

การจำลองการควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็ว
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

SIMULATION OF FLUX VECTOR CONTROL FOR A VARIABLE-SPEED
WIND TURBINE GENERATOR

ยูลักษณ์ พัฒนาคิสัย
YUVALAK PATTANADISAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2528-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองการควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็ว
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

SIMULATION OF FLUX VECTOR CONTROL FOR A VARIABLE-SPEED
WIND TURBINE GENERATOR



ยวลักษณ์ พัฒนาศัย

YUVALAK PATTANADISAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2528-1

**SIMULATION OF FLUX VECTOR CONTROL FOR A VARIABLE-SPEED
WIND TURBINE GENERATOR**

YUVALAK PATTANADISAI

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

2006

ISBN 974-15-2528-1

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม
นักศึกษา	นางสาวบุวลักษณ์ พัฒนาคิษฐ์
รหัสนักศึกษา	44061049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการจำลองการทำงาน และสมรรถนะของระบบขับเคลื่อน เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก โดยมีกังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะใช้วิธีการคำนวณหากระแสเดเตอร์ โดยอาศัยหลักการแบบ Flux Vector จากแบบจำลองสำเร็จรูปในโปรแกรม Matlab ส่วนของ Simulink โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบอะแดปทีฟอีเอสเตอร์วีซีสแบนพีดับบลิวเอ็มเพื่อควบคุมกระแส ส่วนการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายใช้หลักการควบคุมแบบสเกลาร์ เพื่อควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเป็นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง

Thesis Title	Simulation of Flux Vector Control For a Variable-Speed Wind Turbine Generator
Student	Ms. Yuvalak Pattanadisai
Student ID.	44061049
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Monton Leelajindakraierk

ABSTRACT

In this paper, simulation and performance of squirrel cage induction machine system driven by wind turbine to work induction motor and three phase induction generator at the same time by using stator current calculation are given. The calculation of stator current in this paper is based on the principle of flux vector . Simulink and matlab program is used Adaptive Hysteresis band PWM current control for the converter control of power supply is based on the principle of scalar control in order to control switched moed converter that is able to be bidirectional power flow.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งในความอนุเคราะห์ของท่านเป็นอย่างมาก และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ ที่คอยแนะนำให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งในความอนุเคราะห์ของท่านเป็นอย่างมาก และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. พิชิต ถ่ายอง ที่เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ ของข้าพเจ้าเป็นอย่างดีขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ศุภี บรรจงจิตร์ ที่เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ ของข้าพเจ้าเป็นอย่างดีขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. ชาย ชมภูอินไหว ที่เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ ของข้าพเจ้าเป็นอย่างดีขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บุวลักษณ์ พัฒนาคิสัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 วิธีการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	5
2.1.2 หลักการทำงาน.....	5
2.1.3 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดความถี่และที่พิกัดแรงดัน.....	12
2.1.4 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว.....	14
2.2 การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์.....	16
2.2.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่).....	16
2.2.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่).....	18
2.2.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่).....	18
2.3 ชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์.....	19
2.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI).....	19
2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI).....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 รูปแบบของการมอดดูเลท.....	20
2.4.1 เทคนิค SPWM.....	23
2.4.2 เทคนิค Third Harmonic PWM.....	26
2.4.3 เทคนิค 60° PWM.....	26
2.4.4 เทคนิค Space Vector PWM.....	26
2.4.5 เทคนิคการควบคุมแบบ 6 สเตป.....	27
2.4.6 เทคนิค Adaptive Current Control.....	28
2.5 รูปแบบของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	29
2.5.1 การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่.....	30
2.5.2 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับกระแส.....	32
2.5.3 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control).....	33
2.5.4 การควบคุมแบบสลลิปออปติไมซ์เซชัน (Slip Optimization).....	34
2.5.6 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control).....	35
2.5.7 การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control).....	36
2.6 ลมและกังหันลม.....	37
2.6.1 เครื่องมือวัดความเร็วลม และเครื่องแสดงทิศทางลม.....	39
2.7 กังหันลม.....	40
2.7.1 ชนิดของกังหันลม.....	40
2.7.2 กังหันชนิดแนวแกนนอน (Horizontal axis machines).....	41
2.7.3 กังหันชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical axis machines).....	42
2.7.4 กังหันลมในประเทศไทย.....	43
2.8 พลังงานลม.....	44
2.8.1 กำลังงาน.....	44
2.8.2 แรงบิด.....	47
2.8.3 Tip speed ratio.....	49
2.9 สรุป.....	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย.....	51
3.1 พื้นฐานและชนิดของคอนเวอร์เตอร์.....	51
3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านอินพุต.....	51
3.2.1 รูปคลื่นที่ไม่เป็นรูปไซน์.....	51
3.2.2 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส.....	52
3.2.3 กำลังและตัวประกอบกำลัง.....	54
3.3 ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์แบบเฟสเดียว (Single-phase diode bridge rectifiers).....	56
3.3.1 ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์ที่มีฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์.....	56
3.3.2 คุณสมบัติของเรกติไฟเออร์ที่ $v_d(t) = V_d$	59
3.4 การปรับปรุงยูทิลิตีคอนเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว.....	63
3.4.1 วงจรพาสซีฟ.....	63
3.5 ทฤษฎีพื้นฐานการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	64
3.5.1 หลักการการควบคุมวงจรแปลงผันที่พลังงานไหลได้ 2 ทิศทาง.....	67
3.6 เทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสแบบ (Adaptive Hysteresis band current control).....	72
3.6.1 หลักการทำงานของเปรียบเทียบแบบขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส.....	73
3.7 การวิเคราะห์หลักการทำงานของเทคนิคการควบคุมกระแสแบบการติดตาม ขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส.....	75
3.7.1 การวิเคราะห์และออกแบบ Adaptive curren control.....	76
3.7.2 การวิเคราะห์และจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของสวิตช์โหมค คอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับ.....	79
3.8 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส.....	82
3.8.1 การทำงานในโหมคเรกติไฟอิง (Rectifier mode).....	82
3.8.2 การทำงานในโหมคอินเวอร์ติ้ง (Inverting mode).....	83
3.9 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส.....	86
3.10 สรุป.....	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยน	
ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	89
4.1 บทนำ.....	89
4.2 ระบบควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....	91
4.3 หลักการควบคุมแบบโดยตรงของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....	94
4.4 หลักการควบคุมแบบโดยอ้อมของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....	99
4.5 ระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยน	
ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	102
4.5.1 ขั้นตอนการออกแบบการทำงานของแบบจำลองระบบควบคุม	
แบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้.....	103
4.6 กำลังงานกลและแรงบิดทางกลของกังหันลม.....	106
4.6.1 หลักการทำงานของแบบจำลองของกังหันลม.....	109
4.6.2 กำลังงานกลสูงสุดของกังหันลม.....	109
4.7 แบบจำลองระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม	
การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	110
4.8 หลักการทำงานของแบบจำลองแบบจำลองระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์	
สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	110
4.9 สรุป.....	112
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	113
5.1 บทนำ.....	113
5.2 ผลการจำลองของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยน	
ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	115
5.2.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุม	
คอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย.....	115
5.2.2 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	115
5.3 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s	117
5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทาง	
ด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s	117

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.9 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	165
5.9.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทาง ด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	165
5.9.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลมค่าสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	169
5.10 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	173
5.10.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทาง ด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	173
5.10.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลมค่าสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	177
5.11 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	181
5.11.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทาง ด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	181
5.11.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลมค่าสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	185
5.12 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	189
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	192
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	192
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	193
บรรณานุกรม.....	194
ภาคผนวก.....	197
ภาคผนวก 1. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	197
ภาคผนวก 2. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	199
ประวัติผู้เขียน.....	207

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกังหันแนวแกนตั้ง และกังหันแนวแกนนอน.....	44
3.1	โมเมนต์ของสวิตช์และแรงดันของเฟส a.....	82
5.1	การทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	190

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชันและ (ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม.....	6
2.2 กราฟคุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วเมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด.....	13
2.3 กราฟแสดงค่าของกระแสโรเตอร์เทียบกับความถี่ที่โรเตอร์ เมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด.....	14
2.4 การเริ่มเดินของมอเตอร์โดยให้ค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด.....	14
2.5 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลิปมีค่าต่ำ.....	15
2.6 คุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	17
2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน.....	19
2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส.....	20
2.9 สัญญาณขั้วนำสวิตช์กำลังที่มีช่วงประวิงเวลา (dead time).....	21
2.10 สัญญาณพัลส์ที่คืบบิวเอ็มแบบขอบขาเดียวและขอบขาคู่ที่ได้จากตัวประมวลผล.....	21
2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	24
2.12 รูปคลื่นและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส.....	25
2.13 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค Third Harmonic PWM.....	26
2.14 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค 60° PWM.....	26
2.15 แพรเทินร์การทำงานของสวิตช์และแรงดันเฟส, โล้นทางด้านเอาต์พุตจาก การควบคุมแบบ 6 สเตป.....	27
2.16 บล็อกแสดงการควบคุมการทำงานโดยเทคนิค Adaptive Current Control PWM.....	28
2.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันโดยใช้เทคนิค Adaptive Current Control PWM.....	28
2.18 วงจรคอนเวอร์เตอร์ – อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์.....	30
2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด.....	30
2.20 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนวณถึงผลของค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์.....	31
2.21 บล็อกการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่.....	31
2.22 กราฟแสดงบล็อกความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ที่ใช้ในการควบคุม.....	32
2.23 บล็อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ชนิดตรวจจับกระแส.....	33
2.24 บล็อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control).....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด, ประสิทธิภาพและ PF เทียบกับค่าสลิป.....34
2.26	บล็อกการควบคุมความถี่สลิป (Slip frequency control).....35
2.27	บล็อกการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control).....36
2.28	บล็อกการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control).....36
2.29	แสดงการเกิดลมทั่วทั้งโลก.....38
2.30	แสดงการเกิดลมแบบเฉพาะที่.....39
2.31	(ก) เครื่องวัดความเร็วลม(ข) เครื่องแสดงทิศทางลม.....40
2.32	กั๊กันแนวแกนนอนชนิดต่างๆ.....41
2.33	กั๊กันแนวแกนนอนชนิดต่างๆ (ต่อ).....42
2.34	กั๊กันแนวแกนตั้งชนิดต่างๆ.....43
2.35	การขยายตัวของกระแสในรูปแบบของ Benz.....45
2.36	ความสัมพันธ์ของ C_p ในฟังก์ชันของ interference factor a เมื่อ $C_p = 4a(1 - a)^2$47
2.37	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง torque coefficient (C_T) กับ tip speed ratio (λ) ของกั๊กันแบบ high solidity , low solidity และ ideal criterion.....48
3.1	แสดงบล็อกไดอะแกรมของเรกติไฟเลอร์.....51
3.2	แสดงการผิดเพี้ยนรูปคลื่นของกระแส.....52
3.3	ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า (Power triangle).....54
3.4	ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเลอร์ที่มีฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์.....57
3.5	วงจรที่เทียบเท่าของรูปที่ 3.4.....57
3.6	รูปคลื่นในวงจรเรียงกระแสของรูปที่ 3.4.....59
3.7	(ก) เรกติไฟเลอร์ที่แรงดันดีซีเชื่อมโยงคกที่.....60
3.8	I_d ต่อ V_d ในเรกติไฟเลอร์รูปที่ 3.7(ก) กับแรงดันดีซีเชื่อมโยงคกที่.....62
3.9	ค่าความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์โมนิกส์ ค่า DPF และค่า PF ในเรกติไฟเลอร์ของรูปที่ 3.7(ก) ซึ่งมีแรงดันดีซีเชื่อมโยงคกที่.....62
3.10	V_d แบบปกติและ Crest factor ในเรกติไฟเลอร์ของรูปที่ 3.7(ก) ซึ่งมีแรงดันดีซีเชื่อมโยงคกที่.....63
3.11	พาสซีฟฟิลเตอร์ที่แก้ไขรูปคลื่น i_r64
3.12	หลักการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่าง 2 บัส.....65
3.13	วงจรสมมูลของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่ส่งถ่ายกำลัง 2 บัส.....67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 การเรคตีไฟร์ และการอินเวอร์เตอร์.....	68
3.15 แสดงรูปบล็อกไดอะแกรมเทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีชีต.....	72
3.16 แสดงรูปคลื่นกระแสแรงดันเอาต์พุต PWM และสัญญาณเทคนิค การควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีชีต.....	73
3.17 แสดงวงจรการควบคุมการเปรียบเทียบเทคนิคการควบคุมแบบติดตาม ขอบเขตฮิสเตอร์รีชีต.....	73
3.18 การเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเออร์เรอร์ (e) กับสัญญาณฮิสเตอร์รีชีต (HB).....	74
3.19 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมเทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีชีต.....	75
3.20 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมเทคนิคการควบคุมกระแสแบบการติดตาม ขอบเขตฮิสเตอร์รีชีตของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส.....	75
3.21 หลักการทำงานการเกิดรูปคลื่น PWM โดยใช้การกระแสแบบ การติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีชีต.....	76
3.22 บล็อกไดอะแกรมทั่วไปของการควบคุมแบบที่มีการป้อนกลับ.....	79
3.23 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับ.....	81
3.24 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการป้อนกลับแบบพีไอ.....	81
3.25 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 1.....	83
3.26 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 2.....	83
3.27 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 3.....	84
3.28 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 4.....	84
3.29 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 5.....	85
3.30 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 6.....	85
3.31 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 7.....	86
3.32 การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 8.....	86
3.33 แสดงแรงดัน v_m และกระแส i_d ของสวิตช์โหมค คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 8 โหมค.....	87
3.34 ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านเอซีไลน์.....	88
4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	92
4.2 โอเรียลเตชั่นของสภาวะกรอบอ้างอิงร่วมกับโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....	94
4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	95
4.4 รูปแบบของ magnitude และตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์โดยใช้ Hall เป็น ตัววัดและการคำนวณหาโรเตอร์ฟลักซ์.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	บล็อกไดโอดะแกรมของระบบควบคุมโดยตรงโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....97
4.6	บล็อกไดโอดะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ กรณีการควบคุมแบบโดยตรงโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....98
4.7	บล็อกไดโอดะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ กรณีการควบคุมแบบโดยทางอ้อมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์.....101
4.8	บล็อกไดโอดะแกรมของระบบการควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....102
4.9	กราฟความสัมพันธ์ของ C_p และ C_t เทียบกับ λ108
4.10	แบบจำลองของกังหันลมเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....108
4.11	ระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....110
5.1	บล็อกไดโอดะแกรมของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....113
5.2	แบบจำลองของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....114
5.3	แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 (m/s).....117
5.4	แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s....117
5.5	ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s.....118
5.6	แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s.....118
5.7	กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s.....119
5.8	ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s.....119
5.9	แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s	121
5.11 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s	122
5.12 แรงบิด T_m และ T_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s	122
5.13 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s	123
5.14 แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	125
5.15 แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s ...	125
5.16 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	126
5.17 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	126
5.18 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	127
5.19 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	127
5.20 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	129
5.21 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	129
5.22 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	130
5.23 แรงบิด T_m และ T_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s	131
5.25 แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	133
5.26 แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s ...	133
5.27 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	134
5.28 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	134
5.29 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	135
5.30 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	135
5.31 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	137
5.32 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	137
5.33 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	138
5.34 แรงบิด T_m และ T_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	138
5.35 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s	139
5.36 แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	141
5.37 แรงดันอินพุต v_o และกระแสอินพุต i_o เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s ...	141
5.38 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	142

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.39 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	142
5.40 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	143
5.41 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	143
5.42 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	145
5.43 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	145
5.44 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	146
5.45 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	146
5.46 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s	147
5.47 แรงดันอินพุต v_u และกระแสอินพุต i_u เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	149
5.48 แรงดันอินพุต v_u และกระแสอินพุต i_u เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s ...	149
5.49 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	150
5.50 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	150
5.51 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	151
5.52 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	151

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.53 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	153
5.54 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	153
5.55 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	154
5.56 แรงบิด T_m และ T_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	154
5.57 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s	155
5.58 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	157
5.59 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	157
5.60 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	158
5.61 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	158
5.62 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	159
5.63 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันขณะทำงาน ใน โหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	159
5.64 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	161
5.65 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	161
5.66 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	162
5.67 แรงบิด T_m และ T_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	162

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.68 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s	163
5.69 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	165
5.70 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	165
5.71 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	166
5.72 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	166
5.73 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	167
5.74 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันขณะทำงาน ใน โหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	167
5.75 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	169
5.76 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	169
5.77 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	170
5.78 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	170
5.79 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s	171
5.80 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	173
5.81 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	173
5.82 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายขณะทำงาน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	174

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.83 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	174
5.84 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	175
5.85 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	175
5.86 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	177
5.87 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	177
5.88 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	178
5.89 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	178
5.90 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s	179
5.91 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	181
5.92 แรงดันอินพุต v_d และกระแสอินพุต i_d เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	181
5.93 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และค่ากำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	182
5.94 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	182
5.95 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	183
5.96 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	183
5.97 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	185

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.98 กระแสเอาต์พุต I_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	185
5.99 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	186
5.100 แรงบิด T_m และ T_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	186
5.101 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_c ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s	187
5.102 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ ฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม.....	189
5.103 การทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับ ควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมเมื่อใช้ความเร็วลม สูงสุดตั้งแต่ระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 4 m/s จนถึงระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 12 m/s	191

คำอธิบายสัญลักษณ์

P	=	กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
Q	=	กำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย
V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}	=	แรงดันพีคดับลิแวนเฟส a, b และ c ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
V_d, V_q	=	แรงดันไฟฟ้าตรงบนแกน d, q ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
V_a, V_b, V_c	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a, b และ c ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}	=	กระแสไฟฟ้าเฟส a, b และ c ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_d, i_q	=	กระแสไฟตรงบนแกน d, q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
V_{d1}, V_{q1}	=	แรงดันไฟตรงพีคดับลิแวนบนแกน d, q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_{os}	=	กระแสไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
i_{or}	=	กระแสไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวทเตอร์ทางด้านโรเตอร์
E	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงของวงจรถูกคอนเวทเตอร์
V_α, V_β	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับบนแกน α, β ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
θ_c	=	ตำแหน่งมุมของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟ
m_1	=	ดัชนีการมอดูเลชันของสัญญาณไฮด์กับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย
L	=	ค่าความเหนี่ยวนำของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
C	=	ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรเชื่อมโยงไฟตรง
V_{d1}^*, V_{q1}^*	=	แรงดันไฟตรงอ้างอิงบนแกน d, q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_d^*, i_q^*	=	กระแสไฟตรงอ้างอิงบนแกน d, q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
E^*	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงอ้างอิงของวงจรถูกคอนเวทเตอร์
V_{ds}, V_{qs}	=	แรงดันไฟตรงบนแกน d^*, q^* ทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ
V_{dr}, V_{qr}	=	แรงดันไฟตรงบนแกน d^*, q^* ทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามลำดับ

i_{ds}, i_{qs}	=	กระแสไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านสเตเตอร์ตามลำดับ
i_{dr}, i_{qr}	=	กระแสไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านโรเตอร์ตามลำดับ
$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$	=	ฟลักซ์เกี่ยวกับขดลวดสเตเตอร์บนแกน d^c, q^c ตามลำดับ
λ_s	=	ฟลักซ์เกี่ยวกับขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมด
$\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$	=	ฟลักซ์เกี่ยวกับขดลวดโรเตอร์บนแกน d^c, q^c ตามลำดับ
i_{ms}	=	กระแสแมกนีไทซ์ซึ่งทางด้านสเตเตอร์บนแกน d^c, q^c
L_o	=	ค่าความเหนี่ยวนำเทียบเท่า
L_s, L_r	=	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
L_m	=	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์
L_{ls}, L_{lr}	=	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมไหลของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
R_s, R_r	=	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
θ_s	=	ตำแหน่งมุมของสเตอร์ฟลักซ์
θ_{sl}	=	ตำแหน่งมุมของสลิป
θ_r	=	ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ฟลักซ์
σ	=	สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทั้งหมด
σ_s	=	สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
ω_{ms}	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ
V_{ds}^s, V_{qs}^s	=	แรงดันสเตเตอร์บนแกนหนึ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
V_{dr}^s, V_{qr}^s	=	แรงดันโรเตอร์บนแกนหนึ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
i_{ds}^s, i_{qs}^s	=	กระแสแรงดันสเตเตอร์บนแกนหนึ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
i_{dr}^s, i_{qr}^s	=	กระแสแรงดันโรเตอร์บนแกนหนึ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
T_e	=	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
P_m	=	กำลังงานกลของกังหันลม
v	=	ความเร็วลม
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ
r	=	รัศมีของใบพัดของกังหันลม
C_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล
λ	=	อัตราส่วนความเร็วปลาย
C_t	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล
G	=	อัตราส่วนของเกียร์บ็อก

B	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดและแรงเสียดทาน
$T_{m,t}$	=	แรงบิดทางกลของกังหันลม
$T_{m,G}$	=	แรงบิดทางกลเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$T_{m,t,opt}$	=	แรงบิดทางกลที่จุดออปติ멈ของกังหันลม
$T_{m,G,opt}$	=	แรงบิดทางกลที่จุดออปติ멈เมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$P_{m,opt}$	=	กำลังงานกลที่จุดออปติ멈ของกังหันลม
$\omega_{m,t}$	=	ความเร็วเชิงมุมทางกลของกังหันลม
$\omega_{m,G}$	=	ความเร็วเชิงมุมทางกลเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\omega_{m,t,opt}$	=	ความเร็วเชิงมุมออปติ멈ของกังหันลม
$\omega_{m,G,opt}$	=	ความเร็วเชิงมุมออปติ멈เมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ω_r	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ω_{st}	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสลิป
S	=	สลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
P	=	จำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
δ	=	คิวด์ไอเกิล
K_{opt}	=	ค่าคงที่ออปติ멈ของกังหันลม
f_s	=	ความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์
f_r	=	ความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดโรเตอร์
P_s	=	กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟจ่ายออกทางด้านสเตเตอร์
P_r	=	กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟจ่ายออกทางด้านโรเตอร์
P_{st}	=	กำลังสลิป
P_e	=	กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า
Q_s	=	กำลังไฟฟารีแอ็คทีฟทางด้านสเตเตอร์
Q_r	=	กำลังไฟฟารีแอ็คทีฟทางด้านโรเตอร์
η_{system}	=	ประสิทธิภาพของระบบ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยปกติแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำงานสามช่วงคือ ช่วงเบรก (plugging mode) ช่วงปกติทำงานเป็นมอเตอร์ (motoring) และช่วงทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (regeneration mode) ซึ่งในช่วงปกติมอเตอร์จะทำงานตามปกติคือรับไฟฟ้า 3 เฟส มาสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและทำให้โรเตอร์หมุนตาม และสำหรับช่วงเบรก (plugging mode) จะเกิดขึ้นได้เมื่อการกลับลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบทันทีทันใด มีผลทำให้สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนทวนกับการหมุนของโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดการเบรกของโรเตอร์ แต่ผลที่ตามมาอีกอย่างคือกระแสจะสูงมากๆ ทำให้มอเตอร์ร้อนจนเกิดความเสียหาย ส่วนในช่วงของการคืนพลังงาน (regeneration mode) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนำเครื่องจักรอีกตัวหนึ่งมาหมุนโรเตอร์ในทิศทางเดิมที่หมุนอยู่ แต่เร่งความเร็วของโรเตอร์ไปจนเกินความเร็วของสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ผลก็คือ โรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทางตามหลักการความเร็วสัมพันธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอหลักการของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสโดยอาศัยหลักการ การควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ ซึ่งจะนำมาขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ให้สามารถทำงานได้สองโหมดคือทำงานในโหมดของมอเตอร์ และทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะอาศัยก้านลมเป็นเครื่องต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ให้สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานไปทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการนำพลังงานลมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยได้นำเสนอการจำลองการทำงาน ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ให้สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานไปเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน โดยจะนำคอนเวอร์เตอร์มาแทนที่ไดโอดเรกติไฟค์ เพื่อให้สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังได้ในขณะที่ทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสจะมีสถานะการทำงานอยู่ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องมาจากความเร็วเชิงโรตอร์นั้นต่ำกว่าความเร็วโรเตอร์ จะส่งผลให้พลังงานไหลคืนย้อนกลับมายังแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง หรือไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยหลักการดังกล่าวนี้จะเป็นการพัฒนาแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยพลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนอีกรูปแบบหนึ่ง

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในปัจจุบันปัญหาทางด้านพลังงานมีเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงกับเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก สาเหตุหลักของปัญหา คือ เรื่องของราคาพลังงานด้านต่าง ๆ ที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งรวมไปถึงราคาของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ผลิตกำลังไฟฟ้า การพัฒนาเกี่ยวกับแหล่งพลังงานทดแทน เป็นการดำเนินการอีกด้านที่หลายประเทศให้ความสำคัญ ดังนั้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ ที่สามารถจะนำพลังงานเหล่านี้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นเราจะนำเอาพลังงานต่างๆ มาแปลงเป็นพลังงานกลแล้ว จากนั้นค่อยนำไปแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานดังกล่าวก็อย่างเช่น พลังงานความร้อน (อาจจะได้จากการเผาไหม้ของก๊าซ น้ำมัน ถ่านหิน หรือจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์) พลังงานที่ได้จากการไหลของน้ำ พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ และพลังงานจากลม เป็นต้น

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการนำพลังงานลมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยได้นำเสนอการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ให้สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานไปเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะเป็นการพัฒนาแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนอีกรูปแบบหนึ่ง

1.3 วิธีการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีจากบทความ, จากวารสาร, เอกสารและตำราที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับหลักการและเทคนิคต่าง ๆ
2. วิเคราะห์และออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. ออกแบบวงจรการทำงานโดยใช้การจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาและทดลองจากการวิเคราะห์หลักการการทำงานของระบบ
5. เก็บผลที่ได้จากการวิเคราะห์หลักการการทำงานของระบบ
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลองแล้วพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาและวิเคราะห์หลักการการทำงานและหลักการควบคุมของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม
2. ทำการวิเคราะห์ระบบที่ระดับความเร็วลมต่างๆ เริ่มตั้งแต่ระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 4 (m/s) จนถึงระดับความเร็วลมสูงสุดที่มอเตอร์สามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา วิเคราะห์ วิจัย การจำลองการควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม โดยมีรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์และสามารถแบ่งได้เป็นแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 บทนำ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา วิธีการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส คุณสมบัติสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส วิธีการปรับเปลี่ยนความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ ชนิดและคุณสมบัติของ PWM อินเวอร์เตอร์ ไรเฟ และคุณสมบัติต่าง ๆ ของกังหันลม

บทที่ 3 AC/DC สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์และหลักการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้าพื้นฐานและชนิดของ AC/DC คอนเวอร์เตอร์ การวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านอินพุตของคอนเวอร์เตอร์ ทฤษฎีพื้นฐานการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์โหมค การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ หลักการเทคนิคการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตสี่สเตอรัรีซีสแบน และแบบจำลองสำหรับการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตสี่สเตอรัรีซีสแบนและการวิเคราะห์ Adaptive PWM Current control โมเดลของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์โหมคที่มีการป้อนกลับของแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง และการวิเคราะห์ของระบบป้อนกลับโดยใช้โปรแกรม MATLAB การจำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB

บทที่ 4 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และหลักการการทำงานของระบบควบคุม

บทที่ 5 ผลการทดลองและทดสอบการทำงานของระบบควบคุมที่ระดับความเร็วลมต่างๆ

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ภาคผนวก 1. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

ภาคผนวก 2. กล่าวถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. คอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย สามารถทำงานเป็นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถส่งถ่ายพลังงานได้ 2 ทิศทาง
2. สามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (PF) และค่าความผิดเพี้ยนของกระแสอินพุต ของคอนเวอร์เตอร์ให้ดีขึ้น
3. สามารถส่งผ่านพลังงานคืนระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟเบรกกิ้ง
4. การรักษาแรงดันเชื่อมโยงกระแสตรงให้คงที่เมื่อโหลดเพิ่ม โดยนำการควบคุมแบบ PI มาใช้ในการควบคุม
5. สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับผลิตกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยพลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนอีกรูปแบบหนึ่ง

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 บทนำ

2.1.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor) โดยสามารถแบ่งชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบกรงกระรอก (Squirrel cage) โครงสร้างภายในของโรเตอร์จะทำได้ด้วยแผ่นลามิเนตเซาะผิวทางด้านนอกให้เป็นร่อง ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลลา เมื่อนำแผ่นเหล่านี้มาอัดเข้าด้วยกันจะได้เป็นแกนโรเตอร์ โดยภายในร่องจะมีแกนอะลูมิเนียมอยู่ในร่องของผิวด้านนอกของกรงกระรอก และที่ปลายของแกนอะลูมิเนียมทั้งสองข้างจะมีการเชื่อมต่อกันโดยวงแหวนหรือเรียกว่า "End Ring" ส่วนที่ปลายเพลลาอาจมีครีบยื่นออกไปเพื่อใช้ในการติดตั้งใบพัดระบายความร้อน

2. แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor) โรเตอร์แบบนี้จะใช้ขดลวดทองแดงในการพันรอบโรเตอร์แทนที่จะใช้แกนอะลูมิเนียมอย่างมอเตอร์ชนิดกรงกระรอก และที่ปลายของขดลวดจะมีการต่อกับสลิปริงเพื่อใช้ในการต่อกับวงจรรภายนอกในการสแตร์การทำงานของมอเตอร์ โดยโรเตอร์ดังกล่าวจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่สเตเตอร์

2.1.2 หลักการทำงาน

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สมดุลย์ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในสเตเตอร์ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในตัวโรเตอร์จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น และเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดขึ้นที่ตัวโรเตอร์ จึงทำให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนหรือที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (ω_s) สามารถหาได้จาก [27]

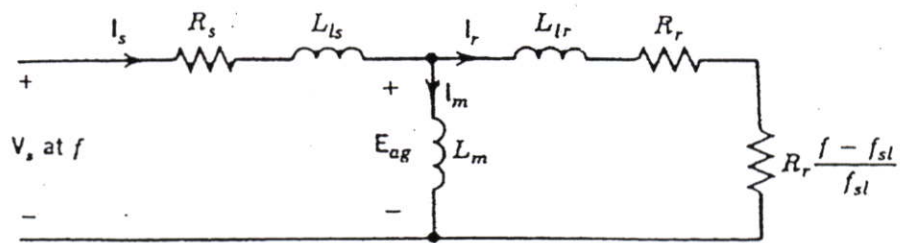
$$\omega_s = \frac{(2\pi)/(P/2)}{1/f} = \frac{2\omega}{P} \quad \text{rad/s} \quad (2.1)$$

หากเขียนอยู่ในรูปของหน่วยรอบต่อนาที (rpm) จะได้ค่าความเร็วซิงโครนัสเท่ากับ

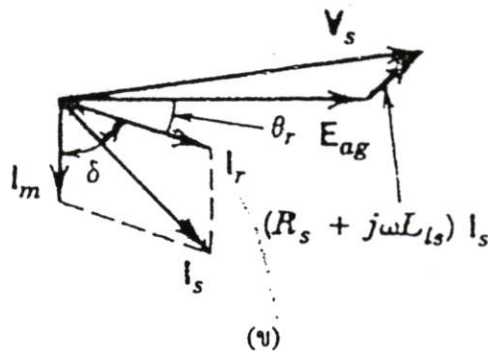
$$n_s = 60 \cdot \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120f}{P} \quad \text{rpm} \quad (2.2)$$

เมื่อ	n_s	คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์
	ω_s	คือ ค่าความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า
	f	คือ ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์
	P	คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

ฟลักซ์ในช่องอากาศ (Air-gap Flux) ที่เกิดจากการกระจายของความหนาแน่นของฟลักซ์ (B_{ag}) จะหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสรอบๆ ขดลวดสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำระหว่างช่องว่างอากาศ (Air-gap Voltage) หรือ E_{ag} ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เท่ากับความถี่แหล่งจ่าย สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์อินดักชันและ (ข) เฟสเซอร์ไคอะแกรม

เมื่อ	V_s	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส
	R_s	คือ ค่าความต้านทานขดลวดสเตเตอร์
	R_r	คือ ค่าความต้านทานขดลวดโรเตอร์
	L_m	คือ ค่าความเหนี่ยวนำในการสร้างสนามแม่เหล็ก

L_{ls} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์

L_{lr} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดโรเตอร์

และเนื่องจากการกระจายของความหนาแน่นของฟลักซ์ เป็นไปในลักษณะของฟังก์ชันของไซน์นูไซคอยด์ จากกฎของฟาราเดย์ทำให้สามารถหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้จาก

$$e_{ag} = N_s \frac{d\phi_{ag}}{dt} \quad (2.3)$$

เมื่อ e_{ag} คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในช่องว่างอากาศ

N_s คือ จำนวนรอบของขดลวด

ϕ_{ag} คือ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air gap)

เมื่อฟลักซ์ในช่องอากาศที่คล่องขดลวดสเตเตอร์มีค่า $\phi_{ag}(t)$ เท่ากับ $\phi_{ag} \sin \omega t$ จะได้

$$e_{ag} = N_s \phi_{ag} \omega \cos \omega t \quad (2.4)$$

โดย ω มีค่าเท่ากับ $2\pi f$

เมื่อแทนค่า $\cos \omega t$ เท่ากับหนึ่งและทำสมการ (2.4) เป็นค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$E_{ag} = 4.44 N_s \phi_{ag} f \quad (2.5)$$

แรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดจากการทำปฏิกิริยากับฟลักซ์ในช่องอากาศกับกระแสในโรเตอร์ ถ้า โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ก็จะไม่เกิดความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับโรเตอร์และจะไม่เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ด้วย ดังนั้นก็จะไม่เกิดกระแสไหลในส่วนของโรเตอร์และเมื่อไม่มีกระแสเกิดขึ้นก็จะไม่เกิดแรงบิดด้วยเช่นกัน แต่ถ้าตัวโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ (ความเร็วซิงโครนัส) ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (ω_s) กับความเร็วโรเตอร์ (ω_r) เรียกว่า ความเร็วสลลิป (ω_{sl}) สามารถหาได้จาก

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r \quad (2.6)$$

โดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วสลลิป (ω_{sl}) กับความเร็วเชิงมุมเชิงโครนัส (ω_s) จะเรียกว่า สลิป (s) สามารถหาได้จาก

$$\text{Slip, } s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_{slip}}{\omega_s} \quad (2.7)$$

เมื่อ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (stator angular frequency)
 ω_r คือ ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (rotor angular frequency)
 ω_{sl} คือ ความถี่เร็วเชิงมุมสลลิป (slip angular frequency)

เมื่อจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ ฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่หมุนผ่านขั้วแม่เหล็กที่ตัวสเตเตอร์และโรเตอร์ด้วยความเร็วเชิงโครนัส จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำทำให้เกิดกระแสไหลใน โรเตอร์ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟโดยค่าของแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสนั้นจะมีค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดใน โรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นความสัมพันธ์ไฟฟ้าของแรงดันเหนี่ยวนำทั้งสองส่วนนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง ในขณะที่มอเตอร์อยู่กับที่ (ความเร็วรอบเท่ากับศูนย์) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นใน โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความเร็วของสาย กรณิดังกล่าวจะมีค่าสลลิปหรือค่าการลื่นไถลเท่ากับ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อโรเตอร์มีการหมุนที่ความเร็วใดๆ ค่าสลลิปจะมีค่าแปรผันตามกันจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าสลลิป สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_r = sE_{og} \quad (2.8)$$

เมื่อ E_r คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์ขณะทำงาน
 E_{og} คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ช่องว่างอากาศ

ในทำนองเดียวกันความถี่ของโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามค่าสลลิป

$$f_{sl} = sf \quad (2.9)$$

เมื่อ f_{sl} คือ ค่าความถี่ไฟที่โรเตอร์
 f คือ ค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังกลของมอเตอร์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำกำลังทางด้านอินพุตไม่ได้เกิดจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโรเตอร์โดยตรง แต่เป็นการส่งผ่านกำลังทางช่องว่างอากาศ (Air Gap) ด้วยการเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ที่โรเตอร์ ซึ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสสามารถหาได้จากสมการ (2.8) โดยถ้านำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าหารด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่โรเตอร์ต่อเฟส (Z_r) จะได้ค่าของกระแสที่โรเตอร์ (I_r) ที่ไหลอยู่ในตัวโรเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ โดยสามารถหาได้จากสมการ (2.10)

$$\bar{I}_r = \frac{sE_r}{Z_r} = \frac{sE_r}{R_r + j2\pi f s L_{lr}} \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) ใช้คำนวณหาค่ากระแสในโรเตอร์ได้ทั้งขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนอยู่ที่ค่าสลิปใดๆ โดยขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนจะมีค่าสลิปเท่ากับ 1

การอธิบายการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำอาจจะอาศัยหลักการเช่นเดียวกับหม้อแปลงในการเขียนวงจรสมมูลได้ หากแต่ทางด้านโรเตอร์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่เท่านั้น ดังนั้นวงจรสมมูลทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหมือนกับวงจรสมมูลทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงคือประกอบด้วยค่าความต้านทานของสเตเตอร์และค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์ ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กให้กับโรเตอร์ได้แก่ ค่ารีแอคแตนซ์ ส่วนค่าความต้านทานของแกนเหล็ก ในบางครั้งสามารถละเลยได้ ย้อนกลับไปทีรูป 2.1 กระแส I_m ที่ไหลในขดลวดความต้านทานของสเตเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในแกนเหล็ก (Core loss) และการสูญเสียในขดลวด (Copper loss) โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นในการคำนวณทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถที่จะย้ายวงจรขดลวดที่ I_m ไหลอยู่มาไว้ในส่วนด้านหน้าของวงจรได้ โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเล็กน้อย อันเนื่องมาจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลของทางด้านสเตเตอร์ และเพื่อการคำนวณที่ง่ายขึ้นถ้าเราทราบอัตราระหว่างจำนวนรอบของขดลวดที่สเตเตอร์กับโรเตอร์ (ratio) ก็สามารที่จะย้ายค่าวงจรสมมูลของขดลวดทั้งสองมารวมกันได้เช่นเดียวกับในหม้อแปลงไฟฟ้า ในที่นี้หากต้องการย้ายค่าของวงจรเทียบเคียงทางด้านโรเตอร์มาทางด้านสเตเตอร์สามารถหาค่าได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_r' = aE_r = E_m \quad (2.11)$$

เมื่อ E_r' คือ แรงดันไฟฟ้าขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่โดยย้ายค่ามาทางด้านสเตเตอร์
 E_m คือ แรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์
 a คือ อัตราระหว่างขดลวดทางด้านสเตเตอร์กับขดลวดทางด้านโรเตอร์

และจากความสัมพันธ์ของกระแสในโรเตอร์ สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ได้จาก

$$\bar{E}_r = R_r \bar{I}_r + j2\pi f s L_{lr} \bar{I}_r \quad (2.12)$$

ผลของเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_{ag}) กับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยกระแสโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงบิดสนามไฟฟ้า (Electromagnetic Torque) ซึ่งเราสามารถหาค่าสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ได้ดังสมการ (2.13)

$$P_r = 3R_r I_r^2 \quad (2.13)$$

และจากสมการ (2.12) หากคูณด้วยค่า $1/s$ จะได้

$$\bar{E}_{ag} = \frac{R_r}{s} \bar{I}_r + j2\pi f L_{lr} \bar{I}_r \quad (2.14)$$

จากรูปที่ 2.1 เทอมของค่า R_r/s ถูกแทนด้วยผลบวกของค่า R_r กับค่า $R_r(1-s)/s$ และจากสมการ (2.14) ปริมาณต่างๆ ทั้งหมดของโรเตอร์สามารถอ้างอิงได้จากจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ หากนำสมการ (2.14) คูณด้วยค่าคอนจูเกตของกระแสในโรเตอร์ แล้วนำเฉพาะค่าจำนวนจริงมาใช้ เราจะได้ค่ากำลังงานที่ข้ามช่องอากาศหรือที่เรียกว่า Air-gap Power (P_{ag})

$$P_{ag} = 3 \frac{R_r}{s} I_r^2 \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.13) และ (2.15) ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล (P_{em}) และค่าแรงบิดทางกล (T_{em}) สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{em} &= P_{ag} - P_r \\ &= 3I_r^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

และ

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} \quad (2.17)$$

และจากสมการ (2.13) (2.15) และ (2.17) จะได้

$$T_{em} = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.1 ค่ากระแส (I_s) ที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์เป็นผลรวมของกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) กับกระแสที่ไหลผ่านวงจรมูลโรเตอร์ (I_r) โดยจะมีค่าเท่ากับ

$$\bar{I}_s = \bar{I}_m + \bar{I}_r \quad (2.19)$$

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่สเตเตอร์และกระแสที่สเตเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ซึ่งเป็นตัวสร้างฟลักซ์แม่เหล็กจะล่าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ (E_{ag}) อยู่ 90 องศา โดยที่ค่ากระแสในโรเตอร์ (I_r) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าล่าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำอยู่เป็นมุมเท่ากับตัวประกอบกำลังของวงจรมอเตอร์ (Power Factor Angle of Rotor Circuit)

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi f L_r}{R_r / s} \right) \quad (2.20)$$

จากทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$T_{em} = K_1 \phi_{eg} I_r \sin \delta \quad (2.21)$$

เมื่อ K_1 คือ ค่าคงที่
 δ มีค่าเท่ากับ $90^\circ + \theta_r$

ซึ่งค่าของ δ ก็คือมุมแรงบิด (Torque Angle) หรือมุมระหว่างกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_m) ที่เป็นตัวสร้างฟลักซ์แม่เหล็กที่แอร์เก็บกับค่ากระแสที่โรเตอร์ ค่าของแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ \bar{V}_s สามารถหาได้จาก

$$\bar{V}_s = \bar{E}_{ag} + (R_s + j2\pi f L_s) \bar{I}_s \quad (2.22)$$

ในสภาวะความเป็นจริงมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ออกแบบโดยทั่วไป ค่าของความถี่สลิปจะมีค่าค่อนข้างน้อยซึ่งมีผลทำให้ค่า $2\pi f L_s \ll R_s$ ดังนั้นค่าของมุมตัวประกอบกำลัง θ จะมี

ค่าประมาณเท่ากับ 0 และมุมแรงบิด δ จะมีค่าเท่ากับ 90 องศา ดังนั้นในสมการ (2.21) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$T_{em} = K_1 \phi_{ag} I_r \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.8) และสมการ (2.12) จะได้ค่าประมาณของกระแสที่โรเตอร์เท่ากับ

$$I_r \approx K_2 \phi_{ag} s f \quad (2.24)$$

เมื่อ K_2 คือ ค่าคงที่
ดังนั้นค่าของแรงบิดจากสมการ (2.33) จะมีค่าเท่ากับ

$$T_{em} \approx K_3 \phi_{ag}^2 s f \quad (2.25)$$

เมื่อ K_3 คือ ค่าคงที่
จากการประมาณค่าทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า

$$I_s \approx \sqrt{I_m^2 + I_r^2} \quad (2.26)$$

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ปกติต่างๆ ไป จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ (2.22) มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_s &\approx 4.44 N_s \phi_{ag} f \\ V_s &\approx E_{ag} \end{aligned} \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) สามารถใช้การคำนวณหาค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโดยประมาณได้ ยกเว้นการทำงานที่ความถี่ต่ำ และค่าอัตราส่วนของกำลังสูญเสียในโรเตอร์ต่อกำลังกลที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับ

$$\%P_r = \frac{P_r}{P_{em}} = \frac{s}{1-s} \quad (2.28)$$

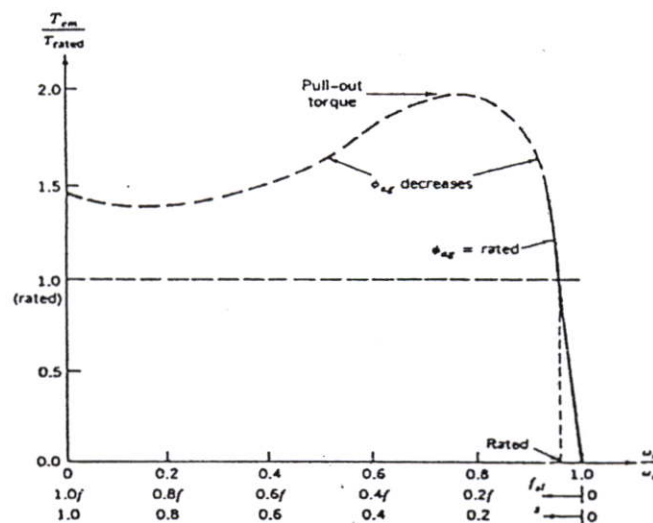
2.1.3 คุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดความถี่และที่พิกัดแรงดัน

ตัวอย่างของคุณลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้ความถี่และแรงดันที่ระบุไว้ในแผ่นป้ายมอเตอร์ (Name Plate) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 จะแสดงค่าของแรงบิดทางกล (T_{em}) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความเร็วรอบของโรเตอร์และค่าความถี่ที่โรเตอร์ ในรูปที่ 2.3 แสดงค่ากระแสที่โร

เตอร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็รรอบที่โรเตอร์และค่าความถี่ที่โรเตอร์ พิจารณาที่ค่าความถี่โรเตอร์ต่างๆ ค่าแรงบิดทางกลและค่ากระแสที่โรเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบเชิงเส้นตามค่าของความถี่โรเตอร์ ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจาก

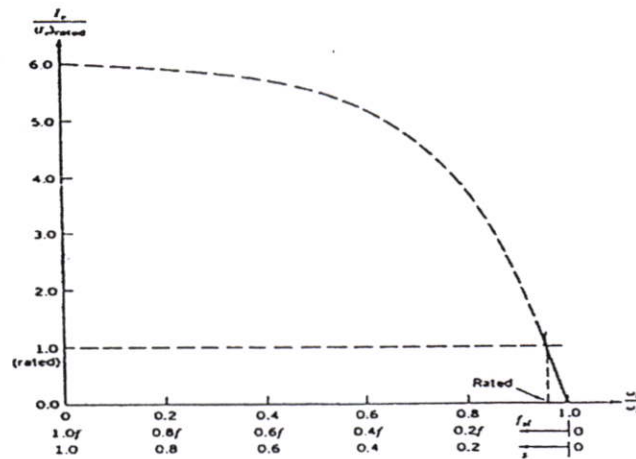
1. ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร โรเตอร์มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานที่โรเตอร์
2. ค่าความเหนี่ยวนำของวงจร โรเตอร์มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานที่โรเตอร์จึงทำให้มีค่าของมุมตัวประกอบกำลังของวงจร โรเตอร์ (ϕ_r) ดังนั้นค่าของมุมแรงบิด δ จึงไม่เท่ากับ 90 องศา

3. ค่ากระแสที่โรเตอร์มีค่ามาก จึงทำให้เราต้องพิจารณาค่าของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ที่สเตเตอร์อันเนื่องมาจากค่าของกระแสที่สเตเตอร์ตามสมการ (2.22) ดังนั้นค่าของฟลักซ์ที่แอร์เก็บซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่แอร์เก็บต่อค่าความถี่จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าของฟลักซ์ที่แอร์เก็บที่ได้จากแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่าย (V_s/f)

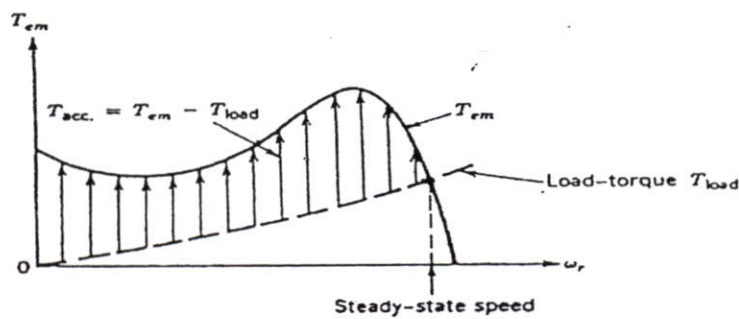


รูปที่ 2.2 กราฟคุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็วเมื่อค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสามข้อนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งส่งผลทำให้คุณสมบัติของแรงบิดและกระแสที่ความถี่โรเตอร์มีค่าต่างๆ มีลักษณะดังเส้นปะดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เราเรียกว่า "Pull-Out Torque" จากที่กล่าวมาทั้งหมดถ้าเราต้องการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเราจะต้องพยายามรักษาค่าของความถี่ที่โรเตอร์ให้มีค่าน้อยๆ เพื่อที่เราจะได้ไม่ต้องพิจารณาส่วนที่เป็นเส้นปะในรูปที่ 2.2 และ 2.3 แต่อย่างไรก็ตามถ้าเราเริ่มต้นเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยปราศจากการควบคุมทางด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ค่าขนาดของกระแสขณะเริ่มเดินจะมีค่าสูงถึง 6 - 8 เท่าของกระแสที่พิกัดดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงค่าของกระแสโรเตอร์เทียบกับความถี่ที่โรเตอร์เมื่อค่าแรงดันและค่าความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด



รูปที่ 2.4 การเริ่มเดินของมอเตอร์ โดยให้ค่าแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากับค่าที่พิกัด

ในรูปที่ 2.4 แสดงค่าของแรงบิดเพื่อการเร่ง (T_{acc}) ของมอเตอร์ โดยค่าที่แรงบิดนี้เป็นตัวช่วยในการเร่งความเร็วรอบของมอเตอร์ให้สูงขึ้นจากจุดหยุดนิ่ง และจากภาพยังแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วของโหลดด้วย โดยจุดตัดของคุณลักษณะของมอเตอร์และโหลดเป็นตัวบอกสถานะคงตัวของการทำงาน

2.1.4 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็ว

จากความสัมพันธ์ของการควบคุมมอเตอร์ ถ้าค่าความถี่โรเตอร์มีค่าน้อยๆ การรักษาค่าของฟลักซ์แม่เหล็กให้มีค่าคงที่จะทำให้ความสัมพันธ์ของแรงบิดของกลทางด้านเอาต์พุตและค่าความถี่โรเตอร์มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นตลอดทุกๆ ช่วงของความถี่

$$T_{em} \approx K_4 s f \quad (2.29)$$

เมื่อ K_4 คือ ค่าคงที่

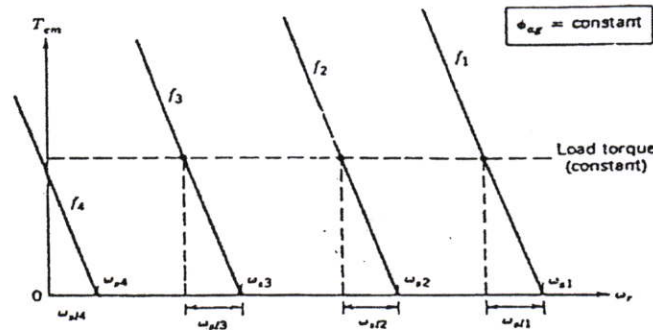
จากสมการ (2.29) จะเป็นการแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อค่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลงเรานิยมแสดงค่าของแรงบิดทางกลให้อยู่มรทอมของความเร็วสลลิป และจากสมการ (2.1) และ (2.9) จะได้

$$\omega_{slip} = \frac{f_{slip}}{f} \omega_s = \frac{4\pi}{P} f_{slip} \quad (2.30)$$

และจากสมการ (2.29) และ (2.30) จะได้

$$T_{em} \approx K_5 \omega_{slip} \quad (2.31)$$

เมื่อ K_5 คือ ค่าคงที่



รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ค่าสลลิปมีค่าต่ำ

คุณลักษณะในรูปที่ 2.5 ค่าความถี่ f จะถูกแทนด้วย f_1 ซึ่งก็คือค่าของความเร็วซิงโครนัส ω_{s1} นั้นเอง จากความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วจะเลื่อนไปตามแนวอนในลักษณะที่ขนานกันไป โดยจะมีการแสดงที่ค่าความถี่ต่างๆ จำนวน 4 ค่า ในการอธิบายกราฟในภาพที่ 2.5 ให้เราพิจารณาที่ค่าความถี่ f_1 และ f_2 ค่าความเร็วซิงโครนัส ω_{s1} และ ω_{s2} จะมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ f_1 และ f_2 โดยจะเห็นได้ว่าค่า ω_{slip1} จะมีค่าเท่ากับค่า ω_{slip2} ถ้าแรงบิดของโหลดที่ความถี่ทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นจากระนาบของแรงบิด-ความเร็วของรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าที่แรงบิดเท่ากัน ค่าความเร็วสลลิป

ที่ใช้ก็จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งทำให้คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่ความถี่ต่างๆ มีลักษณะเหมือนกัน และมีการขนานกันไปตามแนวนอน ถ้าค่าแรงบิดของโหลดคงที่ก็จะทำให้ค่าความถี่สลิบมีค่าคงที่ด้วยเช่นกัน แต่จากสมการ (2.9) ค่าของสลิบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่มีค่าลดลง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์กำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพื่อทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลง ซึ่งการอธิบายหลักการนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อของการควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์ต่อไป

2.2 การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์

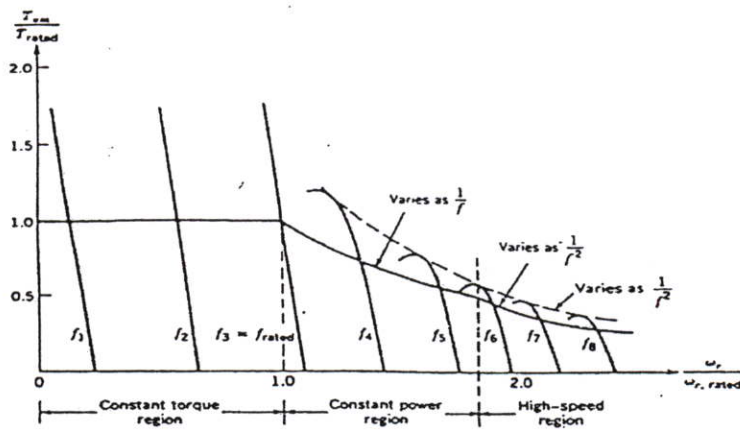
การควบคุมสมรรถนะของมอเตอร์โดยให้มอเตอร์สามารถที่จะทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดหรือสูงกว่าพิกัดได้โดยการควบคุมแรงดันและความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งวิธีการควบคุมดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนเพื่อที่จะให้ได้แรงดันและความถี่ทางด้านเอาต์พุตเป็นไปตามที่ต้องการของหลักการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยจะทำให้สมรรถนะของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ทั้งการทำงานที่ความเร็วต่ำและที่สูงกว่าพิกัด สมรรถนะนี้เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่แข็งแรงจึงทำให้มันสามารถปฏิบัติงานที่ความเร็วสูงเป็น 2 เท่าของความเร็วที่พิกัดได้โดยไม่มีปัญหาทางกลเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแรงบิดและกำลังงานซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาให้ละเอียดและชัดเจน กราฟคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6 (ก) และในรูปที่ 2.6 (ข) จะแสดงค่าของของแรงดัน ความถี่ กระแสและแรงบิดซึ่งจะถูกพล็อตให้เป็นฟังก์ชันของความเร็วโรเตอร์ ส่วนในรูปที่ 2.6 (ค) จะเป็นแสดงการพล็อตค่าความถี่ที่โรเตอร์กับค่าของสลิบ และจากรูปที่ 2.6 สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วงดังนี้

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

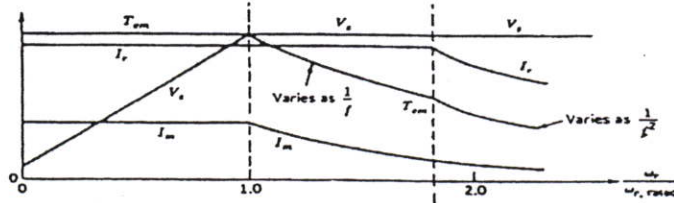
2.2.1 ช่วงการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัด (ค่าแรงบิดมีค่าคงที่)

ในช่วงที่ความเร็วของมอเตอร์ต่ำกว่าพิกัดในรูปที่ 2.6 (ก) จะแสดงถึงคุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วมอเตอร์ที่ค่าความถี่ที่โรเตอร์ต่ำๆ และค่าฟลักซ์ในแอร์เก็บที่มีค่าคงที่โดยการควบคุมค่าแรงดันต่อความถี่ ในรูปที่ 2.6 (ข) จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันที่สเตเตอร์จะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความถี่ โดยเริ่มจากค่าที่พิกัดของมอเตอร์และลดลงมาจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ อยู่ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เพราะที่ค่าความถี่ต่ำๆ ค่าของกระแสแมกนีโตซิงค์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขดลวดแมกนีโตซิงค์ที่ใช้สนามแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว เนื่องจากค่าความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับขดลวดแมกนีโตซิงค์ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทานของสเตเตอร์ ในกรณีที่ใช้การควบคุมค่าแรงดันต่อ

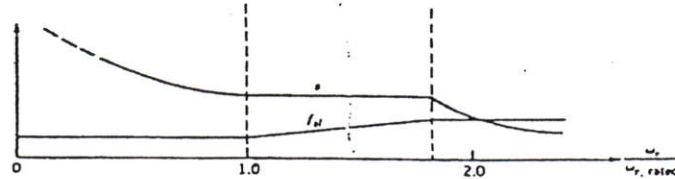
ความถี่นั้นหากค่าฟลักซ์ในแอร์เก็บถูกรักษาให้คงที่แล้วมอเตอร์ก็สามารถให้แรงบิดที่พิกัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยค่าของกระแสที่ใช้งานจะเป็นค่าที่พิกัด และค่าความถี่ที่โรเตอร์มีค่าคงที่ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งในช่วงการทำงานนี้จะเรียกว่า ช่วงแรงบิดคงที่ (Constant Torque Region) ในช่วงนี้ค่าของความถี่ที่โรเตอร์จะถูกรักษาให้คงที่เท่ากับค่าซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่มอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 (ค) และช่วงที่แรงบิดคงที่เท่ากับที่พิกัดนั้นค่ากำลังงานสูญเสียในโรเตอร์ก็จะมีค่าคงที่ด้วย นั่นหมายถึงค่าของกระแสโรเตอร์ก็มีค่าคงที่เช่นกัน อย่างไรก็ตามการทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าพิกัดนั้นจะเกิดปัญหาในเรื่องของการระบายความร้อนขึ้นซึ่งเป็นการระบายความร้อนที่เกิดจากกำลังงานสูญเสียที่โรเตอร์ หากมีปัญหานี้ในเรื่องของความถี่ที่ไม่สามารถระบายได้ทัน (มอเตอร์ที่มีลักษณะระบายความร้อนผ่าน โครงอย่างเดียว) อาจทำให้แรงบิดที่ได้มีการลดลง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.6 คุณลักษณะและสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.2.2 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด (ค่ากำลังงานคงที่)

การเพิ่มความถี่ของสเตเตอร์ให้สูงกว่าที่พิกัดนั้น จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงกว่าความเร็วพิกัดได้ ในงานที่มีการปรับความเร็วของมอเตอร์จะต้องไม่เกินกว่าค่าพิกัดของตัวมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงต้องรักษาค่าของแรงดันให้มีค่าคงที่เท่ากับพิกัดที่แหล่งจ่าย โดยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่จะมีค่าลดลง ซึ่งมีผลต่อการลดลงของค่าฟลักซ์ในแอร์ แก๊ปด้วย โดยจะเห็นได้ว่า ณ การทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัดแล้วเส้นโค้งแรงบิด-ความเร็วจะมีความชันแปรตามค่า $1/f$ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และที่ขีดจำกัดของมอเตอร์ในช่วงนี้ค่าของกระแสที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าที่พิกัดเหมือนกับในช่วงที่แรงบิดคงที่ แต่ในช่วงนี้ค่าของสลิปจะมีค่าคงที่ ส่วนค่าของความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่ามากขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าแปรผันกับความถี่ดังที่แสดงในสมการ (2.32)

$$T_{em,max} = \frac{f_{rated}}{f} T_{rated} \quad (2.32)$$

$$P_{em,max} = \omega_r T_{em,max} \quad (2.33)$$

ในสมการ (2.33) จะแสดงถึงค่าคงที่ที่ค่าพิกัดโดยจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบจะแปรตามความถี่ ดังนั้นในช่วงนี้เราจึงเรียกว่าช่วงกำลังงานคงที่ (Constant Power Region) ในทางปฏิบัติแล้วมอเตอร์สามารถจ่ายกำลังสูงกว่าพิกัดโดยไม่เกิดอะไรขึ้นเนื่องจาก

1. ค่าของกระแสแมกนีไทซิ่งลดลงเป็นผลทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง ดังนั้นค่ากระแสในขดลวดสเตเตอร์จึงมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่พิกัดจึงทำให้กระแสในโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นได้ ดังนั้นแรงบิดและกำลังก็สูงขึ้นได้
2. เมื่อค่ากระแสแมกนีไทซิ่งลดลงค่าสูญเสียในแกนเหล็กก็จะมีค่าลดลงในขณะเดียวกันการระบายความร้อนก็จะดีเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วสูงกว่าพิกัด

2.2.3 ช่วงการทำงานที่ความเร็วสูงมาก (ค่าความถี่ที่โรเตอร์คงที่)

เมื่อเราให้ค่าของแรงดันทางด้านอินพุตมีค่าเท่ากับที่พิกัด ค่าของความเร็วที่เพิ่มขึ้น 1.5 ถึง 2 เท่าของพิกัด (ขึ้นอยู่กับกรอกแบบมอเตอร์) จะทำให้ค่าของฟลักซ์ในแอร์ แก๊ปมีค่าลดลงมาก ซึ่งมอเตอร์จะมีค่าเข้าใกล้ Pull-Out Torque ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และที่ความเร็วสูงกว่าที่พิกัดมอเตอร์จะจ่ายแรงบิดได้ไม่ถึงค่าพิกัด ในขณะที่ค่าความถี่ที่โรเตอร์จะมีค่าคงที่ส่งผลทำให้สมรรถนะของแรงบิดลดลงเป็นอัตราส่วน $1/f^2$ ซึ่งทั้งแรงบิดและกระแสมอเตอร์จะลดลงในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) การรักษาค่าของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้คงที่

นั่น ค่าของแรงบิดของมอเตอร์ในช่วงนี้จะไม่ได้ถูกจำกัดโดยกระแสที่มอเตอร์ได้รับ ดังนั้น กระแสที่ขีดจำกัดจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสที่พิกัดและจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

จากเทคนิคการควบคุมด้วยการเปลี่ยนแรงดันและความถี่เป็นวิธีที่สะดวกในแง่ของการปฏิบัติ โดยสามารถเร่งความเร็วจากศูนย์ถึงความเร็วที่ต้องการ โดยให้มีทอร์คสูงสุดได้ และสามารถควบคุมให้มีการทำงานที่เร็วกว่าที่พิกัดหรือต่ำกว่าที่พิกัดได้ นอกจากนี้ในตอนที่ต้องการหยุดการทำงานของอินดักชันมอเตอร์อาจจะควบคุมให้สลิมมีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงทำให้อินดักชันมอเตอร์ทำงานเป็นอินดักชันเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นกำลังงานไฟฟ้าเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการสลายพลังงานหรือคืนพลังงานกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟได้

2.3 ชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

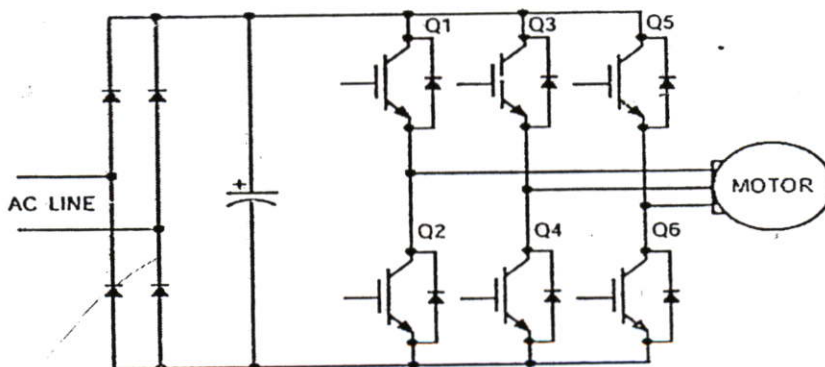
ชนิดของการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกประเภทได้ 2 ประเภทใหญ่ คือ

- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI)
- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะให้คุณสมบัติและลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

2.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI)

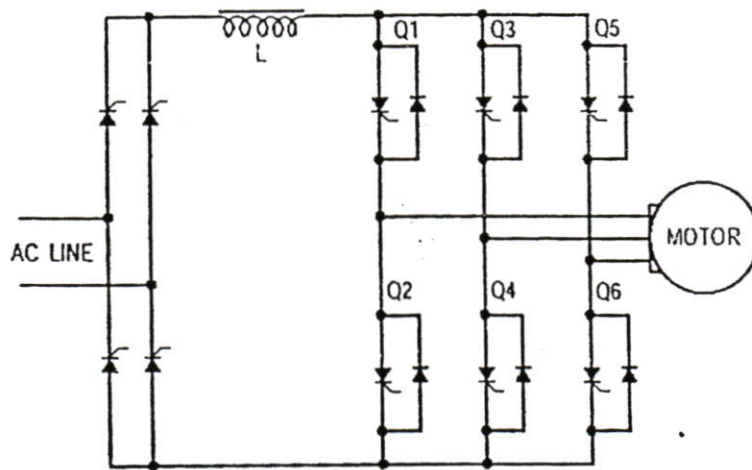
โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุฟิลาเตอร์ที่มีค่ามากอยู่ระหว่างดีซีลิงค์ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันทางด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ส่งผลให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด ซึ่งข้อดีของการอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันคือสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย สามารถใช้กับมอเตอร์หลายๆ ตัวที่ทำงานพร้อมกันได้



รูปที่ 2.7 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน

2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI)

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแสจะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำที่มีค่ามากอยู่ระหว่างคิซึลิ่งค์ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสทางด้านอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในส่วนของวงจรแปลงเป็นไฟตรงจะใช้การควบคุมเฟสของเอซีไลน์โดยใช้ไทรริสเตอร์ในการทำงานหรือบางกรณีอาจใช้ดีซีชอปเปอร์ในการควบคุมการทำงานได้เช่นกันและในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์จะใช้ไทรริสเตอร์ในการควบคุมกระแสที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยลักษณะของแรงดันทางด้านเอาต์พุตจะมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่วนรูปร่างของกระแสที่จ่ายให้กับทางด้านเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม การควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแสมีข้อดีคือวงจรที่ได้มีกำลังขนาดใหญ่และมีค่าเสถียรภาพสูงและส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งของการควบคุมแบบจ่ายกระแสคือ ช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์สามารถปรับได้ค่อนข้างต่ำนอกจากนี้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ในคิซึลิ่งค์จะมีขนาดใหญ่จึงทำให้อินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีน้ำหนักมากและมีราคาแพง ส่วนเรื่องของการควบคุม นั้น การตอบสนองในการทำงานค่อนข้างช้าและมีปัญหาของความเสถียรภาพที่ภาวะโหลดต่ำและสถานะความเร็วรอบในการใช้งานสูง การควบคุมแบบนี้เหมาะกับมอเตอร์ที่มีพิทักปานกลางจนถึงขนาดพิทักกำลังสูง

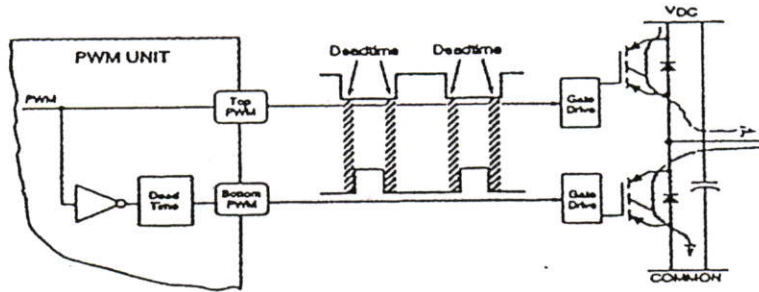


รูปที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส

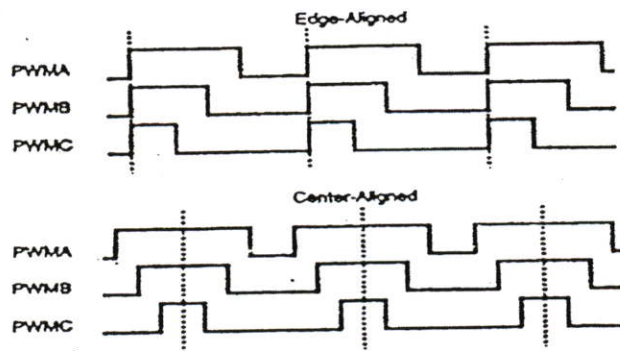
2.4 รูปแบบของการมอดูเลต

รูปแบบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ที่อยู่ในรูปของซอฟต์แวร์หรือการเขียนโปรแกรมนั้นจะต้องมีการกำหนดค่า (ขนาด) ของรูปคลื่น (Wave forms) ที่ต้องการสร้าง ความถี่ และขนาดของรูปคลื่นที่จะสร้างนั้นจะต้องสามารถควบคุมได้ ซึ่งรูปแบบของการควบคุมความถี่ และแรงดันในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะเทคนิคการสร้างพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM) ซึ่งเทคนิคนี้เป็น

เทคนิคที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันที่นำมาใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์อย่างแพร่หลาย โดยที่สัญญาณขับนำที่สร้างนี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังที่ใช้ในวงจรกำลัง ซึ่งการทำงานของสวิตช์ในหนึ่งกิ่งจะมีสวิตช์ 2 ตัว คือตัวบนและตัวล่าง สวิตช์ทั้งสองนี้จะต้องทำงานไม่พอกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะสังเกตได้ว่าการทำงานของสวิตช์ทั้งสองจะมีการทำงานที่กลับกันอยู่ โดยที่มีช่วงประวิงเวลา (dead time) ซึ่งค่าช่วงประวิงเวลานี้จะทำให้สวิตช์ทั้งสองตัวไม่สามารถทำงานที่เวลาเดียวกันได้



รูปที่ 2.9 สัญญาณขับนำสวิตช์กำลังที่มีช่วงประวิงเวลา (dead time)



รูปที่ 2.10 สัญญาณพัลส์พีดับบีวเอ็มแบบขอบขาเดียวและขอบขาคู่ที่ได้จากตัวประมวลผล

ในการเขียนโปรแกรมการควบคุมสัญญาณพัลส์พีดับบีวเอ็มในไมโครคอนโทรลเลอร์ (μc) หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) จำเป็นต้องมีการอัปเดตข้อมูลที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นตลอดเวลา ซึ่งการอัปเดตจะส่งผลทำให้ค่าการมอดดูเลทและตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้คือพัลส์พีดับบีวเอ็มจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเทคนิคที่นิยมนำมาใช้งานได้แก่เทคนิค SPWM ซึ่งเป็นเทคนิคพื้นฐานในการสร้างอย่างง่ายและได้มีการพัฒนาไปสู่เทคนิคการมอดดูเลทแบบอื่นๆ อีกได้แก่ Third Harmonic PWM, 60° PWM และ Space Vector เป็นต้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในวงการอินเวอร์เตอร์ไครฟ์เพราะสามารถสร้างแรงดันพื้นดามเมนทอลทางด้านเอาท์พุตได้สูงโดยไม่เกิดสภาวะโอเวอร์มอดดูเลท [31] ซึ่งเทคนิคทั้งหมดที่กล่าวถึงในที่นี้ในเรื่องของการเขียนโปรแกรมจะต้องอาศัยการคำนวณที่แตกต่างกันและรูปแบบ

การทำงานที่แตกต่างกันเทคนิคการสร้างพัลส์วิตม็อดคูเลชันที่พบเห็นบ่อยจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณควบคุมกับสัญญาณพาหะในการกำเนิดพัลส์ที่ดับบิวเอ็ม ดังนั้นในการสร้างพัลส์ที่ดับบิวเอ็มจำเป็นต้องอาศัยคลื่นพาหะ (สัญญาณสามเหลี่ยม) เพื่อกำหนดความถี่สวิตซึ่งที่ใช้งาน ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีในจุดนี้ได้มีการพัฒนาให้มีการบรรจุอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์หรือตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว [32] ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพาหะภายในตัวประมวลผลโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุม เช่น สัญญาณควบคุมแบบคลื่นไซน์ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการสร้างที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่

- เทคนิค Sinusoidal (SPWM)
- เทคนิค Third Harmonic PWM
- เทคนิค 60° PWM
- เทคนิค Space Vector PWM
- เทคนิคการควบคุมแบบ 6 สเตป
- เทคนิค Adaptive Current Control

2.4.1 เทคนิค SPWM

เทคนิคนี้จะใช้หลักการ โดยนำรูปคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมรูปไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานที่ต้องการมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับ ความถี่การสวิตช์ที่ออกแบบไว้ค่าแอมพลิจูดของคลื่นอินเด็กซ์จะหมายถึง ค่าอัตราส่วนของ ขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นซายน์อ้างอิง เทียบกับขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่น สามเหลี่ยมซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงได้ดังนี้[29]

$$v_{control,a=m_a} \sin(\omega t) \quad \text{เมื่อ} \quad 0 \leq \omega t \leq 2\pi \quad (2.35)$$

โดยที่ $m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}}$

เมื่อ $\hat{V}_{control}$ คือ ค่าขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงและ
 \hat{V}_{tri} คือ ค่าขนาดของแอมพลิจูดของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม

สำหรับการสร้างสัญญาณควบคุมในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส นั้น จะใช้สัญญาณ สามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง 3 สัญญาณ โดยแต่ละสัญญาณจะต่างเฟสกัน 120 องศา ซึ่งจะได้สัญญาณควบคุม 6 สัญญาณที่ใช้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนของอุปกรณ์สวิตช์ ค่า อัตราส่วนระหว่างความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณอ้างอิงจะนิยามไว้ด้วยค่า m_f โดย กำหนดให้

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{control}} \quad (2.36)$$

เมื่อ $f_{control}$ คือ ค่าความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงและ
 f_{tri} คือ ของรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม

ในการออกแบบโดยเลือกค่า m_f โดยแสดงไว้ใน [29] ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ในกรณีที่ออกแบบค่า $m_f (m_f \leq 21)$ ต่างๆ จะต้องเลือกค่า m_f เป็นเลขคี่เพื่อไม่ให้เกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับคู่ขึ้น
2. กรณีค่า $m_f (m_f > 21)$ สูง ผลของการเลือกใช้ชิงโครโนสพีดับเบิลยูเอ็มจะมีน้อย จึงอาจใช้การสวิตช์แบบไม่ชิงโครโนสพีดับเบิลยูเอ็มได้

ในการพิจารณาสัญญาณเอาต์พุตแรงดันที่เกิดจากรูปคลื่นนี้สามารถพิจารณาได้ 2 ข่านคือ

1. ข่านลิเนียร์มอดูเลชั่น ($m_o \leq 1$) เป็นข่านที่แรงดันเอาต์พุตแปรผันตามเชิงเส้นกับค่าแอมพลิจูดมอดูเลชั่นอินเด็กซ์ โดยค่าแรงดันไลน์-ทู-ไลน์ เอาต์พุตมีค่าประมาณดังสมการต่อไปนี่[29]

$$V_{LL,rms} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} m_a V_d \quad (2.37)$$

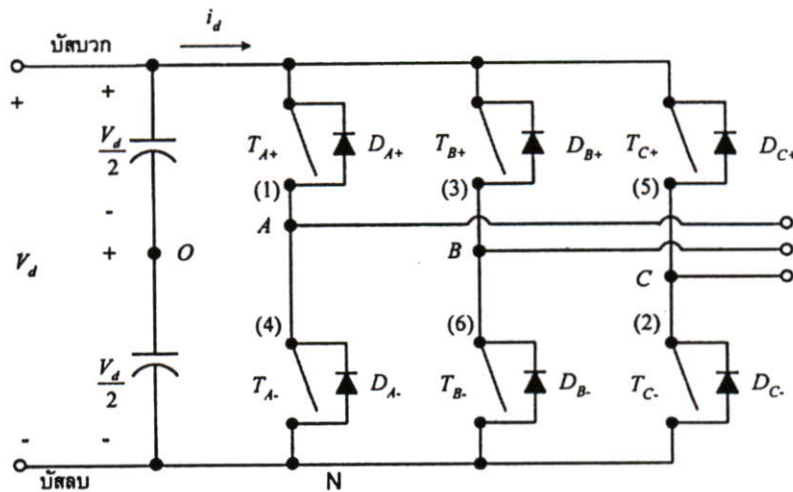
เมื่อค่า V_d เป็นค่าระดับแรงดันคิกซีลิ่ง

จากสมการที่ (2.37) สามารถเขียนได้เป็นค่าประมาณได้ดังสมการต่อไปนี้

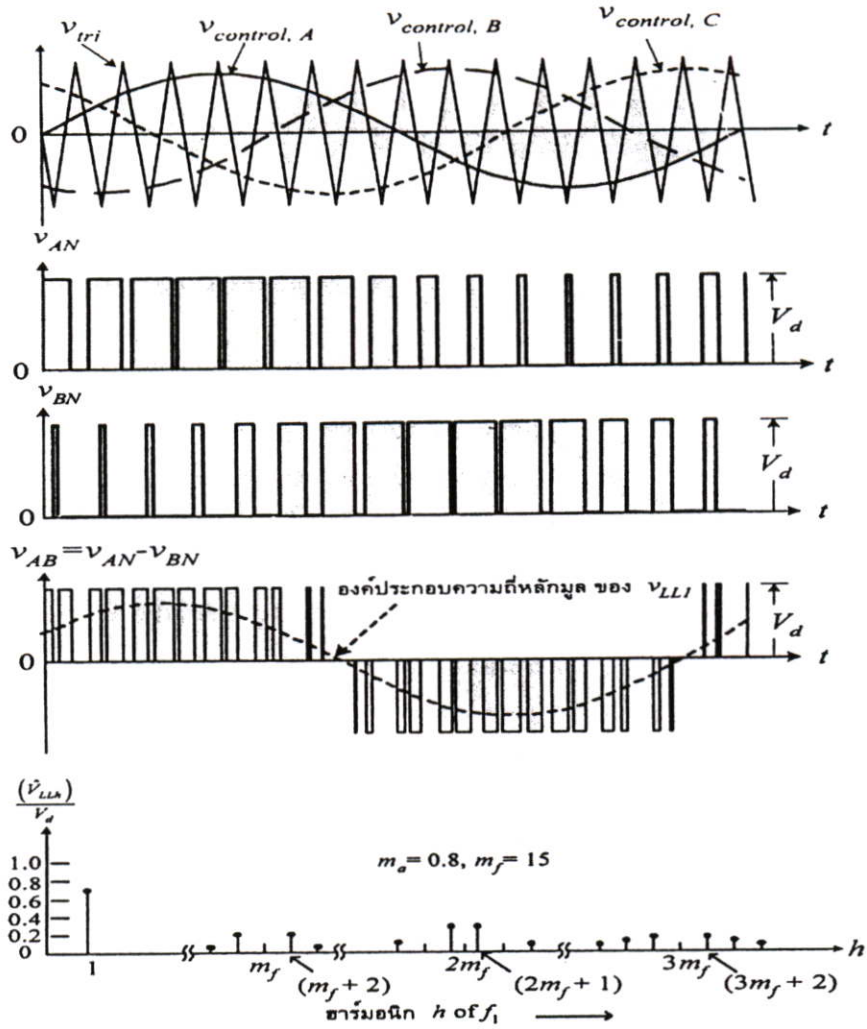
$$V_{LL,rms} \approx 0.612 m_a V_d \quad (2.38)$$

2. ย่านโอเวอร์มอดูเลชัน ($m_a > 1$) เป็นย่านที่แรงดันเอาต์พุตไม่แปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับค่าแอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์ซึ่งโดยมากมักไม่มีการนำย่านนี้ไปใช้งาน

ซึ่งตัวอย่างของลักษณะการสวิตช์แบบชานน์พีดับเบิลยูเอ็มแสดงไว้ดังรูปที่ 2.12 ข้อดีของการสวิตช์แบบนี้คือ สามารถลดขนาดของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำได้ ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นลดน้อยลง แต่มีข้อเสียคือ ให้ค่าองค์ประกอบแรงดันเอาต์พุตของความถี่มูลฐานน้อยลง



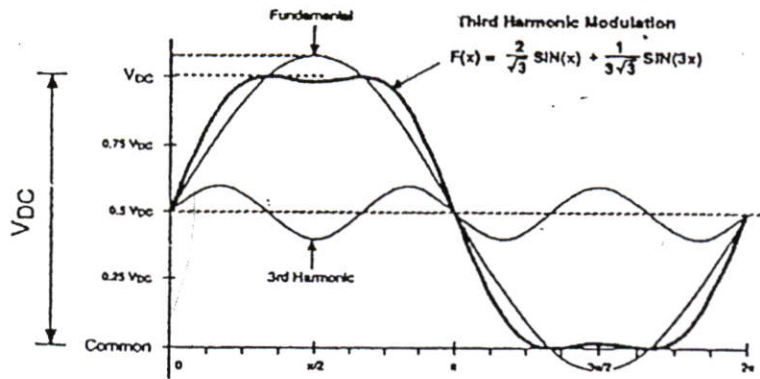
รูปที่ 2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส



รูปที่ 2.12 รูปคลื่นและฮาร์มอนิกสเปกตรัมของอินเวอร์เตอร์สามเฟส

2.4.2 เทคนิค Third Harmonic PWM

เนื่องจากเทคนิคแบบ SPWM สามารถให้ค่าแรงดันองค์ประกอบมูลฐานไลน์-ไลน์ทางด้านเอทท์พุทได้เพียง 0.866 เท่าของแรงดันทางด้านดิซี ซึ่งเป็นข้อเสียของการควบคุมแบบ SPWM ในการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้จึงได้ทีเทคนิคการเพิ่มค่าของฮาร์โมนิกที่ 3 เข้าไปร่วมกับค่าขององค์ประกอบมูลฐานเพื่อขยายย่านเชิงเส้นของการมอดูเลตให้มีค่าสูงขึ้น [31] ส่งผลทำให้ค่าแรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอทท์พุทมีค่าสูงขึ้นโดยไม่เกิดการโอเวอร์มอดูเลตดังแสดง

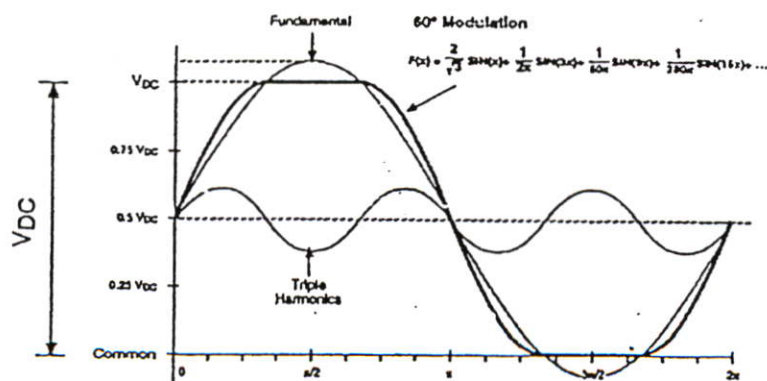


รูปที่ 2.13 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค Third Harmonic PWM

ในรูปที่ 2.13 ซึ่งการทำงานในรูปแบบเชิงดิจิทัลของเทคนิคนี้จะทำเหมือนกับแบบ SPWM คืออาศัยการเปรียบเทียบของรูปคลื่นอ้างอิงกับคลื่นพาหะในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์กำลัง หากจะแตกต่างกันในเรื่องของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมเท่านั้นเอง

2.4.3 เทคนิค 60° PWM

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้แก้ไขข้อเสียของเทคนิค SPWM เนื่องจากเทคนิคแบบ SPWM ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์จะมีค่าสูง ทำให้แรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำ โดยเทคนิคนี้จะเป็นการเพิ่มแรงดันองค์ประกอบมูลฐานทางด้านเอาต์พุตให้มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับเทคนิค Third Harmonic PWM แต่ข้อดีที่เห็นได้ชัดคือ เทคนิคนี้จะช่วยลดความสูญเสียที่เกิดจากสวิตช์ (Switching Loss) เนื่องจากการทำงานของสวิตช์จะมีการทำงาน (เปิด-ปิด) น้อยกว่าเทคนิคที่กล่าวมาแล้ว [33]



รูปที่ 2.14 รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการควบคุมโดยใช้เทคนิค 60° PWM

2.4.4 เทคนิค Space Vector PWM

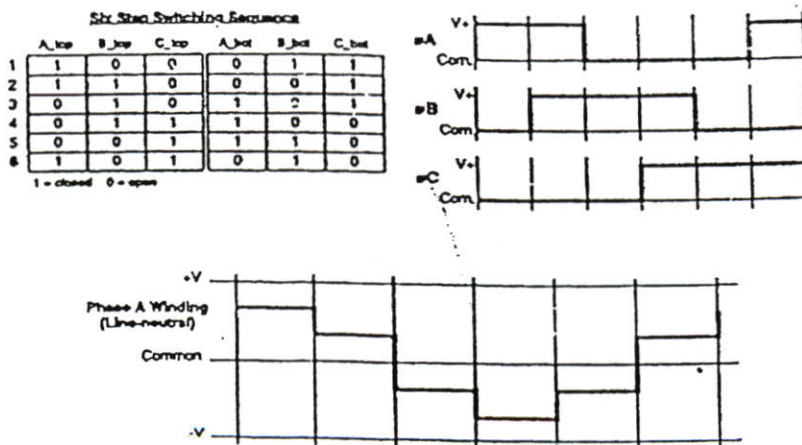
เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยเทคนิคนี้จะแบ่งการทำงานของสวิตช์กำลังออกเป็น 8 จังหวะ 6 เซกเตอร์ ดังรูปที่ 2.16 โดยที่สถานะของสวิตช์จะแทนด้วยเวกเตอร์แรงดัน เช่น $V_1 - V_6$ ซึ่งเทคนิคนี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการนำรูปคลื่น

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T \cdot m \cdot \sin(60 - \Delta\theta) \\
 T_2 &= T \cdot m \cdot \sin(\Delta\theta) \\
 T_0 &= T - T_1 - T_2
 \end{aligned}
 \tag{2.39}$$

- เมื่อ T คือ คาบเวลาที่สวิตช์ทำงาน
- m คือ ค่ามอดดูเลชันอินเด็ก
- $\Delta\theta$ คือ ค่ามุมระหว่างเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงกับเวกเตอร์แรงดัน ($V_1 - V_6$)
- V_N คือ เวกเตอร์แรงดันใดๆ (เมื่อ N เท่ากับ 1 ถึง 6)
- V_{null} คือ เวกเตอร์แรงดันศูนย์

2.4.5 เทคนิคการควบคุมแบบ 6 สเตป

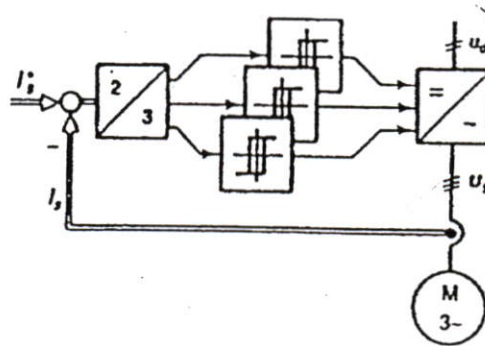
ในการควบคุมการทำงานแบบ 6 สเตป จะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เกิดการโอเวอร์มอดดูเลชันซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุมขนาดของแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ โดยที่รูปคลื่นของแรงดันไลน์เอาต์พุตที่ได้จะมีรูปร่างเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมหรือกึ่งสแควร์ ส่วนแรงดันเฟสจะมีรูปร่างรูปคลื่นเป็น 6 สเตป ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.15 โดยทั่วไปแล้วมักจะไม่นำยานนี้ไปใช้งาน เนื่องจากจะมีผลของฮาร์โมนิกอันดับต่ำเข้ามาร่วม [31]



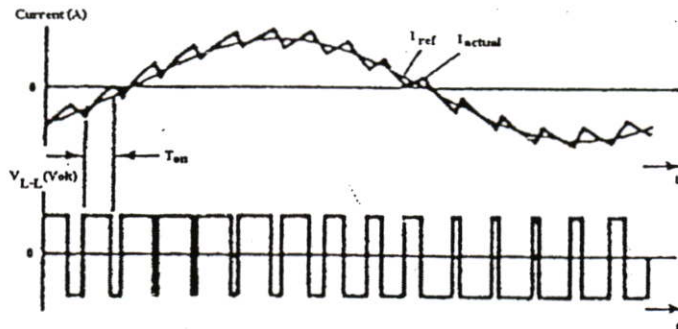
รูปที่ 2.15 แพรเทินร์การทำงานของสวิตช์และแรงดันเฟสไลน์ทางด้านเอาต์พุตจากการควบคุมแบบ 6 สเตป

2.4.6 เทคนิค Adaptive Current Control

ในการวิเคราะห์ลักษณะของรูปคลื่นทางแรงดันเอาต์พุตของแหล่งจ่ายแบบแรงดันโดยส่วนใหญ่จะเป็นการสมมติให้แรงดันทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าในอุดมคติซึ่งจะมีค่าคงที่โดยไม่เกิดริบเปิ้ลแต่ในทางปฏิบัติค่าของริบเปิ้ล อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าของคาปาซิเตอร์ฟิลเตอร์มีค่าไม่มากพอ ดังนั้นเทคนิคที่สามารถควบคุมกระแสโดยใช้ขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิสหรือมีการปรับตัวเองโดยอัตโนมัติก็จะแก้ปัญหาของการเกิดริบเปิ้ล ในส่วนของดิจิตอลก็ได้ ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้การควบคุมกระแส ดังแสดงวงจรควบคุมการทำงานในรูปที่ 2.16 และในรูปที่ 2.17 แสดงสัญญาณกระแสไซน์อ้างอิงซึ่งมีขนาดและความถี่ตามต้องการแล้วนำมาเปรียบเทียบกับกระแสเฟสจริงที่ได้จากการตรวจวัดโดยหม้อแปลงกระแส (CT), Hall Sensor หรือ LEM เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังต่อไป



รูปที่ 2.16 บล็อกแสดงการควบคุมการทำงานโดยเทคนิค Adaptive Current Control PWM



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นกระแสและแรงดันโดยใช้เทคนิค Adaptive Current Control PWM

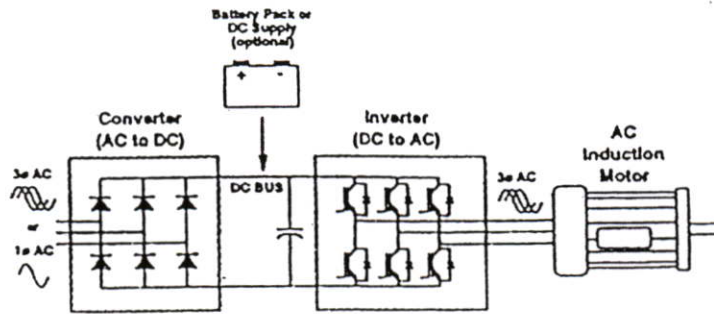
จากรูปที่ 2.17 เมื่อกระแสมีค่าเกินค่าขอบเขตของฮิสเตอร์รีซิสที่กำหนดไว้ สวิตช์ตัวบนในกิ่งของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะทำการหยุดนำกระแส ในขณะที่สวิตช์ตัวล่างในกิ่งของวงจรบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะนำกระแสแทนเป็นผลทำให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตที่จะนำไปใช้ในการควบคุมสวิตช์เปลี่ยนจากบวกไปเป็นลบ และเมื่อกระแสเริ่มลดลงจนกระทั่งกระแสลดลงมาถึงขอบเขต

ของฮีสเตอร์รีซิสทางด้านล่างก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนการทำงานของสวิตช์อีกครั้งหนึ่งและจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดการควบคุมการทำงาน รูปคลื่นของกระแสจริงจะถูกบังคับให้ติดตามสัญญาณไซน์อ้างอิงโดยให้อยู่ในขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสที่ต้องการ โดยสลับสวิตซ์การทำงานไปมา ดังนั้นกระแสรีปเปิ้ลจึงถูกควบคุมให้ปรับตัวอยู่ในขอบเขตของฮีสเตอร์รีซิสตามค่าของแรงดันที่มีการกระเพื่อม จึงทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสรีปเปิ้ล และค่าพีค-ทูปิกของกระแสรีปเปิ้ล มีความสัมพันธ์กัน อันจะเป็นการทำให้ลดอุณหภูมิของมอเตอร์ขณะใช้งานลงอีกด้วย [34] นอกจากนี้เทคนิค Adaptive Current Control ที่ใช้หลักการของฮีสเตอร์รีซิสแบนด์แล้ว ยังมีเทคนิคแบบฟิกแบนด์ (Fixed Band) และเทคนิคแบบไซน์ซอซoidalแบนด์ (Sinusoidal Band) ซึ่งแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับการใช้งานที่ต้องการความแตกต่างกันออกไป [35]

2.5 รูปแบบของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยพื้นฐานสามารถทำได้โดยการปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์หรือปรับขนาดของแรงดันหรือกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งการทำงานสามารถทำได้โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ – อินเวอร์เตอร์ในการสร้างคั้งแสดงในรูปที่ 2.18 วงจรคอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ในการแปลงไฟจากไฟฟ้ากระแสสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์ก็จะทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสามารถปรับเปลี่ยนความถี่และขนาดของแอมป์จูดที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดและความถี่ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะมีวิธีการควบคุมการทำงานด้วยกันอยู่หลายแบบ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงรูปแบบที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรมได้รฟ์ ซึ่งได้แก่

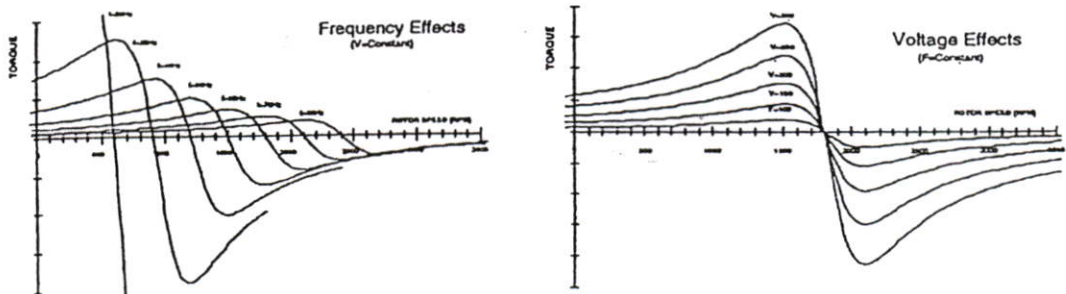
- การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่คงที่ แบบวงรอบเปิด (Open Loop V/F)
- การควบคุมแรงดันต่อความถี่คงที่ ชนิดตรวจจับกระแส (V/F with DC current sensing)
- การควบคุมแรงดันต่อความถี่คงที่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)
- การควบคุมแบบสลีปออปติไมซ์เซชัน (Slip Optimization)
- การควบคุมความถี่สลีป (Slip frequency control)
- การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)
- การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)



รูปที่ 2.18 วงจรคอนเวอร์เตอร์ – อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

2.5.1 การควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่

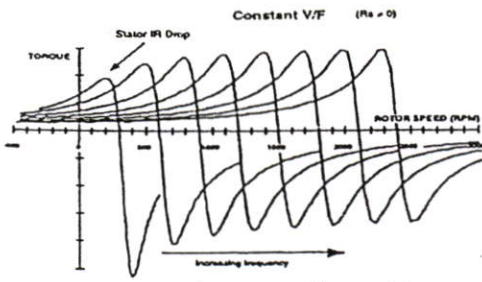
ก่อนจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมการทำงานแบบแรงดันต่อความถี่ เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจะขอกล่าวถึงหลักการการควบคุมแรงบิดให้มีค่าคงที่ตลอดย่านการควบคุมอีกครั้ง โดยละเอียดต่างๆ ดังที่เคยได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ในเรื่องของ การควบคุมแรงบิดให้มีค่าคงที่ตลอดย่านการควบคุม หากการควบคุมที่ได้มานั้นมีการปรับเปลี่ยนเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งจะทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้มีขนาดไม่คงที่ โดยในที่นี้จะสมมติให้มอเตอร์มีค่าความเร็วพิกัดเท่ากับ 1800 รอบต่อนาที และมีค่าความถี่พิกัดเท่ากับ 60 เฮิรตซ์



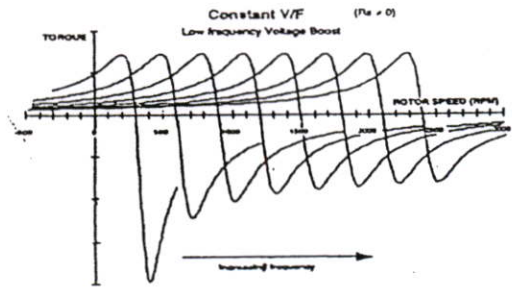
(ก) แรงดันคงที่อาศัยการปรับความถี่

(ข) ความถี่คงที่อาศัยการปรับแรงดัน

รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด



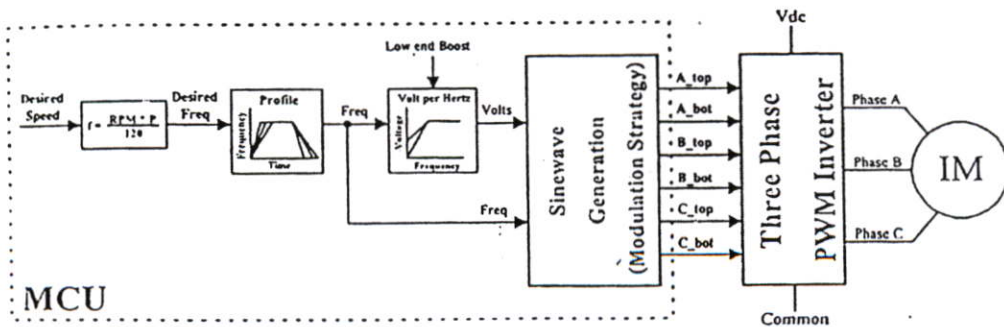
(ก) แรงบิดที่มีค่าลดลงที่ความถี่ต่ำ



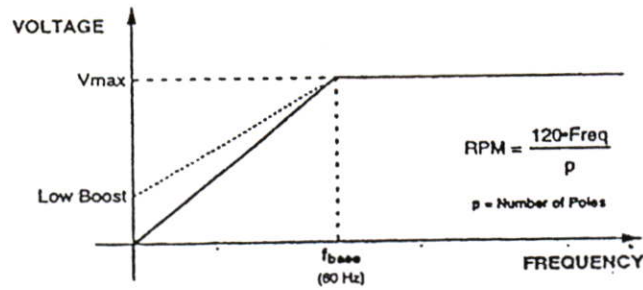
(ข) ชดเชย โดยการเพิ่มแรงดันบุด

รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนึงถึงผลของค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.19 (ก) จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้ค่าของแรงดันมีค่าคงที่แล้วอาศัยการปรับความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์แล้วค่าของแรงบิดที่ได้จะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนกับค่าความถี่ ส่วนในรูปที่ 2.19 (ข) แสดงถึงการปรับเปลี่ยนแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยคงที่ค่าความถี่ จะสังเกตได้ว่าค่าของแรงบิดที่ได้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าของแรงดัน การควบคุมมอเตอร์ในทางอุดมคติแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันต่อความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดที่มีค่าที่พิกัดนั้นจะต้องมีค่าเป็นสัดส่วนกัน แต่ในความเป็นจริง โครงสร้างของมอเตอร์จะประกอบไปด้วยขดลวดทางด้านสเตเตอร์ซึ่งมีค่าความต้านทานจำนวนหนึ่ง หากต้องการควบคุมให้มีการทำงานที่ความถี่ต่ำจะทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้มีการลดลงไปเนื่องมาจากค่าของแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดังนั้นในการทำงานจริงจะต้องมีการเพิ่มแรงดันบุดในช่วงความถี่ต่ำเพื่อช่วยชดเชยในส่วนของค่าแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานสเตเตอร์ของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกรณีคำนึงถึงผลของค่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ ในรูปที่ 2.20 (ก) แสดงค่าแรงบิดที่มีค่าลดลงในกรณีที่มีการทำงานที่ความถี่ต่ำและรูปที่ 2.20 (ข) แสดงค่าแรงบิดที่มีการชดเชยโดยการเพิ่มแรงดันบุดในช่วงความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.21 บล็อกการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่

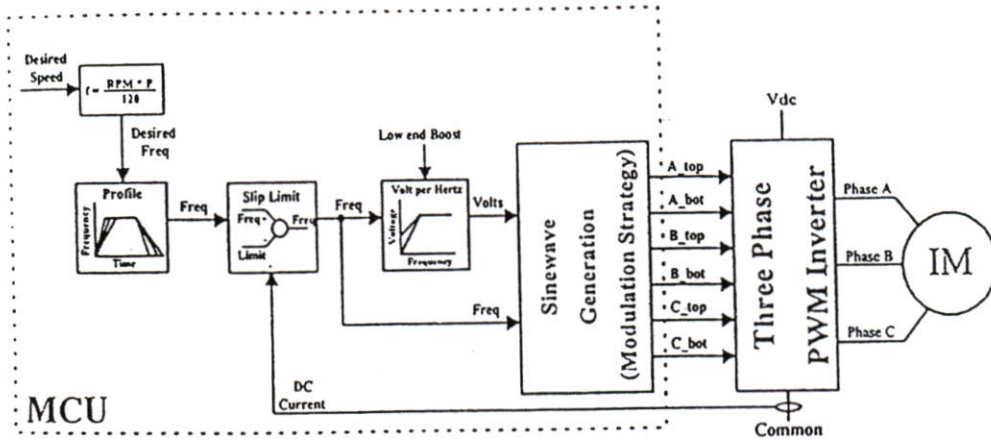


รูปที่ 2.22 กราฟแสดงบล็อกความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ที่ใช้ในการควบคุม

จากความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่ในข้างต้น การควบคุมการทำงานสามารถแสดงบล็อกการทำงานได้ในรูปที่ 2.21 ขั้นตอนการทำงานจะอาศัย โปรไฟล์ (Profile) และบล็อกความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่ในการควบคุมการทำงาน โดยที่โปรไฟล์นี้เป็นชุดข้อมูลที่ใช้เก็บค่าการเปลี่ยนแปลงค่าสั่งความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ในสถานะที่มีการเร่งความเร็วรอบและลดความเร็วรอบการสั่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งโปรไฟล์นี้จะทำหน้าที่เสมือนหน่วงเวลาของความถี่ที่ได้รับจากอินพุต(เป็นคำสั่ง) แล้วค่อยๆ เพิ่ม/ลดความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์เพื่อป้องกันค่ากระแสไม่ให้เกิดเกินพิกัดของมอเตอร์ ส่วนบล็อกความสัมพันธ์ของแรงดันต่อความถี่จะมีหน้าที่ในการปรับค่าของการมอดดูเลทให้มีค่าเหมาะสมกับค่าความถี่ที่เลือกในการใช้งานนั้นๆ โดยเฉพาะค่าแรงดันจุดในช่วงที่มีการใช้งานที่ความถี่ต่ำ ดังในรูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดันต่อความถี่ หลังจากการเลือกค่าของการมอดดูเลทแล้วจะได้ขนาดสัญญาณที่มีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าความถี่สั่งการจากเป็นคำสั่ง โดยสัญญาณที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิทช์กำลังที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป

2.5.2 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับกระแส

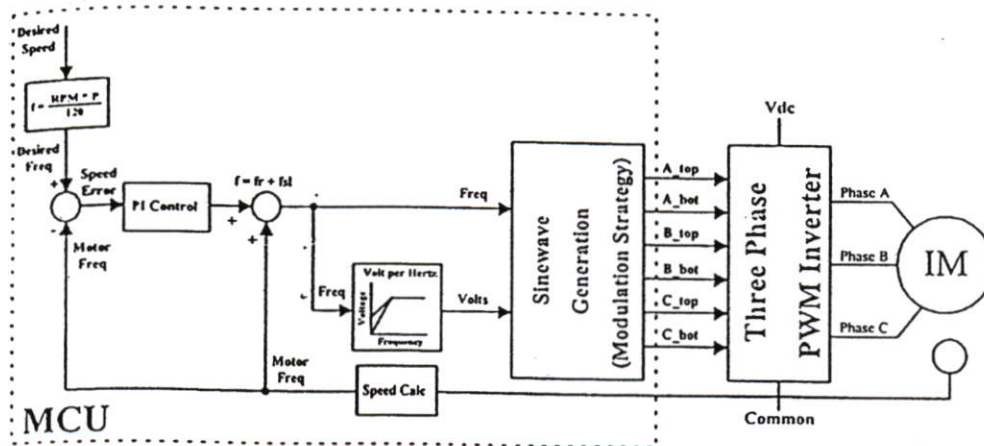
การทำงานจะเหมือนกับการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แต่จะมีการตรวจจับกระแสที่คิซิปัสเพื่อมาเช็คการเพิ่มขึ้น/ลดลงของความถี่ในกรณีที่มีการเร่ง/ลดความเร็วรอบมอเตอร์อย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.23 อีกทั้งยังช่วยในการดู (Monitor) และจำกัดค่าความถี่ที่เกิดขึ้นอีกด้วย



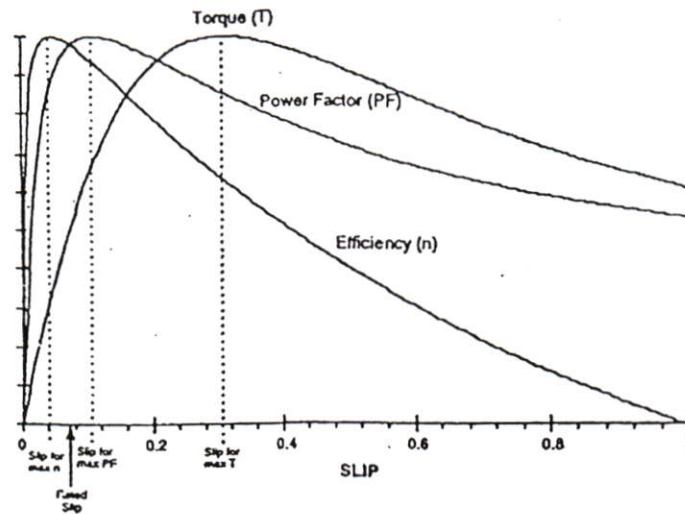
รูปที่ 2.23 บล็อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ชนิดตรวจจับกระแส

2.5.3 การควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)

การควบคุมแบบนี้จะมีการทำงานที่เหมือนกับการควบคุมแบบแรงดันต่อความถี่ แต่จะมีอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ (Encoder) ซึ่งติดตั้งที่มอเตอร์ในการตรวจสอบค่าความเร็วรอบและส่งไปยังตัวประมวลผลเพื่อทำการชดเชยค่าความเร็วรอบนั้น โดยการชดเชยค่าความถี่ที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อทำให้ค่าความเร็วรอบมีค่าเท่ากับค่าความเร็วรอบคำสั่ง ซึ่งวิธีการควบคุมแบบอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบในการชดเชยค่าความถี่สั่งการนี้ ในวงการอุตสาหกรรมไครฟ์จะเรียกว่า การควบคุมแบบสเกลาร์ (Scalar Control) ดังแสดงบล็อกการควบคุมไว้ในรูปที่ 2.24



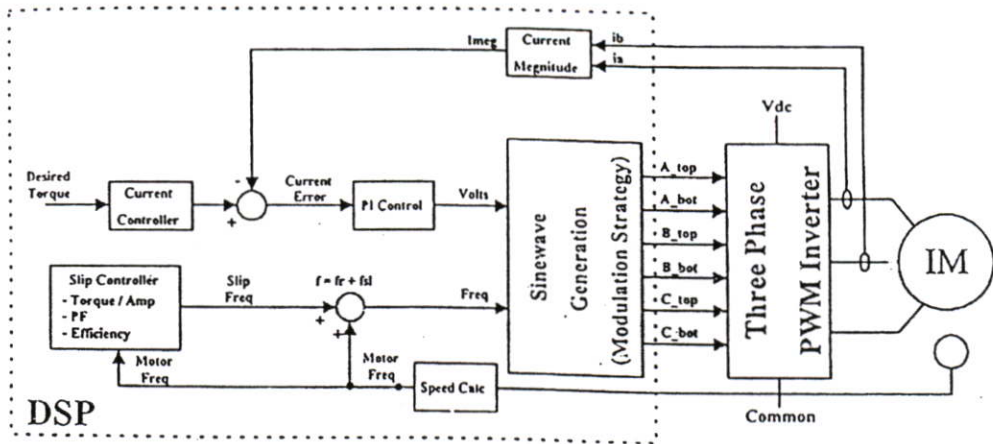
รูปที่ 2.24 บล็อกการควบคุมแรงดันต่อความถี่ ชนิดตรวจจับความเร็ว (Scalar Control)



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิด, ประสิทธิภาพและ PF เทียบกับค่าสลิป

2.5.4 การควบคุมแบบสลิปออฟติไมต์เซชัน (Slip Optimization)

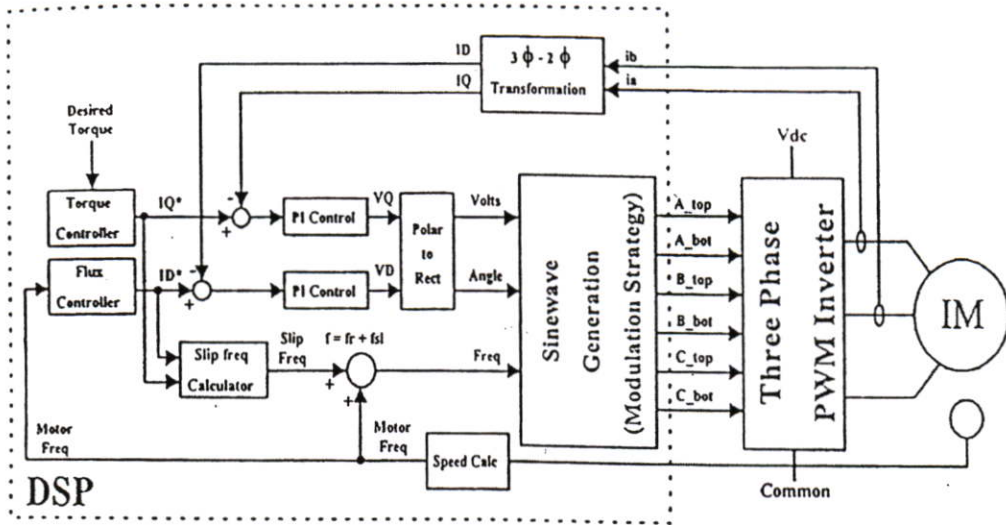
ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยการจำกัดค่าสลิปด้วยการตรวจจับค่ากระแสที่ดีซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อป้องกันการสตอล (Stall) หรือป้องกันค่ากระแสสูง แต่การควบคุมที่ได้นั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าความถี่สลิปโดยตรง จากรูปที่ 2.26 จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป ภายในกราฟจะแสดงถึงตำแหน่งค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุด (Break down point) อีกทั้งยังแสดงถึงตำแหน่งค่าสลิปที่ทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพสูงสุดและตำแหน่งค่าสลิปที่ทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูงสุด แต่โดยทั่วไปเราจะควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้อยู่ระหว่างเส้นประสิทธิภาพสูงสุดและเส้นเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดเพื่อควบคุมค่าความถี่สลิปในการควบคุมค่าของแรงดัน โดยการควบคุมค่าของกรมอดคูลเลท ดังรูปที่ 2.33 แสดงถึงบล็อกการทำงานดังกล่าว ส่วนในย่านที่ความเร็วมีการทำงานสูงกว่าความเร็วที่พิกัด ค่าของความถี่สลิปจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเลขย่านแรงดันคงที่ไปจะทำให้ค่าแรงบิดที่ได้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จากพฤติกรรมดังกล่าวค่าของแรงบิดจะถูกควบคุมโดยค่าความถี่สลิปและค่ากระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในรูปที่ 2.26 ค่าของความถี่จะถูกชดเชยด้วยค่าของความถี่สลิปและค่าของแรงดันควบคุมที่ผ่านกระบวนการพีไอจะได้ออกมาจากการตรวจจับค่ากระแสจำนวน 2 เฟส ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมค่าความถี่สลิปโดยการปรับเปลี่ยนค่ากระแสที่ใช้ในการสร้างแรงบิดเพื่อให้เป็นไปตามความสัมพันธ์ของกราฟดังรูปที่ 2.25



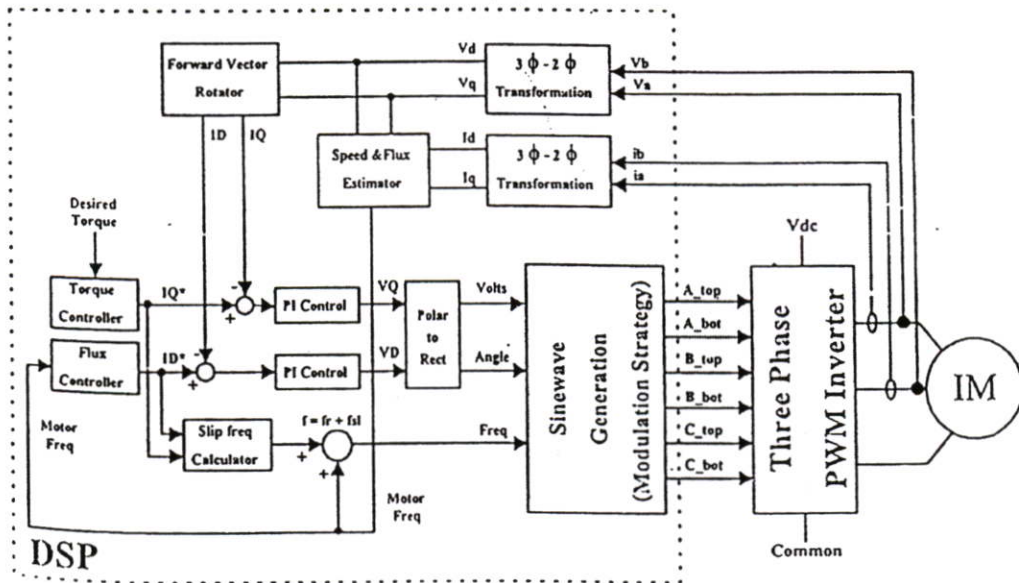
รูปที่ 2.26 บล็อกการควบคุมความถี่สลลิป (Slip frequency control)

2.5.5 การควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)

การควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นการควบคุมที่เสนอมุมมองใหม่ของปริมาณไฟฟ้า 2 เฟส ไปเป็นเวกเตอร์ในระบบ 2 แกน ซึ่งมีพฤติกรรมทำนองเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก คือที่ปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดสนาม (Field winding) เพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กและมีปริมาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงบิด ซึ่งรูปแบบควบคุมการทำงานจะต้องมีการแปลงแกนจาก 3 แกน (a,b,c) ไปเป็นเวกเตอร์แบบ 2 แกน (d,q) โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ในการแปลงแกน โดยที่เวกเตอร์กระแสในแกน d จะมีทิศทางขนานกับสนามแม่เหล็ก ในขณะที่เวกเตอร์กระแสในแกน q จะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ในขณะที่เวกเตอร์กระแสในแกน q จะมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กตลอดเวลา ซึ่งหัวใจของการควบคุมคือการควบคุมสนามแม่เหล็กให้คงที่ในระดับพอเหมาะเพื่อไม่เกิดปัญหาเรื่องการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก รวมทั้งสามารถลดปริมาณสนามแม่เหล็กเพื่อเร่งความเร็วรอบให้เกินค่าความเร็วพิกัดได้ในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมค่าแรงบิดได้โดยตรงและเป็นอิสระจากการควบคุมสนามแม่เหล็กอีกด้วย จากรูปที่ 2.27 เป็นการแสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งการทำงานจะรับค่าคำสั่งสนามแม่เหล็กและคำสั่งแรงบิดซึ่งผ่านมาจากปริมาณกระแสคำสั่ง I_d^* และ I_q^* แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อทำการควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดดังกล่าว โดยการทำงานจะต้องอาศัยการตรวจจับของกระแสจำนวน 3 เฟส ที่มีการแปลงให้อยู่ในรูป d,q และค่าความเร็วมาทำการคำนวณ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณนี้จะขึ้นอยู่กับว่าจะอ้างอิงกับสนามโรเตอร์, สนามสเตเตอร์หรือสนามในช่องว่างอากาศ ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [36-38]



รูปที่ 2.27 บล็อกการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)



รูปที่ 2.28 บล็อกการควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

2.5.6 การควบคุมแบบไร้ตัวตรวจจับความเร็ว (Sensorless Vector Control)

การควบคุมแบบนี้จะมึการทำงานที่คล้ายกับการควบคุมแบบเวกเตอร์แต่จะไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับค่าความเร็วรอบ โดยการทำงานจะอาศัยการตรวจจับของกระแสและแรงดันแทนซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าความเร็วที่โรเตอร์แทน ดังที่แสดงบล็อกการควบคุมในรูปที่ 2.28 ค่าของความเร็วและค่าฟลักซ์ที่โรเตอร์จะได้รับการประมาณ โดยอาศัยโมเดลพื้นฐานของมอเตอร์ ค่าความถูกต้องจากการวัดจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการคำนวณเนื่องจาก

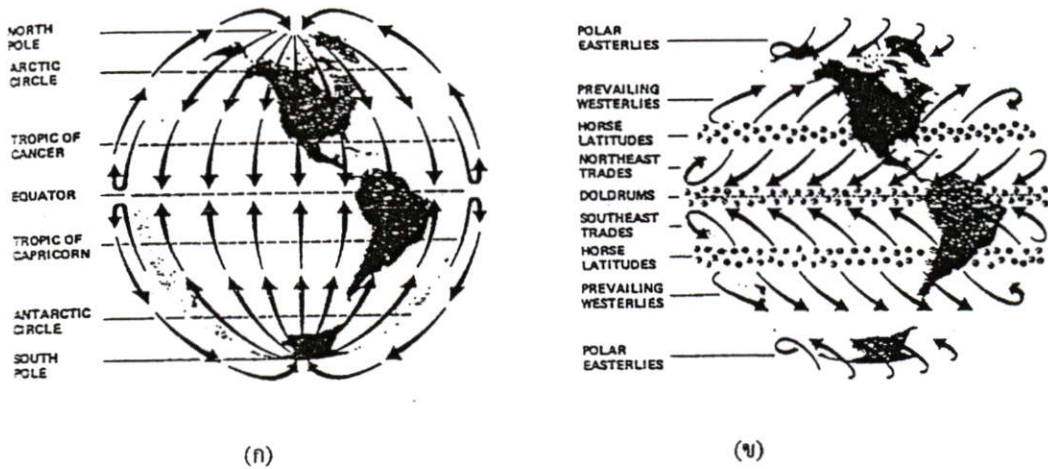
หากค่าที่ได้มีการวัดผิดพลาดเล็กน้อยจะส่งผลไปถึงการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานผิดพลาดไปด้วย ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาได้ใน [39-40]

2.6 ลมและกังหันลม

ในการผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ ที่สามารถจะนำพลังงานเหล่านี้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นเราจะนำเอาพลังงานต่างๆ มาแปลงเป็นพลังงานกลแล้ว จากนั้นค่อยนำไปแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานดังกล่าวก็อย่างเช่น พลังงานความร้อน (อาจจะได้จากการเผาไหม้ของก๊าซ น้ำมัน ถ่านหิน หรือจากปฏิกิริยาทางนิวเคลียร์) พลังงานที่ได้จากการไหลของน้ำ พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ และพลังงานจากลม เป็นต้น สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงการนำพลังงานลมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้เราจะกล่าวถึงพลังงานลม และการคำนวณหาพลังงานจากลมรวมไปถึงการวัดความเร็วลม และทิศทางของลม

เนื่องจากการที่บรรยากาศพื้นผิวโลกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ จึงทำให้ความหนาแน่นของอากาศ หรือความกดอากาศนั้นแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ โดยบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงๆ จะทำให้อากาศบริเวณนั้นลอยตัวขึ้นสูง เพราะว่าบริเวณดังกล่าวมีความกดอากาศต่ำ (อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะเบากว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ) เป็นเหตุให้อากาศจากบริเวณอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะมีความกดอากาศสูงกว่านั้นเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ และการเคลื่อนตัวของอากาศจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนี้ เราเรียกว่า “ลม” หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ลม คือการเคลื่อนตัวของอากาศ เราอาจจะแบ่งลักษณะการเกิดของลมอย่างกว้างๆ ได้เป็นสองแบบ คือการเกิดในลักษณะทั่วทั้งโลก และการเกิดในลักษณะเฉพาะที่ สำหรับลักษณะแรกจะเกิดขึ้นเนื่องจากการที่อุณหภูมิของพื้นผิวโลกที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรนั้นสูงกว่าอุณหภูมิที่ขั้วโลกเหนือ และขั้วโลกใต้ เป็นเหตุให้อากาศร้อนที่บริเวณที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรนั้นลอยตัวขึ้นสูงสู่บรรยากาศข้างบน ทำให้อากาศที่อยู่ที่ขั้วโลกซึ่งเย็นกว่าเคลื่อนตัวมายังบริเวณเส้นศูนย์สูตร ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) แต่เนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเอง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศนี้ โดยที่อากาศร้อนซึ่งอยู่ในบรรยากาศชั้นบนจะมีทิศทางก่อนไปทางตะวันออก และอากาศเย็นซึ่งอยู่ใกล้พื้นผิวโลกจะหมุนตัวไปในทางทิศตะวันตกเหมือนแสดงในรูปที่ 2.29(ข) สำหรับลักษณะการเกิดลมแบบที่สองนั้นสามารถเกิดได้สองแบบคือ เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นดินและพื้นน้ำ และเกิดจากลักษณะความลาดชันของเชิงเขาหรือภูเขา สำหรับแบบแรกในช่วงเวลากลางวันจะมีแสงอาทิตย์ส่องมายังพื้นโลกทำให้พื้นดินนั้นดูดซับความร้อนได้มากกว่าพื้นน้ำ ซึ่งจะทำให้อากาศบนพื้นดินมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศบนพื้นน้ำ แล้วอากาศที่พื้นดินจะลอยตัวสูงขึ้นและอากาศพื้นน้ำจะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ และในเวลากลางคืนทิศทางการเคลื่อนที่จะตรงกันข้ามกับช่วงเวลากลางวัน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) ในแบบที่สองในช่วงเวลากลางวันอากาศร้อนจะ

ลอยตัวสูงขึ้นไปตามความลาดชันของภูเขา และในเวลากลางคืนอากาศที่เย็นซึ่งหนักจะกดตัวต่ำลงมาตามความลาดชันของภูเขาเหมือนที่แสดงในรูปที่ 2.29 (ข)



รูปที่ 2.29 แสดงการเกิดลมทั่วทั้งโลก

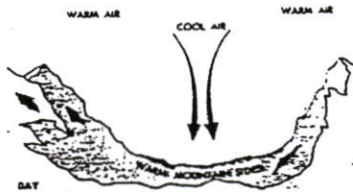
(ก) ทิศทางลมเมื่อโลกไม่หมุน

(ข) ทิศทางลมเมื่อมีผลกระทบจากการหมุนของโลก

เมื่อลมเป็นการเคลื่อนที่ของอากาศและอากาศนั้นมีมวล ดังนั้นลมจึงจัดว่าเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งพลังงานจากลมนั้นเป็นพลังที่ได้จากธรรมชาติ และเป็นพลังงานที่ไม่ทำให้เกิดมลพิษหรือพลังงานบริสุทธิ์ และพลังงานที่ได้จากลมนี้ยังจัดว่าเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด แต่พลังงานลมก็เป็นพลังงานที่ไม่มีความแน่นอน เพราะว่าลมก็มีการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และลมยังมีความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามที่เราสามารถที่จะนำเอาพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์ได้ซึ่งมนุษย์เราได้เอาพลังงานจากลมมาใช้ตั้งแต่อดีตกาล โดยการนำมาใช้ในการเดินเรือในมหาสมุทร หรือวิดน้ำเพื่อการเกษตร เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.30 แสดงการเกิดลมแบบเฉพาะที่

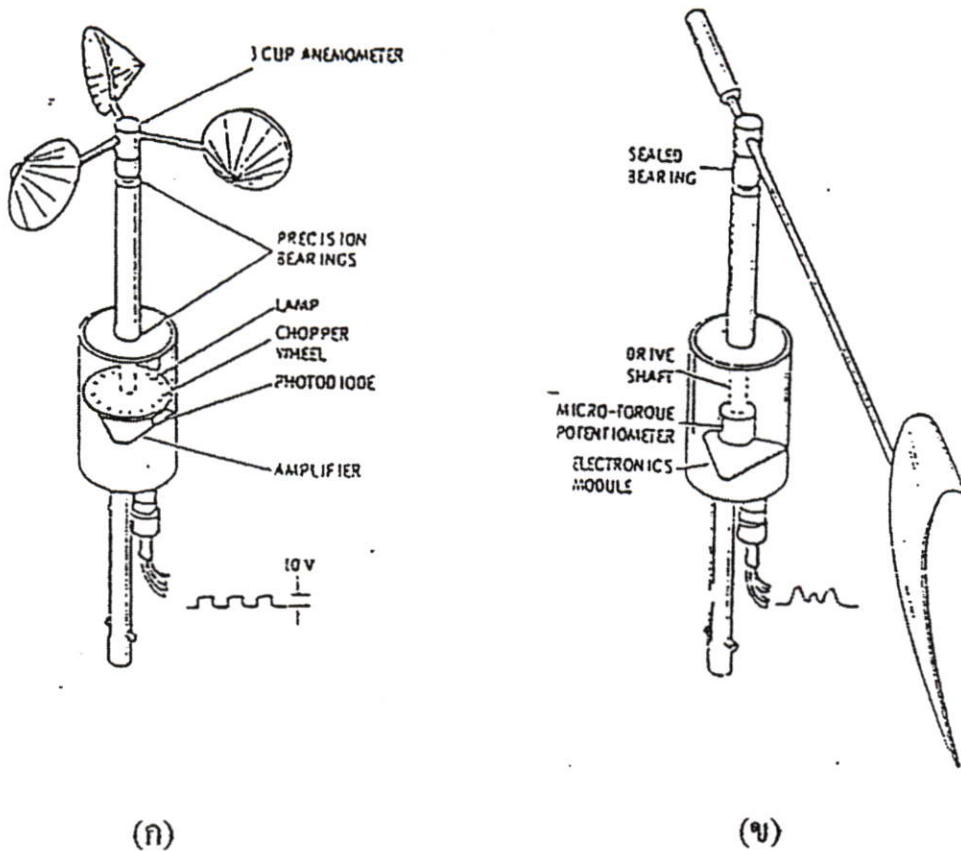
(ก) การเกิดลมตามชายฝั่ง

(ข) การเกิดลมตามหุบเขา

2.6.1 เครื่องมือวัดความเร็วลม และเครื่องแสดงทิศทางลม

การวัดทิศทาง และการวัดความเร็วของลมมีความสำคัญมากในการที่จะตรวจสอบสถานที่ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งเครื่องกลทางลม หรือใช้ตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติของเครื่องกลทางลมที่สัมพันธ์กับความเร็วลม เครื่องมือที่ใช้ในการวัดลมเราเรียกว่า “อะนิโมมิเตอร์” (Anemometer) เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเร็วลมแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นจะเป็นแบบถ้วย และเครื่องที่ใช้แสดงทิศทางลม

สำหรับเครื่องมือวัดลมแบบใหม่จะมีความสามารถในการบันทึกค่าได้ เครื่องมือวัดบางแบบอาจจะรวมทั้งเครื่องวัดความเร็วลมและเครื่องแสดงทิศทางลมไว้ด้วยกัน



รูปที่ 2.31

(ก) เครื่องวัดความเร็วลม

(ข) เครื่องแสดงทิศทางลม

2.7 กังหันลม

2.7.1 ชนิดของกังหันลม

กังหันลมที่ใช้กันอยู่ที่มีชื่อเรียกที่แตกต่างกันเนื่องมาจากรูปร่างที่แตกต่างกันโดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกตามลักษณะแกน โรเตอร์ที่ติดตั้งใบพัดว่าหมุนในลักษณะใดเมื่อมีลมพัดผ่าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ กังหันชนิดแนวแกนนอน (Horizontal axis machines) และกังหันชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical axis machines) ลักษณะของลมที่ปะทะกับใบพัด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงขึ้น 2 แรงคือ

1) แรงลาก (drag force : F_D) เป็นแรงที่มีทิศทางเดียวกันกับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างทิศทางของความเร็วลมกับทิศทางความเร็วการหมุนของกังหัน

2) แรงยก (lift force : F_L) เป็นแรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงลาก ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแรงยกที่เกิดขึ้นกับปีกของเครื่องบิน

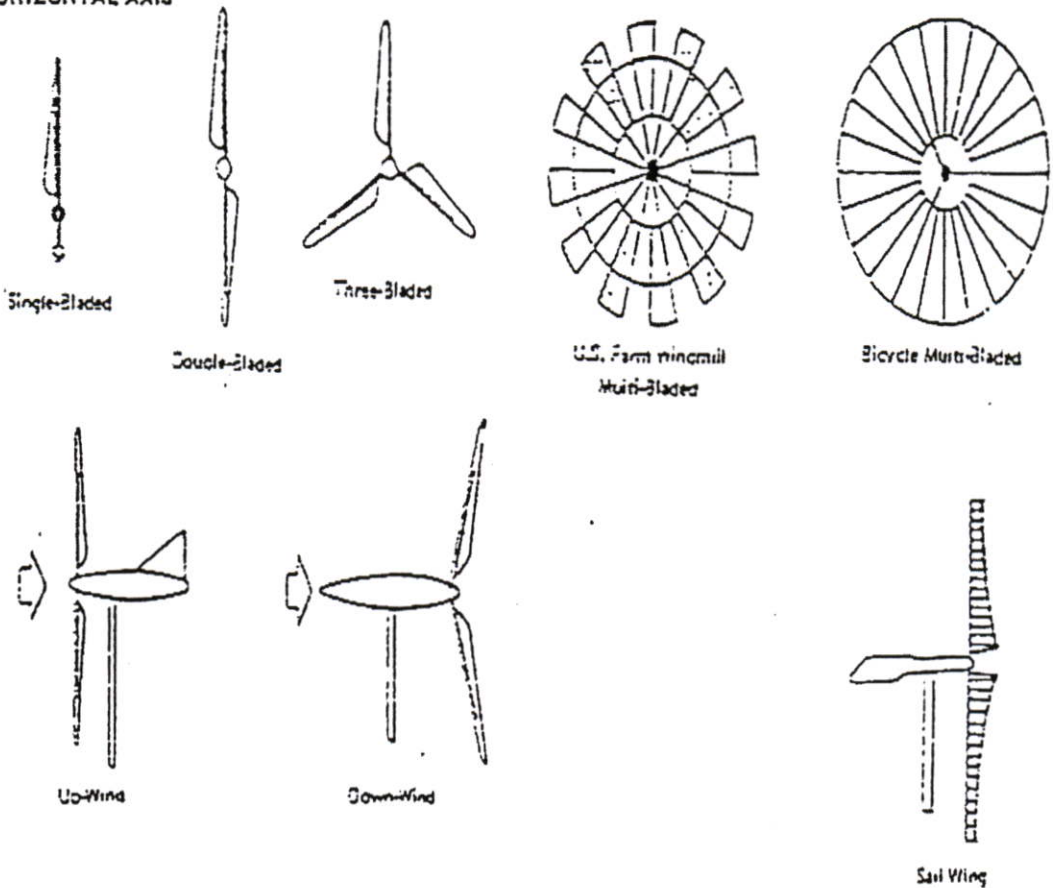
ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้กังหันมีความแตกต่างกัน คือ ความเป็น solidity (solidity เท่ากับพื้นที่หน้าตัดใบพัดกังหันหมุนต่อพื้นที่ของใบพัดของกังหัน ซึ่งจะบ่งบอกถึงลักษณะการ

ใช้งานด้วย เช่น ถ้าเป็นพวก high solidity machine จะมีแรงบิดคอนออกตัวสูง แต่กำลังสูงสุดจะเกิดที่ความเร็วการหมุนต่ำซึ่งเหมาะที่จะใช้เป็นกังหันน้ำ ส่วนพวก low solidity machine แรงบิดออกตัวต่ำ กำลังเกิดสูงสุดที่ความเร็วการหมุนสูง เหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

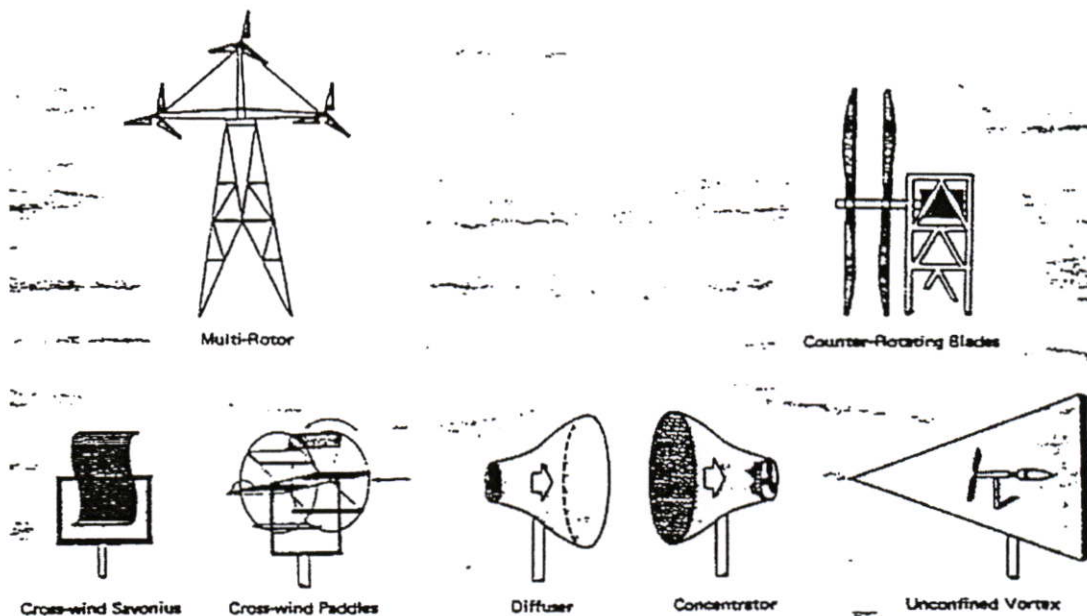
2.7.2 กังหันชนิดแนวแกนนอน (Horizontal axis machines)

กังหันแบบนี้จะมีแนวแกนหมุนอยู่ในแนวนอนตามพื้นผิว โลกและขนานกับทิศทางกระแสลม ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับกังหันน้ำ มีทั้งลักษณะที่ใช้ด้านหน้ากังหันเข้ารับลม (upwind) และใช้ด้านหลังกังหันเข้ารับลม (downwind) และแบบต่างๆ ดังรูป

HORIZONTAL AXIS



รูปที่ 2.32 กังหันแนวแกนนอนชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.33 กังหันแนวแกนชนิดต่างๆ (ต่อ)

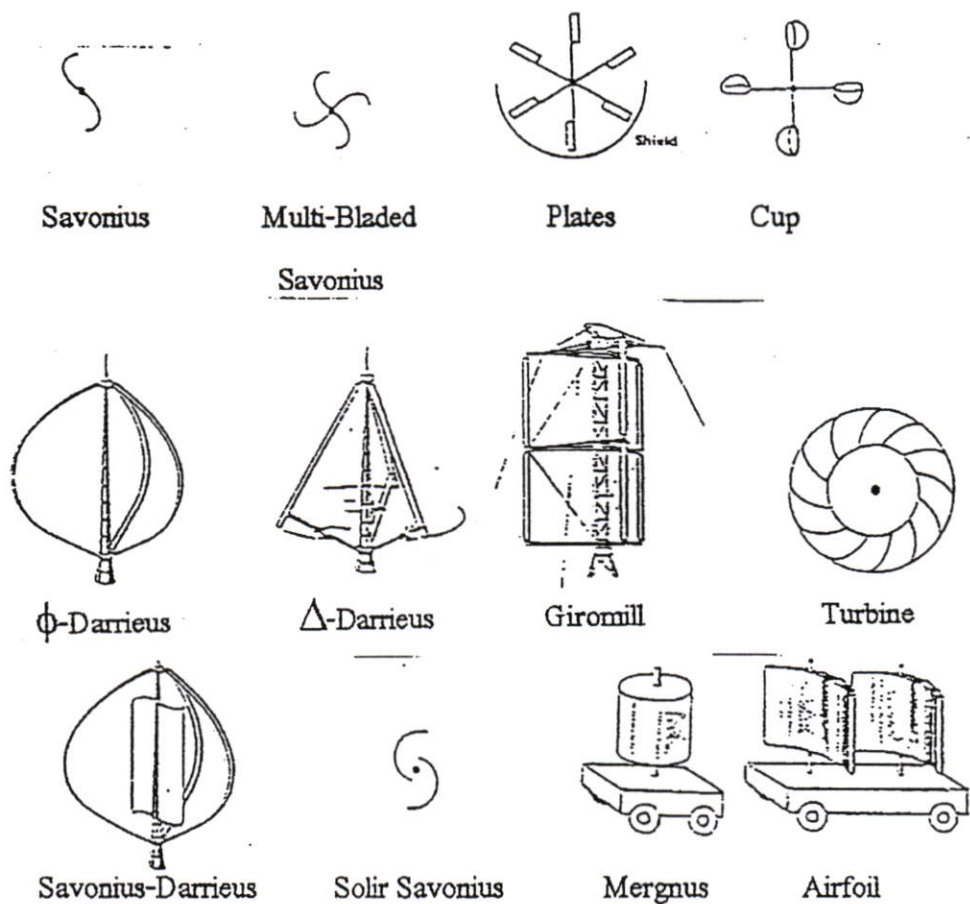
2.7.3 กังหันชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical axis machines)

กังหันแบบนี้จะมีแนวแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลมและระนาบพื้นดิน กังหันนี้จะมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าแบบแนวแกนนอน สามารถรับลมได้ทุกทิศทางแต่จะให้กำลังงานที่น้อยกว่าแบบแนวแกนนอนเมื่อเทียบพื้นที่เท่ากัน กังหันแบบนี้จะมีหลายลักษณะหลายรูปแบบ เช่น

1) Cup anemometer เป็นกังหันที่อาศัยแรงลากทำให้เกิดการหมุน ซึ่งขนาดของลูกถ้วยก็ขึ้นความเร็วลมและความถี่ในการหมุน

2) Savonius rotor (turbo rotor) จะอาศัยแรงลมที่เคลื่อนที่ผ่านใบพัดที่มีลักษณะโค้งงอทำให้เกิดแรงลากตัวกังหันให้หมุนไป ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก แต่ให้แรงบิดขณะออกตัวมาก

3) Darrieus rotor จะประกอบด้วยใบพัดที่มีลักษณะยาวโค้งงอและยึดใบพัดที่ปลายทั้งสองข้างเข้ากับแกนหมุน แรงที่ใช้ขับจะเป็นแรงยก แรงบิดสูงสุดจะเกิดที่ความเร็วลมสูงสุดแต่แรงบิดขณะออกตัวน้อยจะต้องอาศัยแรงบิดจากภายนอกช่วยขับ



รูปที่ 2.34 กังหันแนวแกนตั้งชนิดต่างๆ

2.7.4 กังหันลมในประเทศไทย

กังหันที่มีใช้ในประเทศไทยส่วนมากจะเป็นกังหันแบบแนวแกนนอน ซึ่งจะใช้ในการเกษตรกรรม โดยใช้ในการสูบน้ำหรือวิดน้ำเพื่อใช้ในการทำนาเกลือ เป็นต้น โครงสร้างจะมีแบบที่ทำด้วยไม้และแบบที่ทำด้วยเหล็ก ลักษณะของกังหันแบบใช้ไม้ทำเป็นโครงสร้างจะมีเสาสองต้นเป็นตัวรองรับ มีเชือกขึงตึงระหว่างกันใบเพื่อความแข็งแรง ส่วนใบนั้นอาจจะใช้ผ้า ลือหรือไม้ไผ่สาน ซึ่งมีตั้งแต่สองใบถึงแปดใบ กังหันแบบนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 4-7 เมตร สำหรับแบบหลายใบนั้นจะทำด้วยเหล็กกาวาไนท์และส่วนประกอบต่างๆ จะทำด้วยโลหะ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10-20 ฟุต มีจำนวนใบตั้งแต่ 30-45 ใบ และยังสามารถที่จะหมุนรับทิศทางลมโดยใช้หางเสือบังคับทิศทางเป็นตัวช่วย ซึ่งกังหันแบบนี้จะติดตั้งไว้บนท่อนสูง

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกังหันแนวแกนตั้งและกังหันแนวแกนนอน

กังหันแนวแกนนอน	กังหันแนวแกนตั้ง
<u>ข้อดี</u>	<u>ข้อดี</u>
<ol style="list-style-type: none"> 1. มีพื้นที่รับลมมากกว่าเมื่อน้ำหนักเท่ากัน 2. มีประสิทธิภาพสูงกว่า 3. แรงบิดรอบแกนสูง 4. ความเร็วรอบสูงกว่าเมื่อความเร็วลมเท่ากัน 5. ความเร็วรอบคงที่กว่า 	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับลมได้ทุกทิศทาง ไม่ต้องใช้หางเสือในการปรับทิศทาง 2. น้ำหนักที่ลงที่ฐานมีความสมดุลมากกว่า 3. เริ่มต้นหมุนเองได้เมื่อความเร็วลมต่ำ 4. ระบบการผลิตส่งกำลังทำได้ง่าย ราคาถูก

กังหันแนวแกนนอน	กังหันแนวแกนตั้ง
<u>ข้อเสีย</u>	<u>ข้อเสีย</u>
<ol style="list-style-type: none"> 1. ต้องปรับทิศทางของใบกังหันเข้าหาทิศทางลม 2. การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับแกนหมุนจะทำได้ยาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีแรงต้านการหมุนจากใบพัดที่ไม่ได้รับลม 2. ไม่สามารถรับลมได้ทุกใบ

2.8 พลังงานลม

ในการคำนวณพลังงานที่ได้จากลม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient) สัมประสิทธิ์แรงบิด (torque coefficient) และ tip speed ratio (λ) การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาในกรณีที่เป็นแบบโมเมนตัมเชิงเส้น (Linear Momentum)

2.8.1 กำลังงาน

กำหนดให้การไหลของลมในช่วงต้นลมที่ไหลผ่านท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ โดยมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของใบพัดกังหันลม (A_1) จะได้พลังงานจลน์ที่ไหลผ่านต่อเวลาเป็น

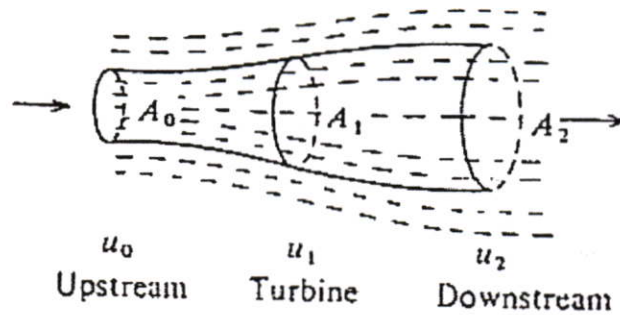
$$P_0 = \frac{1}{2}(\rho A_1 u_0^3) \quad (2.39)$$

กำหนดให้ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

u_0 คือ ความเร็วของลมที่มีแนวการพัดอย่างสม่ำเสมอเป็นเส้นตรง

ρ เป็นฟังก์ชันของความสูงและสภาพภูมิอากาศ ความเร็วลมก็ขึ้นอยู่กับความสูง ซึ่งก็จะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่และเวลาที่ต่างกันด้วย กำหนดให้ ρ และ u_0 มีค่าคงที่ตลอดเวลาและพื้นที่ที่กำหนด โดยจะกำหนดให้ลมที่พิจารณานี้เป็นของเหลวไม่อัดตัว (incompressible fluid)

จากวิธีการข้างต้นเป็นการพิจารณาแบบที่ความเร็วลมมีแนวการไหลที่คงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาที่ผ่านกังหัน แต่ที่จริงแล้วความเร็วลม พื้นที่และความดันก่อนผ่านและหลังผ่านกังหันจะไม่เท่ากัน ถ้ากำหนดให้ A_1 เป็นพื้นที่ใบพัดกังหันหมุนกวาด A_0 เป็นพื้นที่หน้าตัดของความเร็วต้นลมก่อนผ่านกังหัน และ A_2 เป็นพื้นที่หน้าตัดของความเร็วหลังผ่านกังหัน



รูปที่ 2.35 การขยายตัวของกระแสในรูปแบบของ Benz

แรงที่เกิดบนกังหันเท่ากับ โมเมนตัมที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยของเวลา ถ้ามวลอากาศมีอัตราการไหลต่อเวลาเท่ากับ m'

$$F = m'u_0 - m'u_2 \quad (2.40)$$

ดังนั้นกำลังที่ได้จากกังหัน เมื่อความเร็วลมขณะผ่านใบพัดกังหันเท่ากับ u_1 คือ

$$P_M = Fu_1 = (m'u_0 - m'u_2)u_1 \quad (2.41)$$

พลังงานที่สูญหายไปเมื่อลมพัดผ่านกังหัน คือ

$$P_w = \frac{1}{2} m'(u_0^2 - u_2^2) \quad (2.42)$$

จากสมการ จะได้

$$(u_0 - u_2)u_1 = \frac{1}{2}(u_0^2 - u_2^2) = \frac{1}{2}(u_0 - u_2)(u_0 + u_2)$$

$$u_1 = \frac{(u_0 + u_2)}{2} \quad (2.43)$$

ตามทฤษฎีของโมเมนตัมเชิงเส้น ความเร็วลมที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของกังหันจะมากกว่าครึ่งหนึ่งของความเร็วลมที่มีแนวการไหลคงที่สม่ำเสมอที่ผ่านกังหัน โดยมวลอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดกังหันหาได้จาก

$$m' = \rho A_1 u_1$$

$$P_M = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_2)$$

$$P_M = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - (2u_1 - u_0)) = 2\rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_1) \quad (2.44)$$

กำหนดให้ interference factor (a) เป็นอัตราส่วนของความเร็วลมลดลงต่อความเร็วลมที่กังหัน ดังนั้น

$$a = \frac{(u_0 - u_1)}{u_0} = \frac{(u_0 - u_2)}{2u_2}$$

$$P_M = 2\rho A_1 (1-a)^2 u_0^2 [u_0 - (1-a)u_0]$$

$$P_M = \rho A_1 u_0^3 \frac{4a(1-a^2)}{2} \quad (2.45)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการก่อนหน้าจะได้

$$P_M = C_p P_0$$

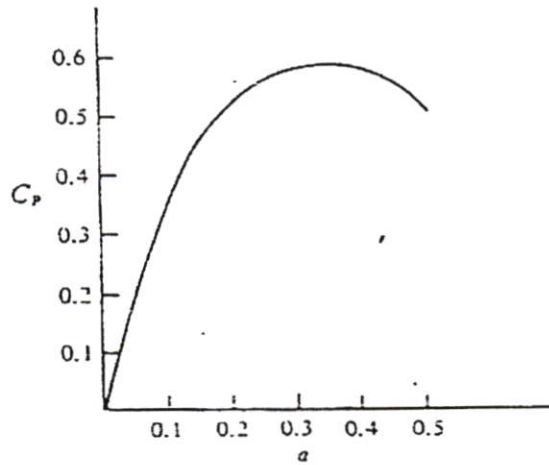
$$P_M = \frac{1}{2} \rho C_p A_1 u_0^3 \quad (2.46)$$

P_0 = เป็นพลังงานที่ได้จากลมที่มีแนวการไหลที่สม่ำเสมอ และ C_0 = เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่เกิดขึ้น หรือเรียกอีกอย่างว่า power coefficient

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.47)$$

เมื่อ a มีค่าเท่ากับ 1/3 ค่า C_p จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $16/27 = 0.59$ จะเห็นได้ว่าสามารถดึงพลังงานออกมาได้เพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้นเนื่องจากว่าอากาศจะเกิดพลังงานจลน์หลังจากที่ไหลผ่านกังหัน โดยค่าสูงสุดของพลังงานที่สามารถนำออกมาใช้ได้ (C_p 16/27) จะเรียกว่า Benz criterion ซึ่งยังใช้กับกังหันที่ใช้แรงจากการไหลของน้ำเป็นตัวขับเคลื่อนได้ด้วย เช่น แรงที่ได้จากน้ำขึ้นน้ำลงหรือแรงที่มาจาก การไหลของน้ำในแม่น้ำ

สัมประสิทธิ์พลังงาน (power coefficient : C_p) เป็นประสิทธิภาพในการดึงเอาพลังงานที่มาจากการที่มวลของอากาศไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดใบพัดของกังหันออกมาใช้



รูปที่ 2.36 ความสัมพันธ์ของ C_p ในฟังก์ชันของ interference factor a เมื่อ $C_p = 4a(1 - a)^2$

2.8.2 แรงบิด

แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากมากระทำปลายใบพัดยาว R เมตรของกังหัน

$$\begin{aligned} T_{\max} &= F_{\max} R \\ F_{\max} &= \frac{\rho A_1 u_0^2}{2} \\ T_{\max} &= \frac{\rho A_1 u_0^2 R}{2} \end{aligned} \quad (2.48)$$

ถ้าเครื่องจักรได้ให้ แรงบิดที่เพลาเท่ากับ T สัมประสิทธิ์ แรงบิด (torque coefficient : C_T) จะกำหนดโดย

$$T = C_T T_{\max} \quad (2.49)$$

กำหนดให้ tip speed ratio λ เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วปลายใบพัดขอบนอกต่อความเร็ว u_0

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{v_t}{u_0} = \frac{R\omega}{u_0} \\ T_{\max} &= \frac{\rho A_1 u_0^2 (u_0 \lambda)}{2\omega} \end{aligned} \quad (2.50)$$

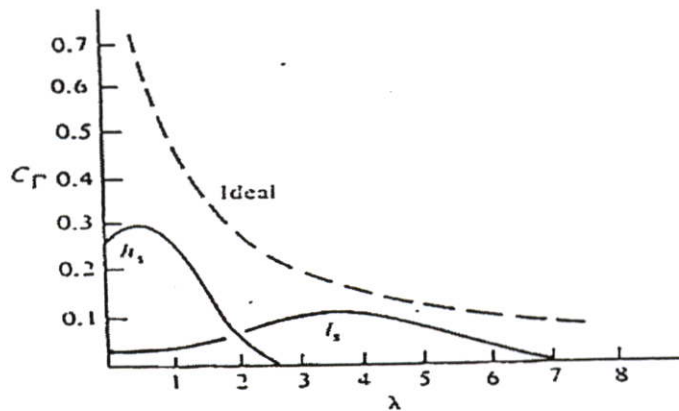
P_0 คือพลังงานลมในสมการข้างต้น และ P_M เป็นพลังงานทางกลที่ได้จากกังหัน ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 P_M &= T\omega \\
 P_M &= C_p P_0 \\
 P_M &= C_T T_{\max} \omega \\
 C_p P_0 &= C_T P_0 \lambda \\
 C_p P_0 &= C_T \lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.51}$$

จะเห็นได้ว่า C_p และ C_T ต่างก็เป็นฟังก์ชันของ tip speed ratio (λ) และค่าโมเมนต์ด้วย ตาม Benz criterion จะพบว่าค่าสูงสุดของ C_p เท่ากับ 0.59 ดังนั้น

$$C_{T_{\max}} = \frac{0.59}{\lambda}
 \tag{2.52}$$

ดังรูปข้างล่างแสดงถึงลักษณะของกังหันที่ใช้งาน กังหันที่ high solidity จะมีค่า tip speed ratio ต่ำ แต่แรงบิดออกตัวสูง ตรงกันข้ามกับกังหันที่ low solidity (เช่นกังหันที่มีใบพัดขนาดเล็ก 2 ใบ) จะมีค่า tip speed ratio สูง แต่แรงบิดออกตัวต่ำและต้องใช้แรงบิดจากภายนอก ตำแหน่งที่มีค่า tip speed ratio สูง จะเกิดการหมุนอย่างอิสระ (freewheel) เนื่องจากแรงบิดจะลดลงเป็นศูนย์ ดังนั้นกังหันที่มีความเร็วรอบสูงที่ความเร็วลมมากอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับแกนหมุน และค่าแรงบิดกับกำลังไม่จำเป็นต้องเท่ากันที่ λ เดียวกัน



รูปที่ 2.37 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง torque coefficient (C_T) กับ tip speed ratio (λ) ของกังหันแบบ high solidity , low solidity และ ideal criterion

2.8.3 Tip speed ratio

อุปกรณ์กังหันลมจะต้องติดตั้งในที่มีปริมาณที่มากเพียงพอที่จะให้พลังงานที่มากที่สุดตาม Benz criterion ที่ได้กำหนดไว้ที่ 59% โดยสาเหตุที่มีผลทำให้พลังงานที่ได้ลดลงจากจุด optimum คือถ้า

1) ใบพัดอยู่ชิดกันมากเกินไปหรือกังหันหมุนเร็วเกินไป จะมีผลให้ลมที่ผ่านใบพัดอันหน้าไปรบกวนใบพัดที่ตามมา หรือ

2) ใบพัดอยู่ห่างกันเกินไปหรือหมุนช้าเกินไปจะทำให้ใบพัดไม่ทันที่จะได้รับแรงจากลมที่พัดเข้ามา

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องกำหนดความถี่ในการหมุนให้สอดคล้องกับความเร็วลมที่เกิดขึ้นจริงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมี t_b (เวลาที่ใบพัดถัดมาจะเข้าแทนตำแหน่งใบพัดใบก่อนหน้า) และ t_w (เวลาที่กระแสลมเปลี่ยนไปเนื่องจากปะทะกับใบพัดจนกลับสู่สภาวะปกติ) โดย t_w จะแปรผันตามขนาดและรูปร่างของใบพัดและแปรผกผันกับความเร็วลม

กำหนดให้กังหันมีใบพัด n ใบพัด มีความเร็วลมพัดเข้า u_0 หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม Ω และ d เป็นระยะทางระหว่างช่วงที่เกิดการบิดเปลี่ยนของกระแสลมที่เข้าและออกจากใบพัด

$$t_b = \frac{2\pi}{n\Omega}$$

$$t_w = \frac{d}{u_0}$$
(2.53)

กำลังที่ได้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $t_b \approx t_w$ ซึ่งจะคิดที่จุดปลายใบพัดเพราะเป็นจุดที่พื้นที่หน้าตัดการหมุนมีค่ามากที่สุด

$$\frac{2\pi}{d} = \frac{n\Omega}{u_0}$$
(2.54)

ถ้าคูณทั้งสองข้างด้วย R (รัศมีใบพัด) จะได้ tip speed ratio (λ)

$$\lambda = \frac{R\Omega}{u_0}$$
(2.55)

ที่จุดที่ให้กำลังสูงสุด

$$\lambda = \frac{2\pi}{n} \cdot \frac{R}{d}$$
(2.56)

ถ้ากำหนดให้ ดังนั้น $d \approx kR, (k \approx 1)$ tip speed ratio ที่กำลังสูงสุดเท่ากับ

$$\lambda = \frac{2\pi}{kn} \quad (2.57)$$

แต่ในทางปฏิบัติแล้ว จะให้ k มีค่าประมาณ $\frac{1}{2}$ ดังนั้นสำหรับกังหัน n ใบพัด

$$\lambda = \frac{2\pi}{n} \quad (2.58)$$

ในทางการคำนวณจริงแล้วจะมีการเผื่อค่าที่คำนวณจำนวนใบพัดไว้เพิ่มขึ้นอีก 30% นอกจากนี้ ค่า tip speed ratio ยังมีความเกี่ยวข้องกับมุมที่ลมกระทบกับ ใบพัด ซึ่งโดยส่วนมากจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งและปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อค่า tip speed ratio เช่น รัศมีใบพัด, ความเร็วลมและความถี่ของแกน โรเตอร์

2.9 สรุป

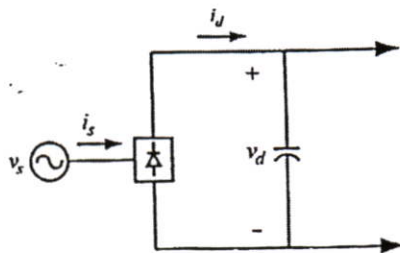
ในบทนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะเป็นกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ, พฤติกรรมของมอเตอร์ในสภาวะความเร็วต่างๆ และเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมแบบต่างๆ รวมทั้งคุณสมบัติต่างๆ ของลมและกังหันที่จะนำมาใช้ในบทต่อไป อีกทั้งในตอนท้ายของบทได้กล่าวถึงรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งวัตถุประสงค์ในบทนี้เพื่อที่จะกล่าวถึงให้เห็นระบบที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำไปสู่การตรวจสอบและวิเคราะห์การทำงานในบทต่อไป โดยที่หลักการพื้นฐานดังกล่าวผู้วิจัยจะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในขั้นต่อไป

บทที่ 3

ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย

3.1 พื้นฐานและชนิดของคอนเวอร์เตอร์

ทฤษฎีของรูปคลื่นที่ไม่เป็นรูปไซน์และ เอชอี / ดีซี คอนเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียวในการนำอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้ในงานส่วนใหญ่ นั้น กำลังทางด้านอินพุตจะอยู่ในรูปของคลื่นไซน์ 50 Hz หรือ 60 Hz เมื่อมีการเปลี่ยนระบบไฟฟ้าจากกระแสสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงส่วนใหญ่ นิยมใช้ไดโอดเรกติไฟ์ลด์รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้ในงาน เช่น แหล่งจ่ายกำลังดีซี, การขับเคลื่อนมอเตอร์เอชอี, การขับเคลื่อนดีซีเซอร์โว โดยแรงดันเอาต์พุตกระแสตรงของเรกติไฟ์ลด์เออร์ที่ได้จะมีริบเปิลด้วยเหตุนี้จึงได้นำคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่อร่วมกับวงจร เสมอเสมือนเป็นตัวฟิลเตอร์ในกระแสตรง เป็นผลทำให้กระแสอินพุตที่มีการผิดเพี้ยนไปจากเดิม



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเรกติไฟ์ลด์เออร์

3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านอินพุต

3.2.1 รูปคลื่นที่ไม่เป็นรูปไซน์

ในวงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นวงจรเอชอีทูซีนั้น โดยคุณสมบัติแล้วจะทำให้กระแสอินพุตเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงได้นำกระแสอินพุตมาวิเคราะห์เพื่อที่จะวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของความถี่มูลฐานและองค์ประกอบที่มีความถี่สูงกว่าความถี่มูลฐาน โดยองค์ประกอบเหล่านี้สามารถถูกนำมาคำนวณจากการเฉลี่ยของการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์ของรูปคลื่น

3.2.2 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแส

จากรูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นกระแส i_s ที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ กระแสที่ผิดเพี้ยนนี้สามารถก่อให้เกิดการผิดเพี้ยนในแรงดันด้วย แต่อย่างไรก็ตามการผิดเพี้ยนในแรงดันมักจะมีขนาดเล็กน้อย ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อให้ง่าย สมมติให้แรงดันอินพุตเป็นคลื่นไซน์เท่านั้น ที่ความถี่พื้นฐาน ดังสมการ (3.1) ($\omega_1 = \omega$ และ $f_1 = f$)

$$V_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega_1 t \quad (3.1)$$

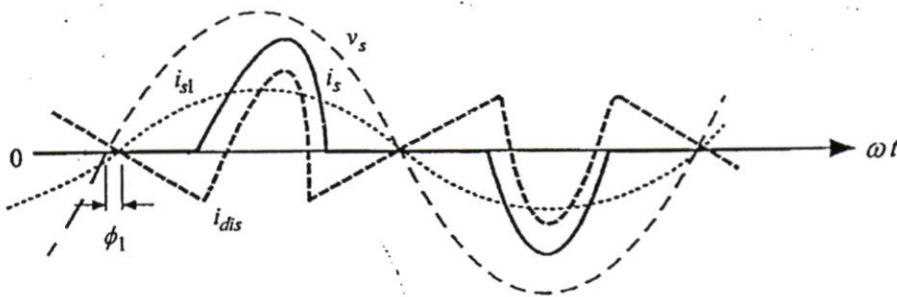
กระแส i_s คือ

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (3.2)$$

เมื่อ i_{s1} เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน

i_{sh} เป็นส่วนประกอบที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ $f_h (= hf_1)$ ซึ่งส่วนประกอบของกระแสเหล่านี้แสดงดังสมการที่ (3.10) คือ

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_1) + \sum_{h \neq 1} \sqrt{2}I_{sh} \sin(\omega_h t - \phi_h) \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.2 แสดงการผิดเพี้ยนรูปคลื่นของกระแส

เมื่อ ϕ_1 เป็นมุมเฟสระหว่างแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์ที่ v_s และ i_{s1} (ϕ_1 หมายถึงกระแส i_{s1} ตามแรงดัน) ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส I_s สามารถคำนวณจากการกำหนดค่าอาร์เอ็มเอสตามสมการที่ 3.12 และได้รูปคลื่นกระแส i_s ดังสมการต่อไปนี้

$$I = \left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt \right) \quad (3.4)$$

$$I_s = \left(\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_s^2(t) dt \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

เมื่อ $T_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{2\pi}{\omega_1}$

การแทนค่า i_s จากสมการ (3.10) ในสมการ (3.13) จะสังเกตเห็นได้ว่าอินทิกรัลของเทอม Cross-product ทั้งหมดเป็นศูนย์ดังสมการ

$$I_s = \left(I_{s1}^2 + \sum_{h \neq 1} I_{sh}^2 \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

การบิดเบี้ยวในแรงดันหรือรูปคลื่นกระแสเป็นคุณสมบัติจากค่าเฉลี่ยของดัชนีที่เรียกว่า การบิดเบี้ยวของฮาร์โมนิกส์โดยรวม Total harmonic distortion (THD) ส่วนค่าของการบิดเบี้ยว i_{dis} ของกระแส จากสมการที่ 3.1 แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$i_{dis}(t) = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (3.7)$$

จากในรูปที่ 3.2 แสดงค่าของอาร์เอ็มเอสได้ดังนี้

$$i_{dis} = \left[I_s^2 - I_{s1}^2 \right]^{1/2} = \left(\sum_{h \neq 1} i_{sh}^2 \right)^{1/2} \quad (3.8)$$

และค่า THD ในกระแสถูกกำหนดให้เป็น

$$\%THD_i = 100 \times \frac{I_{dis}}{I_{s1}} \quad (3.9)$$

$$= 100 \times \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}}$$

$$= 100 \times \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}} \right)^2}$$

เมื่อค่ายอด $I_{s,peak}$ ของรูปคลื่น i_s ในรูปที่ 3.2 เป็นอัตราส่วนของกระแสอาร์เอ็มเอสทั้งหมดซึ่ง I_s เป็นอัตราส่วนคือ [1]

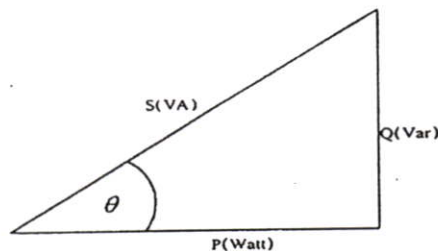
$$\text{Crest factor} = \frac{I_{s,peak}}{I_s} \quad (3.10)$$

3.2.3 กำลังและตัวประกอบกำลัง

โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานกับระบบไฟฟ้า จะเกิดกำลังไฟฟ้าใน 2 ลักษณะคือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปโดยไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น สูญเสียในรูปความร้อน สูญเสียในรูปกำลังไฟฟ้า ซึ่งกำลังไฟฟ้าสามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรหรือโหลดได้จากการถอดรอกที่สองของ $P^2 + Q^2$ เรียกกำลังไฟฟ้านี้ว่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) หรือค่า s มีหน่วยเป็น โวลท์แอมป์ (VA)
2. กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโหลดที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หรือกำลังไฟฟ้าจริง (Active power) หรือ P จากสูตร $VI \cos \theta$ มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)
3. กำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หรือกำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (Reactive power) หรือค่า Q จากสูตร $VI \sin \theta$ มีหน่วยเป็น โวลท์แอมป์รีแอกทีฟหรืออาร์ (VAR)

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า (Power triangle)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะส่งผลต่อค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor หรือ PF) ค่าตัวประกอบการกระจัด (Displacement power factor หรือ DPF) เมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริง / กำลังงานปรากฏและมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 $= \frac{kW}{kVA}$ หรือจากรูปที่ 3.3 จะได้ว่า $PF = \cos \theta$ โดยที่ค่า PF อาจเป็นแบบนำหน้าหรือตามหลังขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสของกำลังงานที่ทำให้เกิดงานรีแอกทีฟ ถ้ากำลังงานทั้งสองส่วนนี้ไหลไปในทิศทางเดียวกันค่า PF จะเป็นแบบตามหลังและถ้าไหลไปคนละทิศทาง ค่า PF จะเป็นแบบนำหน้า เนื่องจากตัวคาปาซิเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานรีแอกทีฟเพียงอย่างเดียวจึงมีค่า PF แบบ

นำหน้าสำหรับตัวเหนี่ยวนำมีค่า PF แบบตามหลัง ดังนั้นค่า PF เป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการนำกำลังไฟฟ้ามาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งการกำหนดกำลังโดยเฉลี่ย ในรูปที่ 3.3 คือ

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} p(t) dt = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} v_s(t) i_s(t) dt \quad (3.11)$$

การใช้ v_s จากสมการ (3.1) และ i_s จากสมการ (3.3) จะสังเกตได้ว่าอินทิกรัลของเทอม C ผลคูณแนวขวางทั้งหมดเป็นศูนย์ดังสมการ

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{2}V_s \sin \omega_1 t \cdot \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_1) dt = V_s I_{s1} \cos \phi_1 \quad (3.12)$$

หากสังเกตจะพบว่าส่วนประกอบของกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ไม่ได้มีส่วนของกำลังเฉลี่ยจากแหล่งแรงดันไซน์ชอยดัล v_s โดยกำลังปรากฏ S ที่พบเป็นผลที่ได้จากแรงดันอาร์เอ็มเอสของ V_s กับกระแสอาร์เอ็มเอสของ I_s ดังสมการ

$$S = V_s I_s \quad (3.13)$$

โดยเพาเวอร์แฟคเตอร์ PF ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับไซน์ชอยดัลที่สุดแสดงได้ดังในสมการที่ (3.14)

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.12) ถึง (3.14)

$$PF = \frac{V_s I_{s1} \cos \phi_1}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 \quad (3.15)$$

เพาเวอร์แฟคเตอร์ที่เคลื่อนที่ (DPF) ที่เป็นลักษณะเดียวกันกับเพาเวอร์แฟคเตอร์ในวงจรเชิงเส้นซึ่งมีแรงดันและกระแสไซน์ชอยดัล ถูกกำหนดเป็นโคไซน์ของมุม θ_1

$$DPF = \cos \phi_1 \quad (3.16)$$

ดังนั้นเพาเวอร์แฟคเตอร์ของกระแสที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์คือ

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} DPF \quad (3.17)$$

จากสมการ (3.16) จะสังเกตเห็นว่าการบิดเบี้ยวของรูปคลื่นกระแสส่งผลในรูปของ I_{s1}/I_s และ เพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อนำสมการ (3.17) แทนในสมการ (3.17) มีค่าเท่ากับ

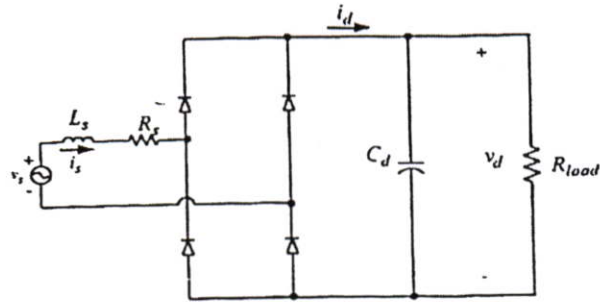
$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} DPF \quad (3.18)$$

ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่า PF ที่มีความบิดเบี้ยวไปจากรูปคลื่นมูลฐานสามารถหาได้จากสมการ (3.18)

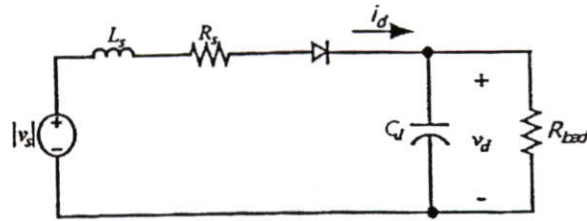
3.3 ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์แบบเฟสเดียว (Single-phase diode bridge rectifiers)

3.3.1 ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์ที่มีฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์

การทำงานของไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์แบบทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ที่มีคาปาซิเตอร์เป็นฟิลเตอร์ที่แรงดันดีซีเชื่อมโยงโดยจำลองแหล่งจ่ายยูทิลิตี้เป็นแรงดันไซน์ชอยดัล v_s พร้อมทั้งอิมพีแดนซ์ภายในซึ่งในทางปฏิบัติเป็นการเหนี่ยวนำเบื้องต้น ดังนั้นจึงแทนค่าด้วย L_s ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีการวิเคราะห์วงจรและสมมุติฐานเพื่อความเข้าใจในการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.4 เมื่อโหลดถูกแทนด้วยความต้านทานที่เทียบเท่า R_{load} และในวงจรนี้มีรีปเปลที่แรงดันคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปคลื่นของวงจรและมีการคำนวณที่ใช้ในการวิเคราะห์ภายใต้กระแสที่ไม่ต่อเนื่อง เงื่อนไขการทำงานของวงจรถูกตั้งสมมุติฐานเพื่อใช้ได้ในความไม่ต่อเนื่องของกระแส i_d ซึ่งคล้ายคลึงกับรูปคลื่นในรูปที่ 3.6(ข) ที่ i_d เป็นศูนย์และที่ v_s ทุกๆ ครึ่งรอบ หลังจากวงจรที่เทียบเท่าของรูปที่ 3.5 นำมาใช้เพื่อคำนวณแรงดันและกระแสในรูปที่ 3.6 สถานะของตัวแปรที่ถูกเลือกให้เป็นกระแสเหนี่ยวนำ i_d และแรงดันคาปาซิเตอร์ v_d ระหว่างในแต่ละครึ่งรอบของความถี่ในไลน์ที่มีช่วงแตกต่างกัน 2 ช่วงคล้ายกับรูปที่ 3.7(ค) เมื่อ $t_b = \theta_b/\omega$ และ $t_f = \theta_f/\omega$



รูปที่ 3.4 ไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์ที่มีฟิลเตอร์คาปาซิเตอร์



รูปที่ 3.5 วงจรที่เทียบเท่าของรูปที่ 3.4

(a) $t_b < t < t_f$ เมื่อกระแสไหลระหว่าง $t_b < t < t_f$ เมื่อ t_b เป็นจุดเริ่มต้นของการนำกระแสและ t_f เป็นเวลาการนำกระแสสุดท้ายดังสมการของความถี่ในไลน์

$$|v_s| = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} + v_d \quad (3.19)$$

และ

$$i_d = C_d \frac{dv_d}{dt} + \frac{v_d}{R_{load}} \quad (3.20)$$

เมื่อใช้กฎ KVL และ KCL เป็นกฎแรงดันและกระแสของ Kirchhoff การนำสมการที่กล่าวมาในข้างต้นมาจัดรูปแบบใหม่ในรูปของตัวแปร ระหว่าง $t_b < t < t_f$ จะได้

$$\begin{bmatrix} -\frac{di_d}{dt} \\ \frac{dv_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_d} & -\frac{1}{C_d R_{load}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ v_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} |v_s| \quad (3.21)$$

สถานะที่แปรผันของเวกเตอร์ x ประกอบด้วย i_d และ v_d ในรูปเมตริก คือ

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_d} & -\frac{1}{C_d R_{load}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

และ

$$b = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$x(t) = Mx(t - \Delta t) + N[|v_s(t)| - |v_s(t - \Delta t)|] \quad (3.24)$$

เมื่อ

$$M = \left[I - \frac{\Delta t}{2} A \right]^{-1} \cdot \left[I + \frac{\Delta t}{2} A \right]$$

$$N = \left[I - \frac{\Delta t}{2} A \right]^{-1} \frac{\Delta t}{2} b \quad (3.25)$$

(b) $t_f < t < t_b + \frac{1}{2}T$ ระหว่างช่วง $t_f < t < t_b + \frac{1}{2}T$ เมื่อบริดจ์เรกติไฟเออร์ไม่ถูกนำกระแส

$$i_d = 0$$

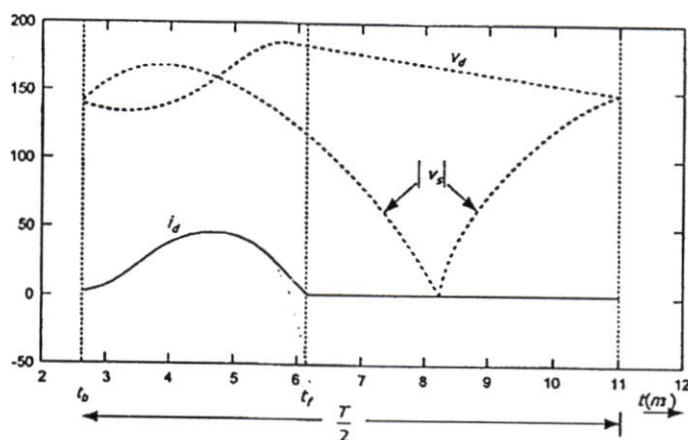
และ

$$\frac{dv_d}{dt} = -\frac{1}{C_d R_{load}} v_d \quad (3.26)$$

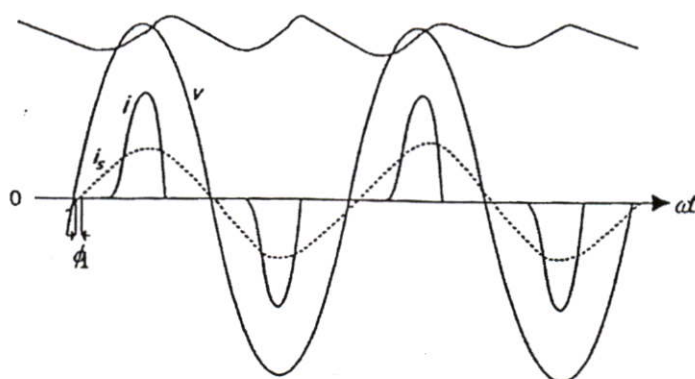
ดังนั้นจากสมการ (3.24) จะได้

$$v_d(t) = v_d(t_f) e^{-(t-t_f)/(C_d R_{load})} \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.32) และ (3.35) ต้องใช้เวลาคงที่ t_b ซึ่งเริ่มต้นการนำกระแส ค่า t_b ที่แท้จริงเป็นผลในการเริ่มต้นของการนำกระแสที่เป็นไปอย่างช้าๆ จากค่าที่ถูกเลือกเดิมจนกระทั่งได้ค่าที่แท้จริงภายในค่าที่ยอมรับได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 รูปคลื่นในวงจรเรียงกระแสของรูปที่ 3.4

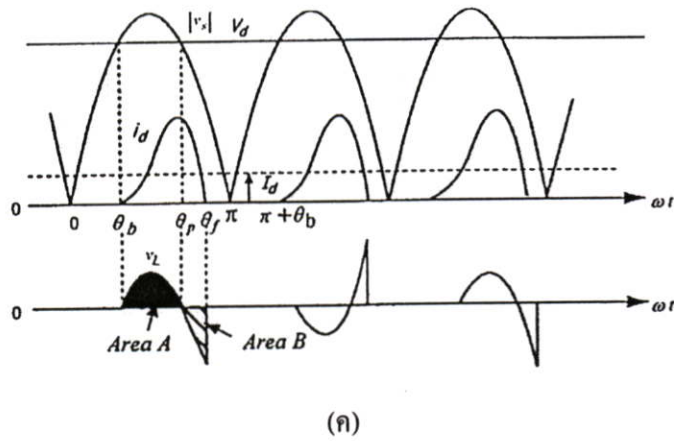
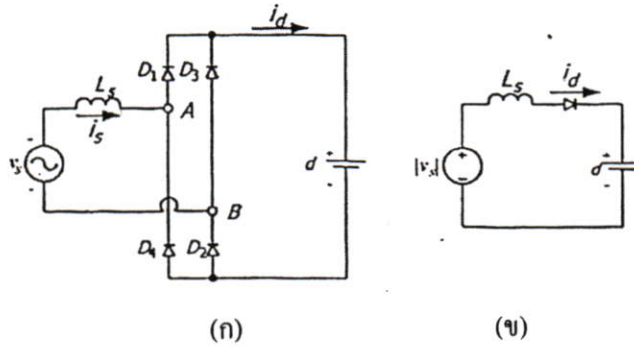
3.3.2 คุณสมบัติของเรกติไฟเออร์ที่ $v_d(t) = V_d$

จากวงจรในรูปที่ 3.7(ก) คือวงจรเรกติไฟ์ที่แรงดันดีซีเชื่อม โยงคงที่พร้อมกับคาปาซิเตอร์สถานะของวงจรกระแส i_d เท่ากับศูนย์ดังในรูปที่ 3.7(ค) ภายใต้สภาวะดังกล่าววงจรที่เทียบเท่าดังในรูปที่ 3.7(ข) จากรูปคลื่นในรูปที่ 3.7(ค) เมื่อค่า v_s มากกว่า V_d ที่ θ_b ไคโอดตัวที่ 1 และ 2 เริ่มนำกระแสไปสู่ค่าสูงสุดที่ θ_p ซึ่ง v_L จะเปลี่ยนเป็นลบ กระแสจะเป็นศูนย์ที่ θ_f เมื่อพื้นที่ Volt-second A และ B มีค่าเท่ากันหรือต่างมี

ค่าเท่ากับค่าคิดลบ กระแสยังคงเป็นศูนย์จนถึง $\pi + \theta_b$ และค่า V_d ที่ถูกกำหนด ค่าเฉลี่ย I_d ของกระแสดีซี โดย

- มุม θ_b สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_d = \sqrt{2}V_s \sin \theta_b \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.7 (ก) ร์คตีไฟเออร์ที่แรงดันดีซีเชื่อมโยงคงที่
(ข) วงจรเทียบเท่า
(ค) รูปคลื่น

จากรูปที่ 3.7(ค) แรงดันเหนี่ยวนำเริ่มต้นศูนย์ที่ θ_b และเปลี่ยนเป็นศูนย์ที่ θ_p ก่อนจะเป็นค่าลบจากความสมมาตรในรูปที่ 3.7(ค)

$$\theta_p = \pi + \theta_b$$

เมื่อเกิดการไหลของกระแสแรงดันเหนี่ยวนำ v_L จะถูกกำหนดโดย

$$v_L = L_s \frac{di_d}{dt} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) - V_d \quad (3.29)$$

และอินทิกรัลที่เกี่ยวข้องกับ ωt สามารถเขียนเป็น

$$\omega L_s \int_{\theta_b}^{\theta} di_d = \int_{\theta_b}^{\theta} (\sqrt{2}V_s \sin \omega t - V_d) d(\omega t) \quad (3.30)$$

เมื่อ $\theta > \theta_b$ จะได้ i_d ที่ θ_b เป็นศูนย์ ดังสมการที่ 3.38 จะได้ว่า

$$i_d(\theta) = \frac{1}{\omega L_s} \int_{\theta_b}^{\theta} (\sqrt{2}V_s \sin \omega t - V_d) d(\omega t) \quad (3.31)$$

มุม θ_f ซึ่ง i_d เป็นศูนย์ จากสมการ (3.38) คือ

$$0 = \int_{\theta_b}^{\theta_f} (\sqrt{2}V_s \sin \omega t - V_d) d(\omega t) \quad (3.32)$$

ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ A= พื้นที่ B ดังในรูปที่ 3.7(c)

ค่าเฉลี่ย I_d ของกระแสดีซีหาได้จากการอินทิเกรต $i_d(\theta)$ จาก θ_b ถึง θ_f และหารด้วย π

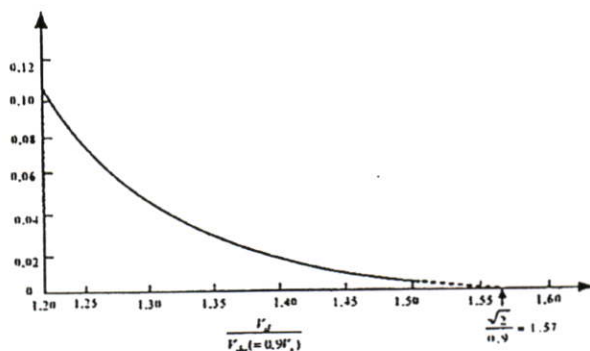
$$I_d = \frac{\int_{\theta_b}^{\theta_f} i_d(\theta) d\theta}{\pi} \quad (3.33)$$

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวงจรนั้น I_d จะขึ้นอยู่กับค่าของ V_d เพื่อนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 2 ในวิธีต่างๆ ไปให้ V_d เป็นแบบปกติโดย V_{do} และ I_d จาก $I_{short\ circuit}$ เมื่อ

$$I_{short\ circuit} = \frac{V_s}{\omega L_s} \quad (3.34)$$

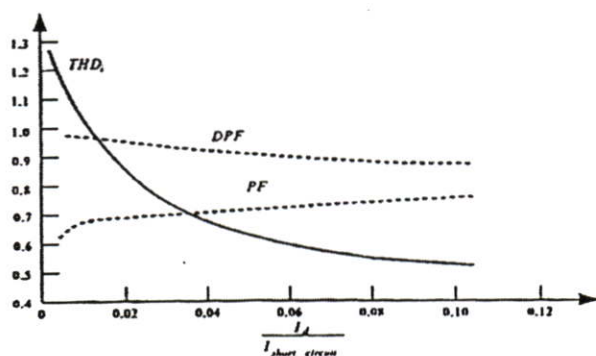
เป็นกระแสอาร์เอ็มเอสที่แหล่งแรงดันเอซี v_s ลัดวงจรไปสู่ L_s ผลที่ได้จากการปฏิบัติในข้างต้นที่กล่าวมานั้นถูกนำมาพล็อตในรูปที่ 3.8 เมื่อกระแสถึงศูนย์ ค่า V_d ไปสู่ค่าสูงสุดของแรงดันอินพุตเอซี

$$\frac{I_d}{I_{short\ circuit}} \left(= \frac{V_s}{\omega L_s} \right)$$

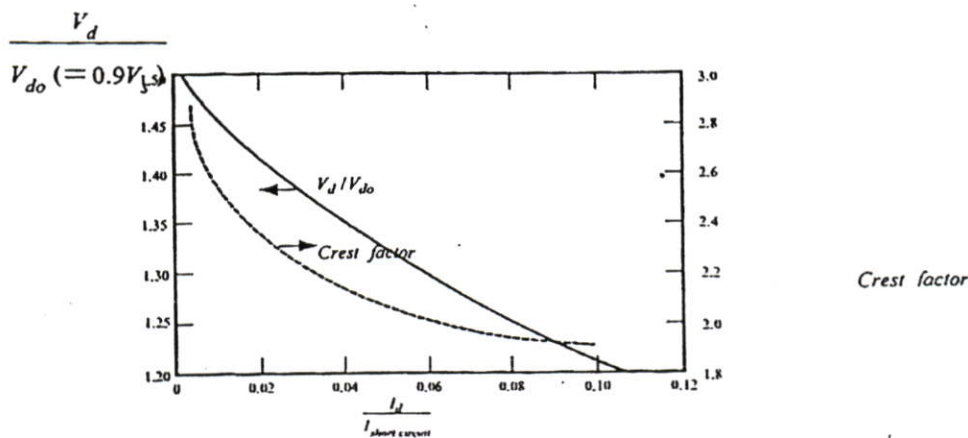


รูปที่ 3.8 I_d ต่อ V_d ในเรกติไฟเออร์รูปที่ 3.7(ก) กับแรงดันดีซีเชื่อมโยคกึ่งที่

การประมาณค่าของแรงดันดีซีเชื่อมโยคกึ่งที่ $v_d(t) = V_d$ อาจเป็นเหตุผลว่าวงจรที่สามารถใช้เป็นประโยชน์ได้มีสูงจากรูปที่ 3.7(ก) หากว่าโหลดถูกเปลี่ยนโดยความต้านทานที่เทียบเท่า R_{load} ในรูปที่ 3.4 ค่าคงที่เวลา $C_d R_{load}$ มากกว่าค่าเวลาของความถี่ในไลน์เป็นผลให้รีปเปิลมีขนาดเล็กมากใน v_d การประมาณเป็นการนำเสนอลักษณะของเรกติไฟเออร์ในแบบทั่วไปดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 เป็นการพล็อตฟังก์ชันของกระแสดีซี I_d สำหรับการกำหนดค่า I_d การเพิ่ม L_s ผลใน $I_{short\ circuit}$ ที่ต่ำและด้วยเหตุนี้ $I_d/I_{short\ circuit}$ ที่สูง ดังนั้นรูปที่ 3.9 และ 3.10 แสดงการเพิ่ม L_s เป็นผลในการปรับปรุงรูปคลื่น i_s ซึ่งมี THD ต่ำกว่าทำให้เพาเวอร์แฟกเตอร์ดีซีขึ้นและ Crest factor (ที่ปรับปรุง) ต่ำกว่า ตามรูป



รูปที่ 3.9 ค่าความผิดเพี้ยนรวมของฮาร์โมนิกส์ ค่า DPF และค่า PF ในเรกติไฟเออร์ของรูปที่ 3.7(ก) ซึ่งมีแรงดันดีซีเชื่อมโยคกึ่งที่



รูปที่ 3.10 V_d แบบปกติและ Crest factor ในเร็คตีไฟเออร์
ของรูปที่ 3.7(ก) ซึ่งมีแรงดันดีซีเชื่อม โยงคงที่

3.4 การปรับปรุงยูนิตคอนเวอร์เตอร์แบบเฟสเดียว

เพื่อเป็นการปรับปรุงยูนิตคอนเวอร์เตอร์ของอุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ดังนี้

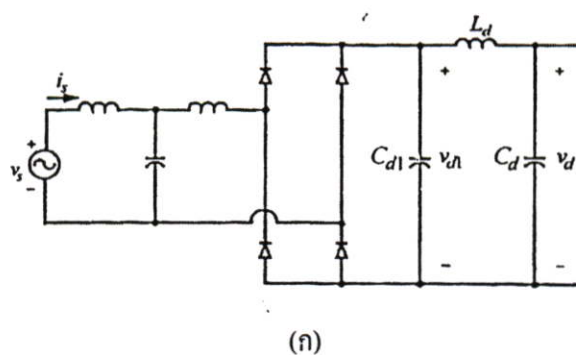
3.4.1 วงจรพาสซีฟ

ตัวเหนี่ยวนำและคาปาซิเตอร์ถูกนำมาใช้ในการเชื่อมไดโอดบริดจ์เร็คตีไฟเออร์เพื่อแก้ไขรูปคลื่นของกระแสจาก Utility Grid โดยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำใน ac side ของบริดจ์เร็คตีไฟเออร์ในรูปที่ 3.1 ผลที่ได้คือ ค่าอินดักแตนซ์ L_s ทำให้ ac side มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นการปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์และลดฮาร์มอนิกส์ ซึ่งผลกระทบของการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ สรุปได้ดังนี้

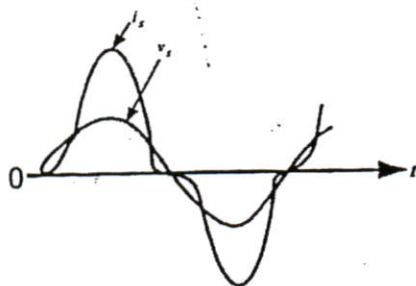
- เนื่องจากการแก้ไขรูปคลื่นกระแสเพาเวอร์แฟกเตอร์ถูกแก้ไขจากค่าต่ำที่ให้อยอมรับได้
- แรงดันเอาต์พุต V_d ขึ้นอยู่กับเอาต์พุตของโหลดและต่ำกว่ามาก (~10%) เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวเหนี่ยวนำ

- ตัวเหนี่ยวนำและ C_d ในรูปที่ 3.1 จากการออกแบบวงจรกรองแบบ Low pass filter ริปเปิลขดขดในแรงดันเอาต์พุตของเร็คตีไฟเออร์ V_d ที่มีค่าน้อย

- ประสิทธิภาพพลังงานยังคงเหมือนเดิม มีการเพิ่มการสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำ หากแต่ว่าการสูญเสียการนำในไดโอดน้อยมาก



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 พาสซีฟฟิลเตอร์ที่แก้ไขรูปคลื่น i_s

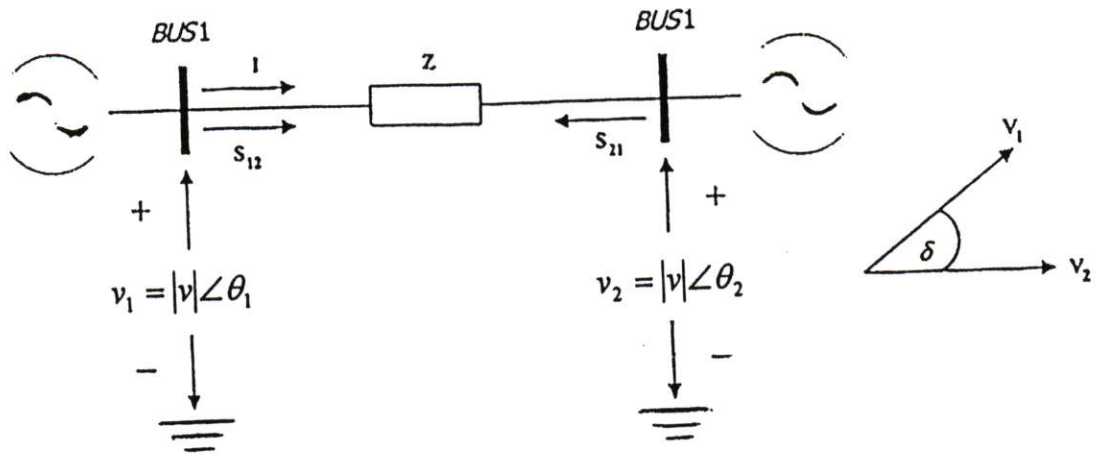
(ก) การจัดเรียงพาสซีฟฟิลเตอร์

(ข) รูปคลื่นของกระแส

มีความเป็นไปได้ว่าการแก้ไขรูปคลื่นกระแสอินพุตของรูปที่ 3.11(ข) จากการจัดเรียงวงจรในรูปที่ 3.11 (ก) ที่ประกอบด้วย C_{d1} ในบริจรีคิตไฟเออร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ C_d ซึ่งยอมให้เกิดริบเปิลใน V_{d1} แต่ผลในรูปคลื่นที่แก้ไข i_s ริบเปิล V_{d1} ถูกกรองออกจากวงจรแบบ Low pass filter ที่ประกอบด้วย L_d และ C_d ข้อเสียของการจัดเรียงเช่นนี้ คือ ต้นทุน ขนาด การสูญเสีย ที่ขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของแรงดันดิซีเชื่อมต่อ V_d ในวงจรกำลัง

3.5 ทฤษฎีพื้นฐานการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ทางเวกเตอร์การทำงานทั้ง 2 โหมด ได้อาศัยทฤษฎีการจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 2 บัส มาเปรียบเทียบให้เห็นดังนี้



(ก) แสดงการส่งกำลังไฟฟ้าระหว่าง 2 บัส

(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

รูปที่ 3.12 หลักการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่าง 2 บัส

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า โดยมีทิศทางการไหลของกระแสและกำลังไฟฟ้าตามรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นวงไลน์ไดอะแกรมแทนระบบส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัส 1 กับบัส 2 และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งเป็น $Z = R + jx$ ต่ออยู่ระหว่างบัสทั้งสอง ซึ่งมีสมการในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

$$S_{12} = P_{12} + jQ_{12} = V_1(I^*) \quad (3.35)$$

$$S_{21} = P_{21} + jQ_{21} = V_2(-I^*) \quad (3.36)$$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{Z} \quad (3.37)$$

โดย

- S_{12} = คือ กำลังไฟฟ้ายรวมที่ไหลจากบัส 1 ไป บัส 2
- S_{21} = คือ กำลังไฟฟ้ายรวมที่ไหลจากบัส 2 ไป บัส 1
- P_{12} = คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส 1 ไป บัส 2
- P_{21} = คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส 2 ไป บัส 1
- Q_{12} = คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลจากบัส 1 ไป บัส 2
- Q_{21} = คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลจากบัส 2 ไป บัส 1
- V_1, V_2 = คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 และบัส 2 ตามลำดับ
- I = คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส 1 ไป บัส 2

Z = คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

จากสมการที่ (3.35) และ (3.37) ได้

$$S_{12} = V_1 \left(\frac{V_1^* - V_2^*}{Z^*} \right)$$

$$S_{12} = \frac{|V_1|^2 - |V_1||V_2| \angle \theta_2 - \theta_1}{R - jX} \quad (3.38)$$

กำหนดให้ $\theta_1 - \theta_2 = \delta$

เมื่อ δ คือ มุมเฟาเวอร์แองเกิล (Power angle) ซึ่งเป็นมุมต่างเฟสกันระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองจะได้สมการดังนี้

$$P_{12} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_1|^2 - R|V_1||V_2| \cos \delta + X|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (3.39)$$

$$Q_{12} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_1|^2 - X|V_1||V_2| \cos \delta - R|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (3.40)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$P_{21} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_1|^2 - R|V_1||V_2| \cos \delta - X|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (3.41)$$

$$Q_{21} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_1|^2 - X|V_1||V_2| \cos \delta + R|V_1||V_2| \sin \delta) \quad (3.42)$$

ซึ่งโดยทั่วไป $X \gg R$

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta \quad (3.43)$$

$$Q_{12} = \frac{|V_1|^2 - |V_1||V_2|}{X} \cos \delta \quad (3.44)$$

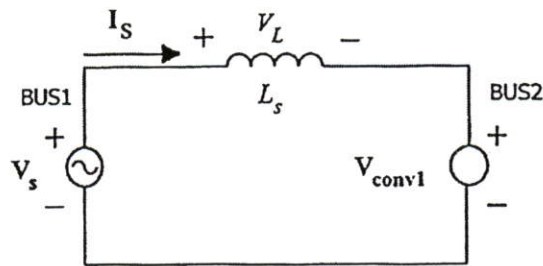
$$P_{21} = -\frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta \quad (3.45)$$

$$Q_{21} = \frac{|V_2|^2 - |V_1||V_2|}{X} \cos \delta \quad (3.46)$$

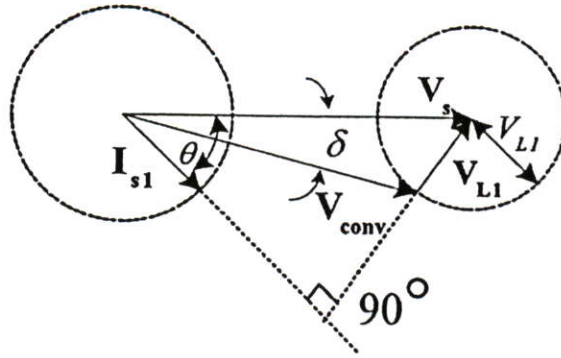
จากรูปที่ 3.12 เมื่อต้องการส่งกำลังไฟฟ้าจาก บัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 หรือจากบัสที่ 2 ไปยังบัสที่ 1 ในการส่งกำลังไฟฟ้านี้สามารถใช้วิธีควบคุมมุม δ ตามสมการที่ (3.43) และ (3.45) [8]

3.5.1 หลักการการควบคุมวงจรแปลงผันที่พลังงานไหลได้ 2 ทิศทาง

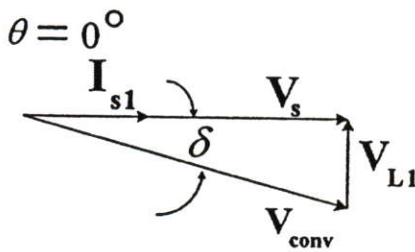
ในการควบคุมการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 3.13 เพื่อแปลงผัน V_s ให้เป็น V_{conv1} และวงจรเปลี่ยนผันไฟกระแสสลับให้เป็นไฟกระแสตรงอีกทั้งยังสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้และยังสามารถที่จะส่งกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทางตามหลักการที่ได้นำเสนอข้างต้นและเมื่อวิเคราะห์หลักการการส่งกำลังไฟฟ้าของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ จากรูปวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.13 ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่าง 2 บัส ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายสองแหล่งโดยบัสที่ 1 คือ V_s และบัสที่ 2 คือ V_{conv1} ดังแสดงในรูปที่ 3.13 [1][5][7]



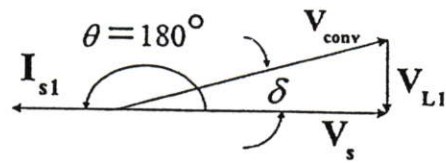
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่ส่งกำลัง 2 บัส



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.14 การเรกติไฟร์ และการอินเวอร์เตอร์

- (ก) เฟสเซอร์ไคอะแกรมทั่วไป
- (ข) เรกติไฟส์ที่ $PF = 1$
- (ค) อินเวอร์เตอร์ $PF = -1$

จากรูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางเวกเตอร์นั้นสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3.14(ก) ซึ่งเป็นเฟสเซอร์ไคอะแกรมทั่วไปของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$v_s = v_{conv} + v_L$$

$$v_L = L_s \frac{di_s}{dt}$$

เมื่อกำหนดให้ V_s เป็นรูปไซน์และเป็นค่าอ้างอิง พิจารณาที่องค์ประกอบมูลฐานจะได้ว่า

$$V_s = V_{conv1} + V_L$$

$$V_L = j\omega L_s I_{s1}$$

$$-V_{conv1} \sin(-\delta) = V_{conv1} \sin \delta \quad (3.47)$$

$$V_s - V_L \sin \theta = V_{conv1} \sin \delta \quad (3.48)$$

$$V_L \sin(90^\circ - \theta) = V_L (\sin 90^\circ \cos \theta - \cos 90^\circ \sin \theta) = V_L \cos \theta \quad (3.49)$$

$$V_L \cos(90^\circ - \theta) = V_L (\cos 90^\circ \cos \theta - \sin 90^\circ \sin \theta) = V_L \sin \theta \quad (3.50)$$

จากรูปที่ 3.14 (ก) จะได้

$$V_{L1} \cos \theta = \omega L_s I_{s1} \cos \theta = V_{conv1} \sin \delta \quad (3.51)$$

$$V_L \sin \theta = \omega L_s I_{s1} \sin \theta = V_{conv1} \cos \delta \quad (3.52)$$

จากสมการ (3.59) และ (3.60) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$I_{s1} \cos \theta = \frac{V_{conv1} \sin \delta}{\omega L_s} \quad (3.53)$$

$$I_{s1} \sin \theta = \frac{V_s - V_{conv1} \cos \delta}{\omega L_s} \quad (3.54)$$

จาก $P = V_s I_{s1} \cos \theta \quad (3.55)$

$$Q = V_s I_{s1} \sin \theta \quad (3.56)$$

นำสมการ (3.53) แทนในสมการ (3.55) และสมการ (3.54) แทนในสมการ (3.56) จะได้

Real Power

$$P = \frac{V_s (V_{conv1} \sin \delta)}{\omega L_s} = \frac{V_s^2 (V_{conv1} \sin \delta)}{\omega L_s V_s} \quad (3.57)$$

Reactive Power

$$Q = \frac{V_s (V_s - V_{conv1} \cos \delta)}{\omega L_s} = \frac{V_s^2 (1 - V_{conv1} \cos \delta)}{\omega L_s V_s} \quad (3.58)$$

Mode Rectifier

กำลังไฟฟ้าจริง (P) ที่ถูกจ่ายจากแหล่งจ่าย (AC) ไปยัง converter หรือกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 (P_{12}) คือ

$$P_{12} = V_s I_s \cos \theta \quad (3.59)$$

เมื่อ $V_{L1} \cos \theta = \omega L_s I_{s1} \cos \theta = V_{conv1} \sin \theta$ จะได้

$$P_{12} = \frac{(|V_s| |V_{conv1}| \sin \delta)}{X_L} = \frac{V_s^2 (V_{conv1} \sin \delta)}{\omega L_s V_s} = \frac{|V_1| |V_2| \sin \delta}{X_L} \quad (3.60)$$

กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจากแหล่งจ่าย (AC) ไปยัง converter หรือกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลจากบัส 1 ไปบัส 2 (Q_{12}) คือ

$$Q_{12} = V_s I_s \sin \theta \quad (3.61)$$

เมื่อ $V_s - \omega L_s \sin \theta = V_{conv1} \cos \delta$ จะได้

$$Q_{12} = \left(\frac{|V_s|^2 - |V_s| |V_{conv1}| \cos \delta}{X_L} \right) = \frac{|V_1|^2 - |V_1| |V_2| \cos \delta}{\omega L_s} \quad (3.62)$$

จาก

$$v_s = v_L + v_{conv1}$$

ฉะนั้น

$$I_{s1} = \frac{V_s - V_{conv1}}{j\omega L_s} \quad (3.63)$$

Mode Inverter

$$P_{21} = -P_{12}$$

เพราะฉะนั้น

$$I_s = \frac{V_{conv1} - V_s}{j\omega L_s} \quad (3.64)$$

จากการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ทางเวกเตอร์ของทั้ง 2 โหมดการทำงาน กับทฤษฎี 2 บัส เป็นจริงตามสมการที่แสดง เพราะฉะนั้นสมการที่นำไปใช้ในการควบคุมสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์คือ

$$P = V_s I_{s1} \cos \theta \quad (3.65)$$

$$P = \frac{(|V_s||V_{conv1}|\sin \delta)}{X_L} = \frac{V_s^2 (V_{conv1} \sin \delta)}{\omega L_s V_s} = \frac{|V_1||V_2|\sin \delta}{X_L} \quad (3.66)$$

$$Q = V_s I_{s1} \sin \theta \quad (3.67)$$

$$Q = \frac{(|V_s|^2 - |V_s||V_{conv1}|\cos \delta)}{X_S} = \frac{(|V_1|^2 - |V_1||V_2|\cos \delta)}{\omega L_s} \quad (3.68)$$

จะได้

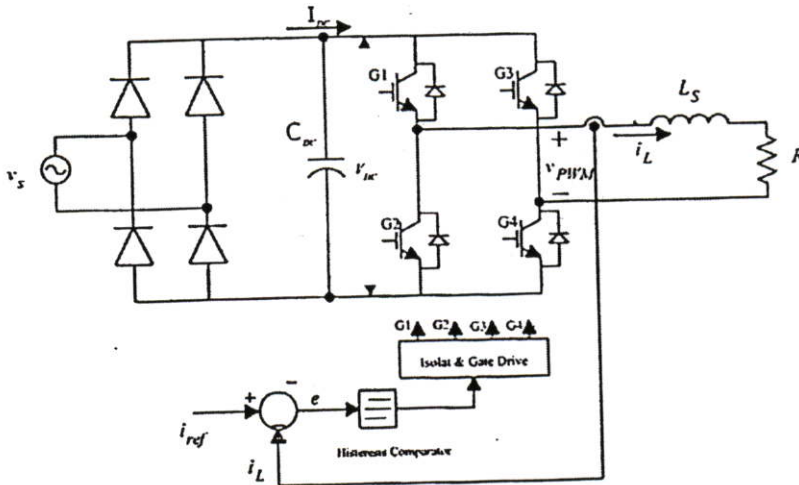
$$I_{s1} = \frac{V_s - V_{conv1}}{j\omega L_s} \quad (3.69)$$

ดังนั้นในการควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ส่งถ่ายต้องทำการควบคุมกระแส I_{s1} โดยได้นำเทคนิคของ Adaptive Current Control มาควบคุม ในการทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ต้องมีการออกแบบความถี่สวิตช์เพื่อให้เหมาะกับการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่มีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำในวงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์เพื่อความเหมาะสมกับระบบ

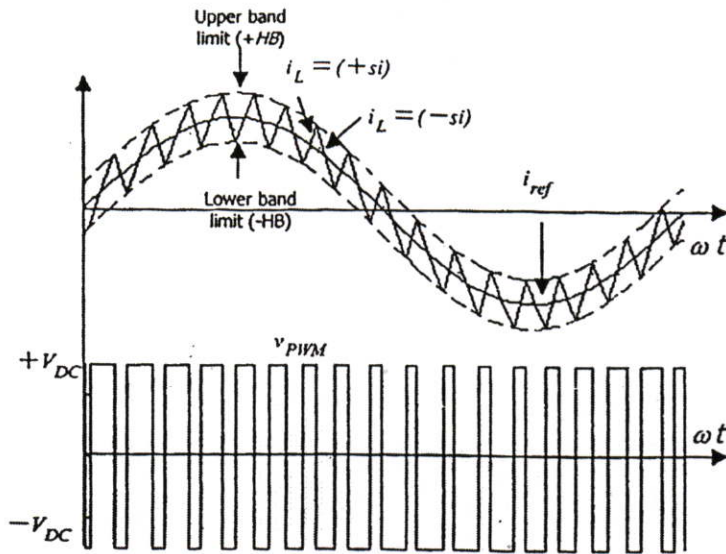
ในการนำสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายชนิด ดังตัวอย่างเช่น ในการเบรคมอเตอร์แบบ Regenerative กำลังไฟฟ้าจะไหลผ่าน Converter แบบ Reverse ที่ต่อกับระบบการไฟฟ้าซึ่งพลังงานจลน์จากแรงเฉื่อยของ Motor และ load จะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าและไหลย้อนกลับสู่การไฟฟ้าโดยใช้ Switch-Mode Converter ขณะที่ทำงานในโหมดเรกติไฟร์ พลังงานจะไหลจากด้าน AC ไปยัง DC และขณะที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ พลังงานจะไหลจากด้าน DC ไปยัง AC ในการควบคุมการไหลของพลังงานนั้น จะใช้วิธีการคุมกระแสให้อินเฟสหรือเอาท์เฟสกับแรงดันคั้งนั้นและวิธีการควบคุมกระแสยังปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ให้เข้าใกล้หนึ่งอีกด้วย

3.6 เทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสแบบ (Adaptive Hysteresis band current control)

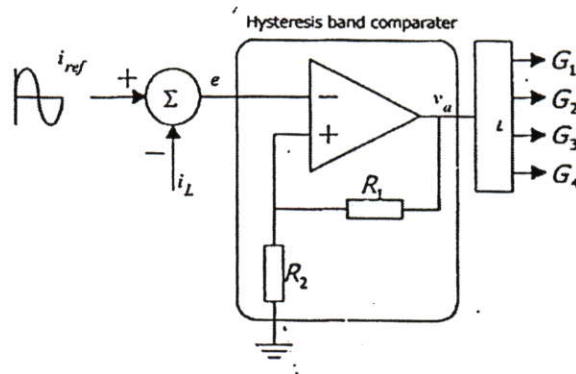
จากหลักการ การสร้างสัญญาณ พัลส์บวกลวเอ็ม (PWM) เพื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter) หรือ VSI โดยใช้เทคนิคสัญญาณไซน์เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม และยังมีอีกวิธีที่สามารถควบคุมอินเวอร์เตอร์ได้เหมือนกันคือ เทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส (Adaptive Hysteresis band current control) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส โดยเทคนิคนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญหลายส่วนด้วยกัน คือส่วนแรกคืออินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ขับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงโดยอุปกรณ์ที่อาจจะเป็น ไอจีบีที (IGBT) หรือ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) แล้วแต่จะเลือกใช้ตามคุณสมบัติของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเพื่อให้เหมาะกับงาน โดยในส่วนของอินเวอร์เตอร์นี้จะมีลักษณะการต่อได้ 2 แบบคือแบบฮาร์ฟบริดจ์และแบบฟูลบริดจ์โดยการต่อแบบฮาร์ฟบริดจ์จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันเอาต์พุตที่ต่อแบบฟูลบริดจ์ ส่วนที่สองคือโหลดตัวเหนี่ยวนำ (Inductor load) เนื่องจากการควบคุมเช่นนี้ต้องมีโหลดตัวเหนี่ยวนำต่อตลอดเวลาเพราะจะอาศัยหลักการพื้นฐานของการอินทิเกรตกระแส (i_L) ตามสูตร $i_L = \frac{1}{L} \int v_L dt$ เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากกระแสรูปสี่เหลี่ยมให้เป็นกระแสรูปสามเหลี่ยมไปใช้ในการควบคุมเพื่อให้ติดตามสัญญาณอ้างอิงดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป ส่วนที่สามเป็นส่วนการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขต ฮิสเตอร์รีซิสในบล็อกนี้จะประกอบไปด้วยวงจรถบ โดยจะนำสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_{ref}) มาทำการลบกับกระแสโหลด (i_L) ที่ตรวจจับได้ โดยใช้ฮอปเฟล็ก จะได้ผลลัพธ์คือสัญญาณเออร์เรอร์ (e) เพื่อนำสัญญาณนี้ไปเปรียบเทียบกับแบบฮิสเตอร์รีซิส เพื่อให้ได้สัญญาณ PWM ไปขับอุปกรณ์สวิตช์



รูปที่ 3.15 แสดงรูปบล็อกโคแระกรมเทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส



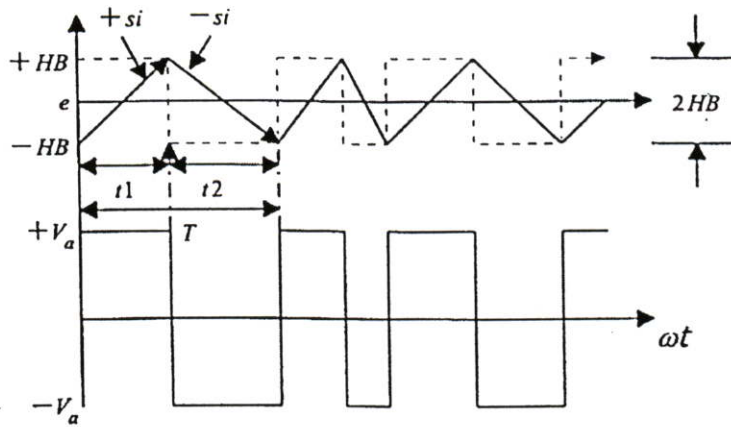
รูปที่ 3.16 แสดงรูปคลื่นกระแสแรงดันเอาต์พุต PWM และสัญญาณเทคนิคการควบคุมแบบติดตาม
ขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส



รูปที่ 3.17 แสดงวงจรการควบคุมการเปรียบเทียบเทคนิคการควบคุมแบบติดตาม
ขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส

3.6.1 หลักการทำงานของ การเปรียบเทียบแบบขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส

จากรูปที่ 3.17 จะเป็น โครงสร้างทั้งหมดของการควบคุมที่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส โดยในส่วนของวงจรเปรียบเทียบฮิสเตอร์รีซิสนั้นจะใช้โอปแอมป์เพียงหนึ่งตัว ในการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณเออร์เรอร์ (e) กับสัญญาณที่ลดระดับแรงดัน v_d ตามหลักการแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ตามรูปที่ 3.1 หรือเรียกว่าสัญญาณฮิสเตอร์รีซิส ลักษณะการเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีซิสแบบ โดยมีหลักการดังนี้

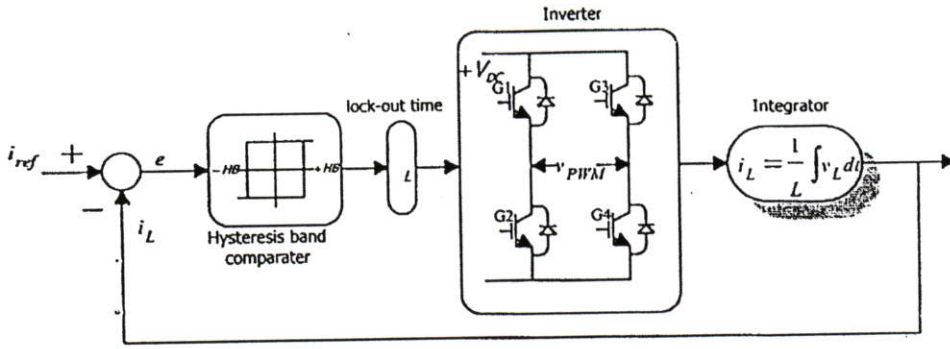


รูปที่ 3.18 การเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเออร์เรอร์ (e) กับสัญญาณฮิสเตอร์รีซิส (HB)

จากรูปคลื่นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเออร์เรอร์ (e) กับสัญญาณฮิสเตอร์รีซิส (HB) โดยสัญญาณฮิสเตอร์รีซิสจะประกอบด้วยขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสล่างกับขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสบน ดังนั้นขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis band) มีค่าเท่ากับ

$$2HB = \frac{V_a R_2}{R_2 + R_1} \quad (3.70)$$

จากรูปที่ 3.18 เมื่อสัญญาณเออร์เรอร์ (e) มีค่ามากกว่าสัญญาณฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตบน ($+HB$) แรงดันเอาต์พุตออปเปอร์แอม v_a จะมีค่าเท่ากับ $-v_a$ ทำให้สัญญาณฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตบน ($+HB$) เปลี่ยนเป็นสัญญาณฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตล่าง ($-HB$) ทันที หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง สัญญาณเออร์เรอร์ (e) วัจนขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตบนสวิทช์จะเปลี่ยนเป็นลบทำให้ชุดสวิทช์ IGBT G_2, G_3 ทำงานได้แรงดันเอาต์พุต v_{pwm} เป็นลบ $-V_{DC}$ เป็นผลให้กระแสเอาต์พุตมีความชันเป็นลบ $-si$ เมื่อสัญญาณกระแสถูกอินทิเกรต และเมื่อสัญญาณเออร์เรอร์ (e) มีค่าน้อยกว่าสัญญาณฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตล่าง ($-HB$) แรงดันเอาต์พุตออปเปอร์แอมป์ จะมีค่าเท่ากับ $+v_a$ ดังนั้นสัญญาณฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตล่าง ($-HB$) จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตบน ($+HB$) ทันที หรือสัญญาณเออร์เรอร์ (e) วัจนขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสขอบเขตล่างสวิทช์จะเปลี่ยนเป็นบวกทำให้ชุดสวิทช์ IGBT G_1, G_4 ทำงานได้แรงดันเอาต์พุต v_{pwm} เป็นบวก $+V_{DC}$ ทำให้กระแสเอาต์พุตมีความชันเป็นบวก $+si$ เมื่อสัญญาณกระแสถูกอินทิเกรต ดังนั้นในการกำหนดขนาดขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสสามารถกำหนดได้จากค่า R_1 และ R_2 ถ้าขอบเขตขี้น้อยค่าความถี่สวิทช์จะมากขึ้นตามในทางกลับกันถ้าขอบเขตขี้น้อยค่าความถี่สวิทช์จะน้อย

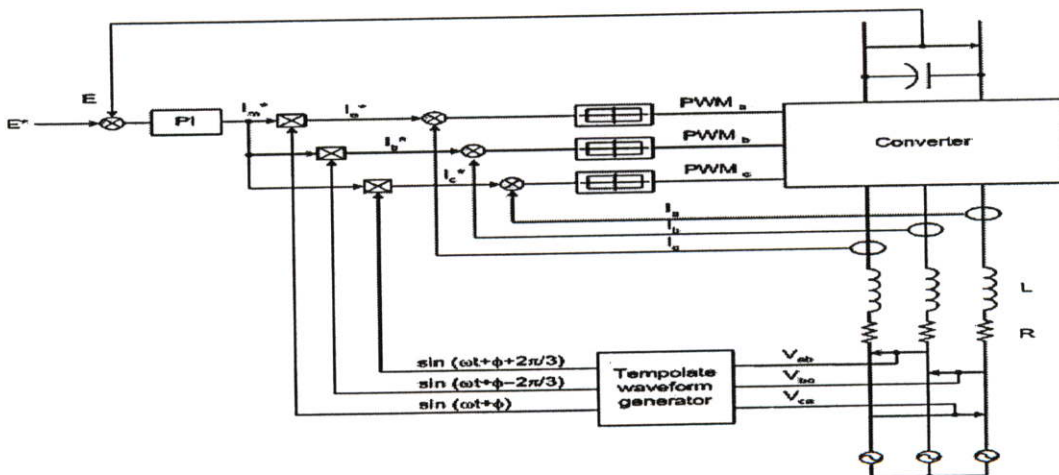


รูปที่ 3.19 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมเทคนิคการควบคุมแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส

จากนั้นก็เกิดเหตุการณ์ในลักษณะซ้ำๆ เดิมอีกครั้ง ดังนั้นสัญญาณกระแสป้อนกลับ i_L จะออกซีสเลตอยู่ในความกว้างของขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสและถ้าขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสนั้นมีช่องแคบ ก็จะทำให้ i_L เข้าใกล้ i_{ref} มากขึ้นดังนั้นในการควบคุมขนาดกระแสอ้างอิงของสัญญาณไซน์อ้างอิง ก็จะควบคุมกระแสไหลด้วยคุณสมบัติการควบคุมแบบควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส (Adaptive Hysteresis band current control) นี้จึงสามารถควบคุมกระแสไหลได้

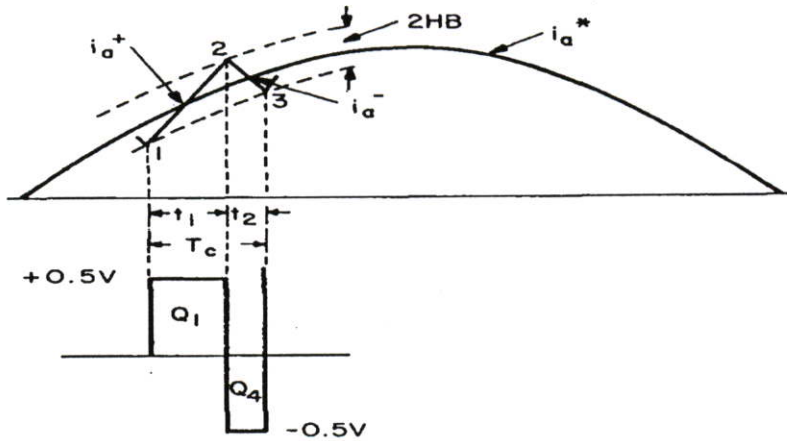
3.7 การวิเคราะห์หลักการทำงานเทคนิคการควบคุมกระแสแบบการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส

เทคนิค PWM นี้สามารถควบคุมกระแสโดยขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสโดยจะใช้การควบคุมกระแสลักษณะติดตามสัญญาณอ้างอิงตามรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมเทคนิคการควบคุมกระแสแบบการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส

ในการควบคุมกระแสที่ใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส โดยจะมีสัญญาณอ้างอิง i_{ref} ที่มีทั้งขนาดและความถี่ตามต้องการเพื่อนำมาลบกระแสที่ตรวจจับได้จริง เพื่อให้ได้สัญญาณเออร์เรอร์ นำไปเปรียบเทียบกับฮิสเตอร์รีซิส โดยเมื่อสัญญาณกระแส i_L วิ่งชนขอบเขตบนที่กำหนดไว้ อุปกรณ์สวิตช์ IGBT (Q_1) จะทำงานได้แรงดันเอาต์พุต PWM เป็น $-V_{dc}$ และเมื่อกระแสวิ่งชนขอบเขตบน อุปกรณ์สวิตช์ IGBT (Q_4) จะทำงานได้แรงดันเอาต์พุต PWM เป็น $+V_{dc}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 หลักการทำงานการเกิดรูปคลื่น PWM โดยใช้กระแสแบบการติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส

3.7.1 การวิเคราะห์และออกแบบ Adaptive current control

จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ในควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM เทคนิคที่ใช้ควบคุมกระแส นั้นคือแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส ในการวิเคราะห์เทคนิคนี้มีการวิเคราะห์อยู่สองสถานะ คือเมื่อกระแส i_L^+ เดินทางจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 โดยกระแส i_L จะวิ่งจากขอบเขตล่างไปหาขอบเขตบน ทำให้ความชันของกระแสเป็นบวก และจากจุดที่ 2 ไปยังจุดที่ 3 กระแส i_L^- มีความชันเป็นลบ จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.21 สามารถที่จะเขียนเป็นสมการที่เกิดจากการสวิตช์ที่เวลา t_1 และ t_2 โดยที่เวลา t_1 อุปกรณ์กำลัง IGBT Q_1 ทำงานดังสามารถเขียนสมการได้

$$L \frac{di_L^+}{dt} = 0.5V_B \quad (3.71)$$

และเมื่อเวลา t_2 อุปกรณ์ กำลัง IGBT Q_4 ทำงาน

$$L \frac{di_L^-}{dt} = -0.5V_B \quad (3.72)$$

ดังนั้นเมื่อนำ $t_1 + t_2$ จะได้

$$\frac{di_L^+}{dt} + \frac{di_L^-}{dt} = 0 \quad (3.73)$$

เมื่อค่า

- L = ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับโหลด
- i_L^+ = กระแสของโหลดที่มีความชันเป็นบวกเมื่อกระแสเดินทางขนบเขต HB^+
- i_L^- = กระแสของโหลดที่มีความชันเป็นลบเมื่อกระแสเดินทางขนบเขต HB^-
- HB^+ = ฮิสเตอร์รีซิสแบนขอบเขตบน
- HB^- = ฮิสเตอร์รีซิสแบนขอบเขตล่าง
- i_{ref} = กระแสอ้างอิง

จากหลักการตรีโกณมิติในรูปที่ 3.21 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{di_L^+}{dt} t_1 - \frac{di_{ref}}{dt} t_1 = 2HB \quad (3.74)$$

$$\frac{di_L^-}{dt} t_2 - \frac{di_{ref}}{dt} t_2 = -2HB \quad (3.75)$$

$$t_1 + t_2 = T_C = \frac{1}{f_c} \quad (3.76)$$

เมื่อ t_1 และ t_2 คือเวลาในการสวิตช์ของ IGBT และ f_c คือความถี่สวิตช์ซึ่งเมื่อนำสมการ (3.74) และสมการ (3.75) มาบวกกันแล้วแทนในสมการ (3.76) สามารถเขียนได้

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} + t_2 \frac{di_L^-}{dt} - \frac{1}{f_c} \frac{di_{ref}}{dt} = 0 \quad (3.77)$$

แล้วนำสมการ (3.75) ลบกับสมการ (3.74) จะได้

$$t_1 \frac{di_L^+}{dt} - t_2 \frac{di_L^-}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_{ref}}{dt} = 4HB \quad (3.78)$$

นำสมการ (3.73) แทนในสมการ (3.78) จะได้

$$(t_1 + t_2) \frac{di_L^+}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_{ref}}{dt} = 4HB$$

$$\frac{1}{f_c} \frac{di_L^+}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_{ref}}{dt} = 4HB \quad (3.79)$$

เมื่อนำสมการ (3.73) แทนในสมการ (3.77)

$$t_1 - t_2 = \frac{\left(\frac{di_{ref}}{dt} \right)}{f_c \left(\frac{di_L^+}{dt} \right)} \quad (3.80)$$

เมื่อนำสมการ (3.80) แทนในสมการ (3.79) จะได้ว่า

$$\frac{1}{f_c} \left[\frac{di_L^+}{dt} - \frac{\left(\frac{di_{ref}}{dt} \right)^2}{\frac{di_L^+}{dt}} \right] = 4HB \quad (3.81)$$

เมื่อนำสมการ (3.71) แทนในสมการ (3.81) จะได้

$$\frac{0.125V_B}{f_c L} \left[1 - \frac{4m^2 L^2}{V_B^2} \right] = HB \quad (3.82)$$

ดังนั้น f_c มีค่าเท่ากับ

$$\frac{0.125V_B}{(HB)L} \left[1 - \frac{4m^2 L^2}{V_B^2} \right] = f_c \quad (3.83)$$

เมื่อกำหนดให้ $m = \frac{di_{ref}}{dt}$ คือความชันของกระแสอ้างอิง

จากสมการที่ (3.82) คือฟังก์ชันของฮิสเตอร์รีซิสเบน นั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของ m และแหล่งจ่าย V_B และความถี่สวิตซ์ซึ่ง f_c ในสมการ (3.83) เหมาะสำหรับการควบคุมแบบฟีดแบ็ค

เมื่อ $i_{ref} = I_m \sin \omega t$

ดังนั้น

$$m^2 = \left[\frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} \right]^2 = 0.5 \omega^2 I_m^2 (1 + \cos 2\omega t)$$

จากสมการ (3.83) มีความสัมพันธ์กับความถี่สูงสุดและความถี่ต่ำสุดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{0.125V_B}{(HB)L} = f_{C_{\max}} \quad \text{ที่} \quad \omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \quad (3.84)$$

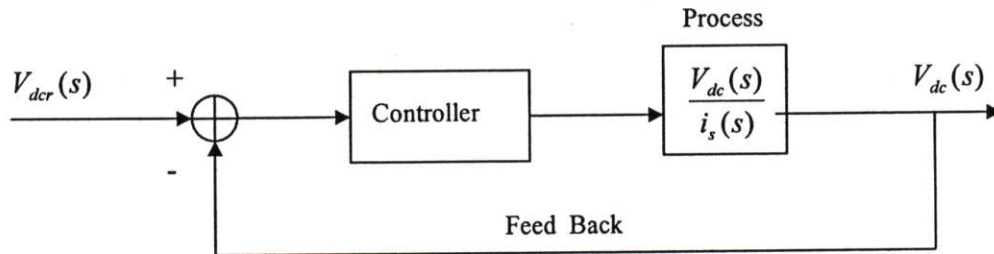
และ

$$\frac{0.125V_B}{(HB)L} \left[1 - \frac{4\omega^2 I_m^2 L^2}{V_B^2} \right] = f_{C_{\min}} \quad \text{ที่} \quad \omega t = 0, \pi \quad (3.85)$$

เมื่อควบคุมฮิสเตอร์รีซิสเบนให้คงที่นั่นที่ ความถี่สูงสุด $f_{C_{\max}}$ เมื่อ m เท่ากับ 0 ที่ $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ เรเดียน และที่ความถี่ต่ำสุด $f_{C_{\min}}$ เมื่อ m เท่ากับ $\omega t = 0, \pi$ ที่เรเดียน [41]

3.7.2 การวิเคราะห์และจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับ

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทั่วไปมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ต้องมีการคำนวณหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์แบบที่มีการป้อนกลับ ในการควบคุมนั้นจะประกอบด้วยตัวควบคุมและกระบวนการการทำงาน (Process) ของระบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่าง i_s กับ V_{dc} ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรม [2]



รูปที่ 3.22 บล็อกไดอะแกรมทั่วไปของการควบคุมแบบที่มีการป้อนกลับ

จากรูปที่ 3.22 สามารถเขียนสมการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ เมื่อทำการปรับแต่งกระแสทางด้านอินพุต i_s จะมีผลต่อแรงดันกระแสตรงเชื่อมโยง (V_{dc}) เมื่อสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทำงานอยู่ในโหมคเร็คติไฟลิ่ง เมื่อเพิ่มปริมาณขนาดของกระแสอินพุตให้มาก จะทำให้แรงดันตกคร่อมในตัวคาปาซิเตอร์มากเนื่องมาจากการสะสมพลังงานในตัวคาปาซิเตอร์ ดังนั้นสามารถเขียนสมการถ่ายโอนได้ โดย อาศัยหลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจาก V_s ไปสู่ V_{dc} แล้วทำการตรวจสอบ

ผลการตอบสนองทางด้านเวลาของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยเหตุนี้สามารถพิจารณาสมมติให้ระบบของ สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพ 100% และอีกทั้งยังต้องมองข้ามผลกระทบของแรงดันรีปเปล ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าทางด้าน V_s ไปสู่ V_{dc} สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ [2]

$$V_s i_s = \frac{V_{dc}^2}{R} + CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.86)$$

$$\text{กำหนดให้ } R = \frac{V_{dc}}{I_L}$$

$$V_s i_s - \frac{V_{dc}^2}{R} = CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.87)$$

$$\frac{V_s i_s}{CV_{dc}} - \frac{V_{dc}}{CR} = \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.88)$$

เพื่อจัดรูปสมการให้ง่ายต่อการแก้ปัญหาของระบบคณิตศาสตร์ กำหนดให้ V_{dc} บางตัวอยู่ในรูปของ ค่าคงที่โดยกำหนดค่า V_{dc} คือค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$\frac{V_s i_s}{CV_{dc}} - \frac{V_{dc}}{CR} = \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.89)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการ (3.89) เพื่อที่ให้ง่ายต่อการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เชิงเส้นและง่ายต่อการ หาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{V_s I_s(s)}{CV_{dc}} - \frac{V_{dc}(s)}{RC} = sV_{dc}(s) \quad (3.90)$$

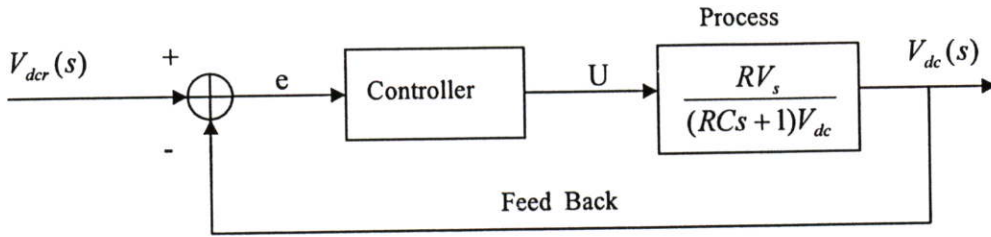
จะได้ว่า

$$\frac{V_s I_s(s)}{CV_{dc}} = \frac{V_{dc}(s)}{RC} + sV_{dc}(s) \quad (3.91)$$

$$\frac{V_s I_s(s)}{CV_{dc}} = V_{dc}(s) \left(s + \frac{1}{RC} \right) \quad (3.92)$$

$$\frac{V_{dc}(s)}{I_s(s)} = \frac{RV_s}{(RCs + 1)V_{dc}} \quad (3.93)$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนระบบจะมีค่าเท่ากับสมการ (3.93) จากนั้นนำไปออกแบบหาระบบควบคุมตามบล็อกไดอะแกรมที่ 3.23

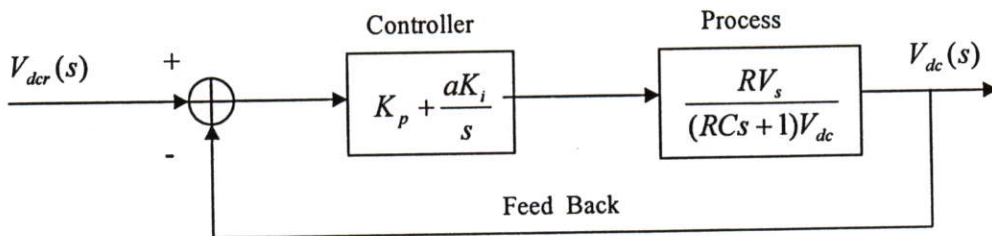


รูปที่ 3.23 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับ

e ความคลาดเคลื่อนในการควบคุม

U สัญญาณควบคุม

ในการเลือกตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบการควบคุมนั้น ตัวควบคุมโดยพื้นฐานโดยทั่วไปที่ใช้จากคุณสมบัติของการควบคุมแต่ละแบบ โดยหลักการในการเลือกตัวควบคุมให้เหมาะสมกับกระบวนการของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์โดยได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ดังนั้นในการออกแบบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของ Transient response ของระบบลูปิดดังแสดงตามรูปที่ 3.24 [2]



รูปที่ 3.24 บล็อกไดอะแกรมของระบบที่มีการป้อนกลับแบบพีไอ

จากรูปที่ 3.24 เมื่อนำมาเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีการป้อนกลับสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_{dcr}(s)} = \frac{RV_s K(s+a)}{(R(s^2+s)V_{dcr} + KRV_s(s+a))} \quad (3.94)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่

จากสมการ (3.94) สามารถที่จะนำไปคำนวณเพื่อตรวจสอบและออกแบบระบบการควบคุมได้

3.8 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส

จากรูปที่ 3.20 เบื้องจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยการทำงานของวงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์จะแบ่งเป็น 2 โหมคคือ โหมคเร็คติไฟอิง และโหมคอินเวอร์ทิง ซึ่งการทำงานในโหมคเร็คติไฟอิง นั้นจะพิจารณาที่กระแส i_s มีเฟสตรงกันกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ v_s และมีการทำงานอยู่ 4 โหมค ส่วนโหมคอินเวอร์ทิง นั้นจะพิจารณาที่กระแส i_s มีมุมต่างเฟสกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ v_s เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า และมีการทำงานอยู่ 4 โหมคเช่นเดียวกัน โดยจะพิจารณาเฉพาะเฟส a ซึ่งสองเฟสที่เหลือจะทำงานลักษณะเดียวกัน

โดยแรงดันในแต่ละเฟสในกรณีที่แหล่งจ่ายไม่ได้ต่อ neutral เป็นกรณีที่มีการส่งถ่ายพลังงานเกิดขึ้นมาก แรงดันในแต่ละเฟสจะไม่เป็น $0.5 V_B$ จะได้ว่าในกรณีที่ไม่ได้ต่อ neutral แรงดันของเฟสจะเป็นดังสมการที่ (3.95) [41] โดยจะมีโหมคของการสวิตซ์และแรงดันของเฟส a ดังตารางที่ 3.1

$$\begin{aligned}v_{an} &= \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}(v_{bo} + v_{co}) \\v_{bn} &= \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{co}) \\v_{cn} &= \frac{2}{3}v_{co} - \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo})\end{aligned}\quad (3.95)$$

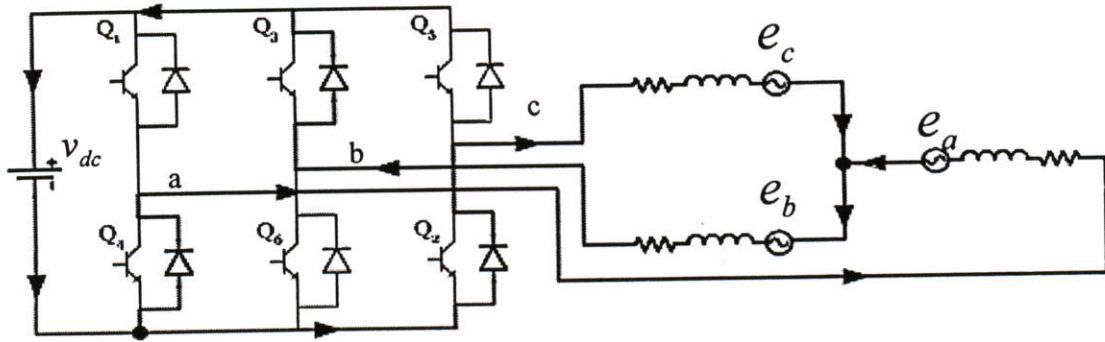
ตารางที่ 3.1 โหมคของสวิตซ์และแรงดันของเฟส a

โหมค	สวิตซ์ที่ ON			แรงดันของเฟส a
1	Q_1	Q_6	Q_5	$+1/3 V_B$
2	Q_1	Q_3	Q_2	$+1/3 V_B$
3	Q_1	Q_3	Q_5	0
4	Q_1	Q_6	Q_2	$+2/3 V_B$
5	Q_4	Q_6	Q_2	0
6	Q_4	Q_3	Q_5	$-2/3 V_B$
7	Q_4	Q_3	Q_2	$-1/3 V_B$
8	Q_4	Q_6	Q_5	$-1/3 V_B$

โดยที่ เมื่อ Q_4 ON จะทำหน้าที่ ชาร์ตประจุและเมื่อ Q_1 ON จะทำหน้าที่ คายประจุ ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการทำงานของวงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์จะแบ่งเป็น 2 โหมคคือ โหมคเร็คติไฟอิง และโหมคอินเวอร์ทิง

3.8.1 การทำงานในโหมดเรกติไฟอิง (Rectifier mode)

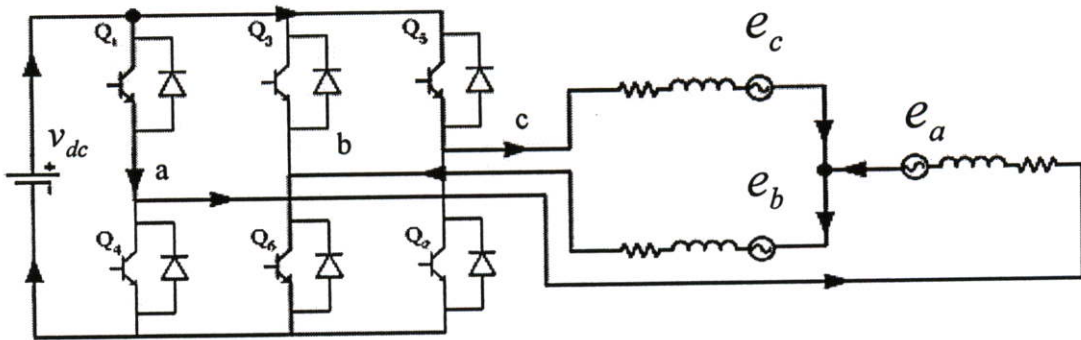
โหมดที่ 1



รูปที่ 3.25 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 1

โดยในโหมดนี้จะทำงานในช่วง 0 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็นเรกติไฟลิ่งโหมด ดังนั้นกระแส i_c จะไหลผ่านไดโอด D_4, D_3, D_2 เพื่อที่จะทำการชาร์จประจุให้กับคาปาซิเตอร์และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

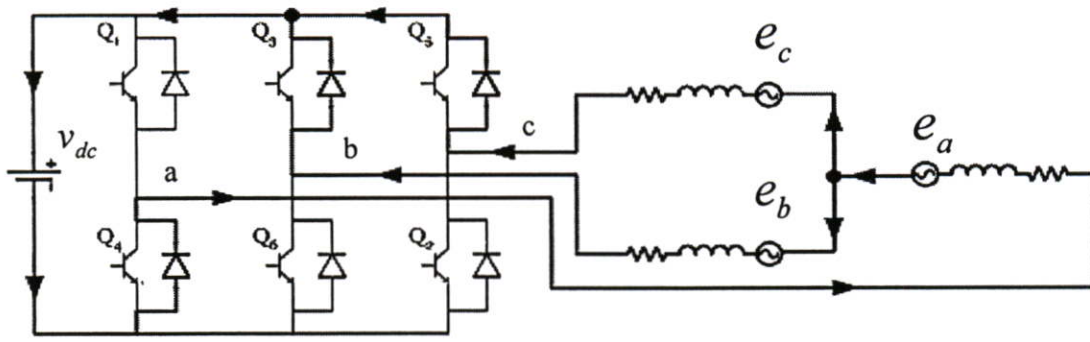
โหมดที่ 2



รูปที่ 3.26 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 2

โดยในโหมดนี้จะทำงานในช่วง 0 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็นเรกติไฟลิ่งโหมด ในการทำงานนั้นสวิตช์ Q_1, Q_6, Q_5 จะ ON โดยในขณะนั้นแรงดัน v_{conv} มีค่าเท่ากับ $+V_{dc}$ ดังนั้นกระแส i_c จะไหลผ่าน Q_1, Q_6, Q_5 จ่ายออกมาทางแหล่งจ่าย v_c ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์ลดลง และในขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น

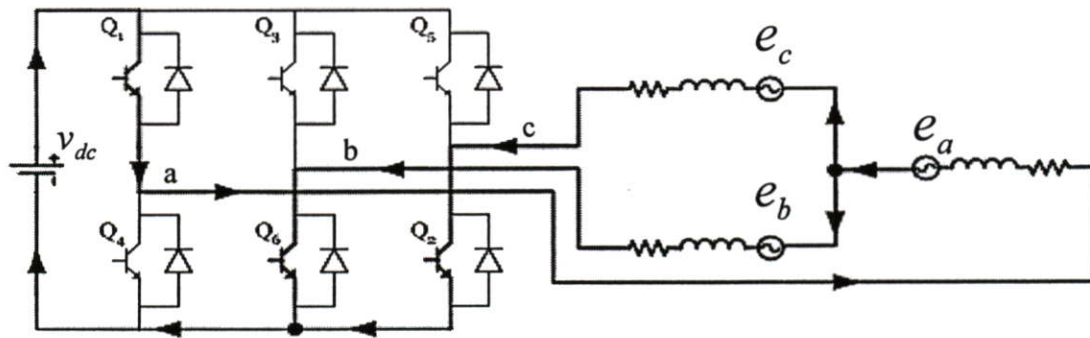
โหมดที่ 3



รูปที่ 3.27 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 3

โดยในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วง 180 ถึง 360 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็นเรกติไฟลิ่งโหมด ดังนั้นกระแส i_s จะไหลผ่านไดโอด D_4, D_3, D_2 เพื่อที่จะทำการชาร์จประจุให้กับคาปาซิเตอร์และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

โหมดที่ 4

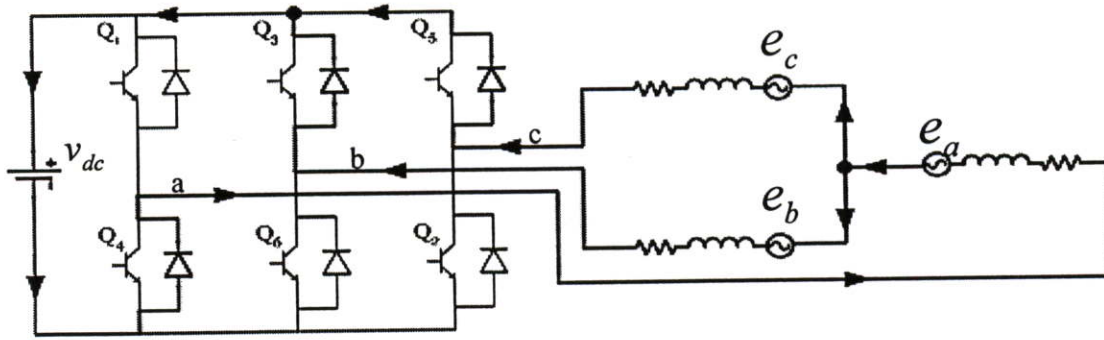


รูปที่ 3.28 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 4

โดยในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วง 180 ถึง 360 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็นเรกติไฟลิ่งโหมด ในการทำงานนั้นสวิตช์ Q_1, Q_6, Q_2 จะ ON โดยในขณะนี้แรงดัน v_{conv} มีค่าเท่ากับ $+V_{dc}$ ดังนั้นกระแส i_s จะไหลผ่าน Q_1, Q_6, Q_2 จ่ายออกมาทางแหล่งจ่าย v_s ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์ลดลง และในขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น

3.8.2 การทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (Inverting mode)

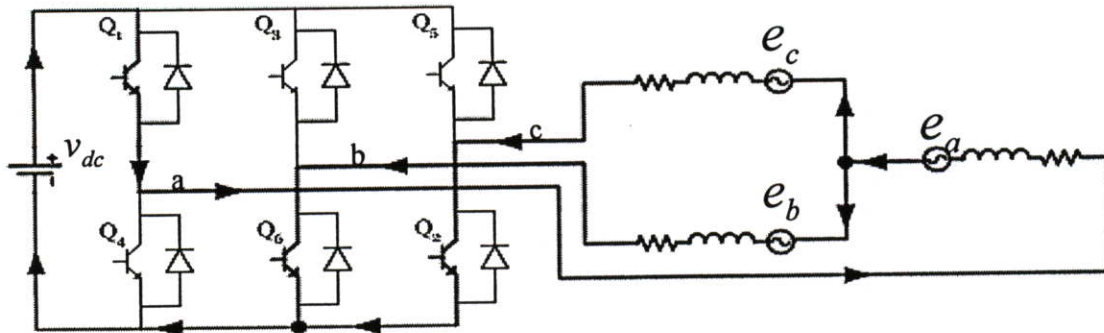
โหมดที่ 5



รูปที่ 3.29 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 5

โดยในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็น อินเวอร์ตติ้งโหมด ดังนั้นกระแส i_s จะไหลผ่านไดโอด D_4, D_3, D_5 เพื่อที่จะทำการชาร์จประจุให้กับคาปาซิเตอร์ และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

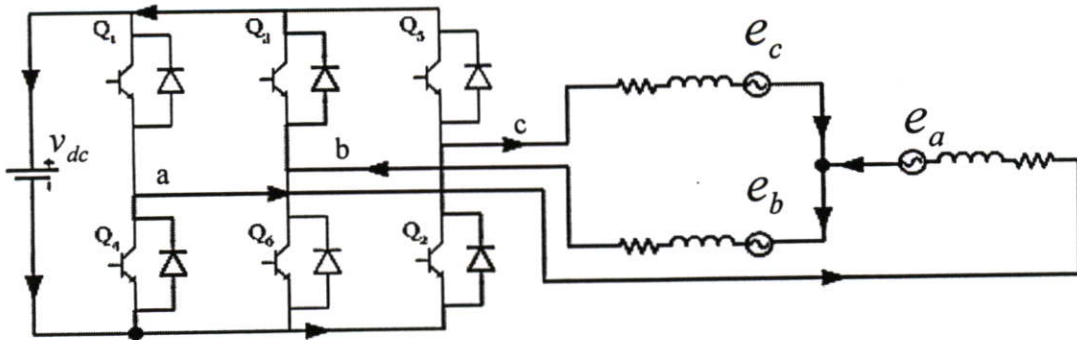
โหมดที่ 6



รูปที่ 3.30 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 6

โดยในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็น อินเวอร์ตติ้งโหมด ในการทำงานนั้นสวิตช์ Q_1, Q_6, Q_2 จะ ON โดยในขณะนี้แรงดัน v_{conv} มีค่าเท่ากับ $-V_{dc}$ ดังนั้นกระแส i_s จะไหลผ่าน Q_1, Q_6, Q_2 จ่ายออกมาทางแหล่งจ่าย v_s ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์ลดลง และในขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น

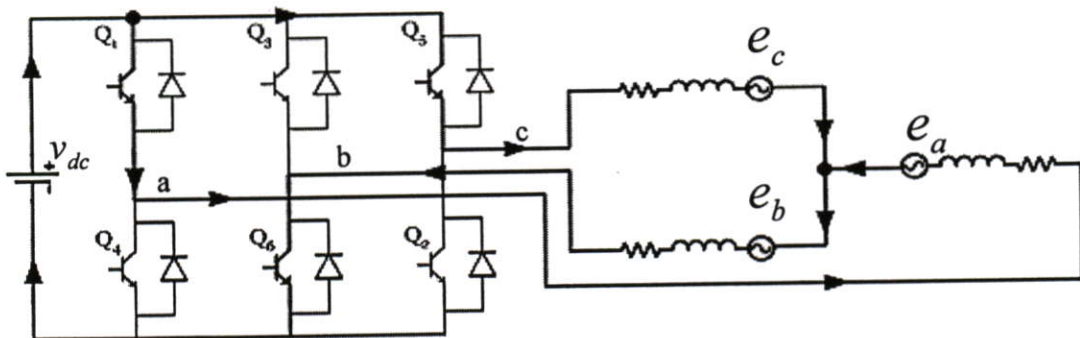
โหมดที่ 7



รูปที่ 3.31 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 7

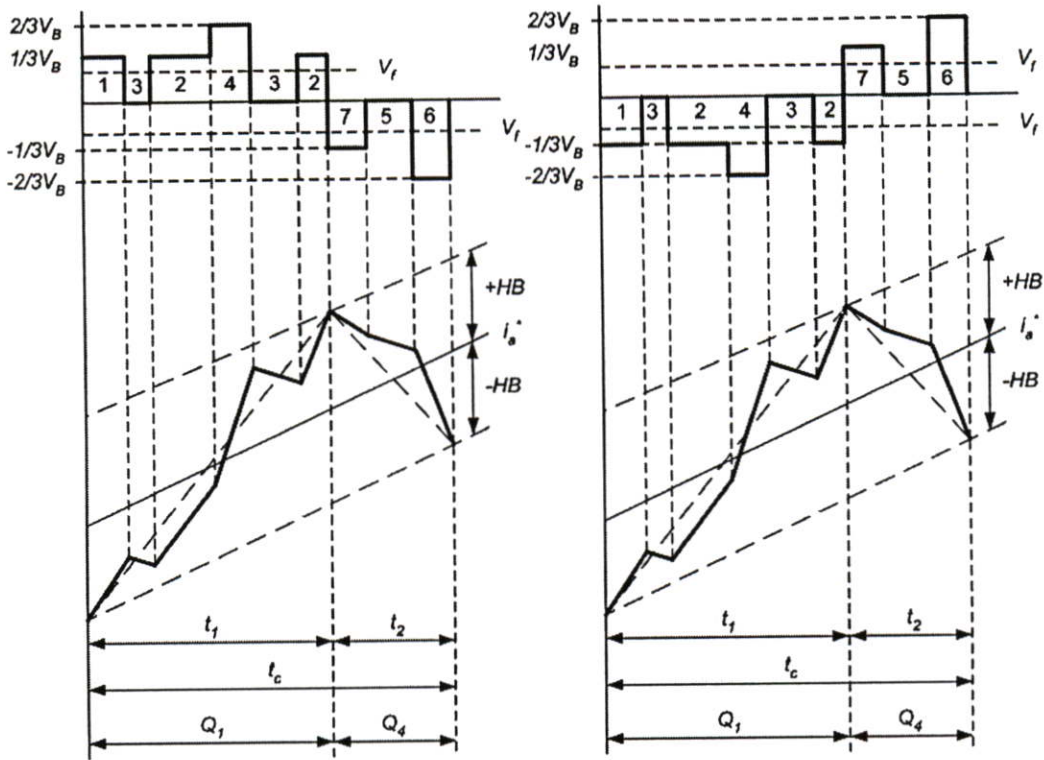
โดยในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็น อินเวอร์ตติ้งโหมด ดังนั้นกระแส i_s จะไหลผ่านไดโอด D_4, D_3, D_2 เพื่อที่จะทำการชาร์จประจุให้กับคาปาซิเตอร์และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

โหมดที่ 8



รูปที่ 3.32 การทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ในโหมดที่ 8

โดยในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วง 0 ถึง 180 องศาทางไฟฟ้า โหมดนี้จะทำงานเป็น อินเวอร์ตติ้งโหมด ในการทำงานนั้นสวิตช์ Q_1, Q_6, Q_5 จะ ON โดยในขณะนี้แรงดัน v_{conv} มีค่าเท่ากับ $-V_{dc}$ ดังนั้นกระแส i_s จะไหลผ่าน Q_1, Q_6, Q_5 จ่ายออกมาทางแหล่งจ่าย v_s ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์ลดลง และในขณะเดียวกันแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น



(ก) การทำงานในโหมดรีคตีไฟอิง

(ข) การทำงานในโหมดอินเวอร์ตอิง

รูปที่ 3.33 แสดงแรงดัน v_{rn} และกระแส i_a ของสวิตช์โหมค คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 8 โหมค

3.9 หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย 3 เฟส

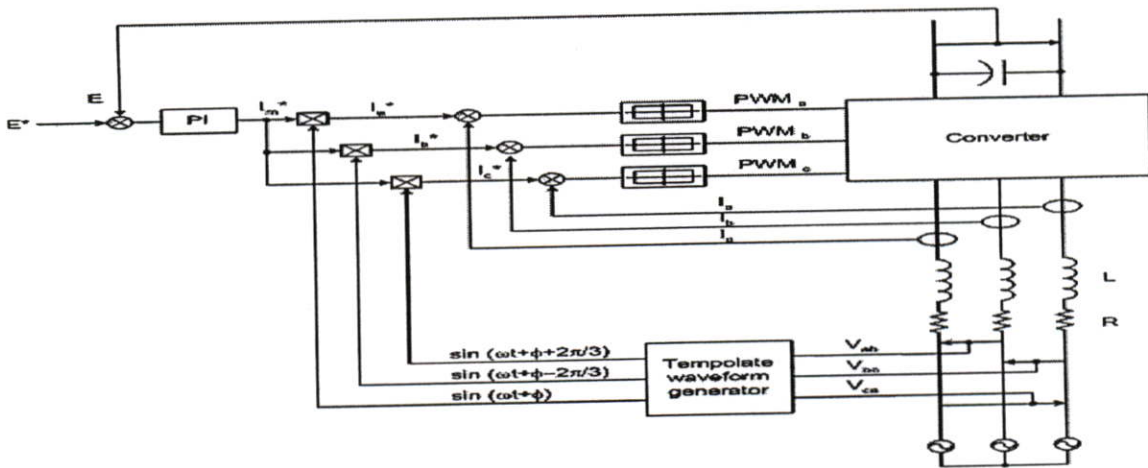
หน้าที่หลักของคอนเวอร์เตอร์ด้านแหล่งจ่าย คือควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (dc link) ให้มี ค่าคงที่โดยไม่คำนึงถึงขนาดและทิศทางของกำลังสลิปโดยใช้หลักการควบคุมแบบสเกลาร์ ในการควบคุมกระแส Adaptive Hysteresis band PWM เพื่อควบคุม คอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเป็นสวิตช์ โหมคคอนเวอร์เตอร์ ที่สามารถทำงานได้ 2 โหมคคือโหมครีคตีไฟอิงและโหมคอินเวอร์ตอิง เพื่อใช้ในการ วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (dc link) จะใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอ (PI control) โดยอินพุทของตัวควบคุมแบบพีไอ จะได้รับค่ามาจากแรงดันดีซีลิงค์อ้างอิงลบแรงดันดีซี ลิงค์จริงที่ได้จากการวัด เมื่อมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นตัวควบคุม PI จะปรับขนาดกระแสอ้างอิง โดยที่ขนาด ของกระแสอ้างอิงนี้เป็นขนาดของกระแสทั้ง 3 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งกระแสอ้างอิง ได้มาจากเอาต์พุท ของตัวควบคุม PI คูณกับรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการจากทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อนำค่ากระแสอ้างอิง ไปลบกับ ค่ากระแสจริงทั้ง 3 เฟสแล้วทำการควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์ให้มีขนาด และรูปร่างติดตามกระแสอ้างอิง โดยใช้ตัวควบคุม Hysteresis ดังนั้นกระแสอ้างอิงเป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้า แผลง (Q) ที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าแผลง (Q) ทำได้โดยปรับมุมต่าง เฟส ของกระแสอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าจากทางด้านแหล่งจ่าย และขนาดของกระแสจะเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากความต้องการ กำลังไฟฟ้าจริง (P) สำหรับใช้รักษาแรงดันไฟดีซีลิงก์ (dc link) ให้มีค่าคงที่ดังแสดงได้ด้วยสมการ

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi \quad (3.86)$$

$$Q = \sqrt{3}V_L I_L \sin \phi \quad (3.87)$$

เมื่อต้องการให้ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับหนึ่งกระแสดำเนินงาน จะต้องอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าจากทางด้านแหล่งจ่าย ดังนั้นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ จะทำงานอยู่ในโหมดรีคตีไฟลิ่ง กำลังไฟฟ้าจะไหลจากระบบไฟฟ้ากำลังเข้าสู่วงจรคอนเวอร์เตอร์ ในลักษณะตรงกันข้ามเมื่อต้องการควบคุมให้ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับลบหนึ่งกระแสดำเนินงาน จะต้องเอาท้อฟเฟสกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย ดังนั้นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานอยู่ในโหมดอินเวอร์ตซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจาก วงจรคอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 3.34 ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านเอซีไลน์

3.10 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์และการวิเคราะห์สมรรถนะทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์โดยวิธีวิเคราะห์ฟูเรียร์ของรูปคลื่นเพื่อที่จะนำมาหาค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์เกิดการผิดเพี้ยนไปจากความถี่พื้นฐานและยังได้กล่าวถึงหลักการการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าและหลักการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไหลสองทิศทางและการทำงานของวงจรเพื่อของการควบคุม และหลักการวิเคราะห์การควบคุมที่ใช้การควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส โดยได้วิเคราะห์หลักการทางโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อนำโมเดลนี้ไปทำการออกแบบหาค่าความถี่สวิตชิง และยังได้กล่าวถึงการทำงานของสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อร่วมกับอินเวอร์เตอร์เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

บทที่ 4

ระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยน ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

4.1 บทนำ

โดยปกติแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำงานสามช่วงคือ ช่วงเบรก (plugging mode) ช่วงปกติทำงานเป็นมอเตอร์ (motoring) และช่วงทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (regeneration mode) ซึ่งในช่วงปกติมอเตอร์จะทำงานตามปกติคือรับไฟฟ้า 3 เฟส มาสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและทำให้โรเตอร์หมุนตาม และสำหรับช่วงเบรก (plugging mode) จะเกิดขึ้นได้เมื่อการกลับลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้กับมอเตอร์แบบทันทีทันใด มีผลทำให้สนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์หมุนทวนกับการหมุนของโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดการเบรกของโรเตอร์ แต่ผลที่ตามมาอีกอย่างก็คือกระแสจะสูงมากๆ ทำให้มอเตอร์ร้อนจนเกิดความเสียหาย ส่วนในช่วงของการคืนพลังงาน (regeneration mode) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อนำเครื่องจักรอีกตัวหนึ่งมาหมุนโรเตอร์ในทิศทางเดิมที่หมุนอยู่ แต่เร่งความเร็วของโรเตอร์ไปจนเกินความเร็วของสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ผลก็คือ โรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทางตามหลักการความเร็วสัมพัทธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอหลักการของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยอาศัยหลักการ การควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ ซึ่งระบบนี้จะนำมาขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก ให้สามารถทำงานได้สองโหมดคือทำงานในโหมดของมอเตอร์ และทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะอาศัยกังหันลมเป็นเครื่องต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ให้สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานไปทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ในเวลาเดียวกัน

คำอธิบายสัญลักษณ์ของบทที่ 4

λ_r	=	ฟลักซ์ของโรเตอร์
λ_r^*	=	ฟลักซ์ของโรเตอร์อ้างอิง
λ_r^s	=	โรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์บนแกนอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์
$\lambda_{dr}^s, \lambda_{qr}^s$	=	โรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์บนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
$\lambda_{DR}^e, \lambda_{QR}^e$	=	โรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น

λ_m^s	=	เวกเตอร์ของฟลักซ์ในช่องว่างแอร์แกบบนแกนอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์
$\lambda_{dm}^s, \lambda_{qm}^s$	=	เวกเตอร์ของฟลักซ์ในช่องว่างแอร์แกบบนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
λ_R^e	=	โรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
v_s^e	=	เวกเตอร์ของแรงดันทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
v_r^e	=	เวกเตอร์ของแรงดันทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
v_{DS}^e, v_{QS}^e	=	เวกเตอร์ของแรงดันทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
v_{DR}^e, v_{QR}^e	=	เวกเตอร์ของแรงดันทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
v_{ds}^s, v_{qs}^s	=	เวกเตอร์ของแรงดันทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
v_{dr}^s, v_{qr}^s	=	เวกเตอร์ของแรงดันทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	=	กระแสทางด้านสเตเตอร์ a,b,c ตามลำดับ
$i_{as}^*, i_{bs}^*, i_{cs}^*$	=	กระแสทางด้านสเตเตอร์อ้างอิง a,b,c ตามลำดับ
i_s^e	=	เวกเตอร์ของกระแสทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
i_R^e	=	เวกเตอร์ของกระแสทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
i_{DR}^e, i_{QR}^e	=	เวกเตอร์ของกระแสทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
i_{DS}^e, i_{QS}^e	=	เวกเตอร์ของกระแสทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
i_{DS}^{e*}, i_{QS}^{e*}	=	เวกเตอร์ของกระแสอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิงในสภาวะกระตุ้น
i_{dr}^s, i_{qr}^s	=	เวกเตอร์ของกระแสทางด้านโรเตอร์บนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
i_{ds}^s, i_{qs}^s	=	เวกเตอร์ของกระแสทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
i_{ds}^{s*}, i_{qs}^{s*}	=	เวกเตอร์ของกระแสอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง d,q ทางด้านสเตเตอร์
θ_r	=	ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์บนแกนอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์
θ_0	=	ตำแหน่งมุมที่เข้าแทนที่ของโรเตอร์
ω_r^*	=	ความเร็วสลลิป
ω_m	=	ความเร็วของโรเตอร์
L_m	=	ความเหนี่ยวนำร่วม
L_s, L_r	=	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
L_{ls}, L_{lr}	=	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์

4.2 ระบบควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

สมการของมอเตอร์ในสภาวะกรอบอ้างอิง จากสมการแรงดันและกระแสของอินดักชันมอเตอร์ในกรอบอ้างอิงของสเตเตอร์ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ [26]

$$v_s^e e^{j\omega t} = R_s i_s^e e^{j\omega t} + p \lambda_s^e e^{j\omega t} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad p \lambda_s^e e^{j\omega t} &= \frac{d\lambda_s^e}{dt} e^{j\omega t} + j\omega e^{j\omega t} \lambda_s^e \\ &= (p + j\omega) \lambda_s^e e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (4.2)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.1) แทนในสมการที่ (4.2) จะได้สมการ

$$v_s^e = R_s i_s^e + (p + j\omega) \lambda_s^e \quad (4.3)$$

และ

$$v_r^e = R_r i_r^e + (p + j\omega_r) \lambda_r^e \quad (4.4)$$

เมื่อ

$$\lambda_s^e = L_s i_s^e + L_m i_r^e \quad (4.5)$$

$$\lambda_r^e = L_m i_s^e + L_r i_r^e \quad (4.6)$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} v_s^e \\ v_r^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + (p + j\omega)L_s & (p + j\omega)L_m \\ (p + j\omega_r)L_m & R_r + (p + j\omega_r)L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^e \\ i_r^e \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

หรือ

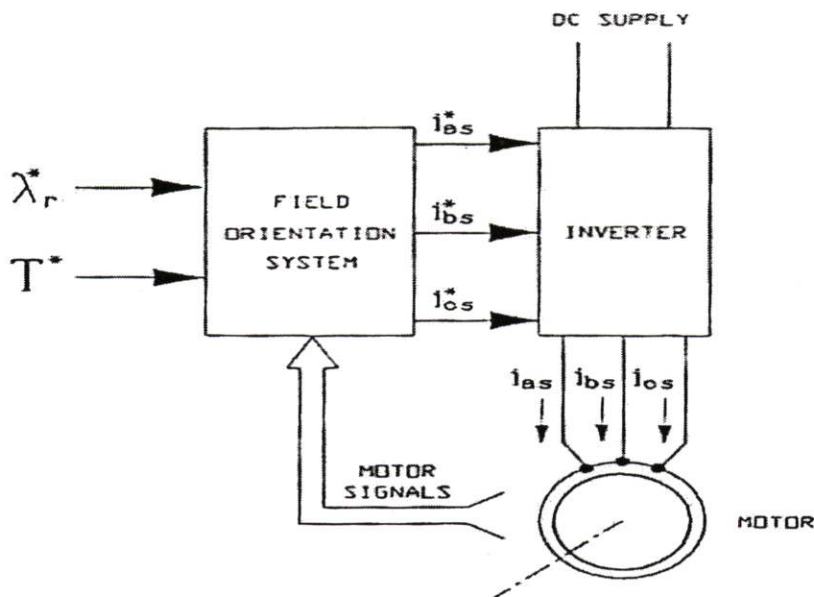
$$\begin{bmatrix} v_{DS}^e \\ v_{QS}^e \\ v_{DR}^e \\ v_{QR}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega L_s & pL_m & -\omega_r L_m \\ \omega L_s & R_s + pL_s & \omega_r L_m & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{DS}^e \\ i_{QS}^e \\ i_{DR}^e \\ i_{QR}^e \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 0 เพราะได้ทำการ short ทางด้านโรเตอร์ไว้ เพราะฉะนั้น $v_{DR}^e = v_{QR}^e = 0$

เพราะฉะนั้นสมการของทอร์กในสภาวะแกนอ้างอิงทางด้านสเตเตอร์ในเทอมของ $e^{j\omega t}$ และ $e^{-j\omega t}$ เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} T &= \frac{P}{3} L_m (i_{QS}^e i_{DR}^e - i_{DS}^e i_{QR}^e) \\ &= \frac{P}{3} L_m I_m (i_s^e i_R^{e*}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

จากการกำหนดบล็อกไดอะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลโทรล สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ระบบพิกัดโอเรียลเตชั่น มีสัญญาณอ้างอิงคือ i_{as}^* , i_{bs}^* และ i_{cs}^* เป็นกระแสทางด้านสเตเตอร์ ซึ่งกระแสเตเตอร์อ้างอิงได้รับมาจากฟลักซ์ของโรเตอร์อ้างอิง (λ_r^*) และ ทอร์กอ้างอิง (T^*) ของมอเตอร์ตามลำดับ และสัญญาณที่ได้ไปกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ในมอเตอร์ ส่วนอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ คือ i_{as} , i_{bs} และ i_{cs} ซึ่งระบบจะนำค่ากระแสเหล่านี้ไปใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงในแต่ละตัวคือ i_{as}^* , i_{bs}^* และ i_{cs}^*



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กระแส i_{DS}^* และ i_{QS}^* คือเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์ i_s^e ในกรณีแกนอ้างอิงสามารถที่จะนำมาใช้ควบคุมพิวล์ของมอเตอร์และทอร์กตามลำดับ

ดังนั้นระบบพิวล์โอเรียลเตชั่นที่แสดงในรูปที่ 4.1 ชั้นแรกจะมีการเปลี่ยนค่าโรเตอร์ฟลักซ์อ้างอิง (λ_r^*) และ ทอร์กอ้างอิง (T^*) ไปอยู่ในแกนอ้างอิงเป็นสัญญาณอ้างอิงในรูป i_{DS}^{e*} และ i_{QS}^{e*} เป็นเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์ และได้เปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูปของ i_{as}^*, i_{bs}^* และ i_{cs}^* ซึ่งก็คือกระแสอ้างอิงของสเตเตอร์ในแต่ละเฟสโดยอินเวอร์เตอร์จะเป็นตัวกำหนดขนาดของกระแส

โดยหลักการของระบบพิวล์โอเรียลเตชั่น จะเป็นการนำค่ากระแสอ้างอิงสเตเตอร์คือ i_{as}^*, i_{bs}^* และ i_{cs}^* มาใช้ในการคำนวณหาในการเปลี่ยนพิกัดแกน dq ไปเป็นแกน abc ซึ่งจะได้สัญญาณอ้างอิงเป็น i_{qs}^* และ i_{ds}^* อยู่ในแกนอ้างอิงของสเตเตอร์ซึ่งสมการที่นำมาใช้ในการแปลงแกน dq เป็นแกน abc ก็จะได้สมการดังนี้ [26]

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 1/3 \\ -1/3 & 1/\sqrt{3} & 1/3 \\ -1/3 & -1/\sqrt{3} & 1/3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

ดังนั้นในการเปลี่ยนแกน dq ไปเป็นแกน DQ จากแกนอ้างอิงหรือแกนหยุดนิ่งของสเตเตอร์ซึ่งสามารถที่จะหาได้จากสมการดังนี้ [26]

$$\begin{bmatrix} v_{DS}^e \\ v_{QS}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

และเมื่อเปลี่ยนจากแกน DQ ไปเป็น dq โดยจะใช้สมการในการเปลี่ยนแกนคือ

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{DS}^e \\ v_{QS}^e \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

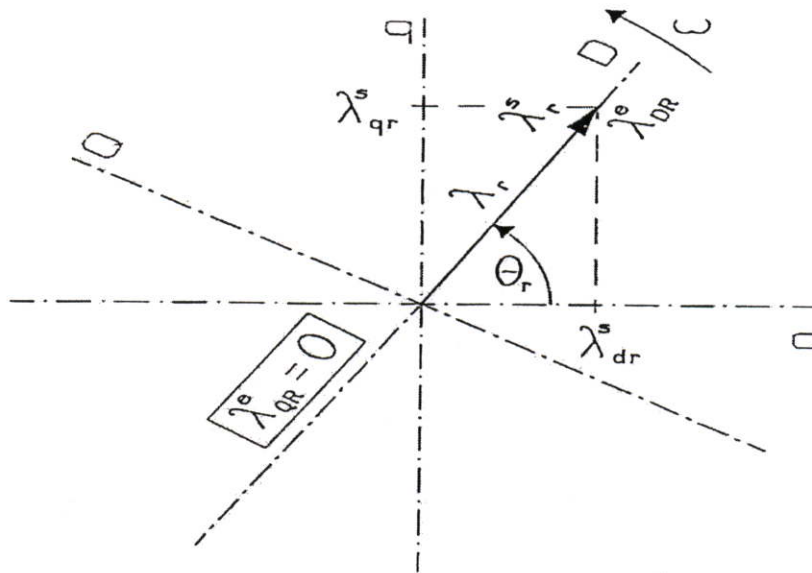
เมื่อต้องการหาค่ากระแสอ้างอิงบนแกนหยุดนิ่ง i_{qs}^{s*} และ i_{ds}^{s*} จากแกนอ้างอิง i_{DS}^{e*} และ i_{QS}^{e*} ซึ่งเทคนิคพิวล์โอเรียลเตชั่นจะมีเวกเตอร์หลายชนิดที่ใช้อ้างอิง แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์นำมาใช้ (λ_r^s) ซึ่งจะนำมาใช้เป็นกรอบอ้างอิง

ดังนั้นหลักการที่นำมาใช้อ้างอิงคือ โรเตอร์ฟลักซ์โอเรียลเตชั่น หรือ(4.12) ตำแหน่งของมุมที่ใช้แสดงของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ในแกนอ้างอิงของสเตเตอร์

โดย θ_r เมื่อทำการแปลงแกนจากแกน DQ ไปเป็นแกน dq ซึ่งจะแสดงไว้ในสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^{s*} \\ i_{qs}^{s*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{DS}^{e*} \\ i_{QS}^{e*} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ซึ่งโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับเวกเตอร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โอเรียลเตชั่นของสภาวะกรอบอ้างอิงร่วมกับโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

ดังนั้นค่าโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์จะถูกควบคุมโดย i_{DS}^e เป็นส่วนประกอบเวกเตอร์ของกระแสเดเตอร์ซึ่งจะถูกควบคุมโดยแยกอิสระออกจากทอร์คทำให้สัญญาณเกิดขึ้นได้โดยส่วนประกอบของ i_{QS}^e โดยจะมีข้อกำหนดที่แน่นอนของมุม θ_r ตำแหน่งกระแสของสเดเตอร์ซึ่งค่าของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ (λ_r^s) สามารถหาได้จากทั้งสองกรณีคือ แบบโดยตรง (direct) และแบบโดยอ้อม (indirect)

4.3 หลักการควบคุมแบบโดยตรงของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

ในระบบควบคุมแบบโดยตรงของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์หรือฟลักซ์เวกเตอร์นั้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และตำแหน่งของมุมแต่ละเฟสของฟลักซ์เวกเตอร์ที่ใช้อ้างอิง ได้นำมาจากแรงดันทางด้านสเดเตอร์ และกระแสที่ใช้หาฟลักซ์เวกเตอร์สามารถที่จะวัดมาได้จาก magnetic field และใน air gap ของมอเตอร์ในแกน d และ q ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบของเวกเตอร์ฟลักซ์ของแม่เหล็ก (λ_m^s) ของฟลักซ์ร่วม (air gap flux) จากในวงจรมวลของกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ได้มาจาก $p\lambda_m^s$ ของฟลักซ์ตัวเหนี่ยวนำรวม L_m ดังจะแสดงไว้ในสมการ

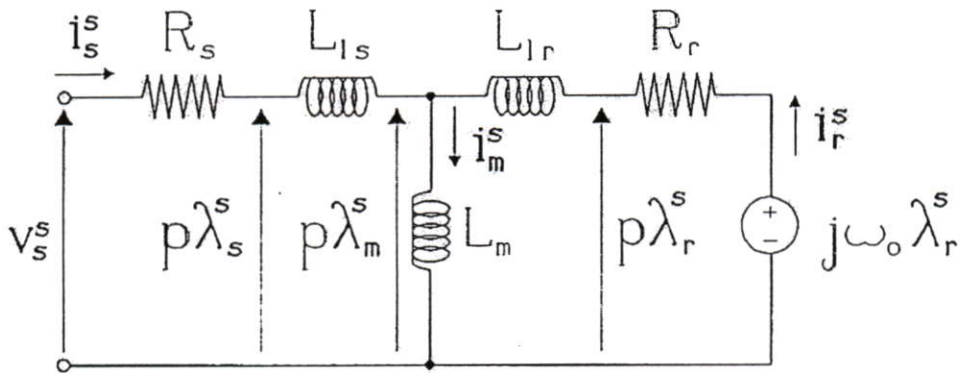
$$\lambda_m^s = L_m i_m^s = L_m (i_s^s + i_r^s) \quad (4.14)$$

หรือ

$$i_r^s = \frac{1}{L_m} \lambda_m^s - i_s^s \quad (4.15)$$

เมื่อ λ_r^s จะได้จาก λ_m^s โดยมีฟลักซ์รั่วไหลในโรเตอร์ ดังนั้นจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \lambda_r^s &= \lambda_m^s + L_{lr} i_r^s = \lambda_m^s + L_{lr} \left(\frac{1}{L_m} \lambda_m^s - i_s^s \right) \\ &= \left(1 + \frac{L_{lr}}{L_m} \right) \lambda_m^s - L_{lr} i_s^s = \frac{L_r}{L_m} \lambda_m^s - L_{lr} i_s^s \end{aligned} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การคำนวณค่าของโรเตอร์ฟลักซ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

สัญญาณของ i_{qs}^s และ i_{ds}^s สามารถคำนวณได้มาจากกระแสเดเตอร์จริงที่ได้มาจากการวัด คือ i_{as}, i_{bs} และ i_{cs} เพื่อนำมาใช้สำหรับแปลงแกนจากแกน abc ไปเป็นแกน dq โดยใช้สมการในการแปลงแกนจาก 3 แกนไปเป็น 2 แกนดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

ขั้นตอนที่ 2

นำสมการที่ (4.16) มาใช้ซึ่งในการคำนวณค่าของ λ_{dr}^s และ λ_{qr}^s สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

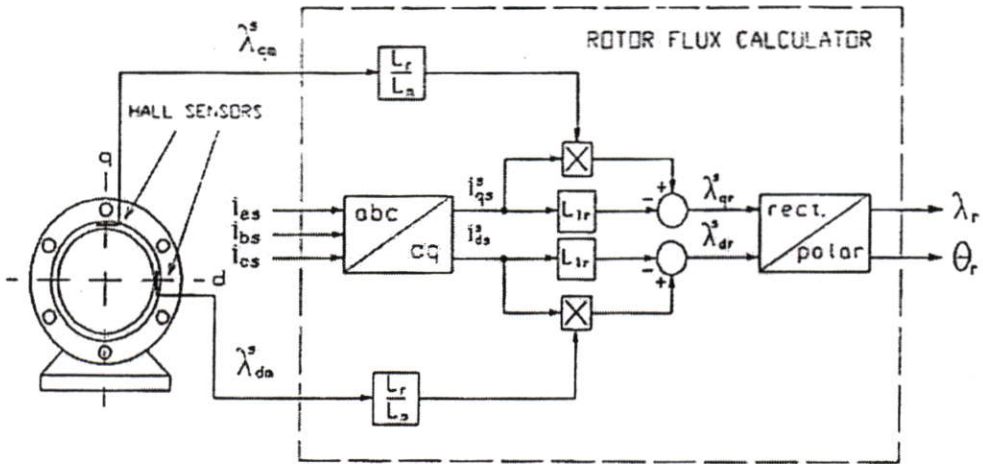
$$\lambda_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} \lambda_{dm}^s - L_{lr} i_{ds}^s \tag{4.18}$$

$$\lambda_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} \lambda_{qm}^s - L_{lr} i_{qs}^s \tag{4.19}$$

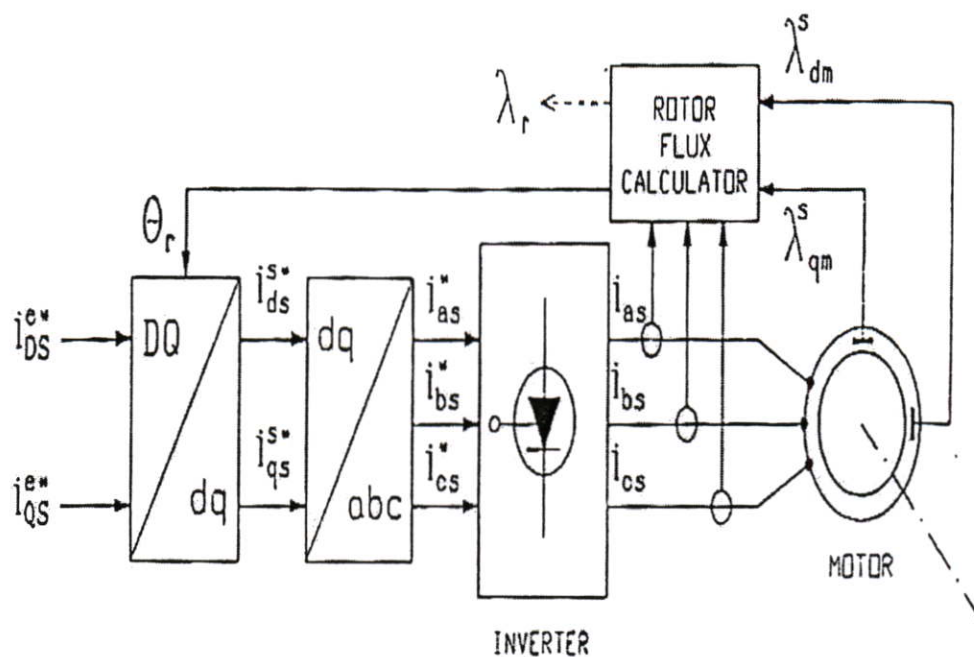
ขั้นตอนที่ 3

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, ฟลักซ์ของโรเตอร์ (λ_r) และมุม θ_r , ซึ่งจะนำค่าที่ได้นี้มาใช้ในการหามุมในการแปลงแกนจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\lambda_{dr}^s = j \lambda_{qr}^s \rightarrow \lambda_r < \theta_r \tag{4.20}$$

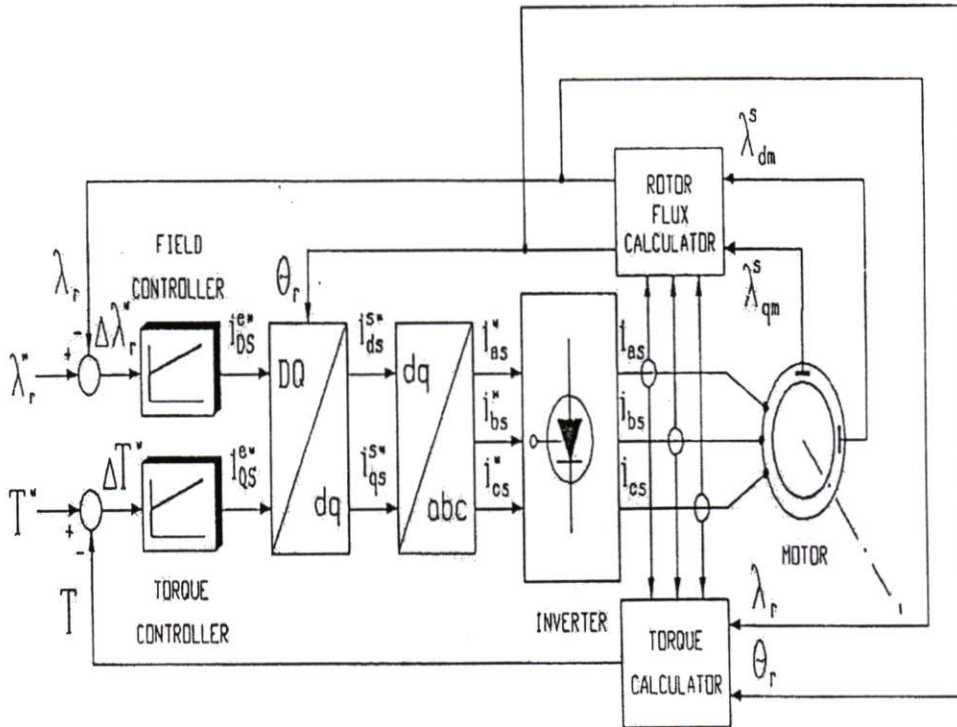


รูปที่ 4.4 รูปแบบของ magnitude และตำแหน่งของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์โดยใช้ Hall เป็นตัววัดและการคำนวณหาโรเตอร์ฟลักซ์



รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมโดยตรงโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

ในบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้หลักการแบบควบคุมโดยตรง (direct) โรเตอร์ฟลักซ์โอเรียลเตชั่นที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อสัญญาณกระแส i_{ds}^e และ i_{qs}^e ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการหาฟลักซ์และทอร์ก กระแส ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีการควบคุมแบบโดยตรงโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

จากรูปในบล็อกไดอะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีการควบคุมแบบโดยตรงโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์นั้น สัญญาณกระแสอ้างอิง i_{ds}^* และ i_{qs}^* ในสถานะกรอบอ้างอิงของค่าโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ (λ_r^s) โดยใช้มุม θ_r ในการคำนวณหาโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์เพื่อจะใช้ในการแปลงแกนจาก DQ ไปเป็นแกน dq ตามบล็อกไดอะแกรม โดยที่กระแสอ้างอิง i_{qs}^* และ i_{ds}^* ในกรอบของสเตเตอร์ซึ่งจะสามารถคำนวณมาจากสมการที่ (4.13) ดังที่แสดงไว้ในบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้สำหรับแปลงกระแสสเตเตอร์ทั้งสามเฟสคือกระแส i_{as}^* , i_{bs}^* และ i_{cs}^* จากแกน dq ไปเป็นแกน abc เมื่อได้สัญญาณอ้างอิงทั้งสามเฟสแล้วอินเวอร์เตอร์จะใช้สัญญาณกระแส i_{as} , i_{bs} และ i_{cs} ของสเตเตอร์เพื่อใช้ควบคุมขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไป

4.4 หลักการควบคุมแบบโดยอ้อมของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

จากระบบการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์โดยตรงหรือโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ ซึ่งจะใช้ตำแหน่งของมุม θ_r ในการหาค่าของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ ที่จะนำมาใช้สำหรับการแปลงแกนจากแกน DQ ไปเป็นแกน dq ซึ่งการควบคุมระบบโดยตรงนี้จะใช้การวัดค่าของฟลักซ์มาจาก air gap แต่กรณีของระบบการควบคุมโดยทางอ้อมจะใช้วิธีคำนวณค่าฟลักซ์มาจากความเร็วสลิป (ω_r^*) ซึ่งเป็นการกำหนดโดยหลักการของระบบฟิวส์โอเรียลเตชั่น และต้องมีการกำหนดความเร็วของมอเตอร์ไว้ด้วย

ดังนั้นความเร็วเชิงโคโรน่าจะมีความจำเป็นในการหาฟลักซ์เวกเตอร์ λ_r^e และ i_r^e ในส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์ซึ่งจะแสดงค่าโดย ω^* ส่วนมุม θ_r จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\theta_r &= \int_0^t \omega^* dt = \int_0^t \omega_r^* dt + \int_0^t \omega_0 dt \\ &= \int_0^t \omega_r^* dt + \theta_0\end{aligned}\quad (4.21)$$

เมื่อ θ_0 คือมุมที่เข้าแทนที่ของโรเตอร์ ซึ่งจะง่ายกว่าเมื่อใช้เครื่องวัดเพื่อเลื่อนตำแหน่งของตัวตรวจจับสัญญาณ การกำหนดค่าของความเร็วสลิป (ω_r^*) สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขของการควบคุมแบบฟิวส์โอเรียลเตชั่นหรือการควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ เมื่อกำหนดให้ค่าของ $\lambda_r^e = \lambda_{DR}^e$ ซึ่งจะสามารถหาค่าของกระแสของโรเตอร์บนแกนอ้างอิงได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$i_r^e = \frac{1}{L_r} (\lambda_{DR}^e - L_m i_s^e) \quad (4.22)$$

แทนค่าสมการที่ (4.22) ในสมการของโรเตอร์ซึ่งจะได้ค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\lambda_{DR}^e [1 + \tau_r (p + j\omega_r)] = L_m i_s^e \quad (4.23)$$

ค่า real และ imaginary ของสมการที่ (4.23) คือสมการดังต่อไปนี้

$$\lambda_{DR}^e (1 + \tau_r p) = L_m i_{DS}^e \quad (4.24)$$

และ

$$\omega_r \tau_r \lambda_{DR}^e = L_m i_{QS}^e \quad (4.25)$$

เมื่อเปลี่ยนความเร็วโรเตอร์ ω_r ให้เหมือนกับ ω_r^* ส่วน λ_{DR}^e เปลี่ยนให้เหมือนกับ λ_r^* และ i_{QS}^e เปลี่ยนให้เหมือนกับ i_{QS}^{e*} ลงในสมการดังกล่าวเพื่อใช้สำหรับคำนวณหาค่าของความเร็วสลลิปดังสมการต่อไปนี้

$$\omega_r^* = \frac{L_m i_{QS}^{e*}}{\tau_r \lambda_r^*} \quad (4.26)$$

จากสมการที่ (4.26) ที่แสดงไว้เป็นส่วนประกอบของเวลา ซึ่งจากสมการที่ (4.24) ในกรณีที่มีมอเตอร์มีเสถียรภาพเมื่อ ($p=0$) ดังแสดงไว้ในสมการต่อไปนี้

$$\lambda_r^* = L_m i_{DS}^{e*} \quad (4.27)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (4.27) ลงในสมการที่ (4.26) จะได้สมการของ (ω_r^*) คือ

$$\omega_r^* = \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{QS}^{e*}}{i_{DS}^{e*}} \quad (4.28)$$

จากการแปลงค่าของ i_{DS}^{e*} และ i_{QS}^{e*} ที่แสดงไว้เป็นการกำหนดส่วนประกอบของค่าฟลักซ์และทอร์กที่เกิดขึ้นของเวกเตอร์ของกระแสสเตเตอร์อ้างอิง i_s^* ตามลำดับ ส่วนสัญญาณ i_{DS}^{e*} จะได้มาจากค่าของฟลักซ์โรเตอร์อ้างอิง λ_r^* ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.24) โดยจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$i_{DS}^{e*} = \frac{1 + \tau_r p}{L_m} \lambda_r^* \quad (4.29)$$

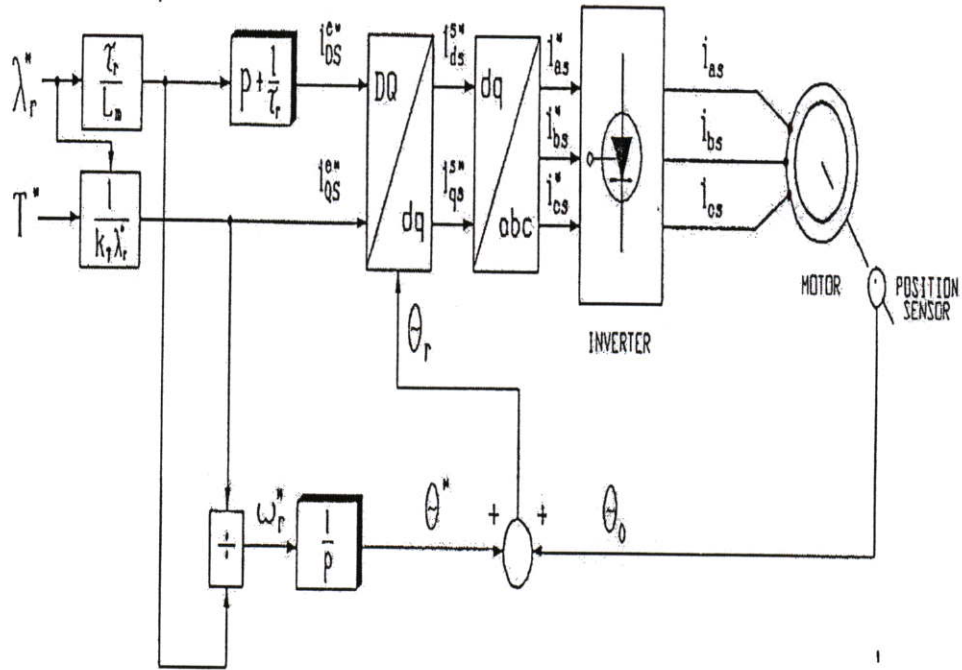
ส่วนสัญญาณ i_{QS}^{e*} จะได้มาจากค่าของทอร์กอ้างอิง T^* ซึ่งจะสามารถหามาได้จากสมการทอร์กคือ

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad T &= \frac{p}{3R_r} \frac{L_m}{\tau_r} \lambda_{DR}^e i_{QS}^e = k_T \lambda_{DR}^e i_{QS}^e \\ k_T &= \frac{p}{3R_r} \frac{L_m}{\tau_r} = \frac{p}{3} \frac{L_m}{L_r} \end{aligned} \quad (4.30)$$

และสมการของ i_{QS}^{e*} สามารถหามาได้จากสมการต่อไปนี้

$$i_{qs}^* = \frac{T^*}{k_T \lambda_r^*} \quad (4.31)$$

เมื่อทอร์กเป็นค่าคงที่ k_T จะหาได้จากสมการที่ (4.30) ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะมี ส่วนประกอบที่ยุ่งยากมากกว่าการควบคุมทอร์กแบบสเกิร์ล่า

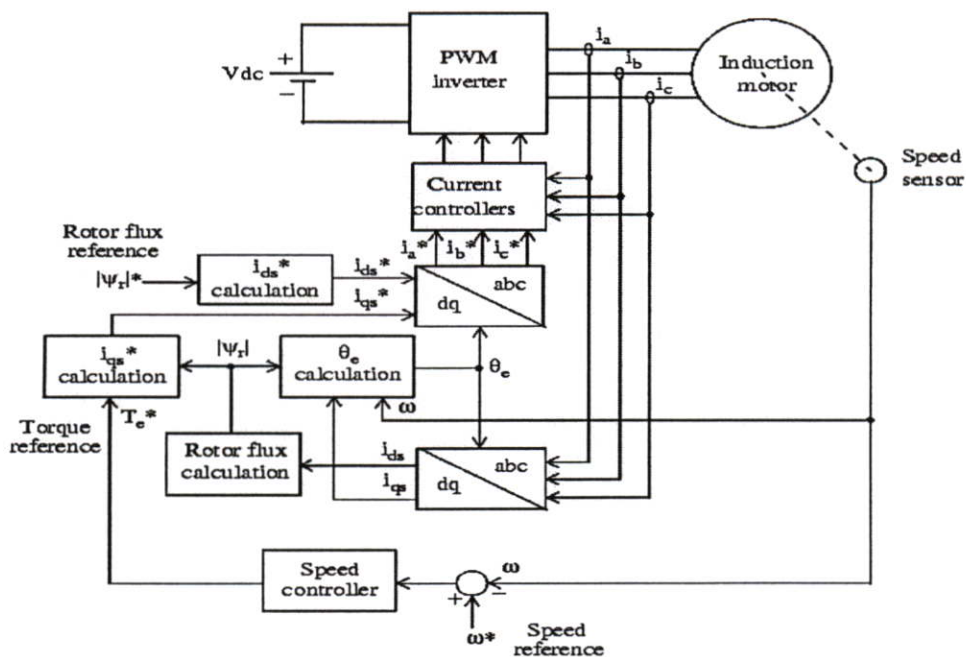


รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบเวกเตอร์คอลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีการควบคุมแบบโดยทางอ้อมโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

จากระบบควบคุมแบบเวกเตอร์คอลโทรลสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ กรณีการควบคุมแบบโดยอ้อมของโรเตอร์ฟลักซ์โอเรียลเตชั่นได้แสดงได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 โดยจะหาค่าพิกัดของมุมในการแปลงแกนจากค่าของ θ_r ของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์โดยจะคำนวณมาจากค่าความเร็วสลิปอ้างอิง ω_r^* ผลลัพธ์ของสัญญาณคือมุม θ^* นำบวกกับ θ_0 จะได้ค่า θ_r สำหรับนำไปใช้ในการแปลงแกน

4.5 ระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบฟลักซ์เวกเตอร์จะใช้หลักการควบคุมแบบโดยอ้อมของโรเตอร์ฟลักซ์โอเรียลเตชั่นหรือโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ โดยจะใช้หลักการแบบการคำนวณหากระแสเดเตอร์ เพื่อควบคุมกระแสเดเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้สร้างแรงบิด T_{em} ให้มีค่าเท่ากับแรงบิดที่กำหนดโดยตัวคุมค่าความเร็ว speed regulator ตัวควบคุม field-oriented controller จะคำนวณกระแสอ้างอิงทั้งสามเฟสซึ่งจะถูกส่งผ่านวงจรแปลงผันกำลังไปยังมอเตอร์ไฟฟ้า และคอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบคงค่ากระแส ได้นำมาใช้ในวงจรนี้ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบการควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ (4.8) การควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในวิทยานิพนธ์นี้ มีกรอบอ้างอิงเป็นพิกัดแกน dq ที่สัมพันธ์กับฟลักซ์เวกเตอร์ของโรเตอร์ ซึ่งจะถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์ของฟลักซ์ และทอร์กของมอเตอร์เหนี่ยวนำและการควบคุมกระแสเดเตอร์ ในกรณีที่มอเตอร์ทำงานเป็นมอเตอร์จะได้รับการป้อนกระแสแบบไซน์ซอซอดอล 3 เฟส จากอินเวอร์เตอร์ที่มี PWM แบบควบคุมกระแส ซึ่งมีการเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ (ω) กับความเร็วอ้างอิง (ω^*) ได้เป็นทอร์กอ้างอิง ทอร์กและฟลักซ์ของโรเตอร์ จะถูกควบคุมแยกกัน

ด้วยกระแสเดเตอร์ทางด้านแกน d และ q ความสัมพันธ์ของ กระแส ฟลักซ์ ความเร็ว และ ทอร์ก มีดังนี้ กระแสอ้างอิงที่ได้จะถูกแปลงให้เป็นกระแสอ้างอิง 3 เฟส เพื่อป้อนให้กับตัวควบคุมกระแส และตัวควบคุมกระแสจะทำหน้าที่ประมวลผลกระแสที่วัดได้ กับกระแสอ้างอิง เพื่อสร้างสัญญาณเกทให้กับอินเวอร์เตอร์ ลักษณะของระบบนี้คือเป็นตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งจะรักษาความเร็วของมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วอ้างอิงที่ป้อนไว้ในสภาวะคงตัว

4.5.1 ขั้นตอนการออกแบบการทำงานของแบบจำลองระบบควบคุมแบบโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1

ระบบการควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์โดยทางอ้อม จะใช้วิธีคำนวณค่าฟลักซ์มาจากความเร็วสลิป (ω_r) และต้องมีการกำหนดความเร็วของมอเตอร์ไว้ด้วย ดังนั้นความเร็วเชิงโคโรนัสจะมีความจำเป็นในการหาฟลักซ์เวกเตอร์ โดยจะทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการกำหนดความเร็วอ้างอิงไว้ที่ค่าหนึ่งแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเร็วของมอเตอร์จริงที่ได้จากการวัด ซึ่งจะได้สัญญาณทอร์กอ้างอิงออกมาโดยจะคำนวณค่าทอร์กได้จากสมการที่ (4.30) คือ [26]

$$T = \frac{p}{3R_r} \frac{L_m}{\tau_r} \lambda_{DR}^e i_{QS}^e = k_T \lambda_{DR}^e i_{QS}^e \quad (4.32)$$

เมื่อ

$$k_T = \frac{p}{3R_r} \frac{L_m}{\tau_r} = \frac{p}{3} \frac{L_m}{L_r}$$

ขั้นตอนที่ 2

สัญญาณของ i_{qs}^s และ i_{ds}^s สามารถคำนวณได้มาจากกระแสเดเตอร์จริงที่ได้มาจากการวัด คือ i_{as}, i_{bs} และ i_{cs} เพื่อนำมาใช้สำหรับแปลงแกนจากแกน abc ไปเป็นแกน dq โดยใช้สมการในการแปลงแกนจาก 3 แกนไปเป็น 2 แกนดังสมการต่อไปนี้[26]

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

ขั้นตอนที่ 3

เมื่อได้ค่าของกระแส i_{qs}^s และ i_{ds}^s หรือก็คือค่า i_{qs} และ i_{ds} กรณีบนแกนหยุดนิ่ง นำค่าที่ได้จากสมการสมการที่ (4.16) มาใช้ในการคำนวณค่าของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ λ_{dr}^s และ λ_{qr}^s บนแกนหยุดนิ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\lambda_{dr}^s = \frac{L_r}{L_m} \lambda_{dm}^s - L_{lr} i_{ds}^s \quad (4.34)$$

$$\lambda_{qr}^s = \frac{L_r}{L_m} \lambda_{qm}^s - L_{lr} i_{qs}^s \quad (4.35)$$

และเมื่อมีการกำหนดให้ค่าของ $|\psi_r|_{est}$ คือฟลักซ์ของโรเตอร์ที่ได้มาจากการคำนวณในกรณีของกระแส i_{ds} บนแกนหยุดนิ่งซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$|\psi_r|_{est} = \frac{L_m i_{ds}}{1 + \tau_r s} \quad (4.36)$$

โดยที่ $\tau_r = L_r / R_r$ คือค่าคงตัวเวลาของโรเตอร์

ขั้นตอนที่ 4

สัญญาณกระแสสเตเตอร์อ้างอิงด้านแกน q สามารถคำนวณได้จาก T_e^* ที่คำนวณได้มาจากขั้นตอนที่ 1 และค่าของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ที่คำนวณได้มาจากขั้นตอนที่ 3 เพื่อที่จะนำมาคำนวณค่าของกระแสสเตเตอร์อ้างอิงด้านแกน q ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|\psi_r|_{est}} \quad (4.37)$$

โดยที่ L_r คือความเหนี่ยวนำของโรเตอร์
 L_m คือความเหนี่ยวนำร่วม และ
 $|\psi_r|_{est}$ คือฟลักซ์ของโรเตอร์

ขั้นตอนที่ 5

สัญญาณกระแสเตเตอร์อ้างอิงทางด้านแกน d ซึ่งสามารถหาได้จากฟลักซ์อ้างอิง ด้านทางเข้าของโรเตอร์โดยจะสามารถคำนวณค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$i_{ds}^* = \frac{|\psi_r|^*}{L_m} \quad (4.38)$$

ขั้นตอนที่ 6

ตำแหน่งของมุม θ_r ในการหาค่าของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ เป็นตำแหน่งฟลักซ์ของ โรเตอร์ที่ใช้สำหรับแปลงแกนจากแกน abc ไปเป็นแกน dq โดยสามารถคำนวณได้จาก ความเร็วของโรเตอร์ (ω_m) และความเร็วสลิป (ω_r^*) คือ

$$\theta_r = \int (\omega_m + \omega_r^*) dt \quad (4.39)$$

โดยที่ความถี่สลิปสามารถคำนวณได้จากกระแสเตเตอร์อ้างอิงด้านแกน q และพารามิเตอร์ของ มอเตอร์ในภาคผนวก

$$\omega_r^* = \frac{L_m}{|\psi_r|_{est}} \cdot \frac{R_r}{L_r} \cdot i_{qs}^* \quad (4.40)$$

ขั้นตอนที่ 7

สัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้เป็น i_{qs}^* และ i_{ds}^* อยู่ในแกนอ้างอิงของสเตเตอร์ซึ่ง จะต้องแปลงค่าของสัญญาณกระแสอ้างอิง 2 เฟส ให้อยู่ในรูปของค่ากระแสอ้างอิงสเตเตอร์ 3 เฟส คือ i_{as}^* , i_{bs}^* และ i_{cs}^* สมการที่นำมาใช้ในการแปลงแกนจากแกน dq เป็นแกน abc คือ จะได้สมการดังนี้ [26]

$$\begin{bmatrix} i_{as}^* \\ i_{bs}^* \\ i_{cs}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 1/3 \\ -1/3 & 1/\sqrt{3} & 1/3 \\ -1/3 & -1/\sqrt{3} & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

ขั้นตอนที่ 8

นำค่ากระแสอ้างอิงสเตเตอร์ 3 เฟส ที่ได้มาจากการคำนวณ คือ i_{as}^* , i_{bs}^* และ i_{cs}^* นำไปลบกับค่ากระแสจริงคือ i_{as} , i_{bs} และ i_{cs} ที่ได้มาจากการวัด และนำค่ากระแสที่ได้ไป เข้าหลักการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซีตแบบ ที่กล่าวหลักการไว้ในบทที่ 3 ซึ่งตัวควบคุม กระแสจะทำหน้าที่ประมวลผลกระแสที่วัดได้ กับกระแสอ้างอิง เพื่อสร้างสัญญาณแก่กับ อินเวอร์เตอร์ ลักษณะของระบบนี้คือเป็นตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ ซึ่งจะรักษาความเร็วของ มอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วอ้างอิงที่ป้อนไว้ในสภาวะคงตัว

4.6 กำลังงานกลและแรงบิดทางกลของกังหันลม

กำลังงานกล P_m (Mechanical power) ที่เกิดขึ้นของกังหันลมจะเป็นฟังก์ชันของความเร็วมวล v (Wind velocity) ความหนาแน่นของอากาศ ρ (Air density) รัศมีของใบพัดของกังหันลม r (Radius of blade) และค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล C_p (power coefficient) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [14,15,16]

$$P_m = \frac{\pi}{2} \rho C_p (\lambda, \beta) r^2 v^3 \quad (4.42)$$

เมื่อ β คือ มุมส่วนเว้าของใบพัด ส่วนค่าของ C_p จะเป็นฟังก์ชันของการออกแบบใบพัดของกังหันลมซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเร็วปลาย λ (tip speed ratio) และ β ทั้งนี้ค่าของอัตราส่วนความเร็วปลายยังสามารถแสดงได้ในเทอมของความเร็วรอบของกังหันลม $\omega_{m,t}$ (Rotational speed of wind turbine) รัศมีของใบพัดของกังหันลม r และความเร็วมวลได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{\omega_{m,t} r}{v} \quad (4.43)$$

ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของกังหันลม $\omega_{m,t}$ (Rotational speed of wind turbine) กับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\omega_{m,G}$ (Rotational speed of generator) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเกียร์ทด (Gear box ratio) G

$$\omega_{m,G} = G \omega_{m,t} \quad (4.44)$$

แรงบิดทางกล $T_{m,t}$ (Mechanical Torque) ของกังหันลมสามารถหาได้จากสมการที่ (3.4.4)

$$T_{m,t} = \frac{P_m}{\omega_{m,t}} \quad (4.45)$$

แรงบิดทางกลทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $T_{m,G}$ กำหนดให้โดย

$$T_{m,G} = \frac{P_m}{\omega_{m,G}} \quad (4.46)$$

จากสมการที่ (4.44) (4.45) และ (4.46) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลทั้ง 2 ด้านดังนี้

$$T_{m,G} = \frac{P_{m,t}}{G} \quad (4.47)$$

สมการอนุพันธ์เชื่อมโยงของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดให้โดย

$$J \frac{d}{dt} \omega_{m,G} + B \omega_{m,G} = T_{m,G} - T_e \quad (4.48)$$

จากรูปที่ 4.9 เป็นเส้นโค้งคุณลักษณะสมบัติแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล C_p และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล C_t เทียบกับค่าอัตราส่วนของความเร็วปลาย λ ของกังหันลมแบบที่มีส่วนเว้าของใบพัดที่แน่นอน (Fixed - pitch) ซึ่งไม่สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยง่ายดังนั้นเราจึงเขียนความสัมพันธ์ของค่า C_p และ C_t ในเทอมของ λ ได้ดังนี้

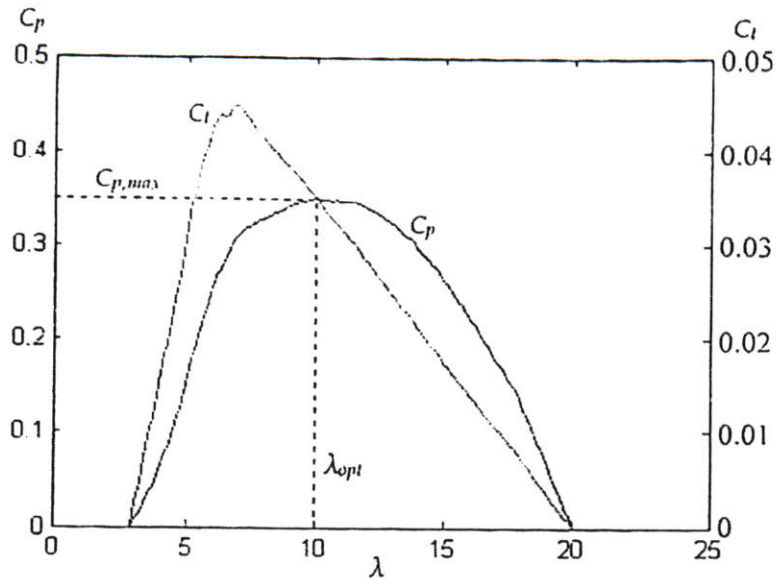
$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_t(\lambda, \beta) \quad (4.49)$$

จากสมการที่ (4.43) และ (4.49) จะได้ว่า

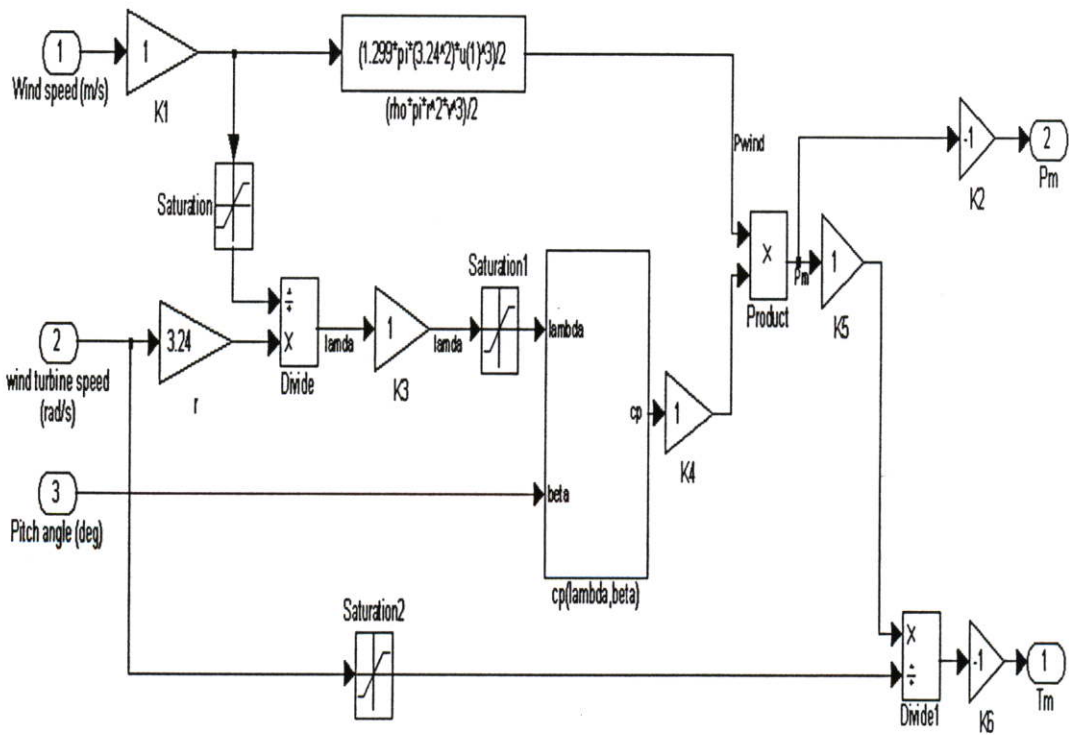
$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{\omega_{m,i} r C_t(\lambda, \beta)}{v} \quad (4.50)$$

จากสมการที่ (4.42) (4.45) และ (4.50) สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลของกังหันลม $T_{m,i}$ ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล C_t ได้ดังนี้

$$T_{m,i} = \frac{\pi}{2} \rho C_t(\lambda, \beta) r^3 v^2 \quad (4.51)$$



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของ C_p และ C_t เทียบกับ λ



รูปที่ 4.10 แบบจำลองของกังหันลมเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.6.1 หลักการทำงานของแบบจำลองของกังหันลม

สามารถวิเคราะห์หลักการทำงานของแบบจำลองของกังหันลมได้โดยสร้างแบบจำลองตามรูปที่ 4.10 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า P_m และค่า T_m เพื่อนำค่า T_m ที่ได้ไปใช้สำหรับเชื่อมโยงกับสมการอนุพันธ์ของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อนำไปขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสให้สามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการการทำงานของโปรแกรมสำเร็จรูป Matlab Version 7 ในส่วนของ Simulink โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในภาคผนวก

4.6.2 กำลังงานกลสูงสุดของกังหันลม (Maximum Mechanical power of wind turbine)

จากรูปที่ 4.9 และสมการที่ (4.42) จะได้ว่ากำลังงานกลสูงสุด $P_{m,max}$ ของกังหันลมจะเกิดขึ้นที่ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกลมีค่าสูงสุดคือ $C_{p,max} = 0.35$ ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าของอัตราส่วนความเร็วปลายออปติ멈 $\lambda_{opt} = 10$ ณ จุดที่กังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติ멈 (optimum speed) สามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้ [17,18,19]

$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,t,opt}^3 \quad (4.52)$$

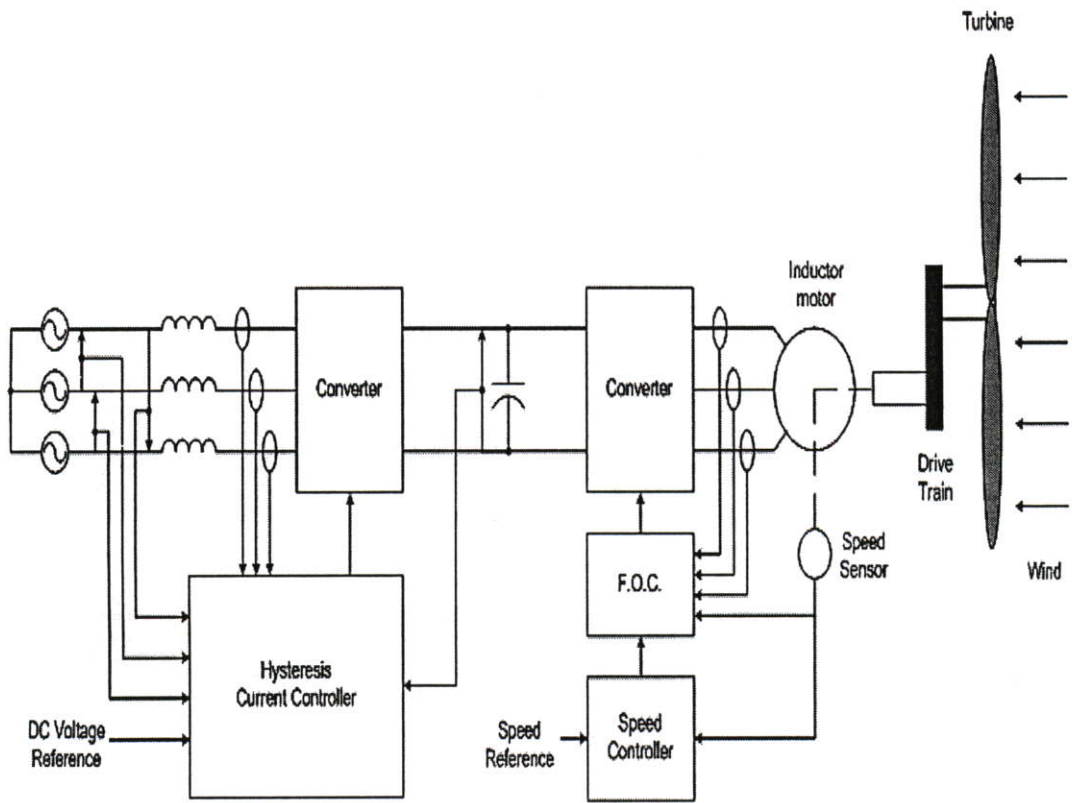
$$T_{m,t,opt} = K_{opt} \omega_{m,t,opt}^2 \quad (4.53)$$

$$\omega_{m,t,opt} = \frac{\lambda_{opt} v}{r} \quad (4.54)$$

เมื่อ
$$K_{opt} = \frac{\pi C_{p,max} \rho r^5}{2 \lambda_{opt}^3} \quad (4.55)$$

เมื่อพิจารณากังหันลมที่มีรัศมีของใบพัด $r = 3.24 \text{ m}$ และมีความเร็วลม $v = 10 \text{ ms}^{-1}$ เมื่อกังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติ멈จะให้กำลังงานกลสูงสุด 7.5 Kw และเมื่อความเร็วลมลดลงเหลือ $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ กังหันลมจะให้กำลังงานกลสูงสุด 480 w เท่านั้น จากสมการที่ (4.42) กำลังงานกลของกังหันลมจะแปรผันไปตามความเร็วลมยกกำลังสาม ดังนั้น เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจะทำให้กำลังงานกลเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ถ้าให้ความเร็วลมที่พิกัด $v = 10 \text{ ms}^{-1}$ เมื่อความเร็วลมลดลงเหลือ $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ จะทำให้กำลังงานกลลดลงเหลือเพียง 6.4 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานกลที่พิกัด ถ้าหากว่าความเร็วลมลดลงต่ำกว่านี้จะไม่เพียงพอที่จะทำให้กังหันลมทำงานได้ ดังนั้น ความเร็วลมต่ำสุดที่จะทำให้กังหันลมทำงานได้เรียกว่า ความเร็วลมต่ำสุด ที่ทำให้กังหันลมเริ่มทำงาน (cut-in wind velocity) ในที่นี้ $v = 4 \text{ ms}^{-1}$

4.7 แบบจำลองระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม



รูปที่ 4.11 ระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

4.8 หลักการทำงานของแบบจำลองระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

จากรูปที่ 4.11 คือ แบบจำลองของระบบการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ประกอบด้วยภาคคอนเวอร์เตอร์และภาคอินเวอร์เตอร์ โดยภาคคอนเวอร์เตอร์นั้นทำงานแบบสวิตช์โหมดซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง และภาคอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยภาคคอนเวอร์เตอร์นี้ประกอบด้วย IGBT 6 ตัวที่ต่อแบบฟูลบริดจ์ (Full bridge) โดย IGBT ทั้งสี่ทำงานเป็นสวิตช์ และใช้หลักการควบคุมกระแสแบบ Adaptive PWM ในการทำงานของสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีการทำงานอยู่ 2 โหมด ดังนี้คือ โหมดที่ 1 เรียกว่าโหมดเรกติไฟลิ่ง (Rectifying) เป็นการส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้า

กำลัง v_s ไปสู่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง ในการทำงานโหมดนี้มีการควบคุมกระแสทางด้านอินพุต i_s ให้มีเฟสตรงกับแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลัง v_s (In phase) เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานจากระบบไฟฟ้ากำลัง v_s ไปสู่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง แต่ถ้านำพลังงานนี้ไปใช้งานจะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงสูงขึ้นอย่างฉับพลันทำให้เกิดความเสียหายได้ ส่วนในโหมดที่ 2 เรียกว่า โหมดอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) การทำงานในโหมดนี้เป็นการส่งถ่ายพลังงานจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง v_{dc} ไปสู่แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลัง v_s ซึ่งในโหมดนี้จะควบคุมกระแสทางด้านอินพุตให้มีเฟสตรงข้ามกับแรงดันแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลัง v_s (Out of Phase) โดยมีมุมห่างกัน 180 องศาทางไฟฟ้า จึงทำให้พลังงานถ่ายออกสู่แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลัง v_s ลักษณะการทำงานเช่นนี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง v_{dc} ลดลง โดยคุณสมบัติของการทำงานทั้ง 2 โหมดนี้สามารถนำไปใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง v_{dc} ให้คงที่ และที่สำคัญในการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์โหมดนี้สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของกระแสอินพุตและค่าความผิดเพี้ยนของกระแสให้ดีขึ้น

ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงให้คงที่ได้ นำเอาการควบคุมรูปปิดที่มีการควบคุมแบบ PI ช่วยในการควบคุมแรงดันให้คงที่ โดยอาศัยหลักการการทำงานทั้ง 2 โหมดของคอนเวอร์เตอร์ เมื่อทำการตรวจจับแรงดันทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงโดยใช้ตัวตรวจจับ ถ้ามีการเพิ่มโหลดที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงลดลงเป็นผลทำให้สัญญาณที่ตรวจจับนั้นลดลงตาม แล้วนำสัญญาณที่ตรวจจับได้มาเปรียบเทียบกับแรงดันกระแสตรงอ้างอิง v_{ref} จะได้สัญญาณเออร์เรอร์ e เป็นสัญญาณบวกและเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวมาคูณกับสัญญาณ v_s ที่ตรวจจับมาจากแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลัง v_s ได้เป็นสัญญาณกระแสอ้างอิง i_{ref} ที่มีเฟสตรงกับแรงดัน v_s ทำให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง (Rectifying) ส่งผลให้ v_{dc} สูงขึ้น เพื่อชดเชยแรงดัน v_{dc} ที่ตกลงเนื่องจากการเพิ่มโหลด และเมื่อแรงดันสูงกว่าแรงดันกระแสตรงอ้างอิงที่ตั้งไว้จะทำให้สัญญาณเออร์เรอร์เป็นลบ เมื่อนำไปคูณกลับสัญญาณแรงดัน v_s ทำให้กระแสอ้างอิงมีเฟสตรงข้ามกับแรงดัน v_s เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ทำให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง v_{dc} ลดลงจึงทำให้รักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงคงที่ และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีการปรับความเร็วรอบ ในขณะที่มอเตอร์ทำงานมีโหลดปกติคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง แต่เมื่อมอเตอร์มีการเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลันเป็นผลทำให้ความเร็วโรเตอร์สูงกว่าความเร็วซิงโครนัสในสเตเตอร์ ส่งผลให้มอเตอร์อยู่ในสภาวะรีเจนเนอเรทีฟ และทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงนี้คอนเวอร์เตอร์ทำงานอยู่ในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) เพื่อนำพลังงานนี้ส่งถ่ายย้อนกลับสู่แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลัง v_s

เมื่อต้องการให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงาน เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเกิดขึ้นได้เมื่อนำเครื่องจักรอีกตัวหนึ่งคือกังหันลม มาใช้หมุนโรเตอร์ในทิศทางเดิมที่หมุนอยู่ แต่เร่งความเร็วของโรเตอร์ ไปจนเกินความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ผลก็คือ โรเตอร์จะมองว่า สนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทาง ตามหลักการความเร็วสัมพัทธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะส่งผลให้พลังงานกลมากกว่าพลังงานไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นค่าของ P_m จึงมากกว่าค่า P_e ในระบบ ในลักษณะเดียวกันคือ จะทำให้ค่าของแรงบิด T_m มีค่ามากกว่าแรงบิด T_e ในระบบไฟฟ้า ซึ่งลักษณะเหล่านี้จะส่งผลให้มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

4.9 สรุป

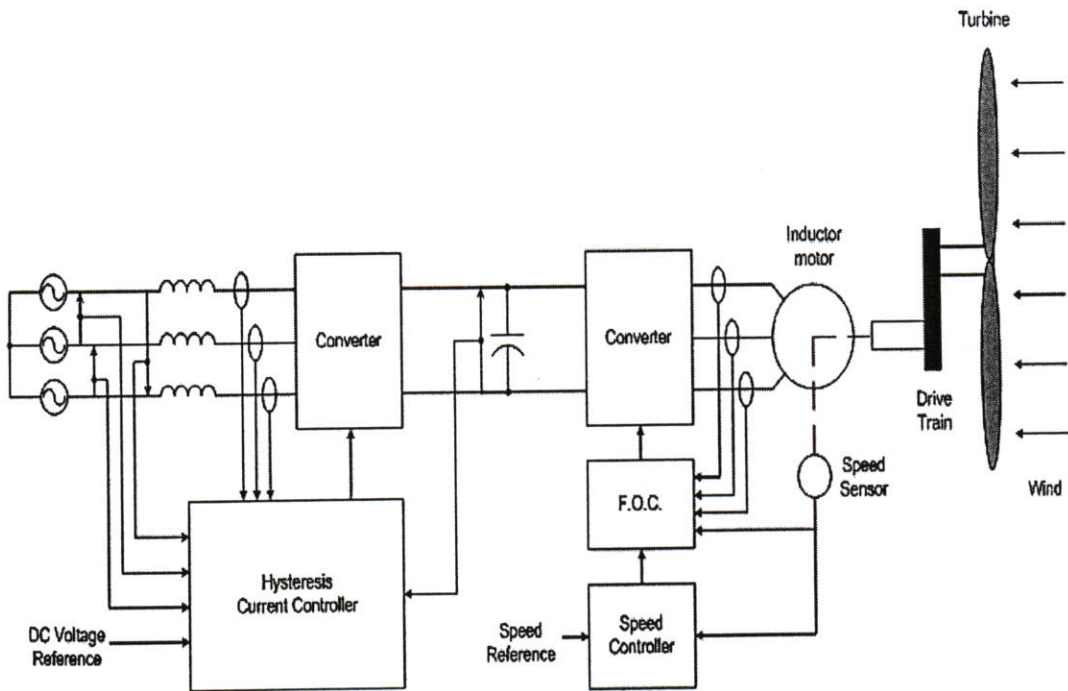
ในบทนี้ได้พูดถึงหลักการวิเคราะห์การควบคุมที่ใช้ การออกแบบระบบควบคุมแบบโรเตอร์ ฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และ หลักการทำงานของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

บทที่ 5

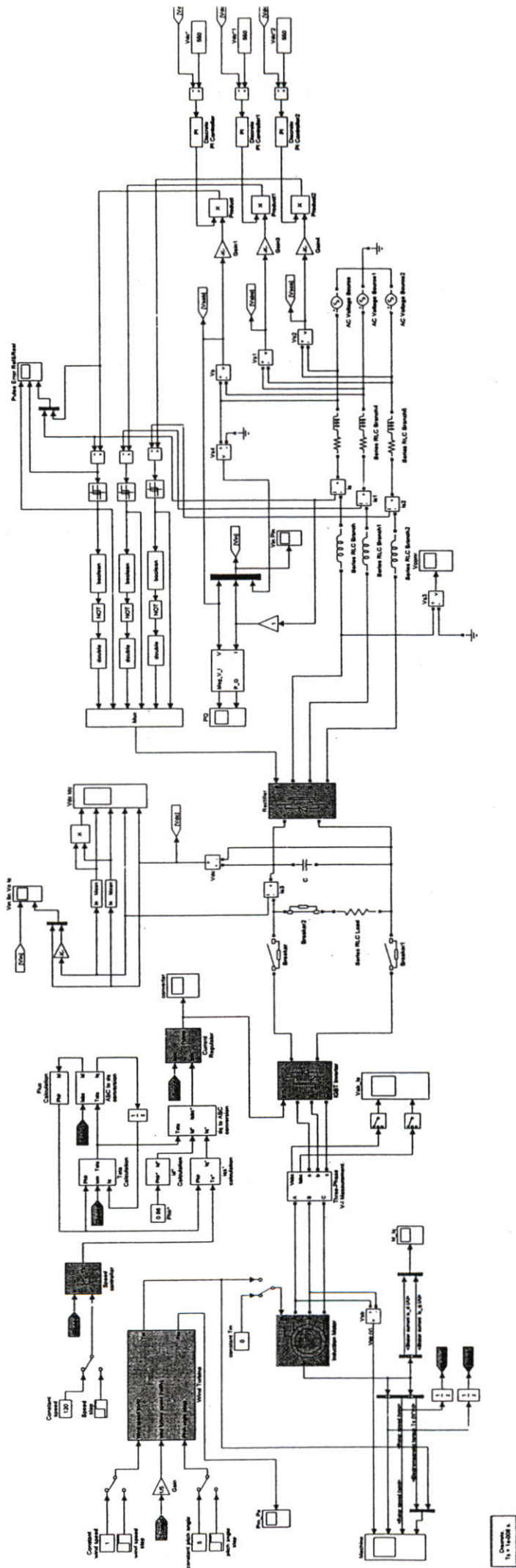
การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

ในการจำลองการทำงาน ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม สามารถพิจารณาจากการจำลองระบบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน เพื่อให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงาน เป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และเมื่อมอเตอร์มีการทำงาน เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแล้วนั้น มอเตอร์จะมีการส่งกำลังย้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์หลักการทำงานได้โดยสร้างแบบจำลองตามรูปที่ 5.2 โดยอาศัยหลักการทำงานของโปรแกรมสำเร็จรูป Matlab Version 7 ในส่วนของ Simulink โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในภาคผนวก



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม



รูปที่ 5.2 แบบจำลองของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

Control
13-1-2023

5.2 ผลการจำลองของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

5.2.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย

จากการทดสอบการทำงานของ ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานแบบสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ ที่สามารถส่งถ่ายพลังงานได้ 2 ทิศทาง โดยสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ จะสามารถทำงานได้ 2 โหมค คือโหมคเรกติไฟลิ่ง และโหมคอินเวอร์ทิง ซึ่งจากรูปในผลการจำลองของระดับความเร็วลมขณะต่างๆ ได้แสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย ร่วมกับแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย โดยในขณะที่สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมคเรกติไฟลิ่ง จะมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแรงดัน v_a ไปสู่แรงดัน v_{dc} โดยจะมีการควบคุมกระแส i_a ให้อินเฟสกับแรงดัน v_a เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และเมื่อสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมคอินเวอร์ทิงเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแรงดัน v_{dc} ไปสู่ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งแรงดัน v_a ในโหมคนี้จะควบคุมกระแส i_a ให้เอาท้อฟเฟสกับแรงดัน v_a เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า และในขณะที่สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมคอินเวอร์ทิง มอเตอร์ก็จะสามารถเปลี่ยนโหมค การทำงานเป็นโหมคเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีกังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมคการทำงาน เป็นโหมคเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์กลับทิศทาง และจะส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง จึงทำให้กำลังไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นค่าของกระแส i_{dc} ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายจึงกลับทิศทางเป็ตรงกันข้ามกับที่ทำงานเป็นมอเตอร์ และจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย P_{dc} มีค่าเป็นลบ ส่วนผลการจำลองของแรงดันเชื่อมโยง v_{dc} จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะที่เพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์อย่างฉับพลันจะทำให้แรงดัน v_{dc} มีค่าคงที่

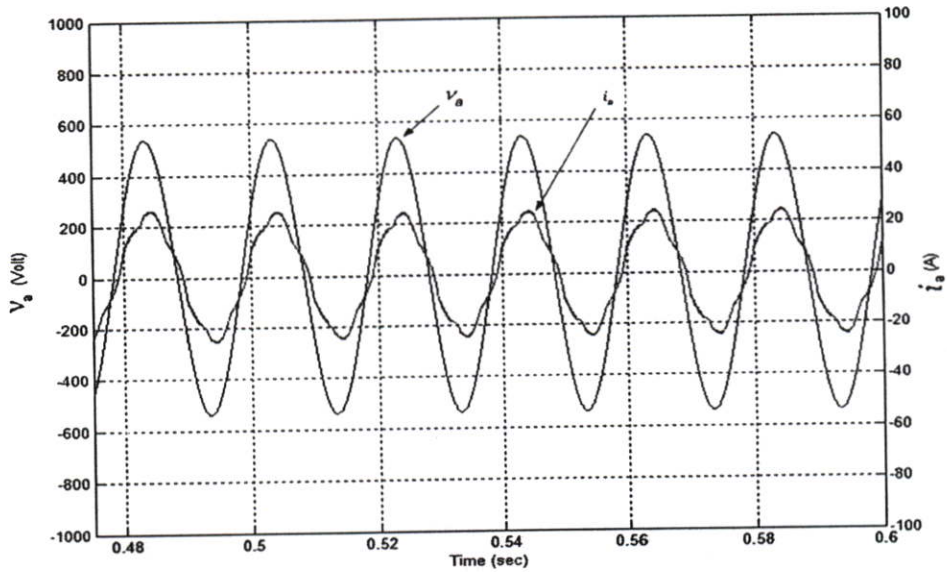
5.2.2 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากการทดสอบการทำงานของ ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส หรือเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งโรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทางตามหลักการความเร็วสัมพันธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมันให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะใช้การทดสอบที่ระดับความเร็วลมสูงสุด ตั้งแต่ที่ระดับความเร็ว 4 m/s จนถึงระดับความเร็วลมที่ 12 m/s เป็นตัวทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

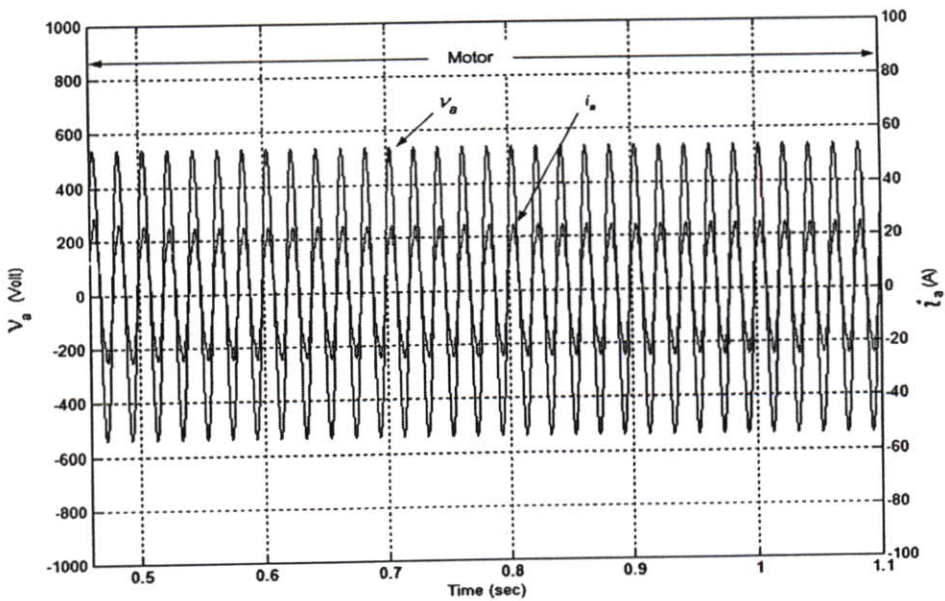
3 เฟส เพื่อให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ระดับความเร็วลมที่จะทำให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้นั้น คือระดับความเร็วลมตั้งแต่ 9 m/s จนถึงระดับความเร็วลมที่ 12 m/s และเมื่อมอเตอร์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสลิปติดลบ ดังนั้นค่าของ แรงบิด T_m และแรงบิด T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน จะทำให้แรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกลของ P_m มีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้าของ P_e และเมื่อมอเตอร์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สถานะนี้มอเตอร์จะมีการส่งถ่ายกำลัง ย้อนกลับมาที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงหรือส่งพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนแรงดันเอาต์พุตและกระแสเอาต์พุตที่แสดงไว้ในระดับความเร็วลมต่างๆ จะเป็นการทำงานของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} และกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมวล

5.3 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s

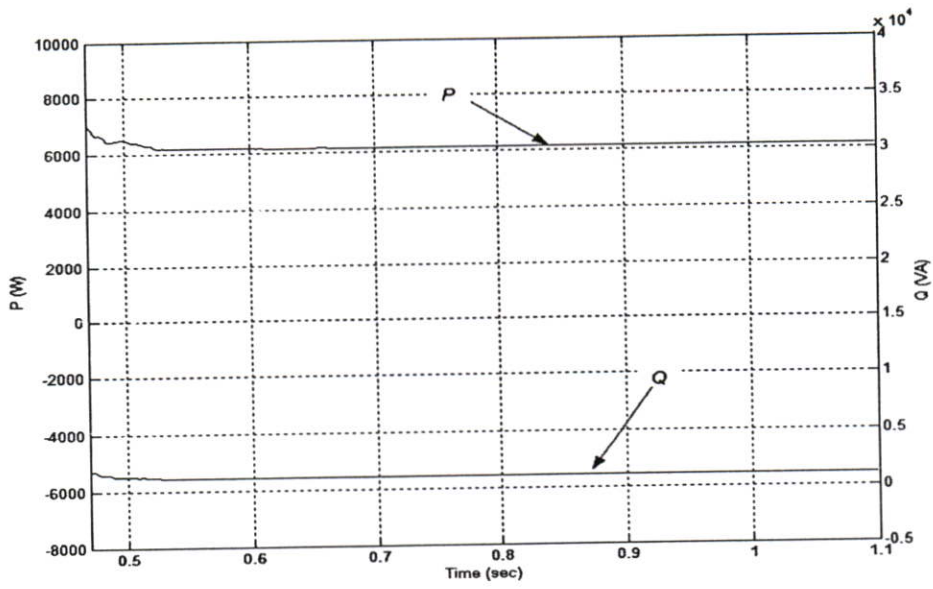
5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



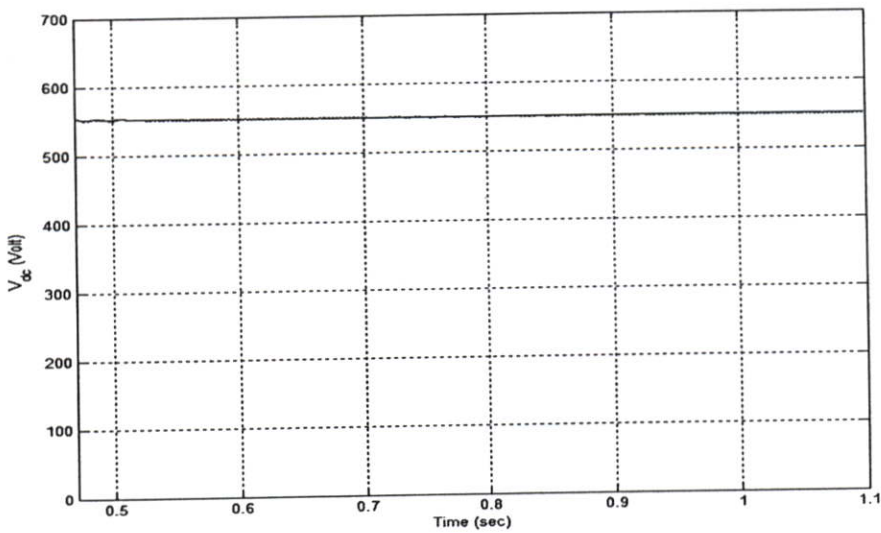
รูปที่ 5.3 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



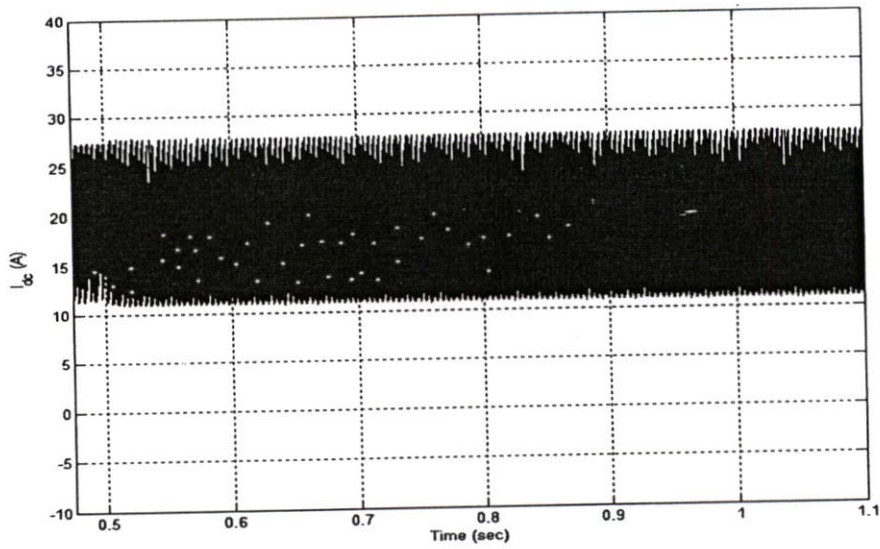
รูปที่ 5.4 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



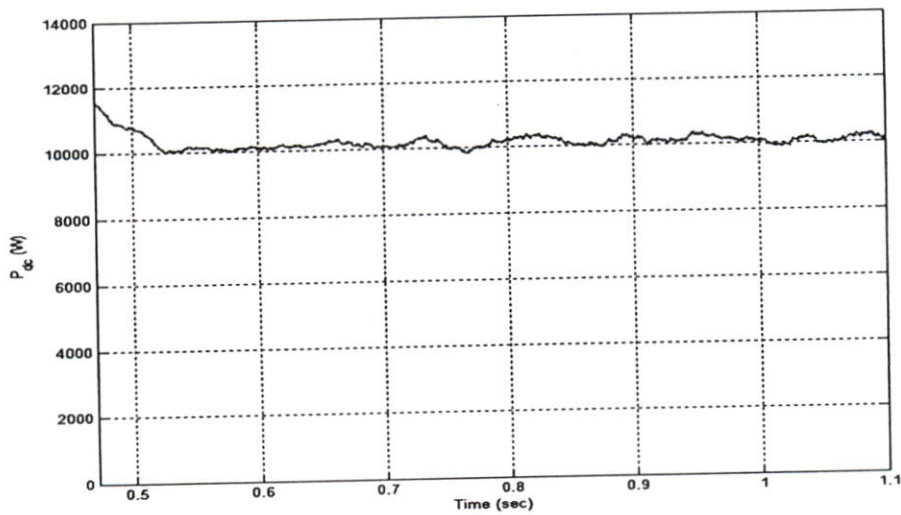
รูปที่ 5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายขณะทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



รูปที่ 5.6 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



รูปที่ 5.7 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



รูปที่ 5.8 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s

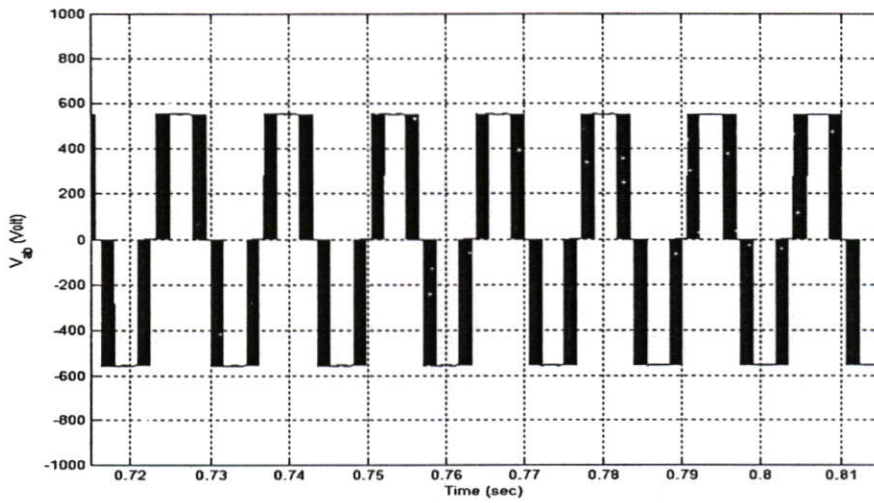
จากรูปที่ (5.3) และรูปที่ (5.4) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_o มีมุมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_o เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s

และในรูปที่ (5.5) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที ที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนรูปที่ (5.6) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมในการเพิ่มความเร็วรอบอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งทำให้แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่

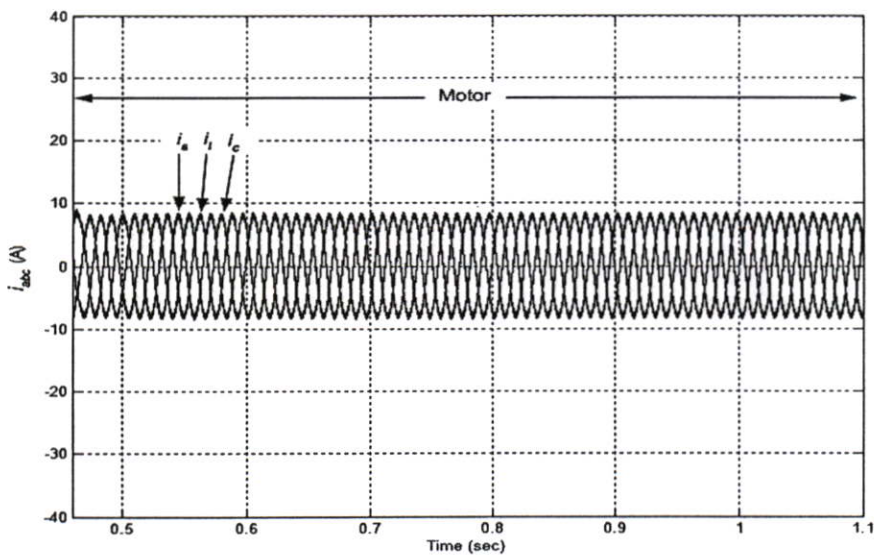
จากรูปที่ (5.7) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะทำงานในโหมดของมอเตอร์ ดังนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าเป็นบวกเท่ากับ 27 A

และในรูปที่ (5.8) แสดงกำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที ที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

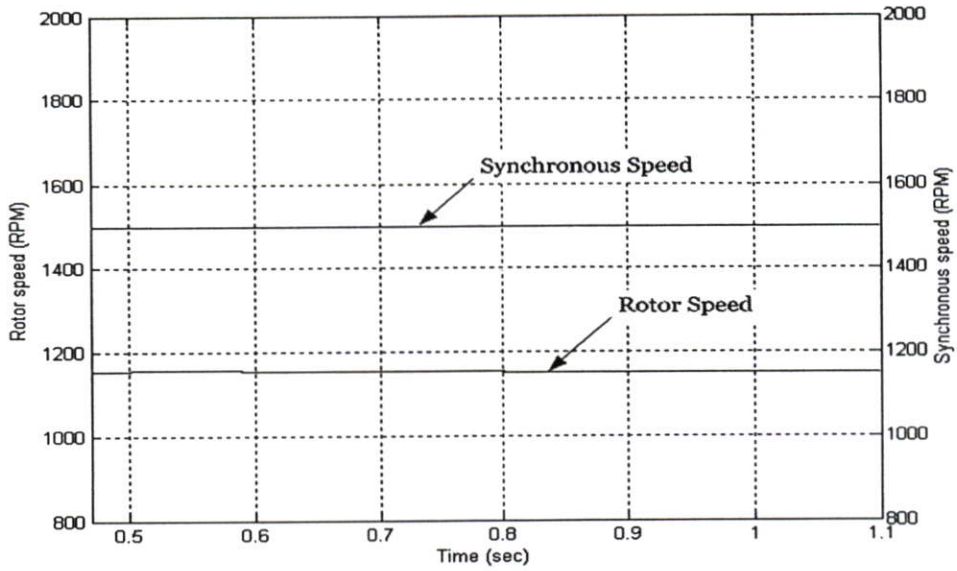
5.3.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



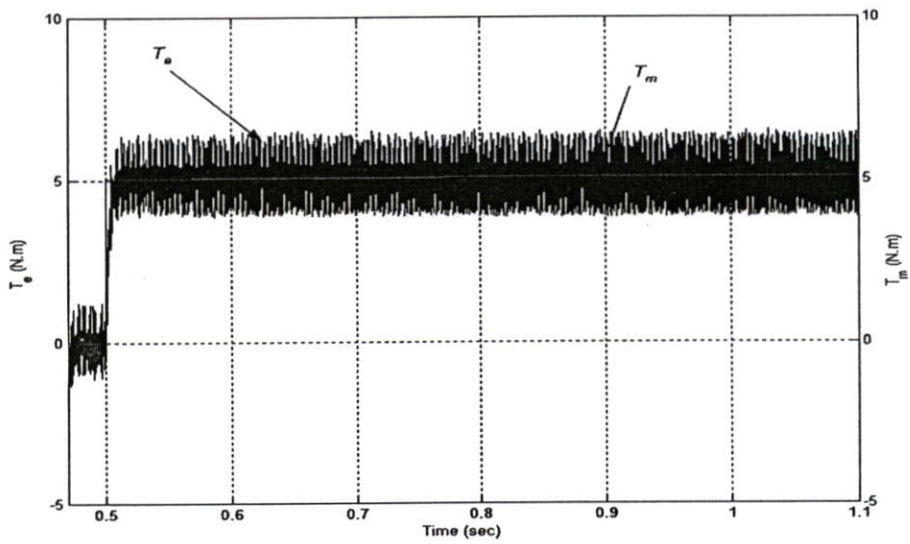
รูปที่ 5.9 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



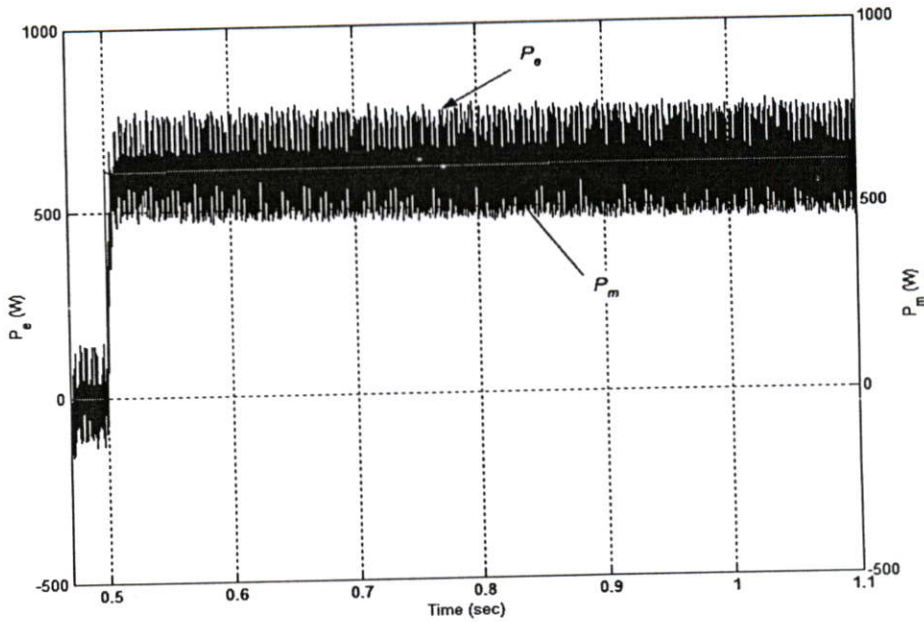
รูปที่ 5.10 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



รูปที่ 5.11 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



รูปที่ 5.12 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s



รูปที่ 5.13 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมด มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 4 m/s

จากรูปที่ (5.9) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

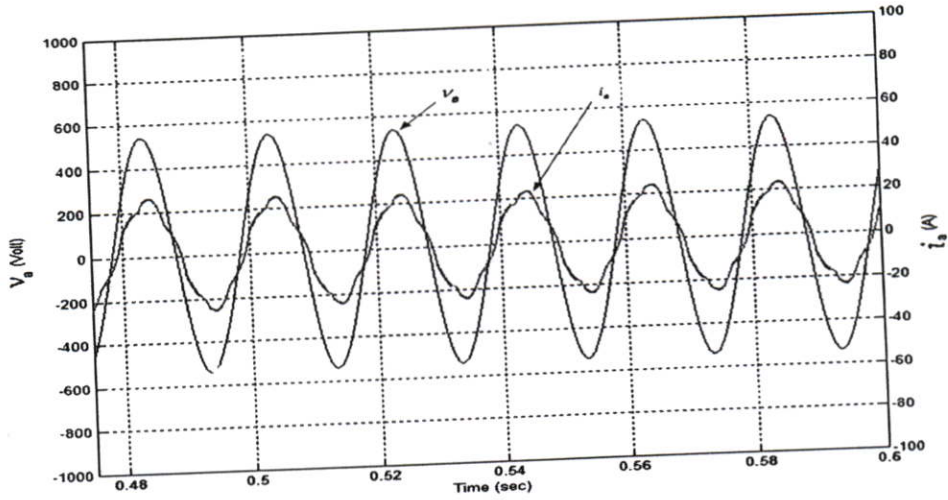
และจากรูปที่ (5.10) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเท่าเดิม

จากรูปที่ (5.11) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคจรซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

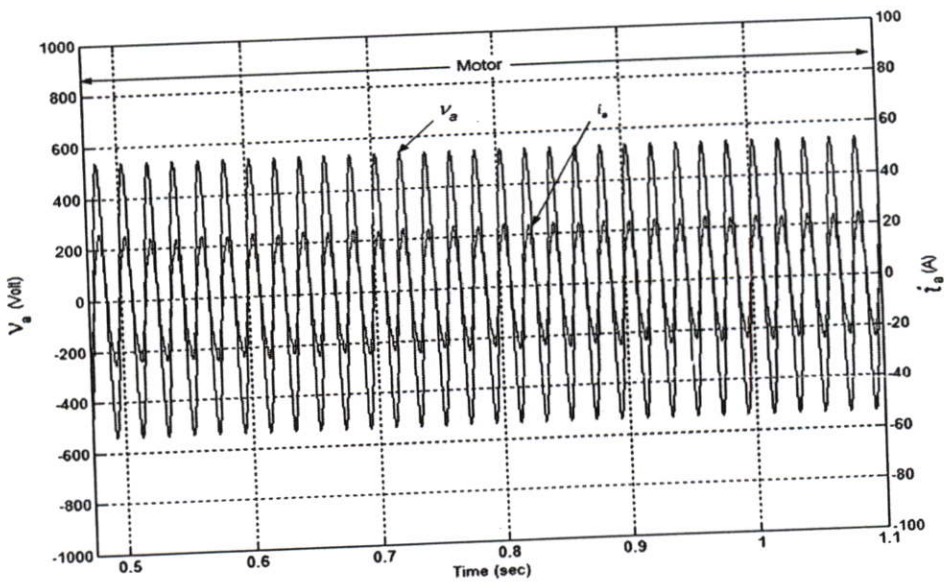
จากรูปที่ 5.12 แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 4 m/s นี้ไม่สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซิงโครนัสได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าของแรงบิดทางกล T_m และค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e มีค่าเท่ากัน และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าทางกล P_m และค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e จะมีค่าเท่ากันด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.13

5.4 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s

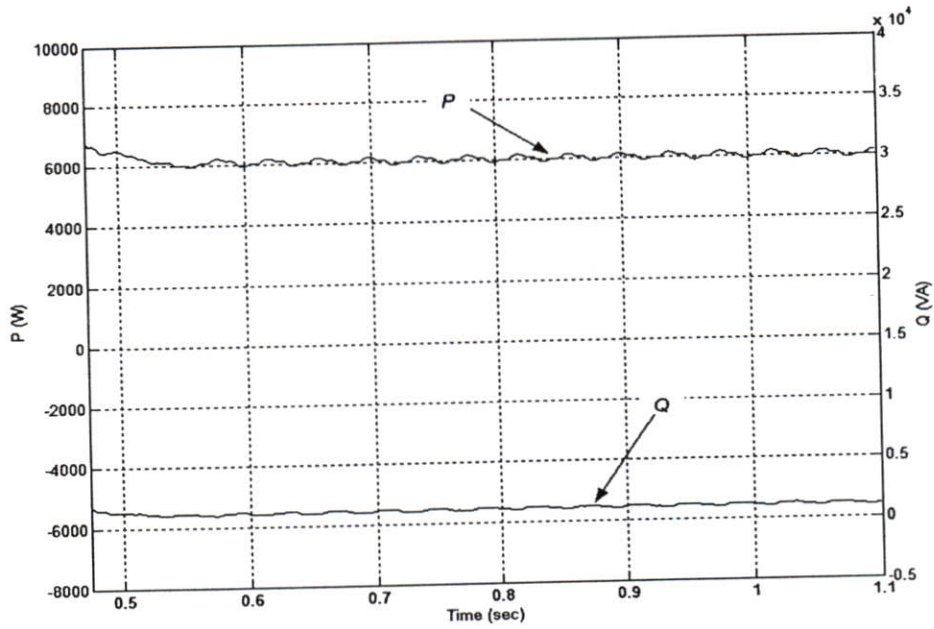
5.4.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



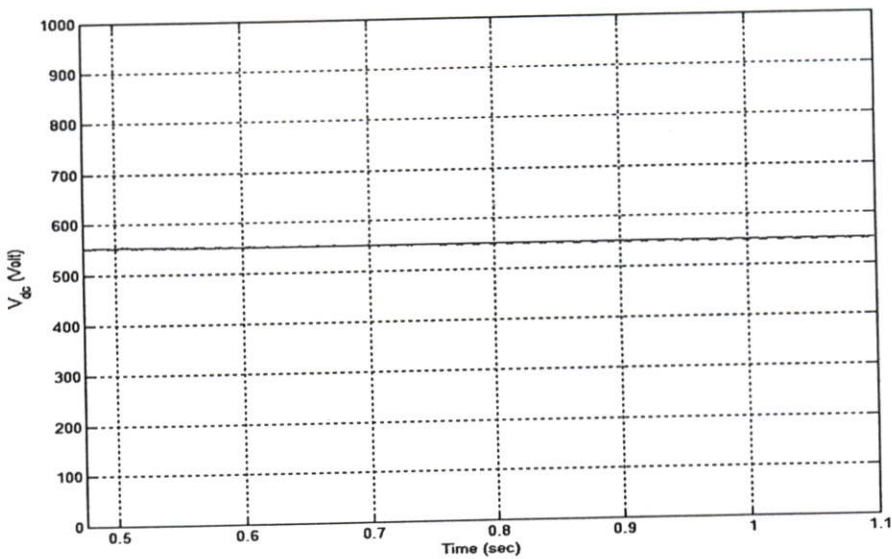
รูปที่ 5.14 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



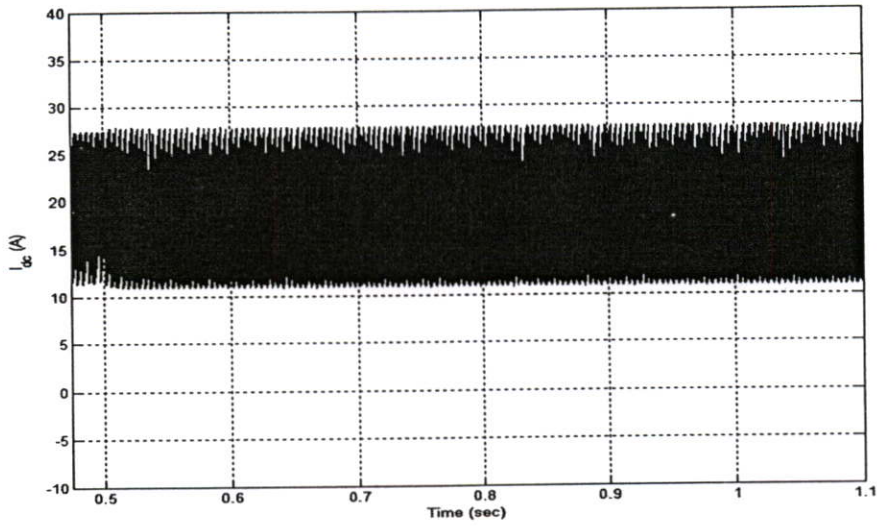
รูปที่ 5.15 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



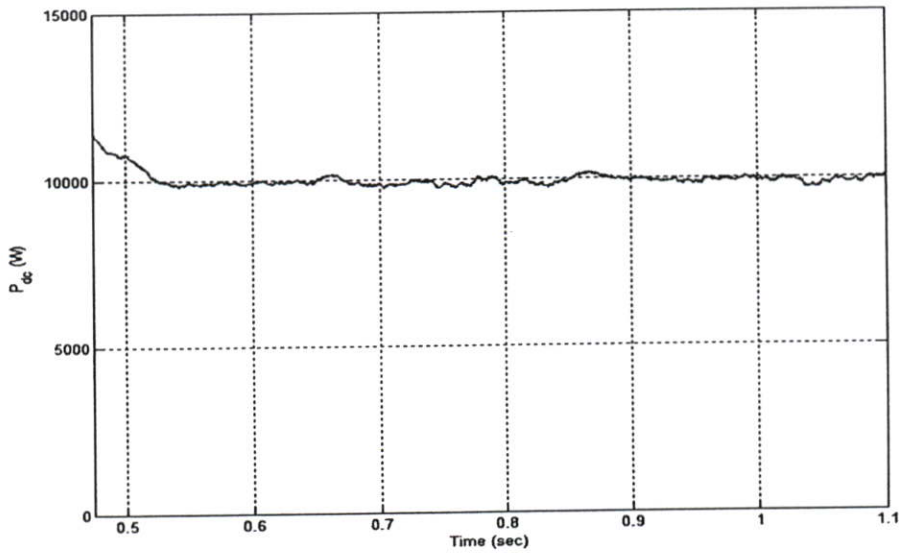
รูปที่ 5.16 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อทำงานใน โหมดมอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



รูปที่ 5.17 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



รูปที่ 5.18 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



รูปที่ 5.19 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s

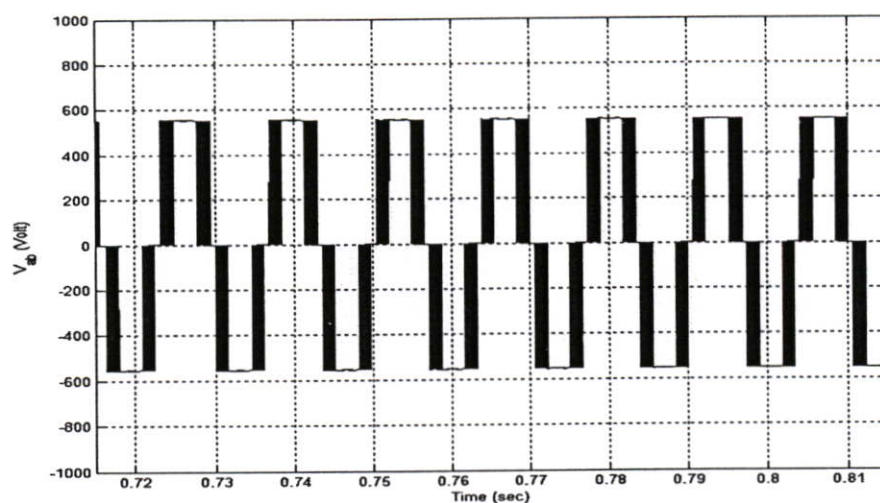
จากรูปที่ (5.14) และรูปที่ (5.15) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_d มีมูมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_d เป็นมูม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ซึ่งความเร็วลมขนาดนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s

และในรูปที่ (5.16) แสดงความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งहनลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ส่วนรูปที่ (5.17) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งहनลมในการเพิ่มความเร็วรอบอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่

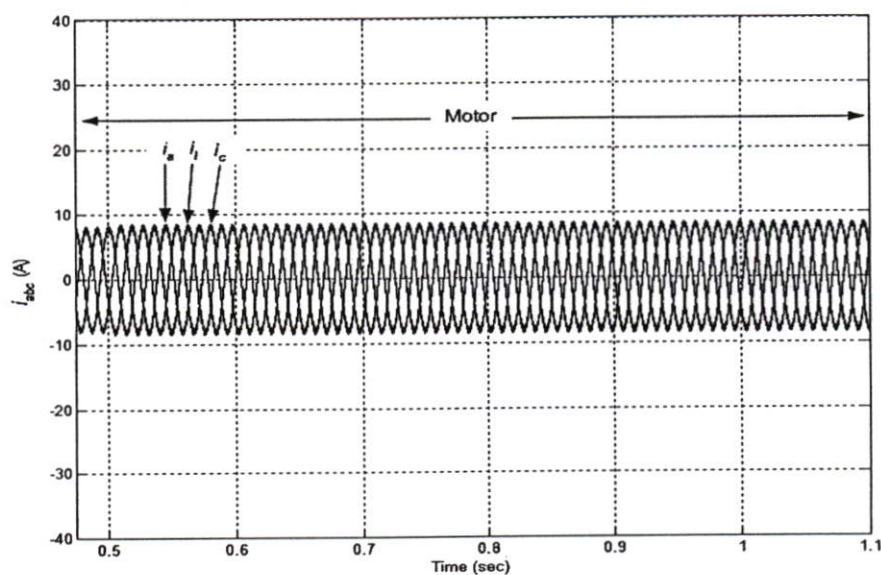
จากรูปที่ (5.18) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะทำงานในโหมดของมอเตอร์ ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าเป็นบวกประมาณเท่ากับ 27 A

และในรูปที่ (5.19) แสดงค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งहनลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

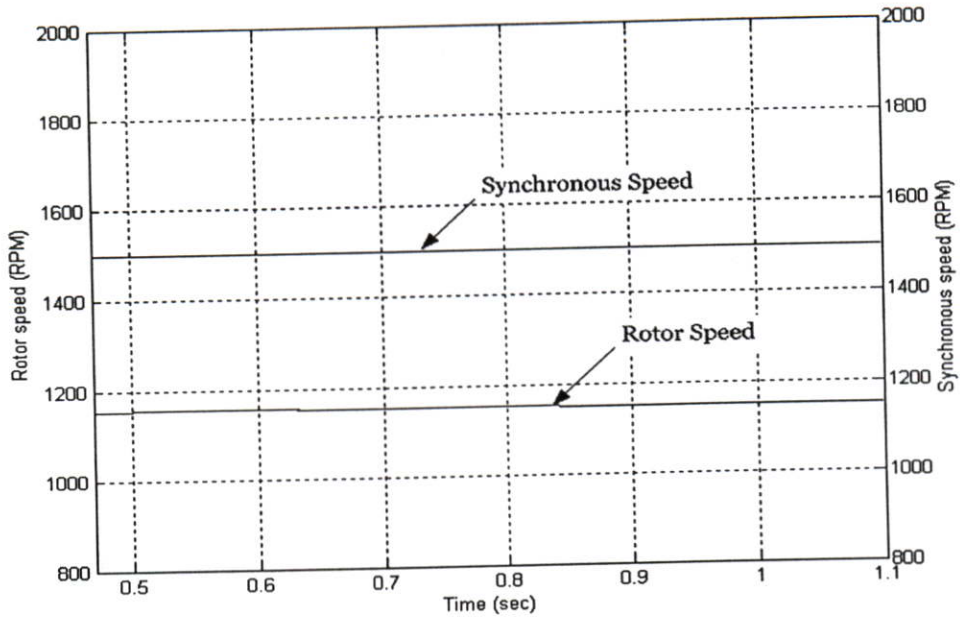
5.4.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



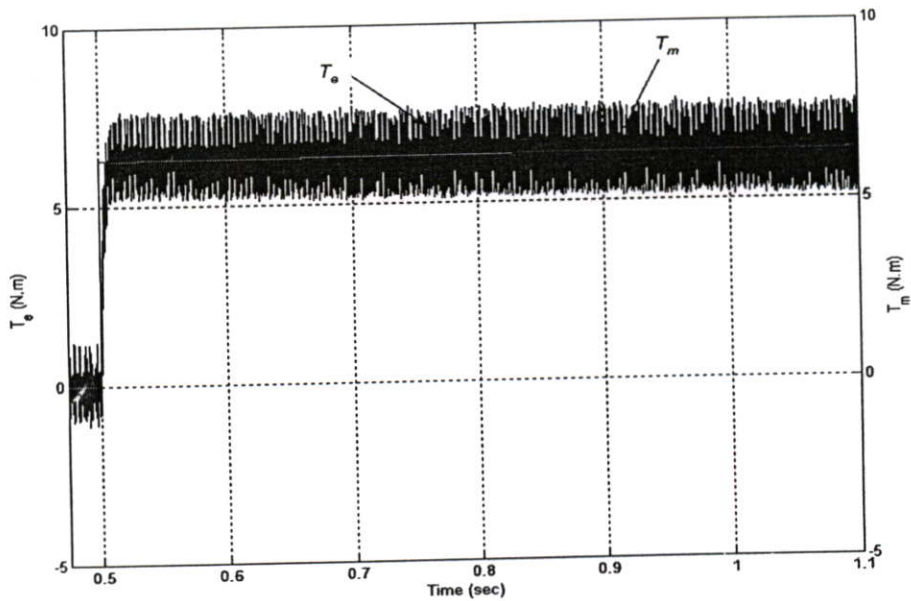
รูปที่ 5.20 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



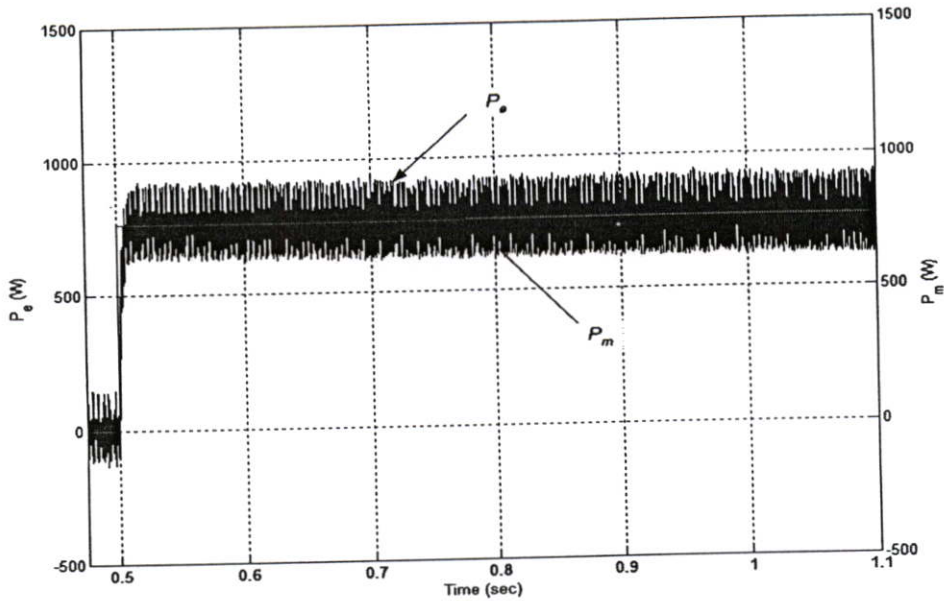
รูปที่ 5.21 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



รูปที่ 5.22 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



รูปที่ 5.23 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s



รูปที่ 5.24 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 5 m/s

จากรูปที่ (5.20) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

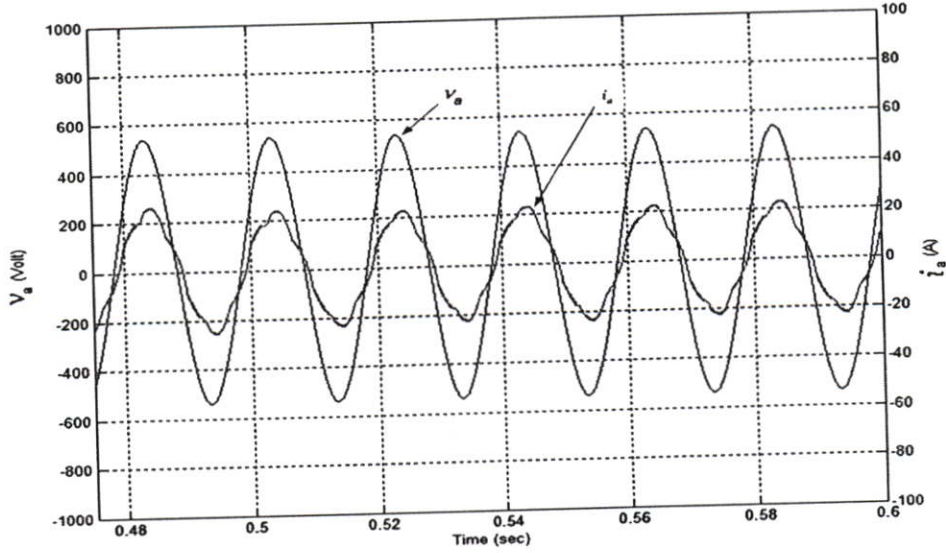
และจากรูปที่ (5.21) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s นี้ มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเท่าเดิม

จากรูปที่ (5.22) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคตัสซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s นี้ไม่สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

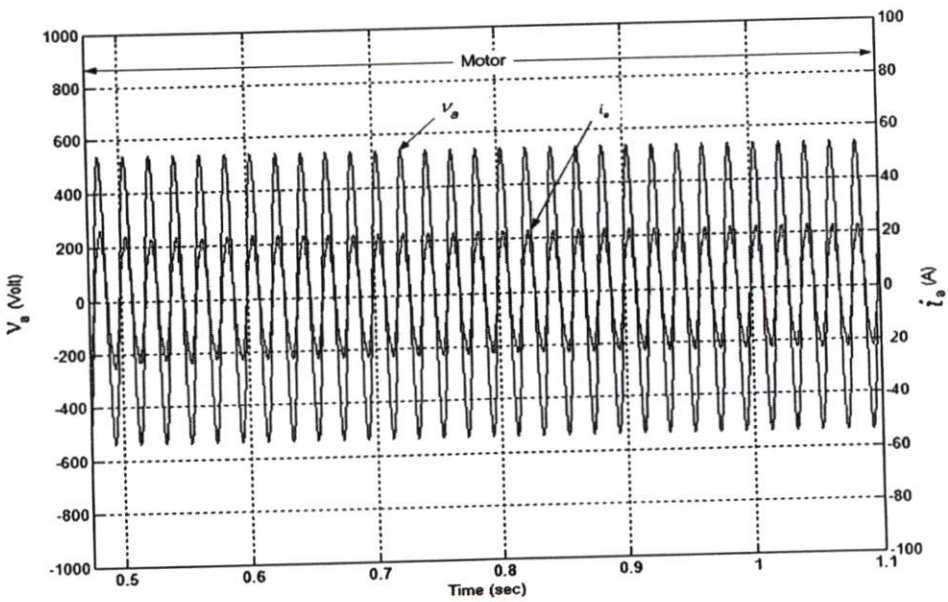
จากรูปที่ (5.23) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 5 m/s นี้ไม่สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซิงโครนัสได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าของแรงบิดทางกล T_m และค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e มีค่าเท่ากัน และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าทางกล P_m และค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e จะมีค่าเท่ากันด้วยดังแสดงในรูปที่ (5.24)

5.5 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s

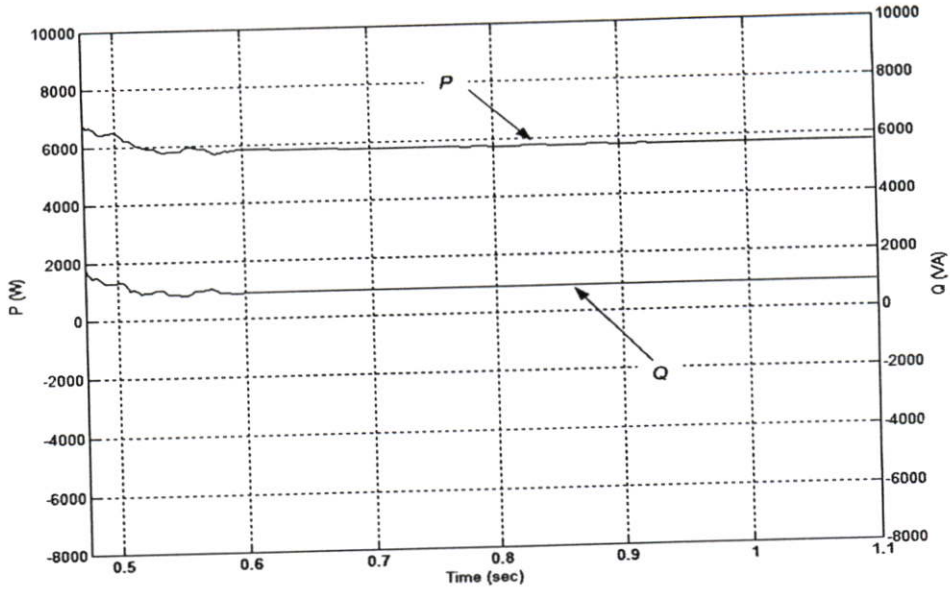
5.5.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



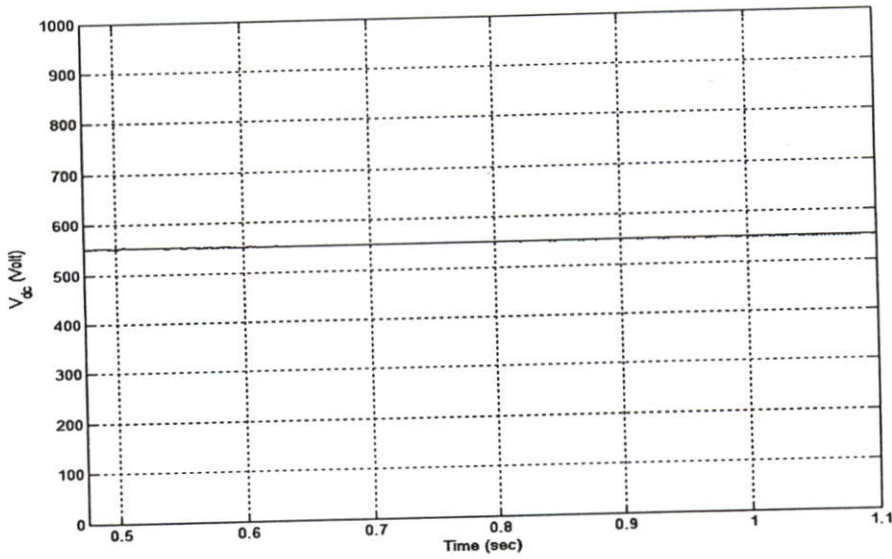
รูปที่ 5.25 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



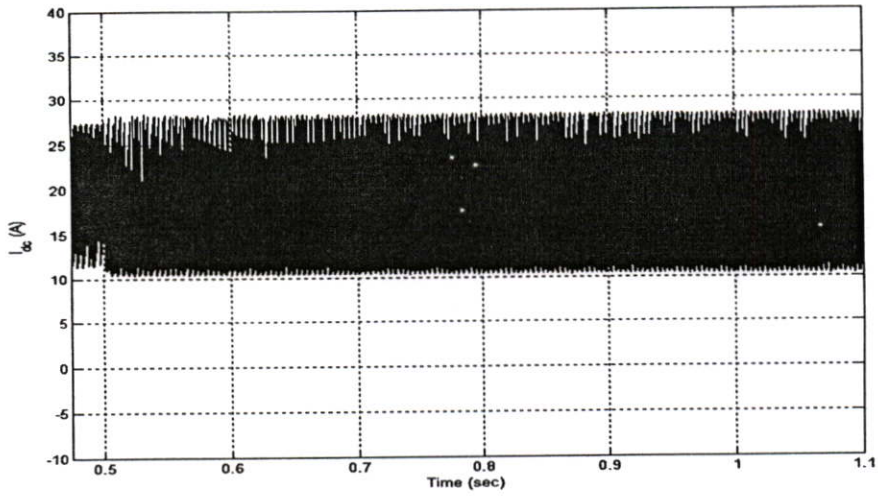
รูปที่ 5.26 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



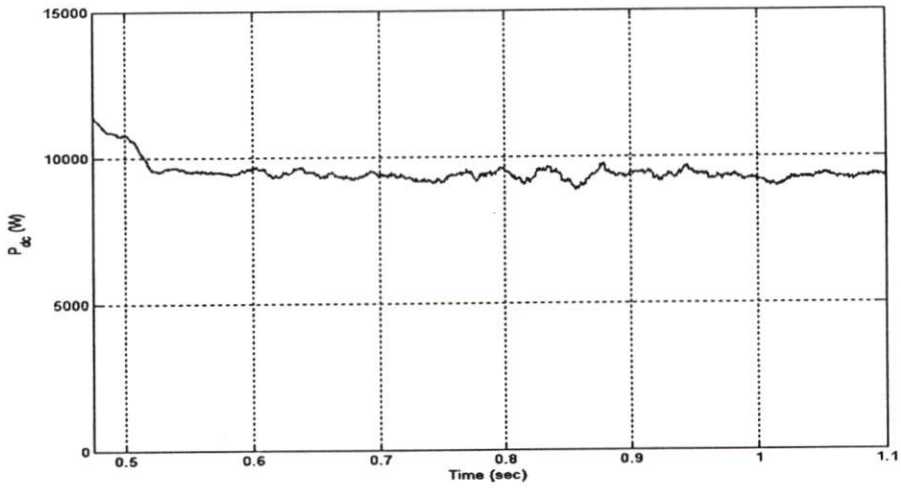
รูปที่ 5.27 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



รูปที่ 5.28 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



รูปที่ 5.29 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



รูปที่ 5.30 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s

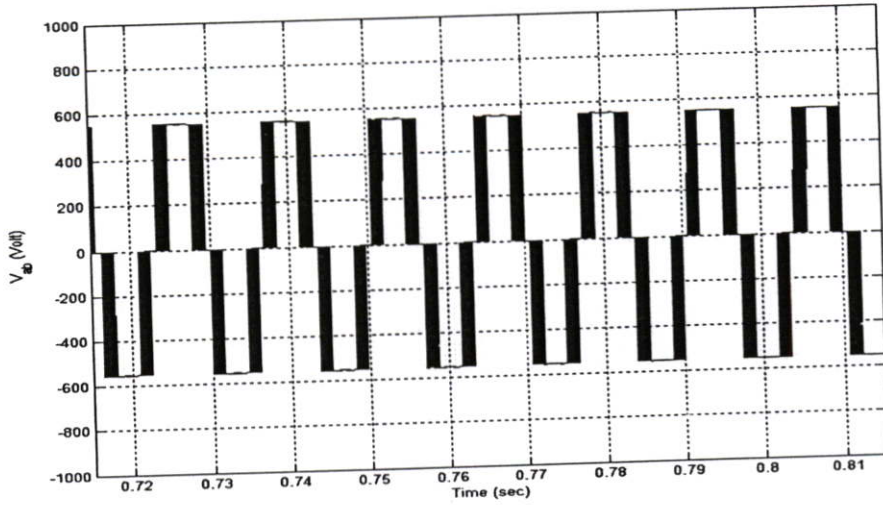
จากรูปที่ (5.25) และรูปที่ (5.26) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_d มีมูอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_d เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ซึ่งความเร็วลมขนาดนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s

และในรูปที่ (5.27) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนรูปที่ (5.28) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมในการเพิ่มความเร็วรอบอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่

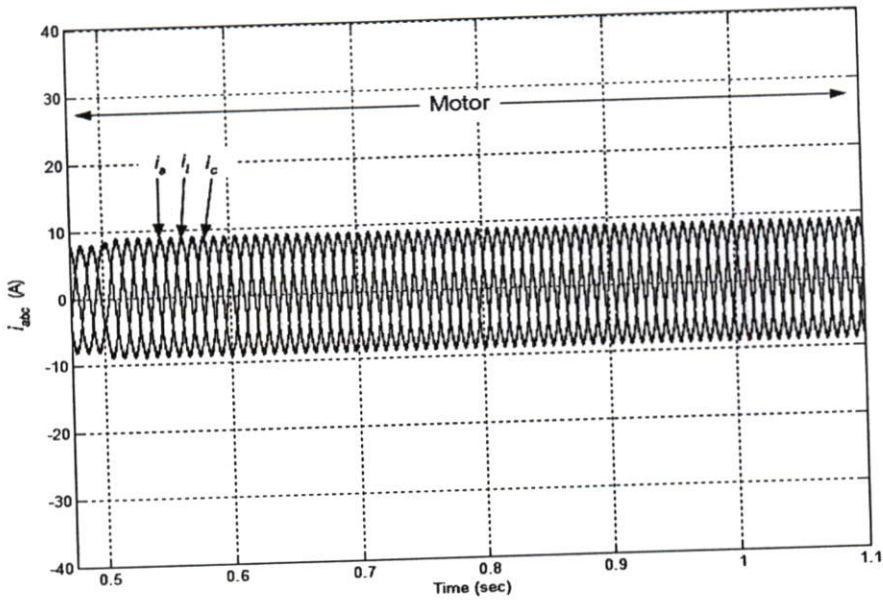
จากรูปที่ (5.29) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ซึ่งความเร็วลมขนาดนี้ ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะทำงานในโหมดของมอเตอร์ ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าเป็นบวกประมาณเท่ากับ 27 A และค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย

และในรูปที่ (5.30) แสดงกำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

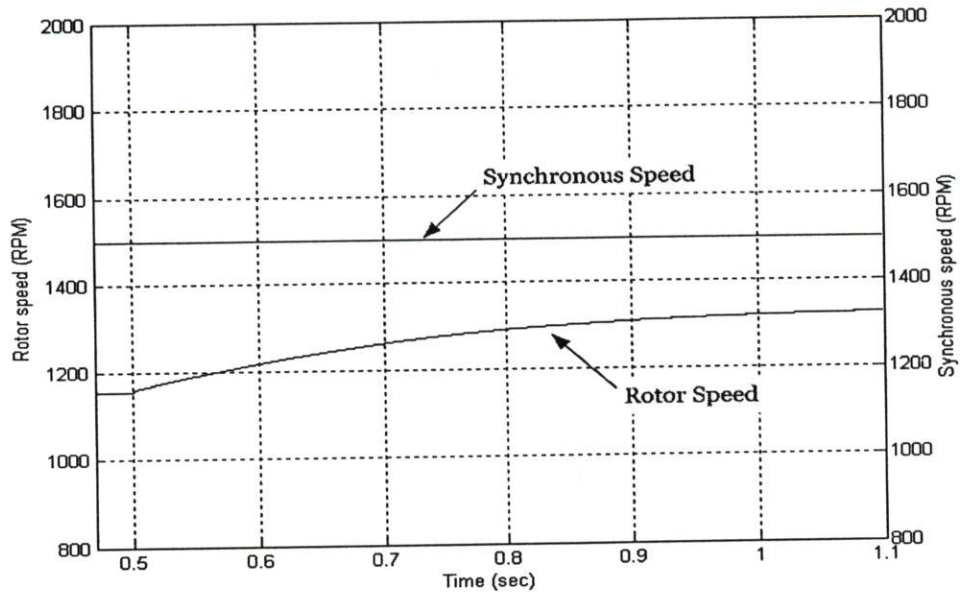
5.5.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



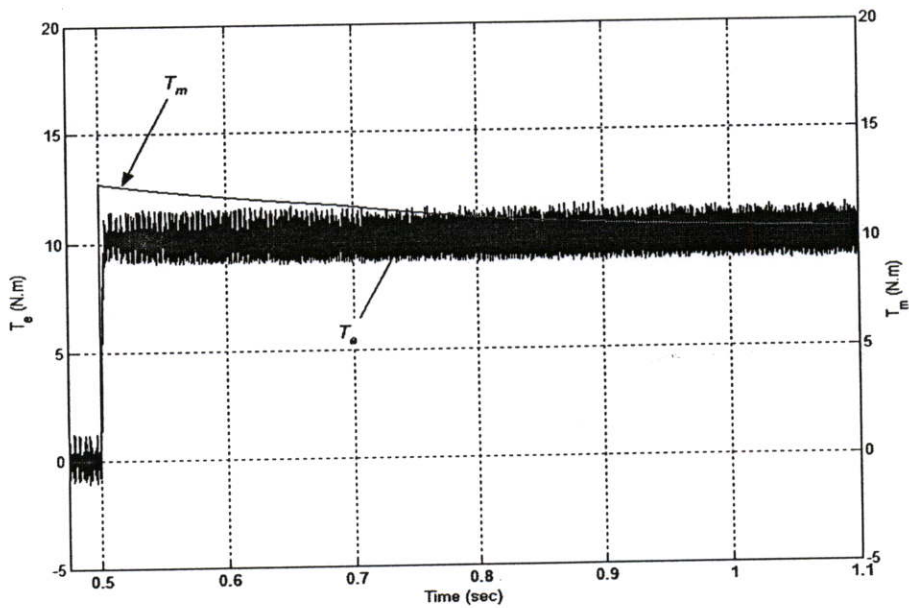
รูปที่ 5.31 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



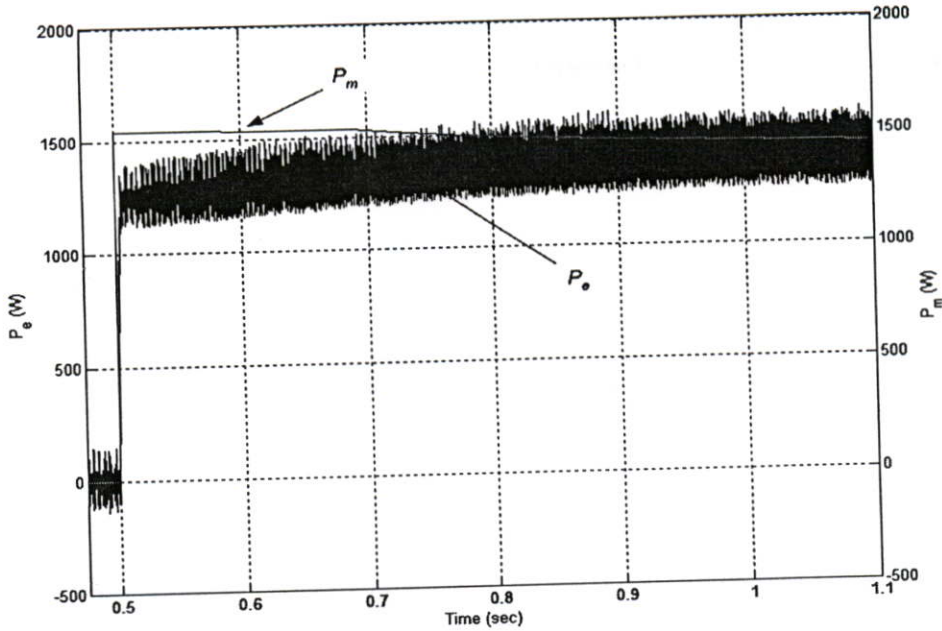
รูปที่ 5.32 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



รูปที่ 5.33 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



รูปที่ 5.34 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s



รูปที่ 5.35 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 6 m/s

จากรูปที่ (5.31) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

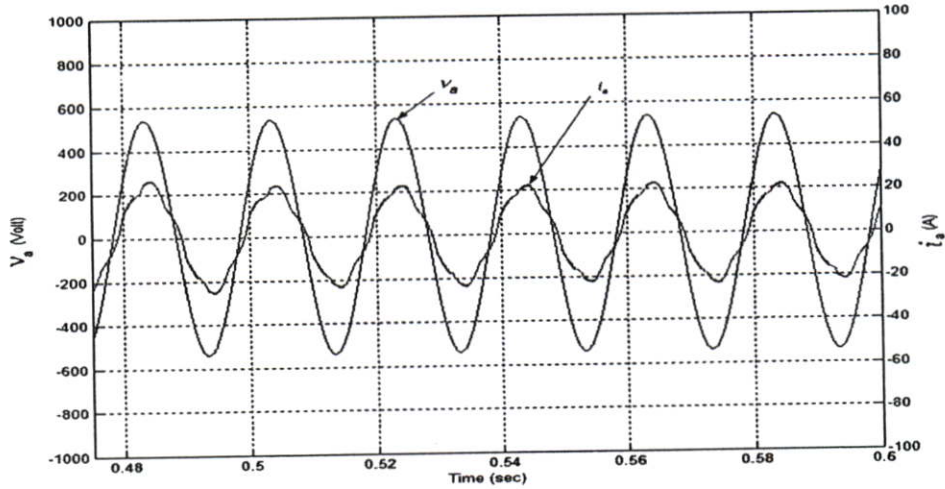
และจากรูปที่ (5.32) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเท่าเดิม

จากรูปที่ (5.33) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วซิงโครนัสซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น โดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เท่ากับ 1300 rpm แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ ไม่สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซิงโครนัสได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

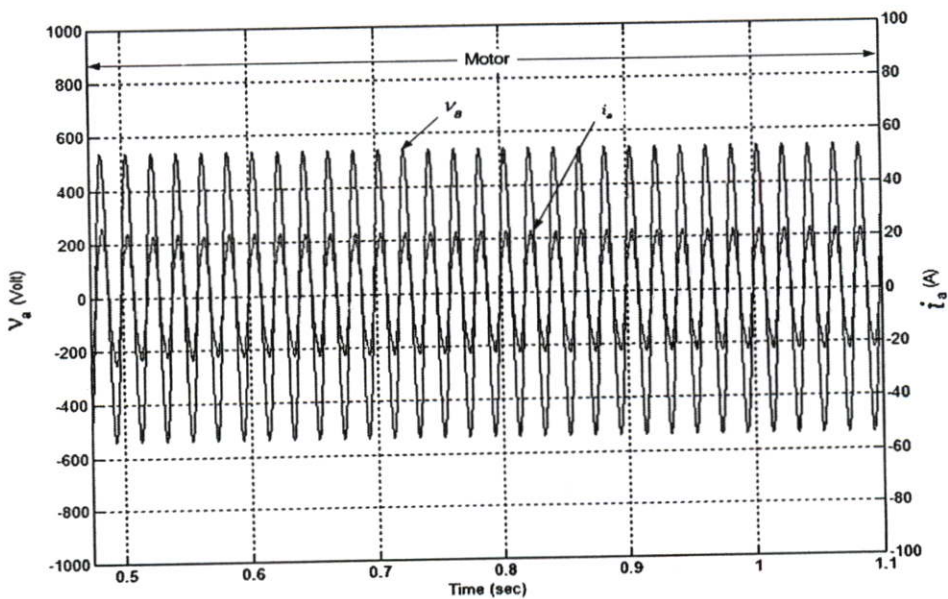
จากรูปที่ (5.34) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมขนาดนี้ไม่สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าของแรงบิดทางกล T_m และค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e มีค่าเท่ากัน และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่าของกำลังไฟฟ้าทางกล P_m และค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e จะมีค่าเท่ากันด้วยดังแสดงในรูปที่ (5.35)

5.6 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s

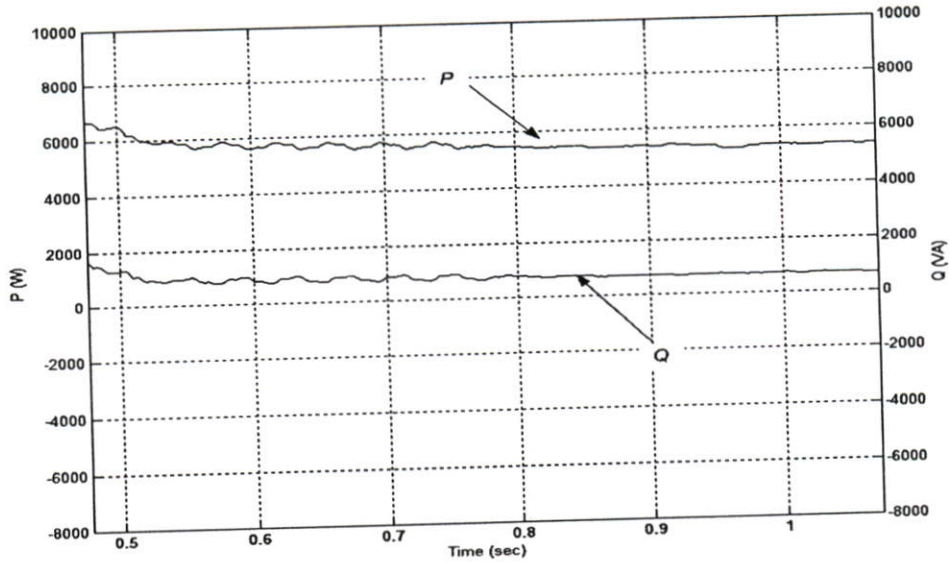
5.6.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



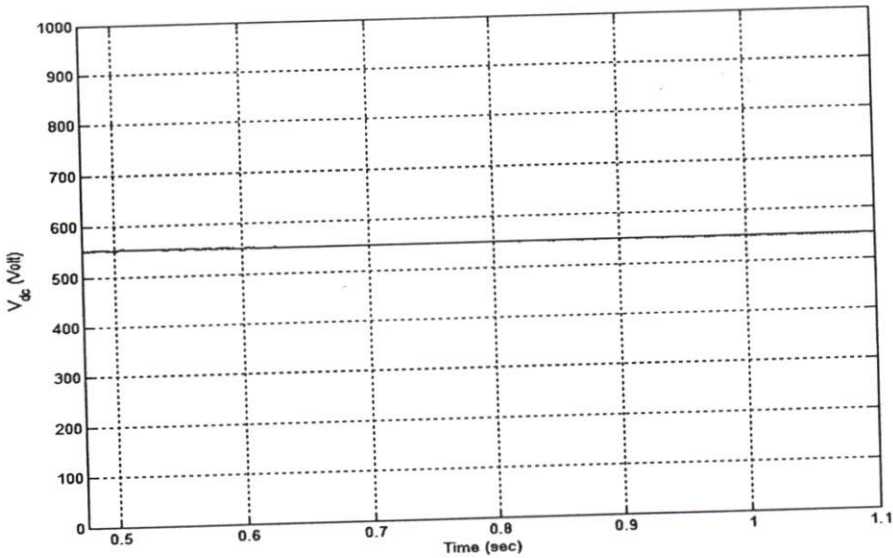
รูปที่ 5.36 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



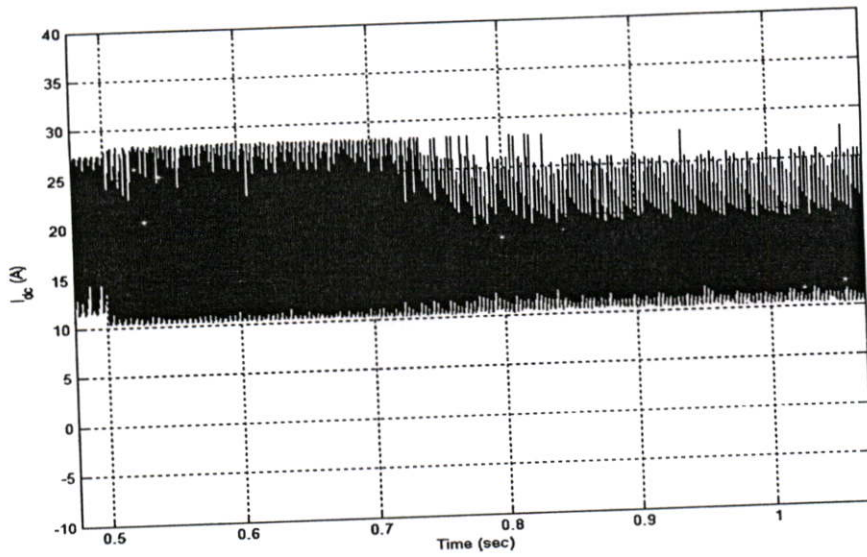
รูปที่ 5.37 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



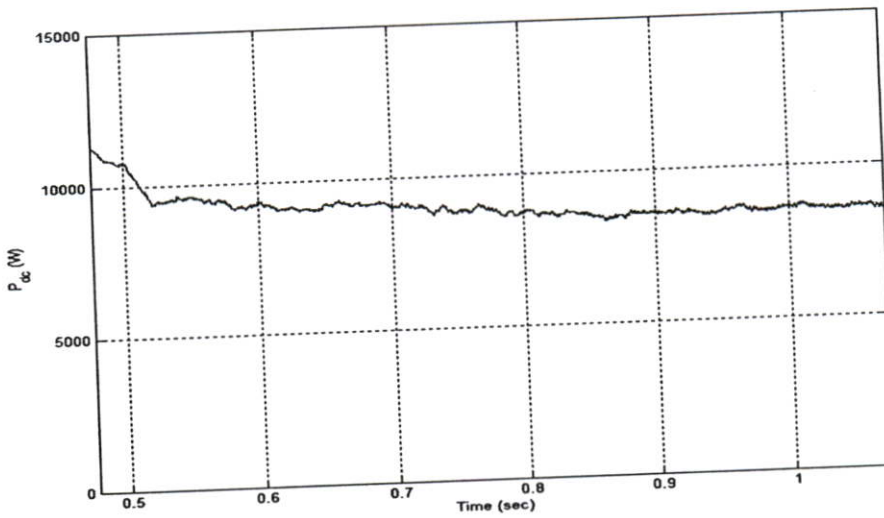
รูปที่ 5.38 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



รูปที่ 5.39 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



รูปที่ 5.40 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



รูปที่ 5.41 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s

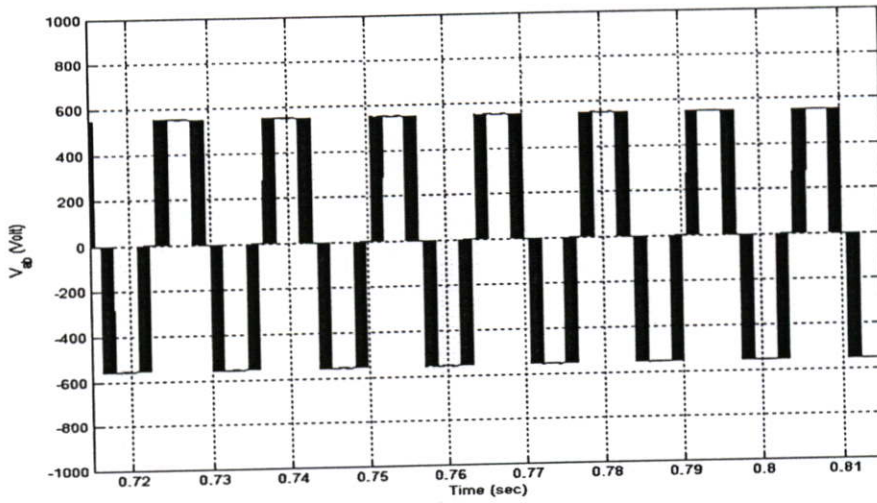
จากรูปที่ (5.36) และรูปที่ (5.37) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_a มีมูมิเฟสกับ แรงดันอินพุต v_a เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ซึ่งความเร็วลมขนาดนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s

และในรูปที่ (5.38) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งหั่นลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ส่วนรูปที่ (5.39) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งหั่นลมในการเพิ่มความเร็วรอบอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่

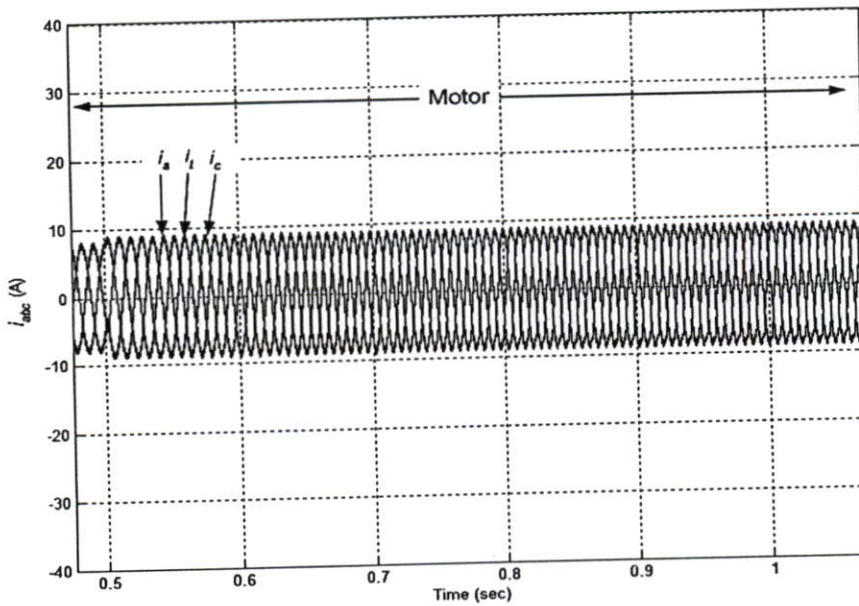
จากรูปที่ (5.40) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะทำงานในโหมดของมอเตอร์ ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าเป็นบวกประมาณเท่ากับ 27 A ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.7 วินาทีไปแล้วนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย

และในรูปที่ (5.41) แสดงค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งหั่นลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

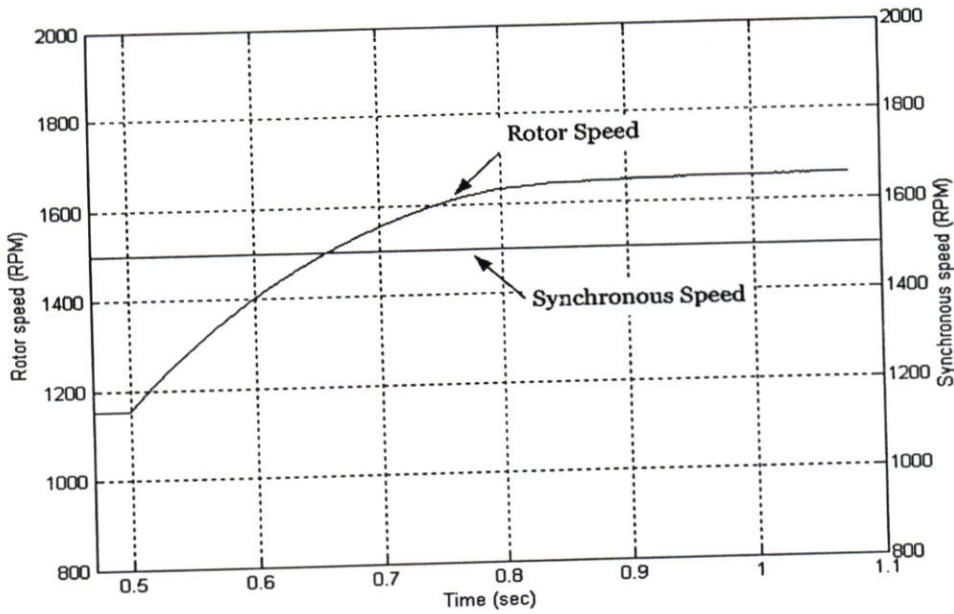
5.6.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



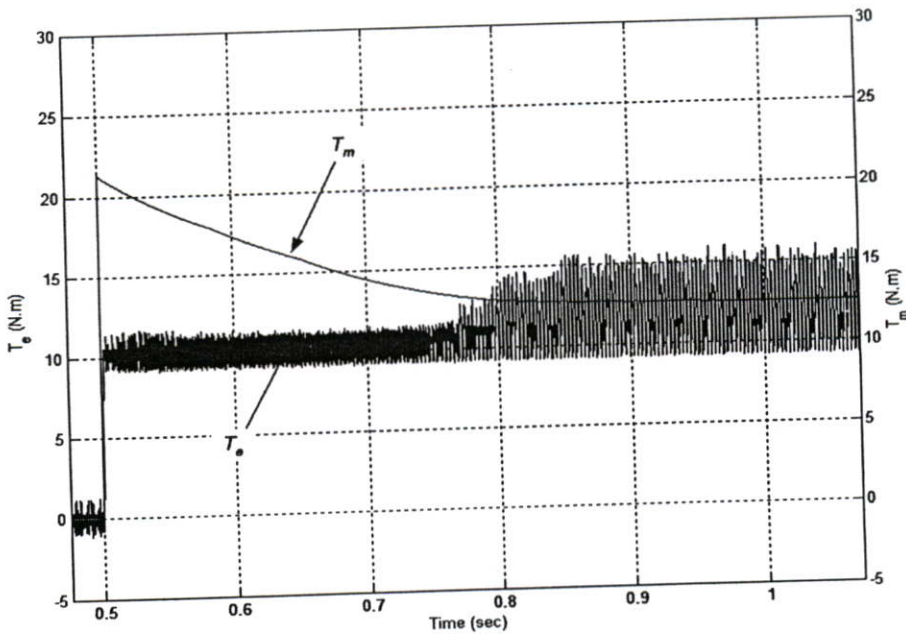
รูปที่ 5.42 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



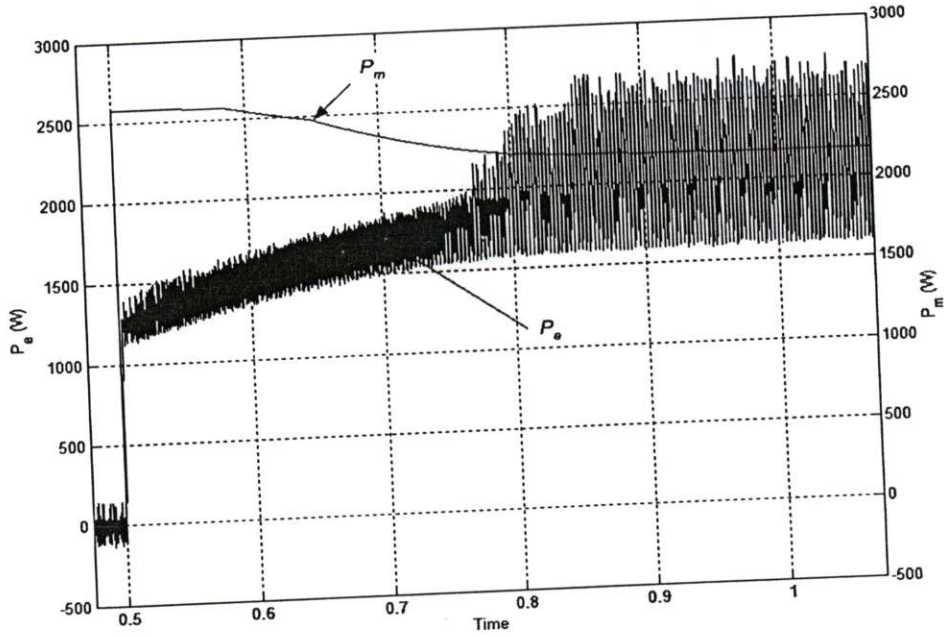
รูปที่ 5.43 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
มอเตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



รูปที่ 5.44 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



รูปที่ 5.45 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s



รูปที่ 5.46 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 7 m/s

จากรูปที่ (5.42) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

และจากรูปที่ (5.43) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเท่าเดิม

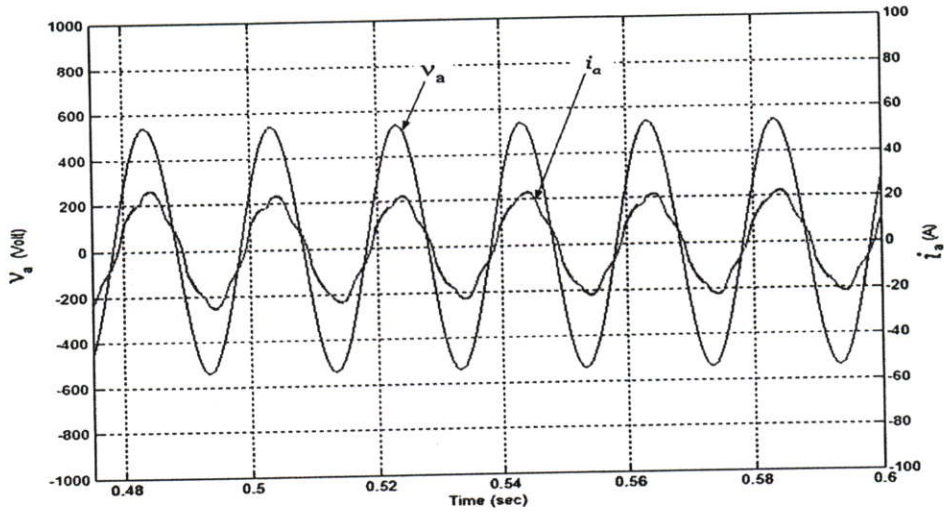
จากรูปที่ (5.44) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วซิงโครนัสซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงเวลาที่ 0.7 วินาที

เป็นต้นไปโดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เท่ากับ 1650 rpm แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซึ่งโคนส์ได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถเปลี่ยนโหมคการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ แต่มอเตอร์ยังไม่สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ยังคงทำงานในโหมคของมอเตอร์อยู่

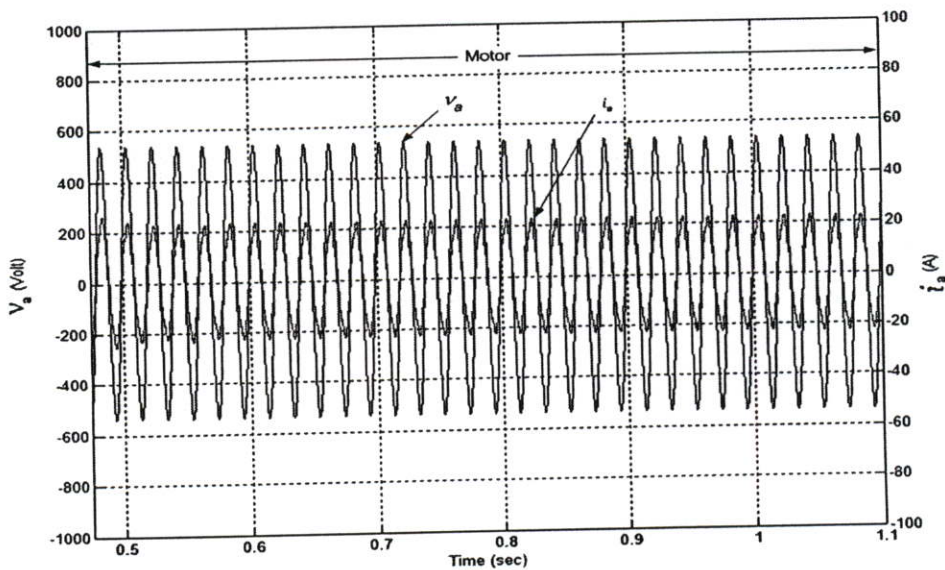
จากรูปที่ (5.45) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 7 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e แต่ช่วงหนึ่ง แต่ในช่วงเวลาที่ 0.8 วินาที เป็นต้นไปนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่าเท่ากับค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ยังคงทำงานในโหมคของมอเตอร์อยู่ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าของแรงบิดทางกล T_m และค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e มีค่าเท่ากัน และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_m มีค่ามากกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e ในช่วงเวลาที่ 0.5 ถึง 0.8 วินาที แต่ในช่วงเวลาที่ 0.8 วินาที เป็นต้นไปนั้นค่าของกำลังไฟฟ้าทางกล P_m และค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e จะมีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ (5.46) ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ยังคงทำงานในโหมคของมอเตอร์อยู่

5.7 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s

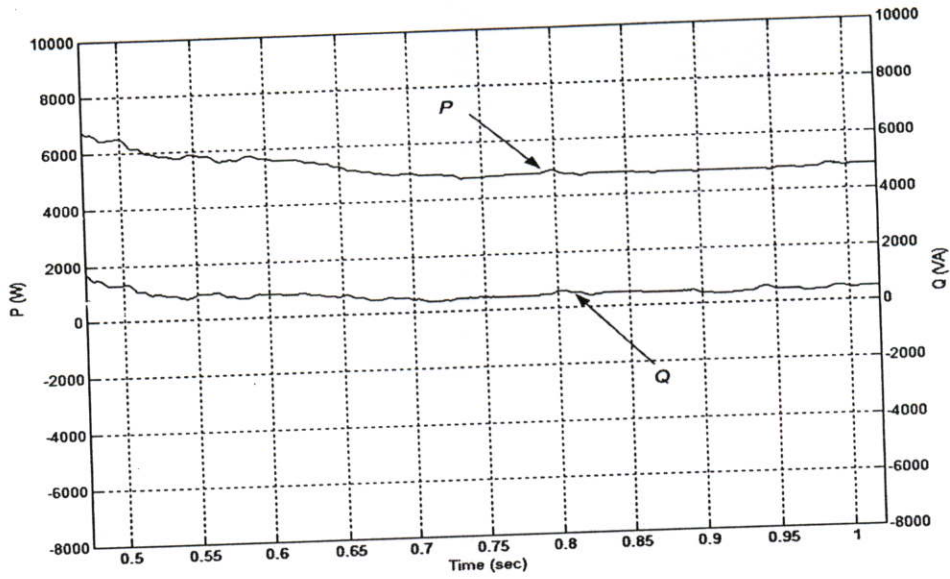
5.7.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



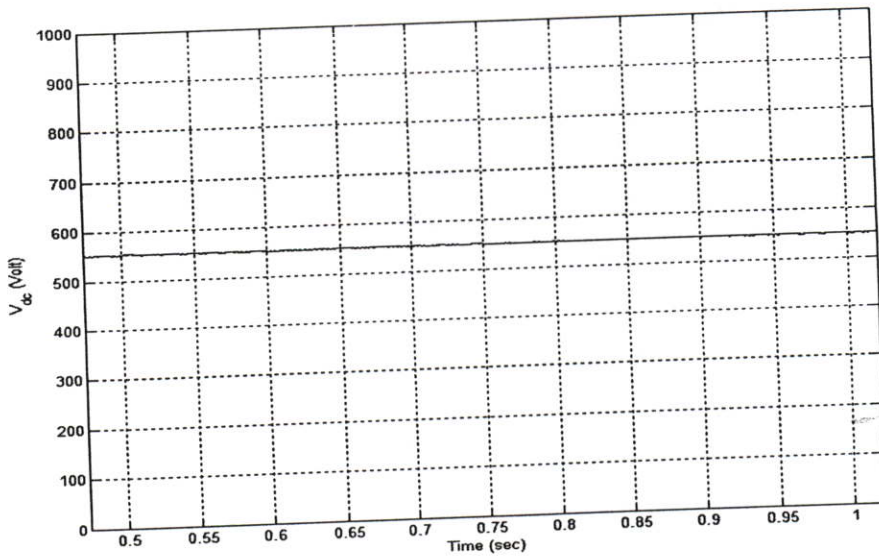
รูปที่ 5.47 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



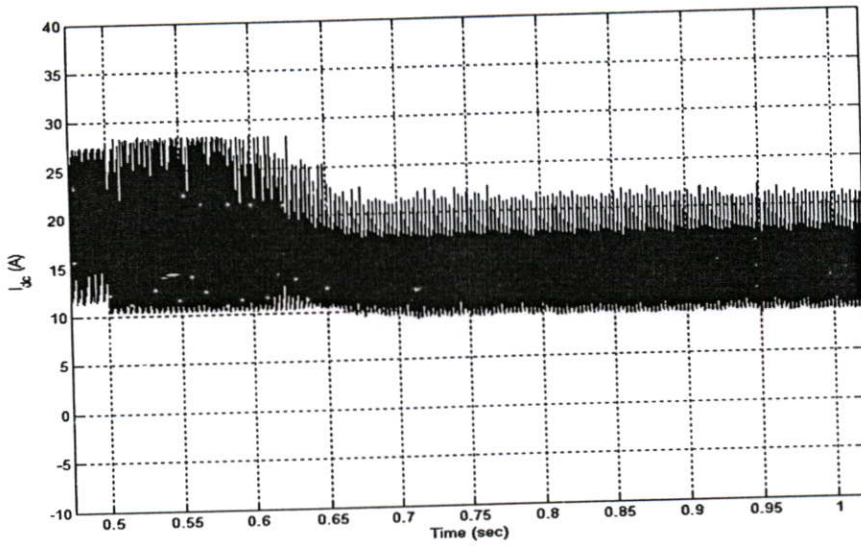
รูปที่ 5.48 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying ซึ่งไม่สามารถทำงานในโหมด Inverting ได้เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



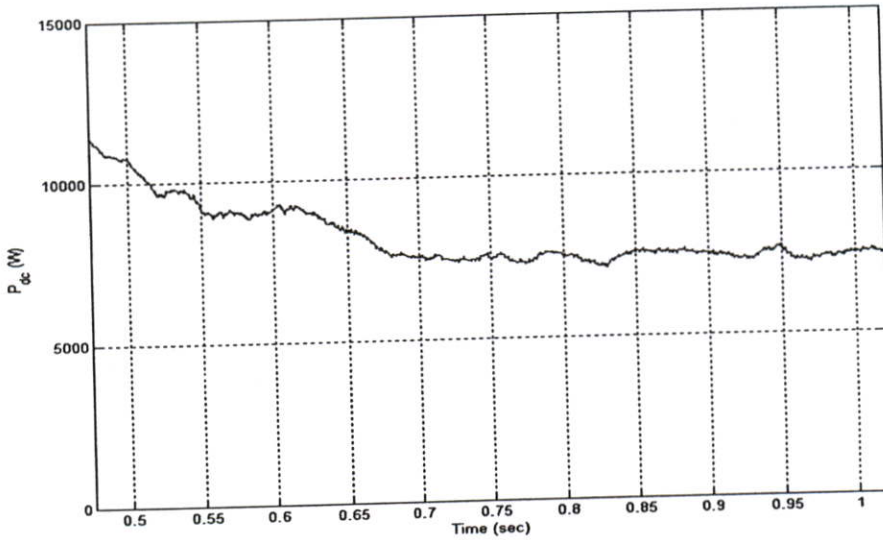
รูปที่ 5.49 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



รูปที่ 5.50 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



รูปที่ 5.51 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



รูปที่ 5.52 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s

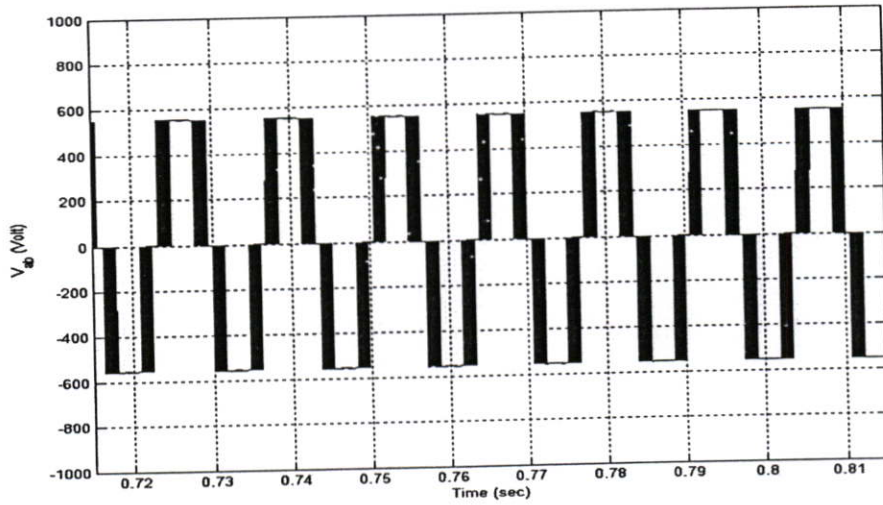
จากรูปที่ (5.47) และรูปที่ (5.48) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_d มีมุมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_d เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s

และในรูปที่ (5.49) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งहनลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนรูปที่ (5.50) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งहनลมนในการเพิ่มความเร็วรอบอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่

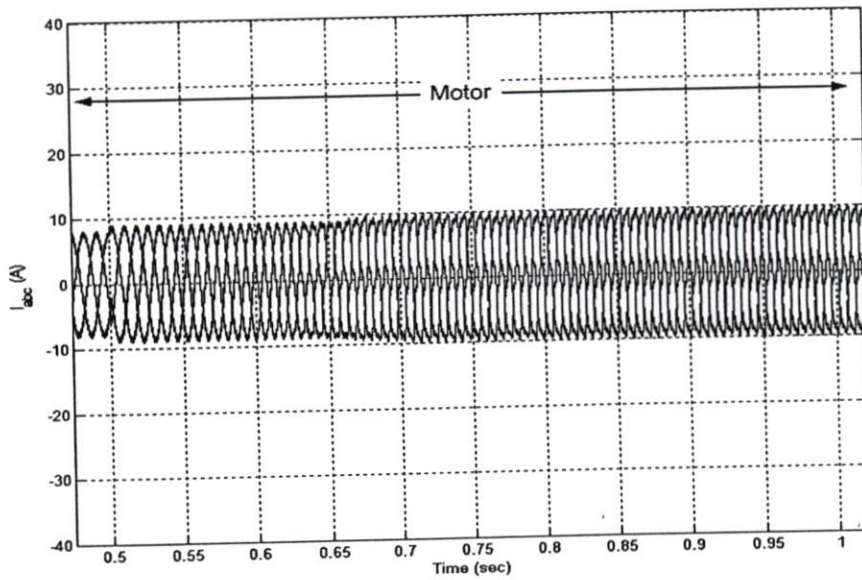
จากรูปที่ (5.51) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสแตเตอร์จะทำงานในโหมดของมอเตอร์ ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าเป็นบวกประมาณเท่ากับ 27 A ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีไปแล้วนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับค่ากระแสตอนเริ่มต้น

และในรูปที่ (5.52) แสดงค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เนื่องจากความเร็วลมระดับนี้ไม่สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กึ่งहनลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับค่ากระแสตอนเริ่มต้น เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

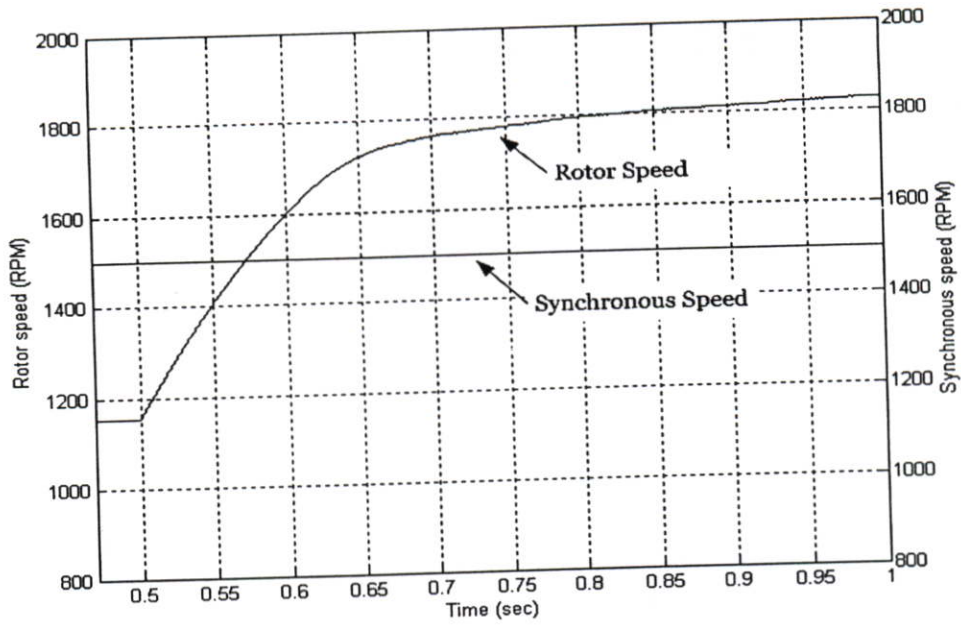
5.7.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



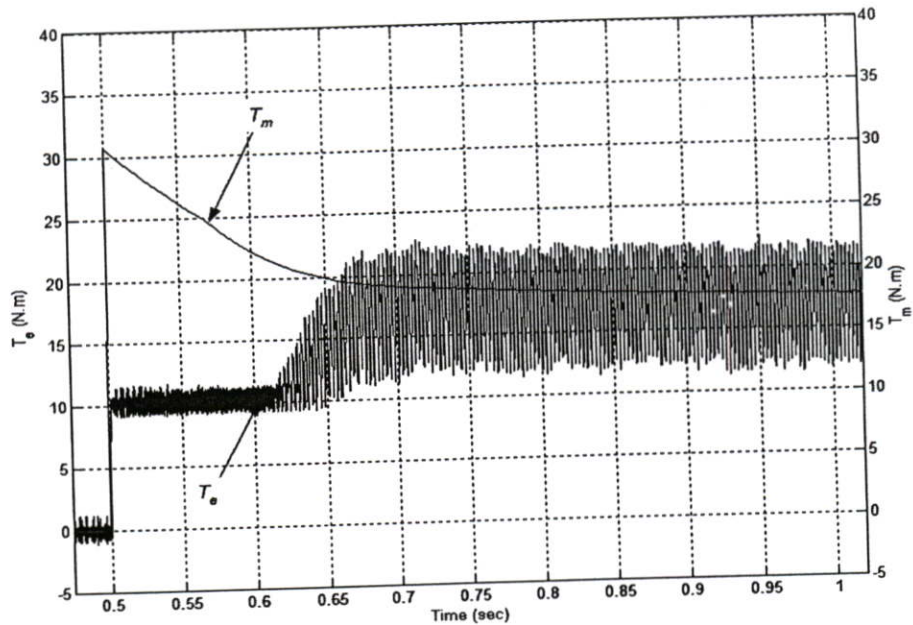
รูปที่ 5.53 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดคอมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



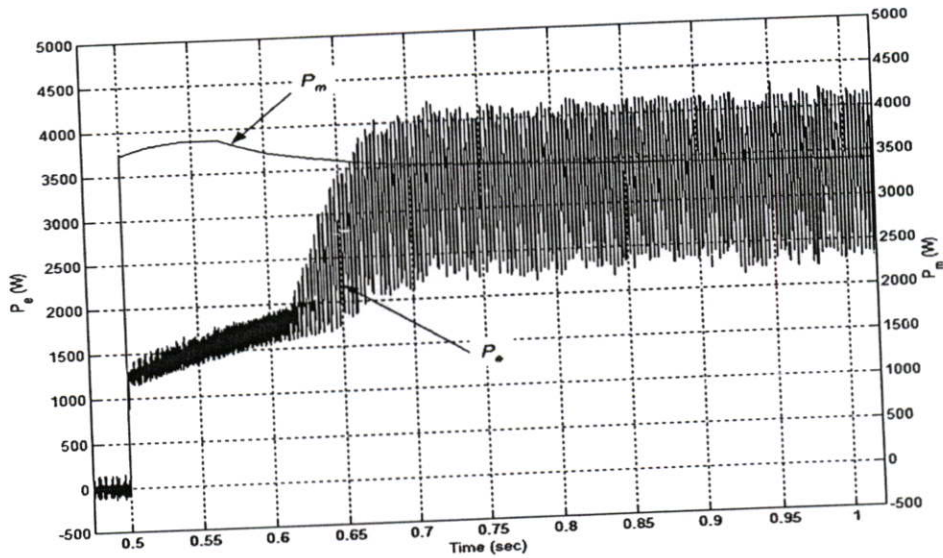
รูปที่ 5.54 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



รูปที่ 5.55 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



รูปที่ 5.56 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s



รูปที่ 5.57 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมดมอเตอร์
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 8 m/s

จากรูปที่ (5.53) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

และจากรูปที่ (5.54) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเท่าเดิม

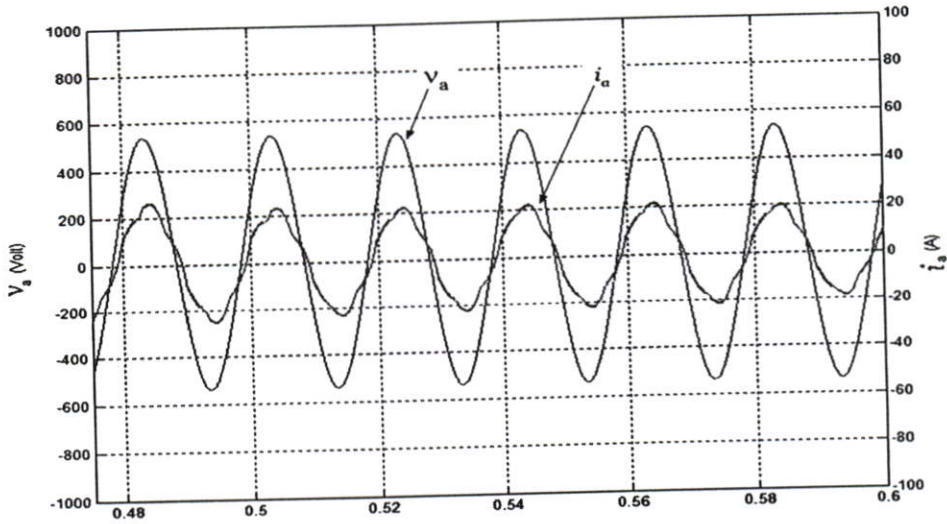
จากรูปที่ (5.55) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคไซน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาที เป็นต้นไปโดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ประมาณเท่ากับ 1800 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วเชิงโคไซน์ได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ แต่มอเตอร์ยังไม่สามารถส่งถ่าย

กำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ยังคงทำงานในโหมดของมอเตอร์อยู่เช่นเดิม

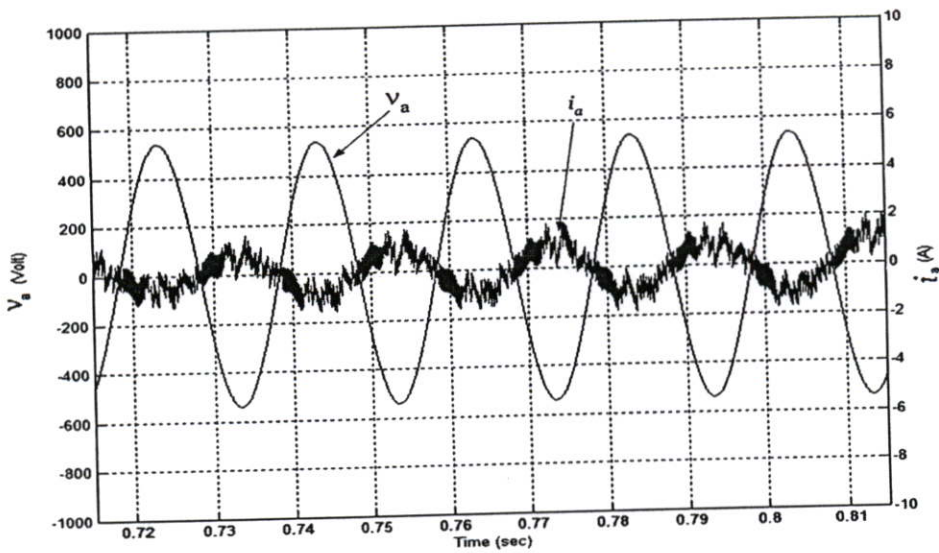
จากรูปที่ (5.56) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 8 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e แต่ช่วงหนึ่ง แต่ในช่วงเวลาที่ 0.65 วินาที เป็นต้นไปนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่าเท่ากับค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ยังคงทำงานในโหมดของมอเตอร์อยู่ซึ่งจะส่งผลให้ ค่าของแรงบิดทางกล T_m และค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e มีค่าเท่ากัน และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_m มีค่ามากกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e ในช่วงเวลาที่ 0.5 ถึง 0.65 วินาที แต่ในช่วงเวลาที่ 0.65 วินาที เป็นต้นไปนั้นค่าของกำลังไฟฟ้าทางกล P_m และค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e จะมีค่าเท่ากันดังแสดงในรูปที่ (5.57) ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ยังคงทำงานในโหมดของมอเตอร์อยู่

5.8 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s

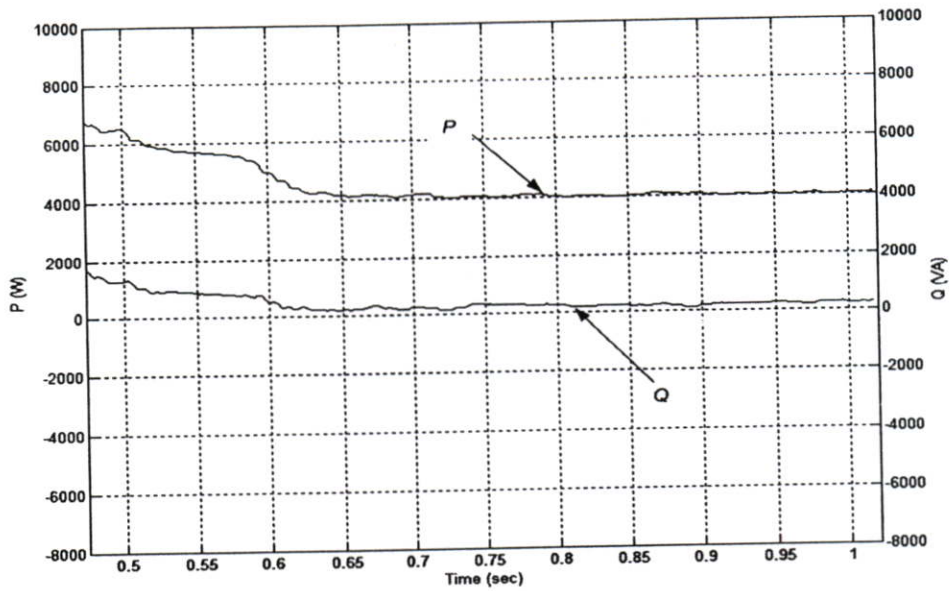
5.8.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



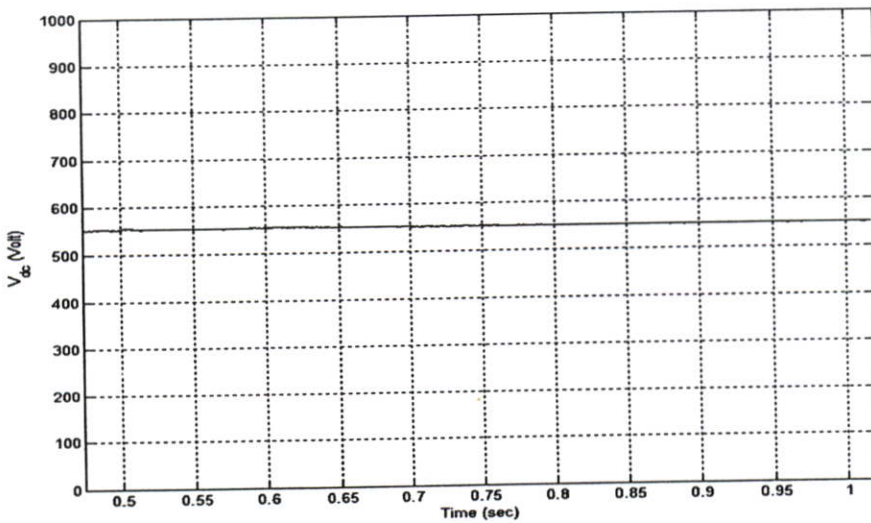
รูปที่ 5.58 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



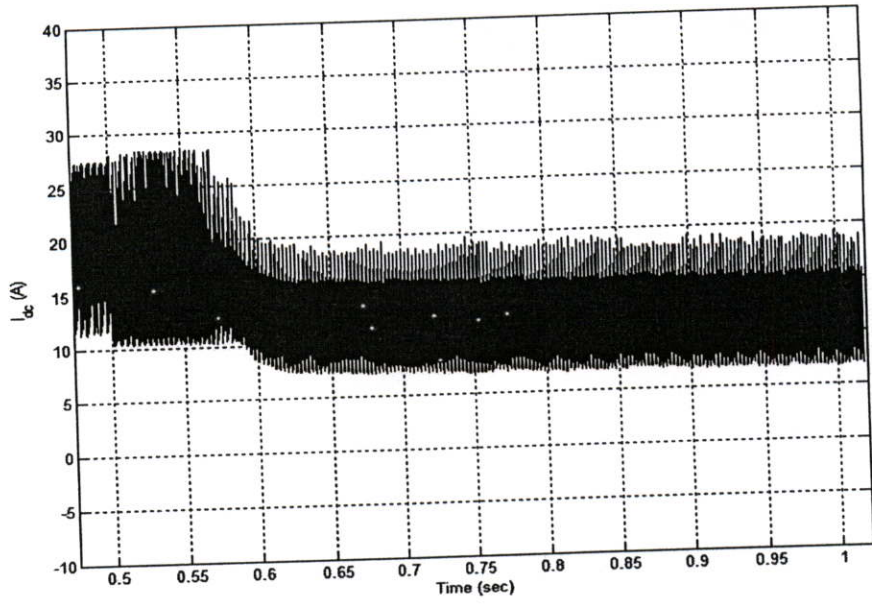
รูปที่ 5.59 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



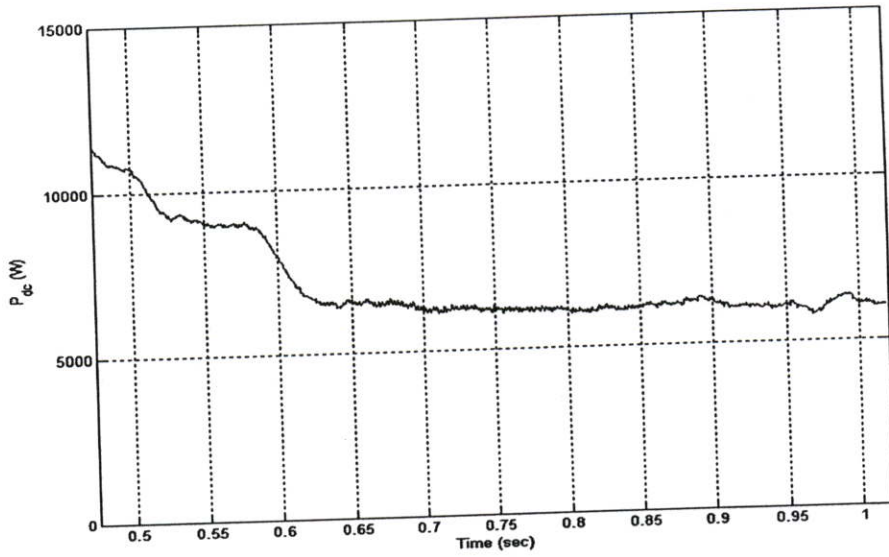
รูปที่ 5.60 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



รูปที่ 5.61 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



รูปที่ 5.62 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



รูปที่ 5.63 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s

จากรูปที่ (5.58) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_o มีมุมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_o เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying อยู่ในช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 0.6 วินาที ส่วนเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s โดยที่กระแสอินพุต i_o มีมุมต่างเฟสกับแรงดันอินพุต v_o เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ (5.59)

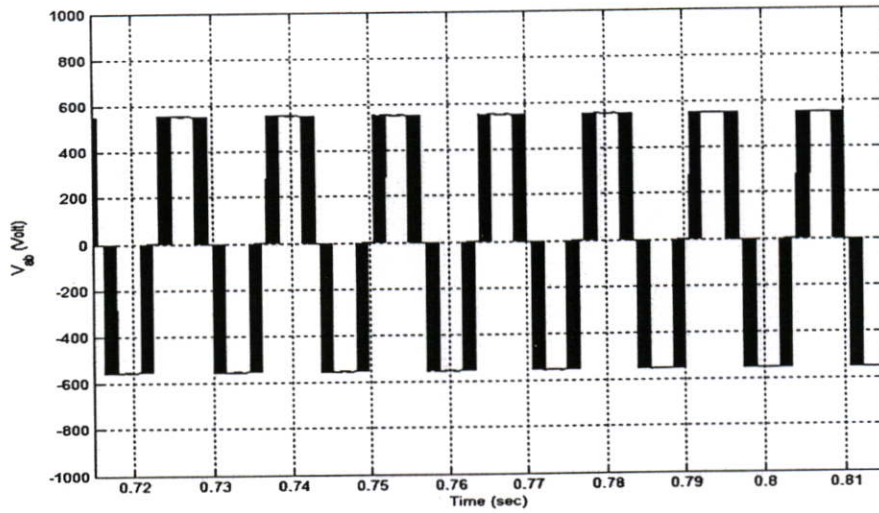
และในรูปที่ (5.60) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ส่วนรูปที่ (5.61) จะแสดงให้เห็นว่า ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมในการเพิ่มความเร็วยกอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่

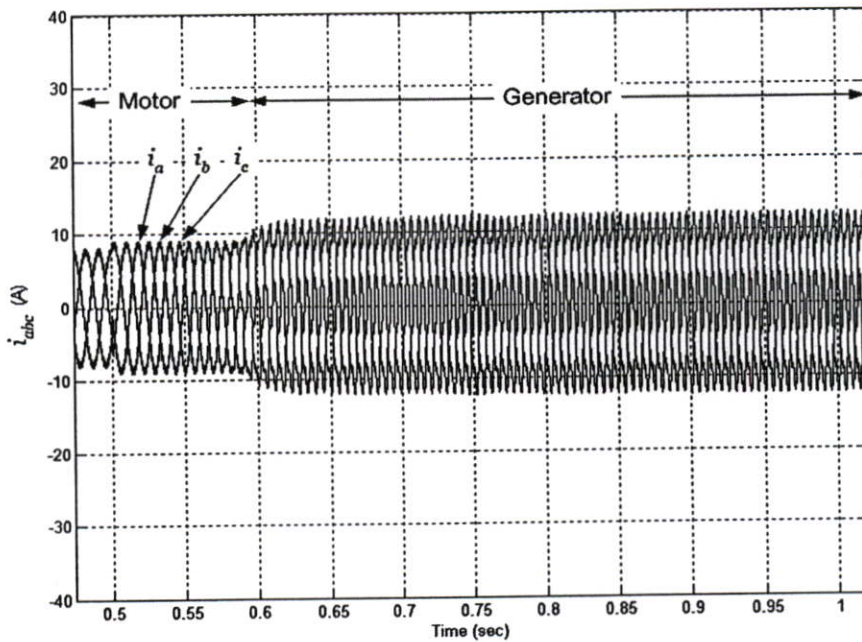
จากรูปที่ (5.62) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสแตเตอร์จะกลับทิศทางการไหล ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีไปแล้วนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสเริ่มต้น

และในรูปที่ (5.63) แสดงกำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s และในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไปมอเตอร์จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

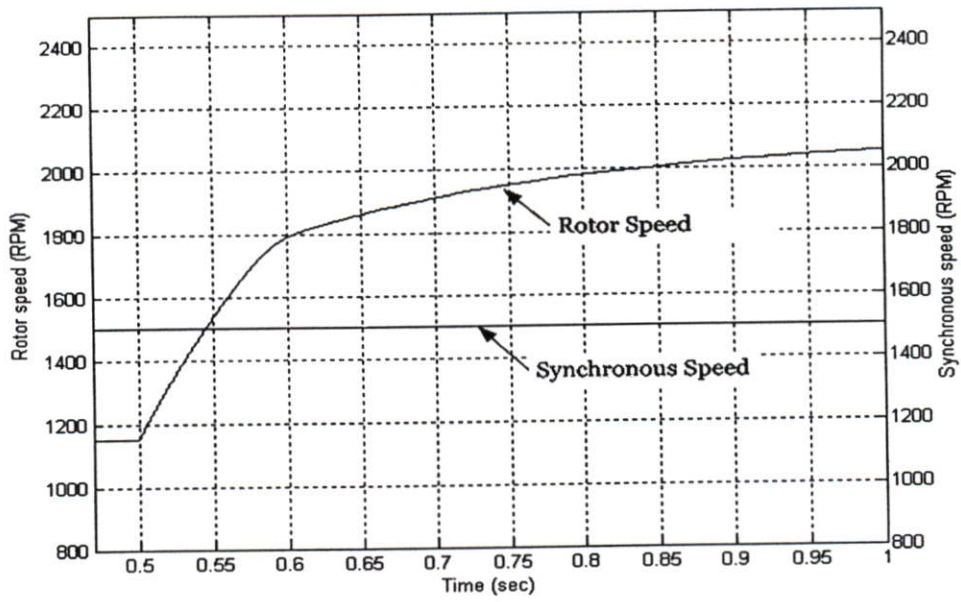
5.8.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



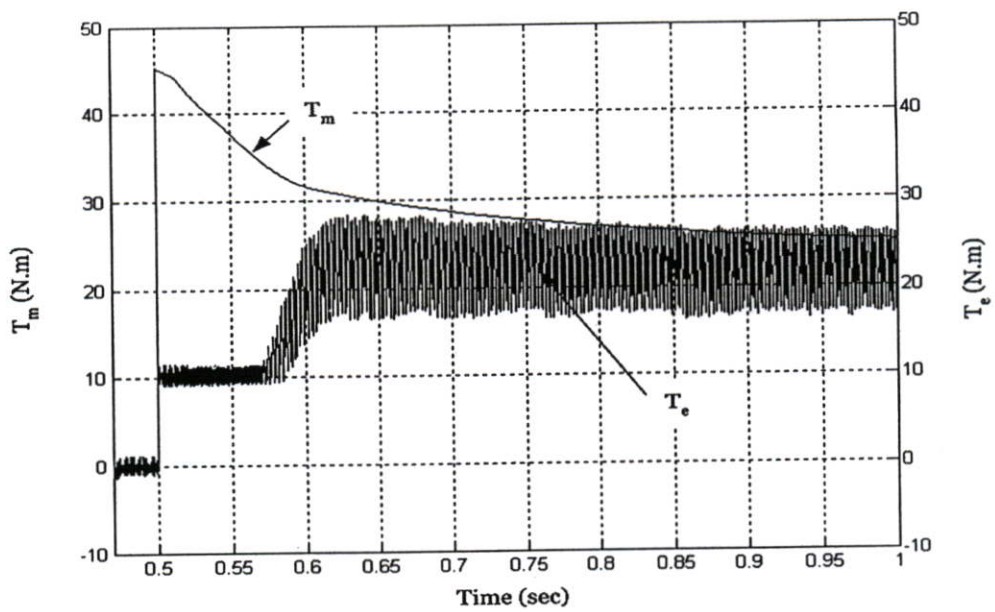
รูปที่ 5.64 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



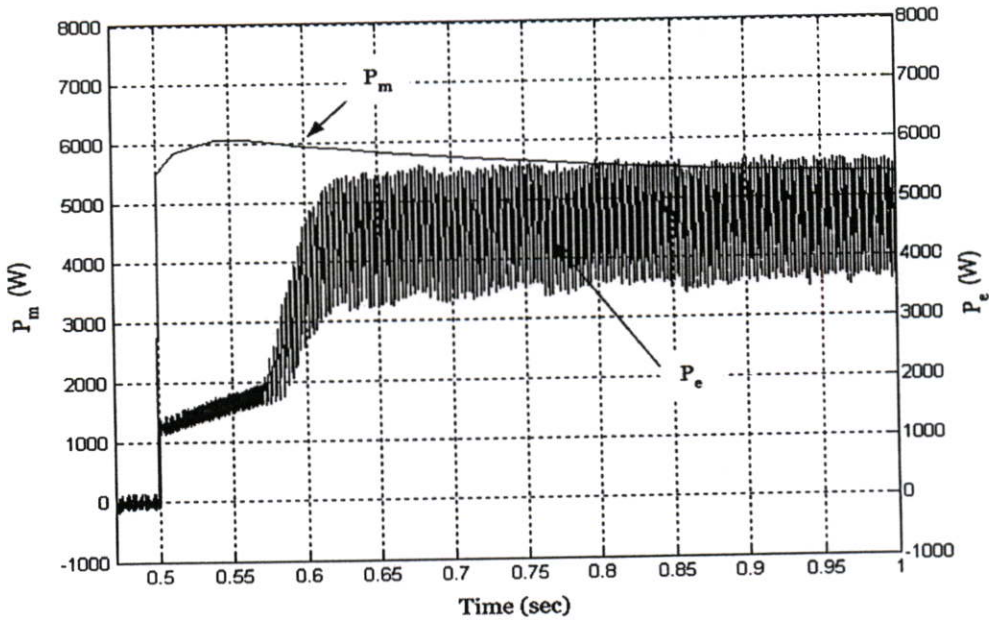
รูปที่ 5.65 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



รูปที่ 5.66 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



รูปที่ 5.67 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s



รูปที่ 5.68 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 9 m/s

จากรูปที่ (5.64) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

และจากรูปที่ (5.65) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้จะทำให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 0.6 วินาที เป็นต้นไปที่มอเตอร์เริ่มทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

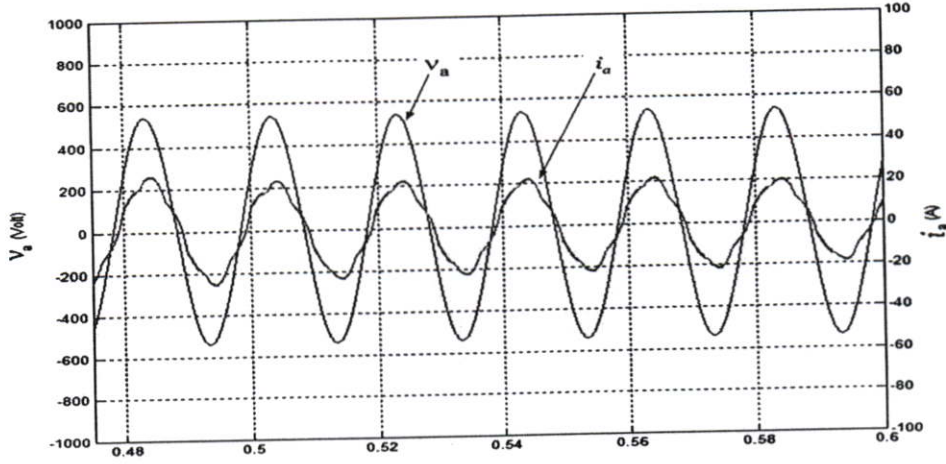
จากรูปที่ (5.66) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคจรซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงเวลาที่ 0.55 วินาที

เป็นต้นไปโดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เท่ากับ 2000 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วเชิงโคนัสได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และมอเตอร์ยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นสภาวะนี้มอเตอร์ทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

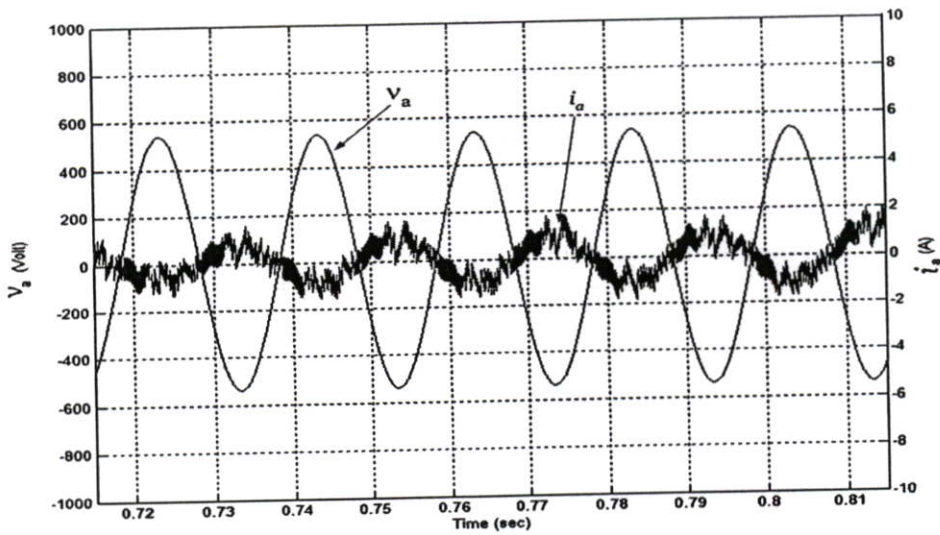
จากรูปที่ (5.67) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 9 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ดังนั้นสภาวะนี้มอเตอร์จะทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_m มีค่ามากกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e ด้วยเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ (5.68) ซึ่งสภาวะนี้มอเตอร์จะทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้

5.9 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s

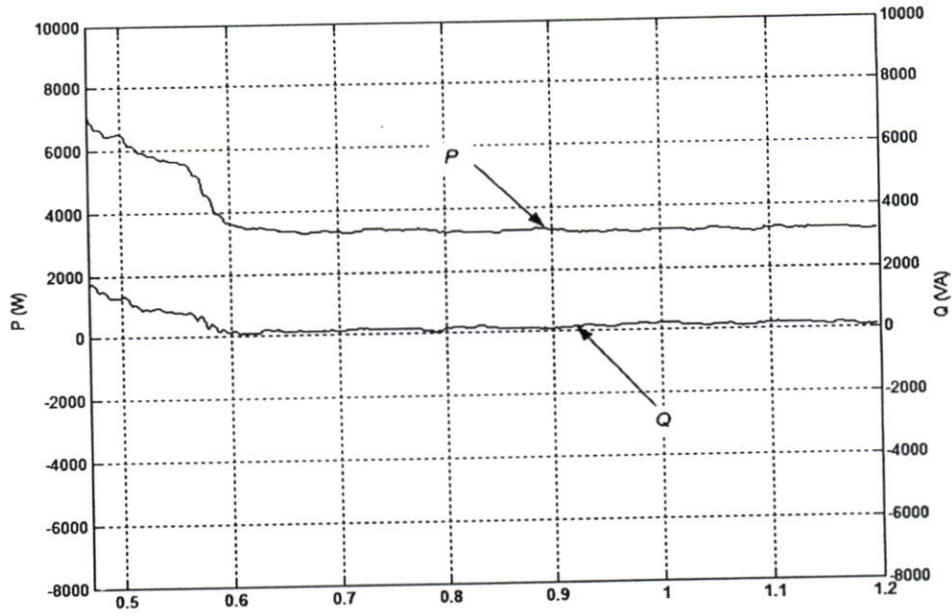
5.9.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



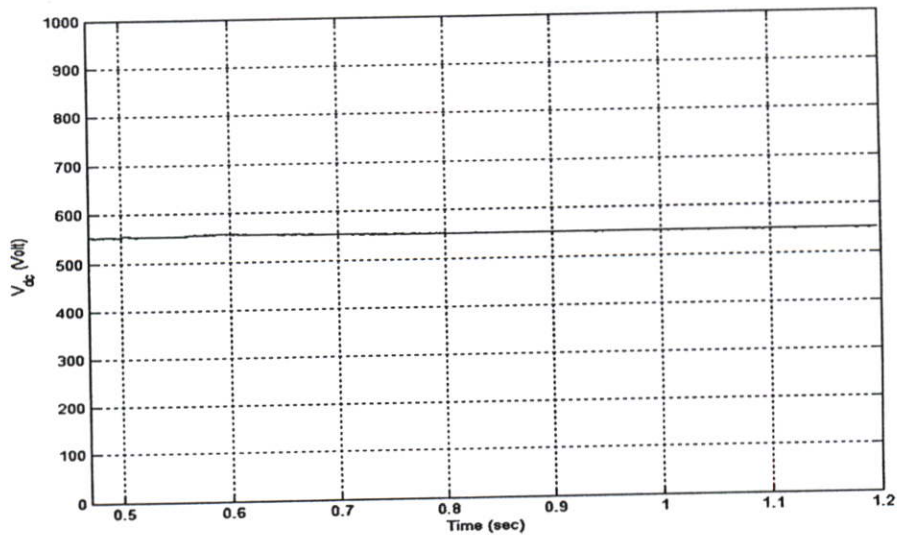
รูปที่ 5.69 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



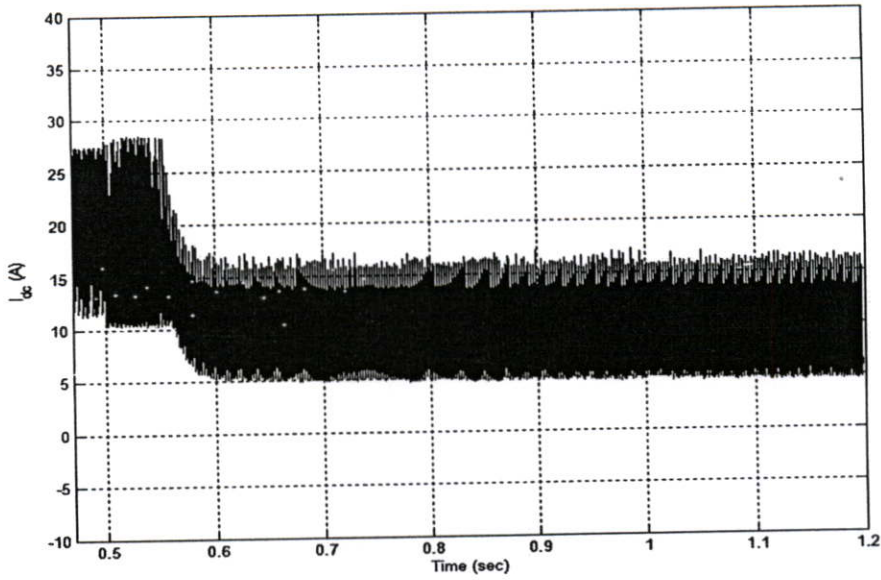
รูปที่ 5.70 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



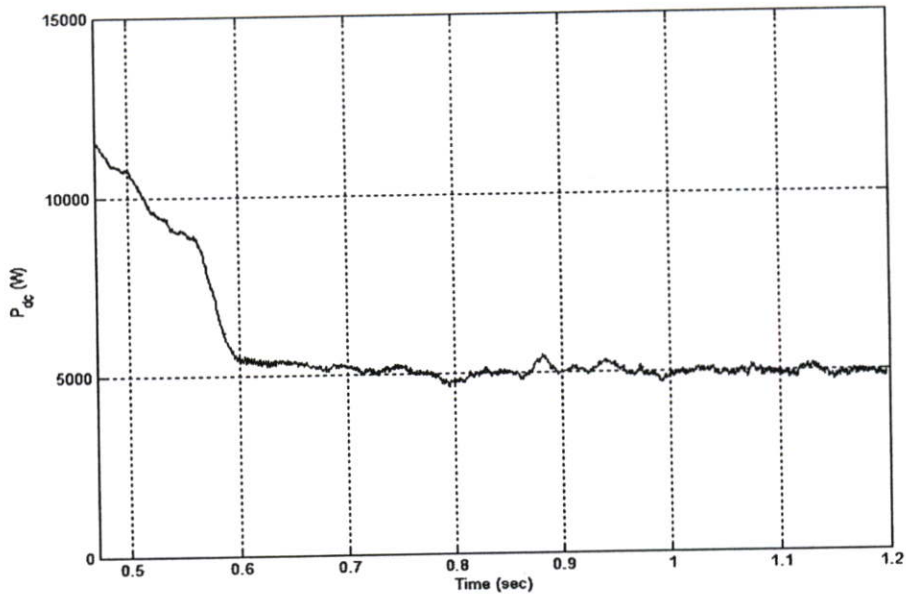
รูปที่ 5.71 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5.72 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5.73 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5.74 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s

จากรูปที่ (5.69) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_a มีมุมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_a เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying อยู่ในช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 0.6 วินาที ส่วนเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s โดยที่กระแสอินพุต i_a มีมุมต่างเฟสกับ แรงดันอินพุต v_a เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ (5.70)

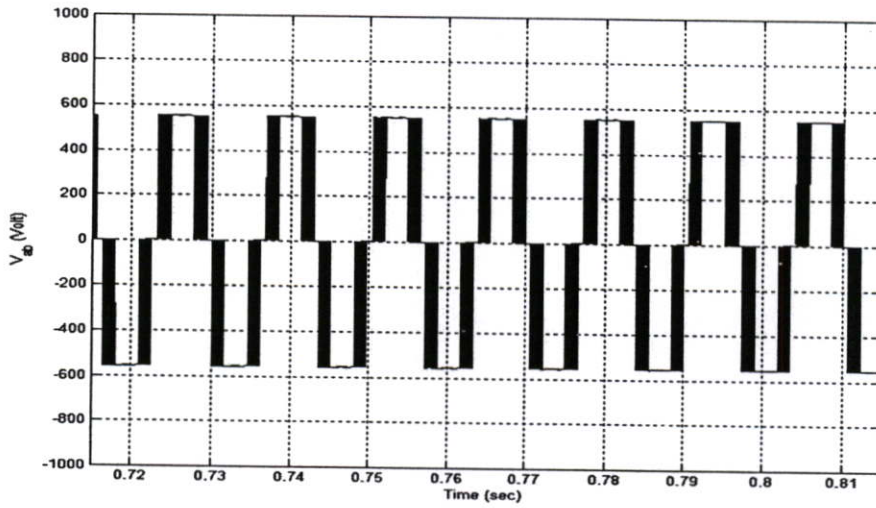
และในรูปที่ (5.71) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายจะเปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ส่วนรูปที่ (5.72) จะแสดงให้เห็นว่า ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมในการเพิ่มความเร็วยกตัวอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่

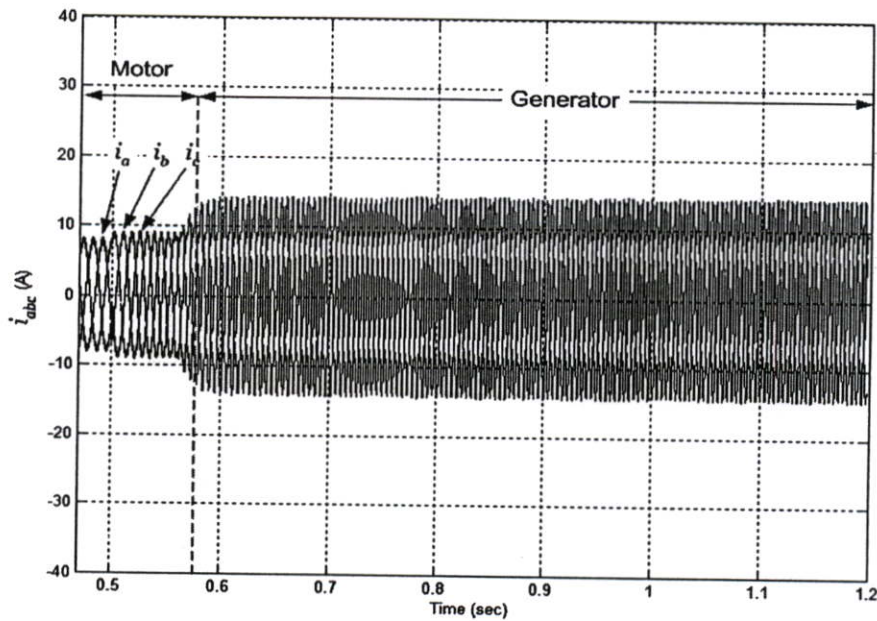
จากรูปที่ (5.73) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะกลับทิศทางการไหล ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีไปแล้วนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสเริ่มต้น

และในรูปที่ (5.74) แสดงกำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s และในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไปมอเตอร์จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

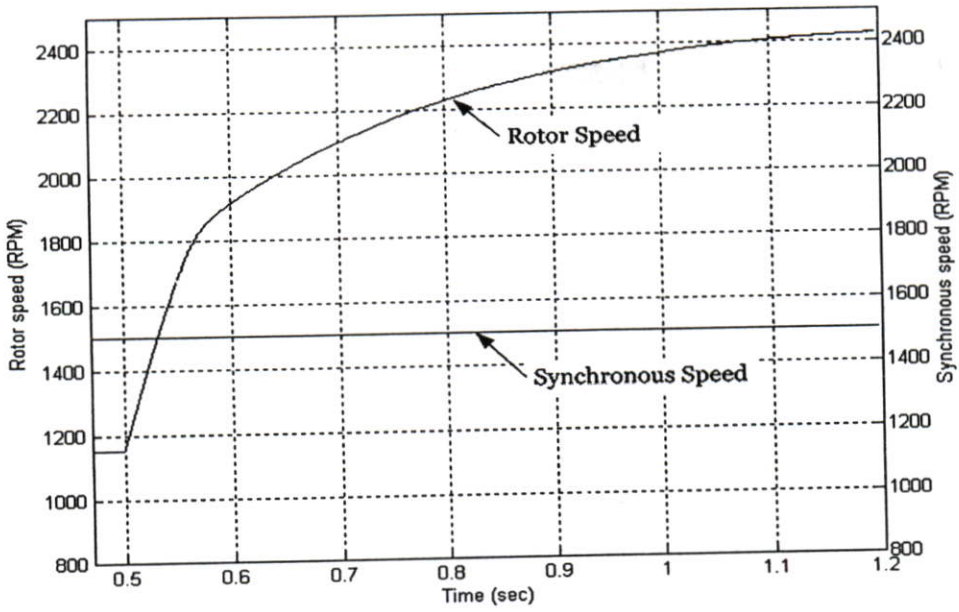
5.9.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



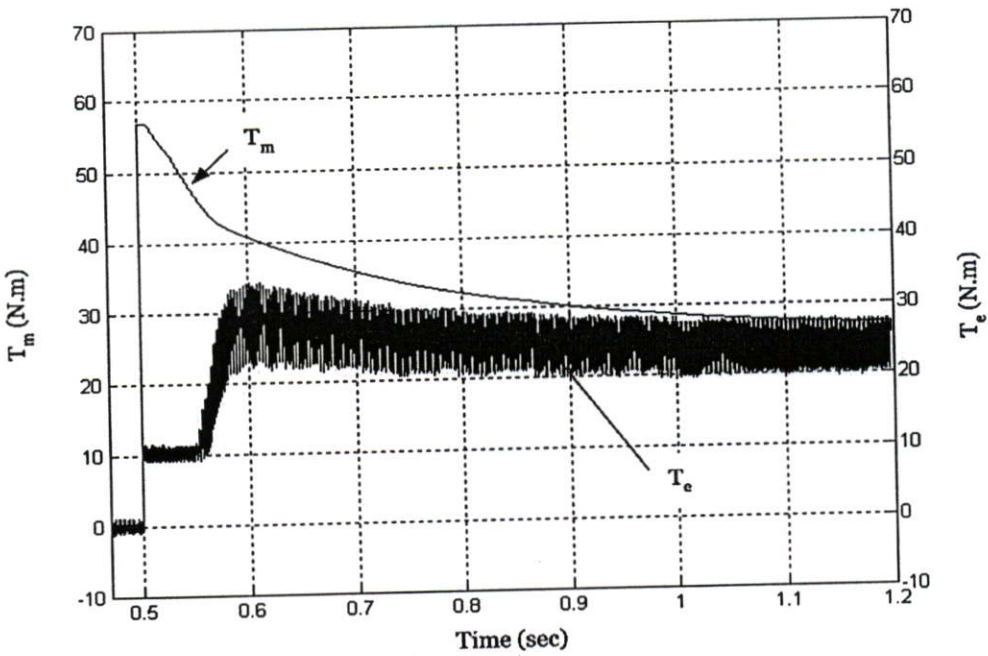
รูปที่ 5.75 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



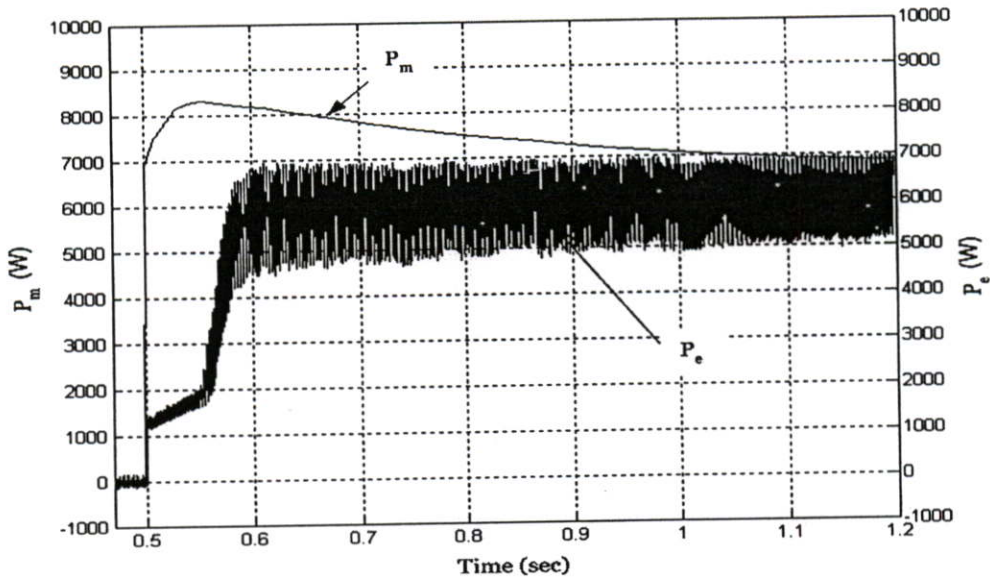
รูปที่ 5.76 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5.77 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5.78 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s



รูปที่ 5.79 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 10 m/s

จากรูปที่ (5.75) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

และจากรูปที่ (5.76) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้จะทำให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 0.55 วินาที เป็นต้นไปที่มอเตอร์เริ่มทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

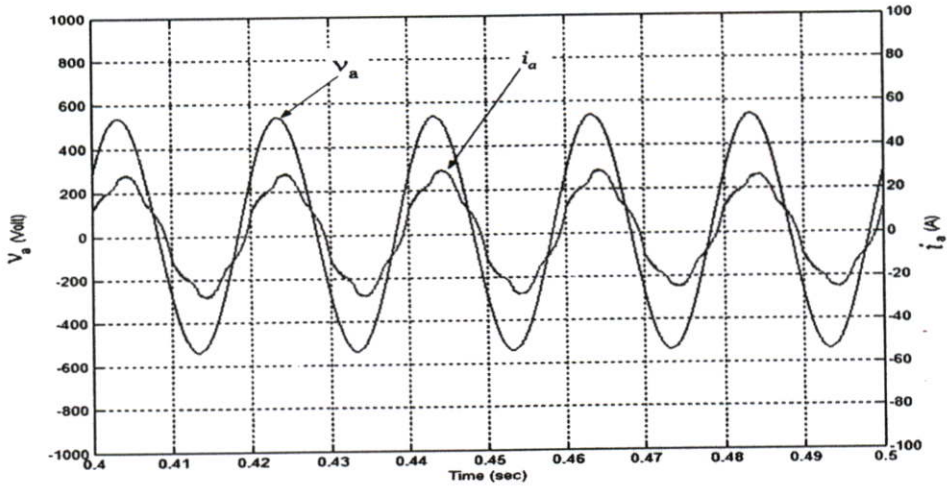
จากรูปที่ (5.77) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคไซน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงเวลาที่ 0.55 วินาที เป็นต้นไปโดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เท่ากับ 2400 rpm

ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซึ่ง โคนัสได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และ มอเตอร์ยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นสภาวะนี้มอเตอร์ทำงาน ในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

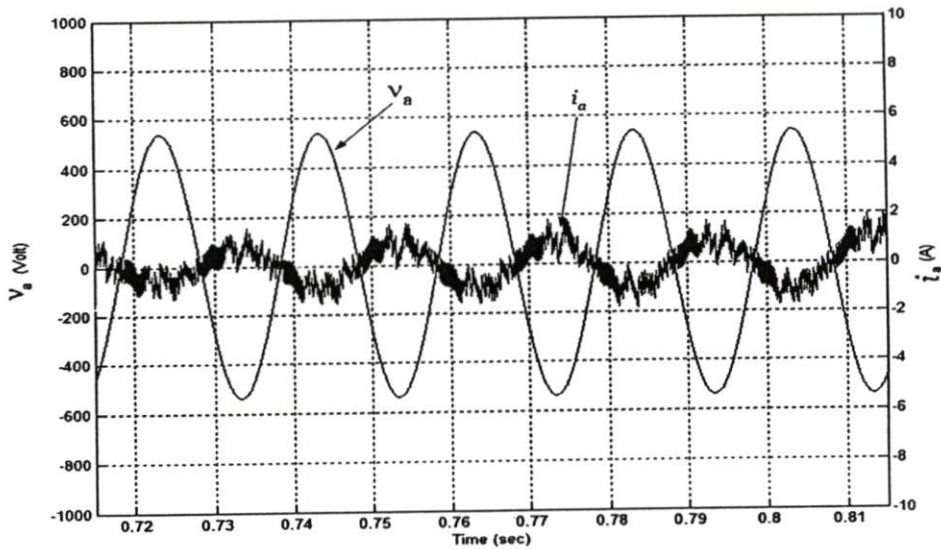
จากรูปที่ (5.78) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ ความเร็วลมเท่ากับ 10 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ดังนั้นสภาวะนี้มอเตอร์จะทำงานในโหมดของเครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้า และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_m มีค่ามากกว่าค่าของ กำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e ด้วยเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ (5.79) ซึ่งสภาวะนี้มอเตอร์จะทำงาน ในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้

5.10 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s

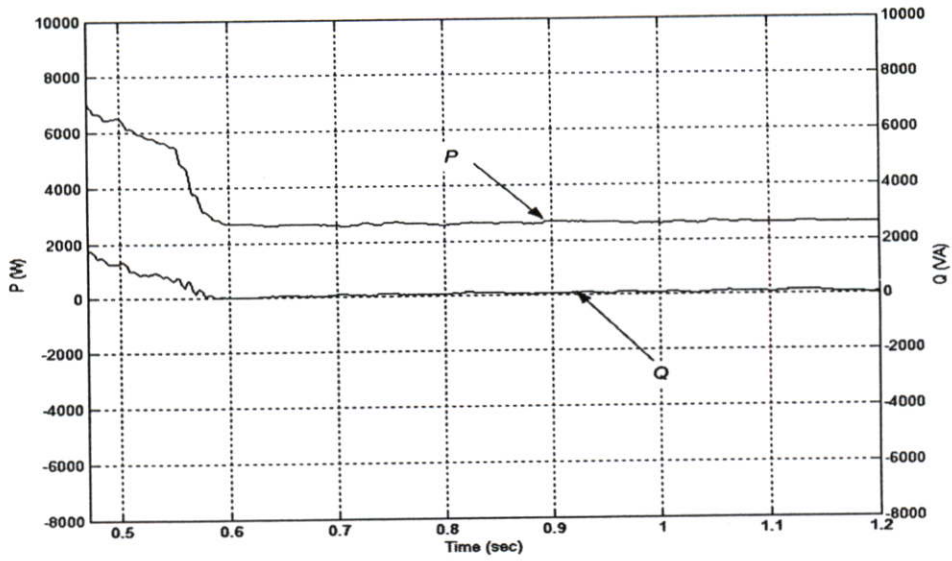
5.10.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



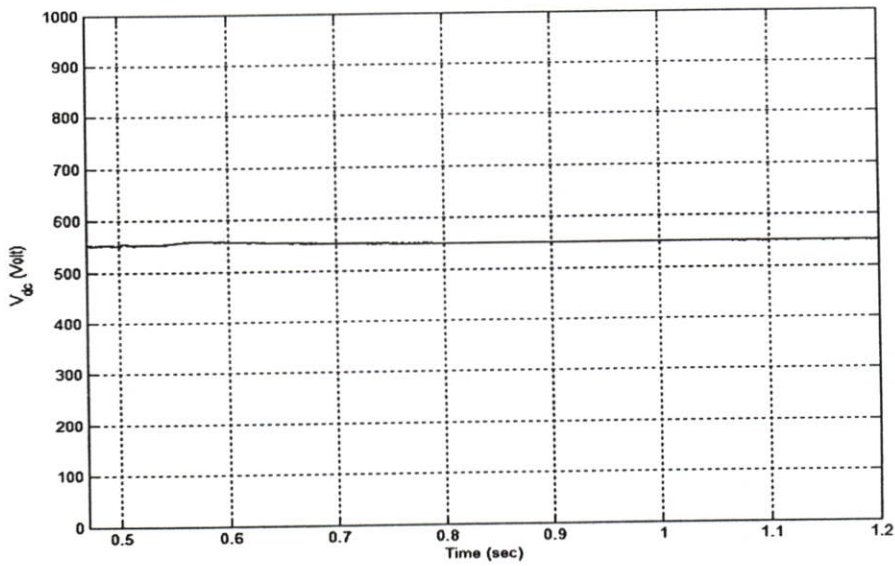
รูปที่ 5.80 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



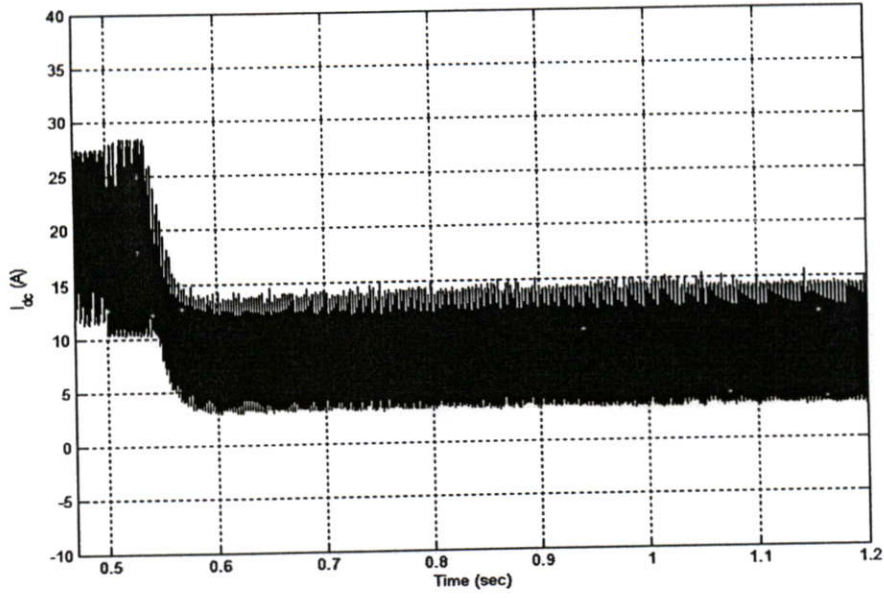
รูปที่ 5.81 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



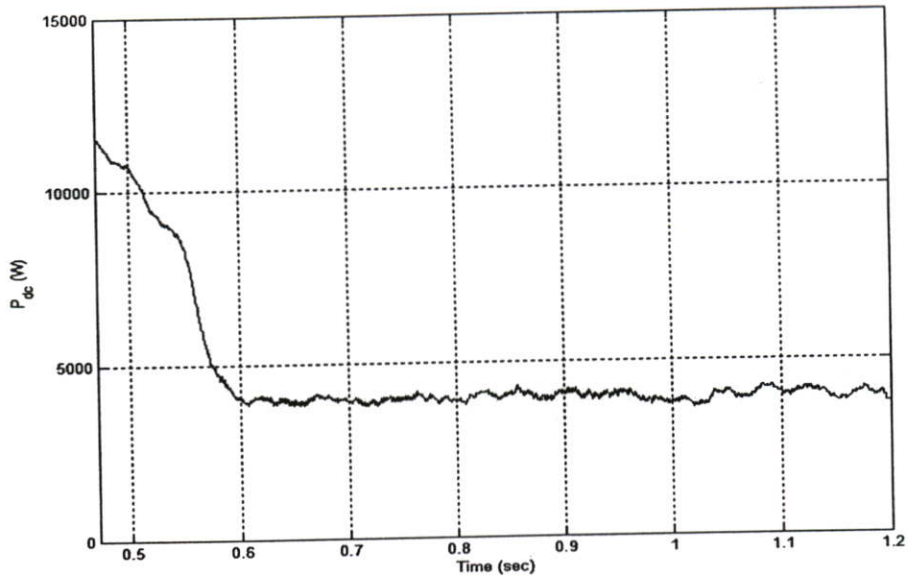
รูปที่ 5.82 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



รูปที่ 5.83 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



รูปที่ 5.84 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



รูปที่ 5.85 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 (m/s)

จากรูปที่ (5.80) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_a มีมุมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_a เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying อยู่ในช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 0.6 วินาที ส่วนเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s โดยที่กระแสอินพุต i_a มีมุมต่างเฟสกับ แรงดันอินพุต v_a เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ (5.81)

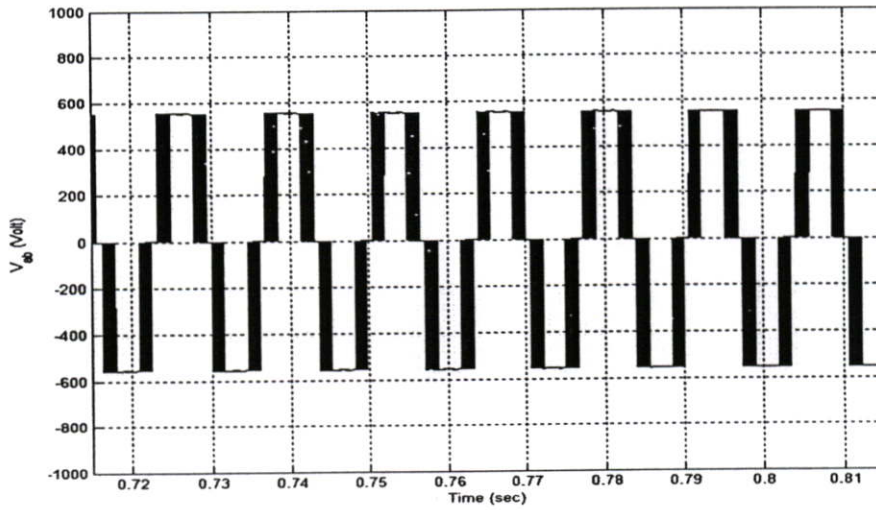
และในรูปที่ (5.82) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ส่วนรูปที่ (5.83) จะแสดงให้เห็นว่า ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมในการเพิ่มความเร็วยกตัวอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่

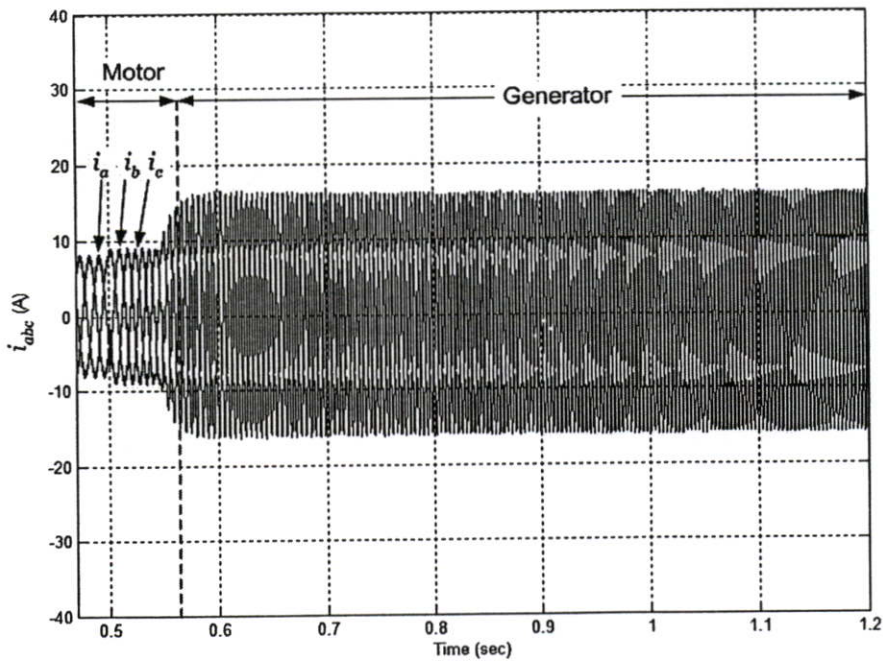
จากรูปที่ (5.84) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะกลับทิศทางการไหล ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีไปแล้วนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสเริ่มต้น

และในรูปที่ (5.85) แสดงกำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s และในช่วงเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไปมอเตอร์จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

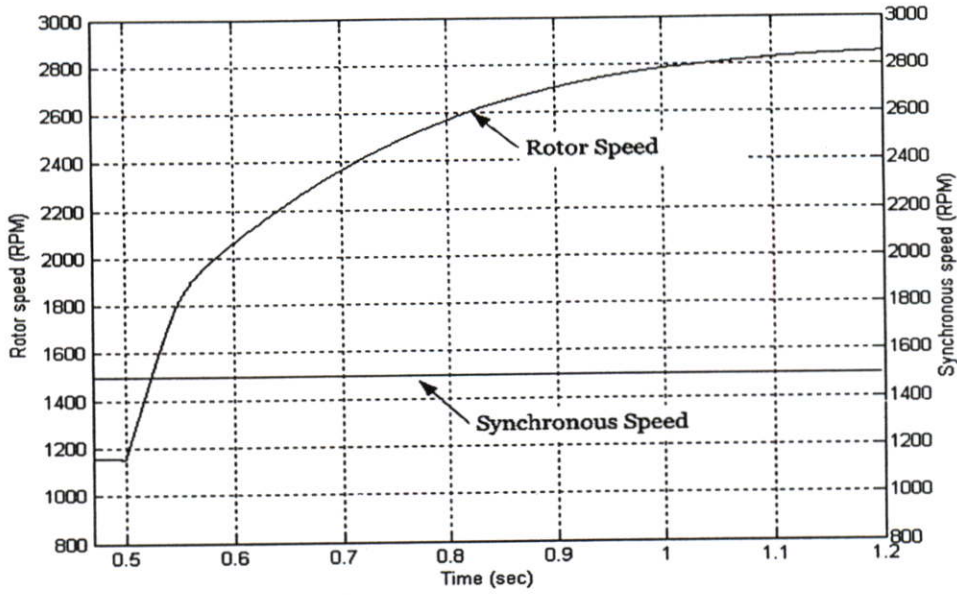
5.10.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



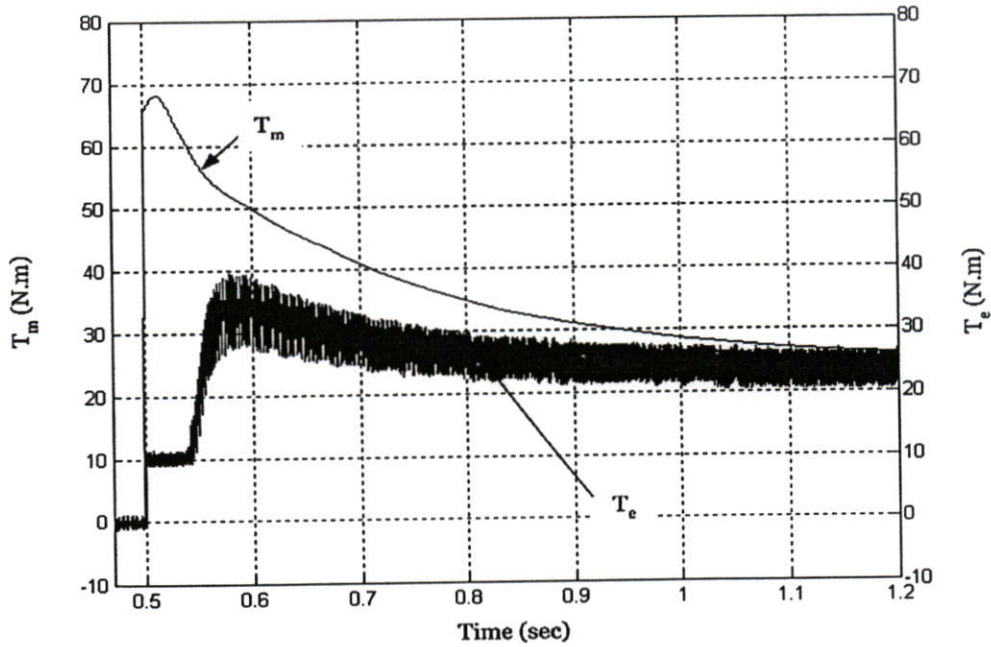
รูปที่ 5.86 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



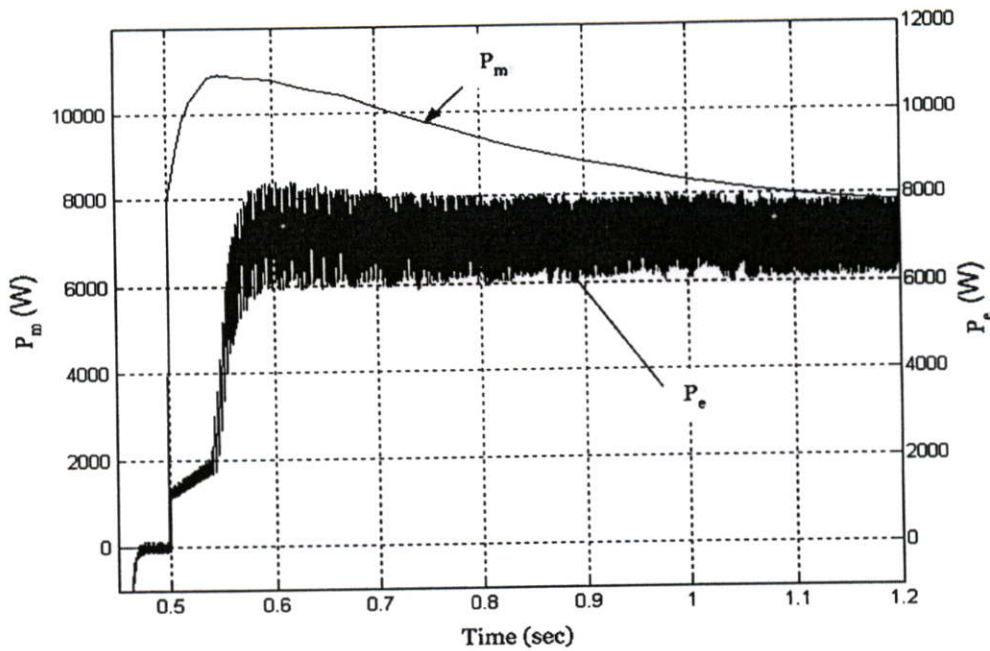
รูปที่ 5.87 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



รูปที่ 5.88 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



รูปที่ 5.89 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s



รูปที่ 5.90 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 11 m/s

จากรูปที่ (5.86) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

และจากรูปที่ (5.87) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้จะทำให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 0.55 วินาที เป็นต้นไปที่มอเตอร์เริ่มทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

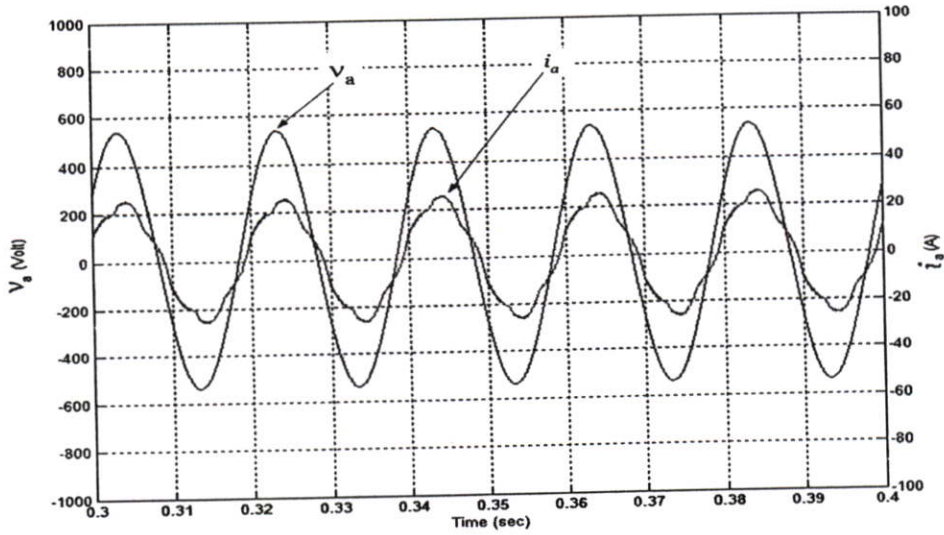
จากรูปที่ (5.88) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคไซน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงเวลาที่ 0.55 วินาที เป็นต้นไปโดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เท่ากับ 2800 rpm

ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซึ่ง โคนัสได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถ เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และ มอเตอร์ยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นสภาวะนี้มอเตอร์ทำงาน ในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

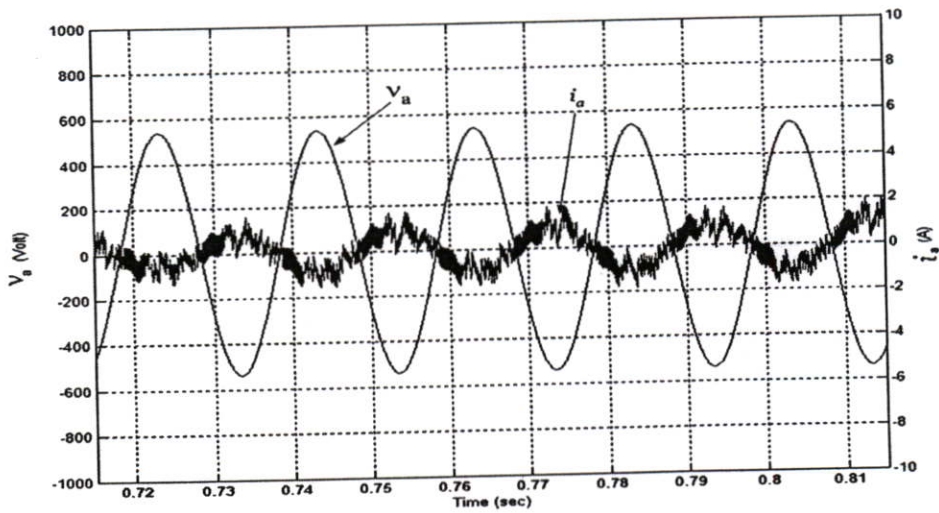
จากรูปที่ (5.89) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ ความเร็วลมเท่ากับ 11 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ดังนั้นสภาวะนี้มอเตอร์จะทำงานในโหมดของเครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้า และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_m มีค่ามากกว่าค่าของ กำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e ด้วยเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ (5.90) ซึ่งสภาวะนี้มอเตอร์จะทำงาน ในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้

5.11 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s

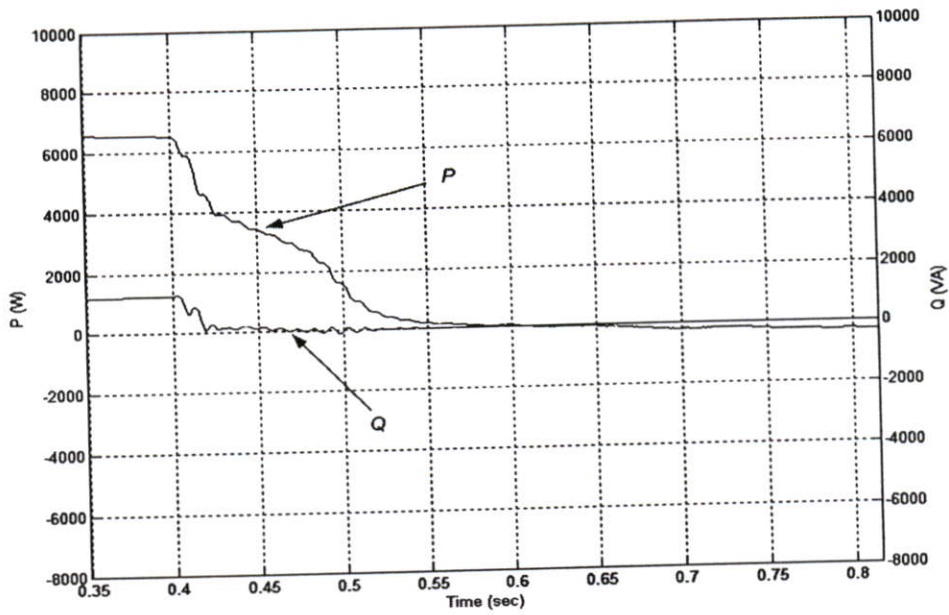
5.11.1 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



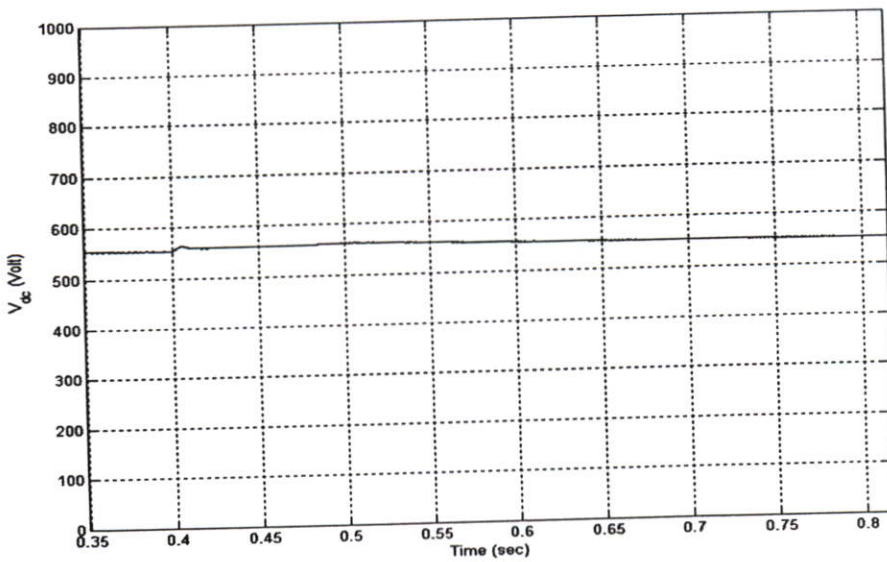
รูปที่ 5.91 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Rectifying เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



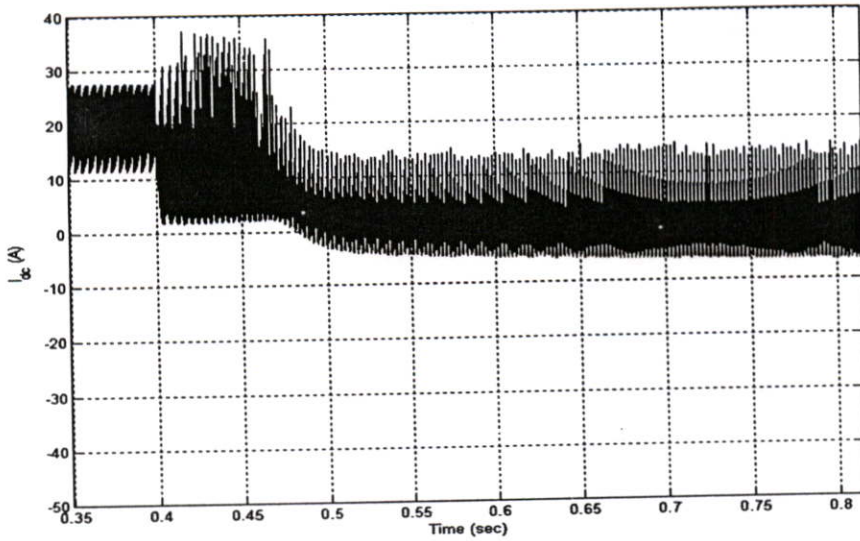
รูปที่ 5.92 แรงดันอินพุต v_a และกระแสอินพุต i_a เมื่อทำงานในโหมด Inverting เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



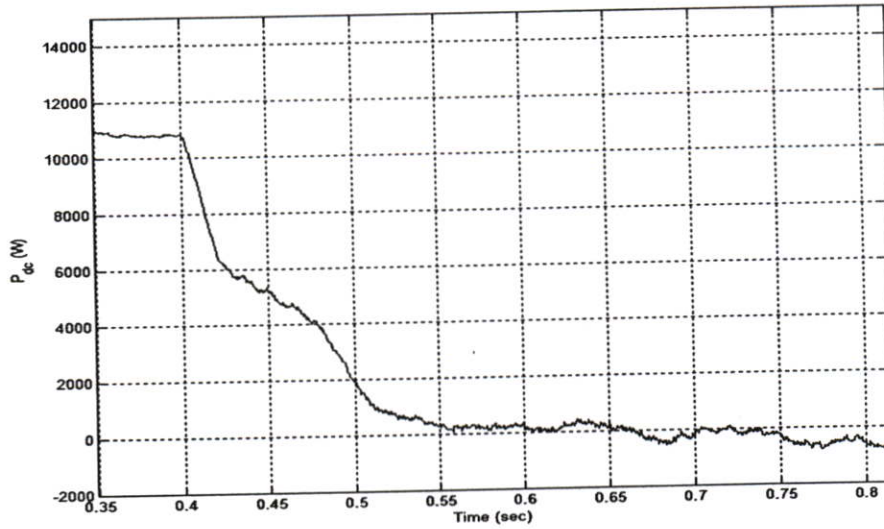
รูปที่ 5.93 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



รูปที่ 5.94 แรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



รูปที่ 5.95 กระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



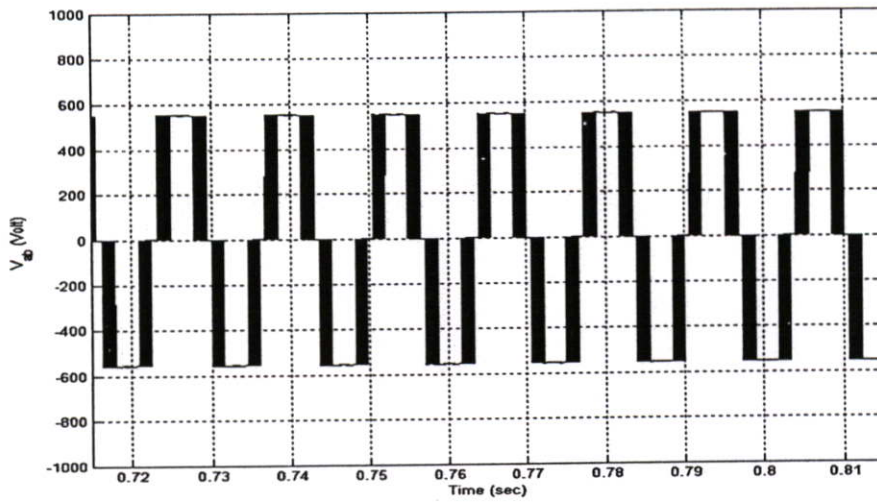
รูปที่ 5.96 ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ขณะเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน
เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s

จากรูปที่ (5.91) เป็นการทดสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง โดยที่กระแสอินพุต i_o มีมุมอินเฟสกับ แรงดันอินพุต v_o เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และจะทำงานในโหมด Rectifying อยู่ในช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 0.6 วินาที ส่วนเวลาที่ 0.6 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมด Inverting ได้ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s โดยที่กระแสอินพุต i_o มีมุมต่างเฟสกับ แรงดันอินพุต v_o เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ (5.92)

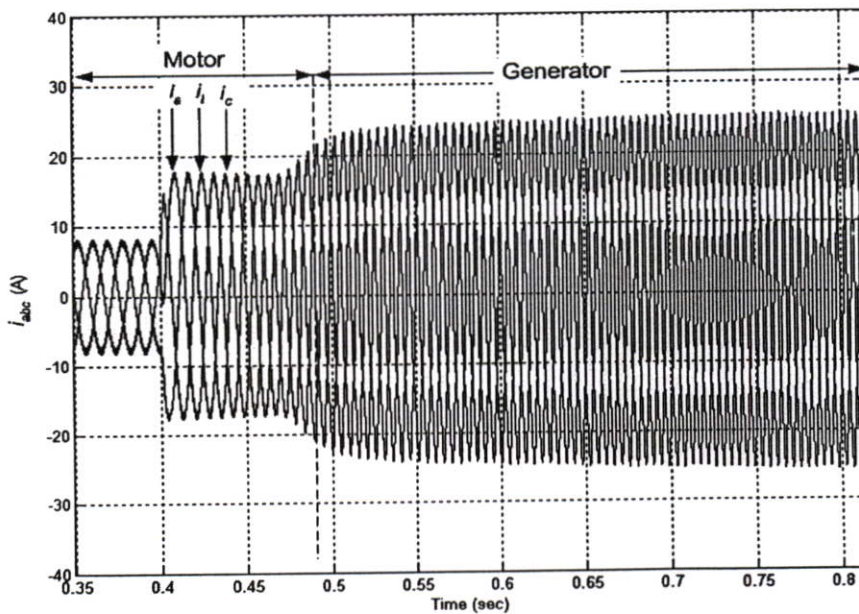
และในรูปที่ (5.93) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่าย เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปนั้นที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านแหล่งจ่ายจะ เปลี่ยนแปลงลดลงจนติดลบ ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) ทางด้านแหล่งจ่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนรูปที่ (5.94) จะแสดงให้เห็นว่า ขณะขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมในการเพิ่มความเร็วรอบอย่างฉับพลันของมอเตอร์นั้น ซึ่งจะใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะทำการควบคุมค่าของแรงดัน V_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่

จากรูปที่ (5.95) แสดงกระแส I_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s ซึ่งความเร็วลมระดับนี้ สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ และกระแสในสเตเตอร์จะกลับทิศทางการไหล ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าของกระแส i_{dc} จะมีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาทีไปแล้วนั้นค่าของกระแส i_{dc} จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสเริ่มต้น และในรูปที่ (5.96) แสดงค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ เมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งความเร็วลมระดับนี้สามารถทำให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่เริ่มการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้กังหันลมนั้นจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า P_{dc} เชื่อมโยงของอินเวอร์เตอร์ ทางด้านแหล่งจ่ายเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s และในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาทีเป็นต้นไป มอเตอร์จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

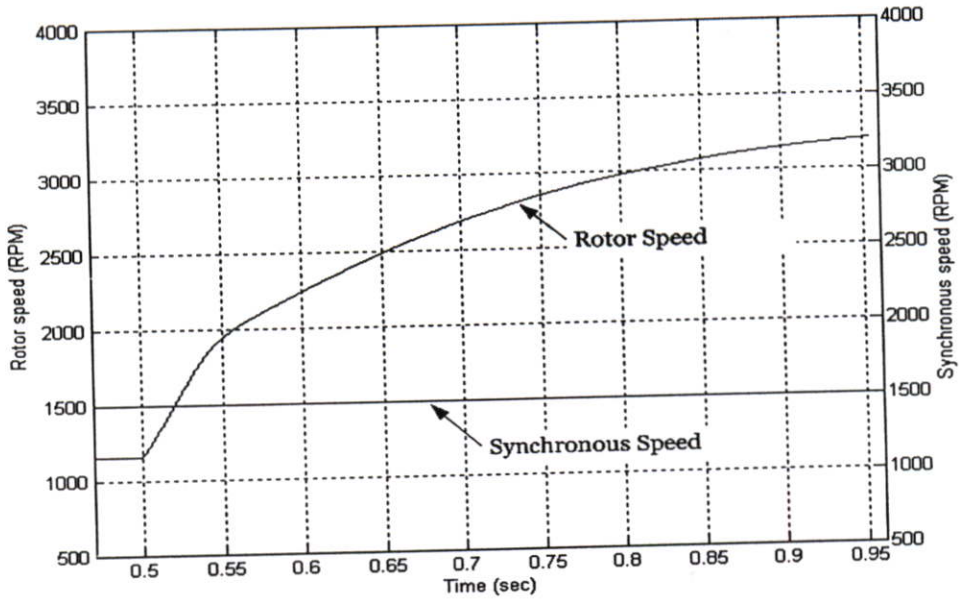
5.11.2 ผลการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อใช้ความเร็วลม
ค่าสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



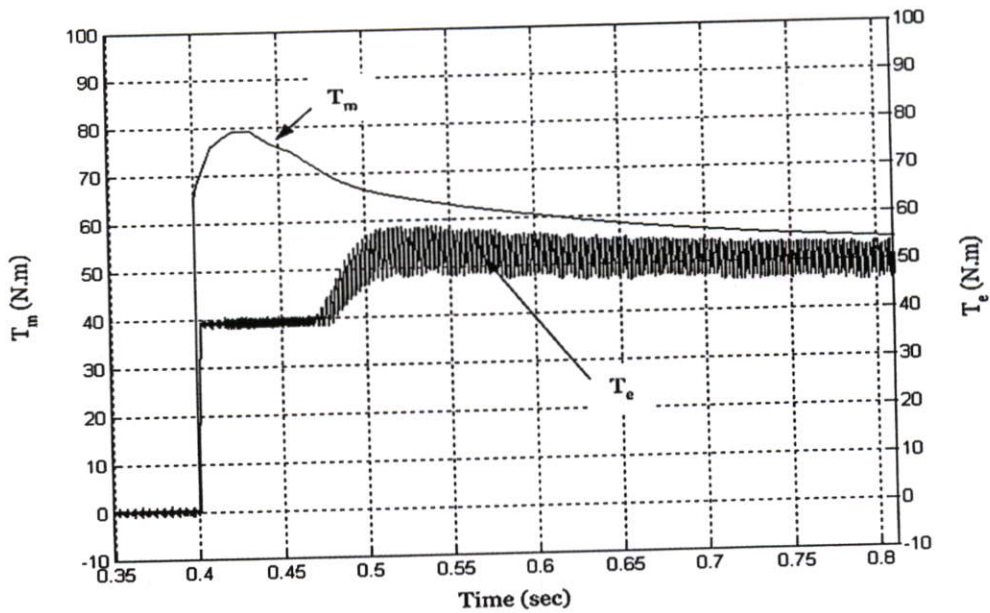
รูปที่ 5.97 แรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



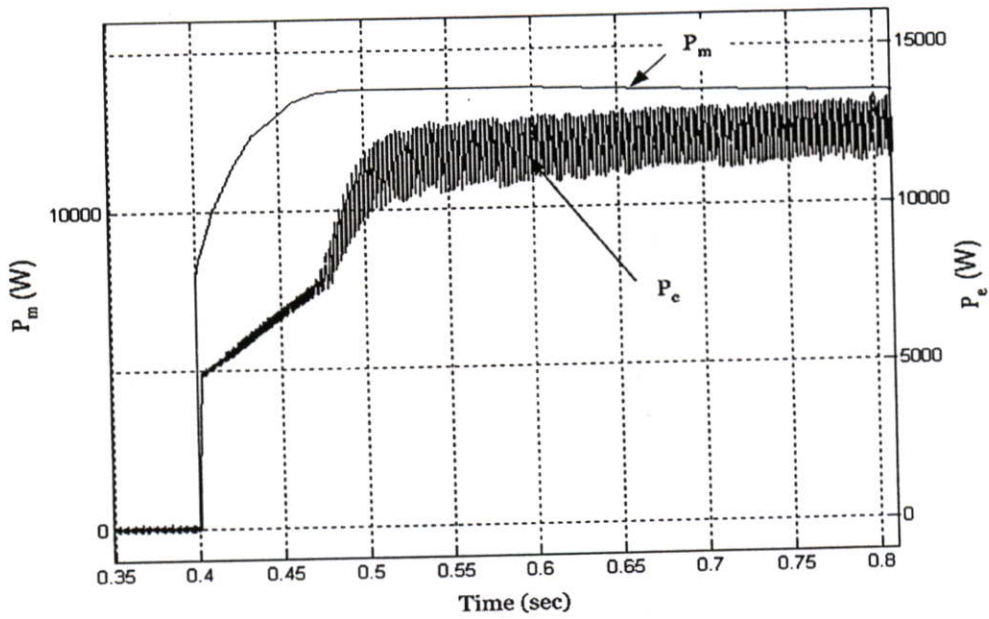
รูปที่ 5.98 กระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมด
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



รูปที่ 5.99 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



รูปที่ 5.100 แรงบิด T_m และ T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s



รูปที่ 5.101 กำลังไฟฟ้า P_m และ P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 12 m/s

จากรูปที่ (5.97) แสดงค่าของแรงดันเอาต์พุต V_{ab} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้

และจากรูปที่ (5.98) แสดงค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9 A และเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้มอเตอร์เปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้จะทำให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ดังนั้นค่าของกระแสเอาต์พุต i_{abc} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไปที่มอเตอร์เริ่มทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

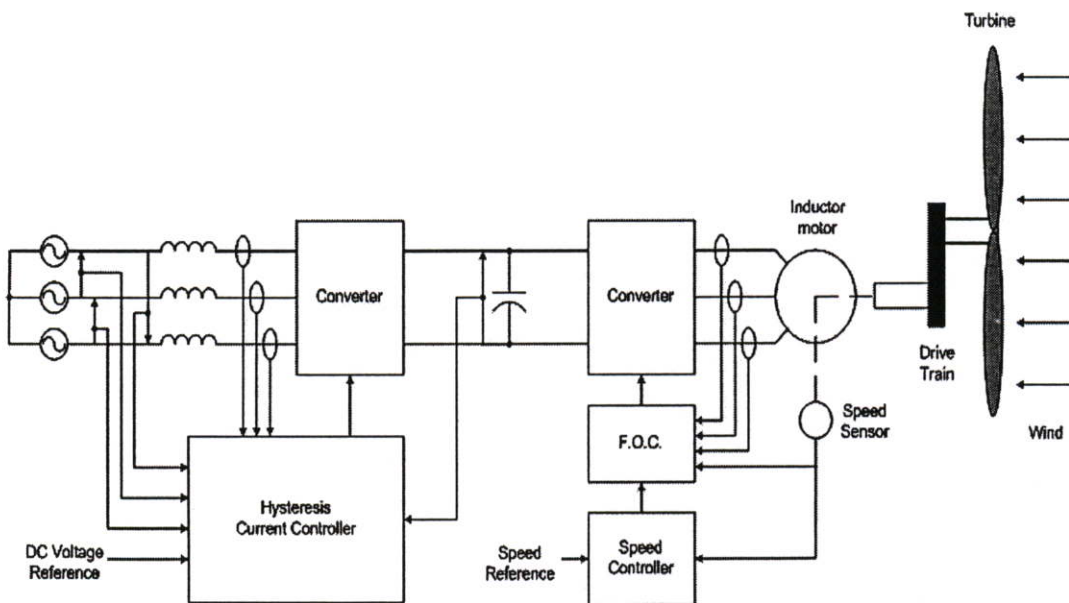
จากรูปที่ (5.99) แสดงค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยได้แสดงค่าของความเร็วเชิงโคจรซึ่งมีค่าเท่ากับ 1500 rpm และค่าของความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 1160 rpm ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที เป็นต้นไป เพื่อให้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น และสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้ในช่วงเวลาที่ 0.55 วินาที เป็นต้นไปโดยสามารถเพิ่มความเร็วโรเตอร์ได้เท่ากับ 3200 rpm

ซึ่งเมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้ สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วเชิงโคจรได้ ดังนั้นมอเตอร์จึงสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และมอเตอร์ยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์ทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ (5.100) แสดงค่าของแรงบิดทางกล T_m และแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งใช้ความเร็วลมเท่ากับ 12 m/s มาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในช่วงเวลาที่ 0.4 วินาที เป็นต้นไป แต่เมื่อใช้ความเร็วลมระดับนี้สามารถเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ได้ ดังนั้นค่าของแรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าค่าของแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ดังนั้นสถานะนี้มอเตอร์จะทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในลักษณะเดียวกันนี้จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกล P_m มีค่ามากกว่าค่าของกำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้า P_e ด้วยเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ (5.101) ซึ่งสถานะนี้มอเตอร์จะทำงานในโหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และยังสามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลังได้

5.12 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

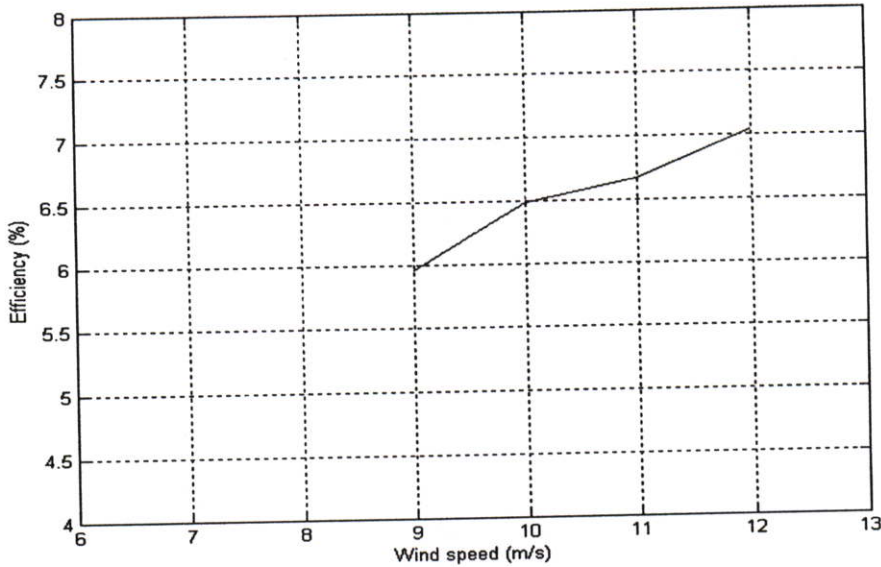
ในการทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม สามารถพิจารณาจากการทดสอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน เพื่อให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงาน เป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และเมื่อมอเตอร์มีการทำงาน เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมแล้วนั้น มอเตอร์จะมีการส่งถ่ายกำลัง ย้อนกลับมาที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง หรือส่งพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นอินพุตทางด้านซ้ายของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม ก็จะเปลี่ยนการทำงานจากอินพุตเป็นเอาต์พุต และในขณะเดียวกันเอาต์พุตทางด้านขวาของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม ก็จะเปลี่ยนการทำงานจากเอาต์พุตเป็นอินพุตเช่นเดียวกัน ซึ่งการทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมนี้ ได้ทำการวัดค่าเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพที่ระดับความเร็วลมค่าต่าง ๆ โดยเริ่มตั้งแต่ระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 4 m/s จนถึงระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 12 m/s ซึ่งผลของการวัดค่าต่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.102 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ ฟลักซ์เวกเตอร์ สำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

ตารางที่ 5.1 การทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

V m/s	$P_{m,opt}$ (W)	P_c (W)	V_s (Volt)	I_s (A)	P_s (W)	Eff (%)
4	480	-	220	-	-	-
5	937	650	220	-	-	-
6	1620	1000	220	-	-	-
7	2571	1400	220	-	-	-
8	3834	1700	220	-	-	-
9	5386	2000	220	0.9	167	5.9643
10	7453	3000	220	1.2	240	6.4865
11	9990	3500	220	1.8	300	6.6667
12	12837	5000	220	2	352	7.0400



รูปที่ 5.103 การทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุดตั้งแต่ ระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 4 m/s จนถึงระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 12 m/s

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพ ของระบบควบคุมแบบฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุม การเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม เมื่อใช้ความเร็วลมสูงสุด ตั้งแต่ระดับ ความเร็วลมสูงสุดที่ 4 m/s จนถึงระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 12 m/s ซึ่งจะเห็นว่ามอเตอร์ สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้นั้น ก็ต้องใช้ระดับความเร็วลม ตั้งแต่ 9 m/s จนถึงระดับความเร็วลมที่ 12 m/s และจากการทดสอบหาประสิทธิภาพ ซึ่ง สามารถบอกได้ว่า ระบบจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ระดับความเร็วลมสูงสุดที่ 12 m/s

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถทำงานได้ทั้งสองโหมดคือทำงานในโหมดคอนเวอร์เตอร์และทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กรณีทำงานในโหมดมอเตอร์ นั้น คอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย จะมีลักษณะการทำงานแบบสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ ที่สามารถส่งถ่ายพลังงานได้ 2 ทิศทาง โดยสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ จะสามารถทำงานได้ 2 โหมด คือโหมดเรกติไฟลิ่ง และโหมดอินเวอร์ทิง โดยที่กรณีทำงานในโหมดมอเตอร์ สวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ จะทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะไหลจากระบบไฟฟ้ากำลังเข้าสู่จอร์คอนเวอร์เตอร์ และจะมีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าจากแรงดัน v_o ไปสู่แรงดัน v_{dc} โดยจะมีการควบคุมกระแส i_o ให้อินเฟสกับแรงดัน v_o เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้มีค่ามากกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือเพิ่มความเร็วของโรเตอร์ให้มากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งโรเตอร์จะมองว่าสนามแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านตัวมันถูกกลับทิศทาง ตามหลักการความเร็วสัมพัทธ์ กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์จึงกลับทิศทางไปด้วย ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์กลับทิศทาง ทำให้กำลังเป็นลบ และมอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแปลงพลังงานกลจากเครื่องต้นกำลังที่นำมาหมุนตัวมัน ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ส่วนสวิตช์โหมดคอนเวอร์เตอร์ จะทำงานในโหมดอินเวอร์ทิง ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจะไหลจากจอร์คอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแรงดัน v_{dc} ไปสู่แรงดัน v_o ในโหมดนี้จะควบคุมกระแส i_o ให้เอาท้อฟเฟสกับแรงดัน v_o เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า และเมื่อมอเตอร์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสลิปติดลบ ดังนั้นค่าของ แรงบิดทางกล T_m มีค่ามากกว่าแรงบิดทางไฟฟ้า T_e ซึ่งสภาวะนี้จะทำให้มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าทางกลของ P_m มีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าทางไฟฟ้าของ P_e และเมื่อมอเตอร์ทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สภาวะนี้มอเตอร์จะมีการส่งถ่ายกำลัง ย้อนกลับมาที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง หรือส่งพลังงานไฟฟ้าไหลกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง

6.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมกับเครื่องต้นกำลังที่เป็นกังหันลมเนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีมีความยืดหยุ่นได้ มีเสถียรภาพที่เหนือกว่าเครื่องจักรไฟฟ้าประเภทอื่น เช่น เครื่องจักรซิงโครนัส เครื่องต้นกำลังแบบที่เป็นกังหันลมต้องการ การปรับความเร็วรอบเพื่อให้เกิดกำลังงานกลสูงสุด กล่าวคือ ที่ความเร็วลมต่างๆ กัน จะเกิดกำลังงานกลสูงสุดที่ความเร็วไม่เท่ากัน ย่านของการปรับความเร็วรอบไม่กว้างมาก การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถควบคุมความเร็วลมหรือพลังงานลมได้ตามความต้องการเหมือนกับเครื่องต้นกำลังประเภทอื่นๆ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนหรือ พลังงานเสริม ไม่สามารถที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานหลักที่ต้องการความมั่นคงของความต้องการพลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟได้

บรรณานุกรม

- [1] พิเชษฐ ฉัตรพาน, “การจำลองวิธีการออกแบบระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้นสองทางโดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [2] กำพล ศิริจันทร์พงศ์, “1 เฟส เอช-ดีซี สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าสองทิศทางสำหรับอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
- [3] พิเชษฐ ฉัตรพาน, ประเสริฐ สอระสัน, วิจิตร กิณเรศ, “การควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทาง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2, หน้า 54-59, มิถุนายน 2544
- [4] พิเชษฐ ฉัตรพาน, วิจิตร กิณเรศ, “การวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคควบคุมกระแสสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเวกเตอร์ฟลักซ์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17 ฉบับที่ 2, หน้า 113-118, มิถุนายน 2543
- [5] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด, “การเลือกชุดมอเตอร์อุตสาหกรรมโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 9 ฉบับที่ 3, หน้า 38-43, ตุลาคม-พฤศจิกายน 2531
- [6] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสด, ณรงค์เดช ศรีอัสวอมร, “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] ศิวะ หงษ์นภา, “ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ”, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [8] มงคล ทองสงคราม, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, สำนักพิมพ์ พรศิวกการพิมพ์, หน้า 215-250
- [9] ธวัชชัย อัดถวิบูลย์กุล, “เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2”, แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลังวิทยาลัยช่างกลปทุมวัน, หน้า 239-286

- [10] R.S. Pena, J.C. Clare and G.M. Asher, "Implementation of Vector Control Strategies for a Variable Speed Doubly-fed Induction Machine for Wind Generation System", EPE'95, pp-3.075-3.080
- [11] B.K. Bose, "An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage-fed PWM Inverter for machine drive system," IEEE
- [12] G.O. Garcia, J.C. Mendes Luis, R.M. Stephan, and E.H. Waranabe, "An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. 41, No. 5, October 1991, pp.533-539
- [13] Parriz F, Jimmie J, "Loss Minimization Control of an Induction Motor Drive". IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 27, No.1, January 1991, pp.32-37.
- [14] Iordanis K, Nikos M, "Loss Minimization in Scalar Controlled Induction Motor Drives With Search Controllers". IEEE Trans. Power Electronics, Vol.11, No.2, March 1996, pp.213-220.
- [15] Musgrove P J, "Wind Energy Conversion – an Introduction", IEE Proceedings A, Vol. 130, No.9, 1983, pp.507-516.
- [16] Fries L, "Wind Energy Conversion Systems", Prentice Hall, 1990.
- [17] "Electrical Generation Aspects of Wind Turbine Operation", Proceedings of a BWEA-D EnWorkshop, 1987, pp.11-20.
- [18] Hinirichen E N, "Controls for Variable Pitch Wind Turbine Generators". IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.4, 1984, pp 886-892.
- [19] Jamieson P, Rawlinson-Smith R, "High Lift Aerofoils for Horizontal Axis Wind Turbines". Variable Pitch Wind Turbine Generators". BWEA Conference, 1990, pp 85-90.

- [20] Buehring J K, Fries L L, "Control Policies for Wind-energy Conversion Systems". IEE Proceedings C, Vol. 128, No 5, 1981, pp 253-261
- [21] Iqbal M T, Coonick A H, Frerir L L, "Dynamics Control Options for Variable Speed Wind Turbines". Wind Engineering, Vol. 18, No 1, 1994, pp 1-9.
- [22] Novak P, Ekelund T, Jovik I, Schmidtbauer, "Modeling and Control of Variable-Speed Wind-turbine Drive-system Dynamics". IEEE control systems, 1995, pp 28-38.
- [23] B. Connor and Leithhead W E, "The Effect of Rotor Characteristic on the Control of Pitch Regulated Variable Speed Wind Turbines". BWEA Conference, 1994, pp 67-72.
- [24] Leithhead, W E, De La Sallc S A. and Reardon D, "Classical Control of Active Pitch Regulation of Constant Speed Horizontal Axis Wind Turbine", Int' Journal of control, Vol 55, 1992, pp 845-876
- [25] B. Connor and Leithhead W E, "Investigation of a Fundamental Trade-off in Tracking the C_{pmax} Curve of a Variable Speed Wind Turbine". BWEA Conference, 1993, pp.313-319
- [26] Andrzej M. Trzynadlowski, "The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors ", University of Nevada, Reno, 1994
- [27] จรัส ตั้งวงศ์ชูเกตุ, "การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเฟสเซอร์โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในการควบคุมการทำงาน", วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
- [28] Tore M. Underland, Stainar Midttveit and Robert Nilssen., " Phasor Applied Control (PAC) of Induction Motors A New Concept for Servo-Quality Dynamic Performance.", Conference on Applied Motion Control, PP. 1-8, June 1986.
- [29] Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins., " Power Electronics Converters, Applications and Design.", Second Edition. John Wiley&Sons, Inc. New York, 1995

- [30] บุวลักษณ์ พัฒนาดิสัย, มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์, “การใช้วิธีควบคุมแบบฟิวล์โอเรียลเตท สำหรับการควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23 ฉบับที่ 1, มีนาคม, 2549
- [31] Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. Academic Press, 2001.
- [32] Digital Signal Processing Products, “DSP56F801/803/805/807 16 Bit Digital Signal Processing User’s Manual.” Motorola, 2000.
- [33] Richard Valentine. Motor Control Electronics Handbook. McGraw-Hill, 1998.
- [34] B.K. Bose. Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications, IEEE Press Marketing. 1996.
- [35] ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล, “การวิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติของเทคนิคเคลดต้ามีอดคูเลชั่น”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [36] Peter Vas. Vector control of AC Machines. Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [37] I. Boldea and S.A. Nasar. Vector Control of AC drives. CRC Press, Inc. 1992.
- [38] D.W. Novotny and T.A. Lipo. Vector Control and Dynamics of AC Drives. Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [39] Werner Leonhard. Control of Electrical Drives. 3rd Edition. Springer-Verlag, 2001.
- [40] Kaushik Rajashekara, Atsuo Kawamura and Kouki Matsuse. Sensorless Control of AC Motor Drives. IEEE Press, Inc. 1996.
- [41] Bimal K. Bose, “An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System.” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 37, no. 5, pp.402-408, October 1990.

ภาคผนวก 1

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส		
พิกัดกำลังไฟฟ้า	7.5	kW
กระแส	19	A
แรงดัน	400	V
จำนวนขั้วของมอเตอร์	4	pole
ความถี่	50	Hz
ความเร็วรอบที่พิกัด	1440	RPM
ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	$R_s = 0.7384$	Ω
ความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์	$L_{is} = 0.003045$	H
ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์	$R_r = 0.7402$	Ω
ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์	$L_{ir} = 0.003045$	H
ความเหนี่ยวนำร่วม	$L_m = 0.1241$	H
Speed controller:		
$K_p = 13$	$K_i = 26$	
Wind Turbine:		
รัศมี	$r = 3.24$	m
ค่าแรงเฉื่อย	$J = 7.5$	Kgm^2
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	$B = 0.06$	Nms/rad
ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho = 1.299$	
ความเร็วลมต่ำสุด	$v = 4$	m/s
ความเร็วลมสูงสุด	$v = 12$	m/s
อัตราส่วนของเกียร์ทด	$G = 5.065$	
Converter:		
คาปาซิเตอร์	$c = 2600$	μF
ความต้านทาน	$R = 0.1$	Ω
ความเหนี่ยวนำ	$L = 1$	mH
$K_p = 0.173$	$K_i = 4.89$	
Hysteresis Current Controller:		
Fixed band	$HB = 0.5$	A

ภาคผนวก 2

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] ชวลักษณ์ พัฒนาศักดิ์, มณฑล สีสัจจินดาไกรฤกษ์, “การใช้วิธีควบคุมแบบฟิวส์โอเรียลเตท สำหรับการควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 23 ฉบับที่ 1, มีนาคม, 2549



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2549

1.	Direction Sequence Construction for Offline Thai Handwriting <i>Kor Kittikorn, Boontee Kruatrachue</i>	1
2.	การสังเคราะห์วัสดุประกอบคล้ายไม้จากพืชมงหนิงและเยื่อขาน้อย <i>ไพศาล นาคพิพัฒน์ เดือนพร บุญศิริชัย</i>	7
3.	การออกแบบวงจรขยายป้อนกลับกระแสแรงดันต่ำ <i>มนตรี สุขเลียง สมบอง วิเศษพานิชกิจ กอบชัย เดชหาญ</i>	14
4.	วงจรกรองความถี่ไมโครคัท OTA-C ที่โปรแกรมได้ทางดิจิทัล <i>สุรัตน์ ตุงกรณะ มนต์รี คำเงิน พัทธิน พรหมมี กอบชัย เดชหาญ กฤษณี อ่างแก้ว จิระศักดิ์ ขาววุฒิมิตรรม</i>	20
5.	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและผลตอบสนองทางแสงของฟิล์มเพชร <i>ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์ วิสุทธิ์ วิจิตรเรือง</i>	26
6.	ไฟไดโอดโพลาร์รอยต่อเนื้อสารชนิดเดียวกันของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นและฟิล์มเพชรชนิดพี <i>ทรงเกียรติ กิตติสินธิรักษ์ วิสุทธิ์ วิจิตรเรือง</i>	32
7.	คอนเวอเตอร์วีซี-เอซี เชื่อมต่อกรไฟฟ้าโดยมีการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล <i>วิมลชัย ชูรักษ์ วิจิตร กิณเรศ</i>	38
8.	การศึกษาการตรวจจับแรงแรงดันในมอเตอร์แตกหักในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยไฟโรจฉายประสาทเทียม <i>กมล สะอาดของ เฉลิมชาติ มานพ วิจิตร กิณเรศ สุรชาติ ลิ่ววิวัฒน์</i>	44
9.	รถไฟฟ้าขับเคลื่อนสี่ล้อ <i>โสภณ สวัสดิ์นาวิน ประภาส ไทรสุวรรณ</i>	50
10.	การใช้วิธีควบคุมแบบฟิวส์โอเรียลเตทสำหรับควบคุมการเปลี่ยนความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม <i>ยุวสิทธิ์ พัฒนวิสัย มณฑล ลิลาจินดาไกรฤกษ์</i>	56
11.	การวิเคราะห์การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนด้วยที่ด้อยลงเอ็ม <i>โดยอินเวอเตอร์หลายระดับชนิดเซมิบริดจ์</i> <i>ฉัตรชัย เหมสะอาด วิจิตร กิณเรศ</i>	62
12.	การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาการทำงานผิดพลาดของระบบป้องกันโซน 3 <i>ไพโรจน์ เขียนทอง มณฑล ลิลาจินดาไกรฤกษ์</i>	68
13.	วงจรมัลติพริคัลคอนเวอเตอร์ที่มีการปรับปรุงแรงดันตกคร่อมระหว่างคาปาซิเตอร์ไม่สมดุล <i>จางวัฑฒ์ จันทร์โร วิจิตร กิณเรศ</i>	74
14.	การออกแบบและวิเคราะห์สวิตช์ใหม่เอซี-ดีซีคอนเวอเตอร์ทางด้านอินพุตสำหรับเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่ <i>มีการควบคุมกระแสปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง</i> <i>พูนศรี วรรณการ ประภาส ไทรสุวรรณ วิจิตร กิณเรศ</i>	80

การใช้วิธีควบคุมแบบฟิวลด์โอเรียลเตทสำหรับควบคุมการเปลี่ยน ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

Field-Oriented Control For a Variable-Speed Wind Turbine Generator

ชวลักษณ์ พัฒนาศสัย มณฑล ถิลาจินดาไกรฤกษ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการจำลองการทำงาน และสมรรถนะของระบบขับเคลื่อน มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก โดยมีกังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อให้สามารถทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะใช้วิธีการคำนวณหากระแสสเตเตอร์ โดยอาศัยหลักการแบบ field-oriented จากแบบจำลองสำเร็จรูปในโปรแกรม Matlab ส่วนของ Simulink โดยใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบบอแคปที่ฟิวลด์โอเรียลเตทที่ปรับความเร็วที่ปรับความเร็วเพื่อควบคุมกระแส ส่วนการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายใช้หลักการควบคุมแบบสเกลาร์ เพื่อควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเป็นสวิทช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง

Abstract

In this paper, simulation and performance of squirrel cage induction motor system driven by wind turbine to work induction motor and three phase induction generator at the same time by using stator current calculation. The calculation of stator current in this paper based on the principle of field-oriented. For simulink form matlab program by using Adaptive Hysteresis band PWM current control. For the converter control of power supply based on the principle of scalar control to control converter and work as switched moed converter that able to be bidirectional power flow.

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาทางด้านพลังงานมีเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงกับเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก สาเหตุหลักของปัญหา คือ เรื่องของราคาพลังงานด้านต่าง ๆ ที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งรวมไปถึงราคาของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ผลิตกำลังไฟฟ้า การพัฒนา

เกี่ยวกับแหล่งพลังงานทดแทน เป็นการดำเนินการอีกด้านที่หลายประเทศให้ความสำคัญ ดังนั้นในบทความนี้ได้นำเสนอการจำลองการทำงาน ของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไปเป็นโหมคเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะนำคอนเวอร์เตอร์มาแทนที่ไดโอดเรกติไฟส์เพื่อให้สามารถส่ง

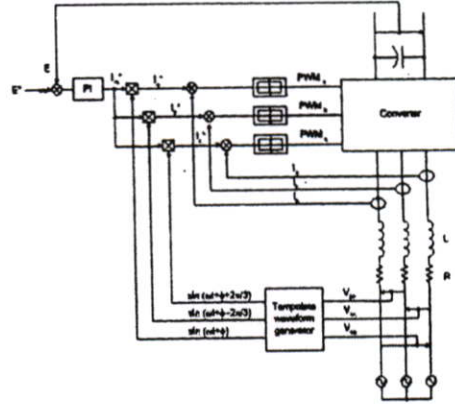
ค่าคงที่โดยไม่มีค่านึงถึงขนาด และทิศทางของกำลังผลิต โดยใช้หลักการควบคุมแบบสแตลาร์ ในการควบคุมกระแส Adaptive Hysteresis band PWM เพื่อควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานเป็นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถทำงานได้ 2 โหมคคือโหมคเรกติไฟลิ่งและโหมคอินเวอร์ตติ้ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (dc link) จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI control) โดยอินพุทของตัวควบคุมแบบพีไอ จะได้รับค่ามาจากแรงดันคิซีลิ่งคี่อ้างอิงลบแรงดันคิซีลิ่งคี่จริงที่ได้จากการวัด เมื่อมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นตัวควบคุม PI จะปรับขนาดกระแสอ้างอิง โดยที่ขนาดของกระแสอ้างอิงนี้เป็นขนาดของกระแสทั้ง 3 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งกระแสอ้างอิงได้มาจากเอาต์พุทของตัวควบคุม PI คูณกับรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการจากทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อนำค่ากระแสอ้างอิงไปลบกับค่ากระแสจริงทั้ง 3 เฟสแล้วทำการควบคุมกระแสคอนเวอร์เตอร์ให้มีขนาด และรูปร่างติดตามกระแสอ้างอิงโดยใช้ตัวควบคุม Hysteresis ดังนั้นกระแสอ้างอิงเป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมกำลังไฟฟ้าแฝง (Q) ทำได้โดยปรับมุมต่างเฟส ของกระแสอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าจากทางด้านแหล่งจ่าย และขนาดของกระแสจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความต้องการ กำลังไฟฟ้าจริง (P) สำหรับใช้รักษาแรงดันคิซีลิ่งคี่ (dc link) ให้มีค่าคงที่ดังแสดงได้ด้วยสมการ

$$P = \sqrt{3}VI \cos \phi \tag{6}$$

$$Q = \sqrt{3}VI \sin \phi \tag{7}$$

เมื่อต้องการให้ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับหนึ่งกระแสอ้างอิง จะต้องอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าจากทางด้านแหล่งจ่าย ดังนั้นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ จะทำงานอยู่ในโหมคเรกติไฟลิ่งคี่ กำลังไฟฟ้าจะไหลจากระบบไฟฟ้ากำลังเข้าสู่จอร์คอนเวอร์เตอร์ ในลักษณะตรงกันข้ามเมื่อต้องการควบคุมให้ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับลบ

หนึ่งกระแสอ้างอิง จะต้องเอาทอเฟสกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย ดังนั้นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์จะทำงานอยู่ในโหมคอินเวอร์ตติ้งทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากจอร์คอนเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2 ระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์ด้านเอซีไลน์

4. ระบบควบคุมกังหันลม

กำลังงานกล P_m ของกังหันลมจะเป็นฟังก์ชันของความเร็วลม v ความหนาแน่นของอากาศ ρ รัศมีของใบพัด r และค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p [4] ซึ่งได้เลือกสมการของกังหันลมแบบ Horizontal axis machine เพื่อต้องการหาค่า P_m และ T_m มาจากสมการดังนี้

$$P_m = \frac{\pi}{2} \rho C_p (\lambda, \beta) r^2 v^3 \tag{8}$$

$$\omega_i = \frac{\lambda v}{r} \tag{9}$$

$$T_i = \frac{P_m}{\omega_i} = \frac{\pi}{2} \rho C_t (\lambda, \beta) r^3 v^2 \tag{10}$$

$$\text{เมื่อ } C_t(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_m - T_e \tag{11}$$

อัตราส่วนของแรงบิดทางกลและอัตราส่วนความเร็วรอบทางด้านกังหันลมเทียบกับทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\frac{T_i}{T_m} = \frac{\omega_m}{\omega_i} = G \tag{12}$$

กังหันลมที่ใช้ขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าจะให้กำลังงานกลสูงสุดที่ความเร็วค่าหนึ่งเรียกค่านี้อ่าความเร็วออปติมัม

ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องออกแบระบบควบคุมความเร็วของกังหันลม ให้ติดตามความเร็วของพัดลมเสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม v ใช้สมการที่(8) และความสัมพันธ์ของกราฟ C_p เทียบกับ λ ในรูปที่ 3(ข) จะได้ว่ากำลังงานกลจะเปลี่ยนไปตามค่าสัมประสิทธิ์ C_p เมื่อความเร็วลม v มีค่าคงที่ และความเร็วรอบของกังหันลมคำนวณได้จากสมการที่ (9) เมื่อนำมาหาลอการิทึมจะได้ คุณลักษณะสมบัติของเส้นโค้งกังหันลม P_m เทียบกับความเร็วรอบของกังหันลม (ความเร็วรอบ จะพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการคูณด้วยอัตราส่วนของเกียร์บล็อก G) ที่ค่าความเร็วลม v ต่างๆ กัน ดังรูปที่ 3(ก) กำลังงานกลจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ C_p มีค่าสูงสุด ซึ่งจะสอดคล้องกับจุดตัดของเส้นโค้ง $P_{m,opt}$ กับเส้นโค้งกำลังงานกล P_m จุด "a" และ "c" เรียกว่า จุดออฟติมัมกำลังงานกลสูงสุด และแรงบิดทางกลสูงสุดที่จุดออฟติมัมสามารถคำนวณได้

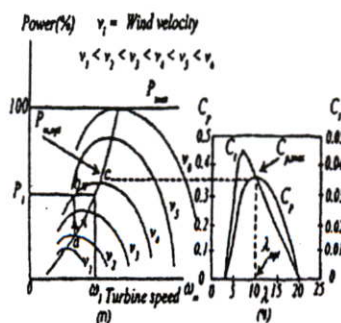
$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,opt}^3 \tag{13}$$

$$T_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,opt}^2 \tag{14}$$

$$\omega_{m,opt} = \frac{\lambda_{opt} v G}{r} \tag{15}$$

$$K_{opt} = \frac{\pi C_{p,max} \rho r^5}{2 \lambda_{opt}^3 G^3}, C_{p,max} = 0.35, \lambda_{opt} = 10$$

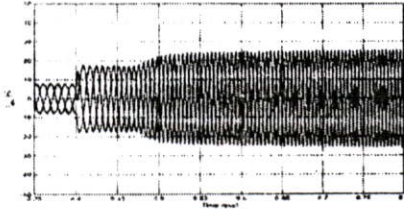
จากสมการที่ (15) จะเห็นได้ว่าความเร็วออฟติมัมของกังหันลมจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วลม v



รูปที่ 3 คุณลักษณะสมบัติของกังหันลม

5. หลักการทำงานของระบบจำลอง

จากรูปที่ (4) แสดงให้เห็นถึงระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงระรอกที่ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์สองตัว โดยมีตัวกังหันลม ที่จะนำมาใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพื่อให้มอเตอร์สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม และเมื่อระบบควบคุมเริ่มทำงานกระแส I_1 จะไหลจากแหล่งจ่ายการไฟฟ้าเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ตัวแรก ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเรกติไฟเลอร์ซึ่งจะเปลี่ยนไฟ AC เป็น DC โดยคอนเวอร์เตอร์ตัวนี้ จะทำหน้าที่เป็นสวิชต์โหมดคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้หลักการควบคุมกระแสแบบอะแดปทีฟ ที่ดับบลิเอ็ม สวิชต์โหมดคอนเวอร์เตอร์จะมีการทำงาน 2 โหมดคือโหมดเรกติไฟลิ่งเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแรงดัน V_{in} ไปสู่แรงดัน V_{dc} โดยจะมีการควบคุมกระแส I_1 ให้อินเฟสกับแรงดัน V_{in} เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้า ส่วนในโหมดที่สองคือโหมดอินเวอร์ตติ้งเป็นการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแรงดัน V_{dc} ไปสู่ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งแรงดัน V_{in} ในโหมดนี้จะควบคุมกระแส I_1 ให้เอาท์ออฟเฟสกับแรงดัน V_{in} เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ส่วนคอนเวอร์เตอร์ตัวที่สองจะทำหน้าที่ทางด้านอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟ DC เป็น AC และใช้หลักการควบคุมแบบ field-oriented สำหรับคำนวณหาค่ากระแสเดเตอร์อ้างอิง เพื่อนำค่าที่ได้มาลกับค่ากระแสจริงที่วัดได้ เพื่อใช้สำหรับควบคุมกระแส ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสให้สามารถทำงานได้ 2 โหมดคือเมื่อทำงานในโหมดมอเตอร์จะทำให้สวิชต์โหมดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย ทำงานในโหมดเรกติไฟลิ่ง และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสให้มากกว่าความเร็วซิงโครนัส โดยใช้กังหันลมที่ใช้ความเร็วลมสูงสุดที่ 10 (m/s) เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้ค่าสลิปคิดลบ ดังนั้นมอเตอร์จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม ซึ่งจะส่งผลทำให้สวิชต์โหมดคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย ทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง



รูปที่ 12 กระแสเอาต์พุต I_m ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ (5) แสดงความสัมพันธ์ของกระแส 1 เฟส ของคอนเวอร์เตอร์ร่วมกับแรงดันทางด้านแหล่งจ่าย ซึ่งทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ กระแส I_a มีมุมอินเฟสกับแรงดัน V_a เป็นมุม 0 องศาทางไฟฟ้าและในรูปที่ (6) เป็นการดำเนินงานในโหมดอินเวอร์ตที่ กระแส I_a มีมุมต่างเฟสกับแรงดัน V_a เป็นมุม 180 องศาทางไฟฟ้า ส่วนรูปที่ (7) จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขณะที่เพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์อย่างฉับพลันจะทำให้แรงดัน V_a มีค่าคงที่ ในรูปที่ (8) แสดงถึงค่าของ Speed และแรงบิด T_m , T_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างฉับพลัน จะทำให้แรงบิด T_m มีค่ามากกว่า T_e ซึ่งจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และในรูปที่ (9) กระแส i_u และกระแส i_v บนแกนหยุดนิ่งจะทำงานห่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้า ส่วน รูปที่ (10) แสดงถึงค่าของ Speed และ P_m , P_e ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นการทดสอบอินเวอร์เตอร์ ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อเพิ่มความเร็วอย่างฉับพลัน โดยใช้กึ่งนำลมนเป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อ จะทำให้อัตราการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สภาวะนี้มอเตอร์ จะมีการส่งกำลังย้อนกลับ มาที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ จะทำการส่งกำลังไฟฟ้าคืนกลับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะสังเกตได้จากค่ากำลังไฟฟ้าของ P_m มากกว่า P_e ส่วนรูปที่ (11) และ (12) เป็นแรงดันเอาต์พุต V_a และกระแสเอาต์พุต I_m ของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะทำงานในโหมดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

7.สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สามารถทำงานได้ทั้งสองโหมดคือกรณีทำงานในโหมดมอเตอร์ สวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายจะทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้มีค่ามากกว่าความเร็วเชิงโรตัส โดยใช้กึ่งนำลมนเป็นตัวขับเคลื่อนจะทำให้ค่าสลิปติดลบดังนั้นมอเตอร์จะเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากึ่งนำลมนส่วนสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายจะทำงานในโหมดอินเวอร์ตที่

8.ภาคผนวก

Induction Motor: 10-Hp, 400 V, 4pole, 50 Hz, 1440 RPM
 $R_s = 0.7384\Omega$, $L_s = 0.003045H$, $R_r = 0.7402\Omega$, $L_r = 0.003045H$, $L_m = 0.1241H$

Speed controller: $K_p = 13$, $K_i = 26$

Wind Turbine: $r = 3.24m$, $J = 7.5Kg m^2$, $B = 0.06Nms/rad$
 $\rho = 1.299$, $G = 5.065$, $v = 10m/s$

Converter: $C = 2600 \mu F$, $R = 0.1$, $L = 10mH$, $E = 550$, $K_p = 0.173$, $K_i = 4.89$

Hysteresis Current Controller: Fixed band HB = 0.5A

9.เอกสารอ้างอิง

- [1] J.T. Boy and A.W. Tore, "Current-Forced Single-Phase Reversible Rectifier," IEE Proceeding, Vol.136, pp.205-211, September, 1998.
- [2] W. Leonhard, "Control of electrical drives," Springer Verlag, 1985.
- [3] B.K. Bose, "An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for machine Drive System," IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 37, pp.402-408, 1990.
- [4] P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik, T. Schmidtbauer, "Modeling and Control of Variable-speed Wind-turbine Drive-system Dynamics," IEEE Control System, pp.28-38, 1995.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวบุวลักษณ์ พัฒนาคิสัย เกิดเมื่อวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ.2517 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544