

การจำลองวิธีการออกแบบระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้คังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน

SIMULATION OF VECTOR CONTROL STRATEGIES DESIGN FOR A DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR DRIVEN BY A WIND TURBINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1755-9

การจำลองวิธีการออกแบบระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน

SIMULATION OF VECTOR CONTROL STRATEGIES DESIGN FOR A
DOUBLY – FED INDUCTION GENERATOR DRIVEN
BY A WIND TURBINE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60973
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1755-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด...
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.....

**SIMULATION OF VECTOR CONTROL STRATEGIES DESIGN FOR A
DOUBLY – FED INDUCTION GENERATOR DRIVEN
BY A WIND TURBINE**



**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**

2005

ISBN 974-15-1755-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองวิธีการออกแบบระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน

นักศึกษา นาย พิเชษฐ ฉัตรพาน

รหัสประจำตัว 43061144

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ. 2548

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบ และการจำลองแบบการทำงานของระบบการควบคุมเวกเตอร์ ของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมทั้งแบบที่ทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส และแบบที่ทำงานด้วยตนเองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองการทำงานด้วยสมการคณิตศาสตร์เนื่องจากเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและเรียนรู้การทำงาน รวมถึงการทดสอบระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการปรับปรุง และพัฒนาระบบก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง โดยในขั้นแรกจะเริ่มต้นศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ที่มีการควบคุมทางด้าน โรเตอร์เพียงด้านเดียว และที่มีการควบคุมทางด้านสเตเตอร์ร่วมกับทางด้าน โรเตอร์ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำหรับศึกษาระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงระบบทางด้านวงจรกำลังและระบบการควบคุมของระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทางแบบใหม่ที่มีสมรรถนะในการทำงานสูง โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมทางด้านสเตเตอร์และเทคนิคการควบคุมทางด้าน โรเตอร์ การพัฒนาทางด้านวงจรกำลังได้ทำการติดตั้งคอนเวทเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ให้ทำงานร่วมกับคอนเวทเตอร์ทางด้าน โรเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ทั้งแบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส และแบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง และติดตั้งคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง แบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสส่วนการปรับปรุงทางด้านระบบควบคุมได้ทำการควบคุมประสิทธิภาพโดยการควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็กให้เท่ากับการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำโดยการควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ให้เหมาะสมกับโหลด การปรับปรุงทางด้านวงจรกำลังและระบบควบคุม ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบ

เอกสาร
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้น 2 ทาง มีประสิทธิภาพสูง มี्यानการควบคุมความเร็วรอบที่กว้าง สามารถควบคุมให้กลับทิศทางหมุนได้อย่างอัตโนมัติ และมีพิภักสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และคุ้มครองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Simulation of vector control strategies design for a doubly – fed Induction Generator driven by a wind turbine
Student	Mr. Piches Chatphan
Student ID.	43061144
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2005
Thesis Advisor	Assoe.Pro f.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis proposes the design and simulation of vector control technique of doubly fed induction generator system driven by a wind turbine both 3 phase power supply and stand alone operation using computer program. A model is simulated by mathematical equations. Due to a large and sophisticated system, it is necessary to study its operation, which includes a testing that system with a computer program in order to improve and develop before deploying it. Primarily, it is needed to study a doubly fed induction motor system that controls a rotor and both stator and rotor. It will be a fundamental study of doubly fed induction generator system. In this thesis, the development and improvement of power circuit and control system of new doubly fed induction machine system with high performance are purposed by controlling the stator and rotor. To develop the power circuit, the converter on stator side is installed in order to operate with converter on rotor side of doubly fed induction motor and doubly fed induction generator both 3 phase power supply and stand alone operation. Also, the converter on power supply side using for controlling terminal voltage of doubly fed induction generator is installed, which can operate by itself using current vector control technique. For the improvement of control system, by controlling iron loss to be equal to copper loss, the efficiency is controlled, which stator flux is regulated to appropriate for the load. The development and improvement of power circuit and control system are applied to gain more higher efficiency, wide range of speed in order to control the direction of rotation automatically and higher rate.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและปรึกษาของ รศ.ดร. วิจิตร
กิมเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และ
ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ และ เจ้าหน้าที่ ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ความ
ช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน พนักงานบริษัทโรงกลั่นน้ำมันเอสโซ่ประเทศไทยจำกัดที่ข้าพเจ้า
ทำงานอยู่ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทำงานแทนกะด้วยดีตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	X
สารบัญภาพ	XI
คำอธิบายสัญลักษณ์	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 หลักการใหม่ที่น่ามาใช้ในวิทยานิพนธ์	3
1.4 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	3
1.5 การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดต่างๆ	6
1.5.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง	6
1.5.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรตอร์	6
1.5.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	7
1.5.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์	7
1.5.5 การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์	8
1.5.5.1 การขับเคลื่อนแบบเครเมอร์สตีด	10
1.5.5.2 การขับเคลื่อนแบบเซอร์เบีสสตีด	11
บทที่ 2 คอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่ายแบบไซนูซoidal	14
2.1 บทนำ	14
2.2 การควบคุมคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย	15
2.2.1 การควบคุมแบบสเกลาร์	16
2.2.2 การควบคุมแบบเวกเตอร์	18
2.3 แบบจำลองของคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน $d-q$	19
2.4 การออกแบบระบบควบคุมของคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟ	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 ผลการจำลองแบบของคอนเวทเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟ.....	25
2.5.1 ผลการจำลองแบบในโหมดเรกติไฟเออร์และโหมดอินเวทเตอร์.....	25
2.5.2 ผลการจำลองแบบของคอนเวทเตอร์ทำงานที่ตัวประกอบกำลังสี่เหลี่ยม และที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า.....	27
2.5.3 ผลการจำลองแบบในสภาวะชั่วคราว.....	28
2.6 สรุปผลการจำลองแบบ.....	30
บทที่ 3 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลม เป็นตัวขับเคลื่อนแบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส.....	31
3.1 บทนำ.....	31
3.2 แบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางในสภาวะชั่วคราว.....	34
3.2.1 แบบจำลองบนแกนหมุน $d^c - q^c$	36
3.2.2 แบบจำลองบนแกนนิ่ง $d^r - q^r$	38
3.3 ระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง.....	40
3.4 กำลังงานกลและแรงบิดทางกลของกังหันลม.....	48
3.4.1 กำลังงานกลสูงสุดของกังหันลม.....	51
3.5 ย่านของความเร็วและพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	51
3.6 การติดตามความเร็วออฟติมัมของกังหันลม.....	56
3.6.1 การควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม.....	57
3.6.2 การควบคุมความเร็วโดยทางตรง.....	58
3.7 การประเมินค่าแรงบิดทางกล.....	59
3.8 ประสิทธิภาพของ DFIG และประสิทธิภาพของระบบ.....	61
3.9 ผลการจำลองแบบในสภาวะชั่วคราว.....	63
3.9.1 ผลการจำลองแบบการควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม.....	63
3.9.2 ผลการจำลองแบบการควบคุมความเร็วโดยทางตรง.....	70
3.10 สรุปผลการจำลองแบบ.....	76

บทที่ 4 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง	78
4.1 บทนำ	78
4.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทางที่ทำงาน ได้ด้วยตนเอง	81
4.3 ลูฟการควบคุมฟลักที่สเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว	86
4.3.1 หลักการทำงานและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ SADFIG	87
4.4 การควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้ติดตาม ความเร็วของพัตมี้มโดยใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วยด้วยเทคนิคการควบคุม แบบซ้อปเปอร์	90
4.4.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย	91
4.4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ	93
4.5 ผลการจำลองแบบโดยปราศจากโหลดช่วย	94
4.5.1 ผลการจำลองแบบขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าแเอคทีฟอย่างทันทีทัน ใด	94
4.5.2 ผลการจำลองแบบขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟารีแเอคทีฟอย่างทันทีทัน ใด	96
4.6 ผลการจำลองแบบการควบคุมโดยใช้โหลดช่วย	98
4.6.1 ผลการจำลองแบบขณะเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด	98
4.6.2 ผลการจำลองแบบขณะลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด	102
4.7 สรุปผลการจำลองแบบ	106
บทที่ 5 การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมแบบทำงาน โดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ	107
5.1 บทนำ	107
5.2 แบบจำลองของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG	110
5.2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์	112
5.2.1.1 การควบคุมคอนเวกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์	112
5.2.1.2 การควบคุมคอนเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์	113

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG.....	116
5.4 การสูญเสียในระบบขับเคลื่อนของ DFIG ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม.....	117
5.4.1 การสูญเสียทางไฟฟ้า.....	117
5.4.1.1 การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	117
5.4.1.2 การสูญเสียที่คอนเวอเตอร์.....	120
5.4.2 การสูญเสียทางกล.....	120
5.5 การควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG.....	121
5.5.1 แบบจำลองการสูญเสียของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG.....	121
5.5.2 ประสิทธิภาพ และการไหลของกำลังไฟฟ้าใน DFIG ในสภาวะคงตัว.....	127
5.6 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG.....	129
5.6.1 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG ในสภาวะชั่วคราว.....	130
5.6.1.1 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG โดยใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมแบบทางอ้อม.....	130
5.6.2 ผลการจำลองแบบในสภาวะคงตัว.....	135
5.6.2.1 ผลการจำลองแบบในสภาวะที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้หลักการของเซอร์เบีส.....	135
5.6.2.2 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	140
5.6.2.3 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการสูญเสียของระบบขับเคลื่อนที่ใช้หลักการของเซอร์เบีสกับหลักการควบคุมประสิทธิภาพ.....	144
5.7 สรุปผลการจำลองแบบ.....	147
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	148
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	148
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	149
เอกสารอ้างอิง.....	150

ภาคผนวก 1..... 153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก2.....	155
ภาคผนวก3.....	159



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

P	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
Q	=	กำลังไฟฟารีแอคทีฟของคอนเวทเตอร์ทางด้าน แหล่งจ่าย
V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}	=	แรงดันพีคดับลิวเอ็มเฟส a ,b และ c ของคอนเวทเตอร์ทางด้าน แหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
V_d, V_q	=	แรงดัน ไฟตรงบนแกน d ,q ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
V_a, V_b, V_c	=	แรงดัน ไฟฟ้ากระแสลับเฟส a ,b และ c ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}	=	กระแสไฟฟ้าเฟส a ,b และ c ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
i_d, i_q	=	กระแสไฟตรงบนแกน d , q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
V_{d1}, V_{q1}	=	แรงดันไฟตรงพีคดับลิวเอ็มบนแกน d ,q ของคอนเวทเตอร์ทางด้าน แหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_{os}	=	กระแสไฟตรงเชื่อม โยงของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
i_{or}	=	กระแสไฟตรงเชื่อม โยงของคอนเวทเตอร์ทางด้านโรเตอร์
E	=	แรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อม โยงของวงจรถูกคอนเวทเตอร์
V_{α}, V_{β}	=	แรงดัน ไฟฟ้ากระแสลับบนแกน α, β ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
θ_e	=	ตำแหน่งมุมของแรงดัน ไฟฟ้ากระแสลับของแหล่งจ่ายไฟ
m_1	=	ดัชนีการมอดูเลชันของสัญญาณ ไซค์กับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย
L	=	ค่าความเหนี่ยวนำของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
C	=	ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรเชื่อม โยงไฟตรง
V_{d1}^*, V_{q1}^*	=	แรงดันไฟตรงอ้างอิงบนแกน d ,q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
i_d^*, i_q^*	=	กระแสไฟตรงอ้างอิงบนแกน d ,q ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
E^*	=	แรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อม โยงอ้างอิงของวงจรถูกคอนเวทเตอร์
V_{ds}, V_{qs}	=	แรงดันไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ
V_{dr}, V_{qr}	=	แรงดันไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

i_{ds}, i_{qs}	=	กระแสไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านสเตเตอร์ตามลำดับ
i_{dr}, i_{qr}	=	กระแสไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านโรเตอร์ตามลำดับ
$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$	=	ฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวดสเตเตอร์บนแกน d^c, q^c ตามลำดับ
λ_s	=	ฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมด
$\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$	=	ฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวดโรเตอร์บนแกน d^c, q^c ตามลำดับ
i_{ms}	=	กระแสแมกนีไตซึ่งทางด้านสเตเตอร์บนแกน d^c, q^c
L_O	=	ค่าความเหนี่ยวนำเทียบเท่า
L_s, L_r	=	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
L_m	=	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์
L_{ls}, L_{lr}	=	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
R_s, R_r	=	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ตามลำดับ
θ_s	=	ตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์
θ_{sl}	=	ตำแหน่งมุมของสลิป
θ_r	=	ตำแหน่งมุมของโรเตอร์ฟลักซ์
σ	=	สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทั้งหมด
σ_s	=	สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
ω_{ms}	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ
U_{ds}^s, U_{qs}^s	=	แรงดันสเตเตอร์บนแกนนิ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
U_{dr}^s, U_{qr}^s	=	แรงดันโรเตอร์บนแกนนิ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
i_{ds}^s, i_{qs}^s	=	กระแสแรงดันสเตเตอร์บนแกนนิ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
i_{dr}^s, i_{qr}^s	=	กระแสแรงดันโรเตอร์บนแกนนิ่ง d^c, q^c ตามลำดับ
T_e	=	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
P_m	=	กำลังงานกลของกังหันลม
v	=	ความเร็วลม
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ
r	=	รัศมีของใบพัดของกังหันลม
C_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล
λ	=	อัตราส่วนความเร็วปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

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
$P_{m,opt}$	=	กำลังงานกลที่จุดออปติ멈 ของกังหันลม
$\omega_{m,t}$	=	ความเร็วเชิงมุมทางกลของกังหันลม
$\omega_{m,G}$	=	ความเร็วเชิงมุมทางกลเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\omega_{m,t,opt}$	=	ความเร็วเชิงมุมออปติ멈 ของกังหันลม
$\omega_{m,G,opt}$	=	ความเร็วเชิงมุมออปติ멈เมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ω_r	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ω_{sl}	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสลิป
S	=	สลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
P	=	จำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
δ	=	ดิฟเฟอเรนเชียล
K_{opt}	=	ค่าคงที่ออปติ멈ของกังหันลม
P_{main}	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟที่ไหลเข้าโหลดหลัก
P_{front}	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟที่ไหลผ่านคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
P_{aux}	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของโหลดช่วย
f_s	=	ความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์
f_r	=	ความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดโรเตอร์
P_s	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟจ่ายออกทางด้านสเตเตอร์
P_r	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟจ่ายออกทางด้าน โรเตอร์
P_{sl}	=	กำลังสลิป
P_e	=	กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า
Q_s	=	กำลังไฟฟารีแอคทีฟทางด้านสเตเตอร์
Q_r	=	กำลังไฟฟารีแอคทีฟทางด้าน โรเตอร์
$P_{s,cr}$	=	กำลังสูญเสียที่ตัวนำของขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

$P_{r, cu}$	=	กำลังสูญเสียที่ตัวนำของขดลวด โรเตอร์
$P_{cu, total}$	=	กำลังสูญเสียที่ตัวนำทั้งหมด
$P_{s, fe}$	=	กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์
$P_{r, fe}$	=	กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของ โรเตอร์
$P_{fe, total}$	=	กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กทั้งหมด
$P_{m, loss}$	=	กำลังสูญเสียทางกล
P_g	=	กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดสเตเตอร์
$P_{out, DFIG}$	=	กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟที่จ่ายออกทั้งหมดของ DFIG
$\eta_{, DFIG}$	=	ประสิทธิภาพของ DFIG
$\eta_{, mechanical}$	=	ประสิทธิภาพทางกล
$\eta_{, converter}$	=	ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์
$\eta_{, system}$	=	ประสิทธิภาพของระบบ
β_e	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวน
β_h	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากฮีสเทอรีซิส
$i_{a, main}$	=	กระแสของโพลหลักเฟส a
V_L	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วของโพลหลัก
$i_{q, aux}$	=	กระแสไฟตรงของโพลช่วยบนแกน q
$i_{d, aux}$	=	กระแสไฟตรงของโพลช่วยบนแกน d

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 การสูญเสียและประสิทธิภาพที่ใช้หลักการของเซอร์เบียส.....	139
5.2 การสูญเสียและประสิทธิภาพขณะที่มีการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG.....	143



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การต่อความต้านทานเข้ากับวงจร โรเตอร์	9
1.2 การใช้ดีซีชอปเปอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์	9
1.3 ระบบขับเคลื่อนเครเมอร์แบบสถิต	10
1.4 วงจรภาคกำลังของระบบขับเคลื่อนเซอร์เบีสแบบสถิต	12
1.5 วงจรภาคกำลังของเซอร์เบีสคอนเวทเตอร์ต่อแบบ back to back	12
2.1 วงจรเทียบเท่าของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ	15
2.2 การควบคุมแบบสเกลาร์ด้วยตัวควบคุมแบบ PI	17
2.3 การควบคุมแบบสเกลาร์ด้วยตัวควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส	17
2.4 การควบคุมแบบเวกเตอร์	19
2.5 วงจรเทียบเท่าของคอนเวทเตอร์บนแกน $d^c - q^c$	20
2.6 ลูฟการควบคุมแรงดัน ไฟดีซีลิงค์	22
2.7 การควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ	23
2.8 การทำงานของคอนเวทเตอร์ในโหมดเรกติไฟเออร์	26
2.9 การทำงานของคอนเวทเตอร์ในโหมดอินเวทเตอร์	26
2.10 การทำงานของคอนเวทเตอร์ที่ตัวประกอบกำลังล่าช้า	27
2.11 การทำงานของคอนเวทเตอร์ที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า	28
2.12 การเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง i_q^* อย่างทันทีทันใด	29
2.13 กระแสและแรงดันที่เฟสของคอนเวทเตอร์	29
3.1 ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกังหันลมแบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ	33
3.2 วงจรเทียบเท่าของ DFIG บนแกนอ้างอิง $d^c - q^c$	37
3.3 วงจรเทียบเท่าของ DFIG บนแกนอ้างอิง $d^s - q^s$	39
3.4 วงจรเทียบเท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอกบนแกนอ้างอิง $d^s - q^s$	39
3.5 เวกเตอร์กระแสบนแกนอ้างอิง $d^c - q^c$, $d^s - q^s$ และ $d^r - q^r$	41
3.6 การควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์แบบทางอ้อมของ DFIG	46
3.7 การควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมของ DFIG	47
3.8 กราฟความสัมพันธ์ของ C_p และ C_t เทียบกับ λ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นาไปไซบ่ระเขยชนดานการค้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 แบบจำลองของกังหันลมเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	50
3.10 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า VA และกระแสของโรเตอร์เทียบกับความเร็วรอบ.....	54
3.11 คุณลักษณะของกำลังงานกลของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ กันเทียบกับความเร็วรอบ.....	55
3.12 คุณลักษณะของแรงบิดทางกลของกังหันลมเทียบกับความเร็วรอบ.....	56
3.13 ระบบการควบคุมความเร็วแบบทางอ้อม.....	58
3.14 ระบบการควบคุมความเร็วแบบทางตรง.....	61
3.15 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์บนแกน $d - q$ ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	64
3.16 แรงบิดทางกลและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมีการเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	65
3.17 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด.....	65
3.18 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	66
3.19 กระแสของคอนเวกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟแกน $d-q$ ขณะเพิ่มความเร็วลมทันทีทันใด.....	66
3.20 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์บนแกน $d - q$ ขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	67
3.21 แรงบิดทางกลและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	68
3.22 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	68
3.23 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	69
3.24 กระแสของคอนเวกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน $d-q$ ขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	69
3.25 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	71
3.26 การประเมินค่าแรงบิดทางกลขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	71
3.27 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	72
3.28 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	72
3.29 กระแสของคอนเวกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน $d-q$ ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	73
3.30 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์ขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	74
3.31 แรงบิดทางกลขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	74
3.32 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด.....	75
4.1 ระบบขับเคลื่อน DFIG ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมแบบทำงานด้วยตนเอง.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 การควบคุมแวกเตอร์ของ SADFIG	84
4.3 ลูฟการควบคุมกระแสแมกนีไตซ์	86
4.4 เส้นโค้งกำลังงานกลเทียบกับความเร็วรอบ	91
4.5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมโหลดช่วย	93
4.6 กระแสโรเตอร์ขณะเพิ่มกำลังแเอ็คทีฟของโหลดอย่างทันทีทันใด	95
4.7 กระแสแมกนีไตซ์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์	95
4.8 กระแสสเตเตอร์และกระแสคอนเวทเตอร์ขณะเพิ่ม โหลดอย่างทันทีทันใด	96
4.9 กระแสโรเตอร์และกระแสแมกนีไตซ์ขณะเพิ่มกำลังรีแเอ็คทีฟของ โหลดอย่างทันทีทันใด	97
4.10 กระแสคอนเวทเตอร์ กระแสของสเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์	97
4.11 กระแสของคอนเวทเตอร์และกระแสของ โหลดช่วยขณะเพิ่ม โหลดหลักอย่างทันทีทันใด	99
4.12 กระแสโรเตอร์แกน q และกระแสแมกนีไตซ์ขณะเพิ่ม โหลดหลักอย่างทันทีทันใด	99
4.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่ม โหลดหลักอย่างทันทีทันใด	100
4.14 กำลังไฟฟ้าแเอ็คทีฟของ โหลดช่วยและของคอนเวทเตอร์ขณะเพิ่ม โหลดหลักอย่างทันทีทัน ใด	100
4.15 กำลังไฟฟ้าแเอ็คทีฟของ โหลดหลัก	101
4.16 กระแสสเตเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์และกระแสของคอนเวทเตอร์ขณะเพิ่ม โหลดหลัก อย่างทันทีทันใด	101
4.17 กระแสของคอนเวทเตอร์และกระแสของ โหลดช่วยบนแกน $d - q$ ขณะลด โหลดหลัก อย่างทันทีทันใด	103
4.18 กระแสโรเตอร์แกน q และกระแสแมกนีไตซ์ ขณะลด โหลดหลักอย่างทันทีทันใด	103
4.19 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะลด โหลดหลักอย่างทันทีทันใด	104
4.20 กำลังไฟฟ้าของ โหลดช่วยและของคอนเวทเตอร์ขณะลด โหลดหลักอย่างทันทีทันใด	104
4.21 กำลังไฟฟ้าแเอ็คทีฟของ โหลดหลัก	105
4.22 กระแสสเตเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์และกระแสของคอนเวทเตอร์ขณะลด โหลดหลัก ลงอย่างทันทีทันใด	105
5.1 ระบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG	109
5.2 แบบจำลองของระบบควบคุมฟลักซ์แวกเตอร์ของ DFIG บนแกนหมุน $d^c - q^c$	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.3 การควบคุมแวกเตอร์ของระบบควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG	115
5.4 แบบจำลองที่สมบูรณ์ของ DFIG แบบแกน $d^c - q^c$	123
5.5 แบบจำลองการสูญเสียของระบบควบคุมฟลักซ์แวกเตอร์ของ DFIG บนแกนหมุน $d^c - q^c$ ในสถานะคงตัว	124
5.6 การควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG	127
5.7 กระแสโรเตอร์และกระแสสเตเตอร์ซึ่งเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด	131
5.8 กระแสสร้างแรงบิดขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด	132
5.9 ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของ โรเตอร์และสเตเตอร์ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด	132
5.10 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด	133
5.11 กระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน $d-q$ ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด	133
5.12 การสูญเสียที่ตัวนำและการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้าน โรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์	134
5.13 การสูญเสียทั้งหมดที่ตัวนำและที่แกนเหล็กของ DFIG	134
5.14 กำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่ขั้วสเตเตอร์ P_s และ โรเตอร์ P_r และกำลังเข้าพุทจ่ายออกทั้งหมด	135
5.15 การสูญเสียที่ตัวนำและการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้าน โรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์	136
5.16 การสูญเสียทั้งหมดที่ตัวนำและที่แกนเหล็กของ DFIG	137
5.17 การสูญเสียทางกล การสูญเสียที่คอนเวทเตอร์ และการสูญเสียใน DFIG	137
5.18 ประสิทธิภาพของ DFIG ประสิทธิภาพของระบบและประสิทธิภาพทางกล	138
5.19 การสูญเสียที่ตัวนำและที่แกนเหล็กทางด้าน โรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์	140
5.20 การสูญเสียทั้งหมดที่ตัวนำและที่แกนเหล็กของ DFIG	141
5.21 การสูญเสียที่คอนเวทเตอร์ การสูญเสียใน DFIG และการสูญเสียทางกล	141
5.22 ประสิทธิภาพของระบบประสิทธิภาพของ DFIG และประสิทธิภาพทางกล	142
5.23 เปรียบเทียบการสูญเสียของ DFIG ที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุม ประสิทธิภาพ	145
5.24 เปรียบเทียบการสูญเสียในคอนเวทเตอร์ที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุม ประสิทธิภาพ	145
5.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ DFIG ที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ประสิทธิภาพ.....	146
5.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุม ประสิทธิภาพ.....	146



คำอธิบายสัญลักษณ์

P	=	กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
Q	=	กำลังไฟฟารีแอคทีฟของคอนเวอเตอร์ทางด้าน แหล่งจ่าย
V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}	=	แรงดันพีคดับลิวเอ็มเฟส a ,b และ c ของคอนเวอเตอร์ทางด้าน แหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
V_d, V_q	=	แรงดันไฟตรงบนแกน 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 ของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
i_d, i_q	=	กระแสไฟตรงบนแกน d , q ของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
V_{d1}, V_{q1}	=	แรงดันไฟตรงพีคดับลิวเอ็มบนแกน d ,q ของคอนเวอเตอร์ทางด้าน แหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
i_{os}	=	กระแสไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
i_{or}	=	กระแสไฟตรงเชื่อมโยงของคอนเวอเตอร์ทางด้านโรเตอร์
E	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงของวงจรถอนเวอเตอร์
V_{α}, V_{β}	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับบนแกน α, β ของแหล่งจ่ายไฟตามลำดับ
θ_e	=	ตำแหน่งมุมของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟ
m_1	=	ดัชนีการมอดูเลชันของสัญญาณ ไซค์กับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย
L	=	ค่าความเหนี่ยวนำของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
C	=	ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรเชื่อมโยงไฟตรง
V_{d1}^*, V_{q1}^*	=	แรงดันไฟตรงอ้างอิงบนแกน d ,q ของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
i_d^*, i_q^*	=	กระแสไฟตรงอ้างอิงบนแกน d ,q ของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ ตามลำดับ
E^*	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงอ้างอิงของวงจรถอนเวอเตอร์
V_{ds}, V_{qs}	=	แรงดันไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ
V_{dr}, V_{qr}	=	แรงดันไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

i_{ds}, i_{qs}	=	กระแสไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้านสเตเตอร์ตามลำดับ
i_{dr}, i_{qr}	=	กระแสไฟตรงบนแกน d^c, q^c ทางด้าน โรเตอร์ตามลำดับ
$\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$	=	ฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวดสเตเตอร์บนแกน d^c, q^c ตามลำดับ
λ_s	=	ฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวดสเตเตอร์ทั้งหมด
$\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$	=	ฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวด โรเตอร์บนแกน d^c, q^c ตามลำดับ
i_{ms}	=	กระแสแมกนีไตซ์ทางด้านสเตเตอร์บนแกน d^c, q^c
L_o	=	ค่าความเหนี่ยวนำเทียบเท่า
L_s, L_r	=	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์และขดลวด โรเตอร์ตามลำดับ
L_m	=	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อพิจารณาทางด้านสเตเตอร์
L_{ls}, L_{lr}	=	ค่าความเหนี่ยวนำร่วมไว้ไหลของขดลวดสเตเตอร์และขดลวด โรเตอร์ตามลำดับ
R_s, R_r	=	ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และขดลวด โรเตอร์ตามลำดับ
θ_s	=	ตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์
θ_{sl}	=	ตำแหน่งมุมของสลิป
θ_r	=	ตำแหน่งมุมของ โรเตอร์ฟลักซ์
σ	=	สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทั้งหมด
σ_s	=	สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทางด้านสเตเตอร์
ω_{ms}	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ
v_{ds}^s, v_{qs}^s	=	แรงดันสเตเตอร์บนแกนนิ่ง d^s, q^s ตามลำดับ
v_{dr}^s, v_{qr}^s	=	แรงดันโรเตอร์บนแกนนิ่ง d^s, q^s ตามลำดับ
i_{ds}^s, i_{qs}^s	=	กระแสแรงดันสเตเตอร์บนแกนนิ่ง d^s, q^s ตามลำดับ
i_{dr}^s, i_{qr}^s	=	กระแสแรงดันโรเตอร์บนแกนนิ่ง d^s, q^s ตามลำดับ
T_e	=	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
P_m	=	กำลังงานกลของกังหันลม
v	=	ความเร็วลม
ρ	=	ความหนาแน่นของอากาศ
r	=	รัศมีของใบพัดของกังหันลม
C_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล
λ	=	อัตราส่วนความเร็วปลาย
C_t	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล
G	=	อัตราส่วนของเกียร์บ็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดและแรงเสียดทาน
$T_{m,t}$	=	แรงบิดทางกลของกังหันลม
$T_{m,G}$	=	แรงบิดทางกลเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$T_{m,t,opt}$	=	แรงบิดทางกลที่จุดออปติ멈ของกังหันลม
$T_{m,G,opt}$	=	แรงบิดทางกลที่จุดออปติ멈เมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$P_{m,opt}$	=	กำลังงานกลที่จุดออปติ멈 ของกังหันลม
$\omega_{m,t}$	=	ความเร็วเชิงมุมทางกลของกังหันลม
$\omega_{m,G}$	=	ความเร็วเชิงมุมทางกลเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$\omega_{m,t,opt}$	=	ความเร็วเชิงมุมออปติ멈 ของกังหันลม
$\omega_{m,G,opt}$	=	ความเร็วเชิงมุมออปติ멈เมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ω_r	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
ω_{sl}	=	ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสลิป
S	=	สลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
P	=	จำนวนขั้วแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
δ	=	คิวตี้ไซเคิล
K_{opt}	=	ค่าคงที่ออปติ멈ของกังหันลม
P_{main}	=	กำลังไฟฟ้าแอมป์ที่ไหลเข้าโหลดหลัก
P_{front}	=	กำลังไฟฟ้าแอมป์ที่ไหลผ่านคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ
P_{aux}	=	กำลังไฟฟ้าแอมป์ของโหลดช่วย
f_s	=	ความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์
f_r	=	ความถี่ที่ป้อนให้กับขดลวด โรเตอร์
P_s	=	กำลังไฟฟ้าแอมป์จ่ายออกทางด้านสเตเตอร์
P_r	=	กำลังไฟฟ้าแอมป์จ่ายออกทางด้าน โรเตอร์
P_{sl}	=	กำลังสลิป
P_e	=	กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า
Q_s	=	กำลังไฟฟารีแอมป์ทางด้านสเตเตอร์
Q_r	=	กำลังไฟฟารีแอมป์ทางด้าน โรเตอร์
$P_{s,cu}$	=	กำลังสูญเสียที่ตัวนำของขดลวดสเตเตอร์
$P_{r,cu}$	=	กำลังสูญเสียที่ตัวนำของขดลวด โรเตอร์
$P_{cu, total}$	=	กำลังสูญเสียที่ตัวนำทั้งหมด
$P_{s,fe}$	=	กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์
$P_{r,fe}$	=	กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_{fe, total}$	=	กำลังสูญเสียที่แกนเหล็กทั้งหมด
$P_{m, loss}$	=	กำลังสูญเสียทางกล
P_g	=	กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดสเตเตอร์
$P_{out, DFIG}$	=	กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟจ่ายออกทั้งหมดของ DFIG
$\eta_{, DFIG}$	=	ประสิทธิภาพของ DFIG
$\eta_{, mechanical}$	=	ประสิทธิภาพทางกล
$\eta_{, converter}$	=	ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์
$\eta_{, system}$	=	ประสิทธิภาพของระบบ
β_e	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากกระแสไหลวน
β_h	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียที่แกนเหล็กเนื่องจากฮีสเตอร์รีซิส
$i_{a, main}$	=	กระแสของโหนดหลักเฟส a
V_L	=	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วของโหนดหลัก
$i_{q, aux}$	=	กระแสไฟตรงของโหนดช่วยบนแกน q
$i_{d, aux}$	=	กระแสไฟตรงของโหนดช่วยบนแกน d



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กังหันลม (Wind Turbine) จัดเป็นเครื่องต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ทำงานได้โดยอาศัยพลังงานลม (Wind Energy) มีความเร็วลม (Wind Velocity) เป็นอินพุตจากคุณลักษณะสมบัติของกังหันลม (Wind Turbine Characteristic) จะให้ กำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) ที่ความเร็วรอบ ค่าหนึ่งเรียกว่า ความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed) โดยที่ความเร็วออปติ멈นี้จะแปรผันโดยตรงกับความเร็วม v ดังนั้น ในการนำกังหันลมเป็นเครื่องต้นกำลังเพื่อให้ได้กำลังงานกลสูงสุดจากพลังงานลมจึงต้องมีการควบคุมความเร็วของกังหันลมให้ทำงานที่ความเร็วออปติ멈แต่ปัญหาก็คือเราไม่สามารถรู้ค่าของความเร็วม ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการที่จะควบคุมความเร็วของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed Tracking) เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วมโดยใช้เทคนิคการควบคุม แบบทางตรงและเทคนิคการควบคุมแบบทางอ้อมสำหรับควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม (Direct and Indirect Speed Control of Wind Turbine) ในอันที่จะทำให้เกิดการส่งถ่ายกำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power Transfer) จากกังหันลมไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ จึงไม่สามารถใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสได้ (Synchronous Generator) เพราะจะทำให้ความถี่ของแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้ว (Terminal Voltage) ไม่คงที่จึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดควัดโรเตอร์แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Generator) สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ชนิดควัดโรเตอร์ แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก เนื่องจากวงจรทางด้านโรเตอร์สามารถต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ จึงสามารถนำกำลังสลิปทางด้านโรเตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วรอบกลับคืนสู่ระบบได้ (Slip Power Recovery) แต่เนื่องจากความถี่ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงไม่สามารถซิงโครไนท์เข้ากับการไฟฟ้าได้โดยตรง ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีกรรมวิธีการเปลี่ยนความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ให้เท่ากับความถี่ของการไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของเซอริเบียง นอกจากนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยทั่วไปจะไม่มี การควบคุมประสิทธิภาพ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะที่ความเร็วมต่ำๆ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่มีการกระตุ้น 2 ทาง โดยการติดตั้งคอนเวอเตอร์ที่ขั้วสเตเตอร์ของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้ ที่ความเร็วลมมีค่าต่างๆ ในระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขับเคลื่อนด้วยกังหันลมที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง (Stand Alone Double Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine) ได้ทำการติดตั้งคอนเวอเตอร์ด้านสเตเตอร์ (Stator Side Converter) สำหรับควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปคลื่นพัลส์บวกลบไม่สามารถนำมาจ่ายโหลดได้จากปัญหา ดังกล่าวผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสำหรับจ่ายโหลด โดยการติดตั้งคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นอีก 1 ตัวทำหน้าที่ควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ให้มีค่าคงที่ทั้งในสภาวะคงตัว (Steady State) และสภาวะชั่วคราว (Transient Respond) ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของภาระ โหลดอย่างทันทีทันใด

ในระบบการคืนพลังงาน สลิปของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิด วาวด์โรเตอร์ โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบิสและเครเมอร์ไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพได้ เนื่องจากความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทางด้านสเตเตอร์มีค่าคงที่ทำให้ฟลักซ์ที่ สเตเตอร์จะมีค่าคงที่ด้วยการสูญเสียที่แกนเหล็กมีค่าคงที่ที่ภาระโหลดเบาๆ (Light Load) ประสิทธิภาพจะมีค่าต่ำมากเนื่องจากการสูญเสียที่แกนเหล็กมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียที่ ขดลวดและมี्यानการควบคุมความเร็วแถบในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดวาวด์โรเตอร์ที่มีการกระตุ้น 2 ทาง (Double Fed Induction Generator) หรือ เรียกย่อๆ ว่า “DFIG” แบบใหม่อีกวิธีหนึ่งที่มีสมรรถนะสูง และสามารถควบคุมประสิทธิภาพได้โดย การควบคุมการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำให้เท่ากับการสูญเสียที่แกนเหล็กมี्यानการควบคุมความเร็วที่ กว้าง โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมทั้ง 2 ด้าน (Duble Side Vector Control) ได้แก่ การควบคุมคอนเวอ เตอร์ ด้านสเตเตอร์ (Stator Side Converter) และคอนเวอเตอร์ด้าน โรเตอร์ (Rotor Side Converter) ทำ ให้ลดความซับซ้อนของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ลงเนื่องจากไม่จำเป็นต้องคำนวณหาตำแหน่งมุม ของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ และมีพิคดกำลังสูงกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกและ ชนิดวาวด์โรเตอร์ที่มีการควบคุมความเร็วด้วยวิธีการอื่น

นอกจากนี้การประเมินค่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core Loss Observer) โดยการสมมุติให้ค่า ความต้านทานของแกนเหล็ก R_0 มีค่าคงที่ซึ่งในความเป็นจริงจะเปลี่ยนไปตามความถี่ทำให้การสูญเสีย ที่แกนเหล็กที่เกิดขึ้นจริงไม่เท่ากับการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำที่จุดออกพิกัดจากปัญหานี้ผู้วิจัยได้คิดผล ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแกนเหล็ก R_0 ทำให้การประมาณค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กมี ความถูกต้องมากขึ้นทำให้การปรับปรุงประสิทธิภาพดีขึ้น

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในปัจจุบันพลังงานที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีราคาแพง อีกทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเชื้อเพลิงและมีการลงทุนสูงในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอพลังงานทดแทนในอีกรูปแบบหนึ่งได้แก่ พลังงานลมซึ่งไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อและการขนส่งเชื้อเพลิงเพราะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งจะพบมากตามภูเขา และแถบชายฝั่งทะเลเป็นพลังงานที่บริสุทธิ์สะอาดไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเนื่องจากสามารถนำกำลังสลิปในโรเตอร์ที่ควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมแทนที่จะถูกปล่อยทิ้งไปกับความต้านทาน ก็จะถูกเก็บมาใช้ประโยชน์ โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียสทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้น และข้อดีของการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) คือมีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่พิกัดเท่ากัน ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงต่ำกว่า มีระบบควบคุมที่ง่าย และไม่ต้องการชิงโครไนท์เข้ากับระบบมีการลงทุนต่ำการติดตั้งและเคลื่อนย้ายระบบทำได้ง่ายเหมาะกับการใช้งานในชนบทที่อยู่ห่างไกลความเจริญที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึง เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ในการติดตั้งเสาไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้าระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและคอนเวอเตอร์จะใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ซึ่งมีสมรรถนะที่เหนือกว่าการควบคุมแบบสเกลลาร์ นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพสูงเหมาะที่จะนำไปใช้งาน โดยมีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการลดการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core Loss) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง เมื่อทำงานที่ความเร็วลมต่ำๆ

1.3 หลักการใหม่ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 5 ผู้วิจัยได้นำเสนอระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมทางด้าน โรเตอร์ร่วมกับทางด้านสเตเตอร์โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ และแบบทำงานได้ด้วยตัวเอง แบบใหม่ที่มีสมรรถนะ ในการทำงานสูงซึ่งระบบดังกล่าวยังไม่มีผู้วิจัยคนใดเคยนำเสนอมาก่อนเช่นกัน

1.4 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ ได้แบ่งออกเป็น 6 บทซึ่งในแต่ละบทมีเนื้อหา ดังนี้คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์รวมถึงหลักการใหม่ที่นำมาใช้ แนะนำระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดต่างๆ โดยย่อ และสุดท้ายได้กล่าวถึงรายละเอียดโดยรวมของแต่ละบท

บทที่ 2 ชื่อเรื่อง คอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟแบบไซน์ซอไซด์ อธิบายถึง พื้นฐานของการควบคุมแบบสเกลาร์ (Scalar Control) และการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) และการทำงานของเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟแบบไซน์ซอไซด์ (Sinusoidal Supply Side Converter) รวมถึงระบบควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวทเตอร์สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง (DC-link Voltage) โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสบนแกนอ้างอิง $d - q$ (Synchronously rotating Frame) โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) อธิบายถึงแบบจำลองของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟและการออกแบบตัวควบคุมพีไอซึ่งในบทนี้จะ เป็นพื้นฐานที่จะนำไปใช้ในบทอื่นๆ ต่อไปและสุดท้ายจะเป็นผลการจำลองแบบแสดงสมรรถนะของระบบควบคุม เวกเตอร์

บทที่ 3 ชื่อเรื่อง การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทำงาน โดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส (Grid - Connected Doubly - Fed Induction Generator) อธิบายถึงแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง (Double Fed Induction Electrical Machine Model) บนแกนอ้างอิงที่อยู่กับที่ $d' - q'$ (Stationary Reference Frame) และบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส $d^c - q^c$ (Synchronously rotating Frame) และการแปลงแกนจาก 3 เฟส ไปยัง 2 เฟส ระบบการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางโดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ (Stator Flux Vector Control) ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้างฟลักซ์ และกระแสสร้างแรงบิดเปรียบเสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately - excited DC Generator) อธิบายถึงแบบจำลองของกังหันลม (Wind Turbine Model) คุณลักษณะสมบัติของกำลังงานกลกับความเร็วยรอบของกังหันลม (Mechanical power and Speed Characteristic of wind Turbine) และคุณลักษณะของแรงบิดทางกลกับความเร็วยรอบของกังหันลม (Mechanical torque and speed Characteristic of wind Turbine) ความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed) ที่จะทำให้เกิดกำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) อธิบายถึงวิธีการควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ติดตามความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed Tracking) เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมอย่างทันทีทันใด (Step Change in wind Velocity) เพื่อทำให้เกิดการส่งถ่ายกำลังงานกลสูงสุด จากกังหันลมไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยจะแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการควบคุม

กระแส (Current Control Mode) หรือการควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม (Indirect Speed control) และอีกแบบหนึ่งคือโหมดการควบคุมความเร็ว (Speed Control Mode) หรือการควบคุมความเร็วโดยตรง (Direct Speed Control) และสุดท้ายจะเป็นผลการจำลองแบบแสดงสมรรถนะของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแสดงสมรรถนะในการติดตามความเร็วออปติ่มของระบบควบคุมความเร็วแบบทางตรงและแบบทางอ้อม

บทที่ 4 ชื่อเรื่อง การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง (Stand Alone Double Fed Induction Generator Drive by a wind Turbine) อธิบายถึง ระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทางสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วของสเตเตอร์ให้มีค่าคงที่สำหรับจ่ายให้กับโหลดหลัก (Main load) โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์แบบทางอ้อม (Indirect Stator Flux Vector Control) อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขณะต่อโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานและรีแอคแตนซ์รั่วไหลทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์และสาเหตุที่เกิดจากปฏิกิริยาของอาร์เมเจอร์ (Armature Reaction) เมื่อโหลดเป็นค่าความต้านทานล้วนเป็นค่าความเหนี่ยวนำล้วน (Pure Inductor Load) และเป็นค่าความจุไฟฟ้าอย่างเดียว (Pure Capacitor Load) หลักการควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยการควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วยด้วยเทคนิคการควบคุมแบบชอปเปอร์ (Chopper Control of Auxiliary Load) เพื่อควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออปติ่มขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใด และสุดท้ายจะเป็นผลการจำลองแบบแสดงสมรรถนะ ของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วให้มีค่าคงที่ขณะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดหลักอย่างทันทีทันใด และแสดงสมรรถนะของระบบควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วยในการควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับควบคุมความเร็วให้ติดตามความเร็วออปติ่มเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

บทที่ 5 ชื่อเรื่อง การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกังหันลมแบบที่ทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ อธิบายถึงระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของคอนเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side converter) และคอนเวกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (Stator side converter) การไหลของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟและกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟ (Active and Reactive power Flow) ทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทาง อธิบายถึงการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical loss) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ การสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator iron loss) การสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ (Rotor

iron loss) การสูญเสียในตัวนำที่สเตเตอร์ (Stator winding loss) การสูญเสียในตัวนำที่โรเตอร์ (Rotor winding loss) การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า, การสูญเสียสเตรย์ (Stray loss) การสูญเสียที่คอนเวอร์เตอร์ (Converter loss) และการสูญเสียทางกล (Mechanical loss) อธิบายถึงหลักการควบคุมประสิทธิภาพและแบบจำลองการสูญเสียของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์และการคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทางและท้ายสุดจะเป็นผลการจำลองแบบแสดงสมรรถนะของระบบควบคุมประสิทธิภาพขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างทันทีทันใด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะที่มีการควบคุมประสิทธิภาพและในสถานะที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพ

1.5 การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดต่างๆ

1.5.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

คุณลักษณะสมบัติเด่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง คือ การควบคุมง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ และนอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพดีกว่า แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังค่อนข้างมากในกรณีที่ใช้การเปลี่ยนการนำกระแสไฟฟ้าโดยธรรมชาติจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเอง (line commutated) ปัญหานี้อาจแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนการนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบบังคับ (Force commutated) แต่จะทำให้เกิดการสูญเสียที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังค่อนข้างมากเนื่องจากมีความถี่ในการสวิตชิ่งสูง

1.5.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัสนิยมใช้มากในกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าระดับสูง มีประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังดีกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ แต่ต้นทุนในการจัดซื้อและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่พิกัด กำลังไฟฟ้าเท่ากันการควบคุมโดยใช้อุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ใดๆ ตามต้องการอาจทำได้โดยการเปลี่ยนการนำกระแสโดยอาศัยแรงดัน ไฟฟ้ากระแสสลับด้านหลัง (back c.m.f. commutated) ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายแต่จะมีปัญหาในเรื่องฮาร์โมนิกส์รบกวนในระบบไฟฟ้าสูง การเพิ่มความถี่ในการสวิตชิ่งให้สูงขึ้น โดยการเปลี่ยนการนำกระแสแบบบังคับ (Force

commutated) จะช่วยลดฮาร์โมนิกส์ลงได้ แต่มีระบบควบคุมค่อนข้างยุ่งยาก และมีราคาแพง นอกจากนี้ที่ระดับกำลังไฟฟ้าสูงๆ และที่ความเร็วรอบต่ำการใช้ไซโครลคอนเวทเตอร์จะทำให้ลดฮาร์โมนิกส์ลงได้ นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสยังทำงานเหมือนกับตัวเก็บประจุ (synchronous condenser) ใช้สำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าขณะหมุนขับโหลดเบาๆ

1.5.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

คุณลักษณะสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้มีทั้ง ข้อดี และข้อด้อย ดังนี้ มีโครงสร้างแข็งแรงทนทาน และง่ายไม่ยุ่งยากทำให้ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงต่ำ และมีราคาถูกกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสที่พิกัดกำลังเท่ากัน นิยมใช้ที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่ำจนถึงระดับกำลังไฟฟ้าปานกลางแต่ถึงอย่างไรก็ตามเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำ และมีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำหมายความว่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าจริง (active power) เท่ากันจะใช้กระแสสูงกว่าเพื่อนำไปสร้างสนามแม่เหล็กหรือกำลังไฟฟ้าแฝง (Reactive power) ทำให้การสูญเสียที่ตัวนำ (copper loss) มีค่าสูง นอกจากนี้จะทำให้ขนาดของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีขนาดใหญ่ทำให้มีราคาแพงการต่อตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับมอเตอร์จะทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ของระบบสูงขึ้นแต่ก็ไม่สามารถใช้ได้กับระบบที่มีการปรับเปลี่ยนความถี่เนื่องจากตัวเก็บประจุจะถูก ออกแบบไว้อย่างเหมาะสมกับความถี่ที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้นการใช้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังควบคุมการทำงาน ไม่สามารถเปลี่ยนการนำกระแสได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (back c.m.f. commutated) ซึ่งแตกต่างจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส การเปลี่ยนการนำกระแสโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (line commutated) จำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุเพิ่มเติมแต่ปัญหานี้จะหมดไปเมื่อใช้วิธีการเปลี่ยนการนำกระแสแบบบังคับ (force commutated) แต่ค่าใช้จ่ายย่อมสูงขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกไม่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กภายในขึ้นมาเองได้ จำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุที่เหมาะสมทางด้านสเตเตอร์ในลักษณะขนานกับขดลวดสเตเตอร์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก จึงจะสามารถผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในเครื่องกำเนิดได้ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีแรงบิดและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ เครื่องจักรกลชนิดนี้เมื่อทำงานเป็นมอเตอร์จะมีความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และเมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องมีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสเสมอ

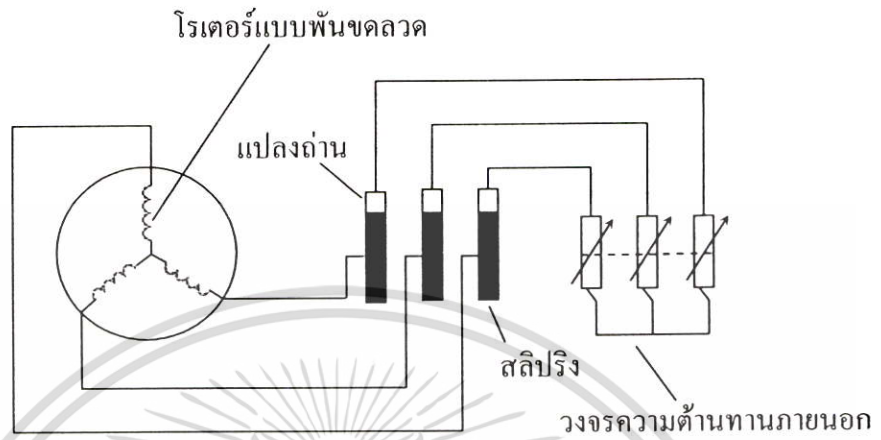
1.5.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์

เนื่องจากขนาดพิกัดกำลัง ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขึ้นอยู่กับระดับกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์และขอบเขตของย่านการปรับความเร็วรอบ เช่น เมื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ให้สูงขึ้นจะทำให้

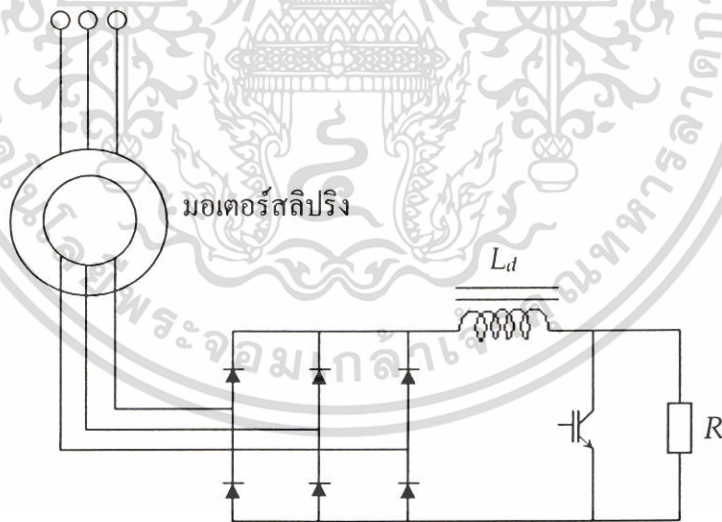
ให้ความถี่ไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ของความเหนี่ยวนำร่วมสูงขึ้นแต่ต้องการกระแสสร้างฟลักซ์เท่าเดิม จึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ซึ่งทำให้พิกัดกำลังของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าแฝง (reactive power) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขณะที่ความเร็วรอบสูง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์สามารถลดขนาดพิกัดกำลังของ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงได้ทำให้ลดต้นทุนในการจัดซื้ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เนื่องจากการควบคุมความเร็วจะควบคุมทางด้านโรเตอร์แทน การควบคุมทางด้านสเตเตอร์ แต่มีข้อเสียคือ ย่านการปรับความเร็วรอบไม่กว้างเหมือนกับการควบคุมทางด้านสเตเตอร์ เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ต้องการการดูแลบำรุงรักษามากกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก (squirrel cage induction machine) การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้มีความสามารถทำได้เท่าเทียมกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส เช่น การทำงานที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า (leading power factor) การเปลี่ยนการนำกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (back e.m.f. commutated) เนื่องจากมีลักษณะทางด้านกายภาพคล้ายกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส แบบทรงกระบอก คุณลักษณะเด่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้คือ สามารถควบคุมให้ทำงานได้ที่ความเร็วต่ำกว่า และสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสได้

1.5.5 การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ที่ง่ายที่สุด คือ การปรับค่าความต้านทานทางด้านวงจรวจรโรเตอร์ โดยการนำค่าความต้านทานจากภายนอกที่ปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับขดลวดของโรเตอร์แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียที่ค่าความต้านทานภายนอกทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำ และปรับความเร็วได้เป็นขั้นๆนอกจากนี้การปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานโดยการเลื่อนแถบตัวนำ เพื่อลดหรือเพิ่มค่าความต้านทานการใช้วิธีทางกลในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดข้อเสีย คือ การกระโดดของกระแสไฟฟ้าระหว่างตัวต้านทานกับหน้าสัมผัสที่ใช้เปลี่ยนค่าความต้านทานนั้น ก่อให้เกิดเขม่าจับที่หน้าสัมผัสและทำให้หน้าสัมผัสสกปรก จึงมีผู้คิดค้นการเปลี่ยนความต้านทานของวงจรวจรโรเตอร์ โดยไม่ต้องใช้หน้าสัมผัสแต่ใช้คุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาเป็นตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 1.2 จากรูป วงจรวจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรวจรโรเตอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดย L_d มีหน้าที่กรองกระแสให้เรียบส่วนทรานซิสเตอร์มีหน้าที่เป็น สวิตช์เพื่อเปลี่ยนทางเดินของกระแสที่ไหล



รูปที่ 1.1 การต่อความต้านทานเข้ากับวงจร โรเตอร์



วงจรรไดโอดบริดจ์เรกติไฟเออร์ ดีซีชอปเปอร์

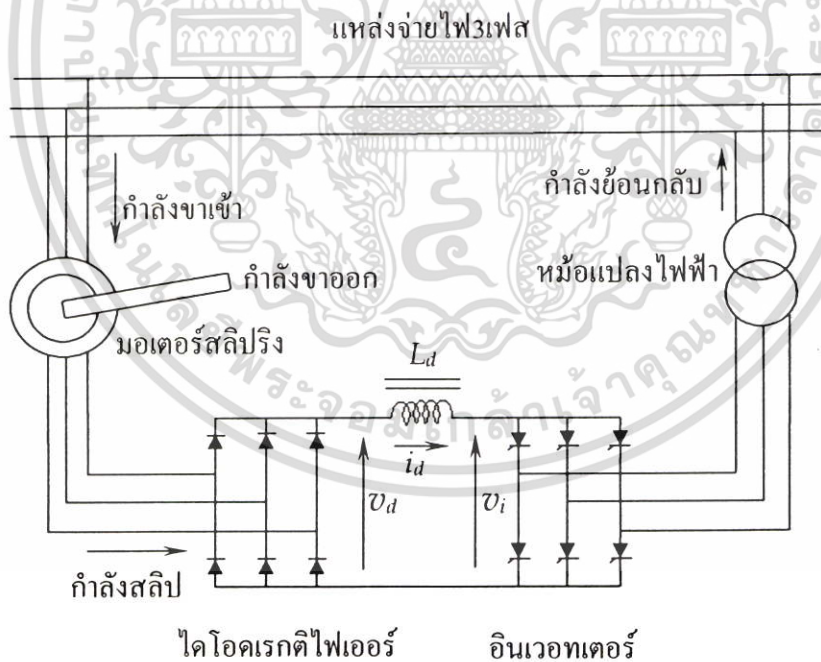
รูปที่ 1.2 การใช้ดีซีชอปเปอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านความต้านทาน R การทำงานของทรานซิสเตอร์ในลักษณะนี้ถือเป็นดีซีชอปเปอร์ (dc chopper) เนื่องจากระบบนี้ ยังมีการสูญเสียพลังงานไปที่ตัวความต้านทานไปโดยเปล่าประโยชน์ จึงมีผู้คิดค้นเอาพลังงานเหล่านี้กลับไปใช้ใหม่โดยใช้หลักการของอินเวอร์เตอร์ และไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่เรียกว่าระบบขับเคลื่อนเครเมอร์ แบบสถิต (static kramer drive) และระบบขับเคลื่อนเซอร์เบียสแบบสถิต (static sherbius drive)

1.5.5.1 การขับเคลื่อนแบบเครเมอร์สถิต

ลักษณะวงจรของระบบขับเคลื่อนเครเมอร์แบบสถิต [6] หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบขับเคลื่อนแบบคาสเคด (cascade drive) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ระบบนี้ได้พัฒนาและปรับปรุงขึ้นเพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น เนื่องจากสามารถดึงพลังงานที่ใช้ปรับความเร็วรอบ และส่งพลังงานกลับไปใช้ประโยชน์ได้ใหม่ (slip power recovery) แทนที่จะถูกปล่อยทิ้งไปกับตัวความต้านทานไปโดยเปล่าประโยชน์ ในทางอุดมคติจึงไม่มีพลังงานสูญเสียไป เพราะส่วนประกอบของวงจรที่เป็นความต้านทาน



รูปที่ 1.3 ระบบขับเคลื่อนเครเมอร์แบบสถิต

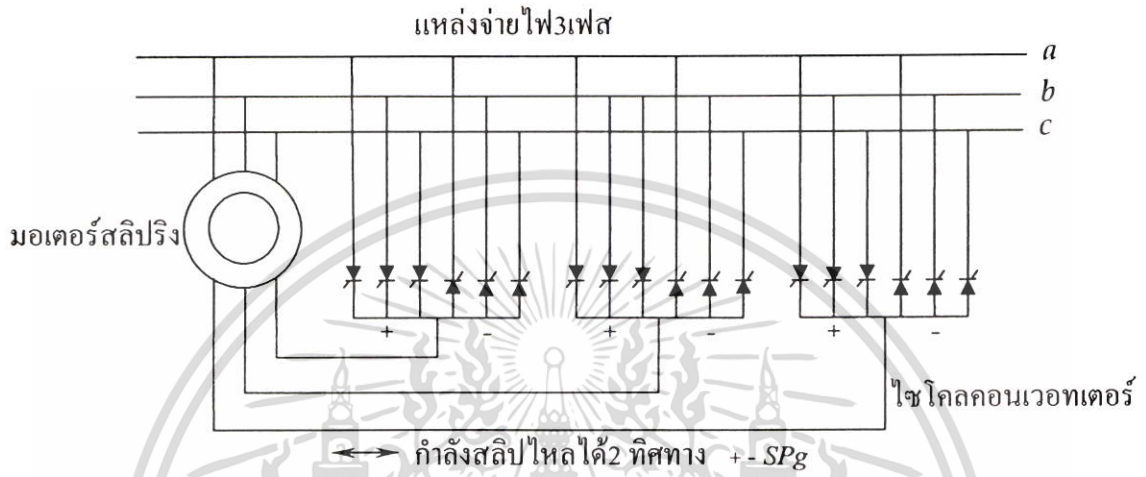
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ปรากฏอยู่ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภาคแรกเป็นวงจรไดโอดเรกติไฟเออร์ ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจะไหลจากโรเตอร์เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟได้ ทิศทางเดียวกันนั้นทำให้มอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือเรียกว่า โหมดซบซิงโครนัส (subsynchronous Mode) ส่วนภาคอินเวอร์เตอร์จะอาศัยการปรับแรงดัน โดยหลักการควบคุมเฟส (phase control) ที่ความเร็วรอบต่ำๆ จะทำให้เกิดมีฮาร์โมนิกส์ปะปนเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟมากปัญหานี้แก้ไขได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีลิวเอ็ม แต่ประสิทธิภาพของระบบจะต่ำลงบ้าง เนื่องจากการสูญเสียที่อินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้กระแสทางด้านโรเตอร์ที่นำพลังงานกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายเมื่อรวมกับกระแส ที่ไหลเข้ามอเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ ทำให้แหล่งจ่ายไฟต้องจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบต่ำลง ขนาดพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขึ้นอยู่กับช่วงความเร็วรอบ ที่ต้องการปรับในช่วงความเร็วรอบไม่มากนัก ขนาดพิกัด ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังก็เล็กคราก็ไม่สูงมาก แต่ถ้าช่วงของความเร็วรอบกว้างมาก ขนาดพิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีขนาดใหญ่และมีราคาแพง

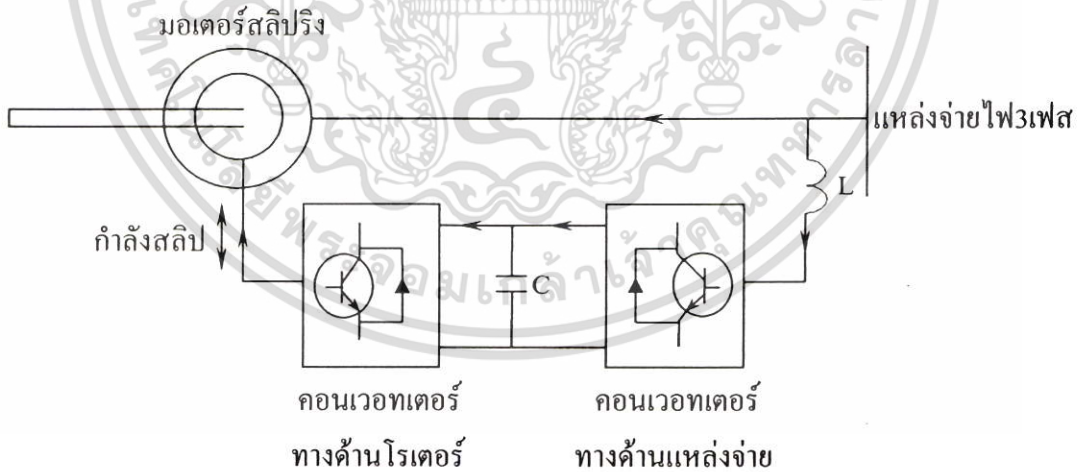
1.5.5.2 การขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียสสติด

การขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียสสติด มีความแตกต่างจากการขับเคลื่อนแบบเครเมอร์สติดคือ สามารถควบคุมกำลังสลลิป (slip power) ให้ไหลเข้าวงจรทางด้านโรเตอร์ได้เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จะเป็นไทรสเตอร์ทั้งหมดซึ่งการขับเคลื่อนแบบ เครเมอร์สติดไม่สามารถทำได้และด้วยเหตุนี้ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์ทำงานได้ ที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสหรือทำงานในโหมดซูเปอร์ซิงโครนัส (supersynchronous Mode) ในทำนองเดียวกัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส หรือทำงานในโหมดซบซิงโครนัส (subsynchronous Mode) ได้ การสร้างวงจรภาคกำลังของการขับเคลื่อนเซอร์เบียสสติดโดยทั่วไปที่นิยมมี 2 แบบ [6] คือ จากรูปที่ 1.4 เป็นวงจรภาคกำลังของระบบขับเคลื่อนเซอร์เบียสสติดแบบที่ 1 โดยที่วงจรมีลักษณะเป็นวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (cycloconverter) จะเห็นได้ว่าไม่มีวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงปะปนอยู่เลยทำให้การแปรรูปพลังงานจะลดขั้นตอนลงและเกิดขึ้นภายในขั้นตอนเดียว (single stage converter) หมายความว่า เราสามารถเปลี่ยนความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับบนโรเตอร์ไปเป็นความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟได้โดยตรง โดยไม่ต้องเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อน แล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งหนึ่ง จากรูปที่ 1.5 เป็นวงจรภาคกำลังของระบบขับเคลื่อนเซอร์เบียสสติดแบบหนึ่งมีลักษณะเป็นคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัวต่อแบบ back to back ซึ่งเป็นวงจรกำลังที่ใช้ในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้การเปลี่ยนการนำกระแสของไทรสเตอร์แบบบังคับ

(force commutated) ด้วยวิธีการปรับความกว้างของพัลส์หรือแบบ พัลส์บวลิเอ็ม (pulse width modulation) ซึ่งจะช่วยลดขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่จะเข้าไปปะปนกับระบบไฟฟ้า



รูปที่ 1.4 วงจรภาคกำลังของระบบขับเคลื่อนเซอร์เบสแบบสถิต



รูปที่ 1.5 วงจรภาคกำลังของเซอร์เบสคอนเวอเตอร์ต่อแบบ back to back

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการใช้ระบบขับเคลื่อนเซอร์เบียสสถิตในการควบคุมกำลังสลิปถึงแม้ว่าจะมีความสามารถและมีข้อดีมากกว่าระบบขับเคลื่อนครีเมอร์แต่ราคาและความยุ่งยากของชุดควบคุมก็มีมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

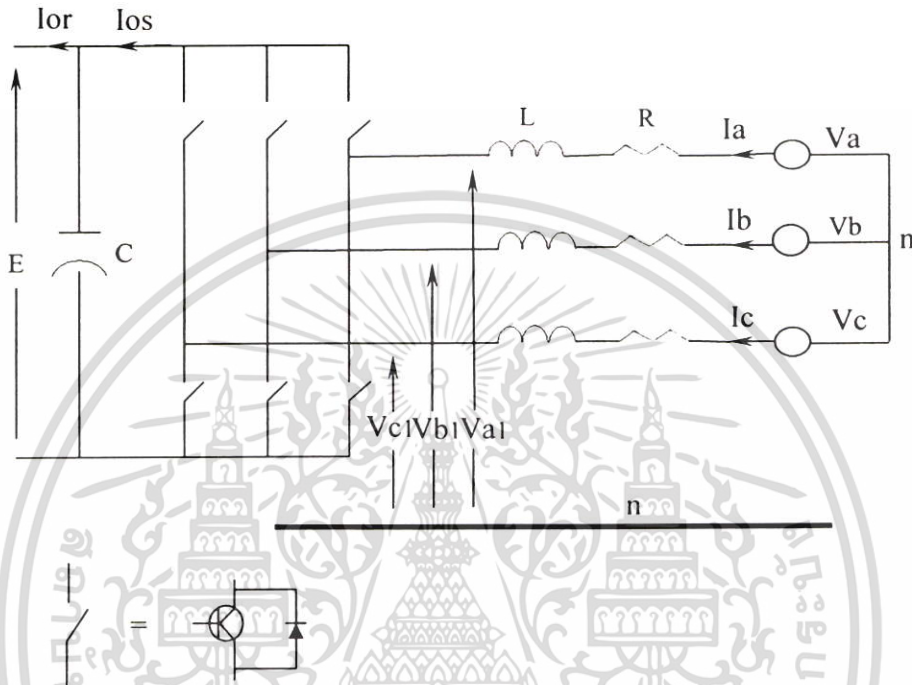
บทที่ 2

คอนเวทเตอร์ด้านแหล่งจ่ายแบบไขว้ขอยดัด

2.1 บทนำ

ข้อได้เปรียบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทาง (Doubly — Fed Induction Machine) เมื่อทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากทางด้านสเตเตอร์ และทางด้านโรเตอร์ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในโหมดซูปเปอร์ซิงโครนัส (supersynchronous mode) หมายความว่าความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีเครื่องต้นกำลังเป็นกังหันลม (wind turbine) เราไม่สามารถควบคุมความเร็วของกังหันลมให้คงที่ได้เนื่องจากความเร็วลม (wind velocity) มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้ความถี่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วสลลิป (slip speed) ดังนั้นทางด้านโรเตอร์ต้องใช้คอนเวทเตอร์เพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ไฟฟ้า กระแสสลับให้เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วงจรไซโครคอนเวทเตอร์ (cycloconverter) คอนเวทเตอร์แบบมีวงจรถ่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. link converter) การใช้วงจรไซโครคอนเวทเตอร์มีข้อเสียเปรียบคือทำให้กระแสมีฮาร์มอนิกส์มาก และมีค่าตัวประกอบกำลังไม่ดี เพื่อแก้ไขข้อเสียดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงใช้คอนเวทเตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (voltage fed converter) ที่มีการเปลี่ยนการนำกระแสของทรานซิสเตอร์แบบบังคับ (force commuted) โดยอาศัยเทคนิคการปรับความกว้างของพัลส์ (pulse width modulation) หรือเรียกว่าเทคนิค พัลส์บลิวเอ็ม โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียส ที่มีวงจรถ่อมโยงเป็นคอนเวทเตอร์ 2 ตัวต่อแบบ back to back ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คอนเวทเตอร์ตัวแรกจะต่อกับสลลิปริงของตัวโรเตอร์ เรียกว่า คอนเวทเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor side converter) คอนเวทเตอร์อีกตัวหนึ่งจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เรียกว่า คอนเวทเตอร์ด้านแหล่งจ่าย (supply side converter) หรืออีกชื่อหนึ่งคือคอนเวทเตอร์ ด้านหน้าแบบไซน์ (Sinusoidal Front — end side converter) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะคอนเวทเตอร์ด้านแหล่งจ่ายซึ่งจะเป็นพื้นฐานของบทต่อไป เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงการควบคุมคอนเวทเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งโดยทั่วไปการควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ๆ คือ การควบคุมแบบสเกลาร์ (scalar control) และการควบคุมแบบเวกเตอร์ (vector control) โดยในรายละเอียดจะกล่าวถึงความแตกต่างของการควบคุมแบบสเกลาร์และการ

ควบคุมแบบเวกเตอร์และชี้แจงเหตุผลที่เลือก ใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์รวมถึงการออกแบบและผลการจำลองแบบแสดงสมรรถนะของระบบการควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.1 วงจรเทียบเท่าของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ

2.2 การควบคุมคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย

สิ่งที่จำเป็นที่สุดสำหรับการควบคุมคอนเวอเตอร์ ก็คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เชื่อมโยง (DC — link) E ให้มีค่าคงที่โดยไม่คำนึงถึงขนาดและทิศทางการไหลของกำลังสลิป (slip power flow) ทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์ปกติโดยทั่วไปจะใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอ (PI controller) โดยอินพุทของตัวควบคุมพีไอจะได้รับการมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า ดีซีลิงค์อ้างอิง (D.C. — link reference) กับแรงดันไฟฟ้าดีซีลิงค์จริง ที่ได้จากการวัดเมื่อมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นตัวควบคุมพีไอ จะสั่งให้ระบบควบคุมกระแสทำการเพิ่มหรือลดกระแสที่ไหลเข้าแหล่งจ่ายไฟทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าความคลาดเคลื่อนที่ได้รับเป็นบวกหรือลบ โดยผ่าน

ทางสวิตช์ซึ่งระบบการควบคุมกระแสจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการควบคุมแบบ สเตลาร์และการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังนี้

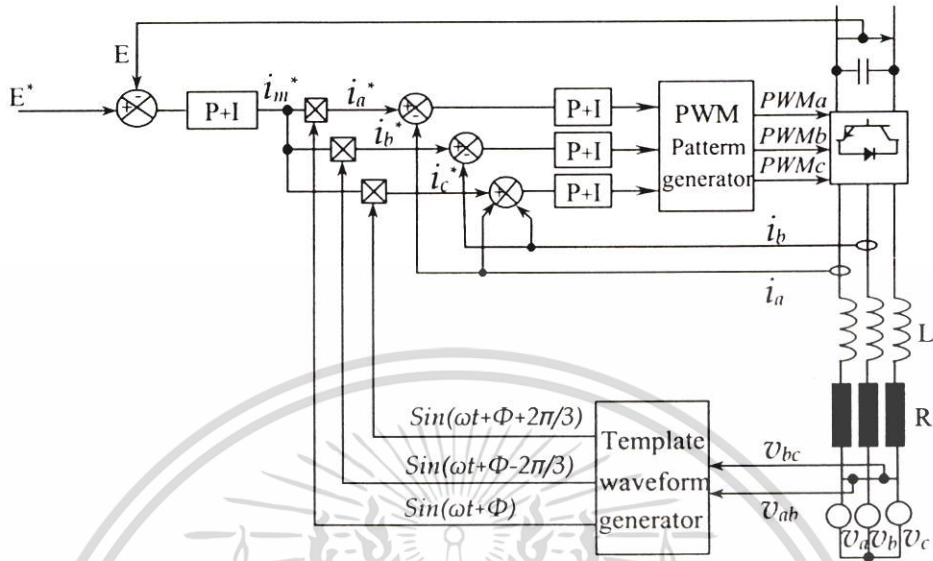
2.2.1 การควบคุมแบบสเตลาร์

เมื่อเกิดค่าคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้ชี่ลิ่ง ตัวควบคุมพีไอจะส่งสัญญาณเข้าพุทเพื่อปรับขนาดของกระแสอ้างอิง โดยที่ขนาดของกระแสอ้างอิงนี้เป็นขนาดของกระแสทั้ง 3 เฟส ของคอนเวทเตอร์ ลักษณะรูปคลื่นของสัญญาณกระแสอ้างอิงได้รับโดยผลคูณของสัญญาณเข้าพุทของตัวควบคุมพีไอกับรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการ ดังนั้นกระแสนี้จึงเป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าจริง (active power) และกำลังไฟฟ้าแฝง (Reactive power) ที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากคอนเวทเตอร์การควบคุมกำลังไฟฟ้าแฝงทำได้โดยการปรับมุมต่างเฟสของ กระแสอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายและแน่นอนว่าขนาดของกระแสย่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วยเนื่องจากความต้องการกำลัง ไฟฟ้าจริงสำหรับใช้รักษาแรงดันไฟฟ้ชี่ลิ่งมีค่าคงที่ ดังแสดงได้ด้วยสมการ

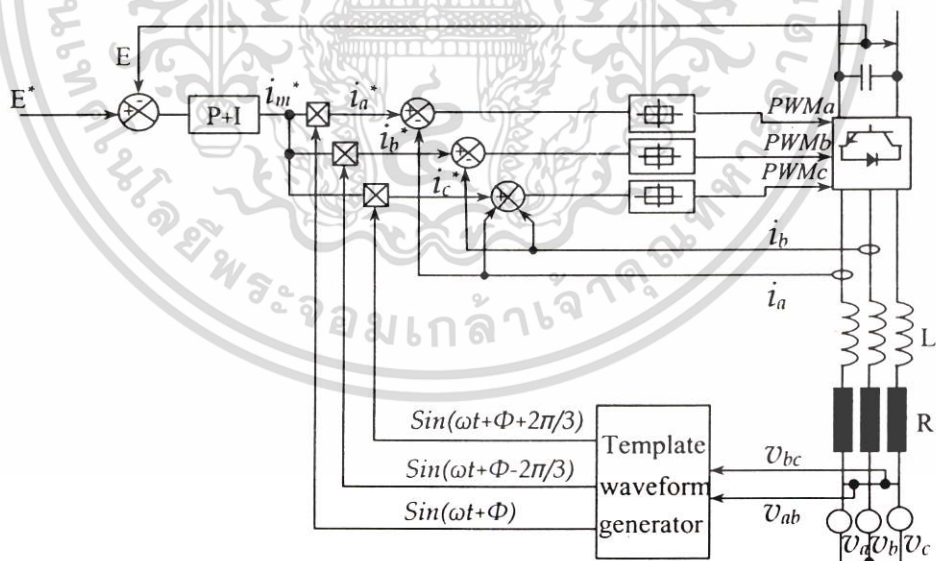
$$P = \sqrt{3} i v \cos \Phi \quad (2.2.1)$$

$$Q = \sqrt{3} i v \sin \Phi \quad (2.2.2)$$

เมื่อต้องการให้คอนเวทเตอร์ ด้านแหล่งจ่ายทำงานที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับหนึ่ง (unity power factor) กระแสอ้างอิงจะต้องอินเฟส กับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย การควบคุมกระแสของคอนเวทเตอร์ ให้มีขนาดและรูปร่างติดตามกระแสอ้างอิงอาจทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ตัวควบคุมพีไอ การใช้ตัวควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิส [10] การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอมีข้อเสียคือค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส (current error) ในสภาวะคงตัว (steady state) ไม่ เป็นที่พึงปรารถนาโดยเหตุที่สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมกระแสแบบพีไอเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ส่วนการควบคุมกระแสแบบฮีสเตอร์รีซิส (Hysteresis current controller) มีสมรรถนะในการติดตามกระแสได้ดีแต่มีข้อเสียคือความถี่ในการสวิตช์ไม่สม่ำเสมอ แผนผังการควบคุมด้วยวิธีนี้ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การควบคุมแบบสเกลาร์ด้วยตัวควบคุมแบบ PI

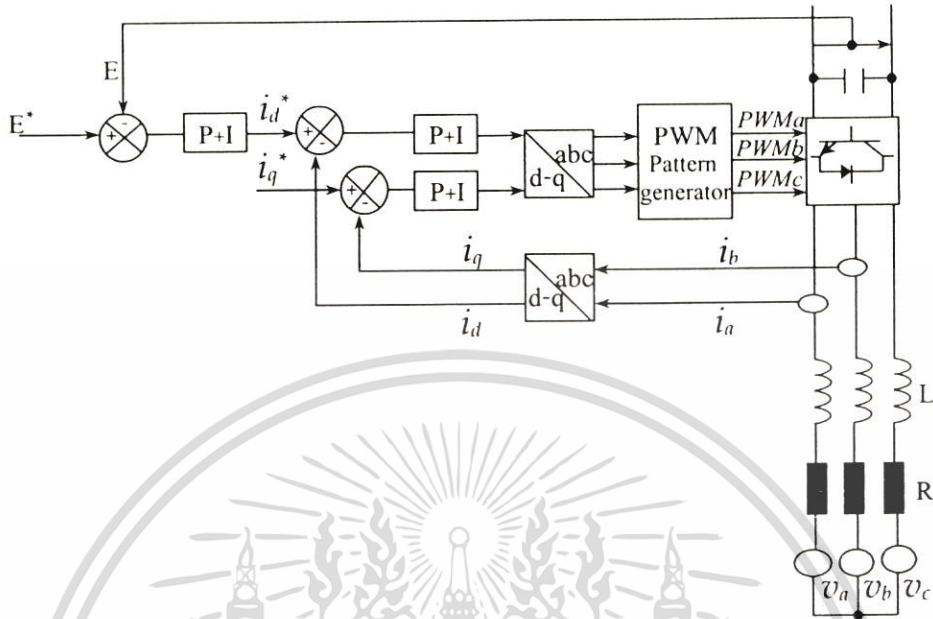


รูปที่ 2.3 การควบคุมแบบสเกลาร์ด้วยตัวควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส

การควบคุมแบบสเกลาร์ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะใช้แบบจำลองของคอนเวทเตอร์ในสถานะคงตัว ทำให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองต่อสถานะชั่วคราว (Transient respond) ไม่ดี เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกจากนี้ การออกแบบระบบควบคุมยังมีความยุ่งยาก

2.2.2 การควบคุมแบบเวกเตอร์

แบบจำลองของระบบควบคุมจะ แปลงปริมาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากระบบ 3 เฟส เข้าสู่ระบบ 2 เฟส ในพิกัดแกนใหม่คือ แกน $d - q$ ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกันและหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟ (synchronously rotating frame) ปริมาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อแปลงแล้วจะเป็น ปริมาณไฟตรงทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และการควบคุมเพราะไม่ต้องคำนึงถึงมุมค่าเฟส ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากปริมาณที่ยังไม่ได้แปลงจะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ในแง่ของการควบคุมสามารถทำการควบคุมแบบแยกอิสระ (Decoupling control) ของกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าแฝง กล่าวคือ องค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าจริงจะเป็นปริมาณกระแสในแกน d และองค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าแฝงจะเป็นปริมาณกระแสในแกน q เท่านั้น ดังนั้น การควบคุมแรงดันไฟดีซีลิงค์ทำได้โดยการควบคุมเวกเตอร์กระแสในแกน d และการควบคุมกำลังไฟฟ้าแฝง ทำได้โดยการควบคุมเวกเตอร์กระแสในแกน q มิฉะนั้น ข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบเวกเตอร์คือ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าแฝงได้โดยตรงในระหว่างสถานะชั่วคราว และสถานะคงตัว การควบคุมกระแสด้วยตัว ควบคุมแบบ พีไอ ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส (current error) เข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากสัญญาณอินพุทของตัวควบคุมพีไอเป็นปริมาณไฟตรงด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ การควบคุมแบบเวกเตอร์สำหรับควบคุมคอนเวทเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าแผนผังการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การควบคุมแบบเวกเตอร์

2.3 แบบจำลองของคอนเวกเตอร์ด้านแหล่งจ่ายบนแกน $d - q$

จากรูปที่ 2.1 สมมติว่าการคอมมิวเตทเป็นแบบอุดมคติ และละทิ้งผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ของกระแสไฟฟ้า จะได้สมการและแบบจำลองของคอนเวกเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟดังสมการที่ (2.3.1) เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าต่อเฟสบนแกนนิ่ง $a - b - c$ ของคอนเวกเตอร์ คือ V_{a1} , V_{b1} และ V_{c1}

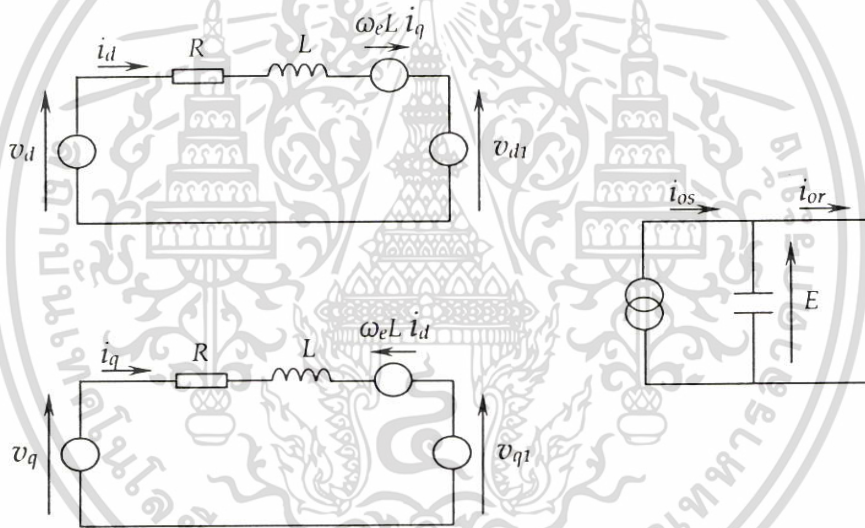
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} \tag{2.3.1}$$

ใช้การแปลงแกนด้วยเมตริก จากสมการที่ (2.3.1) สามารถแปลงแกนในแกนหมุน $d - q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟ (synchronously rotating frame) ทำให้สามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$v_d = R i_d + L \frac{d i_d}{dt} - \omega_e L i_q + v_{d1} \tag{2.3.2}$$

$$v_q = R i_q + L \frac{d i_q}{dt} + \omega_e L i_d + v_{q1} \tag{2.3.3}$$

จากสมการที่ (2.3.2),(2.3.3) สามารถเขียนวงจรสมมูลเทียบเท่า (equivalent circuit) ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรเทียบเท่าของคอนเวอเตอร์บนแกน $d^c - q^c$

เมื่อใช้ค่าคงที่ของเมตริกแปลงแกน ค่ากระแสไฟตรง i_{os} หาได้จาก

$$i_{os} = \frac{2}{3} \frac{i_d v_{d1} + i_q v_{q1}}{E} \tag{2.3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าแฝง (power flow equation) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับคอนเวอเตอร์กำหนดให้โดย

$$P = 3/2 (v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.3.5)$$

$$Q = 3/2 (v_d i_q - v_q i_d) \quad (2.3.6)$$

ถ้ากำหนดให้แกนหมุนซึ่งแกนนอน (แกน d) ชี้ในแนวเดียวกันกับซัพพลายโวลเตจเวกเตอร์ และกำหนดให้ $v_q = 0$ ขนาดแรงดันของแหล่งจ่าย บนแกน d จะมีค่าคงที่เนื่องจาก v_d มีค่าคงที่ จากสมการที่ (2.3.5),(2.3.6) P และ Q จะเป็นสัดส่วนกับเวกเตอร์กระแส i_d และเวกเตอร์กระแส i_q ตามลำดับ

$$P = 3/2 (v_d i_d) \quad (2.3.7)$$

$$Q = -3/2 (v_d i_q) \quad (2.3.8)$$

จากสมการที่ (2.3.7) จะได้ว่ากระแส i_d ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าแฉกที่พีสามารถใช้ในการรักษาแรงดันไฟดีซีลิงค์ E_{dc} ให้มีค่าคงที่เนื่องจากมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกำลังไฟฟ้าแฉกที่พี P และกระแส i_q ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกำลังรีแฉกที่พี Q สามารถใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟารีแฉกที่พี ให้มีค่าคงที่เราสามารถหาตำแหน่งเชิงมุมและขนาดของซัพพลายโวลเตจเวกเตอร์บนแกนนิ่ง α - β เพื่อใช้การแปลงแกนในระบบควบคุม เวกเตอร์ได้ดังนี้

$$|v_s| = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} = \sqrt{v_q^2 + v_d^2} \quad (2.3.9)$$

$$\cos \theta_e = \frac{v_\beta}{|v_s|} \quad (2.3.10)$$

$$\sin \theta_e = \frac{v_\alpha}{|v_s|} \quad (2.3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดัน v_α และ v_β เป็นส่วนประกอบของแรงดันของแหล่งจ่ายไฟโดยอ้างอิงบนแกนนิ่ง α - β (Stationary Reference Frame) ถ้าไม่คิดการสูญเสียที่ความต้านทานภายในของอินดักเตอร์และของฟิลเตอร์ และการสูญเสียในการสวิตชิงจะได้อ่า

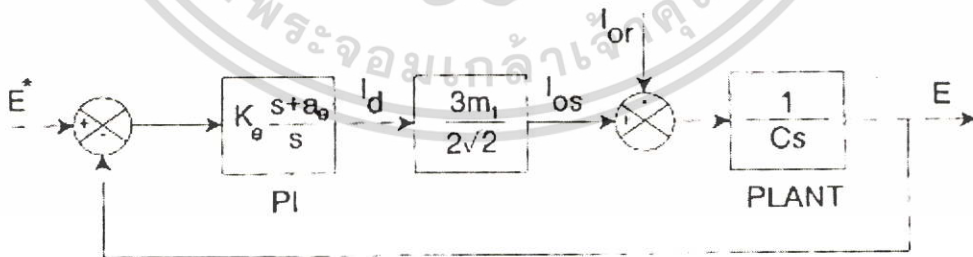
$$E i_{os} = 3/2 (v_d i_d) \tag{2.3.12}$$

$$m_1 = \frac{2\sqrt{2} v_d}{E} \tag{2.3.13}$$

$$i_{os} = \frac{3}{2\sqrt{2}} m_1 i_d \tag{2.3.14}$$

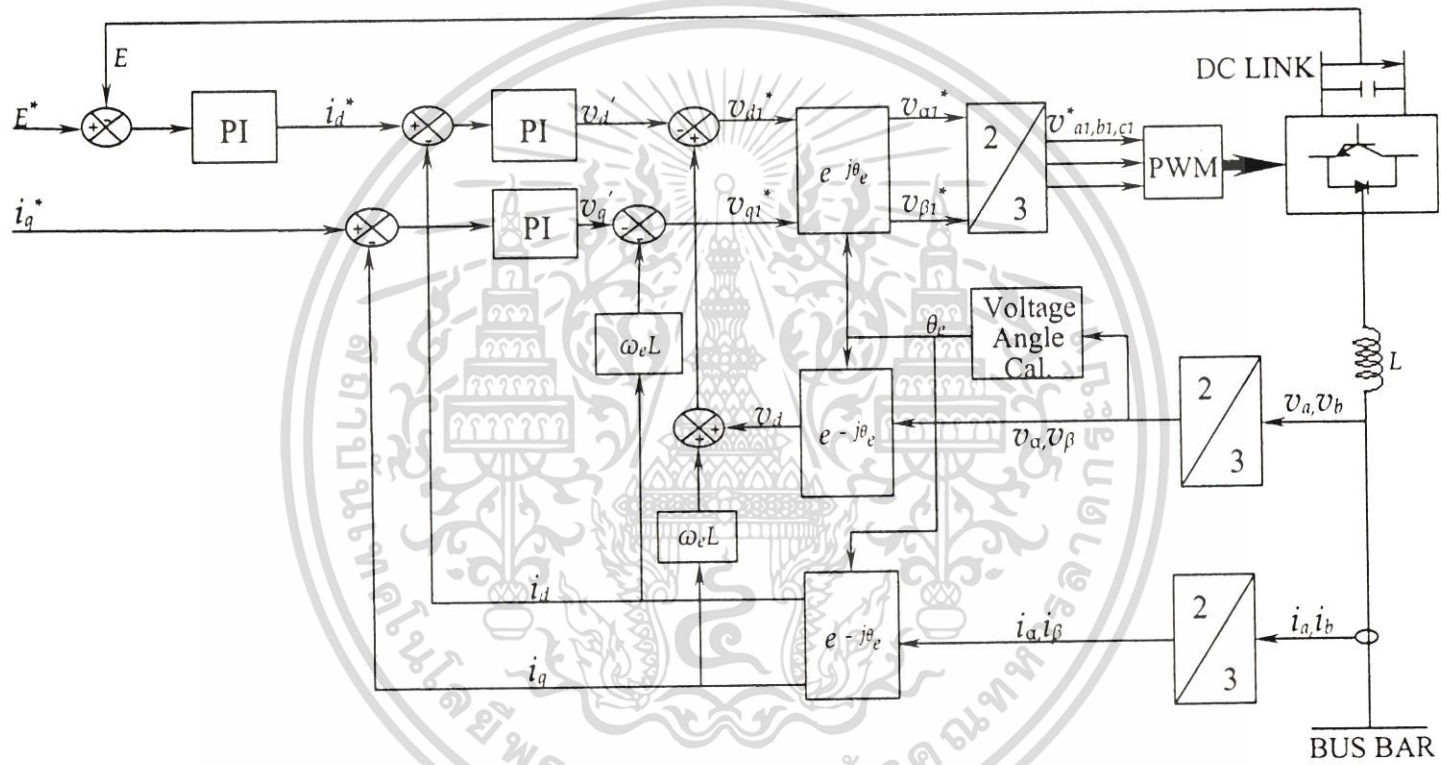
$$\frac{C d E}{dt} = i_{os} - i_{or} \tag{2.3.15}$$

เมื่อ m_1 คือ ดัชนีการมอดูเลชันของคอนเวอเตอร์ จากสมการที่ (2.3.15) การควบคุมแรงดันไฟดีซีลิงค์ให้คงที่ทำได้โดยการควบคุมกระแส i_d แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ในการที่จะทำให้อำนาจไฟฟ้าแอ็คทีฟที่ไหลเข้าและไหลออกจากคอนเวอเตอร์ มีความสมดุลกับปล็อคไดอะแกรมของระบบควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวอเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ลูฟการควบคุมแรงดันไฟดีซีลิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ

2.4 การออกแบบระบบควบคุมของคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย

ถ้ากำหนดให้แกนหมุนบนแกนอ้างอิง $d - q$ โดยที่แกน d ชี้ในแนวเดียวกันกับแกนของขั้วพลาวยโวลเตจเวกเตอร์ และกำหนดให้ $v_q = 0$ จากสมการที่ (2.3.2),(2.3.3) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$v_d = R i_d + L \frac{d i_d}{dt} - \omega_e L i_q + v_{d1} \quad (2.4.1)$$

$$0 = R i_q + L \frac{d i_q}{dt} + \omega_e L i_d + v_{q1} \quad (2.4.2)$$

เพื่อให้ง่ายขึ้นจากสมการที่ (2.4.1),(2.4.2) จะรวมเทอมของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตัวอินดักเตอร์ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่ปราศจากสมการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} v_{d1} &= -v_d' + (\omega_e L i_q + v_d) \\ v_{q1} &= -v_q' - \omega_e L i_d \end{aligned}$$

เมื่อ

$$v_d' = R i_d + L \frac{d i_d}{dt}$$

$$v_q' = R i_q + L \frac{d i_q}{dt}$$

หรือ

$$F(s) = \frac{i_d(s)}{v_d'(s)} = \frac{i_q(s)}{v_q'(s)} = \frac{1}{Ls + R}$$

รูปของการควบคุมกระแสโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีโอถูกกำหนด โดยค่าความต้องการของแรงดันคำสั่ง (command Voltage) v_d' และ v_q' ดังนั้นค่าความต้องการของแรงดันของคอนเวอเตอร์ คือ v_{d1}^* และ v_{q1}^* สามารถหาได้ดังนี้

$$v_{d1}^* = -v_d' + (\omega_e L i_q + v_d) \quad (2.4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

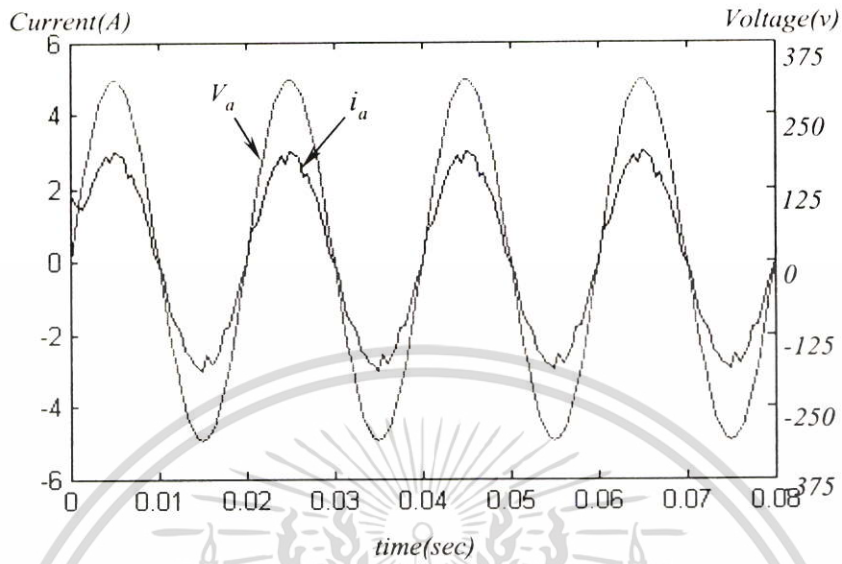
$$v_{q1}^* = -v_q' - \omega_c L i_d \quad (2.4.4)$$

2.5 ผลการจำลองแบบของคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย

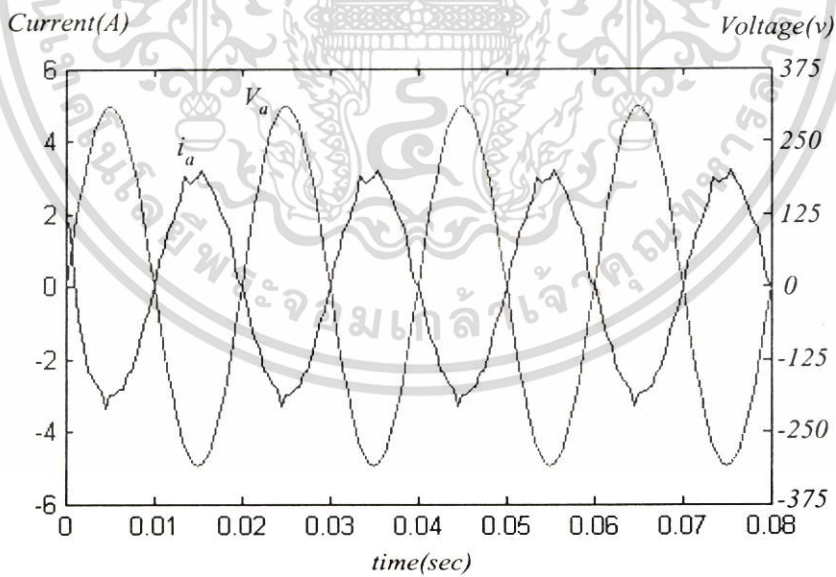
การทดสอบสมรรถนะ การทำงานของคอนเวอเตอร์โดยการจำลองแบบภายใต้สภาวะคงตัว และสภาวะชั่วครู่ ซึ่งประกอบด้วยการทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ (Rectifying Mode) การทำงานใน โหมดอินเวอเตอร์ (Inverting Mode) การทำงานที่ตัวประกอบกำลังล่าช้า (lagging power factor) และที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า (leading power factor) ส่วนในสภาวะชั่วครู่ผลตอบสนองของ แรงดันไฟดีซีลิงค์ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแส i_q อย่างทันทีทันใด (step change) โดยการตั้งค่า ของแรงดันดีซีลิงค์ อ้างอิงไว้ที่ 550 V โดยที่คอนเวอเตอร์ถูกต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาดพิกัดแรงดัน 380V

2.5.1 ผลการจำลองแบบในโหมดเรกติไฟเออร์และโหมดอินเวอเตอร์

เป็นการทดสอบสมรรถนะ การทำงาน ของคอนเวอเตอร์ ในสภาวะคงตัวโดยการตั้ง ค่ากระแสที่เป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟให้เท่ากับศูนย์ $i_q^* = 0$ ดังนั้นจึงไม่มีกำลังไฟฟารี แอ็คทีฟ Q ไหลผ่านคอนเวอเตอร์ จากรูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของคอนเวอเตอร์ในโหมดเรกติไฟ เออร์ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสของคอนเวอเตอร์ i_d และแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ v_d บนแกนอ้างอิง $a - b - c$ จะอินเฟสกันทั้งนี้เนื่องจากกระแส i_d และ i_{or} มีค่าเป็นบวกทำให้กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟไหลจาก แหล่งจ่ายไฟเข้าสู่คอนเวอเตอร์ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดขับ ชิงโครนัส จากรูปที่ 2.9 แสดงการทำของคอนเวอเตอร์ในโหมดอินเวอเตอร์เนื่องจากกระแส i_d และ i_{or} มีค่าเป็นลบทำให้กระแส i_a ต่างเฟสกับแรงดันของแหล่งจ่าย v_a เท่ากับ 180 องศาไฟฟ้า (out of phase) กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ P จะไหลจากคอนเวอเตอร์เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงาน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดชูปเปอร์ชิงโครนัส



รูปที่ 2.8 การทำงานของคอนเวกเตอร์ในโหมดรีคตีไฟเออร์

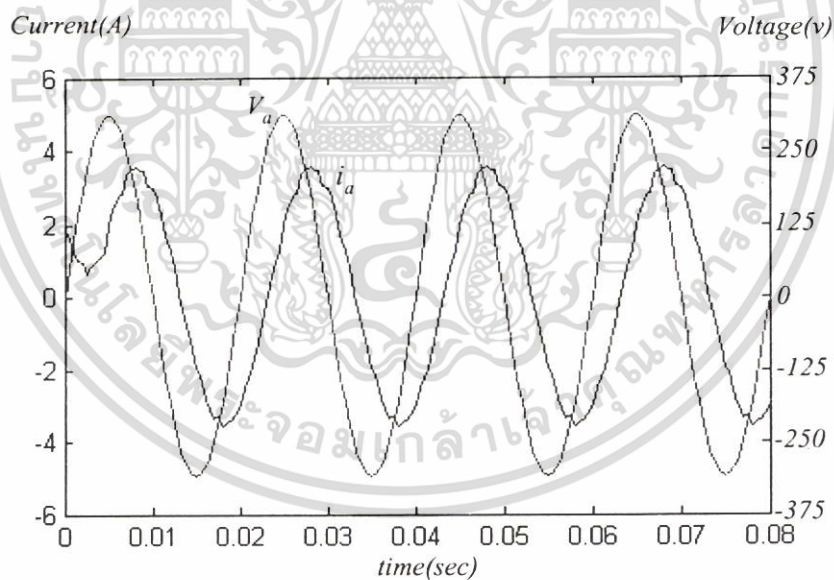


รูปที่ 2.9 การทำงานของคอนเวกเตอร์ในโหมดอินเวกเตอร์

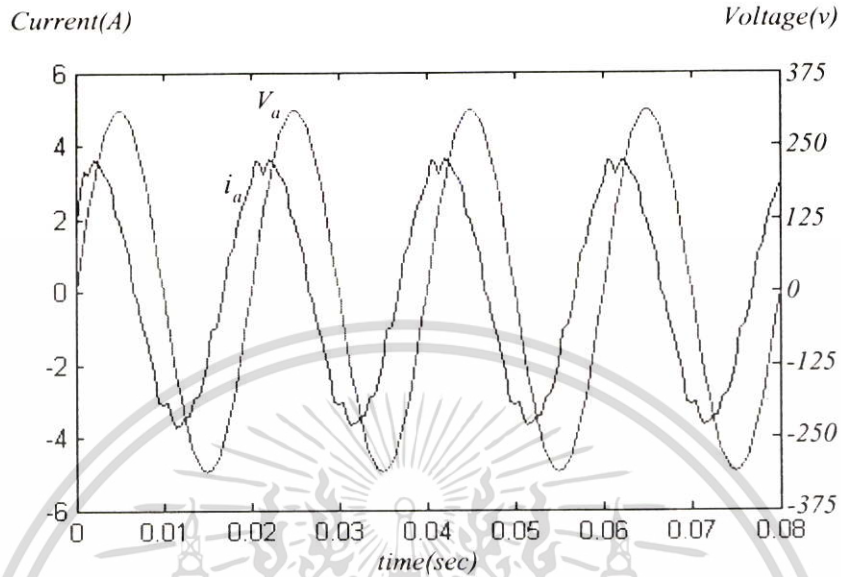
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ผลการจำลองแบบของคอนเวทเตอร์ทำงานที่ตัวประกอบกำลังล้าหลังและที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า

คอนเวทเตอร์มีความสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยการควบคุมเวกเตอร์กระแส i_q ในกรณีที่กระแส i_q เป็นบวก กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะไหลจากดีซีบัส (D.C. bus) เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟ และเมื่อกระแส i_q เป็นลบกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่ดีซีบัส จากรูปที่ 2.10 แสดงกระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟเฟส a และแรงดันไฟฟ้าเฟส a ซึ่งสอดคล้องกับกระแสคำสั่ง $i_q^* = -3A$ และ $i_d^* = 2 A$ จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้า i_a มีเฟสล้าหลังแรงดัน v_a อยู่เป็นมุม 56 องศา ไฟฟ้าแสดงว่าคอนเวทเตอร์รับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ Q จากแหล่งจ่ายไฟ ในทางกลับกันเมื่อเราตั้งค่ากระแสคำสั่ง $i_q^* = + 3 A$ และ $i_d^* = 2 A$ กระแสไฟฟ้า i_a จะมีเฟสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าอยู่เป็นมุม 56 องศา ไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าคอนเวทเตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ Q ให้กับแหล่งจ่ายไฟ



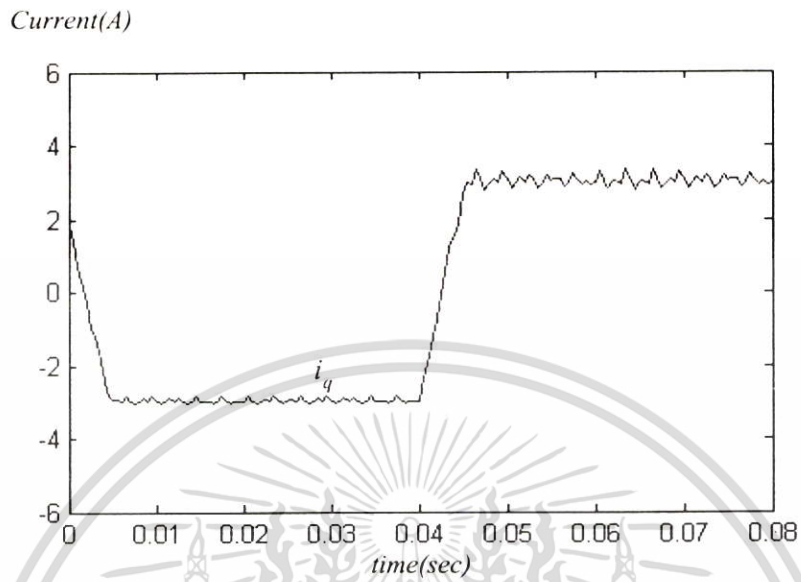
รูปที่ 2.10 การทำงานของคอนเวทเตอร์ที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า



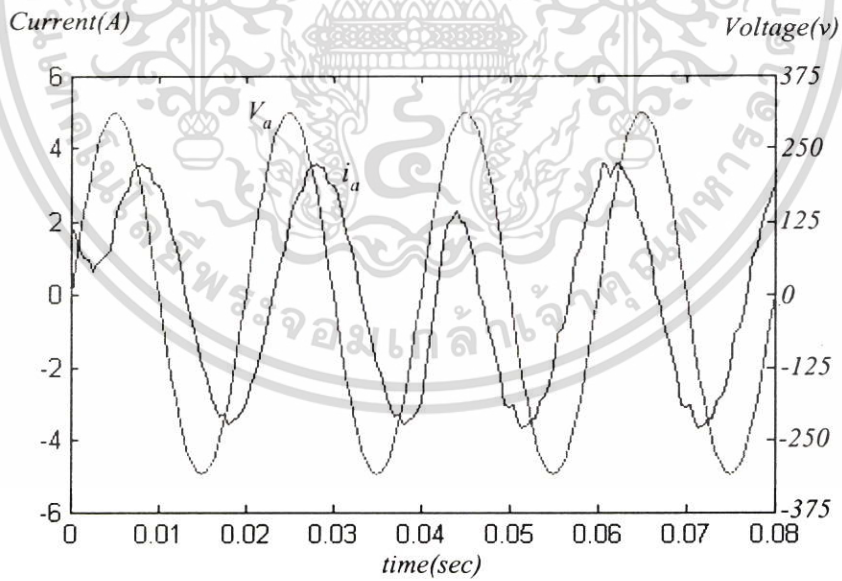
รูปที่ 2.11 การทำงานของคอนเวทเตอร์ที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า

2.5.3 ผลการจำลองแบบในสถานะชั่วครู่

แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง i_q^* อย่างทันทีทันใดที่เวลา $t = 40$ ms จาก $i_q^* = -3$ A เป็น $i_q^* = +3$ A และตั้งค่ากระแสคำสั่ง $i_d^* = 2$ A ดังที่ จากรูปที่ 2.12 แสดงผลตอบสนองของกระแส i_q ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของกระแส i_q จะมีความรวดเร็วแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีของระบบควบคุมเวกเตอร์ จากรูปที่ 2.13 ที่เวลา $0 \leq t < 40$ ms กระแส i_a มีมุมเฟสล่าหลังแรงดันอยู่เป็นมุม 56 องศาไฟฟ้าและที่เวลา $40 \text{ ms} \leq t$ กระแส i_a จะเปลี่ยนจากตามหลังแรงดันไฟฟ้าเป็นนำหน้าแรงดันอยู่เป็นมุม? องศาไฟฟ้าหรือทำงานที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า $PF = 0.6$



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงกระแสคำสั่ง i_q อย่างทันทีทันใด



รูปที่ 2.13 กระแสและแรงดันที่เฟสของคอนเวอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สรุปผลการจำลองแบบ

การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง E (DC link) ทำได้โดยการปรับกระแสสร้างกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ i_d เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในโหมดซิงโครนัส (subsynchronous Mode) กระแส i_d และกระแสไฟตรงเชื่อมโยง i_{os} จะมีค่าเป็นบวก กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่ดีซีลิงค์คอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟจะทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ (Rectifying mode) ในทางกลับกันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในโหมดซูปเปอร์ซิงโครนัส (supersynchronous Mode) กระแส i_d และกระแสไฟตรงเชื่อมโยง i_{os} จะมีค่าเป็นลบกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟจะไหลจากดีซีบัส เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟจะทำงานในโหมดอินเวอเตอร์ (Inverting Mode) ส่วนการควบคุมกำลังไฟรีแอ็คทีฟทำได้โดยการควบคุมกระแส i_q ในกรณีที่กระแส i_q มีค่าเป็นบวก กำลังไฟรีแอ็คทีฟจะไหลจากดีซีบัสเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟกระแสจะมีเฟส นำหน้าแรงดันไฟฟ้าในทางกลับกันถ้ากระแส i_q มีค่าเป็นลบกำลังไฟรีแอ็คทีฟจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่ดีซีบัสกระแสจะมีเฟสล่าหลังแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 3

การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กระตุ้น 2 ทางโดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อน แบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส

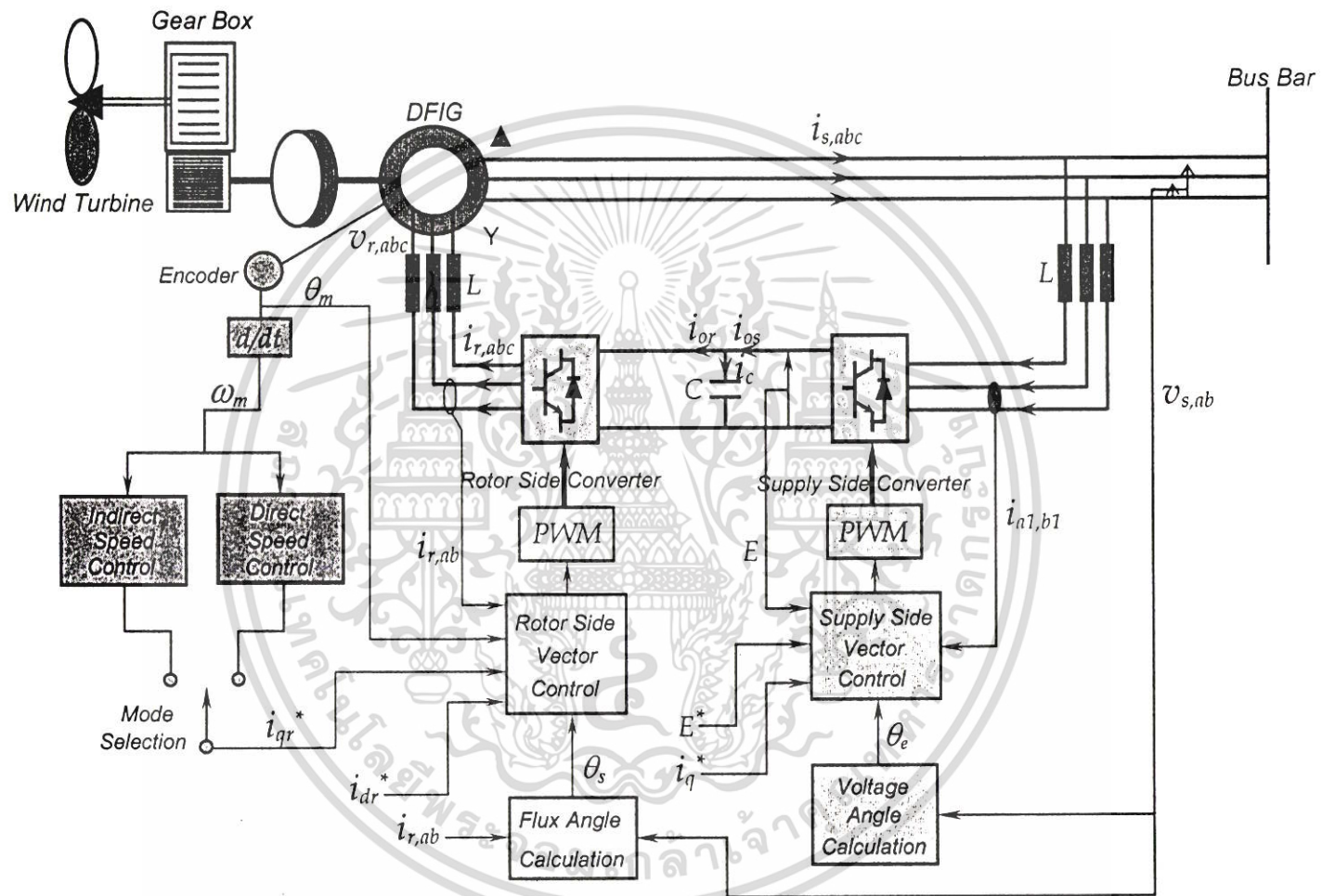
3.1 บทนำ

ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง (Double Fed induction generator) โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบิสที่รู้จักกันมานานแล้ว นำมาประยุกต์ใช้งานกับกำลังไฟฟ้าสูงๆ ซึ่งต้องพิจารณาความกว้างของการปรับความเร็วรอบ (Speed rang) เนื่องจากทางด้านสเตเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายไฟที่มีความถี่ที่ทำให้ ย่านของการปรับความเร็วรอบไม่กว้างมากนักเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องต้นกำลังที่เป็นกังหันลม (wind turbine) ทำให้ต้องคำนึงถึงย่านของการปรับความเร็วรอบ เนื่องจากเราไม่สามารถควบคุมความเร็วลมได้ โดยธรรมชาติความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ย่านความเร็วรอบที่ต้องการ จึงต้องมีการออกแบบอัตราทดของเกียร์บล็อกให้เหมาะสมโดยพิจารณาความเร็วลมต่ำสุด (Cut – in wind velocity) ไปจนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดที่พิกัด (Rated wind Velocity) นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบโดยพยายามลดการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์ ให้ได้มากที่สุดโดยการลดกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power) ที่ไหลผ่านคอนเวอเตอร์โดยการออกแบบอัตราทดของเกียร์บล็อกให้เหมาะสม เมื่อได้ย่านของการปรับความเร็วแล้วต่อไปก็พิจารณา ขนาดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการนำกังหันลมสำหรับขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง เพื่อผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Grid – connected Doubly – Fed Induction Generator (GCDFIG) Driven by a Wind Turbine) โดยในเนื้อหาจะเริ่มต้นด้วย ทฤษฎีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลัก ที่สเตเตอร์ ถัดมาจะอธิบายถึงการกำเนิดกำลังงานกลและแรงบิดทางกลที่ได้จากกังหันลมแบบที่มีส่วนโค้งของใบพัดที่แน่นอน (Fixed - pitch) และสุดท้ายจะกล่าวถึง การควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ติดตามความเร็วออฟติมัม (optimum speed tracking) ในอันที่จะทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมการควบคุมให้กังหัน

ลมนติดตามความเร็วออฟติ้มจะแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการควบคุมกระแส (current control mode) หรือ การควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม (Indirect speed control) และอีกแบบหนึ่ง คือ โหมดการควบคุมความเร็ว (Speed control mode) หรือ การควบคุมความเร็วโดยทางตรง (Direct Speed control)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกังหันลมแบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ

3.2 แบบจำลองของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทางในสถานะชั่วคราว

แบบจำลองในสถานะชั่วคราวของเครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแรงดัน, กระแสและค่าฟลักซ์เกี่ยวคล้องในขณะช่วงเวลาใดๆ ทั้งนี้ สมมุติว่า เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเชิงเส้น (linear Machine) กล่าวคือ ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Air gap Flux density) และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ (Air gap Flux แบบจำลองในสถานะชั่วคราว แบ่งได้เป็นแบบจำลองบนแกนอ้างอิง $a-b-c$ ซึ่งเป็นแบบจำลองตามสภาพความเป็นจริงของเครื่องจักรกล คือ แกนอ้างอิง $a-b-c$ ซึ่งใช้แทนแกนกลางของขดลวดสเตเตอร์จะอยู่กับที่เนื่องจาก ลักษณะทางด้านกายภาพของขดลวดสเตเตอร์จะไม่หมุนและแกนอ้างอิง $a-b-c$ ทางด้านโรเตอร์ที่ใช้แทนแกนกลางของขดลวดโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ แต่แบบจำลองตามสภาพความเป็นจริงของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรวมจะมีค่าไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งมุมของโรเตอร์หรือเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์จะเป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งต้องคำนึงถึงมุมเลื่อนเฟสของปริมาณกระแสและแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากแบบจำลองชนิดนี้ ไม่นิยมจึงไม่ขอกกล่าวถึง แต่จะใช้แบบจำลองแบบแกนนิ่ง (stationary reference Frame) โดยการแปลงแกนกลางของขดลวด 3 เฟส เข้าสู่แกนกลางของขดลวด 2 เฟส ซึ่งอยู่กับที่ดังแสดงได้ด้วยสมการเมตริก สมการที่ (3.2.1) , (3.2.2) ดังนั้นขดลวดที่สเตเตอร์และขดลวดที่โรเตอร์จะเสมือนอยู่กับที่ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำรวมมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ปริมาณของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ มีความถี่เท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากปริมาณต่างๆ บนแกนนิ่ง ยังเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอยู่ ถึงแม้ว่าค่าความเหนี่ยวนำรวมจะมีค่าคงที่ก็ตาม เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องแปลงแกนจาก 2 เฟส ที่หยุดนิ่ง $d^s - q^s$ ไปยังแกนอ้างอิง $d-q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงมุมเชิงโครนัสของแหล่งจ่ายไฟ (Synchronously Rotating Frame) ดังแสดงได้ด้วยสมการเมตริก สมการที่ (3.2.3) , (3.2.4) โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว สลิป (Slip Speed) เมื่อเทียบกับแกน $d-q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงโครนัส นอกจากค่าความเหนี่ยวนำรวมจะมีค่าคงที่แล้วปริมาณต่างๆ ยังเป็นไฟฟ้ากระแสตรงอีกด้วยทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ [5,9,10]

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{os}^s \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{os}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 2/3 & 0 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & \sin \omega_s t \\ -\sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} \quad (3.2.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & -\sin \omega_s t \\ \sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 แบบจำลองบนแกนหมุน $d' - q'$

สมการอนุพันธ์ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง บนแกนอ้างอิง $d' - q'$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วเชิงโคจรของแหล่งจ่ายไฟ ω_c กำหนดให้โดย [6]

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d \lambda_{qs}}{dt} + \omega_c \lambda_{ds} \quad (3.2.5)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d \lambda_{ds}}{dt} - \omega_c \lambda_{qs} \quad (3.2.6)$$

ถ้าโรเตอร์ไม่หมุนสมการของแรงดันบนโรเตอร์ ก็จะเป็นเช่นเดียวกับสมการที่ (3.2.5) และ สมการที่ (3.2.6) กล่าวคือ

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d \lambda_{qr}}{dt} + \omega_c \lambda_{dr} \quad (3.2.7)$$

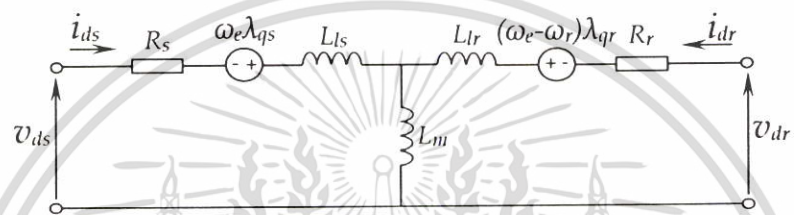
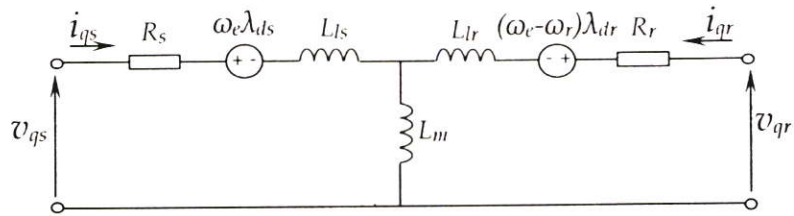
$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d \lambda_{dr}}{dt} - \omega_c \lambda_{qr} \quad (3.2.8)$$

แต่เนื่องจากโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว ω_r ดังนั้นสมการบนโรเตอร์จะเปลี่ยนไปเป็น

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d \lambda_{qr}}{dt} + (\omega_c - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (3.2.9)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d \lambda_{dr}}{dt} - (\omega_c - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (3.2.10)$$

จากสมการที่ (3.2.5), (3.2.6), (3.2.9) และ (3.2.10) นำมาเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรเทียบเท่าของ DFIG บนแกนอ้างอิง $d^c - q^c$

เราสามารถแสดงค่าฟลักซ์แม่เหล็กเชื่อมโยง (Flux Linkage) ในเทอรัมของกระแสได้ดังนี้

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (3.2.11)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (3.2.12)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (3.2.13)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (3.2.14)$$

แทนค่าสมการ (3.2.11),(3.2.12),(3.2.13),(3.2.14) ลงในสมการที่ (3.2.5), (3.2.6), (3.2.9) และ (3.2.10) จะได้สมการในรูปแบบของลาปลาซในรูปของเมตริกดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

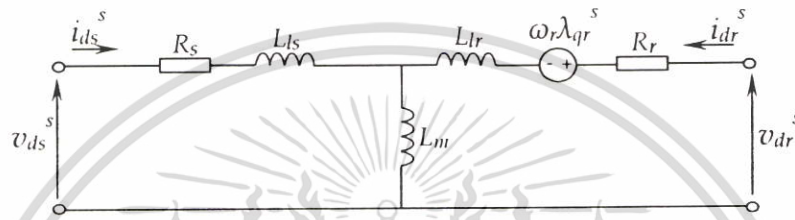
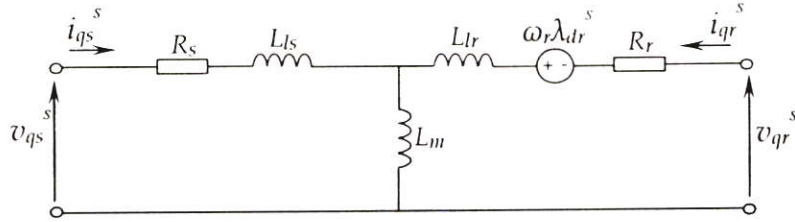
$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & \omega_e L_s & SL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + SL_s & -\omega_e L_m & SL_m \\ SL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + SL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & SL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + SL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qr} \\ \dot{i}_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.2.15)$$

เมื่อ s คือ ตัวกระทำลาปลาซซึ่งใช้แทนตัวกระทำ d/dt ในกรณีที่เป็นการเหนี่ยวนำแบบกรง ครอบครองแรงดัน V_{dr} . และ V_{qr} จะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากโรเตอร์ถูกตัดวงจรแต่สำหรับเครื่องจักรกล ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง จำเป็นต้องทราบค่าของ V_{dr} และ V_{qr} จึงจะสามารถหาค่ากระแสได้จากสมการที่ (3.2.15) การวิเคราะห์ในสภาวะคงตัวให้แทน $s = 0$ เนื่องจากปริมาณต่างๆ ในสมการที่ (3.2.15) เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในเทรอมของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ

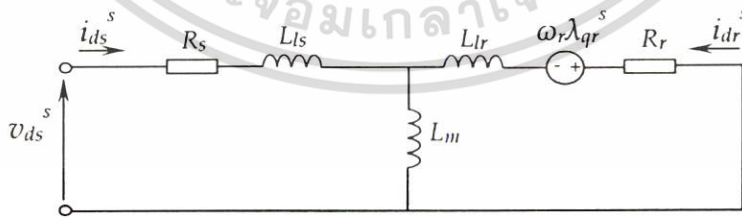
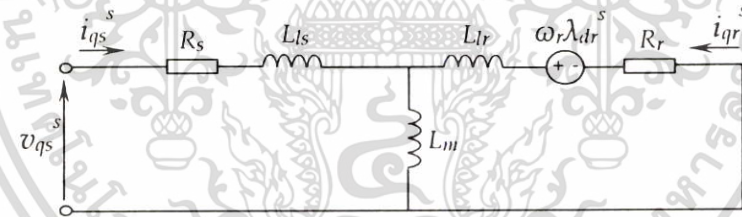
$$T_e = \frac{3}{4} P (\lambda_{dm} i_{qr} - \lambda_{qm} i_{dr}) \quad (3.2.16)$$

3.2.2 แบบจำลองบนแกนนิ่ง q^s-d^s

ถ้าเราแทน $\omega_e = 0$ ใน สมการที่ (3.2.15) ผลที่ได้ก็คือระบบแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_e จะถูกจับให้หยุดนิ่ง และระบบแกนอ้างอิงจะถูกเปลี่ยนจากแกน d^e-q^e เป็นแกน q^s-d^s วงจรสมมูลในรูปที่ 3.2 ก็จะเปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 โดยในรูปที่ 3.3 เป็นวงจรสมมูลในกรณีของ เครื่องจักรไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง ส่วนรูปที่ 3.4 เป็นวงจรสมมูลในกรณีที่โรเตอร์เป็นแบบกรงครอบ



รูปที่ 3.3 วงจรเทียบเท่าของ DFIG บนแกนอ้างอิง d^s - q^s



รูปที่ 3.4 วงจรเทียบเท่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอกบนแกนอ้างอิง d^s - q^s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง

การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยอาศัยวงจรกำลังของ เซอร์เบียสโดยทางด้านสเตเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้าที่มีความถี่และขนาดของแรงดันไฟฟ้า คงที่ส่วนทางด้านโรเตอร์ต่อกับคอนเวอเตอร์ แบบพีดับบลิวเอ็ม ชนิดป้อนแรงดัน 2 ตัว ประกอบด้วย คอนเวอเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor side converter) ทำหน้าที่ควบคุมกระแสทางด้านโรเตอร์เพื่อ สร้างแรงบิดและฟลักซ์โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่ สเตเตอร์ λ_s โดยใช้วิธีการ ควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อม (indirect vector control) ส่วนคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายทำหน้าที่ ควบคุมแรงดันดีซีลิงค์โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 การควบคุม เวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ จะเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้าง แรงบิดบนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronously rotating Frame) โดย กระแสสร้างแรงบิด i_{qr}^* เปรียบเสมือนกระแสอาร์เมเจอร์ และกระแสแมกเนไทซิง (magnetizing current) i_{ms} สำหรับสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศหรือมิวชวลฟลักซ์ เปรียบเสมือนกระแสฟิลด์ของเครื่องจักร ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (separately – excited DC machine) ในอุดมคติโดยละทิ้งผลของการ อิมตัวของแกนเหล็กและผลของปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ (armature reaction) แล้วจะได้ว่าแรงบิด แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic torque) จะเป็นสัดส่วนกับผลคูณของกระแส ฟิลด์หรือกระแสกระตุ้นกับ กระแสอาร์เมเจอร์ แต่กระแสแมกเนไทซิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ประกอบด้วยกระแสสร้างฟลักซ์ 2 ส่วน คือ กระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} และกระแส สร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} การควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้โดยการควบคุมกระแส ทางด้านโรเตอร์ i_{qr} เนื่องจากกระแสสร้างฟลักซ์หรือกระแสแมกเนไทซิงจะมีค่าคงที่ตามอัตราพิภคของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นสมรรถนะของผลตอบสนองของแรงบิดในสภาวะคงตัวและในสภาวะชั่วครู่ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสสร้างแรงบิด i_{qr} เป็นสำคัญ เนื่องจากระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยทางด้านสเตเตอร์ ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ (Grid – connected Doubly – Fed Induction Generator) หรือระบบขับเคลื่อน GCDFIG ทำให้ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศมีค่าคงที่ (Air gap Flux) หมายความว่ากระแสแมกเนไทซิง i_{ms} จะมีค่าคงที่เสมอ ทำให้กำลังไฟรีแอคทีฟ ใน ช่องว่างอากาศ (air gap reactive power) มีค่าคงที่ดังนั้น การควบคุมกำลังรีแอคทีฟ หรือกำลังที่ใช้สร้าง แรงบิดขับโหลด จึงเป็นอิสระต่อกำลังรีแอคทีฟ ส่วนการควบคุมกำลังรีแอคทีฟทางด้านโรเตอร์ทำได้ โดยการควบคุมกระแสสร้างฟลักซ์โรเตอร์ i_{dr} ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการใช้ของกำลังรีแอคทีฟ ทางด้านสเตเตอร์ การใช้ของกำลัง รีแอคทีฟและกำลังรีแอคทีฟในสภาวะคงตัวซึ่งจะได้กล่าวถึงในบท

ที่ 5 ถ้ากำหนดให้แกนอ้างอิงบนแกนหมุน $d^e - q^e$ ซึ่งแกนนอน $d^e - axis$ ชี้ในแนวเดียวกันกับสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ และจากสมการที่ (3.2.11)ถึง(3.2.14) ถ้ากำหนดให้ [1, 2, 29]

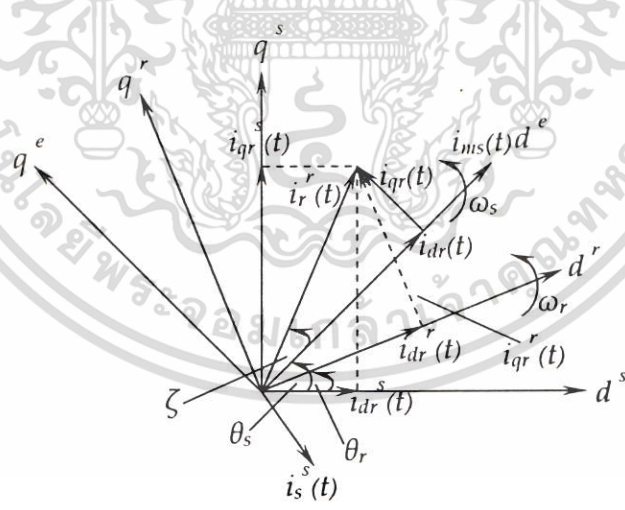
$$\lambda_{qs} = 0$$

$$\dot{i}_{qs} = -\frac{L_o \dot{i}_{qr}}{L_s} \tag{3.3.1}$$

$$\lambda_s = \lambda_{ds} = L_o \dot{i}_{ms} \tag{3.3.2}$$

$$\dot{i}_{ms} = \frac{L_s}{L_o} \dot{i}_{ds} + \dot{i}_{dr} \tag{3.3.3}$$

แล้วจะได้ความสัมพันธ์เชิงมุมของเวกเตอร์ของกระแสบนแกนหมุน $d^e - q^e$ และบนแกนนิ่ง $d^s - q^s$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เวกเตอร์กระแสบนแกนอ้างอิง $d^e - q^e$, $d^r - q^r$ และ $d^s - q^s$

ตำแหน่ง มุม θ_s และ θ_r คือตำแหน่งมุมของแกนอ้างอิง $d^c - q^c$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเชิงโครนัส และตำแหน่งมุมของแกนโรเตอร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วสลิปเมื่อเทียบกับแกนอ้างอิง $d^c - q^c$ หรือหมุนเท่ากับความเร็วมุมเชิงของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่หยุดนิ่ง $d^s - q^s$

$$\theta_{sl} = \theta_s - \theta_r \quad (3.3.4)$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (3.3.5)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.3.6)$$

$$\omega_{sl} = \frac{d\theta_{sl}}{dt} \quad (3.3.7)$$

เนื่องจากทางด้านสเตเตอร์ต่อกับ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าและ ถ้าสมมุติว่าความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ R_s มีค่าน้อยมากโดยปกติจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ประมาณ 2.8% ของพิกัดที่ความถี่ 50 Hz แล้วจะได้ว่ากระแสแมกนีไทซ์ i_{ms} มีค่าคงที่ภายใต้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดันไฟฟ้า, ฟลักซ์คลื่นสายและแรงบิดได้ดังนี้

$$V_{ds} = R_s i_{ds} \quad (3.3.8)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s L_o i_{ms} \quad (3.3.9)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d i_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr} \quad (3.3.10)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d i_{qr}}{dt} + \omega_{sl} (L_o i_{ms} + \sigma L_r i_{dr}) \quad (3.3.11)$$

$$T_e = -\frac{3}{4} P L_o i_{ms} i_{qr}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

$$L_o = \frac{L_m^2}{L_s}$$

จากสมการที่ (3.3.12) จะได้ว่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกับกระแสสร้างแรงบิดทางด้านโรเตอร์ i_{qr} เนื่องจากว่ากระแสแมกนีไทซ์ i_{ms} มีค่าคงที่ภายใต้การสมมติว่าไม่คิดค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และภายใต้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์จะได้ว่า แรงดันไฟฟ้าในแกน d คือ $v_{ds} \approx 0$ และแรงดันไฟฟ้าบนแกน q คือ v_{qs} จะมีค่าเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า (supply Voltage) การควบคุมกำลังไฟฟ้า แอ็คทีฟจึงเป็นอิสระต่อกำลังไฟฟ้รีแอ็คทีฟ กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟขึ้นอยู่กับความเร็วลม ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอ็คทีฟทำได้โดยการควบคุมกระแสคำสั่ง i_{dr}^* เครื่องกำเนิดจะรับกำลัง รีแอ็คทีฟจากทางด้านโรเตอร์เพิ่มขึ้นและจะลดกำลังรีแอ็คทีฟทางด้านสเตเตอร์ลงในกรณีที่ $i_{dr}^* = 0$ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรับกำลังรีแอ็คทีฟจากทางด้านสเตเตอร์เพียงด้านเดียว ทำให้ลดการสูญเสียที่คอนเวกเตอร์ลงได้ และถ้าหากว่าตั้งค่ากระแสคำสั่ง $i_{dr}^* = i_{ms} (N_s / N_r)$ เมื่อ N_s / N_r คืออัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ต่อจำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์ ขณะนี้เครื่องกำเนิดจะรับกำลังไฟฟ้รีแอ็คทีฟจากทางด้านโรเตอร์เพียงด้านเดียวเนื่องจาก $i_{ds} = 0$ ทำให้ทางด้านสเตเตอร์ทำงานที่ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งเราสามารถหาตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ θ_s เพื่อใช้สำหรับการแปลงแกนในระบบควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ โดยทางอ้อมได้จากสมการที่ (3.3.13) ดังนี้

$$\frac{d i_{ms}}{dt} + i_{ms} = \frac{1 + \sigma_s}{R_s} v_{ds} + i_{dr} \quad (3.3.13)$$

$$\theta_s = \int \omega_{ms} dt = \frac{1}{T_s i_{ms}} \left[\frac{1 + \sigma_s}{R_s} v_{qs} + i_{qr} \right] dt \quad (3.3.14)$$

$$\text{เมื่อ } \sigma_s = \frac{L_s - L_m}{L_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.3.13) และสมการที่ (3.3.14) ทำให้เราทราบว่า การหาตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์ เวกเตอร์ θ_s ต้องทราบข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ของแหล่งจ่ายไฟและกระแสทางด้านโรเตอร์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้มาจากการวัดค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time domain) จาก สมการที่ (3.3.11) เราสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกน q , i_{qr} ได้โดยการใช้แรงดันที่โรเตอร์ บนแกน q , v_{qr} และควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกน d , i_{dr} ได้โดยการใช้แรงดันที่โรเตอร์บนแกน d , v_{dr} จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมเวกเตอร์โดยทางอ้อมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง กระแสคำสั่งอ้างอิงทางด้านโรเตอร์บนแกน q , i_{qr}^* ได้มาจากลูฟของการควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งจะสอดคล้องกับโหมดการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมโดยทางอ้อม หรือได้รับโดยค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าคำสั่งอ้างอิง T_e^* ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะสอดคล้องกับโหมดของการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมจุดประสงค์ โดยทางตรงซึ่งจะกล่าวถึงไว้ในหัวข้อที่ 3.6 ซึ่งทั้ง 2 โหมดของการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมเพื่อให้ติดตามความเร็วของพิกัดที่ให้กำลังงานกลสูงสุด

ในการทำงานเดียวกันกับการควบคุมเวกเตอร์กระแส ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย (front – end converter) ในบทที่ 2 จากสมการที่ (3.3.10), (3.3.11) จัดให้อยู่ในรูปของแรงดันในเทอมของตัวแปรใหม่ เพื่อให้สอดคล้องกับตัวควบคุมพีไอ ดังนี้

$$v_{dr}' = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d i_{dr}}{dt}$$

$$v_{qr}' = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d i_{qr}}{dt}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$v_{dr} = v_{dr}' - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr}$$

$$v_{qr} = v_{qr}' + \omega_{sl} (L_m i_{ms} + \sigma L_r i_{dr})$$

โดยที่ค่าของแรงดันที่โรเตอร์ v_{dr}' และ v_{qr}' จะได้รับจากค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส (current error) i_{dr} และ i_{qr} ของตัวควบคุมพีไอแต่ละตัว ตามลำดับ การกำหนดค่าเกณฑ์การขยายที่เหมาะสม ของตัวควบคุมพีไอจากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ระหว่างเวกเตอร์กระแส i_{dr} และ i_{qr} กับเวกเตอร์

แรงดัน v_{dr}' และ v_{qr}' ตามลำดับ เพื่อให้แน่ใจว่ามีสมรรถนะในการติดตามกระแสได้ดีจากสมการที่ (5.4) จะได้ค่าเวกเตอร์แรงดัน อ้างอิงคำสั่ง ทางด้านโรเตอร์บนแกน d และแกน q คือ v_{dr}^* และ v_{qr}^*

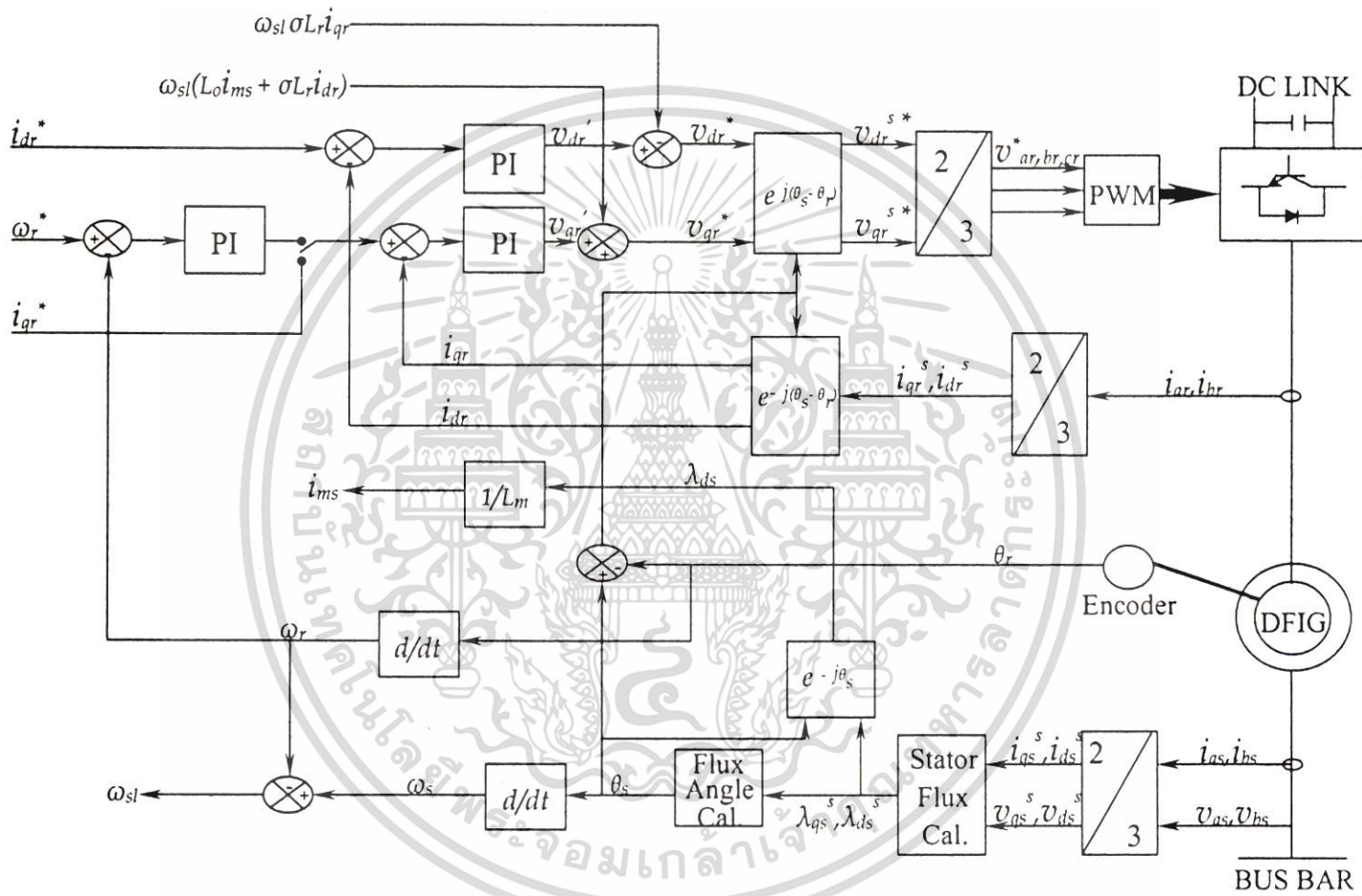
$$v_{dr}^* = v_{dr}' - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr}$$

$$v_{qr}^* = v_{qr}' + \omega_{sl} (L_r i_{ms} + \sigma L_r i_{dr})$$

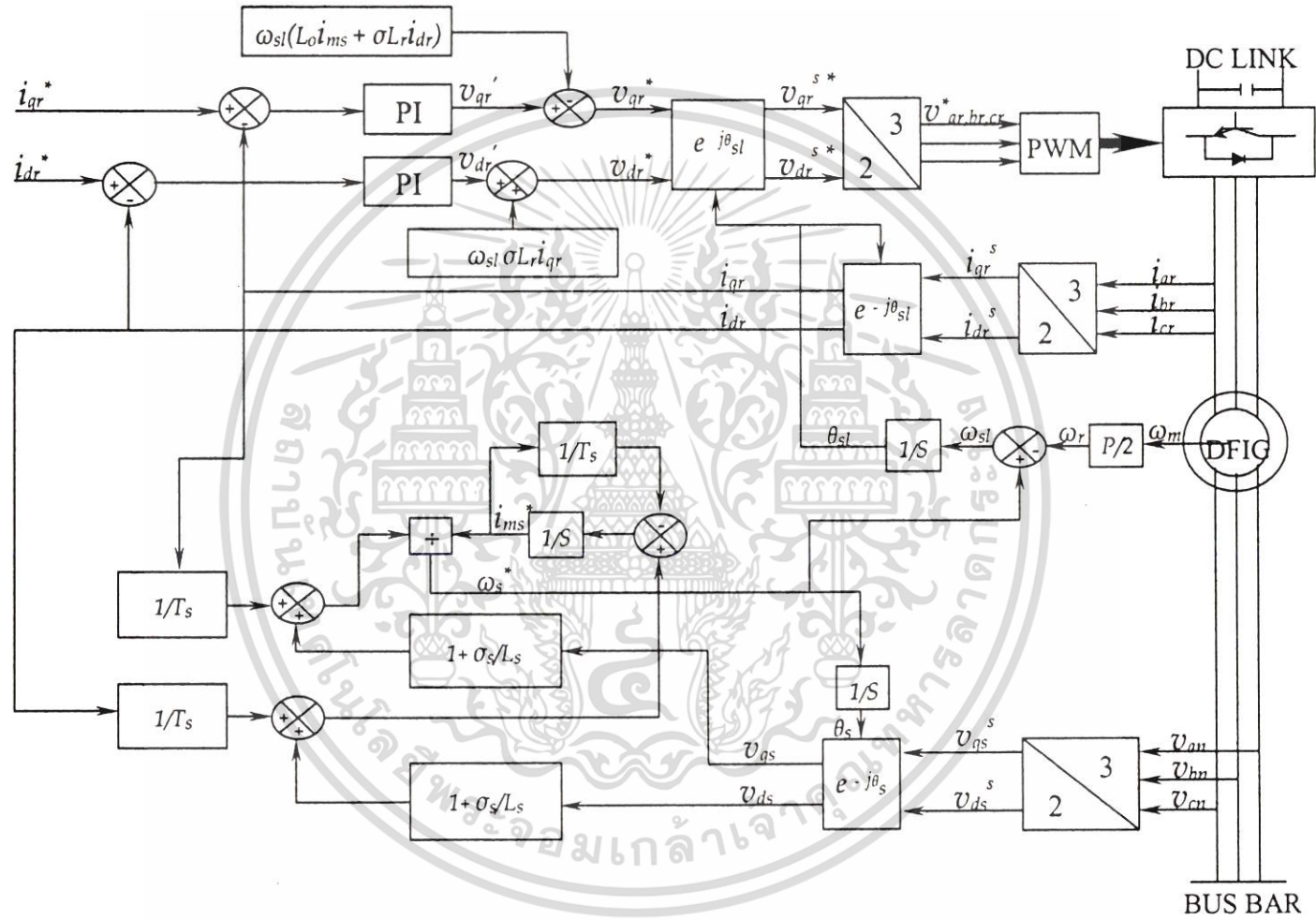
v_{dr}^* และ v_{qr}^* เป็นแรงดันอ้างอิงที่คอนเวอเตอร์ ทางด้านโรเตอร์ต้องป้อนให้กับเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า ทางด้านโรเตอร์ โดยผ่านทางวงแหวนลื่น (slip ring)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์แบบทางอ้อมของ DFIG



รูปที่ 3.7 การควบคุมเวกเตอร์แบบทางอ้อมของ DFIG

3.4 กำลังงานกลและแรงบิดทางกลของกังหันลม

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

$$P_m = \frac{\pi \rho C_p (\lambda, \beta) r^2 v^3}{2} \quad (3.4.1)$$

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 และความเร็วลมได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{\omega_{m,t} r}{v} \quad (3.4.2)$$

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

$$\omega_{m,G} = G \omega_{m,t} \quad (3.4.3)$$

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

$$T_{m,t} = \frac{P_m}{\omega_{m,t}} \quad (3.4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดทางกลทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $T_{m,G}$ กำหนดให้โดย

$$T_{m,G} = \frac{P_m}{\omega_{m,G}} \quad (3.4.5)$$

จากสมการที่ (3.4.3), (3.4.4) และ (3.4.5) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลทั้ง 2 ด้าน ดังนี้

$$T_{m,G} = \frac{T_{m,t}}{G} \quad (3.4.6)$$

สมการอนุพันธ์เชื่อมโยงของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดให้โดย

$$J \frac{d\omega_{m,G}}{dt} + B \omega_{m,G} = T_{m,G} - T_e \quad (3.4.7)$$

จากรูปที่ 3.8 เป็นเส้นโค้งคุณลักษณะสมบัติแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล C_p และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล C_t เทียบกับค่าอัตราส่วนของความเร็วปลาย λ ของกังหันลมแบบที่มีส่วนเว้าของใบพัดที่แน่นอน (Fixed-pitch) ซึ่งไม่สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยง่ายดังนั้นเราจึงเขียนความสัมพันธ์ของค่า C_p และ C_t ในเทรอมของ λ ได้ดังนี้

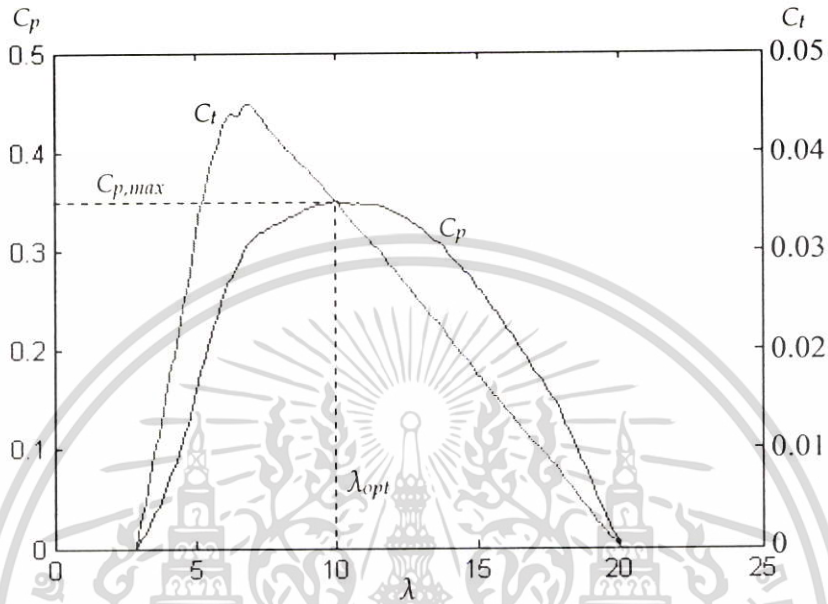
$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_t(\lambda, \beta) \quad (3.4.8)$$

จากสมการที่ (3.4.2) และ (3.4.8) จะได้ว่า

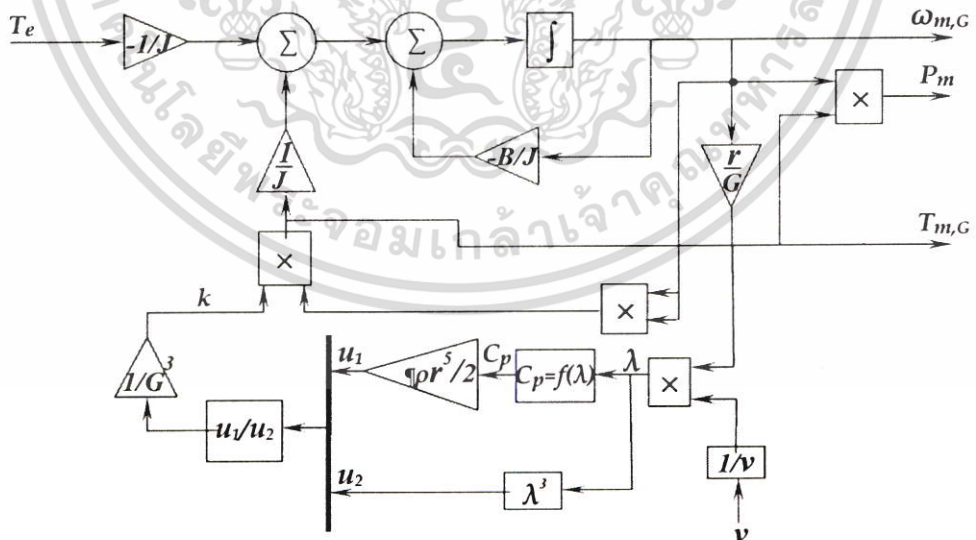
$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{\omega_{m,t} r C_t(\lambda, \beta)}{v} \quad (3.4.9)$$

จากสมการที่ (3.4.1), (3.4.4) และ (3.4.9) สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงบิดทางกลของกังหันลม $T_{m,t}$ ในเทรอมของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล C_t ได้ดังนี้

$$T_{m,t} = \frac{\pi \rho C_t(\lambda, \beta) r^3 v^2}{2} \tag{3.4.10}$$



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ของ C_p และ C_t เทียบกับ λ



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของกังหันลมเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 กำลังงานกลสูงสุดของกังหันลม (Maximum Mechanical power of wind turbine)

จากรูปที่ 3.8 และสมการที่ (3.4.1) จะได้ว่ากำลังงานกลสูงสุด $P_{m, max}$ ของกังหันลมจะเกิดขึ้นที่ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกลมีค่าสูงสุดคือ $C_{p, max} = 0.35$ ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าของอัตราส่วนความเร็วปลายออปติ멈 $\lambda_{opt} = 10$ ณ จุดที่กังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติ멈 (optimum speed) สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้ [17,18,19]

$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,t,opt}^3 \tag{3.4.11}$$

$$T_{m,t,opt} = K_{opt} \omega_{m,t,opt}^2 \tag{3.4.12}$$

$$\omega_{m,t,opt} = \frac{\lambda_{opt} v}{r} \tag{3.4.13}$$

เมื่อ

$$K_{opt} = \frac{\pi C_{p,max} \rho r^5}{2 \lambda_{opt}^3} \tag{3.4.14}$$

พิจารณากังหันลมที่มีรัศมีของใบพัด $r = 3.24 \text{ m}$ และมีความเร็วลม $v = 10 \text{ ms}^{-1}$ เมื่อกังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติ멈จะให้กำลังงานกลสูงสุด 7.5 Kw และเมื่อความเร็วลมลดลงเหลือ $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ กังหันลมจะให้กำลังงานกลสูงสุด 480 w เท่านั้น จากสมการที่ (3.4.1) กำลังงานกลของกังหันลมจะแปรผันไปตามความเร็วลมยกกำลังสาม $P_m \sim v^3$ ดังนั้น เมื่อความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยจะทำให้กำลังงานกลเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ถ้าให้ความเร็วลมที่พิกัด $v = 10 \text{ ms}^{-1}$ เมื่อความเร็วลมลดลงเหลือ $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ จะทำให้กำลังงานกลลดลงเหลือเพียง 6.4 เปอร์เซ็นต์ของกำลังงานกลที่พิกัด ถ้าหากว่าความเร็วลมลดลงต่ำกว่านี้จะไม่เพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ทำงานได้ดังนั้น ความเร็วลมต่ำสุดที่จะทำให้อุปกรณ์ทำงานได้เรียกว่า ความเร็วลมต่ำสุด ที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มทำงาน (cut – in wind velocity) ในที่นี้ $v = 4 \text{ ms}^{-1}$

3.5 ย่านของความเร็วและพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไม่คิดการสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าการสูญเสียทางกล และการสูญเสียที่คอนเวทเตอร์ สมมุติว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วรอบดิมมพิคต์กำลังไฟฟ้า แอ็คทีฟทางด้าน สเตเตอร์ และด้าน โรเตอร์ และแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้า กำหนดให้โดย

$$P_{s,rated} = \frac{P_{m,rated}}{1 - S} = K_{opt} \omega_s \omega_{rated}^2 \quad (3.5.1)$$

$$P_{r,rated} = \frac{-SP_{m,rated}}{1 - S} = -K_{opt}(\omega_s - \omega_{rated})\omega_{rated}^2 \quad (3.5.2)$$

$$T_{rated} = \frac{P_{m,rated}}{\omega_{rated}} = K_{opt} \omega_{rated}^2 \quad (3.5.3)$$

เมื่อ ω_{rated} คือความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกกำหนดโดยค่าอัตราทดของเกียร์ บล็อก พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดพิกัด 7.5 Kw ทำงานที่ความเร็วรอบใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) คือ 970 รอบ/นาที มีค่าสลลิป $S = 0.03$ จะให้แรงบิดที่พิกัด $T_{rated} = 73.8$ Nm. การพิจารณาเลือกความเร็วที่พิกัดและแรงบิดที่พิกัดต้องพิจารณาถึงระบบขับเคลื่อนที่ใช้ดังนี้

- กรณีที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบเครเมอร์สติดิ จะทำงานได้เฉพาะในโหมดซบซิงโครนัสเท่านั้นที่ความเร็วลมเต็มพิกัดความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าควรใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัสเพื่อลดขนาดของคอนเวทเตอร์ ดังนั้น ที่ความเร็วลมต่ำสุดจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ค่าสลลิปสูงขึ้นทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทางด้าน โรเตอร์สูงขึ้นและพิกัดของกระแสทางด้าน โรเตอร์ซึ่งจะต้องพิจารณาด้วยเช่นกัน

- กรณีที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียสติดิข สามารถทำงานได้ทั้งโหมดซบซิงโครนัสและโหมดซบเปอร์ซิงโครนัส ในกรณีที่ทำงานในโหมดซบเปอร์ซิงโครนัสกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟจะไหลได้ 2 ทิศทาง คือ ทางด้านสเตเตอร์ และทางด้านโรเตอร์ ทำให้สามารถลดขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลงได้เนื่องจากไม่มีการไหลวนของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ (eddy Active power) ในระบบ

การพิจารณาเลือกขอบเขตของความเร็วที่พิกัดซึ่งจะมีผลกระทบต่อพิกัดกำลังของคอนเวทเตอร์ ซึ่งได้แก่พิกัดการทนต่อค่าแรงดันไฟฟ้า และพิกัดการทนต่อค่ากระแสไฟฟ้า ถ้าหากไม่คิดค่าแรงดันไฟฟ้า ตกคร่อมที่ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์แล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนตัวโรเตอร์กำหนดให้โดย

$$v_r = \frac{+- S v_s}{n} \quad (3.5.4)$$

จากสมการที่ (3.4.13) สมมติว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความเร็วออปติ멈ในสภาวะคงตัวที่ค่า $\lambda_{opt} = 10$ จะได้ว่า อัตราส่วนระหว่างความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วที่พิกัดมีค่า ดังนี้

$$\omega_{t,opt} \mid v = 10 \text{ ms}^{-1} = 2.5 \quad (3.5.5)$$

$$\omega_{t,opt} \mid v = 4 \text{ ms}^{-1}$$

มีฉะนั้นย่านความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกำหนดโดยค่าสลิป 2 ค่า คือค่า สลิป เป็นลบที่ความเร็วลมเต็มพิกัด $v = 10 \text{ ms}^{-1}$ และสลิปเป็นบวกที่ค่าความเร็วลมเริ่มต้น $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$S_0 = \frac{\omega_s - \omega_0}{\omega_s} \quad (3.5.6)$$

$$S_1 = \frac{\omega_s - \omega_1}{\omega_s}$$

เมื่อ ω_0 คือ ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ω_1 คือ ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\omega_0 = \omega_{t, opt}$ ที่ความเร็วลมเริ่มต้น $v = 4 \text{ ms}^{-1}$

$\omega_1 = \omega_{t, opt}$ ที่ความเร็วลมสูงสุด $v = 10 \text{ ms}^{-1}$

ถ้ากำหนดให้พิกัดของกระแสโรเตอร์ในรูปเปอร์ยูนิต คือ 1 pu และ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ในรูปของเปอร์ยูนิต คือ $v_r = 1$ pu ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าวีเอ v_A ทางด้านโรเตอร์กำหนดให้โดย

$$i_r (pu) = \frac{1}{1 - S}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_r (pu) = S_0$$

$$v_r (pu) = S_1$$

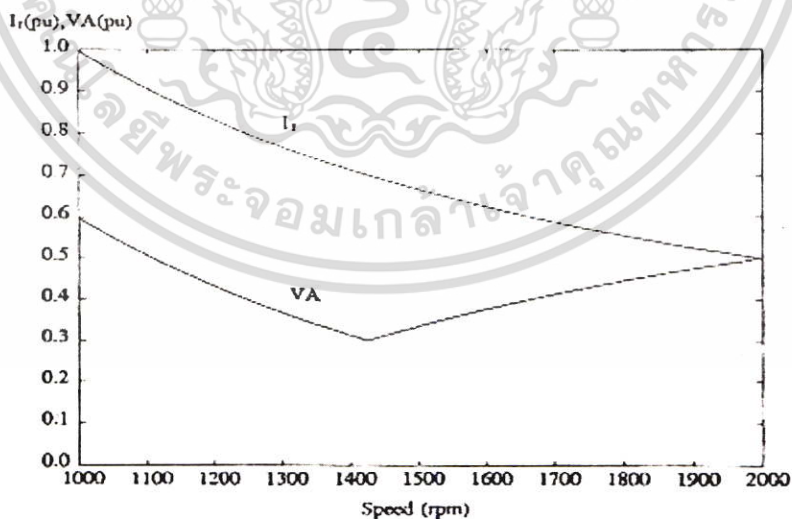
(3.5.7)

$$v_A |_{s=s_0} = \frac{S_0}{1 - S_1}$$

$$v_A |_{s=s_1} = \frac{S_1}{1 - S_1}$$

$$v_{Amax} (pu) = \text{Max}(|v_A|_{s=s_0}|, |v_A|_{s=s_1}|)$$

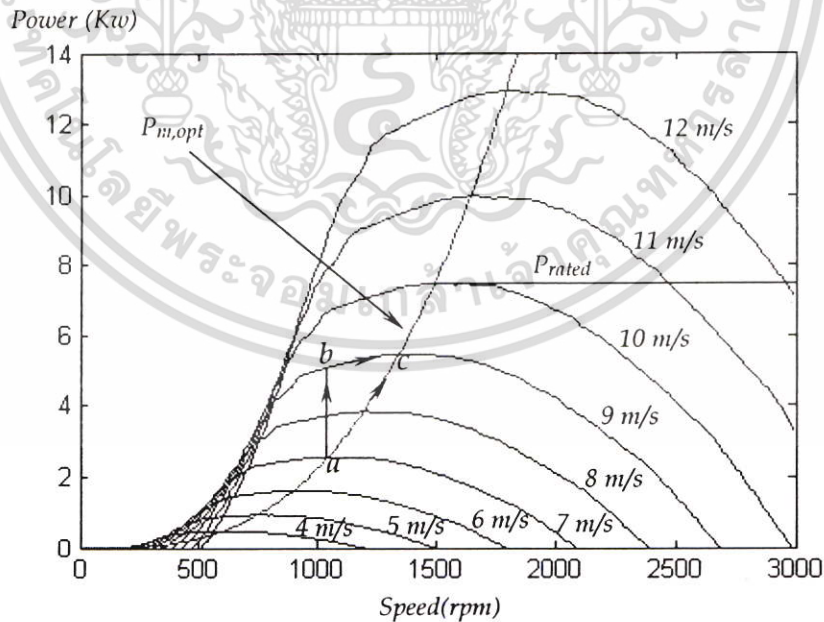
มีฉะนั้นกำลังไฟฟ้าวีเอของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับการเลือกย่านของความเร็วรอบและความเร็วที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ ในรูปเปอร์ยูนิต $v_r (pu)$ และกระแสโรเตอร์ในรูปเปอร์ยูนิต $i_r (pu)$ ซึ่งกำลังไฟฟ้าวีเอของโรเตอร์ จะเป็นผลคูณของกระแสโรเตอร์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนโรเตอร์ รูปที่ 3.9 แสดงค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าวีเอของโรเตอร์ $v_{a,max}$ และกระแสโรเตอร์ $i_r (pu)$ สำหรับความแตกต่างกันของความเร็วที่พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของเกียร์ทดและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมมีค่าคงที่



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า VA และกระแสของโรเตอร์เทียบกับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

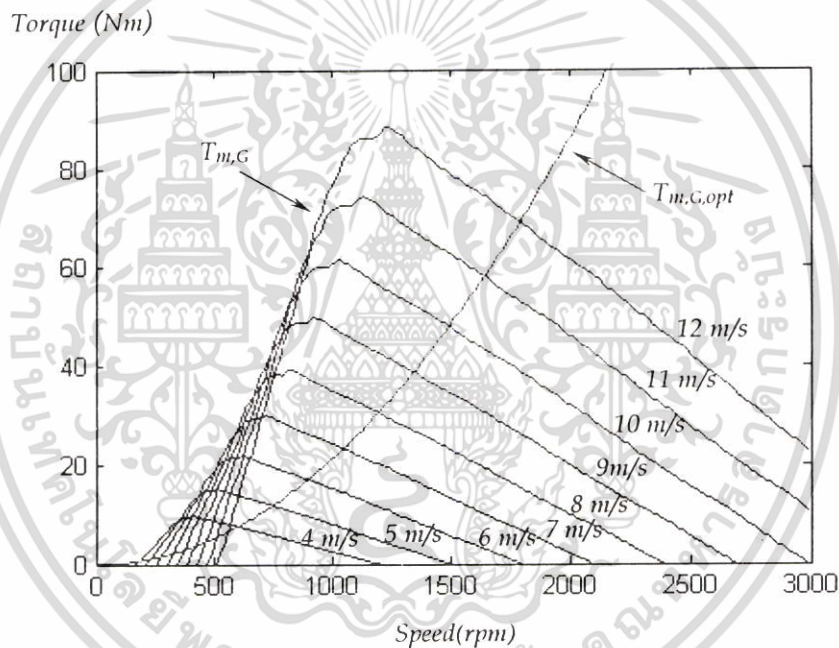
ค่าของกำลังไฟฟ้าวีเอ บนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 4 ขั้วแม่เหล็กจะมีค่าต่ำสุดเกิดขึ้นที่ค่าสลิป $s = -0.41$ และประสิทธิภาพของระบบขณะนี้จะมามีค่าสูงสุดเพราะมีการสูญเสียกำลังที่คอนเวอเตอร์น้อยที่สุดทำให้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนของเกียร์ทดได้ที่ค่าสลิป $s = -0.5$ ความเร็วที่พิคคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $\omega_{m,G} = 1,500$ r.p.m. ที่ความเร็วลม $v = 10$ ms^{-1} และอัตราส่วนความเร็วความเร็วปลายออปติ้ม $\lambda_{opt} = 10$ ใช้สมการที่ (3.4.2) คำนวณหาความเร็วรอบของกังหันลม $\omega_{m,l} = 294.7$ r.p.m. ใช้สมการที่ (3.4.3) คำนวณหาอัตราส่วนของเกียร์ทด $G = 5.09$ ใช้สมการที่ (3.4.1),(3.4.2) และความสัมพันธ์ของกราฟ ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกล C_p เทียบกับอัตราส่วนความเร็วปลาย λ ดังรูปที่ (3.8) เมื่อนำมาพล็อตกราฟ ของกำลังงานกล P_m ของกังหันลม เทียบกับความเร็วรอบของกังหันลม $\omega_{m,G}$ (พิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ที่ค่าของความเร็วลม v มีค่าที่ต่างๆ กัน จะได้คุณลักษณะสมบัติของเส้นโค้งกำลังงานกล P_m ของกังหันลมดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังงานกลของกังหันลมจะ เพิ่มขึ้นเมื่อค่าของสัมประสิทธิ์กำลังงานกลเพิ่มขึ้นและจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงานกลมีค่าสูงสุด ซึ่งจะสอดคล้องกับจุดตัดของเส้นโค้งกำลังออปติ้ม P_{opt} กับเส้นโค้งกำลังงานกล P_m เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก v_2 เป็น v_4 จุด "a" และจุด "c" จะเป็นจุดออปติ้ม (optimum point)



รูปที่ 3.11 คุณลักษณะของกำลังงานกลของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างๆ กันเทียบกับความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.4.4) จะสามารถหาแรงบิดทางกลของกังหันลมเมื่อพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $T_{m,G}$ จากรูปที่ 3.12 แสดงคุณลักษณะสมบัติของเส้นโค้งแรงบิดทางกลของกังหันลม (พิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) เทียบกับความเร็วรอบของกังหันลม (พิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ที่ค่าความเร็วลม มีค่าคงที่ต่างๆ กันขณะที่กังหันลมทำงานที่จุดออปติ멈จะเกิดกำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical power) ค่าของแรงบิดทางกลที่จุดออปติ멈นี้จะเป็นจุดตัดของเส้นโค้ง $C_{p,max}$ กับเส้นโค้งของแรงบิดทางกลที่ค่าความเร็วลมต่างๆ กันซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อกังหันลมทำงานที่จุดออปติ멈แรงบิดทางกลของกังหันลมจะมีค่าต่ำกว่าแรงบิดทางกลสูงสุด (Maximum Mechanical torque) ของกังหันลมเสมอ



รูปที่ 3.12 คุณลักษณะของแรงบิดทางกลของกังหันลมเทียบกับความเร็วรอบ

3.6 การติดตามความเร็วออปติ멈ของกังหันลม

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า กังหันลมที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะให้กำลังงานกลสูงสุดที่ความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่าความเร็วออปติ멈 (optimum speed) ซึ่งจะพบได้จากสมการที่ (3.4.13) ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วออปติ멈จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลม ดังนั้น เราจึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออปติ멈 (optimum speed tracking) เสมอ เมื่อ

มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมแต่ปัญหาก็คือเราไม่ทราบค่าความเร็วลมแต่เราสามารถหาค่าแรงบิดทางกลของกังหันลมได้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจะใช้สมการ (3.4.12) สำหรับหาค่าความเร็วออปติ멈ของระบบควบคุมความเร็วรอบโดยทางอ้อม (Indirect speed control) และระบบควบคุมความเร็วโดยตรง (Direct speed control)

3.6.1 การควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม

จากสมการอนุพันธ์เชื่อมโยงของกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสมการที่ (3.4.7) เนื่องจากเรามีการควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้ได้ว่า $T_e = T_e^*$ แทนค่าใน (3.4.7)

$$J \frac{d \omega_{m,G}}{dt} = T_{m,G} - T_e^* - B \omega_{m,G} \quad (3.6.1)$$

เมื่อ B คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดและแรงเสียดทาน

ในสภาวะคงตัว $\frac{d \omega_{m,G}}{dt} = 0$ แทนค่าใน (3.6.1) จะได้สมการในสภาวะคงตัว

$$T_{m,G} - T_e^* - B \omega_{m,G} = 0 \quad (3.6.2)$$

จากสมการที่(3.4.12)แทนค่า $T_{m,G} = T_{m,opt}$ ในสมการที่ (3.4.12)จะได้สมการที่จุดออปติ멈

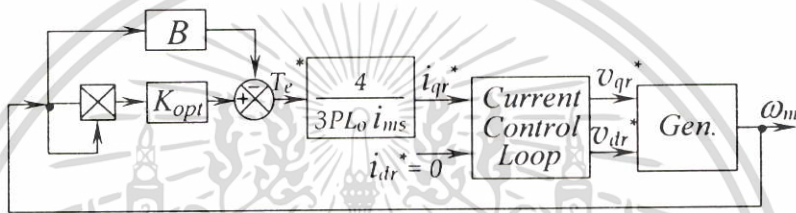
$$T_e^* = k_{opt} \omega_{t,opt}^2 - B \omega_{t,opt} \quad (3.6.3)$$

การควบคุมความเร็วโดยทางอ้อมจะใช้ข้อมูลของความเร็วรอบโดยวิธีการวัดความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วนำมาคำนวณหาแรงบิดคำสั่งโดยใช้สมการที่ (3.6.3) แล้วทำการปรับแก้ไขค่าของแรงบิดคำสั่ง T_e^* จนกว่าสมการที่ (3.6.3) จะเป็นจริงแสดงว่ากังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติ멈ในสภาวะคงตัว ส่วนการควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ในหัวข้อที่ 3.3 โดยที่กระแสคำสั่งสร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำหนดให้โดย [19 , 20 ,21 , 22 , 23 , 24]

$$i_{qr}^* = \frac{4T_e^*}{3PL\alpha i_{ms}} \quad (3.6.4)$$

แรงบิดเร่ง (Accelerate Torque) ของระบบควบคุมแบบทางอ้อมกำหนดให้โดย

$$T_{ac} = J \frac{d}{dt} \omega_{m,G} - K_{opt} \omega_{m,G}^2 \quad (3.6.5)$$



รูปที่ 3.13 ระบบการควบคุมความเร็วแบบทางอ้อม

ถ้าเริ่มต้นในสภาวะคงตัวที่ทำงานที่จุด "a" ด้วยความเร็วลม v_2 ในรูปที่ 3.11 ในสภาวะชั่วคราว เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด (step change) จาก v_2 เป็น v_4 จะทำให้กำลังงานกล P_m เพิ่มขึ้นทันทีทันใดไปที่จุด "b" ขณะที่ความเร็วรอบยังไม่เปลี่ยนแปลงจะเกิดมีแรงบิดเร่ง (Accelerate Torque) ซึ่งเป็นผลต่างของแรงบิดทางกลของกังหันลมกับแรงบิดที่ค่า C_p, max ตามสมการที่ (3.6.5) ทำให้กังหันลมเร่งความเร็วขึ้นเรื่อยๆ แรงบิดเร่งจะมีค่าลดลงแต่เมื่อมีการควบคุมความเร็วรอบตามสมการที่ (3.6.3) กังหันลมจะเปลี่ยนจุดทำงานจาก "b" เป็นจุด "c" เมื่อแรงบิดเร่งมีค่าเท่ากับศูนย์และกังหันลมจะทำงานที่ความเร็วเหมาะสม (optimum speed operating) ในสภาวะคงตัวซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ (3.6.3) ในทำนองเดียวกันถ้าความเร็วลมลดลงจาก v_4 เป็น v_2 ในสภาวะคงตัวที่กังหันลมจะกลับมาทำงานที่จุด "a" จากข้างต้นที่กล่าวมาแสดงให้เห็นถึงการติดตามความเร็วเหมาะสมของกังหันลมในสภาวะชั่วคราว

3.6.2 การควบคุมความเร็วโดยตรง

การควบคุมความเร็วโดยตรงมีจุดประสงค์เดียวกันกับการควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม คือให้กังหันลมติดตามความเร็วเหมาะสม ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม และทำงานที่ความเร็ว

ออปติ멈ในสภาวะคงตัว แต่สิ่งที่แตกต่างกันก็คือผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวขณะที่ความเร็วลมเพิ่มขึ้นหรือลดลงระบบการควบคุมความเร็วโดยทางอ้อมจะมีผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวช้ากว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบเป็นไปโดยธรรมชาติหรือขึ้นอยู่กับแรงเฉื่อยของระบบถ้าระบบมีแรงเฉื่อยมากผลตอบสนองจะยิ่งช้ากว่าจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนการควบคุมความเร็วโดยตรงจะมีผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวเร็วเนื่องจากจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอช่วยเร่งให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับกังหันลมที่มีขนาดใหญ่ที่มีแรงเฉื่อยสูง

จากสมการที่ (3.4.12) ที่จุดออปติ멈 จะได้ความเร็วคำสั่ง

$$\omega_{m,G}^* = \frac{\sqrt{T_{m,G}}}{K_{opt}} \quad (3.6.6)$$

จากสมการที่ (3.6.6) จะเห็นได้ว่าการควบคุมความเร็วโดยตรงจะต้องทราบค่าแรงบิดทางกลของกังหันลม

3.7 การประเมินค่าแรงบิดทางกล

จากสมการที่ (3.4.7) แทนค่า $T_e = T_e^* = \frac{k_{pow} P L_m I_{ms} I_{qr}^*}{2}$

กำหนดให้ตัวแปรช่วยของแรงบิด $T_{aux} = T_{m,G} - B \omega_{m,G}$

จากสมการที่ (3.4.7) เขียนได้ใหม่ดังนี้

$$J \frac{d \omega_{m,G}}{dt} = T_{aux} - \frac{k_{pow} P L_m I_{ms} I_{qr}^*}{2} \quad (3.7.1)$$

และ $\frac{d T_{aux}}{dt} = 0 \quad (3.7.2)$

จากสมการที่ (3.7.1) และ (3.7.2) เป็นสมการสภาวะ (state equation) มี $\omega_{m,G}$ และ T_{aux} เป็นตัวแปรของสภาวะ (state variables) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรเมตริกได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_{m,G} \\ T_{aux} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{m,G} \\ T_{aux} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{k_{pow} P L_m \dot{i}_{ms}}{2J} \\ 0 \end{bmatrix} i_{qr}^*$$

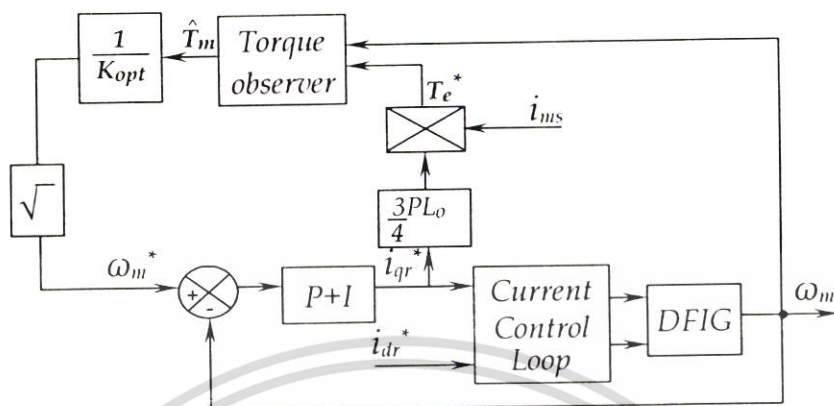
จากสมการที่ (3.7.1) และ (3.7.2) จะได้ระบบประเมินค่าแรงบิดทางกล T_m (Mechanical Torque observer) ที่มีการป้อนกลับของค่าผิดพลาดในการประเมินค่าความเร็วรอบรวมอยู่ด้วยดังนี้

$$J \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{m,G} = \hat{T}_{aux} - \frac{k_{pow} P L_m \dot{i}_{ms}}{2} i_{qr}^* + J k_{01} (\omega_{m,G} - \hat{\omega}_{m,G}) \quad (3.7.4)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{T}_{aux} = k_{02} (\omega_{m,G} - \hat{\omega}_{m,G}) \quad (3.7.5)$$

$$\hat{T}_m = \hat{T}_{aux} + B \hat{\omega}_{m,G} \quad (3.7.6)$$

ในที่นี้ $\hat{\omega}_{m,G}$ แสดงถึงค่าประเมินและ k_{01} , k_{02} คืออัตราขยายป้อนกลับของค่าความผิดพลาดในการประเมินค่าความเร็วซึ่งจะให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพของระบบควบคุมได้ดียิ่งขึ้น โดยการเลือกใช้ค่า k_{01} , k_{02} ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.14 ระบบการควบคุมความเร็วแบบทางตรง

3.8 ประสิทธิภาพของ DFIG และประสิทธิภาพของระบบ

การสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์ของ DFIG ในระบบขับเคลื่อนที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสจะมีค่าคงที่เนื่องจากความถี่และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสเตเตอร์จะมีค่าคงที่การสูญเสียนี้สามารถหาค่าได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีโหลด (No load) โดยการป้อนแรงดันและความถี่ที่พิกัดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าโดยไม่มีโหลดกระแสที่วัดได้จากเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า 80 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นกระแสสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ และประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นกระแสที่เกิดจากการสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์ ส่วนการสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์ จะมีค่าน้อยมากเนื่องจากความถี่ของกระแสโรเตอร์มีค่าน้อยมาก และการสูญเสียที่ตัวนำบนขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ มีค่าน้อยมากเช่นกันเมื่อเทียบกับตอนมีโหลดจึงสามารถละทิ้งได้ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Watt Meter) จะเป็นการสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์ ดังนั้น

$$P_{s,fe} = \text{ค่าที่อ่านได้จาก เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าในขณะไม่มีโหลด}$$

เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานที่ความเร็วออกพิตัมม์ทำให้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ ค่าสลิปคูณกับ

ความถี่ของกระแสที่สเตเตอร์ทำให้การสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านโรเตอร์ $P_{r,fe}$ มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของโรเตอร์

$$f_r = S f_s$$

การสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านโรเตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณมักนิยามแทนด้วยค่าความต้านทานที่ต่อในลักษณะขนานกับค่าความเหนี่ยวนำร่วมซึ่งจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 5.5.1 ผลรวมของการสูญเสียที่แกนเหล็กทั้งหมด (Total iron loss)

$$P_{fe, total} = P_{s,fe} + P_{r,fe}$$

การสูญเสียที่ตัวนำทางด้านสเตเตอร์และการสูญเสียที่ตัวนำทางด้านโรเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลม เมื่อความเร็วลมมีค่ามากทำให้มีกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมากผลก็คือกระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะเพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียที่ตัวนำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

$$P_{s,cu} = \frac{3}{2} (i_{qs}^2 R_s + i_{ds}^2 R_s)$$

$$P_{r,cu} = \frac{3}{2} (i_{qr}^2 R_r + i_{dr}^2 R_r)$$

ผลรวมของการสูญเสียที่ตัวนำ (total copper loss)

$$P_{cu, total} = P_{s,cu} + P_{r,cu}$$

ผลรวมของการสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งหมด (Total Electrical loss)

$$P_{loss} = P_{cu, total} + P_{fe, total}$$

ประสิทธิภาพของ DFIG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{\text{DFIG}}(\%) = \frac{P_e - P_{\text{loss}}}{P_e} \times 100$$

ประสิทธิภาพของระบบ (system efficiency) จะต้องคำนึงถึงการสูญเสียที่คอนเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์และการสูญเสียที่คอนเวกเตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังสลลิป (Slip Power)

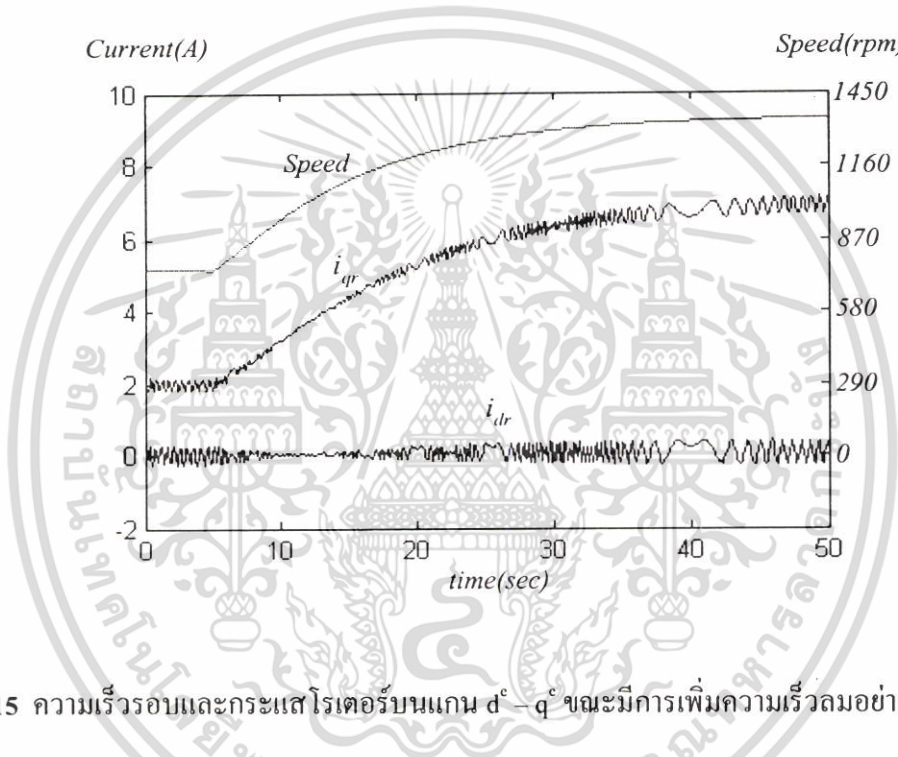
3.9 ผลการจำลองแบบ

ผลการจำลองแบบแสดงสมรรถนะการติดตามความเร็วออปติมัมขณะมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมทันทีทันใดของระบบควบคุม โดยทางอ้อมเปรียบเทียบกับระบบควบคุมโดยตรงของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนโดยจะผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับกริดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยทางด้านสเตเตอร์จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟขนาดแรงดันไฟฟ้า 380 V แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงควบคุมไว้ที่ 550 V กระแสสร้างกำลังไฟฟ้านี้อีกทีหนึ่งของคอนเวกเตอร์ด้านแหล่งจ่าย $i_q^* = 0$ เพื่อให้คอนเวกเตอร์ทำงานที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ $i_{dr}^* = 0$ เพื่อลดกำลังไฟฟ้านี้อีกทีที่ไหลผ่านคอนเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ทำให้ลดการสูญเสียที่คอนเวกเตอร์ลง

3.9.1 ผลการจำลองแบบการควบคุมความเร็วโดยทางอ้อม

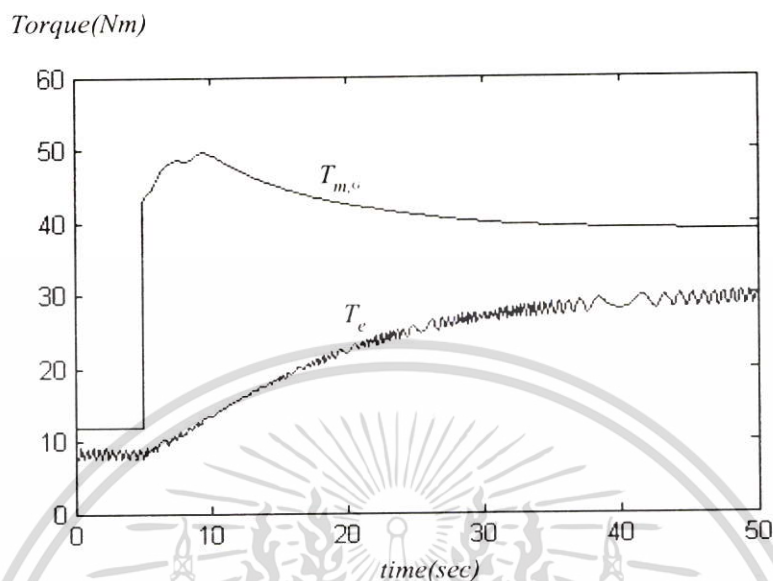
แสดงสมรรถนะในสภาวะชั่วคราวของระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางอ้อมที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ติดตามความเร็วออปติมัม โดยเริ่มต้นในสภาวะคงตัวกังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติมัมคือ 750 r.p.m. ที่ความเร็วลม $v = 5$ m/s ต่อมาที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจากความเร็วลม $v = 5$ m/s เป็น $v = 9$ m/s จากรูปที่ 3.15 แสดงกระแสที่โรเตอร์บนแกนหมุน $d^e - q^e$ และความเร็วรอบของกังหันลม (พิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) เริ่มต้นกังหันลมทำงานที่ความเร็วลม $v = 5$ m/s กังหันลมมีความเร็วเท่ากับความเร็วออปติมัมคือ 750 r.p.m. ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซัพซิง โครนัสที่ค่าสลลิป $s = 0.25$ ต่อมาที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 9 m/s กังหันลมจะเร่งความเร็วขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่แรงบิดเร่งมีค่าลดลง หลังจากเวลา $t = 45$ sec กังหันลมเริ่มจะมีความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วออปติมัม 1365 r.p.m. ซึ่งจะ

สอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดชูปเปอร์ซิงโครนัสมีค่าสลลิป $s = -0.365$ รูปที่ 3.16 แสดงการตอบสนองของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ซึ่งจะพบได้ในสมการที่(3.3.12) ในบทที่ 3 และแรงบิดทางกลของกังหันลม T_m จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นตามคุณลักษณะสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดทางกล C_t เทียบกับ λ ในรูปที่ 3.8 ในสภาวะคงตัวแรงบิดออปติ멈ที่ความเร็วลม $v = 5 \text{ m/s}$ และ $v = 9 \text{ m/s}$ มีค่าเท่ากับ $12 \text{ N} - \text{m}$ และ $39 \text{ N} - \text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งจะพบได้จากสมการที่ (3.4.12)

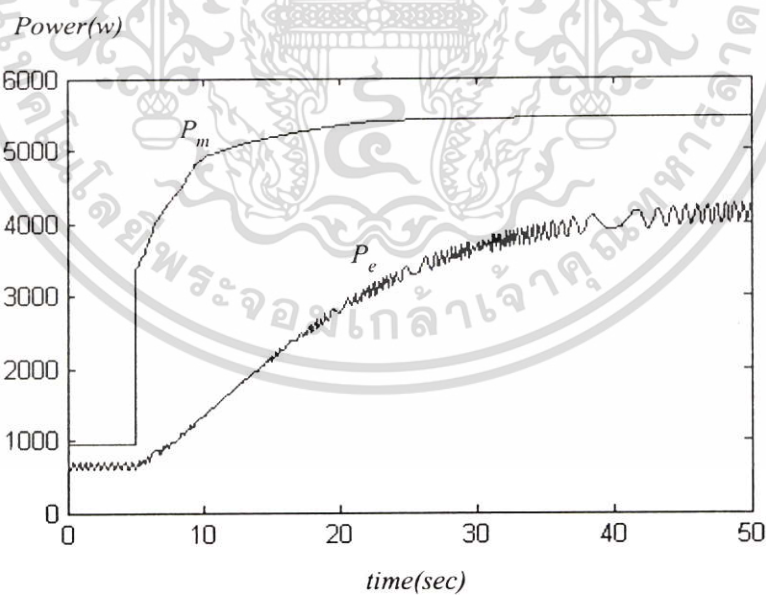


รูปที่ 3.15 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์บนแกน d-q ขณะมีการเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

รูปที่ 3.17 แสดงเส้นโค้งของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับการไฟฟ้า ($P_e = \omega_{m,c} * T_e$) และกำลังงานกลของกังหันลม P_m ความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_e กับกำลังงานกลของกังหันลม P_m ในสภาวะคงตัวจะเป็นการสูญเสียทางกลเนื่องจากความฝืดและแรงเสียดทานและจากรูปที่ 3.18 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง E และจากรูปที่ 3.19 แสดงกระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย i_d และ i_q

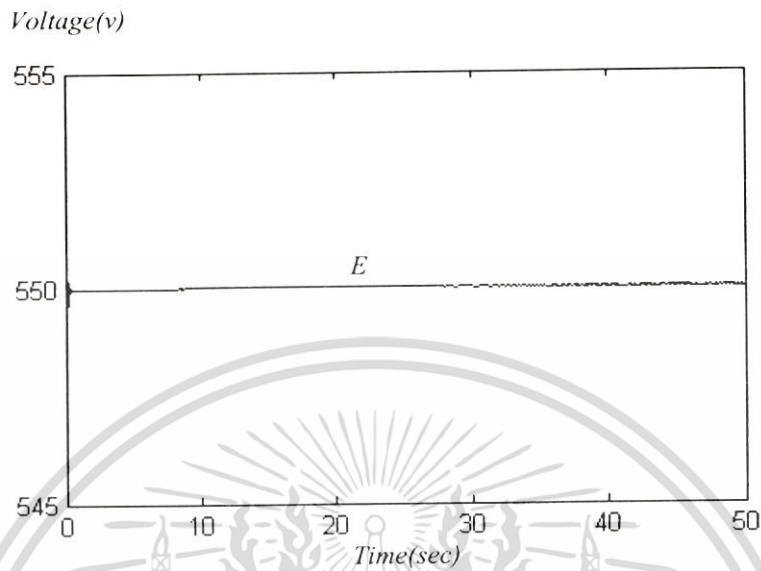


รูปที่ 3.16 แรงบิดทางกลและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมีการเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

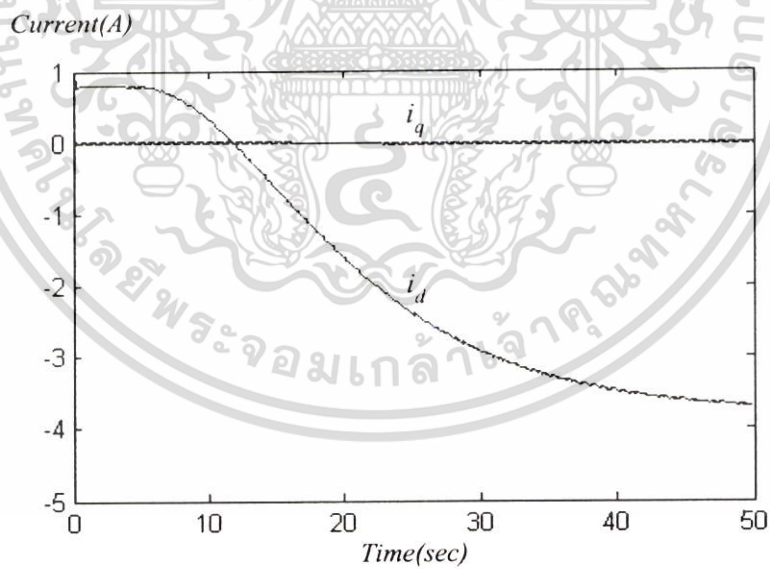


รูปที่ 3.17 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



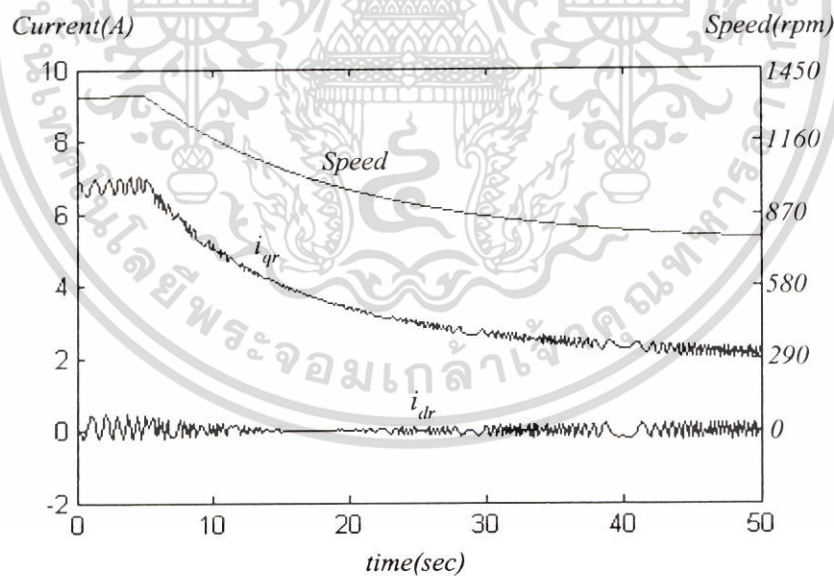
รูปที่ 3.18 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 3.19 กระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน d-q ขณะเพิ่มความเร็วลมทันทีทันใด

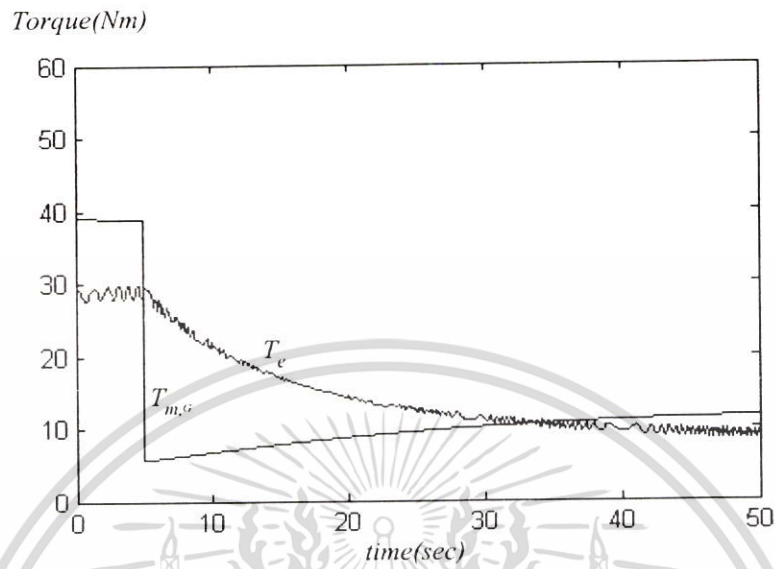
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียทางไฟฟ้าเนื่องจากการสูญเสียที่แกนเหล็กรวมกับการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำทางด้านโรเตอร์ และทางด้านสเตเตอร์ในทำนองเดียวกันสมรรถนะ ในการติดตามความเร็วออปติ้มของกังหันลมขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด จาก $v = 9$ m/s เป็น $v = 5$ m/s จากรูปที่ 3.20 แสดงการติดตามความเร็วออปติ้มของกังหันลมและกระแสโรเตอร์บนแกนอ้างอิง $d^e - q^e$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส เริ่มต้นกังหันลมทำงานที่ความเร็วลม $v = 9$ m/s กังหันลมมีความเร็วเท่ากับความเร็วออปติ้มคือ 1365 r.p.m. ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซูปเปอร์ซิงโครนัส มีค่าสลิป $S = -0.365$ ต่อมาที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมลดลงเหลือ 5 m/s ความเร็วของกังหันลมจะลดลงเนื่องจากเฉื่อยของกังหันลมเอง หลังจากเวลา $t = 40$ sec ความเร็วของกังหันลมเริ่มจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอยู่ในสภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่งนั่นหมายถึง ไม่มีแรงบิดแรงเกิดขึ้นในสภาวะคงตัวกังหันลมจะกลับมาทำงานที่ความเร็วออปติ้มค่าใหม่ คือ 750 r.p.m. ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซัพซิงโครนัส มีค่าสลิป $S = 0.25$ จากรูปที่ 3.23 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง E และจากรูปที่ 3.24 แสดงกระแสของคอนเวกเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย i_d และ i_q

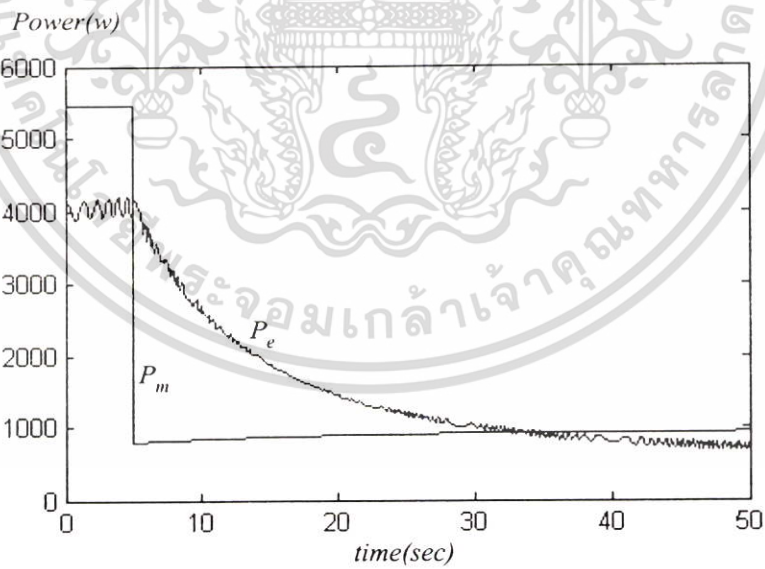


รูปที่ 3.20 ความเร็วรวมและกระแสโรเตอร์บนแกน $d^e - q^e$ ขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

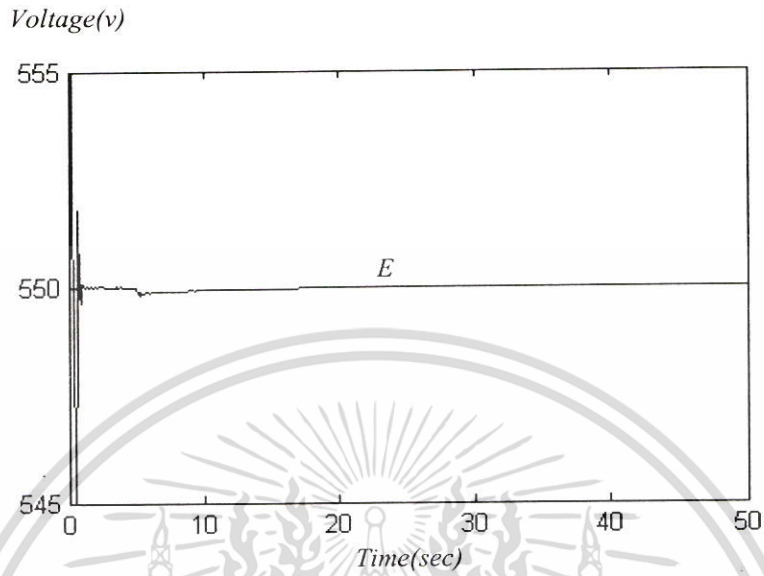


รูปที่ 3.21 แรงบิดทางกลและแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

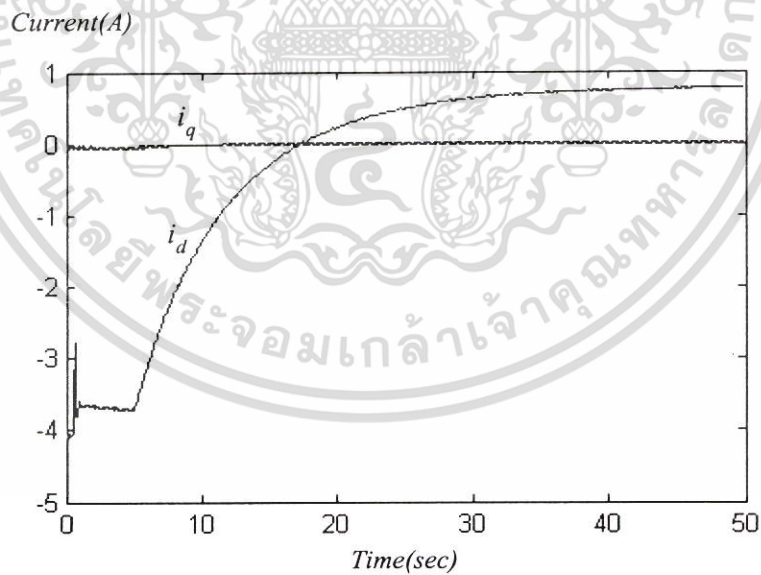


รูปที่ 3.22 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อม โยงขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด



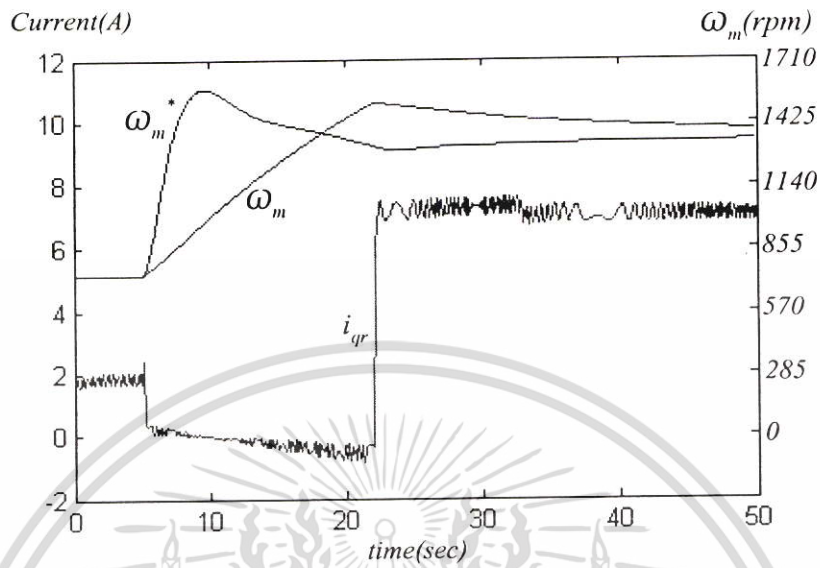
รูปที่ 3.24 กระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน d-q ขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

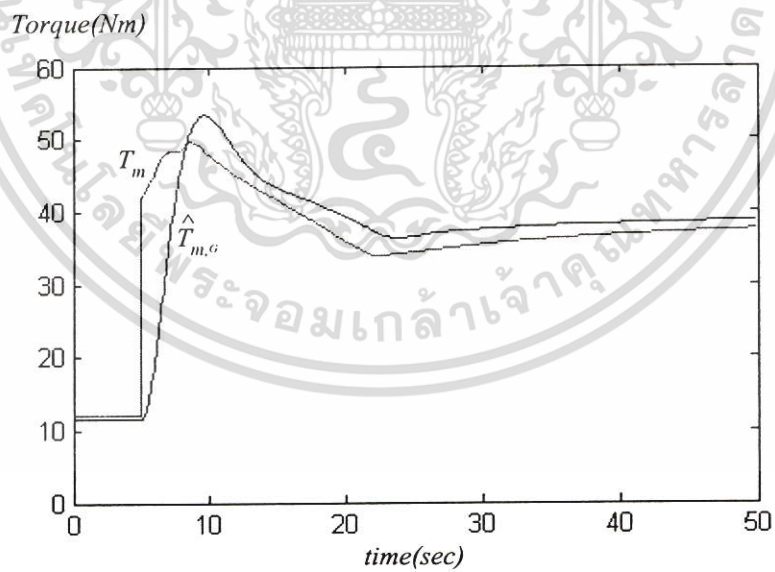
รูปที่ 3.21 แสดงแรงบิดที่เกิดขึ้นของกันหันลม T_m และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้การควบคุม เวกเตอร์ฟลัก รูปที่ 3.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าของกันหันลม P_m และกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_e ขณะที่ความเร็วลมลดลง

3.9.2 ผลการจำลองแบบการควบคุมความเร็วโดยตรง

แสดงสมรรถนะในสภาวะชั่วคราวในการติดตามความเร็วออปติ멈ของกันหันลมของระบบควบคุมความเร็วของกันหันลมแบบทางตรงที่ใช้ ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด จาก $v = 5$ m/s เป็น $v = 9$ m/s จากรูปที่ 3.25 แสดงกระแสสร้างแรงบิดของโรเตอร์ บนแกนอ้างอิง $d^e - q^e$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงโครนัส i_{qr} และค่าความเร็วรอบคำสั่งของกันหันลม $\omega_{m,G}^*$ เปรียบเทียบกับความเร็วจริงของกันหันลม $\omega_{m,G}$ ที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 9 m/s กระแส i_{qr} มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งเท่ากับค่าลิมิตของกระแสของตัวควบคุม PI เหตุผลก็คือต้องการลดค่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ให้มีค่าต่ำสุดเพื่อต้องการให้แรงบิดเร่งมีค่าสูงขึ้น ทำให้ผลตอบสนองของความเร็วสูงกว่าการควบคุมแบบทางอ้อมโดยมีค่าน้อยกว่า 35 sec เนื่องจากสามารถควบคุมแรงบิดเร่งได้ตามต้องการโดยการควบคุมกระแสคำสั่งสร้างแรงบิดทางด้าน โรเตอร์ i_{qr}^* จากรูปที่ 3.26 แสดงการประเมินค่าแรงบิดทางกล $T_{m,G}$ เปรียบเทียบกับแรงบิดจริง $T_{m,G}$ ของกันหันลม จากรูปที่ 3.27 แสดงกำลังงานกลของกันหันลมและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_e จากรูปที่ 3.28 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อม โยง E และจากรูปที่ 3.29 แสดงกระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย i_d และ i_q

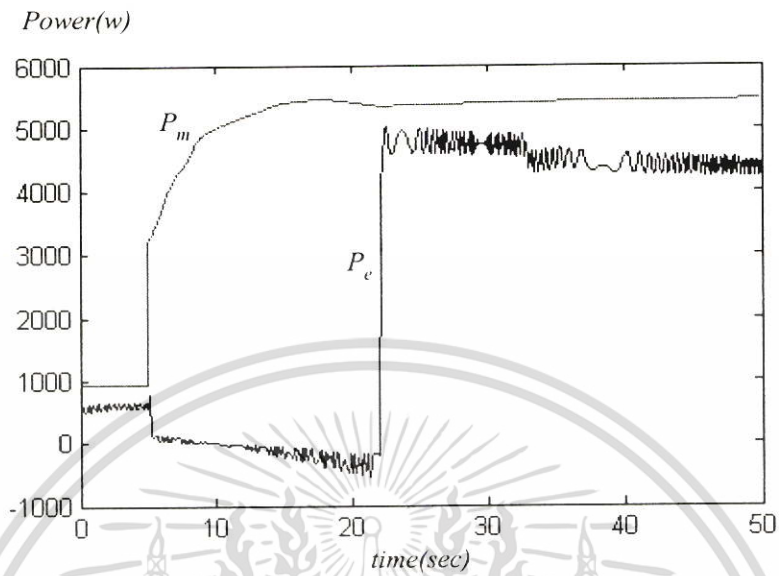


รูปที่ 3.25 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

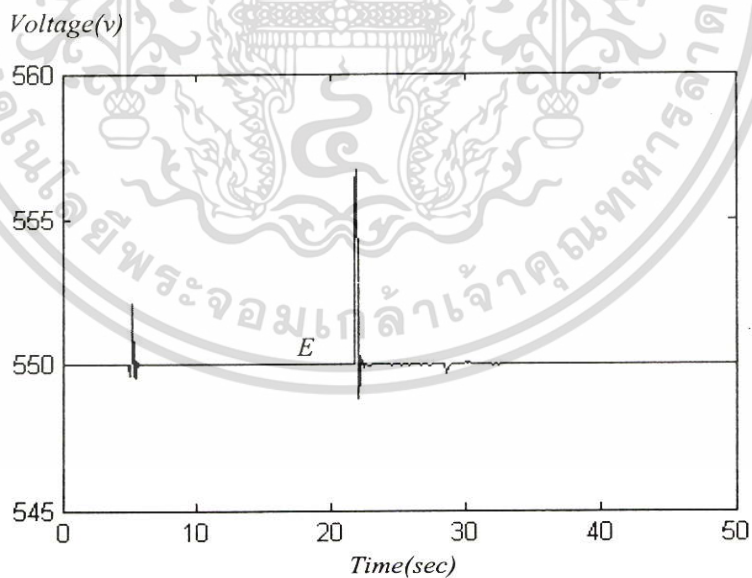


รูปที่ 3.26 การประเมินค่าแรงบิดทางกลขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

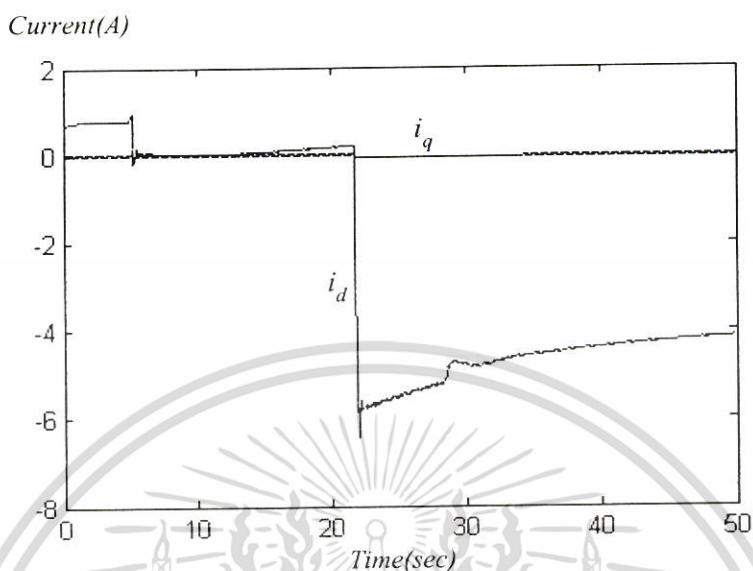


รูปที่ 3.27 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด



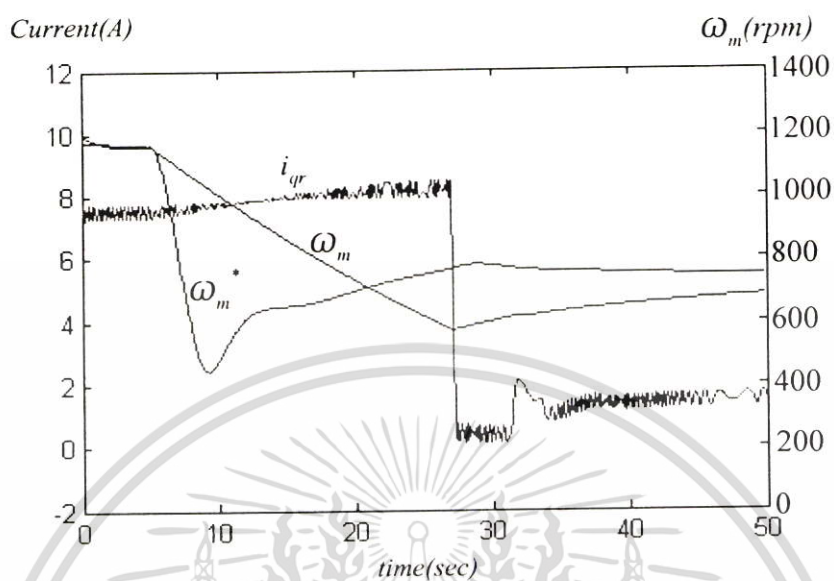
รูปที่ 3.28 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

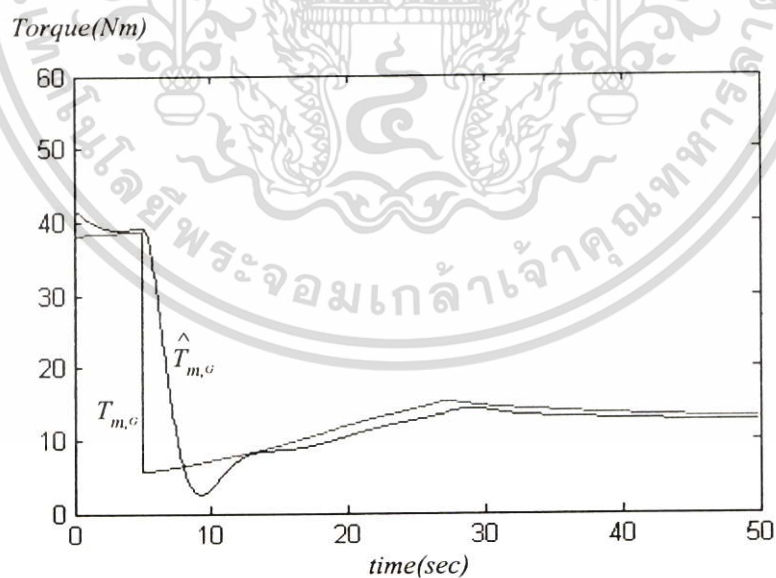


รูปที่ 3.29 กระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน d-q ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

สมรรถนะในการติดตามความเร็วออปติ่ม ของกังหันลมขณะที่ความเร็วลมลดลงอย่างทันทีทันใดจาก $v = 9 \text{ m/s}$ เป็น $v = 5 \text{ m/s}$ ที่เวลา $t = 5 \text{ sec}$ ในรูปที่ 3.30 แสดงผลตอบสนองของความเร็วรอบของกังหันลม $\omega_{m,G}$ ที่มีต่อค่าความเร็วคำสั่ง $\omega_{m,G}^*$ เมื่อต้องการให้กังหันลมเข้าสู่สภาวะคงตัวอย่างรวดเร็ว หรือลดความเร็วลงอย่างรวดเร็วขณะที่ความเร็วลมลดลง เนื่องจากแรงเฉื่อยของตัวกังหันลมเองแล้วสิ่งที่จะช่วยให้กังหันลมลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว ก็คือการ ควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าสูงๆ โดยการควบคุมกระแสสร้างแรงบิดบนโรเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ทำให้กระแสสร้างแรงบิดทางด้านโรเตอร์ i_{qr} มีค่าสูงเท่ากับค่าลิมิตของตัวควบคุม PI ในช่วงที่ความเร็วลมลดลงทำให้กังหันลมลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาน้อยกว่า 30 sec จากรูปที่ 3.31 แสดงการประเมินค่าแรงบิดทางกล $T_{m,G}$ ที่มีการป้อนกลับของค่าความผิดพลาดในการประเมินค่าความเร็วรอบเปรียบเทียบกับแรงบิดทางกล $T_{m,G}$ ของกังหันลมขณะที่ความเร็วลมลดลงจากรูปที่ 3.32 เป็นการกำหนดกำลังงานกลของกังหันลมกับกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะสอดคล้องกับแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า $P_e = \omega_{m,G} T_e$ จากรูปที่ 3.33 แสดงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง E และจากรูปที่ 3.34 แสดงกระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย i_d และ i_q

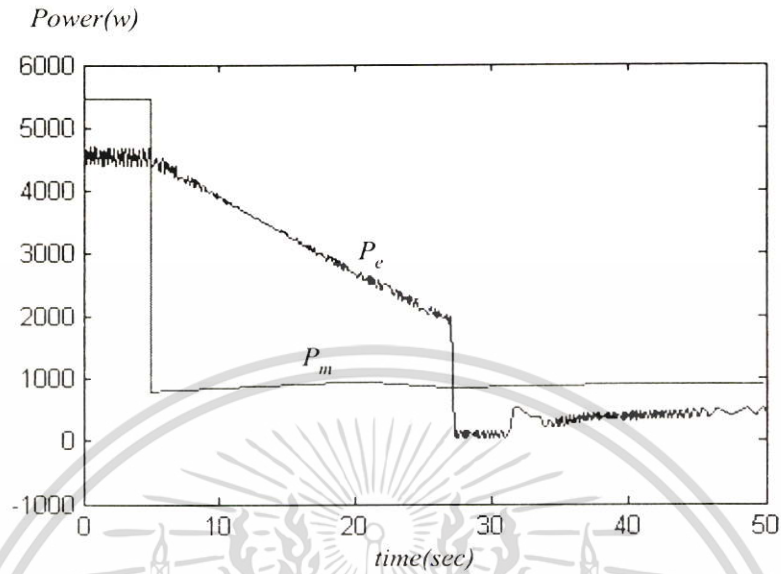


รูปที่ 3.30 ความเร็วรอบและกระแสโรเตอร์ขณะลดความเร็วลงอย่างทันทีทันใด

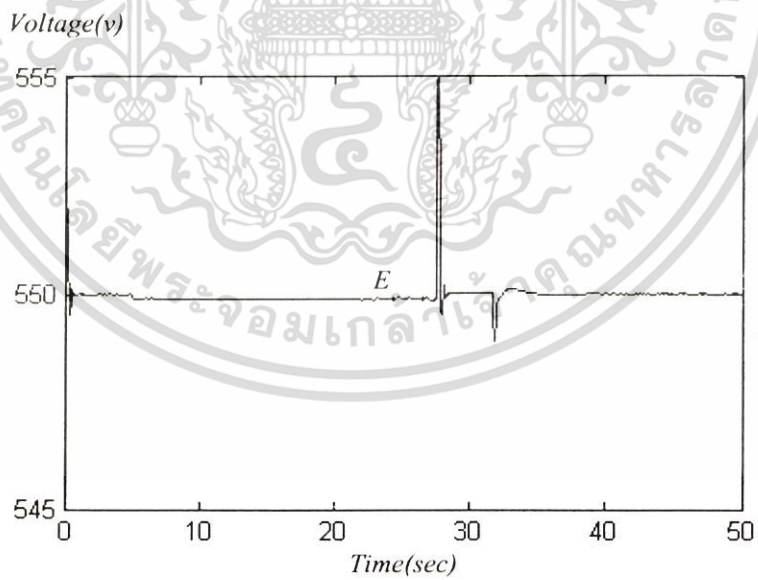


รูปที่ 3.31 แรงบิดทางกลขณะลดความเร็วลงอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

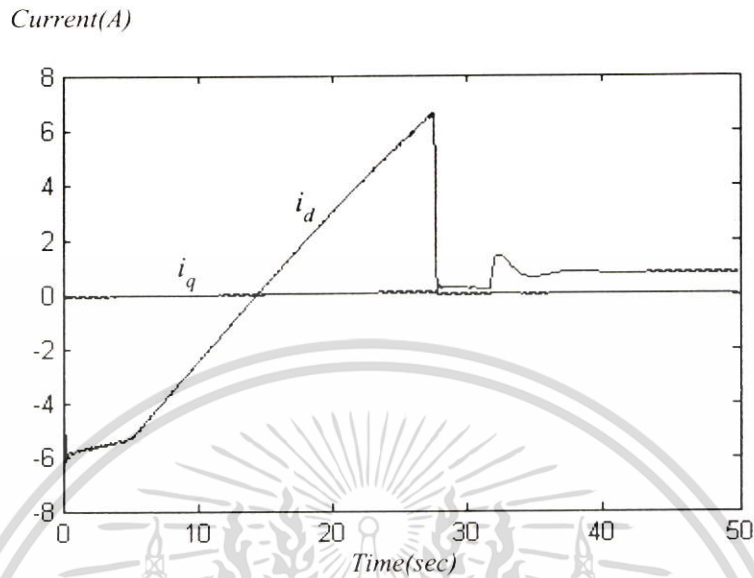


รูปที่ 3.32 กำลังงานกลและกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าขณะลดความเร็วลงอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 3.33 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะลดความเร็วลงอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 กระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน d-q ขณะลดความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

3.10 สรุปผลการจำลองแบบ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกังหันลม โดยทางด้านสเตเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายไฟที่มีความถี่ไฟฟ้าและขนาดของแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ จะมีขนาดของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศคงที่และมีกระแสแมกนีไทซ์ซึ่ง i_{ms} มีค่าคงที่ด้วย ซึ่งกระแสนี้จะประกอบด้วยกระแส 2 ส่วนคือ กระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียสทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ทั้งในโหมดซบซิง โครนัสและโหมดชูปเปอร์ซิง โครนัสซึ่งจะสอดคล้องกับความเร็วลมกล่าวคือ เมื่อความเร็วลมต่ำกว่า 7 m/s เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานในโหมดซบซิง โครนัสกำลังสลิบจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อความเร็วลมสูงกว่า 7 m/s เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานในโหมดชูปเปอร์ซิง โครนัสกำลังสลิบจะไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟโดยผ่านทางวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้เทคนิคการควบคุม เวกเตอร์ฟลักซ์จากผลการจำลองแบบแสดงถึงสมรรถนะที่ดีและมีผลตอบสนองต่อสภาวะชั่วครู่ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใด การควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออปติ멈ใน

สภาวะชั่วคราวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใดจะใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วแบบทางตรงและเทคนิคการควบคุมความเร็วแบบทางอ้อมจากผลการจำลองแบบจะเห็นได้ว่าในสภาวะคงตัวกังหันลมจะทำงานที่จุดออกพิติมัมเสมอไม่ว่าความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตามซึ่งแสดงให้เห็นถึงการติดตามความเร็วออกพิติมัมของกังหันลม ส่วนที่แตกต่างกันของระบบควบคุมทั้ง 2 โหมดก็คือผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวกล่าวคือ การควบคุมแบบทางตรงจะให้ผลตอบสนองของความเร็วเร็วกว่าการควบคุมแบบทางอ้อมแต่การกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอในขณะที่การควบคุมแบบทางอ้อมมีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอหรือเรียกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้น 2 ทางโดยใช้ กังหันลมเป็นตัวขับ เคลื่อนแบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง

4.1 บทนำ

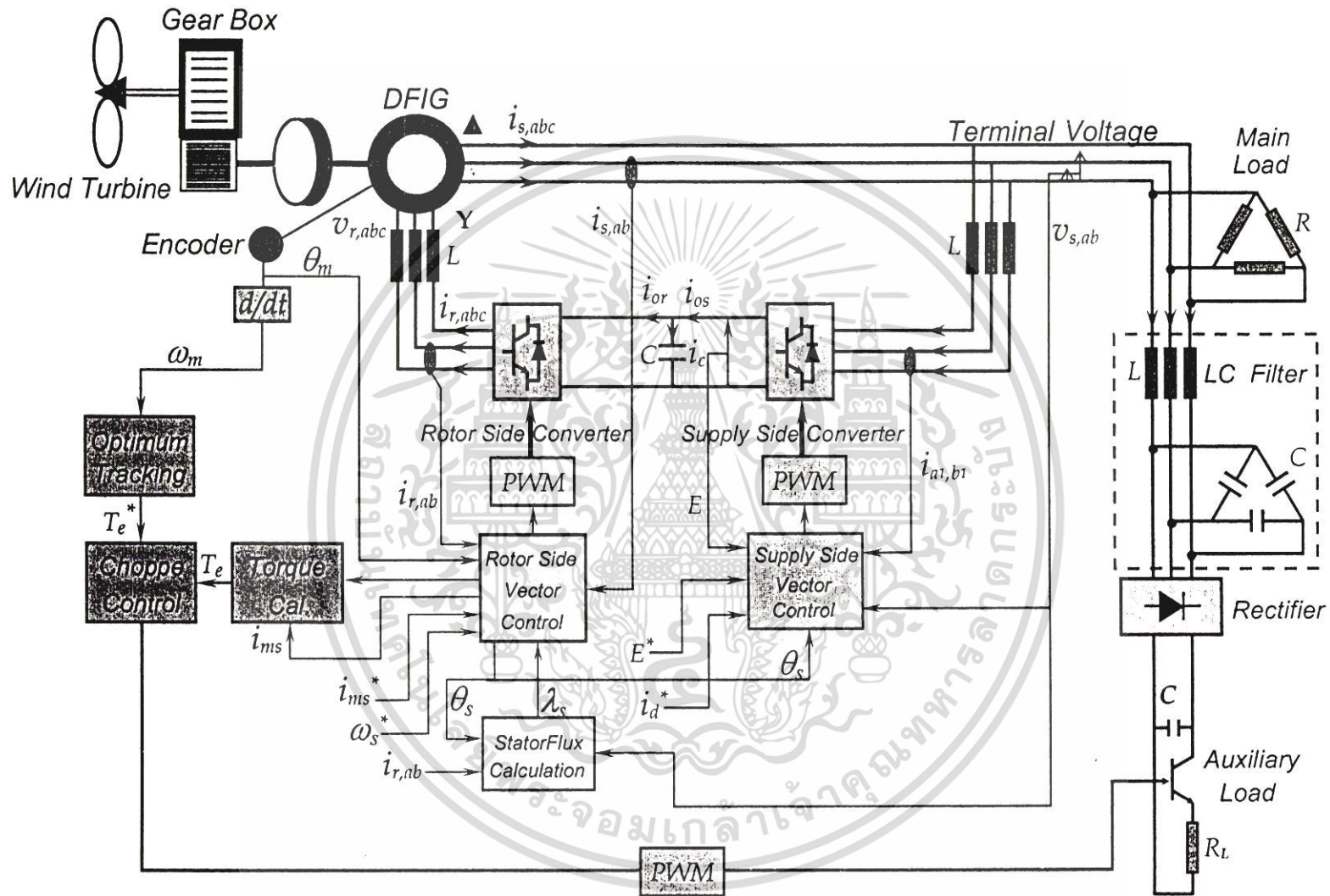
คุณลักษณะเด่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทางโดยที่ทางด้านสเตเตอร์ จะถูกต่อโดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่มีแรงดันและความถี่ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ โดยที่ความเร็วรอบ ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ จึงมีความเหมาะสมกับเครื่องกำเนิดกำลังที่เป็นกังหันลมที่มีความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลม ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง ซึ่งในเครื่องจักรไฟฟ้า ชนิดซิงโครนัส ทำไม่ได้การควบคุมความถี่และแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ ของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบกระตุ้น 2 ทางโดยใช้กังหันลม เป็นตัวขับเคลื่อนแบบที่ทำงานได้ด้วยตนเอง (Stand Alone Double Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine) หรือเรียกย่อๆว่า SADFIG จะใช้เทคนิคการควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ โดยใช้คอนเวอเตอร์แบบพีดีดับลิวเอ็ม (PWM Converter) เนื่องจากมีค่าความผิดเพี้ยนของกระแสต่ำ (Low distortion Current) ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงาน ในโหมดซิงโครนัส และโหมดซูปเปอร์ซิงโครนัส ซึ่งระบบการควบคุมของ SADFIG จะยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าของระบบ GCDFIG เนื่องจากต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้า ที่ขั้ว และความถี่ไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ให้มีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังต้องมีการควบคุม การไหลของกำลังระหว่างกังหันลมไปสู่โหลด เพื่อให้กังหันลมทำงานที่จุดออกพิกัด

ในบทนี้จะทำการจำลองแบบระบบควบคุมเวกเตอร์ สำหรับปรับความเร็วรอบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยที่ทางด้านสเตเตอร์ ถูกแยกออกจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส ซึ่งจะใช้เทคนิคการควบคุมฟลักซ์ ที่สเตเตอร์ แบบทางอ้อม (Indirect Stator Flux Control) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมฟลักซ์ ที่โรเตอร์แบบทางอ้อม (Indirect Rotor Flux Control) มีความคล้ายคลึงกันตรงที่ เป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิด โดยใช้กระแสโรเตอร์บนแกน d^s สร้าง ฟลักซ์สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ให้มีค่าคงที่และใช้กระแสโรเตอร์บนแกน q^s สร้าง

แรงบิดสำหรับ ควบคุมความเร็วของกังหันลม เพื่อทำให้เกิดกำลังงานกลสูงสุดจากกังหันลมไปยังโหลด ซึ่งต้องอาศัยโหลดช่วย (Auxiliary Load) ซึ่งต่อขนานอยู่กับโหลด ของผู้ใช้ไฟหรือโหลดหลัก (Main Load) โดยที่โหลดช่วยจะทำหน้าที่ควบคุม กำลังไฟฟ้า โดยใช้การควบคุมแบบช้อปเปอร์ (Chopper Control) สำหรับควบคุมให้กังหันลมทำงานที่จุดออปติ멈 ในกรณีที่ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า ของผู้ใช้ไฟมีปริมาณต่ำกว่ากำลัง งานกลสูงสุดของกังหันลมที่ผลิตได้ที่จุดออปติ멈 กำลังไฟฟ้าที่เหลือจากการใช้ นี้ จะถูกสลายไปที่ Auxiliary Load ในรูปของความร้อนจนหมด ผลการจำลองแบบแสดง สมรรถนะ การควบคุม ความเร็ว โดยอาศัยเทคนิคการควบคุม เวกเตอร์ฟลักซ์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม ในโหมดขับซิงโครนัสและโหมดชูปเปอร์ซิงโครนัสในสภาวะคงตัว สมรรถนะการติดตามความเร็ว ออปติ멈ของกังหันลม ภายใต้การควบคุมของโหลดช่วย ขณะความเร็ว ลมเปลี่ยนแปลง อย่างทันทีทันใดและผลตอบสนองของความถี่ และแรงดันเข้าพุท เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงโหลด และความเร็วรอบของกังหันลมในสภาวะชั่วคราว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ระบบขับเคลื่อน DFIG ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมแบบทำงานด้วยตนเอง

4.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง ที่ทำงานได้ด้วยตนเอง

ระบบขับเคลื่อนของ SADFIG ด้วยกังหันลม จะต้องควบคุมความถี่ และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ ให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา เพื่อนำมาจ่ายโหลด โดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงความเร็วรอบ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะแตกต่างจากระบบขับเคลื่อนแบบ GCDFIG ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ลูฟ ควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ และความถี่ เนื่องจากต่อกับแหล่งจ่าย ที่มีแรงดันไฟฟ้า และความถี่คงที่ อยู่แล้ว พิจารณาสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง ในแกนอ้างอิง $d^e - q^e$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส และกำหนดให้เวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ ขึ้นในแนวเดียวกันกับแกน d^e และกำหนดให้ $\lambda_{qs} = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดันไฟฟ้า, และฟลักซ์ดังนี้ [1, 2, 9]

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_o i_{dr} = L_m i_{ms} \quad (4.2.1)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_o i_{qr} = 0 \quad (4.2.2)$$

$$\lambda_{dr} = L_o i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (4.2.3)$$

$$\lambda_{qr} = L_o i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (4.2.4)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (4.2.5)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (4.2.6)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (4.2.7)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (4.2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ ดังกล่าวจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสสร้างแรงบิดทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์ ดังนี้

$$i_{qr} = -\frac{L_s}{L_o} i_{qs} \quad (4.2.9)$$

จากสมการที่ (4.2.5) ถ้าไม่คิด แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมค่าความต้านทานทางด้าน สเตเตอร์ แล้ว การควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ ทำได้โดยการควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ในแกน d^e คือ λ_{ds} ให้มีค่าคงที่ เนื่องจาก $\lambda_{qs} = 0$ จากสมการที่ (4.2.5) เขียนความสัมพันธ์ได้ใหม่ดังนี้

$$T_{ms} \frac{d i_{ms}}{dt} + i_{ms} = i_{dr} + \frac{1 + \sigma_s}{R_s} U_{ds} \quad (4.2.10)$$

เมื่อ

$$\sigma_s = \frac{L_s - L_m}{L_m} \quad T_{ms} = \frac{L_s}{R_s}$$

และ

$$T_{ms} i_{ms} \omega_s = i_{qr} + \frac{1 + \sigma_s}{R_s} U_{qs} \quad (4.2.11)$$

จากสมการที่(4.2.10)ค่าของส่วนประกอบเทอมของ U_{ds} มีค่าน้อยมาก ดังนั้นการควบคุมกระแสแกนไคซิง i_{ms} ให้มีค่าคงที่ทำได้โดยการควบคุมกระแสกระตุ้นทางด้านโรเตอร์ i_{dr} ส่วนค่าของกระแสคำสั่งสร้างแรงบิด ทางด้านโรเตอร์จะพบได้ดังนี้

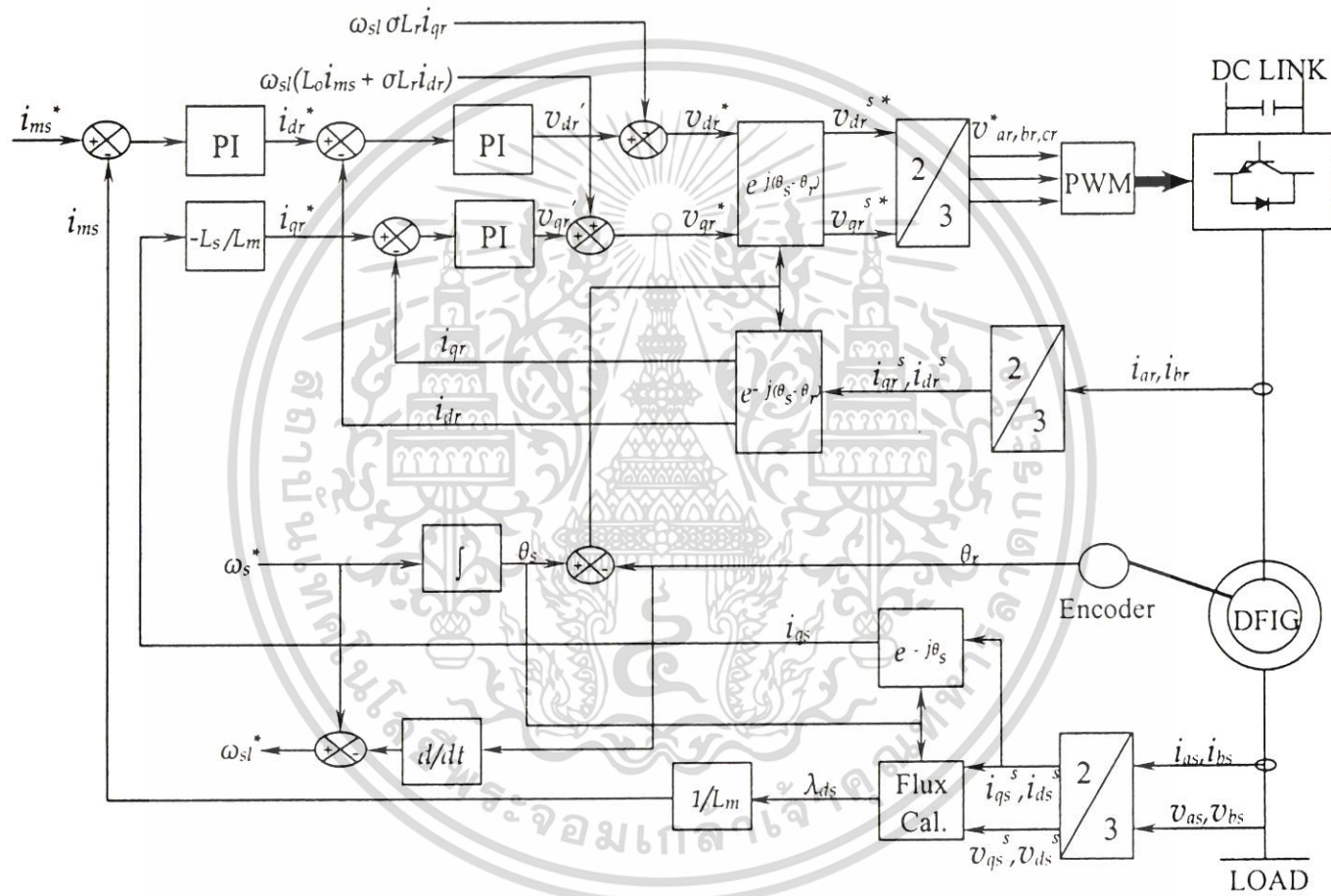
$$i_{qr}^* = -\frac{L_s}{L_o} i_{qs} \quad (4.2.12)$$

จากสมการที่ (4.2.12) พอจะกล่าวได้ว่าฟลักซ์ที่สเตเตอร์ในแกน q เท่ากับศูนย์ หรือ $\lambda_{qs} = 0$ เมื่อกระแสจริง i_{qr} ติดตามค่ากระแสคำสั่ง i_{qr}^* ได้ทันทั่วทั้งที่ภายใต้การควบคุมที่รวดเร็ว ความสัมพันธ์ของกระแสสร้างแรงบิดบนโรเตอร์กับกระแสสร้างแรงบิดที่สเตเตอร์ตามสมการที่ (4.2.12) ไม่ได้มาจากการอินทิเกรตหาค่าแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์จากการวัดค่า แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟอย่างเช่นระบบของ GCMDFIG อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามาจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแต่ตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ ได้มาจากการอินทิเกรตค่าความเร็วคำสั่งของ ω_s^* (50 Hz) ซึ่งกำหนด

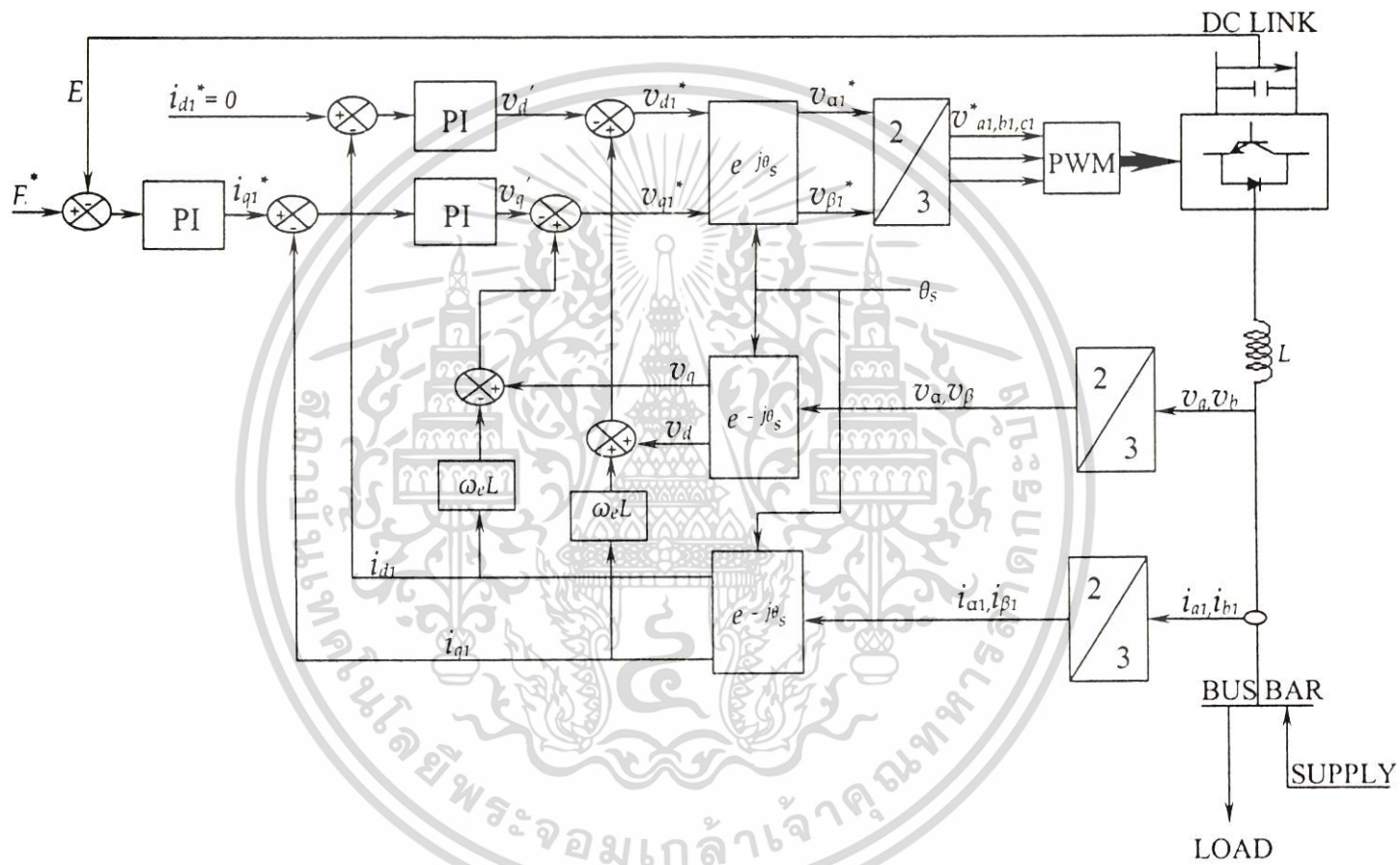
ได้อย่างอิสระจึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของระบบ SADFIG แต่ข้อเสียของระบบ SADFIG เมื่อใช้คอนเวอเตอร์ควบคุมโหลดช่วยภาคอินพุทของโหลดช่วยจะเป็น วงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งใช้ไดโอดจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์สูงถึงแม้ว่าจะใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกส์แบบ LC (LC Filter) ซึ่งจะช่วยลดฮาร์โมนิกส์ได้บ้าง อย่างไรก็ตามจะมีฮาร์โมนิกส์หลงเหลืออยู่ และจะมีผลกระทบต่อสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ทำให้มีฮาร์โมนิกส์ปะปนมาด้วย การควบคุมแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ SADFIG ในสภาวะชั่วคราว ไม่สามารถกำหนดค่าของกระแสสร้างแรงบิด i_{qr}^* ได้อย่างที่ตั้งใจทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระแสสร้างแรงบิดทางด้านสเตเตอร์ i_{qs} ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมของโหลดช่วยดังนั้น สมรรถนะ ในสภาวะชั่วคราวจะขึ้นอยู่กับสมรรถนะของระบบการควบคุมโหลดช่วยเป็นหลักถือคือไดอะแกรม ของระบบควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ของระบบขับเคลื่อน SADFIG แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2(ก) การควบคุมเวกเตอร์ของ SADFIC



รูปที่ 4.2 (ข) การควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ

4.3 ลูฟการควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

การควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ โดยการควบคุมขนาดของกระแสแมกนีไตซิ่ง (Magnetising current) i_{ms} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ที่สเตเตอร์ดังนี้

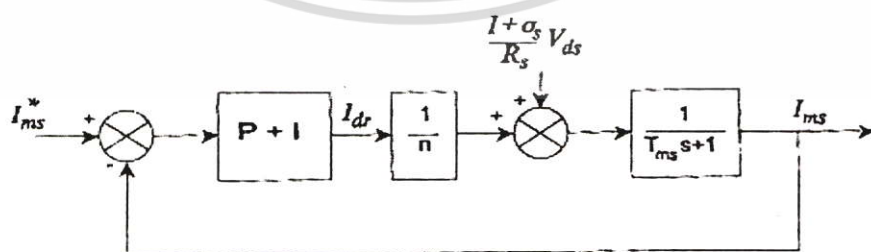
$$i_{ms} = \frac{\lambda_{ds}}{L_o} \quad (4.3.1)$$

เมื่อ $\lambda_{ds} = \lambda_{ds}^s \cos \theta_s + \lambda_{qs}^s \sin \theta_s \quad (4.3.2)$

$$\lambda_{ds}^s = \int (V_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt \quad (4.3.3)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (V_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt \quad (4.3.4)$$

เมื่อสัญลักษณ์ s แทนแกนอ้างอิงบนแกนนิ่ง (stationary Frame) และมุม θ_s แทนตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ค่าความต้องการของกระแสคำสั่ง i_{ms}^* ได้รับจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (no load test) ส่วนลูฟการควบคุมจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) สัญญาณอินพุทของตัวควบคุมแบบพีไอจะรับมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส i_{ms} และเอาพุทของตัวควบคุมพีไอจะเป็นกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr}^* ลูฟของการควบคุมกระแสแมกนีไตซิ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยที่ n คืออัตราส่วนของจำนวนรอบสเตเตอร์ต่อจำนวนรอบของขดลวดโรเตอร์



รูปที่ 4.3 ลูฟการควบคุมกระแสแมกนีไตซิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ v_{ds} มีผลกระทบต่อขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของสเตเตอร์น้อยมาก ซึ่ง ส่วนประกอบของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วส่วนใหญ่จะเป็น v_{qs} ซึ่งจะเห็นได้จากสมการที่ (4.2.6) และจะสามารถคำนวณหาค่ากระแสแมกนีไทซ์คำสั่ง i_{ms}^* เพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ สเตเตอร์ตามที่ต้องการ ได้จากสมการที่ (4.2.1)

4.3.1 หลักการทำงานและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของ SADFIC

เริ่มต้นเราป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ $f_r = \omega_{sl} / 2\pi$ เข้าทางด้านโรเตอร์เพื่อ กระตุ้นให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ทางด้านโรเตอร์ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega_{sl} + \omega_r$ สนามแม่เหล็ก หมุนนี้จะตัดกับขดลวดทางด้านสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์โดย มีความถี่เท่ากับ $f_s = (\omega_{sl} + \omega_r) / 2\pi$ โดยที่ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ λ_m (air gap Flux) พิจารณาวงจรสมมูลย์เทียบเท่ากับแกน $d^e - q^e$ ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ได้ต่อโหลด (no load) จะมีกระแสไหลเข้าทางด้านโรเตอร์โดย ผ่านสลีปรिंग (slip ring) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} ส่วนที่เหลือเพียง เล็กน้อยจะเป็นกระแสสร้างการสูญเสียที่แกนเหล็ก i_{qr} (core loss) ส่วนกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านส เตเตอร์ $i_{ds} = 0$ และกระแสสร้างแรงบิดทางด้านสเตเตอร์ $i_{qs} = 0$ เมื่อต่อโหลดให้กับเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าทำให้มีกระแสไหลเข้าสู่โหลดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับว่ากระแสไฟที่จ่ายไปยังโหลดนั้นมีขนาดมากน้อยเท่าไรและลักษณะของโหลดไฟฟ้านำมา ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีตัวประกอบกำลัง (power factor) เป็นอย่างไรการเปลี่ยนแปลงของ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วที่กล่าวมานี้มีสาเหตุอันเนื่องมาจาก 3 ประการคือ

(ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมอยู่ที่ความต้านทานทางด้านโรเตอร์ R_r และทางด้านสเตเตอร์ R_s

เมื่อมีกระแสไหลผ่านค่าความต้านทานจะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวต้านทานตามกฎของ โอห์ม iR มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง (voltage drop) แต่อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม ค่าความต้านทานจะมีค่าน้อยมากทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบ กับอีก 2 สาเหตุ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมอยู่ที่คาร์แอ็คแตนซ์รั่วไหล (leakage reactance) ทางด้านโรเตอร์ x_{lr} และทางด้านสเตเตอร์ x_{ls}

จากวงจรสมมูลย์เทียบเท่าบนแกนนิ่ง $d^s - q^s$ (stationary Frame) ในรูปที่ 3.3 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมและค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์จะมีค่าคงที่และความถี่ไฟทางด้านโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าความถี่ไฟทางด้านสเตเตอร์ ดังนั้นคาร์แอ็คแตนซ์รั่วไหล

$$X_{ls} = 2\pi f_s L_{ls}$$

$$X_{lr} = 2\pi f_s L_{lr}$$

สาเหตุการรั่วซึมของฟลักซ์ อันเนื่องมาจากการพันขดลวดและจากการที่กระแสไหลผ่านขดลวดของอาร์มาเจอร์ แล้วทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ของกระแส นั้น ๆ โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้ไม่มีประโยชน์ที่จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นกับตัวนำของขดลวดชุดอื่น ๆ เลยเส้นแรงแม่เหล็กนี้แม้ว่าจะข้ามช่องว่างอากาศ (air gap) ระหว่างตัวหมุน (rotor) กับตัวอยู่กับที่ (stator) ได้แต่ก็ไม่ได้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดชุดอื่นเลย ยกเว้นแต่ตัวมันเองเท่านั้นที่มีการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมา แต่มันก็มีแฉงทางเดิน (path) ของเส้นแรงแม่เหล็กกรอบอยู่ในตัวของมันเองอยู่แล้ว ค่าของเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลไปนี้ (leakage Flux) ขึ้นอยู่กับกระแส i และมุมของเฟส (phase angle) ระหว่าง i กับ v ที่ชั่วเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วซึมนี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในตัวของมันเอง (Reactance E.M.F) โดยเกิดขึ้นก่อนไปเป็นมุม 90 องศาไฟฟ้า ดังนั้นจึงเรียกรวมแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ว่าแรงเคลื่อนโต้กลับซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมขึ้นในอาร์มาเจอร์ จึงทำให้ลดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ชั่วจริง ๆ ลดน้อยลงไปด้วยค่า ix_l

(ค) สาเหตุอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของอาร์มาเจอร์ (Armature Reaction)

การเกิดการโต้กลับของอาร์มาเจอรันั้นเกิดจากการไหลของกระแสผ่านขดลวดตัวนำในขดลวดอาร์มาเจอร์ของสเตเตอร์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กขึ้นเป็นจำนวนแอมปี-เทอรอนอีกจำนวนหนึ่งซึ่งเป็นลูกคลื่นไซน์ทำให้เกิดฟลักซ์ขึ้นมาอีกจำนวนหนึ่งนอกเหนือจากฟลักซ์ขณะไม่มีโหลดฟลักซ์ที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะไปทำปฏิกิริยากับฟลักซ์เดิมขณะไม่มีโหลดลักษณะของการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประกอบกำลังของโหลดที่นำมาต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งชนิดของโหลดออกได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้ โหลดเป็นค่าความต้านทานอย่างเดี่ยว (pure Resistor load) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง, โหลดเป็นค่าความเหนี่ยวนำอย่างเดียว (pure inductor load) มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นศูนย์ชนิดตามหลังและแบบที่เป็นค่าความจุอย่างเดียว (pure capacitor load) มีตัวประกอบกำลังเป็นศูนย์ชนิดนำหน้า เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะใช้วงจรสมมูลย์เทียบเท่าในแกน $d^e - q^e$ อธิบายปรากฏการณ์ปฏิกริยาของอาร์มาเจอร์เนื่องจากจะสามารถแยกส่วนประกอบของกระแสสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศกับกระแสสร้างแรงบิด ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่ากระแสที่ไหลเข้าค่าความเหนี่ยวนำรวม L_m จะเป็นกระแสที่ใช้สร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (air gap flux) ในระบบควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตเตอร์ $\lambda_{qs} = 0$ ดังนั้นกระแสที่ไหลเข้าค่าความเหนี่ยวนำรวม L_m ในแกน q^e จะเป็นกระแสสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ สำหรับหักล้างกับค่าฟลักซ์รั่วไหลทางด้านสเตเตอร์แต่จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสสร้างฟลักซ์ในแกน d^e ดังนั้นฟลักซ์ในช่องว่างอากาศที่นำมาใช้งานจะเกิดจากกระแสสร้างฟลักซ์ i_{ms} ซึ่งเป็นกระแสสร้างฟลักซ์ในแกน d^e ซึ่งประกอบด้วยกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้ว (terminal voltage) จึงขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ i_{ms} ถ้าไม่คิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหลจะได้ว่า

$$V_{terminal} \sim i_{ms} \quad (\omega_s = \text{Constant})$$

$$i_{ms} = \frac{L_s i_{ds} + L_o i_{dr}}{L_m}$$

กรณีที่ 1 เมื่อโหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียวจะมีกระแสสร้างแรงบิด i_{qs} ไหลเข้าสู่โหลดกระแสหนึ่งจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก $i_{qs}N_s$ และสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาจำนวนหนึ่งและจะไปเหนี่ยวนำทางด้านโรเตอร์ทำให้เกิดกระแสสร้างแรงบิด i_{qr} ขึ้นทางด้านโรเตอร์และจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก $i_{qr}N_r$ และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก $i_{qs}N_s$ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้จะหักล้างกันหมดไป ทำให้สนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศขณะไม่มีโหลดยังมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานอย่างเดียวจึงไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

กรณีที่ 2 เมื่อโหลดเป็นความเหนี่ยวนำอย่างเดียวจะมีกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} ไหลเข้าสู่โหลดกระแส i_{ds} ในสมการที่ 1 จะมีค่าเป็นลบและจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก $-i_{ds}N_s$ จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา โดยมีทิศทางหักล้างกับสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศขณะไม่มีโหลดทำให้กระแสสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ i_{ms} และผลรวมของสนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วลดลง ถ้าต้องการ รักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้คงที่ ต้องเพิ่มกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} เพื่อสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศขึ้นมาชดเชยกับฟลักซ์ที่ลดลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 3 เมื่อโหลดเป็นค่าความจุไฟฟ้าอย่างเดียวจะมีกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} โหลดเข้าสู่โหลดแต่ละกระแส i_{ds} จะมีค่าเป็นบวกและจะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก $i_{ds} N_s$ จะสร้างฟลักซ์ขึ้นมาเสริมกับฟลักซ์ในช่องว่างอากาศขณะไม่มีโหลดทำให้กระแสสร้างฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ i_{ms} และผลรวมของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเพิ่มมากขึ้น ถ้าต้องการรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้คงที่ ต้องลดกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} เพื่อลดปริมาณของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศให้อยู่ในระดับเท่าเดิม

4.4 การควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วยด้วยเทคนิคการควบคุมแบบช้อปเปอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้ติดตามความเร็วอพติมัม

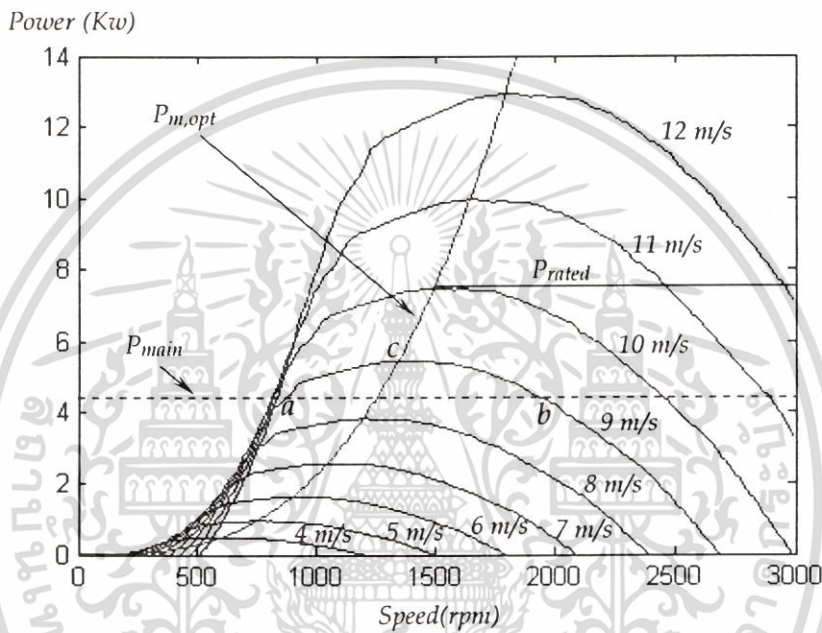
โดยธรรมชาติแล้วกำลังงานกลที่ผลิตได้จากกังหันลมต้องมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดรวมกับการสูญเสียทางกล (Mechanical power loss) และการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical power loss) ไม่ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือกังหันลมจะทำงานที่ความเร็วอพติมัมหรือไม่ก็ตาม จากรูปที่ 4.4 แสดงคุณลักษณะสมบัติเส้นโค้งของกำลังงานกลที่แกนของกังหันลมเทียบกับความเร็วรอบของกังหันลม (Turbine power – shaft speed characteristics of the wind turbine) ที่ความเร็วลม (wind velocity) ต่าง ๆ กัน โดยเริ่มต้นที่ความเร็วลมต่ำสุด $v = 5 \text{ m/s}$ จนถึงความเร็วลมสูงสุด $v = 12 \text{ m/s}$ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วลม $v = 9 \text{ m/s}$ และเส้นกำลังไฟฟ้าของโหลดหลัก (Main load power line) กำลังงานกลของกังหันลมที่จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดหลักได้จะสอดคล้องกับจุด a และจุด b ซึ่งมีความเร็วของกังหันลมเท่ากับ 900 r.p.m. และ 1900 r.p.m. ตามลำดับถ้าไม่มีการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานที่ความเร็วรอบที่เป็นไปได้คือ 900 r.p.m หรือ 1900 r.p.m. ถ้าต้องการให้กังหันลมทำงานที่จุดอพติมัมในรูปคือจุด c ซึ่งมีค่ากำลังงานกลสูงสุด (Maximum mechanical power) ซึ่งมีค่ามากกว่าความต้องการของโหลดหลักดังนั้นการใช้โหลดช่วย (Auxiliary load) ในการรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินนี้จะทำให้เราสามารถควบคุมความเร็วของกังหันลมให้ทำงานที่ความเร็วอพติมัมได้ ดังนั้นโหลดช่วยทำหน้าที่ควบคุมให้กังหันลมให้ทำงานที่จุดอพติมัมดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ที่จุดอพติมัม (optimum point) ในรูปที่ 4.4 กำหนดให้ดังนี้

$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_m^3 \quad (4.4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{m,opt} = K_{opt} \omega_m^2 \quad (4.4.2)$$

ถ้าไม่คิดการสูญเสียทางกลและการสูญเสียทางไฟฟ้าจะได้ว่า $P_{aux} \cong P_{m,opt} - P_{main}$ เมื่อ K_{opt} เป็นค่าคงที่ออปติ멈ซึ่งจะพบได้จากสมการที่ (3.4.14)



รูปที่ 4.4 เส้นโค้งกำลังงานกลเทียบกับความเร็วรอบ

จากรูปที่ 4.1 ในส่วนของโหลดช่วยจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสโดยใช้ไดโอด (Diode rectifier) เปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้กระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับมีฮาร์โมนิกส์สูง ดังนั้นจึงต้องมีวงจรกรองกระแสให้เรียบขึ้นโดยจะใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ LC (LC Filter) เนื่องจากเป็นวงจรกรองที่ใช้งานง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีราคาถูก การควบคุมกำลังไฟฟ้าส่วนเกินส่งผ่านไปยังค่าความต้านทานจะใช้ การควบคุมการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรือที่เรียกว่าการควบคุมแบบชอปเปอร์ (chopper control) แต่มีข้อเสียตรงที่ว่ากำลังไฟฟ้าส่วนเกินนี้จะสูญเสียไปที่ค่าความต้านทานไปโดยเปล่าประโยชน์ ในทางที่ดีกว่าควรจะนำกำลังไฟฟ้าส่วนเกินนี้เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ (battery charging) หรือนำไปขับปั๊มน้ำในงานเกษตรกรรม

4.4.1 การควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย (control of the auxiliary load power)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติว่ากังหันลมผลิตกำลังงานกลเพียงพอต่อการ จ่ายให้กับโหลดหลักและโหลดช่วยเมื่อหักการสูญเสียต่าง ๆ ออกแล้ว หมายความว่าเพียงพอสำหรับการรักษาแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง (DC – link voltage) ให้มีค่าคงที่ ถ้าไม่เช่นนั้นจะต้องมีอุปกรณ์เสริมสำหรับช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด (Auxiliary power source) หรืออีกทางหนึ่งก็คือการเลือกโหลดที่เหมาะสมโดยใช้ อุปกรณ์ตัดต่อที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ในรูปที่ 4.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย และใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมแบบทางอ้อม (Indirect Speed Control) [21, 22, 23, 24] เพื่อทำให้กังหันลมทำงานที่จุดออกพิกัด ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่ที่แตกต่างกันคือ จะใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย (Auxiliary Load Power Control) ในการควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ให้ได้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่ต้องการ T_e^* (Electromagnetic Torque Command) ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ (4.4.3)

$$T_e^* = K_{opt}\omega_m^2 - B\omega_m \quad (4.4.3)$$

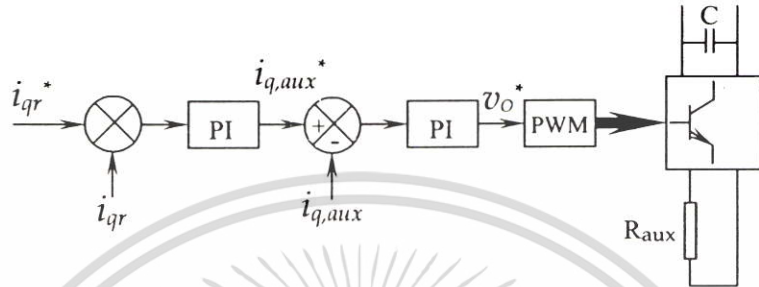
เมื่อ B คือ สัมประสิทธิ์ของความฝืดและแรงเสียดทานทางกล และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ภายใต้การควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ (Flux Vector Control) กำหนดให้โดยสมการที่ (4.4.4)

$$T_e = \frac{3PL_o I_{ms} i_{qr}}{4} \quad (4.4.4)$$

ดังนั้น
$$i_{qr}^* = \frac{4T_e}{3PL_o I_{ms}} \quad (4.4.5)$$

เมื่อ
$$L_o = \frac{L_m^2}{L_s}$$

สัญญาณคลาดเคลื่อนของ i_{qr} กับ i_{qr}^* จะทำหน้าที่เป็นตัวสั่งงาน ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ให้เข้าพุทของตัวควบคุมพีไอ ทำการปรับค่าดิวตีไซเคิล δ (duty cycle) ของการควบคุมแบบช้อปเปอร์เพื่อให้ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าส่วนเกินไปยังความต้านทานของโหลดช่วยจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ i_{qr} กับ



รูปที่ 4.5 ปลีกโดอะแกรมการควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย

i_{qr}^* มีค่าน้อยมากจนเป็นที่น่าพอใจของตัวควบคุมพีไอ ในกรณีที่ไม่มีโหลดช่วยทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมจะทำให้ความเร็วรอบของกังหันลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วรอบสูงเกินพิกัด (Over speed turbine generator) อาจจะทำให้เกิดการเสียหายทางกลได้ (Mechanical damage) ในสถานะที่ความเร็วลม v มีค่าสูงมาก ๆ แต่ในขณะที่โหลดหลักมีค่าต่ำมาก ๆ ความเร็วรอบของกังหันลมจะสูงมาก เพื่อรักษาสมดุลของกำลังไฟฟ้าของโหลดหลัก และกำลังงานกลที่ผลิตได้จากกังหันลม

4.4.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI controller design)

การออกแบบรูปของตัวควบคุมแบบพีไอในกรณีนี้มีความยุ่งยากตรงที่ไม่สามารถทำให้เหมือนจริงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์อื่นเนื่องมาจากโดยธรรมชาติของโหลดช่วยประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสที่มีไดโอดต่อกันในลักษณะของวงจรบริดจ์ การนำกระแสของไดโอดจะขึ้นอยู่กับ วงจรกรองกระแสแบบพาสซีฟ LC และผลกระทบของอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟที่ต่อขนานอยู่กับโหลด สิ่งเหล่านี้ทำให้การวิเคราะห์ไม่เป็นไปตามกฎเกณฑ์ที่ถูกกำหนดโดยทรานเฟอร์ฟังก์ชัน อย่างไรก็ตามเราจะทำการประมาณโดยการ สมมุติว่าผลตอบสนองของคิวตี้ไซเคิล δ และส่วนประกอบของกระแสสร้างแรงบิด i_{qr} มีความสัมพันธ์กันในลักษณะของอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First order response) มิฉะนั้นผลตอบสนองของอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งระหว่าง δ และแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e กำหนดให้โดย

$$\frac{T_e(s)}{\delta(s)} = \frac{3PL_m i_{ms} k'}{2\tau' s + 1}$$

จากสมการข้างบน สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการทดสอบผลตอบสนองที่มีต่อสัญญาณขั้นบันได (step response test) ผลจากการตรวจสอบที่ค่ากระแส $i_{ms} = 6 \text{ A}$ จะได้สมการของอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่แสดงความสัมพันธ์ของ $T_e(s)$ และ $\delta(s)$ ที่ให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ดีที่สุดคือ

$$\frac{T_e(s)}{\delta(s)} = \frac{1.26}{0.25s + 1}$$

มีฉะนั้นการออกแบบตัวควบคุมแบบ PI ในระบบปิด (closed loop system) โดยมีความถี่ธรรมชาติ (natural Frequency) อยู่ที่ 3 rad/s และมีอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) เท่ากับ 0.7 จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมที่ไวดังนี้

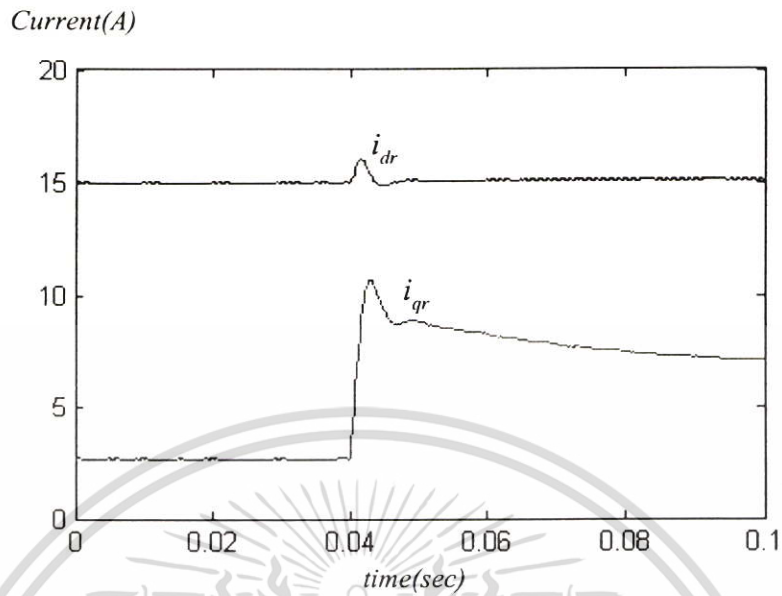
$$\frac{e(s)}{\delta(s)} = \frac{0.04(s + 66)}{s}$$

4.5 ผลการจำลองแบบโดยปราศจากโหลดช่วย

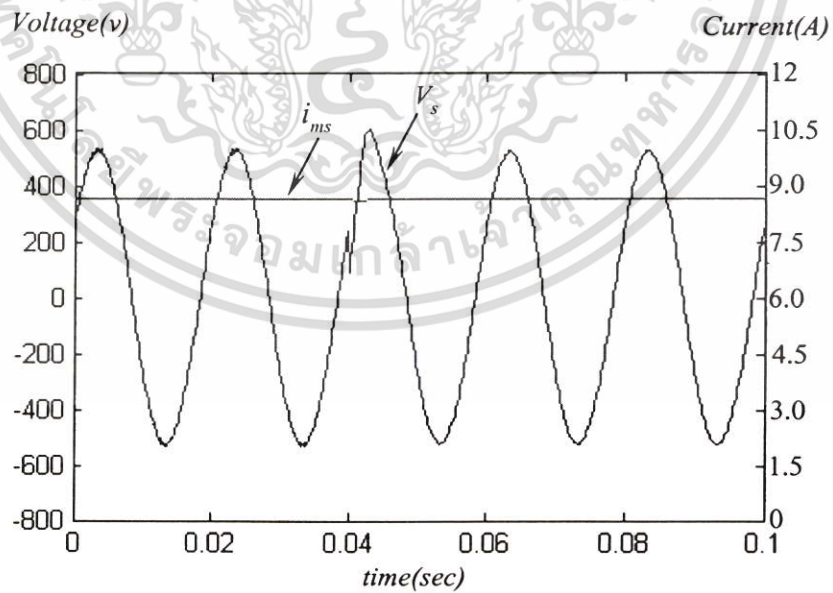
เพื่อศึกษาถึงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ (stator terminal voltage) ขณะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใดและขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟอย่างทันทีทันใด (step change in reactive power)

4.5.1 ผลการจำลองแบบขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟอย่างทันทีทันใด

การเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจาก 1450 W ที่เวลา $t = 0.04 \text{ sec}$ จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสสร้างแรงบิดบน โรเตอร์ของ DFIG คือ i_{qr} จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ส่วนกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{qr} จะไม่ค่อยมีผลกระทบมากนักเพราะกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของโหลดยังมีค่าคงที่อยู่ที่

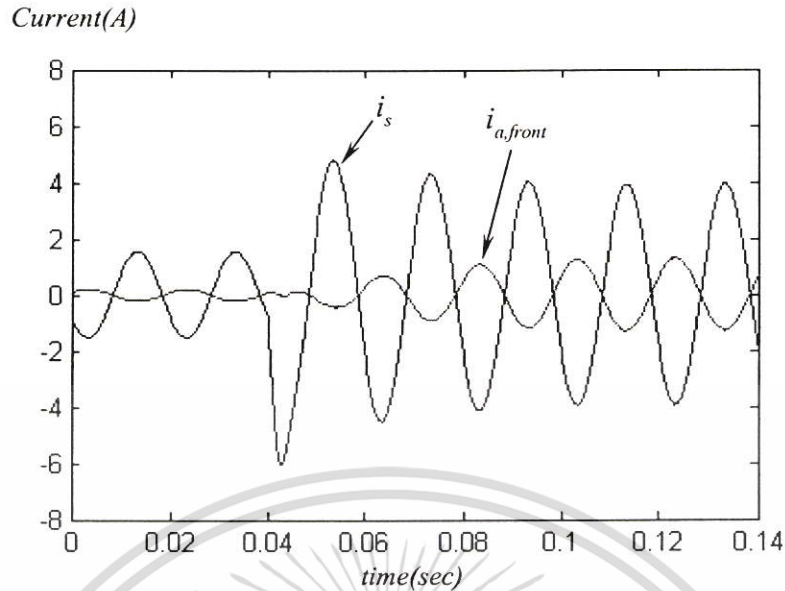


รูปที่ 4.6 กระแสโรเตอร์ขณะเพิ่มกำลังแอมป์ของโหลดอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 4.7 กระแสแมกนีไตซ์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



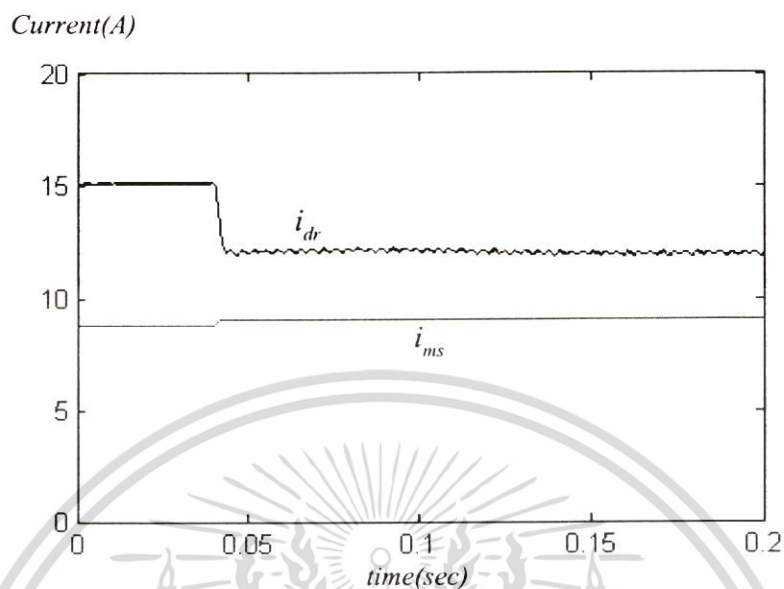
รูปที่ 4.8 กระแสสเตเตอร์และกระแสคอนเวทเตอร์ขณะเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใด

จากรูปที่ 4.7 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ v_s ยังคงมีค่าคงที่อยู่ที่ แสดงให้เห็นถึงการควบคุมฟลักซ์ ที่สเตเตอร์ยังมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง โดยจะสังเกตได้จากกระแสแมกนีโตซึ่งยังมีค่าคงที่จากรูปที่ 4.8 แสดงกระแสที่สเตเตอร์ของเฟส a คือ i_s และกระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ (Front-end side converter) กระแสสเตเตอร์ i_s เริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ มีค่า 1.8 A เมื่อกำลังไฟฟ้าแอมป์ของโหลดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดที่เวลา $t = 0.04$ sec กระแสสเตเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเช่นกันเนื่องจากแรงดัน v_s ยังคงที่อยู่ที่ $v_s = 380$ V กระแสของคอนเวทเตอร์ $i_{a, front}$ จะต่างเฟสกับกระแส i_s เป็นมุม 180 องศาไฟฟ้า (out of phase) แสดงว่าคอนเวทเตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (Inverting Moad)

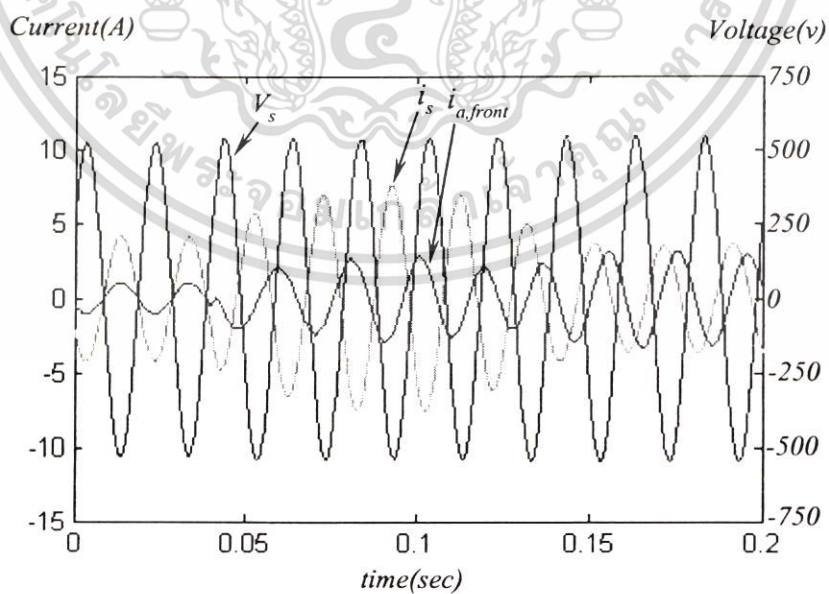
4.5.2 ผลการจำลองแบบขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟารีแอกทีฟอย่างทันทีทันใด

การเปลี่ยนแปลงของกระแสสร้างกำลังรีแอกทีฟ i_d ของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟอย่างทันทีทันใด (Step change in reactive current component) i_d จาก $i_d = 0$ A เป็น $i_d = 2$ A จากรูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองของกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} จะมีค่าลดลงที่เวลา $t = 0.04$ sec เพื่อรักษาให้กระแสแมกนีโตซึ่ง i_{ms} มีค่าคงที่ การที่กระแส i_{dr} มีค่าลดลงหมายถึงมีกำลังรีแอกทีฟไหลเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์เนื่องจากเครื่องกำเนิดต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่คงที่ค่าใดค่าหนึ่งดังนั้นระบบควบคุมจึงสั่งลดกระแส i_{dr} ลงทำให้กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ไหลเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กระแสโรเตอร์และกระแสแมกนีโตซึ่งขณะเพิ่มกำลังรีแอคทีฟของ โหลดอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 4.10 กระแสคอนเวอเตอร์ กระแสของสเตเตอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

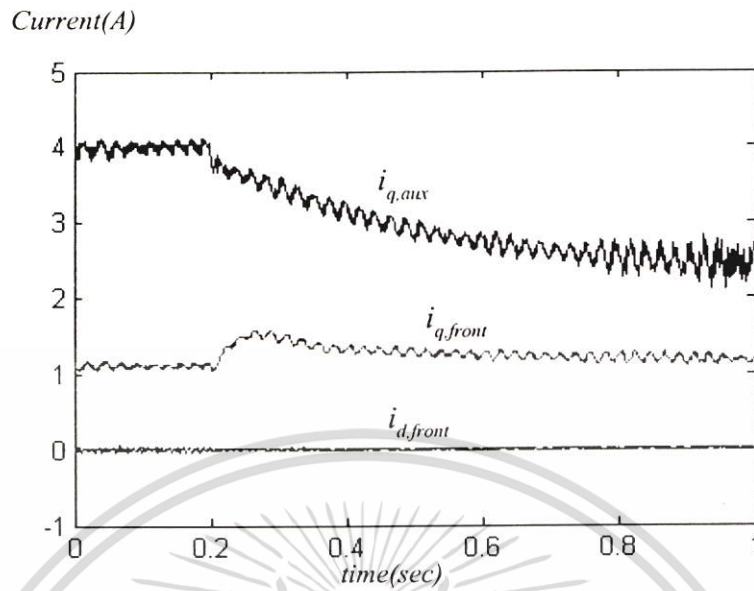
จากรูปที่ 4.10 แสดงกระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย $i_{a, front}$ กระแสสเตเตอร์ i_s และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ v_s จะเห็นได้ว่าที่เวลา $t \leq 0.04$ sec คอนเวทเตอร์ จะทำงานในโหมด อินเวทเตอร์และที่เวลา $t > 0.04$ sec คอนเวทเตอร์จะเปลี่ยนการทำงานในโหมดอินเวทเตอร์ เป็นโหมดที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า (leading Power Factor) นั่นหมายความว่า คอนเวทเตอร์ จ่ายกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟให้กับโหลด และจ่ายกำลังไฟฟ้าร์แอ็คทีฟให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4.6 ผลการจำลองแบบการควบคุมโดยใช้โหลดช่วย

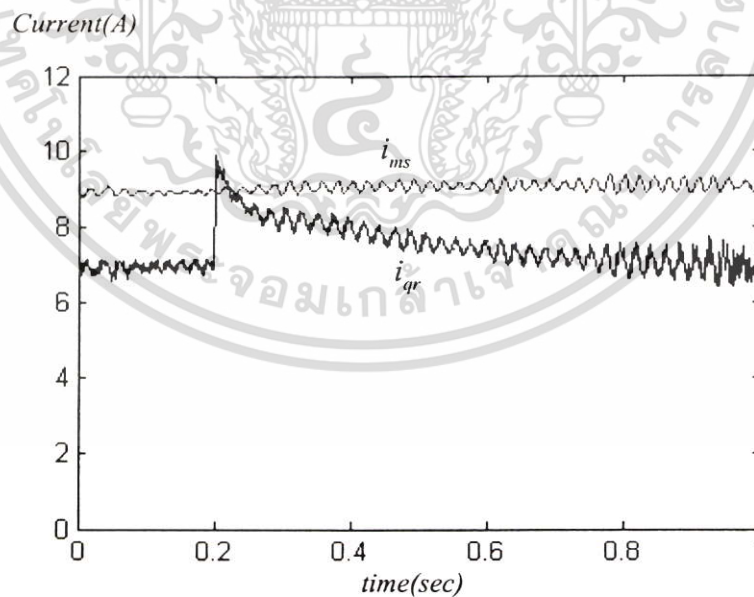
ผลการจำลองแบบในสถานะชั่วคราว โดยการ ใช้โหลดช่วยสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟเพื่อให้งังหนัสนยังคงทำงานที่ความเร็วอพติมัมขณะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดหลักอย่างทันทีทันใด (Step change in main load power) โดยการเพิ่มโหลดหลักและลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด ที่สอดคล้องกับความเร็วลม $v = 9$ m/s และตั้งค่าของกระแสแมกนีไตซ์ิ่งไว้ที่ $i_{ms} = 9$ A และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงอ้างอิง $E^* = 550$ v

4.6.1 ผลการจำลองแบบขณะเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใด

ผลการจำลองแบบจะแสดงสมรรถนะของระบบการควบคุมของ โหลดช่วย เพื่อให้กังหนัสนยังคงทำงานที่ความเร็วอพติมัมเช่นเดิม จากรูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าขณะมีการเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด จาก $P_{main} = 900$ w ไปเป็น $P_{main} = 2200$ w เริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ กระแสของ โหลดช่วย $i_{q, aux}$ จะอยู่ที่ 4 A ต่อมาที่เวลา $t = 0.2$ sec โหลดหลักเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจะเห็นว่ากระแสของ โหลดช่วย $i_{q, aux}$ จะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ทั้งนี้เพื่อต้องการลดกำลังไฟฟ้าของ โหลดช่วย P_{aux} ลงเพื่อรักษาให้ผลรวมของ โหลดทั้งหมดมีค่าเท่าเดิม ส่วนกระแสของคอนเวทเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย (Front-end side converter) จะตั้งค่า $i_{d, front}^* = 0$ A กระแส $i_{q, front}$ จะเปลี่ยนแปลงบ้างเล็กน้อยจะมีค่าเท่าเดิมเพื่อรักษาให้แรงดันคิซีลิ่ง E ให้มีค่าเท่าเดิมจากรูปที่ 4.12 แสดงกระแสสร้างแรงบิด i_{qr} จะได้ว่าที่เวลา $t = 0.2$ sec กระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อยและกลับมามีค่าเท่าเดิมเพื่อควบคุมให้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ให้มีค่าคงที่ ส่วนกระแสแมกนีไตซ์ิ่ง i_{ms} จะคงที่เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว v_s ให้มีค่าคงที่ แต่จะมีการกระเพื่อมบ้างเล็กน้อย เนื่องจากมีฮาร์โมนิกส์ของกระแสของ โหลดช่วย (auxiliary load current) ไหลเข้า ค่าความเหนี่ยวนำร่วม L_m ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีผลทำให้แรงดันที่ขั้วมีการกระเพื่อมเล็กน้อยรูปที่ 4.14 แสดงกำลังไฟฟ้าของ โหลดช่วย P_{aux} (Auxiliary load power) ที่เวลา $t = 0.2$ sec จะเริ่มมีค่าลดลงเพื่อชดเชยกับกำลังไฟฟ้าของ โหลดหลักที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าคงที่ $P_{aux} = 2000$ w

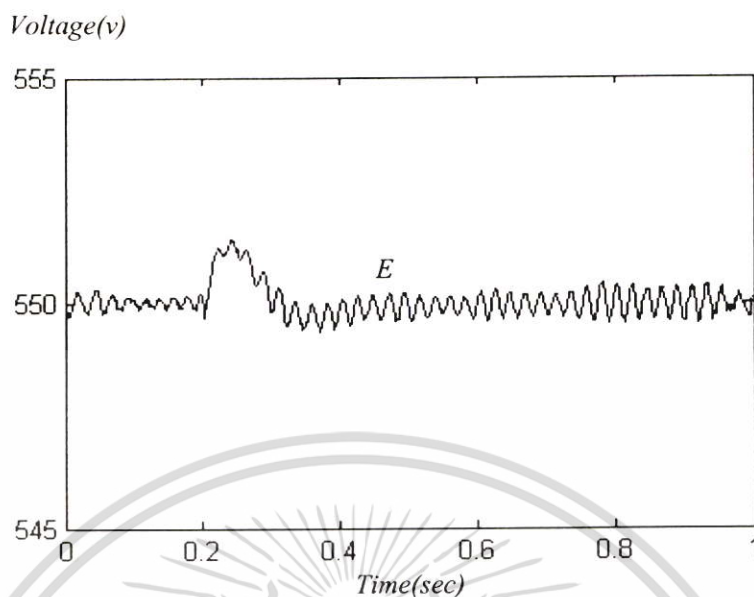


รูปที่ 4.11 กระแสของคอนเวอเตอร์และกระแสของโหลดช่วยขณะเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด

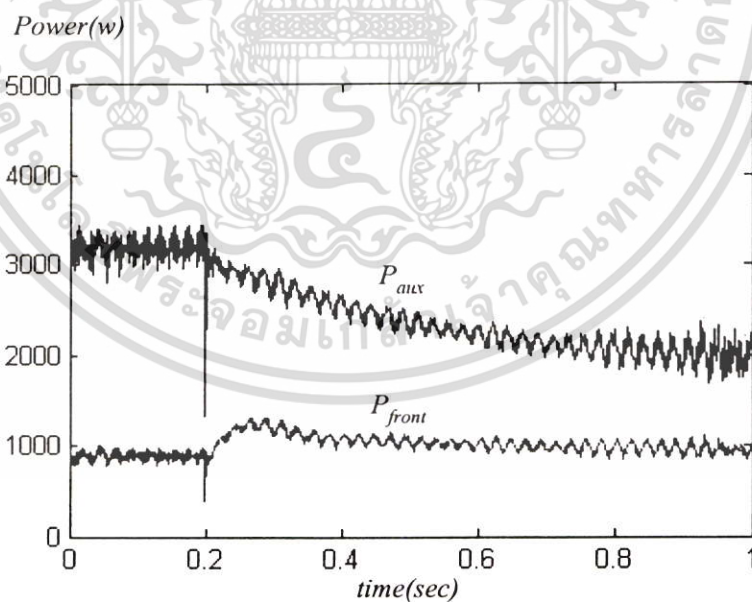


รูปที่ 4.12 กระแสโรเตอร์แกน q และกระแสแมกนีไทซ์ขณะเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

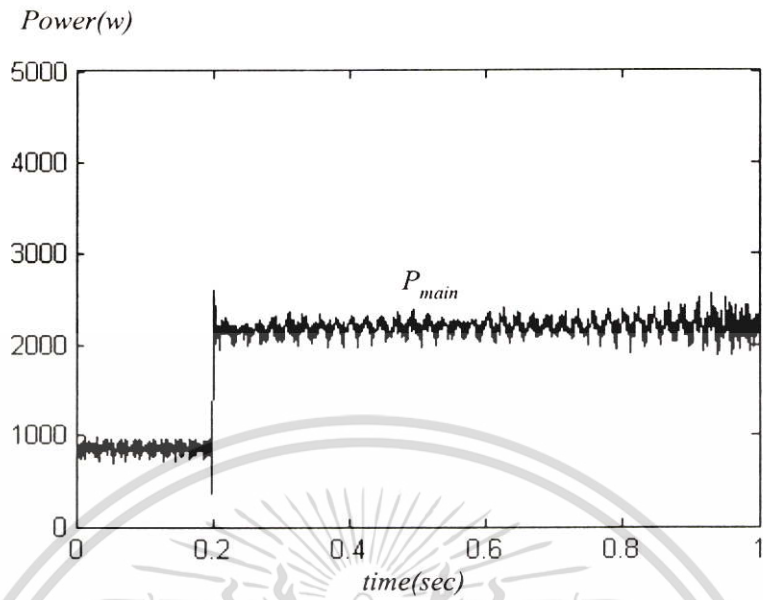


รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด

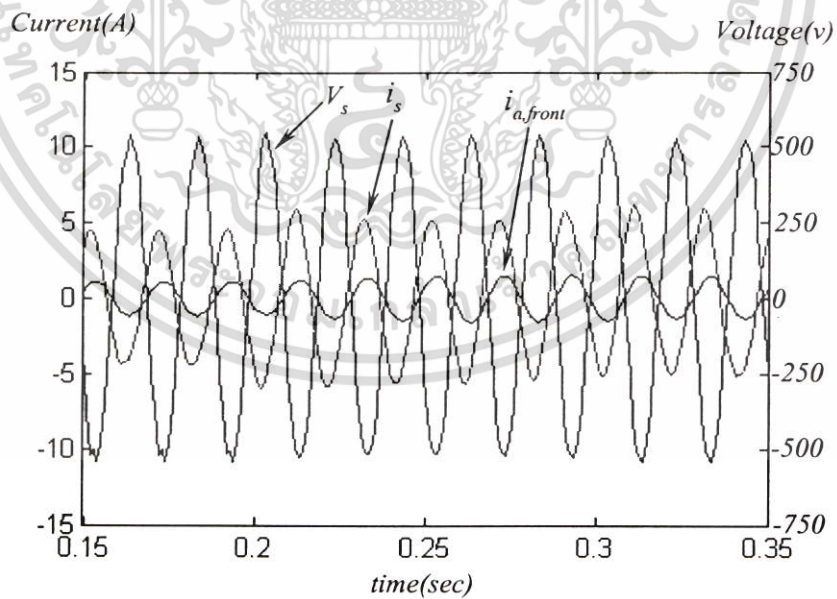


รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าแเอ็คทีฟของโหลดช่วยและของคอนเวอเตอร์ขณะเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟของโหลดหลัก



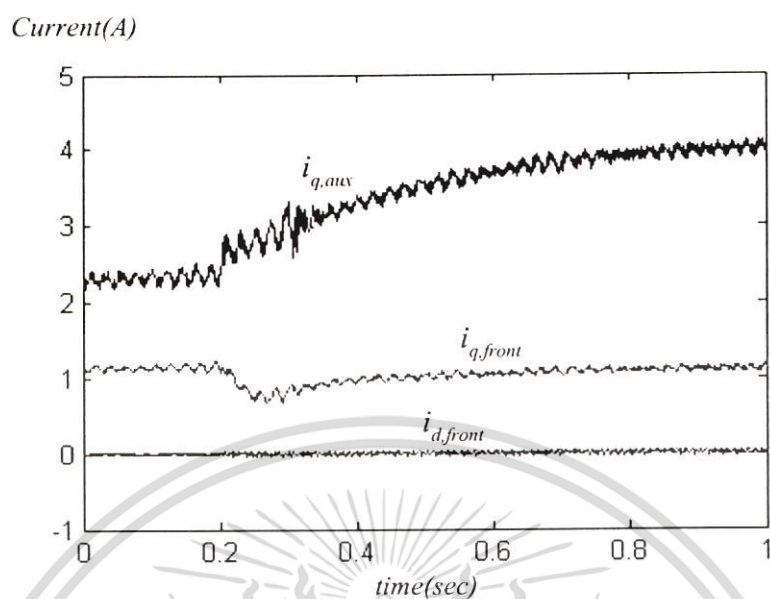
รูปที่ 4.16 กระแสสเตรเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตรเตอร์และกระแสของคอนเวกเตอร์ขณะเพิ่มโหลดหลักอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เวลา $t = 1$ sec กำลังไฟฟ้าของคอนเวอเตอร์ P_{front} จะมีค่าคงที่เท่าเดิมที่เวลา $t = 1$ sec รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของโหลดหลัก P_{main} (step change in main load) จาก 900 w เป็น 2200 w รูปที่ 4.16 แสดงกระแสบนแกนอ้างอิง a-b-c และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว v_s กระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ $i_{a,front}$ จะมีเฟสต่างกับแรงดันไฟฟ้าอยู่ 180 องศาไฟฟ้า (out of phase) แสดงให้เห็นถึงการทำงานของคอนเวอเตอร์ในโหมดอินเวอร์ต (Inverting Moad) ส่วนกระแสของสเตเตอร์ i_s ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะตามหลัง แรงดันไฟฟ้าเป็นมุมมากกว่า 90 องศาไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟให้โหลดและรับกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟจากโหลดช่วยเนื่องจากตัวเก็บประจุของโหลดช่วย

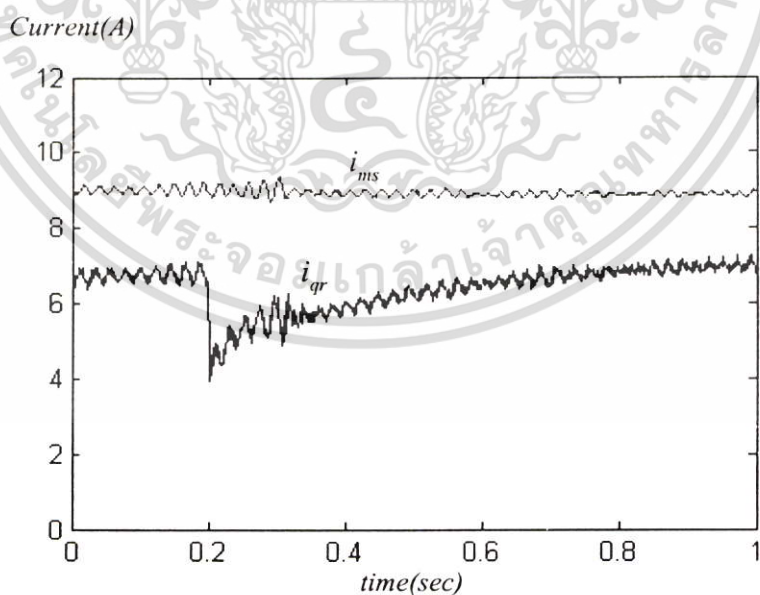
4.6.2 ผลการจำลองแบบขณะลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด

ผลการจำลองแบบแสดงสภาวะของระบบการควบคุมโหลดช่วยขณะมีการลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด (step change in main load) จาก $P_{main} = 2200$ w ไปสู่ $P_{main} = 900$ w ที่เวลา $t = 0.2$ sec จากรูปที่ 4.17 แสดงกระแสของโหลดช่วยบนแกน q , $i_{q,aux}$ กระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ $i_{q,front}$ และ $i_{d,front}$ ที่เวลา $t = 0.2$ sec กระแส $i_{q,aux}$ จะมีค่าสูงขึ้นเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าของโหลดหลักที่ลดลงจะมีค่าคงที่เท่ากับ 4 A ที่เวลา $t = 1$ sec ส่วนกระแส $i_{d,front}$ จะเท่ากับศูนย์เพื่อต้องการให้คอนเวอเตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ต และกระแสสร้างกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ $i_{q,front}$ จะมีค่าคงที่เท่ากับ 1 A จากรูปที่ 4.18 กระแสสร้างแรงบิด i_{qr} จะตกลงที่เวลา $t = 0.2$ sec และฟื้นตัวขึ้นอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์และกระแสแมกนีโตซิ่ง i_{ms} จะเรียกว่า กระแส i_{qr} ทำให้ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (air gap flux) จะมีค่าคงที่รูปที่ 4.20 แสดงกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย P_{aux} ที่เวลา $t = 0.2$ sec จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามการเพิ่มขึ้นของกระแส $i_{q,aux}$ เพื่อชดเชยกับกำลังไฟฟ้าของโหลดหลักที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.21 ที่เวลา $t = 1$ sec ผลรวมของโหลดหลักกับโหลดช่วยจะมีค่าเท่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับที่เวลา $t = 0$ sec ในรูปที่ 4.22 แสดงกระแสคอนเวอเตอร์ $i_{d,front}$ กระแสทางด้านสเตเตอร์ i_s และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว v_s ขณะมีการลดกำลังไฟฟ้าของโหลดหลักอย่างทันทีทันใดที่เวลา $t = 0.2$ sec กระแส i_s จะมีเฟสตามหลังแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 90 องศา ค่าไฟฟ้าเช่นเดียวกับรูปที่ 4.16 ที่เวลา $t = 0.2$ sec แรงดันไฟฟ้า v_s จะพุ่งสูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วกระแส $i_{a,front}$ จะมีเฟสต่างกับแรงดัน v_s อยู่ 180 องศาไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.16



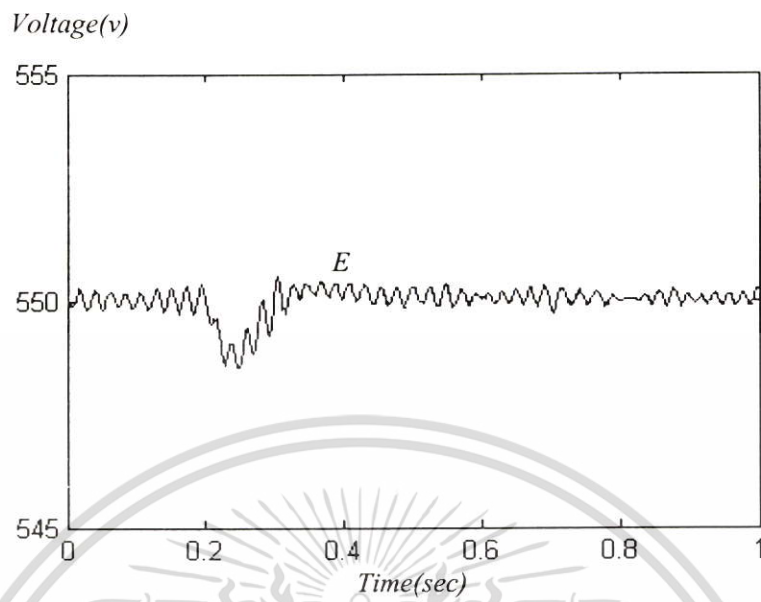
รูปที่ 4.17 กระแสของคอนเวอเตอร์และกระแสของโหลดช่วยบนแกน d-q ขณะลดโหลดหลัก

ลงอย่างทันทีทันใด

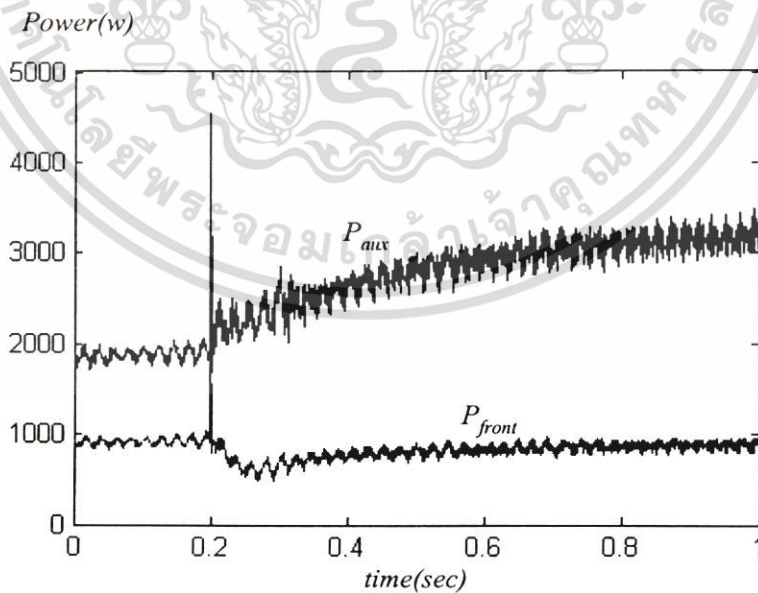


รูปที่ 4.18 กระแสโรเตอร์แกน q และกระแสแมกนีไตซ์ขณะลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

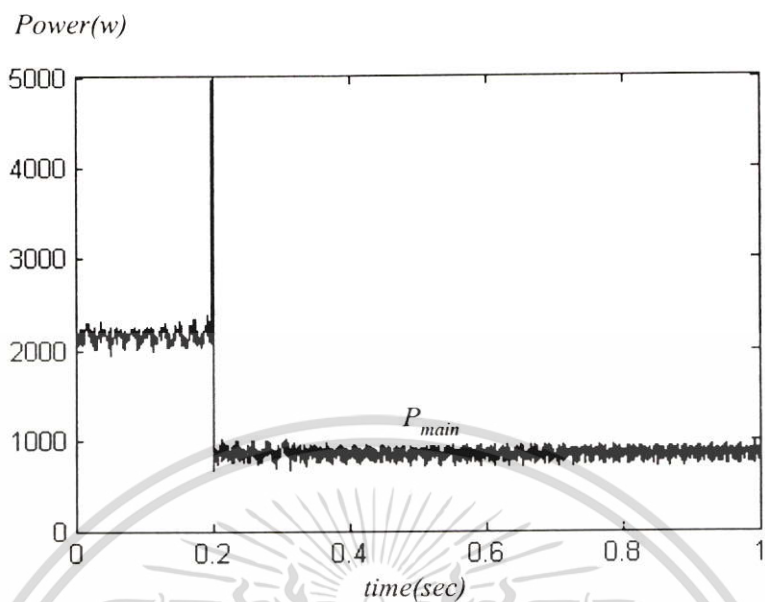


รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะลดโหลดหลักอย่างทันทีทันใด

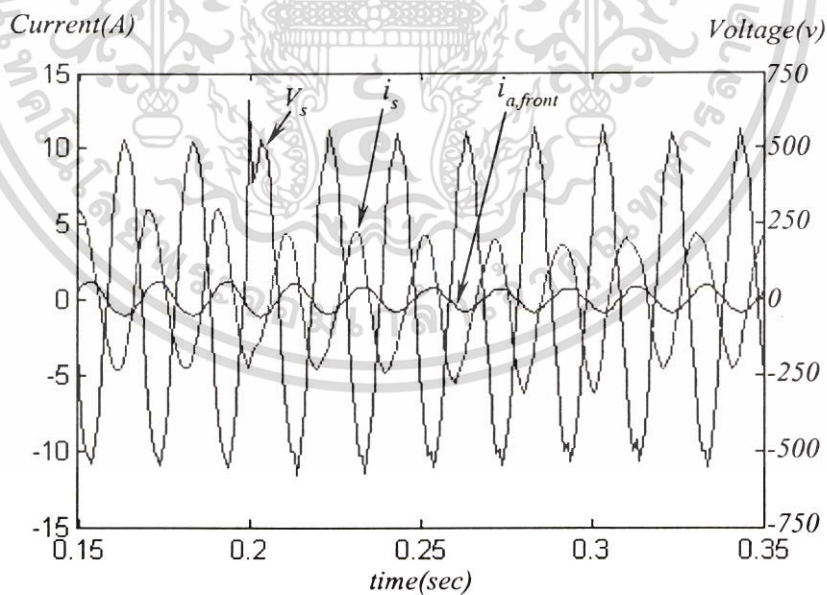


รูปที่ 4.20 กำลังไฟฟ้าของโหลดช่วยและของคอนเวอเตอร์ขณะลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กำลังไฟฟ้าแอมป์ของโหลดหลัก



รูปที่ 4.22 กระแสเตเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์และกระแสของคอนเวกเตอร์ขณะลดโหลดหลักลงอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สรุปผลการจำลองแบบ

จากผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบการควบคุมของฟลักเวเตอร์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ให้มีค่าคงที่ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใด และการเปลี่ยนแปลงของกระแสสร้างกำลังรีแอคทีฟชั่วขณะ เวลาใดเวลาหนึ่งคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของสเตเตอร์ จะขึ้นอยู่กับสมรรถนะของระบบการควบคุมที่ดีที่จะต่อต้านกับ การรบกวนของฮาร์โมนิกส์ที่มาจากภายนอกและที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือ ฮาร์โมนิกส์ที่มาจากคอนเวอเตอร์ทางด้าน โรเตอร์ และคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่าย และที่ภาระโหลดเบา ๆ จะมีการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมากขึ้น ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความถี่ในการสวิตซ์ของคอนเวอเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเรียบขึ้น จากผลการจำลองแบบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการควบคุม กำลังไฟฟ้าแอคทีฟของโหลดช่วยสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าแอคทีฟของโหลด ให้เท่ากับกำลังงานกลออปติ멈 ของกังหันลม ทำให้กังหันลมทำงานที่ความเร็วออปติ멈 แต่อย่างไรก็ตามการควบคุม โหลดช่วย โดยการใช้เทคนิคการควบคุมแบบข้อปเปอร์จะมี ฮาร์โมนิกสูงมาก เพราะใช้ไดโอดเรียงกระแสไฟตรงที่ภาคอินพุท ฮาร์โมนิกส์นี้จะสร้างปัญหาให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสฮาร์โมนิกส์จะสร้างฟลักซ์ที่เป็นฮาร์โมนิกส์ในช่องว่างอากาศ และเกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะมีฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่ ดังนั้น คุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะขึ้นอยู่กับคุณภาพ ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์แบบ LC ด้วย

บทที่ 5

การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3

เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกังหันลม

แบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ

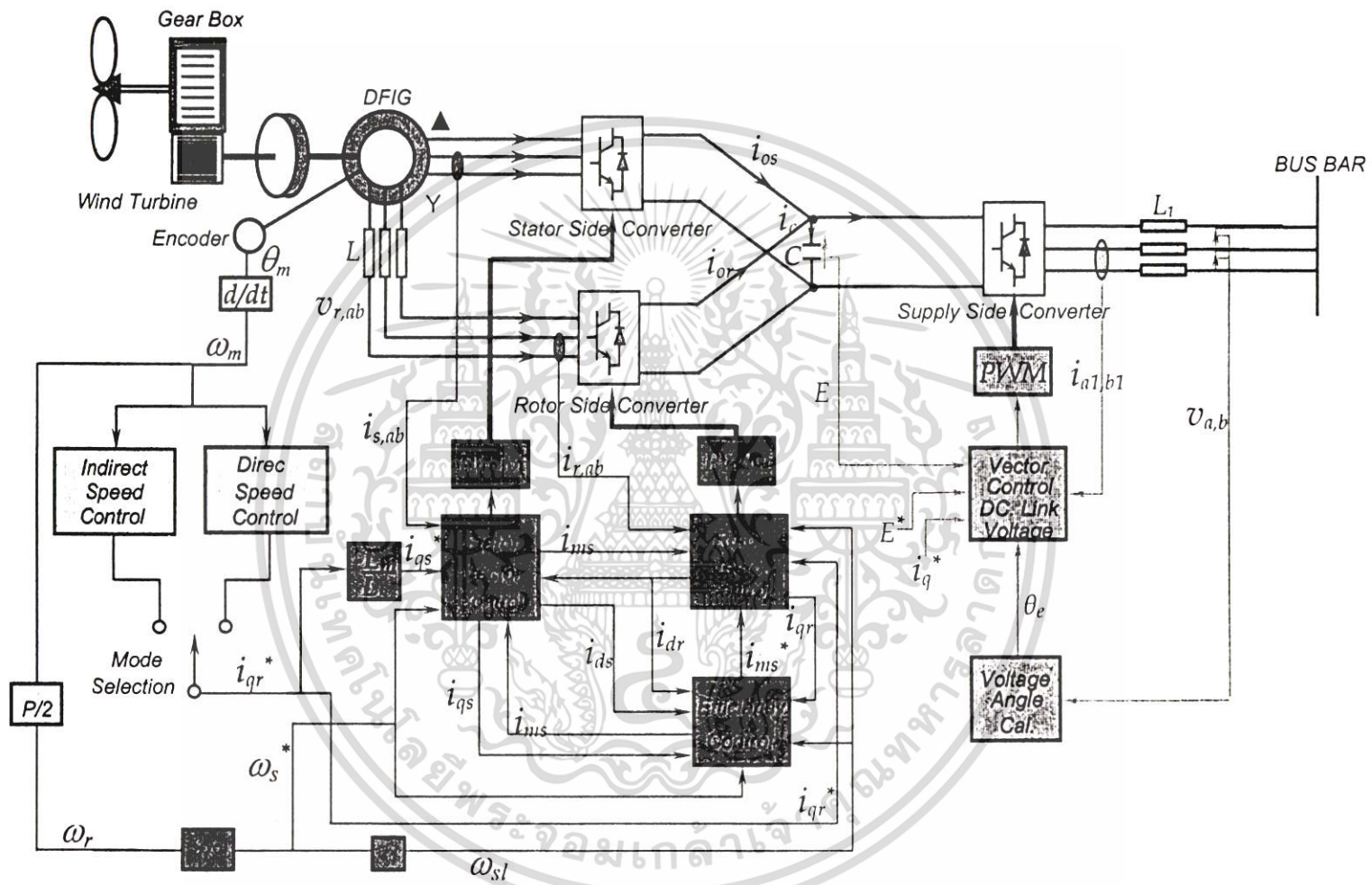
5.1 บทนำ

การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยการควบคุมทางด้านสเตเตอร์ร่วมกับทางด้านโรเตอร์นี้จะมีสมรรถนะการทำงานสูง (high performance) คือจะให้แรงบิดคงที่ที่ความเร็วรอบสูงจึงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูง (high power) ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 6 ส่วนในบทนี้จะกล่าวถึงการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ในระบบการคืนพลังงานสลิปของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดควอเตอร์โรเตอร์ โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียสจะไม่มี การควบคุมประสิทธิภาพ เนื่องจากการควบคุมทางด้าน โรเตอร์เพียงด้านเดียวทำให้ความถี่และแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์มีค่าคงที่ ทำให้ฟลักซ์ที่สเตเตอร์จะมีค่าคงที่ด้วยทำให้การสูญเสียที่แกนเหล็กมีค่าคงที่ที่ภาระโหลดเบา ๆ (Light Load) ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าต่ำมากเนื่องจากการสูญเสียที่แกนเหล็กมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับการสูญเสียที่ตัวนำของขดลวด ในบทนี้จะได้นำเสนอระบบการคืนพลังงานสลิปของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดควอเตอร์โรเตอร์ที่มีการกระตุ้น 2 ทาง (Doubly Fed Induction Generator) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า DFIG ที่มีการควบคุมประสิทธิภาพโดยการควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็กให้เท่ากับการสูญเสียที่ตัวนำของขดลวด โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมทั้ง 2 ด้าน (Double Side Vector Control) คือคอนเวกเตอร์ด้านสเตเตอร์ (Stator Side Converter) และคอนเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) ทำให้ลดความซับซ้อนของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ลง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องคำนวณหาตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์และสามารถนำกำลังสลิปกลับคืนสู่เอซีไลด์ (Slip power Recovery) ได้ โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียส {1} คอนเวกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมประสิทธิภาพ (Efficiency Control) ของ DFIG ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Efficiency) โดย

การควบคุมขนาดของพรีลักซ์ ในช่องว่างอากาศและทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกำลังสลิป (Slip Power) ทางด้านโรเตอร์โดยการควบคุมความถี่ทางด้านสเตเตอร์หรือควบคุมความเร็วซิงโครนัส (Synchronouse Speed Control) นอกจากนี้คอนเวอเตอร์ทางด้านโรเตอร์จะทำหน้าที่นำกำลังสลิปกลับคืนสู่เอซีไลต์แล้วยังสามารถควบคุมค่า เพอร์เวอร์แฟกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ได้อีกด้วย ควบคุมได้ตั้งแต่ค่าเพอร์เวอร์แฟกเตอร์นำหน้าจนถึงค่าเพอร์เวอร์แฟกเตอร์ชนิดตามหลัง (Leading to Lagging Power Factor) และคุณลักษณะเด่นของการควบคุมทั้ง 2 ด้าน ก็คือสามารถควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ทำงานในโหมดซูปเปอร์ซิงโครนัสได้ใน โหมดเดียวกันนั้น ทำให้ความถี่ทางด้านสเตเตอร์หรือความเร็วซิงโครนัสต่ำกว่าความเร็วรอบของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ผลรวมของการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core Loss) ทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์เนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss) มีค่าลดลงและมีย่านการปรับความเร็วรอบ ที่กว้างกว่าการควบคุมทางด้านโรเตอร์เพียงด้านเดียว ผลการจำลองแบบจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของ DFIG ขณะที่มีการควบคุมประสิทธิภาพและไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพ



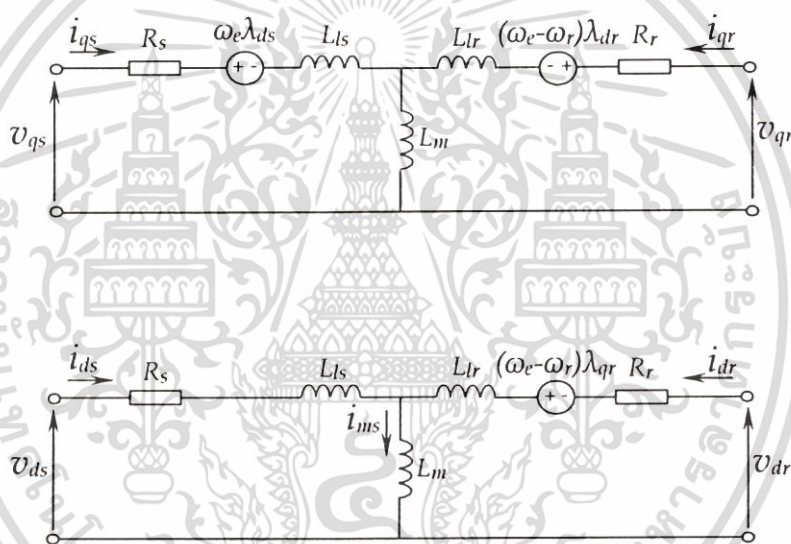
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ระบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG

5.2 แบบจำลองของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG

ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดวางลี้โรเตอร์ (Wound Rotor) แบบกระตุ้น 2 ทาง (Doubly Fed Induction Generator) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า “ DFIG ” จะใช้คอนเวอร์เตอร์ด้านสเตเตอร์ (Stator side Converter) และคอนเวอร์เตอร์ด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) ร่วมกันทำหน้าที่ควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ ที่สเตเตอร์และความเร็วรอบของ DFIG ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดบนแกนหมุน $d^e - q^e$ (Synchronously Rotating Frame Model)



รูปที่ 5.2 แบบจำลองของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG บนแกนหมุน $d^e - q^e$

จากแบบจำลองในรูปที่ 5.2 เป็นแบบจำลองของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ที่สเตเตอร์ของ DFIG โดยละทิ้งกระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานที่แทนการสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์และโรเตอร์ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสแมกนีไทซ์ซึ่ง i_{ms} แล้วจะได้รับความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดัน, ฟลักซ์ และแรงบิดของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ที่สเตเตอร์ดังนี้ [11,12,13]

$$\text{ถ้า} \quad i_{Rqs} \approx i_{Rds} \approx i_{Rqr} \approx i_{Rdr} \approx 0 \quad (5.2.1)$$

$$\lambda_{qs} = 0, \lambda_s = \lambda_{ds} = L_m \dot{i}_{ms} = L_s \dot{i}_{ds} + L_m \dot{i}_{dr} \quad (5.2.2)$$

$$\lambda_{dr} = \frac{L_m^2}{L_s} \dot{i}_{ms} + \sigma L_r \dot{i}_{dr}, \lambda_{qr} = \sigma L_r \dot{i}_{qr} \quad (5.2.3)$$

$$\dot{i}_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} \dot{i}_{qr}, \dot{i}_{ms} = \frac{L_s}{L_m} \dot{i}_{ds} + \dot{i}_{dr} \quad (5.2.4)$$

$$v_{ds} = R_s \dot{i}_{ds} \quad (5.2.5)$$

$$v_{qs} = R_s \dot{i}_{qs} + \omega_s L_m \dot{i}_{ms} \quad (5.2.6)$$

$$\sigma L_r \frac{d}{dt} \dot{i}_{dr} + R_r \dot{i}_{dr} = v_{dr} + \omega_s \sigma L_r \dot{i}_{qr} \quad (5.2.7)$$

$$\sigma L_r \frac{d}{dt} \dot{i}_{qr} + R_r \dot{i}_{qr} = v_{qr} - \omega_s (L_o \dot{i}_{ms} + \sigma L_r \dot{i}_{dr}) \quad (5.2.8)$$

$$T_e = K_{pow} \frac{P_{Lo}}{2} \dot{i}_{qs} \dot{i}_{ms} \quad (5.2.9)$$

โดยที่

$$\sigma = \frac{1 - L_m^2}{L_s L_r}, K_{pow} = \frac{3}{2}, L_o = \frac{L_m^2}{L_s}$$

σ คือค่าสัมประสิทธิ์ของฟลักซ์รั่วไหลทั้งหมด

K_{pow} เป็นค่าคงที่ของการแปลงแกน

จากสมการที่ (5.2.4) และ (5.2.9) จะเห็นได้ว่าแรงบิดของ DFIG จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส i_{qs} เมื่อ i_{ms} ถูกควบคุมให้คงที่เปรียบเสมือนกระแสอาร์เมเจอร์และกระแสฟิลด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก แต่กระแสฟิลด์หรือกระแสแมกนีไทซิง i_{ms} (Magnetizing Current) ของ DFIG ประกอบด้วยกระแสสร้างฟลักซ์ 2 ส่วนคือ กระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} ดังนั้นจึงสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพ (Efficiency Improvement) ของ DFIG ได้โดยการควบคุมค่ากระแสคำสั่งสร้างฟลักซ์ i_{dr}^* และ i_{ds}^* ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปและใช้กระแสคำสั่งสร้างแรงบิด i_{qs}^* สำหรับควบคุมความเร็ว

รอบของ DFIG และจากสมการที่ (5.2.4) โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของคอนเวทเตอร์ด้านสเตเตอร์และคอนเวทเตอร์ด้านโรเตอร์จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบแยกอิสระระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดโดยการควบคุมให้ $\lambda_{qs} = 0$ สามารถทำได้โดยง่ายโดยการควบคุมค่ากระแสคำสั่ง $i_{qr}^* = -(L_s / L_m) i_{qs}$ ได้โดยตรงโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วสลลิป ω_{sl} ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องคำนวณหาตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ θ_s และสามารถป้อนความถี่ให้กับสเตเตอร์ f_s ได้อย่างอิสระโดยไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ ω_r ทำให้เราสามารถควบคุมการไหลของกำลังสลลิป (Slip Power Flow) ทางด้านโรเตอร์ได้โดยการควบคุมความเร็วซิงโครนัส ω_s หรือการควบคุมความถี่ทางด้านสเตเตอร์ f_s

5.2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์

จากรูปที่ 5.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ โดยใช้เทคนิคการควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ λ_s (Stator Flux Vector Control) ของคอนเวทเตอร์ทางด้านสเตเตอร์และคอนเวทเตอร์ทางด้านโรเตอร์ โดยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์และตรวจวัดกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์แล้วแปลงแกนไปยังแกนอ้างอิง $d^e - q^e$ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการป้อนกลับของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ การควบคุมกระแสจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) และการสร้างสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม สำหรับควบคุมคอนเวทเตอร์จะใช้หลักการสร้างแรงดันในสเปค (Space Vector Voltage)

5.2.1.1 การควบคุมคอนเวทเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (Stator Side Converter Control)

จากสมการที่ (5.2.5) และ (5.2.6) เป็นสมการของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของคอนเวทเตอร์ทางด้านสเตเตอร์จะเห็นได้ว่าการควบคุมกระแสในแกน d^e , i_{ds} และกระแสในแกน q^e , i_{qs} ทำได้โดยการปรับค่าแรงดันในแกน d^e , v_{ds} และแรงดันในแกน q^e , v_{qs} ตามลำดับ ถ้ากำหนดให้

$$v_{ds}' = R_s i_{ds} \quad (5.2.10)$$

$$v_{qs}' = R_s i_{qs} \quad (5.2.11)$$

ดังนั้นสมการที่ (5.2.5) และ (5.2.6) เขียนได้ใหม่ดังนี้

$$v_{ds} = v_{ds}' \quad (5.2.12)$$

$$v_{qs} = v_{qs}' + \omega_s L_m i_{ms} \quad (5.2.13)$$

โดยที่ค่าของแรงดัน v_{ds}' และ v_{qs}' จะได้รับจากค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส (Current Error) i_{ds} และ i_{qs} ของตัวควบคุมพีไอแต่ละตัว ตามลำดับการกำหนดค่าเกณฑ์การขยาย ของตัวควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมจะทำให้สมรรถนะในการติดตามกระแสคำสั่งได้ดีจากสมการที่ (5.2.14) , (5.2.15) จะได้ค่าของเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงคำสั่งทางด้านสเตเตอร์บนแกน d^e และแกน q^e คือ v_{ds}^* และ v_{qs}^* ตามลำดับ ดังนี้

$$v_{ds}^* = v_{ds}' \quad (5.2.14)$$

$$v_{qs}^* = v_{qs}' + \omega_s^* L_m i_{ms} \quad (5.2.15)$$

เวกเตอร์แรงดัน v_{ds}^* และ v_{qs}^* เป็นแรงดันคำสั่งอ้างอิงสำหรับการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม สำหรับควบคุมคอนเวอเตอร์ ทางด้านสเตเตอร์การควบคุมการไหลของกำลังสลิปทางด้านโรเตอร์ทำได้โดยการควบคุมความเร็วเชิงโรตอร์คำสั่ง ω_r^* และการควบคุมประสิทธิภาพหรือการควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็กทำได้โดยการควบคุมกระแสแมกนีโตซึ่ง คำสั่ง i_{ms}^* ซึ่งได้รับจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.6

5.2.1.2 การควบคุมคอนเวอเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter Control)

ในการทำงานเกี่ยวกับการควบคุมคอนเวอเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ จากสมการที่ (5.2.7) และ (5.2.8) เป็นสมการของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของคอนเวอเตอร์ทางด้านโรเตอร์ จะได้ว่า การควบคุมกระแสในแกน d^e , i_{dr} และกระแสในแกน q^e , i_{qr} ทำได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในแกน d^e , v_{dr} และแรงดันไฟฟ้าในแกน q^e , v_{qr} ตามลำดับ จากสมการที่ (5.2.7) และ (5.2.8) ดังกำหนดให้

$$v_{dr}' = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d i_{dr}}{dt} \quad (5.2.16)$$

$$v_{qr}' = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d i_{qr}}{dt} \quad (5.2.17)$$

ดังนั้นสมการที่ (5.2.7) , (5.2.8) จะเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$v_{dr} = v_{dr}' - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr} \quad (5.2.18)$$

$$v_{qr} = v_{qr}' + \omega_{sl} (L_o i_{ms} + \sigma L_r i_{dr}) \quad (5.2.19)$$

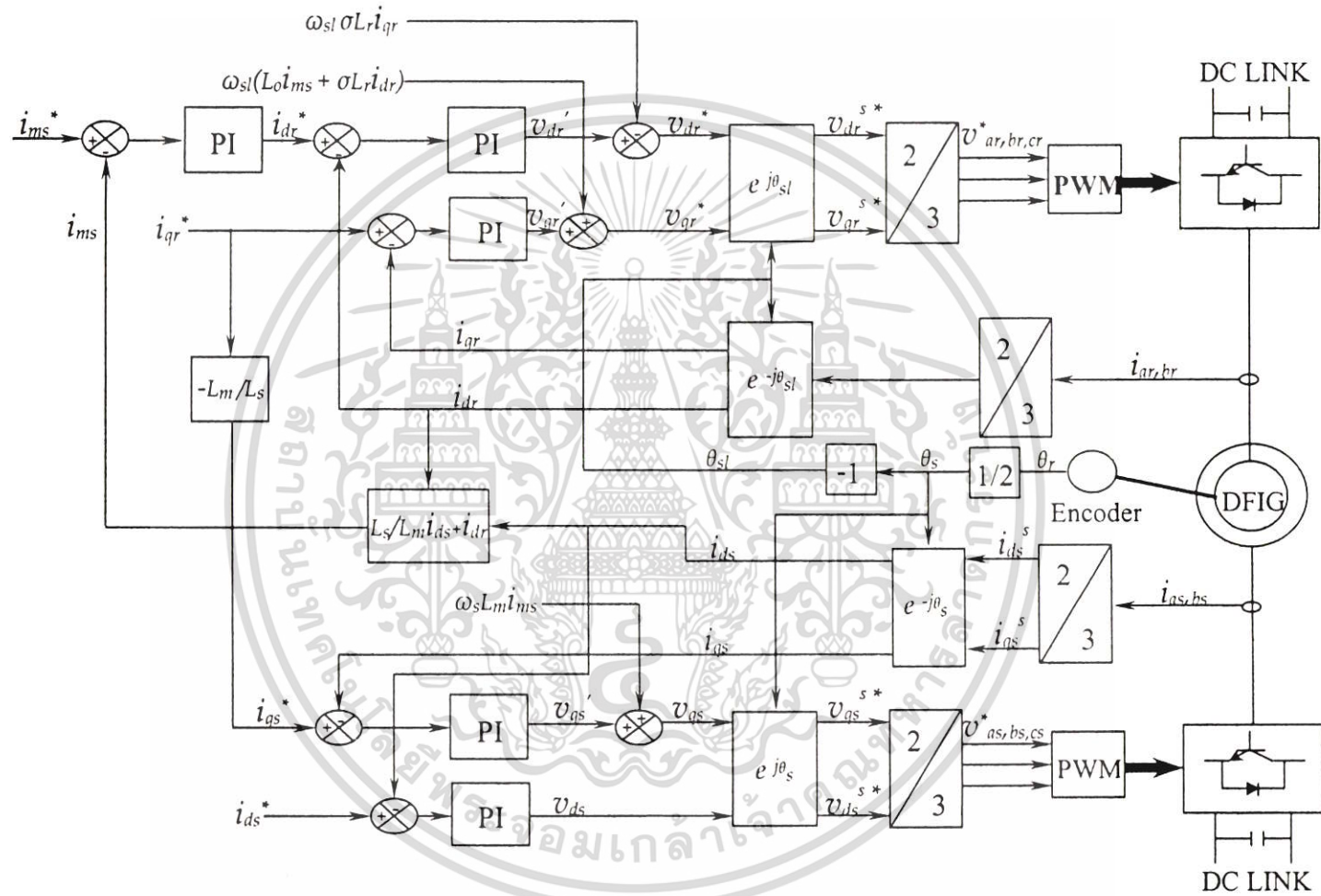
โดยที่ค่าของแรงดัน v_{ds}' และ v_{qs}' จะได้รับจากค่าความคลาดเคลื่อนของกระแส (Current Error) i_{ds} และ i_{qs} ของตัวควบคุมพีไอแต่ละตัวตามลำดับการกำหนดค่าเกณฑ์การขยายของตัวควบคุมแบบพีไอ ที่เหมาะสมจะทำให้สมรรถนะในการติดตามกระแสคำสั่งได้ดี จากสมการที่

(5.2.20) , (5.2.21) จะได้ค่าของเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงคำสั่งทางด้านโรเตอร์บนแกน d^r และแกน q^r คือ v_{dr}^* และ v_{qr}^* ตามลำดับดังนี้

$$v_{dr}^* = v_{dr}' - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr} \quad (5.2.20)$$

$$v_{qr}^* = v_{qr}' + \omega_{sl} (L_o i_{ms} + \sigma L_r i_{dr}) \quad (5.2.21)$$

เวกเตอร์แรงดัน v_{dr}^* และ v_{qr}^* เป็นแรงดันคำสั่งอ้างอิงสำหรับการสร้างสัญญาณ พีดับบลิวเอ็ม สำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์การควบคุมแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของ DFIG ทำได้โดยการควบคุมกระแสคำสั่ง i_{qr}^* ซึ่งได้รับจากระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางตรง (Direct Speed Control) และแบบทางอ้อม (Indirect Speed Control) ในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 ตามลำดับ ส่วนการควบคุมเพอร์เวอร์แฟกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ทำได้โดยการควบคุมกระแสคำสั่ง i_{dr}^* ค่าเพอร์เวอร์แฟกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง (Unity Power Factor) เมื่อ $i_{ds} = 0$ หรือกระแสคำสั่งสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ $i_{dr}^* = i_{ms}$



รูปที่ 5.3 การควบคุมเวกเตอร์ของระบบควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG

5.3 การไหลของกำลังไฟฟ้าของ DFIG (Power Flow of DFIG)

สมการของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ (Active Power) และกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟ (Reactive Power) ทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์ กำหนดให้โดย

$$P_s = 3/2 (V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs}) \quad (5.3.1)$$

$$P_r = 3/2 (V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr}) \quad (5.3.2)$$

$$Q_s = 3/2 (V_{ds}i_{qs} - V_{qs}i_{ds}) \quad (5.3.3)$$

$$Q_r = 3/2 (V_{dr}i_{qr} - V_{qr}i_{dr}) \quad (5.3.4)$$

จากสมการของแรงดันไฟฟ้าทางด้านสเตเตอร์ และทางด้านโรเตอร์ของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ ในสมการที่ (5.2.5) ถึง (5.2.8) และสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าในสมการที่ (5.3.1) ถึง (5.3.4) ถ้าละทิ้งการสูญเสียที่ความต้านทานของตัวนำและละทิ้งการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์รวมถึงการสูญเสียต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของ DFIG และละทิ้งฟลักซ์รั่วไหลสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟและกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟ ทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$P_s \approx -3/2(\omega_s L_o i_{ms} i_{qr}) \quad (5.3.5)$$

$$P_r \approx -3/2(\omega_s L_o i_{ms} i_{qr}) \quad (5.3.6)$$

$$Q_s \approx -3/2(V_{qs}i_{ds}) \approx -3/2(\omega_s L_m i_{ds} i_{ms}) \quad (5.3.7)$$

$$Q_r \approx -3/2(\omega_s L_o i_{dr} i_{ms}) \quad (5.3.8)$$

$$P_e \approx P_s + P_r \approx -3/2(\omega_r L_o i_{qr} i_{ms}) \quad (5.3.9)$$

$$T_e \approx \frac{P_e}{\omega_m} \approx \frac{-3PL_o i_{qr} i_{ms}}{4} \quad (\omega_r = \frac{P}{2} \omega_m) \quad (5.3.10)$$

เราสามารถหาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟในเทอมของสลลิป (Slip)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก} \quad S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟดังนี้

$$\frac{P_s}{P_e} = \frac{1}{1-S} \quad (5.3.11)$$

$$\frac{P_r}{P_e} = \frac{-S}{1-S} \quad (5.3.12)$$

$$\frac{P_r}{P_s} = -S \quad (5.3.13)$$

5.4 การสูญเสียในระบบขับเคลื่อนของ DFIG ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม

การสูญเสียในระบบขับเคลื่อน DFIG โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนในสถานะคงตัวสามารถแบ่งการสูญเสียออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical Loss) และการสูญเสียทางกล (Mechanical Loss)

5.4.1 การสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical Loss)

การสูญเสียทางไฟฟ้าจะเกิดจากการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุหรืออุปกรณ์ ที่ต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าจึงจะสามารถทำงานได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุใด ๆ จะเกิดมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นเสมอพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เมื่อไม่นำมาใช้ประโยชน์ก็จะกลายเป็นการสูญเสียไปทันทีที่การสูญเสียทางไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อน DFIG ประกอบด้วยการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส และการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์

5.4.1.1 การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส จะเป็นการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำไฟฟ้า และการสูญเสียที่แกนเหล็กเสียบเป็นส่วนใหญ่ประกอบด้วย

- การสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator iron loss)

การสูญเสียในแกนเหล็กที่สเตเตอร์ประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy Current loss) และการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) ซึ่งการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสจะเป็นฟังก์ชันของความถี่ และความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air gap flux density) โดยจะเป็นสัดส่วนกับความถี่และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศยกกำลังสอง ส่วนการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนจะเป็นสัดส่วนกับความถี่ยกกำลังสองและความหนาแน่นของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศยกกำลังสองซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P_{s,fe} = \beta_{hf} f_s \Phi_m^2 + \beta_{ef} f_s^2 \Phi_m^2$$

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนขึ้นอยู่กับ ค่าความต้านทานของแกนเหล็กการลดขนาดของกระแสไหลวนสามารถทำได้โดยการใช้แผ่นเหล็กลามิเนตแผ่นบาง ๆ มาวางเรียงซ้อนอัดกันจนแน่นแทนการใช้แกนเหล็กตันทำให้การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนลดลง การประเมินค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กมักนิยมแทนด้วยค่าความต้านทานในวงจรสมมูลย์เทียบเท่า ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

- การสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ (Rotor iron loss)

เช่นเดียวกับกับการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือความถี่ของกระแสในตัวนำโรเตอร์ จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของโรเตอร์ ดังนั้น การสูญเสียในแกนเหล็กโรเตอร์จึงเป็นฟังก์ชันของสลิป กล่าวคือถ้าความเร็วรอบของโรเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วซิงโครนัสสลิป จะมีค่าน้อยมากทำให้การสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียในแกนเหล็กสเตเตอร์

$$P_{r,fe} = \beta_{hf} f_s \Phi_m^2 + \beta_{ef} S^2 f_s^2 \Phi_m^2$$

- การสูญเสียในตัวนำที่สเตเตอร์ (Stator Winding loss)

การสูญเสียชนิดนี้จะไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามโหลด กล่าวคือ ถ้าเพิ่มโหลดให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำให้กระแสที่ไหลในตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้การสูญเสียเนื่องจากตัวนำเพิ่มขึ้น โดยจะเป็นฟังก์ชันของกระแสยกกำลังสองคูณกับค่าความต้านทานของตัวนำ $I^2 R$ และในกรณีที่ตัวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจะมีผลทำให้การสูญเสียชนิดนี้

เพิ่มขึ้นด้วย หรือในกรณีที่มีการปรับแรงดันที่จ่ายให้กับเครื่องจักรไฟฟ้าก็จะส่งผลให้การสูญเสียชนิดนี้เพิ่มขึ้นด้วย อย่างเช่น ลดแรงดันไฟฟ้าลงขณะที่ความถี่ยังคงที่จะทำให้ปริมาณของ ฟลักซ์ในช่องว่างอากาศลดลงขณะที่ความเร็วรอบลดลงบ้างเล็กน้อย และถ้าโหลดเป็นชนิดต้องการแรงบิดคงที่การปรับให้แรงดันลดลงเพียง 10–20 % จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเพิ่มมากขึ้นทำให้การสูญเสียที่ตัวนำเพิ่มขึ้นอย่างมากถ้าหากลดแรงดันลงไปอีกจะทำให้เครื่องจักรไฟฟ้าเกิดการโอเวอร์โหลดจนเกิดความเสียหายได้

- การสูญเสียในตัวนำที่โรเตอร์ (Rotor Winding loss)

เช่นเดียวกับการสูญเสียในตัวนำที่สเตเตอร์ การที่กระแสในตัวนำทางด้านสเตเตอร์เพิ่มขึ้นก็มีผลมาจากกระแสทางด้านโรเตอร์สูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นถ้าการสูญเสียตัวนำทางด้านสเตเตอร์ เพิ่มขึ้น การสูญเสียที่ตัวนำทางด้านโรเตอร์ก็สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

- การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า

ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากระบบควบคุมความเร็วของเครื่องจักรไฟฟ้าที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ จากการป้อนแรงดันที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ทำให้กระแสไฟฟ้าเกิดความผิดเพี้ยนไป จากทฤษฎีของอนุกรมฟูเรียร์ กระแสที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์จะประกอบด้วยกระแสที่มีหลาย ๆ ความถี่ที่เป็นรูปคลื่นไซน์มีขนาดแอมพลิจูดต่าง ๆ กัน หรือเรียกว่า กระแสฮาร์โมนิกส์ กระแสส่วนนี้ออกนอกไม่ได้นำไปสร้างแรงบิดขับโหลดแล้วยังทำให้เกิดการกระเพื่อมของแรงบิด (Ripple torque) และยังทำให้เกิดการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในตัวนำอีกด้วย การลดขนาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ในการสวิตซิ่งให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มความถี่ในการสวิตซิ่งให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์สูงขึ้นด้วย

- การสูญเสียสเตรย์ (Stray loss)

การสูญเสียสเตรย์คือการสูญเสียส่วนเกินของ ผลการสูญเสียทำการวัดที่นอกเหนือจากผลรวมของการสูญเสียในตัวนำ แกนเหล็กและการสูญเสียเนื่องจากการหมุน ซึ่งโดยธรรมชาติของการสูญเสียสเตรย์จะเกิดขึ้นในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำซึ่งได้มีนักวิจัยเสนอผลงานและนิยามการสูญเสียสเตรย์ซึ่งการทำนายผลของการสูญเสียนี้ยังไม่มีการศึกษาให้เข้าใจอย่างกว้างขวางมากนัก การสูญเสียสเตรย์จะประกอบไปด้วยชนิดของการสูญเสียมากมาย ซึ่งไม่ใช่ส่วนของการสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมด เช่น กระแสอินเตอร์บาร์ (Inter bar) ซึ่งจะไหลผ่านใน

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสล็อตเอียงซึ่งจะส่งผลถึงการสูญเสียในตัวนำและมากไปกว่านั้น กระแสพาราซิติค (Parasitic Current) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในขดลวดโรเตอร์ซึ่งเป็นผลมาจาก สเตปฮาร์โมนิกส์ กับค่าแมกนิจูด ซึ่งขึ้นอยู่กับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่ และระดับของฟลักซ์

ในทางปฏิบัติแล้วการสูญเสียที่เกิดจาก End – leakage และ Skew – leakage ฟลักซ์ จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียสเตรย์ซึ่ง จะพิจารณาเป็นการสูญเสียแกนเหล็กสเตรย์และเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีสล็อตเอียง โดยปกติจะลดผลของแรงบิดพาราซิติค (Parasitic torque) และสัญญาณรบกวน (Noise) และสล็อตที่มีลักษณะเอียงจะเป็นสาเหตุของการผิดเพี้ยนของแกนฟิลด์ (Field) ซึ่งจะส่งผลถึงการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียในแกนเหล็ก และขึ้นอยู่กับกระแสฮาร์โมนิกส์ซึ่งเป็นส่วนกลับของสัดส่วนลึกเกอร์แอนด์แคนซ์ และ end – leakage ฟลักซ์จะทำให้เกิดการสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดจากกระแสไหลวนซึ่งขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยฮาร์โมนิกส์ลึกเกจฟลักซ์

5.4.1.2 การสูญเสียที่คอนเวอร์เตอร์ (Converter loss)

การสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำให้เกิดความร้อนบริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N ดังนั้นถ้าหากว่าความถี่ในการสวิตช์หรือความเร็วในการสวิตช์มากจะทำให้เกิดความสูญเสียมากด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ช่วงนำกระแสของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีกระแสไหลผ่านก็จะทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก็จะทำให้เกิดการสูญเสียและจะมีค่ามากเมื่อมีกระแสไหลผ่านเป็นปริมาณมาก ดังนั้น การสูญเสียชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาใช้เป็นสวิตช์ด้วยถึงแม้ว่าความถี่ในการสวิตช์และปริมาณกระแสจะมีค่าเท่ากันก็ตาม แต่จะมีการสูญเสียไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังนอกจากจะเลือกให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของการนำไปใช้งานและราคาแล้วต้องคำนึงถึงการสูญเสียที่จะเกิดขึ้นด้วย นอกเหนือจากนี้ส่วนประกอบของคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องใช้จำนวนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุผลใดก็ตามจะเป็นการเพิ่มการสูญเสีย

5.4.2 การสูญเสียทางกล (Mechanical loss)

การสูญเสียทางกลส่วนใหญ่จะเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการหมุน (Rotational loss) อันเนื่องมาจากแรงลมและแรงเสียดทาน (Windage and Friction) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วที่แกนของเครื่องจักรไฟฟ้าและอุณหภูมิซึ่ง แรงเสียดทานจะมีความสัมพันธ์สูงที่เมื่อตลับลูกปืนถูกทำให้ร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นส่วนการสูญเสียเนื่องจากลมจะขึ้นอยู่กับ ความเร็วซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างไรก็ตามการสูญเสียนี้จะถูกสมมุติให้มีค่าคงที่ตลอดทุกย่าน การใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสำหรับใช้ในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เมื่อทำงานที่ความถี่ของแหล่งจ่ายให้มีค่าคงที่ตลอดการทำงาน

5.5 การควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG (Efficiency Control of DFIG)

การทำงานของระบบขับเคลื่อนของ DFIG ที่ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมในแต่ละชั่วโมงหรือในแต่ละวันนั้นความเร็วลมจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นการผลิตกำลังไฟฟ้าของ DFIG รวมถึงการสูญเสียที่ตัวนำขดลวด (Copper loss) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลม แต่ในขณะที่การสูญเสียที่เกิดจากแกนเหล็ก (Iron loss) ยังมีค่าคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลม ดังนั้นการไม่สมดุลกันระหว่างการสูญเสียที่ขดลวดตัวนำกับการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Unbalance between iron and copper loss) จึงมีโอกาสเป็นไปได้อย่างมากทำให้ผลรวมของการสูญเสียทั้งสองยังมีค่าสูงอยู่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ DFIG จะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุม การสูญเสียที่แกนเหล็กให้มีค่าเท่ากับการสูญเสียที่ตัวนำไฟฟ้า (Balance between iron and copper loss) ที่ภาระโหลดหรือที่ความเร็วลมต่าง ๆ กัน

5.5.1 แบบจำลองการสูญเสียของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG

การสูญเสียส่วนใหญ่ของ DFIG 80 เปอร์เซ็นต์จะเป็นการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กรวมกับการสูญเสียที่ตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นจะละทิ้งการสูญเสียปลิกย่อย (Stray loss) และการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า จะพิจารณาเฉพาะแบบจำลองการสูญเสียที่แกนเหล็กและการสูญเสียที่ตัวนำของขดลวดสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพของ DFIG ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum efficiency) จะใช้แบบจำลองการสูญเสียของ DFIG บนแกนอ้างอิง $d^c - q^c$ ในสถานะคงตัว (Steady state loss Model on Synchronously Frame) เนื่องจากค่าเวลาคงตัวทางไฟฟ้า (Electromagnetic time constant) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าเวลาคงตัวทางกล (Mechanical time Constant) เนื่องจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของ DFIG (Efficiency Improvement) จะได้ผลดีขึ้นอยู่กับความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ ดังนั้นจึงได้คิดผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแกนเหล็กทำให้การประเมินค่าการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Iron loss observer) มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นทำให้การปรับปรุงประสิทธิภาพของ DFIG ได้ผลดียิ่งขึ้นและเพื่อความสะดวกในการคำนวณจะละทิ้ง ค่าฟลักซ์รั่วไหลและกระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานของ

แกนเหล็กเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศและกระแสแมกนีไทซ์ (Magnetizing current) ตามลำดับการสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์และโรเตอร์ของ DFIG ประกอบด้วยการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy current loss) และการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอรีซิส (Hysteresis loss) ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของความถี่และค่าฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air gap flux) เพื่อความสะดวกในการคำนวณและเป็นที่นิยมกันโดยทั่วไปเราจะแทนการสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์และการสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ด้วยค่าความต้านทานซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ไฟฟ้าในวงจรสมมูลย์เทียบเท่าในรูปที่ 5.4

$$R_{os}(\omega_s) = \frac{R_{os}(\omega_{s, rated}) \omega_s}{\omega_{s, rated}} \quad (5.5.1)$$

$$R_{or}(\omega_{sl}) = \frac{R_{or}(\omega_{s, rated}) \omega_{sl}}{\omega_{s, rated}} \quad (5.5.2)$$

เมื่อ $\omega_{s, rated}$ = ความถี่ทดสอบทางด้านสเตเตอร์ (50 Hz) สำหรับหาค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กของ DFIG

ω_s = ความถี่ทางด้านสเตเตอร์ขณะใช้งานจริง

ω_{sl} = ความถี่ทางด้านโรเตอร์ขณะใช้งานจริง

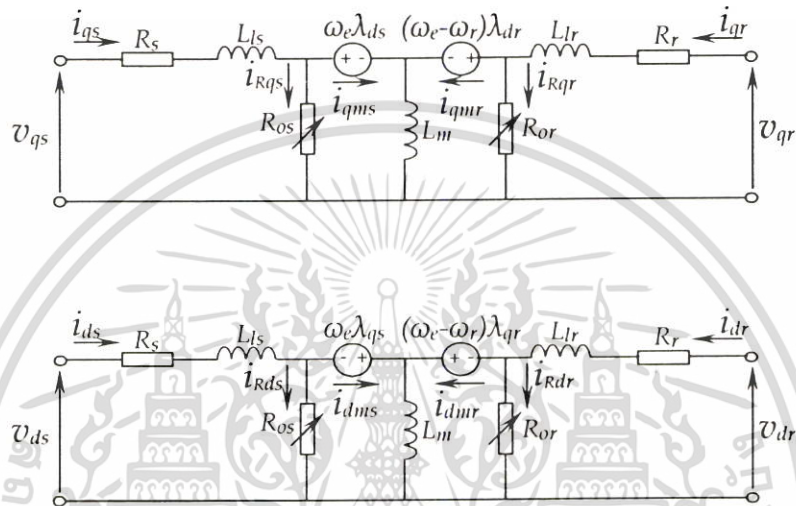
$R_{os}(\omega_{s, rated})$ = ค่าความต้านทานที่แทนการสูญเสียของแกนเหล็กที่สเตเตอร์เมื่อป้อน ด้วยความถี่ทดสอบ $\omega_{s, rated}$ และแรงดันที่พิกัด

$R_{or}(\omega_{s, rated})$ = ค่าความต้านทานที่แทนการสูญเสียของแกนเหล็กที่โรเตอร์เมื่อป้อน ด้วยความถี่ทดสอบ $\omega_{s, rated}$ และแรงดันที่พิกัด

$R_{os}(\omega_s)$ = ค่าความต้านทานที่แทนการสูญเสียของแกนเหล็กที่สเตเตอร์ขณะใช้งานจริง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ ω_s

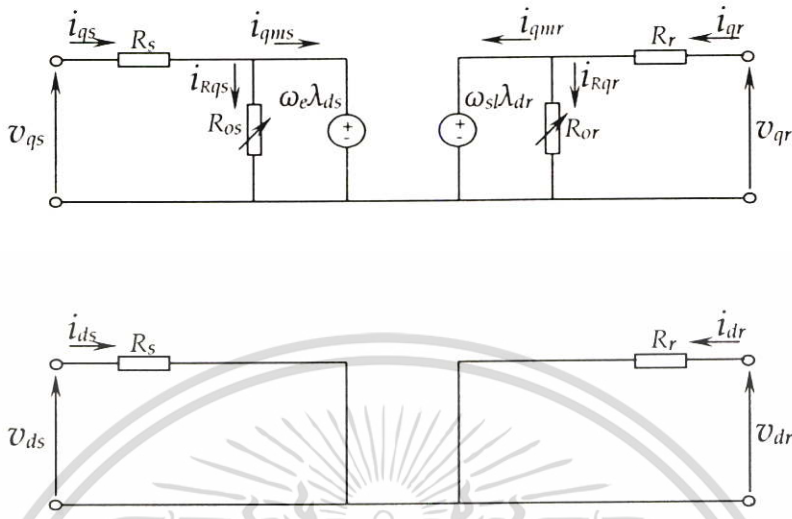
$R_{or}(\omega_{sl})$ = ค่าความต้านทานที่แทนการสูญเสียของแกนเหล็กที่โรเตอร์ขณะใช้งานจริง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ ω_{sl}

หมายเหตุ การทดสอบ DFIG ขณะ No load สำหรับหาค่าความต้านทานที่แทนการสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์ทำได้โดยการลัดวงจรทางด้านโรเตอร์โดยลัดทั้งการสูญเสียที่ตัวนำไฟฟ้าและลัดทั้งการสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์เนื่องจากกระแสขณะ No load และความถี่ทางด้านโรเตอร์จะทดสอบมีค่าน้อยมากซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.8



รูปที่ 5.4 แบบจำลองที่สมบูรณ์ของ DFIG บนแกนหมุน $d^c - q^c$ ในสถานะชั่วคราว

ในสภาวะคงตัว (Steady state) ตัวปฏิบัติการของลาปลาซ $s = 0$ เนื่องจากปริมาณต่างๆ บนแกนหมุน $d^c - q^c$ เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ L_{ls}, L_{lr} จะถูกลัดวงจรจากระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ $\lambda_{qs} = 0$ และถ้าลัดทั้งฟลักซ์รั่วไหลแล้ว $\lambda_{qr} \approx 0$ ทำให้ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก R_{os} และ R_{or} ที่อยู่บนแกน d^c จะถูกลัดวงจรดังนั้นจะได้แบบจำลองการสูญเสียของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG บนแกนหมุน $d^c - q^c$ ในสภาวะคงตัวแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 [11, 12, 13]



รูปที่ 5.5 แบบจำลองการสูญเสียของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ของ DFIG บนแกน d^c - q^c ในสภาวะคงตัว

จากแบบจำลองการสูญเสีย (Loss Model) ในรูปที่ 5.5 การสูญเสียที่ตัวนำของขดลวดทางด้านสเตเตอร์ (Stator copper loss)

$$P_{s,cu} = \frac{3}{2} (i_{qs}^2 R_s + i_{ds}^2 R_s) \tag{5.5.3}$$

เมื่อ $i_{qs} = i_{Rqs} + i_{qms}$

เนื่องจาก $i_{Rqs} \ll i_{qms}$ ดังนั้น $i_{qs} \approx i_{qms}$

$$P_{s,cu} = \frac{3}{2} (i_{qms}^2 R_s + i_{ds}^2 R_s) \tag{5.5.4}$$

การสูญเสียที่ตัวนำของขดลวดทางด้านโรเตอร์ (Rotor copper loss)

$$P_{r,cu} = \frac{3}{2} (i_{qr}^2 R_r + i_{dr}^2 R_r) \tag{5.5.5}$$

เมื่อ $i_{qr} = i_{dmr} + i_{Rqr}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก $i_{Rqr} \ll i_{dmr}$ ดังนั้น $i_{qr} \approx i_{qmr}$

และจากระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ถ้าละทิ้งฟลักซ์รั่วไหลแล้ว จะได้ว่า

$$i_{qmr} \approx i_{qms}$$

$$P_{r,cu} = \frac{3}{2} (i_{qms}^2 R_r + i_{dr}^2 R_r) \quad (5.5.6)$$

ผลรวมของการสูญเสียที่ตัวนำทั้งหมด (total copper loss) , $P_{Cu,total}$

$$P_{Cu,total} = P_{s,cu} + P_{r,cu} \quad (5.5.7)$$

$$P_{Cu,total} = \frac{3}{2} [i_{qms}^2 (R_s + R_r) + i_{ds}^2 R_s + i_{dr}^2 R_r] \quad (5.5.8)$$

การสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator iron loss)

$$P_{s,fe} = \frac{3 \omega_s^2 \lambda_{ds}^2}{2 R_{os}(\omega_s)} \quad (5.5.9)$$

แทนค่า

$$\lambda_{ds} = L_m i_{ms}$$

และ

$$R_{os}(\omega_s) = \frac{R_{os}(\omega_{s,rated}) \omega_s}{\omega_{s,rated}}$$

$$P_{s,fe} = \frac{3 \omega_s L_m^2 i_{ms}^2 \omega_{s,rated}}{2 R_{os}(\omega_{s,rated})} \quad (5.5.10)$$

การสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ (Rotor iron loss)

$$P_{r,fe} = \frac{3 \omega_{sl}^2 \lambda_{dr}^2}{2 R_{or}(\omega_{sl})} \quad (5.5.11)$$

ถ้าละทิ้งฟลักซ์รั่วไหลแล้วจะได้ว่า

$$\lambda_{dr} \approx \lambda_{ds} \approx L_m i_{ms}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมุติว่าความหนาแน่นและปริมาตรของแกนเหล็กของโรเตอร์เท่ากับสเตเตอร์จะได้ว่า

$$R_{or}(\omega_{s,rated}) = R_{os}(\omega_{s,rated}) \quad (5.5.12)$$

จากสมการที่ (5.5.2) สามารถเขียนได้ใหม่

$$R_{or}(\omega_{sl}) = \frac{R_{os}(\omega_{s,rated})\omega_{sl}}{\omega_{s,rated}} \quad (5.5.13)$$

ดังนั้นจะได้อะไรการสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ $P_{r,fe}$

$$P_{r,fe} = \frac{3\omega_{sl}L_m i_{ms}^2 \omega_{s,rated}}{2R_{os}(\omega_{s,rated})} \quad (5.5.14)$$

ผลรวมของการสูญเสียที่แกนเหล็กทั้งหมด (total iron loss)

$$P_{fe,total} = P_{s,fe} + P_{r,fe} \quad (5.5.15)$$

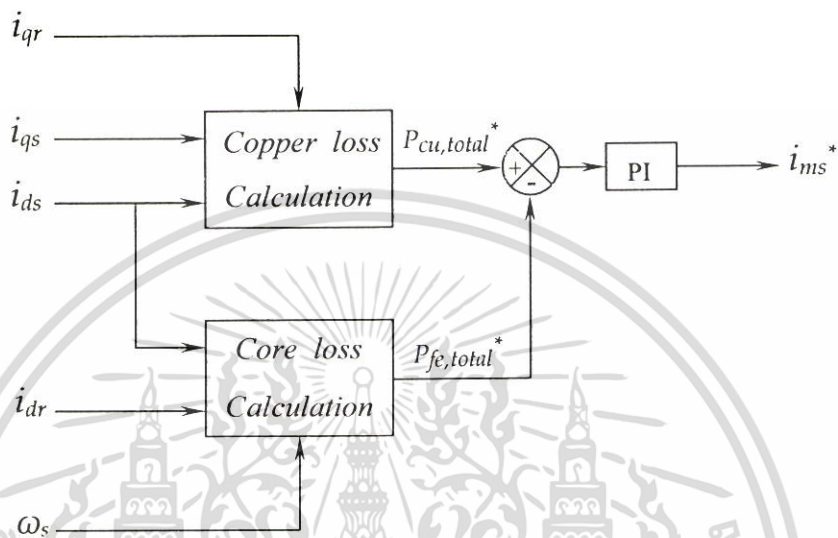
$$P_{fe,total} = \frac{3L_m^2 i_{ms}^2 \omega_{s,rated} (\omega_s + \omega_{sl})}{2R_{os}(\omega_{s,rated})} \quad (5.5.16)$$

ประสิทธิภาพของ DFIG จะมีค่าสูงสุด (Maximum efficiency of DFIG) จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$P_{cu,total} = P_{fe,total} \quad (5.5.17)$$

จากสมการที่ (5.5.16) จะเห็นได้ว่าการสูญเสียที่แกนเหล็กจะเป็นฟังก์ชันของกระแสแมกนีไทซ์ i_{ms} และความถี่ ω_s แต่เนื่องจากว่าความถี่ ω_s^* ถูกใช้ในการควบคุมกำลังสลิปทางด้านโรเตอร์ไปแล้ว ดังนั้นการควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็ก (Iron loss control) ทำได้โดยการควบคุมกระแส i_{ms}^* จากรูปที่ 5.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG โดยใช้ตัวควบคุมพีไอควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็กให้เท่ากับการสูญเสียที่ตัวนำไฟฟ้าตามสมการที่ (5.5.17) สมมุติว่าในกรณีที่การสูญเสียที่แกนเหล็กมีค่า มากกว่าการสูญเสียที่ตัวนำไฟฟ้า ($P_{fe,total}$) ตัวควบคุมพีไอจะได้รับสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่เป็นบวก และตัวควบคุมพีไอจะไปสั่งให้ลดกระแส i_{ms}^* ทำให้การสูญเสียที่แกนเหล็กลดลงในขณะเดียวกันตัวควบคุมพีไอของระบบควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์จะ

สั่งให้เพิ่มกระแสสร้างแรงบิด i_{qr}^* เพื่อรักษาแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ให้มีค่าคงที่ทำให้การสูญเสียที่ตัวนำไฟฟ้า $P_{Cu,total}$ เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าการสูญเสียทั้งสองจะวิ่งเข้าหากันจนอยู่ในระดับที่เท่ากัน



รูปที่ 5.6 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG

5.5.2 ประสิทธิภาพและการไหลของกำลังไฟฟ้าใน DFIG ในสถานะคงตัว

การไหลของกำลังไฟฟ้าในหัวข้อที่ 5.3 เป็นการไหลของกำลังไฟฟ้าในเชิงอุดมคติ (Ideal Power Flow) ยังไม่ได้คิดการสูญเสียทางไฟฟ้าการคำนวณหาประสิทธิภาพของ DFIG หรือ ประสิทธิภาพของระบบจำเป็นต้องคำนึงถึงการสูญเสียต่าง ๆ ของระบบและการสูญเสียของ DFIG ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.4

กำลังงานสูงสุดที่ผลิตได้จากกังหันลม $P_{m,opt}$ (Maximum Mechanical power) ที่ความเร็วออปติ멈

$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_{t,opt}^3 \quad (5.5.18)$$

แรงบิดที่แกน (shaft torque) ของ DFIG

$$T_{m,G} = \frac{P_{m,opt}}{\omega_{m,G}} \quad (5.5.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียทางกล (Mechanical loss) ที่เกิดจากการหมุน (Rotational loss) อันเนื่องมาจากแรงลมและแรงเสียดทานกำหนดให้โดย

$$P_{m,loss} = B\omega_{m,G}^2 \quad (5.5.20)$$

แรงบิดทางกลที่สูญเสียไปเนื่องจากความฝืดและแรงเสียดทาน

$$T_{m,loss} = \frac{P_{m,loss}}{\omega_{m,G}} \quad (5.5.21)$$

กำลังงานกลที่ส่งผ่านช่องว่างอากาศที่ถูกเปลี่ยนสภาพเป็นกำลังแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Power) ใน DFIG

$$P_e = P_{m,opt} - P_{m,loss} \quad (5.5.22)$$

แรงบิดทางกลที่ถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) ใน DFIG

$$T_e = P_e / \omega_{m,G} \quad (5.5.23)$$

หรือ

$$T_e = T_{m,G} - T_{m,loss} \quad (5.5.24)$$

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขดลวดสเตเตอร์ของ DFIG

$$P_g = \frac{3i_{qs}\omega_s\lambda_{ds}}{2} \quad (5.5.25)$$

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์หรือกำลังสลิป (Slip power) ของ DFIG

$$P_{sl} = \frac{3i_{qr}\omega_s\lambda_{dr}}{2} \quad (5.5.26)$$

กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque) ของ DFIG

$$P_e = P_g + P_{sl} \quad (5.5.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าที่เข้าของสเตเตอร์ (Stator terminal power) ของ DFIG

$$P_s = P_g - P_{s,cp} - P_{s,fe} \quad (5.5.28)$$

กำลังไฟฟ้าที่เข้าของโรเตอร์ (Rotor terminal power) ของ DFIG

$$P_r = P_{sl} - P_{r,cp} - P_{r,fe} \quad (5.5.29)$$

กำลังเอาต์พุตของ DFIG (output power)

$$P_{out,DFIG} = P_s + P_r = P_s + P_{sl} - P_{s,cp} - P_{s,fe} - P_{r,cp} - P_{r,fe} \quad (5.5.30)$$

$$P_{out,DFIG} = P_e - P_{s,cp} - P_{s,fe} - P_{r,cp} - P_{r,fe} \quad (5.5.31)$$

P_{sl} และ P_r เป็นบวกเมื่อ DFIG ทำงานในโหมดชูปเปอร์ซิงโครนัส

P_{sl} และ P_r เป็นลบเมื่อ DFIG ทำงานในโหมดซับซิงโครนัส

ประสิทธิภาพของ DFIG

$$\eta_{DFIG} = \frac{P_e - P_{s,cp} - P_{r,cp} - P_{r,fe} - P_{s,fe}}{P_e} = \frac{P_{out,DFIG}}{P_e} \quad (5.5.32)$$

ประสิทธิภาพทางกล (Mechanical efficiency)

$$\eta_{mechanical} = \frac{P_e}{P_{m,opt}} \quad (5.5.33)$$

ประสิทธิภาพของระบบ (System efficiency)

$$\eta_{system} = \eta_{DFIG} \cdot \eta_{mechanical} \cdot \eta_{converter} \quad (5.5.34)$$

หมายเหตุ ถ้าไม่คิดการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical loss) แล้วจะได้ว่า $P_{out,DFIG} \approx P_e$

5.6 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

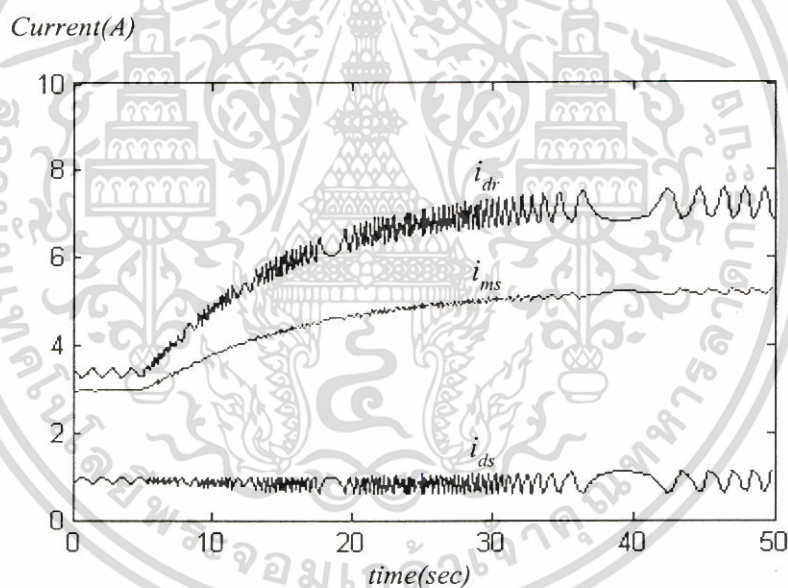
5.6.1 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG ในสถานะชั่วคราว

ผลการจำลองแบบในสถานะชั่วคราวจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียที่ตัวนำทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์การสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมอย่างทันทีทันใดโดยใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมแบบทางอ้อมและแบบทางตรงที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ผลการจำลองแบบในสถานะชั่วคราวขณะที่มีการเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใดจาก $v = 5$ m/s ไปเป็นความเร็วลม $v = 9$ m/s เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบการควบคุมประสิทธิภาพ โดยมีจุดออฟติมัมของการควบคุมคือ ผลรวมของการสูญเสียที่แกนเหล็ก (total iron loss) เท่ากับผลรวมของการสูญเสียที่ตัวนำ (total copper loss) ผลต่างของการสูญเสียที่แกนเหล็กทั้งหมด กับการสูญเสียที่ตัวนำทั้งหมดจะแสดงถึงสมรรถนะของระบบการควบคุมประสิทธิภาพ

5.6.1.1 ผลการจำลองแบบการควบคุมประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิคการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมแบบทางอ้อม

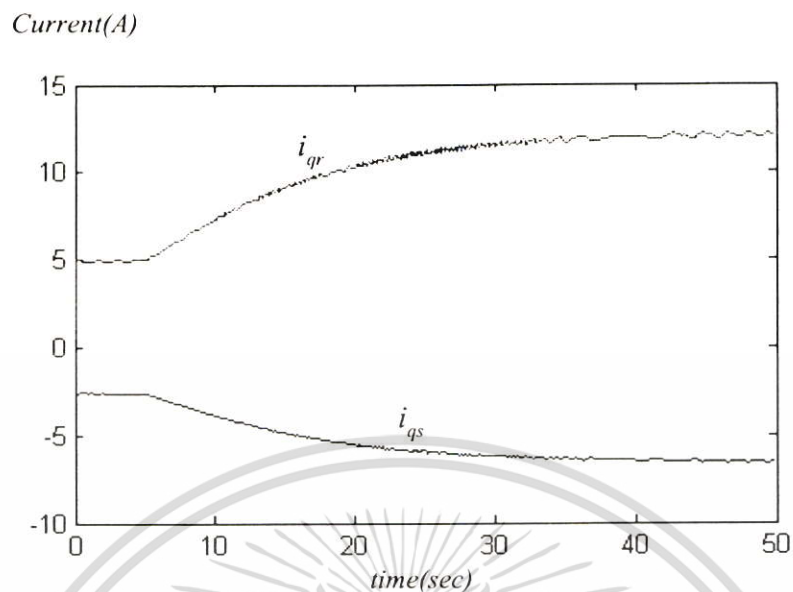
แสดงสมรรถนะของระบบการควบคุมประสิทธิภาพเมื่อใช้เทคนิคการควบคุม ความเร็วรอบของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออฟติมัมแบบทางอ้อม โดยเริ่มต้นในสถานะคงตัวที่เวลา $t = 0$ กังหันทำงานที่ความเร็วออฟติมัมที่ความเร็วลม $v = 5$ m/s ที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจาก $v = 5$ m/s ไปเป็น $v = 9$ m/s จากรูปที่ 5.7 แสดงกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} และกระแสแมกนีโตซึ่ง i_{ms} จะเห็นได้ว่ากระแส i_{ds} จะมีค่าคงที่ตลอดเนื่องจากเราสามารถตั้งค่ากระแสคำสั่ง $i_{ds}^* = 1$ A ได้อย่างอิสระดังนั้นกระแส i_{dr} จะเปลี่ยนแปลงไปตามกระแส i_{ms} ซึ่งเป็นผลมาจากระบบควบคุมประสิทธิภาพเพื่อต้องการรักษาให้ผลรวมของการสูญเสียที่แกนเหล็ก $P_{fe, total}$ มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับผลรวมของการสูญเสียที่ตัวนำ $P_{cu, total}$ ผลก็คือจะทำให้ผลรวมของการสูญเสียทั้งหมด $P_{loss, opt}$ มีค่าต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 5.11 การเพิ่มขึ้นของกระแส i_{ms} และความถี่ ω_s จะทำให้การสูญเสียที่แกนเหล็กของโรเตอร์ $P_{r, fe}$ และการสูญเสียที่แกนเหล็กของสเตเตอร์ $P_{s, fe}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.12 มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยและมีค่าเท่ากันเนื่องจากว่าความถี่ทางด้านสเตเตอร์ ω_s เท่ากับความถี่ทางด้านโรเตอร์ ω_{sr} ดังแสดงในรูปที่ 5.9

จากรูปที่ 5.8 แสดงกระแสสร้างแรงบิดทางด้านโรเตอร์ i_{qr} และกระแสสร้างแรงบิดทางด้านสเตเตอร์ i_{qs} การเพิ่มขึ้น ของกระแสทั้ง 2 นี้เป็นผลมาจากระบบควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม เพื่อให้ติดตามความเร็วอพติมัมเป็นผลให้การสูญเสียที่ตัวนำโรเตอร์ $P_{r,cu}$ และการสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์ $P_{s,cu}$ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.12 จากรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าความถี่ของสเตเตอร์ ω_s มีค่าเท่ากับความถี่ของโรเตอร์ ω_{sl} และมีค่าน้อยกว่า 2 เท่า ของความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ ω_r ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซูปเปอร์ซิงโครนัสที่ค่าสลิป $s = -1$ จากรูปที่ 5.14 แสดงกำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่ขั้วของสเตเตอร์ P_s และโรเตอร์ P_r ซึ่งมีค่าเท่ากัน เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ค่าสลิป $s = -1$ และกำลังเข้าพุทจ่ายออกทั้งหมด $P_{out,DFIG}$ จะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่ากำลังแม่เหล็กไฟฟ้า P_e เนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

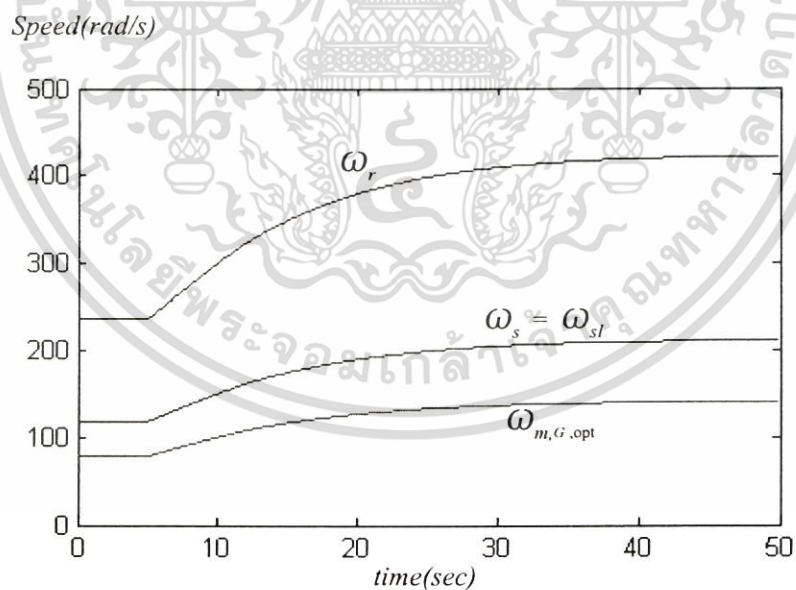


รูปที่ 5.7 กระแสโรเตอร์และกระแสสเตเตอร์ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

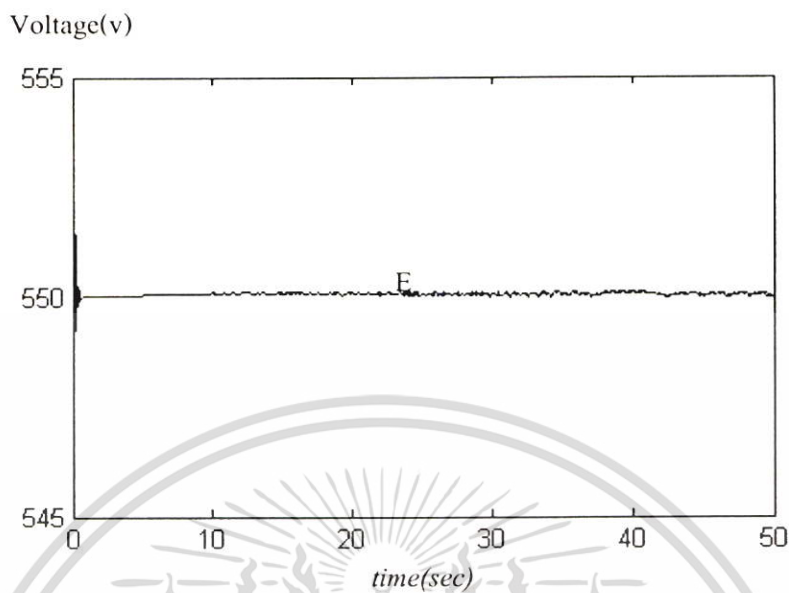


รูปที่ 5.8 กระแสสร้างแรงบิดขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

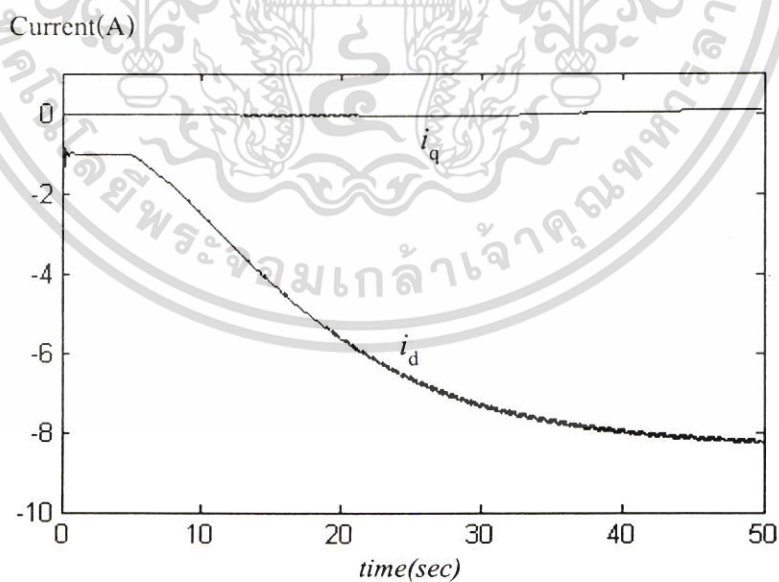


รูปที่ 5.9 ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ และสเตเตอร์ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

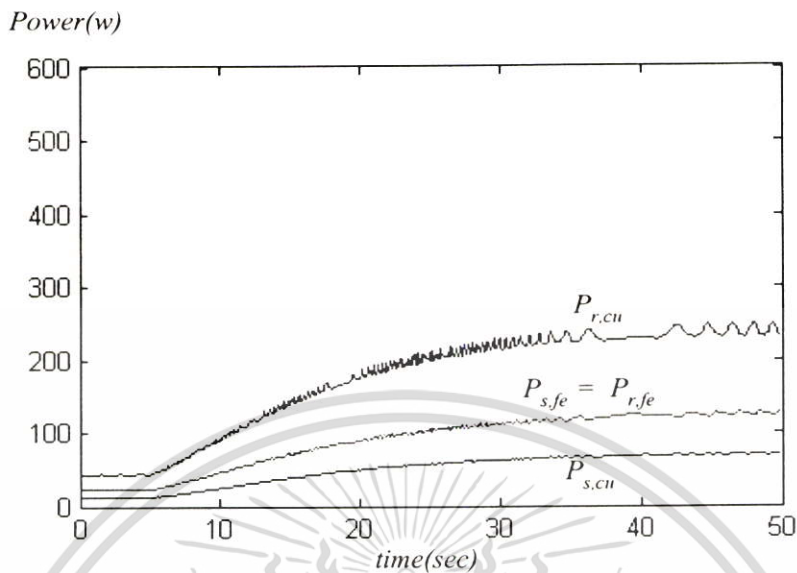


รูปที่ 5.10 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยงขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

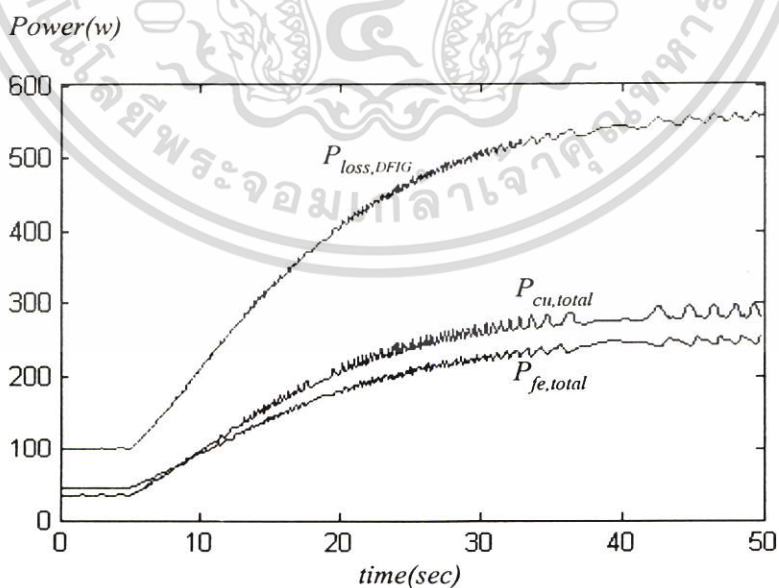


รูปที่ 5.11 กระแสของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน d-q ขณะเพิ่มความเร็วลมอย่างทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

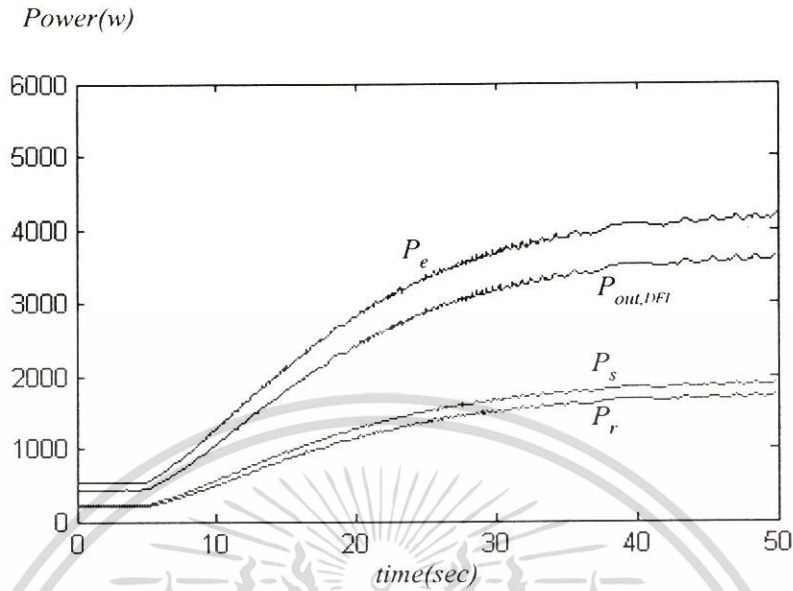


รูปที่ 5.12 การสูญเสียที่ตัวนำและการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้าน โรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์



รูปที่ 5.13 การสูญเสียทั้งหมดที่ตัวนำและที่แกนเหล็กของ DFIG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่ขั้วของสเตเตอร์ P_s และโรเตอร์ P_r และกำลังเข้าพุดจ่ายออกทั้งหมด

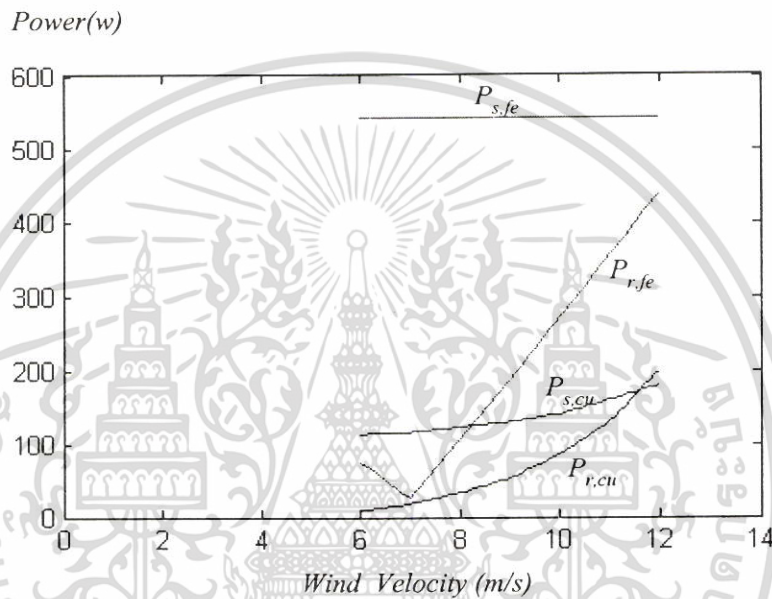
5.6.2 ผลการจำลองแบบในสภาวะคงตัว

ผลการจำลองแบบในสภาวะคงตัวในขณะที่กักห้ามลมทำงานที่ความเร็วพัดมีมที่ความเร็วลมมีค่าคงที่ต่างๆ กันเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะที่มีการควบคุมประสิทธิภาพและในสภาวะที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพที่อาศัยหลักการของเซอร์เบียสคังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียทางกล (Mechanical loss) ประสิทธิภาพทางกล (Mechanical efficiency) การสูญเสียต่างๆ ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electrical loss) ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Efficiency) การสูญเสียที่คอนเวทเตอร์ (Converter loss) และประสิทธิภาพของระบบ (System Efficiency)

5.6.2.1 ผลการจำลองแบบในสภาวะที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้หลักการของเซอร์เบียส

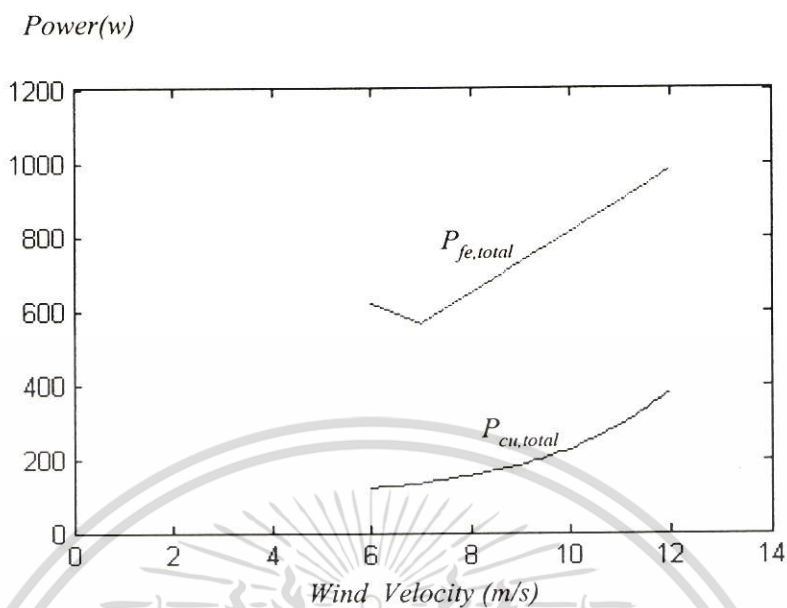
ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทางขับเคลื่อนด้วยกักห้ามลมที่ใช้หลักการของเซอร์เบียส โดยทางด้านสเตเตอร์ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ไฟฟ้าที่มีขนาดคงที่ส่วนทางด้าน โรเตอร์ต่อกับคอนเวทเตอร์ 2 ตัวต่อในลักษณะ back to back ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียในส่วนต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพทางกล, ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและประสิทธิภาพของระบบ จากตัวเลขในตารางที่ 5.1 และจากรูปที่ 5.15 ที่ความเร็วลมมีค่าต่าง ๆ กัน การสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์ $P_{s, fe}$ (stator iron loss) มีค่าคงที่เท่ากับ $P_{s, fe} = 542 \text{ w}$ เนื่องจากปริมาณของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศ (Air gap Flux) และความถี่ของสเตเตอร์มีค่าคงที่ ส่วนการสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ $P_{r, fe}$ (Rotor iron loss) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของโรเตอร์ ที่ความเร็วลม $v = 4 \text{ m/s}$ และ $v = 5 \text{ m/s}$ จะสังเกตเห็นว่ากำลังงานกลสูงสุดที่จุดออกพิดิมจะมีค่าต่ำกว่าการสูญเสียที่แกนเหล็กของ

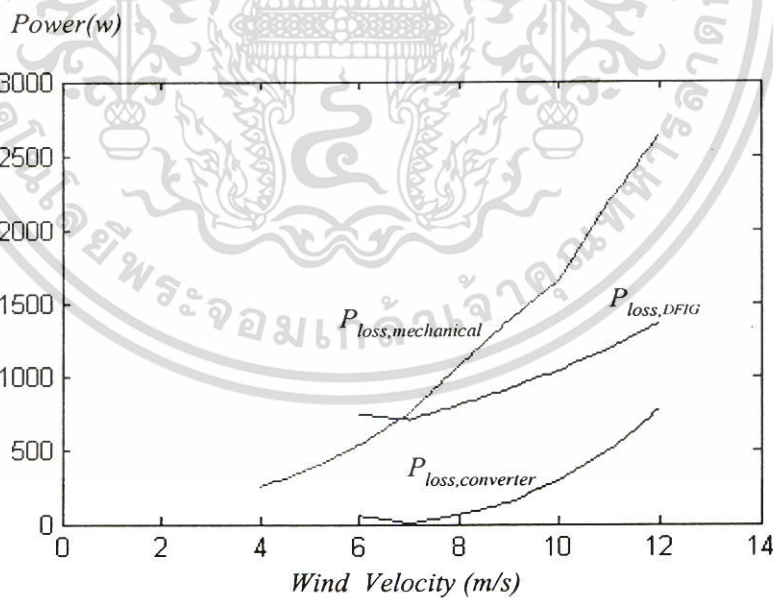


รูปที่ 5.15 การสูญเสียที่ตัวนำและการสูญเสียที่แกนเหล็กทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งนั้นที่ความเร็วลม $v = 4 \text{ m/s}$ และ $v = 5 \text{ m/s}$ จึงไม่สามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จนกระทั่งที่ความเร็วลม $v = 6 \text{ m/s}$ กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า P_e (Electromagnetic power) จะมีค่ามากกว่าการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแหล่งจ่ายไฟได้ ส่วนการสูญเสียที่ตัวนำโรเตอร์ $P_{r,cu}$ และการสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์ (stator copper loss)



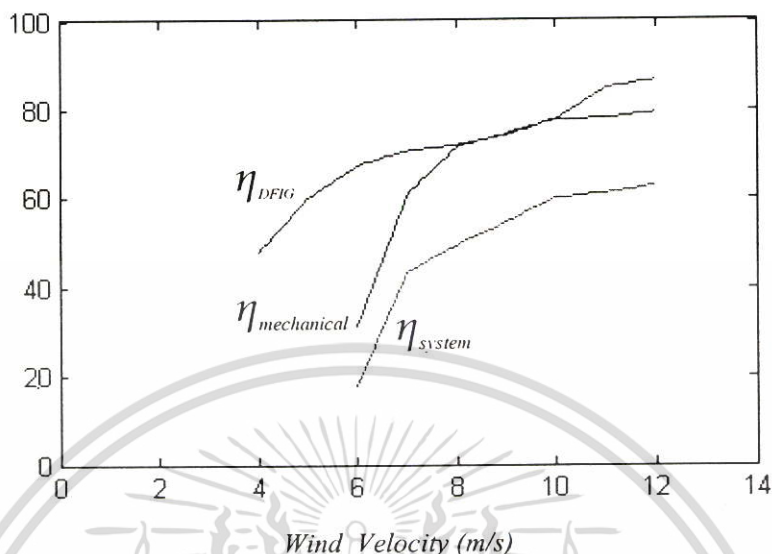
รูปที่ 5.16 การสูญเสียทั้งหมดที่ตัวนำและที่แกนเหล็กของ DFIG



รูปที่ 5.17 การสูญเสียทางกล การสูญเสียที่คอนเวอเตอร์และการสูญเสียใน DFIG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency (%)



รูปที่ 5.18 ประสิทธิภาพของ DFIG ประสิทธิภาพของระบบและประสิทธิภาพทางกล

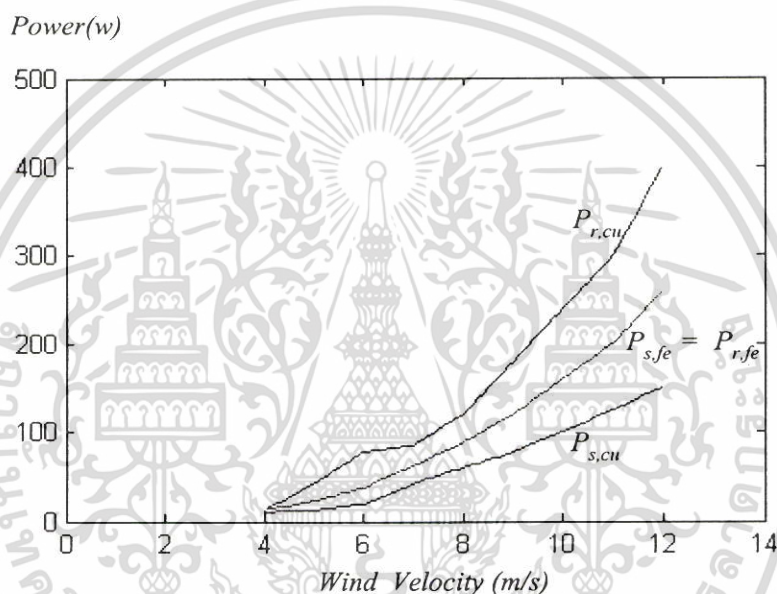
$P_{s, cu}$ จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้นที่ความเร็วลม $v = 6$ m/s กำลังไฟฟ้าที่ขั้วโรเตอร์มีค่าเป็นลบ ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใน โหมดซบซิง โครนัส (subsymchromous Mode) จากรูปที่ 5.16 จะพบว่าที่ความเร็วลมต่างๆ การสูญเสียที่ตัวนำทั้งหมด $P_{cu, total}$ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียที่แกนเหล็กการ ไม่สมดุลกันของการสูญเสียทั้ง 2 นี้ จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำในทางกลับกันเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้นทำให้การสูญเสียที่ตัวนำมีค่าเข้าใกล้ การสูญเสียที่แกนเหล็กมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.14 ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.18 การสูญเสียที่คอนเวอเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ขั้วของโรเตอร์ P_r มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยแสดงในรูปที่ 5.17

ตารางที่ 5.1 การสูญเสียและประสิทธิภาพที่ใช้หลักการของเซอร์เบียส

V (m/s)	$P_{m,opt}$ (W)	$\omega_{m,opt}$ (rad/sec)	P_e (W)	$P_{s, cu}$ (W)	$P_{r, cu}$ (W)	$P_{s, fe}$ (W)	$P_{r, fe}$ (W)	P_{loss} (DFIG) (W)	P_{loss} (converter) (W)	Eff. (Mechanical) (%)	Eff. (DFIG) (%)	Eff. (system) (%)
4	480	62.48	230	-	-	542	200	-	-	-	-	-
5	937	78.18	570	-	-	542	137	-	-	-	-	-
6	1620	93.78	1090	113	9	542	75	739	58.8	67.4	31.3	18
7	2571	109.37	1820	116	18	542	24.5	700.5	6.7	70.7	60.8	43.3
8	3834	125.07	2765	123	33	542	106	804	60	72	71.5	49.5
9	5386	140.67	4000	130	53	542	188	913	144	74.2	74.6	54.6
10	7453	156.26	5800	140	85	542	271	1038	293	77.8	77.8	60
11	9990	172	7800	160	130	542	355	1187	497	78	84.8	61.2
12	12837	187.56	10200	180	200	542	440	1362	771	79.4	86.6	62.8

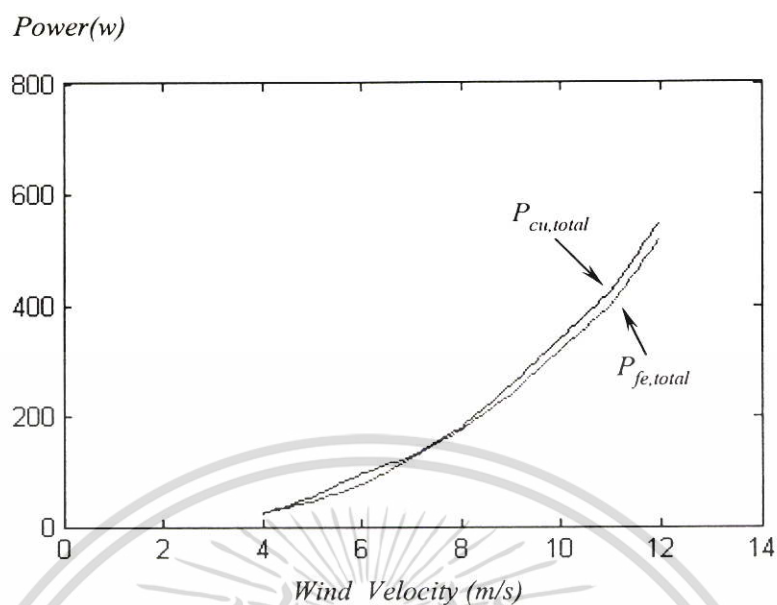
5.6.2.2 ผลการจำลองแบบ การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่าการสูญเสียที่แกนเหล็กโรเตอร์ $P_{r,fe}$ จะมีค่าเท่ากับการสูญเสียที่แกนเหล็กสเตเตอร์ $P_{s,fe}$ เนื่องจากว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ค่าสลิป $s = -1$ ส่วนการสูญเสียที่ตัวนำโรเตอร์ $P_{r,cu}$ และการสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์ $P_{s,cu}$ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่าผลรวมของการสูญเสียที่ตัวนำ $P_{cu,total}$ จะมีค่าใกล้เคียงกับผลรวมของการสูญเสียที่แกน

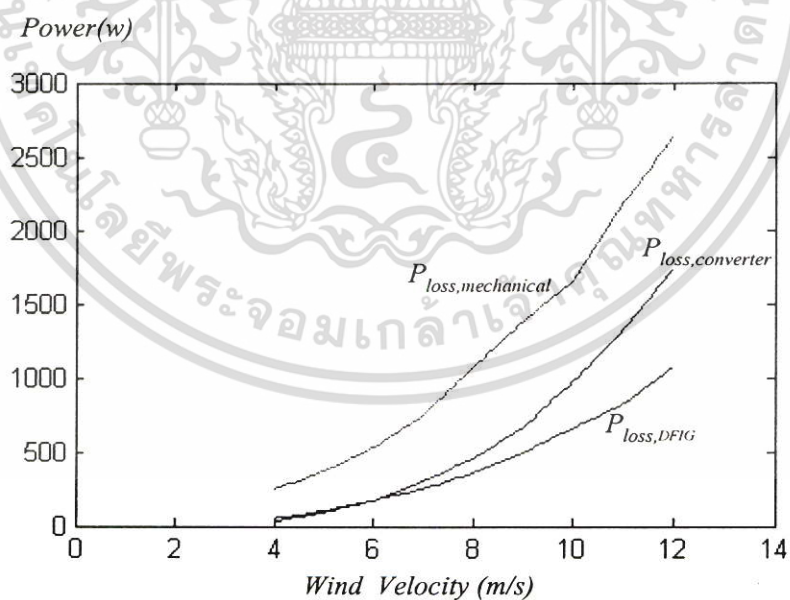


รูปที่ 5.19 การสูญเสียที่ตัวนำและที่แกนเหล็กทางด้านโรเตอร์และทางด้านสเตเตอร์

เหล็ก $P_{fe,total}$ แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมประสิทธิภาพ (Efficiency control system) ทำให้ผลรวมของการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $P_{loss, DFIG}$ มีค่าต่ำสุดซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 5.21 จะเป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียทางกล $P_{loss, mechanical}$ ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบยกกำลังสองและจะมีค่ามากกว่าสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $P_{loss, DFIG}$ ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า η_{DFIG} มี



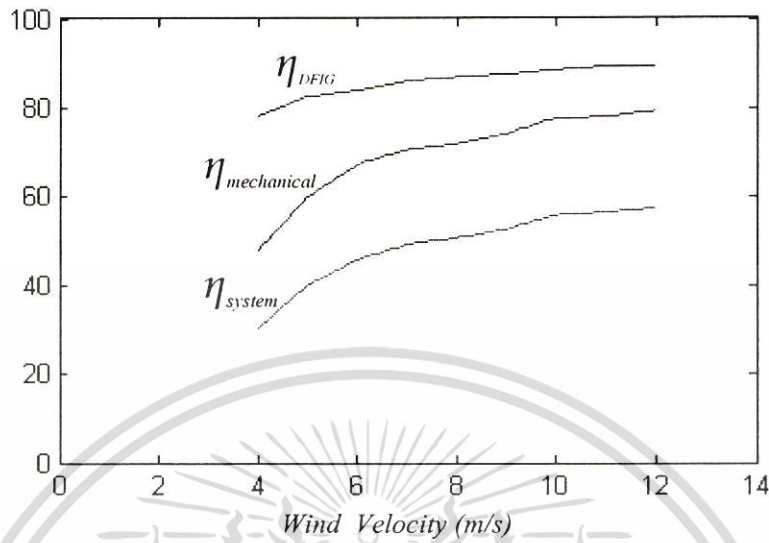
รูปที่ 5.20 การสูญเสียทั้งหมดที่ตัวนำและที่แกนเหล็กของ DFIG



รูปที่ 5.21 การสูญเสียที่คอนเวอเตอร์ การสูญเสียใน DFIG และการสูญเสียทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Efficiency (%)



รูปที่ 5.22 ประสิทธิภาพของระบบประสิทธิภาพของ DFIG และประสิทธิภาพทางกล

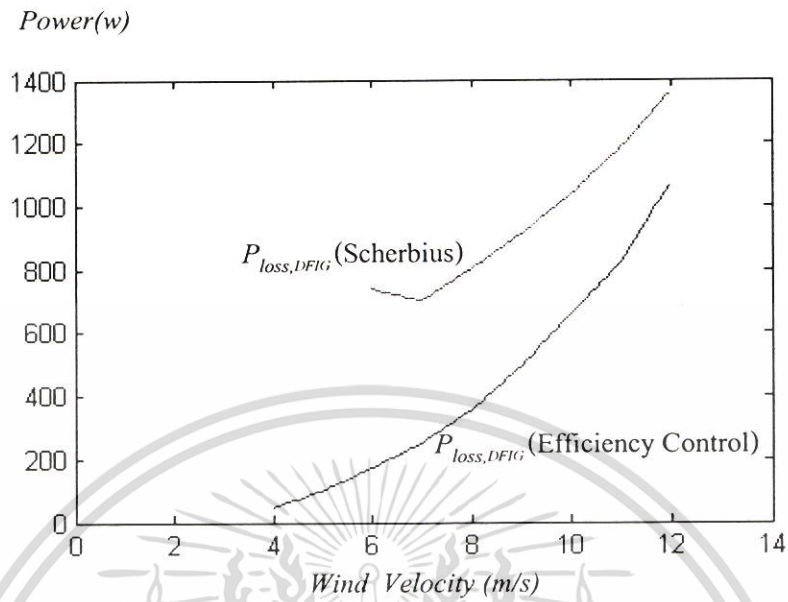
ค่าสูงกว่าประสิทธิภาพทางกล $\eta_{mechanical}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ส่วนการสูญเสียที่คอนเวทเตอร์ $P_{loss,converter}$ สามารถหาค่าได้โดยการสมมติให้คอนเวทเตอร์แต่ละตัวมีประสิทธิภาพเท่ากันคือ 90 เปอร์เซ็นต์ การสูญเสียนี้จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบ η_{system} ลดต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากมีค่ามากกว่าการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากรูปที่ 5.22 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า η_{DFIG} จะมีค่าค่อนข้างสูงและคงที่สม่ำเสมอถึงแม้ว่าความเร็วลมจะมีค่าต่ำก็ตาม เนื่องจากมีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าสูงสุดอยู่ตลอดเวลา ส่วนประสิทธิภาพทางกล $\eta_{mechanical}$ จะมีค่าต่ำที่ความเร็วรอบและความเร็วลมมีค่าต่ำและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบของกังหันลมมีค่าเพิ่มขึ้นหรือมีความเร็วลมมากขึ้นเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 5.2 การสูญเสียและประสิทธิภาพขณะที่มีการควบคุมประสิทธิภาพของ DFIG

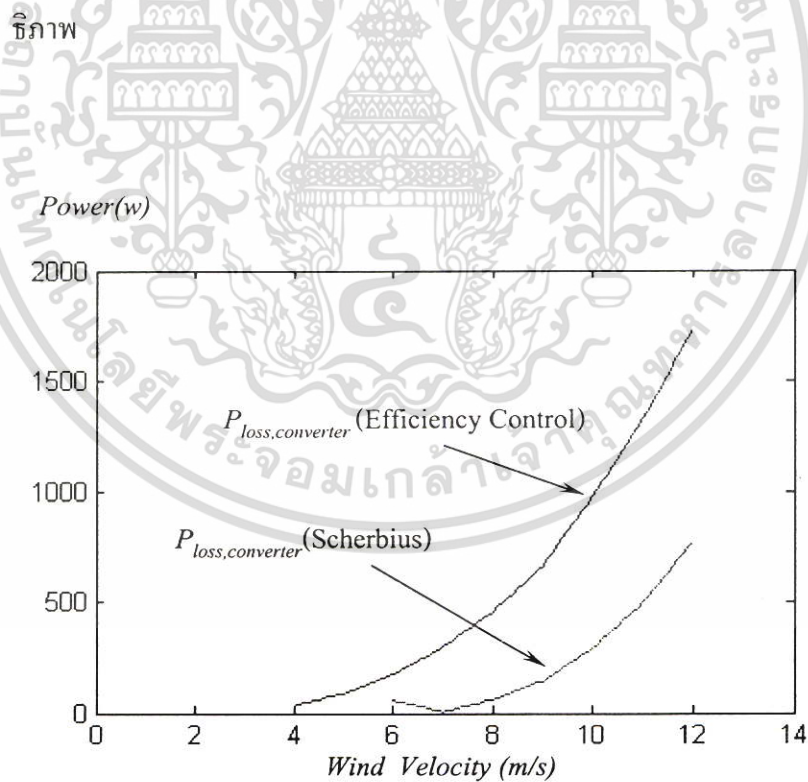
V (m/s)	$P_{m,opt}$ (W)	$\omega_{m,opt}$ (rpm)	P_e (W)	$P_{s, cu}$ (W)	$P_{r, cu}$ (W)	$P_{s, fe}$ (W)	$P_{r, fe}$ (W)	P_{loss} (DFIG) (W)	P_{loss} (converter) (W)	Eff. (Mechanical) (%)	Eff. (DFIG) (%)	Eff. (system) (%)
4	480	62.48	230	11	13	13	13	50	34.2	48	78.3	30.4
5	937	78.18	570	12	42	23	23	100	89.3	60	82.5	40
6	1620	93.78	1090	20	78	38	38	174	174	67.4	84	45.8
7	2571	109.37	1820	42	85	62	62	251	298	70.7	86.2	49.3
8	3834	125.07	2765	60	120	88	88	356	457	72	87	50.73
9	5386	140.67	4000	77	180	120	120	497	665	74.2	87.6	52.65
10	7453	156.26	5800	100	240	160	160	660	976	77.8	88.6	55.84
11	9990	172	7800	125	300	200	200	825	1325	78	89.4	56.5
12	12837	187.56	10200	150	400	260	260	1070	1734	79.4	89.5	57.5

5.6.2.3 ผลการจำลองแบบเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการสูญเสียของระบบขับเคลื่อนที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับระบบขับเคลื่อนที่มีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.23 เป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $P_{loss, DFIG}$ ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไมมีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้การสูญเสียที่ตัวนำมีค่าใกล้เคียงกับการสูญเสียที่แกนเหล็ก การไม่สมดุลกันระหว่างการสูญเสียที่ตัวนำกับการสูญเสียที่แกนเหล็กจะทำให้ผลรวมของการสูญเสียทั้งหมดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า η_{DFIG} ในรูปที่ 5.25 มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่มีการควบคุมประสิทธิภาพอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในกรณีที่ความเร็วลมมีค่าต่ำๆ ตั้งแต่ $v = 4$ m/s จนกระทั่งถึง $v = 10$ m/s แต่เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น $v = 12$ m/s ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสจะมีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงกับในกรณีที่มีการควบคุมประสิทธิภาพแต่ถึงอย่างไรก็ตามระบบที่มีการควบคุมประสิทธิภาพจะมีการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์ $P_{loss, converter}$ สูงกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบโดยให้คอนเวอเตอร์มีประสิทธิภาพ 90 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 5.24 การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์จะมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจากรูปที่ 5.26 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจะได้ว่าที่ความเร็วลมมีค่าต่ำๆ คือ $4 \leq v \leq 8$ m/s ระบบที่มีการควบคุมประสิทธิภาพประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพเนื่องจากว่าที่ความเร็วลมต่ำ การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า $P_{loss,DFIG}$ จะมีค่าสูงกว่าการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์ในทางกลับกันเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงๆ คือ $v > 8$ m/s การสูญเสียที่คอนเวอเตอร์จะมีค่ามากกว่าการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพของระบบที่มีการควบคุมประสิทธิภาพ



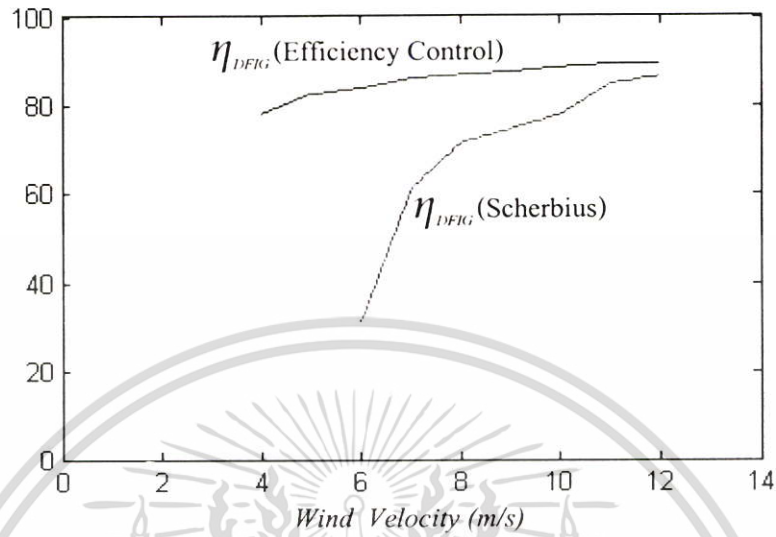
รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบการสูญเสียของ DFIG ที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุมประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบการสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุมประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

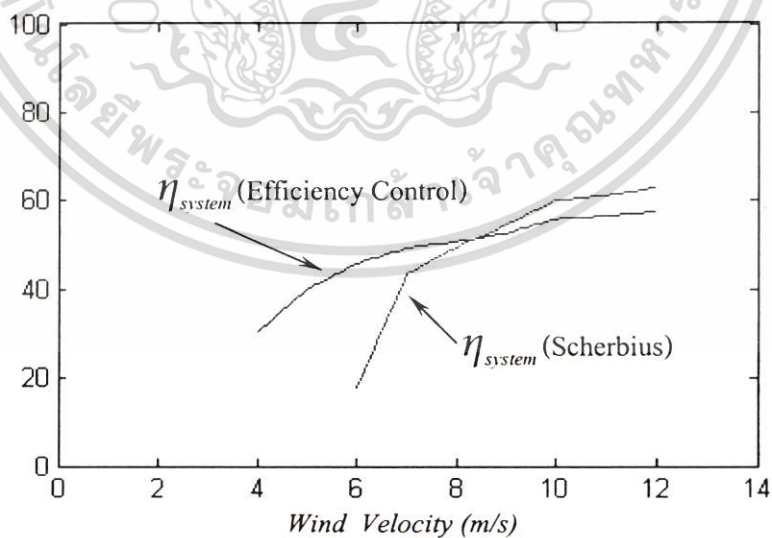
Efficiency (%)



รูปที่ 5.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ DFIG ที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุมประสิทธิภาพ

ภาพ

Efficiency (%)



รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ใช้หลักการของเซอร์เบียสกับหลักการควบคุมประสิทธิภาพ

ภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.7 สรุปผลการจำลองแบบ

จากผลการจำลองแบบในสภาวะชั่วคราวแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบควบคุมประสิทธิภาพในการควบคุมการสูญเสียที่แกนเหล็กให้เท่ากับการสูญเสียที่ตัวนำขณะมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมอย่างทันทีทันใดภายใต้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ ระบบที่มีการควบคุมประสิทธิภาพจะมีการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพ โดยเฉพาะที่ความเร็วลมมีค่าต่ำๆ ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพ แต่มีข้อเสียตรงที่การสูญเสียที่คอนเวกเตอร์จะมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพ ดังนั้นระบบที่มีการควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้ผลดีที่ความเร็วลมมีค่าต่ำๆ เท่านั้นเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้นระบบที่มีการควบคุมประสิทธิภาพจะมีการสูญเสียที่คอนเวกเตอร์มากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพ โดยรวมของระบบที่ไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าก็ตาม ส่วนประสิทธิภาพทางกลจะมีค่าต่ำที่ความเร็วลมต่ำๆ หรือที่ความเร็วรอบต่ำ และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นหรือมีความเร็วรอบสูงขึ้นเนื่องจากว่าการสูญเสียทางกลจะแปรไปตามความเร็วรอบยกกำลังสองแต่ที่กำลังงานกลสูงสุดจะแปรไปตามความเร็วรอบยกกำลังสาม

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง ที่สามารถปรับความเร็วได้โดยการใช้หลักการของเซอร์เบียงที่มีวงจรถูกตั้งเป็น คอนเวอเตอร์ 2 ตัว ต่อแบบ back-to-back ซึ่งประกอบด้วยคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ (supply side converter) โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสสำหรับควบคุมแรงดันไฟ ดีซีลิงค์ สามารถทำงานได้ทั้ง 2 โหมด คือ เร็คติไฟเออร์โหมด และอินเวอเตอร์โหมด และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟให้กับแหล่งจ่ายไฟได้ ส่วนคอนเวอเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Roter side converter) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และนำกำลังสลิปกลับคืนสู่แหล่งจ่ายไฟ

การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักที่สเตเตอร์ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้างฟลักและกระแสสร้าง แรงบิดมีสมรรถนะ การทำงานที่รวดเร็วกว่าการควบคุมแบบสเกลาร์การควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ติดตามความเร็วออปติ멈ของกังหันลมจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบทางตรง (direct speed control) และเทคนิคการควบคุมแบบทางอ้อม (Indirect speed control) จะมีผลตอบสนองในสภาวะคงตัวเหมือนกันคือที่จุดออปติ멈

ในระบบขับเคลื่อนแบบ SADFIC แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไม่เรียบโดยเฉพาะที่โหลดเบา ๆ เนื่องจากมีอาร์โมนิกส์จากการควบคุมโหลดช่วยไหลเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความถี่สวิทช์ของคอนเวอเตอร์ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้มีค่าคงที่ ทำได้โดยการควบคุมกระแสแมกนีไตซ์ i_{ms} ให้มีค่าคงที่

การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้นที่ความเร็วลมต่ำ ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมประสิทธิภาพ จะได้ผลดีที่ความเร็วลมมีค่าต่ำ ๆ เท่านั้น เนื่องจากที่ความเร็วลมมีค่าสูง ๆ จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียที่คอนเวอเตอร์มีค่ามากกว่าการสูญเสียที่เครื่องกำเนิด

ในระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง โดยการใช้เทคนิคการควบคุมทางด้านโรเตอร์ร่วมกับทางด้านสเตเตอร์ มีข้อได้เปรียบคือ สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงเป็น 2 เท่า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก และมีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วค่อนข้างเรียบกว่าระบบของ SADFIC เนื่องจากแรงดันพีคดับลิวเอ็ม ของคอนเวอเตอร์จะถูกกรองด้วยวงจร LC ฟิวเจอร์ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้คอนเวอเตอร์ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นจำเป็นต้องขอเอกสารด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย จะทำให้ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวเร็วขึ้น และมีสมรรถนะที่เหนือกว่า และที่สำคัญ จะไม่มีฮาร์โมนิกส์ของกระแสไปรบกวนแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วซึ่งต่างจากระบบของ SADFIG ที่ใช้หลักการของเซอร์เบีส

6.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความเหมาะสมกับเครื่องต้นกำลังที่เป็นกังหันลมเนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีมีความยืดหยุ่นได้ มีเสถียรภาพที่เหนือกว่าเครื่องจักรไฟฟ้าประเภทอื่นเช่น เครื่องจักรซิงโครไนส์ เครื่องต้นกำลังแบบที่เป็นกังหันลมต้องการ การปรับความเร็วรอบเพื่อให้เกิดกำลังงานกลสูงสุด กล่าวคือ ที่ความเร็วลมต่าง ๆ กัน จะเกิดกำลังงานกลสูงสุดที่ความเร็วไม่เท่ากัน ย่านของการปรับความเร็วรอบไม่กว้างมาก การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกระตุ้น 2 ทางจึงมีความเหมาะสม ในแง่ของการลงทุน เนื่องจากใช้วิธีการปรับความเร็วรอบโดยการปรับกำลังสลิป ทำให้ชุดหรืออุปกรณ์ปรับความเร็วมีราคาถูกลงเมื่อถูกติดตั้งอยู่ทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพราะมีพิกัดกำลังต่ำกว่าเมื่อติดตั้งทางด้านสเตเตอร์ อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถควบคุมความเร็วลมหรือพลังงานลมได้ตามความต้องการเหมือนกับเครื่องต้นกำลังประเภท อื่นๆ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนหรือ พลังงานเสริม ไม่สามารถที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานหลักที่ต้องการความมั่นคงของความต้องการพลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟได้ ในระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบที่ทำงานด้วยตัวเองไม่ควรใช้ การควบคุมโหลดช่วยด้วยการต่อความต้านทานนอกจากจะเป็นการสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ แล้วยังทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกด้วย ควรจะนำกำลังไฟฟ้าส่วนเกินนี้ไปใช้ประโยชน์เช่น เก็บไว้ในแบตเตอรี่ หรือนำไปขับปั๊มน้ำสำหรับการเกษตรกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิเชษฐ ฉัตรพาน, วิจิตร กิณเรศ, “การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางโดยใช้กึ่งนำเป็นตัวขับเคลื่อน”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, หน้า 223-228
- [2] พิเชษฐ ฉัตรพาน, ประเสริฐ สอระสัน, วิจิตร กิณเรศ, “การควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทาง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2, หน้า 54-59, มิถุนายน 2544
- [3] พิเชษฐ ฉัตรพาน, วิจิตร กิณเรศ, “การวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคควบคุมกระแสสำหรับการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบเวกเตอร์ฟลักซ์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17 ฉบับที่ 2, หน้า 113 -118, มิถุนายน 2543
- [4] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรตถ, “การเลือกชุดมอเตอร์อุตสาหกรรมโดยใช้หลักเศรษฐศาสตร์”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 9 ฉบับที่ 3, หน้า 38-43, ตุลาคม-พฤศจิกายน 2531
- [5] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรตถ, ณรงค์เดช ศรีอัสวอมร, “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] ศิวะ หงษ์นิภา, “ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ”, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [7] มงคล ทองสงคราม, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, สำนักพิมพ์ พรศิวกการพิมพ์, หน้า 215-250
- [8] ธวัชชัย อัดถวิบูลย์กุล, “เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2”, แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลังวิทยาลัยช่างกลปทุมวัน, หน้า 239-286
- [9] 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
- [10] B.K. Bose, “An adaptive hysteresis-band current control technique of a voltage-fed PWM inverter for machine drive system,” IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] 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
- [12] 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.
- [13] Iordanis K, Nikos M, “Loss Minimization in Scalar Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers”. IEEE Tans. Power Electronics, Vol.11, No.2, March 1996, pp.213-220.
- [14] Musgrove P J, “Wind Energy Conversion – an Introduction”, IEE Proceedings A, Vol. 130, No.9, 1983, pp.507-516.
- [15] Fريس L, “Wind Energy Conversion Systems”, Prentice hall, 1990.
- [16] “Electrical Generation Aspects of Wind Turbine Operation”, Proceedings of a BWEA-D En Workshop, 1987, pp.11-20.
- [17] Hinirichsen 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.
- [18] Jamieson P, Rawlinson-Smith R, “High Lift Aerofoils for Horizontal Axis Wind Turbines”. Variable Pitch Wind Turbine Generators”. BWEA Conference, 1990, pp 85-90.
- [19] Buehring J K, Fريس L L, “Control Policies for Wind-energy Conversion Systems”. IEE Proceedings C, Vol. 128, No 5, 1981, pp 253-261
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] B. Connor and Leithhead W E, ‘The Effect of Rotor Characteristic on the Control of Pitch Regulated Variable Speed Wind Turbines’. BWEA Convergence, 1994, pp 67-72.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Leithhead, W E, De La Salle 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
- [24] 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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 1

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง (Double Fed Induction Generator)

พิกัดกำลังไฟฟ้า		7.5 KW
พิกัดของแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์	V_s	= 415 V
พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์	V_r	= 440 V
พิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดสเตเตอร์	i_s	= 19 A
พิกัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดโรเตอร์	i_r	= 11 A
ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์	R_s	= 1.06 Ω
ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์	R_r	= 0.8 Ω
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์	L_s	= 0.2065 H
ค่าความเหนี่ยวนำร่วม เมื่อพิจารณาทางด้านโรเตอร์	L_{mr}	= 0.0664 H
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์ เมื่อพิจารณาทางด้านโรเตอร์	L_r	= 0.0810 H
ค่าความเหนี่ยวนำภายนอกเมื่อพิจารณาทางด้านโรเตอร์	L_{ext}	= 0.0320 H
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	P	= 6 โพล
ความเร็วรอบที่พิกัด	N_m	= 970 rpm
แรงบิดที่พิกัด	T_e	= 75 N-m
อัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ต่อขดลวดโรเตอร์	n	= 1.7
ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบเคลด้า		
ขดลวด โรเตอร์ต่อแบบสตาร์		

1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก (Squirrel cage Induction Generator)

ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง คัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอก โดยการลัดวงจรทางด้านโรเตอร์

1.3 วงจรคอนเวอเตอร์ (Converter circuit)

ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง	C	= 2400 μ F
ค่าความเหนี่ยวนำของคอนเวอเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ	L	= 100 mH

1.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (A.C. 3 phase supply)

แรงดันระหว่างสาย	V_s	= 380 V
ความถี่	f_s	= 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 1 (ต่อ)

1.5 กังหันลม (Wind Turbine)

กำลังงานกลที่พิกัด (Rated Mechanical Power)	P_m	=	7.5 Kw
รัศมี	r	=	3.24 m.
ความหนาแน่นของอากาศ	ρ	=	1.299
ความเร็วลมต่ำสุด (Cut in wind velocity)	v	=	4 m/s
ความเร็วลมที่พิกัด (Rated wind velocity)	v	=	10 m/s
ค่าแรงเฉื่อย (Inertia)	J	=	7.5 Kg m^2
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	B	=	0.06 Nmsrad $^{-1}$

1.6 วงจรกรองของโหลดช่วยแบบ LC (LC Filter)

L	=	333 mH
C	=	14.28 uF

1.7 โหลดช่วย (Auxiliary load)

ค่าความต้านทานของโหลดช่วย	R_{aux}	=	50 Ω
---------------------------	-----------	---	-------------

1.8 โหลดหลัก (Main Load)

1.8.1 ค่าความต้านทานของโหลดหลักของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบ กระตุ่น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทำงานได้ด้วยตัวเอง

$$R_L = 300 \Omega$$

1.8.2 ค่าความต้านทานของโหลดหลักของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบ กระตุ่น 2 ทาง โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมทางด้านโรเตอร์ร่วมกับทางด้านสเตเตอร์ โดยใช้ กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทำงานได้ด้วยตัวเอง

$$R_L = 500 \Omega$$

1.9 วงจรกรองแรงดันไฟฟ้าเอาพุทของคอนเวอเตอร์ทางด้านโหลดแบบ LC

L	=	100 mH
C	=	10 uF

ภาคผนวก 2

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในการจำลองแบบ

2.1 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟ (Supply Side converter control)

2.1.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเชื่อมโยง (DC Link Voltage control)

$$E^* = 550 \quad \text{V}$$

$$K_p = 0.173$$

$$K_i = 4.89$$

2.1.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน q, I_q

$$K_p = 350$$

$$K_i = 1$$

2.1.3 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสไฟตรงของคอนเวอร์เตอร์ด้านแหล่งจ่ายไฟบนแกน d, I_d

$$K_p = 350$$

$$K_i = 3$$

2.2 ตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง โดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทำงานโดยอาศัยแหล่งจ่ายไฟ

2.2.1 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side converter control)

2.2.1.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสไฟตรงบนแกน q^r ทางด้านโรเตอร์, i_{qr}

$$K_p = 150$$

$$K_i = 2.5$$

2.2.1.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสไฟตรงบนแกน d^r - q^r ทางด้านโรเตอร์, i_{dr}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 2 (ต่อ)

$$K_p = 50$$

$$K_i = 2$$

2.2.2 การควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม โดยอาศัยเทคนิคการควบคุมโดยทางอ้อม

2.2.2.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความเร็ว

$$K_p = 5$$

$$K_i = 0.25$$

2.2.2.2 อัตราขยายป้อนกลับของค่าความผิดพลาดในการประเมินค่าความเร็วรอบของกังหันลม

$$k_{01} = 0.98$$

$$k_{02} = 5.9$$

2.3 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทางโดยใช้กังหันลมเป็นตัวขับเคลื่อนแบบที่ทำงานได้ด้วยตัวเอง

2.3.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสแมกนีโตซิ่ง, i_{ms}

$$K_p = 6$$

$$K_i = 10$$

2.3.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกน q^c , i_{qr}

$$K_p = 250$$

$$K_i = 30$$

2.3.3 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสโรเตอร์แกน d^c , i_{dr}

$$K_p = 250$$

$$K_i = 30$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 2 (ต่อ)

2.3.4 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าของโหลดช่วย (Auxiliary Load Power control)

$$\begin{aligned} K_p &= 500 \\ K_i &= 2000 \end{aligned}$$

2.4 การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกระตุ้น 2 ทาง

2.4.1 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านสเตเตอร์ (stator side converter control)

2.4.1.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสเตเตอร์บนแกน d^c , i_{ds}

$$\begin{aligned} K_p &= 150 \\ K_i &= 10 \end{aligned}$$

2.4.1.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสสเตเตอร์บนแกน q^c , i_{qs}

$$\begin{aligned} K_p &= 150 \\ K_i &= 10 \end{aligned}$$

2.4.1.3 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสแมกนีไตซิ่ง, i_{ms}

$$\begin{aligned} K_p &= 6 \\ K_i &= 10 \end{aligned}$$

2.4.2 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side converter control)

2.4.2.1 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกน d^c , i_{dr}

$$\begin{aligned} K_p &= 190 \\ K_i &= 10 \end{aligned}$$

2.4.2.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสโรเตอร์บนแกน q^c , i_{qr}

$$K_p = 190$$

ภาคผนวก 2 (ต่อ)

Ki = 10



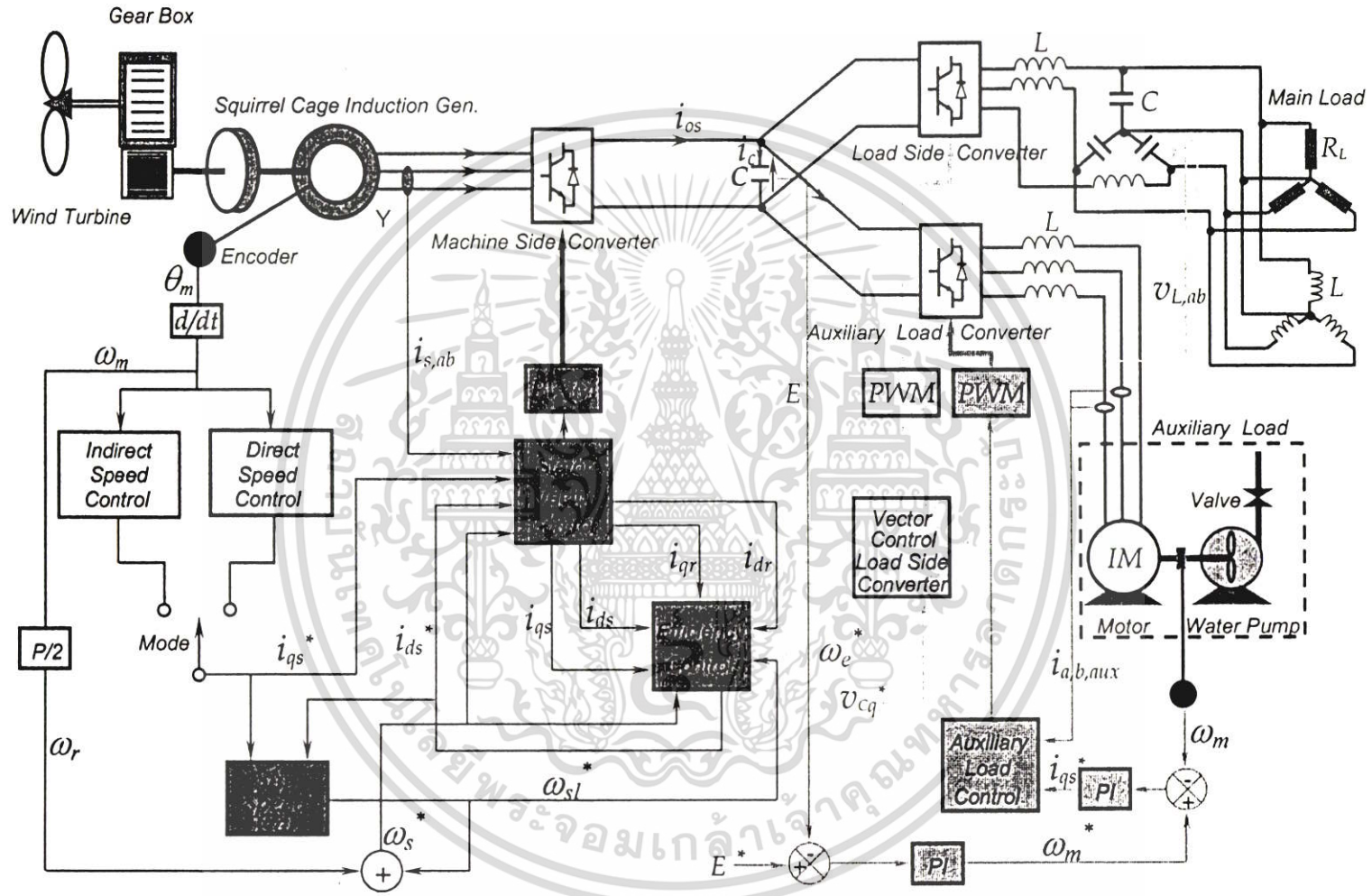
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก 3

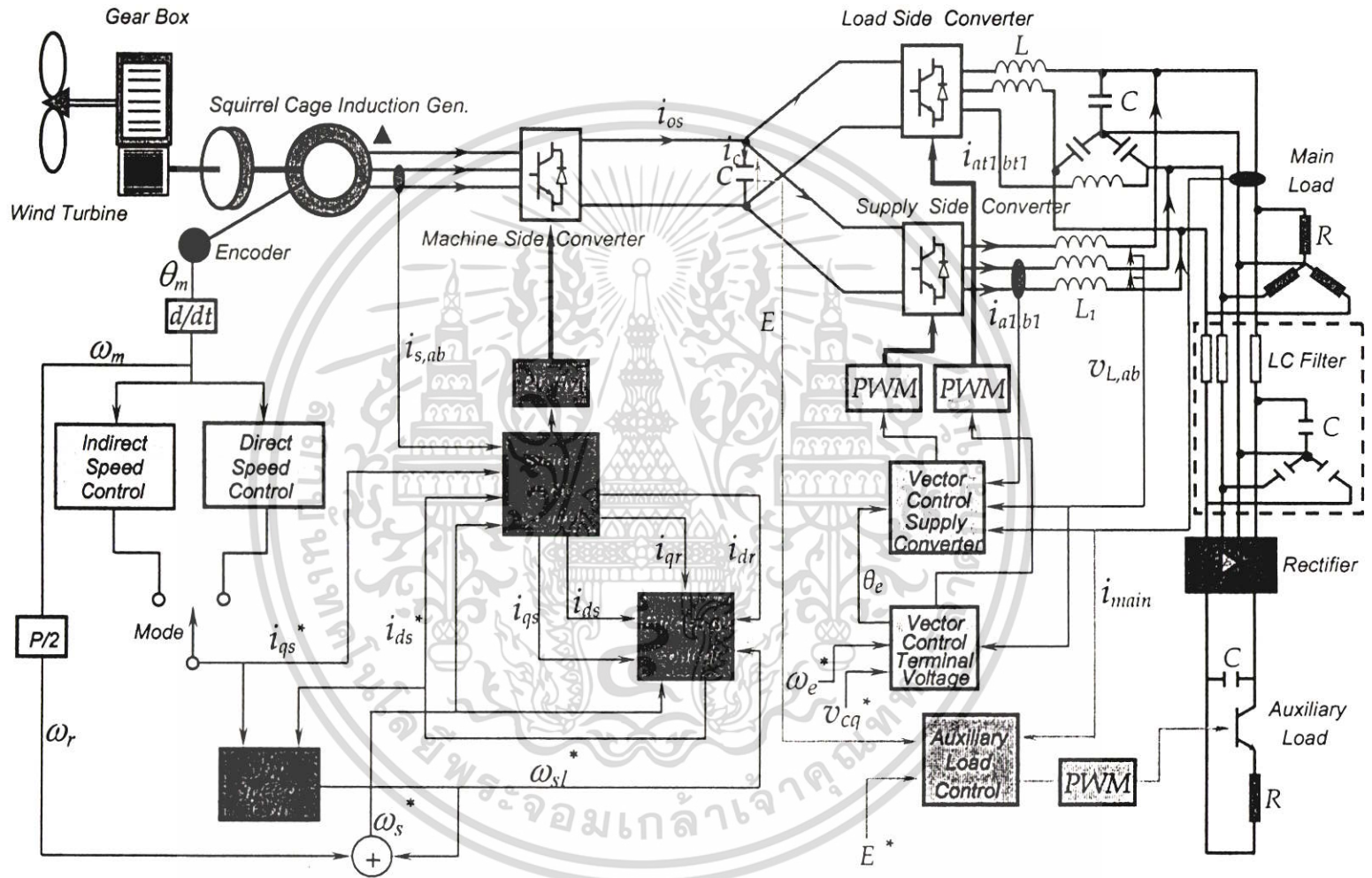
ตัวอย่างระบบขับเคลื่อนสำหรับแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของระบบ
ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้กังหันลม
เป็นตัวขับเคลื่อนแบบที่ทำงานได้ด้วยตนเอง



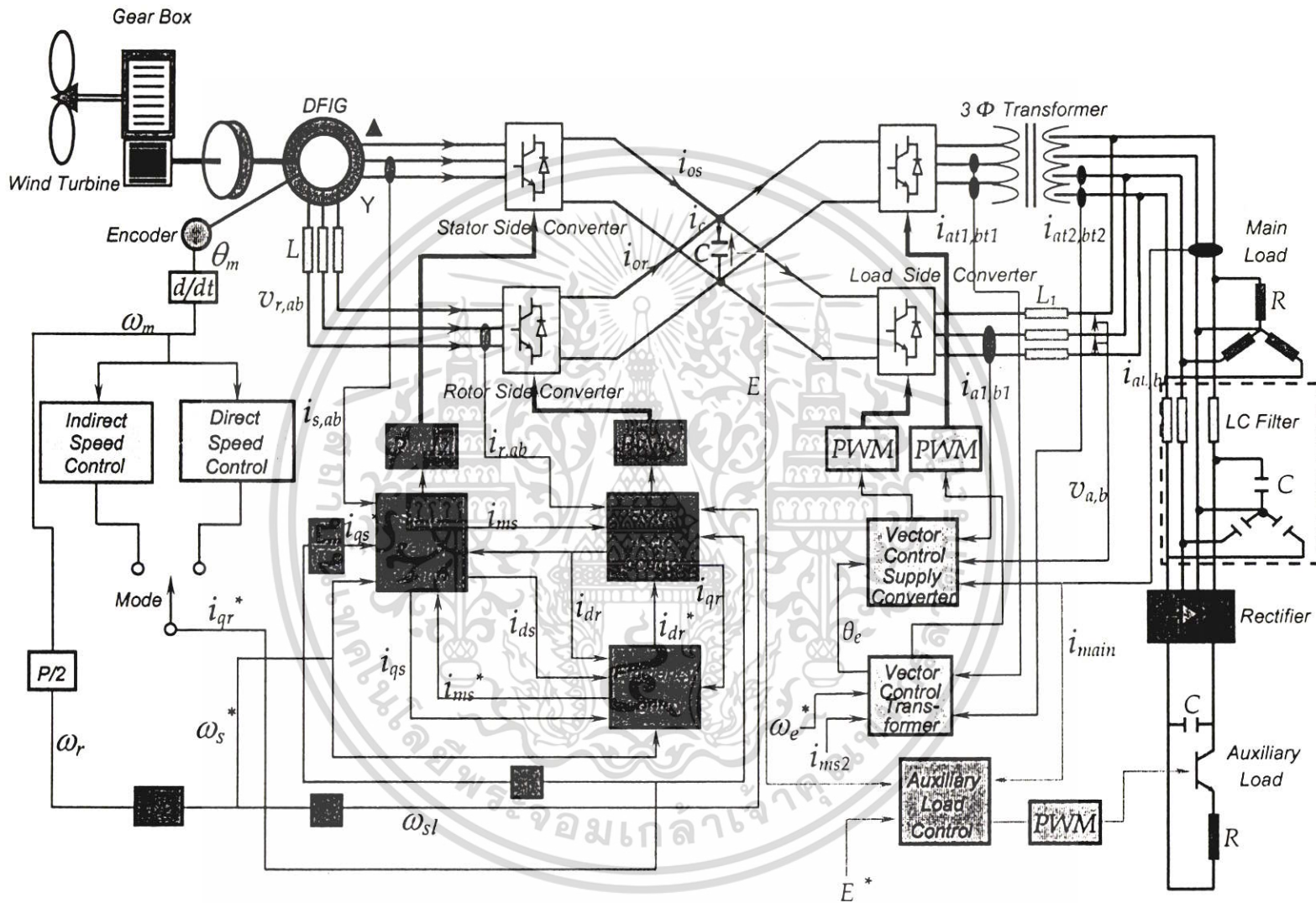
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปตัวอย่าง 1 ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอกขับเคลื่อนด้วยกังหันลมที่ทำงานได้ด้วยตัวเองโดยมีโหลดช่วย เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สำหรับขับปั๊มน้ำที่ถูกควบคุมด้วยคอนเวอเตอร์



รูปตัวอย่าง 2 ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรงกระรอกขับเคลื่อนด้วยกังหันลมที่ทำงานได้ด้วยตัวเองโดยใช้คอนเวอเตอร์อีกตัวหนึ่งต่อขนานกับโหลดสำหรับจ่ายกระแสให้กับโหลด



รูปตัวอย่าง 3 ระบบขับเคลื่อน DFIG โดยใช้เทคนิคการควบคุมด้านโรเตอร์ร่วมกับทางด้านสเตเตอร์ขับเคลื่อนด้วยกังหันลมที่ทำงานได้ด้วยตัวเองโดยใช้คอนเวอเตอร์ควบคุมหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส

การประกวดการแข่งขันโปรแกรม

MATLAB

Academic Contest

จัดโดยบริษัท

TECHSOURCE SYSTEMS (THAILAND)

ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

วันที่ 9 กรกฎาคม 2547

ในงาน

THAILAND ELECTRONIC 2004

ผลการประกวดการแข่งขัน

ได้รับรางวัล

รองชนะเลิศอันดับที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Academic Contest

TechSource Systems (Thailand) Co., Ltd certifies that

นายพิเชษฐ์ ฉัตรพาน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

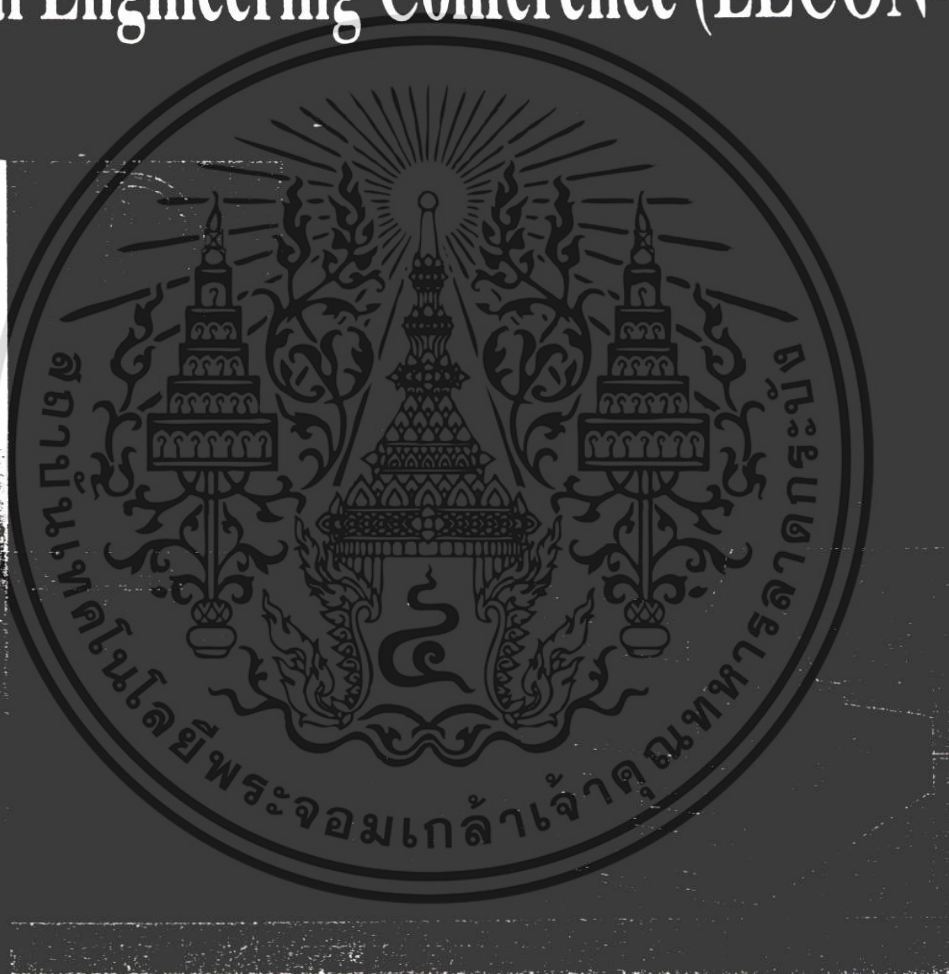
is the 2nd to the Winner of MATLAB Academic Contest
in July 9, 2004




(Mr.Kenneth Koh)
Managing Director

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า

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



บทความ
ไฟฟ้ากำลัง (PW)
หม้อแปลงกำลัง (PE)
ควบคุมและการวัดคุม (CT)
วิจัยที่เกี่ยวข้องกับ
วิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

E E E E E
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965
อื่น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าคุณสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า
<http://www.ladkrabang.com>

การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางโดยใช้กึ่งนำเป็นตัวขับเคลื่อน

Vector Control Strategies for a Doubly-fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine

พิเชษฐ ฉัตรพาน วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

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

บทคัดย่อ

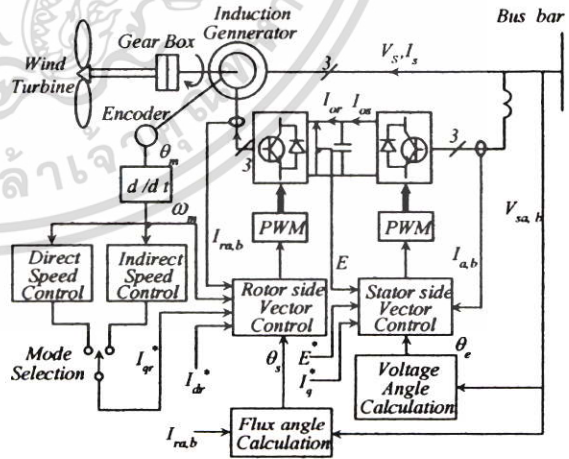
บทความนี้ได้เสนอการจำลองการทำงานและสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฟสที่มีการกระตุ้นสองทางโดยใช้กึ่งนำเป็นตัวขับเคลื่อนที่สามารถควบคุมกำลังสลิปกลับคืนสู่เอชไอไลน์ได้โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบิซที่มีวงจรกำลังเป็นคอนเวกเตอร์ 2 ตัว คอแบบ back - to - back โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ที่สเตรเตอร์ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้าง ฟลักซ์และแรงบิดสำหรับการควบคุมคอนเวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์และใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสของคอนเวกเตอร์ทางด้านเอชไอไลน์เพื่อควบคุมแรงดันลิตซ์ลิ่งคี่ให้คงที่ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟระหว่างแหล่งจ่ายและคอนเวกเตอร์นอกจากนี้ยังมีการควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออปติ멈ในสภาวะชั่วคราวโดยอาศัยหลักการควบคุมกำลังสลิป ในอันทันทีทำให้เกิดการส่งถ่ายกำลังงานกลสูงสุดจากกังหันลมไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะคงตัว

Abstract

In this paper, simulation of operation and performance of doubly fed induction generator system driven by a wind turbine which is capable of controlling recovery slip power to AC mains supply is proposed. This is based on Scherbius principle using two back-to-back converters as a main power circuit. The control technique uses stator flux vector controlling decoupled flux and torque component currents for rotor side converter. Current vector control of AC line front end converter for keeping DC link voltage constant, which the control of active and reactive power between front end converter and AC source are independent. The wind turbine is controlled in order to track optimum speed during transient operation based on recovery slip power control. This results in maximum power transfer between the wind turbine and the induction generator.

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกำลังไฟฟ้ามีราคาแพงอีกทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งเชื้อเพลิงและมีการลงทุนที่สูงในบทความนี้จึงได้นำเสนอพลังงานทดแทนในอีกรูปแบบหนึ่งได้แก่พลังงานลมซึ่งไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเชื้อเพลิงเองตามธรรมชาติเป็นพลังงานที่บริสุทธิ์สะอาดไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมนำมาใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์เนื่องจากมีราคาถูกกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่ติดตั้งเท่ากันค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงน้อยกว่ามีระบบควบคุมที่ง่ายและไม่ต้องซิงโครไนซ์กับระบบมีการลงทุนต่ำการติดตั้งและเคลื่อนย้ายระบบทำได้ง่ายสามารถใช้ในชนบทที่ห่างไกลความเจริญที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งเสาไฟฟ้าและสายส่งไฟฟ้าระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและคอนเวกเตอร์จะใช้การควบคุมเวกเตอร์ซึ่งมีสมรรถนะที่เหนือกว่าการควบคุมแบบสเกลาร์ นอกจากนี้กำลังสลิปในโรเตอร์ที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบแทนที่จะถูกปล่อยทิ้งไปกับความต้านทานก็จะถูกเก็บมาใช้ประโยชน์โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบิซทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้น



รูปที่ 1 ระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์ ขับเคลื่อนด้วยกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง (Doubly fed Induction Generator control Strategy)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) แบบกระตุ้น 2 ทาง (Doubly fed Induction Generator) จะใช้การควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ สำหรับควบคุมฟลักซ์ที่สเตเตอร์ λ_s ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างแรงบิดบนแกนหมุน $d - q$ ซึ่งแกนอน ($d - axis$) ขี่ในแนวเดียวกับสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์จะให้ความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดัน, ฟลักซ์ และแรงบิด ดังนี้ [1-3]

$$\lambda_{qs} = 0, \quad / \lambda_s / = \lambda_{ds} = L_o I_{ms} = L_s I_{ds} + L_o I_{dr} \quad (1)$$

$$I_{qs} = \frac{L_o}{L_s} I_{qr}, \quad I_{ms} = \frac{L_s}{L_o} I_{ds} + I_{dr} \quad (2)$$

$$\sigma L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + R_r I_{dr} = V_{dr} + \omega_{sl} \sigma L_r I_{qr} \quad (3)$$

$$\sigma L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + R_r I_{qr} = V_{qr} - \omega_{sl} (L_m I_{ms} + \sigma L_r I_{dr}) \quad (4)$$

$$T_s \frac{dI_{ms}}{dt} + I_{ms} = \frac{1+\sigma}{R_s} V_{ds} + I_{dr} \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_{ms} = \frac{1}{T_s I_{ms}} \left[\frac{1+\sigma}{R_s} V_{qr} + I_{qr} \right] \quad (6)$$

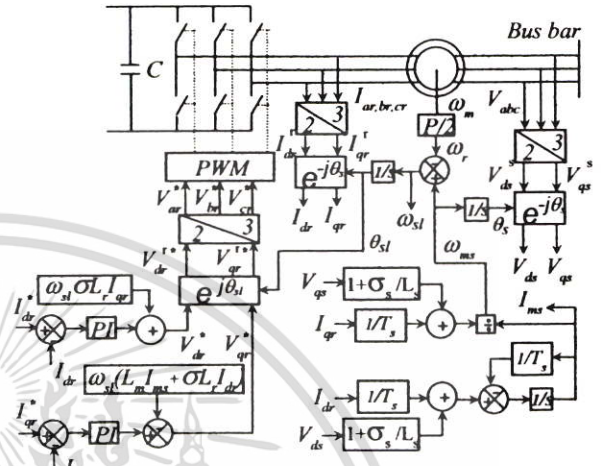
$$T_e = K_{pow} \frac{P}{2} L_m I_{qr} I_{ms} \quad (7)$$

โดยที่ $L_m = \frac{L_o^2}{L_s}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_o^2}{L_s L_r}$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad \sigma_s = \frac{L_s - L_o}{L_o}, \quad K_{pow} = 3/2$$

จากสมการที่ (2) และ (7) จะเห็นได้ว่าแรงบิดของเครื่องกำเนิดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส I_{qr} เมื่อ I_{ms} มีค่าคงที่ ($I_{ms} \cong V_s / \omega L_o$) เมื่อขนาดและความถี่ของแรงดันที่แหล่งจ่ายมีค่าคงที่เปรียบเสมือนกระแสอาร์เมเจอร์ และกระแสฟลักซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately-excited DC Generator) แต่กระแสฟลักซ์หรือกระแสแมกนีไตซิ่ง I_{ms} (Magnetizing Current) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้น 2 ทาง ประกอบด้วยกระแสสร้างฟลักซ์ 2 ส่วนคือกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ I_{ds} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ I_{dr} ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกำลังรีแอคทีฟและค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ และทางด้านโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดได้โดยการปรับกระแสค่าตั้ง I_{dr}^* โดยปกติจะให้เท่ากับศูนย์เพื่อลดการสูญเสียที่คอน

เวกเตอร์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor Side Converter) และใช้กระแสค่าตั้งสร้างแรงบิด I_{qr}^* สำหรับควบคุมความเร็วรอบของกังหันลม (Wind Turbine) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปจากสมการที่ (3) และ (4) เป็นสมการของระบบควบคุมเวกเตอร์ และเราสามารถหาตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ θ_s ได้จากสมการ (5) และ (6)



รูปที่ 2 ระบบควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3. ระบบควบคุมคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย (Front-end Converter Control Strategy)

หน้าที่หลักของคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย (Supply Side Converter) คือควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง E (DC link) ให้มีค่าคงที่ โดยไม่คำนึงถึงขนาดและทิศทางการไหลของกำลังสลิป (Slip Power) โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแส ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระ (Decoupling Control) ของกำลังไฟแอคทีฟและกำลังไฟรีแอคทีฟ ระหว่างคอนเวอเตอร์และแหล่งจ่ายบนแกนหมุน $d-q$ กำหนดให้โดย [3]

$$P = K_{pow} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (8)$$

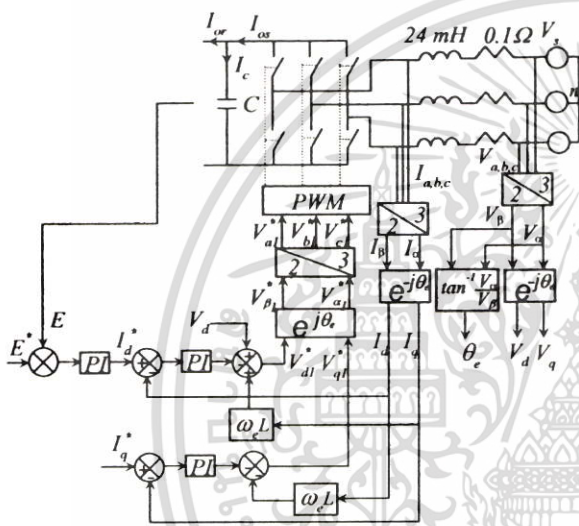
$$Q = K_{pow} (V_d I_q - V_q I_d) \quad (9)$$

ถ้ากำหนดให้แกนหมุนซึ่งแกนอน ($d-axis$) ขี่ในแนวเดียวกับขั้วพลาซโวลเตจเวกเตอร์ และ $V_q = 0$ ขนาดแรงดันของแหล่งจ่าย (Supply Voltage) บนแกนหมุน $d - q$ จะมีค่าคงที่และ V_d มีค่าคงที่ จากสมการที่ (8) และ (9) P และ Q จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส I_d และ I_q ตามลำดับถ้าละเลขการสูญเสียที่ความต้านทานภายในของอินดักเตอร์ของฟิวดอร์ในรูปแบบที่ 3 และการสูญเสียในการสวิตช์ซึ่งจะได้ว่า

$$E I_{\omega} = K_{pwm} V_d J_d \quad (10)$$

$$C \frac{dE}{dt} = I_{\omega} - I_{\omega r} \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) และ (11) จะได้ว่ากระแส I_d ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟสามารถใช้ในการรักษา E ให้มีค่าคงที่ และกระแส I_q ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกำลังรีแอ็คทีฟ Q สามารถใช้ในการควบคุมขนาดและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟ Q และค่าเพอร์เวอร์แฟกเตอร์ของคอนเวกเตอร์ได้อย่างอิสระโดยการปรับกระแสคำสั่ง I_q^* โดยปกติจะให้เท่ากับศูนย์เมื่อต้องการให้คอนเวกเตอร์ทำงานที่ค่าเพอร์เวอร์แฟกเตอร์เท่ากับหนึ่ง (Unity Power Factor)



รูปที่ 3 ระบบควบคุมเวกเตอร์ของคอนเวกเตอร์ด้านเอซีไลน์

4. แบบจำลองของกังหันลม (Wind Turbine model)

กำลังงานกล P_m ของกังหันลมจะเป็นฟังก์ชันของความเร็วลม v (Wind Velocity) ความหนาแน่นของอากาศ ρ (Air density) รัศมีของใบพัด r (Radius of the blades) ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง C_p (Power Coefficient) [4]

$$P_m = \frac{\pi}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) r^2 v^3 \quad (12)$$

$$\omega_t = \frac{\lambda v}{r} \quad (13)$$

$$T_t = \frac{P_m}{\omega_t} = \frac{\pi}{2} \rho C_t(\lambda, \beta) r^3 v^2 \quad (14)$$

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

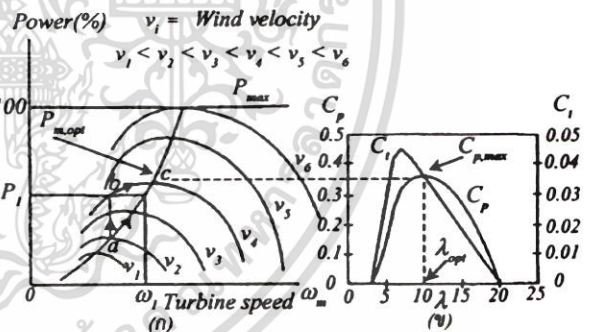
$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = T_m - T_e \quad (15)$$

อัตราส่วนของแรงบิดทางกล และอัตราส่วนความเร็วรอบทางด้านกังหันลมเทียบกับทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\frac{T_t}{T_m} = \frac{\omega_m}{\omega_t} = G \quad (16)$$

4.1 การติดตามความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed Tracking)

กังหันลมที่ใช้ขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้าดังรูปที่ 1 จะให้กำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) ที่ความเร็วค่าหนึ่งเรียกว่าความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed) ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมให้ติดตามความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed Tracking) เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลม v ใช้สมการที่ (12) และความสัมพันธ์ของกราฟ C_p เทียบกับ λ (Tip Speed Ratio) ในรูปที่ 4 (ข) จะได้ว่ากำลังงานกลจะเปลี่ยนไปตามค่าสัมประสิทธิ์ C_p เมื่อความเร็วลม v มีค่าคงที่ และความเร็วรอบของกังหันลมคำนวณได้จากสมการที่ (13) เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้คุณลักษณะสมบัติของเส้นโค้งกำลังงานกล P_m เทียบกับความเร็วรอบของกังหันลม (ความเร็วรอบจะพิจารณาทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการคูณด้วยอัตราส่วนของเกียร์บล็อก G) ที่ค่าความเร็วลม v ต่างๆ กัน ดังรูปที่ 4 (ก)



รูปที่ 4 คุณลักษณะสมบัติของกังหันลม

กำลังงานกลจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของ C_p มีค่าสูงสุด ซึ่งจะสอดคล้องกับจุดตัดของเส้นโค้ง $P_{m,opt}$ กับเส้นโค้งกำลังงานกล P_m จุด "a" และ "c" เรียกว่า จุดออปติ멈 (Optimum Point) กำลังงานกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) และแรงบิดทางกลสูงสุด (Maximum Mechanical Torque) ที่จุดออปติ멈สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,opt}^3 \quad (17)$$

$$T_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,opt}^2 \quad (18)$$

$$\omega_{m,opt} = \frac{\lambda_{opt} v G}{r} \quad (19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

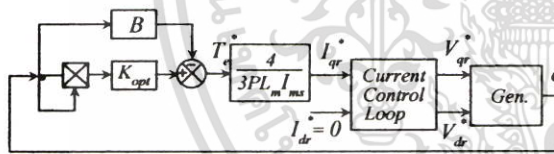
จากสมการที่ (19) จะได้ว่าความเร็วออปติ멈ของกังหันลมจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วลม v จากสมการที่ (17), (18), (19) จะเป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วของกังหันลม

4.1.1 ระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมโดยใช้การควบคุมทางอ้อม (Indirect Speed Control of Wind Turbine)

การควบคุมความเร็วรอบของกังหันลมที่ใช้ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ติดตามความเร็วออปติ멈ในสภาวะชั่วคราวจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบทางอ้อมโดยการปรับแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ในอินพุตจะทำให้เกิดการส่งถ่ายกำลังงานสูงสุด (Maximum Mechanical Power Transfer) จากกังหันลมไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะคงตัวจากสมการที่ (15) แทนค่า $T_e = T_e^*, T_m = T_{m,opt}$ และ $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ของแรงบิดคำสั่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า T_e^* กับความเร็วรอบของกังหันลมที่จุดออปติ멈ในสภาวะคงตัว

$$T_e^* = K_{opt} \omega_{m,opt}^2 - B \omega_{m,opt} \tag{20}$$

จากสมการที่ (7) และ (20) สร้างระบบควบคุมได้ดังนี้



รูปที่ 5 ระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางอ้อม
ถ้าเริ่มต้นกังหันลมทำงานที่จุด “a” ด้วยความเร็วลม v_1 ในรูปที่ 4 (ก) ในสภาวะชั่วคราว เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด (step change) จาก v_1 เป็น v_2 จะทำให้กำลังงานกล P_m เพิ่มขึ้นทันทีทันใดไปที่จุด “b” ขณะที่ความเร็วรอบยังไม่เปลี่ยนแปลงและจะเกิดมีแรงบิดเร่ง (Accelerate Torque) ขึ้นทำให้กังหันลมเร่งความเร็วขึ้นเรื่อย ๆ แรงบิดเร่งจะมีค่าลดลง แต่เมื่อมีการควบคุมความเร็วรอบตามสมการที่ (20) กังหันลมจะเปลี่ยนจุดทำงานจาก “b” เป็น “c” เมื่อแรงบิดเร่งมีค่าเท่ากับศูนย์ และกังหันลมจะทำงานที่ความเร็วออปติ멈 (Optimum Speed Operating) ในสภาวะคงตัวซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ (20) ในทำนองเดียวกันถ้าความเร็วลมลดลงจาก v_2 เป็น v_1 ในสภาวะคงตัวกังหันลมจะกลับมา

ทำงานที่จุด “a” จากข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการติดตามความเร็วออปติ멈ของกังหันลมในสภาวะชั่วคราว

4.1.2 ระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมโดยใช้การควบคุมแบบโดยตรง (Direct Speed Control of Wind Turbine)

จากคุณลักษณะสมบัติของกังหันลมในรูปที่ 4(ก)ที่จุดออปติ멈จะให้ความเร็วคำสั่ง

$$\omega_m^* = \sqrt{\frac{T_m}{K_{opt}}}$$

สำหรับการควบคุมแบบโดยตรงจำเป็นต้องทราบค่าแรงบิดทางกล T_m ของกังหันลม

จากสมการที่ (15) แทนค่า $T_e = T_e^* = K_{pow} \frac{P}{2} L_m I_{ms} I_{qr}^*$
กำหนดตัวแปรช่วยของแรงบิด $T_{aux} = T_m - B \omega_m$

$$\therefore J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{aux} - K_{pow} \frac{P}{2} L_m I_{ms} I_{qr}^* \tag{22}$$

$$\text{และ} \quad \frac{dT_{aux}}{dt} = 0 \tag{23}$$

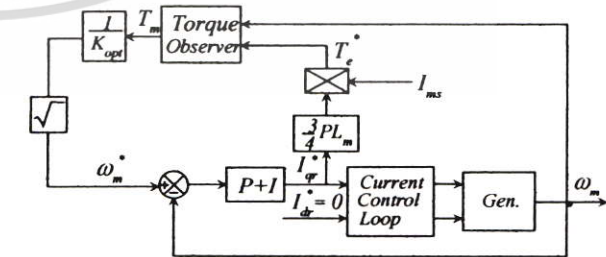
จากข้างต้นจะได้ระบบประเมินค่าแรงบิดทางกล \hat{T}_m (Mechanical Torque observer) ที่มีกรป้อนกลับของค่าผิดพลาดในการประเมินค่าความเร็วรอบรวมอยู่ด้วยดังนี้

$$J \frac{d\hat{\omega}_m}{dt} = \hat{T}_{aux} - K_{pow} \frac{P}{2} L_m I_{ms} I_{qr}^* + J k_{01} (\omega_m - \hat{\omega}_m) \tag{24}$$

$$\frac{d\hat{T}_{aux}}{dt} = k_{02} (\omega_m - \hat{\omega}_m) \tag{25}$$

$$\hat{T}_m = \hat{T}_{aux} + B \hat{\omega}_m \tag{26}$$

ในที่นี้ “ $\hat{}$ ” แสดงถึงค่าประเมิน และ k_{01}, k_{02} คืออัตราขยายป้อนกลับของค่าความผิดพลาดในการประเมินค่าความเร็วซึ่งจะทำให้เราสามารถปรับปรุงคุณภาพของระบบควบคุมได้ดียิ่งขึ้นโดยการเลือกใช้ค่า k_{01}, k_{02} ที่เหมาะสม



รูปที่ 6 ระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ผลการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม

คอมพิวเตอร์

สร้างแบบจำลองตามรูปที่ 1 อาศัยการทำงานของโปรแกรม MATLAB Version 5.2 ในส่วนของ SIMULINK โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในภาคผนวก

5.1 ผลการจำลองแบบของคอนเวกเตอร์ด้านเอซีไลน์

แสดงความสัมพันธ์ของกระแสใน 1 เฟสของคอนเวกเตอร์ร่วมกับแรงดันที่แหล่งจ่ายและแรงดันคิซีลิ่งคิในสภาวะคงตัว ในรูปที่ 7(ก)แสดงการทำงานของคอนเวกเตอร์ในโหมดเรกติไฟเออร์ (Rectifying Mode) กระแสและแรงดันจะทับเฟสกัน (In phase) กำลังสลิป P_s จะไหลจากโรเตอร์เข้าสู่แหล่งจ่ายไฟโดยผ่าน DC บัสซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซิงโครนัส (Subsynchronous Mode) และกังหันลมทำงานที่ความเร็วลม $v = 5$ m/s จากรูปที่ 7 (ข) คอนเวกเตอร์ทำงานในโหมดอินเวกเตอร์ (Inverting Mode) กระแสจะต่างเฟสกับแรงดัน 180 องศา (Out of phase) กำลังแฉีกที่ไหลจากแหล่งจ่ายเข้าสู่โรเตอร์โดยผ่านทาง DC บัสซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซูเปอร์ซิงโครนัส (Supersynchronous Mode) และกังหันลมทำงานที่ความเร็วลม $v = 9$ m/s

5.2 ผลการจำลองระบบควบคุมความเร็วแบบทางอ้อม

แสดงสมรรถนะในสภาวะชั่วคราวของระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางอ้อมที่ใช้ขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้าสำหรับติดตามความเร็วของพัดลมเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจาก $v = 5$ m/s เป็น $v = 9$ m/s จากรูปที่ 8 (ก) แสดงกระแสที่โรเตอร์บนแกนหมุน $d-q'$ และความเร็วรอบของกังหันลมทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เริ่มต้นกังหันลมทำงานที่ความเร็วลม $v = 5$ m/s กังหันลมมีความเร็วเท่ากับความเร็วพัดลมคือ 750 rpm. ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซิงโครนัสที่ค่าสลิป $s = 0.25$ ที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 9 m/s กังหันลมจะเร่งความเร็วขึ้นขณะที่แรงบิดเร่งมีค่าลดลงหลังจากเวลา $t = 45$ sec กังหันลมจะมีความเร็วที่เท่ากับความเร็วพัดลมคือ 1365 rpm. ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโหมดซูเปอร์ซิงโครนัสมีค่าสลิป $s = -0.365$ รูปที่ 8 (ข) แสดงการตอบสนองของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะพบได้จากสมการที่ (7) และแรงบิดทางกล T_m จากสมการที่ (18) แรงบิดพัดลมที่ความเร็วลม $v = 5$ m/s และ $v = 9$ m/s มีค่าเท่ากับ 12 N-m และ 39 N-m ตามลำดับ รูปที่ 8 (ค) แสดงกำลังไฟของเครื่องกำเนิด ($P_g = \omega_m T_m$) และกำลังงานกลของกังหันลม P_m

5.3 ผลการจำลองระบบควบคุมความเร็วแบบทางตรง

แสดงสมรรถนะในสภาวะชั่วคราวของระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางตรงที่ใช้ขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้าสำหรับติดตามความเร็วของพัดลมเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจาก $v = 5$ m/s เป็น $v = 9$ m/s จากรูปที่ 9 (ก) แสดงกระแสสร้างแรงบิดบนแกนหมุน $d-q'$ ของ โรเตอร์ I_r และค่าความเร็วรอบคำสั่งของกังหันลม ω_m^* เปรียบเทียบกับความเร็วจริงของกังหันลม ω_m ที่เวลา $t = 5$ sec ความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 9 m/s กระแส I_r มีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งเท่ากับค่าลิมิตกระแสของตัวควบคุม PI เหตุผลก็คือต้องการลดแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_e ให้มีค่าต่ำสุดเพื่อให้แรงบิดเร่งมีค่าสูงขึ้นทำให้ผลตอบสนองของความเร็วสูงกว่าการควบคุมแบบทางอ้อมโดยมีค่าเกินกว่า 35 sec จากรูปที่ 9 (ข) แสดงการประเมินค่าแรงบิดทางกล T_m เปรียบเทียบกับแรงบิดจริง T_m จากรูปที่ 9 (ค) แสดงกำลังงานกลของกังหันลมและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P_g

6. สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการติดตามความเร็วของพัดลมของกังหันลมในสภาวะชั่วคราวเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นโดยการควบคุมแบบทางตรงจะให้ผลตอบสนองของความเร็วเร็วกว่าการควบคุมแบบทางอ้อมแต่การกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอในขณะที่การควบคุมแบบทางอ้อมมีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ และในสภาวะคงตัวกังหันลมจะทำงานที่ความเร็วของพัดลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานที่ความเร็วต่ำกว่าและสูงกว่าความเร็วพัดลมซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานในโหมดซิงโครนัสและโหมดซูเปอร์ซิงโครนัสตามลำดับทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าทางด้านวงจรโรเตอร์สามารถไหลได้ 2 ทิศทางด้วยกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนแล้วจึงเปลี่ยนกลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยชุดของคอนเวกเตอร์โดยที่ความถี่ของกระแสเดือร์และกระแสของคอนเวกเตอร์มีค่าคงที่เท่ากับค่าของแหล่งจ่ายไฟระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนือกว่าด้วยกังหันลมสามารถทำงานได้ด้วยตนเอง (Stand alone) โดยทางด้านสคเตอร์ไม่จำเป็นต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจึงจะนำเสนอในโอกาสต่อไป

7. ภาคผนวก

Induction Motor : 10-hp, 380 V, 19A, 6pole, 50 Hz, $L_o = 191.8$ mH, $L_r = 234$ mH, $L_s = 206.5$ mH, $R_r = 2.312 \Omega$, $R_s = 1.06 \Omega$
PI controller : $K_i = 2$, $K_p = 100$, $I_{dr}^* = 0$ A
Converter : $C = 2400 \mu F$, $E^* = 550$ V, $I_q^* = 0$ A

$R = 0.1 \Omega$, $L = 24 \text{ mH}$, Supply Voltage = 250 v line to line
PI controller: $K_i = 4.89$, $K_p = 0.173$ (control E) and $K_i = 0.8$, $K_p = 25$
Wind Turbine: $r = 3.24 \text{ m}$, $J = 7.5 \text{ kgm}^2$, $B = 0.06 \text{ Nm/rad}$
 $v_{max} = 12 \text{ m/s}$, $v_{min} = 4 \text{ m/s}$, $G = 5.065$, $\rho = 1.299$
PI controller: $K_i = 0.25$, $k_p = 7$ (Direct Speed Control)
Torque observer: $k_{o1} = 0.98$, $k_{o2} = 5.9$

8. เอกสารอ้างอิง

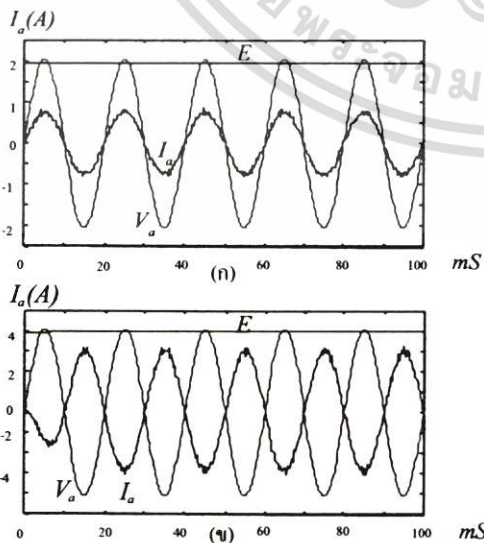
- [1] W. Leonhard, "Control of electrical drives". Spring-Verlag 1985.
- [2] A.M. Walcyna, 1987. BICEM Proc., 495-498
- [3] S.R. Jones, R. Jones, "1993 IEE Colloquium on development in real time control of induction motor drives" DIGEST No 1993/024. 5/1-5/9
- [4] R.S. PENA, J.C. Clare and G.M. Asher, "Implementation of Vector Control Strategies for A Variable Speed Doubly-fed Induction machine for Wind Generation System", EPE'95, pp-3.075-3.080.



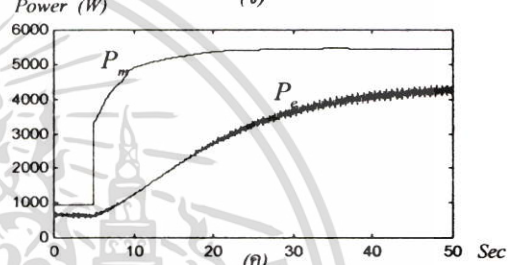
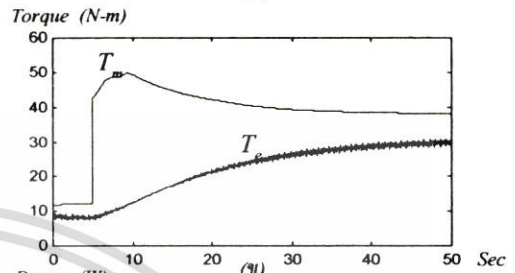
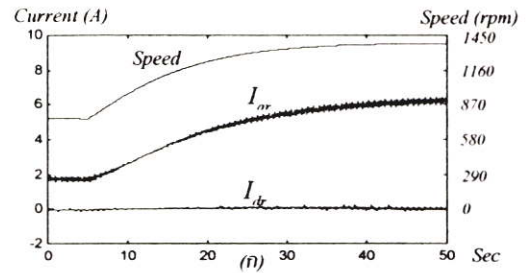
พิเชษฐ นัตราทน นักศึกษาปริญญาโท
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สาขาไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
 เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



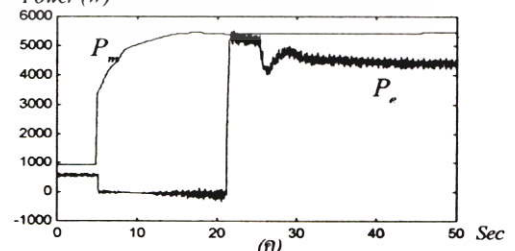
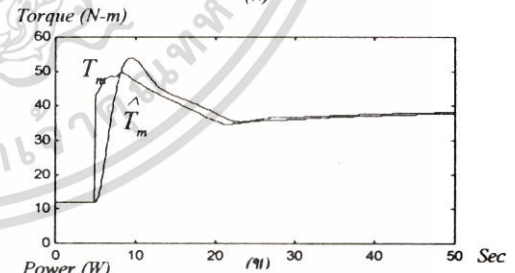
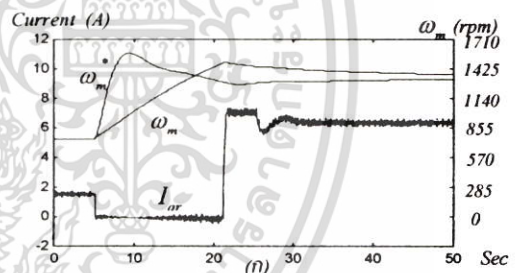
วิจิตร กิษเรศ สำเร็จการศึกษาระดับ วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับ 2) , วศ.ม. จาก สจล. และ Ph.D. จาก University of Nottingham, U. ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. งานวิจัยที่สนใจ Power electronic and Electric Drive.



รูปที่ 7 การทำงานของคอนเวกเตอร์ด้านเอซีไลนในสภาวะคงตัว



รูปที่ 8 ผลการจำลองระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางอ้อม



รูปที่ 9 ผลการจำลองระบบควบคุมความเร็วของกังหันลมแบบทางตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม

ลาดกระบัง

AN INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING

ENGINEERING

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2

กุมภาพันธ์ 2549

การประเมินผลโพลีเมอร์นาโนคอมโพสิตสำหรับใช้ในงานโพลีเมอร์คอมโพสิต	1
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการจัดการเรียนการสอน	3
การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องจักรกล	5
การปรับปรุงระบบกรองของพิลาตัสด้วยกระบวนการทางเคมี	19
การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงคุณสมบัติของวัสดุ	25
เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาแรงดันเชิงความถี่	30
การวิเคราะห์การไหลของกำลังความร้อนในระบบฮีต-คูล	36
การวิเคราะห์การไหลของกำลังความร้อนในระบบฮีต-คูล	42
การวิเคราะห์การไหลของกำลังความร้อนในระบบฮีต-คูล	48
การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกระแสสองทาง	54
เทคนิคการประเมินผลแบบลอจิก-โบลีนเพื่อวิเคราะห์ระบบควบคุม	60
ผลลัพท์การเขียนแบบเชิงเลขของระบบการตัดสินใจอัจฉริยะในงานไฟฟ้า	66
การศึกษาการใช้เน็ตเวิร์กคอมพิวเตอร์เพื่อการค้นคืนสารสนเทศจาก WWW	72
การวัดความชื้นอากาศของท่อจ่ายน้ำจากโครงสร้างควบคุมการไหลและข้อมูลควบคุมการไหล	78
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายผลลัพท์ของค่าส่งทางแยกแบบไดนามิก	84
การประยุกต์ใช้ AToM Management Information Base และ Simple Network Management Protocol เพื่อการจัดการเครือข่าย ATM	90
การออกแบบระบบเครือข่ายส่วนตัวเสมือน เพื่อตรวจสอบการทำงานของ	96
การถอดรหัสแบบ Armstrong โดยปราศจากตัวกรองความถี่	102
การออกแบบระบบเฝ้าตรวจพื้นที่ระยะไกล	108
การสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบบแคบโดยใช้ค่าสมานพียงเตอร์บนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	114
การออกแบบและสร้างตัวกำจัดสัญญาณเสียงสะท้อนโดยใช้ FPGA	120
วงจรรวมที่ทริกเกอร์แบบทรานเซิลอสแตท	126
วงจรรวมสคอนด์แดนซ์ที่ช่วยอินพุตปฏิบัติงานเป็นแบบเรล-ทู-เรล	131
วงจรรวมที่ทริกเกอร์ควาสเอบโดยใช้เทคนิคของสวิตช์กระแสสำหรับแรงดันไฟต้นและทำงานที่ความถี่สูง	136

การควบคุมเวกเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทาง

Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Drives

พิเชษฐ ฉัตรพาน ประเสริฐ สอระตัน วิจิตร กิณเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการจำลองแบบการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่มีการกระตุ้นสองทางที่สามารถควบคุมกำลังงานสลิปกลับคืนสู่เอซีไลน์ได้โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียสที่มีวงจรกำลังเป็นคอนเวอเตอร์ 2 ตัวต่อแบบback-to-back โดยใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์ทางอ้อมสำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างทอร์กและใช้เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์กระแสแบบโดยตรงของคอนเวอเตอร์ทางด้านเอซีไลน์เพื่อควบคุมแรงดันคิซีลิ่งคิให้คงที่ซึ่งเป็นการควบคุมแบบแยกอิสระของกำลังแอคทีฟและกำลังรีแอคทีฟระหว่างแหล่งจ่ายและคอนเวอเตอร์

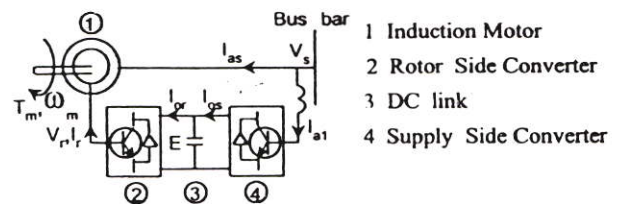
Abstract

In this paper, simulation of operation of 3 ϕ variable speed doubly fed induction motor drives which is capable of controlling recovery slip power to AC line is proposed. This is based on Scherbius principles using two back-to-back converters as a main power circuit. The control technique uses indirect flux vector of induction motors which flux producing component and torque producing component of rotor currents are decoupled. Also, direct vector control of currents of AC line front-end converter for keeping DC link voltage constant, which the control of active and reactive power between front-end converter and AC source are independent.

1. คำนำ

ในบทความนี้ได้เสนอวิธีที่จะนำพลังงานสลิปที่สูญเสียไปของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสกลับมาใช้ประโยชน์ โดยอาศัยหลักการของเซอร์เบียส กล่าวคือพลังงานที่เกิดจากค่าสลิปแทนที่จะถูกปล่อยทิ้งไปกับความต้านทานก็จะถูกเก็บมาใช้ด้วยชุดของคอนเวอเตอร์ จึงเสมือนกับว่าไม่มีพลังงานสูญเสียไป เมื่อก้าวถึงระบบขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียสซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในลักษณะของการควบคุมแบบสเกลาร์ (Scalar Control)

ซึ่งมีสมรรถนะที่เหนือกว่าด้วยกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปพลังงานสลิปจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงก่อนแล้วจึงเปลี่ยนกลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยของอินเวอเตอร์ ดังรูปที่ 1



- 1 Induction Motor
- 2 Rotor Side Converter
- 3 DC link
- 4 Supply Side Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แต่ในบทความนี้ได้เสนอวิธีการควบคุมโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ [1], [2], [3] (Vector Control) ที่ใช้ back-to-back คอนเวอเตอร์ 2 ตัว

2. ทฤษฎี

2.1 ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์

ด้วยการควบคุมเวกเตอร์แบบโดยอ้อม [1], [2], [4]

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาวด์โรเตอร์(Wound Rotor)แบบ กระตุ้น 2 ทาง (Doubly fed Induction Motor) โดย ทางด้านสเตเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันของระบบไฟ 3 เฟส(Grid Connection) ที่มีความถี่ที่และทางด้านโร เตอร์ต่อกับอินเวอร์เตอร์ชนิดจ่ายแรงดันแบบ 3Ø PWM ทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่โรเตอร์สำหรับควบคุมฟลักซ์ ที่สเตเตอร์ λ_s โดยใช้การควบคุมเวกเตอร์แบบโดยอ้อม (Indirect Control) เป็นการควบคุมแบบแยกอิสระ ระหว่างกระแสสร้างฟลักซ์และกระแสสร้างทอร์กบน แกนหมุน $d^s - q^s$ ซึ่งแกนนอน ($d^s - axis$) ซี่ในแนว เดียวกันกับสเตเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์จะให้ความสัมพันธ์ เจริญมุมของเวกเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2 และสมการแสดง ความสัมพันธ์ของกระแส, แรงดัน, ฟลักซ์ และทอร์ก ดังนี้

$$\lambda_{qs} = 0, |\lambda_s| = \lambda_{ds} = L_o i_{ms} = L_s i_{ds} + L_o i_{dr} \quad (1)$$

$$\lambda_{qr} = \sigma L_r i_{qr}, \lambda_{dr} = \frac{L_o^2}{L_s} i_{ms} + \sigma L_r i_{dr} \quad (2)$$

$$i_{qs} = -\frac{L_o}{L_s} i_{qr}, i_{ms} = \frac{L_s}{L_o} i_{ds} + i_{dr} \quad (3)$$

$$\sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} + R_r i_{dr} = V_{dr} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr} \quad (4)$$

$$\sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} + R_r i_{qr} = V_{qr} - \omega_{sl} (L_m i_{ms} + \sigma L_r i_{dr}) \quad (5)$$

$$s \frac{d}{dt} i_{ms} + i_{ms} = \frac{1 + \sigma_s}{R_s} V_{ds} + i_{dr} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_{ms} = \frac{1}{T_s i_{ms}} \left[\frac{1 + \sigma_s}{R_s} V_{qs} + i_{qr} \right] \quad (7)$$

$$e = -K_{pow} \frac{P}{2} L_m i_{ms} i_{qr} \quad (8)$$

โดยที่ $L_m = \frac{L_o^2}{L_s}, \sigma = 1 - \frac{L_o^2}{L_s L_r},$

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$ เป็นค่าคงตัวเวลาของสเตเตอร์

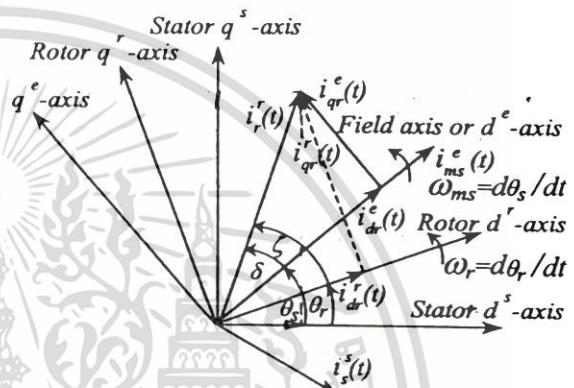
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์อื่นใดได้
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งเหล่านี้ และ

$P =$ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

K_{pow} เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับระบบพิกัดที่ใช้แปลงแกน

σ_s และ σ เป็นตัวประกอบการรั่วของสนามแม่เหล็ก

(Leakage Factor) ของสเตเตอร์และของทั้งหมดตามลำดับ

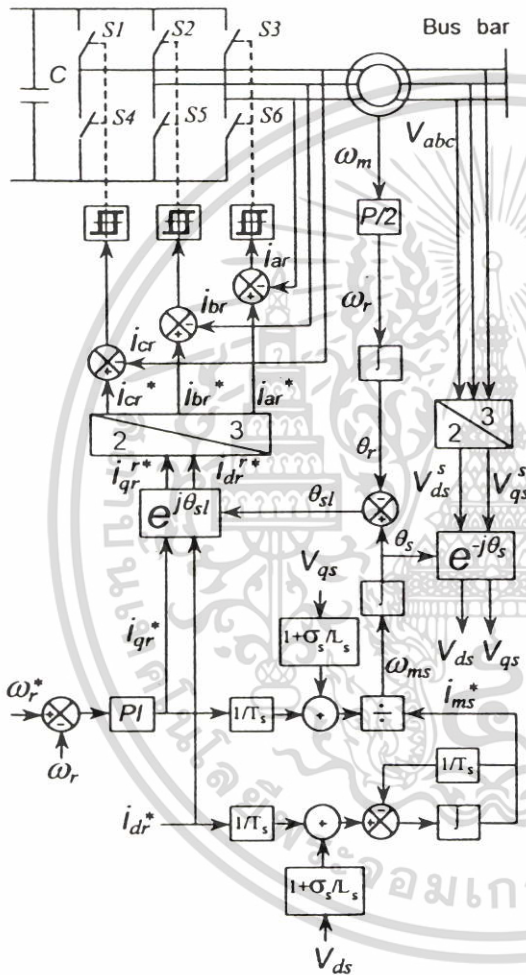


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์เชิงมุมของเวกเตอร์กระแสต่างๆ จากสมการที่ (4),(5),(6) และ (7) ถ้าละเลยการสูญเสียทางไฟฟ้า (Electrical loss), ฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Flux) และการสูญเสียทางกล (Mechanical loss) สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ในสเตเตอร์และโรเตอร์กำหนดให้โดย

$$\begin{aligned} P_r &= K_{pow} \omega_{sl} i_{qr} L_m i_{ms} \\ Q_r &= -K_{pow} \omega_{sl} L_m i_{dr} i_{ms} \\ P_s &= -K_{pow} \omega_s L_m i_{ms} i_{qr} \\ Q_s &= -K_{pow} \omega_s L_o i_{ms} i_{ds} \end{aligned} \quad (9)$$

จากสมการที่ (3) และ (8) จะเห็นว่าทอร์กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส i_{qr} เมื่อ i_{ms} มีค่าคงที่เปรียบเสมือนกระแสอาร์เมเจอร์ และ กระแสฟลักซ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้น แยก (Separately-excited DC Motor) แต่กระแสแมกนีไตซิ่ง i_{ms} (Magnetizing Current) ประกอบด้วยกระแสสร้างฟลักซ์ 2 ส่วนคือกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านสเตเตอร์ i_{ds} และกระแสสร้างฟลักซ์ทางด้านโรเตอร์ i_{dr} และจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันที่ป้อนให้กับสเตเตอร์จะเห็นได้ว่าสมการ (4) และ (5) อาจจะละเลยได้ถ้าเราสามารถควบคุมกระแสโรเตอร์ i_{qr} และ i_{dr} ได้โดยตรงด้วยวิธีการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส(Hysteresis Current Controller) โดยใช้อินเวอร์เตอร์ และเราสามารถหาตำแหน่งมุมของสเตเตอร์ฟลักซ์ไว้

เดือร์ θ_s เพื่อใช้ในระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโดยอ้อม ได้จากสมการ (6) และ (7) บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโดยอ้อมแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโดยอ้อมสำหรับควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบวาล์วโรเตอร์

2.2 ระบบควบคุมเวกเตอร์สำหรับควบคุมคอนเวอเตอร์ด้านแหล่งจ่าย [3], [4]

หน้าที่หลักของคอนเวอเตอร์คือควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง E ให้มีค่าคงที่ โดยไม่คำนึงถึงขนาดและทิศทาง การไหลของกำลังสลิป (Slip Power) ทางด้านโรเตอร์ การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของคอนเวอเตอร์ จะใช้การควบคุมเวกเตอร์แบบโดยตรง (Direct Control) สำหรับการควบคุมแยกอิสระ (Decoupling Control) ของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟและกำลังไฟฟารีแอ็ค

ทีพบนแกนหมุน d-q (Synchronous Rotating Frams) กำหนดให้โดย

$$P = K_{pow} (V_d i_d + V_q i_q) \tag{10}$$

$$Q = K_{pow} (V_d i_q - V_q i_d)$$

ถ้ากำหนดให้แกนหมุนซึ่งแกนนอน (d-axis) ขึ้นในแนวเดียวกันกับซัพพลายโวลเตจเวกเตอร์ และ $V_q = 0$ ขนาดแรงดันของแหล่งจ่าย (Supply Voltage) บนแกนหมุน 'd - q' จะมีค่าคงที่และ V_d มีค่าคงที่ จากสมการที่ (10) P และ Q จะเป็นสัดส่วนกับกระแส i_d และ i_q ตามลำดับ

$$P = K_{pow} V_d i_d \tag{11}$$

$$Q = K_{pow} V_d i_q$$

ถ้าไม่คิดการสูญเสียที่ความต้านทานภายในของอินดักเตอร์ของฟิลเตอร์และการสูญเสียในการสวิตชิ่งซึ่งจะได้ว่า

$$E i_{os} = K_{pow} V_d i_d \tag{12}$$

$$C \frac{dE}{dt} = i_{os} - i_{or} \tag{13}$$

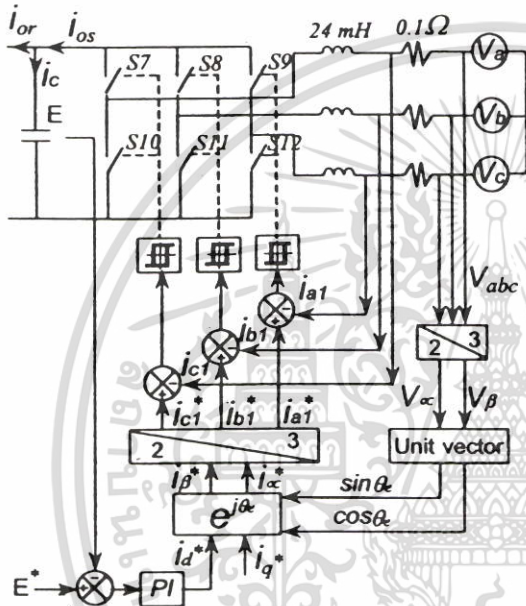
แทนสมการที่ (12) ใน (13) จะได้

$$\frac{dE}{dt} = K_{pow} \frac{V_d i_d}{CE} - \frac{i_{or}}{C} \tag{14}$$

จากสมการที่ (11) และ (14) จะได้ว่ากระแส i_d ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟสามารถใช้ในการรักษา E ให้มีค่าคงที่และมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกำลังแอ็คทีฟ P กระแส i_q ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกำลังรีแอ็คทีฟ Q สามารถใช้ในการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟให้มีค่าคงที่ ถ้าค่าของกระแสค่าตั้ง $i_q^* = 0$ หรือ $Q = 0$ และถ้ากำลังแอ็คทีฟ P ไหลจาก DC บัสเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟคอนเวอเตอร์จะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ (Inverting Mode) ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของมอเตอร์ในโหมด Subsynchronous กระแส i_{or} และ i_d มีค่าเป็นลบทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าบนแกนนี้ abc ของคอนเวอเตอร์จะต่างเฟสกัน 180 องศา (Out of Phase) ในทางกลับกันถ้ากำลังแอ็คทีฟ P ไหลจากแหล่งจ่ายเข้าสู่ DC บัสคอนเวอเตอร์จะทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ (Rectifying Mode) ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (Rectifying Mode) ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของ... อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์โนโหมค Supersynchronous กระแส i_{or} และ i_d มีค่าเป็นบวกทำให้กระแสและแรงดันบนแกนนิ่ง abc ของคอนเวทเตอร์จะอินเฟสกันหรือทำงานที่ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เท่ากับ 1 (Unity Power Factor) จากรูปที่ 4 แสดงบล็อกโคจรแกรมของระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโดยตรงของคอนเวทเตอร์



รูปที่ 4 ระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโดยตรงสำหรับควบคุมคอนเวทเตอร์

เราสามารถหาตำแหน่งเชิงมุมและขนาดของชีพหลายโวลเตจเวกเตอร์บนแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ เพื่อใช้ในระบบควบคุมเวกเตอร์แบบโดยตรงได้ดังนี้

$$|V_s| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} = \sqrt{V_q^2 + V_d^2}$$

$$\cos \theta_e = \frac{V_\beta}{|V_s|}, \quad \sin \theta_e = \frac{V_\alpha}{|V_s|}$$

3. ผลการจำลองการทำงานของระบบ

สร้างแบบจำลองตามรูปที่ 1 อาศัยการทำงานของโปรแกรม MATLAB Version 5.2 ในส่วนของ SIMULINK โดยตั้งค่ากระแสคำสั่ง $i_q^* = 0$ หรือ $Q = 0$ และมอเตอร์มีภาระโหลดคงที่ 2.5 N-m จะเห็นได้ว่าที่เวลา $0 \leq t < 0.07 \text{ sec}$ ในช่วงที่ 1 มอเตอร์จะทำงาน

ในสภาวะคงตัว (Steady State) มีความเร็วรอบคงที่ 120

rad/s ดังรูปที่ 6 (ก) ซึ่งจะสอดคล้องกับการทำงานของมอเตอร์โนโหมค Subsynchronous ในช่วงนี้มอเตอร์จะรับกำลังแอคทีฟจากด้านสเตเตอร์ P_s และมอเตอร์จะจ่ายกำลังสลิปแอคทีฟ P_r ผ่านคอนเวทเตอร์กลับคืนสู่แหล่งจ่ายทางด้านโรเตอร์ (Slip Power Recovery) คอนเวทเตอร์จะทำงานโนโหมคอินเวทเตอร์ (Inverting Mode) ดังรูป 6 (ฉ) และมอเตอร์จะรับกำลังรีแอคทีฟจากทางด้านสเตเตอร์ Q_s เพียงด้านเดียวเนื่องจาก $i_{dr} = 0$ กระแสสเตเตอร์บนแกนนิ่ง abc จะมีเฟสช้าหลังแรงดัน (Current lagging Voltage) ดังรูป 6 (จ) ที่เวลา $t = 0.07 \text{ sec}$ ในช่วงที่ 2 ได้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วคำสั่ง ω_r^* ทันทีทันใด (Step Change) จาก $\omega_r^* = 120 \text{ rad/s}$ เป็น 420 rad/s มอเตอร์จะทำงานในสภาวะชั่วคราว (Transient) มอเตอร์ยังทำงานโนโหมค Subsynchronous กำลัง สลิปแอคทีฟ P_r จะไหลจากโรเตอร์เข้าสู่ DC บัส ทำให้ตัวเก็บประจุได้รับและเก็บสะสมพลังงานจาก โรเตอร์ (Charge) ขณะเดียวกัน ตัวควบคุม PI จะสั่งให้ตัวเก็บประจุคายพลังงานให้กับแหล่งจ่าย (Discharge) เพื่อควบคุม E ให้มีค่าคงที่ทำให้คอนเวทเตอร์ทำงานโนโหมคอินเวทเตอร์ ดังรูป 6 (ฉ) แต่ตัวเก็บประจุได้รับพลังงานมากกว่าที่คายพลังงานทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง E เพิ่มขึ้น ดังรูป 6 (ง) เมื่อมอเตอร์เร่งความเร็วขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่ามากกว่าความเร็วเชิงโรตอร์ที่เวลา $t = 0.15 \text{ sec}$ ในช่วงที่ 3 ความเร็วสลิป ω_{sl} มีค่าเป็นลบและกระแสของโรเตอร์จะเปลี่ยนซีเควิน (Phase Sequence) ดังรูป 6 (ก) ในช่วงนี้มอเตอร์ยังอยู่ในสภาวะชั่วคราวแต่จะเปลี่ยนการทำงานเป็นโนโหมค Supersynchronous ทำให้ตัวเก็บประจุจ่ายพลังงานให้กับโรเตอร์และตัวควบคุม PI จะสั่งให้ตัวเก็บประจุคายพลังงานให้กับแหล่งจ่ายเพื่อทำให้แรงดันตกค้อมตัวกับประจุ E ลดลงดังรูป 6 (ง) ทำให้คอนเวทเตอร์ทำงานโนโหมคอินเวทเตอร์ดังรูป 6 (ฉ) มอเตอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยมีความเร็วรอบคงที่ 420 rad/s ที่เวลา $t = 0.2 \text{ sec}$ ในช่วงที่ 4 ขณะนี้มอเตอร์จะรับกำลังแอคทีฟจากทั้ง 2 ด้าน คือทางด้านสเตเตอร์และทางด้านโรเตอร์จะเห็นได้ว่ากำลังสลิปแอคทีฟ P_r จะไหลกลับทิศทางคอนเวทเตอร์จะเปลี่ยนการทำงานเป็นโนโหมคเรกติไฟเออร์ (Rectifying Mode) ดังรูป 6 (ฉ) และที่เวลา $t = 0.3$

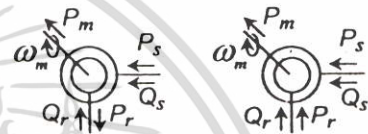
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ในโครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ประโยชน์ตามสมควร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

sec ในช่วงที่ 5 กระแสค่าตั้ง i_{dr}^* ถูกเปลี่ยนจาก 0 A เป็น 5.8 A (step change) ซึ่งเท่ากับพิคคของกระแสแมกนีไตซิง i_{ms} (Magnetizing Current) ดังรูป 6 (ข) ช่วงนี้มอเตอร์จะรับกำลังรีแอกทีฟ และกระแสแมกนีไตซิง i_{ms} จากทางด้านโรเตอร์เพียงด้านเดียวเนื่องจาก $i_{ds} = 0$ กระแสที่สเตเตอร์จะอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้า มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ = 1 ดังรูป 6 (จ) ส่วนคอนเวอเตอร์จะทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ เมื่อเวลา $t = 0.39$ sec ช่วงที่ 6 ได้มีการลดความเร็วค่าตั้ง ω_r^* จาก 420 rad/s เป็น 120 rad/s ดังรูป 6 (ก) ช่วงนี้ตัวเก็บประจุได้รับพลังงานจากโรเตอร์ตัวควบคุม PI จะสั่งให้ตัวเก็บประจุสลายพลังงานให้กับแหล่งจ่ายทำให้คอนเวอเตอร์ทำงานในโหมดอินเวอเตอร์ค่า E จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก่อนที่มอเตอร์จะเปลี่ยนการทำงานเป็นโหมด Subsynchronous ที่เวลา $t = 0.41$ sec ในช่วงที่ 7 ดังรูป 6 (ก) กระแสโรเตอร์จะเปลี่ยนขั้วและตัวเก็บประจุจะจ่ายพลังงานให้กับโรเตอร์ขณะเดียวกันตัวควบคุม PI จะสั่งให้ตัวเก็บประจุดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายทำให้คอนเวอเตอร์กลับมาทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ แต่ตัวเก็บประจุจ่ายพลังงานมากกว่าที่ได้รับทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ E ลดลงดังรูป 6 (ง) ที่เวลา $t = 0.47$ sec ช่วงที่ 8 มอเตอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัวแต่คอนเวอเตอร์ยังทำงานในภาวะชั่วคราวในช่วงนี้ตัวเก็บประจุได้รับพลังงานจากโรเตอร์ขณะเดียวกันก็จะดึงพลังงานจากแหล่งจ่ายทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ E เพิ่มขึ้นเรียกว่า ช่วงฟื้นตัว (Recovery time) ดังรูป 6 (ง) เมื่อเวลา $t = 0.57$ sec ในช่วงที่ 9 การทำงานของระบบจะเริ่มซ้ำกับช่วงแรก

4. สรุปผลการจำลอง

กำลังสลิปแอกทีฟที่โรเตอร์ P_r จะไหลได้ 2 ทิศทางและสามารถนำกลับคืนสู่แหล่งจ่าย ได้เมื่อมอเตอร์ทำงานในโหมด Subsynchronous การควบคุมกำลังรีแอกทีฟที่โรเตอร์ Q_r และที่สเตเตอร์ Q_s สามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสค่าตั้ง i_{dr}^* กล่าวคือเมื่อ ตั้งค่ากระแสค่าตั้ง i_{dr}^* ให้มีค่าลดลงทำให้กำลังรีแอกทีฟ Q_r ลดลงแต่

กระแส i_{ds} จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษากระแส i_{ms} ให้มีค่าคงที่ ทำให้กำลังรีแอกทีฟที่สเตเตอร์ Q_s เพิ่มขึ้นโดยไม่มีผลกระทบต่อกำลังแอกทีฟของมอเตอร์ ถ้ากระแส $i_{dr} = 0$ มอเตอร์จะรับกำลังรีแอกทีฟจากทางด้านสเตเตอร์เพียงด้านเดียวในทำนองเดียวกันการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ Q ของคอนเวอเตอร์ทำได้โดยการควบคุมกระแสค่าตั้ง i_q^* การไหลของกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 5



(ก) โหมด Subsynchronous (ข) โหมด Supersynchronous รูปที่ 5 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในมอเตอร์

5. ภาคผนวก

Induction Motor: 10-hp, 250V, 19A, 6 poles, 50 Hz, $L_0 = 191.8$ mH, $L_r = 234$ mH, $L_s = 206.5$ mH, $R_r = 2.312 \Omega$, $R_s = 1.06 \Omega$, $J = 0.038$ Kg², $\sigma_f = 0.06$ Nm/rad, $T_m = 2.5$ N-m

PI controller : $K_i = 2$, $K_p = 25$, current limit 8 A

Hysteresis Current Controller : Fixed band HB = 0.5 A

Converter : C = 2400 μ F, $E^* = 550$ V, $i_q^* = 0$ A

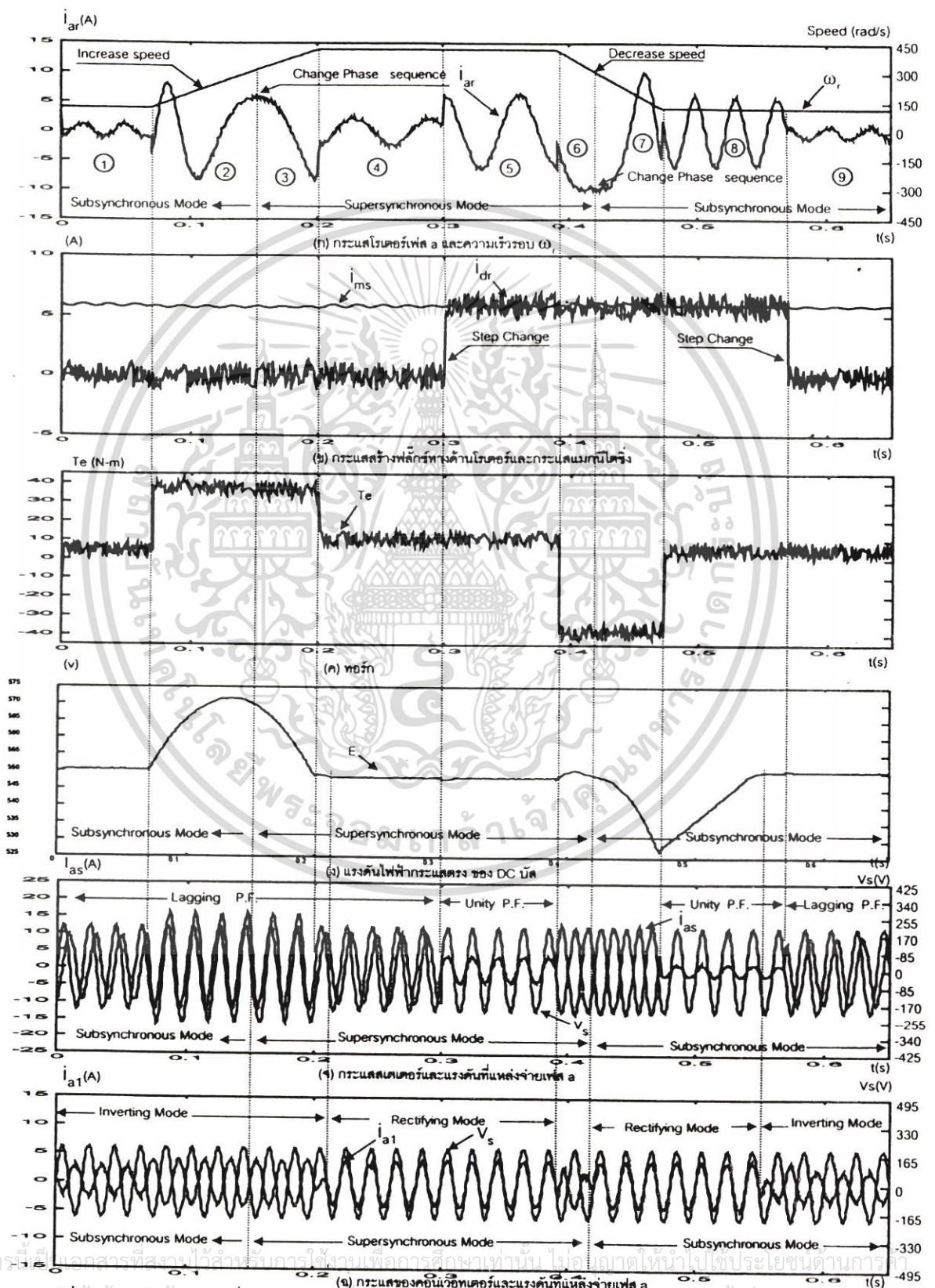
R = 0.1 Ω , L = 24 mH, Supply Voltage = 250 v line to line

PI controller : $K_i = 0.5$, $K_p = 8$, current limit 4 A

Hysteresis Current Controller : Fixed band HB = 0.2 A

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Leonhard, "Control of electrical drives". Springer-Verlag 1985.
- [2] A.M. Walcyna, 1987. BICEM Proc., 495-498
- [3] S.R. Jones, R. Jones, "1993 IEE Colloquium on development in real time control of induction motor drives", DIGEST No 1993/024. 5/1-5/9.
- [4] 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-3.075-3.083.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่เอามาตีพิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 6 แสดงปริมาณต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการปรับความเร็วรอบโดยการเร่งและลดความเร็วรอบโดยตั้งค่ากระแสสั่ง i_{dr}^* ต่าง ๆ กัน

ประวัติผู้เขียน



นาย พิเชษฐ ฉัตรพาน เกิดเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2516 ที่จังหวัดชลบุรี
สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากวิทยาลัยเทคนิคชลบุรี
สาขาไฟฟ้ากำลัง

สำเร็จการศึกษาวិชาการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปัจจุบันทำงานอยู่ที่บริษัทโรงกลั่นน้ำมัน เอส โชน่แห่งประเทศไทย จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้