

แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

TIME DOMAIN MODELS FOR FIXED-SPEED
INDUCTION GENERATORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2000-EN-M-020-082

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่

TIME DOMAIN MODELS FOR FIXED-SPEED
INDUCTION GENERATORS



T105089



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...105089
วัน,เดือน,ปี... 16 พ.ย. 2552

b. 12164719
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL 2009-EN-M-020-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TIME DOMAIN MODELS FOR FIXED-SPEED
INDUCTION GENERATORS**



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

2009

KMITL 2009-EN-M-020-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเอกสารฉบับนี้เกี่ยวข้องกับงานวิจัยของตนเอง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่
Thesis Title Time Domain Models for Fixed-Speed Induction Generators
นักศึกษา นายสิริโรจน์ ใจขาน
รหัสประจำตัว 48060264
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-020-032

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิสระชัย	งามหรุ	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
รศ.ดร.สุพัฒน์	กิตติรัตน์สัจจา	
ดร.เอกรินทร์	วาสนาส่ง	
รศ.ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทางเวลาสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ ความเร็วคงที่
นักศึกษา	นายสิโรจน์ ใจงาน
รหัสประจำตัว	48060264
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองพลวัตทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลองสมการลำดับที่ 3 แบบจำลองทั้งสองได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนของกรณีศึกษาสถานะชั่วคราวได้ทำการจำลองการลัดวงจร 3 เฟสและการต่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 ให้ผลตอบสนองชั่วคราวที่ดีกว่าและเหมาะสมในการใช้เพื่อศึกษาการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้า

Thesis Title	Time domain models for fixed-speed induction generators
Student	Mr. Sirarote Jaikhan
Student ID.	48060264
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn

ABSTRACT

This thesis presents a comparison of time-domain dynamic models used for a fixed-speed induction generator. Two types of the models are developed on the basis of 5th order equations and 3rd order equations. The models are constructed and implemented using MATLAB/Simulink. Case studies are performed with particular consideration on three-phase fault responses and connecting of capacitors at the stator of the induction generator. It is found that the results obtained from 5th order model give more satisfactory transient responses, and should be used as a representation for the induction generator in power system transient studies.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความกรุณาของ รศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษา ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องปฏิบัติการ Electrical Power Applications Research Laboratory (EPRL) ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาของการศึกษา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รัก ครูอาจารย์ที่เคารพ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สิริโรจน์ ใจขาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
บทที่ 2 แบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	7
2.1 สมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	7
2.1.1 สมการแรงดันที่สเตเตอร์.....	8
2.1.2 สมการแรงดันที่โรเตอร์.....	8
2.1.3 สมการฟลักซ์เกี่ยวค้ำ.....	8
2.2 สมการแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	9
2.2.1 ความเป็นมาของกรอบอ้างอิง.....	9
2.2.2 การแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc มายังระบบ 2 เฟส d-q.....	10
2.2.3 สมการแรงดันบนแกน d-q.....	12
2.2.4 สมการฟลักซ์เกี่ยวค้ำบนแกน d-q.....	13
2.2.5 สมการแรงบิดบนแกน d-q.....	15
2.2.6 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงต่างๆ.....	19
2.2.6.1 กรอบอ้างอิงอิสระ.....	19
2.2.6.2 กรอบอ้างอิงสเตเตอร์.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6.3 กรอบอ้างอิงโรเตอร์.....	22
2.2.6.4 กรอบอ้างอิงซิงโครนัส.....	24
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองพลวัตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	27
3.1 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส.....	27
3.2 แบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	29
3.3 สมการลำดับที่ 5 ของแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	30
3.4 สมการลำดับที่ 3 ของแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	30
3.5 การสร้างแบบจำลองพลวัตโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....	31
3.5.1 การแปลงแรงดันจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบแกน d-q.....	32
3.5.2 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน q.....	34
3.5.2.1 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์.....	34
3.5.2.2 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน q ที่โรเตอร์.....	35
3.5.3 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน d.....	36
3.5.3.1 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์.....	36
3.5.3.2 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน d ที่โรเตอร์.....	37
3.5.4 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน o ที่สเตเตอร์.....	39
3.5.5 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์.....	39
3.5.6 การแปลงกระแสจากระบบแกน d-q กลับไปยังระบบ 3 เฟส abc.....	40
3.5.7 การสร้างแบบจำลองสมการลำดับที่ 3.....	41
3.5.7.1 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์.....	41
3.5.7.2 พลังค์์เกี่ยวข้องลิ่งและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์.....	42
บทที่ 4 การทดสอบแบบจำลอง.....	44
4.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
4.2 การทดสอบแบบจำลอง.....	45
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด.....	45
4.2.2 การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 การลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	47
4.2.4 การต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	48
4.2.5 การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	49
4.2.6 การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....	49
4.2.7 การลัดวงจรในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่.....	50
4.3 ผลการทดสอบแบบจำลอง.....	50
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด.....	50
4.3.2 การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	52
4.3.3 การลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	55
4.3.4 การต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	57
4.3.5 การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	60
4.3.6 การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....	62
4.3.7 การลัดวงจรในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่.....	65
4.4 สรุปผลการทดสอบ.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงอิสระ.....	16
2.2 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงอิสระในรูปของ ψ และ x	18
4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	44
4.2 ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสายไฟและหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.3 ตารางเปรียบเทียบความถี่ของการแกว่ง.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การวางขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....7
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 3 เฟส abc กับปริมาณ 2 เฟส d-q.....11
2.3	วงจรมุมลวดทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงอิสระของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....15
2.4	วงจรมุมลวดทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....21
2.5	วงจรมุมลวดทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....23
2.6	วงจรมุมลวดทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....25
3.1	สถานะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....29
3.2	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink.....31
3.3	การต่อขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์.....32
3.4	การแปลงแรงดันจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบแกน d-q.....33
3.5	พลาซซ์เกี่ยวกับคล็องและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์และโรเตอร์.....36
3.6	พลาซซ์เกี่ยวกับคล็องและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์และโรเตอร์.....38
3.7	พลาซซ์เกี่ยวกับคล็องและกระแสบนแกน o ที่สเตเตอร์.....39
3.8	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์.....40
3.9	การแปลงกระแสจากระบบแกน d-q กลับไปยังระบบ 3 เฟส abc.....40
3.10	พลาซซ์เกี่ยวกับคล็องและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ของสมการลำดับที่ 3.....42
3.11	พลาซซ์เกี่ยวกับคล็องและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ของสมการลำดับที่ 3.....43
4.1	ระบบที่ใช้ในการทดสอบ.....44
4.2	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด.....45
4.3	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....46
4.4	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....47
4.5	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการต่อตัวเก็บประจุที่สเตเตอร์.....48
4.6	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ยับสอนันต์.....49
4.7	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะที่ยับสอนันต์.....49
4.8	ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเกิดการลัดวงจรของระบบที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่.....50
4.9	กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์.....50
4.10	กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์.....51
4.11	กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์.....51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์.....	51
4.13 ความเร็วโรเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์.....	52
4.14 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	52
4.15 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	52
4.16 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	53
4.17 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	53
4.18 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	53
4.19 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	54
4.20 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	54
4.21 ความเร็วโรเตอร์ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์.....	54
4.22 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	55
4.23 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	55
4.24 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	55
4.25 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	56
4.26 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	56
4.27 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	56
4.28 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	57
4.29 ความเร็วโรเตอร์ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์.....	57
4.30 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	57
4.31 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	58
4.32 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	58
4.33 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	58
4.34 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	59
4.35 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์.....	59
4.36 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	60
4.37 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	60
4.38 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	60
4.39 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40	กระแสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....61
4.41	กระแสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....61
4.42	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....62
4.43	ความเร็วโรเตอร์ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....62
4.44	แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....62
4.45	แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....63
4.46	แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....63
4.47	กระแสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....63
4.48	กระแสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....64
4.49	กระแสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....64
4.50	แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....64
4.51	ความเร็วโรเตอร์ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ.....65
4.52	แรงดันสเตเตอร์เฟส A (ไม่มีตัวเก็บประจุ).....65
4.53	แรงดันสเตเตอร์เฟส A (มีตัวเก็บประจุ).....65
4.54	แรงดันสเตเตอร์เฟส B (ไม่มีตัวเก็บประจุ).....66
4.55	แรงดันสเตเตอร์เฟส B (มีตัวเก็บประจุ).....66
4.56	แรงดันสเตเตอร์เฟส C (ไม่มีตัวเก็บประจุ).....66
4.57	แรงดันสเตเตอร์เฟส C (มีตัวเก็บประจุ).....67
4.58	กระแสเตเตอร์เฟส A (ไม่มีตัวเก็บประจุ).....67
4.59	กระแสเตเตอร์เฟส A (มีตัวเก็บประจุ).....67
4.60	กระแสเตเตอร์เฟส B (ไม่มีตัวเก็บประจุ).....68
4.61	กระแสเตเตอร์เฟส B (มีตัวเก็บประจุ).....68
4.62	กระแสเตเตอร์เฟส C (ไม่มีตัวเก็บประจุ).....68
4.63	กระแสเตเตอร์เฟส C (มีตัวเก็บประจุ).....69
5.1	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานในโหมดกระตุ้นด้วยตัวเอง.....73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วอยู่ตัว [2] วิเคราะห์ถึงค่าของตัวแปรที่มีผลกับความถูกต้องของแบบจำลองลำดับที่ 3 เมื่อเทียบกับแบบจำลองลำดับที่ 5 [3] เปรียบเทียบถึงวิธีการอื่นๆ ในการลดลำดับของแบบจำลอง [4] แสดงให้เห็นว่าในการนำแบบจำลองลำดับที่ 3 ไปทดสอบในสถานะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแยกตัวออกจากระบบที่ต่ออยู่ ผลลัพธ์ที่ได้จากขนาดของแรงดันสเตรเตอร์ไม่สามารถนำไปใช้ในการศึกษาได้ [5] สร้างแบบจำลองกลุ่มมอเตอร์ด้วยสมการลำดับที่ 5 และ 3 จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกันที่สถานะแรงดันตก [6] นำเสนอวิธีการใหม่ในการลดลำดับสมการของแบบจำลอง [7,8,9] สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทาง (double-fed induction generator) ด้วยสมการลำดับที่ 3 จากนั้นนำแบบจำลองไปทดสอบที่สถานะชั่วคราว [10] สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ด้วยสมการสเปซเวกเตอร์ จากนั้นนำไปลดลำดับของสมการที่ใช้ในการสร้างลงเป็นสมการลำดับที่ 3 แล้วนำไปทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 จะเห็นได้ว่างานวิจัยช่วงหลัง [7,8,9] ได้นำเอาแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางที่ลดลำดับของสมการแล้วไปใช้ในการวิเคราะห์ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า และ [10] ได้นำวิธีการลดลำดับของสมการไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ด้วยการใช้สมการสเปซเวกเตอร์

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองพลวัตทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ด้วยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองลำดับที่ 5 ซึ่งมีผลของสถานะชั่วคราวที่สเตรเตอร์รวมอยู่ด้วยและแบบจำลองลำดับที่ 3 ซึ่งไม่มีผลของสถานะชั่วคราวที่สเตรเตอร์ แบบจำลองทั้งสองได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นได้นำแบบจำลองทั้งสองไปทดสอบที่สถานะชั่วคราวคือ การเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การลัดวงจรสามเฟสที่สเตรเตอร์ การลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สเตรเตอร์ การต่อตัวเก็บประจุที่สเตรเตอร์ การเกิดแรงดันตก การเกิดแรงดันเกิน และการลัดวงจรในระบบที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาเพื่อสร้างแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิธีการสร้างแบบจำลองพลวัตทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่
2. นำสมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองพลวัตมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์
3. ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากข้อ 2 เพื่อ

นำไปใช้ในการศึกษาความแตกต่างในสถานะชั่วคราวของทั้ง 2 แบบจำลอง

4. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาต้องมีความเชื่อถือได้และเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลวัต ซึ่งพัฒนาขึ้นมาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะนำผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองมาตรฐานที่มีในโปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้ากำลัง
5. สามารถนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ทางเวลาในสภาวะชั่วคราวของระบบไฟฟ้ากำลังได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการสร้างแบบจำลองทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่เพื่อใช้ในการศึกษาสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้านั้น จะอยู่บนพื้นฐานของการแปลงแกน d-q ซึ่งเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองพลวัตที่ใช้กันทั่วไป โดยในการสร้างนั้นจะใช้สมการลำดับที่ 1 จำนวน 5 สมการหรือเรียกอีกอย่างว่าสมการลำดับที่ 5 จากนั้นสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงให้เหลือสมการลำดับที่ 1 จำนวน 3 สมการหรือเรียกอีกอย่างว่าสมการลำดับที่ 3 โดยสมมติฐานของการศึกษามีดังต่อไปนี้ คือ

1. แบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่พัฒนาขึ้นมาสามารถนำไปวิเคราะห์บนแกนเวลา เพื่อนำไปศึกษาสภาวะชั่วคราวที่อาจเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าได้
2. ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวทางด้านสเตเตอร์ของแบบจำลองลำดับที่ 5 ควรจะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าผลจากแบบจำลองลำดับที่ 3 เพราะแบบจำลองลำดับที่ 3 ไม่มีปัจจัยที่ทำให้เกิดสภาวะชั่วคราวที่สเตเตอร์
3. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นควรมีความถูกต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองมาตรฐานที่มีใช้กันทั่วไปเช่น โปรแกรม PSCAD/EMTDC

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาและพัฒนาการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันได้มีมาอย่างต่อเนื่อง แนวคิดต่างๆของวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำมาจากงานวิจัยที่ผ่านมา ก่อนหน้านี้ คือ

ปี พ.ศ. 2519 (ค.ศ. 1976) K.P.R. Sastry และ R.E. Burridge [1] นำเสนอแบบจำลองสมการอย่างเต็ม (complete model) และแบบจำลองสมการอย่างง่าย (simplified model) จากนั้นได้นำแบบจำลองทั้งสองไปเปรียบเทียบที่สภาวะแรงดันตกโดยให้ความถี่คงที่ สภาวะแรงดันคงที่แต่เปลี่ยนแปลงความถี่และการเร่งจากหยุดนิ่งจนกระทั่งถึงความเร็วในสถานะอยู่ตัว

ปี พ.ศ. 2522 (ค.ศ. 1979) T.L. Skvarenina และ P.C. Krause [2] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองที่ถูกลดลำดับลงมา(แบบจำลองสมการลำดับที่ 3) เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ยังไม่ได้ถูกลดลำดับของสมการ (แบบจำลองสมการลำดับที่ 5) โดยการเปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆจากพิกัดแรงม้าค่าที่ 3 hp ไปจนถึงพิกัดแรงม้าสูงที่ 6000 hp

ปี พ.ศ. 2528 (ค.ศ. 1985) O. Wasynczuk, Yi-Min Diao และ P.C. Krause [3] ได้เปรียบเทียบให้เห็นถึงวิธีการลดลำดับของแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวิธีต่างๆของแบบจำลองลำดับที่ 5 โดยวิธีที่ 1 เป็นการลดลำดับของสมการที่ใช้กันทั่วไปคือ กำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เกี่ยวกับที่สเตเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ วิธีที่ 2 ใช้วิธีการคล้ายกับวิธีแรกแต่ต่างกันที่รายละเอียดของสมการ วิธีสุดท้ายคือ ตัดส่วนประกอบบางส่วนออกจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เกี่ยวกับที่สเตเตอร์แทนการตัดออกทั้งหมดเหมือนกับวิธีที่ 1

ปี พ.ศ. 2530 (ค.ศ. 1987) P.C. Krause, F.D. Rodriguez, O. Wasynczuk และ D.A. Mojica [4] ได้แสดงให้เห็นว่าในการนำแบบจำลองลำดับที่ 3 ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ไปทดสอบกับสถานะแยกตัวออกจากระบบที่ต่ออยู่ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองด้วยสมการลำดับที่ 3 นั้นไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการศึกษาขนาดของแรงดันสเตเตอร์ และยังได้เสนอวิธีการแก้ไขด้วย

ปี พ.ศ. 2537 (ค.ศ. 1994) T.Y.J. Lem และ R.T.H. Alden [5] ได้สร้างแบบจำลองของกลุ่มมอเตอร์ด้วยสมการลำดับที่ 5 และสมการลำดับที่ 3 จากนั้นนำแบบจำลองทั้งสองไปทดสอบที่สถานะแรงดันตก และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลที่วัดจริง

ปี พ.ศ. 2538 (ค.ศ. 1995) P.A. Dahono และ Qamaruzzaman [6] นำเสนอการลดลำดับของแบบจำลองลงซึ่งจากเดิมที่ไม่คิดผลของสถานะชั่วคราวที่สเตเตอร์ มาเป็น ไม่คิดผลของสถานะชั่วคราวของความเหนี่ยวนำรั่ว จากนั้นนำแบบจำลองไปทดสอบที่สถานะเริ่มหมุน ลัดวงจรและการเปลี่ยนแปลงโหลด

ปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000) A. Feijoo, J. Cidras และ C. Carrillo [7] ได้ประยุกต์การสร้างแบบจำลองลำดับที่ 3 ไปใช้กับการสร้างแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางและได้นำเสนอสมการอย่างง่ายเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองอีกด้วย

ปี พ.ศ. 2546 (ค.ศ. 2003) J.B. Ekanayake, L. Holdsworth และ N. Jenkins [8] ได้สร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางด้วยสมการลำดับที่ 5 และลำดับที่ 3 จากนั้นได้นำแบบจำลองทั้งสองไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ ที่สถานะเริ่มหมุน สถานะเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกล และการลัดวงจรสามเฟสที่สเตเตอร์

ปี พ.ศ. 2547 (ค.ศ. 2004) P. Ledesma และ J. Usaola [9] นำแบบจำลองของเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นสองทางที่คิดผลของสถานะชั่วคราวที่สเตเตอร์ (สมการลำดับที่ 5) และ ไม่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิดผลของสภาวะชั่วคราวที่สเตรเตอร์ (สมการลำดับที่ 3) ไปทดสอบกับการลัดวงจรสามเฟสที่สภาวะโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสและโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

ปี พ.ศ. 2549 (ค.ศ. 2006) A. Perdana [10] ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยการสร้างจากสมการลำดับที่ 5 ลำดับที่ 3 และลำดับที่ 1 ด้วยการใส่สมการสเปซเวกเตอร์ และยังได้นำแบบจำลองทั้งสามไปทดสอบที่สภาวะการลัดวงจรสามเฟส

วิทยานิพนธ์นี้แนะนำเสนอแบบจำลองพลวัตทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ด้วยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลองสมการลำดับที่ 3 แบบจำลองทั้งสองได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนของกรณีศึกษาสภาวะชั่วคราวได้ทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การลัดวงจรสามเฟสและหนึ่งเฟสที่สเตรเตอร์ การต่อตัวเก็บประจุที่สเตรเตอร์ การเกิดแรงดันตก การเกิดแรงดันเกิน และการลัดวงจรในระบบที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้แนะนำเสนอการสร้างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และสมการลำดับที่ 3 ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ โดยจะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลอง สมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทั้งสอง และตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำแบบจำลองทั้งสองไปทดสอบที่สภาวะชั่วคราวและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก โปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น

แบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลองสมการลำดับที่ 3 ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และนำไปทดสอบที่สภาวะชั่วคราวคือการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด แทนการเกิดสภาวะชั่วคราวที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การลัดวงจรสามเฟสและหนึ่งเฟสที่สเตรเตอร์ แทนการเกิดสภาวะชั่วคราวที่วงจรสเตรเตอร์ และการต่อตัวเก็บประจุที่สเตรเตอร์ แทนการเกิดปรากฏการณ์ความถี่สูงที่สเตรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นระบบที่อ้างอิงมาจาก [11] ซึ่งระบบไฟฟ้าประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ต่อผ่านสายไฟ หม้อแปลงและบัสบัสบาร์ โดยในสภาวะทำงานปกติแรงดันสเตรเตอร์สมดุลและต่อแบบสตาร์ ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่จากนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่น การลัดวงจร แรงบิดทางกลที่จ่ายเข้ามาที่โรเตอร์ยังคงมีค่าคงที่ สำหรับความสูญเสียในแกนเหล็กและการอิมตัวไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา ค่าตัวแปรต่างๆมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาทดสอบ สุดท้ายแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำหรือว่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้มีการดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองพลวัตที่ได้มีการนำเสนอก่อนหน้านี้
2. ศึกษาวิธีการลดลำดับของแบบจำลองเพื่อลดความซับซ้อนลง
3. นำสมการที่ได้จากการศึกษามาสร้างเป็นแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. นำแบบจำลองมาทดสอบที่สภาวะชั่วคราวที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้ คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงวิธีการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบ 2 แกน d-q บนกรอบอ้างอิงต่างๆ สมการของตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองพลวัต รวมไปถึงวงจรสมมูลพลวัตที่ได้มาจากการแปลงแกน

บทที่ 3 กล่าวถึงสมการแบบจำลองพลวัตบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสของสมการลำดับที่ 5 และสมการลำดับที่ 3 รวมไปถึงการนำสมการมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

บทที่ 4 กล่าวถึงการนำแบบจำลองทั้งสองที่สร้างขึ้นมาทดสอบในสภาวะชั่วคราวคือ การเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การลัดวงจรสามเฟสที่สเตเตอร์ การลัดวงจรหนึ่งเฟสที่สเตเตอร์ การต่อตัวเก็บประจุที่สเตเตอร์ การเกิดแรงดันตก การเกิดแรงดันเกิน และการลัดวงจรในระบบที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ จากนั้นนำผลที่ได้จากสมการลำดับที่ 5 ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบที่เหมือนกันด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

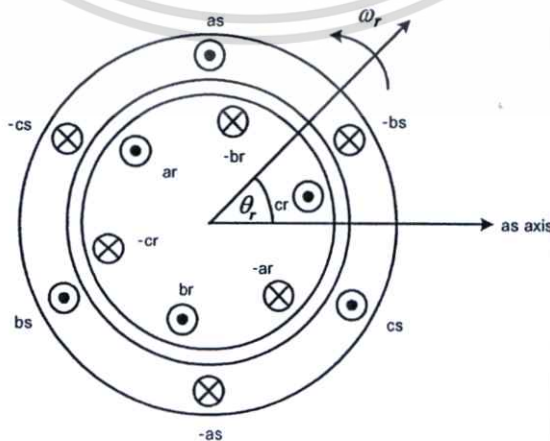
แบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วงจรมุมของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยทั่วไป จะใช้สำหรับวิเคราะห์ปัญหาที่อยู่ในสภาวะอยู่ตัว แต่สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นที่สภาวะชั่วคราว เช่น การเปลี่ยนแปลงของกำลังทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่สเตเตอร์ กระแส และความถี่ หรือแม้กระทั่งเกิดการลัดวงจรขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ วงจรมุมดังกล่าวจะไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เหตุนี้เองจึงได้มีการสร้างแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ที่สภาวะชั่วคราวหรือเรียกอีกอย่างว่าแบบจำลองพลวัต โดยใช้วิธีการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบ 2 เฟสบนแกน d (direct axis) และบนแกน q (quadrature axis) โดยใช้หลักการของการเท่ากันของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (magnetomotive force, mmf) ของทั้งระบบ 3 เฟส abc และระบบ 2 เฟส d-q ทั้งนี้ทั้งนั้นแบบจำลองพลวัตก็ยังสามารถวิเคราะห์ที่สภาวะอยู่ตัวได้อีกด้วย

ในส่วนของทฤษฎีการแปลงแกนยังแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นกรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stator reference frame) กรอบอ้างอิงโรเตอร์ (rotor reference frame) และกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame) โดยทั้ง 4 วิธีนี้จะมีประโยชน์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา

ในบทนี้จะกล่าวถึงการได้มาของสมการคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงอิสระซึ่งกรอบอ้างอิงนี้จะสามารถแปลงไปยังกรอบอ้างอิงอื่นๆได้ และหลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนให้อยู่บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบทต่อไป

2.1 สมการเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.1 การวางขดลวดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ตำแหน่งของขดลวด 3 เฟส abc ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์วางห่างกันแต่ละเฟสเป็นมุม 120 องศาทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.1 จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการแรงดันที่สเตเตอร์และโรเตอร์ในรูปของกระแสลุดกับความต้านทานบวกกับอัตราการผลิตของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องได้ดังต่อไปนี้[12]

2.1.1 สมการแรงดันที่สเตเตอร์

$$v_{as} = i_{as}r_s + p\lambda_{as} \quad (2.1)$$

$$v_{bs} = i_{bs}r_s + p\lambda_{bs} \quad (2.2)$$

$$v_{cs} = i_{cs}r_s + p\lambda_{cs} \quad (2.3)$$

2.1.2 สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$v_{ar} = i_{ar}r_r + p\lambda_{ar} \quad (2.4)$$

$$v_{br} = i_{br}r_r + p\lambda_{br} \quad (2.5)$$

$$v_{cr} = i_{cr}r_r + p\lambda_{cr} \quad (2.6)$$

2.1.3 สมการฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง

ฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องในรูปของผลคูณระหว่างกระแสและความเหนี่ยวนำ

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

โดยที่

$$\lambda_s^{abc} = (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t$$

$$\lambda_r^{abc} = (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t$$

$$i_s^{abc} = (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t$$

$$i_r^{abc} = (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t$$

และ t คือทรานสโพสของเมตริกซ์

ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์ (L_{ss}^{abc}) และความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างโรเตอร์ (L_{rr}^{abc}) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

โดยที่ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ ($L_{sr}^{abc}, L_{rs}^{abc}$) จะขึ้นอยู่กับมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (θ_r) ดังรูปที่ 2.1

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

จะเห็นได้ว่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ในสมการที่ 2.10 จะแปรเปลี่ยนไปตามมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (θ_r) ซึ่งมุมนี้จะแปรตามการหมุนของโรเตอร์ จึงทำให้การวิเคราะห์ในช่วงสภาวะชั่วคราวทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีวิธีสำหรับการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวโดยใช้วิธีการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc มาเป็นระบบ 2 แกน d-q ซึ่งวิธีนี้จะเปลี่ยนความเหนี่ยวนำซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันที่เปลี่ยนตามการหมุนของโรเตอร์มาเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของแกน d-q ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ในช่วงสภาวะชั่วคราวง่ายขึ้น

2.2 สมการแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.2.1 ความเป็นมาของกรอบอ้างอิง[13]

ในช่วงปลายทศวรรษ 1920 R.H. Park ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยทำการเปลี่ยนตัวแปรของแรงดัน กระแสและฟังก์ชันเกี่ยวกับที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ไปเป็นตัวแปรในรูปของขดลวดเสมือนซึ่งหมุนไปพร้อมกับโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลายทศวรรษที่ 1930 H.C. Stanley ได้ทำการแปลงตัวแปรสำหรับขดลวดโรเตอร์ (แรงดัน กระแสและฟลักซ์เกี่ยวกับขดลวด) สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไปเป็นตัวแปรในรูปของขดลวดเสมือนที่หุุดอยู่กับที่ที่สเตเตอร์

ต่อมา G. Kron ได้ทำการแปลงตัวแปรทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไปเป็นตัวแปรในรูปของขดลวดเสมือนที่หมุนด้วยความเร็วเดียวกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน

หลังจากนั้น D.S. Brereton ได้แปลงตัวแปรทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ไปยังขดลวดเสมือนที่ยึดติดกับ โรเตอร์ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ได้นำเอาวิธีของ R.H. Park ซึ่งใช้สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสมาประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

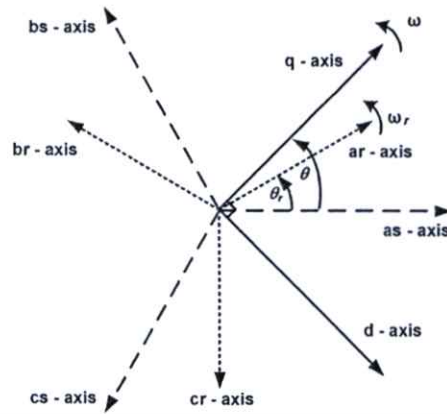
ในที่สุด Park, Stanley, Kron และ Brereton ได้พัฒนาการเปลี่ยนตัวแปรแต่ละแบบให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเฉพาะแต่ละอย่าง ในปี 1965 ได้มีการบันทึกไว้ว่าการที่จะกำจัดค่าความเหนี่ยวนำที่แปรไปตามการหมุนของ โรเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้นั้นสามารถทำได้โดยการแปลงตัวแปรที่สเตเตอร์และโรเตอร์ ไปยังขดลวดเสมือนหรือที่เรียกว่ากรอบอ้างอิง โดยกรอบอ้างอิงจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ หรือแม้กระทั่งหยุดอยู่กับที่ แต่สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะไม่เหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ ค่าความเหนี่ยวนำที่แปรเปลี่ยนตามการหมุนของโรเตอร์จะถูกกำจัดออกในกรณีที่กรอบอ้างอิงถูกยึดติดอยู่กับ โรเตอร์เท่านั้น จากเหตุนี้เองกรอบอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ ก็ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสอีกต่อไป

จากประวัติการแปลงแกนที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าทุกคนมีความพยายามที่จะกำจัดค่าความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนของโรเตอร์ เพื่อให้การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีความง่ายขึ้นนั่นเอง

2.2.2 การแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc มายังระบบ 2 เฟส d-q [12]

สำหรับการสร้างแบบจำลองพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้วิธีการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc มาเป็นระบบ 2 แกน d-q และให้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆ ซึ่งวิธีนี้จะเปลี่ยนความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุนของโรเตอร์มาเป็นความเหนี่ยวนำในรูปของฟลักซ์ที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของแกน d-q ทำให้การวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีความง่ายขึ้น

เราสามารถเขียนสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้อยู่ในรูปของแกน d-q โดยให้แกนดังกล่าวหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมใดๆหรือเรียกอีกอย่างว่ากรอบอ้างอิงอิสระ โดยความสัมพันธ์ระหว่างแกน abc กับแกน d-q แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 และกำหนดให้ ω เป็นความเร็วเชิงมุมในการหมุนของแกน d-q และหมุนในทิศทางเดียวกับโรเตอร์



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 3 เฟส abc กับปริมาณ 2 เฟส d-q

กรอบอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงแกนมาขังระบบ 2 แกน d-q จะมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ โดยเราสามารถกำหนดประเภทของกรอบอ้างอิงได้โดยการกำหนดค่าของ ω ให้มีค่าต่างๆดังนี้

$\omega = \omega$: กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame)

$\omega = 0$: กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame)

$\omega = \omega_r$: กรอบอ้างอิงโรเตอร์ (rotor reference frame)

$\omega = \omega_e$: กรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronously rotating reference frame)

ซึ่งกรอบอ้างอิงแต่ละแบบก็จะมีประโยชน์ในการใช้งานที่แตกต่างกันไป สำหรับปริมาณ 3 เฟส abc สามารถแปลงให้อยู่ในรูปปริมาณ 2 เฟส d-q โดยใช้หลักการของการเท่ากันระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็กของทั้ง 2 ระบบ โดยให้กระแสจากปริมาณ 3 เฟส abc กับกระแสจากปริมาณ 2 เฟส d-q มีค่าเท่ากันและเปลี่ยนจำนวนรอบของขดลวดเพื่อให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กยังคงเท่ากัน สมการที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 3 เฟส abc และปริมาณ 2 เฟส d-q [12]

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_o \end{bmatrix} = [T_{qdo}(\theta)] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยที่ปริมาณ f สามารถเป็นได้ทั้งปริมาณต่อเฟสของแรงดัน กระแส หรือฟลักซ์เกี่ยวคล่องของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเมตริกซ์การแปลงแกน $[T_{qdo}(\theta)]$ มีค่าเท่ากับ

$$[T_{qdo}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

จะเห็นได้ว่าปริมาณ f_o (zero sequence) ในสมการที่ 2.11 ไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุม θ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือไม่ได้ขึ้นอยู่กับกรอบอ้างอิง สาเหตุที่มี f_o ก็เพื่อจะทำให้เมตริกซ์ $[T_{qdo}(\theta)]$ สามารถหาอินเวอร์สได้ และเพื่อที่จะแปลงกลับไปเป็นปริมาณ 3 เฟส abc สำหรับค่าอินเวอร์สของ $[T_{qdo}(\theta)]$ แสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$[T_{qdo}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2.3 สมการแรงดันบนแกน d-q [12]

จากสมการแรงดัน 3 เฟส abc ที่ 2.1-2.3 เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

$$v_s^{abc} = p\lambda_s^{abc} + r_s^{abc}i_s^{abc} \quad (2.14)$$

เปลี่ยนให้เป็นแรงดัน 2 เฟส d-q โดยใช้เมตริกซ์การแปลง $[T_{qdo}(\theta)]$ คูณเข้าทั้งสองข้างของสมการ 2.14 ได้เป็น

$$v_s^{qdo} = [T_{qdo}(\theta)]p[T_{qdo}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)]r_s^{abc}[T_{qdo}(\theta)]^{-1}[i_s^{qdo}] \quad (2.15)$$

โดยที่ $p[T_{qdo}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qdo}]$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} p\theta[\lambda_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)]^{-1}[p\lambda_s^{qdo}] \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำสมการที่ 2.16 ไปแทนในสมการที่ 2.15 จะได้แรงดันที่สเตเตอร์ในรูปของแกน d-q

$$v_s^{qdo} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_s^{qdo} + p\lambda_s^{qdo} + r_s^{qdo} i_s^{qdo} \quad (2.17)$$

โดยที่ $\omega = p\theta$ และ $r_s^{qdo} = r_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (2.18)

ส่วนของแรงดันที่โรเตอร์จะใช้เมตริกซ์ $[T_{qdo}(\theta - \theta_r)]$ ในการแปลงและหาเหมือนกับกับแรงดันที่สเตเตอร์จะได้

$$v_r^{qdo} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_r^{qdo} + p\lambda_r^{qdo} + r_r^{qdo} i_r^{qdo} \quad (2.19)$$

2.2.4 สมการฟลักซ์เกี่ยวข้องกับบนแกน d-q [12]

เราสามารถเปลี่ยนสมการฟลักซ์เกี่ยวกับที่สเตเตอร์ ในสมการที่ 2.7 โดยใช้เมตริกซ์ $[T_{qdo}(\theta)]$ ในการแปลง

$$\lambda_s^{qdo} = [T_{qdo}(\theta)](L_{ss}^{abc; abc} i_s^{abc} + L_{sr}^{abc; abc} i_r^{abc}) \quad (2.20)$$

จัดรูปสมการที่ 2.20 ใหม่ ในรูปของ $[T_{qdo}(\theta)]^{-1}$ จะได้

$$\begin{aligned} \lambda_s^{qdo} &= [T_{qdo}(\theta)]L_{ss}^{abc} [T_{qdo}(\theta)]^{-1} i_s^{qdo} + [T_{qdo}(\theta)]L_{sr}^{abc} [T_{qdo}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{qdo} \\ &= \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} i_s^{qdo} + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_r^{qdo} \end{aligned} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกัน สมการฟลักซ์ที่เกี่ยวกับที่โรเตอร์สามารถแปลงได้เป็น

$$\lambda_r^{qdo} = [T_{qdo}(\theta - \theta_r)] L_{rs}^{abc} [T_{qdo}(\theta)]^{-1} i_s^{qdo} + [T_{qdo}(\theta - \theta_r)] L_{rr}^{abc} [T_{qdo}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{qdo}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{3}{2} L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_s^{qdo} + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2} L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} i_r^{qdo} \quad (2.22)$$

และสมการที่ 2.21 และ 2.22 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

โดยที่

$$\lambda'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr} \quad \lambda'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr} \quad (2.24)$$

$$i'_{qr} = \frac{N_r}{N_s} i_{qr} \quad i'_{dr} = \frac{N_r}{N_s} i_{dr} \quad (2.25)$$

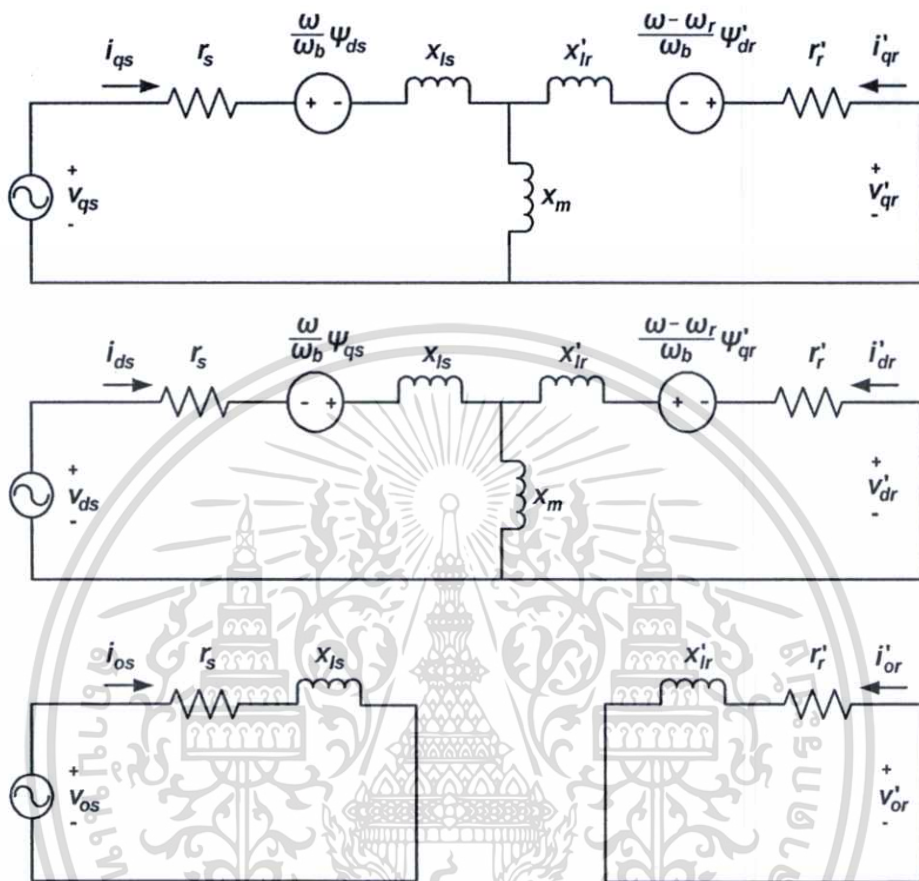
$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (2.26)$$

และ L_m คำนวณโดยมีค่าเท่ากับ

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ 2.23 ลงในสมการที่ 2.17 และ 2.19 และแยกแต่ละปริมาณออกเป็น q, d และ o ในรูปของสมการแรงดัน จะได้วงจรสมมูลทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงอิสระ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงอิสระของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.2.5 สมการแรงบิดบนแกน d-q [12]

กำลังไฟฟ้าขณะเวลาใดๆ ที่จ่ายให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดทั้งด้านสเตเตอร์และโรเตอร์

$$P_{in} = v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} + v'_{ar}i'_{ar} + v'_{br}i'_{br} + v'_{cr}i'_{cr} \tag{2.28}$$

จัดให้อยู่ในรูปของปริมาณ qdo

$$P_{in} = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds} + 2v_{os}i_{os} + v'_{qr}i'_{qr} + v'_{dr}i'_{dr} + 2v'_{or}i'_{or}) \tag{2.29}$$

นำสมการที่ 2.17 และ 2.19 มาแทนลงในแรงดันของสมการที่ 2.29 จะได้ออกมา 3 ส่วน

คือ i^2r , $ip\lambda$ และ $\omega\lambda i$ โดยที่ i^2r คือความสูญเสียเนื่องมาจากขดลวด, $ip\lambda$ คืออัตราการผลิตเอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวด (rate of exchange of magnetic field energy between windings) และ $\omega\lambda i$ คือ พลังงานที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางกลที่โรเตอร์ (rate of energy converted to mechanical work) ผลบวกของเทอม $\omega\lambda i$ จากสมการข้างต้นหารด้วยความเร็วทางกลของโรเตอร์จะได้ค่าของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\lambda'_{dr}i'_{qr} - \lambda'_{qr}i'_{dr})] \quad (2.30)$$

ใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.23 จะได้

$$\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds} = -(\lambda'_{dr}i'_{qr} - \lambda'_{qr}i'_{dr}) = L_m(i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \quad (2.31)$$

สมการที่ 2.30 สามารถเขียนได้ใหม่โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.31

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr}i'_{dr} - \lambda'_{dr}i'_{qr}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

จากสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปได้เป็นสมการในปริมาณของ qdo บนกรอบอ้างอิงอิสระได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงอิสระ
สมการแรงดันที่สเตเตอร์

$$\begin{aligned} v_{qs} &= p\lambda_{qs} + \omega\lambda_{ds} + r_s i_{qs} \\ v_{ds} &= p\lambda_{ds} - \omega\lambda_{qs} + r_s i_{ds} \\ v_{os} &= p\lambda_{os} + r_s i_{os} \end{aligned} \quad (2.33)$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$\begin{aligned} v'_{qr} &= p\lambda'_{qr} + (\omega - \omega_r)\lambda'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\ v'_{dr} &= p\lambda'_{dr} - (\omega - \omega_r)\lambda'_{qr} + r'_r i'_{dr} \end{aligned} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

สมการแรงบิด

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\lambda'_{dr}i'_{qr} - \lambda'_{qr}i'_{dr})] \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr}i'_{dr} - \lambda'_{dr}i'_{qr}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลังหน่วยของตัวแปรต่างๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะอยู่ในหน่วยโอมห์ เปรอร์เซ็นต์หรือว่าเปอร์ยูนิต ดังนั้นเพื่อความสะดวกเราจึงเปลี่ยนสมการแรงดันที่สเตเตอร์ โรเตอร์ และสมการฟลักซ์เกี่ยวคัลล์อง ให้อยู่ในรูปของค่ารีแอกแตนซ์ซึ่งมีหน่วยเป็นโอมห์ แทนที่จะแสดงเป็นค่าความเหนี่ยวนำซึ่งมีหน่วยเป็นเฮนรี่ จากเหตุนี้เองจึงทำให้ฟลักซ์เกี่ยวคัลล์อง λ กลายมาเป็นฟลักซ์เกี่ยวคัลล์องต่อวินาที ψ ดังสมการข้างล่างนี้

$$\psi = \omega_b \lambda \quad V \text{ หรือ per unit} \quad (2.37)$$

และ

$$x = \omega_b L \quad \Omega \text{ หรือ per unit} \quad (2.38)$$

โดยที่ $\omega_b = 2\pi f_{rated}$ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาทีและ f_{rated} คือความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่มีหน่วยเป็น Hertz สำหรับค่าอื่นๆสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเปอร์ยูนิตได้ดังนี้ โดยให้ค่าของแรงดันเป็นค่าฐาน สาเหตุที่ใช้ค่าของแรงดันเป็นค่าฐานก็เพราะว่าเมื่อเราใช้กรอบอ้างอิงซิงโครนัสในการแปลงจะได้ค่าแรงดัน v_q เท่ากับค่าของแรงดันพอดี จึงทำให้ง่ายต่อการแปลงไปยังระบบเปอร์ยูนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แรงดันฐาน } V_b = \sqrt{2/3}V_{rated}$$

$$\text{กำลังฐาน } S_b = S_{rated}$$

$$\text{กระแสสูงสุดฐาน } I_b = 2S_b/3V_b$$

$$\text{อิมพีแดนซ์ฐาน } Z_b = V_b/I_b$$

$$\text{แรงบิดฐาน } T_b = S_b/\omega_{bm}$$

โดยที่

$$\omega_{bm} = 2\omega_b/P \quad (2.39)$$

สมการบนกรอบอ้างอิงอิสระในรูปของฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องต่อวินาที (ψ) และค่ารีแอกแตนซ์ (x) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงอิสระในรูปของ ψ และ x สมการแรงดันที่สเตเตอร์

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \\ v_{ds} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \\ v_{os} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} + r_s i_{os} \end{aligned} \quad (2.40)$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$\begin{aligned} v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\ v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\ v'_{or} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} + r'_r i'_{or} \end{aligned} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องต่อวินาที

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{os} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

สมการแรงบิด

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \left[\frac{\omega}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} (\psi'_{dr} i'_{qr} - \psi'_{qr} i'_{dr}) \right] \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} x_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (2.43)$$

2.2.6 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงต่างๆ

การสร้างสมการของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้ในการสร้างเป็นแบบจำลองพลวัตนั้น สามารถเลือกใช้กรอบอ้างอิงได้ทั้งหมด 4 แบบ โดยการกำหนดค่าของ ω ให้มีค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. $\omega = \omega$: กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame)
2. $\omega = 0$: กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame)
3. $\omega = \omega_r$: กรอบอ้างอิงโรเตอร์ (rotor reference frame)
4. $\omega = \omega_e$: กรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronously rotating reference frame)

การเลือกกรอบอ้างอิงเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง จะขึ้นอยู่กับปัญหาที่เราสนใจ โดยรายละเอียดของแต่ละกรอบอ้างอิง มีดังนี้

2.2.6.1 กรอบอ้างอิงอิสระ (arbitrary reference frame) : กรอบอ้างอิงนี้กำหนดให้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วใดๆ โดยกำหนดค่าที่ ω ซึ่งค่า ω นี้สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวก ลบ หรือแม้แต่ค่าที่แปรเปลี่ยนได้ สมการของกรอบอ้างอิงนี้แสดงดังสมการที่ 2.40-2.43 และวงจรสมมูลพลวัตแสดงดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6.2 กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (stationary reference frame) : กรอบอ้างอิงนี้มีค่า $\omega = 0$ หมายถึงแกน d-q ถูกยึดติดอยู่กับสเตเตอร์ ทำให้มุม θ ในรูปที่ 2.2 มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงทำให้แกน q ทับกับแกนแรงเคลื่อนแม่เหล็กของเฟส a พอดี สำหรับสมการแรงดันหาได้จากการกำหนดให้ $\omega = 0$ ในสมการที่ 2.40 และ 2.41

สมการแรงดันที่สเตเตอร์

$$\begin{aligned}v_{qs} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{qs} \\v_{ds} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{ds} \\v_{os} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} + r_s i_{os}\end{aligned}\quad (2.44)$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$\begin{aligned}v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{-\omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{-\omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\v'_{or} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} + r'_r i'_{or}\end{aligned}\quad (2.45)$$

จากสมการที่ 2.44 และสมการที่ 2.45 นำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลทางพลวัต ได้ดังรูปที่ 2.4 และสมมติให้แรงดันที่จ่ายเข้าสเตเตอร์มีค่าดังนี้

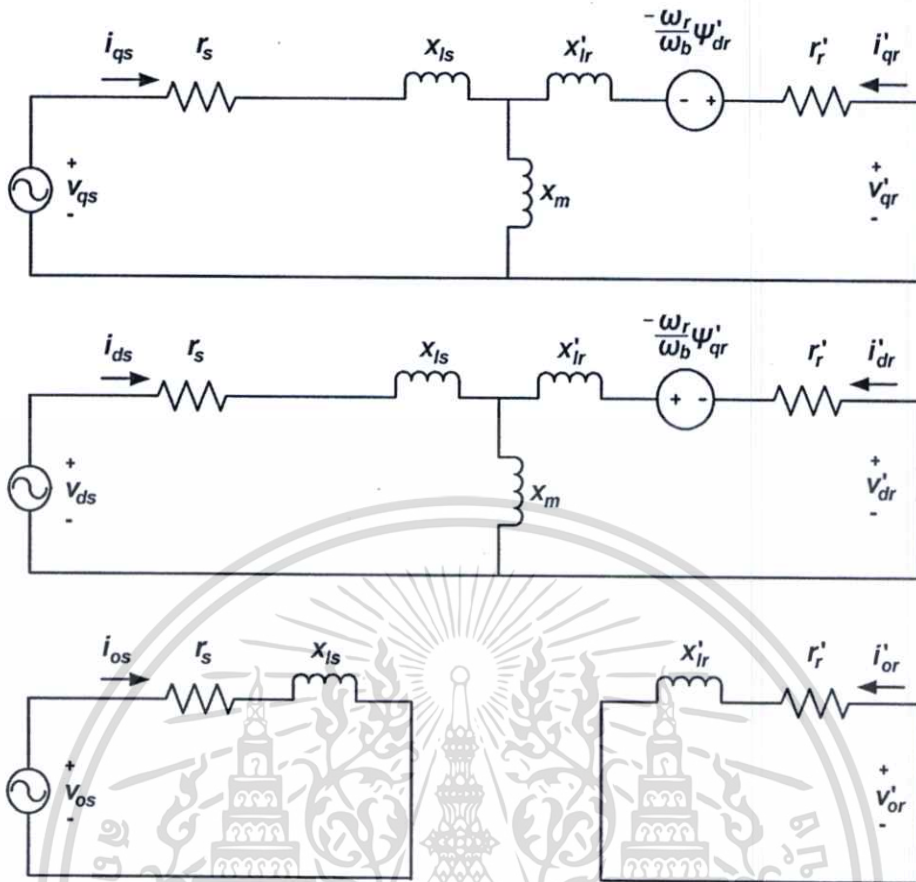
$$v_{as} = V_m \cos(\theta_s + \gamma) \quad (2.46)$$

$$v_{bs} = V_m \cos(\theta_s + \gamma - 2\pi/3) \quad (2.47)$$

$$v_{cs} = V_m \cos(\theta_s + \gamma + 2\pi/3) \quad (2.48)$$

โดย θ_s มีค่าเท่ากับ $\omega_s t$ โดยที่ ω_s คือ ความเร็วเชิงมุมเชิงโรตัสและ t คือ เวลา
 γ คือ ค่ามุมเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากสมการแรงดันที่ 2.46-2.48 แปลงมาเป็นแรงดันในปริมาณ d-q บนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ได้ โดยการกำหนดให้ $\theta = 0$ ในสมการที่ 2.11 จะได้เมทริกซ์การแปลงบนกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ดังสมการที่ 2.49

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

จากสมการที่ 2.49 จะได้ v_{qs} มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{2}{3} \left[v_{as} - \frac{1}{2}(v_{bs} + v_{cs}) \right] \\ &= \frac{2}{3} \left[V_m \cos(\theta_s + \gamma) - \frac{1}{2}(-V_m \cos(\theta_s + \gamma)) \right] \\ &= \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} V_m \cos(\theta_s + \gamma) \right] \\ &= V_m \cos(\theta_s + \gamma) \end{aligned} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ v_{ds} มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= \frac{2}{3} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} v_{bs} + \frac{\sqrt{3}}{2} v_{cs} \right] \\
 &= \frac{2}{3} * \frac{\sqrt{3}}{2} [v_{cs} - v_{bs}] \\
 &= \frac{2}{3} * \frac{\sqrt{3}}{2} [-\sqrt{3} V_m \sin(\theta_s + \gamma)] \\
 &= -V_m \sin(\theta_s + \gamma)
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

จากสมการที่ 2.50 จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ขดลวดบนแนวแกน q มีค่าเท่ากับแรงดันเฟส a ที่จ่ายเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ในทำนองเดียวกันกับกระแสบนแนวแกน q ก็จะมีค่าเท่ากับกระแสเฟส a ที่สเตเตอร์ด้วยเช่นกัน จากตรงนี้เองทำให้เราไม่ต้องเสียเวลาในการแปลงกลับจากปริมาณ d-q ไปเป็นปริมาณในเฟส abc โดยเราสามารถดูค่าของแรงดันและกระแสของเฟส a ได้จากค่าของแรงดันและกระแสบนแนวแกน q

2.2.6.3 กรอบอ้างอิงโรเตอร์ (rotor reference frame) : กรอบอ้างอิงนี้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วโรเตอร์ กำหนดการทำงานของกรอบอ้างอิงนี้ได้โดยทำให้ ω มีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมที่โรเตอร์ ω_r และสมการแรงดันหาได้จากการกำหนดให้ $\omega = \omega_r$ ในสมการที่ 2.40 และ 2.41 ดังนี้

สมการแรงดันที่สเตเตอร์

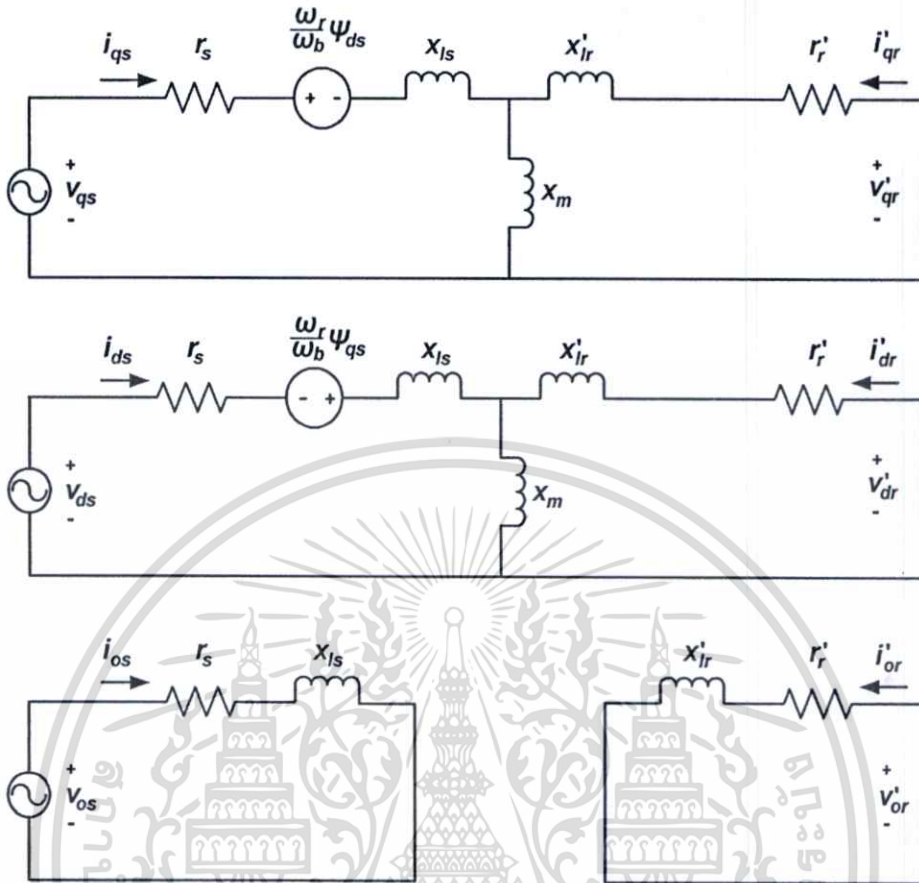
$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \\
 v_{ds} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \\
 v_{os} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} + r_s i_{os}
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$\begin{aligned}
 v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + r'_r i'_{qr} \\
 v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} + r'_r i'_{dr} \\
 v'_{or} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} + r'_r i'_{or}
 \end{aligned} \tag{2.53}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.52 และสมการที่ 2.53 นำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลทางพลวัตได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากสมการแรงดัน 3 เฟสที่จ่ายเข้าสเตเตอร์ที่ 2.46-2.48 เปลี่ยนมาเป็นแรงดัน d-q บนกรอบอ้างอิงโรเตอร์ได้โดยการกำหนดให้ θ ในสมการที่ 2.11 มีค่าเท่ากับ θ_r จะได้เมตริกซ์การแปลงดังสมการที่ 2.54

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - 2\pi/3) & \sin(\theta_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

จากสมการที่ 2.54 จะได้ v_{qs} มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{2}{3} [v_{as} \cos \theta_r + v_{bs} \cos(\theta_r - 2\pi/3) + v_{cs} \cos(\theta_r + 2\pi/3)] \\ &= \frac{2}{3} V_m \left[\frac{3}{2} \cos(\theta_s + \gamma - \theta_r) \right] \\ &= V_m \cos(s\theta_s + \gamma) \end{aligned} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ v_{ds} มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} v_{ds} &= \frac{2}{3} [v_{as} \sin \theta_r + v_{bs} \sin(\theta_r - 2\pi/3) + v_{cs} \sin(\theta_r + 2\pi/3)] \\ &= \frac{2}{3} V_m * \frac{1}{2} [-3 \sin(\theta_s + \gamma - \theta_r)] \\ &= -V_m \sin(s\theta_s + \gamma) \end{aligned} \quad (2.56)$$

จากสมการแรงดันที่ 2.55 และ 2.56 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันมีค่าสลับเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งตรงนี้เองถ้าเรามองไปที่โรเตอร์จะได้กระแสโรเตอร์บนแนวแกน q (i'_{qr}) มีค่าเท่ากับกระแสโรเตอร์เฟส a (i'_{ar})

2.2.6.4 กรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronously rotating reference frame) : กรอบอ้างอิงนี้แกน d-q หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส โดยการกำหนดให้ $\omega = \omega_e$ ในสมการที่ 2.40 และ 2.41 ทำให้ได้แรงดันดังนี้

สมการแรงดันสเตเตอร์

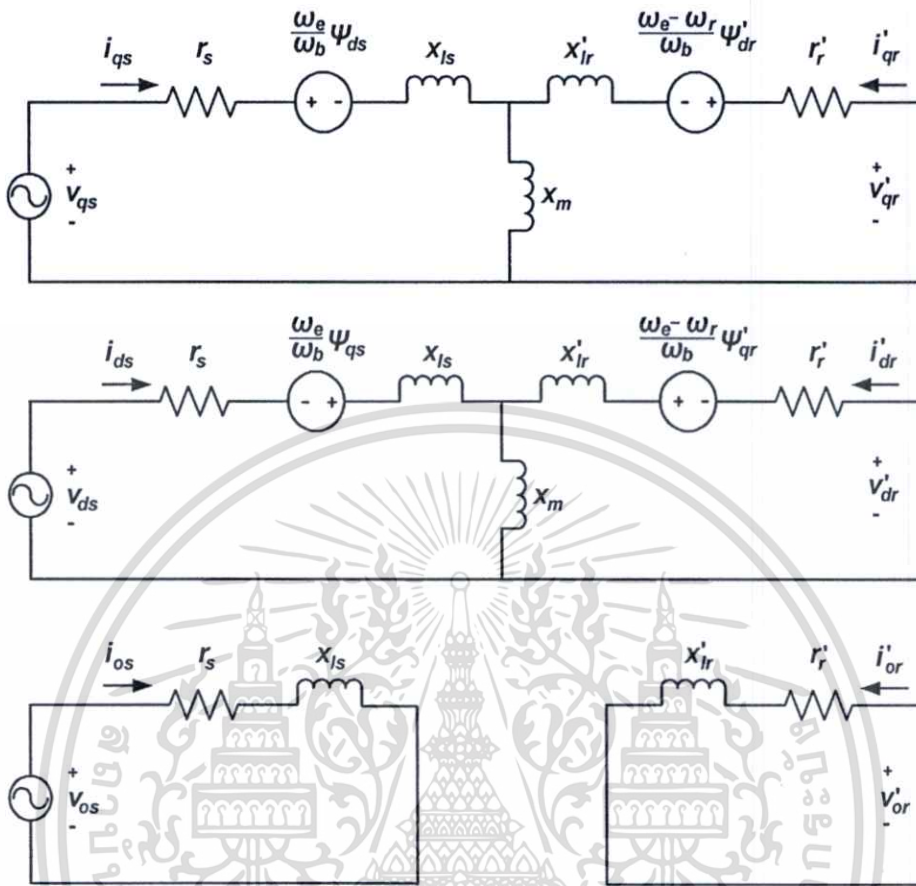
$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \\ v_{ds} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \\ v_{os} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} + r_s i_{os} \end{aligned} \quad (2.57)$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$\begin{aligned} v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\ v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\ v'_{or} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} + r'_r i'_{or} \end{aligned} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.57 และสมการที่ 2.58 นำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลทางพลวัตได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลทางพลวัต d-q บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากสมการแรงดันที่ 2.46-2.48 แปลงมาเป็นแรงดัน d-q บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสได้โดยการกำหนดให้ θ ในสมการที่ 2.11 มีค่าเท่ากับ θ_s จะได้เมตริกซ์การแปลงดังสมการที่ 2.59

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - 2\pi/3) & \sin(\theta_s + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

จากสมการที่ 2.59 จะได้ v_{qs} มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{2}{3} [v_{as} \cos \theta_s + v_{bs} \cos(\theta_s - 2\pi/3) + v_{cs} \cos(\theta_s + 2\pi/3)] \\ &= \frac{2}{3} V_m \left[\frac{3}{2} \cos(\theta_s + \gamma - \theta_s) \right] \\ &= V_m \cos(\gamma) \end{aligned} \quad (2.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ v_{ds} มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} v_{ds} &= \frac{2}{3} [v_{as} \sin \theta_s + v_{bs} \sin(\theta_s - 2\pi/3) + v_{cs} \sin(\theta_s + 2\pi/3)] \\ &= \frac{2}{3} V_m * \frac{1}{2} [-3 \sin(\theta_s + \gamma - \theta_s)] \\ &= -V_m \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (2.61)$$

จากสมการแรงดันที่ 2.60 และ 2.61 ถ้าค่ามุมเริ่มต้นของแรงดัน (γ) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ $v_{qs} = V_m$ และ $v_{ds} = 0$ ซึ่งจะเห็นได้ว่า v_{qs} เป็นค่าคงที่และมีค่าเท่ากับค่ายอดของแรงดัน สำหรับประโยชน์อย่างหนึ่งของกรอบอ้างอิงนี้ก็คือ ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมป้อนกลับ (feedback controller design) เพื่อใช้กับสมการเชิงเส้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองพลวัตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในบทที่แล้วได้กล่าวถึงการสร้างสมการพลวัตด้วยสมการเชิงอนุพันธ์บนกรอบอ้างอิงต่างๆ ทั้ง 4 แบบ สำหรับในบทนี้จะเป็นการนำเอาสมการพลวัตบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสมาสร้างเป็นแบบจำลองเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมพลวัตที่ส่งผลต่อระบบไฟฟ้าที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่ออยู่ [8,12,13] ซึ่งแบบจำลองจะประกอบไปด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่ 1 จำนวน 5 สมการหรือเรียกอีกอย่างว่าสมการลำดับที่ 5 สำหรับแบบจำลองพลวัตที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ทั้งในสถานะมอเตอร์ไฟฟ้าและสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการกำหนดเครื่องหมายให้กับแรงบิดทางกลที่โรเตอร์ สำหรับโหมดมอเตอร์กำหนดให้เป็นลบและสำหรับโหมดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดให้เป็นบวก [12]

การศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ในระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่หลายตัว ทำให้การสร้างแบบจำลองมีความซับซ้อนขึ้น อันเนื่องมาจากลำดับของสมการที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นตามจำนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีในระบบ ส่งผลให้เวลาในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ช้าตามไปด้วย ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองลง โดยในการสร้างแบบจำลองจะไม่คิดปัจจัยที่มีผลต่อสถานะชั่วคราวที่สเตรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [8,13] ซึ่งแบบจำลองอย่างง่ายนี้ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่ 1 จำนวน 3 สมการหรือเรียกอีกอย่างว่าสมการลำดับที่ 3

3.1 สมการพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

สมการพลวัตบนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสสามารถหาได้โดยการกำหนดให้ $\omega = \omega_e$ ในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นสมการพลวัตบนกรอบอ้างอิงอิสระ ทำให้ได้สมการใหม่ดังนี้

สมการแรงดันที่สเตรเตอร์

$$\begin{aligned}v_{qs} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \\v_{ds} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \\v_{os} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{os} + r_s i_{os}\end{aligned}\tag{3.1}$$

สมการแรงดันที่โรเตอร์

$$\begin{aligned}
 v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\
 v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\
 v'_{or} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{or} + r'_r i'_{or}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

สมการฟลักซ์เกี่ยวคล้อง

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{os} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

สมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \tag{3.4}$$

สมการการหมุนที่โรเตอร์

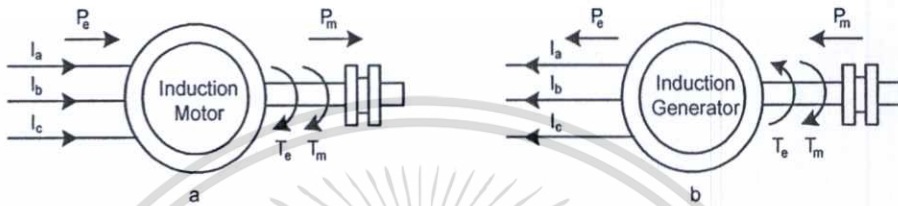
$$Jp\omega_{rm} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \tag{3.5}$$

- โดยที่
- J : ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย
 - ω_{rm} : ความเร็วเชิงมุมทางกลที่โรเตอร์
 - T_{em} : แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า
 - T_{mech} : แรงบิดทางกลที่โรเตอร์
 - T_{damp} : แรงบิดหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำงานใน 2 สถานะคือ สถานะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ สถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยสถานะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่สเตเตอร์ในรูปของกระแสไฟฟ้าและส่งจ่ายพลังงานออกจากโรเตอร์ในรูปของพลังงานทางกลดังรูปที่ 3.1a สำหรับความเร็วที่โรเตอร์จะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้ค่าสลิปของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 3.1 สถานะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สำหรับสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าจะไหลออกจากสเตเตอร์ในรูปของกระแสไฟฟ้า โดยได้รับพลังงานทางกลจากโรเตอร์ดังรูปที่ 3.1b สำหรับความเร็วที่โรเตอร์จะสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสทำให้ค่าสลิปของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเป็นลบ

การกำหนดสถานะการทำงานให้กับแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำได้โดยใช้สมการการหมุนที่โรเตอร์ ดังสมการที่ 3.6

$$Jp\omega_{rm} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (3.6)$$

การกำหนดสถานะการทำงานให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าทำได้โดยการกำหนดให้แรงบิดทางกลที่โรเตอร์ (T_{mech}) ในสมการการหมุนที่ 3.6 มีค่าเป็นลบมีผลทำให้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (T_{em}) มีเครื่องหมายเป็นบวก เพื่อให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่โรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ที่สถานะอยู่ตัว ส่วนการทำงานในสถานะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการกำหนดให้แรงบิดทางกลที่โรเตอร์มีค่าเป็นบวกมีผลทำให้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ

การกำหนดสถานะการทำงานโดยการกำหนดเครื่องหมายให้กับแรงบิดทางกลนั้น ในหนังสือบางเล่มอาจกำหนดเครื่องหมายแตกต่างออกไปโดยจะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายหน้า T_{mech} ของสมการการหมุน

3.3 สมการลำดับที่ 5 ของแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากการแปลงแกนมาอยู่บนระบบ d-q บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสของสมการแรงดันในสมการที่ 3.1-3.2 จะได้สมการแรงดันที่สเตเตอร์บนแกน q (v_{qs}) แรงดันสเตเตอร์บนแกน d (v_{ds}) แรงดันโรเตอร์บนแกน q (v'_{qr}) และแรงดันโรเตอร์บนแกน d (v'_{dr}) ซึ่งเมื่อรวมกับสมการการหมุนของโรเตอร์ที่ 3.5 แล้ว จะได้สมการลำดับที่ 1 จำนวน 5 สมการจึงเรียกว่า สมการลำดับที่ 5 ดังสมการที่ 3.7 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในการศึกษาสภาวะชั่วครู่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะใช้แบบจำลองสมการลำดับที่ 5 ในการสร้างแบบจำลองเพราะสมการลำดับที่ 5 นี้เป็นลำดับสูงสุดที่ได้จากการแปลงแกนและยังได้รวมเอาผลของสภาวะชั่วครู่ที่เกิดจากสเตเตอร์และผลของสภาวะชั่วครู่ที่เกิดจากโรเตอร์เอาไว้ด้วย

สมการลำดับที่ 5

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \\
 v_{ds} &= \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \\
 v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\
 v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\
 Jp\omega_{rm} &= T_{em} + T_{mech} - T_{damp}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

3.4 สมการลำดับที่ 3 ของแบบจำลองพลวัตเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สำหรับการศึกษาในระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่จำนวนมาก ทำให้การสร้างแบบจำลองมีความซับซ้อนขึ้นตามจำนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จากตรงนี้เองจึงทำให้มีแนวคิดที่จะลดความซับซ้อนของระบบลง โดยการไม่คิดผลของสภาวะชั่วครู่ที่เกิดจากสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพราะเมื่อเกิดการรบกวนขึ้นกับระบบ เช่น เกิดการลัดวงจรขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่มีเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่ออยู่ จะทำให้เกิดสภาวะชั่วครู่ขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งที่สภาวะชั่วครู่นี้เอง สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลของสภาวะชั่วครู่ที่เกิดมาจากสเตเตอร์จะหมดไปก่อนผลของสภาวะชั่วครู่ที่เกิดมาจากโรเตอร์[2,3,13]

ดังนั้นในการศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้า สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยการไม่คิดผลของสภาวะชั่วครู่ที่เกิดจากสเตเตอร์ โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เกี่ยวคดลิ่งที่สมการแรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ($\frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} = \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} = 0$) ส่งผลให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

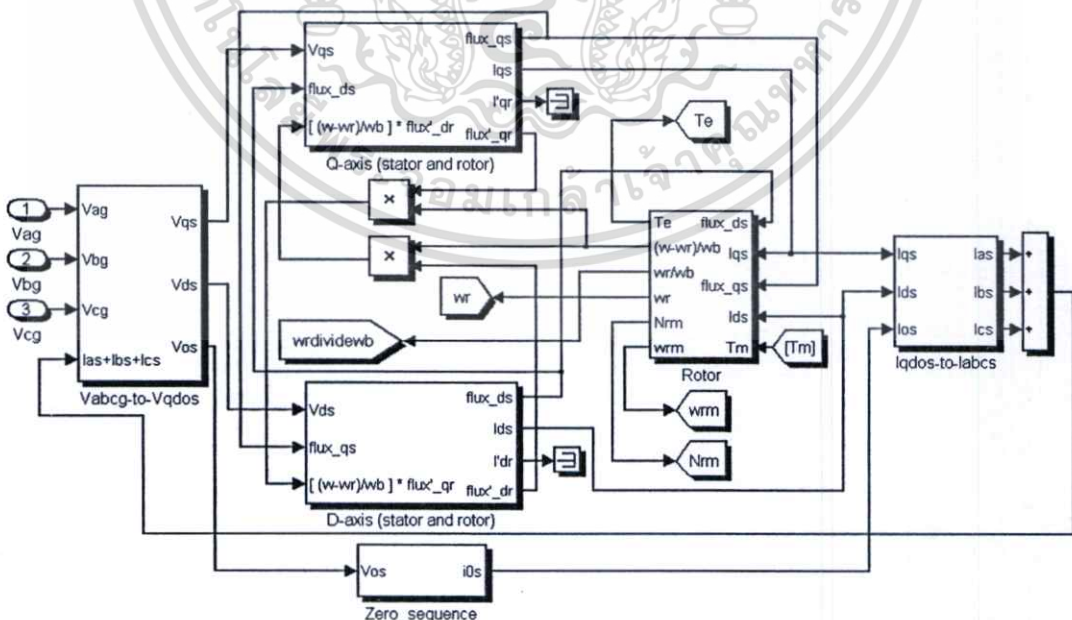
เหลือสมการลำดับที่ 1 จำนวน 3 สมการคือ สมการแรงดันที่โรเตอร์และสมการการหมุน ดังสมการที่ 3.8

สมการลำดับที่ 3

$$\begin{aligned}
 v_{qs} &= \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \\
 v_{ds} &= -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \\
 v'_{qr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\
 v'_{dr} &= \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\
 Jp\omega_{rm} &= T_{em} + T_{mech} - T_{damp}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

3.5 การสร้างแบบจำลองพลวัตโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่หาได้จาก การสร้างแบบจำลองพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากนั้นกำหนดสถานะการทำงานให้ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้โดยการกำหนดให้แรงบิดทางกลที่โรเตอร์มีค่าเป็นบวกซึ่งหมายถึงการ จ่ายพลังงานทางกลเข้าที่โรเตอร์ สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้นำหลักการและแนวคิดมาจาก [12,13] จากนั้นนำมาสร้าง โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 การแปลงแรงดันจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบแกน d-q

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย มีลักษณะการต่อขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบสตาร์ดังรูปที่ 3.3 โดยแรงดันสเตเตอร์แสดงดังสมการที่ 3.9

$$\begin{aligned}v_{as} &= v_{ag} - v_{sg} \\v_{bs} &= v_{bg} - v_{sg} \\v_{cs} &= v_{cg} - v_{sg}\end{aligned}\quad (3.9)$$

หรือ

$$\begin{aligned}v_{as} + v_{bs} + v_{cs} &= (v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}) - 3v_{sg} \\3v_{sg} &= (v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}) - (v_{as} + v_{bs} + v_{cs})\end{aligned}\quad (3.10)$$

โดยที่

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} : แรงดันสเตเตอร์เฟส a,b,c

v_{ag}, v_{bg}, v_{cg} : แรงดันของแหล่งจ่าย a,b,c

v_{sg} : แรงดันระหว่างนิวทรัลของสเตเตอร์และนิวทรัลของแหล่งจ่าย



รูปที่ 3.3 การต่อขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย ไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างนิวทรัลของสเตเตอร์และนิวทรัลของแหล่งจ่าย ดังนั้นในการนำไปสร้างเป็นแบบจำลอง v_{sg} หาได้จากสมการที่ 3.11 โดยการกำหนดให้ R_{sg} มีค่ามากๆ เพื่อแทนความต้านทานอนันต์ [12]

$$v_{sg} = R_{sg}(i_{as} + i_{bs} + i_{cs}) = 3i_{os}R_{sg}\quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ 3 เฟส 3 สายที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ กระแสเสเตอร์ลำดับศูนย์ซึ่งหาได้จาก $i_{os} = (i_{as} + i_{bs} + i_{cs})/3$ มีค่าเป็นศูนย์เพราะกระแสที่ไหลเข้าจุดนิวทรัล s ที่เสเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นไม่ว่ากระแสเสเตอร์จะสมดุลหรือไม่ ก็จะไม่เกิดกระแสลำดับศูนย์

แรงดันเสเตอร์ 3 เฟส abc แปลงไปยังระบบแกน d-q บนกรอบอ้างอิงซิงโครนัสได้โดยใช้เมตริกซ์การแปลงจากสมการที่ 2.59

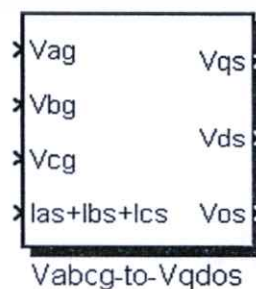
$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ \sin \theta_s & \sin(\theta_s - 2\pi/3) & \sin(\theta_s + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{2}{3} [v_{as} \cos \theta_s + v_{bs} \cos(\theta_s - 2\pi/3) + v_{cs} \cos(\theta_s + 2\pi/3)] \\ v_{ds} &= \frac{2}{3} [v_{as} \sin \theta_s + v_{bs} \sin(\theta_s - 2\pi/3) + v_{cs} \sin(\theta_s + 2\pi/3)] \\ v_{os} &= \frac{2}{3} \left[\frac{1}{2} v_{as} + \frac{1}{2} v_{bs} + \frac{1}{2} v_{cs} \right] \end{aligned} \quad (3.13)$$

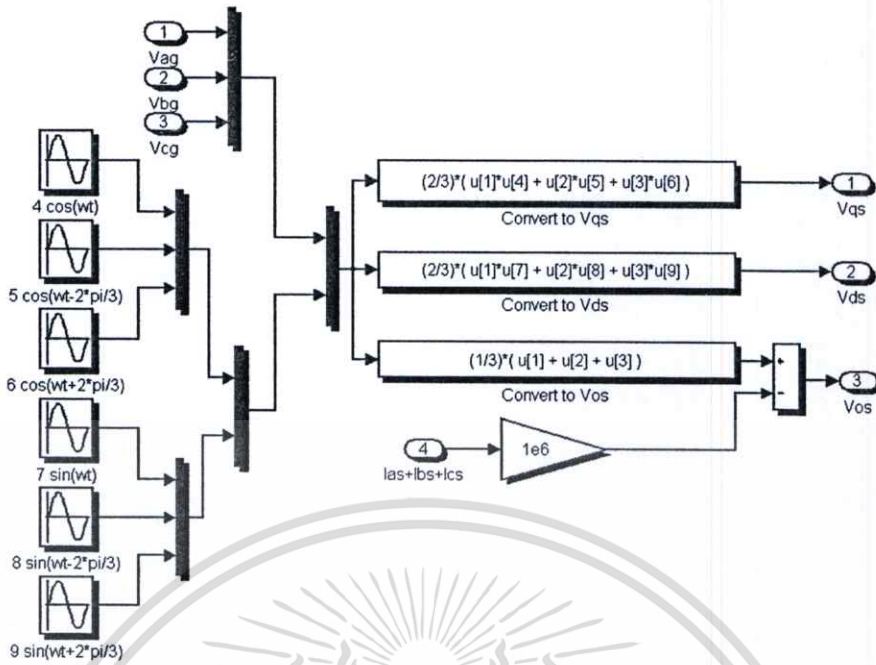
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.9 ทำให้เขียนสมการที่ 3.13 ใหม่ได้ดังสมการที่ 3.14 จากนั้นนำไปสร้างเป็นแบบจำลอง ดังรูปที่ 3.4

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{2}{3} [v_{ag} \cos \theta_s + v_{bg} \cos(\theta_s - 2\pi/3) + v_{cg} \cos(\theta_s + 2\pi/3)] \\ v_{ds} &= \frac{2}{3} [v_{ag} \sin \theta_s + v_{bg} \sin(\theta_s - 2\pi/3) + v_{cg} \sin(\theta_s + 2\pi/3)] \\ v_{os} &= \frac{1}{3} [v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}] - v_{sg} \end{aligned} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.4 การแปลงแรงดันจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบแกน d-q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การแปลงแรงดันจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบแกน d-q (ต่อ)

3.5.2 ฟลักซ์เกี่ยวค้ำและกระแสบนแกน q

3.5.2.1 ฟลักซ์เกี่ยวค้ำและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์

จากสมการแรงดันสเตเตอร์บนแกน q ที่ 3.1

$$v_{qs} = \frac{p\psi_{qs}}{\omega_b} + \frac{\omega_e}{\omega_b}\psi_{ds} + r_s i_{qs}$$

$$\frac{p\psi_{qs}}{\omega_b} = v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b}\psi_{ds} - r_s i_{qs}$$

$$\psi_{qs} = \omega_b \int (v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b}\psi_{ds} - r_s i_{qs}) dt \tag{3.15}$$

จากสมการฟลักซ์เกี่ยวค้ำที่สเตเตอร์บนแกน q ที่ 3.3

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= i_{qs}(x_{ls} + x_m) + i'_{qr}x_m \\ &= i_{qs}x_{ls} + i_{qs}x_m + i'_{qr}x_m \\ &= i_{qs}x_{ls} + (i_{qs} + i'_{qr})x_m \\ &= i_{qs}x_{ls} + \psi_{mq} \\ i_{qs} &= \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \end{aligned} \tag{3.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน x_{ls} คือการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\psi_{mq} = (i_{qs} + i'_{qr})x_m$$

หรือ

$$\psi_{mq} = x_M \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) \quad \text{โดยที่} \quad \frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}}$$

นำสมการที่ 3.16 ไปแทนในสมการที่ 3.15 จะได้

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= \omega_b \int \left(v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} - r_s \left(\frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \right) \right) dt \\ &= \omega_b \int \left(v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) \right) dt \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.5.2.2 พลักซ์เกี่ยวค้ำและกระแสบนแกน q ที่โรเตอร์

จากสมการแรงดันโรเตอร์บนแกน q ที่ 3.2

$$\begin{aligned} v'_{qr} &= \frac{p \psi'_{qr}}{\omega_b} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \\ \frac{p \psi'_{qr}}{\omega_b} &= v'_{qr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} - r'_r i'_{qr} \\ \psi'_{qr} &= \omega_b \int \left(v'_{qr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} - r'_r i'_{qr} \right) dt \end{aligned} \quad (3.18)$$

จากสมการพลักซ์เกี่ยวค้ำที่โรเตอร์บนแกน q ที่ 3.3

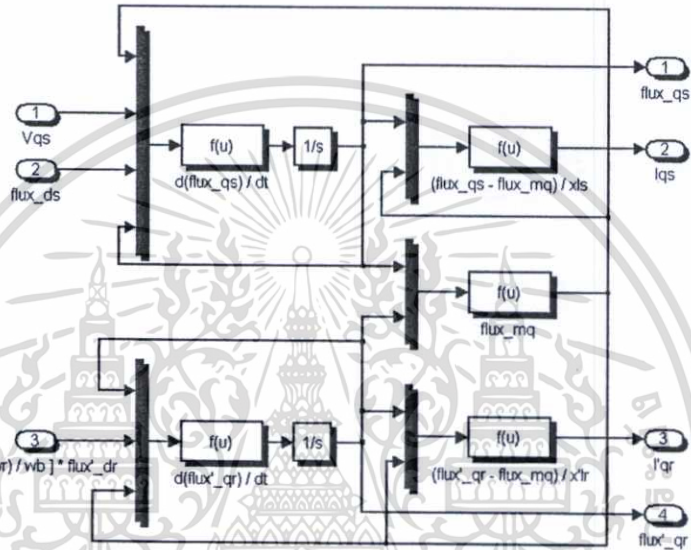
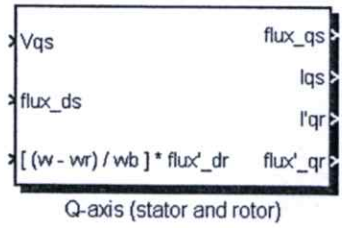
$$\begin{aligned} \psi'_{qr} &= i'_{qr} (x'_{lr} + x_m) + i_{qs} x_m \\ &= i'_{qr} x'_{lr} + i'_{qr} x_m + i_{qs} x_m \\ &= i'_{qr} x'_{lr} + (i'_{qr} + i_{qs}) x_m \\ &= i'_{qr} x'_{lr} + \psi_{mq} \\ i'_{qr} &= \frac{\psi'_{qr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

นำสมการที่ 3.19 ไปแทนในสมการที่ 3.18 จะได้

$$\begin{aligned} \psi'_{qr} &= \omega_b \int \left(v'_{qr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} - \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) \right) dt \\ &= \omega_b \int \left(v'_{qr} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr}) \right) dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการนำสมการที่ 3.20 ไปสร้างเป็นแบบจำลองจะกำหนดให้ $v'_{qr} = 0$ เนื่องจากโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก จากนั้นนำสมการที่ 3.15-3.20 มาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ฟลักซ์เกี่ยวกับดั่งและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์และโรเตอร์

3.5.3 ฟลักซ์เกี่ยวกับดั่งและกระแสบนแกน d

3.5.3.1 ฟลักซ์เกี่ยวกับดั่งและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์

จากสมการแรงดันสเตเตอร์บนแกน d ที่ 3.1

$$v_{ds} = \frac{p\psi_{ds}}{\omega_b} - \frac{\omega_e}{\omega_b}\psi_{qs} + r_s i_{ds}$$

$$\frac{p\psi_{ds}}{\omega_b} = v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b}\psi_{qs} - r_s i_{ds}$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int (v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b}\psi_{qs} - r_s i_{ds}) dt \tag{3.21}$$

จากสมการฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่สเตเตอร์บนแกน d ที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 \psi_{ds} &= i_{ds}(x_{ls} + x_m) + i'_{dr}x_m \\
 &= i_{ds}x_{ls} + i_{ds}x_m + i'_{dr}x_m \\
 &= i_{ds}x_{ls} + (i_{ds} + i'_{dr})x_m \\
 &= i_{ds}x_{ls} + \psi_{md} \\
 i_{ds} &= \frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

โดยที่

$$\psi_{md} = (i_{ds} + i'_{dr})x_m$$

หรือ

$$\psi_{md} = x_M \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) \quad \text{โดยที่} \quad \frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}}$$

นำสมการที่ 3.22 ไปแทนในสมการที่ 3.21 จะได้

$$\begin{aligned}
 \psi_{ds} &= \omega_b \int \left(v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} - r_s \left(\frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}} \right) \right) dt \\
 &= \omega_b \int \left(v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) \right) dt
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

3.5.3.2 ฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องและกระแสบนแกน d ที่โรเตอร์

จากสมการแรงดันโรเตอร์บนแกน d ที่ 3.2

$$\begin{aligned}
 v'_{dr} &= \frac{p\psi'_{dr}}{\omega_b} - \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \\
 \frac{p\psi'_{dr}}{\omega_b} &= v'_{dr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} - r'_r i'_{dr} \\
 \psi'_{dr} &= \omega_b \int \left(v'_{dr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} - r'_r i'_{dr} \right) dt
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

จากสมการฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องที่โรเตอร์บนแกน d ที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 \psi'_{dr} &= i'_{dr}(x'_{lr} + x_m) + i_{ds}x_m \\
 &= i'_{dr}x'_{lr} + i'_{dr}x_m + i_{ds}x_m
 \end{aligned}$$

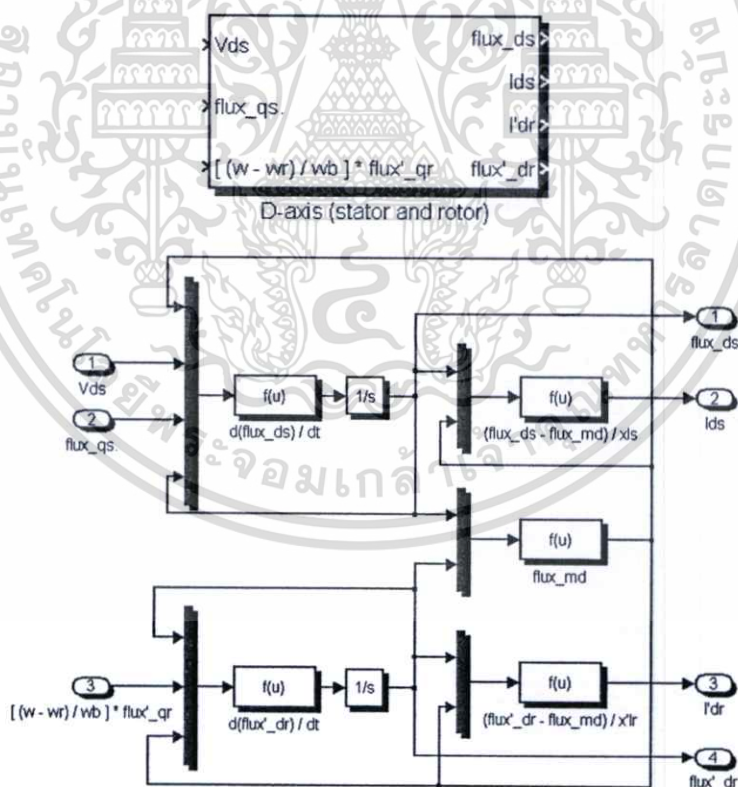
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \psi'_{dr} &= i'_{dr} x'_{lr} + (i'_{dr} + i_{ds}) x_m \\
 &= i'_{dr} x'_{lr} + \psi_{md} \\
 i'_{dr} &= \frac{\psi'_{dr} - \psi_{md}}{x'_{lr}}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

นำสมการที่ 3.25 ไปแทนในสมการที่ 3.24 จะได้

$$\begin{aligned}
 \psi'_{dr} &= \omega_b \int (v'_{dr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} - \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{dr} - \psi_{md})) dt \\
 &= \omega_b \int (v'_{dr} + \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr})) dt
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

ในการนำสมการที่ 3.26 ไปสร้างเป็นแบบจำลองจะกำหนดให้ $v'_{dr} = 0$ เนื่องจากโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอกจากนั้นนำสมการที่ 3.21-3.26 มาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 พล็อตซ์เกี่ยวกับคล็องและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์และ โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 ฟลักซ์เกี่ยวค้ำและกระแสบนแกน o ที่สเตเตอร์

จากสมการแรงค้ำสเตเตอร์บนแกน o ที่ 3.1

$$v_{os} = \frac{p\psi_{os}}{\omega_b} + r_s i_{os}$$

$$\frac{p\psi_{os}}{\omega_b} = v_{os} - r_s i_{os}$$

$$\psi_{os} = \omega_b \int (v_{os} - r_s i_{os}) dt \quad (3.27)$$

จากสมการฟลักซ์เกี่ยวค้ำที่สเตเตอร์บนแกน o ที่ 3.3

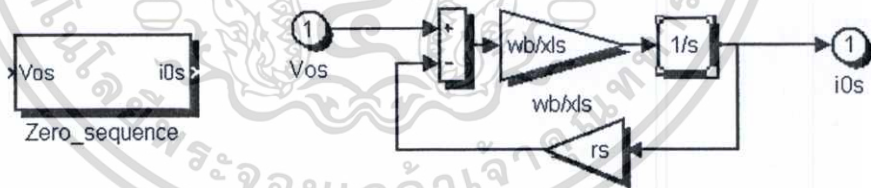
$$\psi_{os} = x_{ls} i_{os}$$

$$i_{os} = \frac{\psi_{os}}{x_{ls}} \quad (3.28)$$

นำสมการที่ 3.27 ไปแทนในสมการที่ 3.28 จะได้

$$i_{os} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int (v_{os} - r_s i_{os}) dt \quad (3.29)$$

นำสมการที่ 3.29 มาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ฟลักซ์เกี่ยวค้ำและกระแสบนแกน o ที่สเตเตอร์

3.5.5 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์

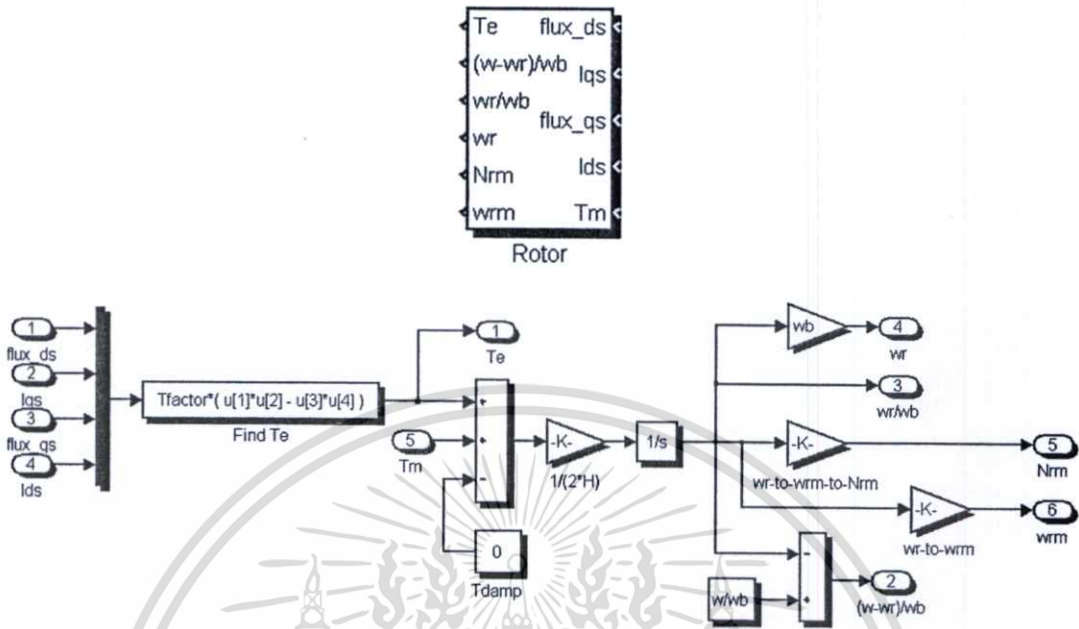
จากสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 3.4 และสมการการหมุนที่โรเตอร์ที่ 3.5 นำมาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.8

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (3.30)$$

$$Jp\omega_{rm} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ 3.30 และ 3.31 มาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.8

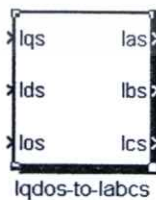


รูปที่ 3.8 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์

3.5.6 การแปลงกระแสจากระบบแกน d-q กลับไปยังระบบ 3 เฟส abc

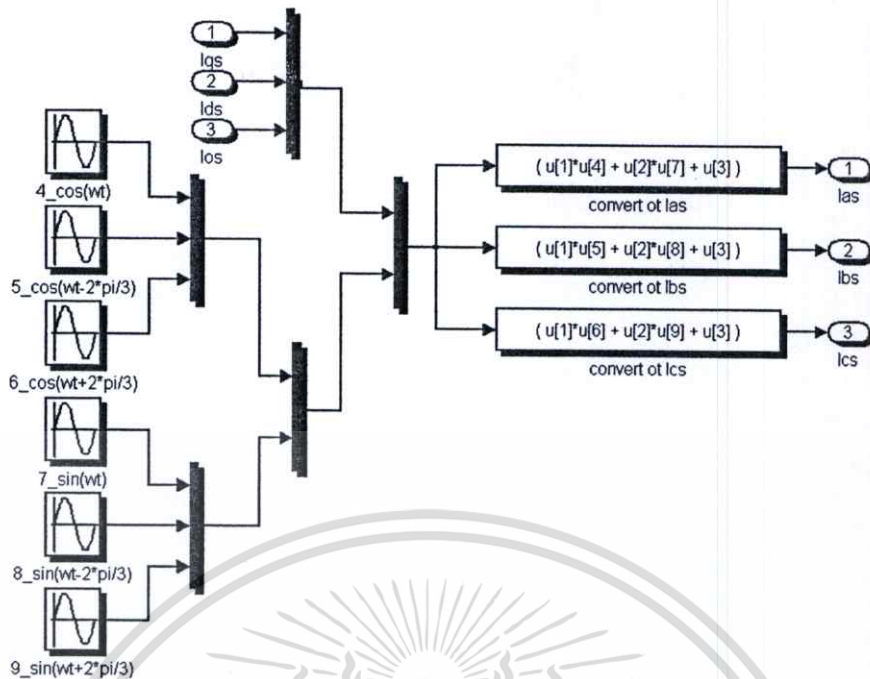
การแปลงกระแสตัวเตอร์กลับไปยังระบบ 3 เฟส abc ทำได้โดยการใช้เมตริกซ์การแปลงที่ 2.13 จากนั้นนำมาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s & 1 \\ \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \sin(\theta_s - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta_s + 2\pi/3) & \sin(\theta_s + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.9 การแปลงกระแสจากระบบแกน d-q กลับไปยังระบบ 3 เฟส abc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การแปลงกระแสจากระบบแกน d-q กลับไปยังระบบ 3 เฟส abc (ต่อ)

3.5.7 การสร้างแบบจำลองสมการลำดับที่ 3

3.5.7.1 พลั๊กซ์เกี่ยวค้ำและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์

จากสมการแรงดันสเตเตอร์ที่ 3.8 ของสมการลำดับที่ 3

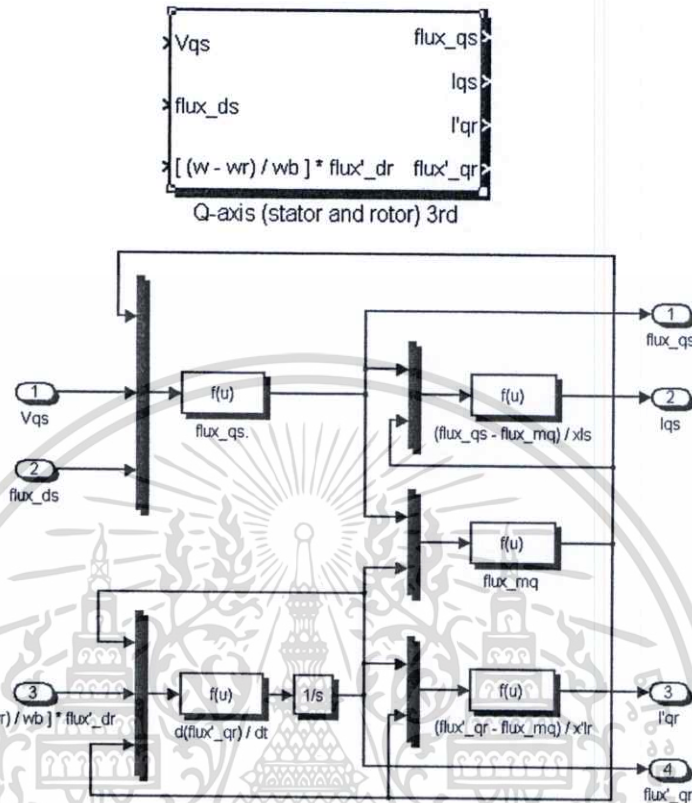
$$v_{qs} = \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \tag{3.33}$$

จาก i_{qs} ในสมการที่ 3.16 นำมาแทนในสมการที่ 3.33

$$\begin{aligned} v_{qs} &= \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s \left(\frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \right) \\ &= \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r_s \psi_{qs}}{x_{ls}} - \frac{r_s \psi_{mq}}{x_{ls}} \\ \psi_{qs} &= \frac{x_{ls}}{r_s} \left(v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} \psi_{mq} \right) \\ &= \frac{x_{ls}}{r_s} \left(v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} \right) + \psi_{mq} \end{aligned} \tag{3.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำมาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.10 สำหรับปริมาณบนแกน q ที่โรเตอร์ยังคงใช้เหมือนเดิม



รูปที่ 3.10 ฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องและกระแสบนแกน q ที่สเตเตอร์และโรเตอร์ของสมการลำดับที่ 3

3.5.7.2 ฟลักซ์เกี่ยวกับเครื่องและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์

จากสมการแรงดันสเตเตอร์ที่ 3.8 ของสมการลำดับที่ 3

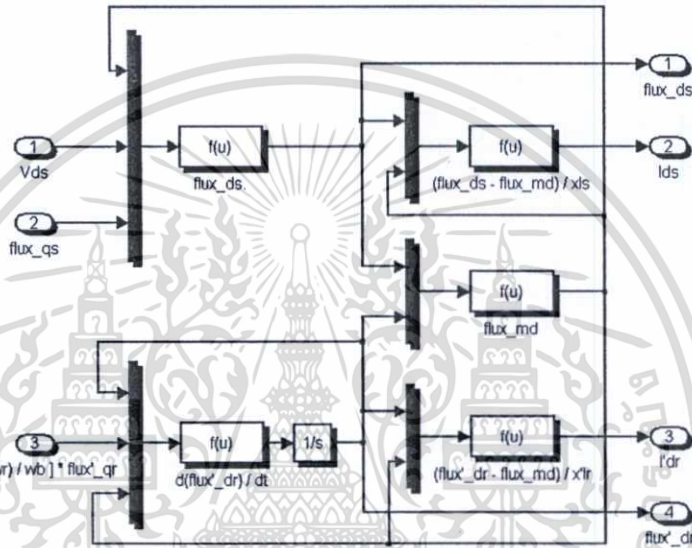
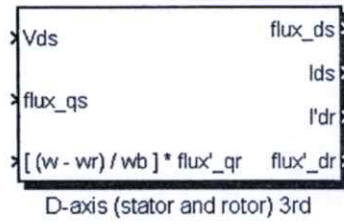
$$v_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \quad (3.35)$$

จาก i_{ds} ในสมการที่ 3.22 นำมาแทนในสมการที่ 3.35

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s \left(\frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}} \right) \\ &= -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r_s \psi_{ds}}{x_{ls}} - \frac{r_s \psi_{md}}{x_{ls}} \\ \psi_{ds} &= \frac{x_{ls}}{r_s} \left(v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} \psi_{md} \right) \\ &= \frac{x_{ls}}{r_s} \left(v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} \right) + \psi_{md} \end{aligned} \quad (3.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำมาสร้างเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.11 สำหรับปริมาณบนแกน d ที่โรเตอร์ยังคงใช้เหมือนเดิม



รูปที่ 3.11 พล็อตซ์เกี่ยวกับคลั่งและกระแสบนแกน d ที่สเตเตอร์และ โรเตอร์ของสมการลำดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบแบบจำลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และลำดับที่ 3 โดยใช้สถานะชั่วคราวเป็นกรณีศึกษาคือ การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์ การลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์ การต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะและการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองมาตรฐานที่ได้จากโปรแกรม PSCAD/EMTDC สำหรับเนื้อหาในตอนท้ายได้นำเสนอกรณีศึกษาการลัดวงจรในระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

4.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ระบบที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงมาจาก [11] ซึ่งเป็นระบบที่มีอยู่จริงในระบบไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสขนาด 225 kW, 400 V, 50 Hz ค่าตัวแปรต่างๆแสดงตามตารางที่ 4.1 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับบัสอนันต์ผ่านทางสายไฟฟ้าและหม้อแปลง ($Y_n - Y_n$) ซึ่งแทนด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ โดยค่าทั้งสองแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Parameters	Value
Number of poles	6
Rated Speed	1013 rpm
Rated Voltage	400 V
Rated Output Power	225 kW
Stator winding resistance	7.821 m Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stator leakage reactance	0.071 Ω
Magnetizing reactance	1.987 Ω
Rotor resistance	7.821 m Ω
Rotor leakage reactance	0.142 Ω
Rotor inertia	7.4 kgm ²

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสายไฟและหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ

Parameters	Value
Cable resistance	9.4 m Ω
Cable inductance	17 μ H
Transformer resistance	2.7 m Ω
Transformer inductance	47 μ H

4.2 การทดสอบแบบจำลอง

ก่อนการทดสอบแบบจำลองในกรณีต่างๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงาน โดยเริ่มจากหยุดนิ่งและหมุนไปจนกระทั่งความเร็วที่โรเตอร์สูงกว่าความเร็วซิงโครนัสในสถานะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการกำหนดเครื่องหมายของแรงบิดทางกลที่จ่ายให้กับโรเตอร์เป็นบวกตามสมการการหมุนที่ 3.6

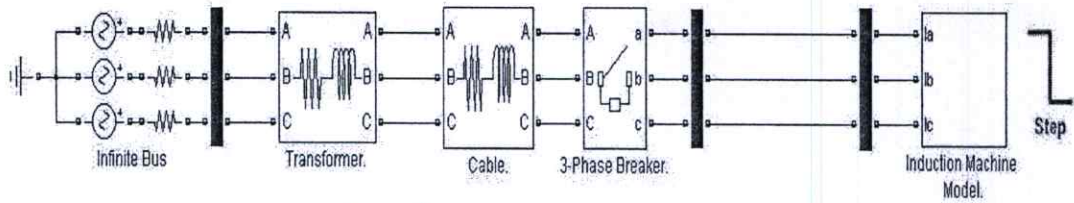
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด

เป็นการทดสอบเพื่อดูความสั่นพ้องว่าเมื่อเกิดสถานะชั่วคราวที่โรเตอร์ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่โรเตอร์แบบทันทีทันใดจะส่งผลอย่างไรกับปริมาณต่างๆที่สเตเตอร์ โดยระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งก่อนการเปลี่ยนแปลงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนด้วยสถานะไร้แรงบิดทางกลที่จ่ายเข้ามา จากนั้น ณ วินาทีที่ 4 จ่ายแรงบิดทางกลในลักษณะของสัญญาณขั้นบันไดขนาดเท่ากับพิคคของแรงบิดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9-4.13

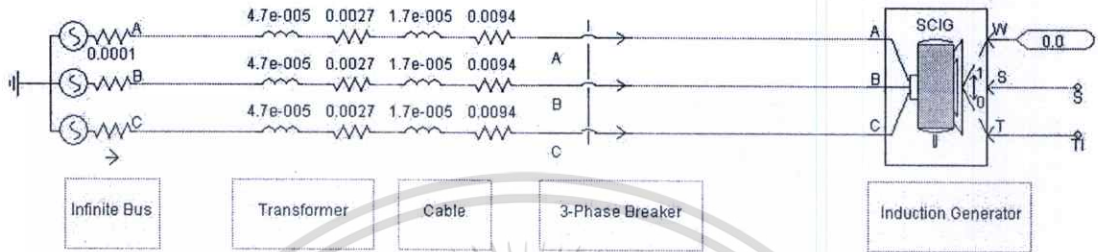


รูปที่ 4.2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

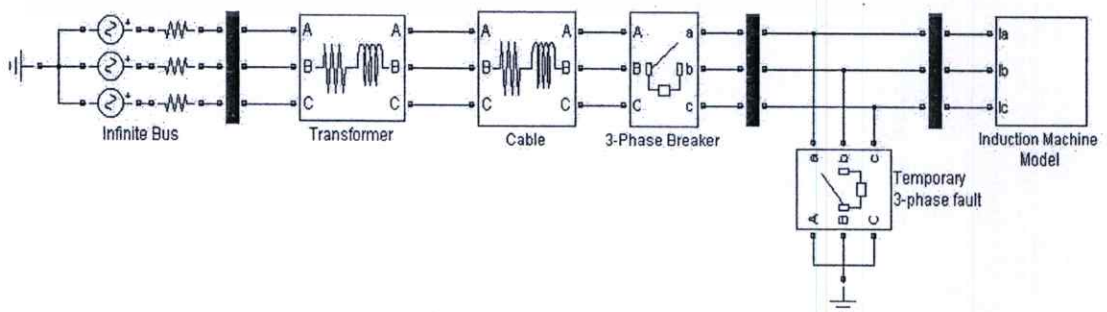


ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC

รูปที่ 4.2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด (ต่อ)

4.2.2 การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

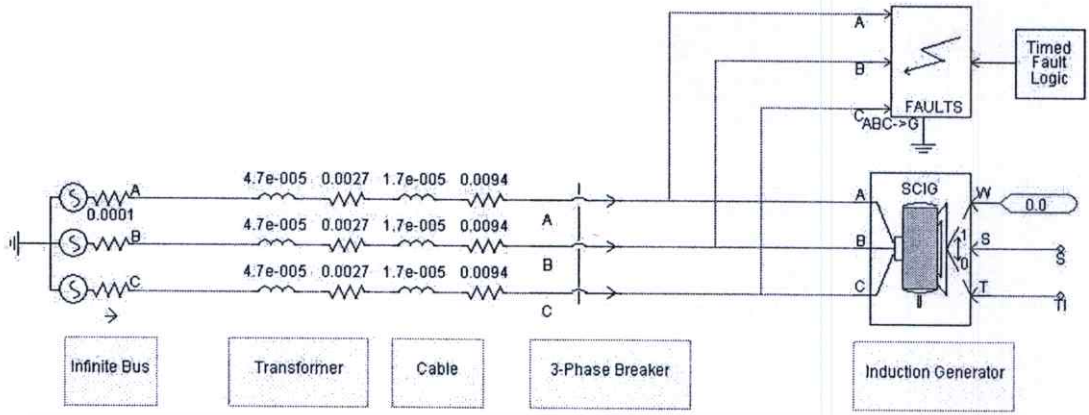
เป็นการทดสอบเพื่อดูความสัมพันธ์ว่าเมื่อเกิดสถานะชั่วคราวที่วงจรสเตเตอร์โดยตรงซึ่งในแบบจำลองลำดับที่ 3 ไม่ได้คิดผลของสถานะชั่วคราวที่สเตเตอร์จะส่งผลอย่างไรกับปริมาณต่างๆที่สเตเตอร์เอง โดย ณ วินาทีที่ 4.9 เกิดการลัดวงจร 3 เฟสขึ้นที่สเตเตอร์เป็นระยะเวลา 0.1 วินาทีหรือ 5 ลูกคลื่น ระหว่างช่วงเวลานี้เราถือว่าแรงบิดทางกลที่จ่ายเข้าที่โรเตอร์มีค่าคงที่เพราะการลัดวงจรเกิดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ [14] จากนั้น ณ วินาทีที่ 5 สัญญาณฟอลต์ได้ถูกตัดออกจากระบบ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลับเข้ามาต่ออยู่กับระบบตามเดิม ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14-4.21



ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

รูปที่ 4.3 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

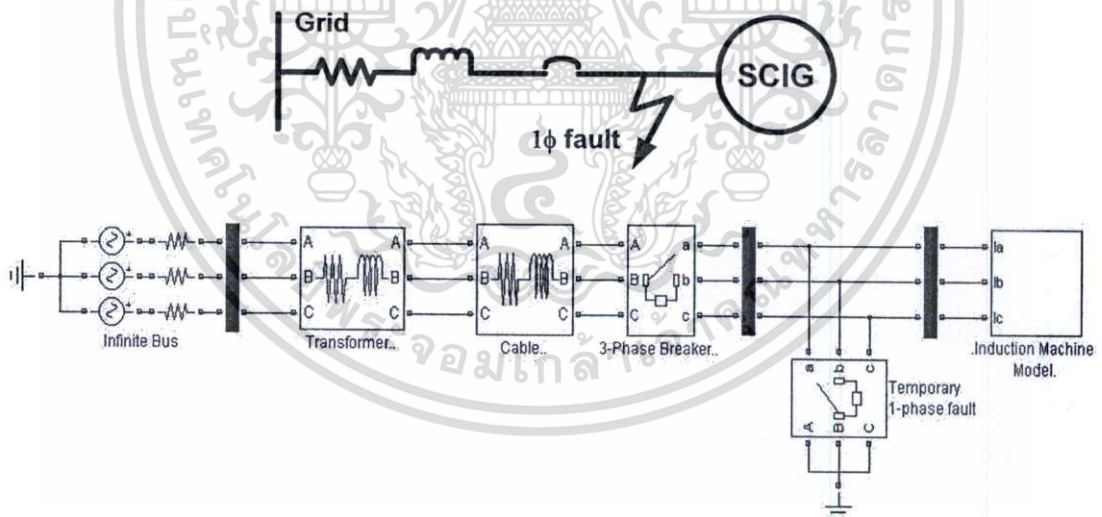


ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC

รูปที่ 4.3 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจร 3 เฟสที่สแตเตอร์ (ต่อ)

4.2.3 การลัดวงจร 1 เฟสที่สแตเตอร์

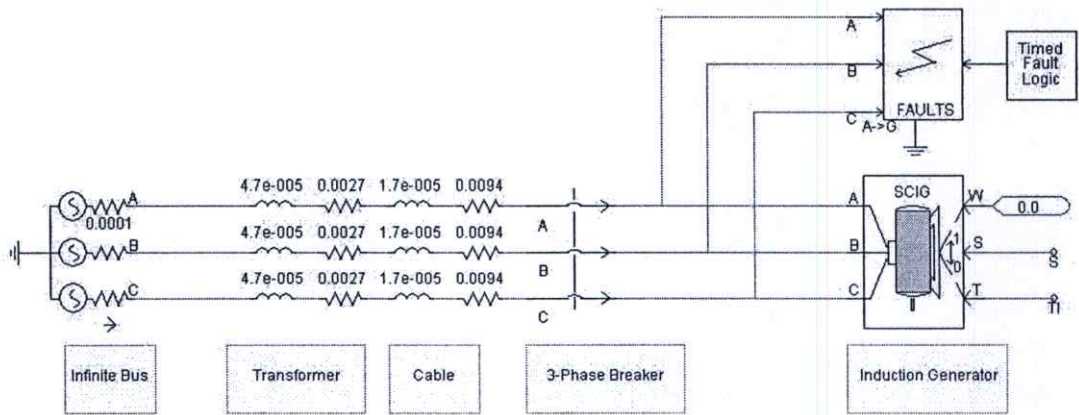
เป็นการทดสอบแบบจำลองคล้ายกับการลัดวงจร 3 เฟส แต่เปลี่ยนเป็นการลัดวงจร 1 เฟส โดยที่วินาทีที่ 4.9 เกิดการลัดวงจรขึ้นที่แรงดันเฟส A เป็นระยะเวลา 0.1 วินาที ดังรูปที่ 4.4 สำหรับผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22-4.29



ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

รูปที่ 4.4 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจร 1 เฟสที่สแตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

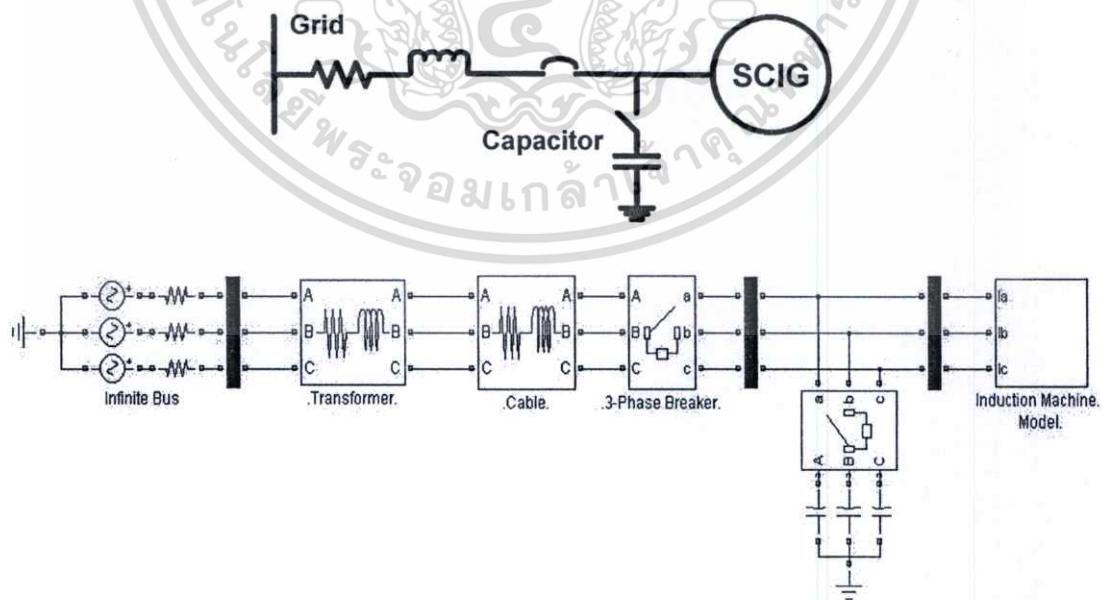


ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม PSCAD/EMTDC

รูปที่ 4.4 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจร 1 เฟสที่สแตเตอร์ (ต่อ)

4.2.4 การต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สแตเตอร์

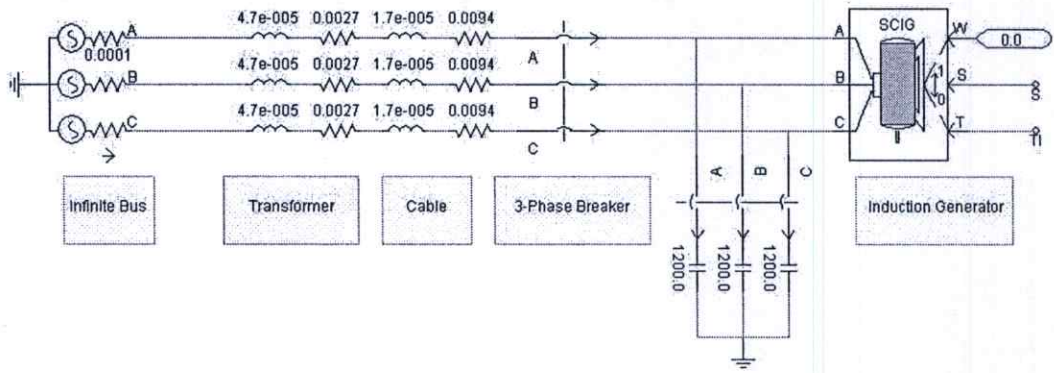
จุดประสงค์ของการต่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดึงมาจากระบบภายนอกเพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 4.5 เมื่อต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สแตเตอร์จะเกิดการแกว่งของสัญญาณด้วยความถี่ธรรมชาติ(natural frequency) บนสัญญาณของแรงดันและกระแส ซึ่งความถี่ธรรมชาตินี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุของระบบ [15] ผลตอบสนองของแรงดันและกระแสแสดงดังรูปที่ 4.30-4.35 สำหรับตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงค่าของความถี่ธรรมชาติซึ่งเป็นผลที่ได้จากแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบจริง [11]



ระบบที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

รูปที่ 4.5 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการต่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

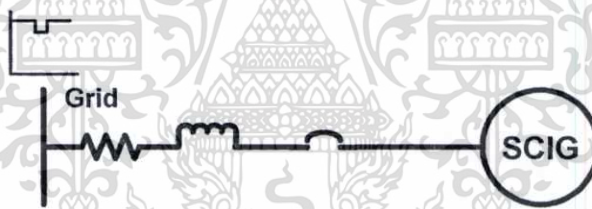


ระบบที่สร้างขึ้นจาก โปรแกรม PSCAD/EMTDC

รูปที่ 4.5 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการต่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์ (ต่อ)

4.2.5 การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (voltage sag)

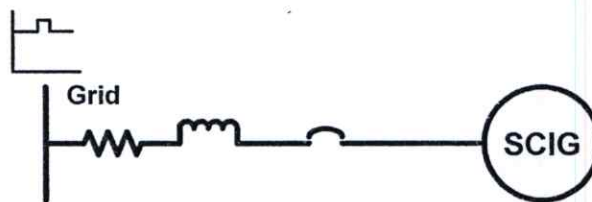
การทดสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่บัสอนันต์ ดังรูปที่ 4.6 แทนการเกิดแรงดันตก ณ จุดใดๆ ในระบบไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่อมายังบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยแรงดันตกนี้จะลดลงจากแรงดันปกติ 20 % เป็นระยะเวลา 0.1 วินาที ดังรูปที่ 4.36-4.43



รูปที่ 4.6 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่บัสอนันต์

4.2.6 การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ (voltage swell)

การทดสอบการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะที่บัสอนันต์ ดังรูปที่ 4.7 แทนการเกิดแรงดันเกิน ณ จุดใดๆ ในระบบไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่อมายังบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งแรงดันเกินนี้จะเพิ่มขึ้นจากแรงดันปกติ 20 % เป็นระยะเวลา 0.1 วินาที ดังรูปที่ 4.44-4.51

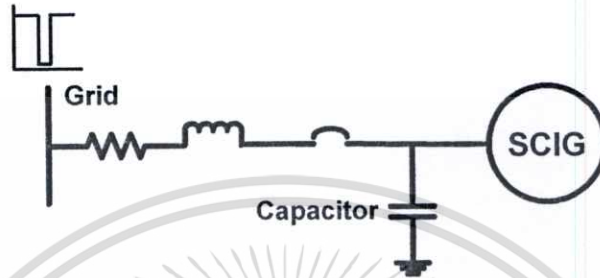


รูปที่ 4.7 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะที่บัสอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 การลัดวงจรในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

กรณีศึกษานี้จะดูถึงผลกระทบจากกระแสของตัวเก็บประจุที่ส่งผลกระทบต่อมายังกระแสลัดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อเกิดการลัดวงจรที่บัสบัสนี้ดังรูปที่ 4.8 โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.52-4.63

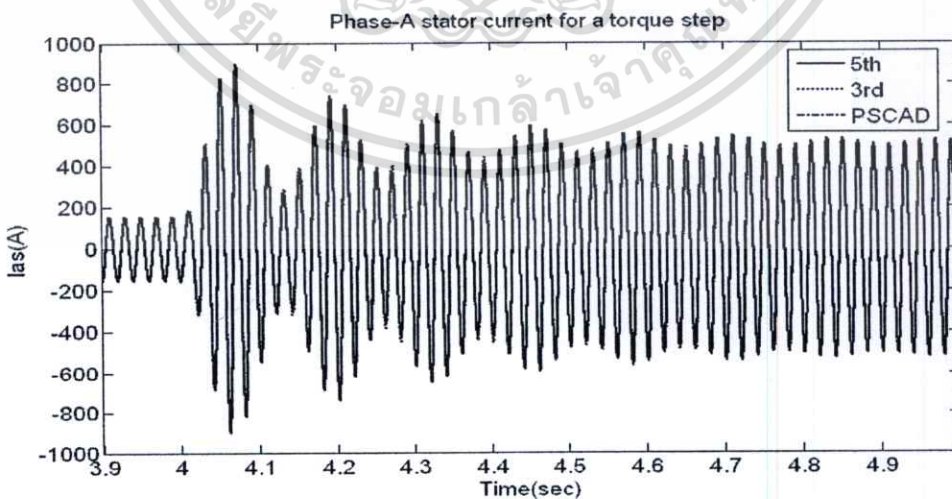


รูปที่ 4.8 ระบบที่ใช้ในการทดสอบการเกิดการลัดวงจรในระบบที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

4.3 ผลการทดสอบแบบจำลอง

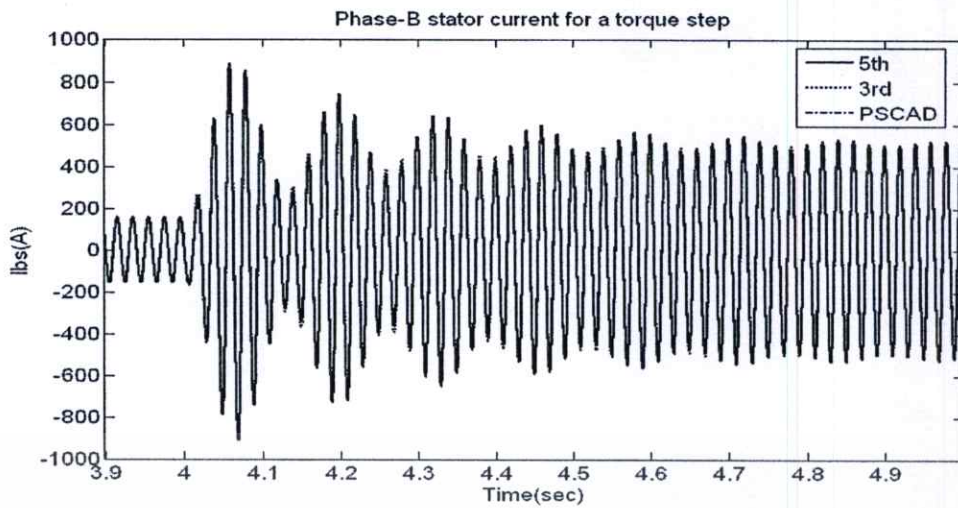
การทดสอบแบบจำลองจะเปรียบเทียบผลที่ได้ของแต่ละสถานะ ระหว่างแบบจำลองลำดับที่ 5 และแบบจำลองลำดับที่ 3 และเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองลำดับที่ 5 ผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก โปรแกรม PSCAD/EMTDC ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ทั่วไปในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด

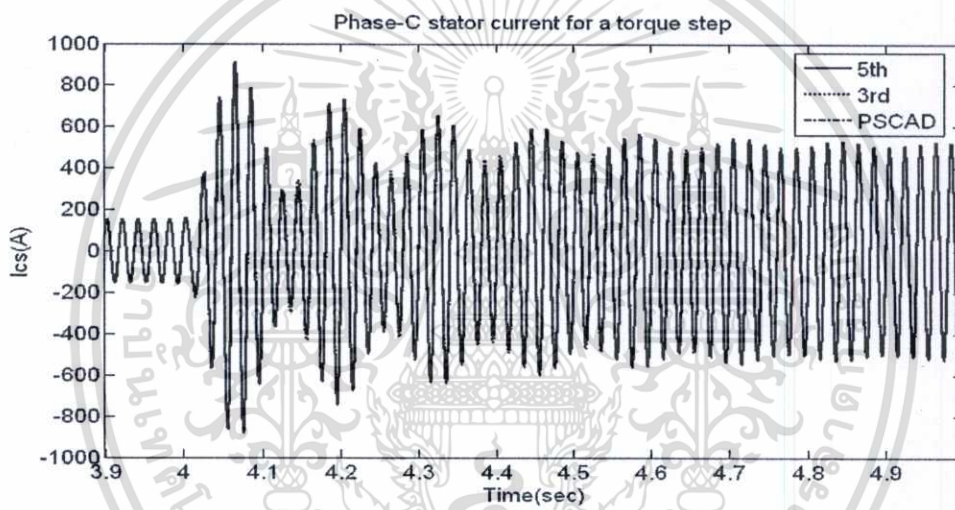


รูปที่ 4.9 กระแสเตเตอร์เฟส A ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์

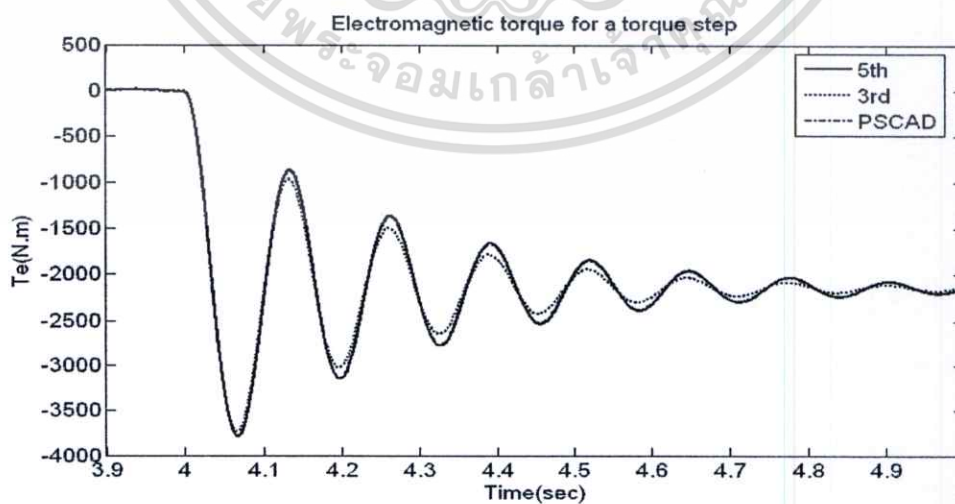
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์

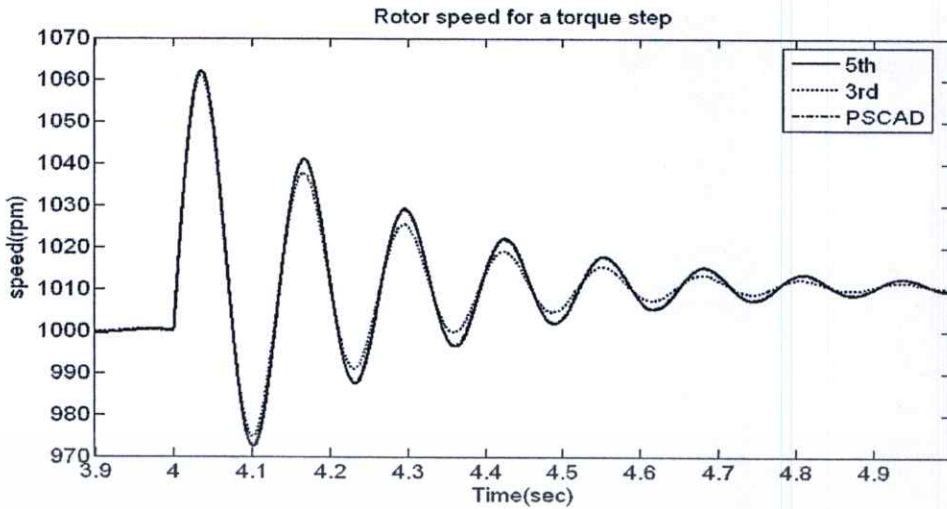


รูปที่ 4.11 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์



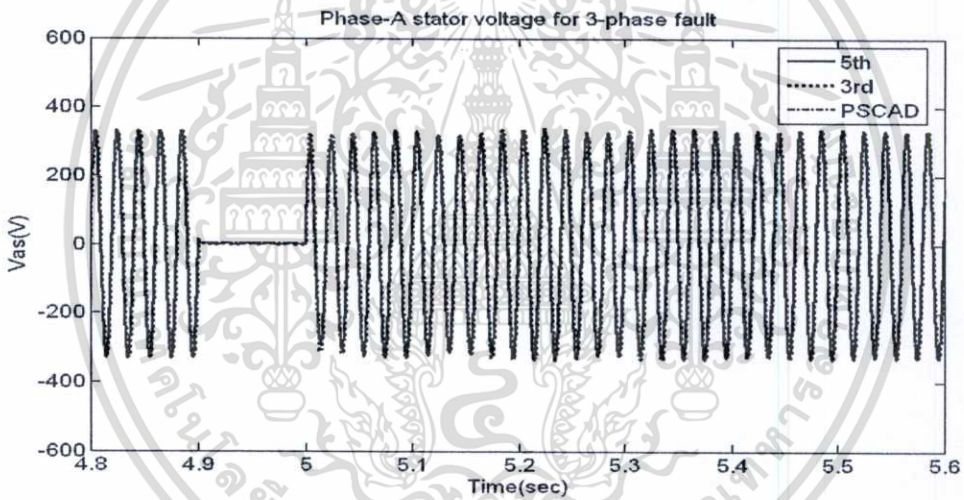
รูปที่ 4.12 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

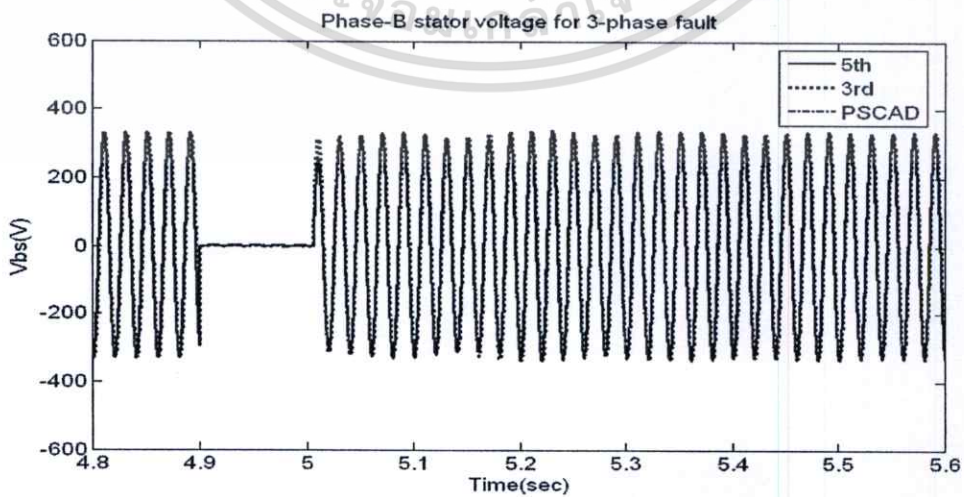


รูปที่ 4.13 ความเร็วโรเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์

4.3.2 การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

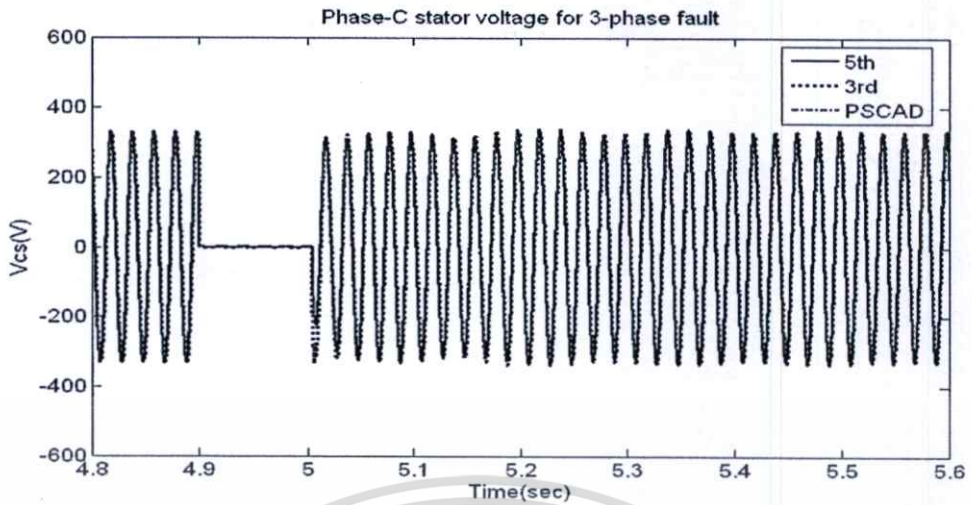


รูปที่ 4.14 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

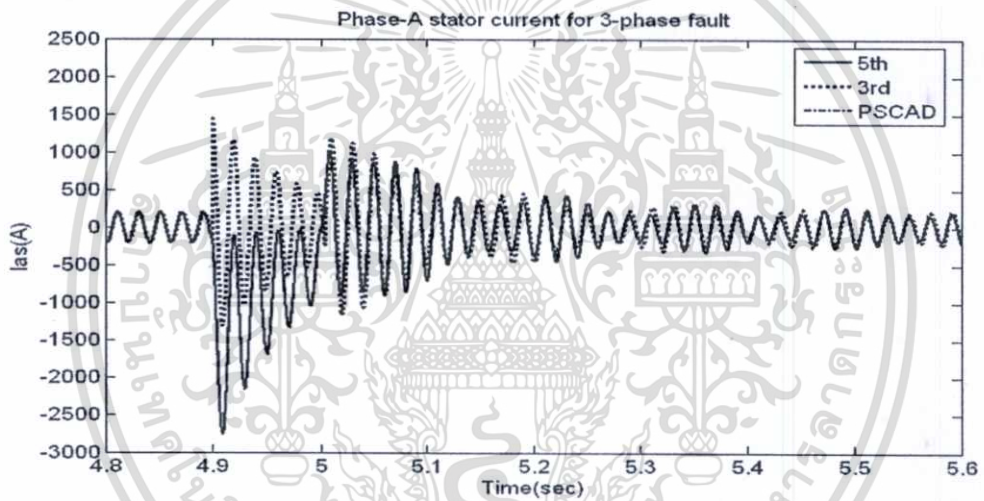


รูปที่ 4.15 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

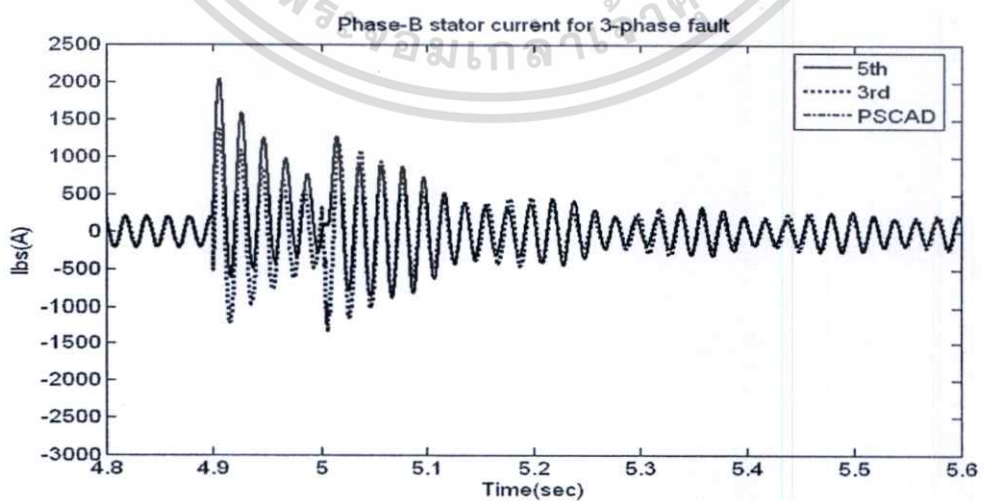
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

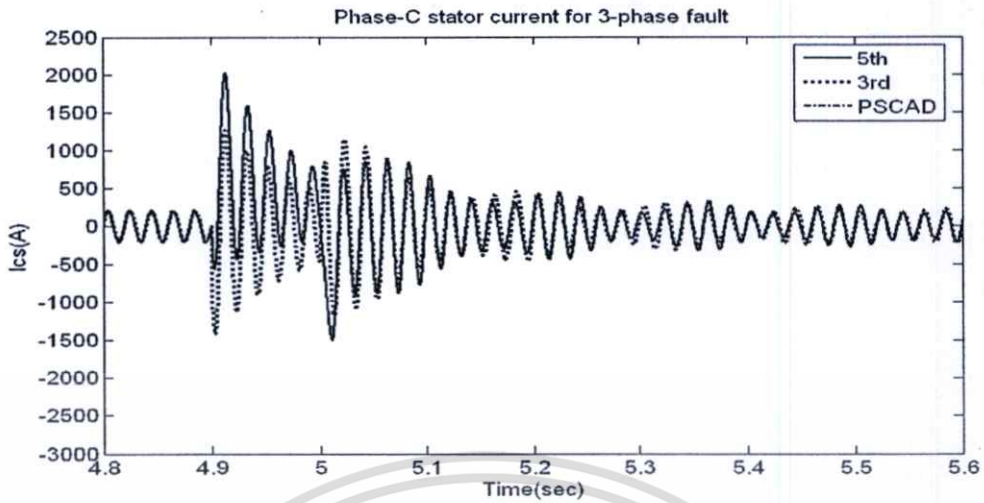


รูปที่ 4.17 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

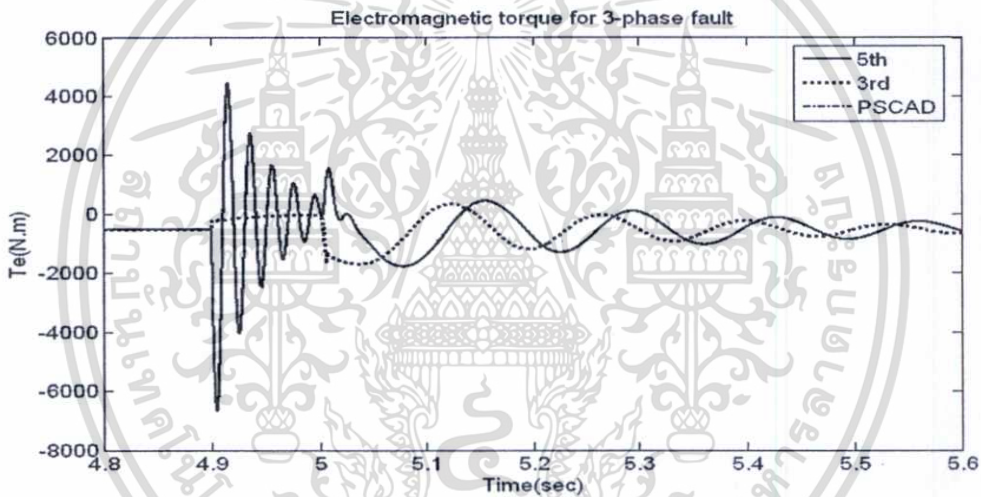


รูปที่ 4.18 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

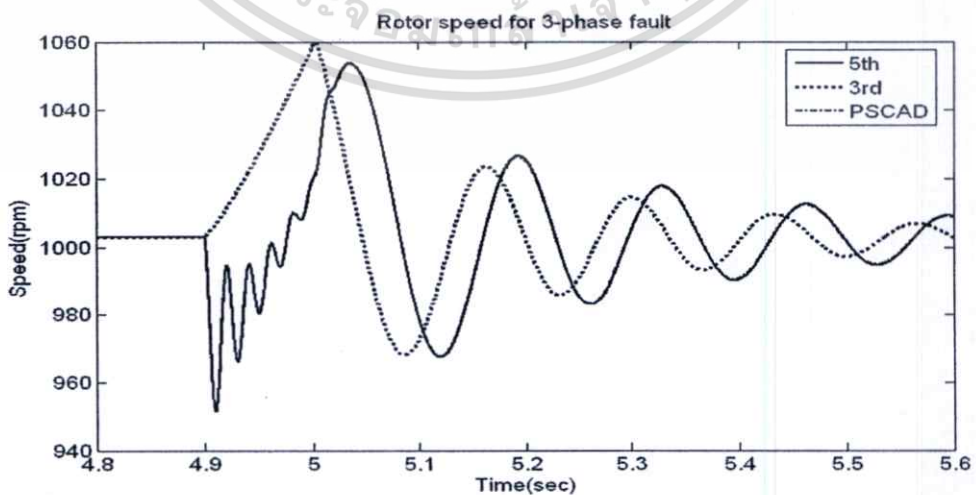
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์



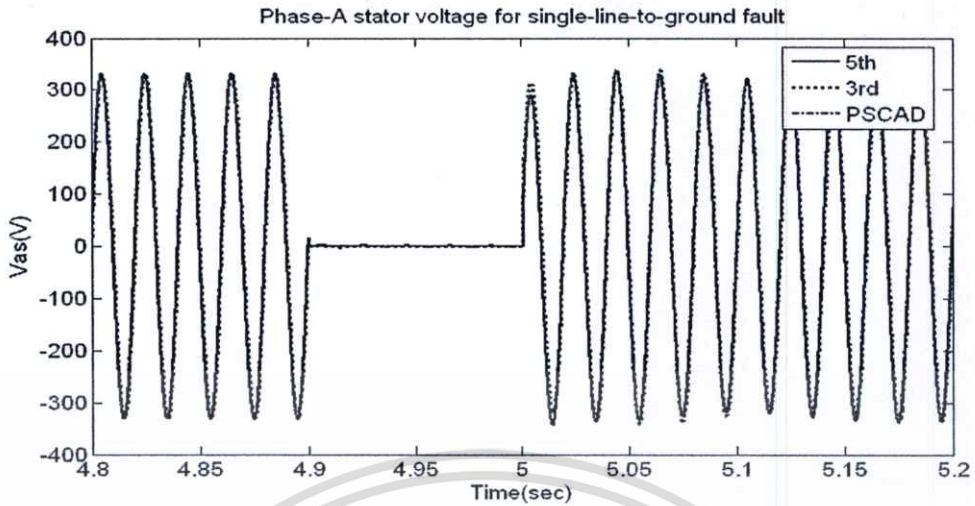
รูปที่ 4.20 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์



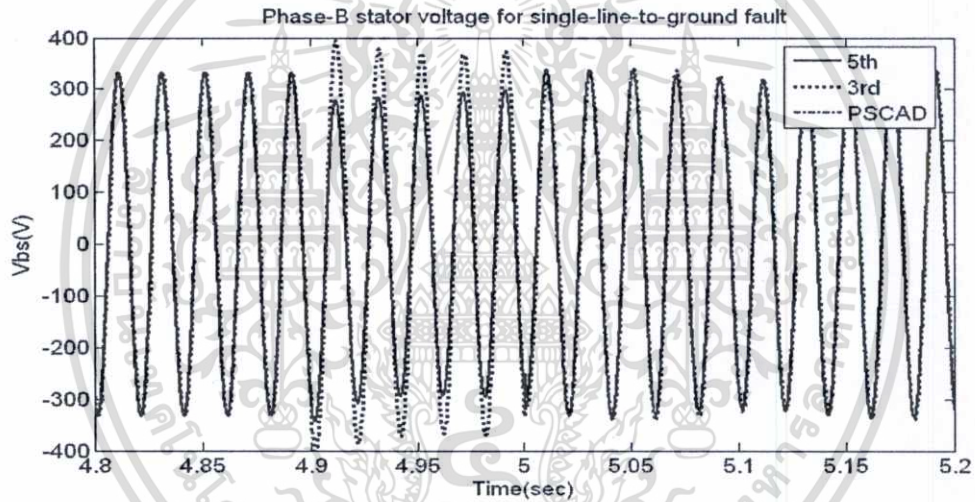
รูปที่ 4.21 ความเร็วโรเตอร์ของการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

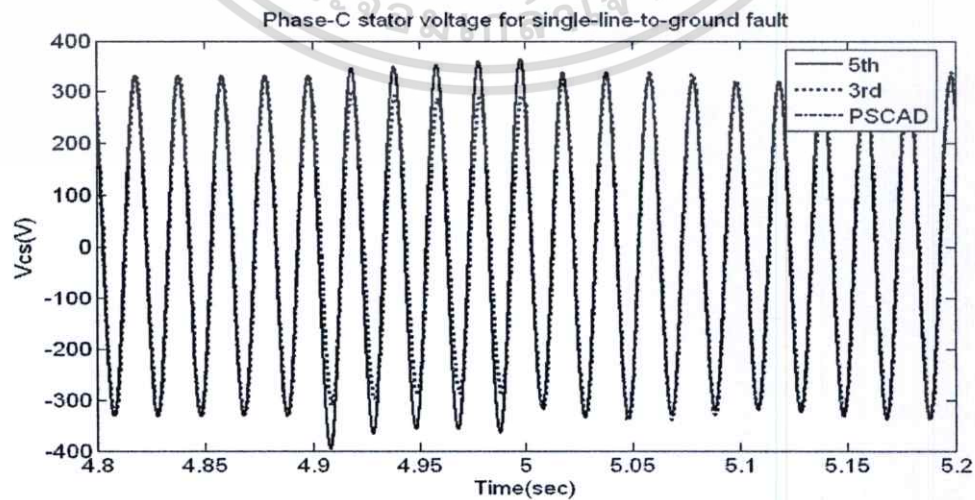
4.3.3 การลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์



รูปที่ 4.22 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

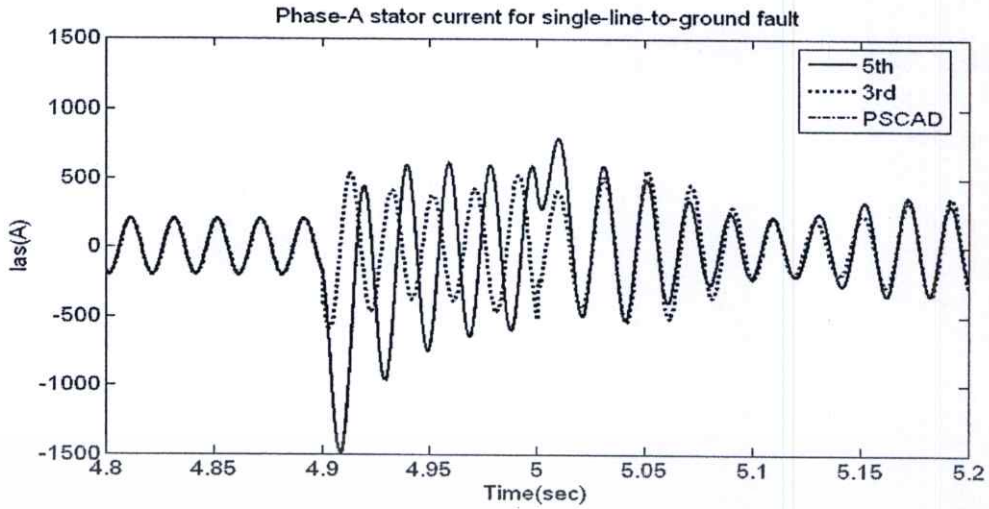


รูปที่ 4.23 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

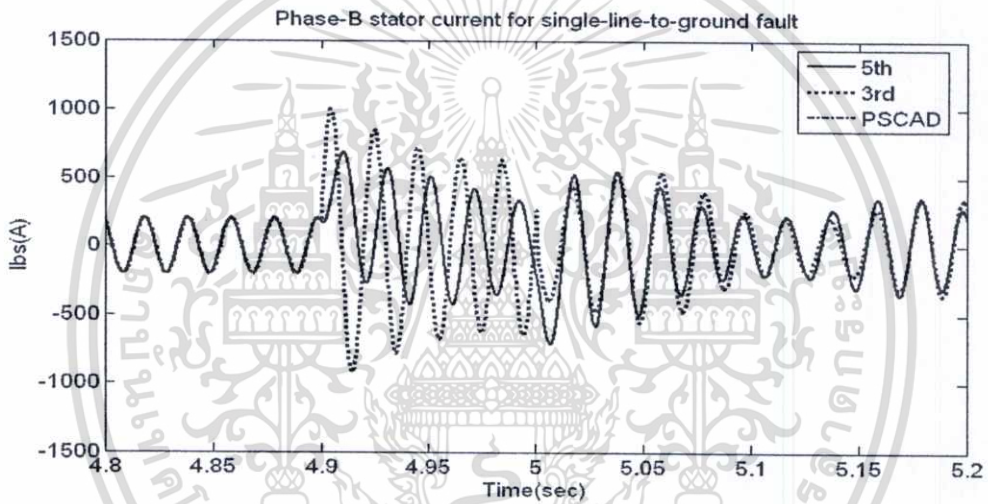


รูปที่ 4.24 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

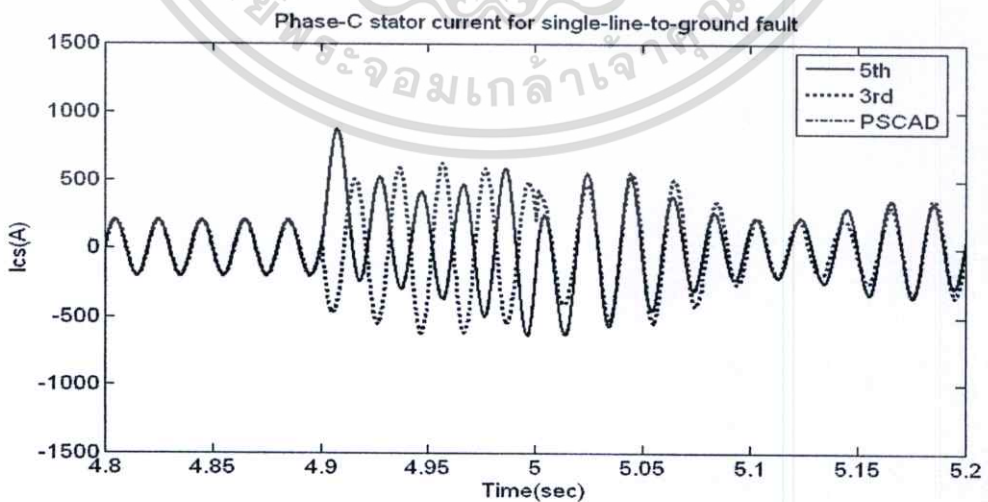
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

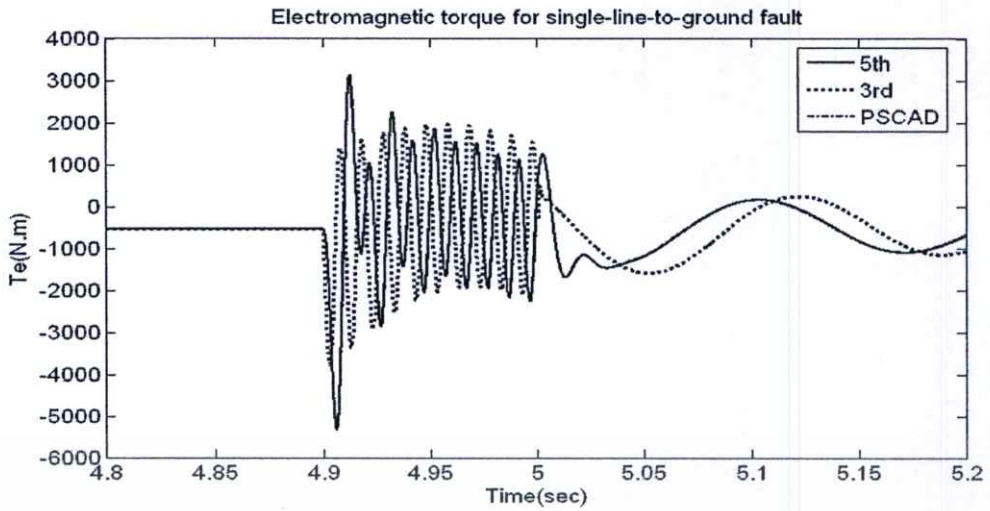


รูปที่ 4.26 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

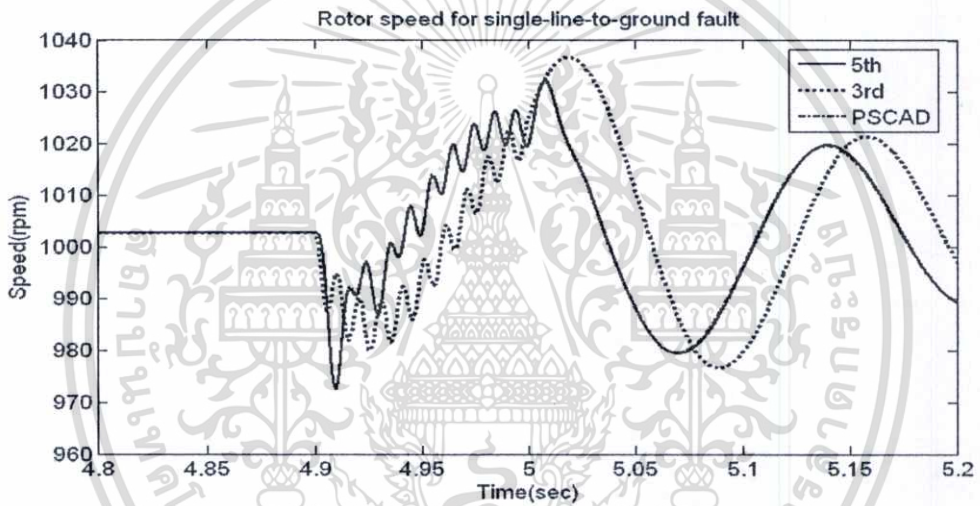


รูปที่ 4.27 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

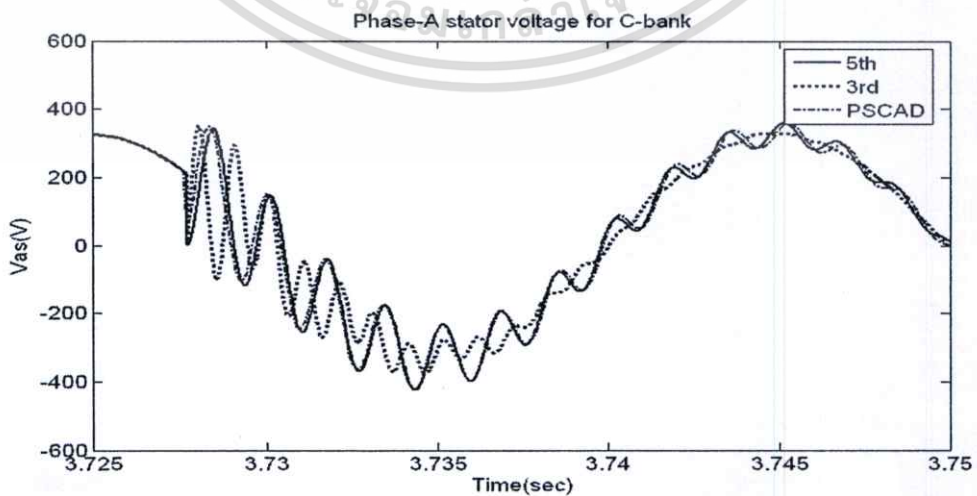


รูปที่ 4.28 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์



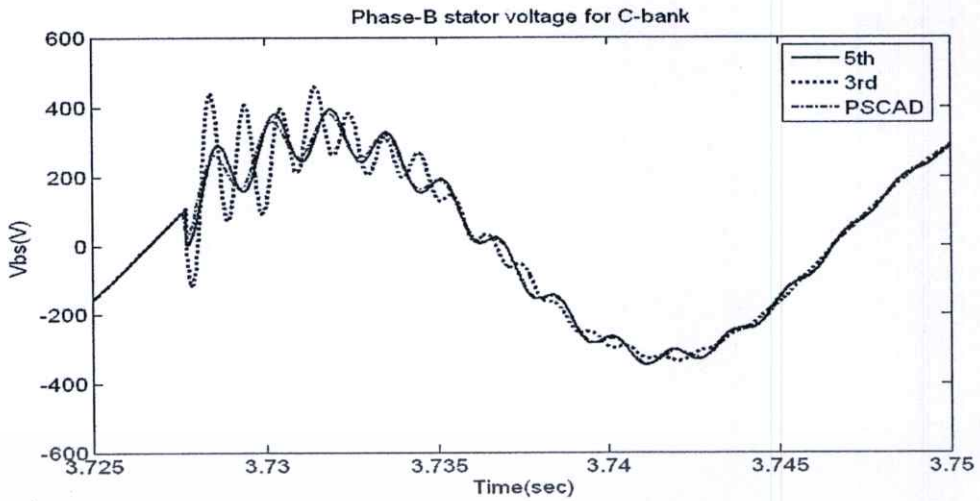
รูปที่ 4.29 ความเร็วโรเตอร์ของการลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์

4.3.4 การต่อตัวเก็บประจุที่สเตเตอร์

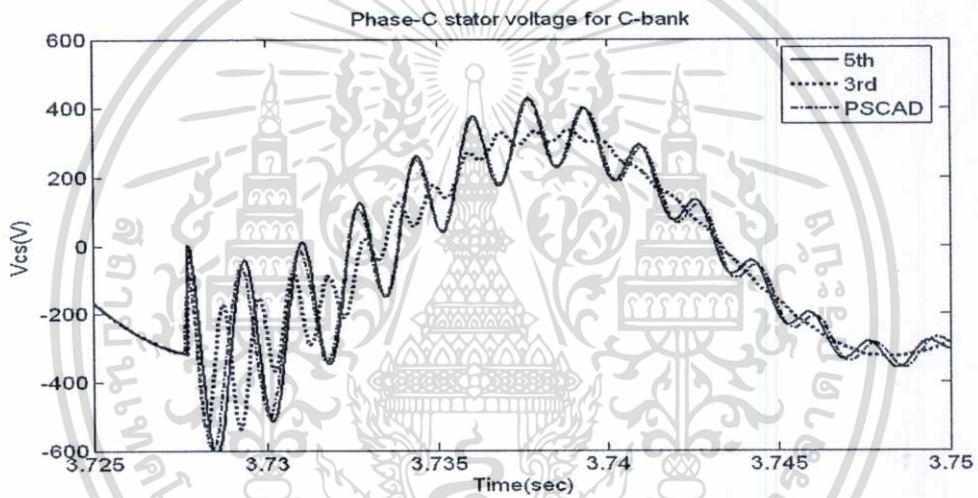


รูปที่ 4.30 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์

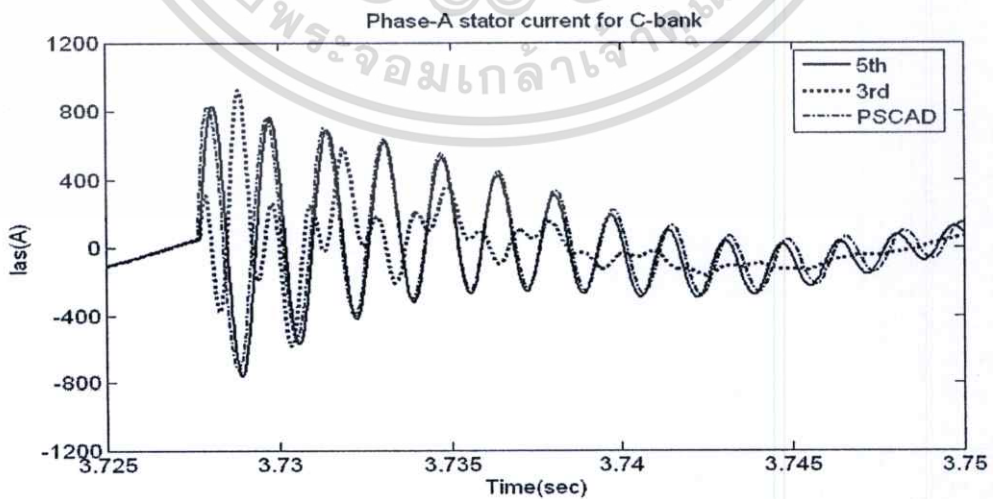
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์

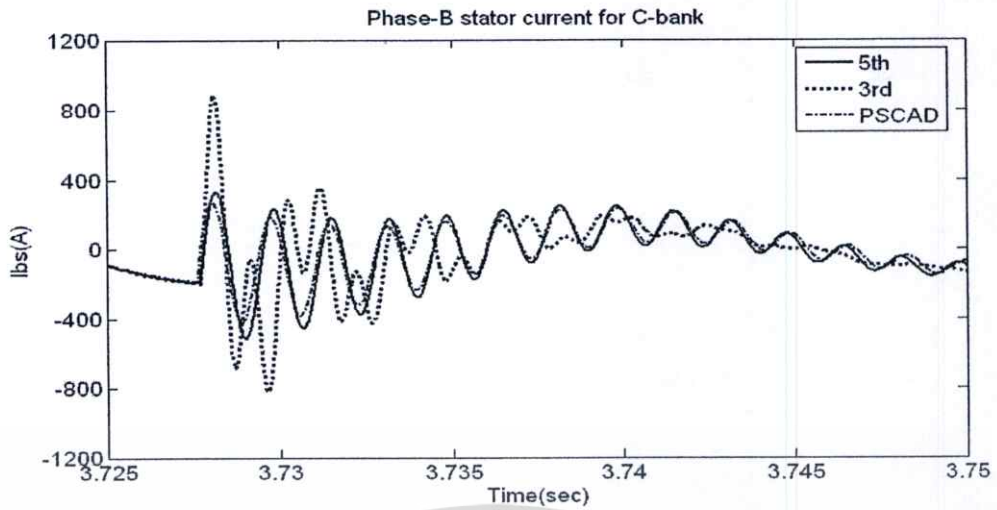


รูปที่ 4.32 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์

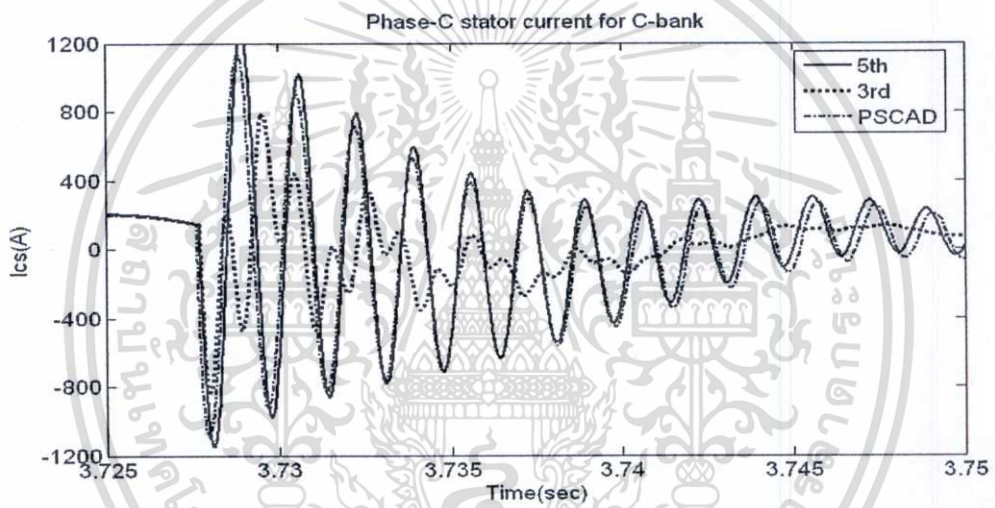


รูปที่ 4.33 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์



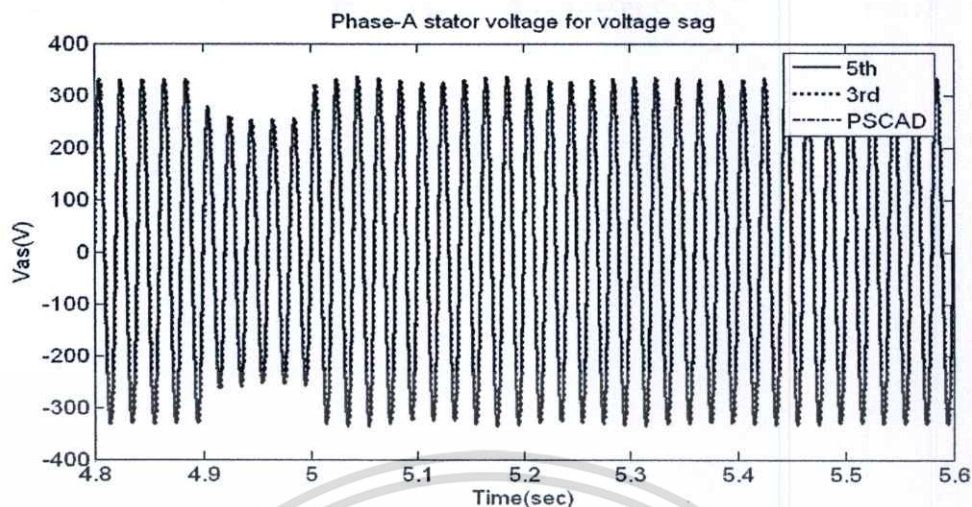
รูปที่ 4.35 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบความถี่ของการแกว่ง

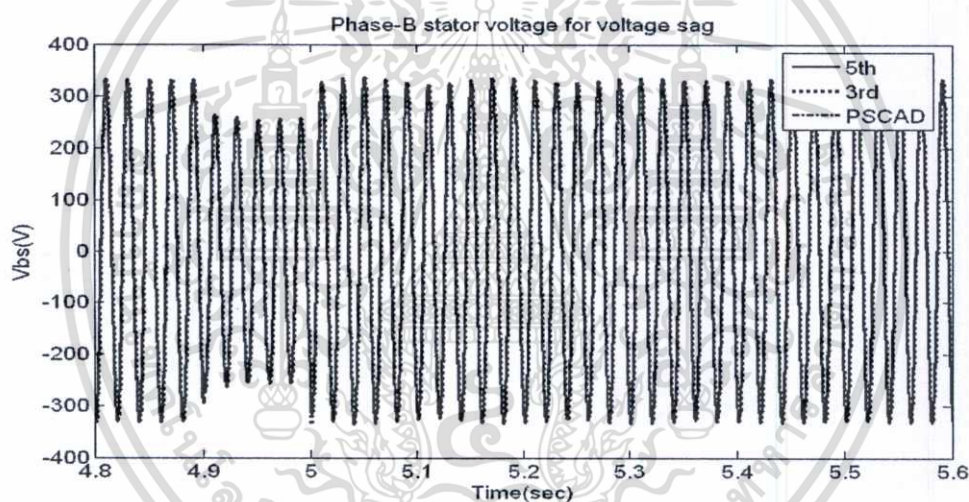
วัดจริง[11]	PSCAD/EMTDC	ผลจาก 5 th	ผลจาก 3 rd
590 Hz	588 Hz	588 Hz	Non-sinusoidal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

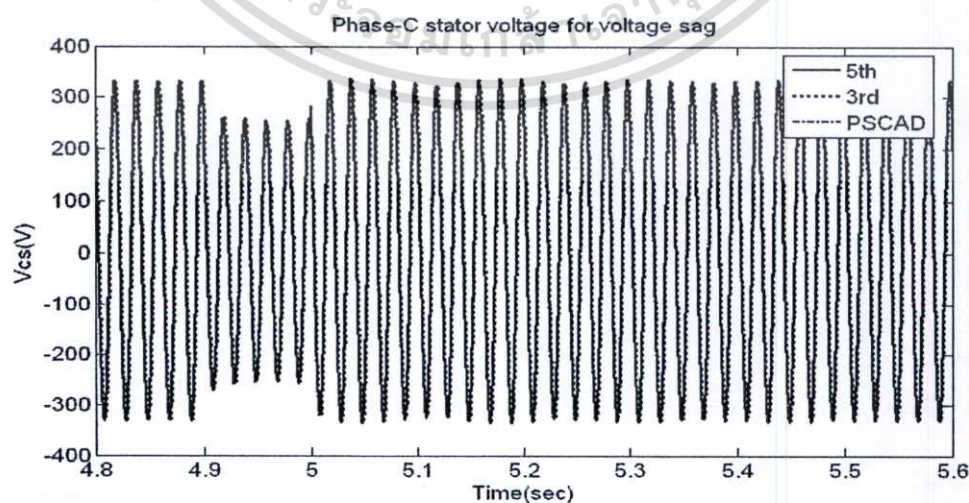
4.3.5 การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (voltage sag)



รูปที่ 4.36 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

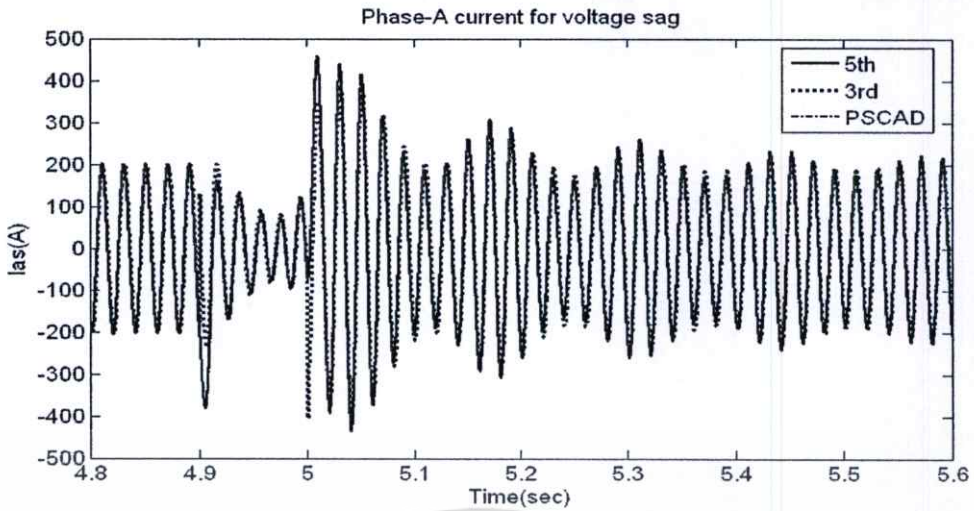


รูปที่ 4.37 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

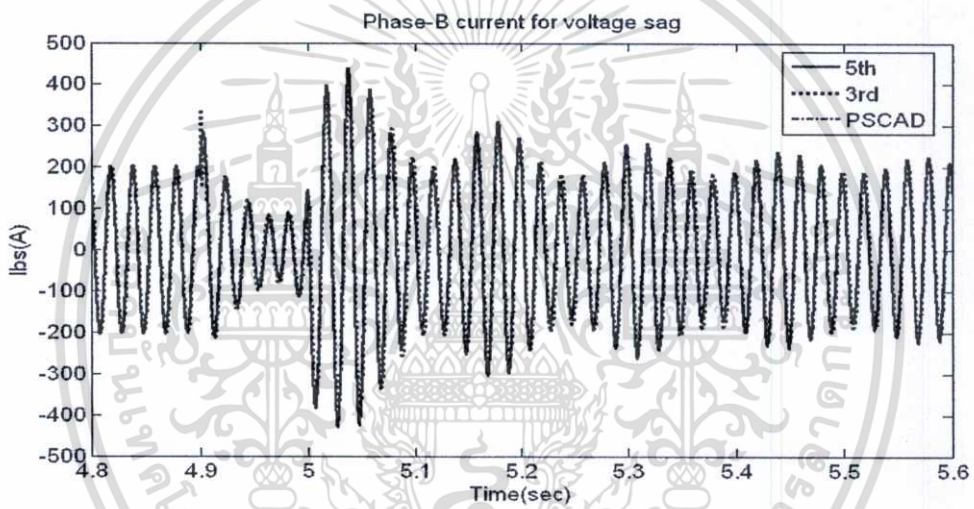


รูปที่ 4.38 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

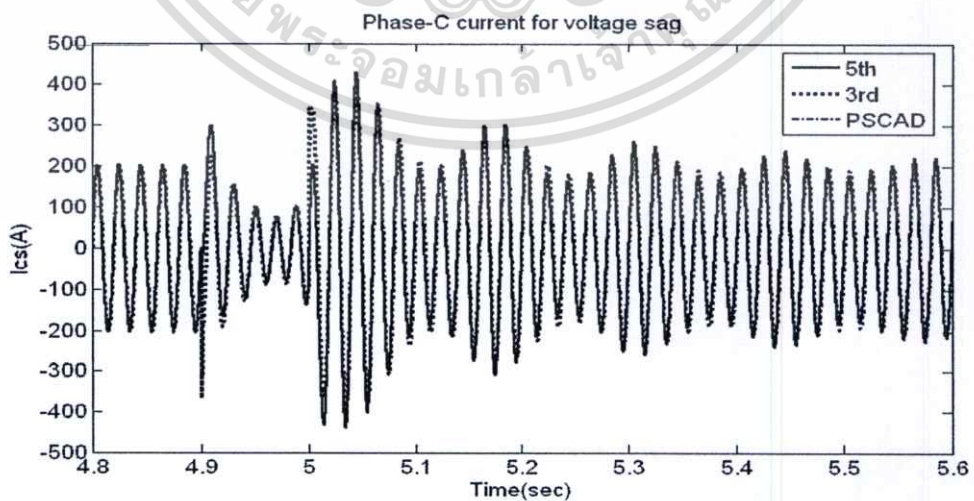
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

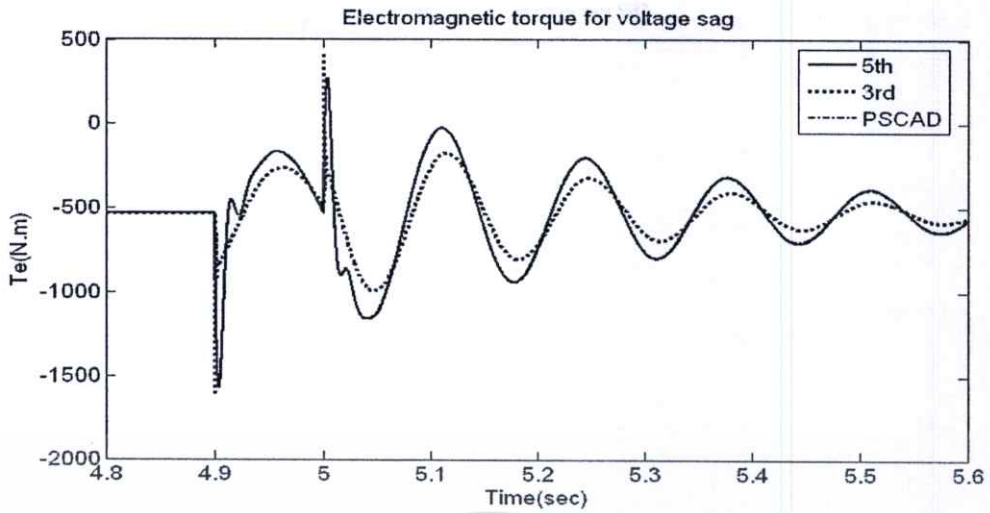


รูปที่ 4.40 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

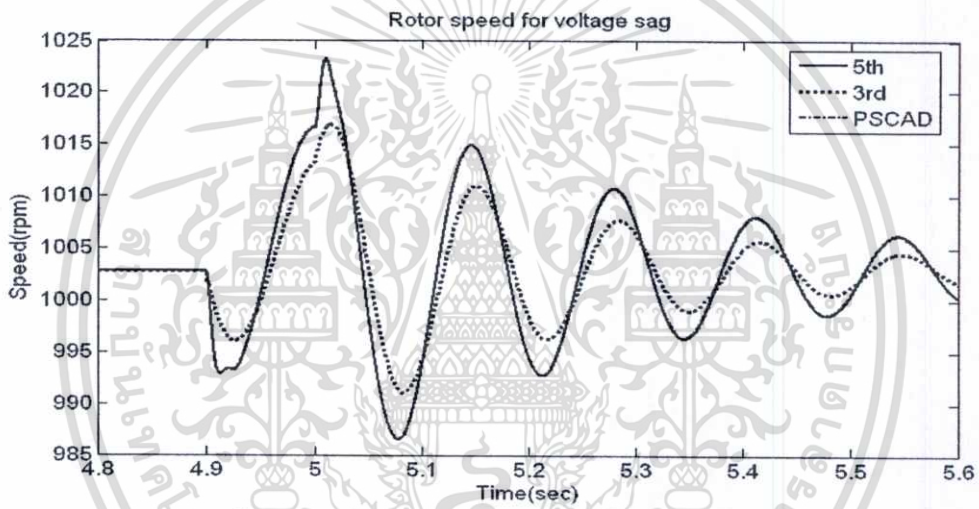


รูปที่ 4.41 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

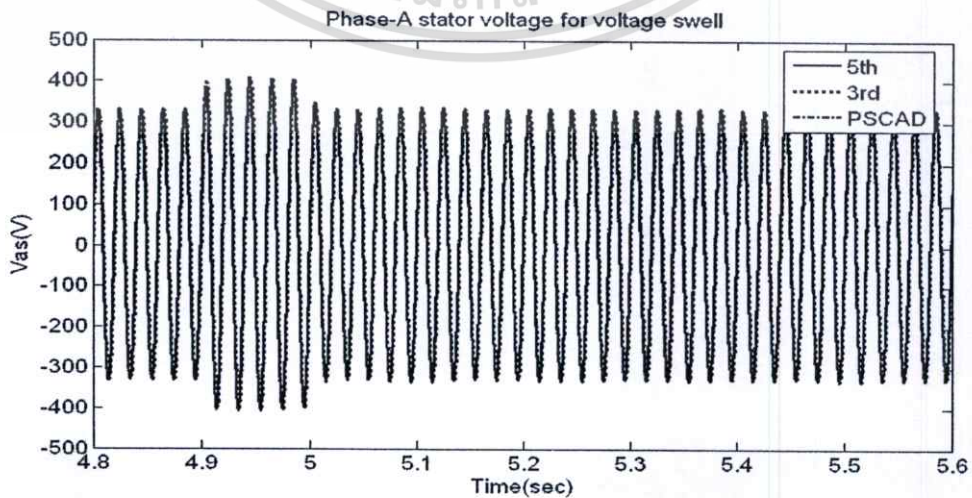


รูปที่ 4.42 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ



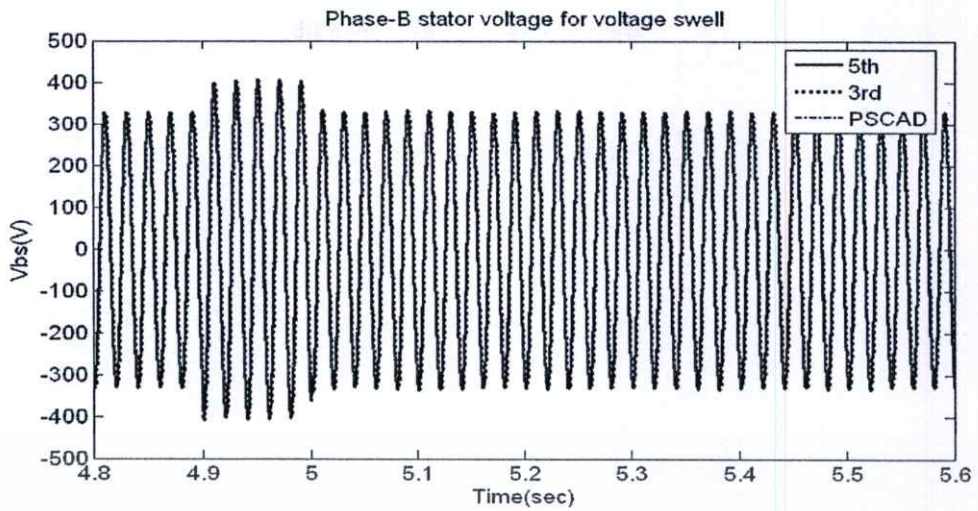
รูปที่ 4.43 ความเร็วโรเตอร์ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

4.3.6 การเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ (voltage swell)

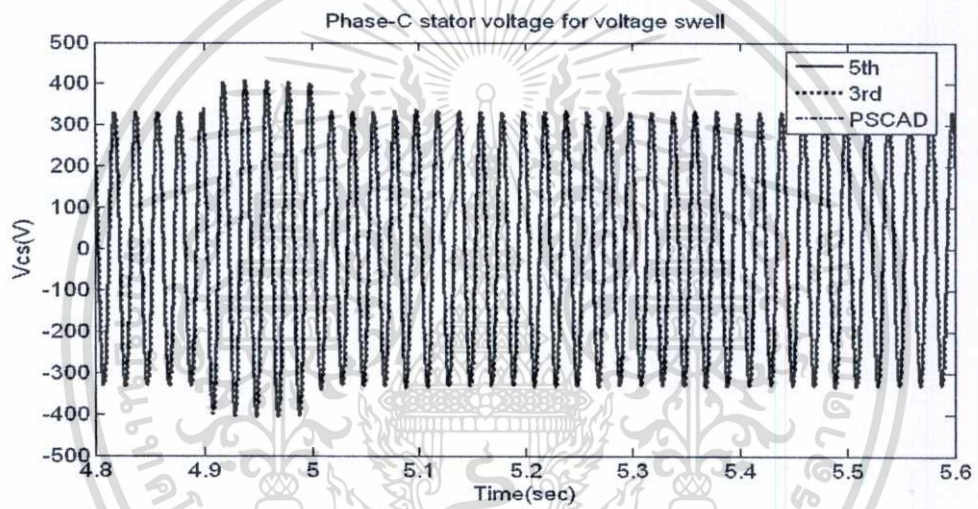


รูปที่ 4.44 แรงดันสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

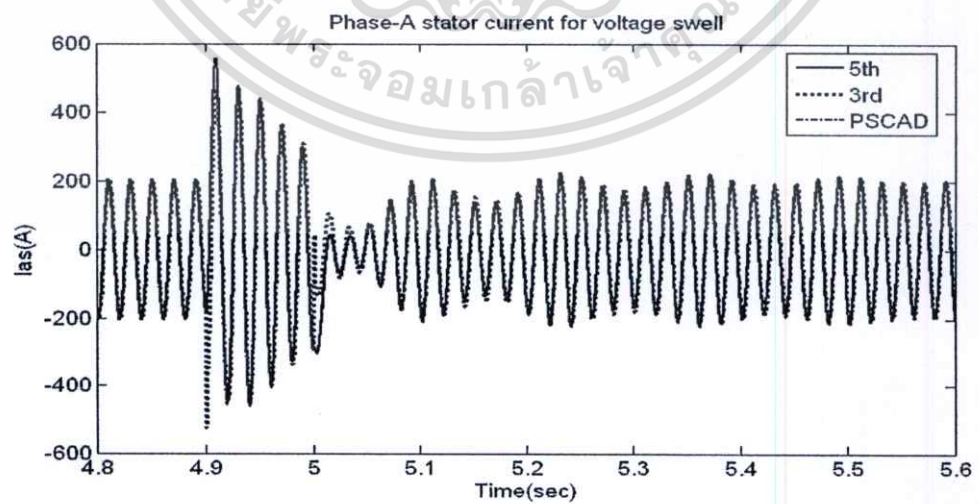
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 แรงดันสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

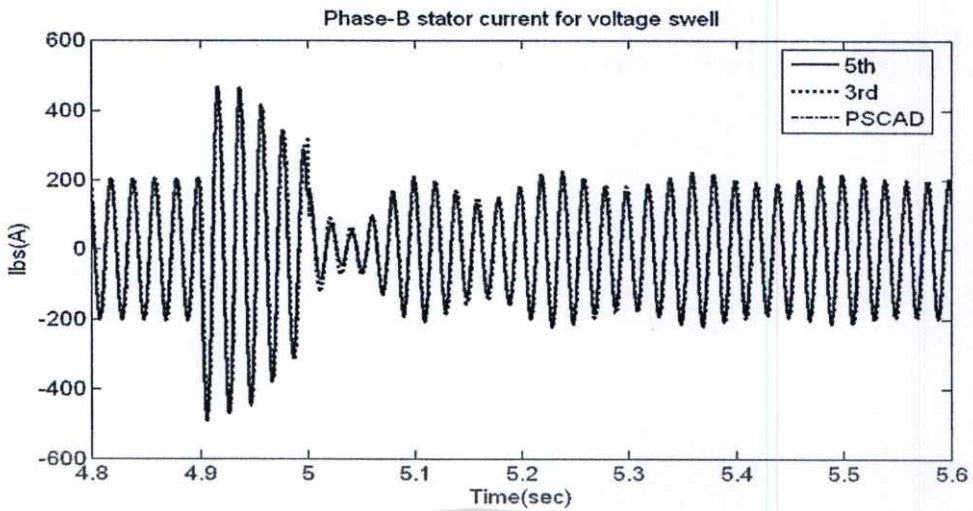


รูปที่ 4.46 แรงดันสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

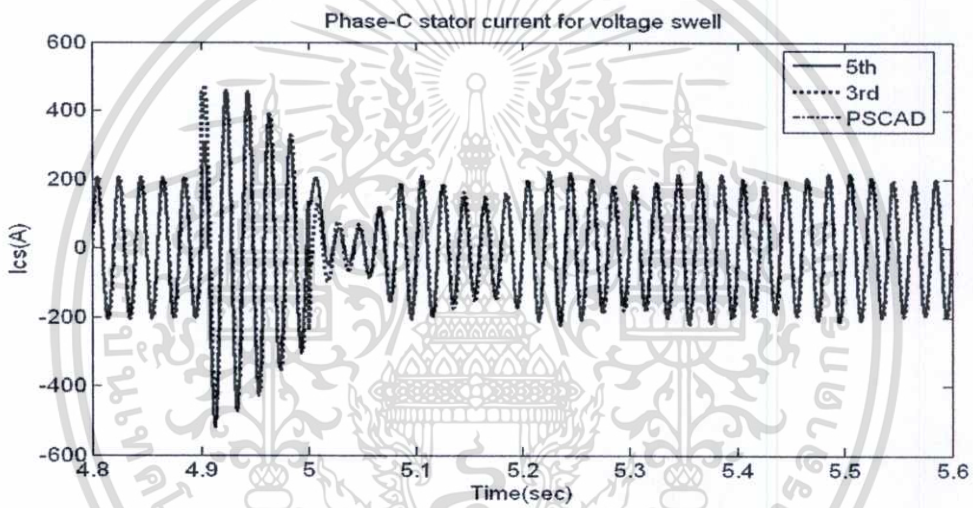


รูปที่ 4.47 กระแสสเตเตอร์เฟส A ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

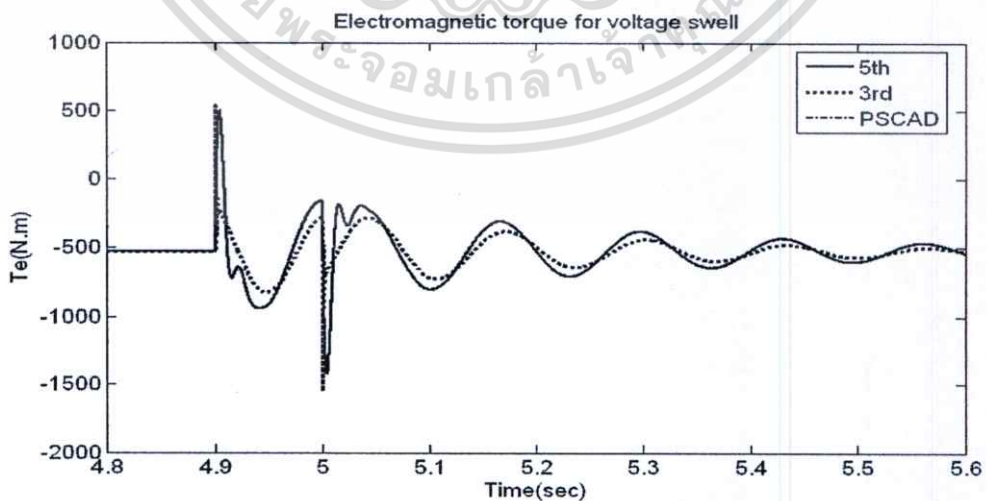
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 กระแสสเตเตอร์เฟส B ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

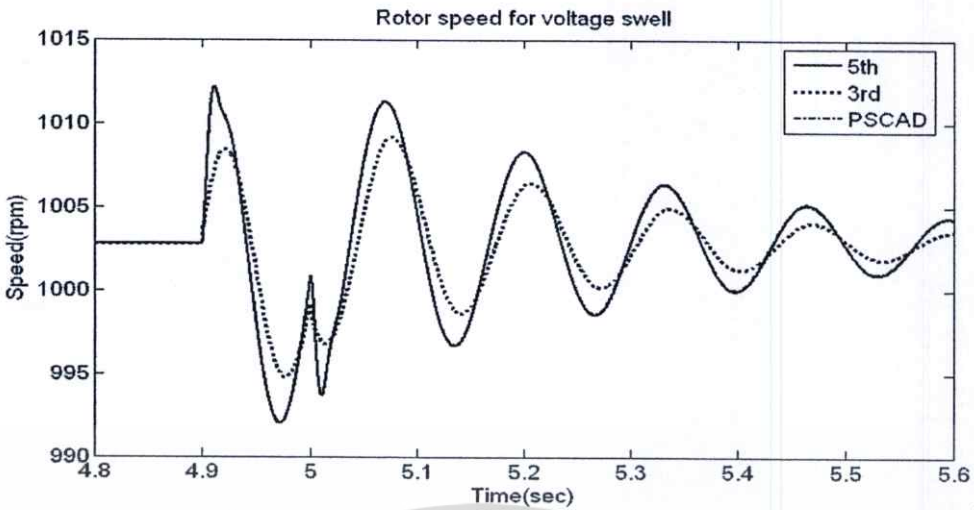


รูปที่ 4.49 กระแสสเตเตอร์เฟส C ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ



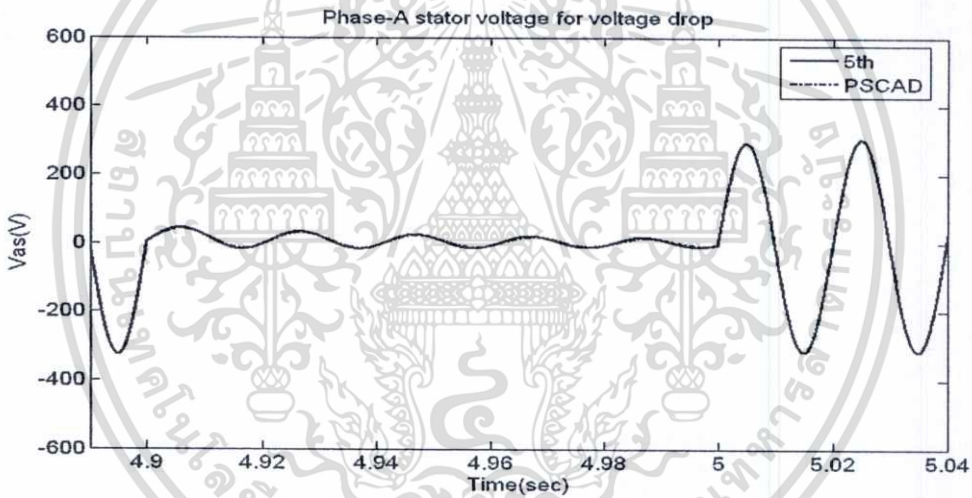
รูปที่ 4.50 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

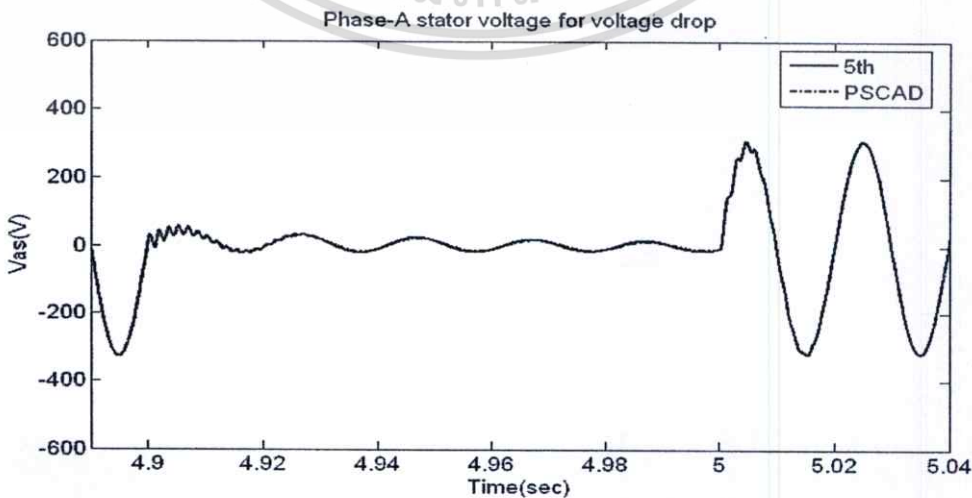


รูปที่ 4.51 ความเร็วโรเตอร์ของการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ

4.3.7 การลัดวงจรในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

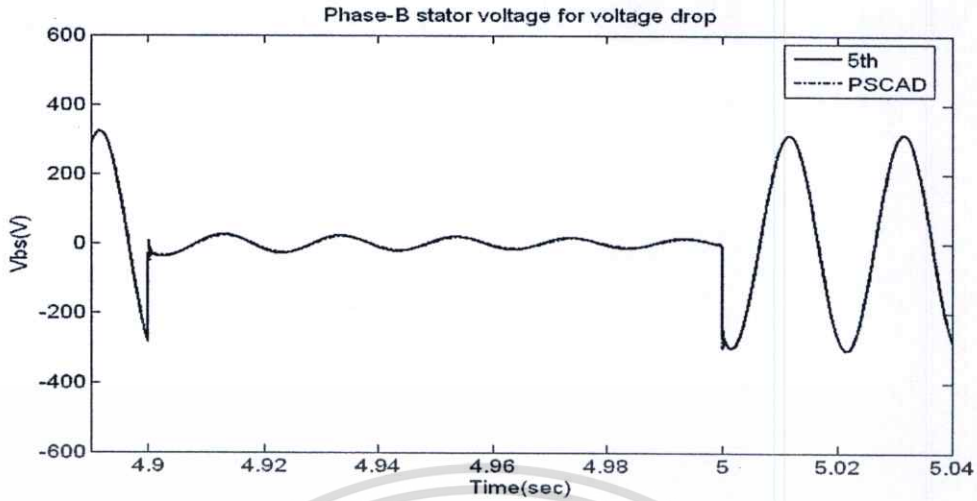


รูปที่ 4.52 แรงดันสเตเตอร์เฟส A (ไม่มีตัวเก็บประจุ)

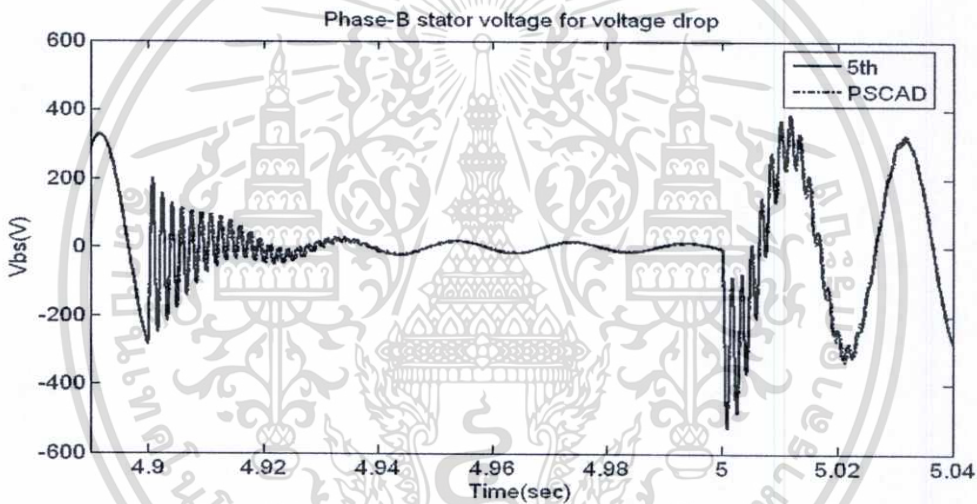


รูปที่ 4.53 แรงดันสเตเตอร์เฟส A (มีตัวเก็บประจุ)

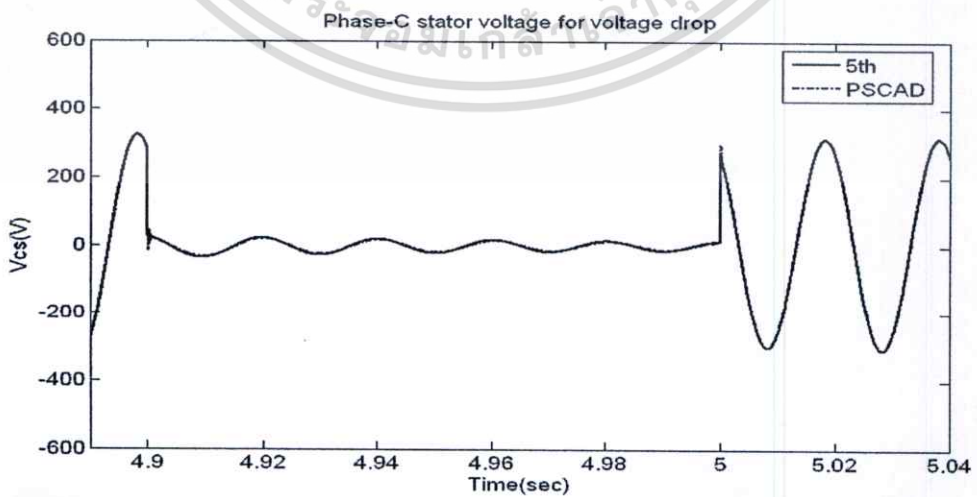
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 แรงดันสเตเตอร์เฟส B (ไม่มีตัวเก็บประจุ)

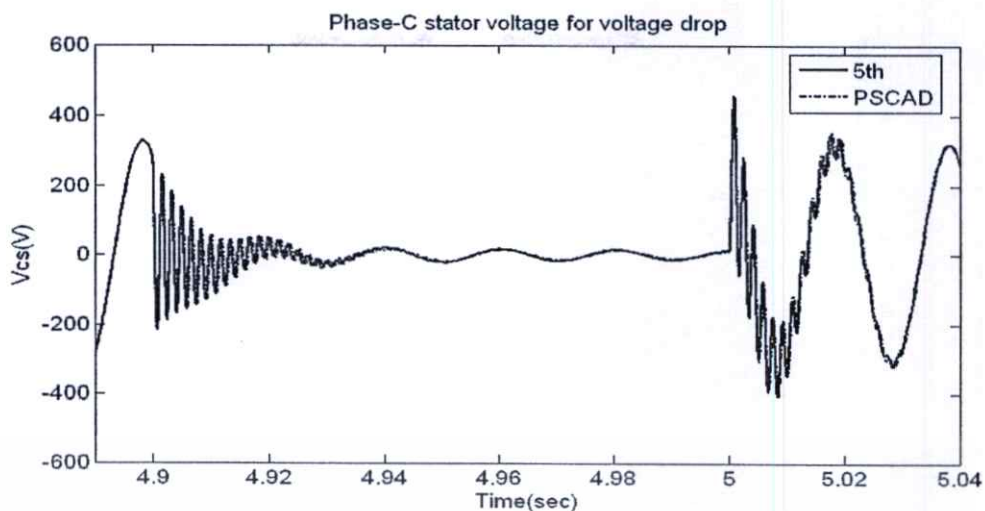


รูปที่ 4.55 แรงดันสเตเตอร์เฟส B (มีตัวเก็บประจุ)

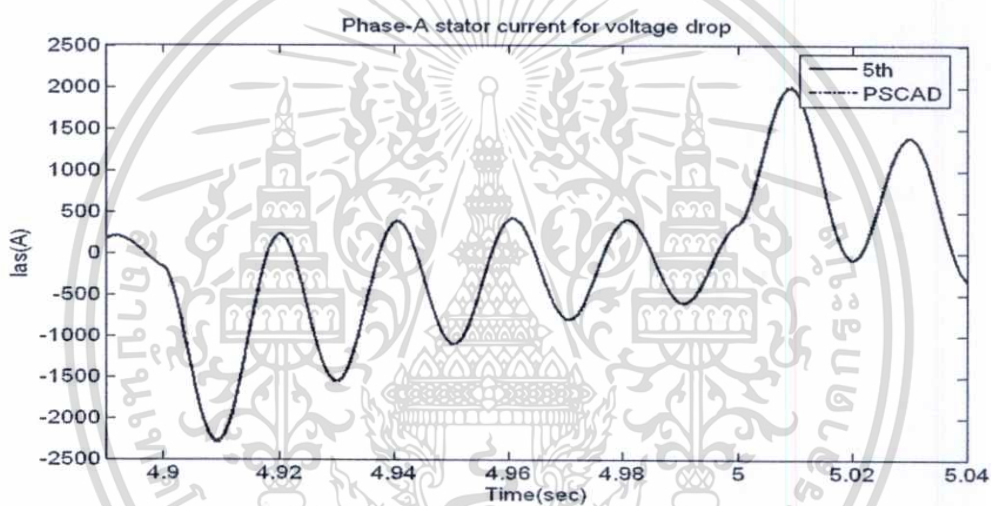


รูปที่ 4.56 แรงดันสเตเตอร์เฟส C (ไม่มีตัวเก็บประจุ)

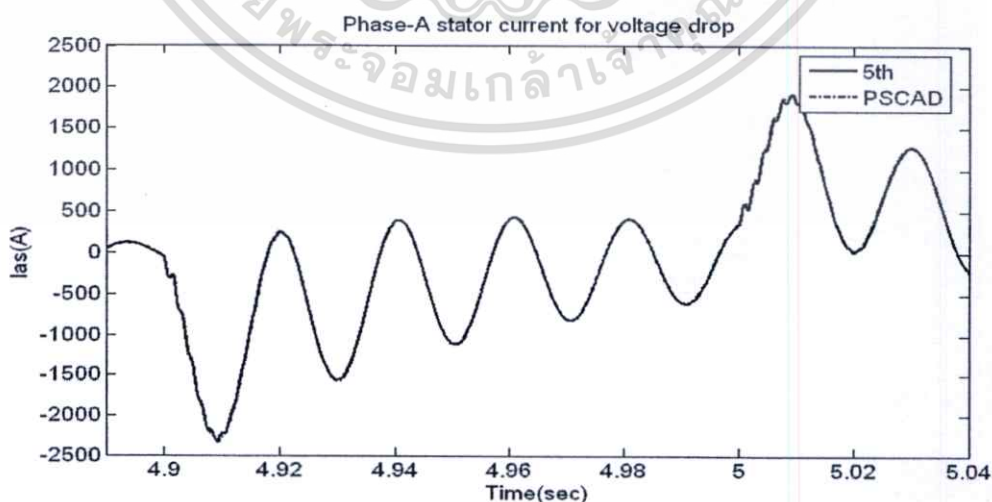
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.57 แรงดันสเตเตอร์เฟส C (มีตัวเก็บประจุ)

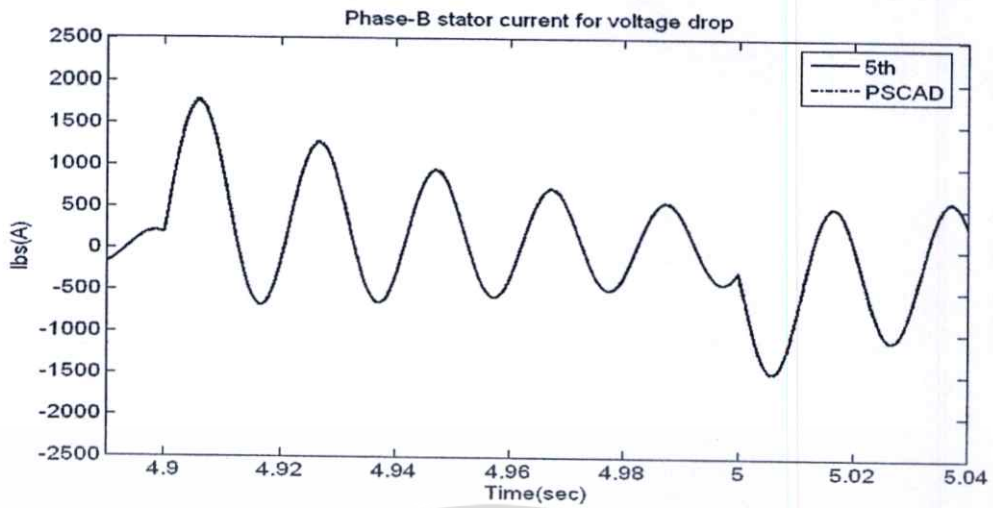


รูปที่ 4.58 กระแสสเตเตอร์เฟส A (ไม่มีตัวเก็บประจุ)

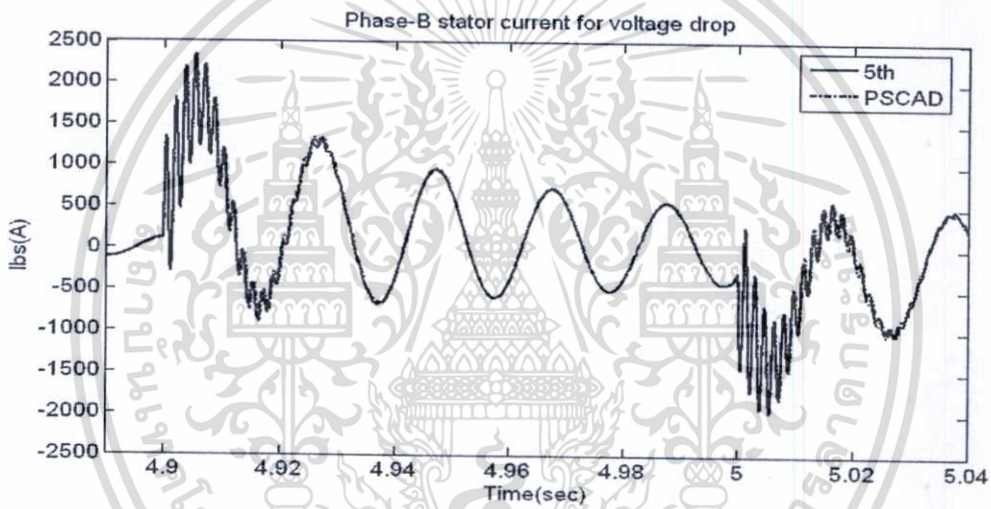


รูปที่ 4.59 กระแสสเตเตอร์เฟส A (มีตัวเก็บประจุ)

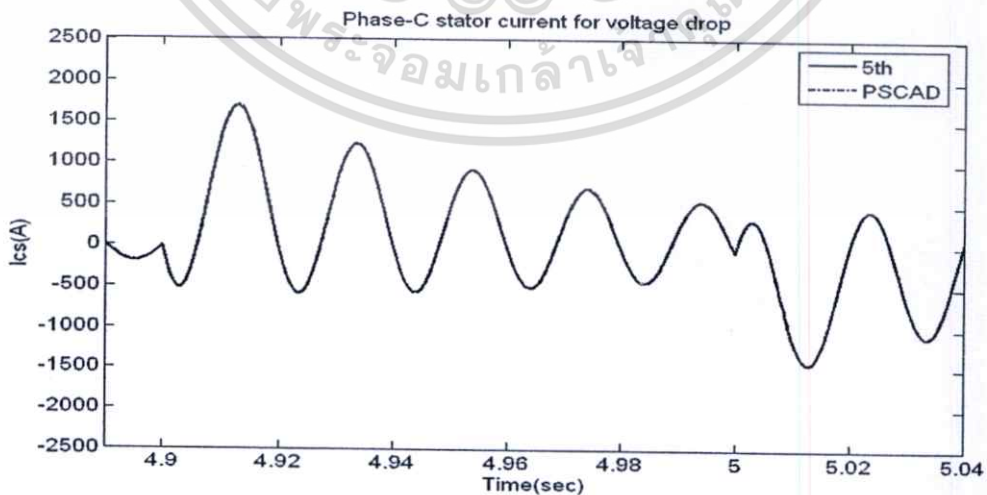
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 กระแสสเตเตอร์เฟส B (ไม่มีตัวเก็บประจุ)

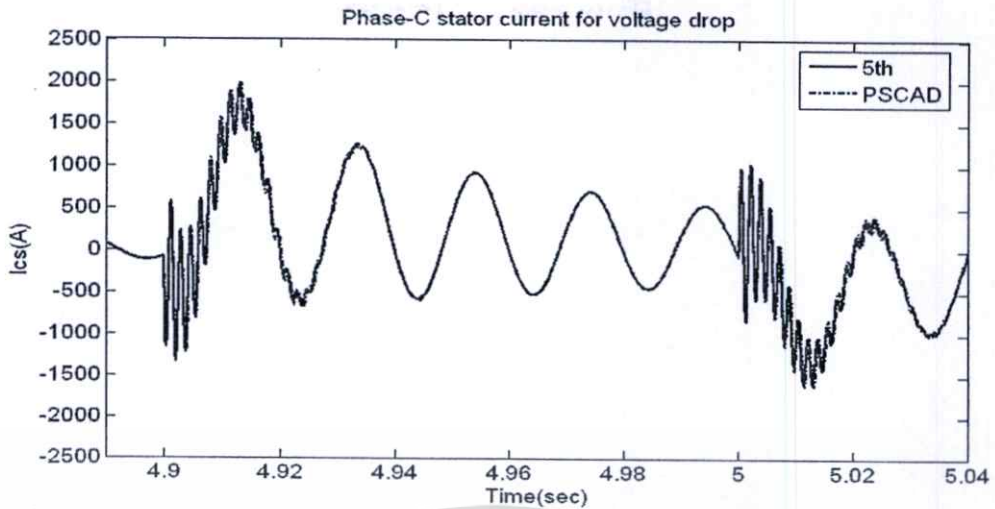


รูปที่ 4.61 กระแสสเตเตอร์เฟส B (มีตัวเก็บประจุ)



รูปที่ 4.62 กระแสสเตเตอร์เฟส C (ไม่มีตัวเก็บประจุ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.63 กระแสสเตเตอร์เฟส C (มีตัวเก็บประจุ)

4.4 สรุปผลการทดสอบ

จากการเปรียบเทียบผลของสภาวะชั่วคราว ระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 ตามสมการที่ 3.7 และแบบจำลองสมการลำดับที่ 3 ตามสมการที่ 3.8 ซึ่งได้มาจากการไม่คิดผลของสภาวะชั่วคราวที่สเตเตอร์ของสมการลำดับที่ 5 (กำหนดให้ $\frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}$, $\frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}$ ในสมการที่ 3.7 มีค่าเท่ากับศูนย์) โดยสภาวะชั่วคราวที่นำมาทดสอบประกอบไปด้วย การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์ การลัดวงจร 1 เฟสที่สเตเตอร์ การต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ และการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะ สุดท้ายเป็นกรณีศึกษาการลัดวงจรในระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยพิจารณาผลการทดสอบแยกตามลำดับดังนี้

การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด

ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลแบบทันทีทันใดที่โรเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.9-4.13 ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ว่า เมื่อเกิดสภาวะชั่วคราวที่โรเตอร์ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลแบบทันทีทันใดจะส่งผลอย่างไรกับปริมาณต่างๆที่สเตเตอร์ โดยจากผลการทดสอบของกระแสดังรูปที่ 4.9-4.11 จะเห็นได้ว่า ผลที่ได้มีค่าเหมือนกันทั้งแบบจำลองลำดับที่ 5 และ ลำดับที่ 3 ส่วนผลของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์ดังรูปที่ 4.12-4.13 จะให้ค่าที่ค่อนข้างเหมือนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด ส่งผลกระทบน้อยต่อสภาวะชั่วคราวที่สเตเตอร์ของแบบจำลองลำดับที่ 3 จึงทำให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองลำดับที่ 5

การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์

การลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์เป็นการทดสอบการเกิดสภาวะชั่วคราวที่สเตเตอร์โดยตรง เพื่อที่จะดูว่าเมื่อไม่คิดผลของสภาวะชั่วคราวที่สเตเตอร์ในแบบจำลองลำดับที่ 3 แล้วจะมีผลต่างกันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรกับแบบจำลองลำดับที่ 5 ที่มีผลของสภาวะชั่วคราวที่สแตเตอร์รวมอยู่ด้วย จากผลของกระแสแสดงดังรูปที่ 4.17-4.19 กระแสที่ได้มาจากแบบจำลองลำดับที่ 5 จะมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 3 เพราะกระแสจากแบบจำลองลำดับที่ 5 มีส่วนประกอบของกระแสดตรง (dc component) รวมอยู่ด้วย ซึ่งจะไม่มีในกระแสจากแบบจำลองลำดับที่ 3 จึงทำให้ค่ากระแสจากแบบจำลองลำดับที่ 5 มีค่าสูงกว่า

ส่วนผลของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าดังรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่เกิดการลัดวงจรในแบบจำลองลำดับที่ 5 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจะแกว่งด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่คือ 50 Hz ซึ่งจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกไปแกว่งตามไปด้วย ส่วนผลของแบบจำลองลำดับที่ 3 จะให้ผลออกมาเป็นค่าเฉลี่ยของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มาจากแบบจำลองลำดับที่ 5 เหตุที่ผลของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเป็นค่าเฉลี่ยก็เพราะกระแสที่ได้มาจากแบบจำลองลำดับที่ 3 ไม่มีส่วนประกอบกระแสดตรงรวมอยู่ด้วย

สำหรับผลของความเร็วที่โรเตอร์ดังรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าความเร็วที่โรเตอร์ของแบบจำลองลำดับที่ 5 จะตกลงทันทีที่เกิดการลัดวงจร เพราะ ณ เวลาที่เกิดการลัดวงจร เมื่อพิจารณาตามสมการการหมุนที่ 3.6 แล้ว ทิศทางของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงแรกซึ่งเป็นลบมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วมีค่าเป็นลบด้วย จึงทำให้ความเร็วตกลง ณ เวลาที่เกิดการลัดวงจร ก่อนที่ความเร็วจะเกิดการเร่งขึ้น แต่สำหรับความเร็วที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 3 จะมีการเร่งทันทีที่เกิดการลัดวงจร เพราะทิศทางของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาที่เกิดการลัดวงจรมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในสมการที่ 3.6 มีค่าเป็นบวก ทำให้ความเร็วที่โรเตอร์เร่งขึ้น จากนั้นตัดสัญญาณลัดวงจรออกจากระบบ ทำให้ระบบกลับมาทำงานในสภาวะปกติเหมือนก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลง

การลัดวงจร 1 เฟสที่สแตเตอร์

เมื่อเกิดการลัดวงจรที่แรงดันเฟส A มีผลทำให้แรงดันเฟส B ตกและแรงดันเฟส C สูงขึ้นในแบบจำลองลำดับที่ 5 แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 3 จะให้ผลที่ตรงกันข้าม สำหรับกระแสจากแบบจำลองลำดับที่ 3 จะให้ผลออกมาไม่เหมือนกับแบบจำลองลำดับที่ 5

การต่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์

การต่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์เป็นการทดสอบแบบจำลองที่สภาวะการเกิดความถี่สูงที่สแตเตอร์ โดยเมื่อต่อตัวเก็บประจุเข้าไปจะเกิดการแกว่งแบบสัญญาณไซน์ด้วยความถี่ธรรมชาติบนสัญญาณของแรงดันและสัญญาณของกระแส มีผลทำให้ขนาดของทั้งแรงดันและกระแสมีค่าสูงขึ้นโดยดูได้จากผลของแบบจำลองลำดับที่ 5 ดังรูปที่ 4.30-4.35 และเมื่อเวลาผ่านไปการแกว่งด้วยความถี่ธรรมชาตินี้จะหายไปตามเวลา แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 3 การแกว่งของสัญญาณจะไม่มีสัญญาณไซน์ โดยเห็นได้ชัดจากสัญญาณของกระแสดังรูปที่ 4.33-4.35 สำหรับ

ความถี่ของการแกว่งแสดงตามตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 5 และผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดจริงตาม [11]

การเกิดแรงดันตกชั่วขณะและการเกิดแรงดันเกินชั่วขณะที่ยับสอนันต์

ผลของแรงดัน กระแส แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วที่โรเตอร์ดังรูปที่ 4.36-4.51 จะเห็นได้ว่าทั้งที่สภาวะแรงดันตกและสภาวะแรงดันเกิน ผลจากแบบจำลองลำดับที่ 5 และลำดับที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน จึงกล่าวได้ว่าที่สภาวะแรงดันตกและสภาวะแรงดันเกินนั้น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสจากสภาวะปกติมีค่าไม่มากนักเมื่อเทียบกับการลัดวงจรที่สเตเตอร์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสจากสภาวะปกติมาก ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 5 และลำดับที่ 3 มีค่าไม่แตกต่างกัน

กรณีศึกษาการลัดวงจรในระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่

การเกิดการลัดวงจรที่ยับสอนันต์และหลังจากที่ตัดสัญญาณรบกวนออก จะเห็นได้ว่าระบบที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ทั้ง ณ เวลาที่เกิดการลัดวงจรและช่วงเวลาหลังจากตัดสัญญาณรบกวนออก จะเกิดการแกว่งของสัญญาณด้วยความถี่ธรรมชาติบนสัญญาณของแรงดันและกระแสซึ่งความถี่นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุในระบบ การเกิดนี้ก็จะคล้ายกับการต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์ในการทดลองที่ 4.2.4 ทำให้ทั้งขนาดของแรงดันและกระแสของระบบที่มีตัวเก็บประจุ เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้น จะให้ขนาดที่สูงกว่าอันเนื่องมาจากผลของตัวเก็บประจุ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองพลวัตทางเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบความเร็วคงที่ที่พัฒนาขึ้นนี้ เพื่อใช้ในการศึกษาสภาวะชั่วคราวที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ ซึ่งวงจรสมมูลโดยทั่วไปไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ การสร้างแบบจำลองพลวัตนี้ใช้หลักการของการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบ 2 แกน d-q จากการแปลงแกนนี้ทำให้ได้สมการลำดับที่ 1 จำนวน 5 สมการ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสมการลำดับที่ 5 จากนั้นยังได้มีการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองลำดับที่ 5 ลง โดยการไม่คิดปัจจัยที่ทำให้เกิดสภาวะชั่วคราวที่สเตเตอร์ในทันทีก็คือ ไม่คิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เกี่ยวกับขั้วที่สเตเตอร์ในสมการแรงดันสเตเตอร์ ผลจากตรงนี้เองทำให้ได้สมการลำดับที่ 1 จำนวน 3 สมการ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสมการลำดับที่ 3

เมื่อได้สมการแล้วก็นำมาสร้างเป็นแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และลำดับที่ 3 โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และนำไปทดสอบที่สภาวะชั่วคราวต่างๆ ซึ่งได้ข้อสรุปดังนี้คือแบบจำลองลำดับที่ 5 ที่พัฒนาขึ้นให้ผลที่เหมือนกับแบบจำลองมาตรฐานที่มีอยู่ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC ควรจะใช้แบบจำลองลำดับที่ 5 เมื่อต้องการความถูกต้องของผลที่ได้ เช่น เมื่อต้องการรู้ขนาดของกระแสลัดวงจร ผลจากแบบจำลองลำดับที่ 5 จะให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าผลที่ได้จากแบบจำลองลำดับที่ 3 หรือเมื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดความถี่สูง เช่น การต่อตัวเก็บประจุเข้าที่สเตเตอร์หรือการศึกษาเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งต้องเกี่ยวข้องกับการเกิดความถี่สูงของอุปกรณ์สวิตซ์ ดังนั้นควรเลือกใช้แบบจำลองสมการลำดับที่ 5 แทนการใช้แบบจำลองลำดับที่ 3

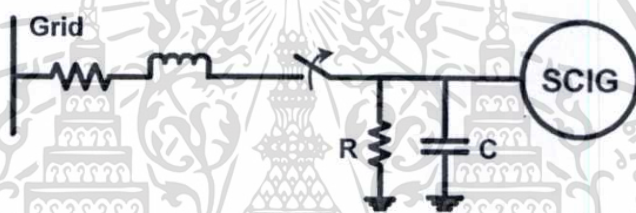
สำหรับการนำแบบจำลองลำดับที่ 3 ไปใช้ ควรนำไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสมากนักเพื่อให้ผลที่ได้ยังคงเหมือนกับผลจากแบบจำลองลำดับที่ 5 เช่น การศึกษาสภาวะทำงานปกติหรือสภาวะอยู่ตัวของระบบ การเกิดแรงดันตกและแรงดันเกิน การเปลี่ยนแปลงแรงบิดทางกลที่โรเตอร์แบบทันทีทันใด การศึกษาโหลดพลรวมไปถึงการศึกษาเสถียรภาพของระบบโดยที่ให้ความสนใจแค่ตรวจสอบว่าระบบมีเสถียรภาพต่อการรบกวนจากสัญญาณภายนอกหรือไม่

5.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองพลวัตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยสัญญาณอินพุตคือแรงดันสเตเตอร์และแรงบิดทางกลที่โรเตอร์ ส่วนสัญญาณเอาต์พุตคือ กระแสสเตเตอร์ แรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใจและประสงค์จะนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วโรเตอร์ สำหรับการทดสอบแบบจำลองทั้งหมดที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น เป็นเพียงการทดสอบผลของสัญญาณอินพุทที่เปลี่ยนแปลงไปว่าจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรกับ สัญญาณเอาต์พุท เช่น ในการทดสอบที่ 4.2.2 เป็นการทดสอบการลัดวงจร 3 เฟสที่สเตเตอร์ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเราจะกำหนดให้สัญญาณอินพุทซึ่งในที่นี้คือแรงดันของระบบ ไฟฟ้าที่ต่ออยู่มีค่าเท่ากับศูนย์ ณ เวลาที่เกิดการลัดวงจร แต่ในกรณีที่ค่าแรงดันของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันของระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ แบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นจะไม่สามารถนำมาทดสอบได้ เช่น ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแยกตัวออกจากระบบ มี ผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในโหมดกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกระตุ้น ทำให้ค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นอยู่กับโหลดและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่ ซึ่งตรงนี้เองแรงดัน สเตเตอร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันของระบบไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ ทำให้แบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นยังไม่สามารถนำมาใช้งานในกรณีนี้ได้



รูปที่ 5.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานใน โหมดกระตุ้นด้วยตัวเอง

การที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแยกตัวออกจากระบบที่ต่ออยู่อาจมีสาเหตุมาจากการ ลัดวงจรจากภายนอกทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลดและตัวเก็บประจุออกจาก ระบบแสดงดังรูปที่ 5.1 ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในโหมดกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยมีตัวเก็บ ประจุเป็นตัวกระตุ้น มีผลทำให้แรงดัน ความถี่และความเร็วโรเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าที่ เปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับโหลดและตัวเก็บประจุ ยกตัวอย่างเช่น ในสภาวะปกติที่เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่ออยู่กับระบบ โดยตัวเก็บประจุที่สเตเตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้น้อย กว่าความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับกำลังไฟฟ้าเสมือนส่วนที่เหลือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำจะดึงมาจากระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ ถ้าเกิดเหตุการณ์ผิดปกติที่ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ เช่น การลัดวงจรจากภายนอก จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน ในโหมดกระตุ้นด้วยตัวเอง โดยที่ ณ เวลาที่เซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรออกและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ยังคงจ่ายโหลดอยู่ แรงดันสเตเตอร์จะตกลงทันทีเนื่องจากการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้มาจาก ระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ ยังคงเหลือเพียงกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้มาจากตัวเก็บประจุ เมื่อแรงดันตกมีผล ทำให้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าและกระแสตกตามไปด้วย หลังจากนั้นระบบจะทำการปรับสมดุลใหม่ โดยที่สมดุลใหม่นี้ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับแรงบิดทางกลที่จ่ายเข้ามาที่โรเตอร์ จากการ

ปรับตัวเพื่อให้เข้าสมดุลใหม่นี้เองจะมีผลทำให้แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าปรับตัวสูงขึ้นเพื่อให้เท่ากับแรงบิดทางกลที่จ่ายเข้ามา และเมื่อมองย้อนกลับไปที่สมการการหมุนแล้ว การที่แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าปรับตัวสูงขึ้นมีผลให้โรเตอร์เกิดการเร่ง ทำให้ความถี่และแรงดันสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อเทียบกับค่าก่อนที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเปิดวงจร สำหรับกระแสจะมีค่าลดลงอันเนื่องมาจากค่ารีแอกแตนซ์มีค่าสูงขึ้นตามความถี่ที่ปรับตัวสูงขึ้น ผลของแรงดันที่มีค่าสูงขึ้นอาจมีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลับคืนมาต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าตามเดิมจะทำให้เกิดปัญหาของแรงดันที่สูงกว่าปกติ ความถี่ไม่ตรงกับระบบที่จะเข้าไปต่อรวมไปถึงลำดับเฟสที่ไม่ตรงกันอีกด้วย

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจึงควรพัฒนาแบบจำลองเพื่อให้สามารถใช้ในการศึกษาในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในโหมดกระตุ้นด้วยตัวเองและควรรศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวเก็บประจุที่สแตเตอร์มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความต้องการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.P.R. Sastry and R.E. Burridge, "Investigation of a Reduced Order Model for Induction Machine Dynamic Studies", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-95, No.3, May/June 1976, pp. 962 - 969
- [2] T.L. Skvarenina and P.C. Krause, "Accuracy of a Reduced Order Model of Induction Machines in Dynamic Stability Studies", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-98, No. 4, July/Aug 1979, pp.1192-1197
- [3] O. Wasynczuk, Yi-Min Diao and P.C. Krause, "Theory and Comparison of Reduced Order Models of Induction Machines", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-104, No.3, March 1985, pp.598-606
- [4] P.C. Krause, F.D. Rodriguez, O. Wasynczuk and D.A. Mojica, "Neglecting Stator Transients when Representing Isolated Operation of Induction Machines", IEEE Trans. Power Systems, Vol. PWRS-2, No.1, February 1987, pp.183-186
- [5] T.Y.J. Lem and R.T.H. Alden, "Comparison of Experimental and Aggregate Induction Motor Responses", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, No.4, November 1994, pp.1895-1900
- [6] P.A. Dahono and Qamaruzzaman, "A New Reduced Order Model of Induction Motors", Energy Management and Power Delivery 1995, Vol. 2, 21-23 November 1995, pp.651-655
- [7] A. Feijoo, J. Cidras and C. Carrillo, "A Third Order Model for The Doubly-fed Induction Machine", Electric Power Systems Research, November 2000, pp.121-127
- [8] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth and N. Jenkins, "Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines", Electric Power Systems Research, December 2003, pp.207-215
- [9] P. Ledesma and J. Usaola, "Effect of Neglecting Stator Transients in Doubly Fed Induction Generators Models", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 19, No.2, June 2004, pp.459-461
- [10] A. Perdana, "Wind Turbine Models for Power System Stability Studies", Thesis for the degree of licentiate of engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] A. Larson and T. Thiringer, "Measurements on and modelling of capacitor-connecting transients on a low-voltage grid equipped with two wind turbines", IPST'95 , pp. 184-188, September 1995.
- [12] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, 1998.
- [13] Paul C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, 1987.
- [14] E. Belenguer, N. Aparicio, J.L. Gandia and S. Ano, "Influence of Wind Generators in Voltage Dips", ICREPQ'06, April 2006.
- [15] A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1994.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 24 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2550

1. การประเมินค่าแรงดึงผิวของพอลิเอทิลีน นิกุล เกิดทองแดง ทรงประสงค์ นิยมโนภา ฌริทพล ชุตมชัยหาญ สุวัฒน์ อารีรัตน์	1
2. วิธีการแกว่งปริมาตรสำหรับภาพประเมินประสิทธิภาพของใช้จากของแข็งชนิดผงระบายอากาศ ในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน กาศิณี นววิบูลย์ สมวิวัฒน์ ภูมิภาค ชัยภูมิ จิตรกรัตน์	7
3. บทศึกษาคอเออร์เจนีออสถาปัตยกรรมในภาวะเร่งคั้นไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟแรงดันโดยวิธีแบบจำลอง พลวัต เอกวิวัฒน์ กิณเขตต์ สาธิตทวิโลป คุณภาพ	13
4. ทบทวนเปรียบเทียบแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสต้นด้วยตนเองชนิดเชื่อมด้วย กึ่งเหล็ก ไฟฟ้า สิริโชค ใจชวน อานันท์วิวัฒน์ คุณภาพ	19
5. การวิเคราะห์และออกแบบถังส่งจ่ายแรงดันแก๊สรับกับค่าได้แบบลดเล็ก ณัฐพงศ์ อรรถะรัตน์ วิริยะ พิรุญจางกูร	25
6. การออกแบบและวิเคราะห์ถังเก็บแก๊สชนิดสี่เหลี่ยมทรงกลมโดยมีความดันสูง 250 บาร์ ที่ไว้ใช้สำหรับการจัดสรรแก๊สภายใน ภูธร ทนชวาท วิจิตร ภิรมย์	31
7. ชุดควบคุมอย่างประณีตสำหรับระบบการให้ความร้อนด้วยซีพีเอวีด้วยวิธีทางไฟฟ้า ณดี ไชยสงคราม วิจิตร ภิรมย์	37
8. การใช้วิธีทางพันธุศาสตร์ในการคัดเลือกรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประปา กเขียนแบบแฟร็กชัน ค่าความผิดพลาด กฤษฏา ลิขิตวิธ เตือน ปิ่นโรจน์	43
9. นวัตกรรมของความเป็นหลายหน้าที่รูปแบบกระแสโดยใช้เฉพาะอุปกรณ์แอคทีฟจำนวนน้อย สิทธิพงษ์ สุริยะคำวงศ์ ศิห์ชัย พรหมมี มนต์วี คำเงิน กษมชัย เดชนาญ	49
10. วงจรเรกเคชันอินเวอร์ตไอเรชันแบบทรานส์ลิเนียร์ ทรงพล กลิ่นสุคนธ์ กษมชัย เดชนาญ	55
11. Numeric Identification for Thai Spoken Language by Recognizing Vowels and Tones Using Critical Band Intensity and Quantized Pitch Pakdee Chantraket and Kraisin Songwotana	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตนเองชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

A Comparison of dynamic models used for a grid-connected self-excited induction generators

ศิริโรจน์ ใจขาน อานันท์วัฒน์ คุณากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตนเองชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลองสมการลำดับที่ 3 แบบจำลองได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในส่วนของกรณีศึกษาได้ทำการจำลองการลัดวงจร 3 เฟสขึ้นในระบบ ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพลวัตของสมการลำดับที่ 5 ให้ผลตอบสนองพลวัตที่ดีกว่าและเหมาะสมในการใช้เพื่อศึกษาการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบไฟฟ้า

Abstract

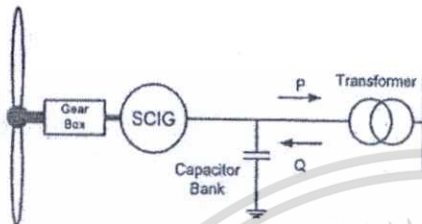
This paper presents a comparison of dynamic models used for a grid-connected self-excited induction generator. Two types of the models are developed on the basis of 5th order equation and 3rd order equation. The models are constructed and implemented using Matlab/Simulink. Case studies are performed with particular consideration on three-phase fault responses of the induction generator. It is found that the results obtained from 5th order model give more satisfactory dynamic responses, and should be used as a representation for the induction generator in power system dynamic studies.

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการมองหาพลังงานทดแทนเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานลมก็เป็นอีกหนึ่งในหลายทางเลือกของพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ก่อนทำการสร้างและการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเข้ากับระบบไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมการทำงานรวมถึงผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ดังกล่าว

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกรงกระรอก เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งนิยมใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ระบบผลิตไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 1 โดยส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ประกอบด้วย กังหันลม เกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกรงกระรอก ตัวเก็บประจุ ในบางระบบอาจมีตัวเริ่มเดินแบบนิ่มนวลต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุ โดยตัวเริ่มเดินแบบนิ่มนวลจะทำหน้าที่ลดกระแสตอนเริ่มออกตัว [1] ส่วนเกียร์จะทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานทางกล โดยเปลี่ยนจากความเร็วรอบต่ำ แรงบิด

สูงทางด้านกึ่งหันลม ไปเป็นความเร็วสูง แรงบิดต่ำ ทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สำหรับตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่แก้ค่าประกอบกำลังของระบบ และหม้อแปลงจะยกระดับแรงดันเพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังระบบต่อไป



รูปที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกรงกระรอก

ข้อดีของระบบชนิดนี้ คือ ระบบทางกลไม่ซับซ้อน ราคาถูก และการดูแลรักษาง่าย ส่วนข้อเสีย คือ ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ไม่สามารถแปรเปลี่ยนได้ จะต้องหมุนด้วยความเร็วคงที่ (โดยสูงกว่าความเร็วเชิงโรตัส) และระบบนี้ยังต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) เพื่อช่วยในการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยกำลังไฟฟ้าเสมือนนี้โดยทั่วไปจะถูกดึงมาจากระบบไฟฟ้า [1] ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าต่ำ

จากข้อเสียของระบบชนิดนี้ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้ามีค่าต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน โดยการต่อตัวเก็บประจุขนานเข้าที่ด้านหน้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในบางระบบอาจจำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุหลายค่าเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความเร็วของการทำงานมีค่าแตกต่างกัน [2]

บทความฉบับนี้จะนำเสนอการวางแบบจำลองพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยความเร็วในการหมุนคงที่ โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองที่สร้างจากสมการลำดับที่ 5 และลำดับที่ 3 โดยการสร้างจะอยู่บนพื้นฐานของการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบสองแกน (d-q) ซึ่งกำหนดให้ความเร็วในการหมุนของแกน d-q หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส จากนั้นจะทำการ

เปรียบเทียบผลตอบสนองขณะเปลี่ยนแปลงแรงบิดแบบทันทีทันใดและการลัดวงจรสามเฟสจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองลักษณะ

2. แบบจำลองสมการลำดับที่ 5

การแปลงแกนจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบสองแกน (d-q) จะใช้สมการที่ [3] ในการแปลง โดยในการตั้งแกน d-q จะกำหนดให้แกน q นำหน้าแกน d เป็นมุม 90 องศา และหมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{qdo}(\omega t) \\ T_{qdo}(\omega t) \\ T_{qdo}(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยตัวแปร f เป็นได้ทั้งค่าต่อเฟสของแรงดัน กระแส และค่าฟลักซ์เกี่ยวค้อยของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เมตริกซ์การแปลง $T_{qdo}(\omega t)$ นี้ค่าดังนี้

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{2}{3} \sin(\omega t) & \frac{2}{3} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{2}{3} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

ผลลัพธ์จากการแปลงจากระบบ 3 เฟส abc ไปยังระบบสองแกน (d-q) ของสมการแรงดันที่สเตเตอร์และโรเตอร์ แสดงดังสมการที่ 2-5 โดยกำหนดให้ ω หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส

$$v_{qs} = \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \quad (2)$$

$$v_{ds} = \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \quad (3)$$

$$v'_{qr} = \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_r i'_{qr} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v'_{dr} = \frac{P}{\omega_b} \psi'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_r i'_{dr} \quad (5)$$

สมการพลาซมที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์และ โรเตอร์
แสดงดังสมการที่ 6-9

$$\psi_{qs} = \omega_b \int (v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r'_s}{x'_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs})) dt \quad (6)$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int (v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r'_s}{x'_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds})) dt \quad (7)$$

$$\psi'_{qr} = \omega_b \int (\frac{\omega_r - \omega_e}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr})) dt \quad (8)$$

$$\psi'_{dr} = \omega_b \int (\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr})) dt \quad (9)$$

สมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ 10

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (10)$$

สมการการหมุนที่โรเตอร์ แสดงดังสมการที่ 11

โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (J) จะเป็นค่ารวมกันระหว่าง
โมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันที่คานเกียร์และค่าโมเมนต์
ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\frac{2J\omega_b}{P} \frac{d(\omega'_r/\omega_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (11)$$

โดย ω_b คือความเร็วเชิงมุมฐาน ($2\pi f_{rated}$) ω_r
คือความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าที่โรเตอร์ P คือจำนวน
ขั้วแม่เหล็ก T_{em} คือแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า T_{mech} คือ
แรงบิดทางกลที่จ่ายให้กับโรเตอร์ T_{damp} คือ แรงบิด
หน่วง

3. แบบจำลองสมการลำดับที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำสามารถลดรูปได้โดย ไม่คิดผลของอัตรา
เปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เกี่ยวคล้อง [4] ตามสมการ

แรงดันที่สเตเตอร์ ทำให้ลำดับของสมการเปลี่ยนจาก
ลำดับที่ 5 เป็นลำดับที่ 3 แสดงดังสมการที่ 12-13

$$v_{qs} = \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r'_s i_{qs} \quad (12)$$

$$v_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r'_s i_{ds} \quad (13)$$

สมการพลาซมที่เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์ที่ได้จากการลด
ลำดับสมการแสดงดังสมการที่ 14-15 ในส่วนของ
สมการพลาซมที่เกี่ยวข้องที่โรเตอร์ยังคงใช้ตามสมการที่
8-9 สำหรับสมการของแรงบิดยังเหมือนเดิมตามสมการ
ที่ 10

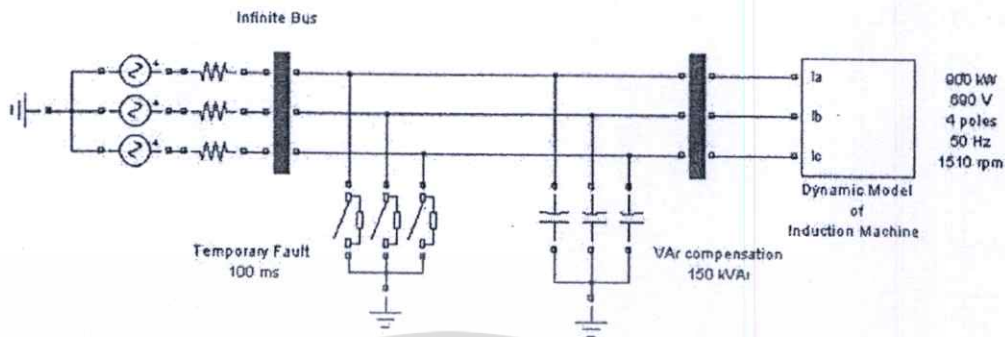
$$\psi_{qs} = \frac{x'_{ls}}{r'_s} (v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds}) + \psi_{mq} \quad (14)$$

$$\psi_{ds} = \frac{x'_{ls}}{r'_s} (v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs}) + \psi_{md} \quad (15)$$

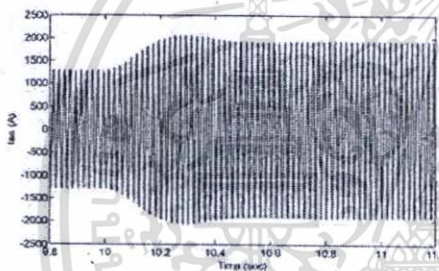
4. การทดสอบแบบจำลอง

ในการทดสอบแบบจำลองคืออาศัยระบบที่นำเสนอ
โดย Z.Lubosny [5] แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย เครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกรงระรอกขนาด 900 kW 690 V
4 ขั้ว 50 Hz 1510 rpm.และตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยค่า
กำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับการทำงานที่กักและความเร็ว
คงที่ขนาด 150 kVAr [5] ซึ่งเป็นระบบที่เครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเข้ากับสื่อนันด์

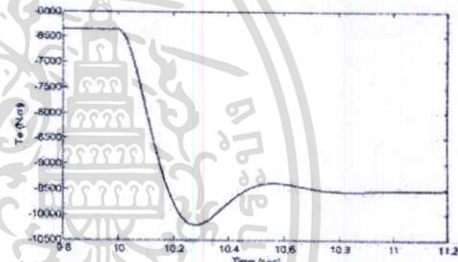
การเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองทั้งสองจะ
แบ่งการทดสอบแบบจำลองเป็น 2 ตอน ในตอนแรกจะ
เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดที่จ่ายเข้าที่โรเตอร์แบบ
ทันทีทันใด สำหรับในตอนที่สองจะเป็นการจำลองการ
ลัดวงจร 3 เฟสชั่วขณะ โดยทั้งสองตอนจะทำการ
ทดสอบที่สภาวะทำงานปกติ คือที่ความเร็ว 1510 rpm
ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลของการเปลี่ยนแปลง
ของแรงบิดที่จ่ายเข้าโรเตอร์แบบทันทีทันใดสำหรับ
แบบจำลองทั้งสองจะมีผลต่อกระแส แรงบิด
แม่เหล็กไฟฟ้า และความเร็ว แสดงดังรูปที่ 3-8



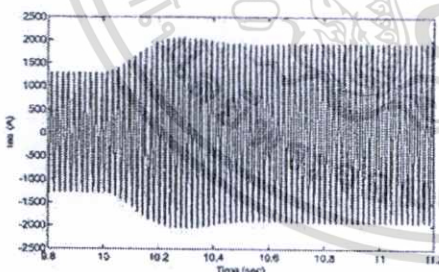
รูปที่ 2 แสดงระบบที่ใช้ในการศึกษา



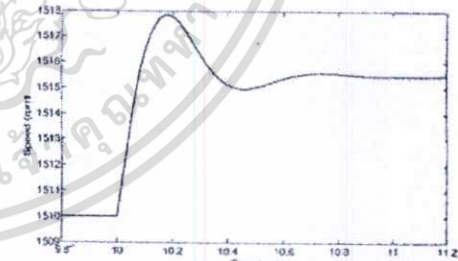
รูปที่ 3 กระแสเฟส a ของสมการลำดับที่ 5



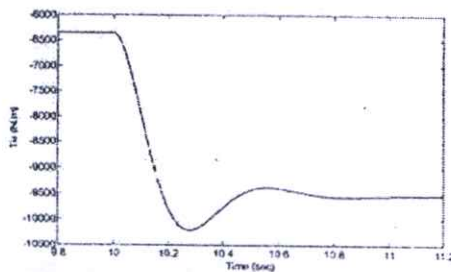
รูปที่ 6 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของสมการลำดับที่ 3



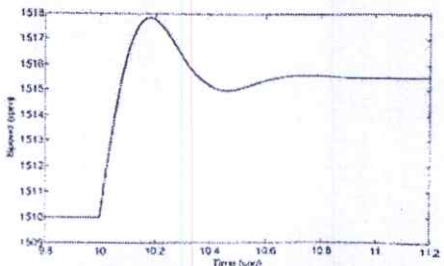
รูปที่ 4 กระแสเฟส a ของสมการลำดับที่ 3



รูปที่ 7 ความเร็วรอบของสมการลำดับที่ 5



รูปที่ 5 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของสมการลำดับที่ 5

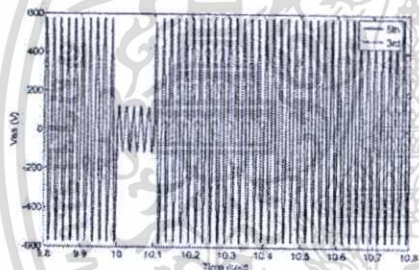


รูปที่ 8 ความเร็วรอบของสมการลำดับที่ 3

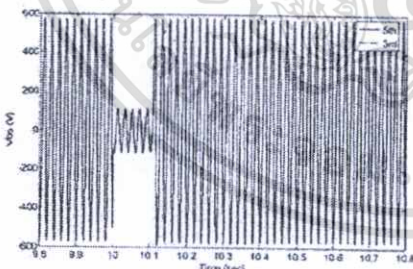
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3-8 เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดที่
 ข่ายเข้าที่โรเตอร์แบบทันทีทันใดที่มีผลต่อกระแส
 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วรอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า
 แบบจำลองที่สร้างจากสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลอง
 ที่สร้างจากสมการลำดับที่ 3 จะให้ผลตอบสนองที่
 เหมือนกัน [6]

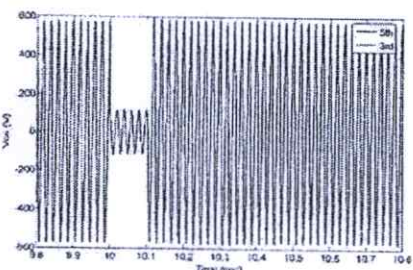
ในส่วนของการทดสอบแบบจำลองการลัดวงจร 3
 เฟสแบบชั่วขณะ แสดงดังรูปที่ 2 โดยการเกิดการ
 ลัดวงจรเป็นเวลา 100 ms โดยเริ่มที่วินาทีที่ 10 และทำ
 การเคลียร์ฟอลต์เป็นเวลา 0.1 วินาที หลังจากเกิดฟอลต์
 โดยผลลัพธ์ที่ได้ของ แรงดัน กระแส แรงบิด
 แม่เหล็กไฟฟ้า และความเร็ว โดยทำการเปรียบเทียบกัน
 ระหว่างแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 และแบบจำลอง
 สมการลำดับที่ 3 แสดงดังรูปที่ 9-16



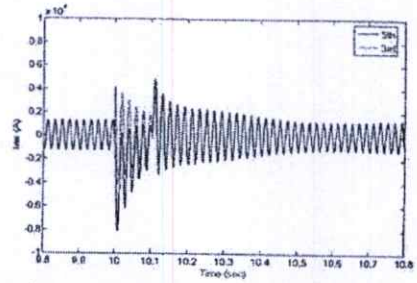
รูปที่ 9 แรงดันที่สเตเตอร์เฟส a ของลำดับที่ 5 และ 3



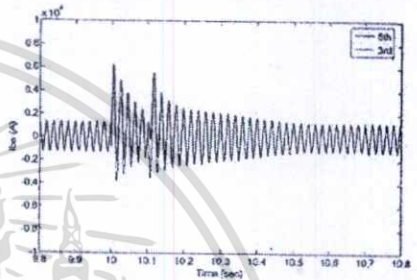
รูปที่ 10 แรงดันที่สเตเตอร์เฟส b ของลำดับที่ 5 และ 3



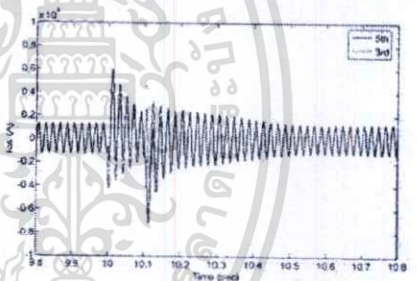
รูปที่ 11 แรงดันที่สเตเตอร์เฟส c ของลำดับที่ 5 และ 3



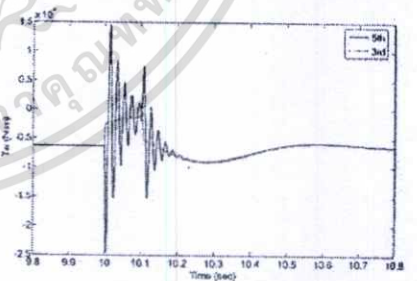
รูปที่ 12 กระแสที่สเตเตอร์เฟส a ของลำดับที่ 5 และ 3



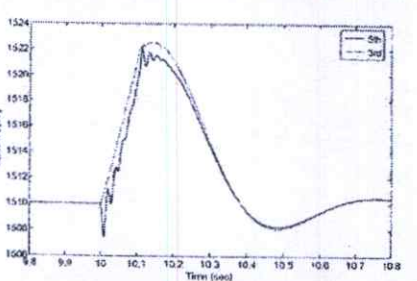
รูปที่ 13 กระแสที่สเตเตอร์เฟส b ของลำดับที่ 5 และ 3



รูปที่ 14 กระแสที่สเตเตอร์เฟส c ของลำดับที่ 5 และ 3



รูปที่ 15 แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของสมการลำดับ 5 และ 3



รูปที่ 16 ความเร็วที่โรเตอร์ของสมการลำดับที่ 5 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่เกิดขึ้นของการลดลำดับสมการโดยการไม่คิดผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์เกี่ยวข้องที่สเตเตอร์จะมีผลทำให้ไม่มีส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสลัดวงจรแบบสามเฟสสำหรับสมการลำดับที่ 3 ซึ่งทำให้ค่ากระแสลัดวงจรของสมการลำดับที่ 3 มีค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง [1] สำหรับแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของสมการลำดับที่ 3 จะไม่เกิดผลของการแกว่งในสภาวะชั่วขณะเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้สมการลำดับที่ 5 ในส่วนของผลตอบสนองของความเร็วที่โรเตอร์ จะพบว่าทั้งสมการลำดับที่ 3 และสมการลำดับที่ 5 จะให้ผลคล้ายคลึงกัน

5. สรุปผลการทดลอง

การจำลองการลัดวงจรสามเฟส จากแบบจำลองสมการลำดับที่ 5 จะเห็นว่าแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจะแกว่งในช่วงที่เกิดการลัดวงจร เนื่องจากผลของส่วนประกอบกระแสตรงของกระแสที่สเตเตอร์ การแกว่งของแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะส่งผลต่อลักษณะทางพลวัตของกำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายเข้าสู่ระบบ ซึ่งการแกว่งนี้เมื่อใช้แบบจำลองสมการลำดับที่ 3 จะไม่ปรากฏ ดังนั้นในการศึกษาสภาวะพลวัตรวมไปถึงการวิเคราะห์สภาวะชั่วครู่ของระบบไฟฟ้ากำลัง จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้แบบจำลองสมการลำดับที่ 5 สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีผลกับระบบไฟฟ้ากำลังที่ถูกต้องแม่นยำ สำหรับการศึกษาดูพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะปกติเช่น load flow หรือ การเปลี่ยนแปลงของโหลด สามารถใช้สมการลำดับที่ 3 แทนได้โดยไม่ให้ผลที่แตกต่างจากการใช้สมการลำดับที่ 5

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, Ltd, 2005 .
- [2] E. Muljadi, Y. Wan, C.P. Butterfield, B. Parsons "A Study of a Wind Farm Power System",

Technical report, National Wind Technology Center, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA

- [3] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", 1st edition, Prentice-Hall PRT, 1998.
- [4] P.C. Krause, Oley Wasycznk, Scott D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery And Drive System", IEEE Press, 2002.
- [5] Z. Lubosny, "Wind Turbine Operation in Electric Power Systems", Springer, 2003.
- [6] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins, "Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines", Electric Power Systems Research , Vol. 67, NO. 3, Pages 207-215, December 2003

ภาคผนวก (ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ)

900 kW, 690 V, 50 Hz, 4 poles, 1510 rpm,

$r_s = 0.0034$ ohms, $r_r = 0.003$ ohms, $x_B = 0.055$ ohms

$x'_{lr} = 0.042$ ohms, $x_M = 1.6$ ohms, $J_G = 35.184$ kg.m²



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ECTI-CON 2008
THE 2008 ECTI INTERNATIONAL CONFERENCE

Volume 2

Proceedings of the 2008 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference

May 14-17, 2008
Maritime Park and Spa Resort, Krabi, THAILAND

ECTI Association  **TRIDI**
Telecommunications Research and Industrial Development Institute
a member of NSTDA **NECTEC**
a member of NSTDA **Seagate**  **TNGC**
The Network Center **IEEE**
THAILAND SECTION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time Domain Models for Fixed-speed Induction Generators

S. Jaikhan and A. Kunakorn

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Abstract - This paper presents a comparison of time-domain dynamic models used for a fixed-speed induction generator. Two types of the models are developed on the basis of 5th order equations and 3rd order equations. The models are constructed and implemented using MATLAB/Simulink. Case studies are performed with particular consideration on three-phase fault responses and connecting of capacitors at the stator of the induction generator. It is found that the results obtained from 5th order model give more satisfactory transient responses, and should be used as a representation for the induction generator in power system transient studies.

Index Terms - Three-phase fault, Transient current due to capacitor connection, Induction generator models

I. INTRODUCTION

Nowadays, renewable energy sources are widely used in electricity generation systems because there are many advantages. For instance, there are the absence of harmful emissions and the availability of the resources that can be converted into electricity. One of the most important energy sources is wind power. As the penetration of wind power into the grid increases significantly, this means that the presence of wind power becomes substantial in the power system. The operation of the wind power generation is required to provide a reliability of supply and a certain level of stability. In addition, electromagnetic transients in the wind power generation must be taken into account [1].

This paper presents the development of time domain models in order to represent a fixed speed wind turbine with a squirrel cage induction generator, which is the simplest type of the wind turbine technology. The squirrel cage induction generator uses the reactive power for generating the magnetizing current. Therefore in many cases, capacitors are connected into the system to provide the reactive power and also as the power factor correction. In this paper, two types of the time domain models are described. The construction of the two models is based on 5th order equations and 3rd order equations using MATLAB/Simulink. The responses of the induction generator connected with a grid due to the three-phase faults and the switching operation of the capacitor at the terminals of the generator are simulated and compared with results obtained from the standard model in PSCAD/EMTDC library.

II. MATHEMATICAL MODELS OF INDUCTION GENERATORS

There are many types of mathematical models to represent induction generators in power system studies [2,3,4]. The induction generator may be modeled as a transient reactance with a voltage source [2]. Such a model has been used in power system stability studies and load flow calculations. However, when electromagnetic transients are concerned, the time domain dynamic models must be used [3,4]. Ekanayake [4] proposed two models for doubly-fed induction generators. These two models are 5th order model and 3rd order model. In this section, the mathematical models of fixed speed induction generators are described. The models developed in this paper are constructed from differential equations based on q-d axis fixed to a synchronous reference frame [3,4]. All equations can be shown as follows:

5th order representation [3,4]

The voltage equations

$$v_{qs} = \frac{d\psi_{qs}}{\omega_b} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \quad (1)$$

$$v_{ds} = \frac{d\psi_{ds}}{\omega_b} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \quad (2)$$

$$v'_{qr} = 0 = \frac{d\psi'_{qr}}{\omega_b} + \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + r'_{r'} i'_{qr} \quad (3)$$

$$v'_{dr} = 0 = \frac{d\psi'_{dr}}{\omega_b} - \left(\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + r'_{r'} i'_{dr} \quad (4)$$

The flux linkage equations

$$\psi_{qs} = \omega_b \int (v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs})) dt \quad (5)$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int (v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds})) dt \quad (6)$$

$$\psi'_{qr} = \omega_b \int (\frac{\omega_r - \omega_e}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{r'_{r'}}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr})) dt \quad (7)$$

$$\psi'_{dr} = \omega_b \int (\frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{r'_{r'}}{x'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr})) dt \quad (8)$$

The electromagnetic torque equation

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (9)$$

The rotor speed equation

$$\frac{2J}{P} \omega_b \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (10)$$

3rd order representation [3,4]

The voltage equations

$$v_{qs} = \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + r_s i_{qs} \quad (11)$$

$$v_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + r_s i_{ds} \quad (12)$$

The flux linkage equations

$$\psi_{qs} = \frac{x_{ls}}{r_s} (v_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds}) + \psi_{mq} \quad (13)$$

$$\psi_{ds} = \frac{x_{ls}}{r_s} (v_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs}) + \psi_{md} \quad (14)$$

The 5th order model combines voltage equations from (1) to (4) and the movement equation of the generator rotor shown as (10). It can be noticed that for 3rd order representation, this can be achieved by neglecting the rate of change of stator flux linkage at the stator voltage equations. Figures 1 and 2 demonstrate the MATLAB/Simulink blocks for 5th order and 3rd order equations.

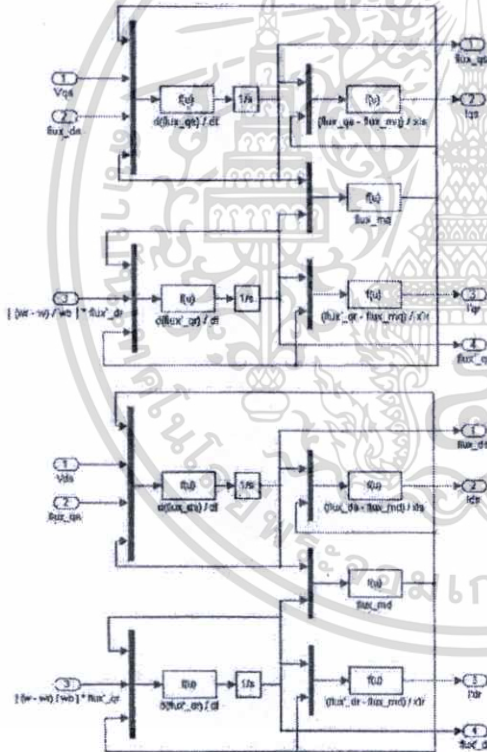


Fig. 1: MATLAB/Simulink model for 5th order equations on q-d axis.

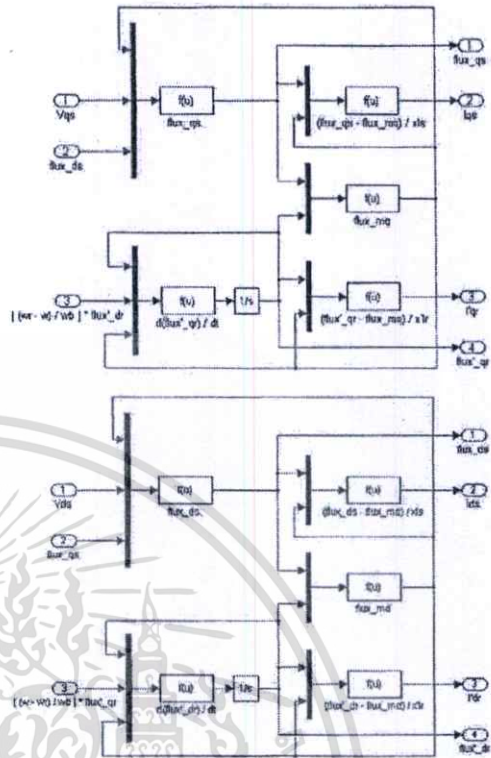


Fig. 2: MATLAB/Simulink model for 3rd order equations on q-d axis.

III. CASE STUDIES AND RESULTS

The induction machine used in case studies is a squirrel-cage type with rated values as follows [5]: 3-phase, 225 kW, 400 V, 6-pole, 1013 RPM. with the compensation capacitor of 1.2 mF. The grid resistance is 12.1 mΩ and the grid reactance is 20 mΩ [5].



Fig. 3: A schematic diagram for three-phase fault conditions.

The first case study is to predict the fault currents generated by the induction generator. Fig. 3 shows a schematic diagram of the system under the investigation. The temporary three-phase fault is applied at the stator terminals at $t = 4.9$ sec for 5 cycles, and the fault is cleared at $t = 5$ sec. The comparisons of responses obtained from 5th order model, 3rd order model and standard PSCAD/EMTDC model are illustrated in Figures 4,5,6,7 and 8.

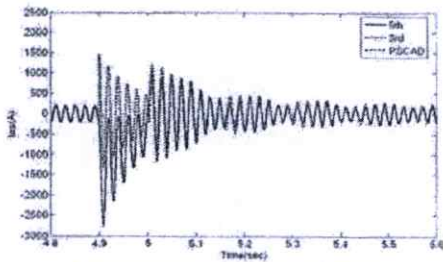


Fig. 4: Phase-A current of three-phase fault.

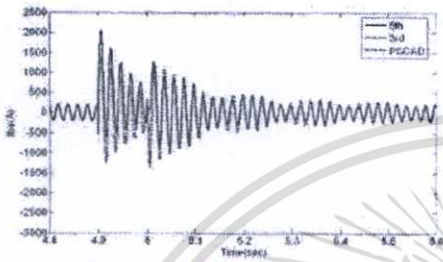


Fig. 5: Phase-B current of three-phase fault.

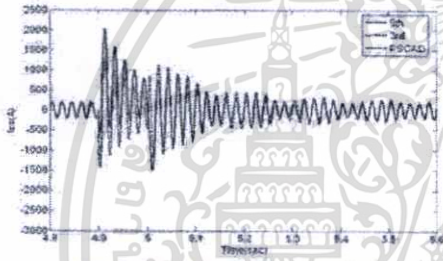


Fig. 6: Phase-C current of three-phase fault.

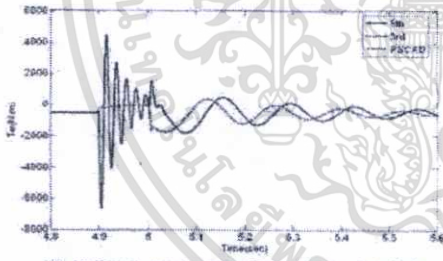


Fig. 7: The electromagnetic torque of three-phase fault.

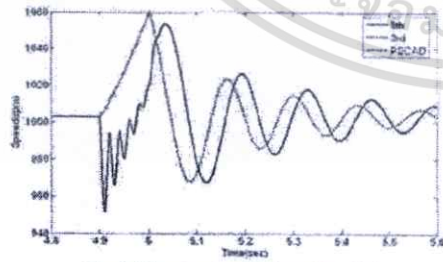


Fig. 8: The rotor speed of three-phase fault.

It can be seen that the stator currents obtained from 5th order model are higher than those obtained from 3rd order model because the current from 5th order model has de-offset which can not be seen in 3rd order model. This gives the different electromagnetic torque between that of 5th order model and that of 3rd order model. The 3rd order model gives an average value of the electromagnetic torque while the oscillation of the torque can be obtained from the 5th order model [6].

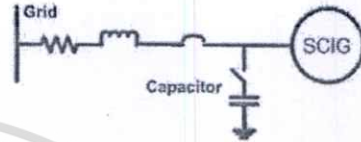


Fig. 9: A schematic diagram for capacitor switching transients.

The second case study is the switching operation of the compensation capacitor. It is well-known that when the capacitor is in switching-on mechanism, there is an inrush current with high frequency components at a natural frequency of the system superimposing on the voltage and current waveforms [7]. The test grid of this case study is shown in Fig. 9 and the comparisons of transient voltages and currents caused by the capacitors switching among those from 5th order model, standard PSCAD/EMTDC model and those from 3rd order model are depicted in Figures 10, 11, 12, 13, 14 and 15.

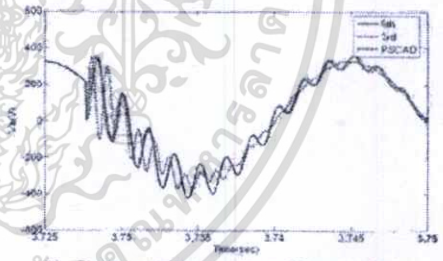


Fig. 10: The switching capacitors of phase-A voltage.

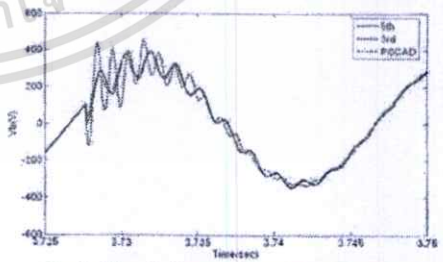


Fig. 11: The switching capacitors of phase-B voltage.

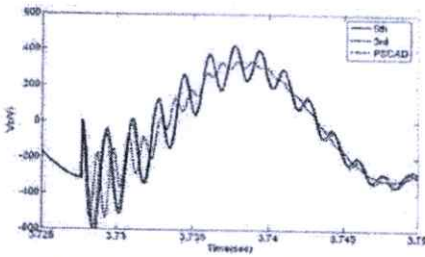


Fig. 12: The switching capacitors of phase-C voltage.

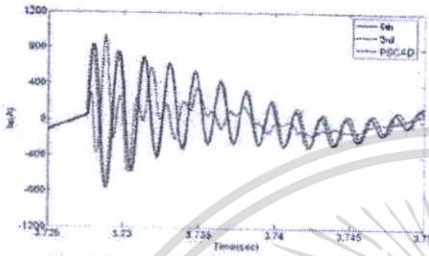


Fig. 13: The switching capacitors of phase-A current.

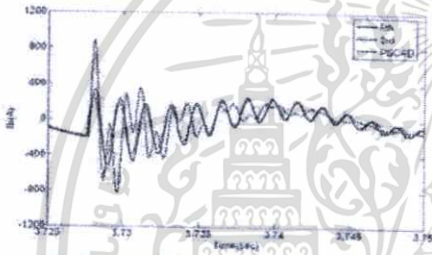


Fig. 14: The switching capacitors of phase-B current.

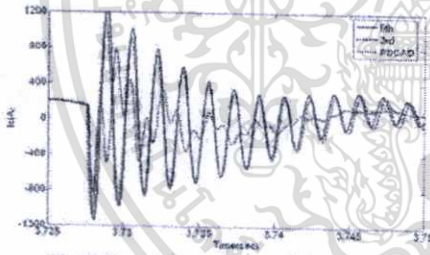


Fig. 15: The switching capacitors of phase-C current.

When the capacitors are connected into a system, this is an LC circuit. This circuit has a sudden disturbance with an oscillation at the natural frequency, which can be defined as [5,7]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{15}$$

where,

L is the total inductance of the system
 C is the total capacitance of the system

When a simplified calculation of the system shown in Figure 9 was performed by Larson and Thiringer [5], the natural frequency was 574 Hz. From simulation results, it is found that the sinusoidal oscillation frequency from 5th order model is 588 Hz, but the result from 3rd order model gives non-sinusoidal oscillation. As a result, it is clear that 5th order model is the appropriate representation for the fixed speed induction generator in electromagnetic transient studies.

IV. CONCLUSIONS

Two mathematical models including 5th order and 3rd order models for a fixed speed induction generator have been studied. The two models are developed and implemented in the MATLAB/Simulink. The 5th order model and 3rd order model have been compared with the results simulated using the standard model provided in PSCAD/EMTDC for two case studies, three-phase faults and switching transients of compensation capacitors. It has been found that the responses from 5th order models give more accurate results than those from 3rd order models.

V. REFERENCES

- [1] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [3] C. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, 1st ed., Prentice-Hall, 1998.
- [4] J.B. Ekanyake, L. Holdsworth and N. Jenkins, "Comparision of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines," *Electric Power Systems Research*, vol. 67, no. 3, pp. 207-215, December 2003.
- [5] A. Larson and T. Thiringer, "Measurements on and modelling of capacitor-connecting transients on a low-voltage grid equipped with two wind turbines," *IPST'95*, pp. 184-188, September 1995.
- [6] A. Perdana, *Wind Turbine Models for Power System Stability Studies*, Thesis for the degree of licentiate of engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2006.
- [7] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1994.

List of symbols

Symbols	Meaning
$v_{qs}, v_{ds}, v'_{qr}, v'_{dr}$	q-d axis voltages
$i_{qs}, i_{ds}, i'_{qr}, i'_{dr}$	q-d axis currents
ψ	flux linkage
r_s, r'_{r}	machine resistance
x_{ls}, x'_{lr}	machine reactance
ω_e	angular velocity of system
ω_h	angular velocity of base
ω_r	angular velocity of rotor
J	moment of inertia
P	number of poles
T_{em}	electromagnetic torque
T_{mech}	mechanical torque
T_{damp}	damping torque

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสิริโรจน์ ใจงาน
วัน เดือน ปี เกิด 26 ตุลาคม 2524 ที่จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2547

การทำงาน

2547-2548

วิศวกรไฟฟ้า

ฝ่ายวิศวกรรม บริษัท สยามมิชลิน จำกัด

2551-ปัจจุบัน

วิศวกรไฟฟ้า

แผนกออกแบบระบบวงจรถาข่าย กองออกแบบด้านไฟฟ้า

ฝ่ายออกแบบและควบคุมงาน การไฟฟ้านครหลวง

ผลงานทางวิชาการ

“ การเปรียบเทียบแบบจำลองทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระตุ้นด้วยตนเอง ชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2550, หน้า 19-24

“ Time Domain Models for Fixed-speed Induction Generators ”, The 2008 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference, (ECTI-CON 2008), pp. 1065-1068, 14-17 May 2008, Krabi, Thailand.