

การจำลองระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงาน
แบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

SIMULATION OF WIND TURBINE GENERATOR USING
MATRIX CONVERTER SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION OF WIND TURBINE GENERATOR USING
MATRIX CONVERTER SYSTEM



PRAMOOK KAWPUKDEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2023-EN-M-087-159



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองระบบกักเก็บผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์
นักศึกษา	นายประมุข แก้วภักดี
รหัสประจำตัว	62601184
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและจำลองการทำงานของ ระบบกักเก็บผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Matrix converter) ซึ่งในการควบคุมระบบการแปลงพลังงานนั้น จะใช้วิธีการควบคุมโดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมการเปิด-ปิดของ Switching เนื่องจากเป็นวิธีการที่ควบคุมที่ไม่ซับซ้อน วงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่าย และใช้จำนวนอุปกรณ์น้อย ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบกักเก็บผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ในการทดสอบการทำงานของระบบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการทำงานและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบก่อนที่จะนำไปทดสอบในระบบที่เป็นของจริง

Thesis Title	Simulation of Wind Turbine Generator Using Matrix Converter System
Student	Mr. Pramook Kawpukdee
Student ID.	62601184
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Sirichai Tammaruckwattana

ABSTRACT

This thesis presents the design and operation simulation of a wind turbine power generation system using a matrix converter system. PWM signal to control the on-off of the switch because it is a simple control method and the circuit has a simple structure and uses a small number of devices. Which this thesis will design and simulate the operation of the wind turbine power generation system by using Matrix Converter energy conversion system by using Matlab & Simulink program to test the system performance. To demonstrate the feasibility and performance of the system before testing it on a real system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และคุ้มครองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์ ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำแนวทางการในการทำเนื้อหาสาระของงานวิจัยที่เคย นำเสนอในอดีตเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาต่างๆ เพื่อนำความรู้และทฤษฎีต่างๆ นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาต่างที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้โอกาสและมอบ สถานที่ในการศึกษาและความรู้ต่างๆ ตลอดจนเหล่าคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและ ควบคุมที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเสมอมา

ขอบคุณพี่น้องๆ ในแลปและเพื่อนร่วมสาขาทุกท่าน ที่ช่วยเหลือสนับสนุนให้วิทยานิพนธ์ฉบับ นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลสำคัญในครอบครัวอีกหลายท่าน ที่คอยเป็น กำลังใจ เป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าได้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ประมุข แก้วภักดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และก๊อปปี้หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 หลักการใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 เจนเนอร์เรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG).....	4
2.2.1 แบบวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์ของเจนเนอร์เรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG).....	6
2.3 ระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix convertor).....	11
2.4 เทคนิคการควบคุมวงจรวิตซิงของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์โดยใช้สัญญาณ Pulse width modulation technique (PWM).....	15
2.5 ระบบวิธีการ Commutation ควบคุมสวิตซิ่งชนิด RB IGBT Bi-direction switch.....	16
2.5.1 วิธีการ Commutation แบบควบคุมกระแส 4 ขั้นตอน (4C).....	18
2.5.2 วิธีการ Commutation แบบควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V).....	20
2.5.3 วิธีการ Commutation แบบควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.4	วิธีการ Commutation แบบควบคุมแรงดันแบบ 2 ชั้นตอน (2V).....	23	
2.5.5	วิธีการ Commutation แบบควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ชั้นตอน (3VC).....	25	
บทที่ 3 ชั้นตอนการจำลองระบบกังหันลมโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix converter) ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์			26
3.1	กล่าวนำ.....	26	
3.2	ภาควงจรอินพุต (Input).....	27	
3.2.1	ชุดจำลองระบบกังหันลม (Wind turbine simulation system).....	27	
3.2.2	ชุดจำลองระบบเจนเนอร์เรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG).....	29	
3.3	ภาควงจรกำลังสวิตซ์ซิ่งของระบบ Matrix converter.....	30	
3.4	ภาควงจรเอาต์พุต (Output).....	33	
3.5	ภาควงจรควบคุมวงจรกำลังสวิตซ์ซิ่ง.....	34	
3.5.1	ระบบ Converter controller.....	35	
3.5.2	ระบบ Inverter controller.....	38	
3.5.3	ระบบ Pulse composition.....	41	
3.5.4	ระบบ Commutation.....	45	
บทที่ 4 การทดสอบระบบการทำงานของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix converter).....			51
4.1	กล่าวนำ.....	51	
4.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	51	
4.2.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบชุดจำลองระบบกังหันลมเจนเนอร์เรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG).....	52	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบชุดจำลองระบบภาคInput ภาคOutput และภาค วงจรกำลังสวิตชิงของระบบ Matrix converter.....	53
4.2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบชุดจำลองระบบควบคุมสวิตชิงของระบบ Matrix converter.....	55
4.3 ผลการทดสอบระบบการทำงานของระบบกักเก็บผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบ Matrix converter.....	56
4.4 สรุป.....	74
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ.....	75
5.1 บทสรุป.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อ.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และก๊อปปี้หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางความจริงของ AND Gate.....	42
3.2 ตารางความจริงของ OR Gate.....	42
3.3 ตารางความจริงของ D flip flop.....	43
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนภาคชุดระบบกึ่งहनลุมและเจนเนอร์เรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG).....	52
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนภาค Input ภาค Output และภาควงจรกำลังสวิตซิ่งของระบบ Matrix converter.....	53
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนระบบควบคุมสวิตซิ่งของระบบ Matrix converter.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และคว้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างเจนเนอเรเตอร์ PMSG.....5
2.2	แบบวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์ของเจนเนอเรเตอร์ PMSG.....7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแกนโรเตอร์ d-q axis และแกนสเตเตอร์ a,b,c.....8
2.4	วงจรจำลองของแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก q axis.....9
2.5	วงจรจำลองของแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก d axis.....9
2.6	ระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์11
2.7	ระบบแปลงพลังงานแบบ Back to back PWM converter.....12
2.8	วงจรสวิตช์ชิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์.....12
2.9	วงจรสวิตช์ชิ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์.....13
2.10	บล็อกไดอะแกรมการทำงานการควบคุมสวิตช์ชิ่งด้วย PWM.....15
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณมอดดูเลต และสัญญาณ PWM.....16
2.12	สวิตช์ชิ่งชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch.....17
2.13	การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C).....18
2.14	แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C).....19
2.15	การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V).....20
2.16	แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V).....21
2.17	การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....22
2.18	แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)22
2.19	การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V).....23
2.20	แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V).....24
2.21	การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC).....25
2.22	แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)...26
3.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้ระบบ Matrix converter ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....26
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดกักเก็บพลังงานนั้นขนาดกำลัง 300 วัตต์ (Watt)27
3.3	บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ของชุดกักเก็บพลังงานกับชุดเจนเนอเรเตอร์28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ชุดจำลองโมเดลในภาคของชุดกังหันลมขนาดกำลัง 300 วัตต์ (Watt) ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	29
3.5 ชุดแบบจำลอง PMSG ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสโดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์ d-q axis ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	30
3.6 ชุดแบบจำลอง PMSG ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสโดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์ d-q axis เป็น UVW ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	30
3.7 วงจรสวิตซ์ซิงของ Matrix converter	31
3.8 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสสองทิศทางของ Matrix converter.....	31
3.9 ชุดระบบจำลองวงจรสวิตซ์ซิงของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	32
3.10 ชุดระบบจำลองวงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสสองทิศทางของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	32
3.11 ชุดระบบจำลองวงจร Output RL Load ของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	33
3.12 ชุดระบบจำลองภาคควบคุมวงจรกำลังสวิตซ์ซิงของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	34
3.13 สัญญาณ Pulse ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณ Sine กับ สัญญาณ Triangle	35
3.14 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของภาค Converter ที่ใช้ในการควบคุม.....	35
3.15 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Converter controller โดยใช้ PWM ในการควบคุมของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)	36
3.16 ชุดแบบจำลองย่อยชุดกำเนิดแรงดันอ้างอิงวงจรรบบ Converter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ชุดแบบจำลองย่อย 1leg modulation วงจรระบบ Converter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	37
3.18 ชุดแบบจำลองย่อย Triangle carrier วงจรระบบ Converter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	37
3.19 ชุดแบบจำลองย่อย PWM signal generator วงจรระบบ Converter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	38
3.20 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของภาค Inverter ที่ใช้ในการควบคุม.....	39
3.21 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Inverter controller โดยใช้ PWM ในการควบคุมของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	39
3.22 ชุดแบบจำลองย่อย Phase command voltage ภาควงจรระบบ Inverter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	40
3.23 ชุดแบบจำลองย่อย Triangular carrier2 ภาควงจรระบบ Inverter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	40
3.24 ชุดแบบจำลองย่อย Inverter side PWM signal control block ภาควงจรระบบ Inverter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	41
3.25 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ Pulse composition.....	42
3.26 วงจร Logic gate ของ D flip flop.....	43
3.27 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Pulse composition ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	44
3.28 สวิตซ์ชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch.....	45
3.29 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)	46
3.30 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C).....	47
3.31 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation.....	47
3.32 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Commutation ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ชุดแบบจำลองย่อยในส่วน input จากชุด Pulse composition ภาควงจรระบบ Commutation ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	49
3.34 ชุดแบบจำลองย่อยในส่วน Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ชั้นตอน (4C) ของสวิตซ์ทั้ง 9 ตัว ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	49
3.35 ชุดแบบจำลองย่อยในส่วน Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ชั้นตอน (4C) ของสวิตซ์ 1 ตัว ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink).....	50
4.1 ชุดจำลองระบบกักเก็บลมชุดเจนเนอเรเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG).....	52
4.2 ชุดจำลองระบบภาค Input ภาค Output และภาควงจรกำลังสวิตซ์ของระบบ Matrix converter.....	53
4.3 ชุดจำลองระบบระบบควบคุมสวิตซ์ของระบบ Matrix converter.....	55
4.4 ค่าแรงดัน Vrst Input (low speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ	57
4.5 ค่าแรงดัน Vrst Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง.....	57
4.6 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst Input (low speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ.....	58
4.7 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง.....	58
4.8 ค่าแรงดัน Vrst line Input (low speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ	59
4.9 ค่าแรงดัน Vrst line Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง.....	59
4.10 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst line Input (low speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ.....	60
4.11 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst line Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง	60
4.12 ค่ากระแส Irst line Input (low-speed) จาก PMSG ความเร็วต่ำ.....	61
4.13 ค่ากระแส Irst line Input (Hi-speed) จาก PMSG ความเร็วสูง.....	61
4.14 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส Irst Input (low speed) จาก PMSG ขณะความเร็วต่ำ.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส I _{rst} Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะความเร็วสูง.....	62
4.16 ค่าแรงดัน V _{uvw} Output (low-speed) จาก Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	63
4.17 ค่าแรงดัน V _{uvw} Output (Hi-speed) จาก Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหนดความเร็วสูง.....	63
4.18 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} output (low speed) จาก Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	64
4.19 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} output (low speed) จาก Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหนดความเร็วสูง.....	65
4.20 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} output (low speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ จาก Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	65
4.21 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} output (Hi-speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ จาก Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหนดความเร็วสูง.....	66
4.22 ค่าแรงดัน V _{uvw} line Output (low-speed) จาก Matrix converter ขณะผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	66
4.23 ค่าแรงดัน V _{uvw} line Output (Hi-speed) จาก Matrix converter ขณะผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	67
4.24 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} line output (low speed) จาก Matrix converter ขณะผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	68
4.25 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} line output (Hi-speed) จาก Matrix converter ขณะผ่านโหนดความเร็วสูง.....	68
4.26 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} line output (low speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จาก Matrix converter ขณะผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	69
4.27 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V _{uvw} line output (Hi-speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จาก Matrix converter ขณะผ่านโหนดความเร็วต่ำ.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และผู้เข้าถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ค่ากระแส $luvw$ Output (low-speed) จาก Matrix converter เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ขณะความเร็วต่ำ.....	70
4.29 ค่ากระแส $luvw$ Output (Hi-speed) จาก Matrix converter เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ขณะความเร็วสูง.....	70
4.30 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส $luvw$ output (low speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จาก Matrix converter ขณะความเร็วต่ำ.....	71
4.31 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส $luvw$ output (Hi-speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จาก Matrix converter ขณะความเร็วสูง.....	71
4.32 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง V_{rst} และ V_{uvw}	72
4.33 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง V_r และ V_u	72
4.34 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง V_s และ V_w	73
4.35 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง V_t และ V_w	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่ก็นั้นมาจาก การผลิตไฟฟ้ามาจาก ทรัพยากรสิ้นเปลืองเช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน โรงไฟฟ้าน้ำมันดีเซล โรงไฟฟ้าน้ำมันเตา และ โรงไฟฟ้าจาก แก๊สธรรมชาติ เป็นต้น และบางส่วนก็ได้ทำการนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้าน ซึ่ง จากวิธีการผลิตไฟฟ้า ที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะทำให้เกิดเป็นมลภาวะสะสมในชั้นบรรยากาศทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนและ สิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่เป็นการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่ง ทางผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญนี้เลยมีความคิดที่นำพลังงานทดแทนจากธรรมชาติ เช่น พลังงานจาก แสงแดด พลังงานจากลม และพลังงานจากน้ำ เป็นต้น มาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อลดการผลิต ไฟฟ้าด้วยทรัพยากรสิ้นเปลืองและลดการนำเข้าไฟฟ้ามาจากต่างประเทศ

จากการสำรวจแล้วพลังงานทดแทนที่ใช้ในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะการใช้พลังงานจาก แสงแดด และ พลังงานจากน้ำ ส่วนพลังงานจากลมนั้น ขณะนี้ในประเทศไทยเริ่มมีการใช้กังหันลม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าบ้างแล้ว เช่น โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าลำตะคอง โครงการทุ่งกังหันลมเขาค้อ เป็นต้น ซึ่งเป็นระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to back PWM converter ซึ่งระบบนี้ใช้กันอย่าง แพร่หลายทั้งอเมริกาและยุโรป ระบบการแปลงพลังงานนี้มี ข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาที่สูง เนื่องจากเป็นระบบการแปลงพลังงานมีความซับซ้อน และมีการสูญเสียพลังงานค่อนข้างมากระหว่าง การแปลงพลังงานด้วยชุดระบบการแปลงพลังงานนี้

จากข้อเสียของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to back PWM converter ที่กล่าวมา ข้างต้นนั้นที่ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยที่จะทำการพัฒนาระบบการแปลงพลังงานให้มีความซับซ้อน ของระบบน้อยลง สามารถดูแลรักษาได้ง่ายขึ้นและใช้งบประมาณในการดูแลรักษาได้น้อยลง และมีการสูญเสียพลังงานในระหว่างการแปลงพลังงานของระบบที่ต่ำ จึงเป็นที่มาของการค้นคว้าวิจัยของ ระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix converter) ซึ่งมีจำนวนชุดระบบควบคุมที่น้อยกว่า ระบบการแปลงพลังงาน Back to back PWM converter จึงจึงผลทำให้ทั้งค่าบำรุงรักษาระบบ

ลดลง และลดการสูญเสียพลังงานระหว่างการแปลงพลังงานน้อยลง อีกทั้งระบบระบบการแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix converter) นั้นเป็นระบบที่ใหม่กว่าระบบการแปลงพลังงาน Back to back PWM converter จึงสามารถทำการพัฒนาและต่อยอดได้อีกค่อนข้างมาก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Matrix converter เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วย Matrix converter ในความถี่ที่ต่างกัน

1.3 หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Matrix converter ซึ่งในการควบคุมระบบการแปลงพลังงานจะใช้วิธีการโดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุม การเปิด-ปิดของตัวสวิตซ์เนื่องจากเป็นวิธีการที่ควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและวงจรมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและการใช้จำนวนอุปกรณ์น้อย

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Matrix converter ด้วยโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ในการทดสอบการทำงานของระบบ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการทำงานและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบก่อนที่จะนำไปทดสอบในระบบที่เป็นของจริง

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาทั้งหมด 5 บท และภาคผนวกอีก 1 ภาค โดยจะมีเนื้อหาที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ มีเนื้อหาเกี่ยวกับความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ในการทำวิจัยในวิทยานิพนธ์ หลักการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมถึงรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึง คุณสมบัติและหลักการทำงานของ PMSG, ระบบ Matrix converter, ชนิดวงจรสวิตซ์ซึ่งแบบ RB-IGBT

บทที่ 3 การออกแบบระบบการจำลองการทำงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ กล่าวถึง การออกแบบระบบการจำลองการทำงานในโปรแกรมแมทแลป แอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ประกอบด้วย ชุดระบบกักเก็บพลังงาน ชุดระบบอินพุตของระบบ Matrix converter, ชุดระบบคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ (Converter/Inverter), ชุดระบบควบคุมการแปลงพลังงาน, ชุดระบบเอาต์พุต

บทที่ 4 การทดสอบระบบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Matrix converter กล่าวถึง รายละเอียดของการทดสอบระบบการทำงานในความเร็วลมช่วงต่างๆและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบต่างๆ

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัย เป็นการสรุปงานวิจัยที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยในอนาคต รวมถึงการวิจัยต่อยอด

ภาคผนวก ก. ซึ่งกล่าวถึงบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ในการประชุมระดับนานาชาติ

บทที่ 2

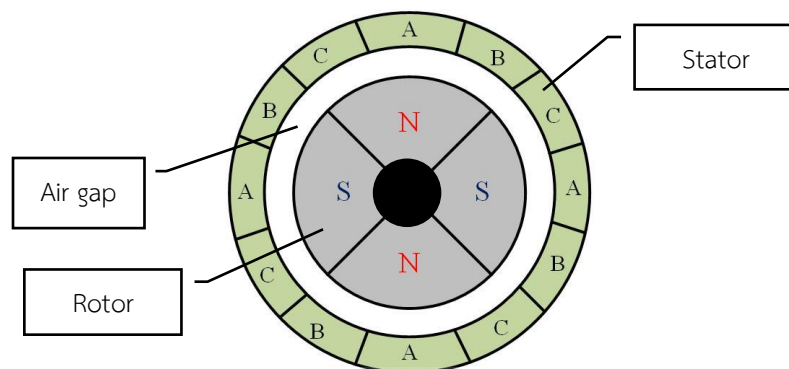
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Matrix converter จุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วย Matrix converter ในความเร็วลมที่แตกต่างกัน ซึ่งระบบกังหันลมแปลงพลังงานแบบ Matrix converter จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ 1.ระบบอินพุต ซึ่งในระบบนี้จะใช้เจนเนอเรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG) ซึ่งข้อดีของ PMSG คือ 1.ระบบจะไม่มีเสียงรบกวนเนื่องจากชุดกังหันลมจะสามารถต่อเข้าโดยตรงกับชุด Generator โดยไม่จำเป็นต้องมีชุดทดกำลัง (Gear Box) 2. ระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix converter นั้นเป็นระบบที่มีขนาดเล็กเนื่องจากระบบนี้จะใช้จำนวนวงจร Switching ที่มีจำนวนที่น้อยกว่าระบบอื่น ซึ่งทำให้มีการดูแลที่รักษาง่ายและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่ต่ำกว่าระบบอื่น

2.2 เจนเนอเรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

โครงสร้างเจนเนอเรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส[1-3] เป็นเจนเนอเรเตอร์แบบ 3 เฟสซึ่งมีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้ว (16 Pole) ซึ่งมีโครงสร้างหลักอยู่ 2 ส่วนคือ 1. ส่วนที่เป็นขดลวดที่ไม่เคลื่อนที่ ซึ่งจะเรียกส่วนนี้ว่า สเตเตอร์ (Stator) 2. ส่วนที่เป็นชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ซึ่งจะเรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งในชิ้นส่วนนี้จะเป็ชนิดแบบแม่เหล็กถาวร โดยทั้งชิ้นส่วนทั้งสองนั้นจะมีช่องว่างระหว่างกลางซึ่งจะเรียกว่าช่องอากาศ (Air gap) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเจนเนอเรเตอร์ PMSG

ซึ่งเจนเนอเรเตอร์ PMSG ตัวโรตอร์นั้นจะเป็นแบบขั้วยื่น (Salient pole rotor) ซึ่งทำให้เกิดช่องอากาศที่ไม่สม่ำเสมอ จึงส่งผลทำให้ฟลักซ์แม่เหล็ก ณ จุดช่องอากาศนั้นเกิดการกระจายตัวไม่เท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นกับ 2 แกนหลักคือ แกนแม่เหล็กของโรตอร์ (Direct axis) กับ แกนตั้งฉากกัน (Quadrature axis) เมื่อเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่แกนแม่เหล็กของโรตอร์นี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาที่แกนแม่เหล็กของโรตอร์ (V_d) และเมื่อเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่แกนตั้งฉากนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาที่แกนตั้งฉาก (V_q) ซึ่งขนาดของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้นนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านพื้นที่ดังที่แสดงในสมการที่ (1)

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

ซึ่งจากสมการที่ (1) นั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นจะมีทิศทางต้านกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ (Len's Law) ซึ่งในกรณีนี้อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กจะมีจำนวนของขดลวดและขนาดของพื้นที่เข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) – (4)

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2)$$

ค่าฟลักซ์แม่เหล็กจะเกิดการเปลี่ยนไปเมื่อพื้นที่ A ทำมุม 0° จะเป็นไปตามสมการที่ (3)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

จากนั้นทำสมการที่ (3) มาแทนในสมการที่ (2) จะได้เป็นสมการที่ (4)

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (4)$$

ซึ่งตำแหน่งของขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสจะวางห่างกัน 120° ซึ่งจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแต่ละเฟสเป็นไปตามสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ

$$e_a = E \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$e_b = E \sin(\omega t + 240) \quad (6)$$

$$e_c = E \sin(\omega t + 120) \quad (7)$$

นอกจากนี้จำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และความเร็วรอบของโรเตอร์นั้นจะมีผลต่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (8)

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (8)$$

เมื่อ N_s คือ อัตราเร็วรอบซึ่งโครนส์มีหน่วยเป็น...

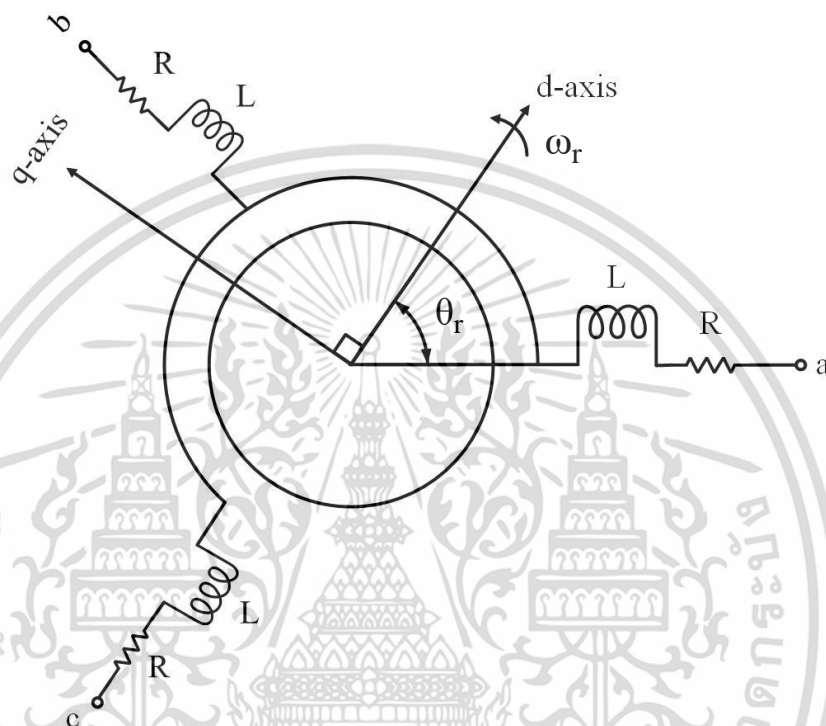
f คือ ความถี่มีหน่วยเป็น Hz

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

2.2.1 แบบวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์ของเจนเนอเรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG)

แบบวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์ของเจนเนอเรเตอร์ PMSG ที่แสดงใน รูปที่ 2.2 จะแสดงให้เห็นว่า ขดลวดสเตเตอร์เฟส a, b และ c จากวงทำมุมห่างกัน 120° และจุดเชื่อมต่อของขดลวดสเตเตอร์แต่ละ เฟส a, b และ c จะมีความต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตเตอร์ (L) โดยเทียบกับ d-axis แกนอ้างอิงที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก (Direct Axis) และ q-axis แกนอ้างอิงที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (Quadrature Axis) โดยที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r) และตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ (θ_r)



รูปที่ 2.2 แบบวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์ของเจนเนอเรเตอร์ PMSG

ซึ่งจากวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์จากรูปที่ 2.2 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ว่าด้วยแรงดันไฟฟ้า (Kirchhoff's Voltage Law, KVL) สามารถเขียนไปเป็นตามสมการที่ (9)

$$U_{abc} = Ri_{abc} + L \frac{d}{dt} i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{pm}(\theta) \quad (9)$$

เมื่อ U_{abc} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (เฟส a,b,c)

i_{abc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (เฟส a,b,c)

R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง $\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt}$ คือแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Back e.m.f) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่ (10)

$$\frac{d\lambda_{pm}(\theta)}{dt} = -\omega_r \lambda_{pm} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

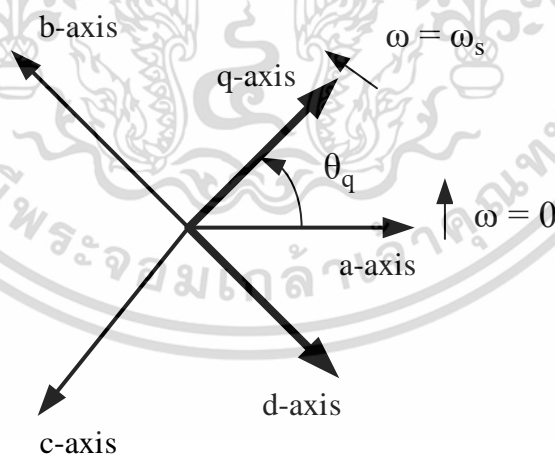
เมื่อนำสมการที่ (9) มาแทนในสมการที่ (10) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่ (11), (12) และ (13)

$$U_a = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r) \quad (11)$$

$$U_b = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \quad (12)$$

$$U_c = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r + 2\pi/3) \quad (13)$$

จากสมการที่ (11), (12) และ (13) เนื่องจากเจนเนอเรเตอร์แบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส นั้น ในการพิจารณาคอนข้างมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นแปลงสมการให้อยู่ในรูปแบบเจนเนอเรเตอร์แบบกระแสตรง โดยทำการแปลงจากแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบ 3 เฟส มาอยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสโดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์ d-q axis ซึ่งในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแกนโรเตอร์ d-q axis และแกนสเตเตอร์ a,b,c

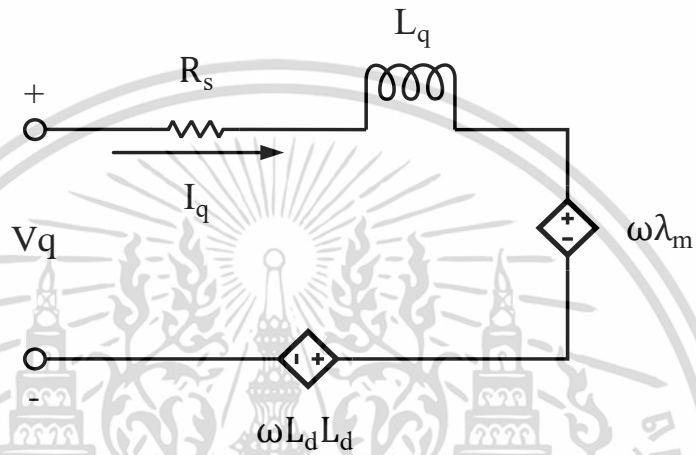
จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกนโรเตอร์ d-q axis และแกนสเตเตอร์ a,b,c โดยกำหนดให้แกน d-q

หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_r) ซึ่งแสดงในสมการที่ (14)

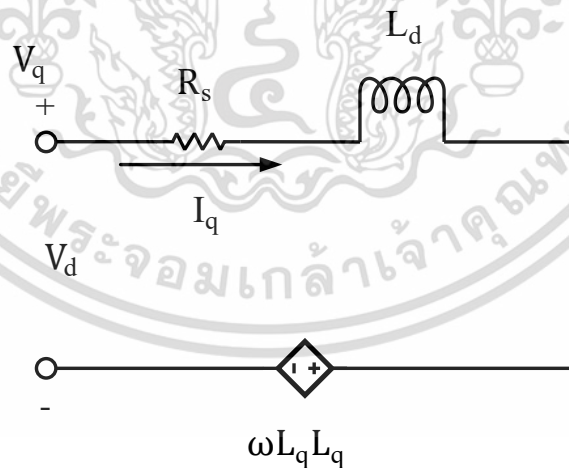
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} U_q \\ U_d \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r-2\pi/3) & \cos(\theta_r+2\pi/3) \\ \sin\theta_r & \sin(\theta_r-2\pi/3) & \sin(\theta_r+2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

ซึ่งจากวงจรจำลองของแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก q-axis ในรูปที่ 2.4 และวงจรจำลองแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก d-axis ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 วงจรจำลองของแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก q-axis



รูปที่ 2.5 วงจรจำลองของแกนอ้างอิงโรเตอร์ที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก d-axis

ซึ่งสามารถเขียนในอยู่ในรูปสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_d = R_s i_d - \omega_r \lambda_q + \frac{d}{dt} \lambda_d \quad (15)$$

$$U_q = R_s i_q - \omega_r \lambda_d + \frac{d}{dt} \lambda_q \quad (16)$$

ซึ่งค่า λ_d และ ค่า λ_q จะแสดงในสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{pm} \quad (17)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (18)$$

จากนั้นนำสมการที่ (17) และ (18) มาแทนในสมการ (15), (16)

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \quad (19)$$

$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r (L_d i_d + \lambda_{pm}) \quad (20)$$

แรงบิดที่เกิดขึ้นของเจนเนอเรเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรนั้นจะเป็นไปตามสมการที่ (21)

$$T_e = -\frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) [i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (21)$$

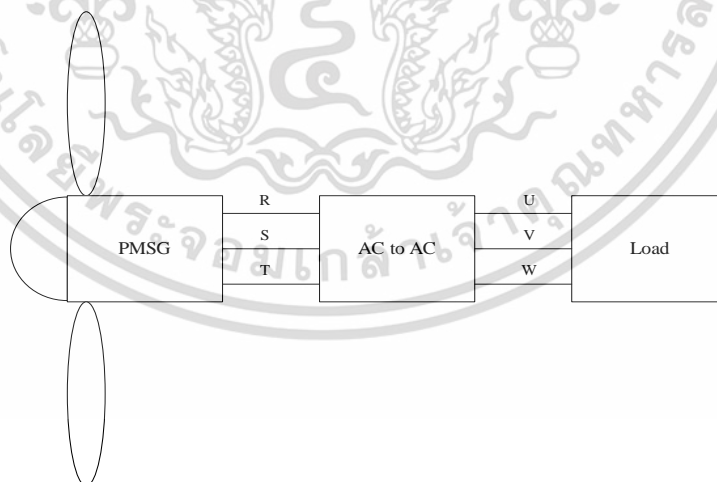
ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแรงบิดของโหลด, โมเมนต์แรงเฉื่อย, ความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ และสัมประสิทธิ์ความหน่วง ซึ่งจะแสดงในสมการที่ (22)

$$T_e = T_m - J \frac{d\omega_m}{dt} - B\omega_m \quad (22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

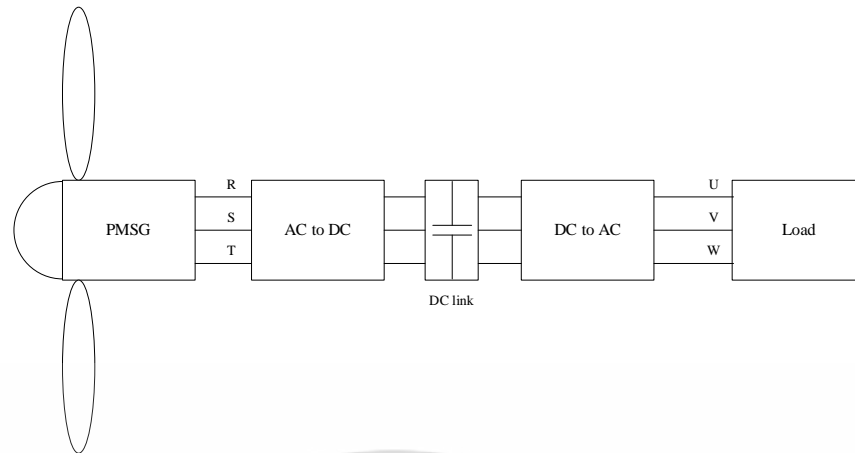
2.3 ระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix convertor)

ระบบ Matrix convertor คือระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) [4-8] ได้โดยตรง สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่โดยอิสระ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับระบบแปลงพลังงานแบบ Back to back PWM converter เนื่องจากระบบ Matrix converter นั้นสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าอินพุตจากกระแสสลับ (AC) จากตัวเจนเนอเรเตอร์ และควบคุมเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ได้โดยตรง ดังในรูปที่ 2.6 ซึ่งแตกต่างจากระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to back PWM converter นั้น จะต้องมีการแปลงพลังงานอินพุตจากเจนเนอเรเตอร์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หลังจากนั้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะผ่านชุดตัวระบบดีซีลิงค์ (DC link circuit) โดยจะมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้มีความคงที่ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดพลังงานที่สูญเสีย (loss) ไปในรูปของความร้อนและมีการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุของตัวระบบดีซีลิงค์ (DC link circuit) หลังจากนั้นเมื่อสัญญาณผ่านชุดระบบดีซีลิงค์ (DC link circuit) มาแล้ว ระบบจะต้องทำการแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็น ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อเป็นเอาต์พุตเพื่อไปใช้งานต่อไปดังในรูปที่ 2.7



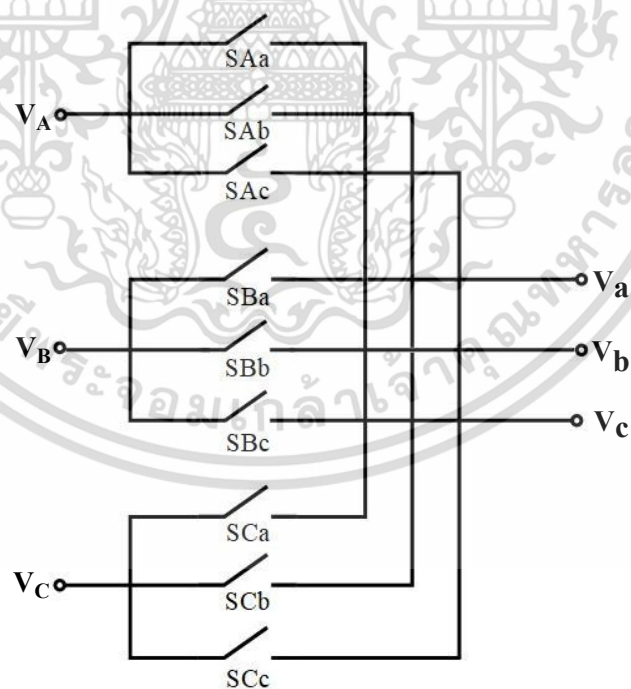
รูปที่ 2.6 ระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



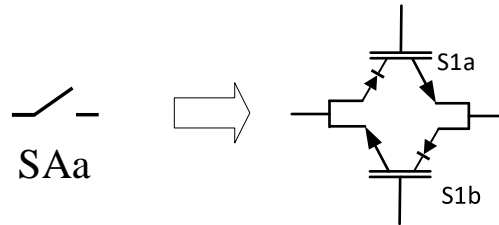
รูปที่ 2.7 ระบบแปลงพลังงานแบบ Back to back PWM converter

ซึ่งวงจรหลักของระบบ Matrix converter จะประกอบด้วยสวิตช์แบบสองทิศทาง (Bi-Direction Switch) จำนวน 9 ตัว ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งสวิตช์แบบสองทิศทางนั้นสามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้สองทิศทาง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 วงจรสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรสวิตช์ซึ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์

ซึ่งจากรูปที่ 2.8 สามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเมทริกซ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุทและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (23) - (27)

$$V_{out} = T \cdot V_{in} \quad (23)$$

ซึ่ง V_{out} จะเป็นไปตามสมการที่ (24)

$$V_{out} = \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

ซึ่ง V_{in} จะเป็นไปตามสมการที่ (25)

$$V_{in} = \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

ซึ่ง T จะเป็นไปตามสมการที่ (26)

$$T = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

จากนั้นนำสมการที่ (24), (25), (26) มาแทนในสมการที่ (23) จะได้เป็นสมการที่ (27)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

จากนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเมทริกซ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (28) – (32)

$$i_{in} = T^T \cdot i_{out} \quad (28)$$

ซึ่ง i_{in} จะเป็นไปตามสมการที่ (29)

$$i_{in} = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

ซึ่ง T^T จะเป็นไปตามสมการที่ (30)

$$T^T = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Aa}(t) & S_{Ac}(t) \\ S_{Ba}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Bc}(t) \\ S_{Ca}(t) & S_{Cb}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \quad (30)$$

ซึ่ง i_{out} จะเป็นไปตามสมการที่ (31)

$$i_{out} = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (31)$$

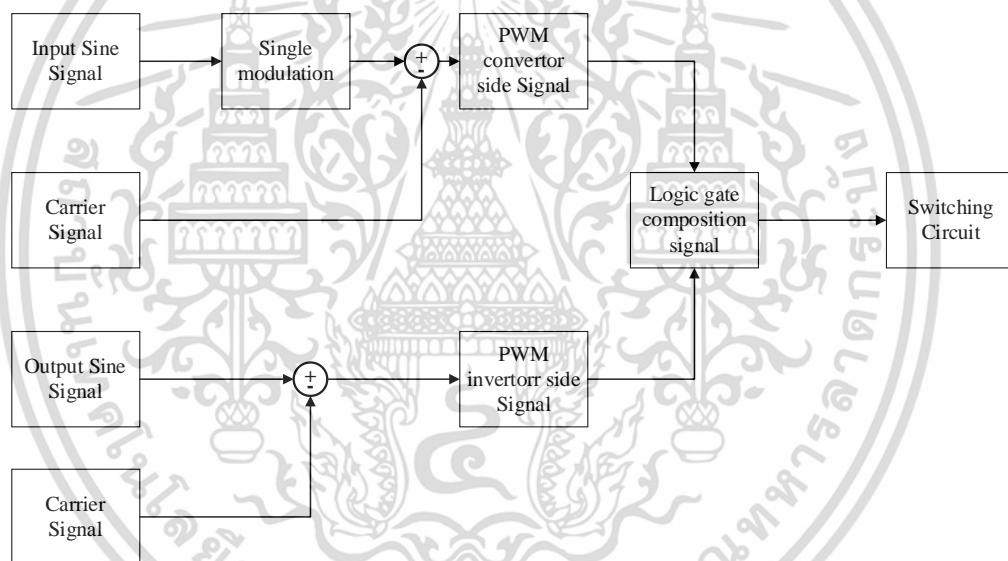
จากนั้นนำสมการที่ (29), (30), (31) มาแทนในสมการที่ (28) จะได้เป็นสมการที่ (32)

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Aa}(t) & S_{Ac}(t) \\ S_{Ba}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Bc}(t) \\ S_{Ca}(t) & S_{Cb}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

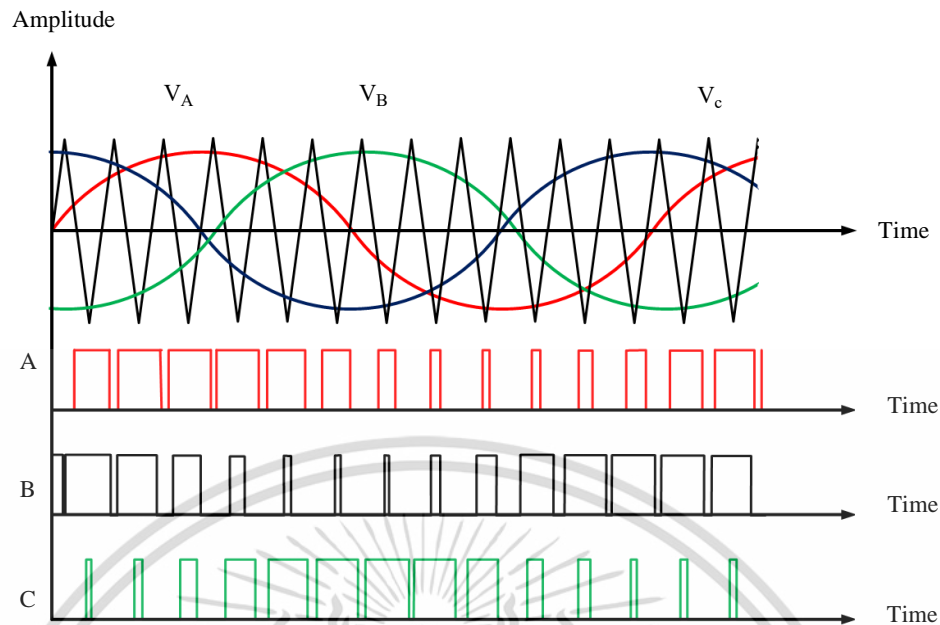
2.4 เทคนิคการควบคุมวงจรสวิตซ์ของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์โดยใช้สัญญาณ PWM (Pulse width modulation technique)

เนื่องจากวงจรสวิตซ์ของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์นั้น จำเป็นจะต้องมีการควบคุมการทำงานของสวิตซ์ของแต่ละตัวให้เป็นไปตามต้องการอย่างถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีควบคุมสวิตซ์โดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์[9-13] เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายสามารถออกแบบระบบได้ง่าย อีกทั้งยังมีต้นทุนที่ต่ำซึ่งวิธีการควบคุมจะเป็นไปตามไดอะแกรมดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยมสัญญาณมอดูเลต และสัญญาณ PWM ที่ทำหน้าที่ปิด-เปิด ตัวสวิตซ์



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมการทำงานการควบคุมสวิตซ์ด้วย PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



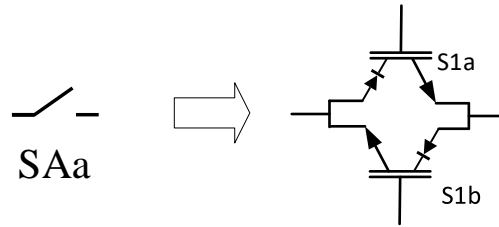
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยม, สัญญาณมอดูเลตและสัญญาณ PWM

ซึ่งจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.11 สัญญาณสามเหลี่ยมจะทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณ Sinusoidal ซึ่งจะได้สัญญาณ PWM ซึ่งค่าความถี่ของสัญญาณ PWM จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสัญญาณ Sinusoidal หลักจากนั้นก็ได้นำสัญญาณ PWM ของแต่ละเฟสมาเปรียบเทียบกับกันทั้ง 3 เฟส โดยใช้วงจร D flip flop ในการเปลี่ยนเทียบสัญญาณ เพื่อป้องกันการ Short circuit ของวงจรสวิตซ์ซึ่งอันเนื่องมาจากสัญญาณ PWM ของแต่ละเฟสที่มีช่วงการทำงานที่ตรงกัน

2.5 ระบบ Commutation ในการควบคุมสวิตซ์ชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch

ระบบ Commutation นั้นคือระบบที่ทำหน้าที่ ควบคุมการไหลและทิศทางของกระแสของตัวสวิตซ์ซึ่งเป็นชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

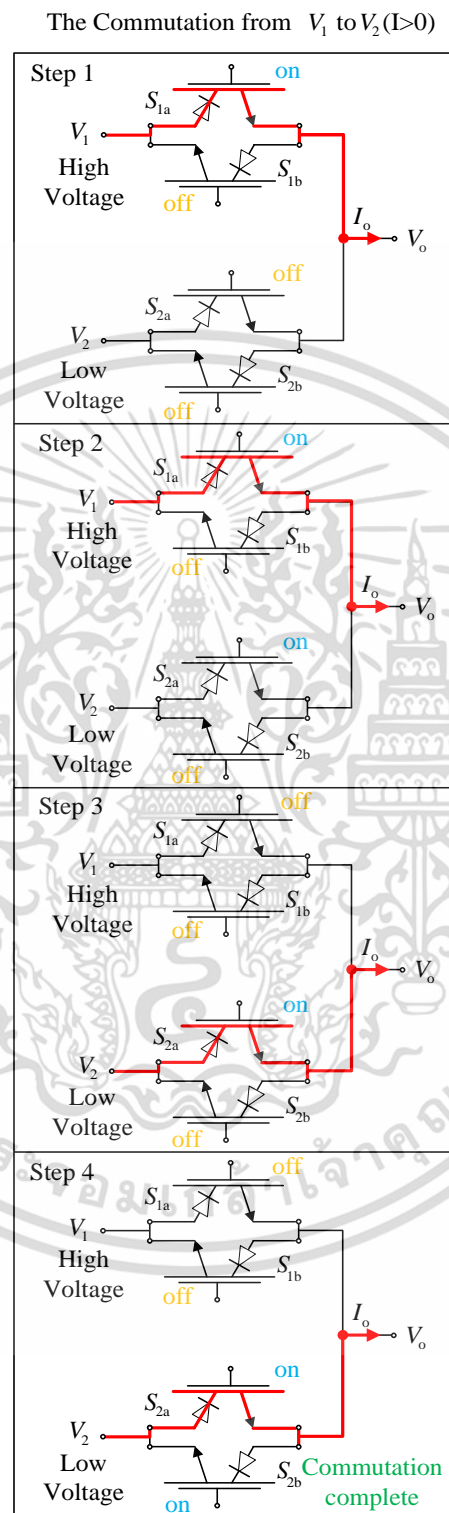


รูปที่ 2.12 สวิตชิงชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch

ซึ่งวิธีการ Commutation นั้นวิธีการควบคุม 5 แบบด้วยกัน[14] คือ 1. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) 2. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V) 3. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C) 4. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V) 5.การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสและแรงดันแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)

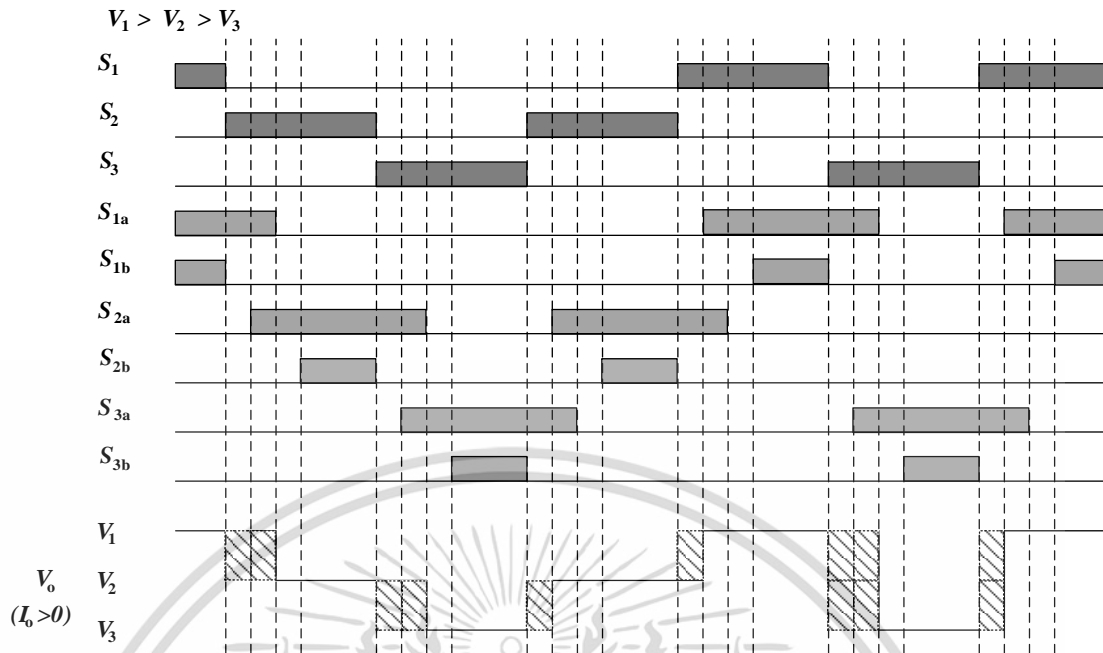
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)



รูปที่ 2.13 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

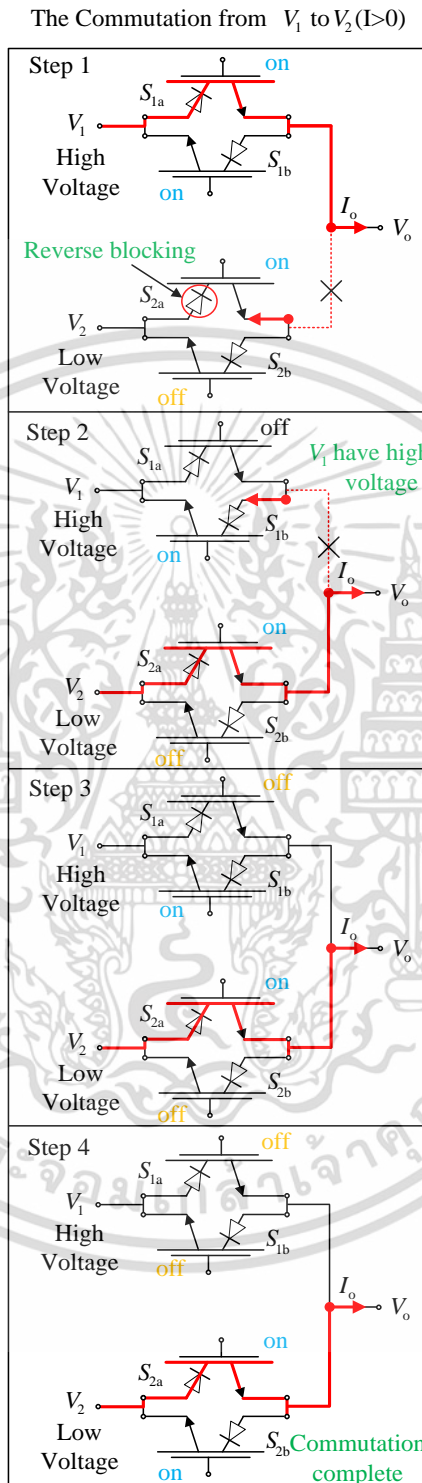
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

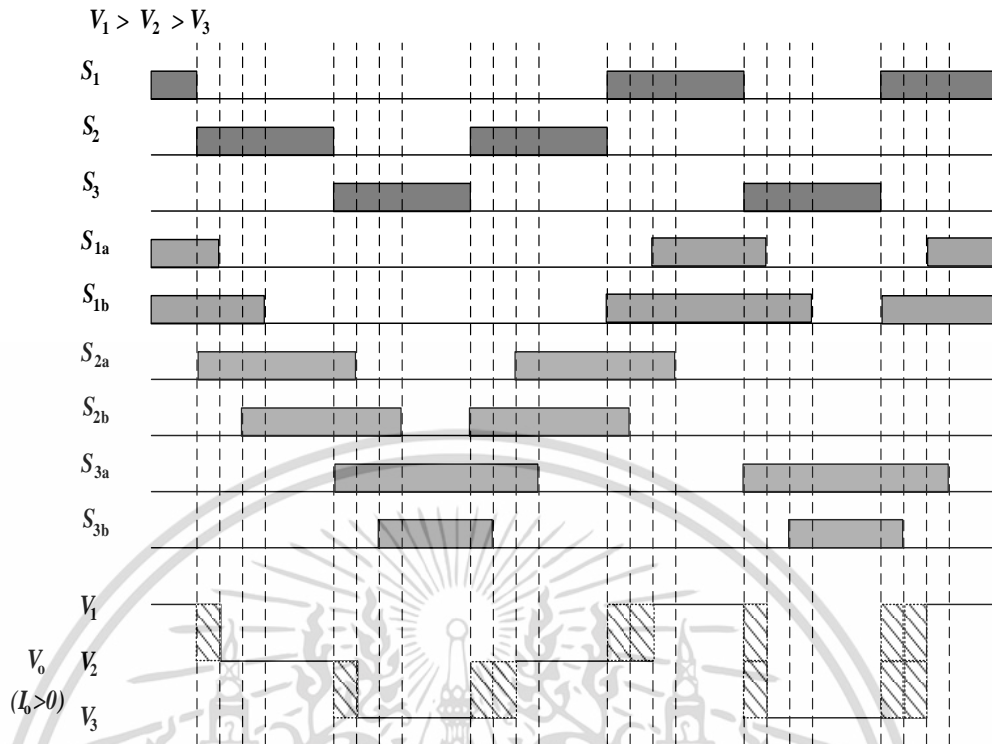
กระแสไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอน ในปัจจุบันการกำหนดเวลาการสวิตซิ่งของสองสวิตช์ในขั้วกระแสเดียวกันนั้น พิจารณาจากการกำหนดระยะเวลาการเชื่อมต่อกระแสเพื่อเปิดสวิตช์ อุปกรณ์ที่มีขั้วกระแสเอาต์พุตเดียวกัน จากนั้นกำหนดเวลาการสวิตซิ่งของสวิตช์ตัวอื่น ๆ โดยพิจารณาจะ Dead Time เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน

2.5.2 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)



รูปที่ 2.15 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

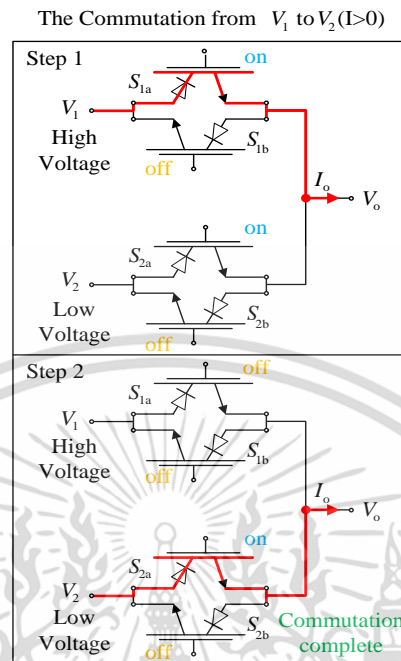
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



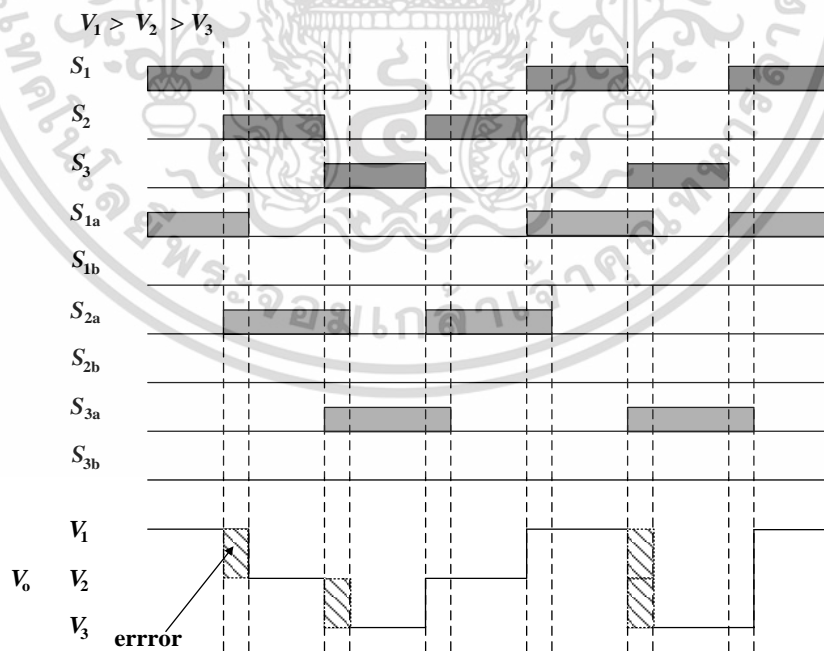
รูปที่ 2.16 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

รูปที่ 2.16 แผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอนที่ $I_o > 0$ สำหรับขั้นตอนที่ (1) การเปิด S_{2b} หมายถึงเกิดการลัดวงจร ขั้วเอาต์พุตจะเปิดขึ้นเมื่อ S_{1a} หรือ S_{1b} ถูกปิด และไม่มีความเป็นไปได้ที่จะรักษาเส้นทางของกระแส การลัดวงจรและวงจรเปิดจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ หากไม่ได้เปิด S_{2a} ในขั้นตอนที่ (2) เนื่องด้วยเส้นทางของกระแสมีทิศทางเป็นบวกเมื่อ S_{2a} เปิด S_{1a} สามารถปิดได้ ในขั้นตอนที่ (3) การลัดวงจรจะไม่เกิดขึ้นแม้ว่า S_{2b} จะเปิดอยู่ เนื่องจาก S_{1a} ปิดอยู่ ในขั้นตอน (4), S_{1b} สามารถปิดได้เนื่องจากเส้นทางของกระแสมีทิศทางลบจึงสามารถมั่นใจได้เมื่อเปิด S_{2b} ในวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้า 4 ขั้นตอน รูปแบบการสวิตช์ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน ซึ่งจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าอินพุตนอกจากนี้วิธีการแปลงนี้สามารถเลือกรูปแบบการแปลงที่แน่นอนได้ โดยพิจารณาถึงการรักษาเส้นทางกระแสได้ ข้อผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจะเกิดขึ้นในรูปแบบการแปลงทั้งหมดและขนาดของข้อผิดพลาดจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสเอาต์พุตและความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันไฟฟ้าสำหรับจุดมุ่งหมายของการแปลงกระแสไฟฟ้า

2.5.3 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)



รูปที่ 2.17 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

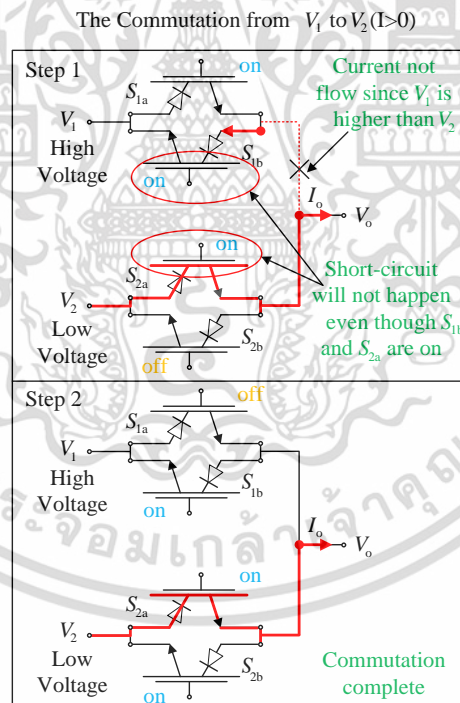


รูปที่ 2.18 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

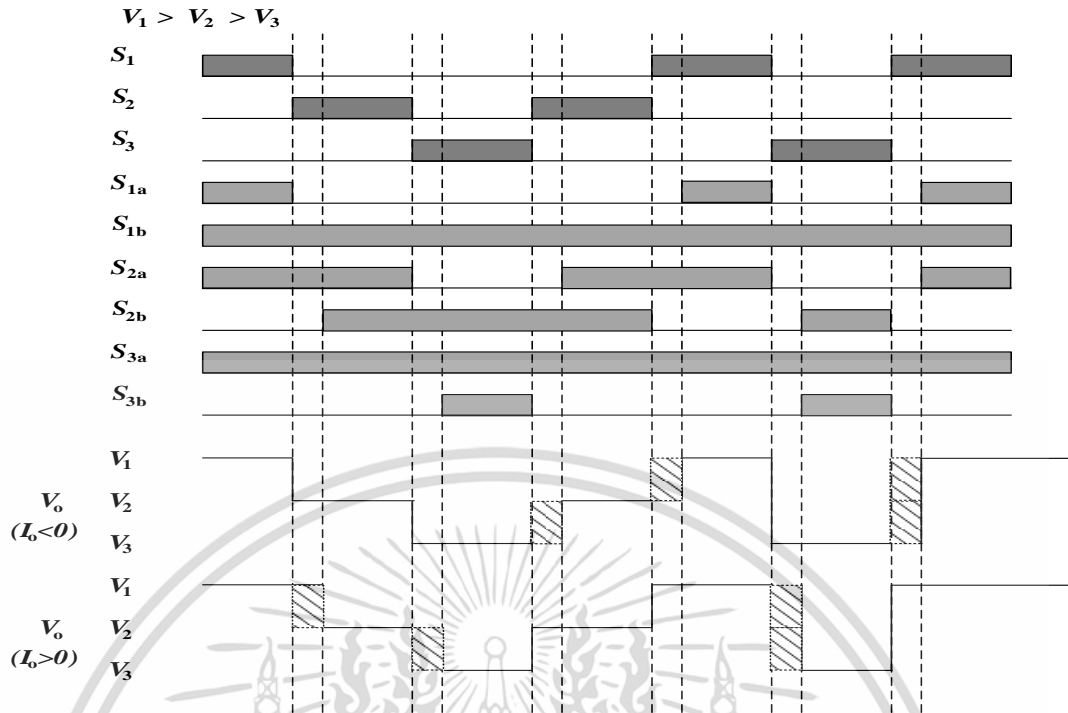
รูปที่ 2.18 แผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงกระแสไฟฟ้าแบบ 2 ชั้นตอน (2C) ซึ่งการแปลงแบบ 2 ชั้นตอนจะสามารถกำจัด Dead Time ได้เนื่องจาก RB-IGBTs ในเส้นทางที่ไม่มีกระแสไหลผ่านจะไม่ทำงานซึ่งจะเหมือนการแปลงกระแสแบบ 4 ชั้นตอน (4C) เพื่ออธิบายหลักการทำงานขั้นพื้นฐาน สมมติว่า แรงดันไฟฟ้าขาเข้าคือ $V_1 > V_2 > V_3$ และทิศทางของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นบวก S_{1a} , S_{2a} และ S_{3a} กลายเป็นสวิตช์นำไฟฟ้าเมื่อกระแสเอาต์พุตเป็น $I_o > 0$ และ S_{1b} , S_{2b} และ S_{3b} จะคงสถานะ OFF ไว้จนกว่ากระแสไฟเอาต์พุตจะเป็นศูนย์ เพราะมันกลายเป็นสวิตช์ที่ไม่นำไฟฟ้า เอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้า V_o จะมี ข้อผิดพลาด เนื่องจากการแปลงเฟสแรงดันสูงไปยังเฟสแรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่นการเปลี่ยนจาก S_1 ถึง S_2 อย่างไรก็ตามข้อผิดพลาดจะไม่เกิดขึ้นสำหรับการเปลี่ยนจากเฟสของแรงดันต่ำไปเฟสของแรงดันสูง

2.5.4 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ชั้นตอน (2V)



รูปที่ 2.19 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ชั้นตอน (2V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

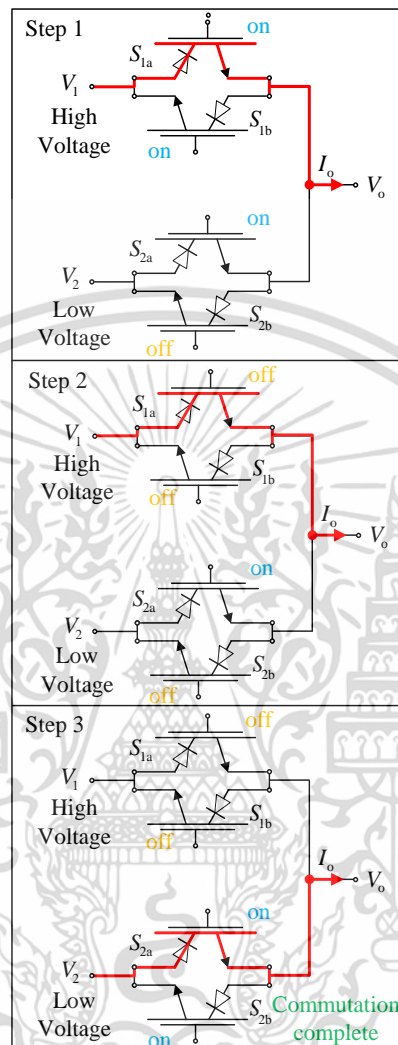


รูปที่ 2.20 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ชั้นตอน (2V)

รูปที่ 2.20 แสดงแผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 2 ชั้นตอนโดยที่ $I_o > 0$ ในวิธีแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 2 ชั้นตอน สวิตช์ที่ไม่เกิดการลัดวงจรของแหล่งพลังงานในวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 4 ชั้นตอน จะเปิดอยู่เสมอ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะลดระยะเวลาเพื่อให้เส้นทางของกระแสในวงจร สวิตช์ที่สถานะเปิดจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของจุดมุ่งหมายของการแปลงและแหล่งที่มาของการแปลง ดังนั้นสวิตช์สถานะเปิดสำหรับเฟสแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและเฟสแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดสามารถอยู่กับที่ได้จนกว่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม สวิตช์ที่สถานะเปิด สำหรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจะต้องเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของปลายทางของการแปลงหรือแหล่งที่มาของการแปลง ดังนั้นแม้ว่าคำสั่งการสวิตช์จะไม่ถูกกำหนดให้กับสวิตช์ของระหว่างเฟส แต่ก็จำเป็นต้องทำการสวิตช์

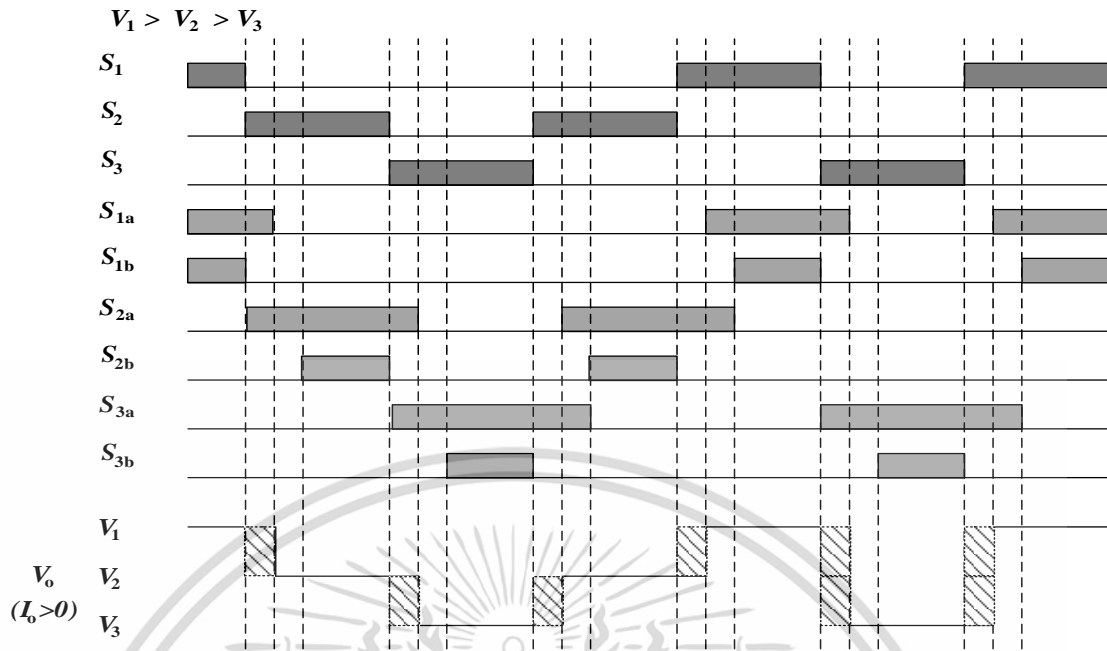
2.5.5 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)

The Commutation from V_1 to V_2 ($I > 0$)



รูปที่ 2.21 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและ
กระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)

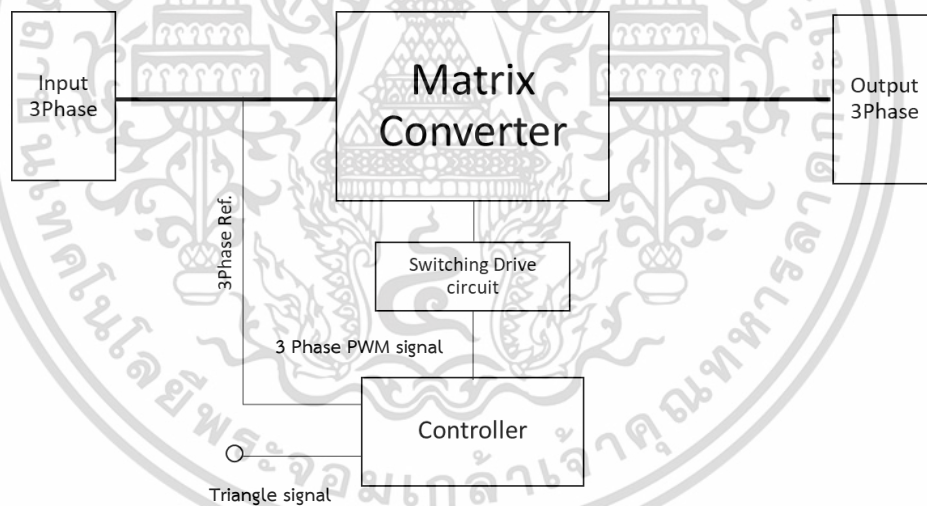
รูปที่ 2.22 แสดง กราฟเวลาสำหรับการแปลงกระแสและแรงดัน 3 ขั้นตอนโดยที่ $I_o > 0$ ในวิธีการแปลงกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบ 3 ขั้นตอน รูปแบบการแปลง จะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ขนาดของแรงดันไฟฟ้าอินพุตและขั้วของกระแสไฟเอาต์พุต รูปแบบการสวิตช์ซึ่งจะถูกกำหนดในขั้นต้นตามวิธีแปลงแรงดันไฟฟ้าหรือวิธีแปลงกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนการแปลงที่สามารถกำจัดได้โดยใช้ข้อมูลที่บัพทร่อง (ขั้วกระแสไฟเอาต์พุตสำหรับวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้าและความสัมพันธ์ขนาดของแรงดันอินพุตสำหรับวิธีการแปลงกระแสไฟฟ้า) โดยไม่เป็นปัญหา จากนั้นเลือกรูปแบบการสวิตช์ของ 3 ขั้นตอน สำหรับวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 ขั้นตอนรูปแบบการสวิตช์ซึ่งสามารถเลือกได้เองเนื่องจากไม่มีข้อจำกัด (เนื่องจากวงจรเปิดโหนดและลัดวงจรแหล่งพลังงาน) ในช่วงเวลาการเปิด / ปิดของสวิตช์ที่ดำเนินการในขั้นตอนนี้ได้ถูกกำจัดออกไป

บทที่ 3

ขั้นตอนการจำลองระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้การแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

3.1 กล่าวนำ

จากที่ได้กล่าวถึงระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้ระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ (Matrix converter) ซึ่งการจำลองระบบนั้นได้ใช้โปรแกรมแมทแล็บแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ในการจำลองระบบ ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักๆอยู่ 4 ส่วนคือ 1. ภาควงจรอินพุต (Input) 2. ภาควงจรกำลังสวิตซ์ ซึ่ง 3. ภาควงจรเอาต์พุต (Output) และ 4. ภาควงจรควบคุมวงจรถูกกำลังสวิตซ์ซึ่ง



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้ระบบ Matrix converter ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

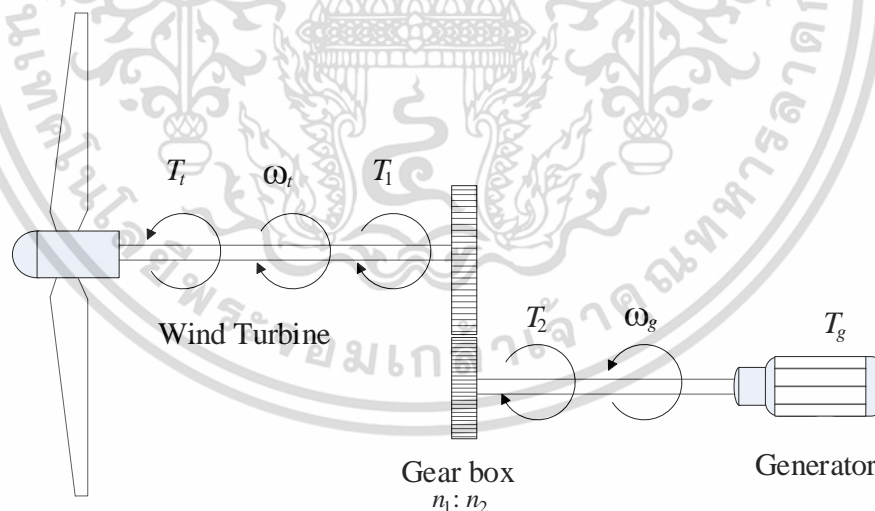
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ภาควงจรอินพุต (Input)

ในส่วนอินพุต (Input) มีส่วนประกอบคือ 1. ชุดกังหันลมจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลม ซึ่งตัวชุดกังหันลม จะต่อเข้ากับ PMSG ซึ่งข้อดี PMSG คือ ไม่มีเสียงรบกวน เนื่องจากชุดกังหันลมจะสามารถต่อเข้าโดยตรงกับชุดเจนเนอเรเตอร์ โดยไม่ต้องมีชุดทดกำลัง (Gear Box) ซึ่งระบบทั่วไปจะใช้เจนเนอเรเตอร์แบบเหนี่ยวนำ (IG) ซึ่งจะต้องมีชุดทดกำลังในการขับเคลื่อนเจนเนอเรเตอร์ ในการสร้างกระแสไฟฟ้าซึ่ง Output ของ PMSG นั้นจะเป็นลักษณะสัญญาณ Sine 3 phase แต่เนื่องจากเป็น Output ที่ออกมาจากเจนเนอเรเตอร์นั้นสัญญาณจะยังไม่เสถียร เนื่องจากจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดตัวกังหันลม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการแปลงพลังงานที่ทำหน้าที่ให้สัญญาณ Output มีความเสถียรขึ้น

3.2.1 ชุดจำลองระบบกังหันลม (Wind turbine simulation system)

ชุดกังหันลมนั้นขนาดกำลัง 300 วัตต์ (Watt) ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดกังหันลมนั้นขนาดกำลัง 300 วัตต์ (Watt)

จากความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน รูปที่ 3.1 นั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของ

สมการได้ตามสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_g = [T_g - Q(n_2/n_1) - \{B_g + B_t(n_2/n_1)^2\}\omega_g] \frac{1}{\{J_g + J_t(n_2/n_1)^2\}s} \quad (3.1)$$

เมื่อ ω_g คือ ความเร็วเชิงมุมของเจนเนอเรเตอร์

T_g คือ แรงบิดของเจนเนอเรเตอร์

Q คือ แรงบิดของชุดกึ่งหันลม

n_2/n_1 คือ อัตราทดระหว่างชุดกึ่งหันลมกับเจนเนอเรเตอร์

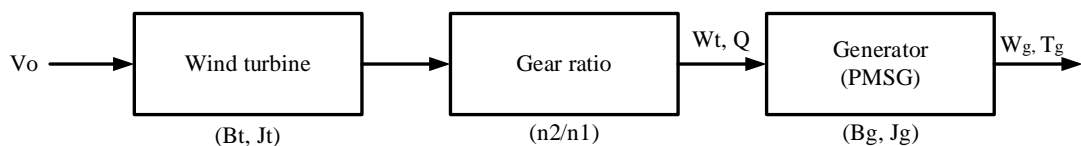
B_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเจนเนอเรเตอร์

B_t คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชุดกึ่งหันลม

J_g คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของเจนเนอเรเตอร์

J_t คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของชุดกึ่งหันลม

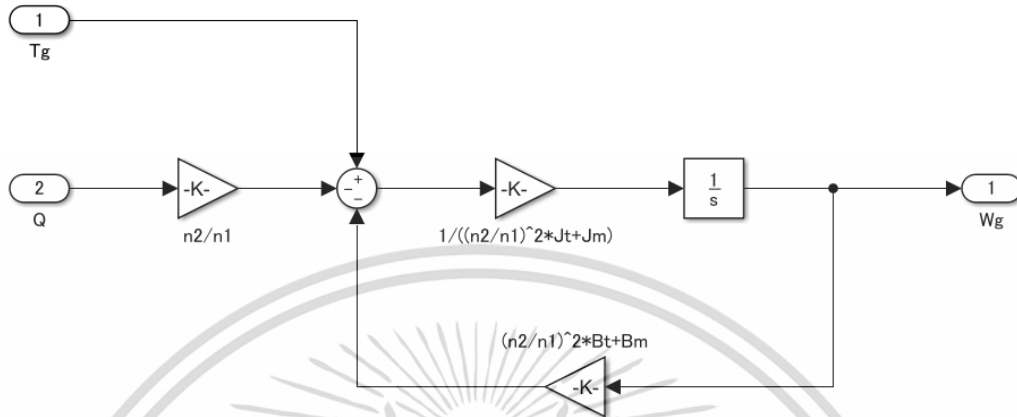
จากสมการความสัมพันธ์และแบบจำลองคณิตศาสตร์ นั้นจะพบว่าเมื่อมีแรงลมมากระทบกับตัวใบกังหันลมจะทำให้แกนเพลลาที่ต่อกับใบกังหันลมนั้นเกิดการหมุนทำให้เกิดความเร็วเชิงมุมของชุดกึ่งหันลม (ω_t) ซึ่งจะแปรผันตามค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของชุดกึ่งหันลม (J_t) และ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชุดกึ่งหันลม (B_t) และในขณะที่เกิดการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมนั้นก็ทำให้เกิดแรงบิดของชุดกึ่งหันลม (Q) ขึ้นมาด้วยซึ่งจะส่งผ่านไปยังชุดอัตราทดระหว่างชุดกึ่งหันลมกับเจนเนอเรเตอร์ (n_2/n_1) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ชุดกึ่งหันลมจะทำการต่อโดยตรงกับชุดเจนเนอเรเตอร์ หลังจากนั้นความเร็วเชิงมุมของชุดกึ่งหันลม (ω_t) และ แรงบิดของชุดกึ่งหันลม (Q) นั้นจะถูกส่งไปยังเพลลาขับของชุดเจนเนอเรเตอร์ซึ่งจะทำให้ตัวของเจนเนอเรเตอร์เกิดการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร็วเชิงมุมของเจนเนอเรเตอร์ (ω_g) และ แรงบิดของเจนเนอเรเตอร์ (T_g) ซึ่งจะแปรผันตามค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของเจนเนอเรเตอร์ (J_g) และ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเจนเนอเรเตอร์ (B_g) ซึ่งจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ของชุดกึ่งหันลมกับชุดเจนเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3 และสมการที่ 3.1 นั้น สามารถเขียนแบบจำลองในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ได้ตามในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดแบบจำลองในภาคของชุดกังหันลมขนาดกำลัง 300 วัตต์ (Watt) ในแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

3.2.2 ชุดจำลองระบบเจนเนอเรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG)

จากที่กล่าวถึงแบบวงจรจำลองทางคณิตศาสตร์ PMSG ในบทที่ 2 นั้น สมการของ PMSG จะเป็นไปตามสมการที่ 3.2 , 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$U_a = R i_a + L \frac{d}{dt} i_a - \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r) \quad (3.2)$$

$$U_b = R i_b + L \frac{d}{dt} i_b + \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \quad (3.3)$$

$$U_c = R i_c + L \frac{d}{dt} i_c + \omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r + 2\pi/3) \quad (3.4)$$

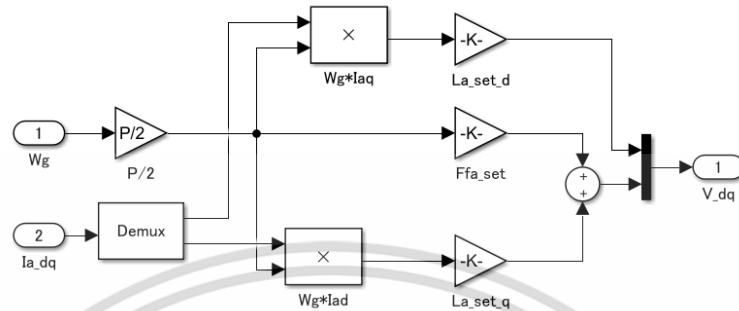
และเมื่อพิจารณาในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสโดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์ d-q axis ซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \quad (3.5)$$

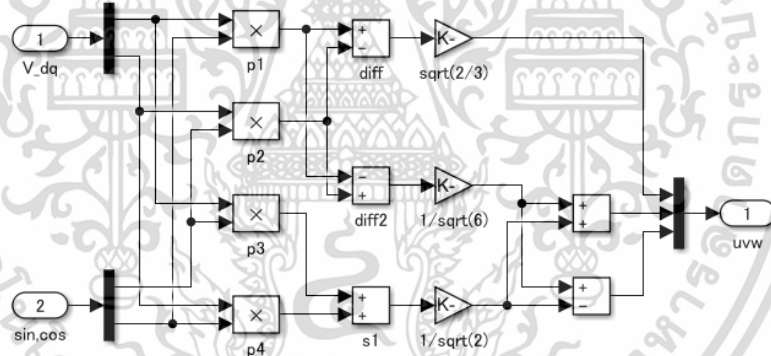
$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r (L_d i_d + \lambda_{pm}) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากสมการที่ 3.5 และ 3.6 นั้น สามารถเขียนระบบจำลองในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ได้ตามในรูปที่ 3.5 , รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ชุดแบบจำลอง PMSG ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสโดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์ d-q axis ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

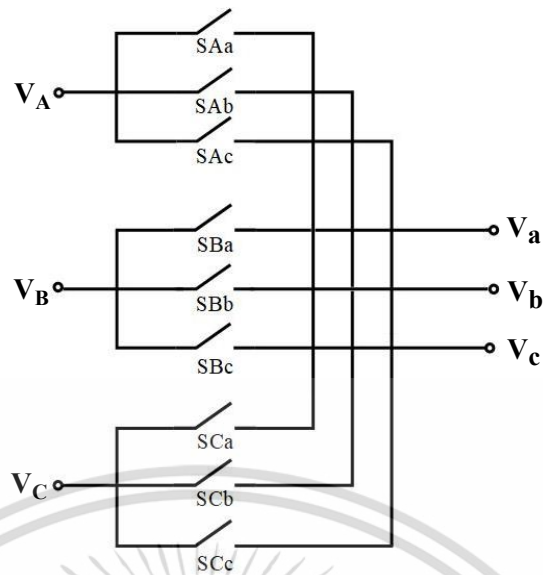


รูปที่ 3.6 ชุดแบบจำลอง PMSG ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟสโดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์ d-q axis เป็น UVW ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

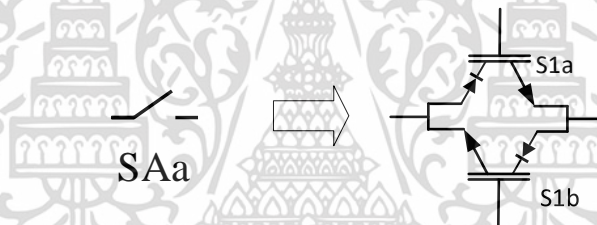
3.3 ภาควงจรกำลังสวิตซ์ชิงของระบบ Matrix convertor

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นั้น วงจรหลักประกอบด้วยสวิตซ์แบบสองทิศทาง (Bi-Direction Switch) จำนวน 9 ตัว ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสวิตซ์แบบสองทิศทางนั้นสามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้สองทิศทาง ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรสวิตซ์ซิ่งของ Matrix converter

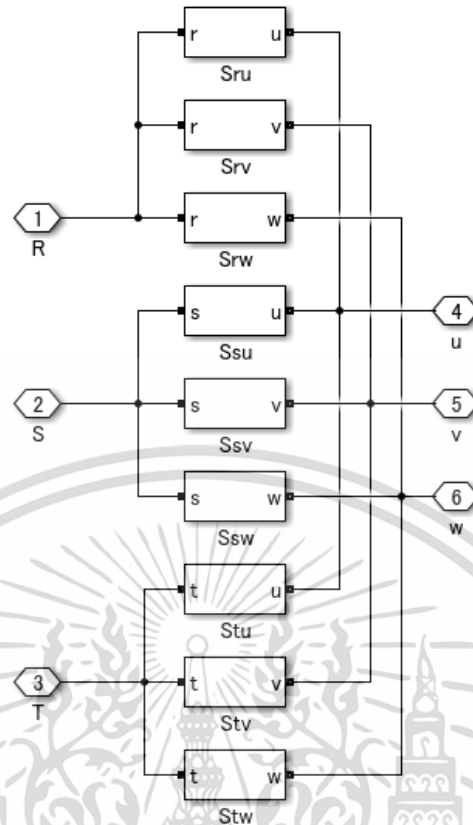


รูปที่ 3.8 วงจรสวิตซ์ซิ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของ Matrix converter

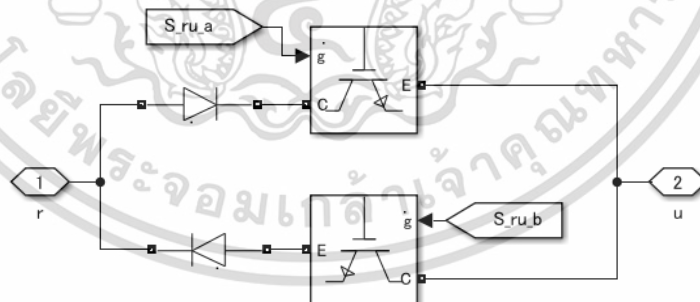
ซึ่งจากรูปที่ 3.7 นั้นจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 3.7 และสามารถเขียนแบบจำลองในโปรแกรมเมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ได้ตามในรูปที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ชุดระบบจำลองวงจรสวิตซ์ซิงของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ ซิมมูลิงค์ (Matlab & Simulink)



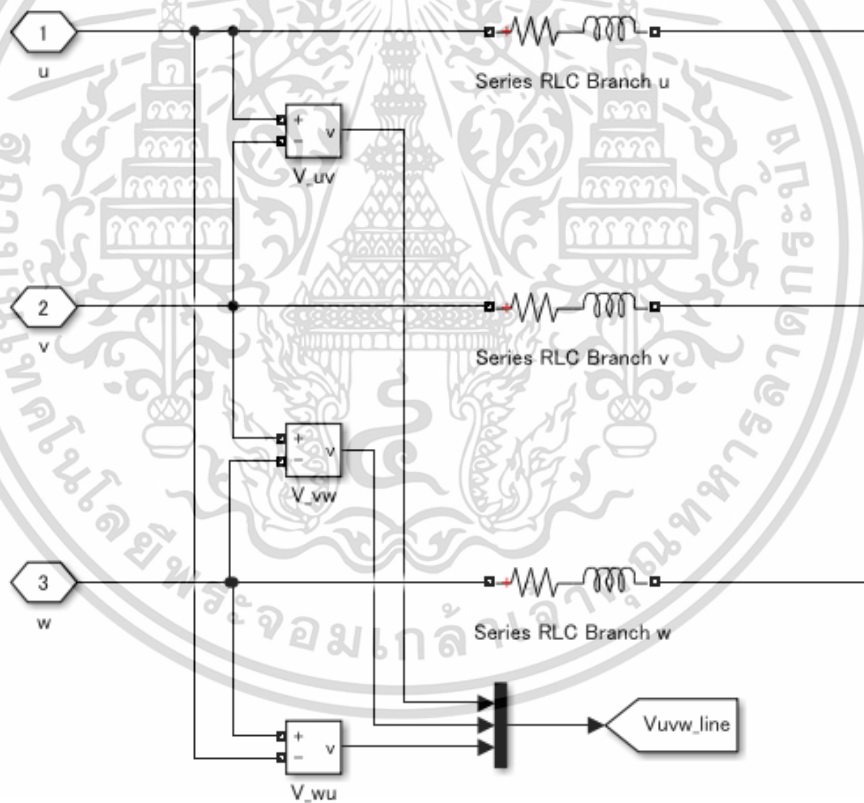
รูปที่ 3.10 ชุดระบบจำลองวงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสสองทิศทางของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากรูปที่ 3.9 นั้นจะเป็นการจำลองระบบวงจรสวิตช์ซึ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ ในโปรแกรมเมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ซึ่งจะทำการต่อแบบกลับหัวต่อชนกัน (Anti parallel) กันดังรูปที่ 3.10

3.4 ภาควงจรเอาต์พุต (Output)

เมื่อสัญญาณผ่านชุดภาคภาควงจรกำลังสวิตช์ซึ่งของ Matrix converter ซึ่งจะได้สัญญาณ 3 เฟส ที่สามารถควบคุมเฟสและความถี่ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ซึ่งใน Block ของภาค Output จะต่อ load แบบ RL load เพื่อจำลองเป็นระบบสายส่งต่อไปดังรูปที่ 3.11



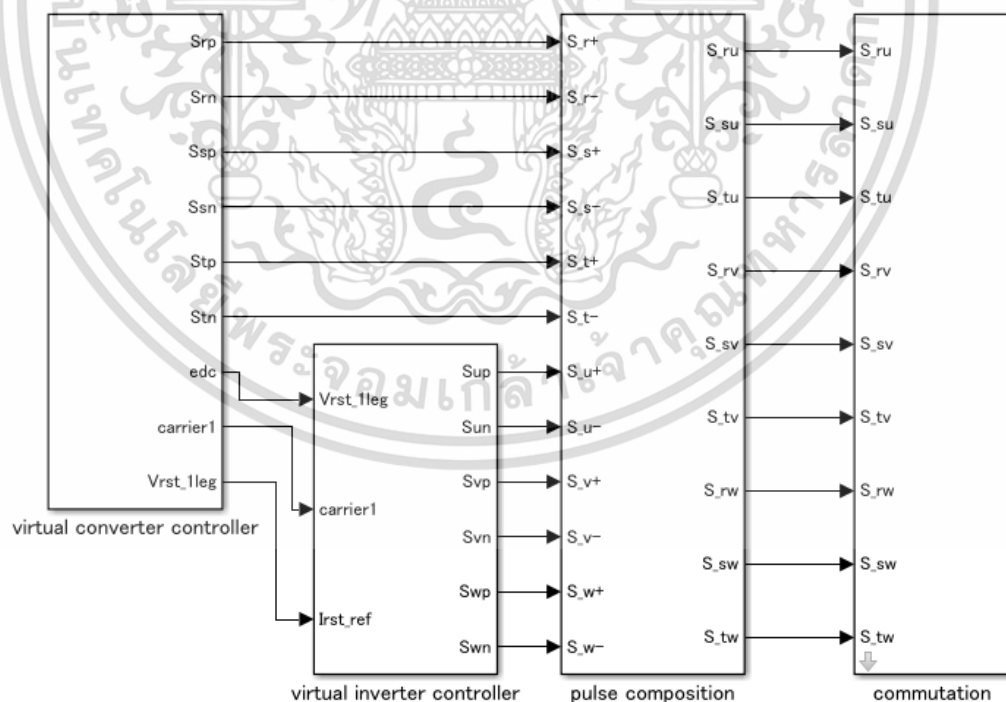
รูปที่ 3.11 ชุดระบบจำลองวงจร Output RL Load ของ Matrix converter ในโปรแกรมเมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 นอกจากสัญญาณ Output ที่ออกจากวงจรกำลังสวิตซ์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์จ่ายไปยัง RL load แล้ว ซึ่งจากนั้นก็จะมีการนำสัญญาณ 3 เฟส output บางส่วน นำมาเปรียบเทียบเพื่อเข้าไปยังวงจรชุด Control Inverter โดยที่ เฟส Vu จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส Vv ซึ่งจะได้สัญญาณ Vuv , เฟส Vv จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส Vw ซึ่งจะได้สัญญาณ Vvw และ เฟส Vw จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส Vu ซึ่งจะได้สัญญาณ Vwu จากนั้นสัญญาณ Vuv, Vvw, Vwu จะผ่านมายัง Mux แล้วเป็น Vuvw_line เพื่อเป็น Output reference ของวงจร Control Inverter ระบบต่อไป

3.5 ภาควงจรควบคุมวงจรกำลังสวิตซ์

ในการทำงานของภาควงจรกำลังสวิตซ์ซึ่งของ Matrix converter นั้นเพื่อให้ทำงานได้อย่างถูกต้องและไม่ให้เกิดความเสียหายนั้นจำเป็นต้องมีวงจรควบคุมวงจรกำลังสวิตซ์ซึ่งซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ 1. ระบบ Converter controller 2. ระบบ Inverter controller 3. ระบบ Pulse composition 4. ระบบ Commutation ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ชุดระบบจำลองภาควงจรควบคุมวงจรกำลังสวิตซ์ซึ่งของ Matrix converter ในโปรแกรม

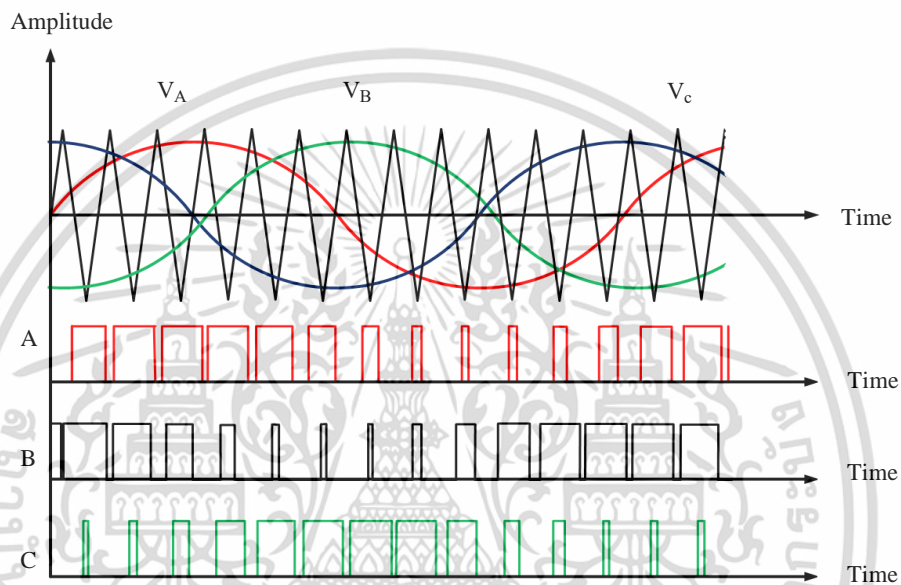
แมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

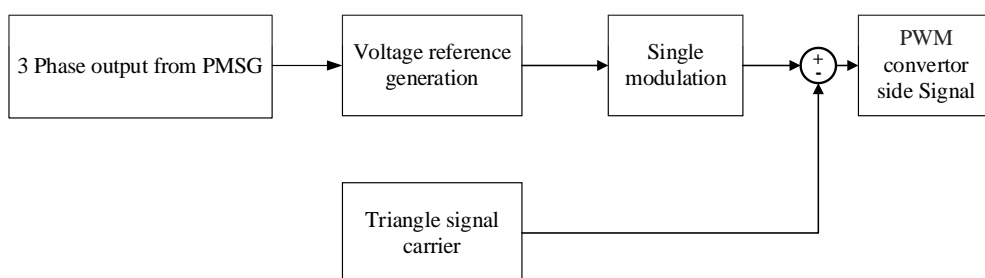
3.5.1. ระบบ Converter controller

ระบบ Converter controller ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เทคนิควิธีการควบคุมโดยใช้ PWM ในการควบคุม โดยหลักการจะใช้สัญญาณ Sine จาก output ของ PMSG นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณ Triangle signal กันซึ่งจะได้เป็นสัญญาณ Pulse ซึ่งสัญญาณ Pulse นี้เองค่า duty cycle จะมีการผันแปรไปกับสัญญาณ Sine ดังรูปที่ 3.13

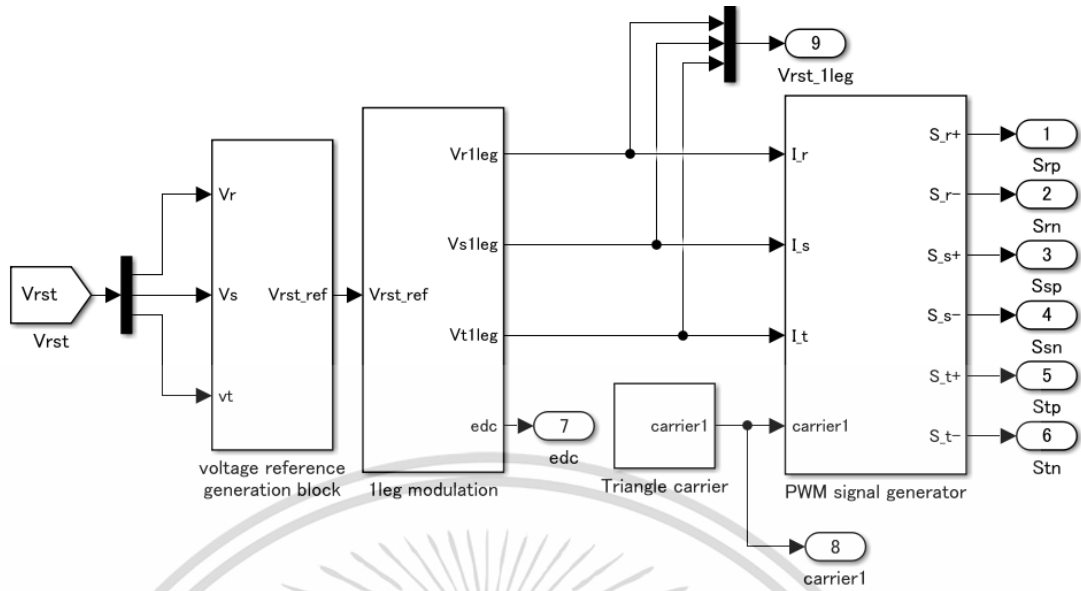


รูปที่ 3.13 สัญญาณ Pulse ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง สัญญาณ Sine กับ สัญญาณ Triangle

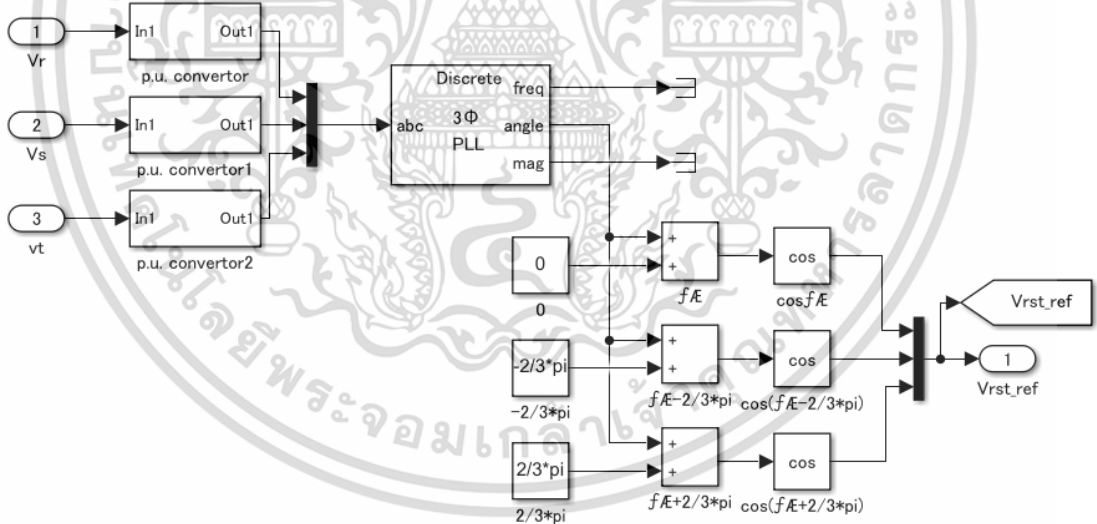
ซึ่งจากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นสัญญาณ Pulse ที่ได้นั้นจะนำไปใช้ในการควบคุมวงจรสวิตซ์ซึ่งของ Matrix coverter ต่อไป ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมการสร้าง PWM ในส่วนของภาค Converter ที่ใช้ในการควบคุม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

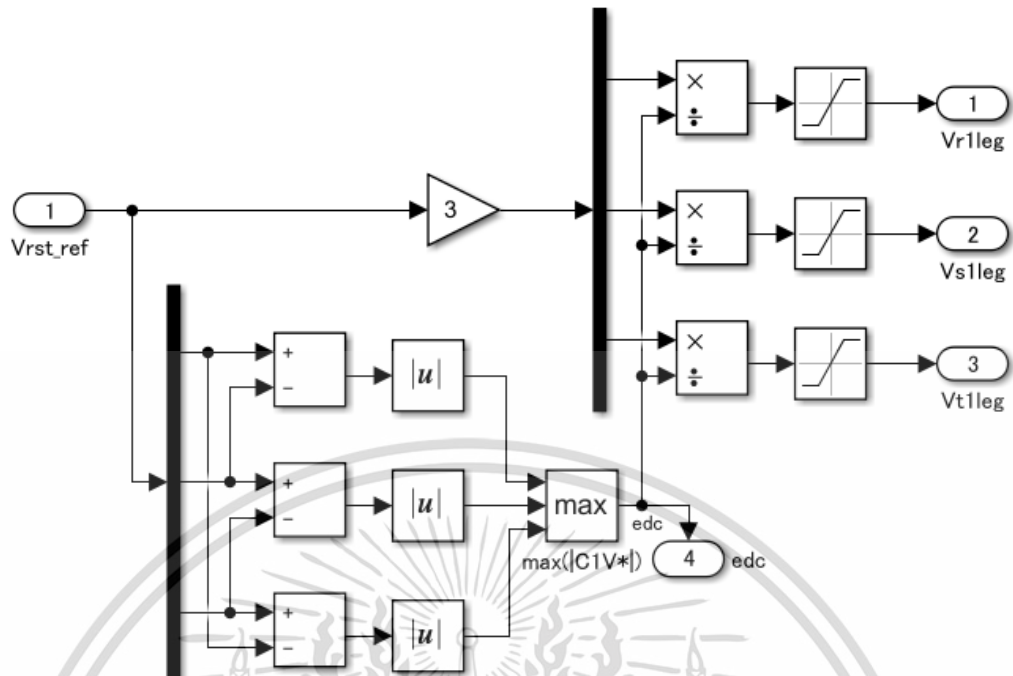


รูปที่ 3.15 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Converter controller โดยใช้ PWM ในการควบคุมของ Matrix converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนดซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

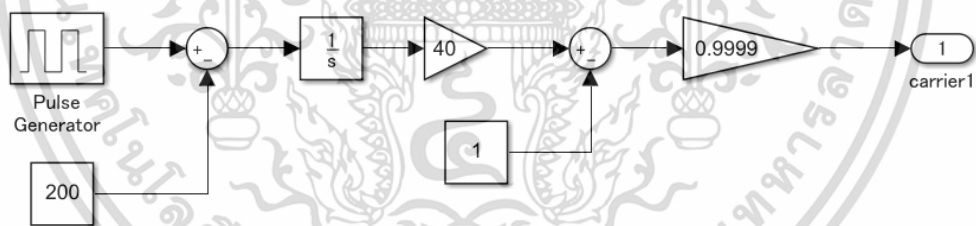


รูปที่ 3.16 ชุดแบบจำลองย่อยชุดกำเนิดแรงดันอ้างอิงวงจระบบ Converter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนดซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

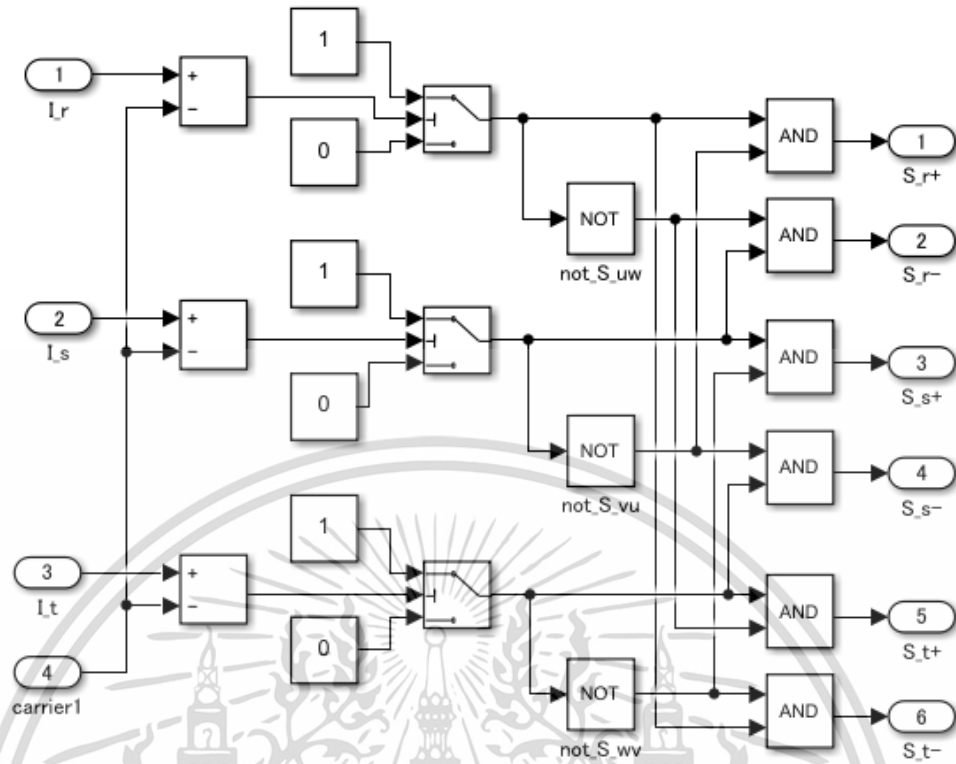


รูปที่ 3.17 ชุดแบบจำลองย่อย 1leg modulation วงจรระบบ Converter controller ในโปรแกรม
แมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)



รูปที่ 3.18 ชุดแบบจำลองย่อย Triangle carrier วงจรระบบ Converter controller ในโปรแกรม
แมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

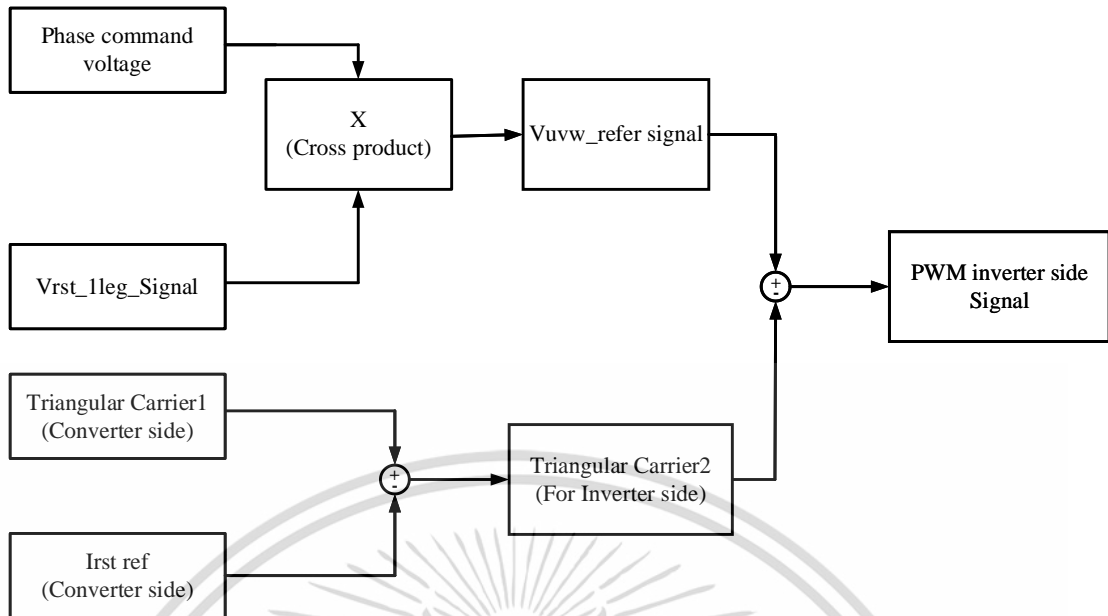
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ชุดแบบจำลองย่อย PWM signal generator วงจรระบบ Converter controller ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

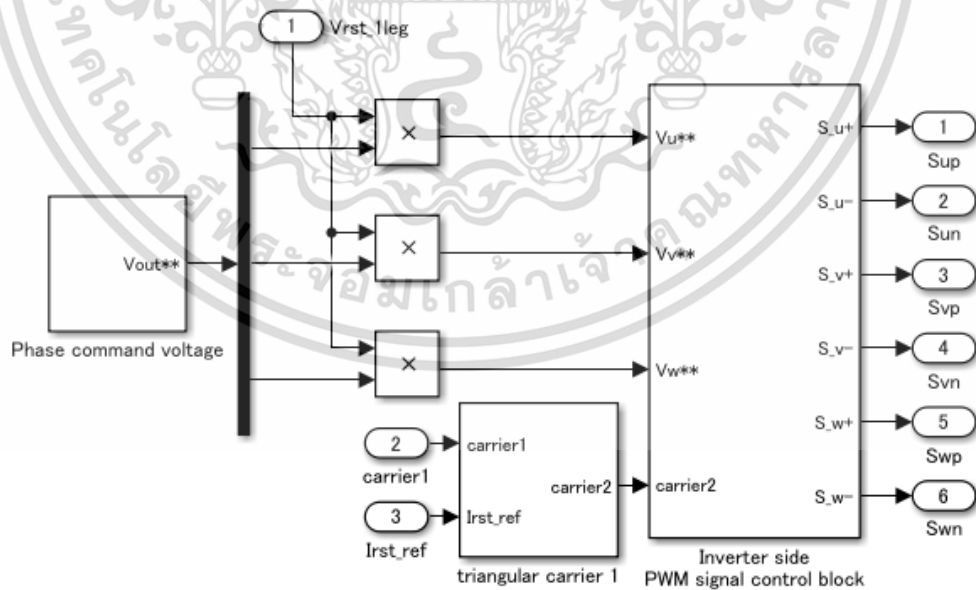
3.5.2. ระบบ Inverter controller

การแปลงพลังงานแบบ Matrix converter นั้นจะทำการ converter และ inverter ในช่วงเวลาเดียวกันเนื่องในวงจร switching ของ Matrix converter นั้น สามารถนำกระแสได้สองทิศทางในหนึ่งตัว ซึ่งส่วนที่เป็นของระบบ Inverter controller นั้นจะมีการทำงานใกล้เคียงกับชุด converter controller แต่จะมีความแตกต่างในการใช้สร้างสัญญาณ triangular carrier ซึ่งจะมีการทำสัญญาณ triangular carrier ของชุด Converter controller นำมาเปรียบเทียบกับกระแสของ Input จึงจะทำให้เกิดสัญญาณ triangular carrier สำหรับชุดของ Inverter controller เพื่อนำไปสร้างสัญญาณ Pulse เพื่อไปควบคุมวงจร switching ของ Matrix converter ของฝั่ง Output ต่อไป ซึ่งหลักการทำงานที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของภาค Inverter ที่ใช้ในการควบคุม

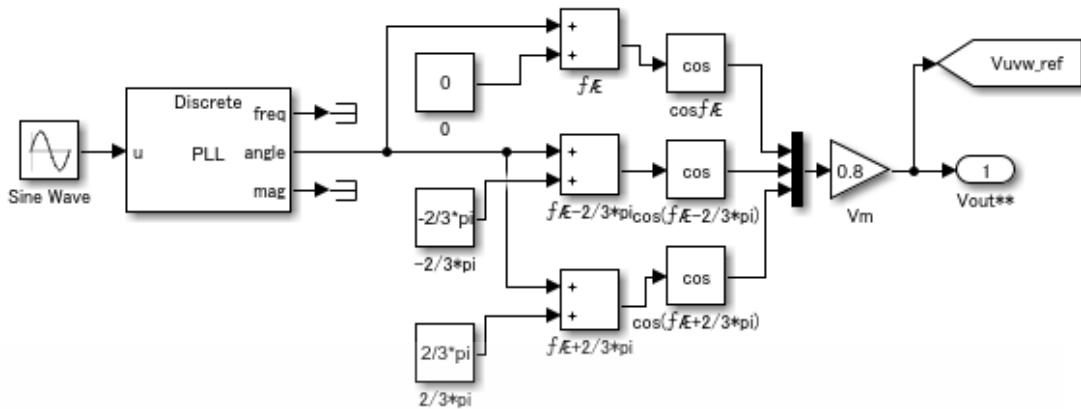
ซึ่งจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.20 สามารถนำมาเขียนระบบจำลองโมเดลในโปรแกรมเมทแลป ซิมูลิงค์ (Matlab Simulink) ได้ดังรูปที่ 3.21



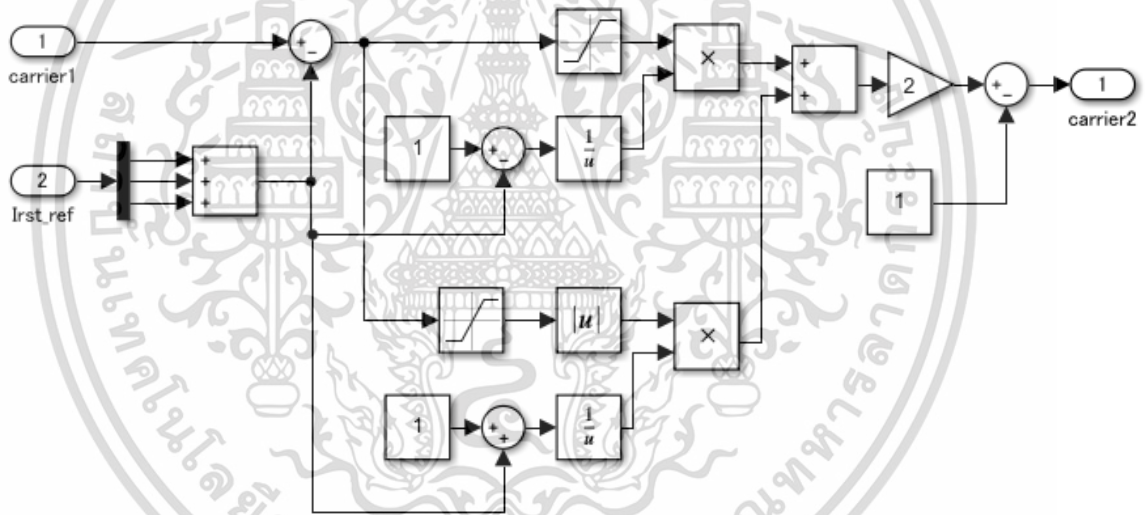
รูปที่ 3.21 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Inverter controller โดยใช้ PWM ในการควบคุมของ

ระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์ในโปรแกรมเมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

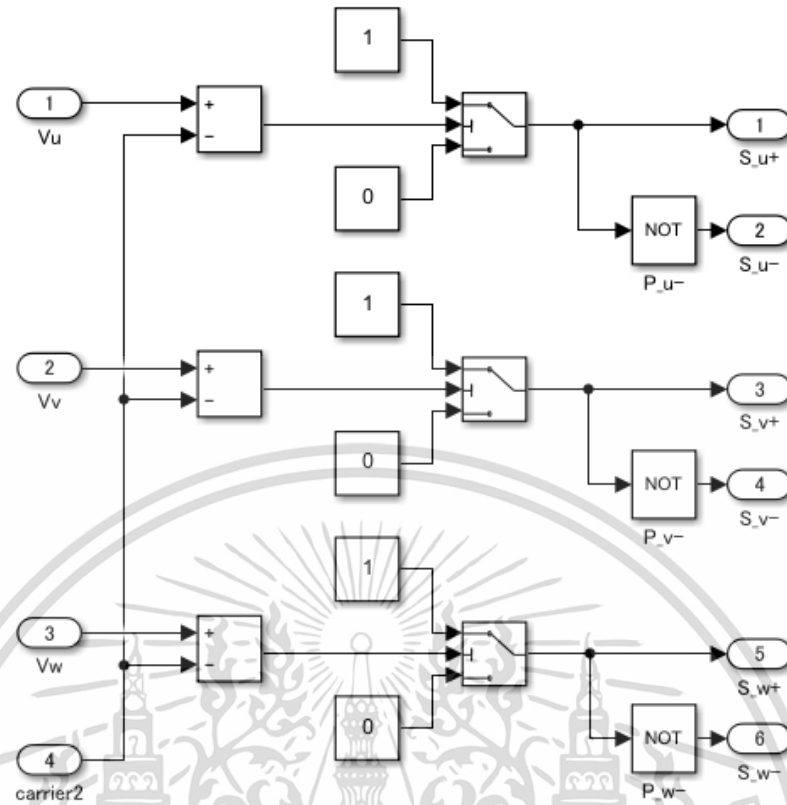


รูปที่ 3.22 ชุดแบบจำลองย่อย Phase command voltage ภาควงจรระบบ Inverter controller
ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)



รูปที่ 3.23 ชุดแบบจำลองย่อย Triangular carrier2 ภาควงจรระบบ Inverter controller ใน
โปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

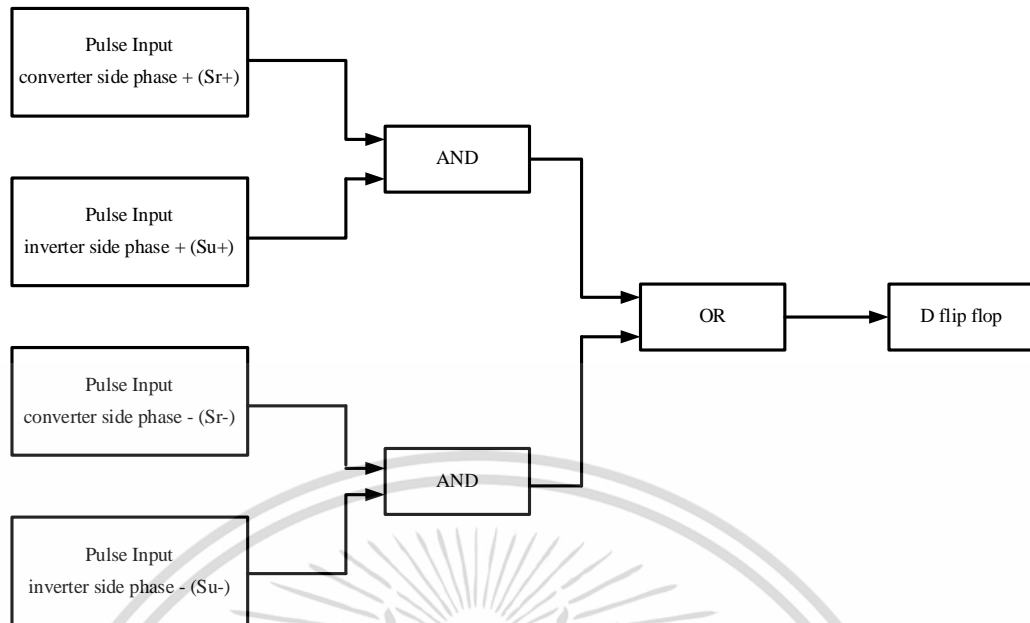
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ชุดแบบจำลองย่อย Inverter side PWM signal control block ภาควงจรระบบ Inverter controller ในโปรแกรมเมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

3.5.3 ระบบ Pulse composition

ชุดระบบ Pulse composition นั้นจะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณ Pulse ที่ได้จากชุดวงจร Converter controller และ ชุด Inverter controller โดยจะใช้ Logic gate circuit และใช้วงจร D Flip Flop ในการเปรียบเทียบสัญญาณ Pulse เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปยังชุด Commutation และควบคุมสวิตซ์ต่อไป ซึ่งจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรม ตามรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ Pulse composition

ตารางที่ 3.1 ตารางความจริงของ AND Gate

A	B	Output
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

ตารางที่ 3.2 ตารางความจริงของ OR Gate

A	B	Output
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในส่วนของวงจร D-Flip flop นั้นจะทำหน้าที่ Delay สัญญาณโดยจะอาศัยสัญญาณ Clock ในการควบคุมค่า Output เพื่อสร้างช่วง Dead time ของสัญญาณ pulse ที่จะเกิดขึ้นในวงจร Switching เพื่อป้องกันการเกิดการ short circuit ภายในวงจร ซึ่งวงจร D flip flop จะเป็นไปตามรูปที่ 3.26



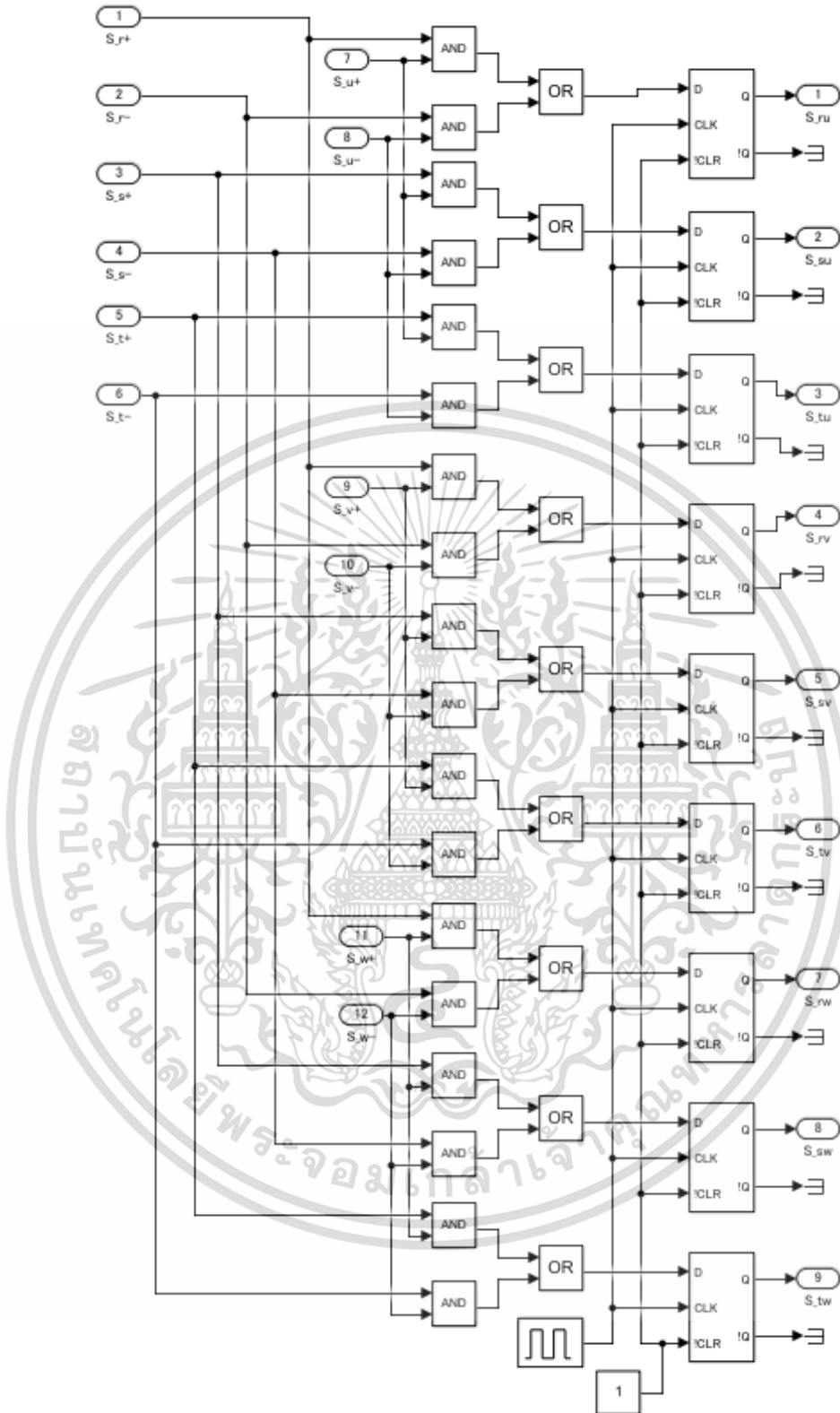
รูปที่ 3.26 วงจร Logic gate ของ D flip flop

ตารางที่ 3.3 ตารางความจริงของ D flip flop

D	CLK	Q
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

ซึ่งสถานะที่ 1 คือ เมื่อ Input ที่ขา D ไม่ว่าจะ เป็น 0 หรือ 1 ถ้า Input CLK เป็น 0 (ขอบขาลง จาก 1→0) ค่า Q จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะก่อนหน้านี้ ต่อมาเมื่อเข้าสู่สถานะที่ 2 คือ เมื่อ Input ที่ขา D ไม่ว่าจะ เป็น 0 หรือ 1 ถ้า Input CLK เป็น 1 (ขอบขาขึ้นจาก 0→1) ค่า Q จะเปลี่ยนแปลงไปตาม Input D ซึ่งจากที่กล่าวมาเกี่ยวกับระบบการทำงานของ Logic gate และ D-flip flop นั้น สามารถนำมาสร้างระบบชุดจำลองโมเดลภาควงจรระบบ Pulse composition ในโปรแกรมโปรแกรมเมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ได้ตามรูปที่ 3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



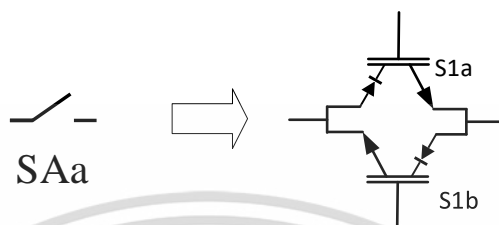
รูปที่ 3.27 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Pulse composition ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์

ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 ระบบ Commutation

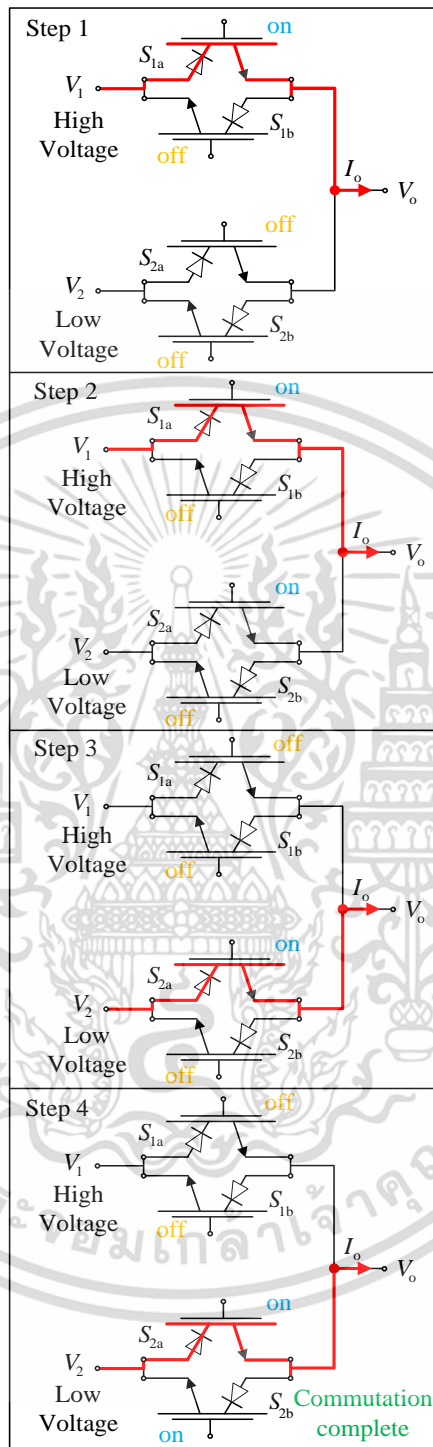
ระบบ Commutation นั้นคือระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลและทิศทางของกระแสของตัวสวิตซ์ซึ่งเป็นชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 สวิตซ์ชนิดแบบ RB IGBT Bi-direction switch

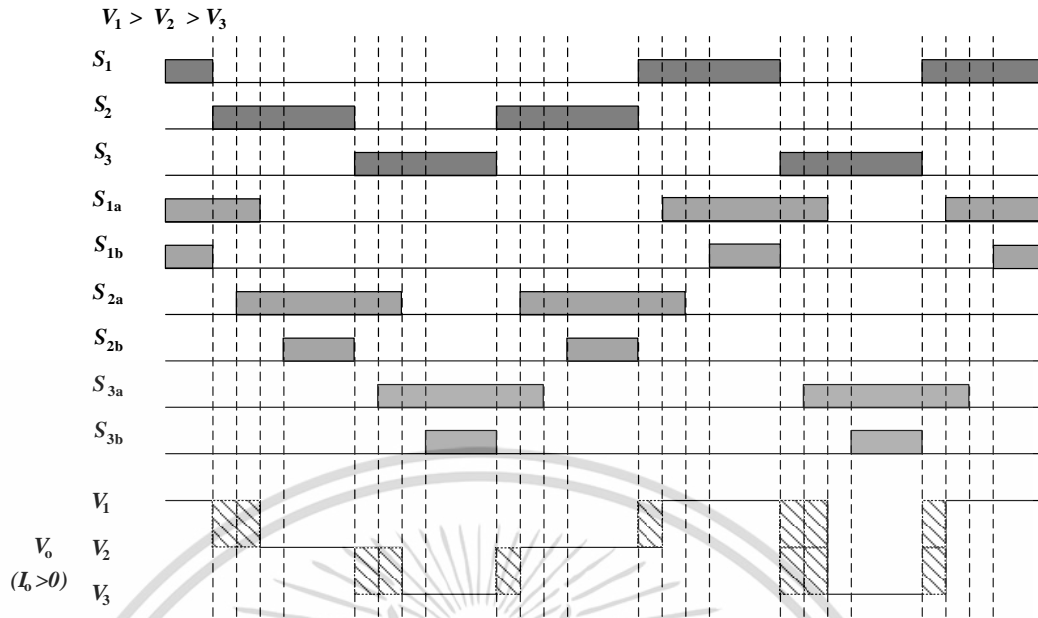
ซึ่งการวิธีการ Commutation นั้นวิธีการควบคุม 5 แบบด้วยกัน คือ 1. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) 2. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V) 3. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C) 4. การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V) 5.การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสและแรงดันแบบ 3 ขั้นตอน (3VC) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีแบบการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเสถียรสูง มีโอกาสที่จะเกิดการ short-circuit ของวงจรสวิตซ์ที่ต่ำที่สุดในทุก 5 วิธี ซึ่งหลักการทำงานจะเป็นไปตามรูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.30

The Commutation from V_1 to V_2 ($I > 0$)



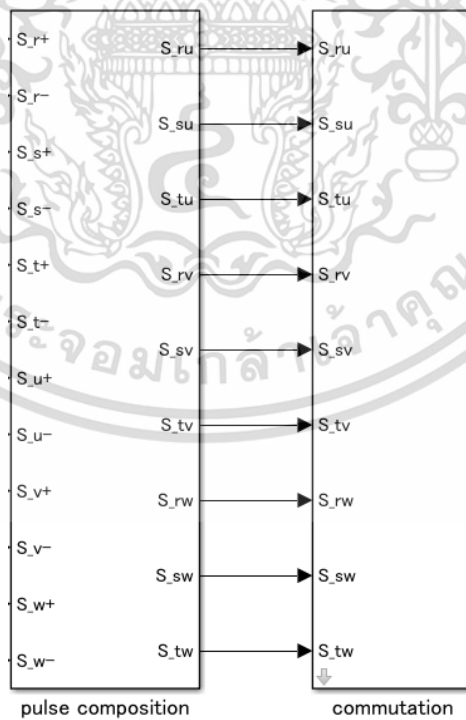
รูปที่ 3.29 การ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 แผนภูมิเวลาการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

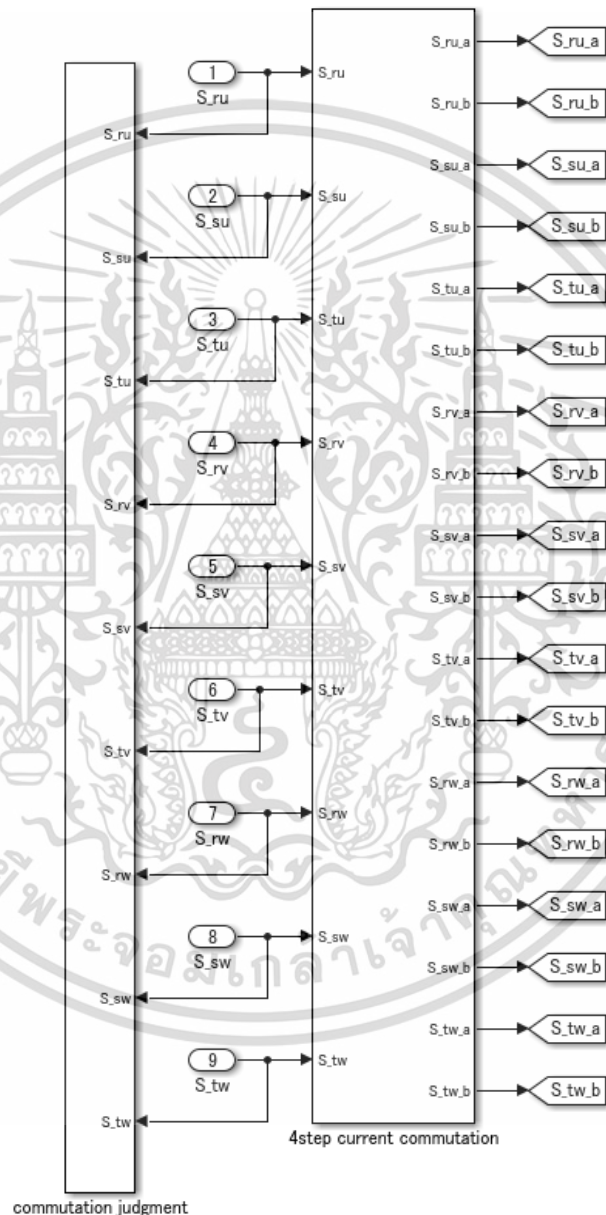
ซึ่งจากการทำงานของ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) นั้นสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation ได้ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation

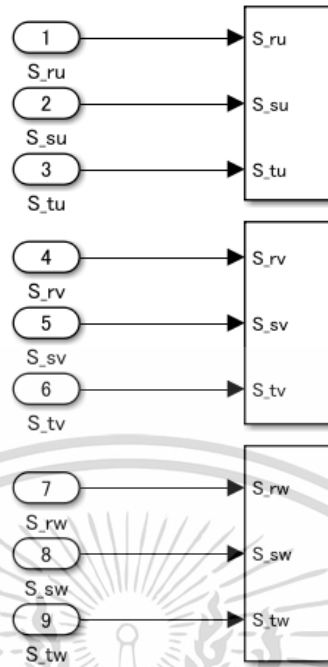
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากรูปที่ 3.31 นั้นจะพบว่าวงจร Commutation จะรับสัญญาณของ Pulse ของชุดวงจร Pulse composition ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณ pulse ระหว่างชุดวงจร Converter และ Inverter ซึ่งในชุด Commutation นั้นสามารถสร้างเป็นชุดจำลองโมเดลภาควงจรระบบ Commutation โดยโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

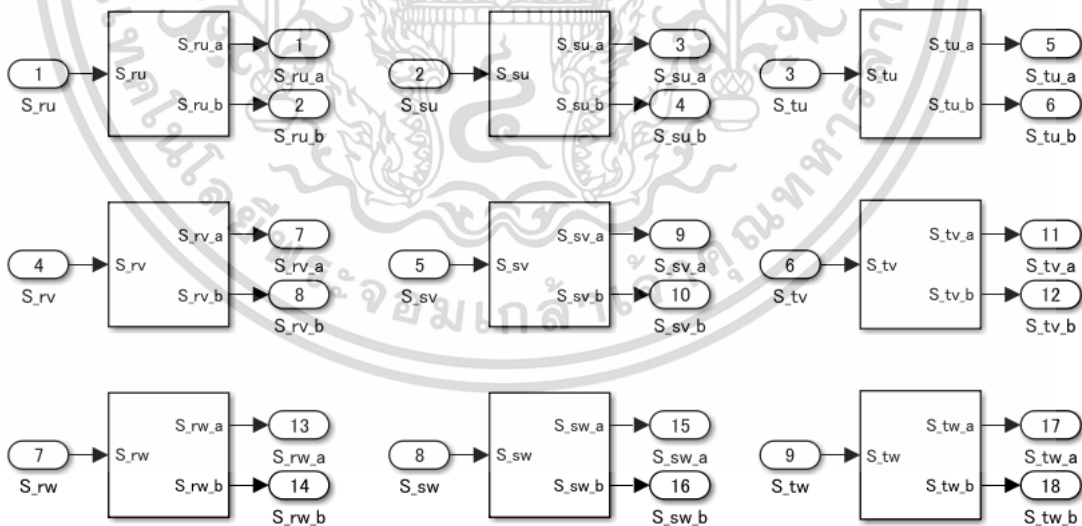


รูปที่ 3.32 ชุดแบบจำลองภาควงจรระบบ Commutation ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

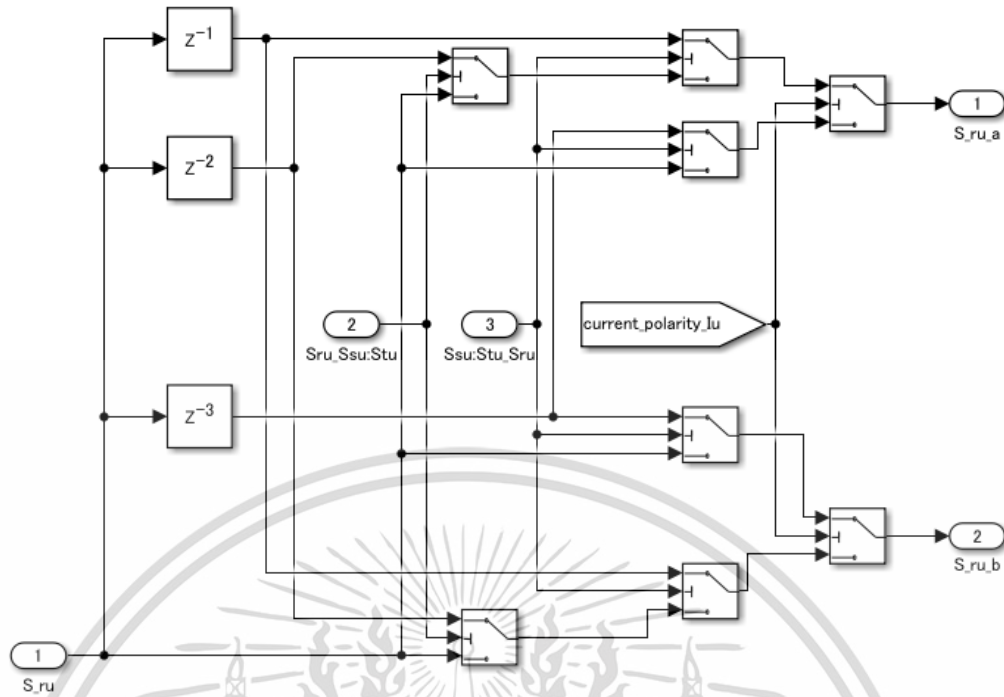


รูปที่ 3.33 ชุดแบบจำลองย่อยในส่วน input จากชุด Pulse composition ภาควงจรระบบ Commutation ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)



รูปที่ 3.34 ชุดแบบจำลองย่อยในส่วน Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ชั้นตอน (4C) ของสวิตชิงทั้ง 9 ตัว ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 ชุดแบบจำลองย่อยในส่วน Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) ของสวิตซ์ 1 ตัว ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบระบบการทำงานของระบบกักเก็บผลผลิต

กระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงาน

แบบ Matrix converter

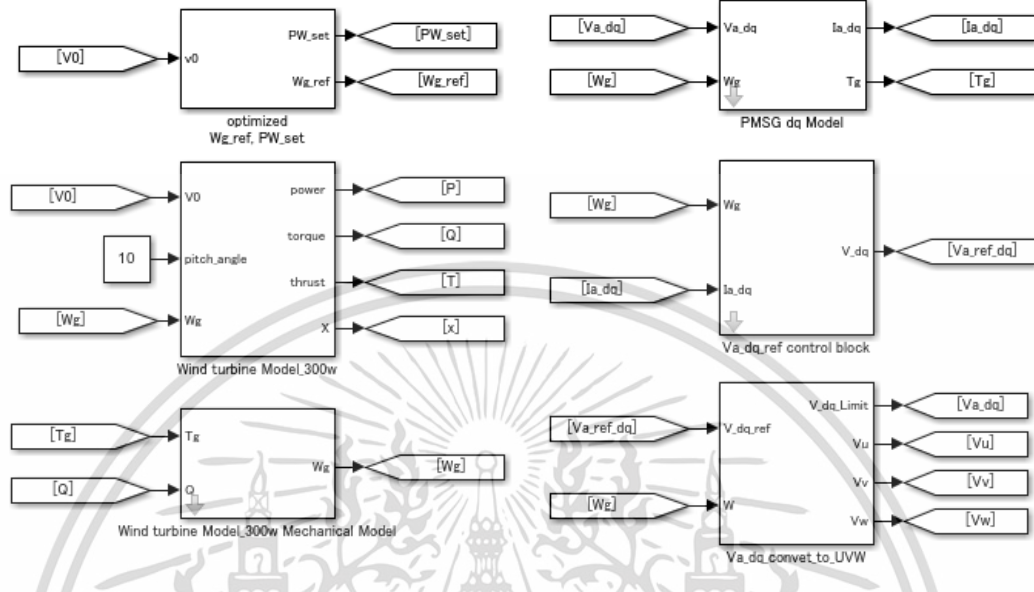
4.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 ได้อธิบายการทำงานของแต่ละบล็อกวงจรย่อยที่นำมาใช้งานในการออกแบบระบบกักเก็บผลผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบ Matrix Converter วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย 1. ชุดจำลองระบบกักเก็บผลผลิตโดยใช้ PMSG 2. ชุดจำลองระบบ PMSG 3. ภาควงจรกำลังสวิตซ์ซึ่งของระบบ Matrix Converter 4. ภาควงจร Output 5. ภาควงจรควบคุมวงจรถูกกำลังสวิตซ์ซึ่ง 6. ชุดระบบ Converter controller 7. ชุดระบบ Inverter controller 8. ชุดระบบ Pulse composition 9. ชุดระบบ Commutation ซึ่งในบทนี้จะขอกกล่าวถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบของระบบการทำงานของระบบกักเก็บผลผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink)

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของชุดระบบต่างๆในโปรแกรมแมทแลปแอนด์ซิมูลิงค์ (Matlab & Simulink) ดังต่อไปนี้

4.2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบชุดจำลองระบบกังหันลมเจเนอเรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรแบบซิงโครนัส (PMSG)



รูปที่ 4.1 ชุดจำลองระบบกังหันลมชุดเจเนอเรเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG)

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนภาคชุดระบบกังหันลมและชุดเจเนอเรเตอร์แบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG) จะมีค่าตามตารางที่ 4.1

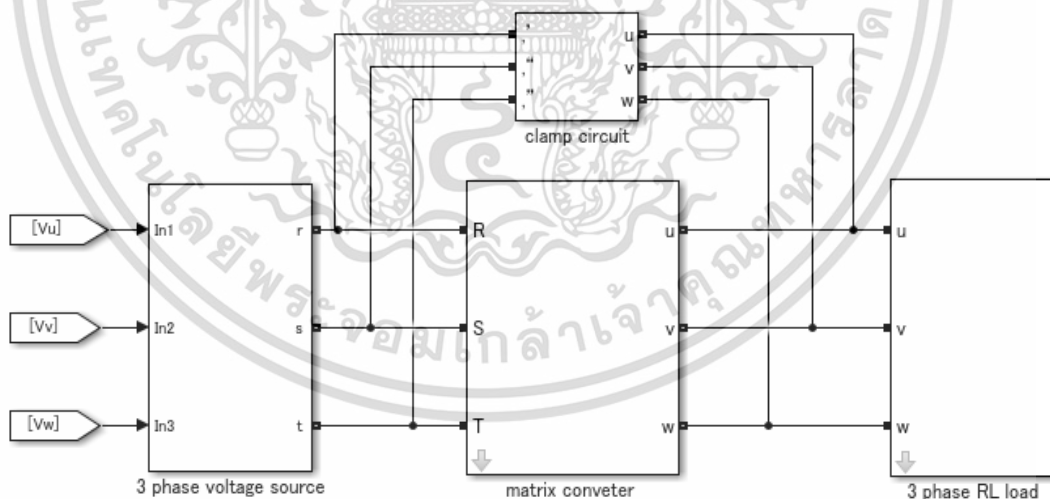
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนภาคชุดระบบกังหันลมและชุดเจเนอเรเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG)

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการจำลอง	หน่วย
Wind turbine model block		
Wind low Speed (Vo)	5	m/s
Wind high Speed (Vo)	28	m/s
Wind turbine moment of inertia (Jt)	0.104	kg.m
Pitch angle	10	deg
Gear ratio	1	-

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วภาคชุดระบบกึ่งหันลมและชุดเจนเนอเรเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSG)

PMSG Model block		
Rate power	300	W
Rate Voltage	200	V
Stator Resistance	1.42	Ω
Stator Inductance	0.47	mH
stator flux	0.07	Wb
Pole number	16	-

4.2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบชุดจำลองระบบภาค Input ภาค Output และภาควงจรกำลังสวิตชิงของระบบ Matrix converter



รูปที่ 4.2 ชุดจำลองระบบภาค Input ภาค Output และ ภาควงจรกำลังสวิตชิงของระบบ Matrix converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

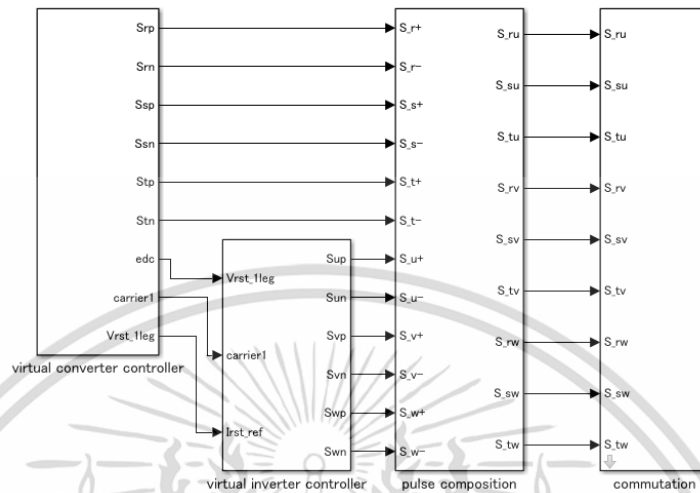
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนภาค Input ภาค Output และภาควงจรกำลังสวิตซ์ของระบบ Matrix converter จะมีค่าตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนภาค Input ภาค Output และภาควงจรกำลังสวิตซ์ของระบบ Matrix converter

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการจำลอง	หน่วย
3 phase voltage source model block		
Resistance load	0.01	Ω
Matrix converter model block		
Resistance of IGBT R_{on}	0.25	Ω
Inductance of IGBT	0.1	μH
Current 10% fall time of IGBT	1	ns
Current tail time of IGBT	0.02	μs
Matrix converter model block		
Snubber resistance of IGBT	10	Ω
Snubber capacitance of IGBT	0.1	μF
3 phase RL load model block		
Resistance load	15	Ω
Inductance load	10	mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบชุดจำลองระบบควบคุมสวิตช์ขั้วของระบบ Matrix converter



รูปที่ 4.3 ชุดจำลองระบบระบบควบคุมสวิตช์ขั้วของระบบ Matrix converter

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของระบบควบคุมสวิตช์ขั้วของระบบ Matrix converter จะมีค่าตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนระบบควบคุมสวิตช์ขั้วของระบบ Matrix converter

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการจำลอง	หน่วย
Converter controller block		
3 phase PLL P gain Loop filter proportional gain	200	-
3 phase PLL P gain Loop filter integral gain	2000	-
3 phase PLL Initial frequency (Hz):	60	Hz
frequency of triangle carrier1	2000	Hz
Pulse Width	50	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของในส่วนระบบควบคุมสวิตชิงของระบบ Matrix converter

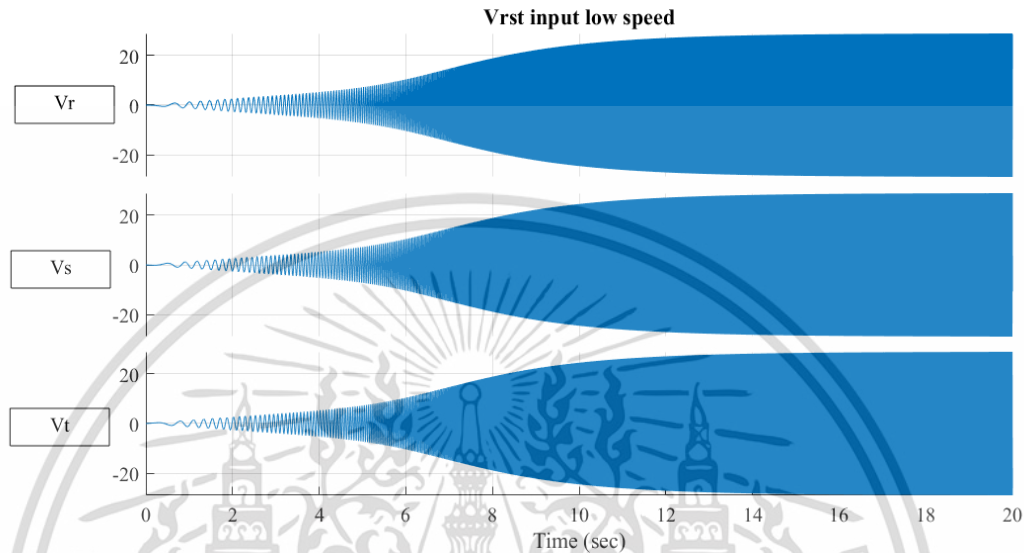
Inverter controller block		
Sine wave generate refer amplitude	1	-
Sine wave generate refer frequency	50.0	Hz
PLL 1 Phase detector integral gain	1000	-
PLL 1 Loop filter proportional gain	400	-
PLL 1 Loop filter integral gain	20000	-
PLL 1 Initial frequency	50	Hz
Pulse composition block		
Pulse generate for CLK signal of D flip flop Period	15.5	μ s
Pulse generate for CLK signal of D flip flop width	50	%
Commutation switching block		
Timing of commutation step change	5	μ s

4.3 ผลการทดสอบระบบการทำงานของระบบกักเก็บลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบ Matrix converter

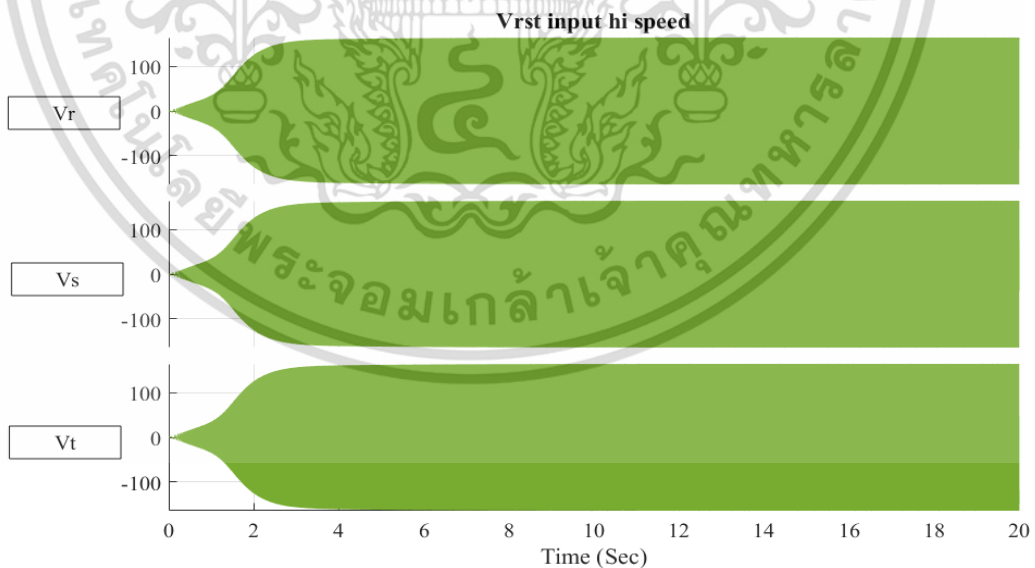
ในการจำลองระบบนั้นจะทำการแบ่งทดสอบเป็น 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ 1 จะเป็นที่ความเร็วลมที่ 5 m/s หรือ 20 km/h ซึ่งเป็นความเร็วต่ำ (Wind low speed) และ เงื่อนไขที่ 2 คือ ความเร็วลมที่ 28 m/s หรือ 100 km/h ซึ่งเป็นความเร็วสูง (Wind hi speed) ซึ่งในการทดสอบนั้นจะทำการบันทึกผลการทดสอบดังนี้ 1. ค่าแรงดัน Input จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลด (Vrst) 2. ค่าแรงดัน Input จาก PMSG ขณะผ่านโหลด (Vrst line) 3. ค่ากระแส Input จาก PMSG 4.ค่าแรงดัน Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ขณะยังไม่ผ่านโหลด โดยยังไม่ผ่านชุดกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Vuvw) 5.ค่าแรงดัน Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหลด โดยผ่านชุดกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Vuvw fillter) 6. ค่าแรงดัน Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดสายส่ง โดยยังไม่ผ่านชุดกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Vrst line) 7. ค่าแรงดัน Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดสายส่ง โดยผ่านชุดกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Vrst filter line) และ 8. ค่ากระแส Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter



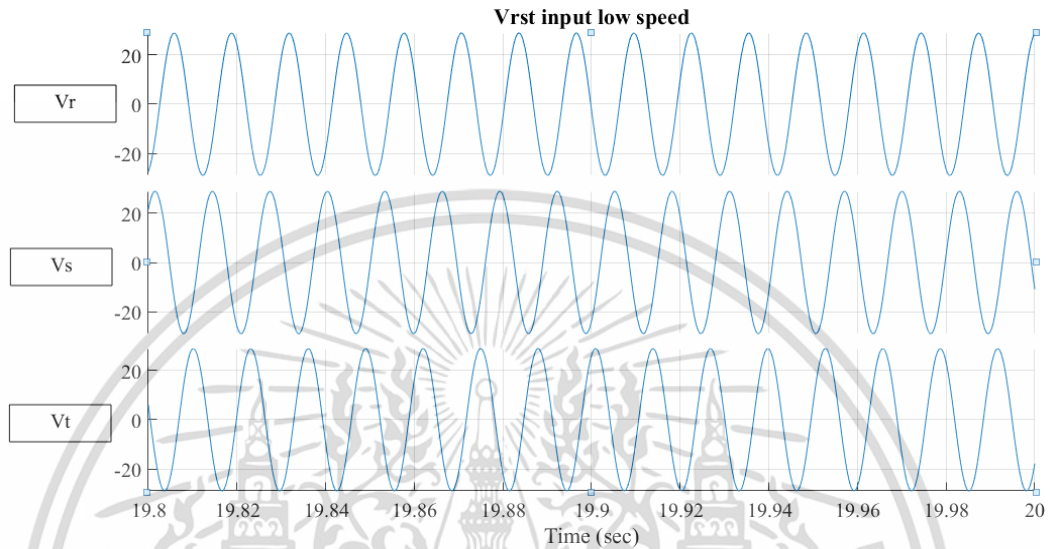
รูปที่ 4.4 ค่าแรงดัน Vrst Input (low speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ



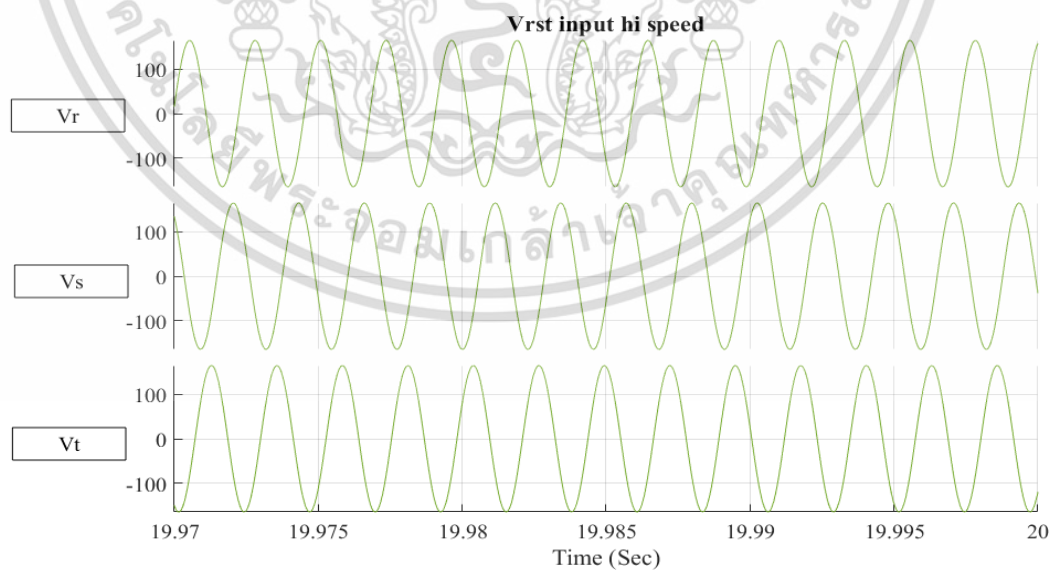
รูปที่ 4.5 ค่าแรงดัน Vrst Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 ค่าแรงดัน V_{rst} Input จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ ค่าแรงดันไฟฟ้าจะต่ำกว่า V_{rst} Input จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.5 ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าความเร็วต่ำคงที่จะเท่ากับ 25 V และที่ความเร็วสูงจะอยู่ที่ 150V



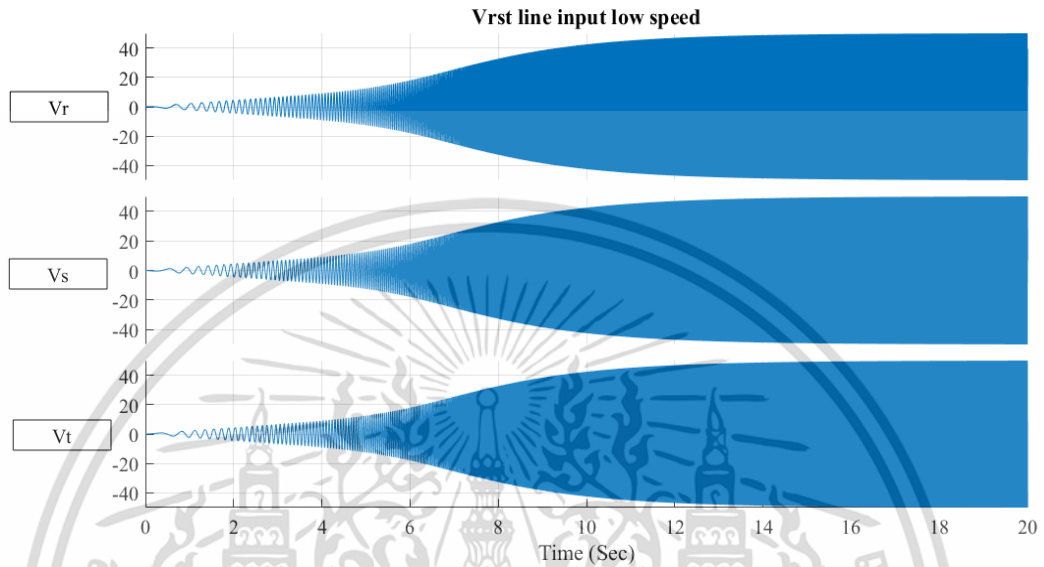
รูปที่ 4.6 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V_{rst} Input (low speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ



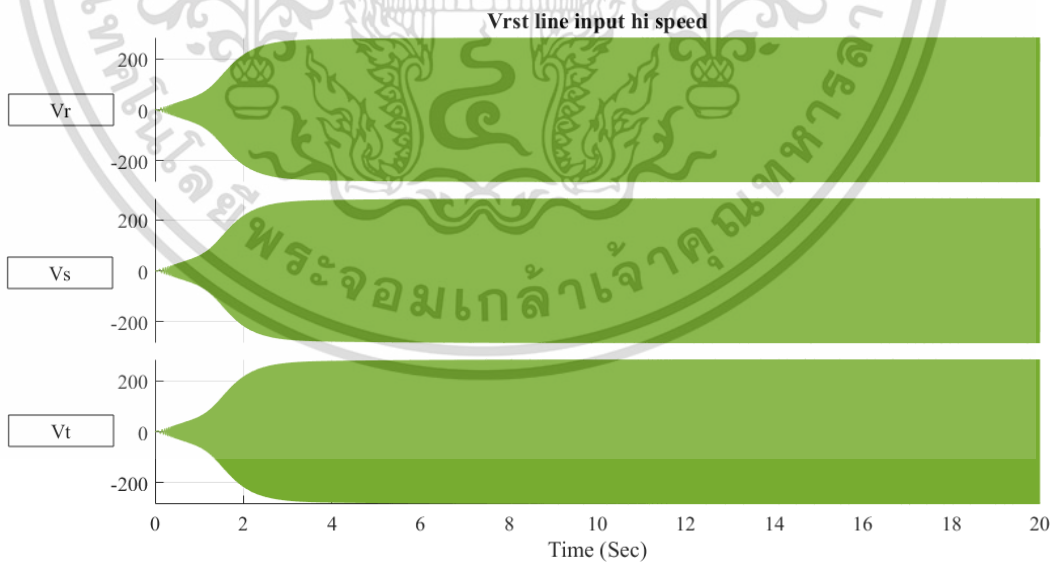
รูปที่ 4.7 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V_{rst} Input (Hi-speed) จาก PMSG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน V_{rst} Input (low speed) จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่าน โหลดความเร็วต่ำ ความถี่ของสัญญาณนั้นจะมีความถี่ที่ต่ำกว่า V_{rst} Input จาก PMSG ขณะยังไม่ผ่าน โหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.7



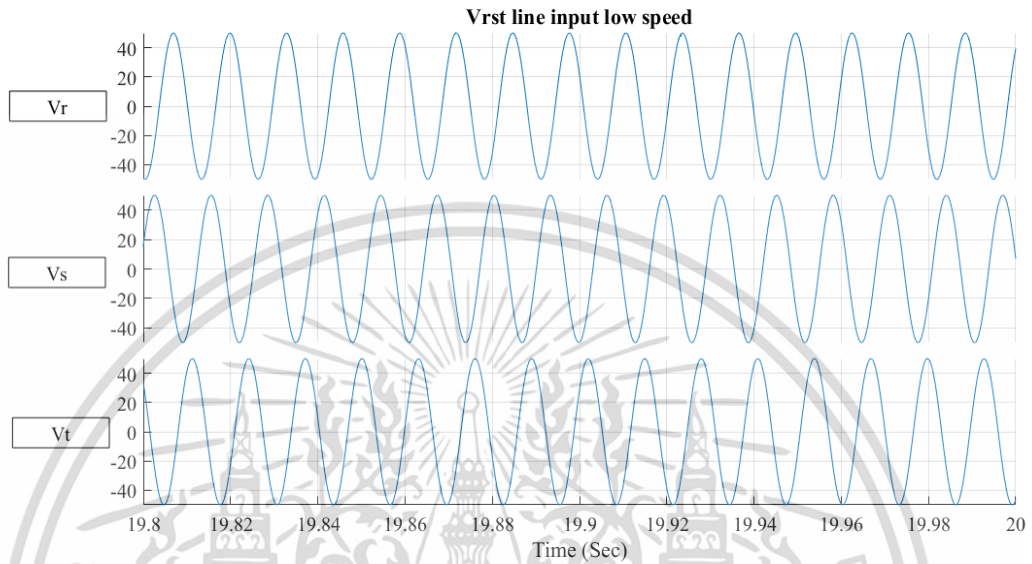
รูปที่ 4.8 ค่าแรงดัน V_{rst} line Input (low speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ



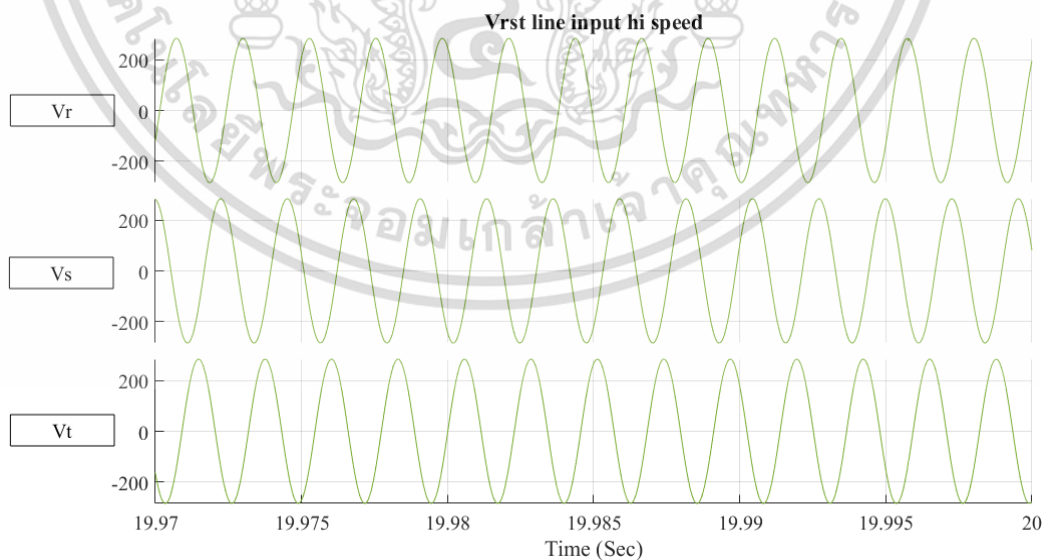
รูปที่ 4.9 ค่าแรงดัน V_{rst} line Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 ค่าแรงดัน Vrst line Input จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ ค่าแรงดันไฟฟ้าจะต่ำกว่า Vrst line Input จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.9 ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าความเร็วต่ำคงที่จะเท่ากับ 40 V และที่ความเร็วสูงจะอยู่ที่ 250V



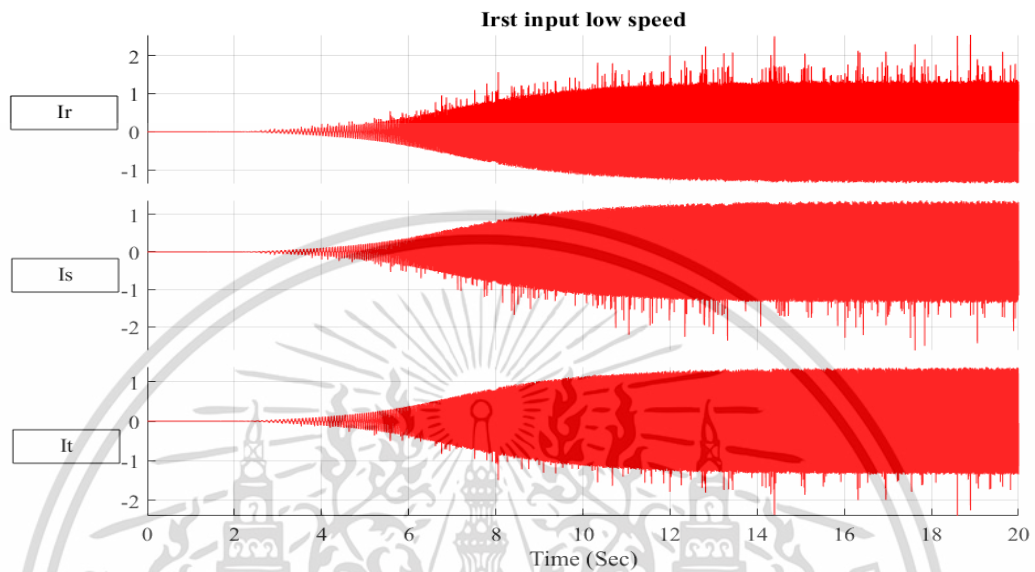
รูปที่ 4.10 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst line Input (low speed) จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ



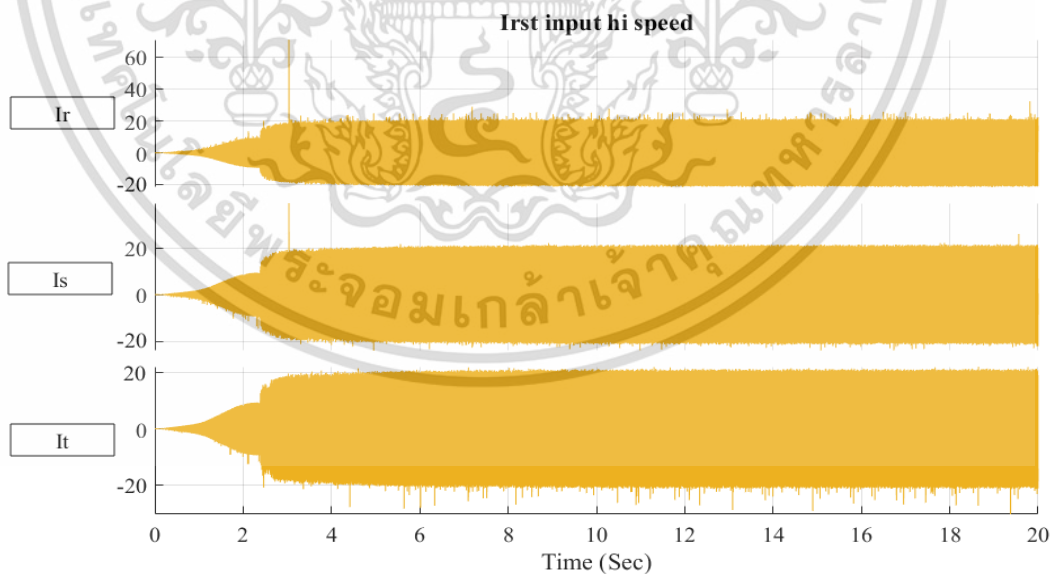
รูปที่ 4.11 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst line Input (Hi-speed) จาก PMSG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vrst line Input (low speed) จาก PMSG ขณะผ่าน โหลดความเร็วต่ำ ความถี่ของสัญญาณนั้นจะมีความถี่ที่ต่ำกว่า Vrst line Input จาก PMSG ขณะผ่าน โหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.11



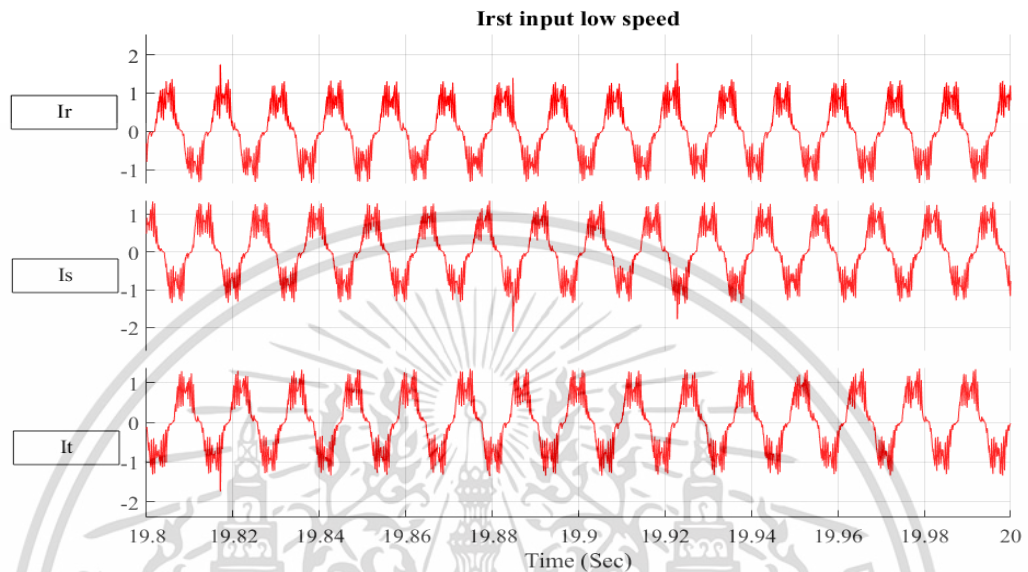
รูปที่ 4.12 ค่ากระแส Irst line Input (low-speed) จาก PMSG ความเร็วต่ำ



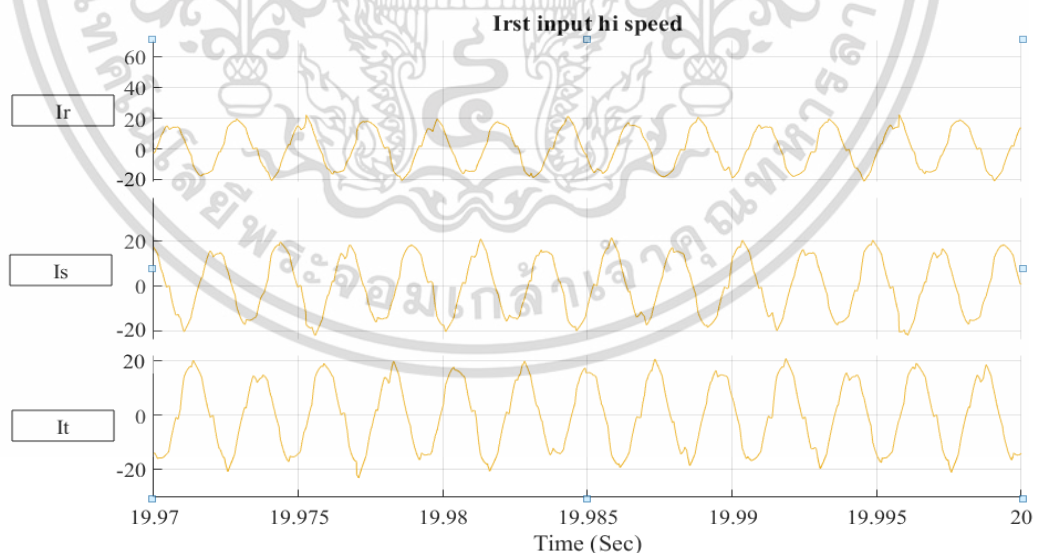
รูปที่ 4.13 ค่ากระแส Irst line Input (Hi-speed) จาก PMSG ความเร็วสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 ค่ากระแส I_{rst} Input จาก PMSG ขณะความเร็วต่ำ ค่ากระแสจะต่ำกว่า I_{rst} Input จาก PMSG ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.13 ซึ่งค่ากระแสความเร็วต่ำคงที่จะเท่ากับ 1 A และที่ความเร็วสูงจะอยู่ที่ 20A และที่ความเร็วต่ำจะเกิดสัญญาณรบกวนที่มากกว่าที่ความเร็วสูง



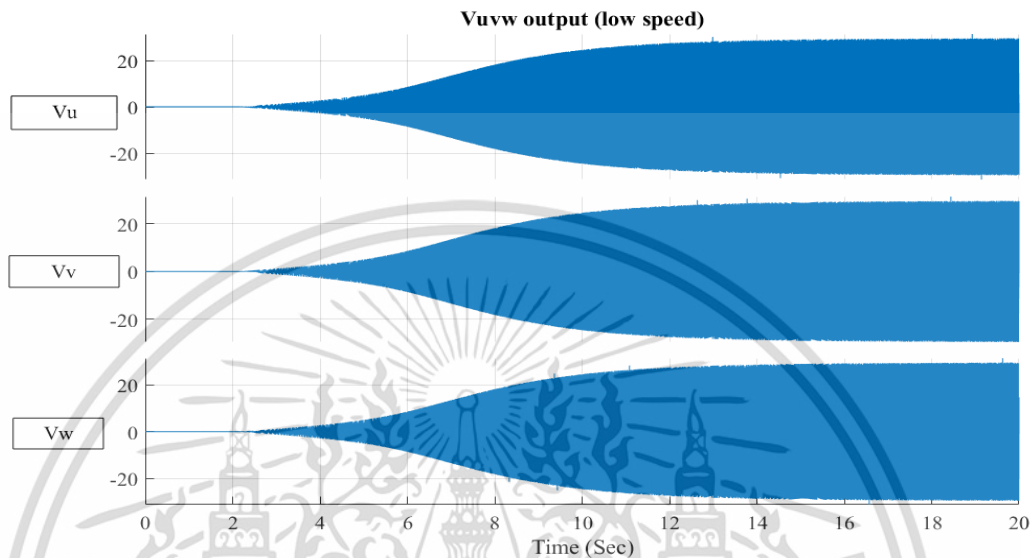
รูปที่ 4.14 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส I_{rst} Input (low speed) จาก PMSG ขณะความเร็วต่ำ



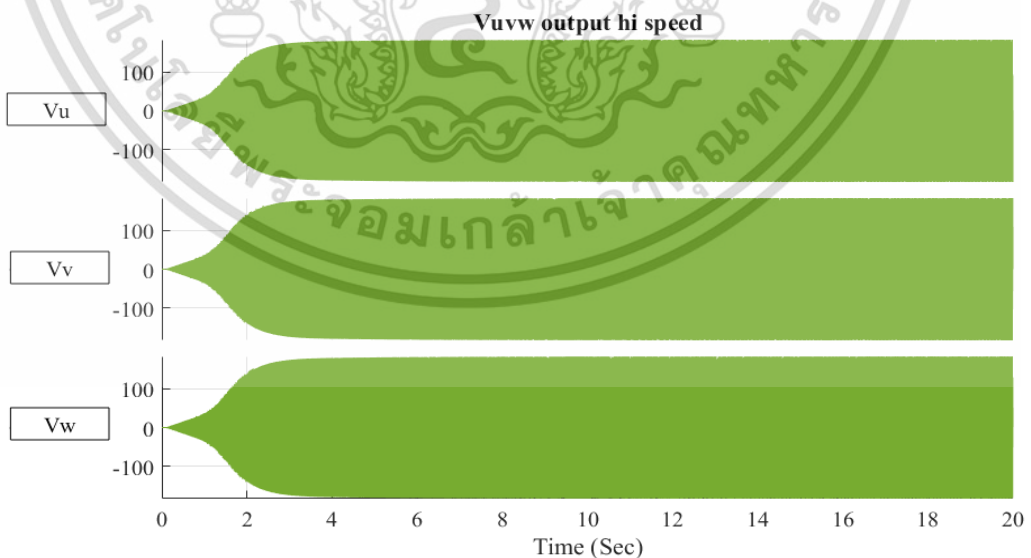
รูปที่ 4.15 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส I_{rst} Input (Hi-speed) จาก PMSG ขณะความเร็วสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส I_{rst} Input (low speed) จาก PMSG ขณะความเร็วต่ำ ความถี่ของสัญญาณนั้นจะมีความถี่ที่ต่ำกว่า I_{rst} Input จาก PMSG ขณะความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.15 และลักษณะสัญญาณไม่มีความคงที่



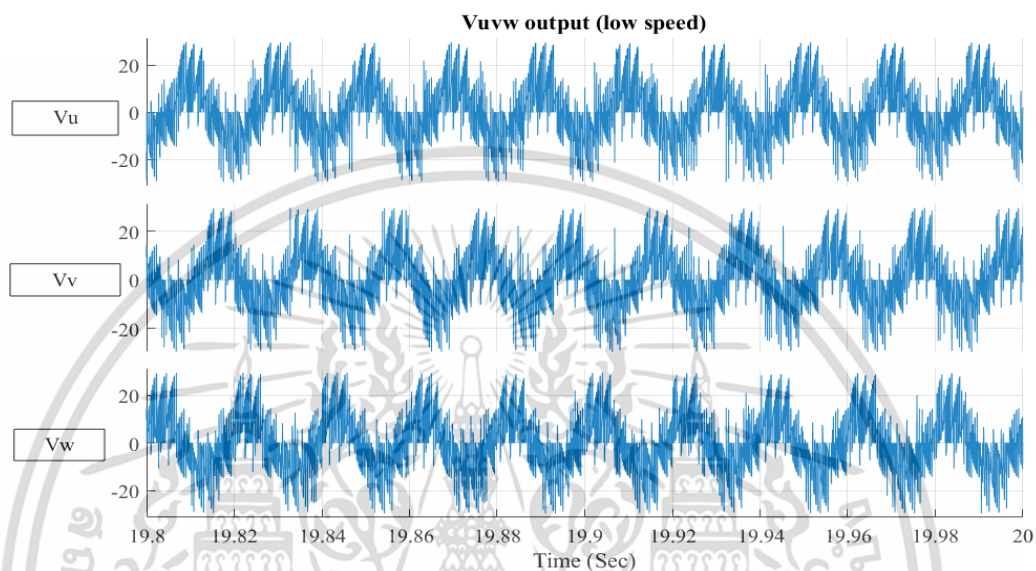
รูปที่ 4.16 ค่าแรงดัน Vuvw Output (low-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ



รูปที่ 4.17 ค่าแรงดัน Vuvw Output (Hi-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter

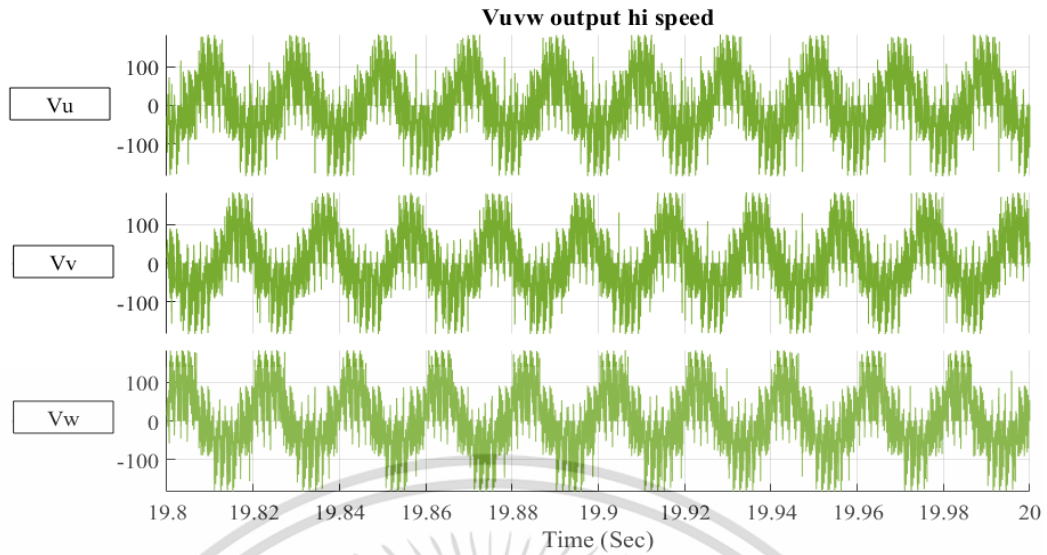
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 ค่าแรงดัน Vuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ ค่าแรงดันจะต่ำกว่า Vuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.17 ซึ่งค่าแรงดันความเร็วต่ำคงที่จะเท่ากับ 25V และที่ความเร็วสูงจะอยู่ที่ 150V



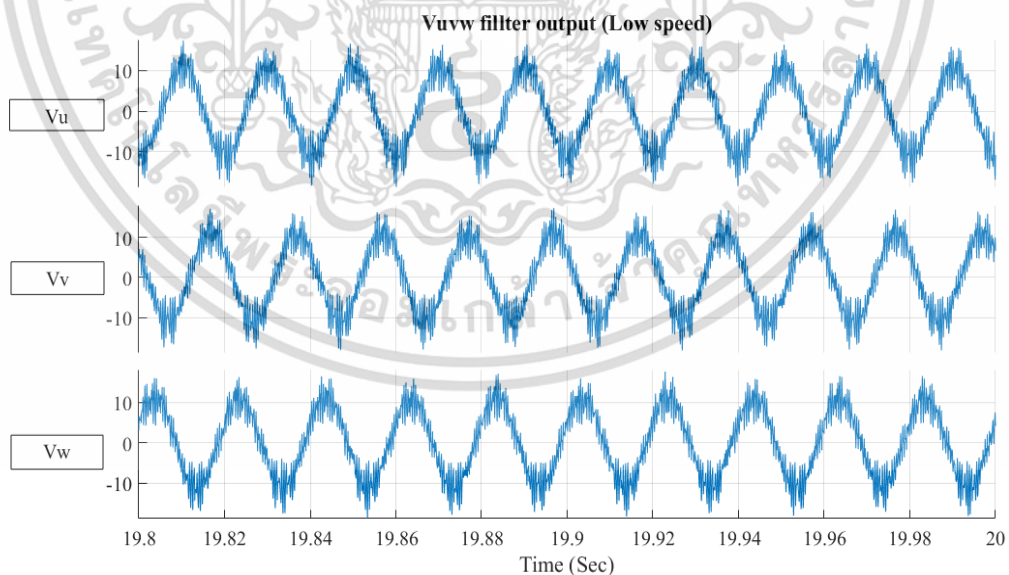
รูปที่ 4.18 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw output (low speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



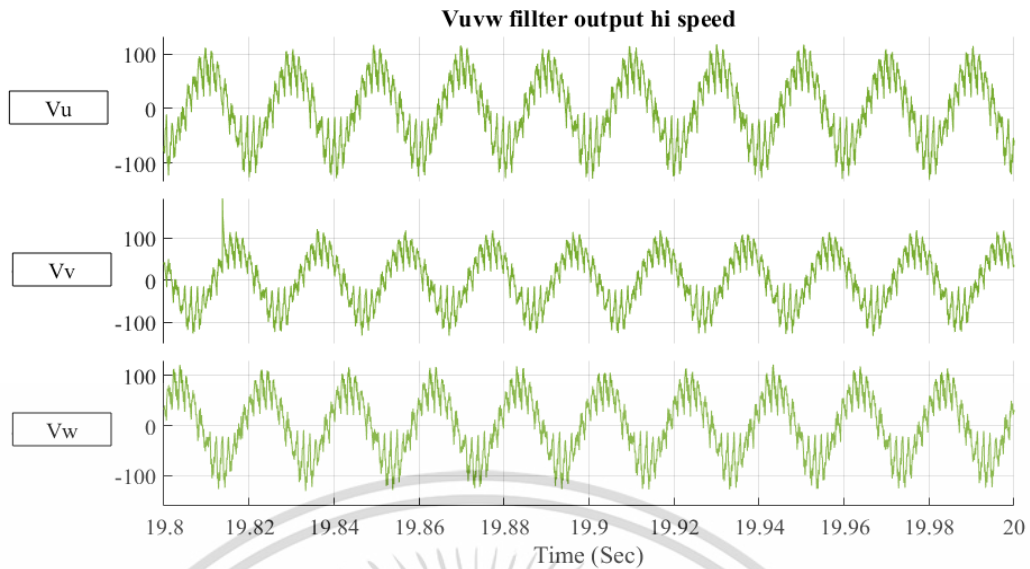
รูปที่ 4.19 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw output (low speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 ความถี่ Output ที่ออกมาทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูงนั้นจะมีค่าความถี่เท่ากัน และที่ความเร็วสูงสัญญาณ Output จะเกิดสัญญาณรบกวนที่มากกว่าความเร็วต่ำ



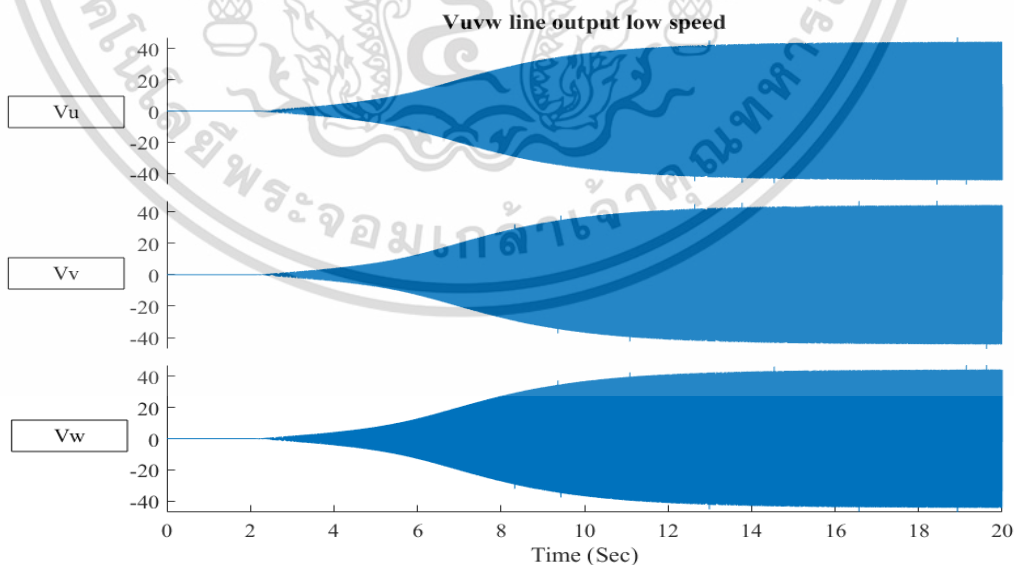
รูปที่ 4.20 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw output (low speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



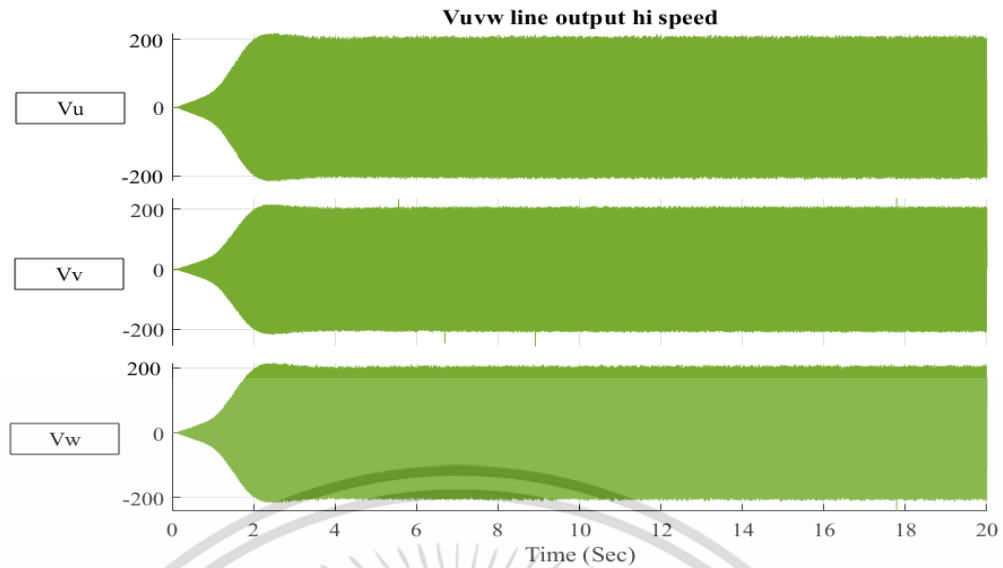
รูปที่ 4.21 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw output (Hi-speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ได้ จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะยังไม่ผ่านโหลดความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 ความถี่ output ที่ออกมาทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูงนั้น เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ รูปสัญญาณจะมีความเรียบและมีความเป็นสัญญาณ Sine มากขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้ ดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21



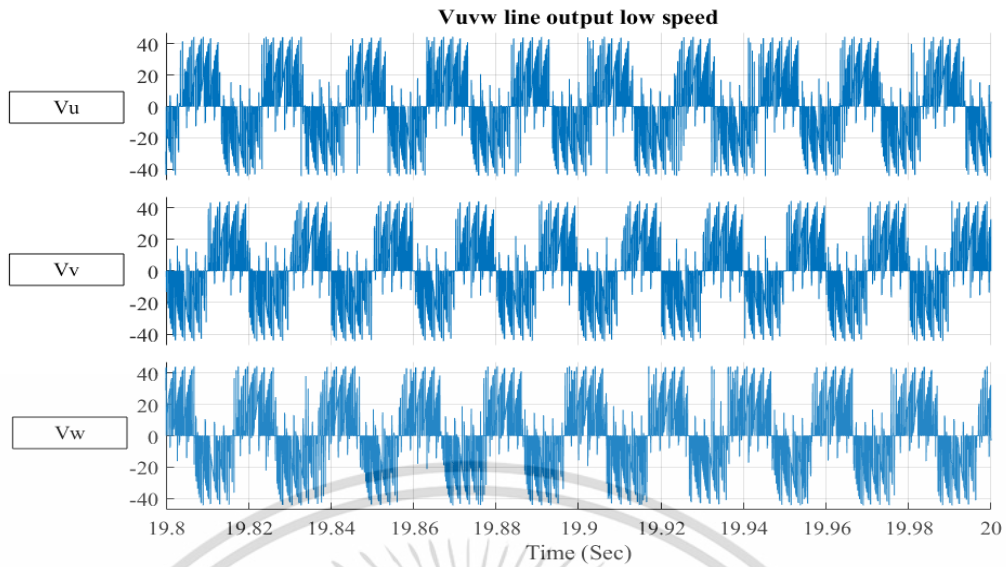
รูปที่ 4.22 ค่าแรงดัน Vuvw line Output (low-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix

converter ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

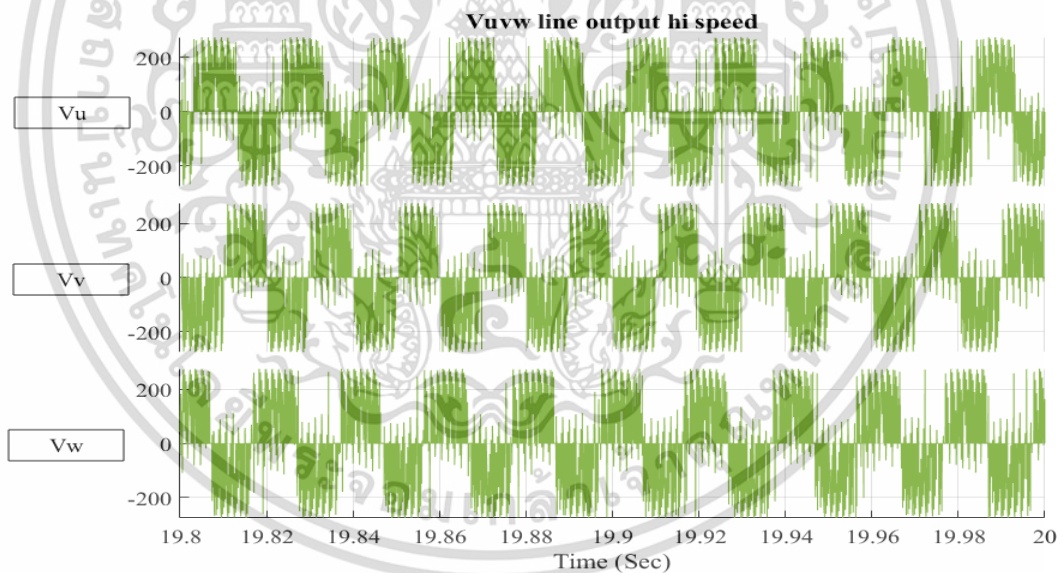


รูปที่ 4.23 ค่าแรงดัน Vuvw line Output (Hi-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ

จากรูปที่ 4.22 ค่าแรงดัน Vuvw line Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ ค่าแรงดันจะต่ำกว่า Vuvw line Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.23 ซึ่งค่าแรงดันความเร็วต่ำคงที่จะเท่ากับ 40V และที่ความเร็วสูงจะอยู่ที่ 200V



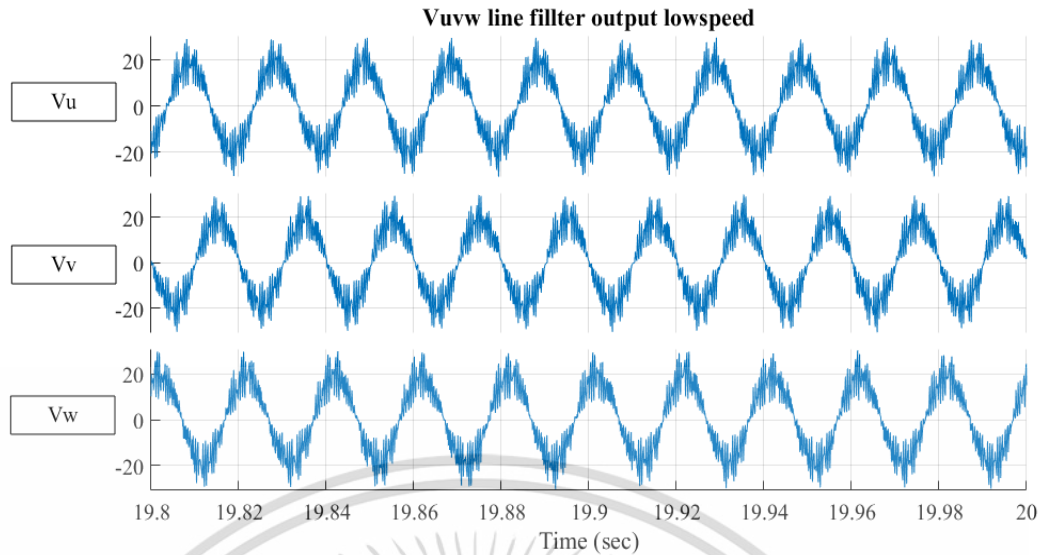
รูปที่ 4.24 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw line output (low speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ



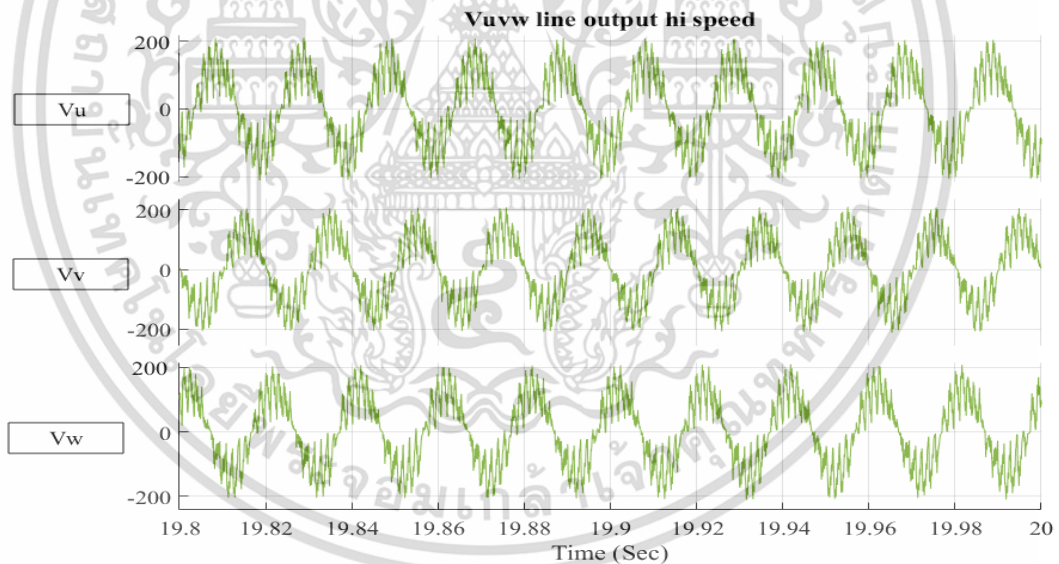
รูปที่ 4.25 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw line output (Hi-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 ความถี่ Output ที่ออกมาทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูงนั้นจะมีค่าความถี่เท่ากัน และที่ความเร็วสูงสัญญาณ Output จะเกิดสัญญาณรบกวนที่มากกว่าความเร็วต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



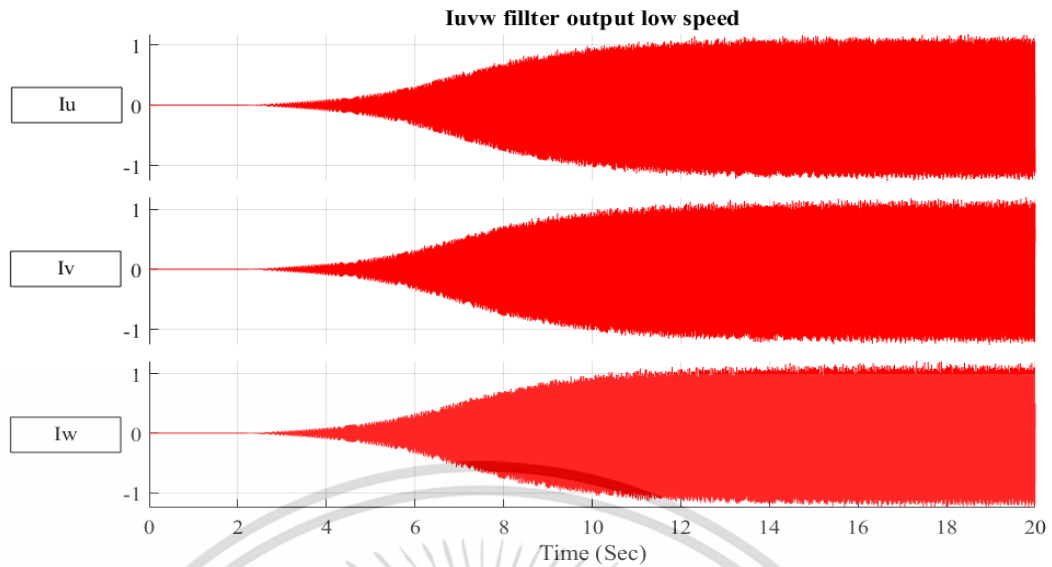
รูปที่ 4.26 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw line output (low speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ



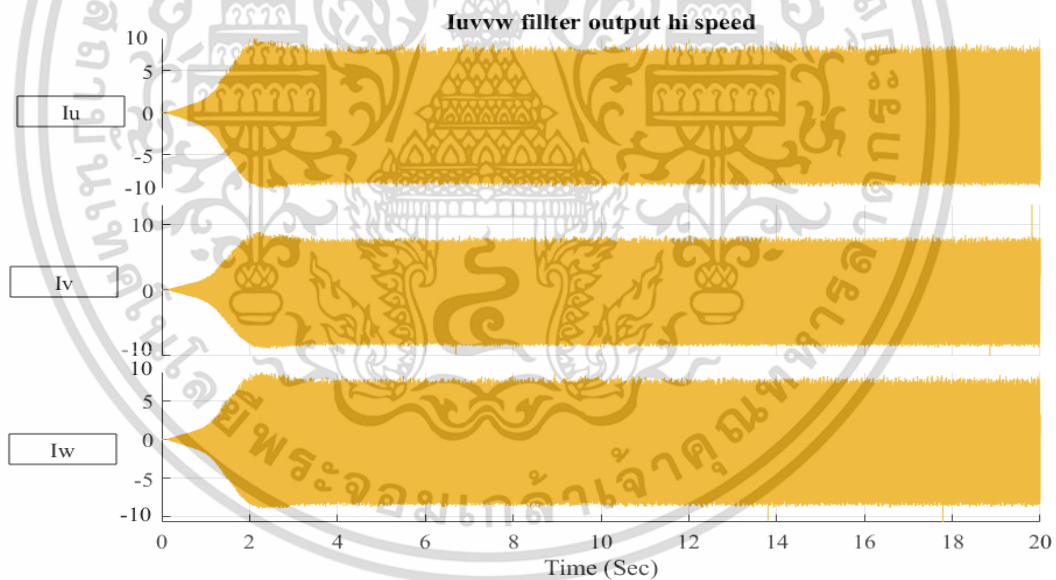
รูปที่ 4.27 ภาพขยายสัญญาณค่าแรงดัน Vuvw line output (Hi-speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลดความเร็วต่ำ

จากรูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 ความถี่ output ที่ออกมาทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูงนั้น เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ รูปสัญญาณจะมีความเรียบและมีความเป็นสัญญาณ Sine มากขึ้นและ

สามารถนำไปใช้งานได้ ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



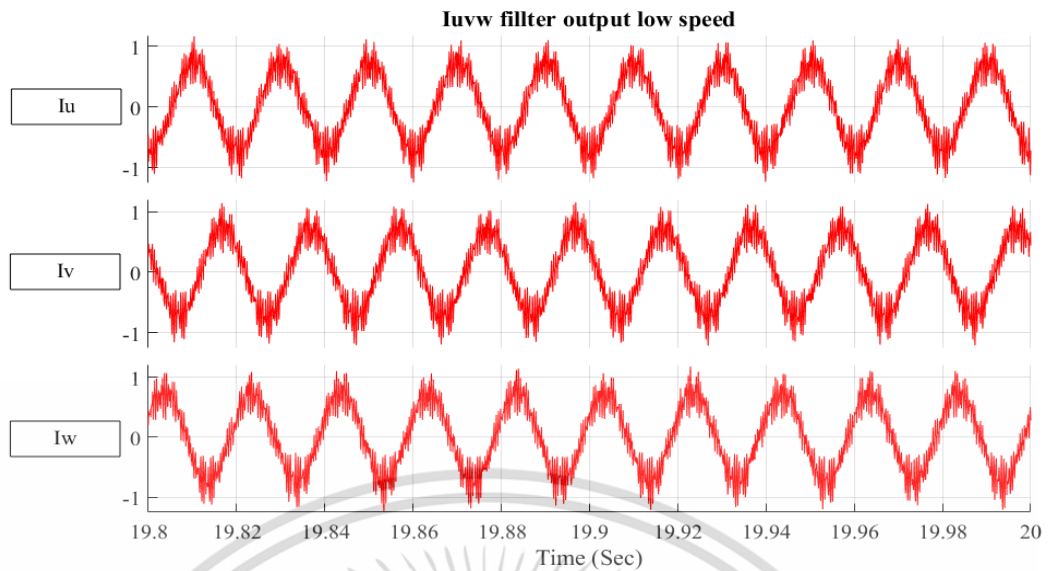
รูปที่ 4.28 ค่ากระแส Iuvw Output (low-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ขณะความเร็วต่ำ



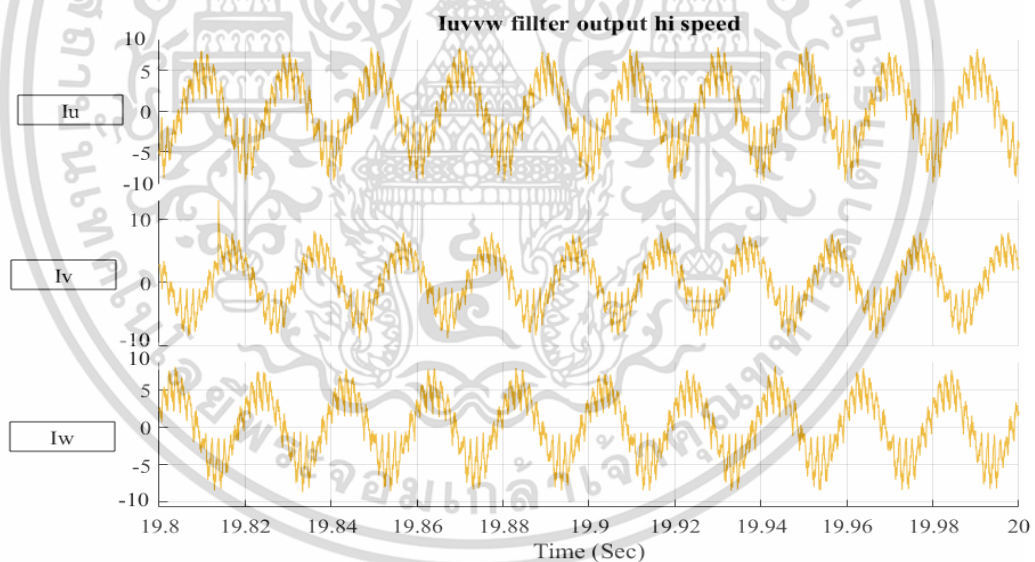
รูปที่ 4.29 ค่ากระแส Iuvw Output (Hi-speed) จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ขณะความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.28 ค่ากระแส Iuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะความเร็วต่ำ ค่ากระแส Iuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะผ่านโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นใบเซอร์จะแจ้งให้ทราบ
 ความเร็วสูง ดังในรูปที่ 4.29 ซึ่งค่ากระแสความเร็วต่ำคงที่จะเท่ากับ 1A และที่ความเร็วสูงจะอยู่ที่ 5A
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



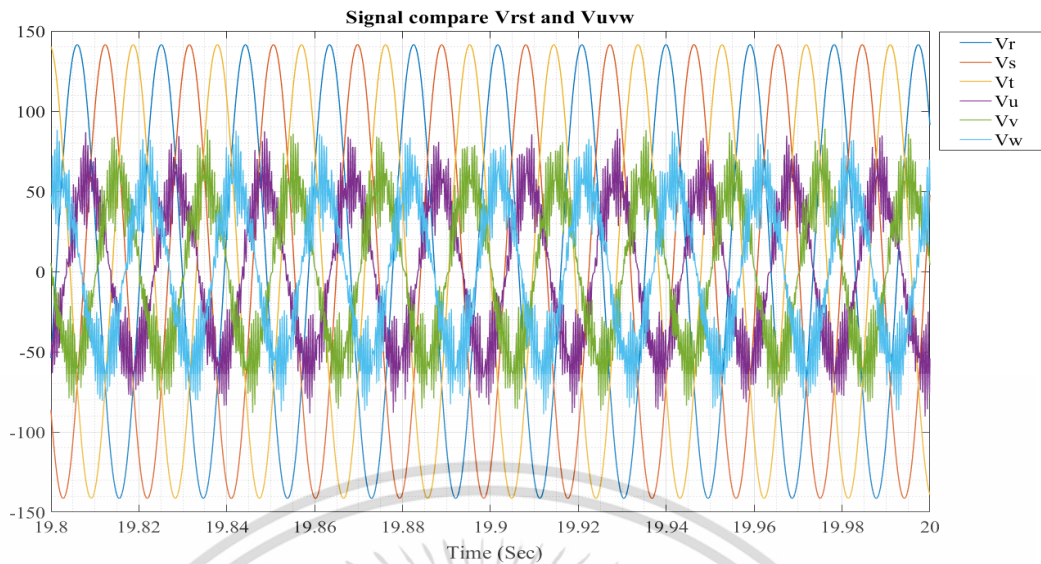
รูปที่ 4.30 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส Iuvw output (low speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ ผ่านได้จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะความเร็วต่ำ



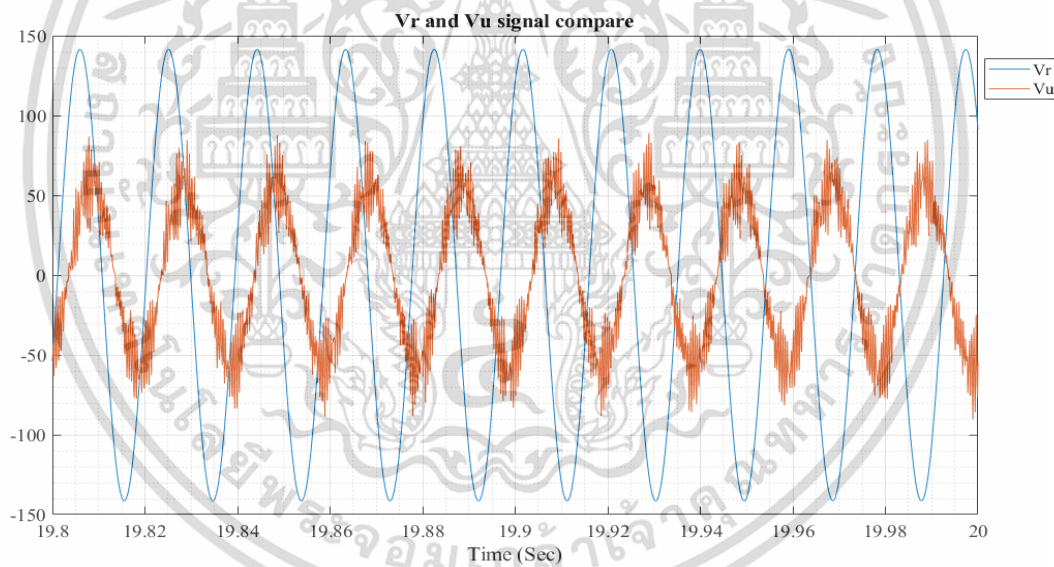
รูปที่ 4.31 ภาพขยายสัญญาณค่ากระแส Iuvw output (Hi-speed) เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำผ่าน ได้จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix converter ขณะความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.30 และ รูปที่ 4.31 ความถี่ Output ที่ออกมาทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูงนั้น เมื่อผ่าน ชุดกรองความถี่ต่ำผ่านได้ รูปสัญญาณจะมีความเรียบและมีความเป็นสัญญาณ Sine มากขึ้นและ

สามารถนำไปใช้งานได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

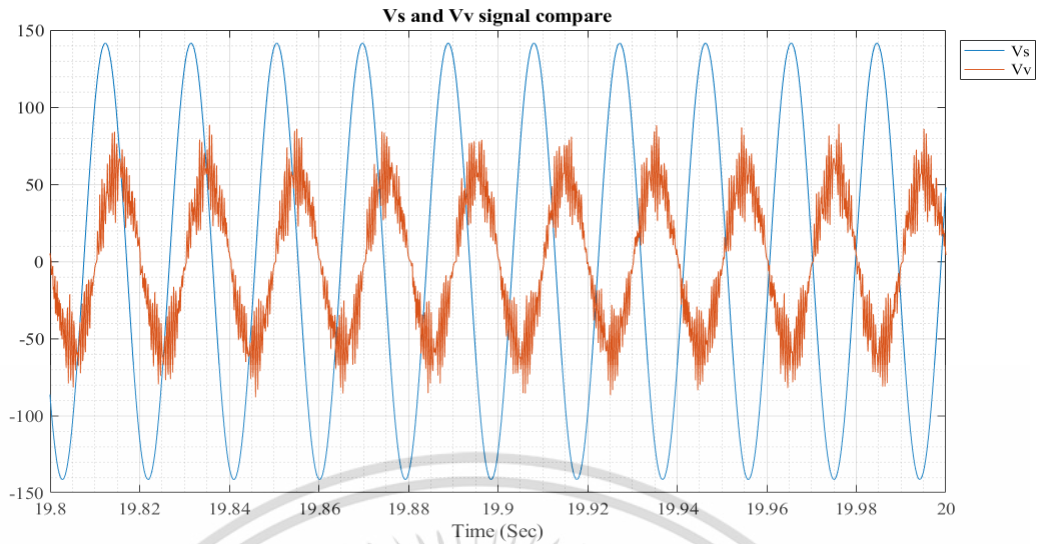


รูปที่ 4.32 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง Vrst และ Vuvw

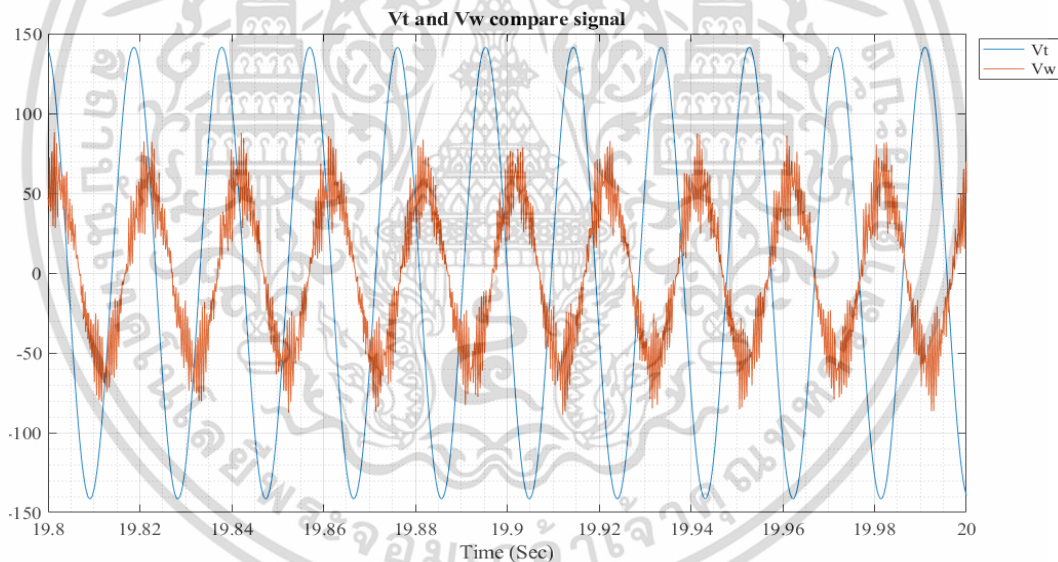


รูปที่ 4.33 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง Vr และ Vu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง Vs และ Vv



รูปที่ 4.35 ภาพเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง Vt และ Vw

จากรูปที่ 4.32 ถึง รูปที่ 4.35 จะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างตัวอินพุตที่มาจาก PMSG กับ เอาต์พุตที่ผ่านระบบ Matrix converter แล้วจะพบว่า สัญญาณในแต่ละเฟสจะมีการดีเลย์ระหว่างเฟสซึ่งเกิดจากดีเลย์ของการสวิตชิงของภาควงจรสวิตชิงของ Matrix converter จึงทำสัญญาณเอาต์พุตดีเลย์จาก PMSG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุป

การทดสอบระบบการทำงานของระบบกักทันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix converter โดยใช้โปรแกรม Matlab & Simulink นั้นและผลการทดสอบนั้นจะพบว่า แรงดันและกระแส Input จาก PMSG นั้น ค่าแรงดันและความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นจะผันแปรไปตามความเร็วลม ซึ่งเมื่อความเร็วต่ำค่าแรงดัน ค่ากระแส และความถี่จะต่ำและเมื่อความเร็วสูงค่าแรงดัน ค่าแรงดัน ค่ากระแส และความถี่จะสูง แต่เมื่อผ่านชุด การแปลงพลังงานแบบ Matrix converter แล้ว ค่าแรงดันและค่ากระแส Output นั้นจะยังคงผันแปรไปตาม ค่าแรงดันและค่ากระแสจาก Input แต่ค่าความถี่ที่ได้นั้นจะมีค่าคงที่ ทั้งความเร็วต่ำและความเร็วสูง แต่รูปคลื่นสัญญาณที่ผ่านชุดการแปลงพลังงานแบบ Matrix converter นั้นจะมีสัญญาณรบกวนอันนั้นมาจากการสวิตซ์ซึ่งของชุดแปลงพลังงาน จึงจำเป็นต้องผ่านชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ (Low pass filter) และเมื่อผ่านชุดกรองสัญญาณแล้ว รูปคลื่นสัญญาณจะมีความเรียบและมีความเป็น Sine มากขึ้น จึงจะสามารถนำสัญญาณที่ได้นั้นไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ

5.1 บทสรุป

จากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อออกแบบและจำลองการทำงานของระบบกักทันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix converter และทดสอบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยระบบ Matrix converter ในความเร็วลมที่แตกต่างกัน ซึ่งในการควบคุมระบบการแปลงพลังงานจะใช้วิธีการโดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมในการเปิด-ปิดของตัว Switching ซึ่งจากการออกแบบและทดสอบระบบการทำงานในโปรแกรม Matlab & simulink แล้วนั้นสามารถทำงานและควบคุมสัญญาณและความถี่ได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อ

จากการจำลองการทำงานของระบบกักทันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix converter จากผลการทดสอบในโปรแกรม Matlab & Simulink นั้น ค่าแรงดันระหว่าง Input Vr_{st} และ Output Vu_{vw} นั้นค่าของแรงดันนั้นจะเกิดการสูญเสียพลังงานที่ชุดสวิตซ์ซึ่ง (Switching Loss) และเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้นั้นก็จะเกิดการสูญเสียพลังงาน (Low pass filter loss) ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น 2 ขั้นตอน จากปัญหานี้จึงสามารถเป็นข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อไป และ ในระบบควบคุมการแปลงพลังงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมเป็นหลัก ซึ่งแนวทางในการทำวิจัยต่อนั้นก็จะได้เสนอวิธีการควบคุมการแปลงพลังงานโดยใช้วิธีการสร้างสัญญาณสเปซเวกเตอร์ (Space Vector) ร่วมกับการควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ซึ่งเมื่อรวมสองวิธีนี้เข้าด้วยกันนั้นจะเรียกรวมวิธีนี้คือ Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) ซึ่งจะทำให้การควบคุมการแปลงพลังงานนั้นมีความแม่นยำและมีความเสถียรเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภัทรา กุลเดชชัยชาญ. “ศึกษาการจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร.” ปริญญาโทปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยบูรพา. 2551
- [2] กานต์ธิดา บุญมา และชัยนุสนธ์ เกษตรพงศ์ศาล. “การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอัตราเร็วรอบต่ำด้วยแม่เหล็กแรงสูง,NdFeB N35” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. ปีที่21, ฉบับที่3, พฤษภาคม-ตุลาคม 2561. หน้า206-215.
- [3] C. He and T. Wu, "Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator," in **CES Transactions on Electrical Machines and Systems.**, vol.3, no. 1, pp. 94-100, March 2019, doi: 10.30941/CESTEMS.2019.00013.
- [4] Tammaruckwattana, S. “Modeling and Simulation of Wind Power Generation System Using AC to AC Converter” **International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2016.**, IMECS 2016
- [5] วิโชค โห้ทองคำ และวิริยะ พิเชฐจำเริญ. “การออกแบบ สร้าง และพัฒนา 3-เฟส เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่25, ฉบับที่3, กรกฎาคม-กันยายน 2545. หน้า245-256
- [6] R. K. Gupta, K. K. Mohapatra, A. Somani and N. Mohan, "Direct-Matrix-Converter-Based Drive for a Three-Phase Open-End-Winding AC Machine With Advanced Features," in **IEEE Transactions on Industrial Electronics.**, vol. 57, no. 12, pp. 4032-4042, Dec. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2043045.
- [7] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," in **IEEE Transactions on Industrial Electronics.**, vol. 49, no. 2, pp. 276-288, April 2002, doi: 10.1109/41.993260.
- [8] A. S. Mohamad, "Matrix Inverter: A Multilevel Inverter Based on Matrix Converter Switch Matrix," **2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC).**, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPEC48502.2020.9320121.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] P. B. Shinde and T. N. Date, "Pulse width modulation control of 3 phase AC-AC matrix converter," **2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC).**, 2017, pp. 992-997, doi: 10.1109/ICCMC.2017.8282618.
- [10] G. Tozzi, M. Elsied, A. M. Mabwe, C. Onambele and L. Pugi, "Enhanced space vector PWM for six to three-phase matrix converter interfacing PMSG with the grid," **IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.**, 2017, pp. 1933-1940, doi: 10.1109/IECON.2017.8216326.
- [11] J. Rodriguez, M. Rivera, J. W. Kolar and P. W. Wheeler, "A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters," in **IEEE Transactions on Industrial Electronics.**, vol. 59, no. 1, pp. 58-70, Jan. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2165310.
- [12] Bondarev, A & Fedorov, S & Muravyova, E. (2018). Control Systems with Pulse Width Modulation in Matrix Converters. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.** 327. 052008. 10.1088/1757-899X/327/5/052008.
- [13] A. Yusuke and T. Takeshita, "PWM Control of Matrix Converter for Reducing a Number of Commutations and Output Voltage Harmonics," **2007 Power Conversion Conference - Nagoya.**, 2007, pp. 769-775, doi: 10.1109/PCCON.2007.373054.
- [14] S. Tammaruckwattana, Chenxin Yue, Y. Ikeda and K. Ohya, "Comparison of switching losses of matrix converters for commutation methods," **2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications.**, 2014, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2014.6910995.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

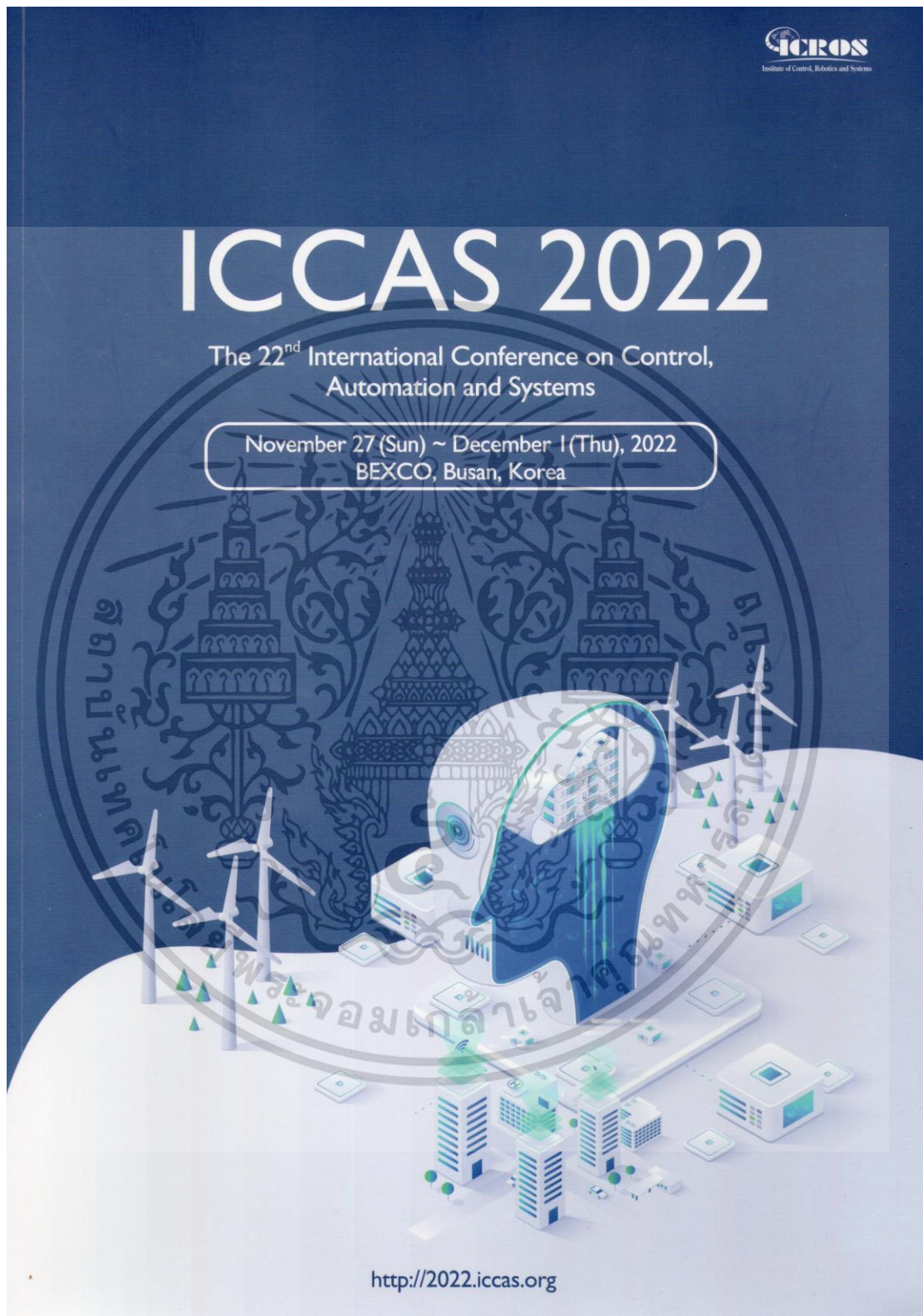
ภาคผนวก ก

บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์

บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการระดับนานาชาติในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีรายละเอียดดังนี้

- [1] S. Tammaruckwattana, P. Kawpukdee, N. Suppaadirek, R. Gullayanono and A. Rerkrath, “Commutation Methods of AC-AC Converter for Wind Power Generation System” **22th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2022)**, BEXCO, Busan, Korea, Nov. 27 – Dec. 1, 2022, pp. 586 - 591.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Commutation Methods of AC-AC Converter for Wind Power Generation System

S. Tamaruckwattana¹, P. Kawpukdee², N. Suppaadirek³, R. Gullayanono⁴ and A. Rerkratn^{5*}

¹ School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (sirichai.ta@kmitl.ac.th)

² School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (62601184@kmitl.ac.th)

³ School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (62601186@kmitl.ac.th)

⁴ School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (rutchanee.gu@kmitl.ac.th)

⁵ School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand (apinai.re@kmitl.ac.th) * Corresponding author

Abstract: In this paper, the AC-AC converters using 2-step current commutation, 4-step current commutation, 2-step voltage commutation, 4-steps voltage commutation, and 3-steps voltage-current commutation will be used for a power converter system are proposed. The system is simulated and calculated with MATLAB/Simulink. This paper discusses each method, its difference, and its power loss.

Keywords: Matrix converter, Commutation method, Simulation, Switching loss

1. INTRODUCTION

AC-AC converter is used for transforming AC waves with one frequency and magnitude to another mainly used in the case of speed control for machines. A matrix converter (MC) is an AC-to-AC converter which means the input and output are AC [1]. Its efficiency is high, and the system is small compared with general power converters. In [2], the multi-speed wind power generation system that uses a back-to-back PWM converter is proposed. This method needs a lot of switches, and the control system is complicated. In [3,4] The power converter is made of a diode and boost converter circuit. The system cost less and is less complicated but still needs a DC link to function the same as [5] which proposed a power converter made from the diode bridge rectifier. The matrix system can reduce the system cost and the control system is less complicated [6,7]. The matrix circuit used nine bidirectional switches constructed using IGBTs construct in the reverse blocking method. The way to link two reverse block IGBTs in parallel and reverse is efficient and commonly used [8,9]. MC is mainly grouped into two methods, the indirect and the direct method [9]. The indirect method allows the comparison of carrier PWM control of PWM rectifiers and inverters by their relation between output and input voltages and switching functions. The indirect methods' loss expands due to the carrier PWM switching comparison increases. The switching losses are the sum of the losses incurred between the emitter and collector of the reverse IGBT and the losses incurred at the gate impedance. This research simulation topology of 2-step current commutation (2C), 4-step voltage commutation (4V), 4-step current commutation (4C), 3-step voltage-current commutation (3VC), and 2-step voltage commutation (2V), and compare their loss in commutation process. The losses of gate resistances and the losses between the emitters and collectors of Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistors (RB-IGBTs)

are caused by a difference in the sequence of switching.

2. MATRIX CONVERTER SIMULATION

2.1 Commutation method

The MC construct of using six units of RB-IGBTs for every phase as the state in Fig. 1. The voltage commutation and current commutation methods are presented in [9-11]. The voltage commutation determines the switching scheme depending on the relative magnitudes of the input voltages V_1 , V_2 , and V_3 . The current commutation determines the commutation pattern based on the direction of the output current I [12].

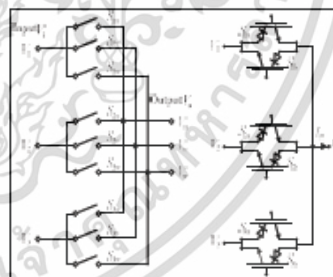


Fig. 1. The basic circuit of the matrix converter.

2.2 2-step current commutation method (2C)

The 2-step commutation method is proposed in [12]. This process focuses on maintaining the conduction path of the output current. The short circuit did not happen because the others are off. In this case, the 2-step commutation can construct. A gate resistance loss is reduced because the switching sequence decreases. However, this type of circuit requires the detection of the

current polarity on the output terminal. In addition, a switching voltage is applied to the zero-output current. This is because error detection can happen based on the sensor efficacy that measures current when the output current cuts through about zero.

Fig. 2 shows the timetable for a 2-step current commutation (2C). Normally, the system is using three sets of switches, but the diagram will keep it at two for simple understanding since the diagram is used for explaining the concept of the switching system. The logic of the timetable of switching comes from the understanding of the IGBT switch and simulation. The step interval of commutation is $5 \mu\text{s}$ per 1 step. The first step in the timetable will start when the process occurs in the dashed line. Set the working state as $V_1 > V_2 > V_3$, and the current on the output terminal is positive. S_{1a} , S_{2a} , or S_{3a} will conduct when $I_o > 0$. The S_{1b} , S_{2b} , and S_{3b} are in off-state when they switch off until the output current comes across zero. An error occurred on the voltage on output terminal V_o when commutation from high voltage to low, but the error did not happen from low voltage to high voltage.

2.3 4-step voltage commutation method (4V)

Fig. 3 presents the timetable for a 4-step voltage commutation at $I > 0$. The step interval of commutation is $5 \mu\text{s}$ per 1 step. The first step will start when the process occurs in the dashed line. There will be a short circuit in the first step if S_{2a} turns on, so keep it off first. The output terminal is active when S_{1a} or S_{1b} is in off-state, and it is not possible to steady the current path. Open and short circuits are inevitable without turning the S_{2a} on. In the second step, a positive current is ensured when S_{2a} is in the open state which means the S_{1a} is possible to go off-state. In the third step, the short circuit will not occur even if the S_{2b} is on-state because the S_{1a} is off. In the final step, the S_{1b} can be turned off because the negative current can be secure when the S_{2b} is on.

In the 4-step voltage commutation method, the work process of the switch is decided by the magnitude of the voltage on the input terminal. This switching method can choose an inevitable switching pattern and consider keeping the current path. The errors in voltage output happen in all methods, and the size of errors is changed depending on the value of voltages for the commutation destinations and the output current's polarity.

2.4 4-step current commutation method (4C)

Fig. 4 presents the timetable for a 4-step current commutation at $I > 0$. In a 4-stage current, the switching times of the switches in a similar current polarity are defined by observing the current connection time to turn on the switch within the same output terminal. The time

it takes for switching other switches is determined by dead time to prevent short circuits.

2.5 3-step voltage-current commutation method (3VC)

Fig. 5 presents a timetable for 3-step voltage and current commutation at $I > 0$. The step interval of commutation is $5 \mu\text{s}$ per 1 step. The first step in the timetable will start when the process occurs in the dashed line. This method is proposed in [13] which uses a combination of voltage switching and current switching methods. In this method, the switching mode is defined by the value relation of voltage on the input terminal and the polarity of the output current. The switching scheme is at first specified depending on a method of switching the voltage or the method of switching on the current. The commutation steps, which can be eliminated using lacked information (the relative magnitude of the input voltage for the current method and the polarity of the output current for the voltage switching method) are determined, then a 3-step switching scheme is selected for the current switching method. In this method, a switching scheme can be chosen freely because of no restrictions (because of open-circuit load and short-circuit of a power source) for the on/off the rhythm of the switch carried out in eliminated steps.

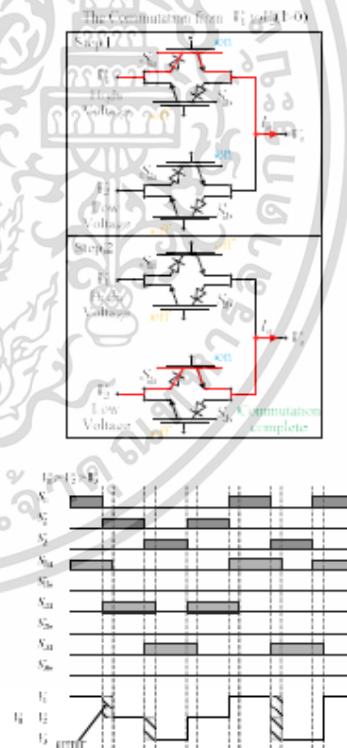


Fig. 2. Timetable for 2-step current commutation at $I > 0$.

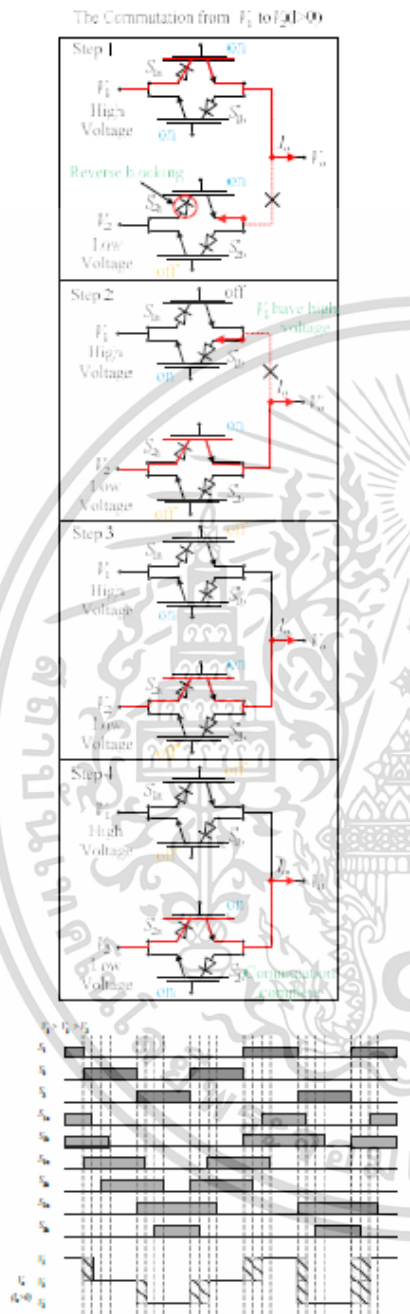


Fig. 3. Timetable for 4-steps voltage commutation at $I > 0$.

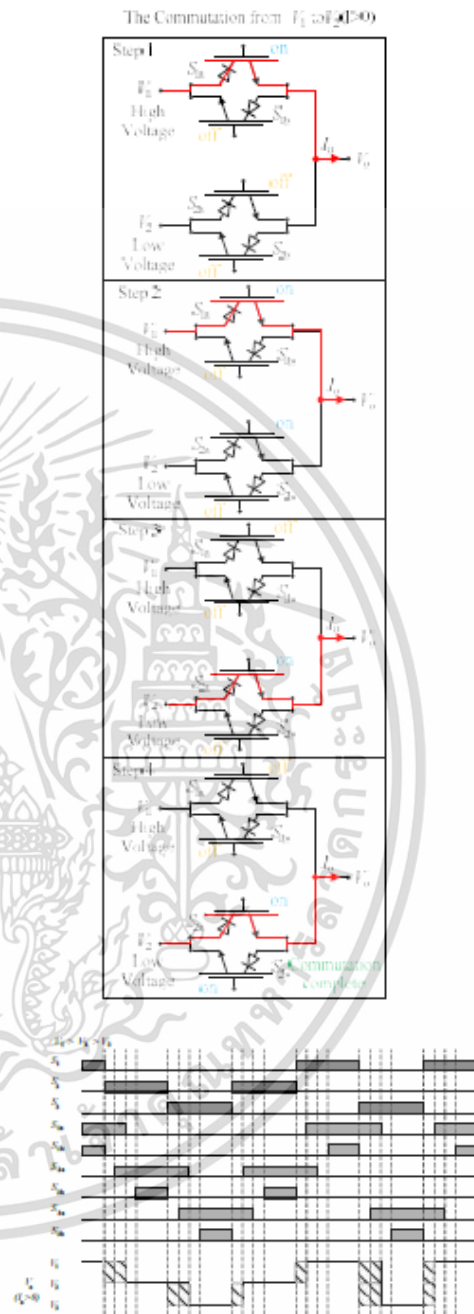


Fig. 4. Timetable for 4-steps current commutation at $I < 0$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

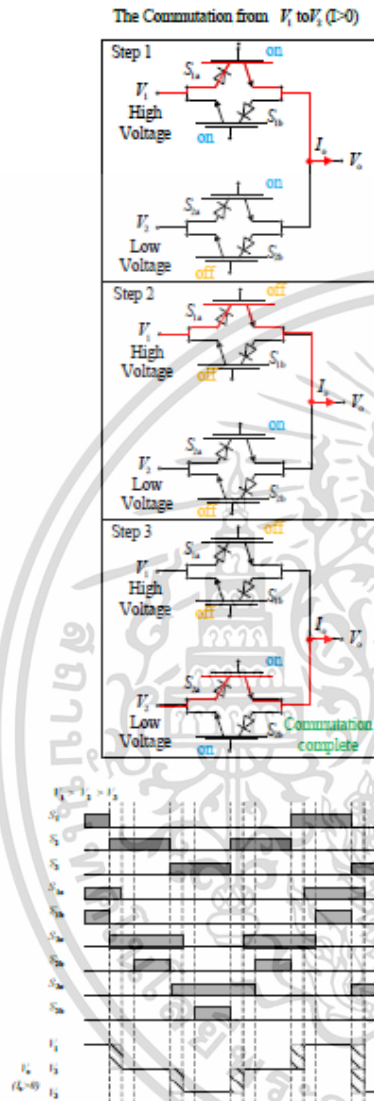


Fig. 5. Timetable for 3-steps voltage-current commutation at $I > 0$.

2.6 2-steps voltage commutation method (2V)

Fig. 6 presents a timetable chart for a 2-step voltage commutation at $I > 0$. The step interval of commutation is $5 \mu s$ per 1 step. The first step in the timetable will start when the process occurs in the dashed line. In this method, the switch which did not occur short-circuits the power source is always turned on. Therefore, it can shorten the time to secure the current route. The on-state switch is decided by the voltage related to a switching destination

and the switching source. The switch of the on-state for the highest voltage and the lowest voltage is possible to set until the change in the relation to the input voltage. However, the switch which is turned on for the intermediate phase voltage needs to change following the voltage relationship between the phases of the switching source or the switching destination, even if the command for switching is not assigned to the neutral phase switch. It is necessary to maintain the switching.

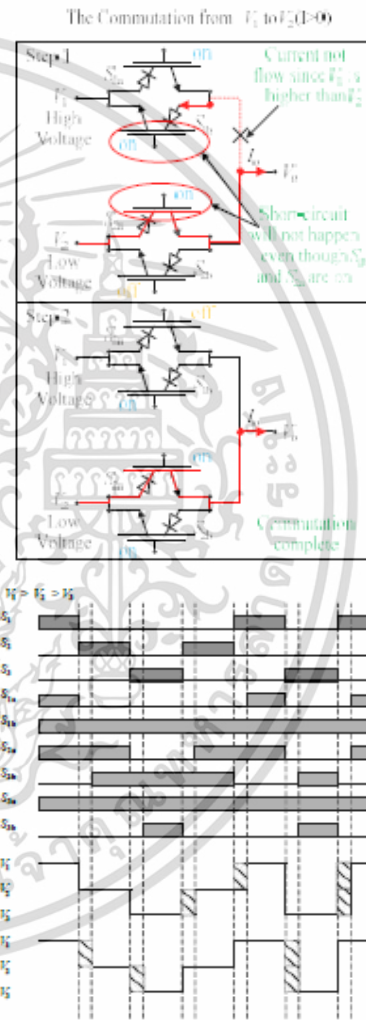


Fig. 6. Timetable for 2-step voltage commutation at $I > 0$.

3. SIMULATION METHOD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The aim of the simulation is to study the matrix system in each method and compare the loss that occurs in the process to make the MC system a power conversion system. The control system of the MC uses a simulation AC to DC to AC method, which is an indirect way. The first leg modulation has been put into the simulation rectifier side control and the number of switching times is lessened [14]. The zero current range of the DC link is maintained by a converted carrier on the simulation inverter side and the current waveform on the input side is enhanced [14]. The simulation model is presented in Fig. 7.

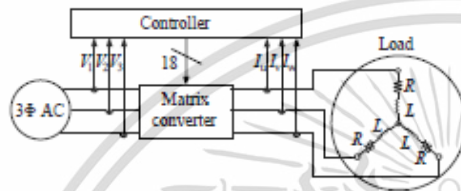


Fig. 7. Simulation model

The switching losses W have been calculated as by the total of the W_{CF} losses created between the emitter and collector and the W_G losses on the gate impedance of the gate drive circuit. The situation of the gate impedance and emitter of the RB-IGBT is simulated as an RC circuit as presented in Fig. 8 and W_G is acquired as the ohmic loss of the R_G .

$$W = W_{SW} + W_G = W_{IN} - W_{OUT} + \int \frac{(E - E_0)^2}{R_G} e^{-\frac{t}{R_G C}} dt \quad (1)$$

where W_G is the gate loss, W_{SW} is the switching loss, W_{IN} is the input power for the MC, W_{OUT} is the output power for the MC, E_0 is the initial charge voltage of the condenser, E is the power supply voltage, C is the capacitance between the gate and the emitter of the RB-IGBTs and R_G is the gate resistance.

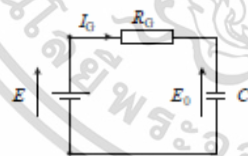


Fig. 8. RC circuit model of RB-IGBT

4. SIMULATION RESULT

The simulation program use parameter as following, three-phase AC power supply (amplitude $E_m = 20[V]$, frequency $f = 60[Hz]$) and Y connection RL load (inductance $L = 40[mH]$, resistance $R = 15[\Omega]$). The reference voltage frequency is $40[Hz]$ for every switch. The forward voltage is $V_f = 2.4[V]$ and the open resistance is $R_{on} = 0.25[\Omega]$. The gate drives circuit has a push-pull

driver with supply positive $E = 15[V]$ and supply negative $E = -5[V]$. The RB-IGBT has a gate resistance R_G set as $5[\Omega]$ and a capacitance $C = 2.4[nF]$ between the gate and emitter. The step transition interval is $5[\mu s]$ per step. The switching method threshold is $\pm 0.2[A]$. For 2-step switching, the switching current is worked under conditions of $|I| \geq 0.2[A]$ and voltage exchange is set under the conditions of $|I| < 0.2[A]$.

Fig.9 presents the W_G results in the simulation which show an IGBT gate impedance loss. W_G of each switching method depends on the switching times of the commutation. The W_{SW} presents the overall losses of MC. The W shows the total of the W_G and the W_{SW} . The W is overwhelmed by the W_{SW} because the W_G is much smaller than the W_{SW} .

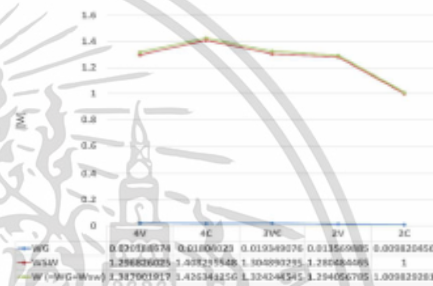


Fig. 9. Simulation results.

5. EXPERIMENTAL SYSTEM

Fig. 10 presents the experimental system of the MC control system. The losses that occur in the matrix converters can be estimated with W_{CF} , so the total matrix converter losses are considered as power subtracted from the output power from the input power in the experiment. Fig. 11 presents the results of the experiment. The three-phase AC power supply, the load Y connection RL, reference voltage frequency, step switching interval, switch method threshold and switching conditions are the same as simulation. The input power factor is 1 and the carrier frequency is $2[kHz]$. The output voltage amplitude is 0.5. In this experiment, the Precision Power Analyzer (PPA5530) was used to determine the input power and output power to gauge the loss of the matrix converter. Assessments are performed on all losses as the PPA5530 cannot measure W_G .

W_{SW} presents the overall loss of each method. When compared to the simulation results, the overall loss of 3VC and 4V is reduced. On the other hand, 2V and 2C are increased for the total loss. In addition to 4V and 3VC, other methods are similar to simulation results. In real experiment testing, the transition time of the 2-step switching method appears to be greater than the simulation which will cause more losses regardless of the current path. Also, the switching time of the current switching method appears to increase as the current is negligible near 0.

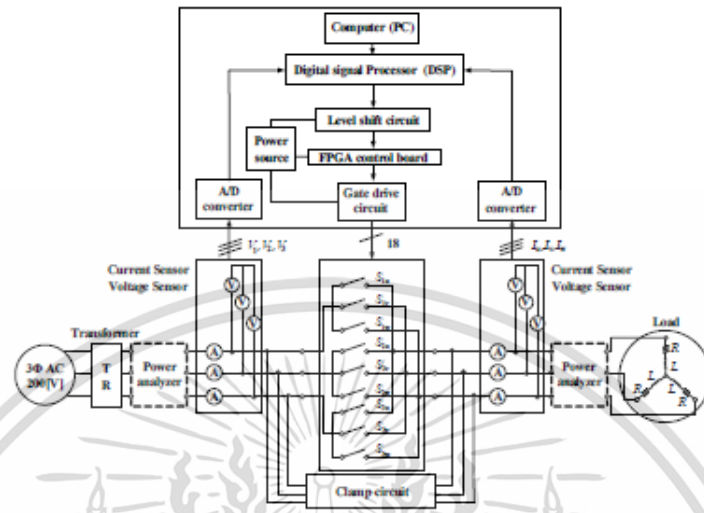


Fig. 10. Experimental system

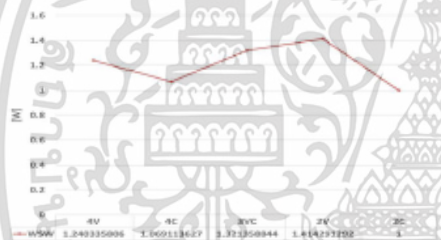


Fig. 11. Experimental results.

6. CONCLUSION

This paper assesses the simulation and ability of five switching methods. From the simulation results, the IGBT gate impedance loss is less compared to the total MC loss. The switching current method loss is less than the voltage switching method loss.

REFERENCES

[1] A. S. Mohamad, "Matrix Inverter: A Multilevel Inverter Based on Matrix Converter Switch Matrix," *IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, 2021.
 [2] S. Tammaruckwattana and K. Ohyama, "Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Wind Turbine Emulator," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 123-145, 1989.
 [3] S. Tammaruckwattana and K. Ohyama, Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power Generation System Using Boost Converter Circuit," *15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2015.
 [4] S. Tammaruckwattana and K. Ohyama, Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System

Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Boost Converter Circuit," *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013.
 [5] S. Tammaruckwattana, S. Reangkitrakam, N. Suppaadirek and K. Ohyama, "Experimental Verification of Wind Power Generation System Using Diode Bridge Rectifier Circuit with Wind Turbine Simulator" *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 17, no.1, pp. 54-65, 2022.
 [6] T. N. Mir, B. Singh, and A. H. Bhat, "Single-Phase to Three-Phase Matrix Converter Fed Induction Motor Drive for Low Speed Applications," *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2020.
 [7] A. Formentini, S. Pipolo, A. Trentin and P. Zanchetta, "Optimal Control of Matrix Converters," *21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe)*, 2019.
 [8] C. Hou, C. Huang and P. Lin, "Common Mode Voltage Reduction in Matrix Converter with Multicarrier PWM Scheme," *21st European Conference on Power Electronics and Applications*, 2019.
 [9] Investigating R&D Committee on Improvement of Practical and Applied Technology of Direct AC to AC Conversion Circuit: Trend and Applications of Matrix Converters, *IEEJ*, no.1111, pp.17-18, 2008.
 [10] W. Cai, Z. Wang and S. Sun, "A Novel Space Vector Modulation for the 3x5 Direct Matrix," *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2019.
 [11] K. Okuzono, S. Tomita and H. Haga, "Expand Output Voltage Range of AC/AC Converter Using Reversible Indirect Matrix Converter (R-IMC)," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019.
 [12] K. Kato and J. Itoh, "Development of a Novel Commutation Method which Drastically Suppresses Commutation Failure of a Matrix Converter," *IEEJ Transactions on Industry Applications*, vol.127, no.8, pp.829-836, 2007.
 [13] Patrick W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, and A. Weinstein, "Matrix Converters: A Technology Review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no.2, pp. 276-288, 2002.
 [14] J. Itoh, I. Sato, H. Ohguchi, K. Sato, A. Odeka, and N. Eguchi, "A Control Method the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Using Carrier Comparison Method," *Electrical Engineering in Japan*, vol.152, no.3, pp.65-73, 2004.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายประมุข แก้วภักดี

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 16 มีนาคม 2536

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ จากคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2558 และในปี 2562 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้