



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
Real Time Simulator of a Doubly-Fed Induction Generator for Electricity



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **138018**
รับเดือนปี **8 ก.ย. 2558**

12706139
.b.....
.i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
 แหล่งเงินเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์.....
 ประจำปีงบประมาณ.....2554..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 64,900.....บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
 ดร.วรชาติ แซ่ก๊ก.....สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์.....

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เกี่ยวกับการสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางซึ่งจัดเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมากในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม ในการวิจัยนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการจำลองการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อที่จะนำระเบียบวิธีการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาใช้ในการสร้างระบบทดสอบและทำการทดสอบระบบจริงโดยทำการทดสอบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีพิกัด 7 kVA ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดสอบนั้น ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อเป็นการยืนยันการความถูกต้องของระเบียบวิธีการควบคุมที่ออกแบบไว้ พบว่าผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดสอบนั้นมีทิศทางไปในทิศทางเดียวกัน

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง, การผลิตไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Real Time Simulator of a Doubly-Fed Induction Generator for Electricity Generation

Researcher: Dr. Warachart Sae-Kok

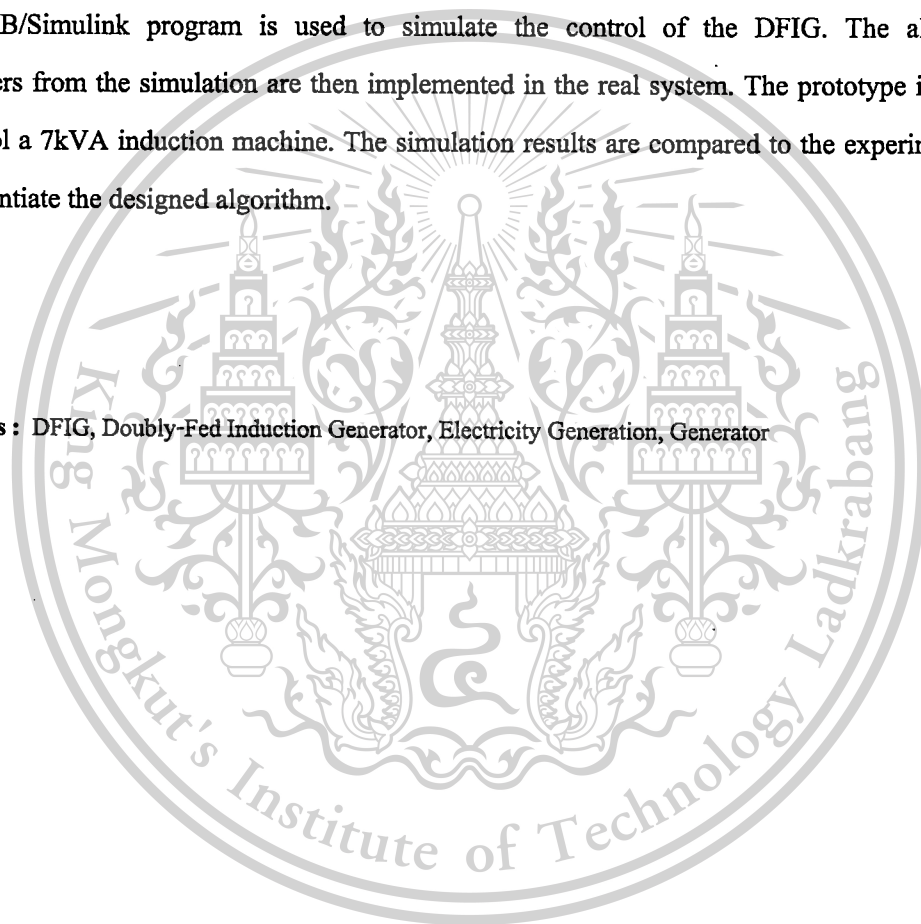
Faculty: Engineering

Department: Electrical Engineering

ABSTRACT

The aim of this research is to construct the prototype system of a doubly-fed induction generator (DFIG). This type of generator is generally used for electricity generation by the wind. In this research, MATLAB/Simulink program is used to simulate the control of the DFIG. The algorithm and parameters from the simulation are then implemented in the real system. The prototype is constructed to control a 7kVA induction machine. The simulation results are compared to the experimental results to substantiate the designed algorithm.

Keywords : DFIG, Doubly-Fed Induction Generator, Electricity Generation, Generator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	30
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	30
เอกสารอ้างอิง.....	31
ประวัตินักวิจัย.....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ไดอะแกรมของระบบการจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	1
1.2 ไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	2
2.1 เส้นกราฟคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์แบบขดลวดเมื่อมีการควบคุมผ่านวงจรโรเตอร์	4
2.2 ไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (a) ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส, (b) ความเร็วซิงโครนัส และ (c) ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และภายใต้การทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (d) ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส, (e) ความเร็วซิงโครนัส และ (f) ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส	5
2.3 รูปแบบการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบขดลวดในแบบต่างๆ (a) การควบคุมโดยการปรับค่าความต้านทาน (b) การควบคุมโดยอาศัยวงจรชอปเปอร์ (c) การควบคุมโดยใช้วงจรคราเมอร์ (d) การควบคุมโดยการควบคุมแรงดันไฟตรงผ่าน PWM converter (d) การควบคุมโดยการป้อนแรงดันสองทาง	7
2.4 ไดอะแกรมเวกเตอร์ของตัวแปรต่างๆที่สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	8
2.5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน	12
2.6 ไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางโดยการควบคุมเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์	13
2.7 ไดอะแกรมเวกเตอร์ของตัวแปรต่างๆที่สำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟังกริด	14
2.8 ไดอะแกรมการประมาณค่ามุมและความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงแรงดันกริดโดยใช้เฟสล็อกคัลรูปชนิดสามเฟส	15
2.9 ไดอะแกรมการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟังกริด	16
2.10 ไดอะแกรมการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเต็มระบบ	17
2.11 ไดอะแกรมการสร้างระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	18
3.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	20
3.2 ระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (a) และ (b) ส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (c) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับทำงานเป็นต้นกำลังให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ห้ามมิให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อทำงานเป็นต้นกำลังให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง.....	22
4.1 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่น (a) กระแสโรเตอร์ (b) แรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ และ (c) กระแสสเตเตอร์ ภายใต้สภาวะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริด.....	23
4.2 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสสเตเตอร์ในย่าน (a) ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และ (b) ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส.....	24
4.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่นกระแสโรเตอร์ในย่าน (a) ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (b) ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และ (c) ความเร็วรอบเปลี่ยนจากย่านความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสไปสู่อ่านความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส.....	24-25
4.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสกริดในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด (a) วงจรเรียงกระแส และ (b) อินเวอร์เตอร์.....	25
4.5 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นของ (a) กระแสคำสั่งและกระแสจริงในแนวแกน D (b) กระแสโรเตอร์ และ (c) แรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ ภายใต้สภาวะการเริ่มเดินเครื่องโรเตอร์.....	26
4.6 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่น (a) กระแสสเตเตอร์ และ (b) แรงดันกริด, แรงดันสเตเตอร์ และ กระแสสเตเตอร์ ภายใต้สภาวะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า.....	27
4.7 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นกระแสโรเตอร์และมุมสลิปภายใต้สภาวะการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ (a) ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (b) ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และ (c) ย่านความเร็วรอบของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงจากความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสไปสู่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส.....	27
4.8 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสสเตเตอร์ (บน) และกระแสโรเตอร์ (ล่าง) ภายใต้การทำงานในย่านความเร็ว (a) ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และ (b) สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส.....	28
4.9 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งกริดภายใต้การทำงานในโหมด (a) วงจรเรียงกระแส (b) อินเวอร์เตอร์.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

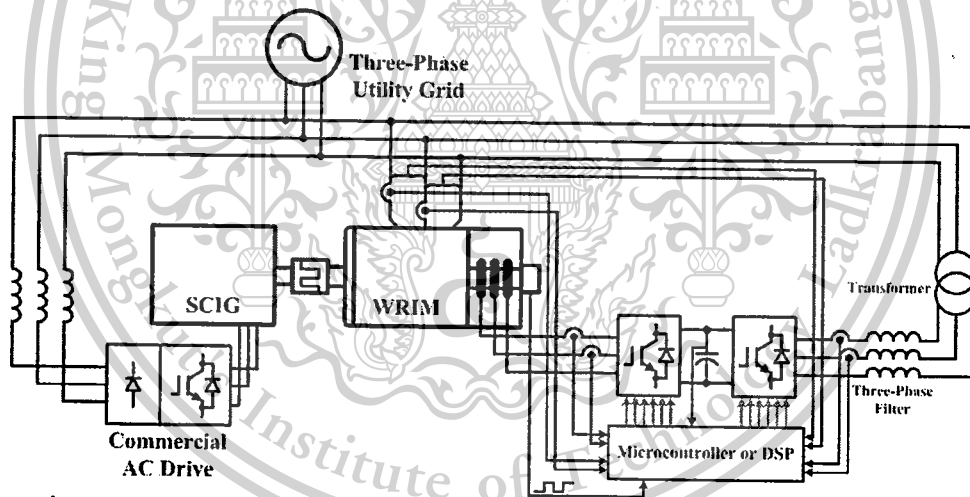
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงการวิจัยนี้เป็นการออกแบบสร้างระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (doubly-fed induction generator, DFIG) ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานลม โดยหลักการของโครงการวิจัยนี้คือการสร้างระบบที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าซึ่งสามารถกระทำได้ในห้องปฏิบัติการ โดยไม่จำเป็นต้องทำการสร้างโรงไฟฟ้าหรือติดตั้งกังหันลมจริงดังเช่นกรณีภาคสนาม ซึ่งโครงการนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยองค์ความรู้และเทคโนโลยีในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้ารวมถึงเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้า โดยในการผลิตไฟฟ้าด้วย DFIG จำเป็นที่จะต้องมีการใช้เครื่องจักรต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนเพลลาของ DFIG ซึ่งทางผู้ดำเนินโครงการวิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งสามารถควบคุมได้โดยอาศัยชุดขับเคลื่อนทางไฟฟ้าที่สามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดมาทำหน้าที่เป็นต้นกำลังสำหรับโครงการวิจัยนี้ดังแสดงในภาพที่ 1.1



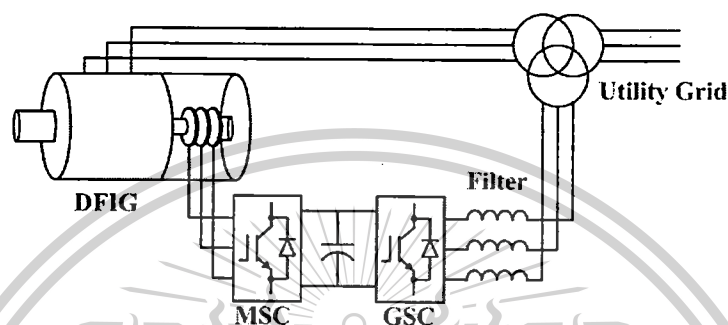
ภาพที่ 1.1 โค้ดแกรมของระบบการจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

โครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การควบคุม DFIG ให้สามารถทำการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ตามที่ต้องการ มีข้อดีของการนำ DFIG มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าคือ สามารถควบคุมให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ที่ความเร็วใดๆ กล่าวคือ DFIG สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (sub-synchronous speed) ความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) หรือ ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส (super-synchronous speed) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวไม่ปรากฏอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าอื่นๆ นอกจากนี้ DFIG ยังสามารถหาได้ง่ายในตลาดและ ไม่จำเป็นต้องสั่งทำพิเศษ เพราะเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ทั่วไป ในการควบคุม DFIG นั้นจะอาศัยการควบคุมผ่านวงจรของโรเตอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุม DFIG นั้นจะมีขนาดเพียง 20-30% ของพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรกำลังของระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้ได้ คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสชนิด PWM 2 ชุดซึ่งต่อกันอยู่ในลักษณะ back-to-back ซึ่งจะต่ออยู่กับวงจรโรเตอร์ของ DFIG ดังแสดงในภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 โค้ดแอมป์อย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

จากการเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ในลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2 จะทำให้กำลังไฟฟ้าของโรเตอร์สามารถไหลได้ 2 ทิศทาง ทำให้สามารถควบคุม DFIG ให้สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วใดๆ ด้วยเหตุนี้ทำให้ DFIG มีประโยชน์ในการใช้ผลิตไฟฟ้าโดยเฉพาะจากพลังงานลมที่มีความเร็วลมแปรเปลี่ยนไม่แน่นอน

โครงการวิจัยนี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากปัญหาโลกร้อน, การหมดไปของแหล่งพลังงานจากฟอสซิล และปัญหาภาวะจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ได้จากน้ำมัน, ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น หากยังมีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานดังกล่าวจะทำให้สถานการณ์สิ่งแวดล้อมของโลกรุนแรงขึ้น ด้วยเหตุนี้การนำพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าแทนที่แหล่งพลังงานดั้งเดิมที่สร้างมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อม เนื่องด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจัดเป็นหัวใจสำคัญของการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อเป็นการผลิตไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดทางผู้ดำเนินโครงการวิจัยเสนอโครงการนี้เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการผลิตไฟฟ้าและศึกษาวิเคราะห์โดยนำผลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อทำการสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง ขนาด 1 kW โดยทำการเชื่อมต่อกับกริดของระบบไฟฟ้า
2. เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าและการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า
3. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการควบคุมจักรกลไฟฟ้าให้สามารถผลิตไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นแบบสำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานหมุนเวียนเพื่อเป็นการลดมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อมด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การสร้างระบบต้นแบบสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางขนาด 1 kW เพื่อใช้ในการจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน และศึกษาหาวิธีการควบคุมที่เหมาะสมต่อการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพผลสูงสุด

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าเทคโนโลยีการประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
2. สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
3. สร้างเครื่องต้นแบบขนาด 1 kW และทดสอบเครื่องต้นแบบโดยอาศัยอัลกอริทึมที่ได้จากการจำลอง ทางคอมพิวเตอร์
4. ทำการบันทึกและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
5. สรุปผลการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

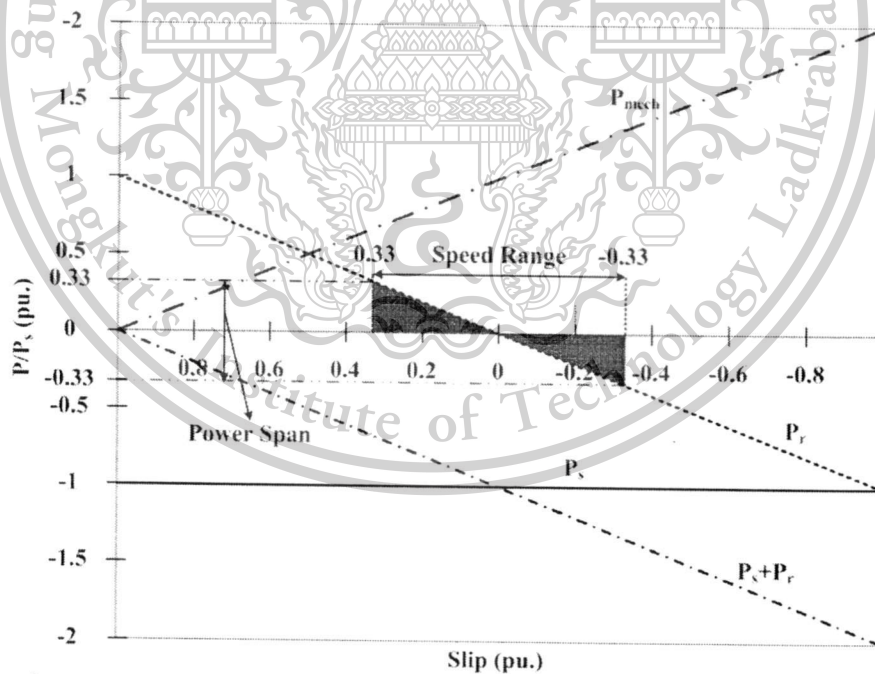
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบขดลวดนั้น หากนำมาทำการลัดวงจรที่โรเตอร์แล้วทำการควบคุมสัญญาณแรงดันที่ป้อนเข้าสู่สเตเตอร์จะมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์กรงกระรอก แต่เนื่องด้วยคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้คือ การเข้าถึงได้ของวงจรรอโรเตอร์ทำให้การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ไม่ถูกจำกัดอยู่เพียงการควบคุมผ่านสเตเตอร์เท่านั้น หากแต่ยังสามารถทำการควบคุมผ่านวงจรรอโรเตอร์ได้เช่นกัน ซึ่งส่งผลให้ยานการทำงานและคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์แบบขดลวดแตกต่างออกไปจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก

2.1.1 หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์แบบขดลวดนั้น เพื่อให้การควบคุมง่ายขึ้น จำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจทฤษฎีที่ต่างออกไปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ซึ่งเส้นกราฟคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 เส้นกราฟคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดโรเตอร์แบบขดลวดเมื่อมีการควบคุมผ่านวงจรรอโรเตอร์

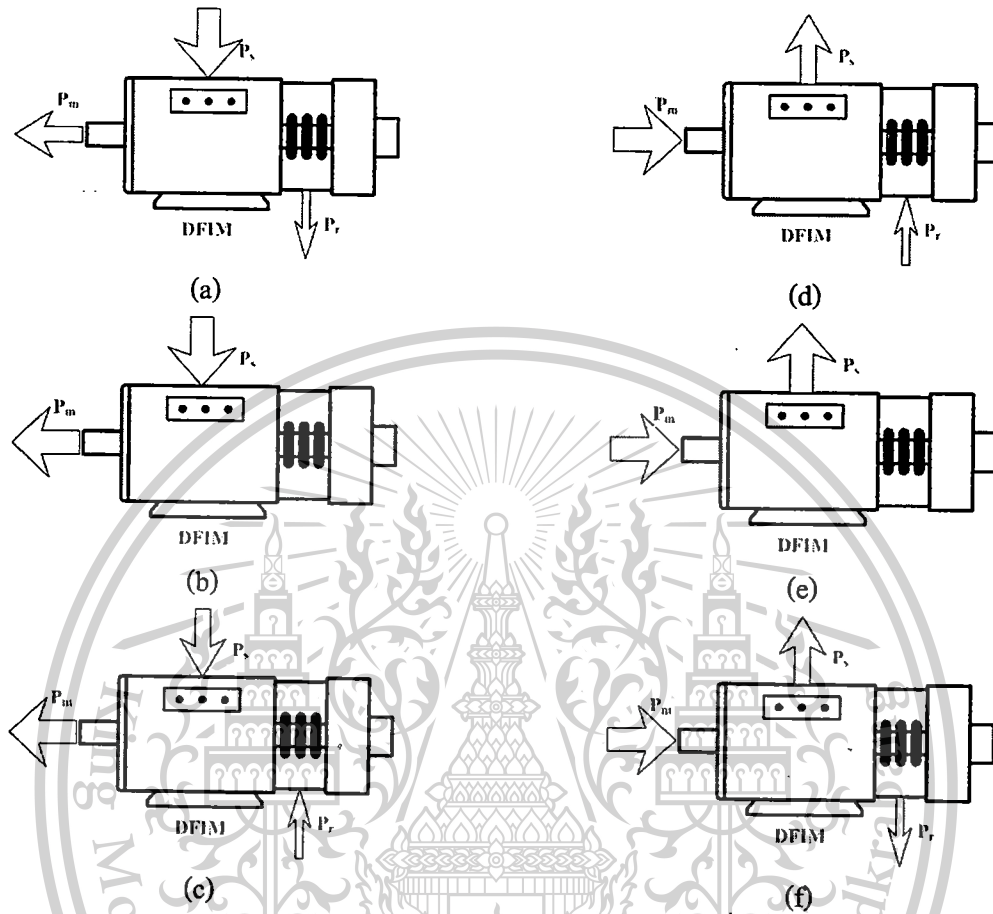
จากรูปจะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่โรเตอร์จะแปรผันกับค่าสลิปโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$P_r = -sP_s \quad (2.1)$$

ซึ่งเมื่อเขียน ไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงจะเป็นดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ไดอะแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง
 (a) ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส, (b) ความเร็วซิงโครนัส และ (c) ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และภายใต้การทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (d) ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส, (e) ความเร็วซิงโครนัส และ (f) ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส

จากภาพที่ 2.2 จะพบว่าในโหมดมอเตอร์นั้นจะพบว่าที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโรเตอร์ ในขณะที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่โรเตอร์ในทางกลับกัน ในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่โรเตอร์ ในขณะที่ที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโรเตอร์ ที่ความเร็วซิงโครนัสกำลังไฟฟ้าจากโรเตอร์จะเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1

ในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์นั้นวิธีการที่เป็นวิธีการดั้งเดิมและยังได้รับความนิยมในปัจจุบันคือการควบคุมค่าความต้านทานที่โรเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.3a การควบคุมแบบนี้

สามารถควบคุมค่าแรงบิดขณะเริ่มต้นออกตัวของมอเตอร์ได้โดยอาศัยการปรับค่าความต้านทานให้สูงขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้า ส่งผลให้ค่าแรงบิดขณะออกตัวมีค่าสูงขึ้น แต่กระแสจะต่ำลง อย่างไรก็ตามด้วยการพัฒนาทางค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีมากขึ้นส่งผลให้มีการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมแรงดันที่โรเตอร์ โดยอาศัยวงจรบริดจ์และวงจรชอปเปอร์เพื่อช่วยในการปรับค่าแรงดันของโรเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.3b ซึ่งจะส่งผลให้สามารถควบคุมความเร็วรอบของโรเตอร์ได้โดยการควบคุมการสวิตช์ที่คอนเวอร์เตอร์เท่านั้น

วิธีการดังกล่าวข้างต้นเหมาะกับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าในโหมดมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น เนื่องจากในโหมดการทำงานดังกล่าวมีกำลังไฟฟ้าไหลออกจากโรเตอร์ ส่วนในโหมดและย่านการทำงานที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าไหลออกจากโรเตอร์นั้นจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้

นอกจากนี้จะพบว่าการควบคุมโดยสองวิธีข้างต้นนั้น เป็นการทิ้งพลังงานที่ผลิตได้จากโรเตอร์ลงไปที่ตัวต้านทานซึ่งพลังงานดังกล่าวสามารถป้อนคืนกลับมาสู่ระบบได้โดยอาศัยวงจรดังแสดงในรูป 2.3c ซึ่งวงจรถูกเรียกว่าวงจรขับเคลื่อนเครื่องคราเมอร์ (Static Kramer drive) อย่างไรก็ตาม วงจรการควบคุมดังกล่าวยังสามารถใช้ได้กับการทำงานในโหมดมอเตอร์ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น

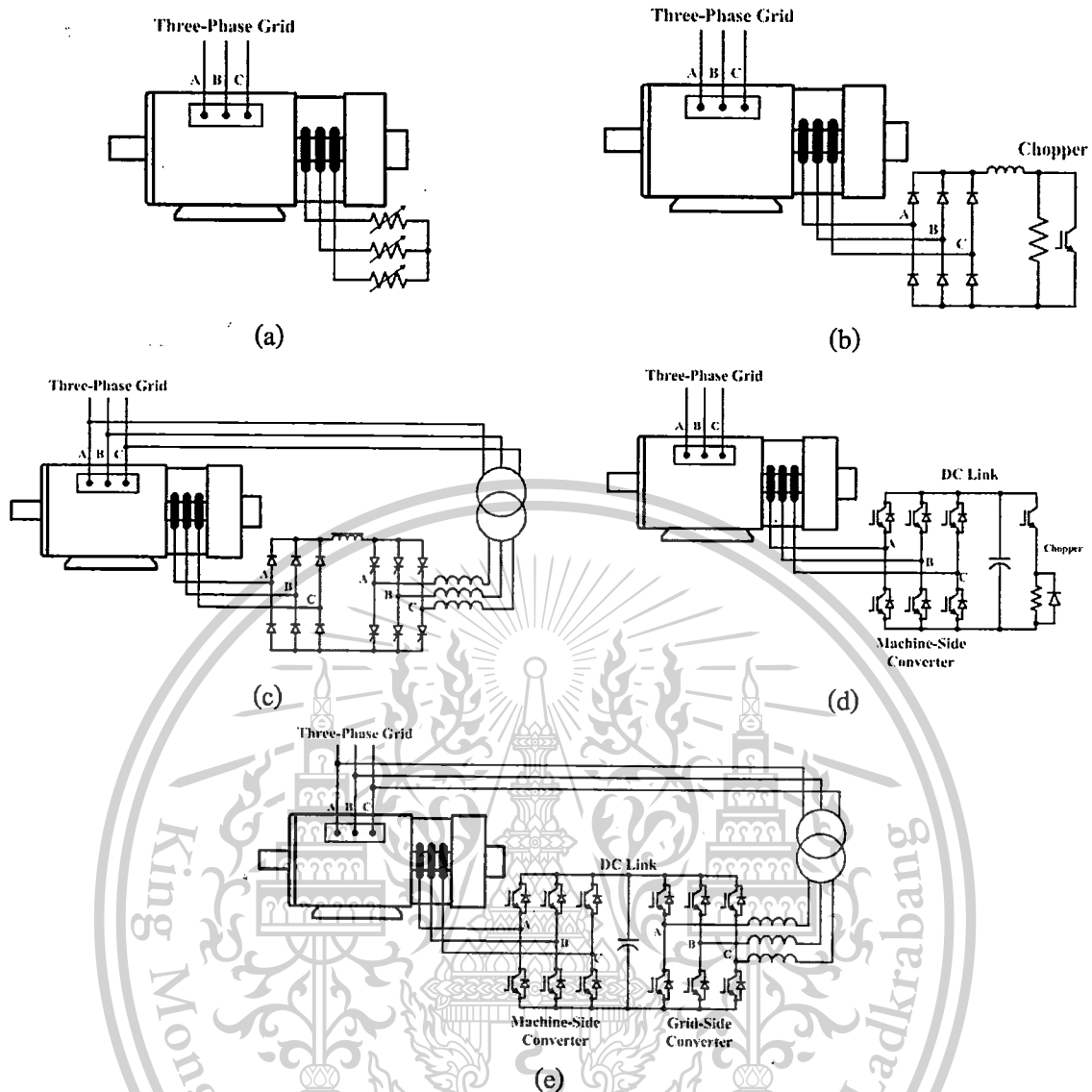
ในปัจจุบันเนื่องจากเทคโนโลยีการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับการพัฒนาไปอย่างมากส่งผลให้วิธีการควบคุมที่เรียกว่า การควบคุมเวกเตอร์ (vector control) ได้รับการพัฒนาและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธีการในการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดนี้เป็นการควบคุมกระแสโรเตอร์โดยอาศัยการแจกแจงกระแสตามเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับคล็อกที่สเตเตอร์ ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ ซึ่งจะได้อธิบายถึงในบทต่อไป

ด้วยเหตุนี้เพื่อให้สามารถควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้ด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องอาศัยคอนเวอร์เตอร์ชนิดปรับความกว้างพัลส์ (PWM converter) มาเชื่อมต่อกับวงจรโรเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.3d และ 2.3e สำหรับวงจรในภาพที่ 2.3d จะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการทำงานเป็นมอเตอร์ในย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสเท่านั้น ซึ่งการทำงานของวงจรมอเตอร์อาศัยการรักษาระดับแรงดันไฟตรงโดยใช้วงจรชอปเปอร์เช่นเดียวกับที่ประยุกต์ใช้ในวงจรไดนามิกเบรค เพื่อให้สามารถทำการควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ แต่หากมีการเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์ชนิดปรับความกว้างพัลส์อีกชุดหนึ่งเข้าทางด้านวงจรเชื่อมโยงไฟตรงดังภาพที่ 2.3f จะทำให้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลได้ 2 ทิศทางทำให้สามารถควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ทั้งโหมดมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทุกย่านความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 2.3 รูปแบบการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์แบบขดลวดในแบบต่างๆ

- (a) การควบคุมโดยการปรับค่าความต้านทาน
- (b) การควบคุมโดยอาศัยวงจรรอเปอร์
- (c) การควบคุมโดยใช้วงจรรามาเมอร์
- (d) การควบคุมโดยการควบคุมแรงดันไฟตรงผ่าน PWM converter
- (e) การควบคุมโดยการป้อนแรงดันสองทาง

2.1.2 การควบคุมเวกเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองเตี้ยวซึ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำประเภทนี้คือเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดโรเตอร์ขดลวดซึ่งมีการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้เข้าทางโรเตอร์ การควบคุมเวกเตอร์ในหัวข้อนี้จะเจาะจงไปที่การควบคุมเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับกลองที่สเตเตอร์ โดยอาศัยการควบคุมกระแสโรเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\bar{i}_s = \frac{L_s}{L_m} (\bar{i}_{ms} - \bar{i}_r) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 ค่า $\frac{L_s}{L_m} = 1 + \sigma_s$ โดยที่ σ_s แทนค่าตัวประกอบรั่วไหลที่โรเตอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_s = \frac{L_{sl}}{L_m}$$

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าตัวประกอบรั่วไหลดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\bar{i}_s = \frac{1}{(1 + \sigma_s)} (\bar{i}_{ms} - \bar{i}_r) \quad (2.5)$$

ดังแสดงในภาพที่ 2.4 จะพบว่ากระแสเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวข้องกับสเตรเตอร์จะมีองค์ประกอบในแนวแกน d เท่านั้น เพราะฉะนั้นขนาดของเวกเตอร์ของกระแสแม่เหล็กในไตซึ่งที่สเตรเตอร์จึงมีค่าเท่ากับขนาดขององค์ประกอบของเวกเตอร์ของกระแสแม่เหล็กในไตซึ่งในแนวแกน d เช่นกัน ดังนั้น จากสมการที่ 2.5 เมื่อทำการแยกองค์ประกอบของเวกเตอร์ของกระแสสเตรเตอร์ให้อยู่ในรูปของกระแสสเกลาร์ในแนวแกน d และ แนวแกน q จะได้

$$i_{sd}^e = \frac{1}{(1 + \sigma_s)} (\bar{i}_{ms} - i_{rd}^e) \quad (2.6)$$

$$i_{sq}^e = -\frac{1}{(1 + \sigma_s)} i_{rq}^e \quad (2.7)$$

2.1.2.2 สมการแรงดันโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ในกรณีของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางนั้น สเตรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะเชื่อมต่อโดยตรงกับกริดของการไฟฟ้าในขณะที่โรเตอร์จะถูกเชื่อมต่ออยู่กับคอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรทางด้านโรเตอร์เท่านั้นที่จะถูกควบคุมโดยตรง ในขณะที่ตัวแปรทางด้านสเตรเตอร์จะถูกควบคุมโดยอ้อมผ่านการควบคุมตัวแปรทางด้านโรเตอร์ ในการที่จะทำการควบคุมตัวแปรทางด้านโรเตอร์นั้น สิ่งสำคัญประการแรกคือต้องทำความเข้าใจสมการแรงดันโรเตอร์ก่อน ซึ่งในหัวข้อนี้จะเริ่มที่สมการเวกเตอร์ของแรงดันโรเตอร์ในกรอบอ้างอิงฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวข้องกับสเตรเตอร์ (stator flux reference frame) ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$\vec{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j(\omega_e - \omega_r) \bar{\lambda}_r \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 พิจารณาเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวข้องกับโรเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.9 ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\bar{\lambda}_r = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s \quad (2.9)$$

ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลิ่งที่โรเตอร์สมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.8 แล้วจะได้สมการแรงดันโรเตอร์ในรูปของเวกเตอร์เชิงซ้อนดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + L_r \frac{d\bar{i}_r}{dt} + L_m \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j(\omega_e - \omega_r)L_r \bar{i}_r + j(\omega_e - \omega_r)L_m \bar{i}_s \quad (2.10)$$

ดังได้กล่าวมาข้างต้น ตัวแปรที่ถูกควบคุมโดยตรงคือตัวแปรทางด้านโรเตอร์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.10 จะพบว่า ยังมีค่ากระแสสเตเตอร์ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยตรงอยู่ นอกจากนี้ในการควบคุมด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์ฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับขดลิ่งที่สเตเตอร์ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสเตเตอร์และกระแสแมกเนไตซ์ที่สเตเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.3 จะถูกนำมาแทนค่าในสมการที่ 2.10 ซึ่งจะได้สมการแรงดันโรเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d\bar{i}_r}{dt} + \frac{L_m^2}{L_s} \frac{d\bar{i}_{ms}}{dt} + j\omega_{sl} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \bar{i}_r + j\omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_s} \bar{i}_{ms} \quad (2.11)$$

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) \frac{d\bar{i}_r}{dt} + \frac{L_m^2}{L_s} \frac{d\bar{i}_{ms}}{dt} + j\omega_{sl} L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) \bar{i}_r + j\omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_s} \bar{i}_{ms} \quad (2.12)$$

โดยที่ ω_{sl} เท่ากับ $\omega_e - \omega_r$

จากสมการที่ 2.12 ค่า $1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ เรียกว่าตัวประกอบรั่วไหลรวมซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ σ

เพราะฉะนั้น $\frac{L_m^2}{L_r} = L_s (1 - \sigma)$ ดังนั้นเมื่อจัดรูปสมการที่ 2.12 ใหม่จะได้

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \sigma L_r \frac{d\bar{i}_r}{dt} + (1 - \sigma) L_r \frac{d\bar{i}_{ms}}{dt} + j\omega_{sl} \sigma L_r \bar{i}_r + j\omega_{sl} (1 - \sigma) L_r \bar{i}_{ms} \quad (2.13)$$

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + L_r' \frac{d\bar{i}_r}{dt} + (L_r - L_r') \frac{d\bar{i}_{ms}}{dt} + j\omega_{sl} L_r' \bar{i}_r + j\omega_{sl} (L_r - L_r') \bar{i}_{ms} \quad (2.14)$$

โดยที่ L_r' แทนค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์ในสถานะชั่วคราว ซึ่งมีค่าเท่ากับ $L_r' = \sigma L_r$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ 2.13 ให้อยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์อันดับ 1 ของกระแสโรเตอร์จะได้สมการในรูปแบบสมการที่ 2.15

$$\sigma L_r \frac{d\bar{i}_r}{dt} + R_r \bar{i}_r = \bar{v}_r - j\omega_{sl} \sigma L_r \bar{i}_r - L_r (1 - \sigma) \left(\frac{d\bar{i}_{ms}}{dt} + j\omega_{sl} \bar{i}_{ms} \right) \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการแยกสมการเวกเตอร์ให้อยู่ในรูปของสมการสเกลาร์ในแต่ละแนวแกนจะได้สมการในแนวแกน d และ แนวแกน q ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$\sigma L_r \frac{di_{rd}^e}{dt} + R_r i_{rd}^e = v_{rd}^e + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq}^e - (1-\sigma) L_r \frac{d|\bar{i}_{ms}|}{dt} \quad (2.16)$$

$$\sigma L_r \frac{di_{rq}^e}{dt} + R_r i_{rq}^e = v_{rq}^e - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd}^e - \omega_{sl} (1-\sigma) L_r |\bar{i}_{ms}| \quad (2.17)$$

นอกจากนี้ ในสถานะที่แรงดันกริดมีค่าคงที่ตลอดจะส่งผลให้ค่ากระแสแมกเนไตซ์ซึ่งที่สเตเตอร์มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ 2.18 จะลดรูปเหลือเพียง

$$\sigma L_r \frac{di_{rd}^e}{dt} + R_r i_{rd}^e = v_{rd}^e + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq}^e \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.16 และ 2.17 จะพบว่าในแต่ละสมการจะมีองค์ประกอบในแนวแกนอื่นค้ำบปลั่งอยู่ซึ่งในแนวแกน d และในแนวแกน q ดังนี้

องค์ประกอบในแนวแกน d

$$\sigma L_r \omega_{sl} i_{rq}^e$$

องค์ประกอบในแนวแกน q

$$-\omega_{sl} (1-\sigma) L_r |\bar{i}_{ms}| - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd}^e$$

ซึ่งองค์ประกอบแรงดันเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดการตอบสนองที่ช้าลงในการควบคุมกระแสในแต่ละแนวแกน ซึ่งจำเป็นจะต้องกำจัดองค์ประกอบแรงดันดังกล่าวทิ้ง โดยการทำการบวกค่าแรงดันชดเชยในสมการวงรอบการควบคุมโดยค่าแรงดันชดเชยแต่ละองค์ประกอบเป็นดังนี้

แรงดันชดเชยในแนวแกน d

$$-\sigma L_r \omega_{sl} i_{rq}^e$$

แรงดันชดเชยในแนวแกน q

$$\omega_{sl} (1-\sigma) L_r |\bar{i}_{ms}| + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd}^e$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ 2.18 และ 2.17 ในรูปแบบของค่าคงตัวเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\sigma \tau_r \frac{di_{rd}^e}{dt} + i_{rd}^e = \frac{v_{rd}^e}{R_r} + \omega_{sl} \sigma \tau_r i_{rq}^e \quad (2.19)$$

$$\sigma \tau_r \frac{di_{rq}^e}{dt} + i_{rq}^e = \frac{v_{rq}^e}{R_r} - \omega_{sl} \sigma \tau_r i_{rd}^e - \omega_{sl} (1-\sigma) \tau_r |\bar{i}_{ms}| \quad (2.20)$$

โดยที่ $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ แทนค่าคงตัวเวลาของโรเตอร์

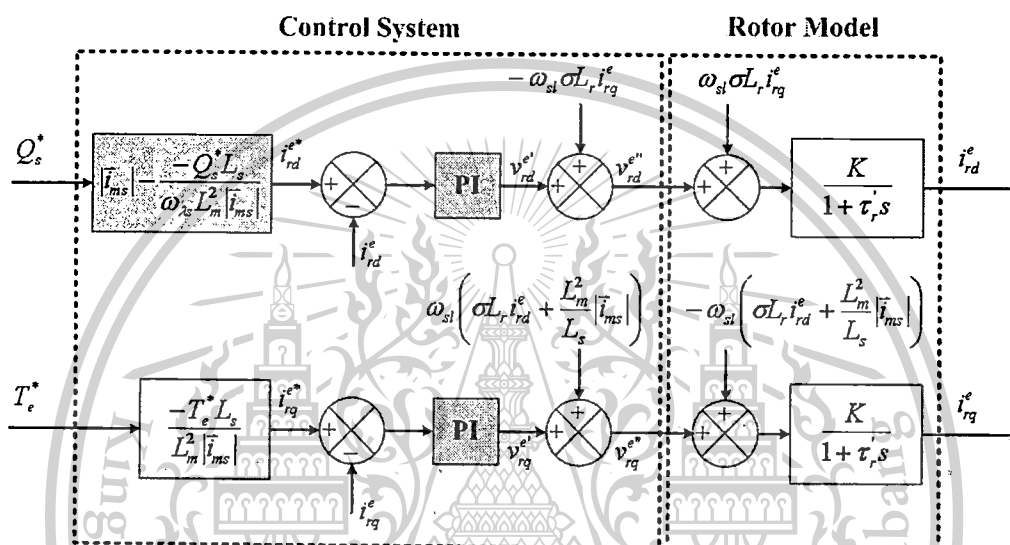
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะพบว่าค่าคงตัวเวลาของระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางภายใต้การควบคุมกระแสโรเตอร์ด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์นั้นจะมีค่าคงตัวเวลาของระบบควบคุมมีค่าเท่ากับ $\tau_r' = \frac{\sigma L_r}{R_r}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าคงตัวเวลาของโรเตอร์

จากสมการที่ 2.18 และ 2.17 เมื่อนำมาแสดงในรูปของบล็อกโคอะแกรมการควบคุมกระแสโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้โคอะแกรมดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยที่ $K = \frac{1}{R_r}$



ภาพที่ 2.5 บล็อกโคอะแกรมการควบคุมกระแสโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน

จากภาพที่ 2.5 จะพบว่ารูปดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นแบบจำลองของโรเตอร์และส่วนควบคุม โดยในส่วนที่เป็นแบบจำลองของโรเตอร์จะพบว่ามีพจน์ที่คัปปลิงระหว่างแกนรวมอยู่ด้วย ซึ่งเมื่อทำการควบคุมโดยการเพิ่มส่วนควบคุมเข้าระบบจะพบว่าการเพิ่มแรงดันขดเซซเข้าที่ขาออกของตัวควบคุมโดยค่าดังกล่าวมีค่าเท่ากับค่าลบของแรงดันคัปปลิงระหว่างแกนในส่วนของแบบจำลองของโรเตอร์ในส่วนของการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้การควบคุมเวกเตอร์ของฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวข้องกับสเตเตอร์นั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการแรงบิดทั่วไปดังแสดงในสมการที่ 2.21

$$T_e = \frac{3}{2} L_m (i_{sq}^e i_{rd}^e - i_{sd}^e i_{rq}^e) \quad (2.21)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโรเตอร์และกระแสสเตเตอร์ในสมการที่ 2.6 และ 2.7 เมื่อทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + L_m \frac{d\vec{i}_r}{dt} + j\omega_e L_s \vec{i}_s + j\omega_e L_m \vec{i}_r \quad (2.24)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 2.24 ใหม่โดยทำการเขียนสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปของกระแสแมกเนไตซ์ซึ่งที่สเตเตอร์ และกระแสโรเตอร์จะได้

$$\vec{v}_s = \frac{R_s}{(1+\sigma_s)} (\vec{i}_{ms} - \vec{i}_r) + L_m \frac{d\vec{i}_{ms}}{dt} + j\omega_e L_m \vec{i}_{ms} \quad (2.25)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ 2.25 ให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 จะได้

$$\tau_s \frac{d\vec{i}_{ms}}{dt} + \vec{i}_{ms} (1 + j\omega_e \tau_s \vec{i}_{ms}) = \frac{(1+\sigma_s)}{R_s} \vec{v}_s + \vec{i}_r \quad (2.26)$$

โดยที่ $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$ แทนค่าคงตัวของสเตเตอร์ σ_s แทนค่าตัวประกอบรั่วไหลที่สเตเตอร์

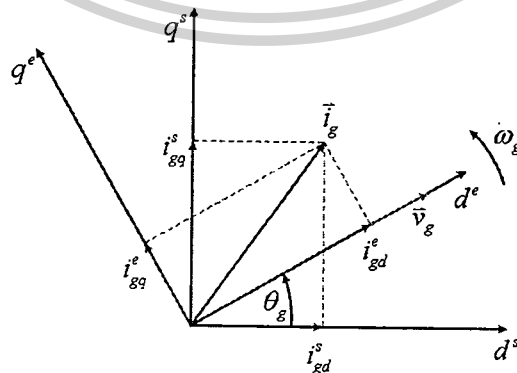
จากสมการที่ 2.26 เมื่อทำการแยกสมการดังกล่าวออกเป็นสมการสเกลาร์ในแนวแกน d และแนวแกน q จะได้ผลดังสมการที่ 2.27 และ 2.28

$$\tau_s \frac{d|\vec{i}_{ms}|}{dt} + |\vec{i}_{ms}| = \frac{(1+\sigma_s)}{R_s} v_{sd}^e + i_{rd}^e \quad (2.27)$$

$$\tau_s \omega_e |\vec{i}_{ms}| = \frac{(1+\sigma_s)}{R_s} v_{sq}^e + i_{rq}^e \quad (2.28)$$

2.1.3 การควบคุมเวกเตอร์ของแรงดันกริดสำหรับกระแสของคอนเวอร์เตอร์ฟักริด

คอนเวอร์เตอร์ฟักริดจะถูกใช้สำหรับการรักษาระดับแรงดันไฟตรงให้มีค่าคงที่ โดยการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้นั้นจะอาศัยการควบคุมเวกเตอร์แรงดันของกริดเพื่อควบคุมกระแสของคอนเวอร์เตอร์ โดยไดอะแกรมเวกเตอร์ของการควบคุมชนิดนี้เป็นไปดังแสดงในภาพที่ 2.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยการควบคุมโดยวิธีดังกล่าวนี้จะต้องอาศัยกรอบอ้างอิงชื่อว่า กรอบอ้างอิงของแรงดันกริด โดยมีแกน d อยู่ในทิศทางเดียวกับเวกเตอร์ของแรงดันกริดดังแสดงในภาพที่ 2.7 เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ดังกล่าวในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งจะได้

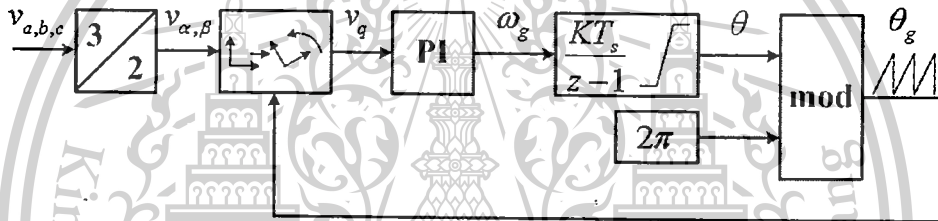
$$\vec{v}_g = v_{gd}^s + jv_{gq}^s = |\vec{v}_g| e^{j\theta_g} \quad (2.27)$$

โดยที่ θ_g แทนค่ามุมระหว่างกรอบอ้างอิงแรงดันกริดและกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

ในการคำนวณค่าความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.28

$$\omega_g = \frac{d\theta_g}{dt} \quad (2.28)$$

ในทางปฏิบัตินั้นค่า θ_g และ ω_g สามารถประมาณค่าได้จากการใช้เฟสล็อกคูลูซึ่งมีรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ไคอะแกรมการประมาณค่ามุมและความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงแรงดันกริดโดยใช้เฟสล็อกคูลูชนิดสามเฟส

เมื่อพิจารณาสมการแรงดันสำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวนี้มีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 2.29

$$\vec{v}_g = R_f \vec{i}_{conv} + L_f \frac{d\vec{i}_{conv}}{dt} + \vec{v}_{conv} \quad (2.29)$$

โดยที่ \vec{v}_g แทนเวกเตอร์ของแรงดันกริด, \vec{v}_{conv} แทนเวกเตอร์ของแรงดันคอนเวอร์เตอร์, \vec{i}_{conv} แทนเวกเตอร์ของกระแสคอนเวอร์เตอร์ R_f แทนค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ และ L_f แทนค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการแรงดันที่ 2.29 เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงเวกเตอร์ของแรงดันกริดจะได้สมการดังแสดงในสมการที่ 2.30

$$\vec{v}_g = R_f \vec{i}_{conv} + L_f \frac{d\vec{i}_{conv}}{dt} + j\omega_g L_f \vec{i}_{conv} + \vec{v}_{conv} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการที่ 2.30 เมื่อทำการแยกออกเป็นสมการแรงดันในแต่ละแนวแกนและเขียนแสดงในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 จะได้สมการกระแสในรูปของสมการที่ 2.31 และ 2.32 ตามลำดับ

$$-\left(\tau_f \frac{di_{convd}}{dt} + i_{convd}\right) = \frac{v_{convd}}{R_f} - \frac{v_{gd}}{R_f} - \omega_g \tau_f i_{convq} \tag{2.31}$$

$$-\left(\tau_f \frac{di_{convq}}{dt} + i_{convq}\right) = \frac{v_{convq}}{R_f} + \omega_g \tau_f i_{convd} \tag{2.32}$$

โดยที่ $\tau_f = L_f/R_f$ แทนค่าคงตัวเวลาของตัวเหนี่ยวนำ

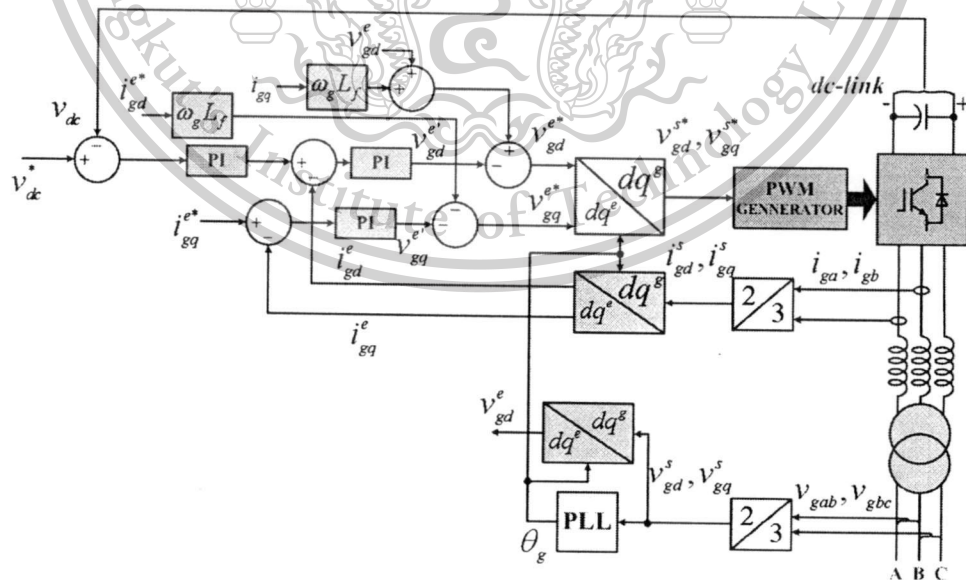
เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.31 และ 2.32 ให้อยู่ในรูปของสมการแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์โดยทำการคูณค่า R_f ตลอดทั้งสมการจะได้ว่าส่วนที่มีการคัปปลิงในแกน d และแกน q เป็นค่า $-v_{gd} - \omega_g L_f i_{convq}$ และ $\omega_g L_f i_{convd}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะต้องถูกชดเชยโดยการเพิ่มค่าลบของค่าดังกล่าวลงในตัวควบคุมคือ $v_{gd} + \omega_g L_f i_{convq}$ และ $-\omega_g L_f i_{convd}$ ดังนั้นจะได้สมการแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.33 และ 2.34 ตามลำดับ

$$v_{convd} = -v_{gd}^* + (v_{gd} + \omega_g L_f i_{convq}) \tag{2.33}$$

$$v_{convq} = -v_{gq}^* - \omega_g L_f i_{convd} \tag{2.34}$$

โดยที่ $v_{gd}^* = R_f i_{convd}^* + L_f \frac{di_{convd}^*}{dt}$ และ $v_{gq}^* = R_f i_{convq}^* + L_f \frac{di_{convq}^*}{dt}$ ตามลำดับ

จากการแสดงที่มาของสมการต่างๆ สำหรับการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟังกกริดข้างต้นจะได้ไออะแกรมการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟังกกริดด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์แรงดันกริดดังแสดงในภาพที่ 2.9



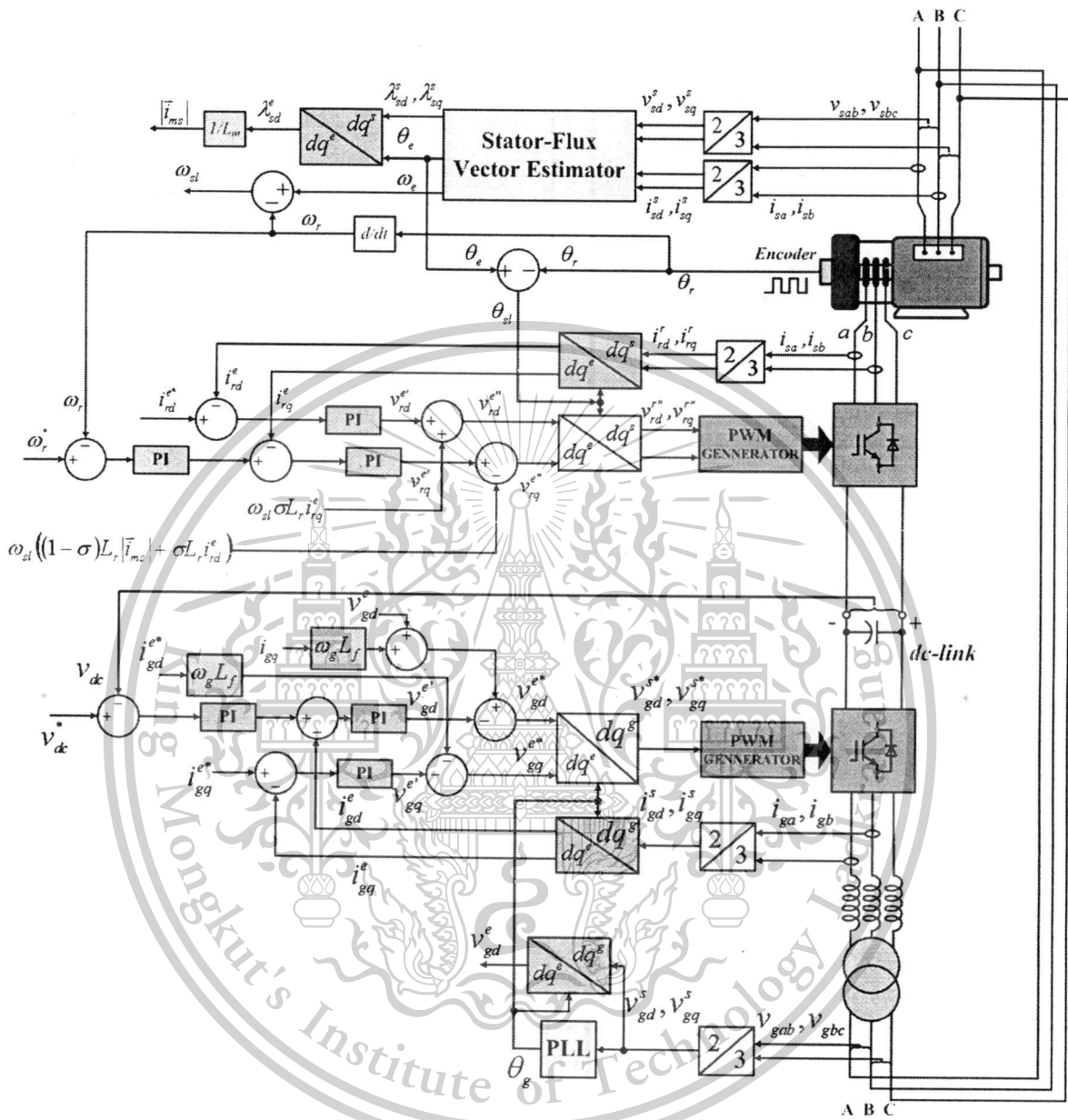
ภาพที่ 2.9 ไออะแกรมการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฟังกกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการรวมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งกริดเข้ากับคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันเป็นระบบเต็ม จะได้โคแอสแกรมการควบคุมดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 โคแอสแกรมการควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางเต็มระบบ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีทางการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ซึ่งทางรัฐบาลก็ได้ให้ความสำคัญในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนเช่นกัน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ในส่วนของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับการประยุกต์ใช้กันมาก คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนกว่า 70% ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

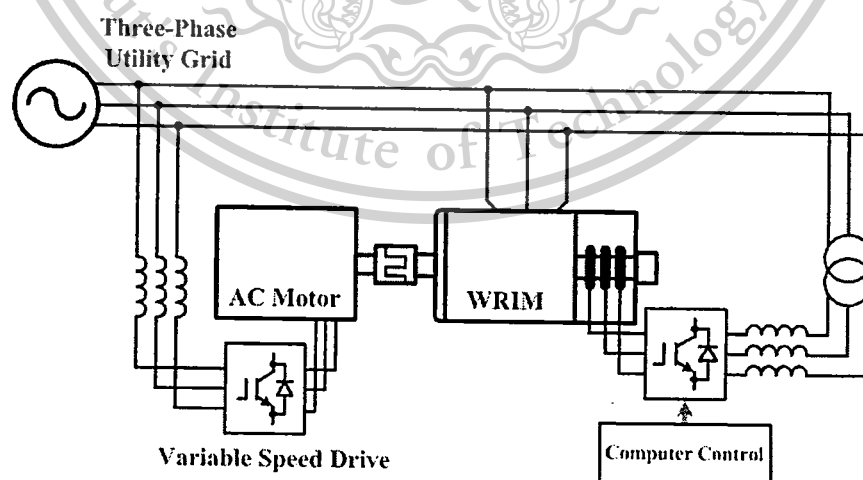
เอกสารนี้ทั้งหมดที่ใช้ในกัณฑ์ฉบับ [1] และในปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (doubly-fed induction generator, DFIG) ซึ่งมีข้อดีคือ ต้องการคอนเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนที่มีพิกัดกำลังต่ำกว่าพิกัดกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [2] และสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วใดๆ โดยไม่จำกัดที่ความเร็วเชิง โครนัส หรือสูงกว่าความเร็วเชิง โครนัส [3, 4]

สำหรับในการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนเช่น พลังงานลม หากทำการก่อสร้างและติดตั้งกังหันลมจริงหรือโรงไฟฟ้าจริงจะเป็นการลงทุนที่สูงมากและอาจไม่สะดวกในการที่จะทำการวิจัยหากต้องมีการเดินทาง เนื่องจากสถานที่ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนส่วนใหญ่จะอยู่ห่างออกไปจากแหล่งชุมชนและตัวเมือง ดังนั้น แนวทางแก้ปัญหาดังกล่าวจึงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองทางคือ การจำลองระบบทางคอมพิวเตอร์ และการจำลองระบบโดยอาศัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการจำลองทางคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียวนั้น ถึงแม้จะมีข้อดีในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่าย แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้นั้นไม่สามารถทำนายพฤติกรรมและปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคสนามได้มากนักเนื่องจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์อาศัยเพียงสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งไม่ได้รวมปัจจัยอื่นๆ ซึ่งไม่สามารถจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ เช่นคุณลักษณะของอุปกรณ์รวมไปถึงรายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างระบบการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นการสร้างระบบทดสอบขนาดเล็กจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงผลลัพธ์ภาคสนามมากที่สุด นอกจากนี้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการยังสามารถที่จำลองสถานะต่างๆที่เป็นไปได้ในภาคสนามได้เช่นกัน ซึ่งรูปแบบของการสร้างระบบจำลองการผลิตไฟฟ้านั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3 โดยจะอาศัยมอเตอร์เป็นเครื่องจักรต้นกำลังสำหรับการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมอเตอร์ดังกล่าวจะถูกควบคุมให้มีคุณลักษณะตามระบบการผลิตไฟฟ้าที่พิจารณา เช่น ถ้าหากว่าเป็นกรณีของกังหันลม มอเตอร์ดังกล่าวก็จะถูกควบคุมให้มีคุณลักษณะเช่นเดียวกับกังหันลม เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 โดอะแกรมการสร้างระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

สองทาง

- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยจากภาพที่ 2.11 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกใช้เป็นตัวกำเนิดและถูกควบคุมและขับเคลื่อนด้วยระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าซึ่งสามารถโปรแกรมให้ทำงานได้ตามความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวกำเนิดมีข้อดีคือราคาที่ถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในห้องปฏิบัติการทางด้านการแปลงพลังงาน นอกจากนี้ยังสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ในส่วนของการควบคุม DFIG นั้นจะส่วนใหญ่จะอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์, หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหรือ คอมพิวเตอร์ในการควบคุม เพื่อให้ DFIG ทำงานได้ตามต้องการ โดยอาศัยวิธีการควบคุมเวกเตอร์ซึ่งจัดว่าเป็นวิธีการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงมาก, เหมาะสมและได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน ซึ่งภายหลังโครงการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ก็จะได้ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางต้นแบบสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า, การควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และสามารถต่อยอดงานวิจัยไปถึงในระดับผลกระทบต่อระบบของการผลิตไฟฟ้าได้

ข้อดีของระบบต้นแบบที่สร้างขึ้นนี้คือ

- ใช้พื้นที่ในการทำการติดตั้งและสร้างระบบต้นแบบที่น้อย
- วัสดุอุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ง่าย
- สามารถนำมาใช้ในการศึกษาการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีต่างๆ และประยุกต์ใช้งานกับต้นกำเนิดสำหรับการผลิตไฟฟ้าอื่นๆ นอกจากลม เช่น กังหันน้ำ กังหันแก๊ส หรือกังหันไอน้ำ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

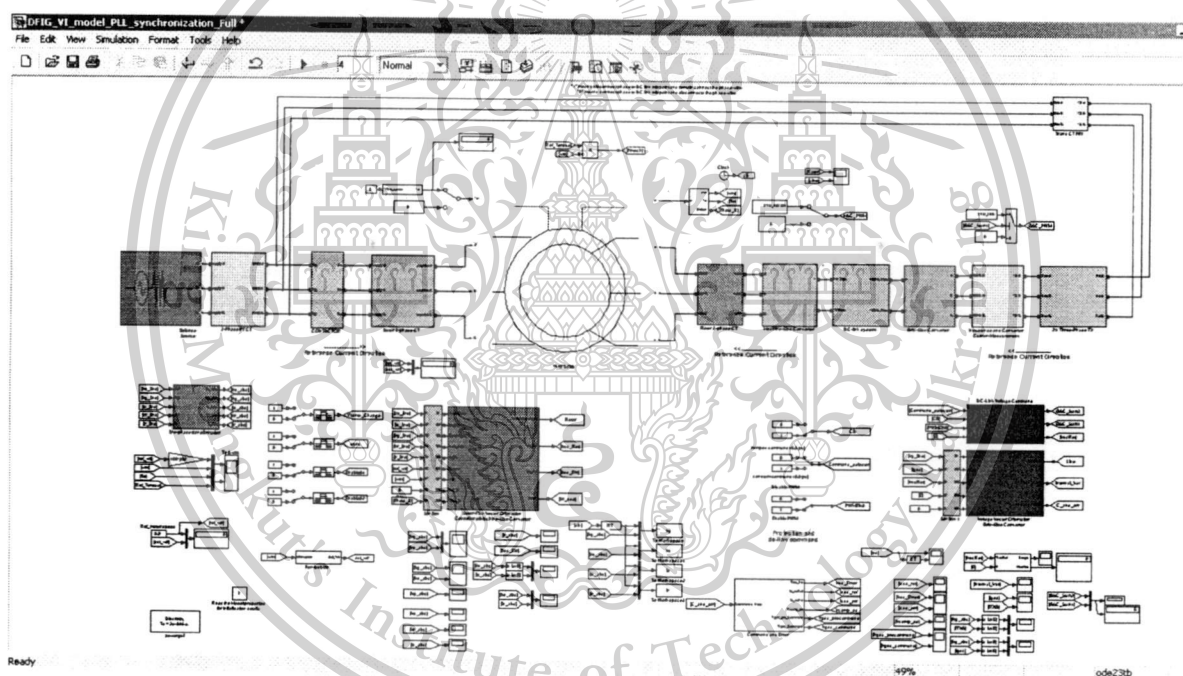
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยทางผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือส่วนที่เป็นการจำลองทางคอมพิวเตอร์และควบคุมระบบจริง ซึ่งในการวิจัยนั้นจะทำการจำลองระบบในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ก่อนเพื่อทำการจำลองการทำงานและออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อได้ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์แล้วจึงนำอัลกอริทึมที่ได้มาใช้ในการควบคุมระบบจริง

3.1 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยมีรูปแบบของแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

3.2 การทำการทดสอบระบบจริง

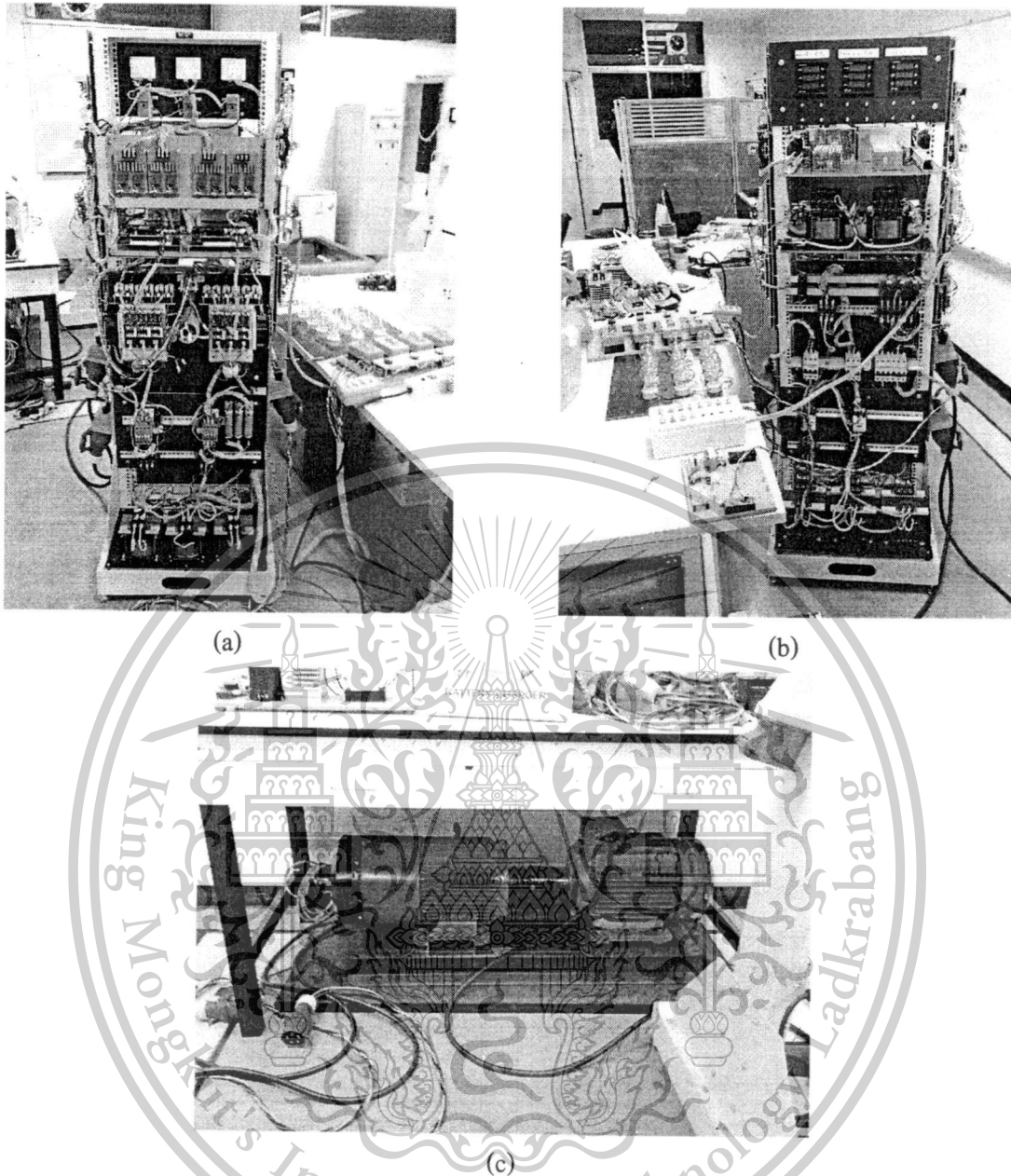
ในการทำการทดสอบกับระบบจริงนั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างระบบสำหรับการจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยระบบนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่ 1. ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและต้นกำลัง 2. ส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ 3. ส่วนควบคุมมอเตอร์

เหนี่ยวนำสำหรับการทำงานเป็นต้นกำลังให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง โดยส่วนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำมาเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า เป็นวงจรกำลังและส่วนควบคุมได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3.2

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



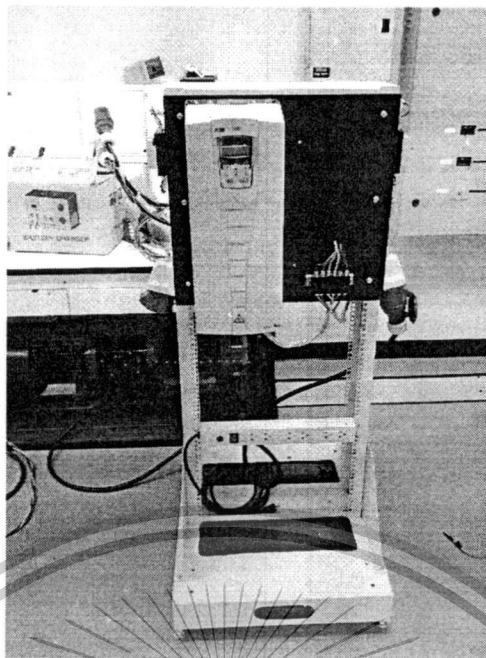
ภาพที่ 3.2 ระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (a) และ (b) ส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง (c) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับทำงานเป็นต้นกำลังให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทาง

ในส่วนของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับทำงานเป็นต้นกำลังนั้น ทางผู้วิจัยได้ใช้ชุดขับเคลื่อนที่มีขายอยู่ทั่วไปสำหรับงานทางอุตสาหกรรมดังแสดงในภาพที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 3.3 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อทำงานเป็น
ต้นกำลังให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดบิโอสองทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

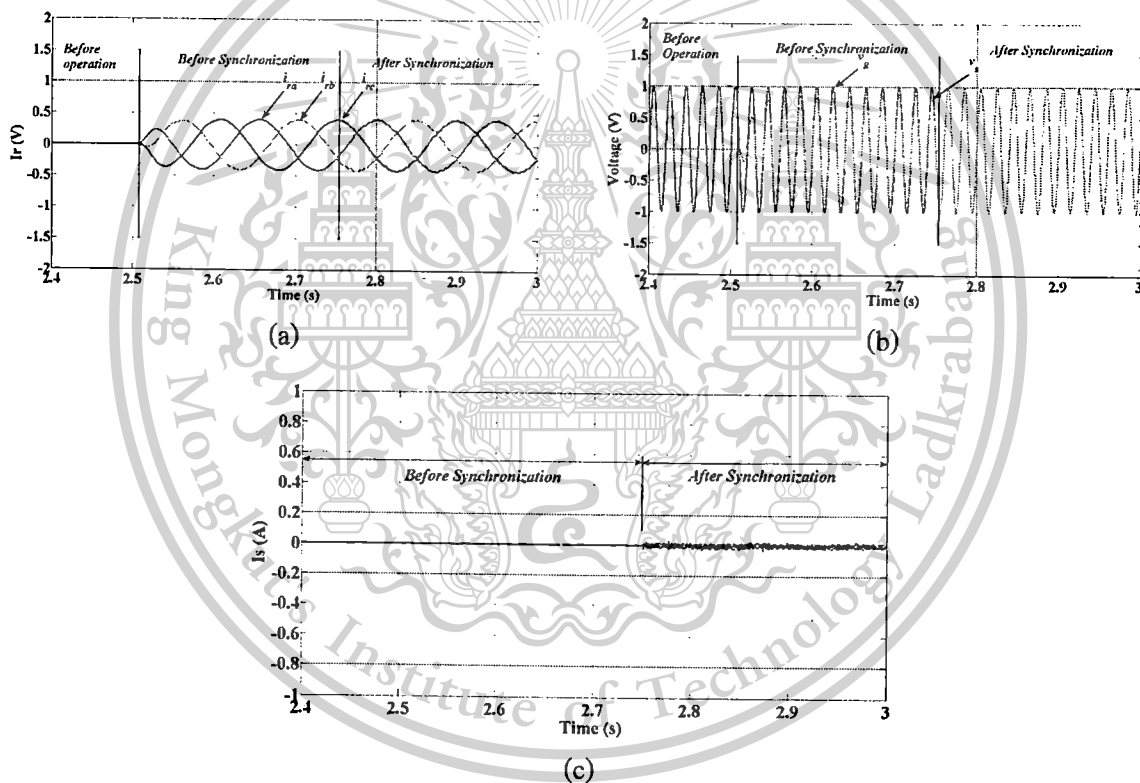
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะทำการจำแนกผลการวิจัยออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจริง

4.1 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

การทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การจำลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและคอนเวอร์เตอร์ฝั่งกริด ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนแรกจะเป็นการจำลองในสถานะที่ทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่น (a) กระแสโรเตอร์ (b) แรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ และ (c) กระแสสเตเตอร์ ภายใต้สถานะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริด

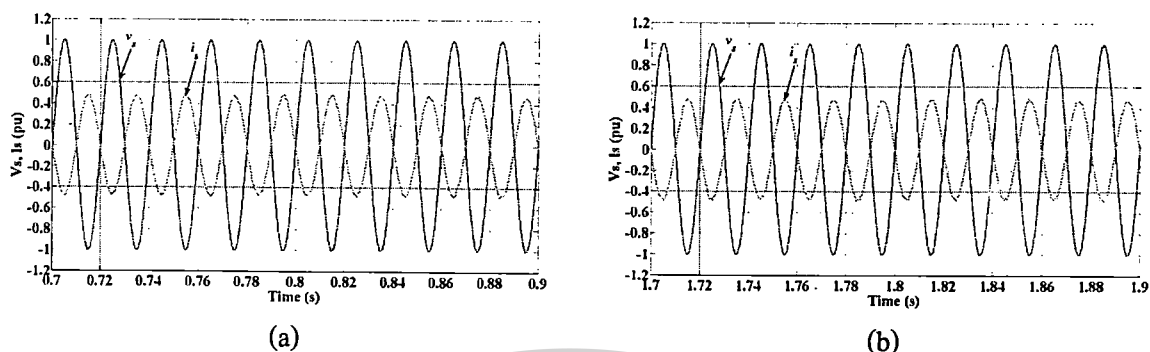
จากภาพจะพบว่าจะไม่เกิดกระแสชวาระหว่างการขนานสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้แรงดันทางด้านสเตเตอร์มีขนาด, ความถี่ และลำดับเฟสตรงกับ แรงดันทางด้านระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

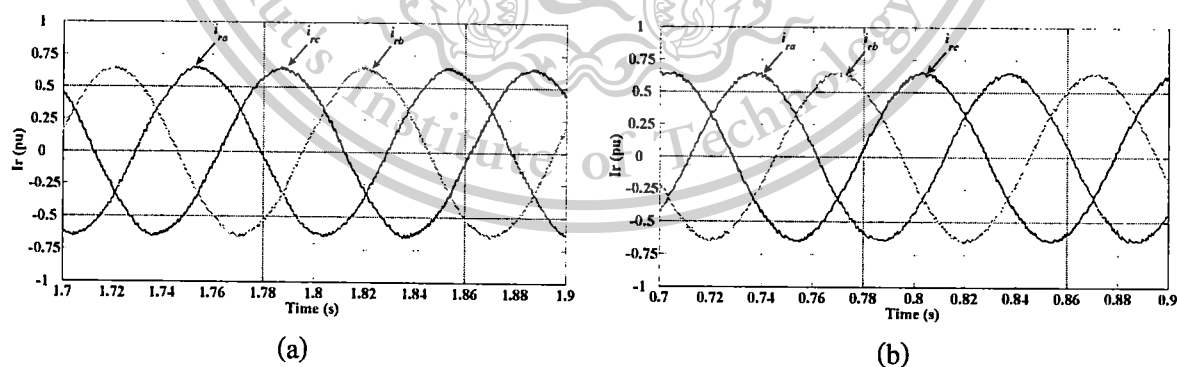
ในส่วนต่อมาเป็นการแสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันทางด้านสเตเตอร์ภายใต้การทำงานที่ย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และย่านความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสสเตเตอร์ในย่าน (a) ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และ (b) ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส

จากภาพจะพบว่าค่ามุมเฟสระหว่างกระแสและแรงดันมีค่าเท่ากับ 180° เนื่องจาก ทิศทางอ้างอิงของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการควบคุมมีทิศทางพุ่งเข้าสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่การทำงานในโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น กระแสจะไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในสภาวะดังกล่าวนี้จะพบว่าทางด้านสเตเตอร์นั้นจะไม่มี การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเสมือนระหว่างระบบไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะได้รับการกระตุ้นจากคอนเวอร์เตอร์ฝั่งโรเตอร์นั่นเอง

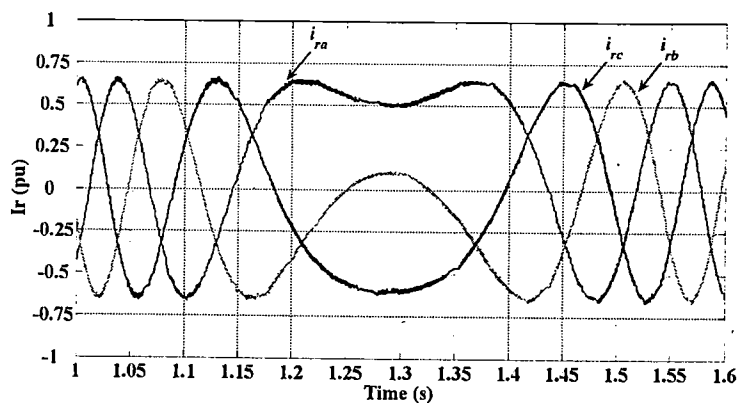
ในส่วนของภาพที่ 4.3 นั้นจะเป็นการแสดงรูปคลื่นกระแส โรเตอร์ภายใต้สภาวะการทำงานที่ย่านความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสดังแสดงในภาพที่ 4.3a และที่ย่านความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสดังแสดงในภาพที่ 4.3b



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

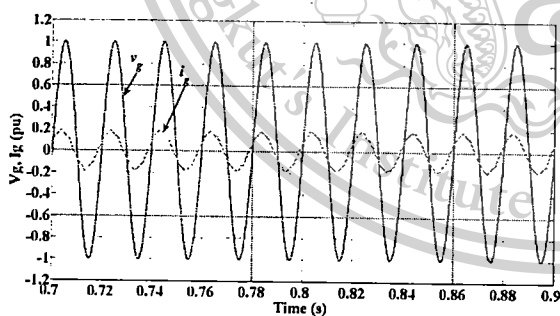


(c)

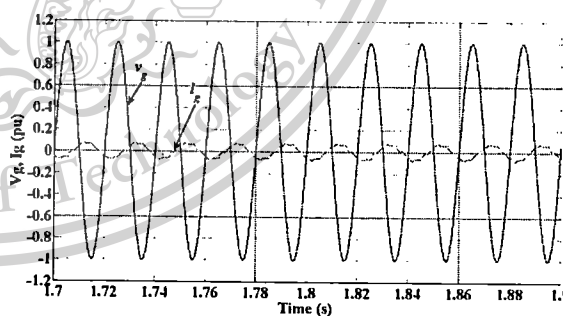
ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่นกระแสโรเตอร์ในย่าน (a) ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (b) ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และ (c) ความเร็วรอบเปลี่ยนจากย่านความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสไปสู่ย่านความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส

จากภาพทั้ง 2 จะพบว่าลำดับเฟสของกระแสโรเตอร์นั้นสลับกัน โดยจะพบว่าเกิดการกลับเฟสของกระแสโรเตอร์เมื่อโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนผ่านความเร็วซิงโครนัสดังแสดงในภาพที่ 4.3c ซึ่งที่ความเร็วซิงโครนัสนี้ ความถี่ของสัญญาณทางไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดจะมีค่าเท่ากับ 0 นั่นเอง

ในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ฟังก์ชันที่แสดงในภาพที่ 4.4 โดยที่ภาพที่ 4.4a เป็นกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งในสภาวะดังกล่าว กำลังไฟฟ้าจะไหลจากระบบไฟฟ้าเข้าสู่โรเตอร์ ซึ่งในย่านความเร็วนี้คอนเวอร์เตอร์ฟังก์ชันจะทำงานในโหมดวงจรเรียงกระแส



(a)



(b)

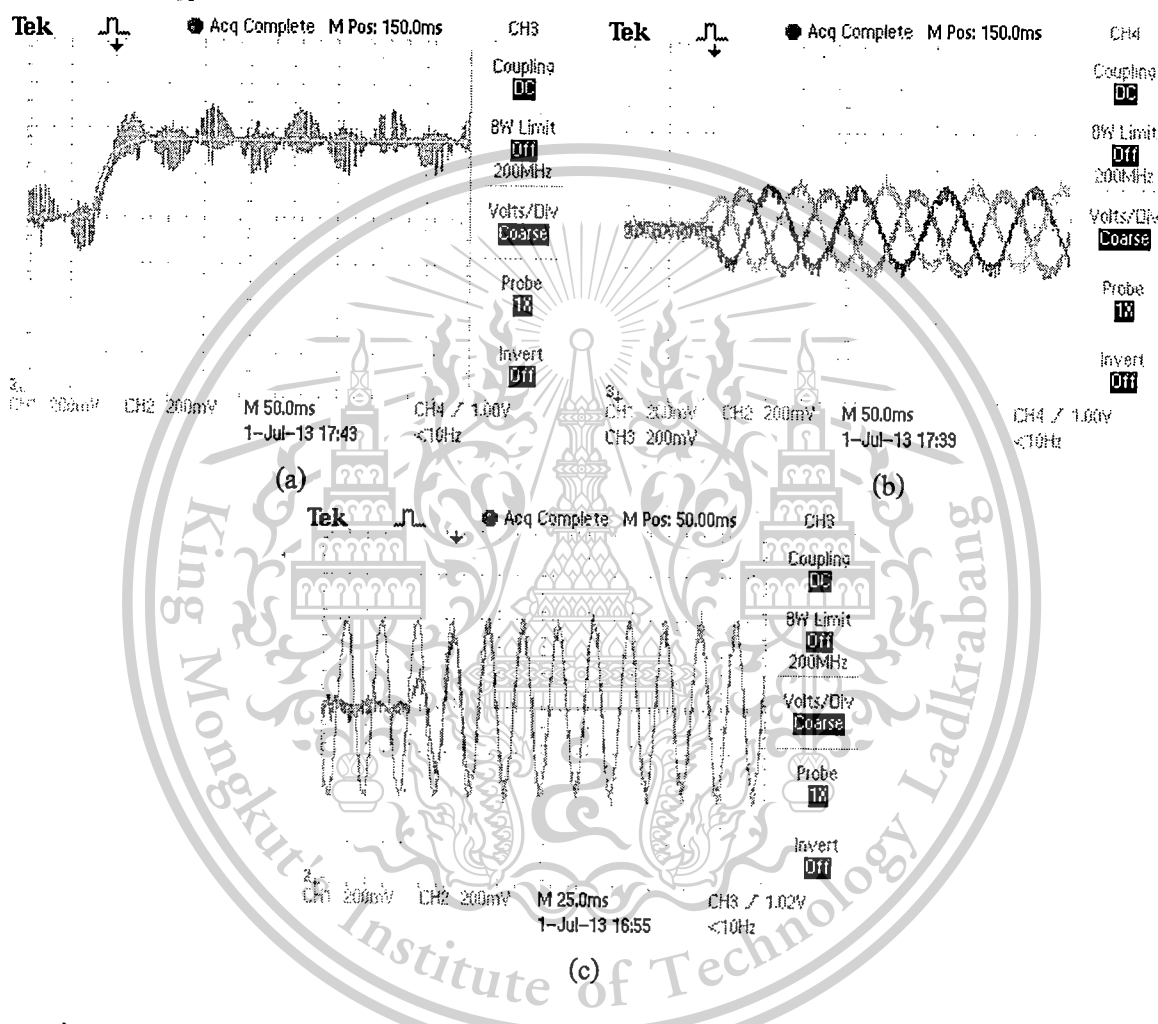
ภาพที่ 4.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสกริดในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมด (a) วงจรเรียงกระแส และ (b) อินเวอร์เตอร์

ตรงกันข้ามกับกรณีของรูปที่ 4.4b ซึ่งเป็นกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งในย่านความเร็วนี้ กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโรเตอร์ผ่านคอนเวอร์เตอร์ไปสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งในย่านความเร็วนี้คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง

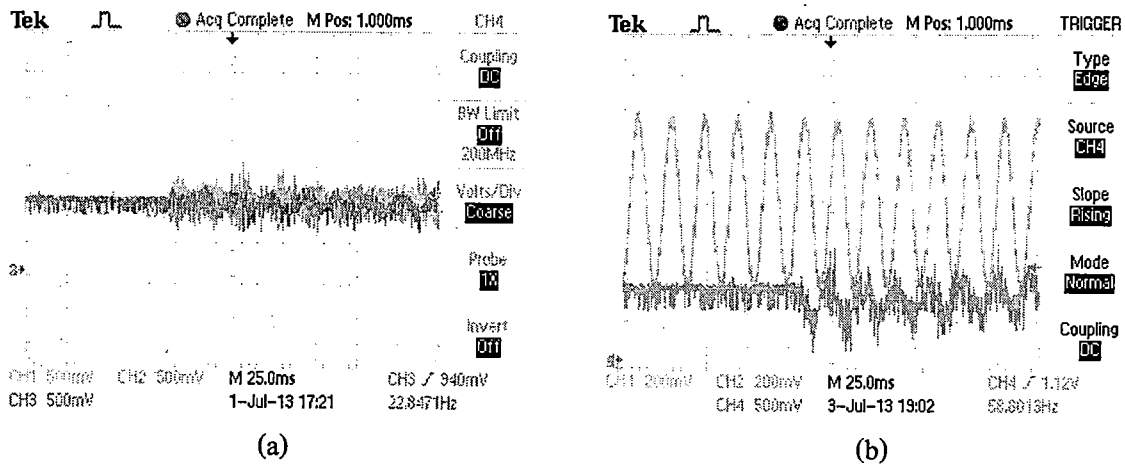
ในส่วนของการทดลองจะเป็นการนำอัลกอริทึมที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ทำงานตามที่ได้จำลองไว้และเป็นการพิสูจน์ถึงความถูกต้องในการออกแบบระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดป้อนสองทางนั่นเอง ในส่วนแรกเป็นการแสดงรูปคลื่นของกระแสโรเตอร์ ภาพที่ 4.5a และ 4.5b และส่วนที่เป็นแรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 4.5c ภายใต้สภาวะเริ่มการทำงานคอนเวอร์เตอร์ฝั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นของ (a) กระแสคำสั่งและกระแสจริงในแนวแกน D (b) กระแสโรเตอร์และ (c) แรงดันกริดและแรงดันสเตเตอร์ ภายใต้สภาวะการเริ่มเดินเครื่องโรเตอร์

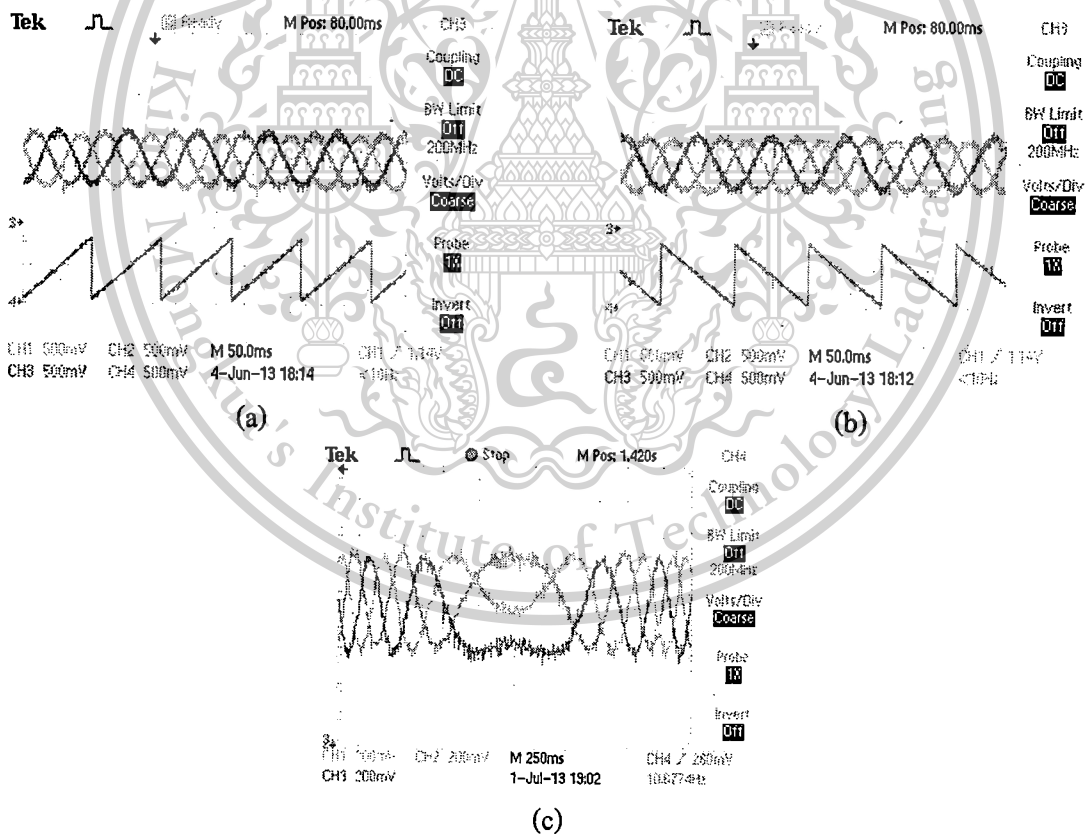
ในส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบซึ่งได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
 Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.6 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่น (a) กระแสเตเตอร์ และ (b) แรงดันกริด, แรงดันสเตเตอร์ และ กระแสเตเตอร์ ภายใต้สภาวะการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

จากผลการทดสอบจะพบว่าไม่มีกระแสกระชากเกิดขึ้น เช่นเดียวกับในกรณีที่ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์นั่นเองภาพที่ 4.7เป็นผลการทดสอบจริงภายใต้สภาวะการทำงานที่ย่านความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสดังแสดงในภาพที่ 4.7a ย่านความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสดังแสดงในภาพที่ 4.7b



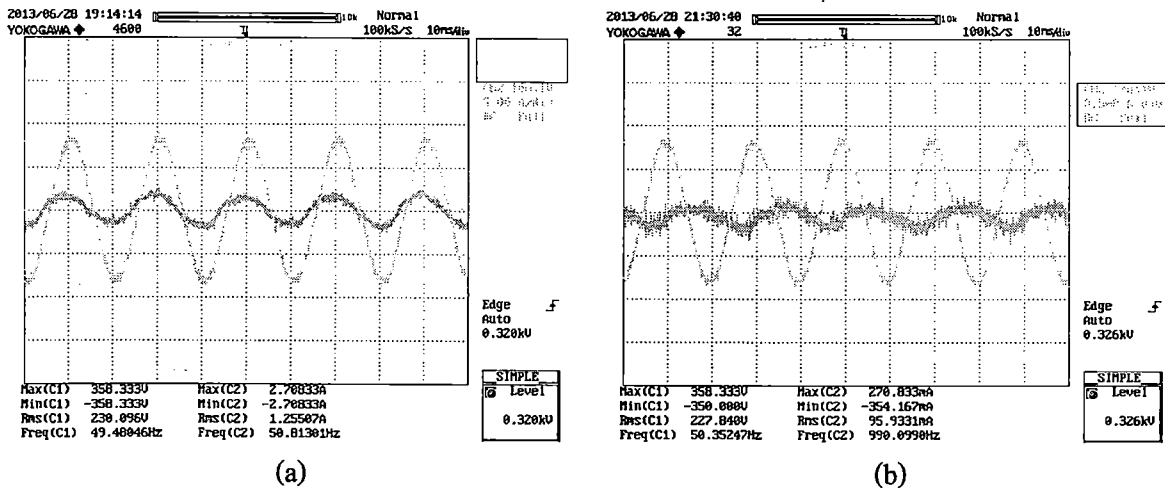
ภาพที่ 4.7 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นกระแส โรเตอร์และมุมสลิปภายใต้สภาวะการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ (a) ความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (b) ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส และ

(c) ย่านความเร็วรอบของ โรเตอร์เปลี่ยนแปลงจากความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสไปสู่ความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบแสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของคอนเวอร์เตอร์ฟังก์ชันภายใต้การทำงานในโหมด (a) วงจรเรียงกระแส (b) อินเวอร์เตอร์



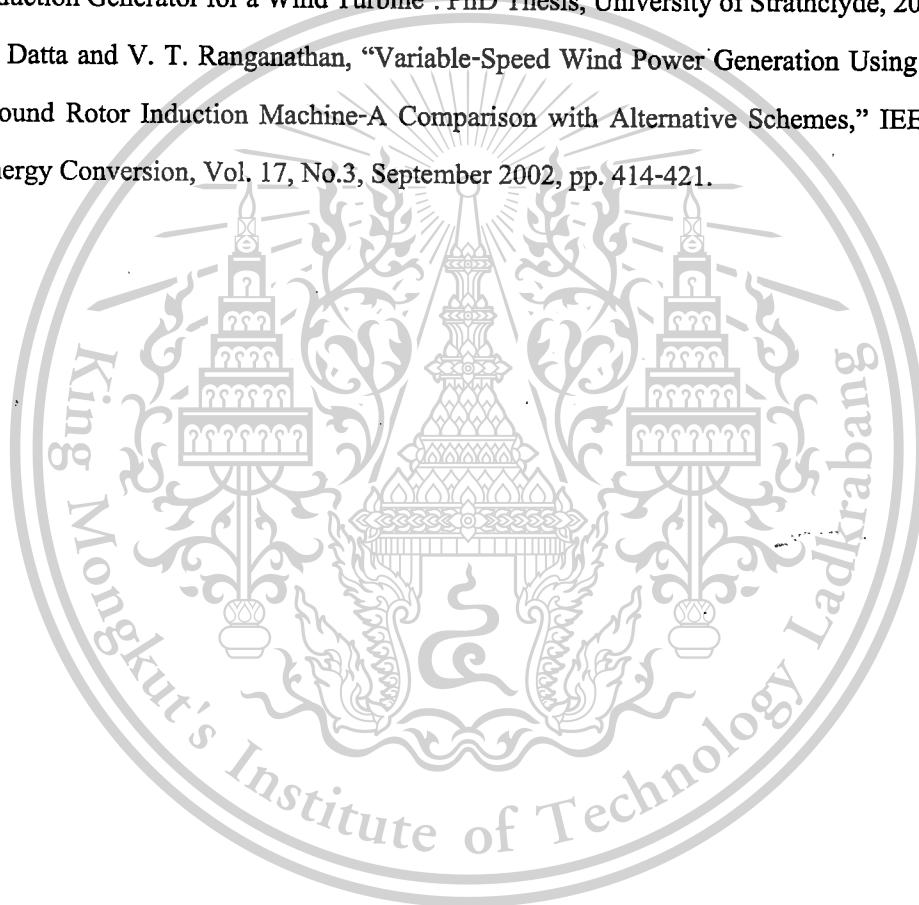
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

1. S. Soter and R. Wegener, "Development of Induction Machines in Wind Power Technology," Proceeding of IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007, pp. 1490-1495.
2. S. Müller, M. Deicke, and Rik W. DE Doncker, "Doubly-Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines A Viable Alternative to Adjust Speed Over a Wide Range at Minimal Cost," IEEE Industry Application Magazine, May/June 2002, pp. 26-33.
3. Warachart Sae-Kok, 'Converter Fault Diagnosis and Post Fault Operation of a Doubly-Fed Induction Generator for a Wind Turbine'. PhD Thesis, University of Strathclyde, 2008.
4. R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison with Alternative Schemes," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No.3, September 2002, pp. 414-421.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย วรชาติ แซ่ก๊ก

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 14 มกราคม 2522 อายุ 34 ปีสถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สจล.	2542
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สจล.	2545
Ph.D.	Electronic and Electrical Engineering	University of Strathclyde	

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) Electrical Machines and Drives, Power Electronics Application

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2552	Best paper award	EECON

การประชุมวิชาการภายในประเทศ

- **W. Sae-Kok and S. Khomfoi**, "An Open Switch Fault Diagnostic Method for an AC to DC Converter Used in Microgrid Applications," in *Proc.33rd Electrical Engineering Conference, Chiangmai, Thailand, 2010* (in English)
- **W. Sae-Kok**, "Simulation and Experimental System of a Doubly-Fed Induction Generator Part 1: Control of an Induction Generator," in *Proc.32nd Electrical Engineering Conference, Prachinburi, Thailand, 2009* (in English) (Best Paper Award)
- **W. Sae-Kok**, "Simulation and Experimental System of a Doubly-Fed Induction Generator Part 2: Control of the Grid-Side Converter," in *Proc.32nd Electrical Engineering Conference, Prachinburi, Thailand, 2009* (in English)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานนี้ ไม่นับเป็นเอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- P. Sarikprueck, **W. Sae-Kok** and P. Lumyong, “Torque-Speed Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motor Using an Acceleration Method,” in *Proc.25th Electrical Engineering Conference, PSU, Thailand, 2002* (in Thai)
- **W. Sae-Kok** and P. Lumyong, “Torque-Speed Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motor Using an Acceleration Method,” in *Proc.24th Electrical Engineering Conference, KMITL, Thailand, 2001* (in Thai)

การประชุมวิชาการนานาชาติ

- Pravit Mart-ro, **Warachart Sae-Kok**, Surin Khomfoi, “Analysis of dv/dt Filter Installation for PWM AC Drive Applications,” In *proc. 9th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, IEEE PEDS 2011, Singapore, December 2011*
- **W. Sae-Kok**, “Application of dynamic braking for DC voltage regulation of a wound rotor induction machine,” *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, vol., no., pp.1-6, 15-18 Nov. 2009
- **W. Sae-Kok** and D M Grant, “Open Switch Fault Diagnosis for a Doubly-Fed Induction Generator,” in *Proc.7th IEEE Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS2007, Thailand*
- **Warachart Sae-Kok** and Douglas M Grant, “TMS320F2812 DSP to Non-Invasive Health Monitoring and Fault Diagnosis for Doubly-Fed Induction Generator Systems,” in *Proc. European DSP Education & Research Symposium, EDERS2006, Munich, Germany*
- **W. Sae-Kok** and P. Lumyong, “Acceleration Test for Small Three-Phase Integral Horsepower Induction Motors—Techniques, Limitation, and Problems of the Test and Interpretation of the Results,” in *Proc.5th IEEE Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS2003, Singapore*
- **Warachart Sae-kok** and Pichit Lumyong, “Characteristics Evaluation of 3 Phase Induction Motor Based on an Acceleration Method with Increasing Moment of Inertia Technique,” in *Proc.4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003, Atlanta, GA, pp. 93-98.*

บทความในวารสารนานาชาติ

- Surin Khomfoi, **Warachart Sae-Kok**, Issarachai Ngamroo, “An Open Circuit Fault Diagnostic Technique in IGBTs for AC to DC Converters Applied in Microgrid Applications,” *Journal of Power Electronics, JPE*, vol.11, No.6, pp. 801-810, November 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- **W. Sae-Kok, D.M. Grant, B.W. Williams, “System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine,” *Renewable Power Generation, IET*, vol.4, no.5, pp.458-470, September 2010**

ทุนวิจัยที่ได้รับ

- Undergraduate student scholarships form EPPO:
Year 2009: 80,000 THB
- Postgraduate student scholarship from EPPO:
Year 2010: 80,000 THB
- Undergraduate student scholarships form EPPO:
Year 2011: 40,000 THB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.