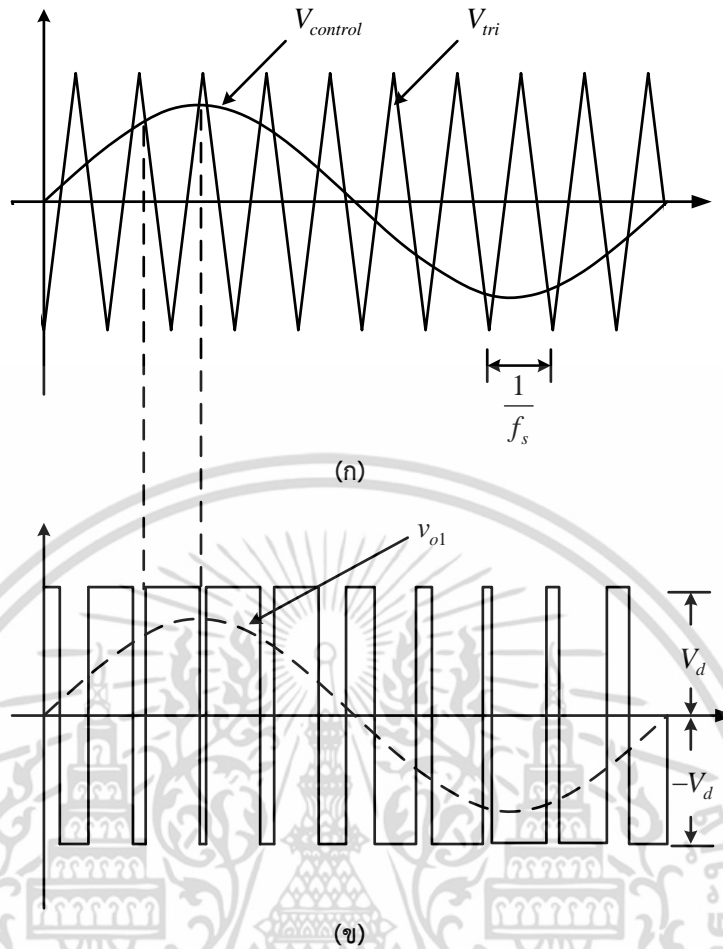
$$\text{เมื่อ } V_{control} < V_{tri} \quad v_{Ao} = -\frac{1}{2}V_d \quad \text{สวิตช์ } SW_{A-} \text{ และ } SW_{B+} \text{ นำกระแส} \quad (3.5)$$

ฉะนั้น แรงดันด้านออกของกิ่ง B จะเท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของกิ่ง A คือ  $v_{Bo} = -v_{Ao}$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ

$$v_o = v_{Ao} - v_{Bo} = 2v_{Ao} \quad \hat{V}_{o1} = m_d V_d \quad \text{เมื่อ } m_d \leq 1.0 \quad (3.6)$$

$$V_d < \hat{V}_{o1} < \frac{4}{\pi}V_d \quad \text{เมื่อ } m_d > 1.0 \quad (3.7)$$

โดยแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะสวิตช์อยู่ระหว่าง  $+V_d$  กับ  $-V_d$  ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

### 3.7 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ [7]

การควบคุมสวิตซ์แบบยูนิโพลาร์จะแยกการควบคุมของสวิตซ์ในกึ่ง A และกึ่ง B ออกจากกัน โดยสวิตซ์ในกึ่ง A ควบคุมจากสัญญาณ  $v_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม  $v_{tri}$  ขณะที่สวิตซ์ในกึ่ง B ควบคุมจากสัญญาณ  $-v_{control}$  เทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม  $v_{tri}$  โดยมีลักษณะการสวิตซ์ดังนี้

เมื่อ $v_{control} > v_{tri}$ :	สวิตซ์ $SW_{A+}$ จะนำกระแส	$v_{AN} = V_d$
เมื่อ $v_{control} < v_{tri}$ :	สวิตซ์ $SW_{A-}$ จะนำกระแส	$v_{AN} = 0$
เมื่อ $-(v_{control}) > v_{tri}$ :	สวิตซ์ $SW_{B+}$ จะนำกระแส	$v_{BN} = V_d$
เมื่อ $-(v_{control}) < v_{tri}$ :	สวิตซ์ $SW_{B-}$ จะนำกระแส	$v_{BN} = 0$

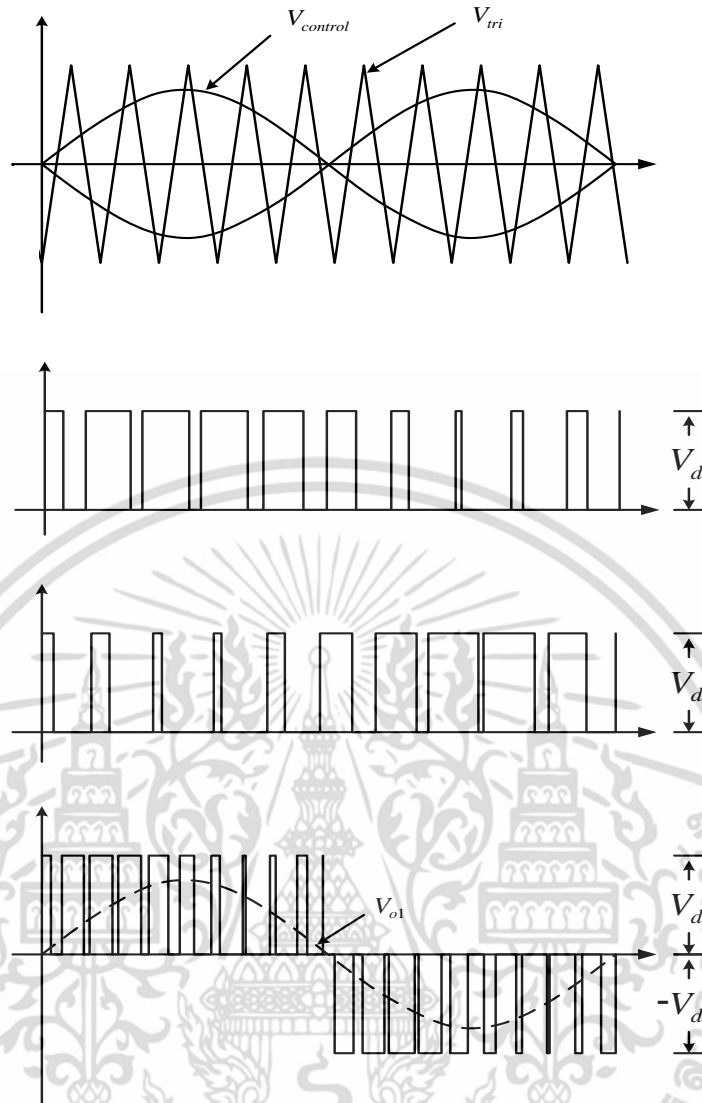
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนสถานะของแรงดันระหว่างสายจากศูนย์ไปบวก หรือจากศูนย์ไปลบ เป็นผลให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงที่สวิตซ์สูง เช่นกรณีไปโพลาร์ และจุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือ ความถี่ด้านออกจะมีค่าเป็น 2 เท่าของความถี่เฟส แสดงดังรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.1 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

สวิตซ์นำกระแส	สวิตซ์นำกระแส	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$
$SW_{A+}$	$SW_{B-}$	$V_d$	0	$V_d$
$SW_{A+}$	$SW_{B-}$	0	$V_d$	$-V_d$
$SW_{A+}$	$SW_{B-}$	$V_d$	$V_d$	0
$SW_{A+}$	$SW_{B-}$	0	0	0

จากตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.12 ทำให้ทราบว่า การสวิตซ์แบบยูนิโพลาร์แรงดันด้านออกมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคาบวกลงไปยังศูนย์และจากศูนย์ไปยังแรงดันคาบวกลงในช่วงครึ่งคาบ และอีกครึ่งคาบจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกจากแรงดันไฟฟ้าลบไปยังศูนย์และจากศูนย์ไปยังแรงดันไฟฟ้าลบ



รูปที่ 3.12 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

### 3.8 การสวิตชิงแบบไซน์พีคดับเบิลยูเอ็ม [7]

วงจรรินเวอร์เตอร์จะใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 3.13 ก. เพื่อให้ได้แรงดันด้านออกเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ได้ตามต้องการ โดยความถี่สวิตชิงของอินเวอร์เตอร์จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

โดยอัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูดมีค่าเท่ากับ

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (3.8)$$

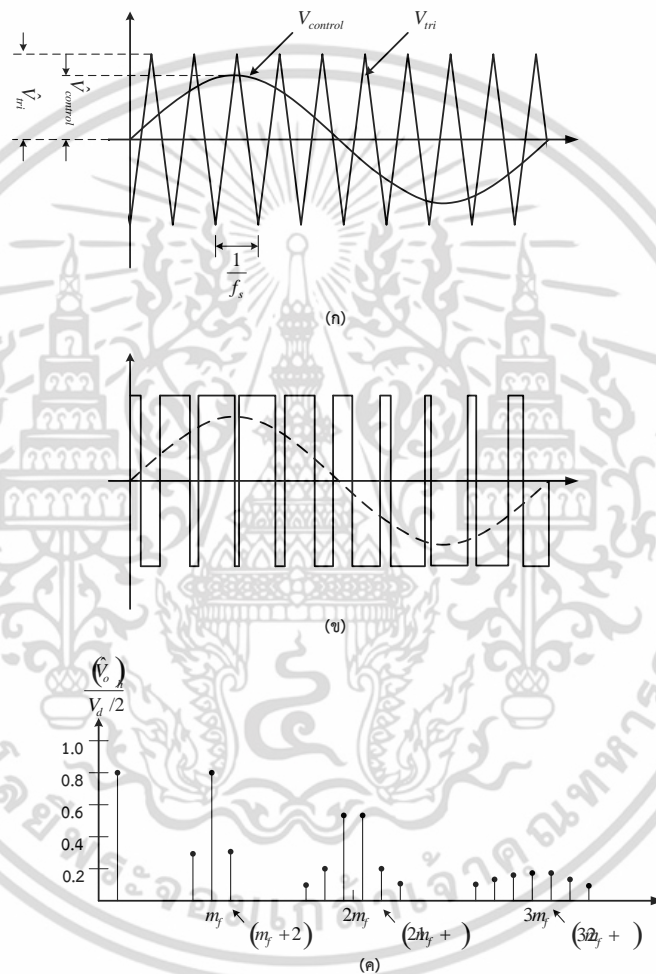
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการผลิตด้านความถี่

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $\hat{V}_{control}$  คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

$\hat{V}_{tri}$  คือค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.13 การสร้างสัญญาณสวิตชิงแบบพีดีบีเบิลยูเอ็ม

### 3.8.1 ช่วงมอดูเลตเป็นเชิงเส้น ( $0 \leq m_a \leq 1$ )

ในช่วงที่เป็นเชิงเส้น ( $0 \leq m_a \leq 1$ ) ความถี่ของแรงดันมูลฐานเอาท์พุทจะมีการแปรผันเป็นเชิงเส้นกับขนาดของอัตราส่วนในการมอดูเลต  $m_a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.2 ช่วงการมอดูเลตแบบโอเวอร์มอดูเลต

ในการโอเวอร์มอดูเลตพีดับเบิลยูเอ็มขนาดความสูงของสัญญาณแรงดันควบคุมเกินขนาดความสูงของสัญญาณสามเหลี่ยมอยู่ในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นในโหมดการทำงานนี้เป็นความสูงของแรงดันมูลฐานมีการเพิ่มขึ้นไม่เป็นสัดส่วนกับ  $m_a$  ส่งผลให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงกว่าช่วงมอดูเลตเชิงเส้น

การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มมีเงื่อนไขการสร้างสัญญาณคือ

$$V_{control} > V_{tri}, \quad SW_{A+} \text{ จะนำกระแส} \quad V_{A0} = \frac{1}{2} V_d \quad (3.10)$$

$$V_{control} < V_{tri}, \quad SW_{A-} \text{ จะนำกระแส} \quad V_{A0} = -\frac{1}{2} V_d \quad (3.11)$$

การทำงานของสวิตช์  $SW_{A+}$  และ  $SW_{A-}$  จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ  $V_{control}$  กับ  $V_{tri}$  ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส โดยรูปที่ 3.14

$m_a = 0.8, m_f = 15$  ฮาร์มอนิกสเปคตรัมของ  $v_{Ao}$  โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนนตั้ง  $\frac{(\hat{V}_{Ao})_h}{V_d/2}$  แสดงดังรูปที่ 3.13 ค.

1.) ค่ายอดขอแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล  $(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a \left( \frac{V_d}{2} \right)$

โดยที่ 
$$\hat{V}_{Ao} = \frac{\hat{V}_{control} \square V_d}{\hat{V}_{tri} 2}, \quad v_{control} \leq \hat{V}_{tri} \quad (3.12)$$

$$v_{control} = \hat{V}_{control} \sin \omega_1 t, \quad v_{control} \leq \hat{V}_{tri}$$

$$(V_{Ao})_1 = \left( \frac{\hat{V}_{control} \square V_d}{\hat{V}_{tri} 2} \right) \sin(\omega_1 t) \quad m_a \leq 1.0$$

$$(V_{Ao})_1 = m_a \frac{V_d}{2} \sin(\omega_1 t) \quad m_a \leq 1.0$$

$$(\hat{V}_{Ao})_1 = m_a \frac{V_d}{2} \quad m_a \leq 1.0 \quad (3.13)$$

2.) ค่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิก จะเกิดขึ้นที่  $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$  ดังสมการต่อไปนี้

$$f_h = (jm_f \pm k) f_1 \quad (3.14)$$

$$h = j(m_f) \pm k \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $h=1$  คือความถี่หลักมูล และถ้าค่า  $j$  เป็นเลขคู่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า  $k$  ที่เป็นเลขคี่ ส่วนถ้าค่า  $j$  เป็นเลขคี่ ค่าฮาร์โมนิกจะเท่ากับค่า  $k$  ที่เป็นเลขคู่

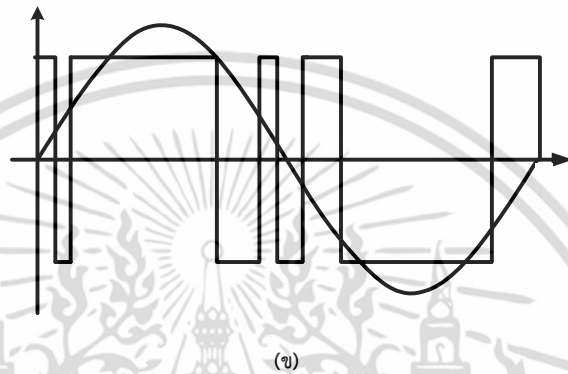
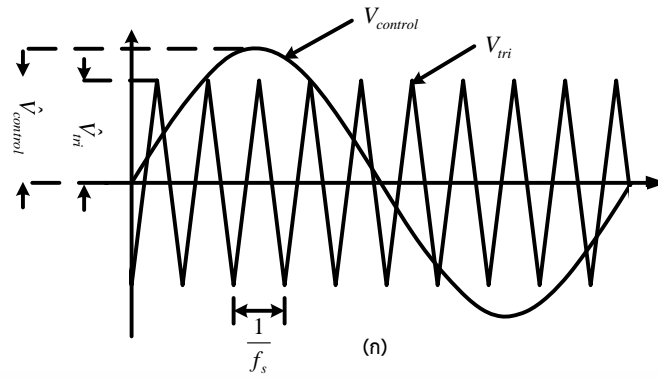
3.) ฮาร์โมนิกที่เกิดควรจะเป็นเลขคี่ เพราะจะทำให้เกิดการสมมาตรเลขคี่ ผลที่ได้จะมีเพียงฮาร์โมนิกเลขคี่เท่านั้นที่ปรากฏอยู่ใน  $v_{Ao}$  หากเกิดฮาร์โมนิกเลขคู่จะหักล้างกัน โดนที่ช่วง  $m_f > 21$  จะถือว่า  $m_f$  มีค่ามากโดยที่ขนาดฮาร์โมนิกย่อย จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $m_f$

ในกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน ( $m_a > 1$ ) จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\hat{V}_{control} > \hat{V}_{tri}$  โดยค่ารูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มจะมีช่วงที่เป็นบวกหรือลบกว้างกว่าหนึ่งคาบการสวิตชิงแสดงดังรูปที่ 3.14 เป็นโอเวอร์มอดูเลชันมีข้อดีคือขนาดแรงดันไฟฟ้าของความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่ากรณี  $m_a \leq 1$  แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าจะไม่เป็นเชิงเส้นจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่ง และช่วงแรงดันยอดทางด้านออกของความถี่หลักมูลจะมีค่าระหว่าง  $\frac{V_d}{2}$  ถึง  $4\frac{V_d}{2\pi}$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_d}{2} < (\hat{V}_{Ao})_1 < 4\frac{V_d}{2\pi} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.8) ค่า  $(\hat{V}_{Ao})_1$  อยู่ระหว่างค่าที่เป็นเชิงเส้นและโหมตรูปคลื่นสี่เหลี่ยม การที่จะเกิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมได้จะต้องมีค่า  $m_a > 1$  และ  $m_f > m_a$  จะทำให้  $V_{control}$  ไม่ตัดยอดสัญญาณสามเหลี่ยมอ้างอิง

การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณ ที่  $V_{control} > V_{tri}$  จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวก ในทางกลับกัน หาก  $V_{control} < V_{tri}$  จะได้พัลส์เป็นลบ ในกรณีโอเวอร์มอดูเลชันดังรูปที่ 3.14 ไซเคิลที่  $V_{control}$  มีช่วงยอดมากกว่า  $V_{tri}$  เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งเสมือนว่าไม่มีการสวิตชิง ผลเสียคือเกิดฮาร์โมนิกอันดับต่ำๆที่ใกล้กับความถี่หลักมูลและเกิดฮาร์โมนิกรอบๆความถี่  $f_s$

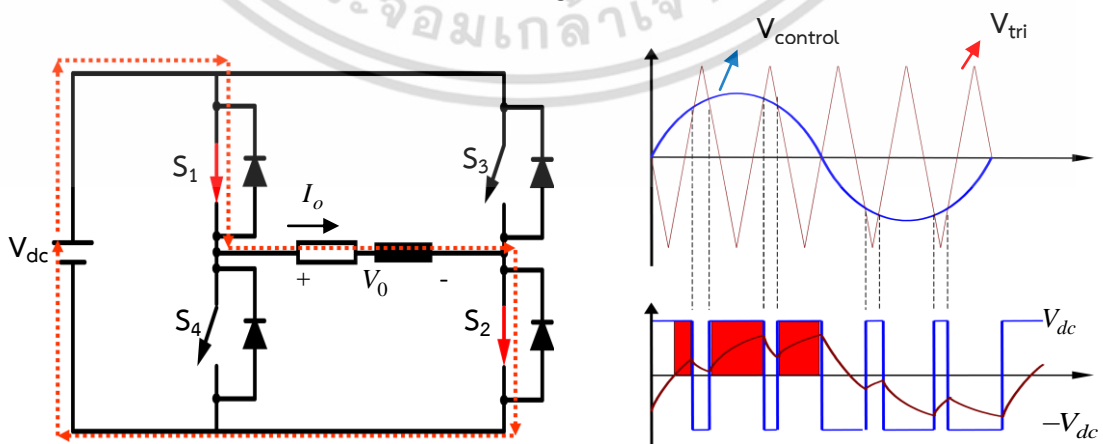


รูปที่ 3.14 รูปคลื่นพีดีบีเบิลยูเอ็มแบบโอเวอร์มอดูเลชัน

### 3.9 สวิตช์โหมตอินเวอร์เตอร์ [10]

โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสามารถทำงานด้วยการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสได้ โดยต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมข้าม 1 เฟส ดังที่แสดงในรูปที่ 3.15 โดยสามารถแบ่งการทำงานพื้นฐานของสวิตช์โหมตอินเวอร์เตอร์ออกเป็น 4 โหมตหลักๆด้วยกันคือ

โหมตที่ 1 โหมตจ่ายกำลังงาน (Powering)

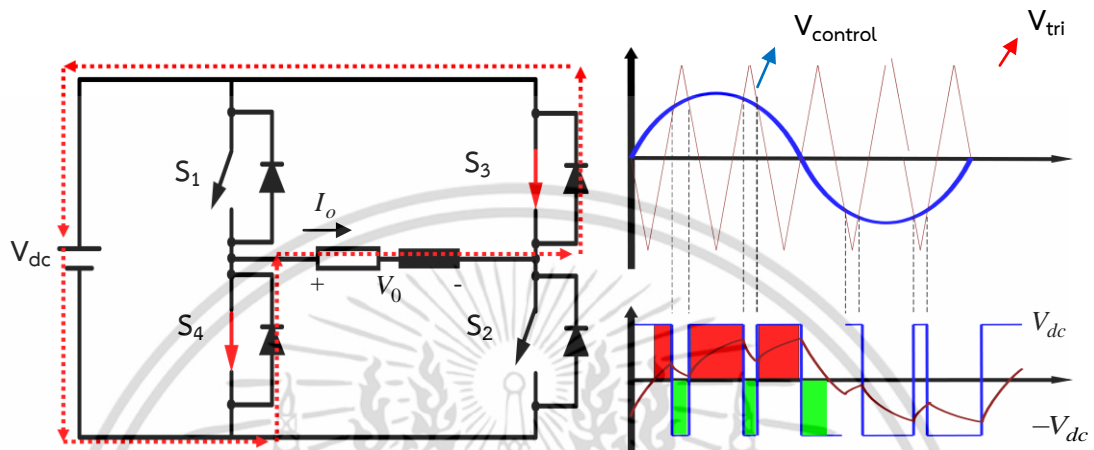


รูปที่ 3.15 แสดงสวิตช์โหมตจ่ายกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 พบว่าแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นบวก, กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นบวก, กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )

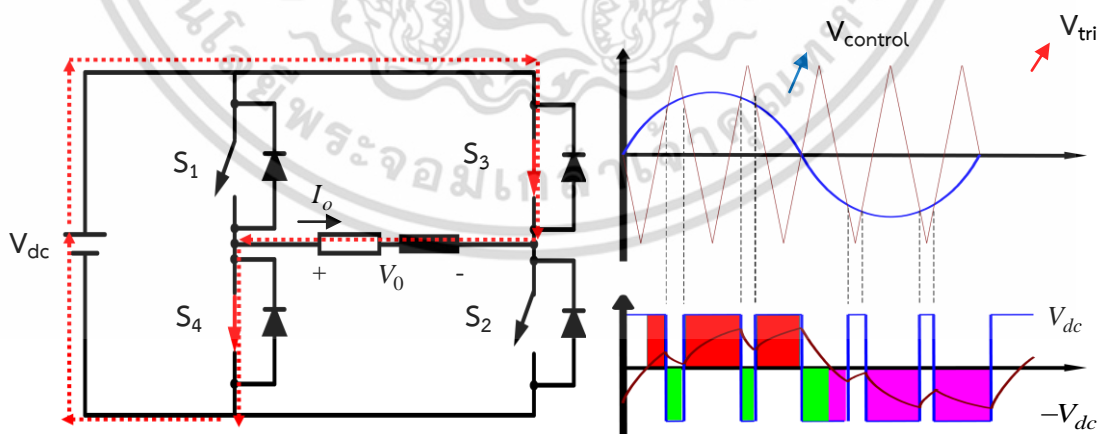
โหมดที่ 2 โหมดคืนพลังงาน (Regenerative)



รูปที่ 3.16 แสดงสวิตซ์ในโหมดคืนพลังงาน

จากรูปที่ 3.16 พบว่าแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นลบ, กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นบวก, กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )

โหมดที่ 3 โหมดจ่ายกำลังงาน (Powering)

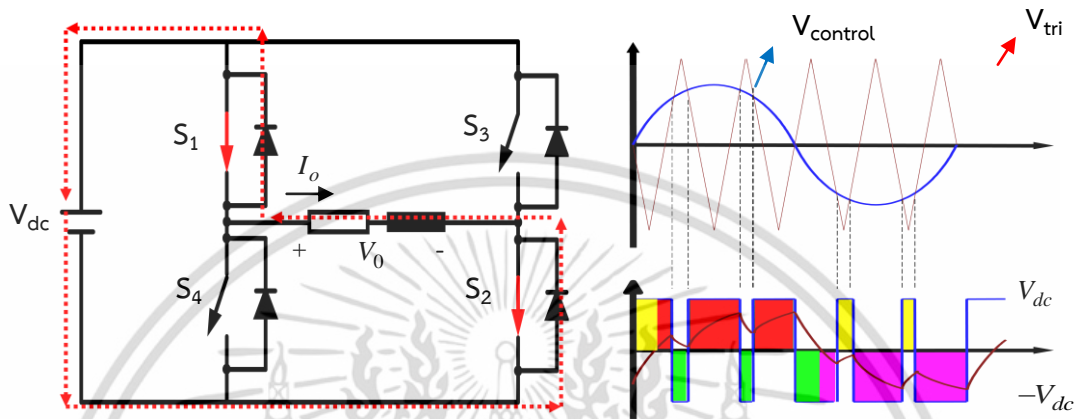


รูปที่ 3.17 แสดงสวิตซ์ในโหมดจ่ายกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.17 พบว่าแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นลบ, กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นลบ, กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )

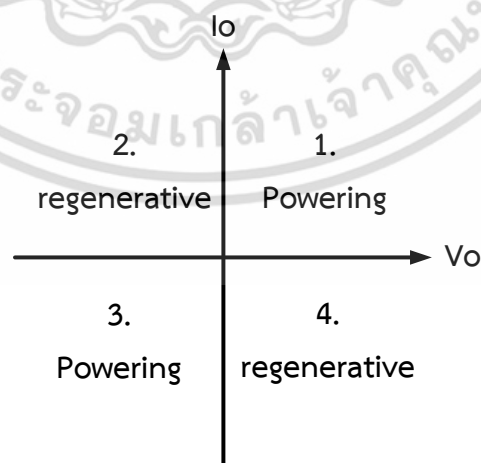
โหมดที่ 4 โหมดคืนพลังงาน (Regenerative)



รูปที่ 3.18 แสดงสวิตช์ในโหมดคืนพลังงาน

จากรูปที่ 3.18 พบว่าแรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นบวก, กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นลบ, กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )

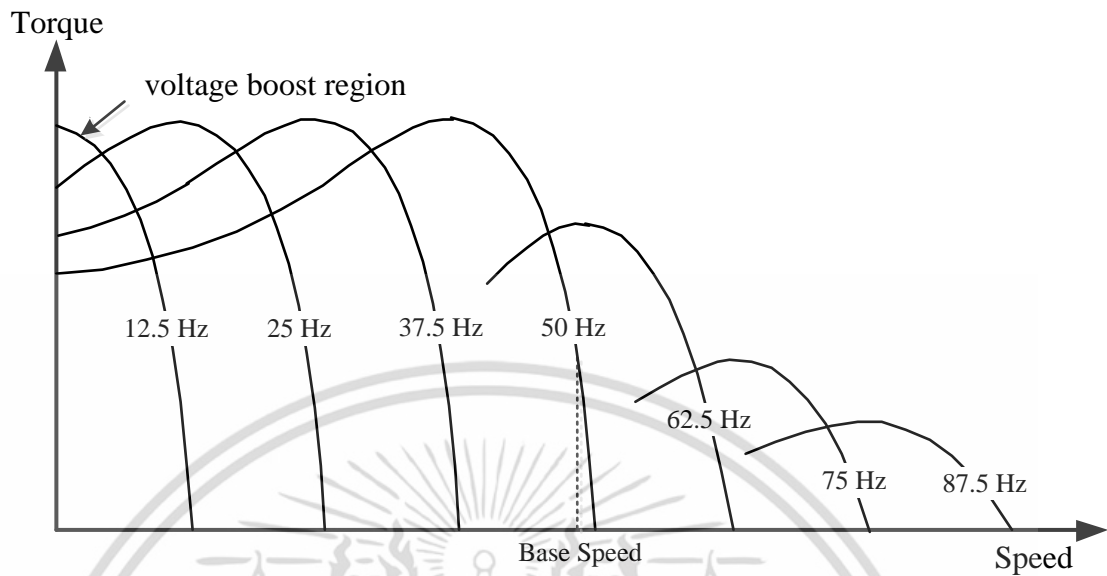
สามารถสรุปสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ทั้ง 4 โหมดในรูปควอดเรนซ์ได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์ใน 4 ควอดเรนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10 ขอบเขตการทำงานของระบบขับเคลื่อน [8]



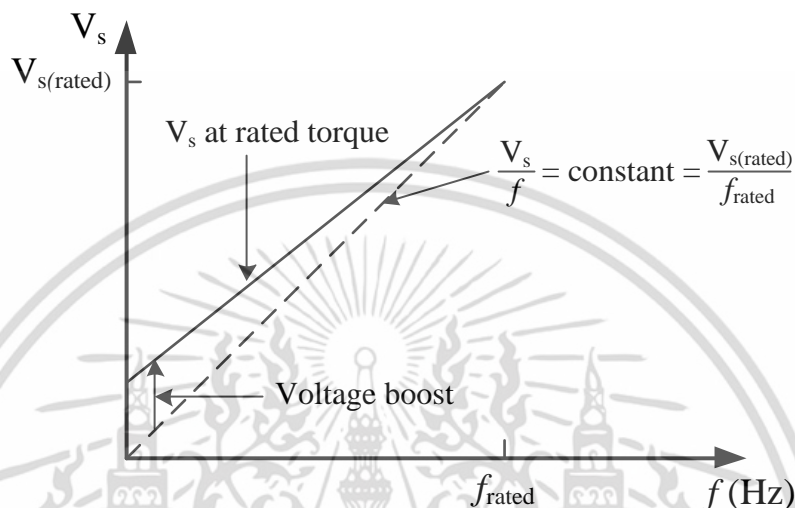
รูปที่ 3.20 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วเมื่อมอเตอร์ถูกจ่ายด้วย VSI แบบความถี่คงที่

ขอบเขตการทำงานที่ต่างกันของเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วสำหรับการปรับความเร็วของระบบขับเคลื่อนโดยการปรับความถี่และแรงดันแหล่งจ่ายดังที่แสดงในรูปที่ 3.20 เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ที่ความถี่ต่ำ ๆ ค่าแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์จะมีค่าต่ำกว่าค่าแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ขณะทำงานที่ความถี่สูงหรือความถี่มูลหลัก (50 Hz) ซึ่งจะมีปัญหาในกรณีที่โหลดต้องการแรงบิดเริ่มหมุนสูง ๆ กรณีนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่ ( $V/f$ ) ที่ค่าความถี่ต่ำดังกล่าวเพื่อที่จะรักษาระดับฟลักซ์แม่เหล็กให้คงที่ เทคนิคดังกล่าวถูกเรียกว่า การเพิ่มแรงดันในสภาวะความเร็วต่ำ (Low-speed voltage boosting) คุณสมบัติของเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ในสภาวะความเร็วต่ำที่มีการปรับปรุงแก้ไขแรงบิดด้วยการเพิ่มแรงดันแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.20 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามอเตอร์สามารถที่จะสร้างแรงบิดสูงสุดได้ทุก ๆ ค่าความเร็วจากศูนย์ไปจนถึงค่าความเร็วฐาน (Base speed) ที่ความถี่มูลหลัก 50 Hz จึงเรียกช่วงดังกล่าวว่าเป็นช่วงแรงบิดคงที่ (Constant torque) ซึ่งหมายถึงแต่ละค่าความถี่ไปจนถึงความเร็วฐาน

เพื่อความชัดเจนของการเพิ่มแรงดันเพื่อชดเชยค่าฟลักซ์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่ำ ๆ

ซึ่งเมื่อพิจารณาวจรสมมูลแล้ว จะเห็นว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายค่าแรงดันและความถี่ต่ำให้กับมอเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดมอเตอร์เฉพาะค่าอินดักทีฟ รีแอกแตนซ์ (Inductive reactance,  $X_L$ ) ลดลงไปด้วย แต่ค่าความต้านทานยังคงที่ จึงทำให้สัดส่วนแรงดันตกคร่อมความต้านทานกับแรงดันของแหล่งจ่ายมากขึ้นเมื่อความถี่ต่ำอย่างเป็นเชิงเส้น โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องชดเชยอันเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.21



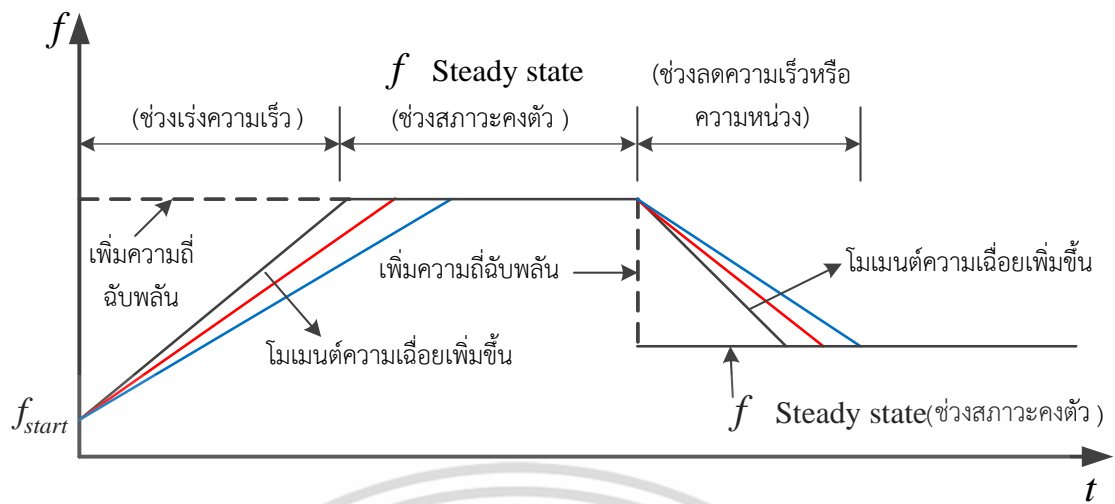
รูปที่ 3.21 การชดเชยแรงดันเพื่อรักษาแรงบิดคงที่เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายความถี่ต่ำ

### 3.11 หลักการทำงานการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล [9]

การเดินเครื่องมอเตอร์แบบนิ่มนวลนั้นสามารถลดแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ขณะเริ่มเดินเครื่อง โดยวิธานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวลด้วยการเปลี่ยนความถี่ทางไฟฟ้า โดยเริ่มจากความถี่ศูนย์ไปจนถึงความถี่ที่พิกัดแบบเชิงเส้น

การเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวลด้วยการเปลี่ยนแปลงความถี่นั้นจะเพิ่มความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์อย่างต่อเนื่องและเป็นเชิงเส้น โดยใช้หลักการอัตราส่วนแรงดันต่อความถี่คงที่ที่พิกัด เพื่อที่จะให้เส้นแรงแม่เหล็กคงที่ที่พิกัด โดยความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างแรงดันและความถี่ดังรูปที่ 3.13

จากรูปที่ 3.22 อัตราการเร่งและการหน่วงของการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล เป็นการควบคุมบนพื้นที่ของเวลา คือเวลาที่เพิ่มขึ้นต่อแรงดันไฟฟ้า (Ramp Time) โดยการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเริ่มเดินมอเตอร์ไว้ก่อนและเพิ่มแรงดันขึ้นจนถึงพิกัดตามเวลาที่กำหนด



รูปที่ 3.22 อัตราการเร่งและการหน่วงของการเริ่มเดินเครื่องแบบนิ่มนวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

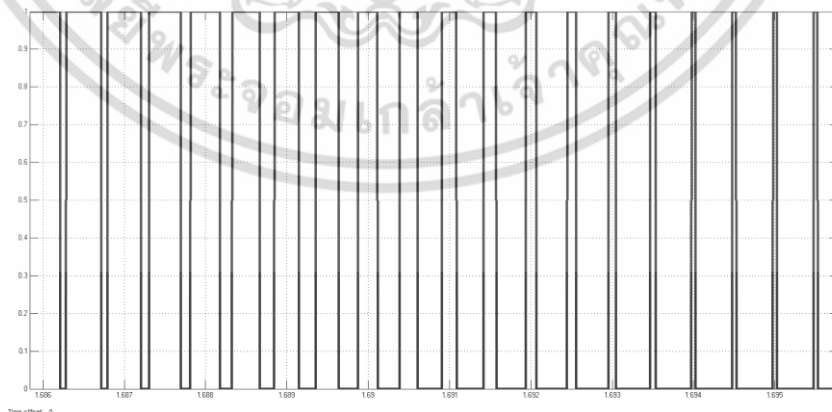
### ขั้นตอนและการออกแบบการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

อินเวอร์เตอร์ที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าด้านเดียวเป็นการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อควบคุมขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าด้านออก โดยส่งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแล้วส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันด้านออกเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้วจ่ายไปยังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

#### 4.2 สร้างสัญญาณสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

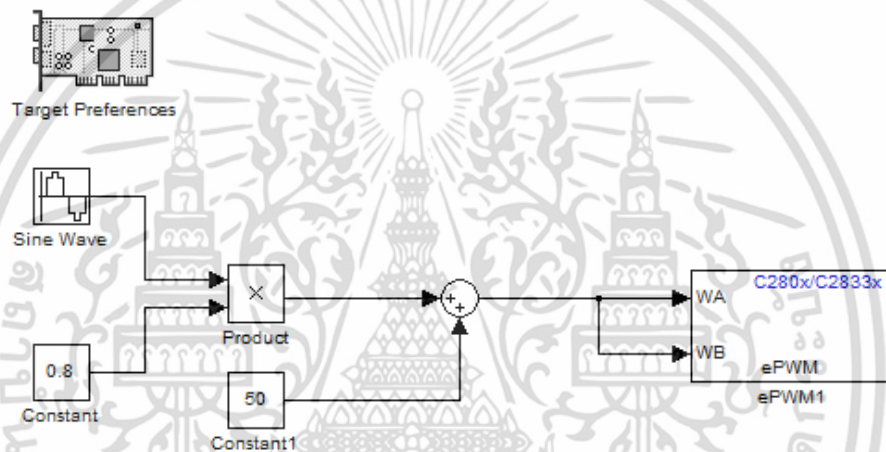
ในการทดสอบใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดไบโพลาร์ ในการสร้างสัญญาณสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต้องการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ตามที่ต้องการได้ โดยใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งความถี่สวิตช์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความถี่สามเหลี่ยม ในขั้นแรกเริ่มจำลองโดยใช้โปรแกรมเมทแลบ ซิมูลิงค์ (Mathlab/Simulink) เพื่อดูว่าสัญญาณที่กำลังจะสร้างต่อไปมีลักษณะเช่นไร ตรงตามทฤษฎีหรือไม่ จากการจำลองได้ภาพสัญญาณสวิตช์แบบไบโพลาร์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการจำลองตรงตามทฤษฎี



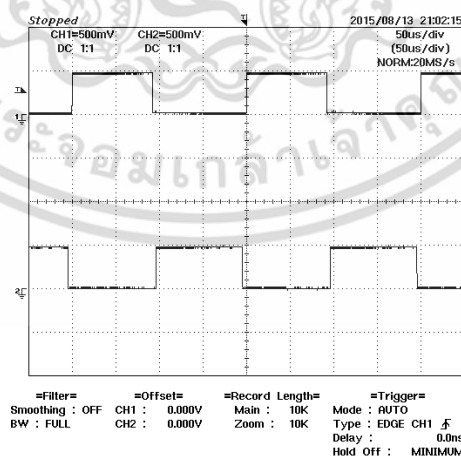
รูปที่ 4.1 แสดงภาพสัญญาณไบโพลาร์ที่ได้จากการจำลองเพื่อนำไปขับเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการทดสอบจริงใช้ C2000™ Microcontrollers มาช่วยในการสร้างสัญญาณควบคุม โดย C2000 ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาด 32 บิต แบบตามเวลาจริง (Real-time Control) โดยบล็อกไดอะแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อสร้างสัญญาณไปโพลาร์และโปรแกรมลงในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 4.2 ในการทดสอบที่ความถี่มูลฐาน  $50\text{Hz}$  กำหนดให้  $m_a$  มีค่าเท่ากับ 0.8, ความถี่สวิตซ์ซึ่ง  $5\text{kHz}$  และตั้งค่าเดทไทม์ (Dead Time)  $4\mu\text{s}$  ให้สัญญาณออกที่พอร์ต ePWM1A และ ePWM1B ซึ่งมีขนาดแรงดันด้านออกเท่ากับ 3.3V โดยสัญญาณออกจากพอร์ต ePWM1A และ ePWM1B แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยสัญญาณแฉวบนเป็นสัญญาณที่ได้จากพอร์ต ePWM1A และสัญญาณที่ออกจากพล็อต ePWM1B แสดงสัญญาณแฉวล่างของภาพ

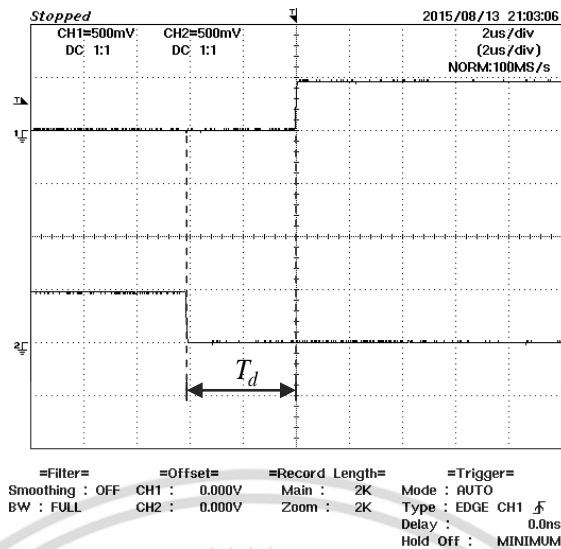


รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณไปโพลาร์



รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณไปโพลาร์ที่ออกจากพอร์ต ePWM1A และ ePWM1B

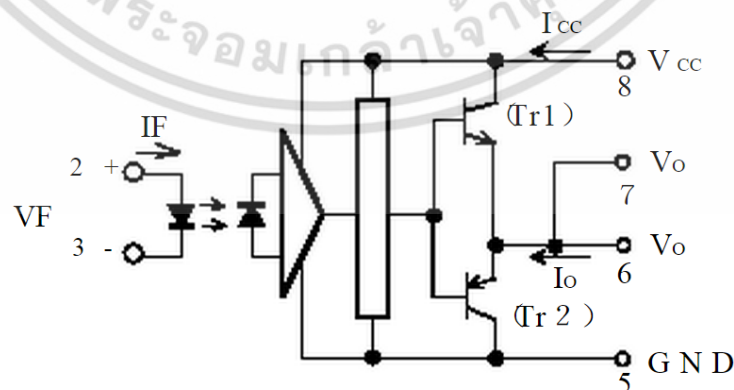
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงเดดไทม์สัญญาณสวิตช์  $4\mu\text{s}$

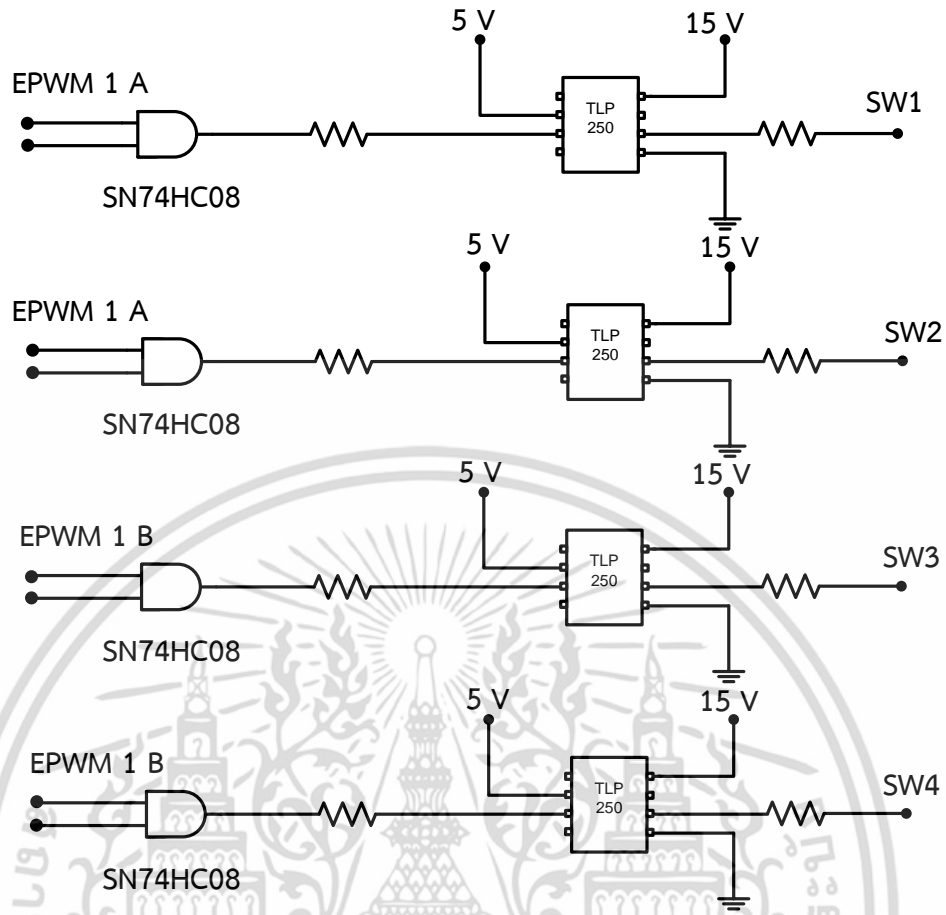
### 4.3 วงจรขับเคลื่อน

เมื่อได้สัญญาณควบคุมมาแล้วยังไม่สามารถส่งเข้าสู่ขาเกตของตัวไอพีเอ็มโมดูลโดยตรงได้ ดังนั้นจำเป็นต้องส่งสัญญาณควบคุมจาก C2000 ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าสู่วงจรขับเพื่อส่งสัญญาณขับเกตเข้าสู่ไอจีบีที โดยไอจีบีทีที่เลือกใช้เป็นโมดูลสำเร็จรูปควบคุมให้นำกระแสและหยุดนำกระแสโดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขาเกตซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการควบคุม วงจรขับเคลื่อนใช้ไอซีออปโตไอโซเลเตอร์เบอร์ TLP250 ในการขับนำ ไดอะแกรมภายใน TLP 250 แสดงดังรูปที่ 4.5 และวงจรที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งวงจรขับเคลื่อนที่ใช้เป็นวงจรที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยใช้วงจรขับเคลื่อนทั้งหมด 4 ชุดเพื่อขับไอพีเอ็มเพาเวอร์โมดูล 2 ถึง 4 ตัว



รูปที่ 4.5 แสดงไดอะแกรมภายในไอซีออปโตไอโซเลเตอร์ TLP 250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

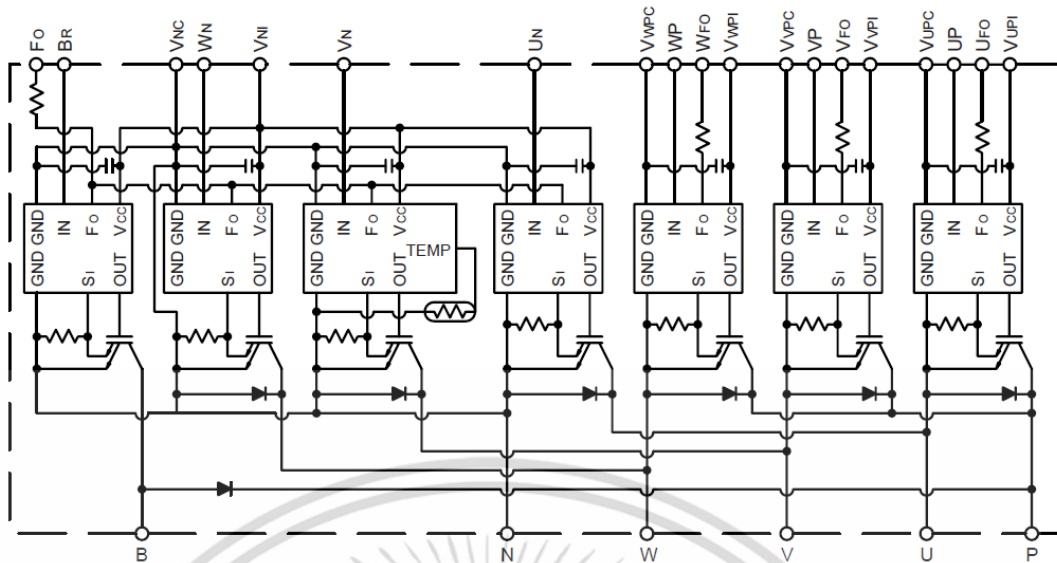


รูปที่ 4.6 แสดงวงจรขับนำสัญญาณเกิด

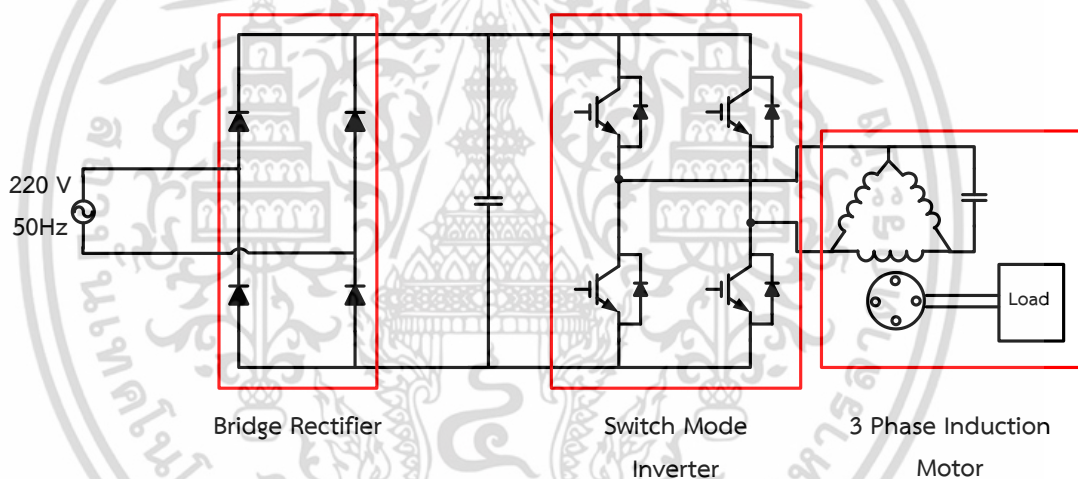
#### 4.4 วงจรกำลัง

ส่วนของวงจรกำลัง ในการออกแบบวงจรกำลังใช้ไอพีเอ็มเพาเวอร์โมดูล (IPM Power Modules) เบอร์ PM25RSB120 ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่องานเพาเวอร์สวิตชิง ทำงานที่ความถี่สูงถึง 20 kHz เหมาะกับงานประเภทอินเวอร์เตอร์, ยูพีเอส (UPS), แหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply) ซึ่งเหมาะกับงานวิจัยนี้ด้วย โดยภายในประกอบด้วยไอจีบีทีและชุดขับเกตภายในซึ่งทำหน้าที่ตัดป้องกัน โดยชุดป้องกันจะทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจร (Short Circuit), กระแสเกิน (Over Current), อุณหภูมิเกิน (Over Temperature), แรงดันไฟเลี้ยงต่ำ (Under Voltage) และไดอะแกรมของไอพีเอ็มเพาเวอร์โมดูลแสดงดังรูปที่ 4.7 และวงจรที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงไดอะแกรมวงจรภายในเฟ้าเวอร์โมดูล PM25RSB120

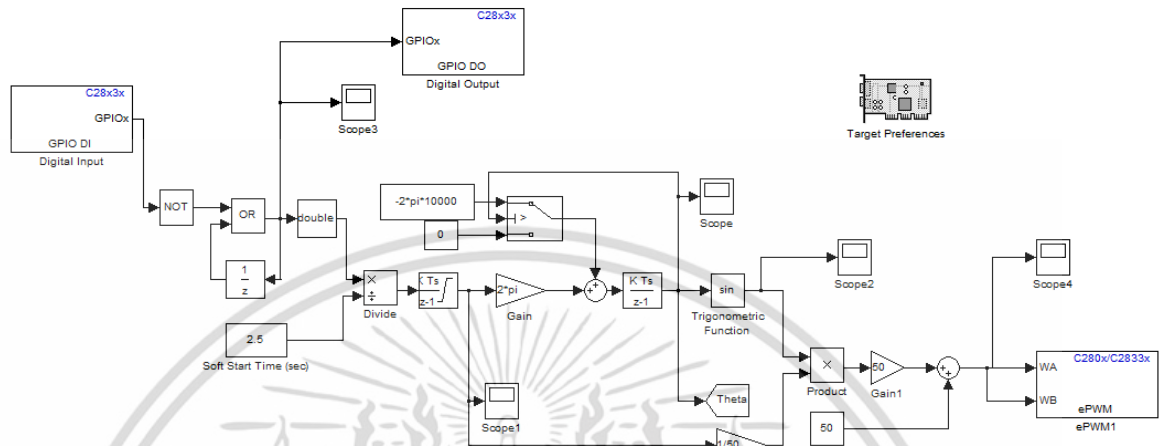


รูปที่ 4.8 แสดงวงจรกำลังที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่วงจรโดยผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดไดโอด เมื่อผ่านวงจรเรียงกระแสแรงดันที่ออกมาจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วส่งต่อมายังอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดของแรงดันและความถี่ โดยป้อนสัญญาณควบคุมที่ได้จาก C2000 ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าสู่วงจรขับเคลื่อน แล้ววงจรขับเคลื่อนจะส่งสัญญาณมาคอนโทรลขาเกิดภายในไอพีเอ็มเฟ้าเวอร์โมดูล เพื่อควบคุมขนาดแรงดันและความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การออกแบบการเริ่มต้นเครื่องแบบนิ่มนวล



รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการเริ่มต้นเครื่องแบบนิ่มนวล

การออกแบบการเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบนุ่มนวลด้วยการเปลี่ยนความถี่นั้นสามารถสร้างบล็อกไดอะแกรมดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 โดยจะกำหนดเวลาการเริ่มต้นเครื่องจากความถี่ศูนย์ไปจนถึงความถี่พิกัดเป็นเส้นตรงแบบเชิงเส้น เพื่อคำนวณความถี่ ( $f_1$ ) ที่จะป้อนให้กับมอเตอร์ โดยจำกัดความถี่  $f_1$  ที่  $f_{rated} = f_{max}$

$$f_1 = \int \frac{1}{T_{start}} \times f_{max} dt \quad (4.1)$$

เมื่อได้ความถี่มูลฐานแล้วสามารถคำนวณมุมทางไฟฟ้าได้จาก

$$\theta_1 = \int \omega_1 dt$$

$$\theta_1 = \int 2\pi f_1 dt \quad (4.2)$$

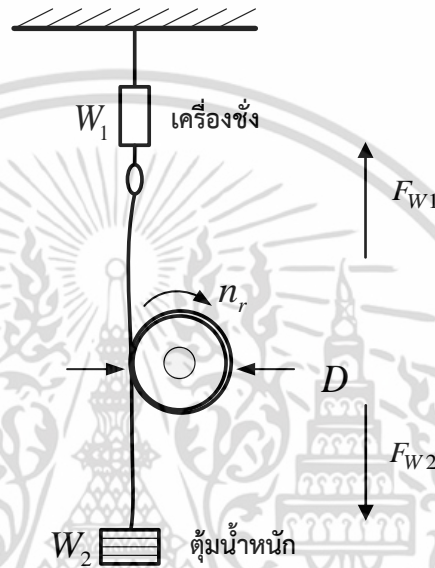
และแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$V_m(t) = \frac{f_1}{50} \times V_{dc} \times \sin(\theta_1) \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การทดสอบขับโหลดโดยใช้พู่เลย์ (Pulley)

การทดสอบการขับโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยใช้รอก ที่มีช่องว่างตรงกลางรอกเพื่อใส่น้ำเข้าไปกลางรอกในขณะที่มอเตอร์หมุน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างรอกและเชือกที่ใช้พันรอบรอกเพื่อใส่โหลดในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ชุดทดสอบโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้รอก

หลักการทำงานของการใช้รอกและลูกตุ้มน้ำหนักเป็นภาระทางกล

โดยรัศมีของพู่เลย์มีค่าเท่ากับ  $\frac{D}{2} = r$

และแรงลัพธ์มีค่าเท่ากับ

$$F_{total} = F_{W2} - F_{W1}$$

เมื่อ  $n_r = 0 \text{ rpm}$  ฉะนั้นแรงดึงเชือกจะมีค่าเท่ากัน

$$W_1 = W_2 \quad (4.4)$$

เมื่อ  $n_r > 0 \text{ rpm}$  ฉะนั้นแรงดึงเชือกจะมีค่าเท่ากัน

$$W_1 < W_2 \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากทิศทางการหมุนทำให้เกิดความผิดดิ่งลูกตุ้มน้ำหนักที่ผูกอยู่กับเชือก ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากตาชั่ง  $W_1$  มีค่าน้อยกว่า  $W_2$  จึงสามารถคำนวณหาแรงดึงเชือกของมอเตอร์ได้จาก

$$F_{pulley} = 9.81(W_2 - W_1) \quad (4.6)$$

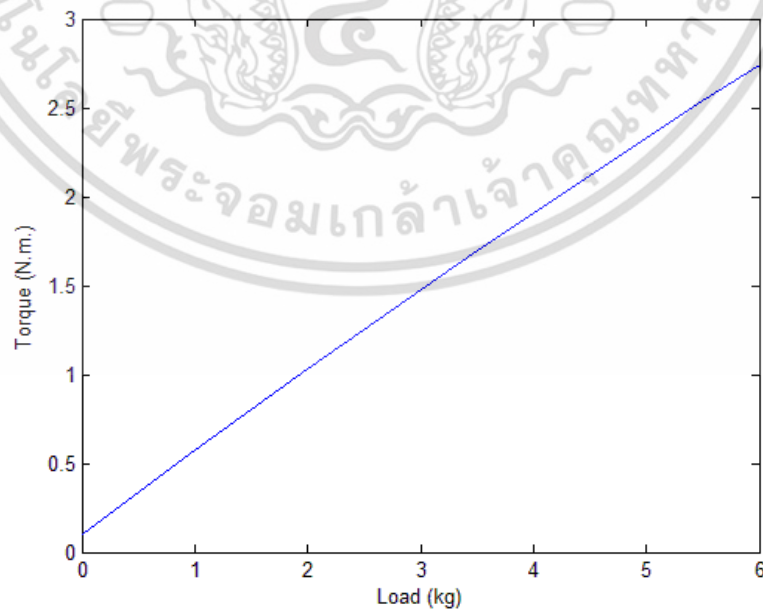
คำนวณแรงบิดได้จาก

$$T_{pulley} = 9.81(W_2 - W_1) \frac{D}{2} \quad (4.7)$$

และสามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับโหลดได้จาก

$$P_{o/p} = T_{pulley} \omega_r \quad (4.8)$$

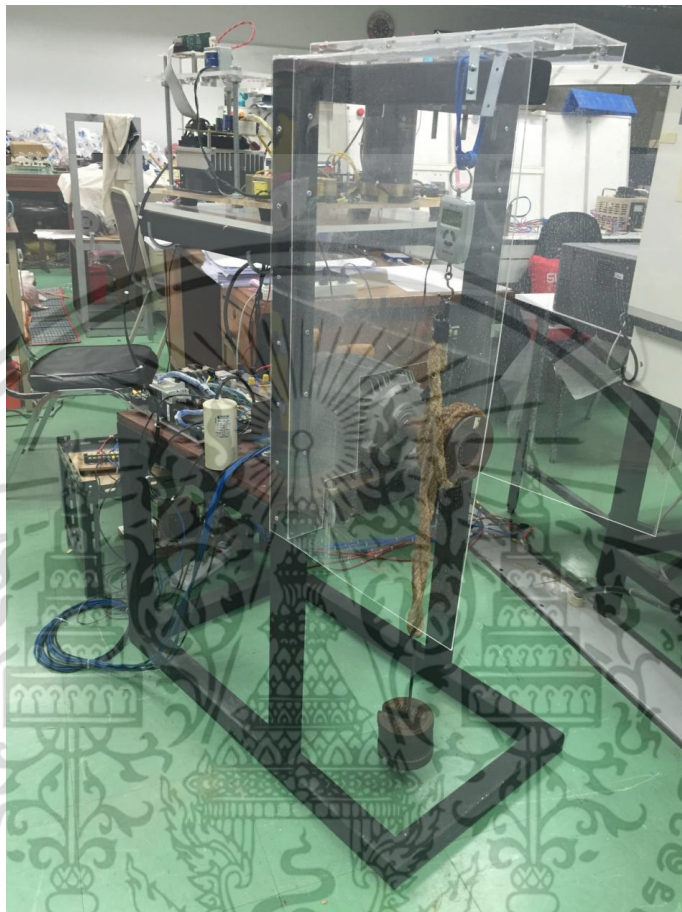
โดย  $W_1$ : ค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากตาชั่ง มีหน่วยเป็น kg  
 $W_2$ : ค่าน้ำหนักที่ใส่ มีหน่วยเป็น kg  
 $D$ : เส้นผ่านศูนย์กลางพูลเลย์  
 $F_{pulley}$ : แรงดึงเชือกของมอเตอร์  
 $T_{pulley}$ : แรงบิดที่ใช้ขับโหลด  
 $P_{o/p}$ : กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับโหลด



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์โหลดและแรงบิดแสดงดังกราฟรูปที่ 4.11 โดยค่าแรงบิดที่ได้จากการทดสอบ เพื่อหาค่าน้ำหนักที่ใส่โหลด และค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากตาชั่งนำมาคำนวณดังสมการที่ (4.7) ได้ ความสัมพันธ์ของโหลดและแรงบิดดังภาพ



รูปที่ 4.12 แทนทดสอบภาระทางกลโดยใช้ฟูเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการจำลองและการทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและการจำลองการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสด้วยเทคนิคการควบคุมสวิตช์แบบไบโพลาร์ โดยใช้ C2000 ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม และใช้ IPM Module รุ่น PM25RSB120 เป็นวงจรกำลังซึ่งมีอุปกรณ์สวิตช์กำลัง 6 ตัว ต่อรองรับอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง แต่เลือกใช้เพียง 2 กิ่ง เนื่องจากต้องการนำมาใช้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว โดยมีหลักการทำงาน คือ จ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ตัววงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับต้านออกเพื่อจ่ายให้กับยังมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสดังที่กล่าวไว้แล้วโดยละเอียดในบทที่ 4 โดยพิจารณาสมรรถนะของมอเตอร์ทั้ง ประสิทธิภาพ ความเร็ว แรงบิด และค่าตัวประกอบกำลัง ที่ความถี่ 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz และ 60Hz เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส และอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส รวมถึงการวิเคราะห์เทคนิคการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบนุ่มนวลและเปรียบเทียบกับการสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง ซึ่งพิกัดของมอเตอร์ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 5.1

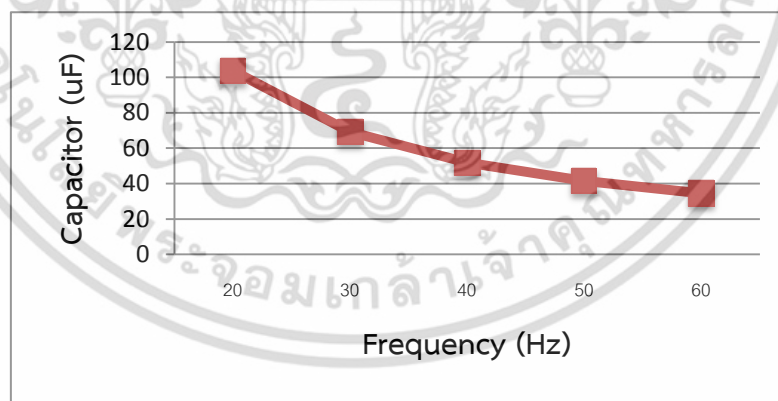
ตารางที่ 5.1 พิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 แรงม้าที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดัน	220/380	(V)
กระแส	6.1/3.5	(A)
ความเร็วรอบ	1420	(rpm)
ความถี่	50	(Hz)
จำนวนโพล	4	(P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

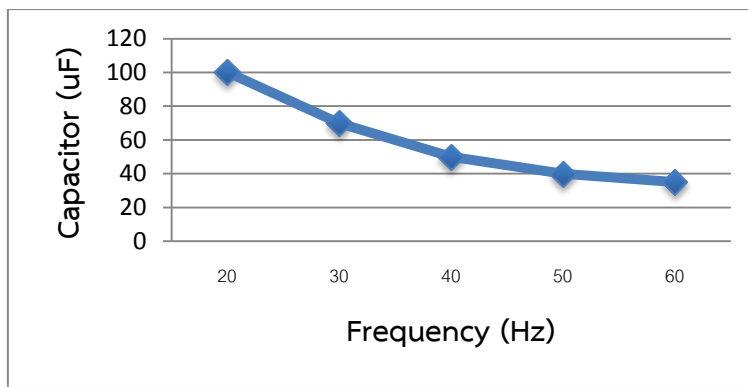
## 5.2 ผลการคำนวณค่าตัวเก็บประจุ

จากการคำนวณดังสมการที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งโค้ดที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์แสดงดังภาคผนวก ก. เพื่อให้ได้ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมาต่อคร่อมเฟสหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อให้เกิดกระแสไหลในขดลวดสเตเตอร์แล้วเกิดสนามแม่เหล็กหมุนทำให้ออเตอร์ 3 เฟสสามารถทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสได้ โดยนำสมการนั้นมาคำนวณด้วยโปรแกรมแมทแลบ/ซิมูลิงค์ ผลที่ได้ดังกราฟรูปที่ 5.1 พบว่าค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีนี้มีค่าที่ต่างกัน คือ ที่ค่าความถี่ 20Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 103.7 $\mu$ F ที่ความถี่ 30Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 69.41 $\mu$ F ที่ความถี่ 40Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 51.85 $\mu$ F ที่ความถี่ 50Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 41.48 $\mu$ F และที่ความถี่ 60Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 34.57 $\mu$ F ดังกราฟรูปที่ 5.1 แต่ในทางปฏิบัติไม่มีค่าตัวเก็บประจุตรงตามที่คำนวณไว้ จึงเลือกใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ โดยมีค่าความผิดพลาดจากค่าที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน 4% คือ ที่ความถี่ 20Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 100 $\mu$ F ที่ความถี่ 30 Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 70  $\mu$ F ความถี่ 40 $\mu$ F ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 50  $\mu$ F ความถี่ 50Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 40 $\mu$ F และที่ความถี่ 60Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 35 $\mu$ F ดังกราฟรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ต่างๆซึ่งได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ความถี่ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

### 5.3 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์

ในการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพ, แรงบิด, ความเร็วรอบ, ค่าตัวประกอบกำลังสเปกตรัมแรงดันและกระแส ตั้งแต่ไม่มีภาระทางกลแล้วเพิ่มภาระทางกลให้กับมอเตอร์ พิจารณาเช่นนี้ในทุกๆความถี่ตั้งแต่ 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz และ 60Hz จากนั้นนำค่าที่ได้ของแต่ละความถี่มาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ต่อไป

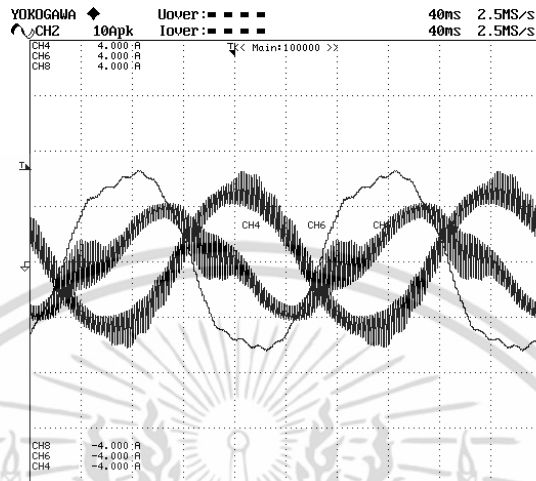
การทดสอบใช้อุปกรณ์ Power Analyzer รุ่น PZ4000 ดังแสดงในภาคผนวก ข. ใช้ในการวัดค่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ แรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ กระแสและแรงดันแต่ละเฟส, ค่าตัวประกอบกำลังที่ป้อนเข้ามอเตอร์, กำลังที่ป้อนเข้ามอเตอร์ รวมไปถึงค่าความผิดพลาดของรูปคลื่นกระแสและแรงดัน และบันทึกภาพรูปคลื่นกระแสแรงดันที่ได้ โดยเริ่มวิเคราะห์จากความถี่ 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz และ 60Hz ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์ที่อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ความถี่ 50Hz เทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแส

#### 5.3.1 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 20Hz ตัวเก็บประจุ 100uF

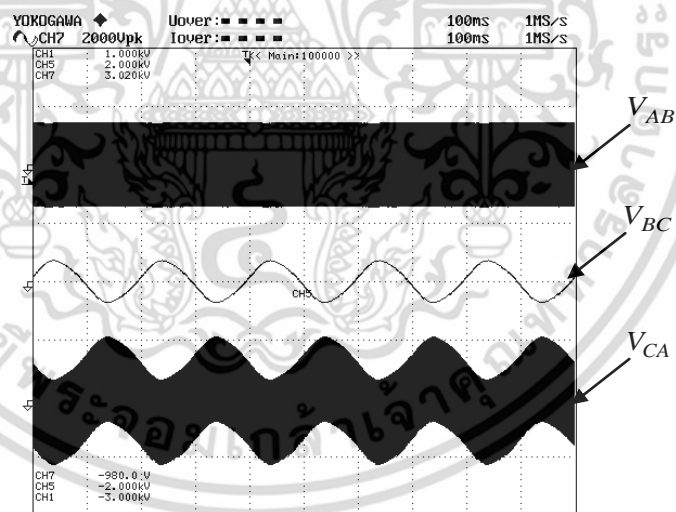
กราฟรูปที่ 5.3 - 5.9 ผลที่ได้จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ความถี่ 20Hz โดยต่อตัวเก็บประจुरूมเฟสของมอเตอร์ค่า  $100\mu F$  โดยรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีโหลดทางกล โดยกระแสในแต่ละเฟสเลื่อนเฟสประมาณ  $90^\circ$  คือ  $I_A$  นำหน้า  $I_B$  เป็นมุมประมาณ  $90^\circ$  ซึ่งคล้ายกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส และ  $I_C$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส C ซึ่งเมื่อรวมกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส B ( $I_B$ ) จะมีเท่ากับกระแสที่ไหลในขดลวดเฟส A ( $I_A$ ) ซึ่งดังรูปที่ 5.3 แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเต

เตอร์ทั้ง 3 เฟสดังรูปที่ 5.4 โดยด้านบนสุดของภาพเป็นแรงดันเฟสที่ตกคร่อมเฟส A รูปคลื่นแรงดันที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นเชิงบริบูรณ์ขึ้นดำเนินการตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เป็นไบโพลาร์, ถัดมารูปคลื่นรูปกลางของภาพเป็นแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส B ที่ต่อตัวเก็บประจุขนานขดลวดทำให้รูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นไซน์ และสุดท้ายด้านล่างสุดของรูปแรงดันตกคร่อมเฟส C

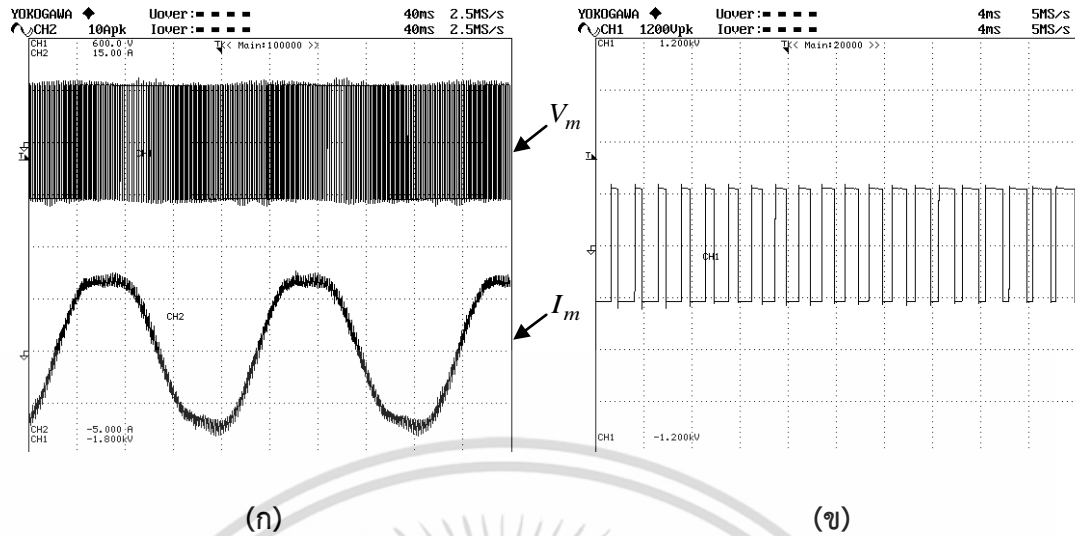


รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโหลดทางกล ที่ความถี่ 20Hz ตัวเก็บประจุ  $100\mu F$



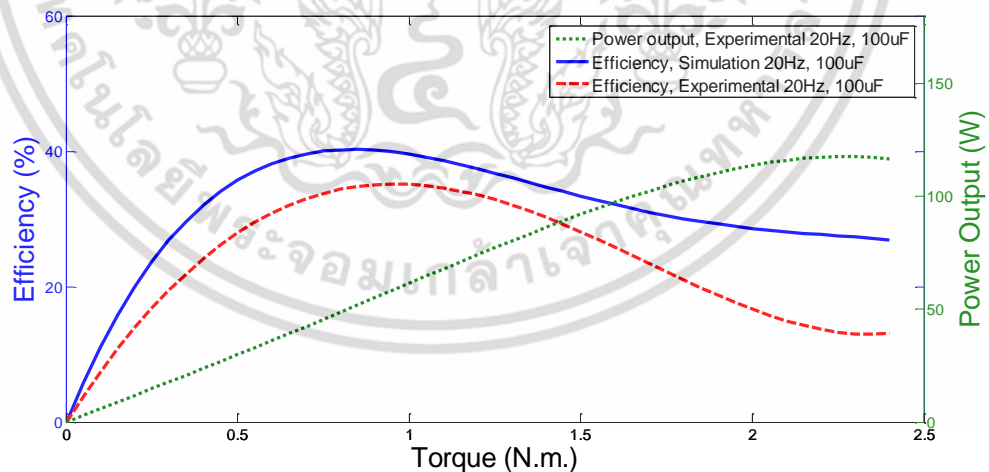
รูปที่ 5.4 แรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 20Hz ตัวเก็บประจุ  $100\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 (ก.) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข.) รูปคลื่นขยายแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ ที่ความถี่  $20\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$

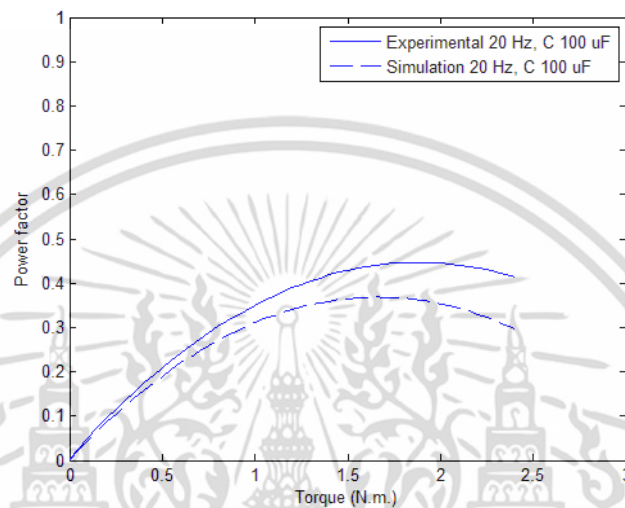
รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ โดยภาพ (ก) ด้านบนเป็นภาพแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่งเท่ากับแรงดันคร่อมสวิตช์ รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์ เมื่อขยายดูสัญญาณแรงดันจะเห็นดังรูปที่ 5.5 (ข) และภาพ 5.5 (ก) ด้านล่างเป็นภาพรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ซึ่งมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบผลค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $20\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$

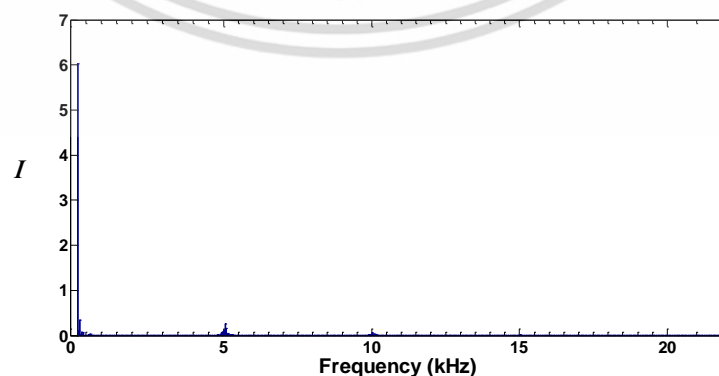
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบผลค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $20\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$  โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวทสวไรสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่วัดได้ 35% ผลที่ได้จากการจำลองค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ได้ 40% และกราฟกำลังไฟฟ้านอกที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6 ด้วย รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 20Hz ตัวเก็บประจุ 100 $\mu$ F โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าตัวประกอบกำลังที่ดีที่สุดที่วัดได้คือ 0.45 ที่ภาระทางกล 2 N.m.



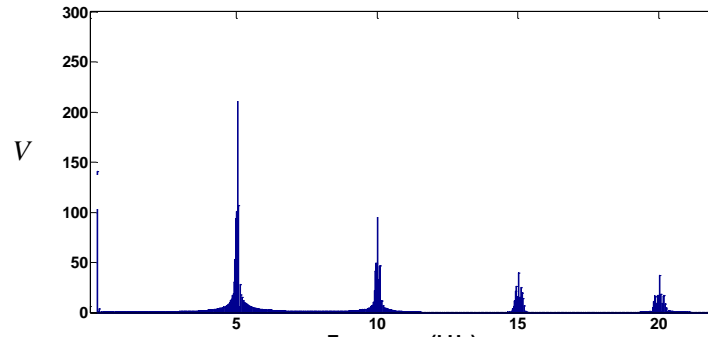
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบผลค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 20Hz ตัวเก็บประจุ 100 $\mu$ F

ค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่ 20Hz ค่าตัวเก็บประจุ 100 $\mu$ F ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.9 พบว่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกที่เกิดที่จะเกิดในช่วงความถี่ 5kHz, 10kHz, 15kHz, 20kHz,... ซึ่งตรงตามทฤษฎี คือไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ 1 $m_f$ , 2 $m_f$ , 3 $m_f$ ,...



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมกระแส  $I_m$  ที่ความถี่ 20Hz ค่าตัวเก็บประจุ 100 $\mu$ F

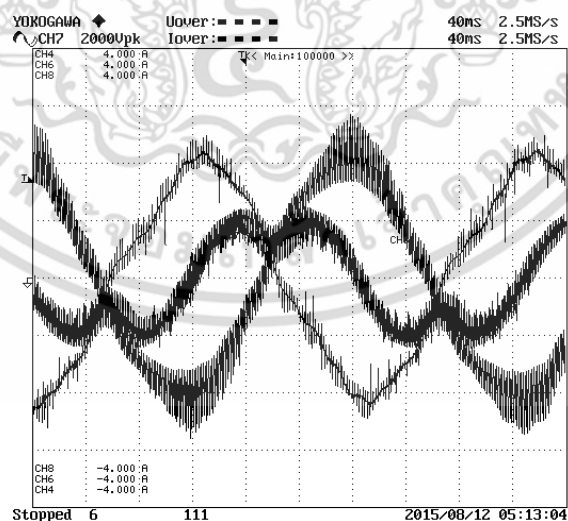
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 สเปกตรัมแรงดัน  $V_m$  ที่ความถี่  $20\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$

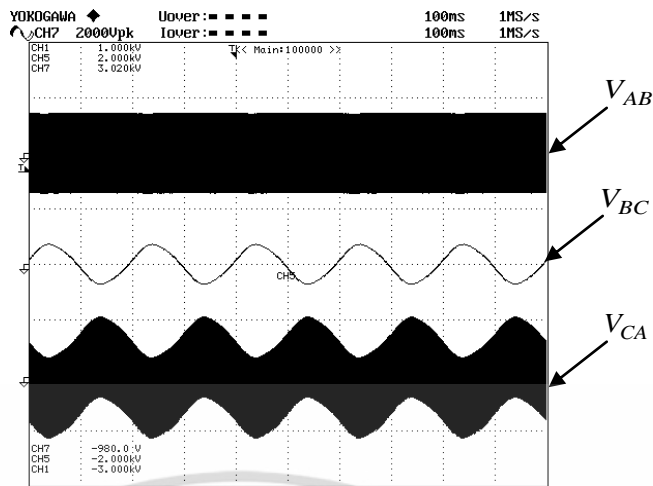
### 5.3.2 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ $30\text{Hz}$ ตัวเก็บประจุ $70\mu\text{F}$

กราฟรูปที่ 5.10-5.16 ผลที่ได้จากการทดสอบพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ความถี่  $30\text{Hz}$  โดยต่อตัวเก็บประจุคร่อมเฟสของมอเตอร์ค่า  $70\mu\text{F}$  โดยรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีโหลดทางกล โดยกระแสในแต่ละเฟสเลื่อนเฟสประมาณ  $90^\circ$  และมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์ ซึ่ง  $I_A$  นำหน้า  $I_B$  เป็นมุมประมาณ  $90^\circ$  ซึ่งคล้ายกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส และ  $I_C$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส C ซึ่งเมื่อรวมกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส B ( $I_B$ ) จะมีเท่ากับกระแสที่ไหลในขดลวดเฟส A ( $I_A$ ) ซึ่งดังรูปที่ 5.10



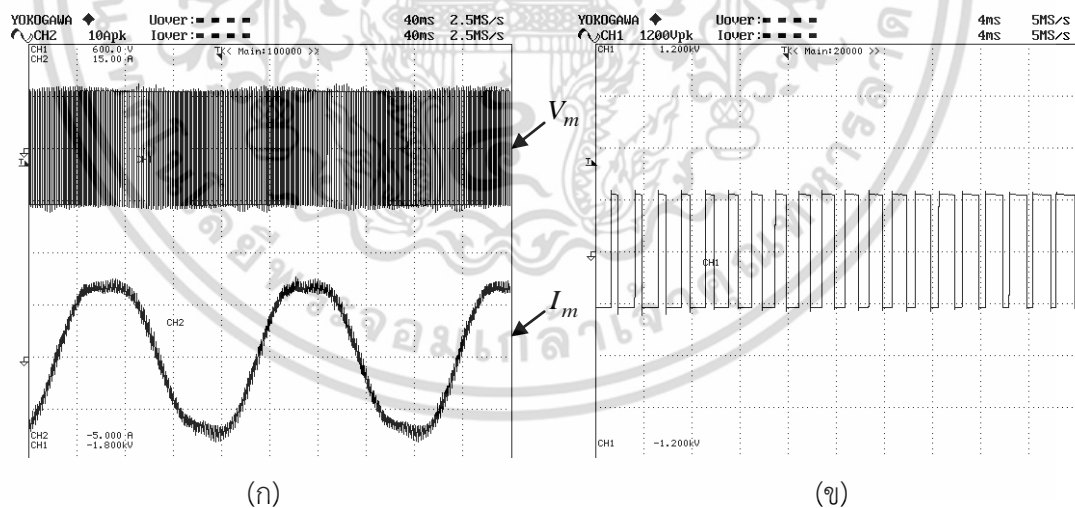
รูปที่ 5.10 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโหลดทางกล ที่ความถี่  $30\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $70\mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่  $30\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $70\mu\text{F}$

แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสดังรูปที่ 5.11 โดยด้านบนสุดของภาพเป็นแรงดันเฟสที่ตกคร่อมเฟส A รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์, ถัดมารูปคลื่นรูปกลางของภาพเป็นแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส B ที่ต่อตัวเก็บประจุนานขดลวดทำให้รูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นไซน์ และสุดท้ายด้านล่างสุดของรูปแรงดันตกคร่อมเฟสที่ต่อตัวเก็บประจุนานขดลวดอยู่ แรงดันที่ตกคร่อมเฟส C มีลักษณะผสมรูปคลื่นไซน์และไปโพลาร์

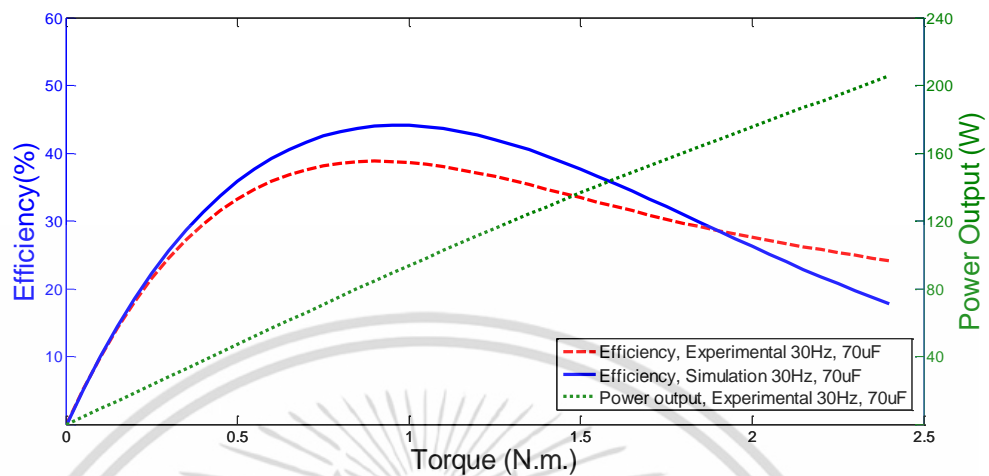


รูปที่ 5.12 (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข.) รูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมมอเตอร์

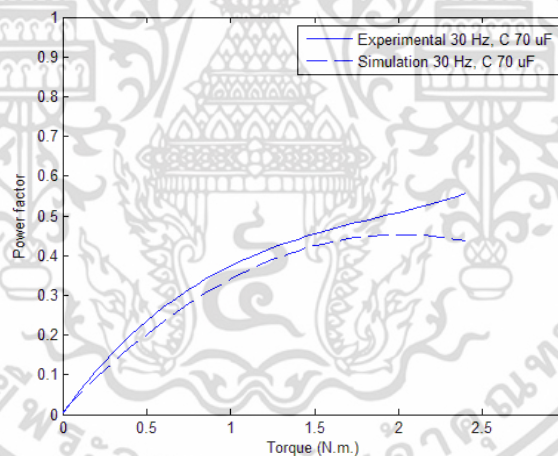
ที่ความถี่  $30\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $70\mu\text{F}$

รูปที่ 5.12 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ โดยภาพ (ก) ด้านบนเป็นภาพแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่งเท่ากับแรงดันคร่อมสวิตช์ รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์ เมื่อขยายดูสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันจะเห็นดังรูปที่ 5.5 (ข) และภาพ 5.5 (ก) ด้านล่างเป็นภาพรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ซึ่งมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์รูป



รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ 70 $\mu$ F

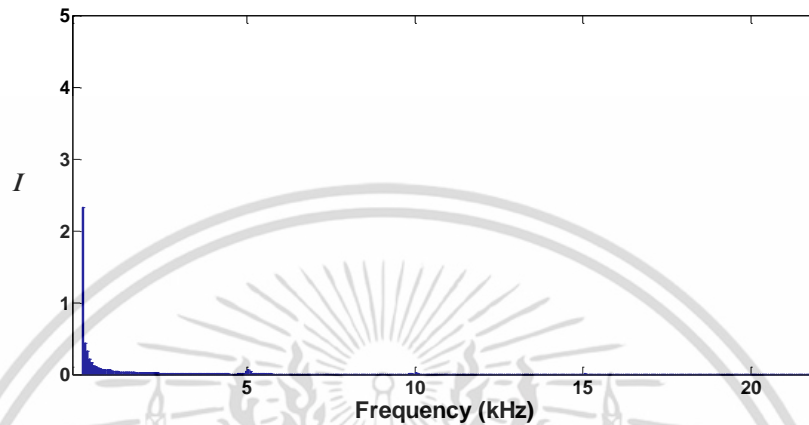


รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ 70 $\mu$ F

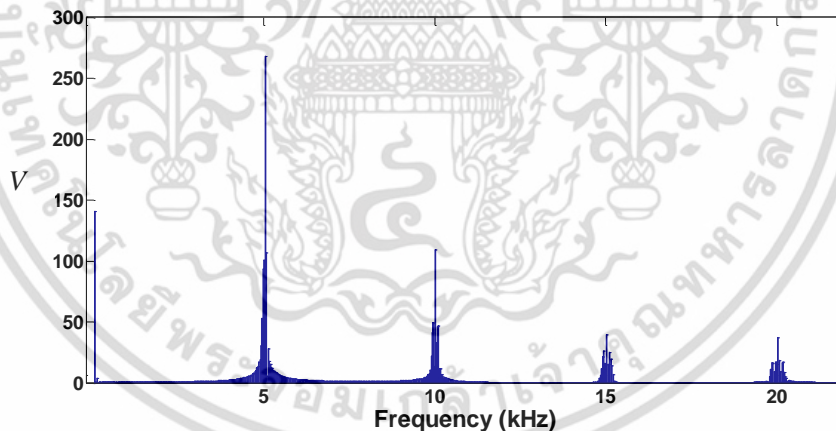
รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง และ กำลังไฟฟ้าด้านนอกที่ได้จากการทดลองที่ความถี่ 30Hz รวมถึงกำลังไฟฟ้าด้านนอกที่ภาระทางกลเบา ค่าประสิทธิภาพที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มภาระทางกลมากขึ้น ค่าประสิทธิภาพลดต่ำลงเนื่องจากกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 30Hz ตัวเก็บประจุ 70 $\mu$ F โดยผลที่ได้จากการ

จำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าตัวประกอบกำลังที่ดีที่สุดที่วัดได้คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.55 ค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่  $30\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $70\mu\text{F}$  ดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.16 พบว่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกที่เกิดที่จะเกิดในช่วงความถี่  $5\text{kHz}, 10\text{kHz}, 15\text{kHz}, 20\text{kHz}, \dots$  เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$  ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี



รูปที่ 5.15 สเปกตรัมกระแส  $I_m$  ที่ความถี่  $30\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $70\mu\text{F}$



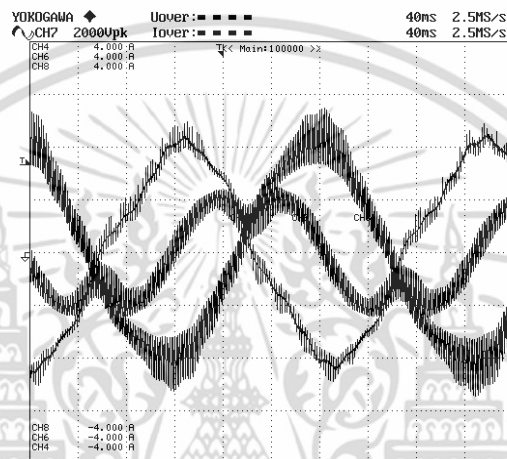
รูปที่ 5.16 สเปกตรัมกระแส  $V_m$  ที่ความถี่  $30\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $70\mu\text{F}$

### 5.3.3 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ $40\text{Hz}$ ตัวเก็บประจุ $50\mu\text{F}$

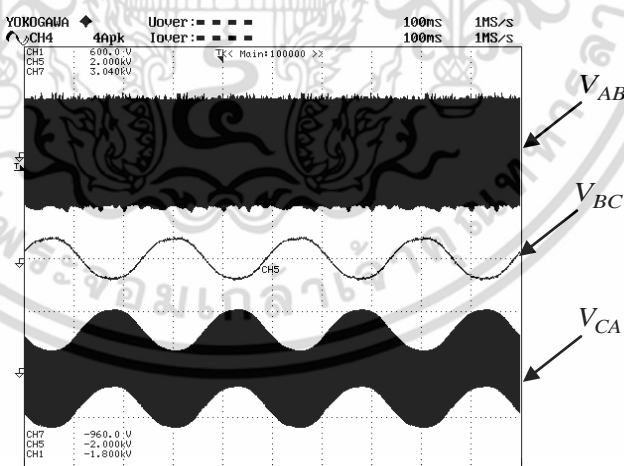
กราฟรูปที่ 5.17-5.23 ผลที่ได้จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ความถี่  $40\text{Hz}$  โดยต่อตัวเก็บประจุคร่อมเฟสของมอเตอร์ค่า  $50\mu\text{F}$  โดยรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีโหลดทางกล โดยกระแสในแต่ละเฟสเลื่อนเฟส

ประมาณ  $90^\circ$  คือ  $I_A$  นำหน้า  $I_B$  เป็นมุมประมาณ  $90^\circ$  ซึ่งคล้ายกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้เชิงพาณิชย์ การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 เฟส และ  $I_C$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส C ซึ่งเมื่อรวมกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส B ( $I_B$ ) จะมีเท่ากับกระแสที่ไหลในขดลวดเฟส A ( $I_A$ ) ดังรูปที่ 5.17 แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสดังรูปที่ 5.18 โดยด้านบนสุดของภาพเป็นแรงดันเฟสที่ตกคร่อมเฟส A รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์, ถัดมารูปคลื่นรูปกลางของภาพเป็นแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส B ที่ต่อตัวเก็บประจุขนานขดลวดทำให้รูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นไซน์ และสุดท้ายด้านล่างสุดของรูปแรงดันตกคร่อมเฟส C

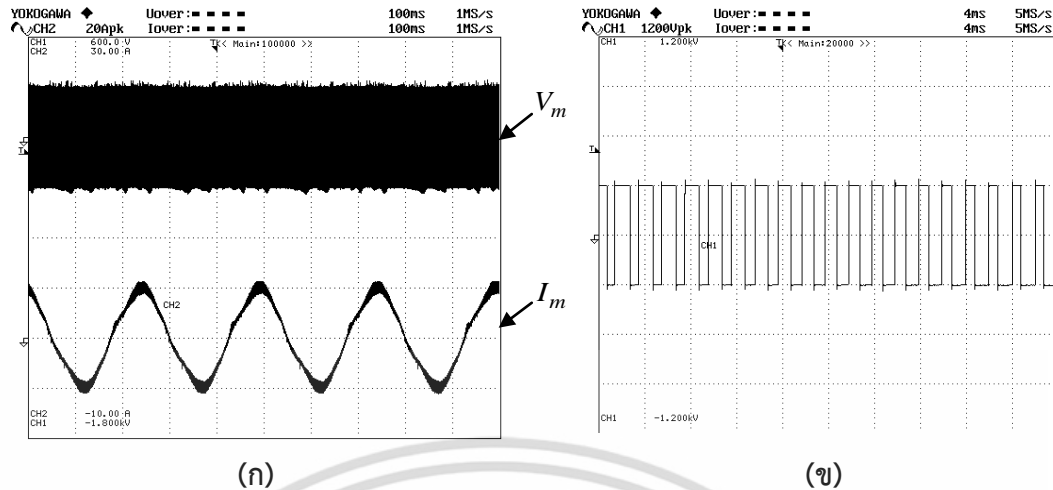


รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ  $50\mu F$



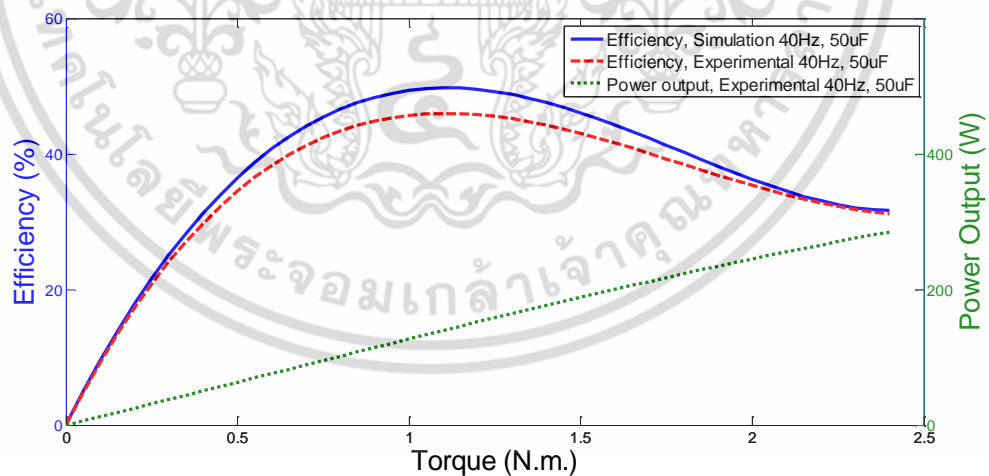
รูปที่ 5.18 แรงดันตกคร่อมขดลวดทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ  $50\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



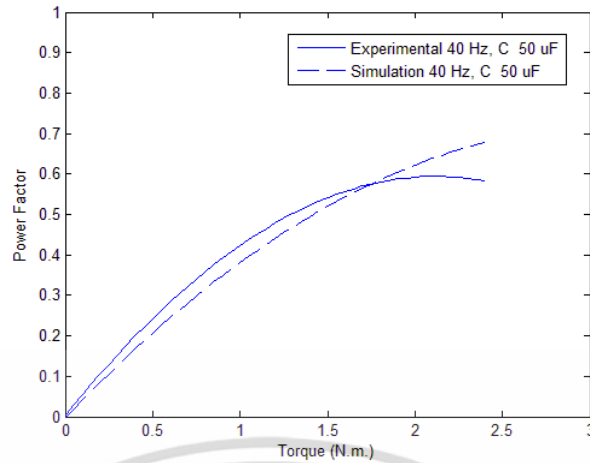
รูปที่ 5.19 (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข) รูปขยายรูปคลื่นแรงดันที่ติดคร่อมมอเตอร์ ที่ความถี่  $40\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $50\mu\text{F}$

รูปที่ 5.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ โดยภาพ (ก) ด้านบนเป็นภาพแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่งเท่ากับแรงดันคร่อมสวิตช์ รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาาร์ เมื่อขยายดูสัญญาณแรงดันจะเห็นดังรูปที่ 5.5 (ข) และภาพ (ก) ด้านล่างเป็นภาพรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ซึ่งมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์



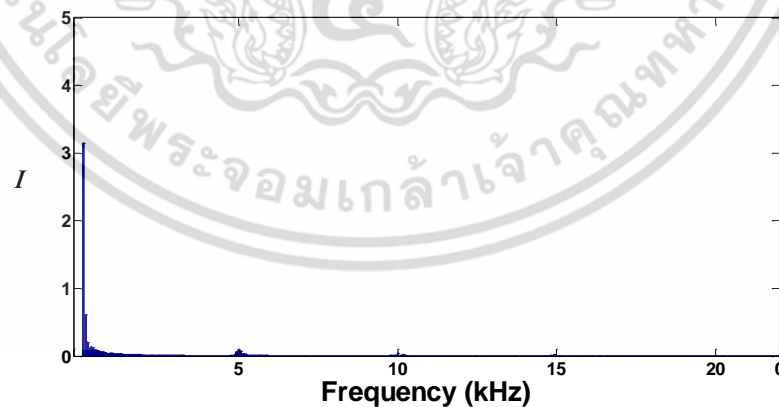
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $40\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $50\mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ 50 $\mu$ F

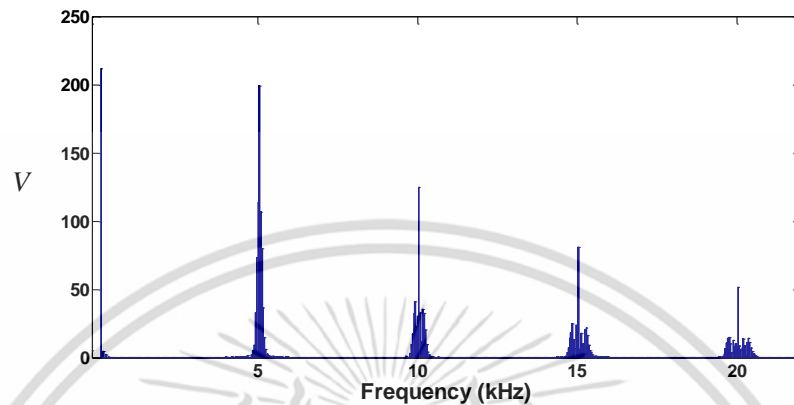
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลองและ กำลังไฟฟ้าด้านออกได้ที่ได้จากการทดลองที่ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ 50 $\mu$ F โดยผลที่ได้จากการ จำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่วัดได้ 46.51% รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบผลค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ ความถี่ 40Hz ตัวเก็บประจุ 50 $\mu$ F โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทาง เดียวกัน



รูปที่ 5.22 สเปกตรัมกระแสไหลเข้ามอเตอร์  $I_m$  ที่ความถี่ 40Hz ค่าตัวเก็บประจุ 50 $\mu$ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.22 ค่าความผิดพลาดโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสที่ความถี่  $40\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $50\mu\text{F}$  และรูปที่ 5.23 ค่าความผิดพลาดโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันที่ความถี่  $40\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $50\mu\text{F}$

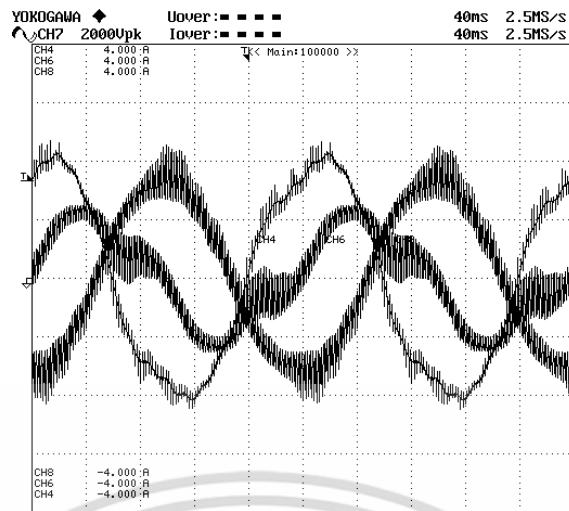


รูปที่ 5.23 สเปกตรัมแรงดันที่เข้ามอเตอร์  $V_m$  ที่ความถี่  $40\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $50\mu\text{F}$

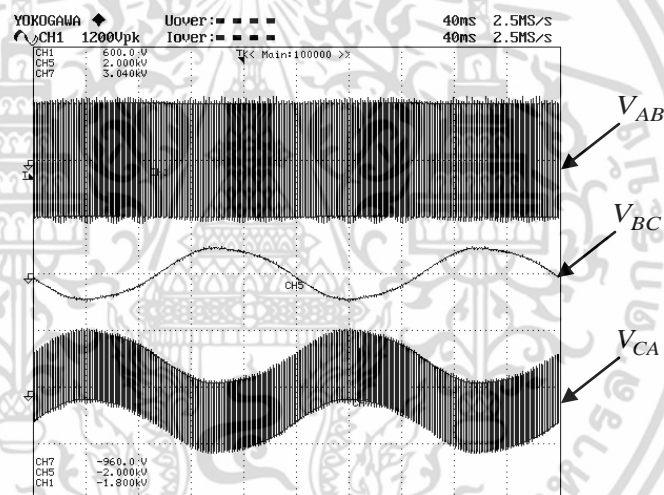
จากรูปที่ 23 พบว่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกที่เกิดที่ช่วงความถี่  $5\text{kHz}$ ,  $10\text{kHz}$ ,  $15\text{kHz}$ ,  $20\text{kHz}$  เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $1m_f$ ,  $2m_f$ ,  $3m_f$ .... ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี

### 5.3.4 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ $50\text{Hz}$ ตัวเก็บประจุ $50\mu\text{F}$

กราฟรูปที่ 5.24-5.30 ผลที่ได้จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  โดยต่อตัวเก็บประจุค่า  $40\mu\text{F}$  คร่อมเฟสของมอเตอร์โดยรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีโหลดทางกล โดยกระแสในแต่ละเฟสเลื่อนเฟสประมาณ  $90^\circ$  คือ  $I_A$  นำหน้า  $I_B$  เป็นมุมประมาณ  $90^\circ$  ซึ่งคล้ายกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส และ  $I_C$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส C ซึ่งเมื่อรวมกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส B ( $I_B$ ) จะมีเท่ากับกระแสที่ไหลในขดลวดเฟส A ( $I_A$ ) ดังรูปที่ 5.24

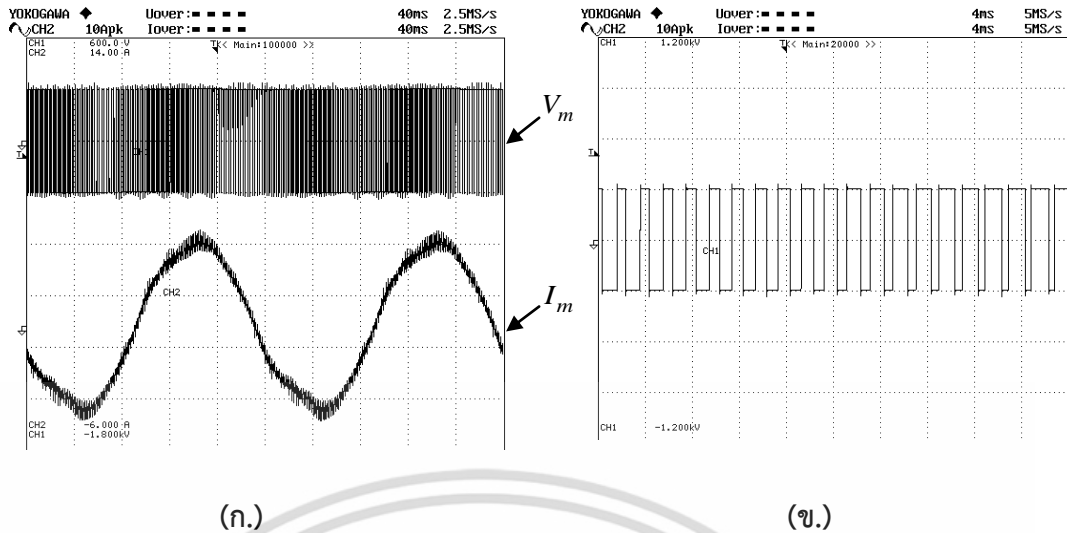


รูปที่ 5.24 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโหลดทางกล ที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F



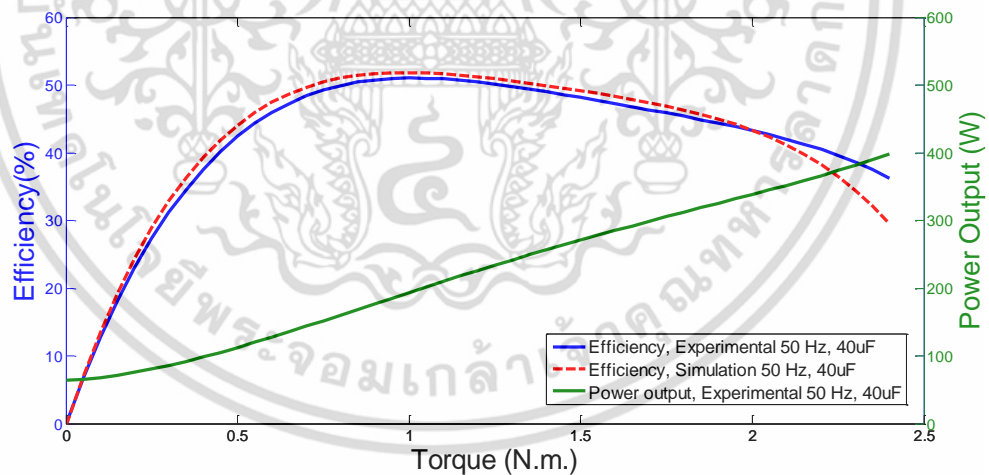
รูปที่ 5.25 แรงดันตกคร่อมขดลวดทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 50Hz ตัวเก็บประจุ 40 $\mu$ F

แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสดังรูปที่ 5.25 โดยด้านบนสุดของภาพเป็นแรงดันเฟสที่ตกคร่อมเฟส A รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์, ถัดมารูปคลื่นรูปกลางของภาพเป็นแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดเฟส B ที่ต่อตัวเก็บประจุขนานขดลวดทำให้รูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นไซน์ และสุดท้ายด้านล่างสุดของรูปแรงดันตกคร่อมเฟส C



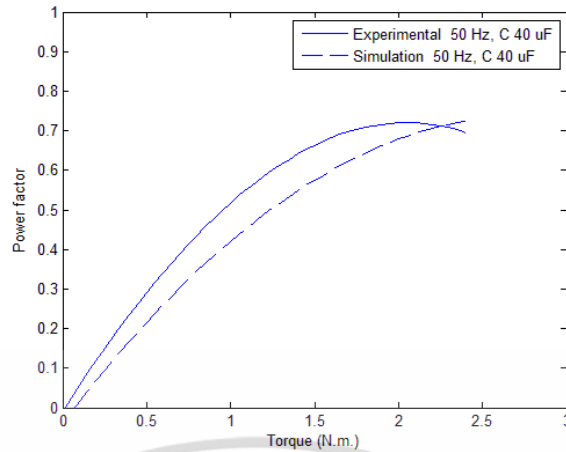
รูปที่ 5.26 (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข) รูปขยายรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมมอเตอร์ ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$

รูปที่ 5.26 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ โดยรูป (ก) ด้านบนคือรูปแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ชนิดไบโพลาร์ โดยเมื่อขยายดูสัญญาณแรงดันจะเห็นดังรูปที่ 5.26 (ข) และภาพ (ก) ด้านล่างเป็นภาพรูปคลื่นกระแส ซึ่งจะเห็นว่ามัลักษณะเป็นไซน์



รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$

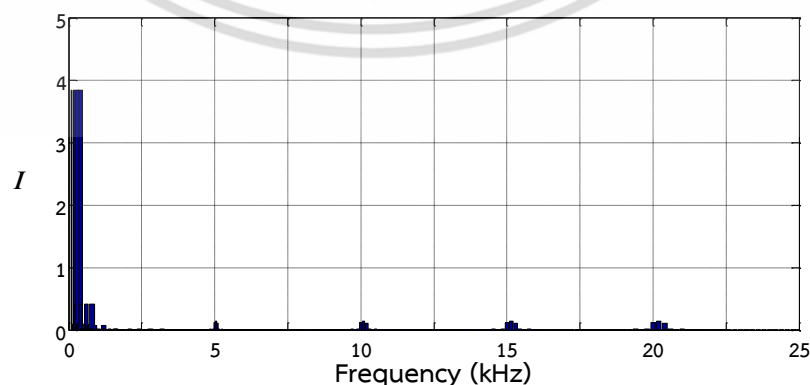
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง

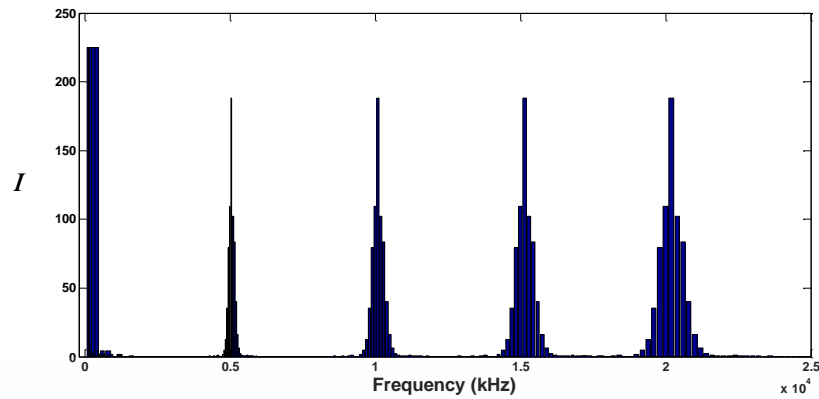
ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$

รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลองและกำลังไฟฟ้าด้านนอกที่ได้จากการทดลอง ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$  โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่วัดได้  $50.55\%$  รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบผลค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$  โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ค่าความผิดพลาดโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$  ดังรูปที่ 5.29 และ 5.30 ตามลำดับ จากภาพที่ 5.29-5.30 จะเห็นได้ชัดว่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกที่เกิดทั้งที่กระแสและแรงดัน จะเกิดในช่วงความถี่  $5\text{kHz}, 10\text{kHz}, 15\text{kHz}, 20\text{kHz}, \dots$  เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$  ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี



รูปที่ 5.29 สเปกตรัมกระแสไหลเข้ามอเตอร์  $I_m$  ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $40\mu\text{F}$

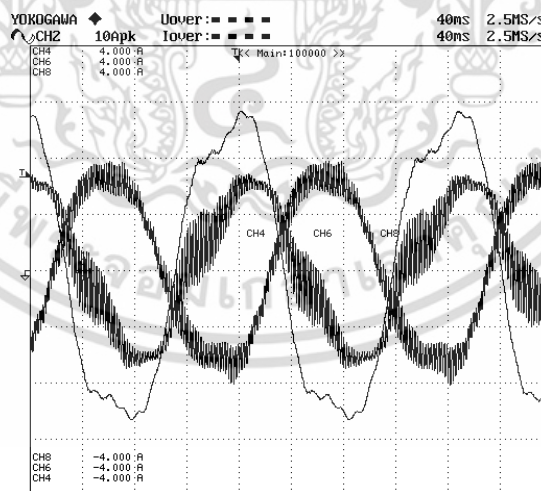
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปเผยแพร่ขึ้นหน้าการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 สเปกตรัมแรงดันที่เข้ามอเตอร์  $V_m$  50Hz ค่าตัวเก็บประจุ  $40\mu F$

### 5.3.5 ผลการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ $35\mu F$

กราฟรูปที่ 5.31-5.37 ผลที่ได้จากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ความถี่ 60Hz โดยต่อตัวเก็บประจุกรวมเฟสของมอเตอร์ค่า  $35\mu F$  โดยรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระทางกล โดยกระแสในแต่ละเฟสเลื่อนเฟสประมาณ  $90^\circ$  คือ  $I_A$  นำหน้า  $I_B$  เป็นมุมประมาณ  $90^\circ$  ซึ่งคล้ายกับการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส และ  $I_C$  คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส C ซึ่งเมื่อรวมกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเฟส B ( $I_B$ ) จะมีเท่ากับกระแสที่ไหลในขดลวดเฟส A ( $I_A$ ) ดังรูปที่ 5.31

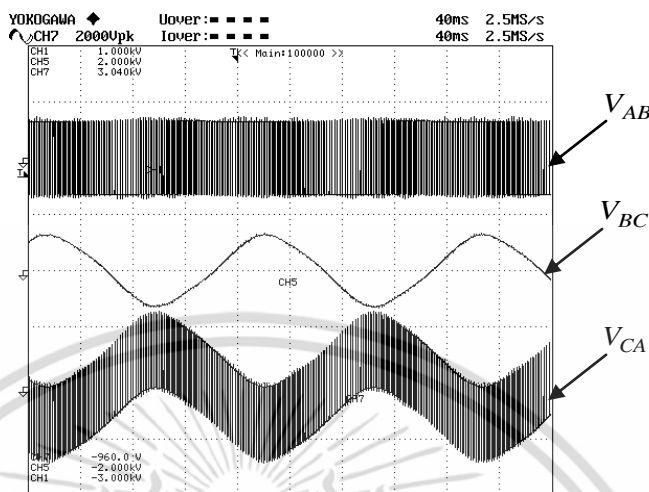


รูปที่ 5.31 รูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่สภาวะไม่มีภาระโหลดทางกล ที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ  $35\mu F$

แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสดังรูปที่ 5.32 โดยด้านบนสุดของภาพเป็นแรงดัน

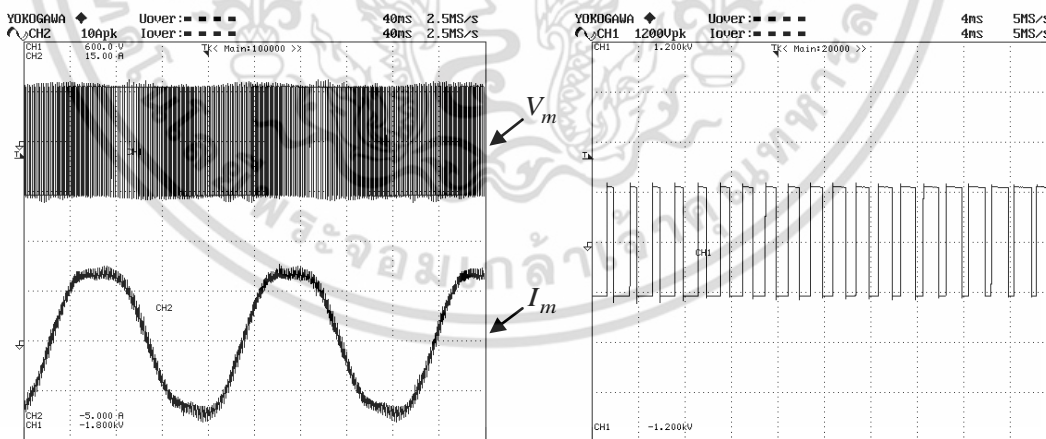
เฟสที่ตกคร่อมเฟส A รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์, ถัดมารูปคลื่นรูปกลางของภาพเป็นแรงดันที่  
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกร่อมขดลวดเฟส B ที่ต่อตัวเก็บประจุขนานขดลวดทำให้รูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นไซน์ และสุดท้ายด้านล่างสุดของรูปแรงดันตกร่อมเฟส C



รูปที่ 5.32 แรงดันตกร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟสที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35μF

รูปที่ 5.33 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ไหลเข้ามอเตอร์ รูปที่ 5.33 (ก) ด้านบนเป็นภาพแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซึ่งเท่ากับแรงดันคร่อมสวิตช์ รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นไปโพลาร์ เมื่อขยายดูสัญญาณแรงดันจะเห็นดังรูปที่ 5.33 (ข) และรูปที่ 5.33 (ก) ด้านล่างเป็นภาพรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ซึ่งมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์



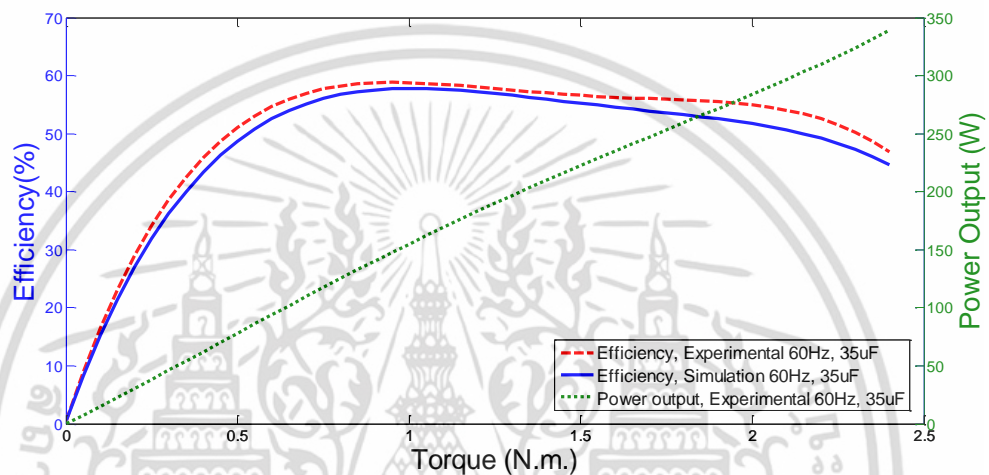
(ก.)

(ข.)

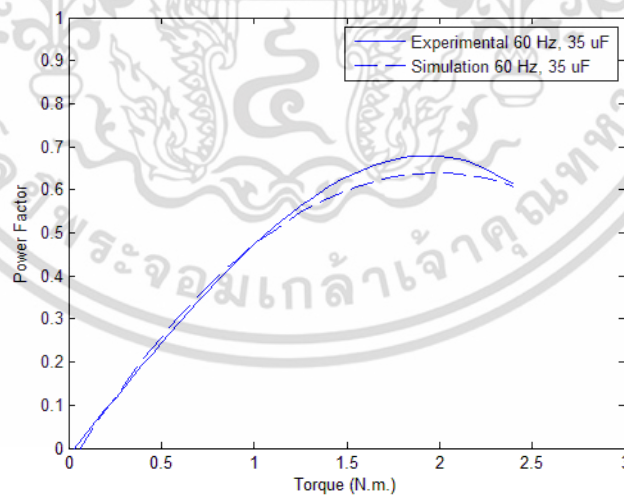
รูปที่ 5.33 (ก.) รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ (ข.) รูปขยายรูปคลื่นแรงดันที่ตกร่อมมอเตอร์ ที่ความถี่ 60Hz ตัวเก็บประจุ 35μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบผลค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลองและกำลังไฟฟ้านอกที่วัดได้จากการทดลองที่ความถี่  $20\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$  โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่วัดได้ 60% รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบผลค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $35\mu\text{F}$  โดยผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยค่าตัวประกอบกำลังที่ดีที่สุดที่วัดได้คือ 0.67 ที่สภาวะโหลด 2 N.m.



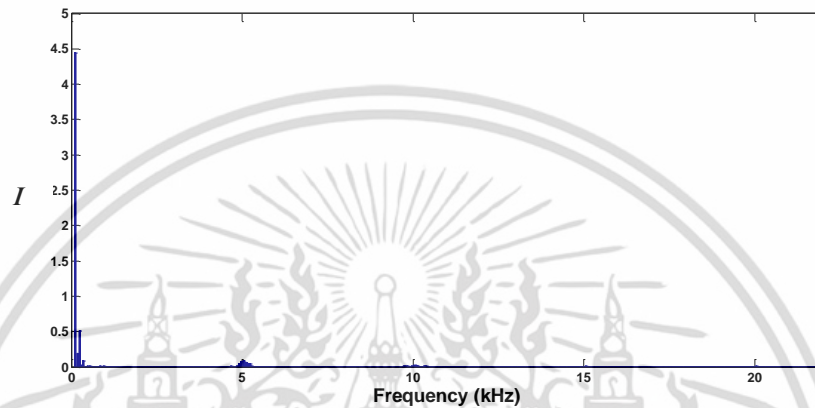
รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $60\text{Hz}$



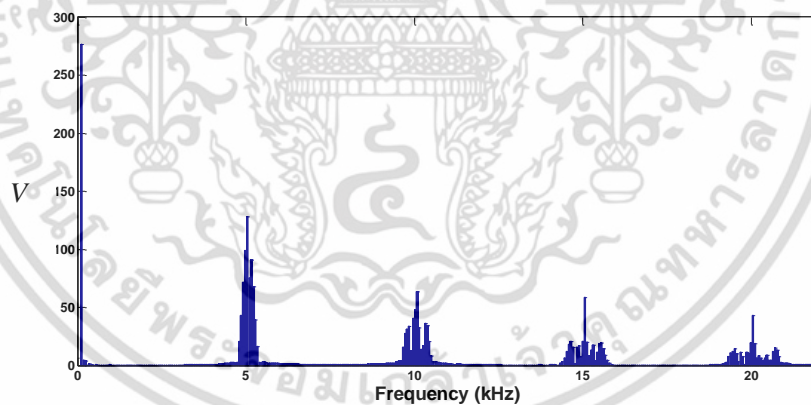
รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการจำลองและการทดลอง ที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ตัวเก็บประจุ  $35\mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.36 ค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $35\mu\text{F}$  และรูปที่ 5.37 ค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $35\mu\text{F}$  จากรูปที่ 5.37 สังเกตTHD<sub>v</sub>จะเห็นได้ชัดเจนว่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกที่เกิดที่จะเกิดที่ช่วงความถี่  $5\text{kHz}, 10\text{kHz}, 15\text{kHz}, 20\text{kHz}, \dots$  เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$  ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี



รูปที่ 5.36 สเปกตรัมกระแสไหลเข้ามอเตอร์  $I_m$  ที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $35\mu\text{F}$

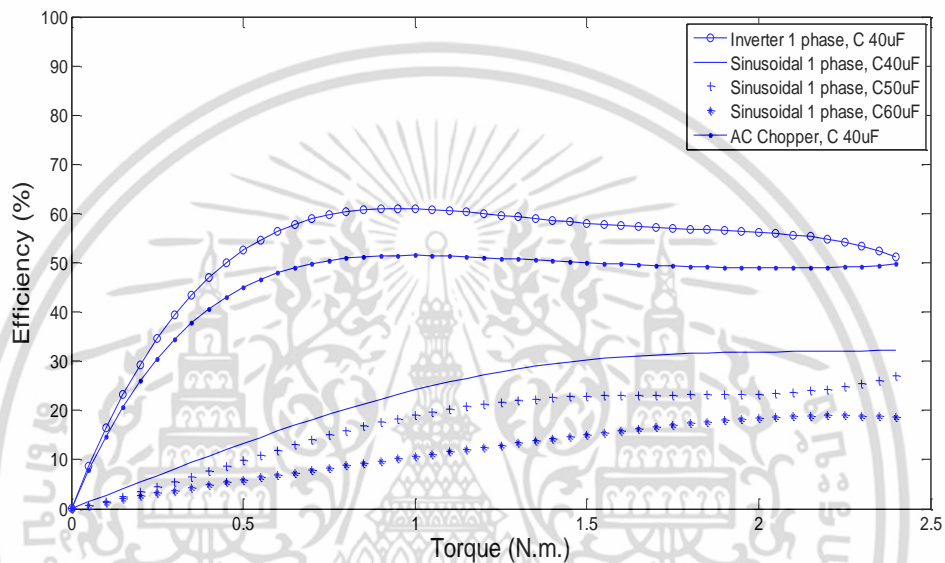


รูปที่ 5.37 สเปกตรัมแรงดันที่เข้ามอเตอร์  $V_m$  ที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ค่าตัวเก็บประจุ  $35\mu\text{F}$

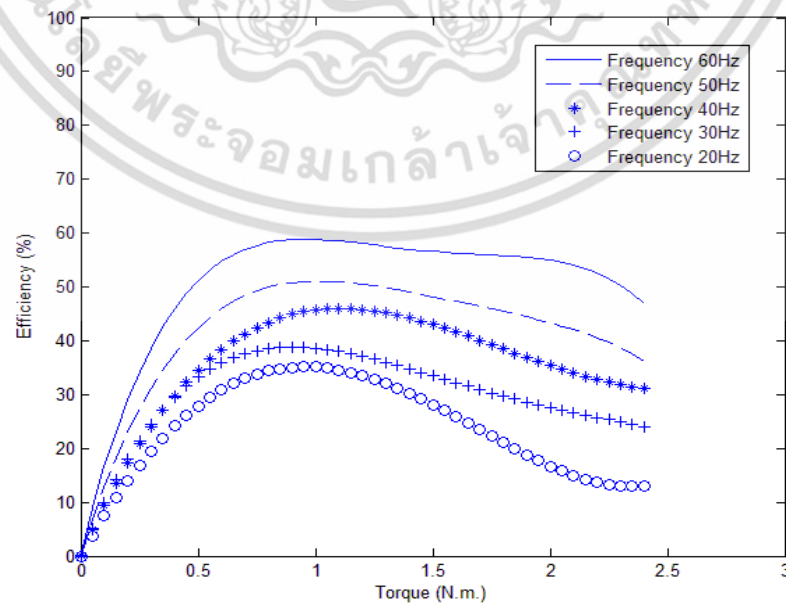
กราฟรูปที่ 5.38 ค่าประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ความถี่  $50\text{Hz}$  ที่ต่อกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ต่อตัวเก็บประจุค่า  $40\mu\text{F}$  กับบ่อนแหล่งจ่ายแรงดันความถี่  $50\text{Hz}$  เข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสซึ่งต่อกับตัวเก็บประจุค่า  $40\mu\text{F}, 50\mu\text{F}$  และ  $60\mu\text{F}$  ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าเมื่อต่อตัวเก็บประจุค่า  $40\mu\text{F}, 50\mu\text{F}$  และ  $60\mu\text{F}$  คร่อมเฟสหนึ่งของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์สามารถออกตัวได้เมื่อวัดค่าประสิทธิภาพที่ได้พบว่า ตัวเก็บประจุค่า  $40\mu\text{F}$  ให้ประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับที่ต่อตัวเก็บประจุค่า  $50\mu F$  และ  $60\mu F$  และเมื่อเปรียบเทียบที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสและเอซี ซอปเปอร์กับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พบว่าอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสให้กับมอเตอร์โดยตรง เมื่อป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ทำให้มอเตอร์ทำงานที่ภาระทางกลเบาได้ประสิทธิภาพสูงถึง 50% ในขณะที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสให้กับมอเตอร์ ที่ภาระทางกลเบาให้ประสิทธิภาพสูงสุดเพียง 30%



รูปที่ 5.38 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส เอซี ซอปเปอร์ และอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



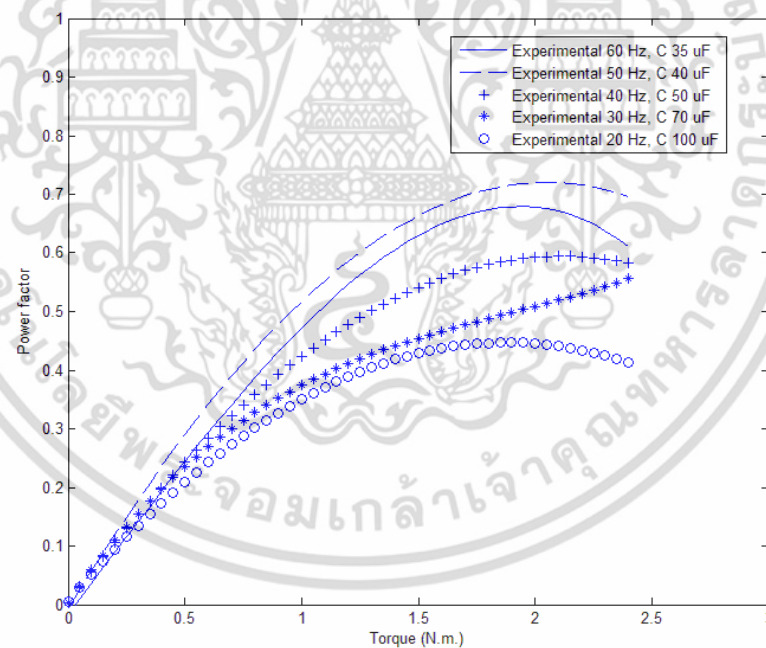
รูปที่ 5.39 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร กรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้า มิฉะนั้นจะถือว่าผิดกฎหมาย

ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ค่าความถี่ต่างๆ

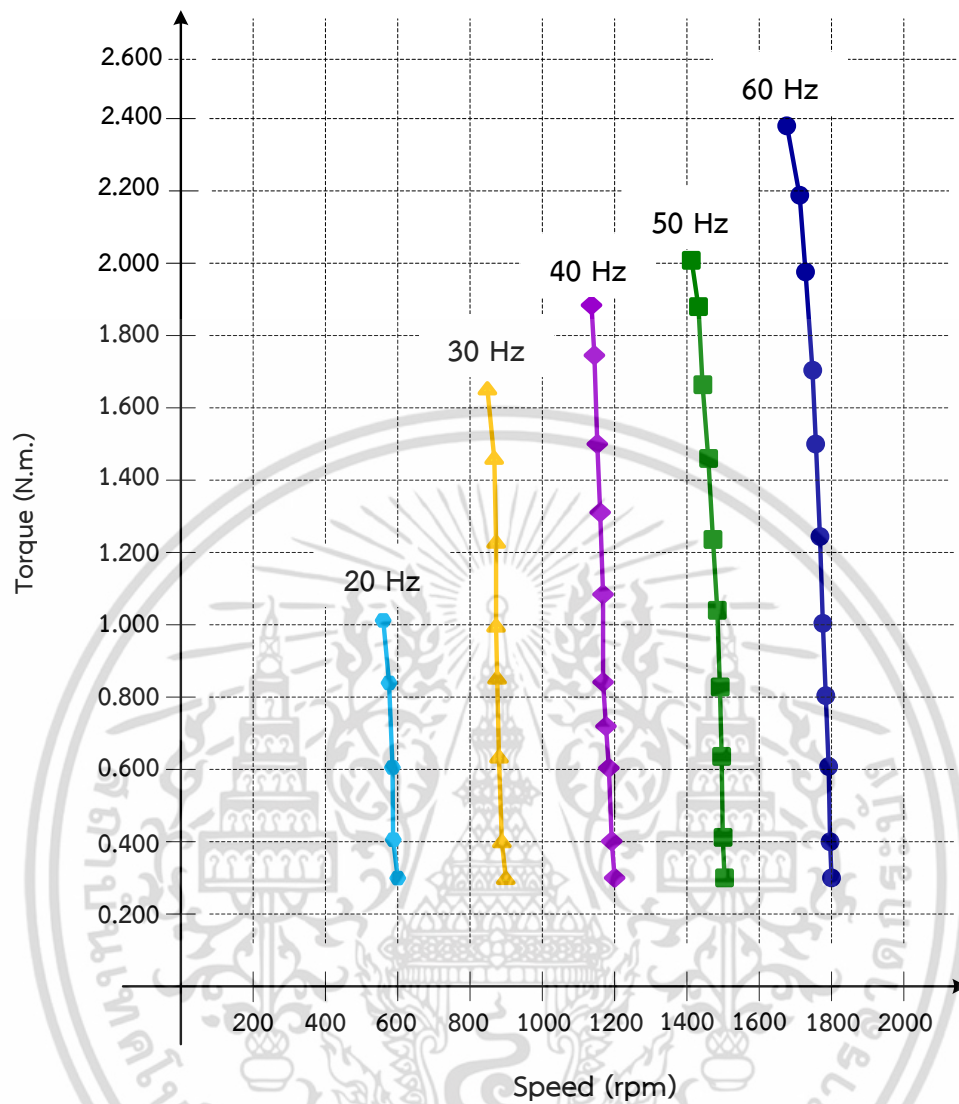
รูปที่ 5.39 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ค่าความถี่  $20\text{Hz}$ ,  $30\text{Hz}$ ,  $40\text{Hz}$ ,  $50\text{Hz}$  และ  $60\text{Hz}$  ที่สภาวะโหลดเบา โดยที่ความถี่  $60\text{Hz}$  ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือ  $60.40\%$  เมื่อเทียบกับความถี่อื่นๆที่ต่ำลงมา

กราฟรูปที่ 5.40 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเมื่อป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ค่าความถี่  $20\text{Hz}$ ,  $30\text{Hz}$ ,  $40\text{Hz}$ ,  $50\text{Hz}$  และ  $60\text{Hz}$  ที่สภาวะโหลดเบาที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือที่สภาวะโหลดเบา ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามภาระทางกลที่เพิ่มขึ้นจนถึง  $2\text{ N.m}$ . เมื่อเพิ่มภาระทางกลเข้าไปอีกปรากฏว่าค่าตัวประกอบกำลังมีแนวโน้มลดลง โดยที่ความถี่  $50\text{Hz}$  มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับความถี่อื่นๆ ที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เท่ากับ  $0.757$  ถัดมาเป็นความถี่  $60\text{Hz}$ ,  $40\text{Hz}$ ,  $30\text{Hz}$  และ  $20\text{Hz}$  ตามลำดับจากกราฟจะสังเกตเห็นว่าเมื่อความถี่ต่ำลง



รูปที่ 5.40 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ค่าความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

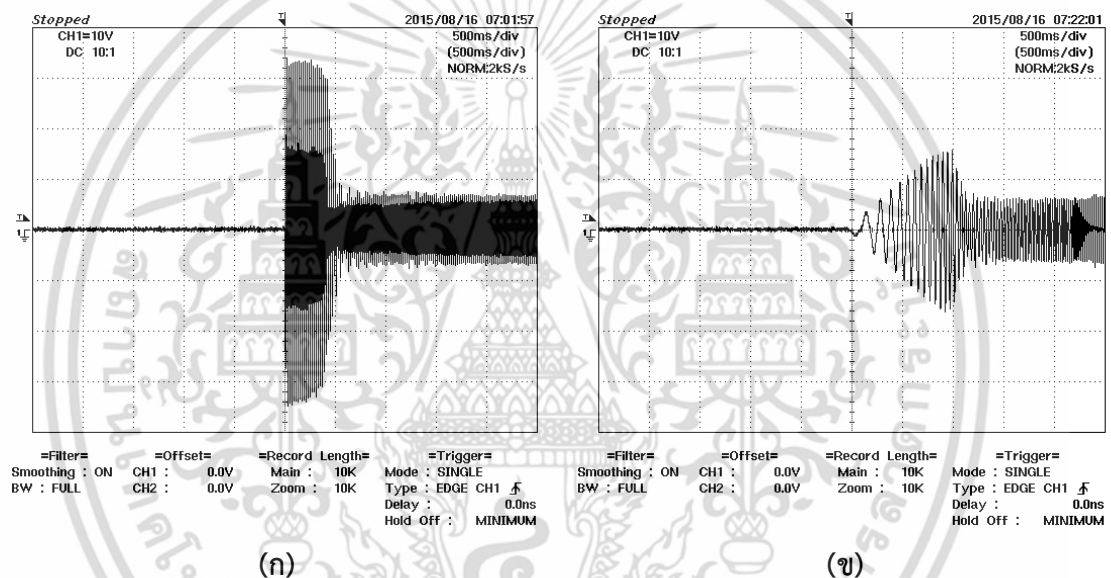


รูปที่ 5.41 การเปรียบเทียบแรงบิดและความเร็วที่ค่าความถี่ต่างๆ

กราฟรูปที่ 5.41 การเปรียบเทียบที่แรงบิดและความเร็วค่าความถี่ 20Hz , 30Hz , 40Hz , 50Hz และ 60Hz จากกราฟพบว่าทุกความถี่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือที่ความเร็วรอบสูง แรงบิดต่ำ แต่เมื่อความเร็วรอบลดลงเรื่อยๆแรงบิดจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆตามเช่นกัน โดยที่ค่าความถี่ 60Hz ให้ค่าแรงบิดและความเร็วสูงสุดเมื่อเทียบกับความถี่อื่นๆ ถัดมาเป็น 50Hz , 40Hz , 30Hz และ 20Hz ตามลำดับ

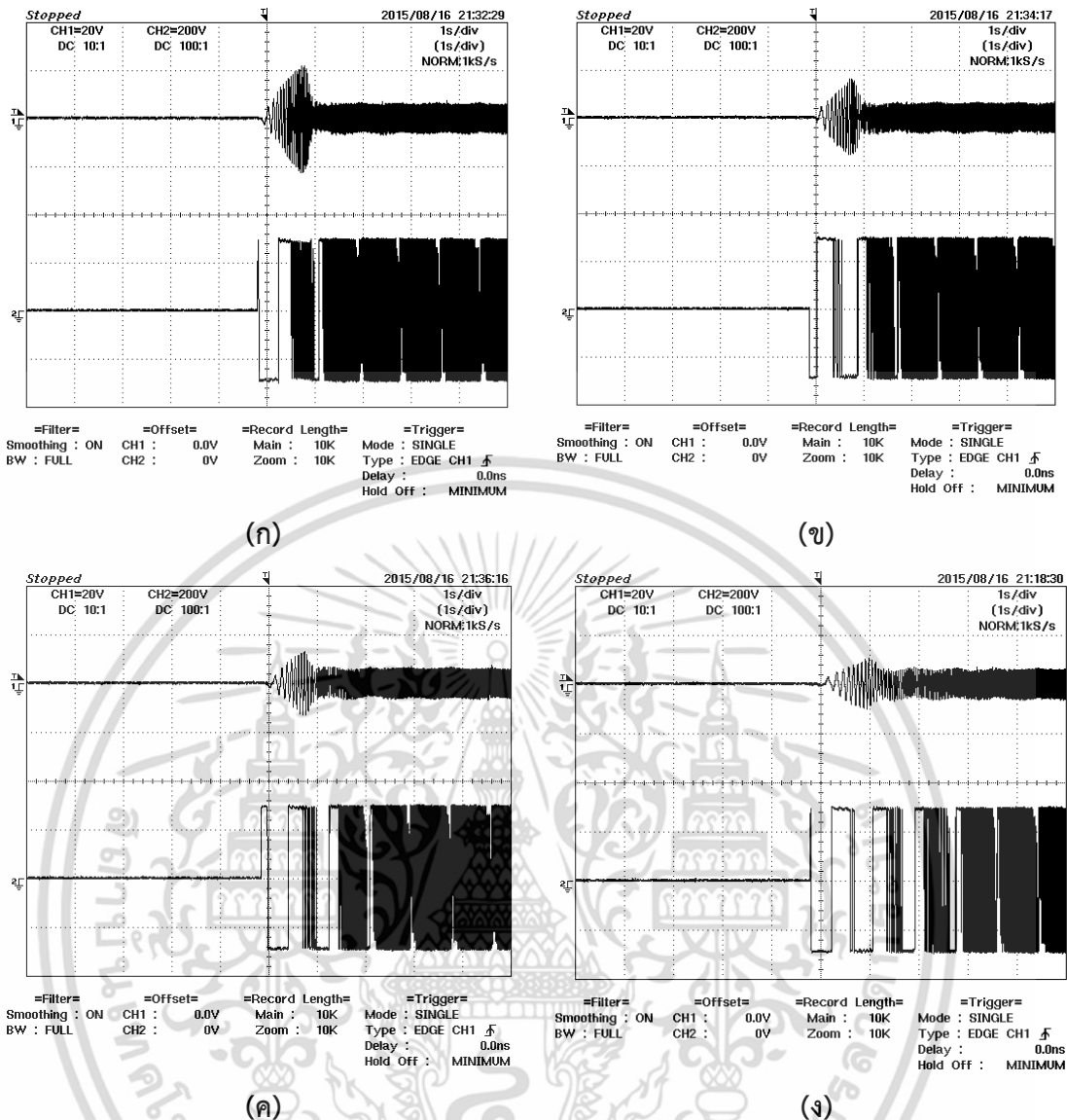
## 5.4 ผลการทดลองเมื่อเริ่มเดินเครื่องแบบนุ่มนวล

รูปที่ 5.43 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อใช้วิธีเริ่มเดินเครื่องแบบนุ่มนวลที่ความถี่ 50 Hz ที่เวลา (ก) 1.5 วินาที (ข) 2 วินาที (ค) 2.5 วินาที และ (ง) 3 วินาที จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงมอเตอร์เริ่มเดินเครื่องโดยตรงจะมีค่ากระแสสูงมาก เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะลดลง และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำซอฟต์แวร์ทอกลงกระแสของมอเตอร์ในช่วงออกตัวจะลดลง ไม่สูงเหมือนป้อนแหล่งจ่ายเข้าไปตรงดังรูปที่ 5.42 จากรูปจะเห็นว่า 5.42 (ก) สตาร์ทโดยตรง กระแสในช่วงสตาร์ทจะสูงถึง 35 แอมป์ ขณะที่เมื่อทำซอฟต์แวร์ทอที่เวลา 2 วินาที ดังรูป 5.41 (ข) กระแสในช่วงสตาร์ทจะลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5.42 รูปคลื่นกระแส (ก) สตาร์ทโดยตรง (ข) ซอฟต์แวร์สตาร์ทที่เวลา 2 วินาที

สำหรับค่ากระแสและแรงดันขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์ที่สภาวะไม่มีภาระทางกล เมื่อกำหนดเวลาเริ่มต้นที่ 1.5 วินาที, 2วินาที, 2.5วินาที และ 3 วินาที ดังรูปที่ 5.43 (ก) – 5.43 (ง) ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเริ่มต้นมากขึ้นจะสามารถลดกระแสขณะสตาร์ทได้ โดยจากรูปพบว่าการกำหนดระยะเวลาออกตัวที่ 3 วินาที จะทำให้กระแสขณะสตาร์ทต่ำสุดเกือบเท่ากับกระแสในช่วงสภาวะคงตัว



รูปที่ 5.43 รูปคลื่นกระแสและแรงดันขอฟท์สตาร์ทที่ความถี่ 50 Hz ที่เวลา (ก) 1.5 วินาที (ข) 2 วินาที (ค) 2.5 วินาที และ (ง) 3 วินาที

สำหรับค่ากระแสและแรงดันขณะเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์ที่สถานะไม่มีภาระทางกล เมื่อกำหนดเวลาเริ่มต้นที่ 1.5 วินาที, 2วินาที, 2.5วินาที และ 3 วินาที ดังรูปที่ 5.43 (ก) – 5.43 (ง) ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเริ่มต้นมากขึ้นจะสามารถลดกระแสขณะสตาร์ทได้ โดยจากรูปพบว่าการกำหนดระยะเวลาออกตัวที่ 3 วินาที จะทำให้กระแสขณะสตาร์ทต่ำสุดเกือบเท่ากับกระแสในช่วงสภาวะคงตัว



## บทที่ 6

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไปโพลาร์ โดยพิจารณาสมรรถนะของมอเตอร์ทั้ง ประสิทธิภาพ ความเร็ว แรงบิด และค่าตัวประกอบกำลัง ที่ความถี่ 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz และ 60Hz ที่ภาระทางกลเบา โดยจะสรุปเนื้อหาที่ทำการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆด้วยกัน คือ 1.การพิจารณาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม 2. การประเมินสมรรถนะมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองและการทดลองเมื่อจ่ายพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไปโพลาร์ และเปรียบเทียบสมรรถนะของมอเตอร์ 3 เฟส เมื่อจ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส และป้อนพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไปโพลาร์ 3. พิจารณาการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบนุ่มนวล และเปรียบเทียบการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบนุ่มนวลกับการสตาร์ทโดยตรง

ขั้นแรกคำนวณเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อนำมาต่อคร่อมเฟสหนึ่งของมอเตอร์ให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถทำงานร่วมกับพีดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไปโพลาร์ เนื่องจากโดยพื้นฐานทั่วไปมอเตอร์จะสามารถออกตัวได้เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กหมุน การจ่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสเข้าไปไม่ทำให้กระแสเกิดการเลื่อนเฟสกันมากพอ คือกระแสเลื่อนเฟสกันไม่ถึง  $90^\circ$  ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถออกตัวได้ จึงไม่เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ดังนั้นจึงนำตัวเก็บประจุมาต่อคร่อมเฟสเพื่อให้เกิดกระแสไหลในขดลวดทั้ง 3 เฟส และมีมุมต่างเฟสกัน  $90^\circ$  หรือใกล้เคียง  $90^\circ$  ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กหมุน ค่าตัวเก็บประจุได้จากการวิเคราะห์สมการส่วนประกอบสมมาตร ทำให้ได้ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมค่าหนึ่งกับแต่ละความถี่ โดยค่าที่ได้จากการคำนวณและการทดลองจะมีความแตกต่างกัน เพียงเล็กน้อยโดยค่าความผิดพลาดจากค่าที่ใช้ทดสอบต้องไม่เกิน 4% จากค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นที่ความถี่ 20Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมคือ  $100\mu F$  , ที่ความถี่ 30Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมคือ  $70\mu F$  , ที่ความถี่ 40Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมคือ  $50\mu F$  , ที่ความถี่ 50Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมคือ  $40\mu F$  และที่ความถี่ 60Hz ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมคือ  $35\mu F$  โดยค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณส่งผลต่อสมรรถนะของมอเตอร์โดยตรง โดยพบว่าค่าตัวเก็บประจุ

ที่ได้จากการคำนวณทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ดีกว่าเมื่อเทียบกับค่าตัวเก็บประจุค่าอื่นที่มีค่าสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ หรือต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาทดสอบ หากค่าตัวเก็บประจุต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมอเตอร์จะไม่สามารถออกตัวได้เนื่องจากกระแสไหลในแต่ละเฟสเลื่อนเฟสกันน้อยมาก กระแสที่ไหลในขดลวดแต่ละเฟสยังทำมุมกันไม่ถึง  $90^\circ$  ทำให้ไม่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กหมุนได้ แต่หากเพิ่มค่าตัวเก็บประจุเข้าไปมอเตอร์สามารถออกตัวได้แต่กระแสในช่วงออกตัวหมุนจะสูงกว่าเล็กน้อย และเมื่อทดสอบโดยเพิ่มภาระทางกลทำให้ได้ประสิทธิภาพต่ำลง

จากการจำลองและการทดลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส โดยใช้เทคนิคการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบมาเปรียบเทียบที่ทุกความถี่พบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันลักษณะรูปคลื่นกระแสและแรงดันในแต่ละความถี่เหมือนกัน คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์และกระแสไหลในแต่ละเฟสเป็นรูปคลื่นไซน์หรือมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์, แรงดันที่ตกคร่อมขดลวดแต่ละเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเฟส A ของมอเตอร์ต่อคร่อมสวิตซ์ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมเป็นแบบไบโพลาร์ ในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมเฟส B มีลักษณะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ เนื่องจากต่อตัวเก็บประจุที่ต่อขานขดลวดสเตเตอร์เฟสนี้ ซึ่งตัวเก็บประจุนั้นนอกจากจะช่วยให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสได้ ตัวเก็บประจุนั้นยังเสมือนตัวกรองความถี่ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้รูปคลื่นแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ และสุดท้ายแรงดันตกคร่อมเฟส C ลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ผสมไบโพลาร์ เนื่องจากแรงดันในเฟส C มีค่าเท่ากับลบแรงดับเฟส A ลบกับแรงดันเฟส B ทำให้รูปคลื่นแรงดันที่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์ผสมไบโพลาร์ ประสิทธิภาพที่ได้ที่ความถี่  $50\text{Hz}$  มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่อื่นและเทียบกับเมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ต่อกับตัวเก็บประจุค่า  $40\mu\text{F}$ ,  $50\mu\text{F}$ ,  $60\mu\text{F}$  ที่อินเวอร์เตอร์ความถี่  $50\text{Hz}$  ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เพราะอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ ที่ความถี่สูงค่าตัวประกอบกำลังที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่ความถี่ที่สูงกว่าเนื่องจากที่ความถี่ต่ำกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ และกระแสในแต่ละเฟสมีค่าสูง แต่เมื่อเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่ได้ที่สภาวะโหลดเบาที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส และอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ชนิดไบโพลาร์ พบว่าเมื่อป้อนอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ชนิดไบโพลาร์ให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ภาระทางกลเบาได้ดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มภาระทางกลเข้าไปทำให้ค่าตัวประกอบกำลังต่ำลงเนื่องจากกระแสที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่อกำลังและประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาสเปคตรัมฮาร์มอนิกหรือค่าความผิดเพี้ยนโดยรวมสัญญาณฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสและแรงดัน โดยสังเกตที่สเปคตรัมแรงดันและกระแสจะเห็นได้ชัดเจนว่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกที่เกิดที่จะเกิดในช่วงความถี่

5kHz, 10kHz, 15kHz, 20kHz, ... เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วไซด์แบนด์ฮาร์โมนิกจะเกิดขึ้นรอบๆ  $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$  ผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี

การทดสอบการเริ่มเดินเครื่องแบบนุ่มนวลผลที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎี คือ เมื่อเพิ่มเวลาในการออกตัวเป็นไปอย่างนุ่มนวล ความเร็วที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยลดแรงฉุดหรือแรงกระชากในขณะออกตัว โดยในการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดช่วงเวลาเพิ่มขึ้นก่อนที่จะเพิ่มแรงดันจนถึงพิกัดกระแสในช่วงออกตัวหมุนของมอเตอร์จะลดลง ยิ่งเพิ่มเวลาขึ้นกระแสในช่วงเริ่มต้นหมุนก็จะลดต่ำลงจนเกือบเท่ากระแสที่ไหลในสภาวะคงตัว และเมื่อเทียบที่สตาร์ทมอเตอร์โดยตรงในช่วงเริ่มต้นหมุนมอเตอร์จะมีค่ากระแสสูงมาก สูงถึง 35 แอมป์ ซึ่งตรงตามทฤษฎี ว่าช่วงเริ่มต้นหมุนมอเตอร์จะมีกระแสสูง 5 – 7 เท่าของกระแสพิกัด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรเพิ่มเทคนิคการเริ่มต้นหมุนมอเตอร์แบบนุ่มนวลเข้าไปในช่วงออกตัวหมุนมอเตอร์จะมีค่ากระแสน้อยลง ซึ่งจะช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไปในช่วงออกตัวหมุนได้ และลดผลกระทบที่เกิดทั้งทางไฟฟ้าและทางกลคือช่วยลดการสึกหรอของอุปกรณ์ต่างๆ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคการควบคุมอื่นๆ เพื่อประโยชน์ในการศึกษาและวิจัยต่อไป เช่น

1. เพิ่มการควบคุมความเร็วรอบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานเฉพาะด้าน
2. ควบคุมให้ได้แรงบิดสูงสุด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆต่อไป
3. การควบคุมค่าตัวเก็บประจุอัตโนมัติเพื่อให้ได้ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับความถี่หรือการใช้งานต่างๆ
4. พิจารณาการเริ่มต้นหมุนแบบนุ่มนวลเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ และลดการสูญเสียพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nabil A. Ahmed, Three-phase induction motor operating from single-phase supply with an electronically controlled capacitor. Journal in Electric Power Systems Research 73 (2005) 121–128.
- [2] J.H.H. Alwash, Predicting performance of three-phase induction motors connected to single-phase supplies, IEE Proc. Electr. Power Appl. 143 (4) (1996) 339–344.
- [3] J.H.H. Alwash, S.H. Ikwan, A generalized approach to the analysis of asymmetrical three-phase induction motors, IEE Proc. B Power Appl. 142 (2) (1995) 87–96.
- [4] J.E. Brown, C.S. Jha, The starting of a three-phase induction motor connected to a single-phase supply system, IEE Proc. Power Appl. (1959) 183–190.
- [5] อานันท์วัฒน์ คุณากร. 2538. “การพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเพื่อใช้กับไฟเฟสเดียวโดยการต่อแบบ แยกเฟส. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] พิเชิต ลำยอง. เครื่องจักรกลไฟฟ้า. 2554. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย
- [7] วีระเชษ ขันเงิน และ วิมลพล ธาราธิรเศรษฐ์. 2555. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินติ้ง.
- [8] BIMAL K. BOSE. Modern Power Electronics And AC Drives. United States of America: Prentice Hall PTR.
- [9] พงษ์พรรณ พงษ์พจนธรรม. “การเริ่มต้นเครื่องแบบนิมมวลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระแสเริ่มต้นคงที่” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] วิจิตร กิณเรศ, เอกสารประกอบการสอนวิชา Industrial Power Electronics สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [11] Phiphitsuonthon B. “Performance evaluation of single-phase PWM AC chopper fed three-phase induction motor” 17th. Oct 2014. pp. 2981-2986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

โค้ดที่ใช้แก่สมการเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear all
clc
Nr=input('Roter Speed=')
S=(1500-Nr)/1500
R1=1.5;
X1=1.73;
R2=1;
X2=1.73;
Xm=42.4;
if S==0
    y1=1/(R1+(X1*i)+(Xm*i));
    y2=1/(R1+(X1*i)+(Xm*i));
else
    y1=1/(R1+X1*i)+((Xm*i)*((R2/S)+X2*i))/((R2/S)+(X2+Xm)*i);
    y2=1/(R1+X1*i)+((Xm*i)*((R2/(2-S))+X2*i))/((R2/(2-S)+(X2+Xm)*i);
end
Y1=abs(y1);
Theta1=(angle(y1));
Y2=abs(y2);
Theta2=(angle(y2));
K1=(sqrt(3)*cos(Theta1))-(3*sin(Theta1));
K2=(sqrt(3)*cos(Theta2))-(3*sin(Theta2));
A=3*Y1*Y2*((Y1*K2)-(Y2*K1));
B=(6*((Y1^2)-(Y2^2)));
C=(-1)*((K1*Y1)+(K2*Y2));
Xc1=((-1)*(B)+(sqrt((B^2)-(4*A*C))))/(2*A);
Xc2=((-1)*(B)-(sqrt((B^2)-(4*A*C))))/(2*A);
f=input('frequency=')
C1=(1/(2*100*pi*f*Xc2))*1000000

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์ที่ใช้การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



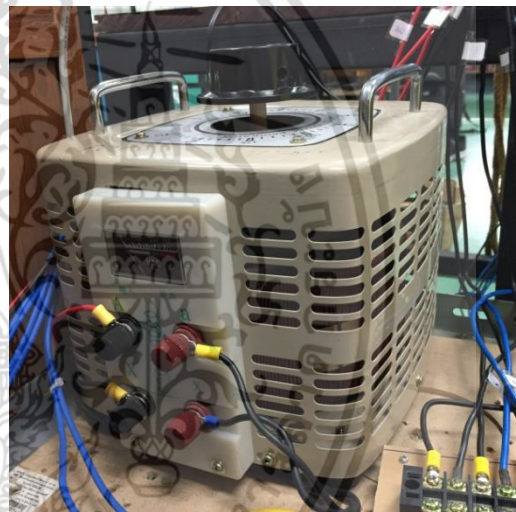
Power Analyzer รุ่น PZ4000



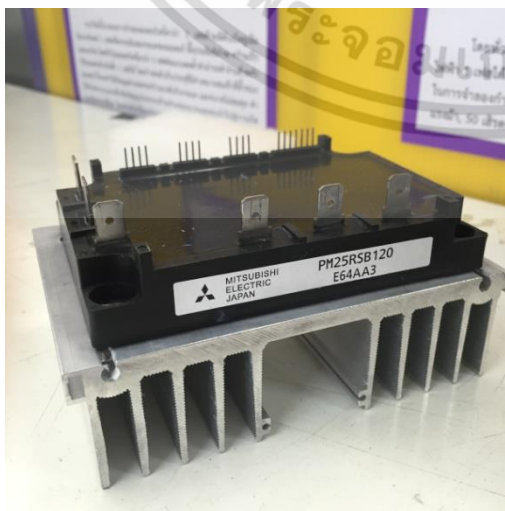
Multimeter



Clamp on meter

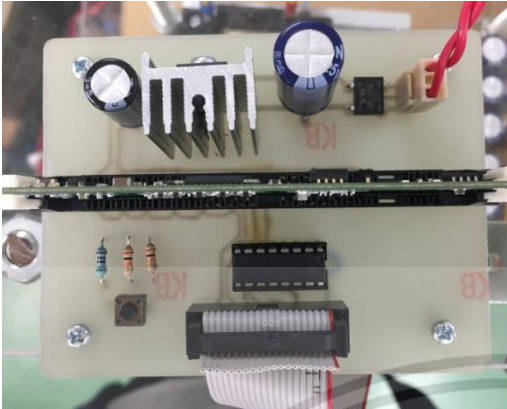


Variac

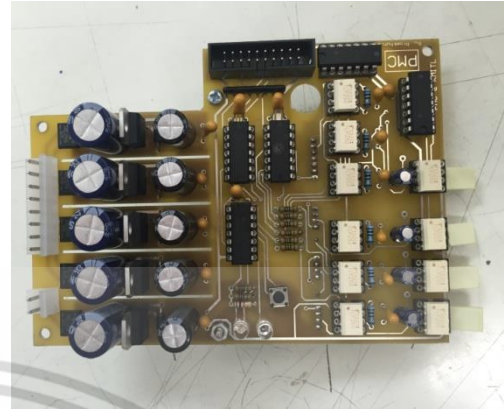


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IPM Power Modul

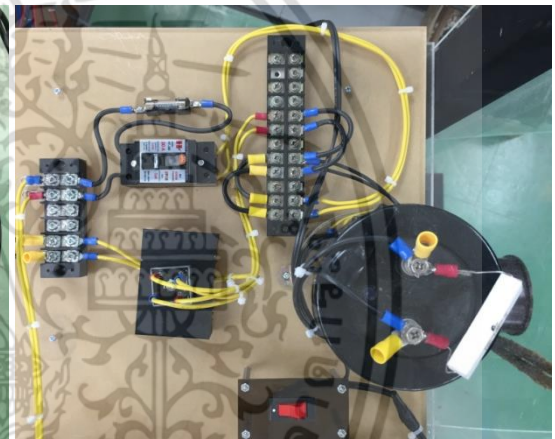
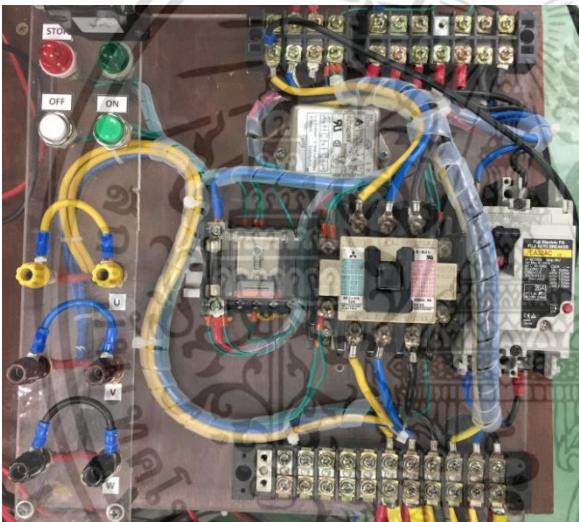


C2000 Microcontroller



บอร์ด C2000

อุปกรณ์สวิตซ์



อุปกรณ์กำลัง

DC link

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Performance Evaluation of Single-Phase PWM AC Chopper fed Three-Phase Induction Motor

Benyathip Phiphithunthorn, Chavaporn Bumroongphuck, Watcharin Promkhun, Vijit Kinnares  
 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand  
 E-mail: p.benyathip@hotmail.com

**Abstract** — This paper presents performance evaluation of a single-phase AC chopper fed three phase induction motor. The existing three-phase induction motor connected in delta can be operated with such single-phase voltage controller by connecting a capacitor across one phase. By varying duty cycle of asynchronous PWM generated from a dsPIC microcontroller for a single-phase AC chopper, terminal motor voltage can be adjusted. Performance evaluation in terms of motor input power factor and efficiency has been performed. In addition, comparison between the proposed technique and both fixed voltage of 1-phase sinusoidal ac source and fixed voltage of conventional three-phase ac source is also given.

### I. INTRODUCTION

The induction motors are important and widely used in industrial applications as well as in households for low power applications. AC voltage control can be used with those such as soft start energy saving modes and speed control of single-phase induction motor.[1] The three-phase supply is available all over the world, unless in some countryside area have just a single-phase supply is available. In some applications, it may be use of three-phase induction motor on single-phase supply. The standard three-phase induction motor can be operated with a single-phase supply by connection of an external capacitor across any phase [2]. Generally, a motor operates under various load conditions such as light load, medium load, and heavy load depending on types of applications and motor duty. The motor loads affect the performance of the induction motor. For instance, at light load, the motor has low efficiency and low power factor (estimated 0.2-0.3) because there is higher core loss than copper loss. The developments of power electronic make it possible to improve the power system utility. Line commutated AC Controllers can be superseded by PWM AC chopper which have better performance. PWM AC chopper are designed with force-commutation devices such as Bipolar transistor, GTO, IGBT, Mosfet etc. can improve performance and above the problem.[2]

Therefore, this paper will investigate the motor is performance of the motor like power factor and efficiency by controlling the voltage of the proposed AC Chopper.

### II. CIRCUIT DESCRIPTION

As shown in Fig.1, the test rig consists of a single-phase AC mains supply, a 1-phase AC chopper controlled by a dsPIC Microcontrollers, a 2 Hp, 220 V, 6 A, 1450 rpm, 4 P, 50 Hz, three-phase induction motor with an external capacitor of  $50 \mu F$  across one phase for working with a single-phase supply, a 5.5 kW DC motor drive acting as a motor load. The power circuit of the AC chopper is composed of two bidirectional switches consisting of two IGBTs with RC snubber circuits in conjunction with diodes formed in full bridge rectifiers. With this circuit configuration, the control method is simple particularly PWM signals without mains supply synchronization. Power, torque and speed are measured with high accurate instrument.

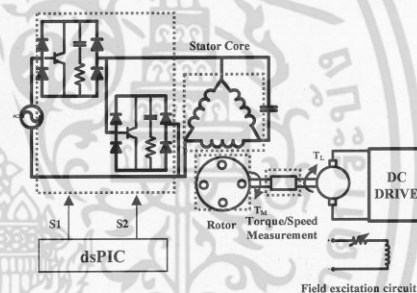


Fig. 1 The schematic diagram of the experimental system

PWM signal for controlling bidirectional switches of the PWM AC chopper are shown in Fig.2 and Fig.3 shows the motor voltage and current waveforms of the proposed PWM AC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

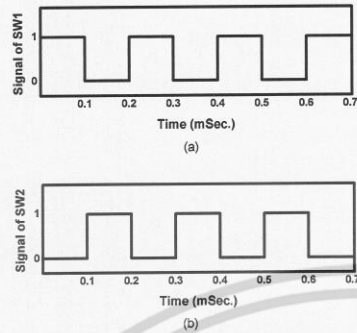


Fig.2 PWM signal for control SW<sub>1</sub> and SW<sub>2</sub>

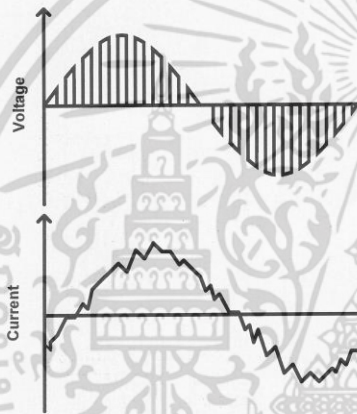


Fig.3 the voltage and current waveform of the PWM AC chopper

III. MATHEMATICAL MODEL

A. Principle of AC Chopper [3], [4]

If the input voltage supply is defined as

$$v_s(t) = V_s \sin(\omega t) \tag{1}$$

where  $\omega$  is angular frequency and  $V_{sm}$  is the peak value of the input voltage. Switching function is defined by the fourier series. It is applied to the PWM AC chopper circuit. The chopper modulated output voltage can be expressed as.

$$F(t) = D + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin nD\pi}{n\pi} \sin(n\omega_c t) \tag{2}$$

when  $F(t)$  is switching function,  $\omega_c$  is switching frequency, and  $D$  is duty cycle. Then the instantaneous output voltage of the chopper circuit is obtained from the multiplication between the switching function and input voltage as

$$v_m(t) = F(t) \cdot v_s(t) \tag{3}$$

The fundamental component of the chopper voltage is equivalent to the duty cycle, which is defined by the ratio of the total modulated period of the switching function.

$$T_s = T_{on} + T_{off}$$

The duty cycle is expressed as

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \tag{4}$$

B. The capacitor calculation [5]

The three-phase induction motor can be operated with a single-phase supply by using the capacitor connected to stator winding. The analysis of configuration can be treated as asymmetrical component. The motor performance depends on suitable choosing the phase balance capacitor when the motor drives various loads.

$V_0, V_1, V_2$  is referred to phase A as.

$$V_0 = V_a^0 \text{ or } V_1 = V_a^+ \text{ or } V_2 = V_a^-$$

In Fig.4, Fig.5, the sequence voltages and the sequence currents can be related with

$$V_1 = I_1 Z_1 \tag{7}$$

$$V_2 = I_2 Z_2 \tag{8}$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} \tag{9}$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} \tag{10}$$

The derivative of the zero sequence component ( $V_0, I_0$ ) equals zero.

$Z_1$  = Positive Sequence Impedance,

$Z_2$  = Negative Sequence Impedance and

$Y_1$  = Positive Sequence admittance,

$Y_2$  = Negative Sequence admittance in the motor

This can be analyzed from the information in no-load test and locked rotor test.

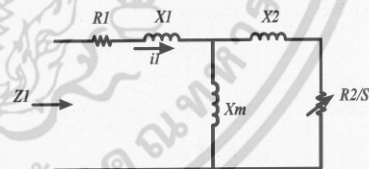


Fig. 4 The positive sequence impedance of motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) + \frac{[(jX_m)(\frac{R_2}{s} + jX_2)]}{[\frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_m)]} \quad (11)$$

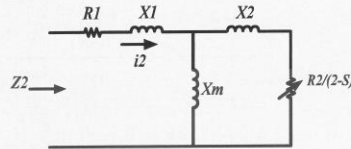


Fig.5 The negative sequence impedance of motor

$$Z_2 = (R_1 + jX_1) + \frac{[(jX_m)(\frac{R_2}{(2-s)} + jX_2)]}{[\frac{R_2}{(2-s)} + j(X_2 + X_m)]} \quad (12)$$

Therefore, the analysis is made as following:

$$\frac{d\eta}{dX_c} = \frac{d\eta}{dU} \times \frac{dU}{dX_c} \quad (13)$$

Therefore,  $\frac{d\eta}{dX_c} = 0$  is determined from equation 13 that means capacitance to achieve maximum efficiency taking core losses and mechanical losses into account.

$$U = \frac{V_2}{Y_1} \quad (14)$$

The capacitor in Fig.1 is connected across the stator winding  $V_b$  terminal and then is presented the relations according to.

$$\begin{aligned} V &= V_a \\ V_c &= V_z \\ I_z &= I_c - I_b \\ V_c - jX_c(I_c - I_b) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

where  $V$  is equal the supply voltage and  $X_c$  is equal capacitive reactance

The equation solving for finding  $V_1, V_2$  is shown by from (16).

$$\begin{aligned} aV_1 + a^2V_2 &= jX_c(aY_1Y_1 + a^2Y_2Y_2 - a^2Y_1Y_1 - aV_2Y_2) \\ (a + \sqrt{3}jX_cY_1)Y_1 &= (\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)V_2 \end{aligned} \quad (17)$$

And replace  $Z_1, Z_2$  in

$$V_1 = \left[ \frac{(\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)}{a + \sqrt{3}jX_cY_1} \right] \times V_2$$

$$V_2 = \left[ \frac{(a + \sqrt{3}X_cY_1)}{(\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)} \right] \times V_1$$

$$V = V_a = V_1 + V_2 \quad (18)$$

Equation (18) is replaced with (17) for finding  $V_1$

$$V_1 = \left[ \frac{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j - \sqrt{3}X_cY_2 \right)}{\left( -\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c(Y_1 + Y_2) \right)} \right] \times V \quad (19)$$

Next is reformatted the equation.

$$V = V_1 + \left[ \frac{(a + \sqrt{3}X_cY_1)}{(\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)} \right] \times V_1$$

$$V = V_2 + \left[ \frac{(\sqrt{3}X_cY_2 - a^2)}{(a + \sqrt{3}X_cY_1)} \right] \times V_2$$

$$V = \left[ \frac{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j + \sqrt{3}X_cY_1 \right)}{\left( -\sqrt{3}j - \sqrt{3}X_c(Y_1 + Y_2) \right)} \right] \times V \quad (20)$$

Equation (14) is replaced with (19) and (16).

$$U = \left[ \frac{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j + \sqrt{3}X_cY_1 \right)}{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j - \sqrt{3}X_cY_2 \right)} \right] \times V \quad (21)$$

$Y_1, Y_2$  is rearranged in magnitude and angle.

$Y_1$  is equal to the magnitude of admittance ( $Y_1$ );  $\phi_1$  is equal to the angle of admittance ( $Y_1$ )

$Y_2$  The magnitude of admittance ( $Y_2$ );  $\phi_2$  is equal to the angle of admittance ( $Y_2$ )

$$U = \left[ \frac{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j + \sqrt{3}X_cY_1 (\cos \phi_1 + j \sin \phi_1) \right)}{\left( -\left(\frac{1}{2}\right) - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)j - \sqrt{3}X_cY_2 (\cos \phi_2 + j \sin \phi_2) \right)} \right] \times V \quad (22)$$

$$U = \frac{\sqrt{[1 + 3X_c^2Y_1^2 - X_cY_1K_1]}}{\sqrt{[1 + 3X_c^2Y_2^2 + X_cY_2K_2]}} \times V \quad (23)$$

Where

$$K_1 = \sqrt{3} \cos \phi_1 - 3 \sin \phi_1$$

$$K_2 = \sqrt{3} \cos \phi_2 - 3 \sin \phi_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The condition is  $\frac{dU}{dX_C} = 0$  for minimum unbalance as same finding maximum efficiency.

$$3Y_1Y_2(Y_1K_2 + Y_2K_1)X_C^2 + 6(Y_1^2 - Y_2^2)X_C - (Y_1K_1 + Y_2K_2) = 0$$

$$AX_C^2 + BX_C + C = 0 \tag{24}$$

The coefficient in (24) is shown by  
 $A = 3Y_1Y_2(Y_1K_2 + Y_2K_1)$   
 $B = 6(Y_1^2 - Y_2^2)$   
 $C = -(K_1Y_1 + K_2Y_2)$

C. Power factor and efficiency [6]

Power factor for nonlinear loads which have non sinusoidal voltage and current can be found from  $PF = \frac{P}{S}$

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + \sum_{n \neq 1} V_n I_n \cos \theta_n}{V_s I_s} \tag{25}$$

Displacement power factor is cosine of different phase angle between voltage and current of fundamental component  $DPF = \cos \theta_1$  in terms of non sinusoidal current is

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} DPF \tag{26}$$

Efficiency can be found from output power and input power as follow

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

$$P_{out} = T_o \omega$$

Hence

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{27}$$

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The proposed 1-phase PWM AC chopper is controlled by varying duty cycle of PWM signals to obtain maximum motor power factor for each load condition. Fig.6 illustrates measured terminal voltage and current waveforms at duty cycle of 50% and 1 Nm load torque. The current waveform is nearly sinusoidal. Fig.7 shows relationship between output voltage of the PWM Ac chopper and duty cycle. Clearly the simulation and experimental results are good agreement. Fig. 8 shows efficiency versus load torque from no load to 2.5 N.m compared to a single-phase sinusoidal supply with fixed rated voltage whilst the duty cycle at each load level is adjusted to obtained highest efficiency. It is found that at a light load condition, the proposed PWM AC chopper gives better efficiency than fixed sinusoidal voltage. Fig 9 illustrates a variation of efficiency with load torque and capacitor value for three phase supply sources, Three-phase sinusoidal supply gives the highest efficiency. The fixed single-phase sinusoidal voltage supply gives higher efficiency than that with other values of capacitor. Fig.10 shows power factor versus

load torque obtained from the proposed PWM AC chopper with suitable duty value and fixed single-phase voltage. The proposed PWM AC chopper controller has better power factor than fixed sinusoidal voltage at light load. In order to investigate how capacitor value affect power factor at light load, fixed single-phase sinusoidal voltage with capacitor values of  $40 \mu F$ ,  $50 \mu F$ ,  $60 \mu F$  was used. Fig.11 shows a variation of power factor with capacitor values for fixed single voltage at light load compared to that for a three-phase supply. It is found that higher capacitance higher power factor. The three-phase power supply gives lower power factor at light load.

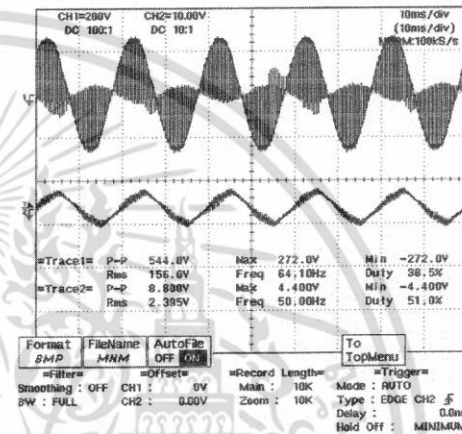


Fig. 6 Output voltages and output current compare with times

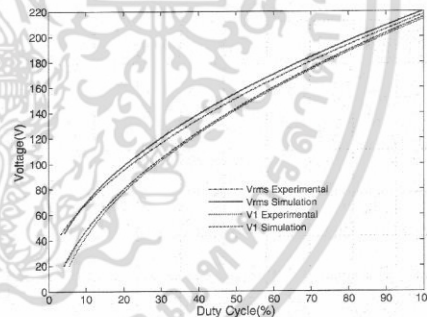


Fig. 7 Output voltage versus duty cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

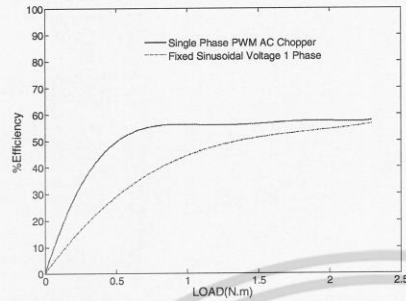


Fig. 8 Efficiency versus load torque

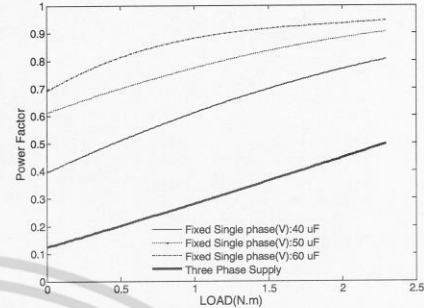


Fig. 11 Power factor for fixed single-phase sinusoidal voltage with capacitor values of  $40 \mu F$ ,  $50 \mu F$ ,  $60 \mu F$

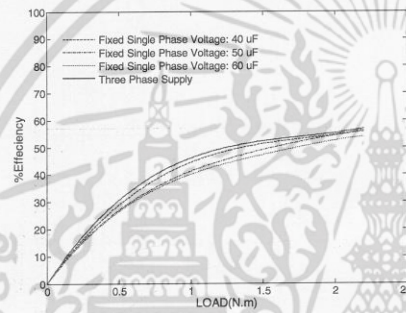


Fig. 9 Efficiency versus load torque

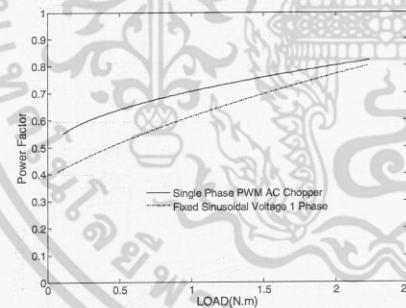


Fig. 10 Power factor versus load torque

V. CONCLUSION

This paper has presented the performance evaluation of a single-phase AC chopper fed three phase induction motor with ratings of 2 Hp, 220 V, 6 A, 1450 rpm, 4 P, 50 Hz.. By varying duty cycle of asynchronous PWM generated from a dsPIC microcontroller for a single-phase AC chopper, terminal motor voltage can be adjusted in order to obtained optimum efficiency and power factor. Also, the calculation of external capacitor has been given. At light load power factor is higher for the proposed than for fixed single-phase sinusoidal voltage. The capacitor value affects the power factor at light load.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge Energy Policy and Planning office Ministry of Energy, Royal Thai Government (EPPO) for financial support. Also they would like to thank Mr. Chavaporn Bumroongphuck, Mr. Nutthavut Danvanichkul, Mr. Toollatorn Pakdeekaew and Miss. Yupada Chanachai for helping the experiment.

REFERENCES

- [1] Veera Thanyaphirak, Vijit Kinnares, "PWM AC Chopper Control Schemes for Energy Saving of Single-Phase Induction Motors," @20012 IEEE IPEC 2012
- [2] Chavaporn Bumroongphuck, Vijit Kinnares, Rungwicha Chaiyot, "Power Factor Improvement for Single-Phase AC Chopper Voltage Controller-fed Three-Phase Induction Motor" International Conference on Engineering Applied Sciences and Technology, Aug.2013.
- [3] Nabi A. Ahmed\*, Kenji Amei, Masaaki Sakui, "AC chopper voltage controller-fed single-phase induction motor employing symmetrical PWM control technique," ELSEVIER. Elect. Power sys. Research 55(2000) 15-25).
- [4] Nabi A. Ahmed\*, Kenji Amei, Masaaki Sakui, "Three phase induction motor operating from single phase supply with an electronically controlled capacitor," ELSEVIER. Elect. Power sys. Research 73(2005) 121-128.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [5] Tian-Hua, "A maximum torque control with a controlled capacitor for a single-phase induction motor," IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 42, No. 1, Feb. 1995
- [6] Ned Mohan, "Electric Drives An Integrative Approach", USA. MNPERE, 2001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10  
วันที่ 4-6 มิถุนายน พ.ศ. 2557 ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

การประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  
ด้วยพีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์

Performance Evaluation of 3-Phase Induction Motors Driven  
by 1-Phase Bipolar PWM Inverter

เบญญทิพย์ พิพิธสุนทร<sup>1\*</sup>, ชวพร บำรุงพฤกษ์<sup>1</sup>, ชัยวุฒิ ชูรักษา<sup>1</sup> และ วิจิตร กิมเรศ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง อ.ลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

\*ผู้ติดต่อ: p.benyathip@hotmail.com: 08-5430-6668

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยพีดีบีเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสเพื่อประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ ทั้งประสิทธิภาพ ความเร็ว และแรงบิด โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสต่อแบบเดลต้าสามารถทำงานด้วยการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟสได้ โดยต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมเข้ากับขั้วของมอเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแส และขนาดไม่สมดุล ทำให้เกิด สนามแม่เหล็ก ลัพธ์หมุน ประกอบด้วยส่วนของบวกและลบนำไปสู่ การเกิดแรงบิดกระเพื่อม โดยค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ดังนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 แรงม้า, 50เฮิร์ตซ์, 4 โพล, 220/380 โวลต์, 6.1/3.4 แอมป์, ต่อแบบ เดลต้า ใช้การสวิตซ์ซิงแบบพัลส์วidthมอดูเลชั่นอินเวอร์เตอร์ (Pulse width-Modulation Inverter : PWM)ชนิดไบโพลาร์ ซึ่งสามารถควบคุม ได้ทั้งขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าให้ปรับสัดส่วนโดยตรงต่อกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink มีการอธิบายขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์อย่างละเอียด มีการประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ที่ภาระโหลดต่างๆ เช่นแรงบิดแม่เหล็ก ความเร็ว ในสภาวะเริ่มต้นหมุนและสภาวะคงตัวตลอดจนประสิทธิภาพของมอเตอร์

**คำหลัก:** พัลส์วidthมอดูเลชั่น อินเวอร์เตอร์, มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

**Abstract**

This paper proposes simulation of a 3-phase induction motor driven by 1-phase inverter for performance evaluation as well as efficiency, speed and torque. Generally, a delta connected 3 phase induction motor can be operated with a 1-phase power supply by connected a capacitor with suitable value across the motor terminals. As a consequence, there are phase shift among voltages, thus producing resultant rotating magnetic field consisting of positive and negative components leading to electromagnetic torque pulsation. The ratings of an under test 3-phase induction motor rating are 2HP, 50Hz, 4Pole, 2220/380 volts, 6.1/3.4 A, delta/star connected. A bipolar PWM inverter is used to control both frequency and voltage to be proportional. MATLAB/Simulation program is used for

ENETT 10-XXX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



simulation. The operation modes of the inverter is fully described. Performance evaluation under various load conditions such as electromagnetic torque, motor speed during start-up and steady state as well as motor efficiency is given.

**Keywords:** PWM Inverter, 1-phase induction motor,

## 1. บทนำ

ในบางสถานการณ์ที่ไม่สามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3-เฟสได้ เช่น อาศัยในพื้นที่ห่างไกล ชนบทพื้นที่ไฟฟ้าใช้เอง ซึ่งจะมีเฉพาะ แหล่งจ่ายไฟฟ้า 1-เฟส แต่มีความจำเป็นต้องใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ ไฟฟ้า 3-เฟส หรือมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์ขนาดใหญ่ส่วนใหญ่จะผลิตเป็นมอเตอร์ 3-เฟส ดังนั้นการนำมอเตอร์ 3-เฟสมาดัดแปลงใช้เป็นมอเตอร์เฟสเดียวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งช่วยแก้ปัญหา และเทคนิคหนึ่งซึ่งช่วยแก้ปัญหาคือนำตัวเก็บประจุต่อเข้ากับขั้วของมอเตอร์ ซึ่งตัวเก็บประจุจะช่วยให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแส ทำให้เกิดแรงบิดสูงขึ้น [1]

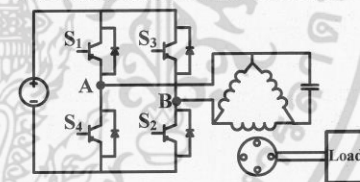
อินเวอร์เตอร์เข้ามามีบทบาทในภาคอุตสาหกรรมต้นกำลังทางไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้แหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เช่นอุตสาหกรรมการผลิตอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก ฉะนั้น การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีสมรรถนะสูงสามารถใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุม เพื่อให้ได้ความเร็วรอบและแรงบิดตามที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น และไม่ก่อให้เกิดการรบกวนแก่ระบบไฟฟ้าข้างเคียง การแปลงต้นกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับไม่ว่าจะใช้ในการควบคุมมอเตอร์หรือระบบป้องกันกำลังไฟฟ้า ต่างต้องการให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกสามารถควบคุมได้ทั้งแรงดันและความถี่ [5]

การแปลงต้นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter) และ (Current Source Inverter) ซึ่งอินเวอร์เตอร์

ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจะเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงนัก แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสจะเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงๆ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่นิยมใช้กันคืออินเวอร์เตอร์แบบที่ดัดแปลงเบิกลูเอ็ม (Pulse width-Modulation Inverter: PWM Inverter) และแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (square-wave inverter) ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์แบบที่ดัดแปลงเบิกลูเอ็มซึ่งจะสร้างแรงดันออกมาเป็นรูปคลื่นไซน์ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

## 2. การทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

โดยทั่วไปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสามารถทำงานด้วยการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟส ได้ โดยต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสม ขั้ว 1 เฟส ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ในการจำลอง กำหนดค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ดังนี้ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 แรงม้า, 50 วัตต์, 4 โพล, 220/380 โวลต์, 6.1/3.4 แอมป์, ต่อแบบเดลต้า/สตาร์



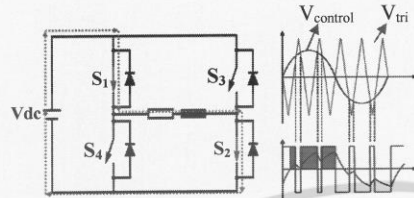
รูปที่ 1 แสดงการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

### 2.1 สวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์

โหมดที่ 1 โหมดจ่ายกำลังงาน (Powering) แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นบวก , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นบวก , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นบวก

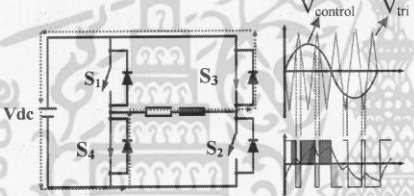


คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )



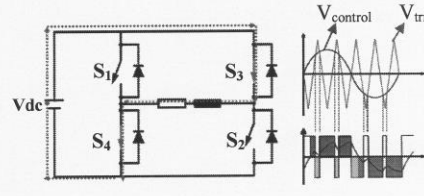
รูปที่ 2 แสดงสวิตช์ในโหมดจ่ายกำลัง

โหมดที่ 2 โหมดคืนพลังงาน (Regenerative)  
แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นลบ , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นบวก , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )



รูปที่ 3 แสดงสวิตช์ในโหมดคืนพลังงาน

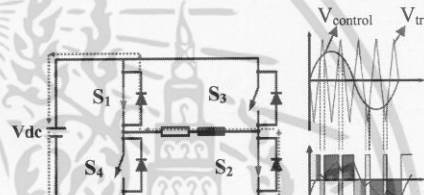
โหมดที่ 3 โหมดจ่ายกำลังงาน (Powering)  
แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นลบ , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นลบ , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )



รูปที่ 4 แสดงสวิตช์โหมดจ่ายกำลัง

โหมดที่ 4 โหมดคืนพลังงาน (Regenerative)

แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นบวก , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นลบ , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )



รูปที่ 5 แสดงสวิตช์ในโหมดคืนพลังงาน

2.2 การสวิตช์แบบที่ดับเบิลยูเอ็ม

หากต้องการสร้างแรงดันด้านออกเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับขนาดและแรงดันได้ตามต้องการสามารถทำได้โดยใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal control signal) ที่ความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular waveform) ความถี่การสวิตช์ที่ได้จะเท่ากับความถี่รูปคลื่นสามเหลี่ยม

2.3 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

เงื่อนไขสำคัญในการทำงานของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวคือการทำงานของสวิตช์แต่ละกิ่ง จะไม่ทำงาน



พร้อมกันในทุกช่วงเวลา เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจร  
ระหว่างบัสบวกและบัสลบ

การสวิตซ์แรงดันแบบไบโพลาร์ (Bipolar voltage  
switching) คือการควบคุมให้สวิตซ์แบบบริดจ์ทำงาน  
พร้อมกันเป็นคู่คือการทำงานของ S<sub>1</sub> และ S<sub>2</sub> จะทำงาน  
พร้อมกันในช่วงเวลาหนึ่ง อีกคู่หนึ่งคือสวิตซ์ S<sub>3</sub> และ S<sub>4</sub>  
จะทำงานพร้อมกันในช่วงเวลาหนึ่งเช่นกัน ดังนั้น  
แรงดันไฟฟ้าที่ด้านออกของกึ่ง A ซึ่งจะเท่ากับ

$$V_{A0} = \frac{1}{2}V_d, \text{ เมื่อ } V_{control} > V_{tri} \quad (1)$$

สวิตซ์ S<sub>1</sub> และ S<sub>2</sub> จะนำกระแส

$$V_{A0} = -\frac{1}{2}V_d, \text{ เมื่อ } V_{control} < V_{tri} \quad (2)$$

สวิตซ์ S<sub>3</sub> และ S<sub>4</sub> จะนำกระแส

เมื่อลัดจากอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์  $V_{B0} = -V_{A0}$  ดังนั้น  
แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์คือ

$$V_{o1} = V_{A0} - V_{B0} = 2V_{A0}$$

$$V_{o1} = m_a V_d, \text{ เมื่อ } m_a \leq 1.0 \quad (3)$$

$$V_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d, \text{ เมื่อ } m_a \geq 1.0 \quad (4)$$

ฉะนั้นแรงดันด้านออกที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $+V_d$  และ  $+V_d$

### 3. การจำลองทางคณิตศาสตร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสสามารถทำงานได้โดยใช้  
แหล่งจ่ายไฟฟ้า 1 เฟส ได้โดยการต่อตัวเก็บประจุกับ  
ขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) การวิเคราะห์  
องค์ประกอบขณะที่ไม่สมมาตร การเปลี่ยนรูปกำลังงาน  
อินวาเรียน (Power invariant) 3-เฟสองค์ประกอบ  
สมมาตรดังแสดงในสมการที่ (5)

$$[C] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ที่  $a = e^{j2\pi/3}$

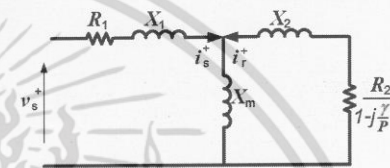
$U_a, U_b, U_c$  คือองค์ประกอบแรงดันช่วงขณะของแต่ละ  
เฟส

$$[U]_{abc} = [C][U]^{+0} \quad (6)$$

$$[U]_{abc} = [U_a \ U_b \ U_c]^T \quad (7)$$

$$[U]^{+0} = [U^+ \ U^- \ U^0]^T \quad (8)$$

$U^+, U^-, U^0$  คือลำดับบวก, ลำดับลบ และลำดับ  
ศูนย์ตามลำดับ จากรูปที่ 1 ปริมาณลำดับศูนย์จะไม่มีและ  
ปริมาณลำดับลบเป็น สังกะยัฒนาของปริมาณ  
ลำดับบวก วงจรสมมูลลำดับบวกของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ  
3-เฟสแสดงดังรูปที่ 6



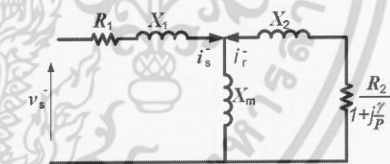
รูปที่ 6 แสดงวงจรสมมูลลำดับบวก

$$v_s^+ = (R_1 + X_1 p) i_s^+ + X_m p (i_s^+ + i_r^+)$$

$$0 = \frac{v_r^+}{1 - j(\gamma/p)}$$

$$0 = \left( \frac{R_2}{1 - j(\gamma/p)} + X_2 p \right) i_r^+ + X_m p (i_s^+ + i_r^+) \quad (9)$$

เมื่อวงจรสมมูลของลำดับลบแทนที่  $j$  ด้วย  $-j$  ในสมการ  
ที่ 9



รูปที่ 7 แสดงวงจรสมมูลลำดับลบ

$$v_s^- = (R_1 + X_1 p) i_s^- + X_m p (i_s^- + i_r^-)$$



$$0 = \frac{v_r^-}{1 + j(\gamma / p)}$$

$$0 = \left( \frac{R_2}{1 + j(\gamma / p)} + X_2 p \right) i_r^- + X_m p (i_r^- + i_r^+) \quad (10)$$

สมการที่ 7 และ 8 เป็นจำนวนเชิงซ้อน เพราะฉะนั้นทำให้เข้าใจง่ายก็คือแรงดันและกระแสลำดับบวกซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$v_s^+ = v_{sx} + jv_{sy}, i_s^+ = i_{sx} + ji_{sy},$$

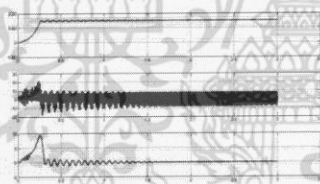
$$v_r^+ = v_{rx} + jv_{ry}, i_r^+ = i_{rx} + ji_{ry} \quad (11)$$

ในลักษณะเดียวกันสมการที่ 11 เป็นลำดับลบ ดังนั้นแรงบิดสนามแม่เหล็กของลำดับปริมาณสามารถเขียนได้ดังนี้

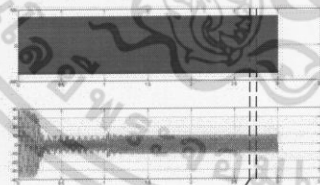
$$T_c = \frac{jX_m}{\omega_s} (i_r^+ i_s^- - i_r^- i_s^+) \quad (12)$$

4. การประเมินสมรรถนะ

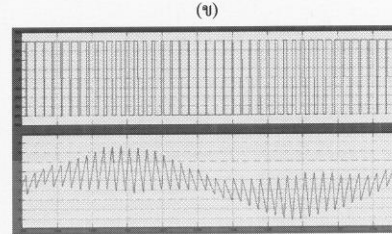
จากการทดสอบใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ตัวเก็บประจุที่ต่อกับขดลวดสตเตอร์ 40 μF, อินเวอร์เตอร์ แบบฟูลบริดจ์ใช้ไอจีบีที 1-เฟส ควบคุมแรงดันและความถี่, มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 แรงม้า, 50เฮิรตซ์, 4 โพล, 220/380 โวลต์, 6.1/3.4 แอมป์, ต่อแบบ เกล็ดข้าวสาคู



(ก)



ENETT 10-XXX

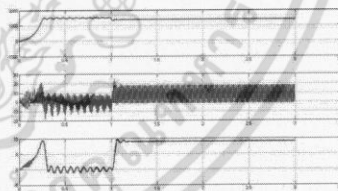


(ค)

รูปที่ 8 ที่สภาวะไม่มีภาระโหลด (ก.) แสดงแนวโน้มความเร็วเทียบกับแรงบิด เมื่อเทียบกับเวลา (ข) แสดงแรงดันและกระแส เมื่อเทียบกับเวลา (ค) แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่สภาวะคงตัว

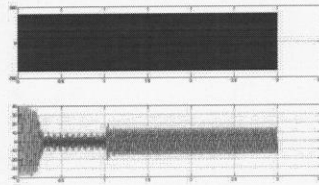
กราฟแสดงแนวโน้มความเร็วและแรงบิดเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 8 (ก) จากกราฟจะเห็นว่าในช่วง เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัว ในขณะที่ แรงบิด จะสูงในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์และมีการกระเพื่อมอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งการกระเพื่อมเป็นผลมาจาก การ ต่อตัวเก็บประจุที่ขั้วสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนและแรงบิดกระเพื่อม และค่อยเข้าสู่สภาวะคงตัว

กราฟแสดงแรงดันและกระแสเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 8 (ข) จะเห็นว่าแรงดันคงตัวตั้งแต่ว่าง เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ แต่กระแสจะสูงในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ เพราะในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ มอเตอร์จะมีแรงบิดสูง และค่อยเข้าสู่สภาวะคงตัว

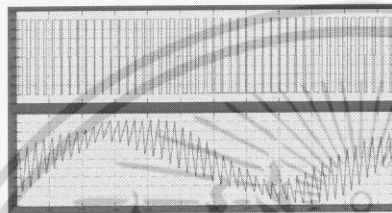


(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

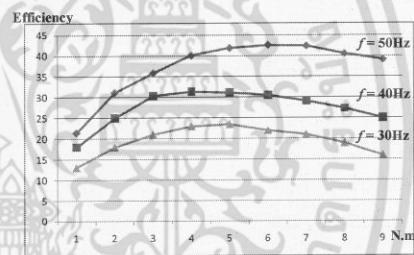
รูปที่ 9 ที่ภาระโหลด 5 N.m. (ก.) แสดงแนวโน้มความเร็วเทียบกับแรงบิดเมื่อเทียบกับเวลา (ข) แสดงแรงดันและกระแส เมื่อเทียบกับเวลา (ค) แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่สภาวะคงตัว

กราฟแสดงแนวโน้มความเร็วและแรงบิดเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 9 (ก) จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ ความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัวในขณะที่แรงบิดจะสูงในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์และมีการกระเพื่อมอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อความเร็วสูงสุดแล้ว แรงบิด จะลดลงเท่ากับศูนย์ และมาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มภาระโหลดในวินาทีที่ 1

กราฟแสดงแรงดันและเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 9 (ข) จะเห็นว่าแรงดันคงตัวตั้งแต่ช่วง เริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ แต่กระแสจะสูงในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์เพราะในช่วงเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ มอเตอร์จะมีแรงบิดสูงและค่อยเข้าสู่สภาวะคงตัว

จากกราฟรูปที่ 8(ค) และ 9(ค) สามารถอธิบายโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังนี้ โหมดจ่ายกำลัง

งาน แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นบวก , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นบวก , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) , โหมด คืนพลังงาน แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นลบ , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นบวก , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) , โหมด จ่ายกำลังงาน แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นลบ , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นลบ , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) , โหมด คืนพลังงาน แรงดันด้านออก ( $V_o$ ) เป็นบวก , กระแสด้านออก ( $I_o$ ) เป็นลบ , กำลังงานด้านออก ( $P_o$ ) เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าส่งจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปยังด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ )



รูปที่ 10 กราฟแสดงการ ประเมินประสิทธิภาพ เทียบโหลดที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ 40 เฮิร์ตซ์ และ 30 เฮิร์ตซ์

จากกราฟจะเห็นว่าความถี่ 50 Hz, 40 Hz, 30 Hz ที่สภาวะโหลดเบามอเตอร์จะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ในแต่ละความถี่ มอเตอร์ จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่พิกัดโหลดของมอเตอร์ และที่ความถี่ 50 Hz มอเตอร์มีประสิทธิภาพ ดีกว่าที่ความถี่ 40 Hz และ 30 Hz ในสภาวะ โหลดเดียวกัน

## 5. สรุป



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10  
วันที่ 4-6 มิถุนายน พ.ศ. 2557 ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

บทความนี้นำเสนอการ ประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยที่ดับเบิลยูเอ็มอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบไบโพลาร์ โดยต่อตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมเข้าที่ขั้วของมอเตอร์ ผลที่ได้จากการจำลองจะเห็นได้ มอเตอร์จะทำงานได้เต็มสมรรถนะที่สุดที่พิกัดโหลด ที่สภาวะโหลดเปลี่ยนมอเตอร์จะทำงานได้ดีที่แรงดัน ที่ดีที่สุดค่าหนึ่ง ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และแต่ ละความถี่จะมี ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ ค่าแรงดัน ไม่เท่ากัน

[5] รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชื่นเงิน และวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ (2555), อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic), กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง,

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chavaporn Bumroongphuck, Vijit Kinnares, Rungwicha Chaiyot, (2013), "Power Factor Improvement for Single-Phase AC Chopper Voltage Controller-fed Three-Phase Induction Motor" International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, Aug.2013
- [2] Nabi A. Ahmed\*, Kenji Amei, Masaaki Sakui, (2000), "AC chopper voltage controller-fed single-phase induction motor employing symmetrical PWM control technique." ELSEVIER, Elect. Power sys. Research 55(2000 15-25)
- [3] Toshihiko Noguchi, Member, IEEE, Hirokazu Kodachi, and Isamu Saito, (2001), Performance Improvement of Current-Controlled PWM Inverter by Means of Dithering, Cardiff, IEEE, 2001
- [4] SHOJI FUKUDA, YOSHITAKA IWAJI, AND HIROKAZU HASEGAWA, (1990), PWM Technique for Inverter with Sinusoidal Output Current, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 5, NO. 1, JANUARY 1990

ENETT 10-XXX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล**           เบญญทิพย์ พิพิธสุนทร
- วัน เดือน ปี เกิด**       4 ธันวาคม 2532
- ที่อยู่**                    33/7 ถ.จันทอุดม ต.ท่าประดู่ อ.เมือง จ.ระยอง 21000
- ประวัติการศึกษา**       สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- ผลงานวิจัย**
1. Benyathip Phiphitsuonthon, Chavaporn Bumroongphuck, Watcharin Promkhun, Vijit Kinnares, “Performance Evaluation of Single-Phase PWM AC Chopper fed Three-Phase Induction Motor” 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China
  2. เบญญทิพย์ พิพิธสุนทร, ชวพร บำรุงพลฤกษ์, ชัยวุฒ ชูรักษ์และ วิจิตร กิณเรศ “ การประเมินสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยพีดีบีแอลยูเอ็ม อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสชนิดไบโพลาร์”การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่10 วันที่4-6 มิถุนายน 2557 ม.สงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้