

การประยุกต์ใช้งานตัวแปลงแมทริกซ์ในระบบการผลิตพลังงานจากลม

APPLICATION OF MATRIX CONVERTER TO WIND POWER  
GENERATION SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-M-027-035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF MATRIX CONVERTER TO WIND POWER  
GENERATION SYSTEM



CHOTIWAT JUNTHAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2025

KMITL-2025-EN-M-027-035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2025**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้งานตัวแปลงแมทริกซ์ในระบบการผลิตพลังงาน จากลม
นักศึกษา	นาย โชติวัฒน์ จันธรรม
รหัสประจำตัว	66016031
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้งานแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์(Matrix Converter) ในการควบคุมแรงดันและความถี่ของพลังงานที่ผลิตจากลม และการเชื่อมต่อพลังงานลมกับระบบกริดไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีความผันผวนของพลังงานลม การศึกษาใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องแปลงแมทริกซ์ในการควบคุมแรงดันและความถี่ ผลการศึกษาพบว่าเครื่องแปลงแมทริกซ์สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ของพลังงานได้ดี โดยมีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าการใช้หม้อแปลงหรืออุปกรณ์แปลงความถี่แบบดั้งเดิม นอกจากนี้ เครื่องแปลงแมทริกซ์ยังช่วยเพิ่มความเสถียรของระบบกริดไฟฟ้า และลดผลกระทบจากความผันผวนของพลังงานลม การศึกษานี้จึงเสนอแนวทางใหม่ในการพัฒนาระบบพลังงานทดแทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนในการผลิตพลังงานจากลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Application of matrix converter to wind power generation system
<b>Student</b>	Mr. Chotiwat Juntham
<b>Student ID.</b>	66016031
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical and Computer
<b>Year</b>	2025
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Sirichai Tammaruckwattana

## ABSTRACT

This study aims to apply the Matrix Converter to control the voltage and frequency of energy generated from wind power and to efficiently integrate wind energy into the electrical grid, particularly in situations involving fluctuations in wind power. Mathematical simulations and laboratory experiments were employed to assess the performance of the Matrix Converter in controlling voltage and frequency. The results indicate that the Matrix Converter effectively controls both voltage and frequency with lower energy losses than traditional transformers and frequency converters. Furthermore, the Matrix Converter contributes to improving the stability of the electrical grid and mitigating the impact of wind energy fluctuations. This study proposes a novel approach for the development of renewable energy systems, which can be applied in the future to enhance the efficiency and sustainability of wind power generation.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สิริชัย ธรรมรักษวัฒน์ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีคุณค่าและการสนับสนุนตลอดกระบวนการวิจัย ทั้งในด้านวิชาการ การวิเคราะห์ข้อมูล และการออกแบบงานวิจัยที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วง ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ที่ช่วยสนับสนุนในด้านวิชาการ และให้คำปรึกษาในช่วงเวลาที่ข้าพเจ้ามีข้อสงสัยหรืออุปสรรคต่างๆ และบุคลากรภายในภาควิชา ที่ร่วมให้การช่วยเหลือในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การเตรียมข้อมูลจนถึงการประมวลผล รวมทั้งการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ ซึ่งช่วยให้ข้าพเจ้าสามารถพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ร่วมมือกันในการบวนการวิจัยและช่วยเหลือในด้านต่างๆ โดยเฉพาะการทดลอง การเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ผล และทุกสิ่งทีข้าพเจ้ากล่าวมาซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถฝ่าฟันอุปสรรคและทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จได้ ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จของการวิจัยครั้งนี้จากใจจริง

โชติวัฒน์ จันธรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.5.1 ศึกษาและทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.5.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจำลองระบบ.....	4
1.5.3 ออกแบบระบบฮาร์ดแวร์.....	4
1.5.4 พัฒนาระบบควบคุมและเขียนโปรแกรม.....	4
1.5.5 ประกอบและทดสอบระบบต้นแบบ.....	5
1.5.6 ทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลลัพธ์.....	5
1.5.7 สรุปผลและเสนอแนะแนวทางการปรับปรุง.....	5
1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 ความหมายและหลักการทำงานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	6
2.2 โครงสร้างพื้นฐานและการควบคุมของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	6
2.3 สมการพื้นฐานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	6
2.4 ทฤษฎีการควบคุมแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	7
2.4.1 การควบคุมพลังงานในแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	7
2.4.2 การคำนวณพลังงาน.....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การแปลงระบบไฟฟ้า .....	8
2.5.1 AC to DC วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	8
2.5.2 DC to AC วงจรอินเวอร์เตอร์ .....	8
2.5.3 DC to DC วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	8
2.5.4 AC to AC วงจรควบคุมแรงดัน.....	8
2.6 MATLAB and Simulink.....	10
2.7 ระบบอินพุต .....	11
2.7.1 กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า .....	11
2.7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร.....	13
2.8 ระบบสวิตซ์ซิ่ง .....	15
2.8.1 การแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	15
2.9 ระบบ 4 Step – Current Commutation .....	17
2.10 ระบบเอาต์พุต.....	29
2.10.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	29
2.10.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	30
2.11 ชุดควบคุม.....	30
2.11.1 ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ออกแบบ .....	31
2.11.2 ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบ .....	34
2.11.3 Basys3 FPGA Board.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	38
3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบ .....	38
3.1.1 แบบจำลองระบบอินพุต.....	39
3.1.2 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่ง.....	41
3.1.3 ระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่ง.....	42
3.1.4 ระบบ Converter controller.....	43
3.1.5 ระบบ Commutation.....	45
3.1.6 ระบบเอาต์พุต .....	49
3.1.7 ทดสอบระบบเอาต์พุตกับความเร็วลม .....	49
บทที่ 4 การทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ.....	52
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
4.2 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ.....	54
4.3 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า.....	56
4.5 การวิเคราะห์พลังงานและประสิทธิภาพ .....	56
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	56
4.7 การอภิปรายผล .....	57
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ.....	58
5.1 บทสรุป .....	58
5.2 ปัญหาที่พบ .....	58
5.3 แนวทางการแก้ปัญหา .....	58
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบอินพุต ระบบสวิตซ์ซิง และระบบเอาต์พุต.....	52
ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back PWM Converter.....	9
รูปที่ 2.2 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบการแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	10
รูปที่ 2.3 ระบบกักเก็บพลังงานผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ....	11
รูปที่ 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดกักเก็บพลังงานขนาดกำลัง 300 วัตต์ .....	12
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ของชุดกักเก็บพลังงานกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้าง Switching IGBT .....	15
รูปที่ 2.7 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	16
รูปที่ 2.8 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	16
รูปที่ 2.9 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสหนึ่งทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบ Back-to-Back PWM converter .....	16
รูปที่ 2.10 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V).....	18
รูปที่ 2.11 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V).....	19
รูปที่ 2.12 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....	20
รูปที่ 2.13 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....	21
รูปที่ 2.14 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC) .....	22
รูปที่ 2.15 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC). 23	
รูปที่ 2.16 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V).....	25
รูปที่ 2.17 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V).....	26
รูปที่ 2.18 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C).....	28
รูปที่ 2.19 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C).....	29
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างไอซี FPGA ของบริษัท Xilinx และบริษัท Intel.....	30
รูปที่ 2.21 โครงสร้างภายใน FPGA ทั่วไป .....	31
รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนการออกแบบโดยใช้ FPGA .....	33
รูปที่ 2.23 Basys3 FPGA Board.....	35
รูปที่ 2.24 อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตบนบอร์ด Basys3 .....	37
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบกักเก็บพลังงานผลิตรกระแสไฟฟ้า .....	38
รูปที่ 3.2 ระบบกักเก็บพลังงานผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์..	39
รูปที่ 3.3 กักเก็บพลังงานจำลอง .....	39
รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบอินพุตของชุดกักเก็บพลังงานขนาดกำลัง 300 วัตต์.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis.....	40
รูปที่ 3.6 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis.....	40
รูปที่ 3.7 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	41
รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบกำลังสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	41
รูปที่ 3.9 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	42
รูปที่ 3.10 แบบจำลองย่อยระบบสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	42
รูปที่ 3.11 แบบจำลองระบบควบคุมสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.. .....	43
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสวิตซ์ซิงด้วยสัญญาณ PWM .....	43
รูปที่ 3.13 แบบจำลองชุดวงจร Pulse composition.....	44
รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation.....	45
รูปที่ 3.15 แบบจำลองชุดวงจร Commutation .....	46
รูปที่ 3.16 แบบจำลองย่อยชุด Commutation judgment ในวงจร Commutation.....	46
รูปที่ 3.17 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation.....	47
รูปที่ 3.18 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation.....	47
รูปที่ 3.19 วงจรการไหลของแรงดันไฟฟ้า.....	48
รูปที่ 3.20 แบบจำลองระบบเอาต์พุตโหลด RL ของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	49
รูปที่ 3.21 ค่าแรงดัน Vuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ความเร็วลม ต่ำ.....	50
รูปที่ 3.22 ค่าแรงดัน Vuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ความเร็วลม สูง.....	51
รูปที่ 4.1 กราฟผลการทดลองการแปลงพลังงานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ...	53
รูปที่ 4.2 แรงดันอินพุต (เฟส R, S, T).....	56
รูปที่ 4.3 แรงดันเอาต์พุต (เฟส U, V, W) .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

MC	Matrix Converter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
SVM	Space Vector Modulation
I	Current
V	Voltage
P	Power
T	Transpose of Vector
HDL	Hardware Description Language
FPGA	Field-programmable gate array
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
IP	Internet Protocol
USB	Universal Serial Bus
4C	4 Step Current commutation
4V	4 Step Voltage commutation
3VC	3 Step Voltage and Current commutation
2C	2 Step Current commutation
2V	2 Step Voltage commutation
I/O	Input and output
LED	Light Emitting Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบไฟฟ้ากำลัง การแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่งอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำไปใช้ในระบบควบคุมมอเตอร์ ระบบส่งกำลังไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน รวมถึงระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป การควบคุมแรงดันและความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจึงเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ตามความต้องการ โดยทั่วไปเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการแปลงไฟฟ้าจากแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) เป็น DC ผ่านเรกติไฟเออร์ แล้วจึงแปลงกลับเป็นแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) อีกครั้งด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ที่อยู่ในลิงก์กระแสตรง (DC-link capacitor) เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่และลดสัญญาณรบกวนในระบบ แม้ระบบดังกล่าวจะสามารถตอบสนองความต้องการของงานได้อย่างดีในระดับหนึ่ง แต่ตัวเก็บประจุดังกล่าวมีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งในเรื่องของขนาดใหญ่ น้ำหนักที่มาก รวมถึงอายุการใช้งานที่จำกัด โดยตัวเก็บประจุมักจะเสื่อมสภาพและมีโอกาสเกิดความเสียหายในระหว่างการใช้งาน ซึ่งส่งผลให้ระบบทั้งระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำลง และต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เพื่อแก้ไขปัญหาคือข้อจำกัดเหล่านี้ แนวคิดของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1980 โดยเป็นเทคโนโลยีการแปลงไฟฟ้าแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนแปลงเป็น DC และไม่มีการใช้ตัวเก็บประจุในลิงก์ DC อีกต่อไป แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ประกอบด้วยชุดสวิตช์แบบสองทิศทางที่เชื่อมต่ออินพุตและเอาต์พุตเข้าด้วยกันโดยตรง ทำให้สามารถควบคุมการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ข้อดีหลักของเทคโนโลยีนี้คือ ระบบมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และมีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากลดการใช้ส่วนประกอบพาสซีฟที่มีอายุการใช้งานจำกัด นอกจากนี้ แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ยังมีความสามารถในการควบคุมแรงดันและความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตได้อย่างละเอียด และรองรับการไหลของพลังงานในสองทิศทาง (bidirectional power flow) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในระบบที่ต้องการการพิชิตแบคพลังงาน เช่น ระบบบริเจนเนอเรทีฟเบรกกิ้งในมอเตอร์ไฟฟ้า หรือระบบพลังงานหมุนเวียนที่ต้องการการป้อนพลังงานกลับเข้าสู่ระบบ

แม้ว่าจะมีข้อดีหลายประการ แต่แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ยังคงมีข้อจำกัดและความท้าทายหลายประการที่ต้องได้รับการแก้ไขและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในความท้าทายหลักคือความซับซ้อนในการออกแบบและควบคุมวงจรสวิตช์ที่มีจำนวนมาก และต้องทำงานร่วมกันอย่างแม่นยำ เพื่อป้องกันการลัดวงจรหรือการทำงานผิดพลาดที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ อีกทั้งการ

จัดการกับคลื่นฮาร์มอนิกและการบิดเบือนของรูปคลื่น (waveform distortion) เป็นอีกประเด็นที่

ไม่ควรมองข้ามอีกทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญ เนื่องจากคลื่นฮาร์มอนิกสามารถทำให้เกิดความร้อนสูงในอุปกรณ์ และลดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ เทคนิคการควบคุมและการมอดูเลชันขั้นสูง เช่น Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) จึงได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความเพี้ยนของสัญญาณ แต่ก็ยังต้องอาศัยความชำนาญและการออกแบบที่ละเอียดอ่อนในการประยุกต์ใช้งาน ในช่วงแรกที่แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ถูกนำเสนอ เทคโนโลยีนี้ยังไม่แพร่หลายเนื่องจากข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีสวิตช์และความสามารถในการประมวลผลสัญญาณควบคุมที่ยังไม่เพียงพอ อุปกรณ์สวิตช์ที่มีอยู่ในเวลานั้นไม่สามารถตอบสนองความต้องการด้านความเร็วและความทนทานได้ดีนัก ทำให้แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ยังคงเป็นแค่แนวคิดและโครงการวิจัยในระดับห้องทดลอง อย่างไรก็ตาม ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอุปกรณ์สวิตช์ เช่น IGBTs และ MOSFETs ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ความเร็วในการสวิตช์ดีขึ้น และเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถประมวลผลได้รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น ทำให้แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) มีโอกาสในการประยุกต์ใช้งานจริงมากขึ้นตามไปด้วย

ปัจจุบัน แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการวิจัยและอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในงานระบบพลังงานหมุนเวียน ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และระบบควบคุมมอเตอร์ความแม่นยำสูง เนื่องจากคุณสมบัติในการลดขนาดระบบ เพิ่มความน่าเชื่อถือ และการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ความสามารถในการรองรับการไหลของพลังงานแบบสองทิศทางยังช่วยให้สามารถนำพลังงานกลับเข้าสู่ระบบได้ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของระบบพลังงานที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง จำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาระบบต้นแบบ รวมถึงอัลกอริทึมการควบคุมที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการบิดเบือน และเพิ่มความทนทานต่อสภาวะการทำงานที่หลากหลาย งานวิจัยในด้านนี้จึงมีความสำคัญมาก ทั้งในแง่ของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี การออกแบบวงจร การพัฒนาวิธีการควบคุม และการทดลองจริง เพื่อสร้างความมั่นใจในประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม การวิจัยและพัฒนาแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ในปัจจุบันยังครอบคลุมถึงการลดความซับซ้อนของวงจร การปรับปรุงประสิทธิภาพของสวิตช์ และการใช้เทคนิคการมอดูเลชันรูปแบบใหม่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการของแต่ละงาน

โดยรวมแล้ว แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) ถือเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาและปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังในยุคปัจจุบันและอนาคต ซึ่งสามารถช่วยให้ระบบมีขนาดเล็กลง น้ำหนักเบา และมีความทนทานในการทำงานที่สูงขึ้น รวมถึงความน่าเชื่อถือที่มากขึ้นกว่าเทคโนโลยีเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งในหลักการท างาน ข้อจำกัด และวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้งานแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (MC) จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับนักวิจัยและวิศวกรที่ต้องการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้ตอบโจทย์ความต้องการของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ได้อย่าง

แท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแนวทางการประยุกต์ใช้เครื่องแปลงแมทริกซ์ในระบบการผลิตพลังงานจากลม เพื่อการควบคุมแรงดันและความถี่ในกรณีที่เกิดความผันผวนจากพลังงานลม การวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องแปลงแมทริกซ์ในการควบคุมพลังงานจากลมและการเชื่อมต่อกับระบบกริดไฟฟ้า โดยการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้การศึกษานี้ยังมุ่งเปรียบเทียบการใช้งานเครื่องแปลงแมทริกซ์กับเทคโนโลยีแปลงพลังงานแบบดั้งเดิม เช่น การใช้หม้อแปลง (Transformer) และอุปกรณ์แปลงความถี่ (Frequency Converter) เพื่อประเมินข้อดีข้อเสีย และประสิทธิภาพในการใช้งานในระบบพลังงานทดแทน โดยผลการศึกษาคือช่วยให้เห็นถึงประโยชน์และศักยภาพในการนำเครื่องแปลงแมทริกซ์มาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน ระบบการแปลงพลังงานรูปแบบนี้ใช้การควบคุมสังเคราะห์ความถี่สูง โดยเน้นการใช้สวิตช์แบบสองทิศทาง มีสวิตช์สองทิศทางกึ่งซัดที่ประกอบเป็นวงจรหลักของระบบการแปลงพลังงานระบบของตัวแปลงแมทริกซ์ อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไม่มีโมดูล IGBT ที่เป็นแบบสองทิศทาง จึงใช้อุปกรณ์แยกต่างหากสำหรับการเชื่อมต่อแบบขนานซึ่งประกอบด้วย IGBT และไดโอดเพื่อป้องกันกระแสย้อนกลับ

ระบบแปลงพลังงาน แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นระบบแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ คือกระแสสลับที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้อย่างอิสระ สิ่งนี้จะเข้ามาแทนที่การทำงานของระบบตัวแปลงแบบ back-to-back ขนาดใหญ่และมีราคาแพง นอกจากนี้ระบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ไม่ต้องการวงจรเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรง ส่งผลให้วงจรมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ใช้โพลต์ที่สูงกว่า และไม่มีปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในวงจรดีซีลิงค์

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาวิจัยนี้คือ ระบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้รับการออกแบบและควบคุมด้วยเทคนิคที่เหมาะสม จะสามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าสลับจากแหล่งจ่ายอินพุตไปยังเอาต์พุตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยควบคุมความถี่และแอมพลิจูดของแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ มีความเพี้ยนของสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ และสามารถทำงานได้อย่างเสถียรภายใต้สภาวะโพลต์ที่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ ผลการทดลองจริงจากต้นแบบจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการจำลองในซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงวิชาการ เนื่องจากเครื่องแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเทคโนโลยีที่ยังคงได้รับความสนใจในวงการวิศวกรรมไฟฟ้าและยังมีการศึกษาและการวิจัยที่จำกัด การนำเสนอผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เครื่องแปลงแมทริกซ์ในระบบพลังงานจากลม จะช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทำงานและข้อดีในแง่ของการควบคุมพลังงานที่มีความผันผวน

นอกจากนี้ ผลการศึกษานี้จะช่วยขยายขอบเขตของเทคโนโลยีไปยังการใช้งานในสาขาพลังงานทดแทนประเภทอื่น ๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานชีวมวล ซึ่งสามารถช่วยเสริมความยั่งยืนของระบบพลังงานโดยรวม และมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาระบบพลังงานที่มีประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงาน

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

### 1.5.1 ศึกษาและทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ วิธีการมอดูเลชัน เช่น Venturini, Scalar PWM และ Space Vector PWM รวมถึงเทคนิคการสวิตช์แบบปลอดภัย (Safe Commutation Techniques) นอกจากนี้ยังศึกษาการประยุกต์ใช้งานในระบบต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบในงานวิจัยนี้

### 1.5.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจำลองระบบ

ทำการสร้างแบบจำลองของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink หรือ PSIM โดยจำลองทั้งส่วนของวงจรพาวเวอร์ อุปกรณ์สวิตช์ ตัวกรองโพลต์ และแหล่งจ่าย จากนั้นทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบในเชิง steady-state และ transient เพื่อศึกษาความถูกต้องของการทำงาน และปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสม

### 1.5.3 ออกแบบระบบฮาร์ดแวร์

ดำเนินการออกแบบวงจรจริงของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์สวิตช์ การจัดวางวงจรขับเคลื่อน วงจรฟิลเตอร์ และการป้องกันแรงดันเกิน-กระแสเกิน รวมถึงการออกแบบระบบจ่ายไฟและระบบวัดแรงดัน-กระแสสำหรับการตรวจสอบค่าต่าง ๆ ที่สำคัญ

### 1.5.4 พัฒนาระบบควบคุมและเขียนโปรแกรม

พัฒนาอัลกอริทึมควบคุมการมอดูเลชันของสวิตช์บนแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือ DSP พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมควบคุมให้สามารถทำงานได้แบบเรียลไทม์ และตรวจสอบสถานะผิดปกติ (Fault Handling) เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5.5 ประกอบและทดสอบระบบต้นแบบ

เมื่อฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์พร้อมแล้ว จะทำการประกอบเป็นระบบต้นแบบ และทำการทดสอบเบื้องต้นในสภาวะต่าง ๆ เช่น no-load และโหลดบางส่วน เพื่อตรวจสอบรูปลักษณ์แรงดัน – กระแส และตรวจสอบการสวิตช์ของอุปกรณ์ว่าทำงานถูกต้องหรือไม่

### 1.5.6 ทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลลัพธ์

ดำเนินการทดสอบระบบอย่างละเอียดภายใต้โหลดจริง โดยวัดค่าทางไฟฟ้าสำคัญ เช่น ค่า THD, Efficiency, Power Factor และการตอบสนองต่อโหลดเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้อง พร้อมทั้งวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

### 1.5.7 สรุปผลและเสนอแนะแนวทางการปรับปรุง

หลังจากได้ผลการทดสอบจริง จะทำการสรุปข้อค้นพบ จุดเด่น จุดด้อย และข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาแม่ทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยหรือการประยุกต์ใช้งานในอนาคต

## 1.6 ข้อจำกัดของการศึกษา

แม้ว่างานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาการทำงานของแม่ทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในเชิงทฤษฎีและการทดลองจริง แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ส่งผลกระทบต่อขอบเขตของผลการศึกษา ได้แก่ ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์และฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจำกัดกำลังไฟฟ้าที่สามารถทดสอบได้จริง ข้อจำกัดของวงจรกรองที่อาจไม่สามารถลดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ตลอดจนข้อจำกัดด้านซอฟต์แวร์และระบบควบคุมที่มีขีดความสามารถจำกัด ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคควบคุมขั้นสูงได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ สภาวะแวดล้อมในการทดลอง เช่น โหลดที่ใช้และแหล่งจ่ายไฟ ยังเป็นแบบจำลองที่อาจแตกต่างจากการใช้งานจริง ทำให้ผลลัพธ์อาจยังไม่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพที่แท้จริงของระบบได้ทั้งหมด รวมถึงข้อจำกัดด้านระยะเวลาและทรัพยากรวิจัยที่มีอยู่ ส่งผลให้การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นเฉพาะรูปแบบพื้นฐานของแม่ทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ความหมายและหลักการทำงานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้าที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จากหลายเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกรูปแบบหนึ่งโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านการแปลงเป็นกระแสตรง (DC) ก่อน ซึ่งช่วยลดขั้นตอนและความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าโครงสร้างพื้นฐานและการควบคุมของ Matrix Converter

#### 2.2 โครงสร้างพื้นฐานและการควบคุมของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

โครงสร้างของ แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ประกอบไปด้วย Matrix Switching Network ซึ่งจะเชื่อมโยงสัญญาณของเฟสขาเข้า (input) ไปยังเฟสขาออก (output) ในการออกแบบ Matrix Converter ให้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้อย่างแม่นยำ จะใช้เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์

#### 2.3 สมการพื้นฐานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

สมการพื้นฐานของ แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ใช้ในการแปลงพลังงานจากระบบกระแสไฟฟ้าขาเข้า (input) ไปยังระบบขาออก (output) สมการนี้สามารถเขียนได้ในรูปของเวกเตอร์แรงดัน (Voltage Vector) หรือกระแส (Current Vector) โดยมีรูปแบบดังสมการนี้ใช้ในการคำนวณการแปลงพลังงานระหว่างระบบ AC ที่มีหลายเฟส ซึ่งจะมีแมทริกซ์ที่เชื่อมโยงระหว่างแต่ละเฟสของพลังงานขาเข้าและขาออก ดังสมการที่ 2.1

$$\begin{bmatrix} V_{out1} \\ V_{out2} \\ V_{out3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in1} \\ V_{in2} \\ V_{in3} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_{in}$ , คือแรงดันที่ได้รับจากเฟสที่ 1, 2, และ 3 ของระบบ AC ขาเข้า  
 $V_{out}$  คือแรงดันที่ส่งออกจากเฟสที่ 1, 2, และ 3 ของระบบ AC ขาออก  
 $M$  คือการเปลี่ยนแปลงแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Matrix Converter) ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณระหว่างอินพุตและเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ทฤษฎีการควบคุมแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ใช้เทคนิคการควบคุมที่แม่นยำและมีความซับซ้อนเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ และมีความปลอดภัยสูงเพื่อป้องกันการเกิด Short Circuit โดยใช้ Pulse Width Modulation (PWM) ในการควบคุมช่วงเวลาที่สวิตช์เปิด-ปิดเพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าแบบสลับและตรงตามที่ต้องการ พร้อมทั้งใช้ Space Vector Modulation (SVM) ที่ช่วยควบคุมแรงดันและความถี่พร้อมกัน ลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากระบบ AC หนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง ผ่านการคำนวณในรูปแบบแมทริกซ์ตามสมการที่กำหนดไว้ดังสมการ 2.2

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos(\theta_b) & \cos(\theta_c) \\ \sin(\theta_a) & \sin(\theta_b) & \sin(\theta_c) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $V_a, V_b, V_c$  คือแรงดันในแต่ละเฟส  
 $I_a, I_b, I_c$  คือกระแสในแต่ละเฟส  
 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$  คือมุมเฟสของแรงดันในแต่ละเฟส

### 2.4.1 การควบคุมพลังงานในแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

ในการทำงานของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์การควบคุมการเปิดและปิดสวิตช์จะทำให้เกิดการแปลงพลังงานจากแหล่งจ่ายพลังงาน (input) ไปยังระบบโหลด (output) ได้ตามต้องการ ซึ่งการควบคุมนี้จะเกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคการควบคุมที่ทำให้ได้ค่าของแมทริกซ์ที่ต้องการ

### 2.4.2 การคำนวณพลังงาน

หากเราต้องการคำนวณพลังงานที่แปลงผ่าน แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ สามารถใช้พลังงานที่เชื่อมโยงระหว่างกระแสและแรงดันในแต่ละเฟสดังนี้

$$P = V^T \cdot I \quad (2.3)$$

เมื่อ  $P$  คือพลังงานที่แปลง (Power)  
 $V$  คือเวกเตอร์แรงดัน (Voltage vector)  
 $I$  คือเวกเตอร์กระแส (Current vector)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T$  คือการทรานสโพส (transpose) ของเวกเตอร์

## 2.5 การแปลงระบบไฟฟ้า

ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าสามารถจำแนกตามชนิดของอินพุตและเอาต์พุตของพลังงานไฟฟ้า ได้แก่

### 2.5.1 AC to DC วงจรคอนเวอร์เตอร์

วงจรเรียงกระแส (Rectifier) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ไดโอดหนึ่งตัวในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นหรือใช้ไดโอดหลายตัวในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นทิศทางเดียว

### 2.5.2 DC to AC วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์เพื่อสร้างรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกมาสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของไฟฟ้าได้

### 2.5.3 DC to DC วงจรคอนเวอร์เตอร์

เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกค่าหนึ่งที่ต้องการ โดยจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างสวิตช์เปิดและปิดในรูปต่าง ๆ เพื่อควบคุมการไหลของไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้ามาสร้างรูปคลื่นแรงดันและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการ

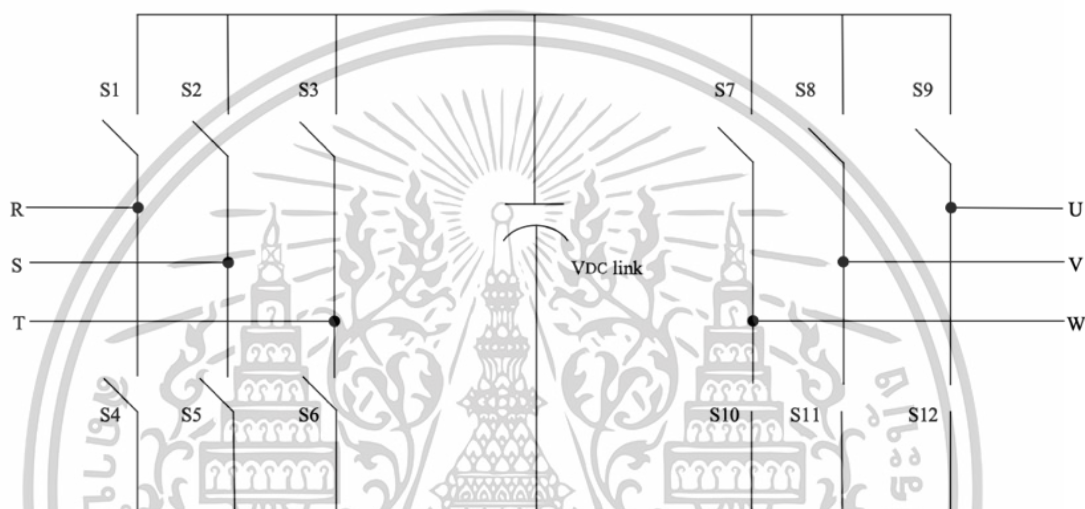
### 2.5.4 AC to AC วงจรควบคุมแรงดัน

ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับใช้สำหรับการแปลงรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอีกค่าหนึ่งที่ต้องการโดยในทางปฏิบัติระบบแปลงพลังงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ได้กล่าวไปข้างต้นอาจจะทำงานแปลงพลังงานไฟฟ้าร่วมกันได้ ตัวอย่างของระบบอินพุตกึ่งอัตโนมัติที่ใช้การแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมและแปลงแรงดันความถี่ของไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานหรือควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามความต้องการ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.4.1 Back-to-Back PWM Converter

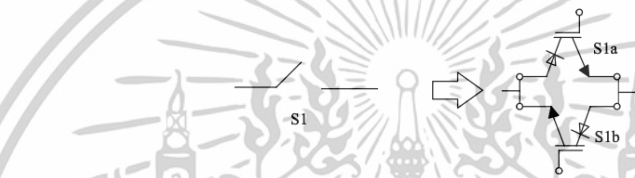
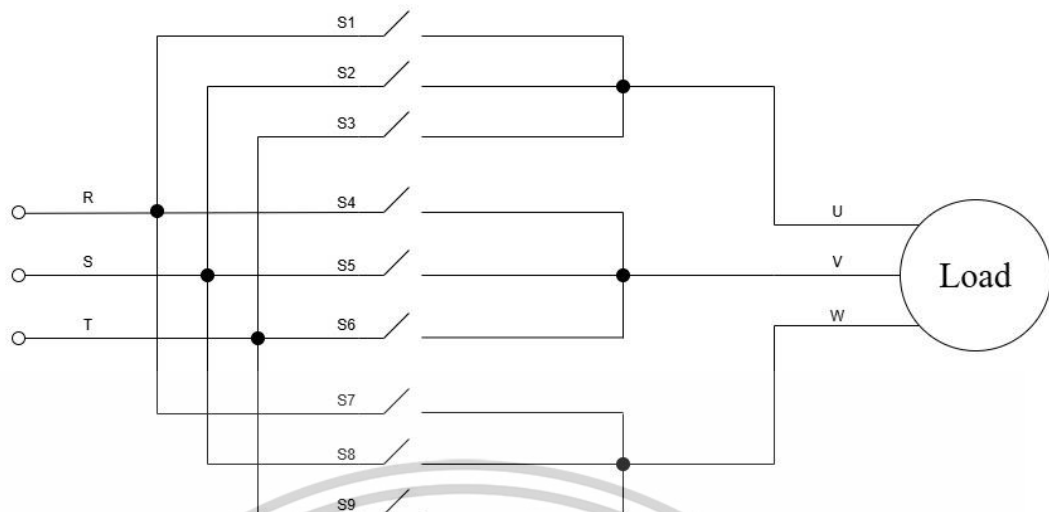
ระบบแปลงพลังงานแบบ AC to AC โดยใช้โครงสร้าง Back-to-back PWM Converter เป็นวิธีการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่ง โดยผ่านกระบวนการแปลงสองขั้นตอน คือ จาก AC เป็น DC และจาก DC กลับเป็น AC อีกรูปแบบหนึ่ง โดยมีตัวเก็บประจุหรือ DC link อยู่ตรงกลางเพื่อช่วยรักษาแรงดันให้คงที่ ทั้งสองส่วนของระบบจะควบคุมการทำงานด้วยเทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมแรงดัน ความถี่ และทิศทางของพลังงาน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรสวิตซ์ซึ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back PWM Converter

### 2.5.4.2 แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

ระบบการแปลงพลังงานแบบ แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงโดยไม่ต้องใช้วงจรเชื่อมโยงทาง DC ใดๆ ดังแสดงในรูป 2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดการสูญเสียภายในวงจรเชื่อมโยงทาง DC โดยแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยสวิตซ์สองทิศทางที่ไม่มีอุปกรณ์สวิตซ์สองทิศทางโมดูลเดียวในปัจจุบัน แต่เพื่อตอบสนองความต้องการ ซึ่งใช้ IGBT กำหนดค่าในลักษณะของการใช้งานอุปกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อสร้างหน่วยสวิตซ์สองทิศทางที่สามารถนำกระแสในทั้งสองทิศทางและปิดกั้นแรงดันไฟฟ้าทั้งสองขั้วได้



รูปที่ 2.2 วงจรสวิตช์ซึ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

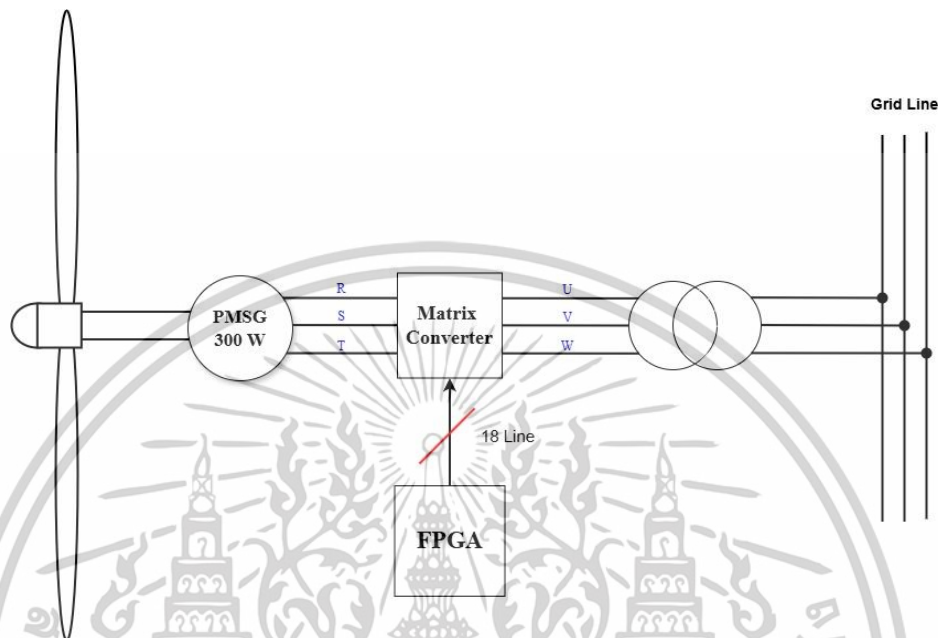
## 2.6 MATLAB and Simulink

MATLAB and Simulink เป็นซอฟต์แวร์ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมที่ใช้ในการคำนวณและเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีความสามารถครอบคลุมตั้งแต่การคำนวณทางคณิตศาสตร์และทางสถิติอย่างหลากหลาย เพื่อใช้ในการทำงานกับข้อมูลเชิงตัวเลขและการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ เช่น การแก้สมการเชิงคณิตศาสตร์ การประมาณค่าทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์ข้อมูล การพล็อตกราฟ การจำลองระบบ และการทดสอบผลิตภัณฑ์อย่างหลากหลายในงานวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม นอกจากนี้ MATLAB ยังมีความสามารถในการเขียนสคริปต์เพื่อแก้ปัญหาที่เฉพาะเจาะจงและมีการสนับสนุนภาษาโปรแกรม MATLAB (MATLAB programming language) เพื่อควบคุมการทำงานของซอฟต์แวร์ มีการสร้างเครื่องมือและแพ็คเกจ (Toolboxes) พิเศษที่ช่วยในงานเฉพาะตามสาขาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น MATLAB Image Processing Toolbox สำหรับการประมวลผลภาพ, MATLAB Signal Processing Toolbox สำหรับประมวลผลสัญญาณ, และ MATLAB Simulink สำหรับจำลองระบบ

ซอฟต์แวร์ MATLAB ถูกพัฒนาโดยบริษัท MathWorks และมีการให้บริการในรูปแบบที่ใช้งานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์ มีประโยชน์มากในหลายด้าน จึงได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการนำเสนอทฤษฎีและหลักการจำลองการทำงานของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink



รูปที่ 2.3 ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

## 2.7 ระบบอินพุต

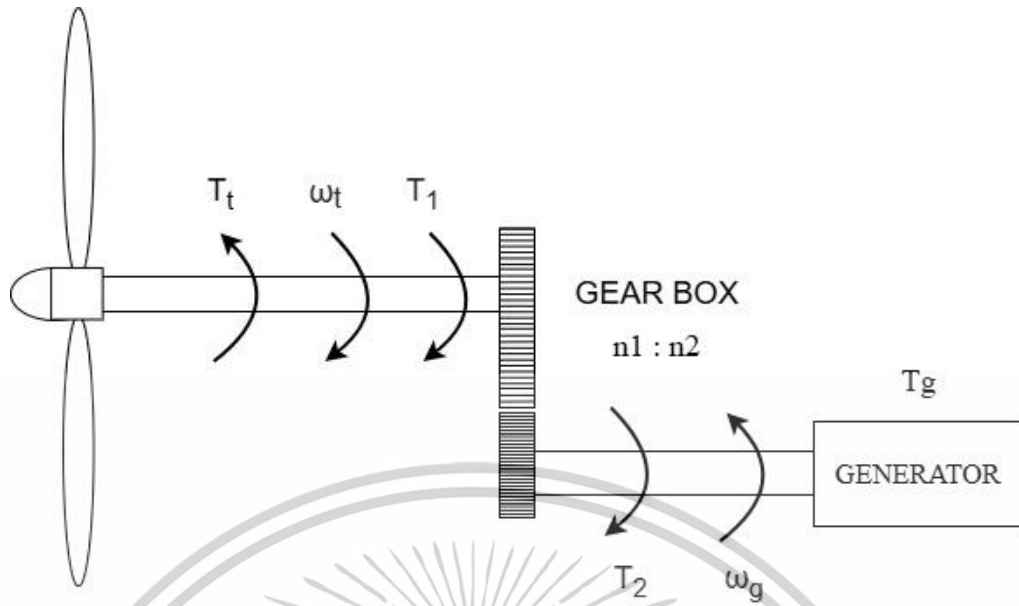
ระบบอินพุตกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วน ได้แก่ กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

### 2.7.1 กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

กังหันลมผลิตไฟฟ้า หมายถึง ระบบที่ใช้เครื่องกังหันลม (Wind Turbine) เพื่อแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ลมเป็นแหล่งพลังงาน ใบกังหันลมของเครื่องกังหันลมจะหมุนเมื่อลมพัดผ่านและทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

#### 2.7.1.1 ชุดจำลองกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ชุดกังหันลมนั้นขนาดกำลัง 300 วัตต์ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดกึ่งหั่นลมขนาดกำลัง 300 วัตต์

จากความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปที่ 2.4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.4

$$\omega_g = [T_g - Q(n_2/n_1) - \{B_g + B_t(n_2/n_1)^2\}\omega_g] \frac{1}{[J_g + J_t(n_2/n_1)^2]s} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\omega_g$  คือ ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\omega_t$  คือ ความเร็วเชิงมุมของชุดกึ่งหั่นลม

$T_g$  คือ แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$Q$  คือ แรงบิดของชุดกึ่งหั่นลม

$n_2/n_1$  คือ อัตราทดระหว่างชุดกึ่งหั่นลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$B_g$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$B_t$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชุดกึ่งหั่นลม

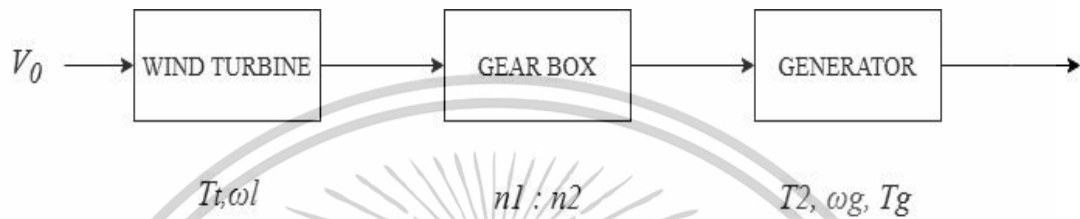
$J_g$  คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$J_t$  คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของชุดกึ่งหั่นลม

จากสมการ 2.4 เมื่อมีแรงลมมากกระทบกับตัวใบกังหันลมจะทำให้แกนเพลลาที่ต่อกับใบกังหันลมเกิดการหมุน ทำให้เกิดความเร็วเชิงมุมของชุดกึ่งหั่นลม ( $\omega_t$ ) ซึ่งจะแปรผันตามค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของชุดกึ่งหั่นลม ( $J_t$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชุดกึ่งหั่นลม ( $B_t$ ) โดยในขณะที่เกิดการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมจะทำให้เกิดแรงบิดของชุดกึ่งหั่นลม ( $Q$ ) ซึ่งจะถูกส่งไปยังชุดอัตราทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างชุดกังหันลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $n_2/n_1$ ) โดยในวิทยานิพนธ์นี้ชุดกังหันลมจะทำการต่อโดยตรงกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากนั้นความเร็วเชิงมุมของชุดกังหันลม ( $\omega_t$ ) และแรงบิดของชุดกังหันลม ( $Q$ ) จะถูกส่งไปยังเพลาคับของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการหมุน ทำให้เกิดความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $\omega_g$ ) และแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $T_g$ ) โดยจะแปรผันตามค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $J_g$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $B_g$ ) ซึ่งจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ของชุดกังหันลมกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

จากสมการที่ 2.4 และบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.5 นำไปใช้เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink

### 2.7.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator : PMSG) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนประกอบหลักประกอบด้วยดังนี้

1) สเตเตอร์ (Stator) คือ ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รับการเหนี่ยวนำจากเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า มีชุดขดลวดหรือสายตัวนำที่จะถูกเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเพื่อการใช้งาน

2) โรเตอร์ (Rotor) คือ ส่วนที่สามารถหมุนเคลื่อนที่อยู่แกนกลางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อโรเตอร์มีการหมุนจะสร้างสนามแม่เหล็กในขดลวดหรือสายตัวนำของสเตเตอร์ตามหลักความถี่ของการหมุนและจำนวนขั้วแม่เหล็ก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ ที่มีการออกแบบให้สามารถต่อเข้าโดยตรงกับชุดกังหันลมโดยไม่ต้องมีชุดทดกำลัง ซึ่งมักจะเป็นแหล่งเสียงรบกวนในระบบผลิตไฟฟ้าเมื่อมีการหมุนด้วยความเร็วสูง เป็นข้อได้เปรียบของ PMSG ในเรื่องประสิทธิภาพของการลดเสียงรบกวนในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.2.1 ชุดจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่แสดงสถานะและพฤติกรรมระหว่างขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (เฟส a, b และ c) ซึ่งมีความต้านทาน (R) ต่ออนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ (L) ดังสมการที่ 2.5

$$\begin{aligned} U_a &= R i_a + L \frac{d}{dt} i_a + -\omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r) \\ U_b &= R i_b + L \frac{d}{dt} i_b + -\omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ U_c &= R i_c + L \frac{d}{dt} i_c + -\omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $U_{abc}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (เฟส a,b,c)  
 $R$  คือ ค่าความต้านทาน  
 $i_{abc}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส (เฟส a,b,c)  
 $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ  
 $\omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์  
 $\lambda_{pm}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

และเมื่อพิจารณาในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 2 เฟส โดยอาศัยแกนอ้างอิงของโรเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Direct - Quadrature Axis) จะเป็นไปตามสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r \left( L_q i_q + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \right) \quad (2.6)$$

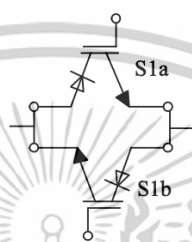
$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r \left( L_d i_d + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $U_{dq}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แกนอ้างอิงของโรเตอร์ (d-q axis)  
 $R_s$  คือ ค่าความต้านทานที่ขดลวดสเตเตอร์  
 $i_{dq}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่แกนอ้างอิงของโรเตอร์ (d-q axis)  
 $L_{dq}$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่แกนอ้างอิงของโรเตอร์ (d-q axis)  
 $\omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์  
 $\lambda_{pm}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 นำไปใช้เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 ระบบสวิตซ์ซิ่ง

ระบบสวิตซ์ซิ่ง เป็นส่วนหนึ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยสวิตซ์ซิ่ง คือ กระบวนการเปลี่ยนสถานะของสวิตซ์หรืออุปกรณ์ควบคุมในระบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ มีส่วนประกอบหลัก คือ สวิตซ์หรืออุปกรณ์ควบคุมการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถเปิดหรือปิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร เป็นระบบที่กำหนดเงื่อนไขของกระแสไฟฟ้าเข้าออกจากเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ให้เป็นตามลักษณะที่ต้องการ



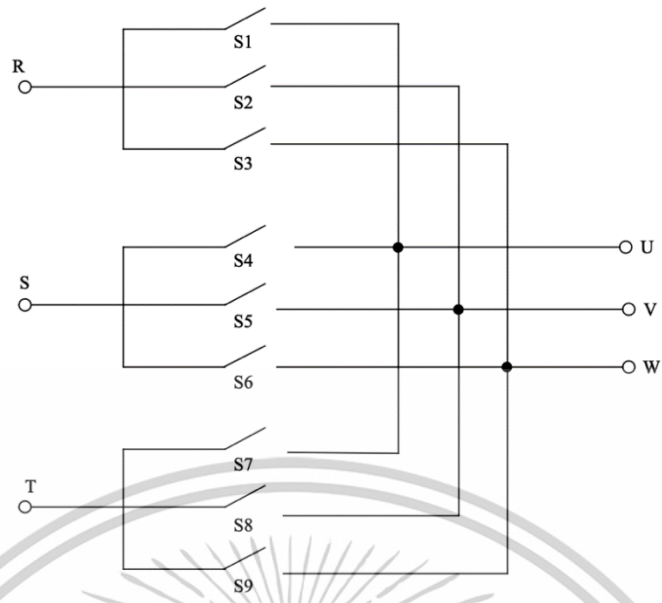
รูปที่ 2.6 โครงสร้าง Switching IGBT

### 2.8.1 การแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

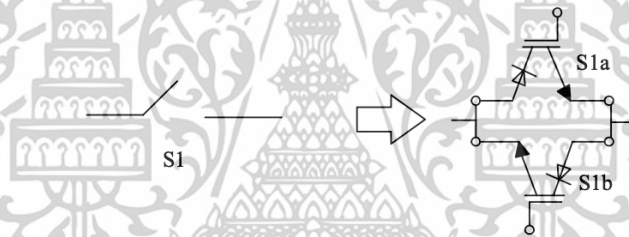
การแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ คือ ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่โดยอิสระ ซึ่งจะเข้ามาแทนที่การทำงานของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter ที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง อีกทั้งระบบแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ไม่จำเป็นต้องมีวงจรเชื่อมโยงทาง DC จึงส่งผลทำให้วงจรมีอายุการใช้งานที่สูงกว่าและไม่มีปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุของวงจรเชื่อมโยงทาง DC

ระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ขึ้นอยู่กับการควบคุมการสังเคราะห์ความถี่สูง โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้สวิตซ์แบบสองทิศทาง (Bi-Direction Switch) จำนวน 9 ตัว ประกอบเป็นวงจรหลักของระบบการแปลงพลังงาน ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสวิตซ์แบบสองทิศทางสามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้สองทิศทางและมีความสามารถในการทำงานสลับไปสลับมาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไม่มีโมดูล IGBT แบบสองทิศทาง จึงใช้อุปกรณ์แบบแยกส่วนทำการต่อแบบกลับหัวต่อชนกัน (Anti parallel) ซึ่งประกอบไปด้วย IGBT และไดโอดป้องกันการย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8 ต่างจากระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter ที่มีสวิตซ์ทั้งหมด 12 ตัว และใช้สวิตซ์แบบทิศทางเดียว จึงสามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้เพียงทิศทางเดียวดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.8 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.9 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสหนึ่งทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบ Back-to-Back PWM converter

จากรูปที่ 2.7 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตเอาต์พุตของวงจรสวิตซ์ซิงได้ตามสมการที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ab}(t) & S_{Ac}(t) \\ S_{Ba}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Bc}(t) \\ S_{Ca}(t) & S_{Cb}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 นำไปใช้เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink และเนื่องด้วยไม่มีโมดูล IGBT แบบสองทิศทาง จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องศึกษาวิธีการควบคุมสวิตช์และวิธีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสัญญาณคลื่นความถี่ไฟฟ้าตามเทคโนโลยีการสังเคราะห์รูปคลื่นความถี่สูงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## 2.9 ระบบ 4 Step – Current Commutation

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้หลักการ 4-Step Current Commutation ใน แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ คือกระบวนการควบคุมการเปลี่ยนกระแสจากเฟสหนึ่งไปยังเฟสอื่นในวงจร เพื่อป้องกันการเกิดการช็อตหรือการเปิดระบบวงจรที่ผิดพลาด โดยการเปลี่ยนกระแสนี้จะทำใน 4 ขั้นตอนหลัก

- 1) Step 1 ปิดสวิตช์ที่ไม่ได้ใช้งานเมื่อเริ่มเปลี่ยนกระแสจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง จะทำการปิดสวิตช์ที่ไม่ใช้งานในขณะนั้นก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการเชื่อมต่อเฟสทั้งสองพร้อมกัน
- 2) Step 2 เปิดสวิตช์ใหม่ สวิตช์ใหม่ที่เชื่อมต่อกับเฟสที่ต้องการให้กระแสไหลไปจะถูกเปิด แต่จะยังไม่ปิดสวิตช์เดิมทันที
- 3) Step 3 กระแสค่อยๆ เปลี่ยนผ่านกระแสจะเริ่มไหลจากเฟสเดิมไปยังเฟสใหม่อย่างค่อยเป็นค่อยไป เพื่อป้องกันการเกิดกระแสลัดวงจร
- 4) Step 4 ปิดสวิตช์เดิม เมื่อกระแสไหลผ่านเฟสใหม่ได้สมบูรณ์แล้ว จะปิดสวิตช์เฟสเดิมที่ไม่ใช้งานแล้ว เพื่อให้กระแสไหลไปในเส้นทางที่ต้องการ

กระบวนการนี้ช่วยให้การเปลี่ยนเส้นทางของกระแสไฟฟ้าเป็นไปอย่างปลอดภัย ลดความเสี่ยงจากการช็อตระหว่างเฟสและไหลดขาดกระแสไฟฟ้า และทำให้ระบบ Matrix Converter ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร

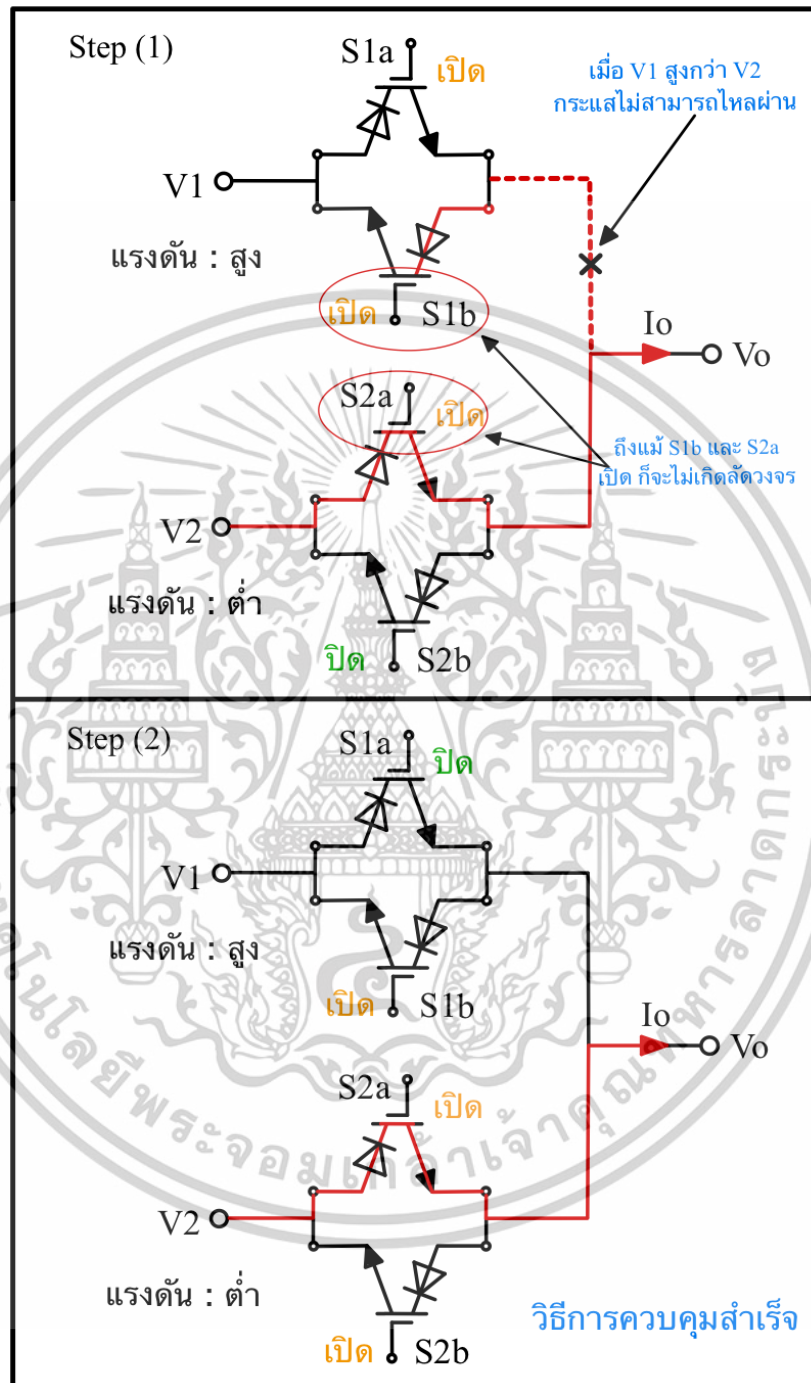
ซึ่งเรานำวิธีการ Commutation แต่ละแบบมาวิเคราะห์ให้เห็นว่าการใช้วิธีการ แต่ละประเภทใช้งานแตกต่างกันอย่างไร มี 5 แบบด้วยกัน ได้แก่

1. Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)
2. Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)
3. Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสและแรงดันแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)
4. Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)
5. Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

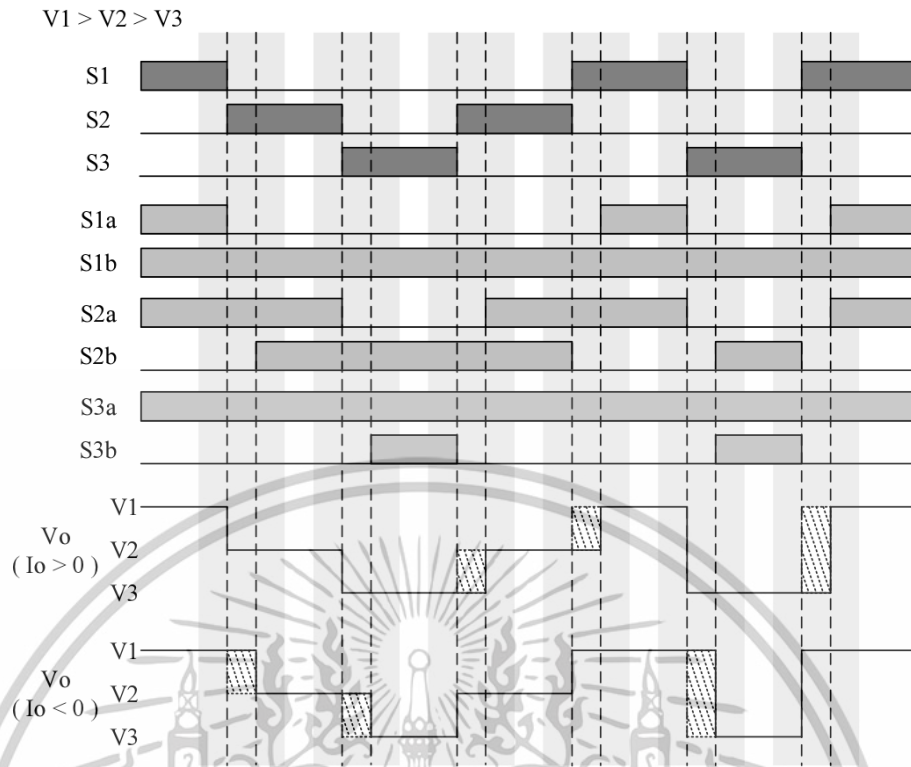
2.9.2.1 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)

การควบคุมจาก V1 to V2 (I>0)



รูปที่ 2.10 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)

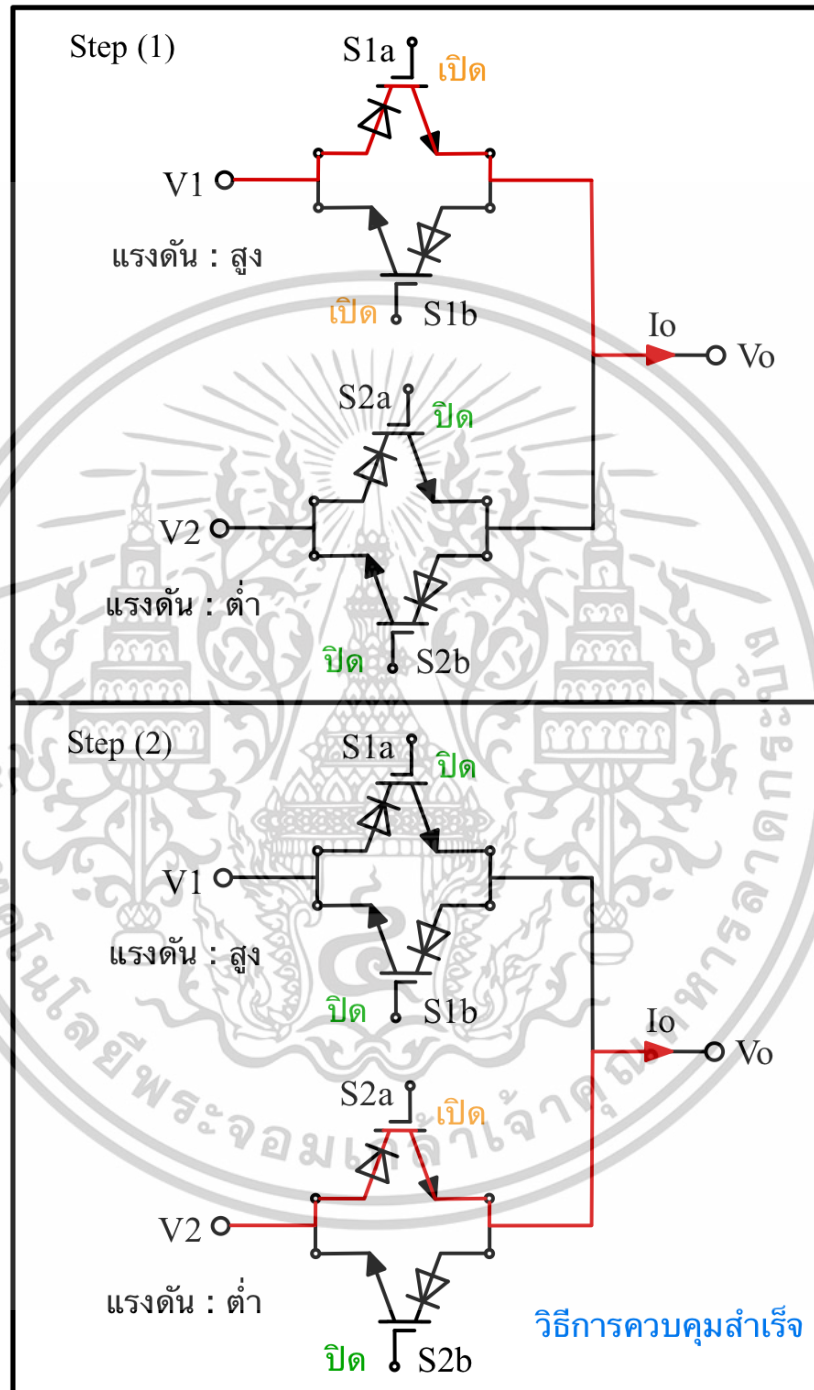
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)

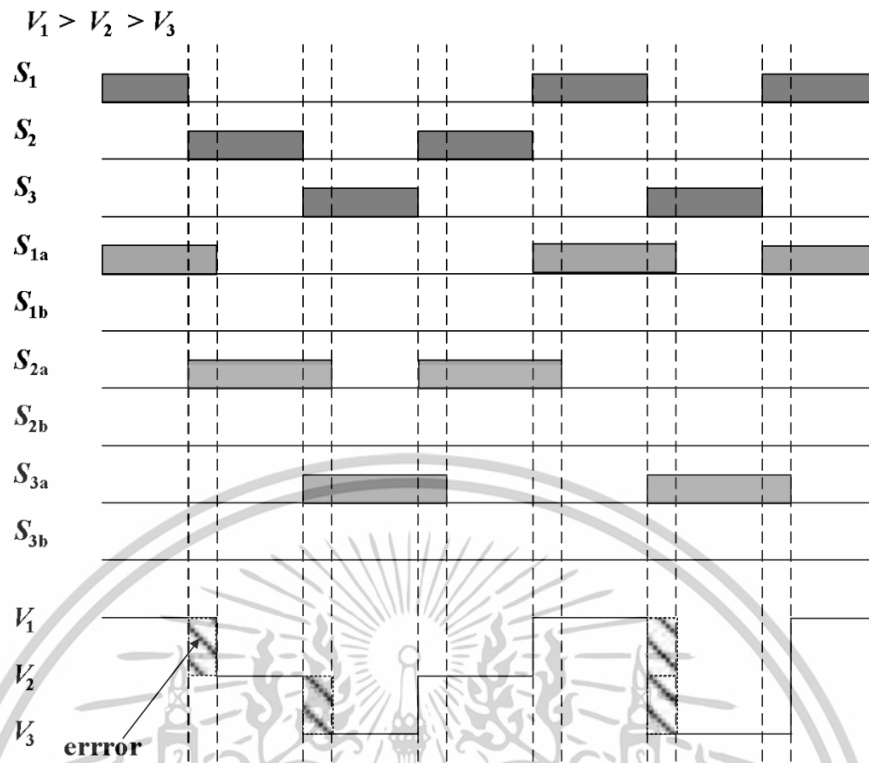
รูปที่ 2.11 แสดงแผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอนโดยที่  $I_o > 0$  ในวิธีแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอน สวิตซ์ที่ไม่เกิดการลัดวงจรของแหล่งพลังงานในวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอนจะเปิดอยู่เสมอ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะลดระยะเวลาเพื่อให้เส้นทางของกระแสมั่นคง สวิตซ์ที่มีสถานะเปิดจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของผลลัพธ์ในการแปลงและแหล่งที่มาของการแปลง ดังนั้นสวิตซ์สถานะเปิดสำหรับเฟสแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและเฟสแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดสามารถอยู่กับที่ได้จนกว่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามสวิตซ์ที่มีสถานะเปิดสำหรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสจะต้องเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของปลายทางของการแปลงหรือแหล่งที่มาของการแปลง ดังนั้นแม้ว่าคำสั่งการสวิตซ์ซึ่งจะไม่ถูกกำหนดให้กับสวิตซ์ของระหว่างเฟสแต่ก็จำเป็นต้องทำการสวิตซ์ซึ่ง

## 2.9.2.2 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

การควบคุมจาก V1 to V2 ( $I > 0$ )

รูปที่ 2.12 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

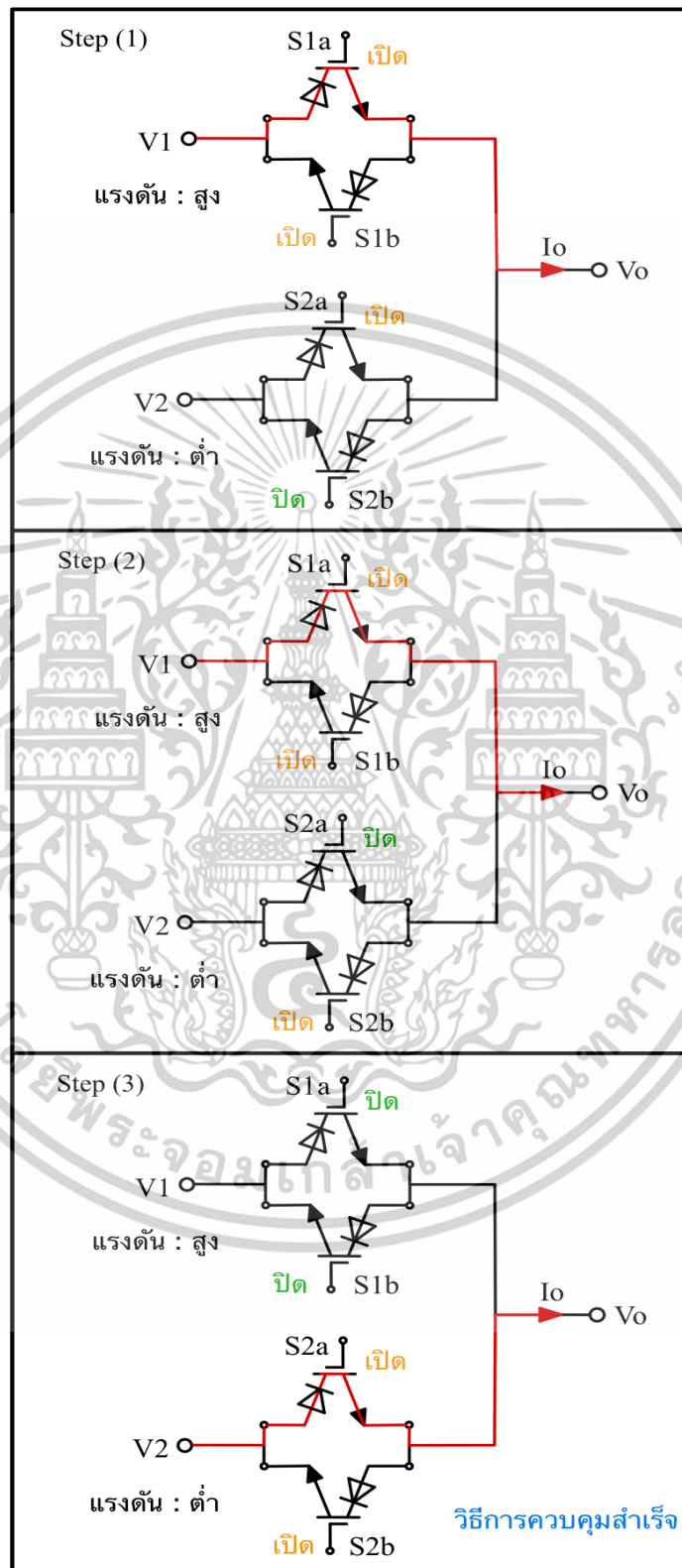


รูปที่ 2.13 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

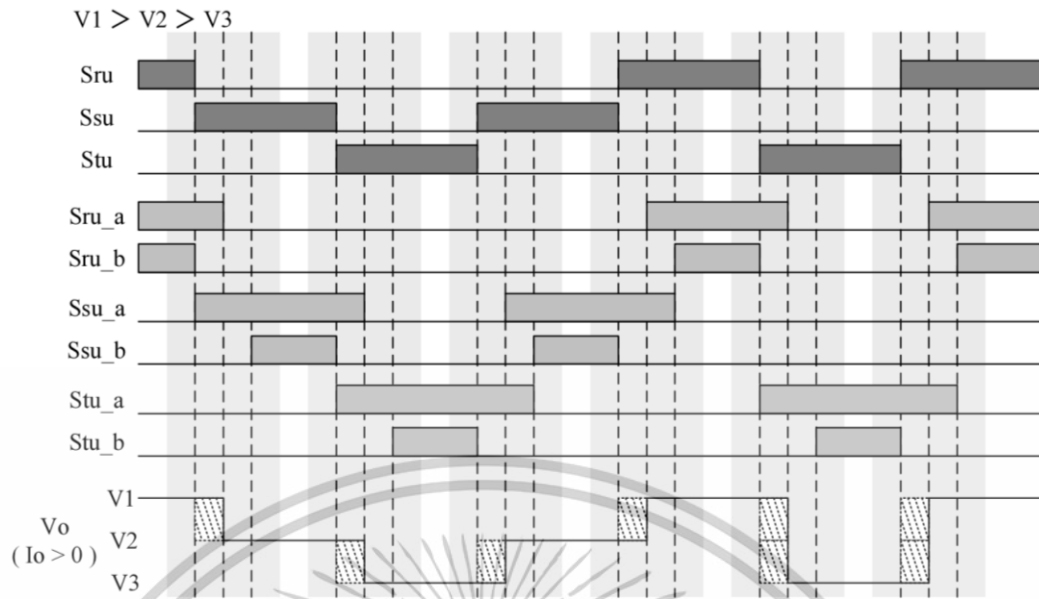
รูปที่ 2.13 แผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงกระแสไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอน (2C) ซึ่งการแปลงแบบ 2 ขั้นตอนจะสามารถกำจัด Dead Time ได้ เนื่องจาก RB-IGBT ในเส้นทางที่ไม่มีกระแสไหลผ่านจะไม่ทำงาน ซึ่งจะเหมือนการแปลงกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) เพื่ออธิบายหลักการทำงานขั้นพื้นฐาน สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าคือ  $V_1 > V_2 > V_3$  และทิศทางของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นบวก  $S_{1a}$ ,  $S_{2a}$  และ  $S_{3a}$  กลายเป็นสวิตช์นำไฟฟ้า เมื่อกระแสเอาต์พุตเป็น  $I_o > 0$  และ  $S_{1b}$ ,  $S_{2b}$  และ  $S_{3b}$  จะคงสถานะ OFF ไว้จนกว่ากระแสไฟเอาต์พุตจะเป็นศูนย์ เพราะมันกลายเป็นสวิตช์ที่ไม่นำไฟฟ้า เอาต์พุตของแรงดันไฟฟ้า  $V_o$  จะมีข้อผิดพลาด เนื่องจากการแปลงเฟสแรงดันสูงไปยังเฟสแรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่นการเปลี่ยนจาก  $S_1$  ถึง  $S_2$  อย่างไรก็ตามข้อผิดพลาดจะไม่เกิดขึ้นสำหรับการเปลี่ยนจากเฟสของแรงดันต่ำไปเฟสของแรงดันสูง

2.9.2.3 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)

การควบคุมจาก V1 to V2 ( $I > 0$ )



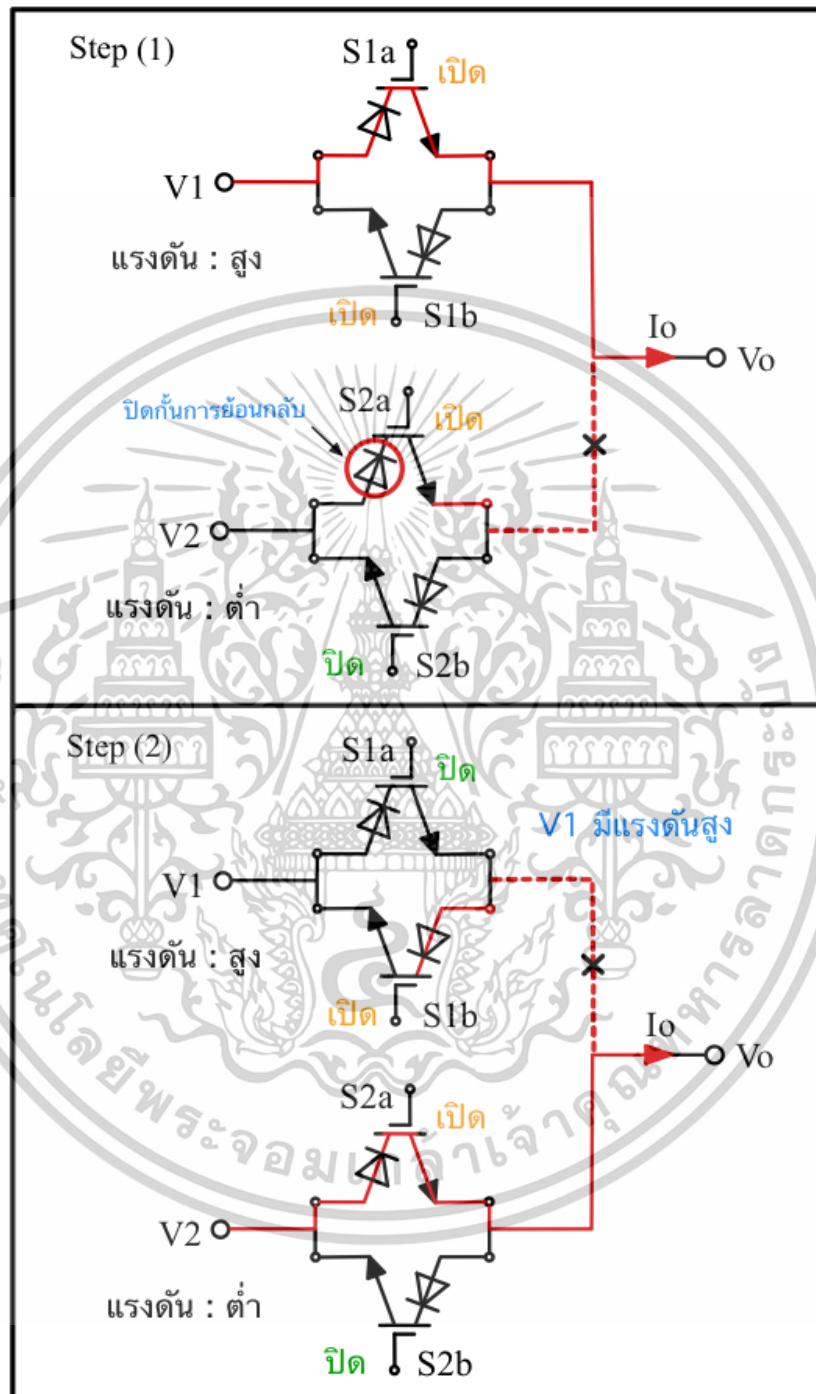
รูปที่ 2.14 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เป็นได้ เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)

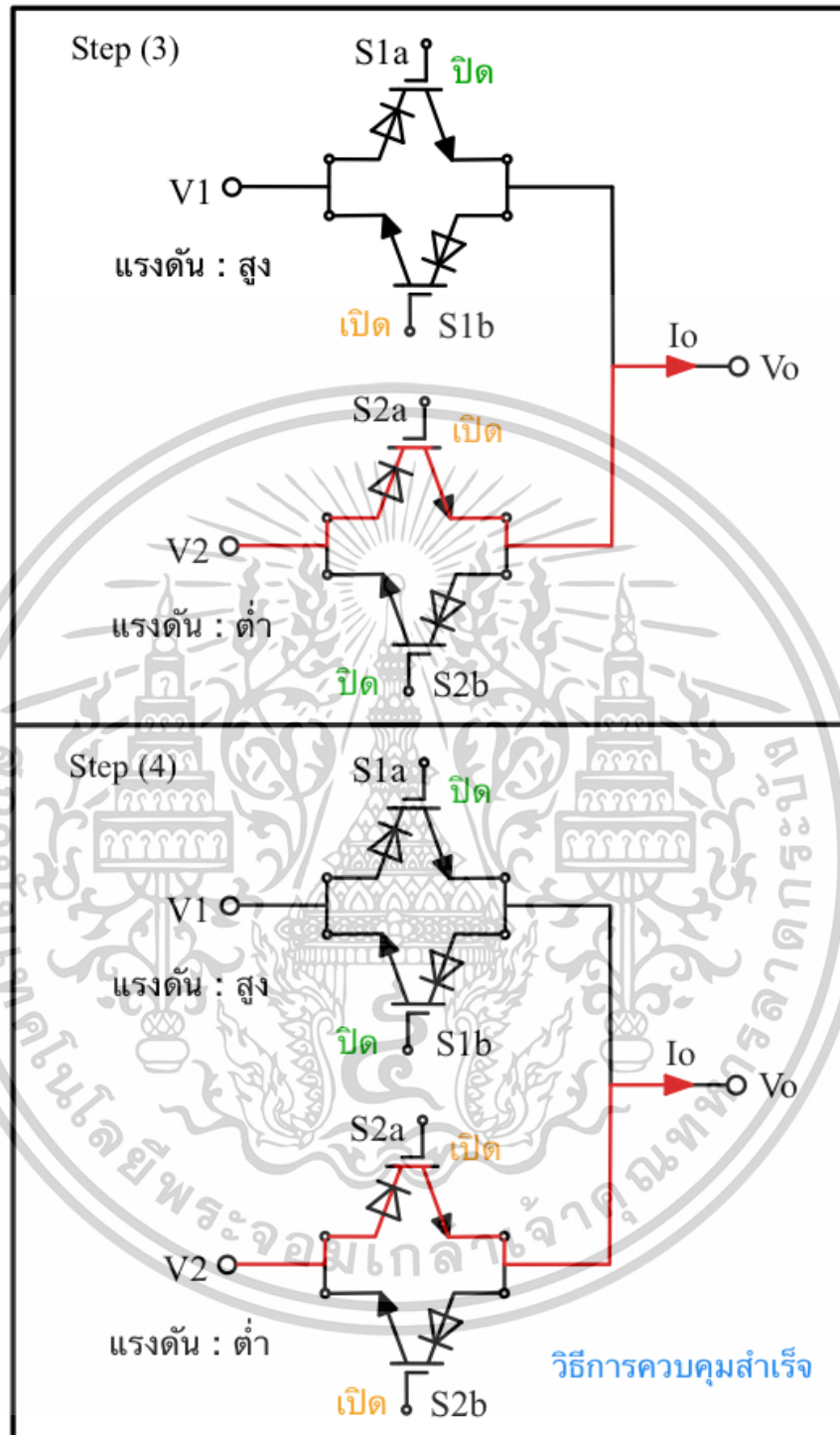
รูปที่ 2.15 แสดงกราฟเวลาสำหรับการแปลงกระแสและแรงดัน 3 ขั้นตอนโดยที่  $I_o > 0$  ในวิธีการแปลงกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบ 3 ขั้นตอน รูปแบบการแปลงจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ขนาดของแรงดันไฟฟ้าอินพุตและขั้วของกระแสไฟเอาต์พุต รูปแบบการสวิตช์ซึ่งจะถูกกำหนดในขั้นต้นตามวิธีแปลงแรงดันไฟฟ้าหรือวิธีแปลงกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนการแปลงที่สามารถกำจัดได้โดยใช้ข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ (ขั้วกระแสไฟเอาต์พุตสำหรับวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้าและความสัมพันธ์ขนาดของแรงดันอินพุตสำหรับวิธีการแปลงกระแสไฟฟ้า) โดยไม่เป็นปัญหา จากนั้นเลือกรูปแบบการสวิตช์ซึ่งของ 3 ขั้นตอน สำหรับวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 ขั้นตอนรูปแบบการสวิตช์ซึ่งสามารถเลือกได้เอง เนื่องจากไม่มีข้อจำกัด (จากวงจรเปิดโหนดและการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน) ในช่วงเวลาการเปิด/ปิดของสวิตช์ที่ดำเนินการในขั้นตอนนี้ถูกกำจัดออกไป

## 2.9.2.4 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

การควบคุมจาก V1 to V2 ( $I > 0$ )

(ก) Step การแปลงแรงดันไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 และ 2

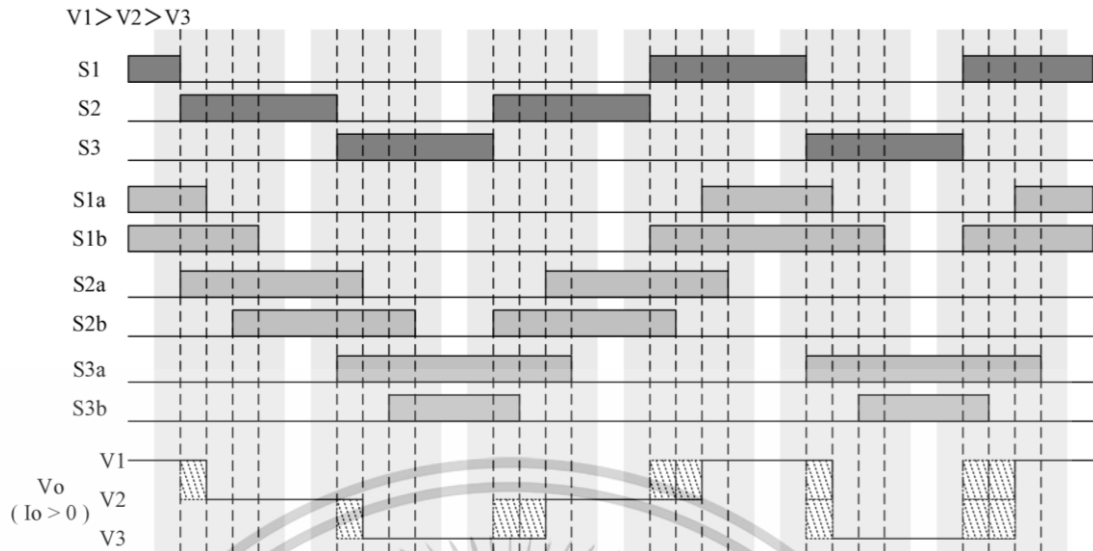
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) Step การแปลงแรงดันไฟฟ้าขั้นตอนที่ 3 และ 4

รูปที่ 2.16 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

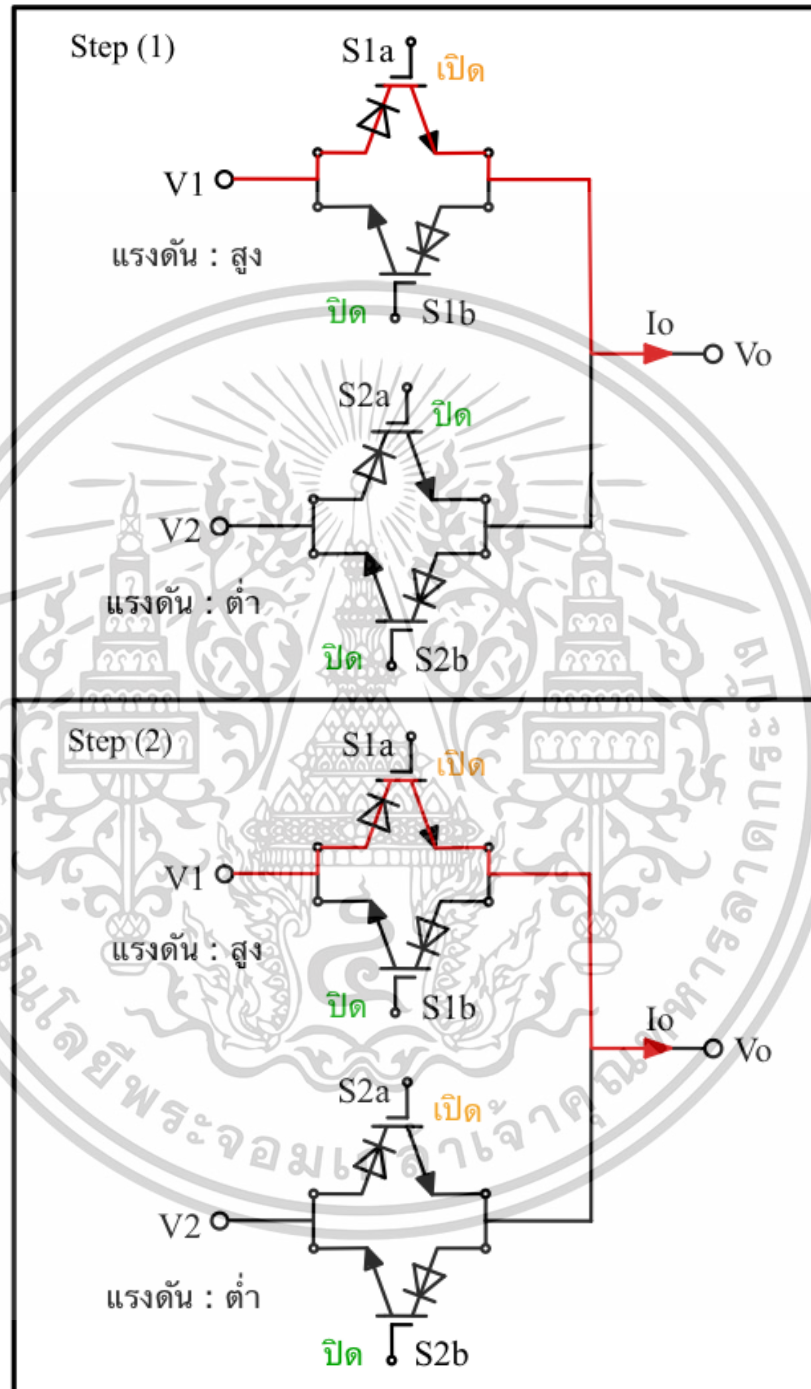
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

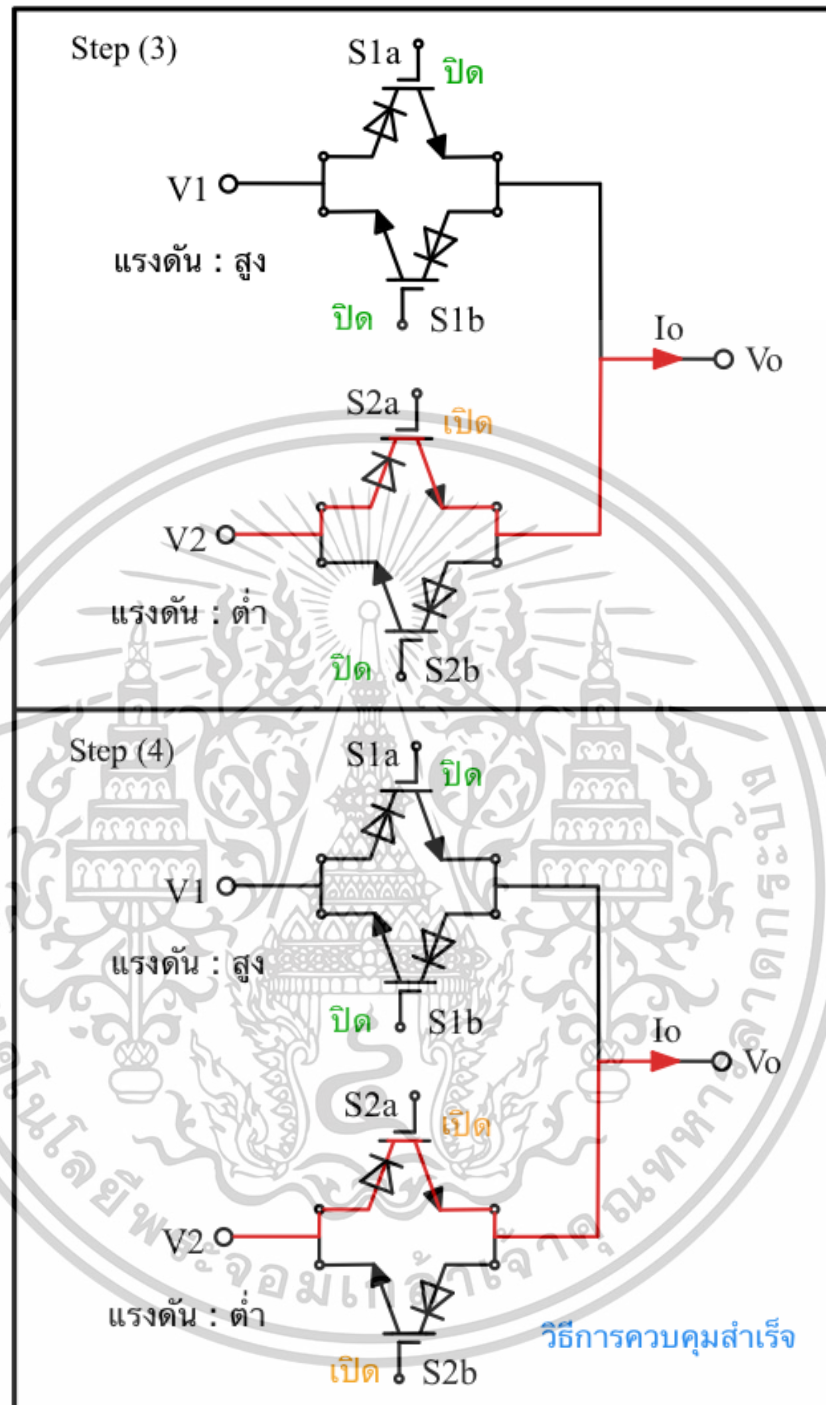
รูปที่ 2.17 แผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอนที่  $I_o > 0$  สำหรับขั้นตอนที่ (1) การเปิด  $S_{2b}$  หมายถึงเกิดการลัดวงจร ขั้วเอาต์พุตจะเปิดขึ้นเมื่อ  $S_{1a}$  หรือ  $S_{1b}$  ถูกปิด และไม่มีความเป็นไปได้ที่จะรักษาเส้นทางของกระแส การลัดวงจรและวงจรเปิดจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้หากไม่ได้เปิด  $S_{2a}$  ในขั้นตอนที่ (2) เนื่องด้วยเส้นทางของกระแสมีทิศทางเป็นบวก เมื่อ  $S_{2a}$  เปิด  $S_{1a}$  สามารถปิดได้ ในขั้นตอนที่ (3) การลัดวงจรจะไม่เกิดขึ้นแม้ว่า  $S_{2b}$  จะเปิดอยู่ เนื่องจาก  $S_{1a}$  ปิดอยู่ ในขั้นตอน (4)  $S_{1b}$  สามารถปิดได้ เนื่องจากเส้นทางของกระแสมีทิศทางลบจึงสามารถมั่นใจได้เมื่อเปิด  $S_{2b}$  ในวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้า 4 ขั้นตอน รูปแบบการสวิตช์ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน ซึ่งจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าอินพุต นอกจากนี้วิธีการแปลงสามารถเลือกรูปแบบการแปลงที่แน่นอนได้โดยพิจารณาถึงการรักษาเส้นทางกระแส ข้อผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจะเกิดขึ้นในรูปแบบการแปลงทั้งหมด และขนาดของข้อผิดพลาดจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสเอาต์พุตและความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันไฟฟ้าสำหรับผลลัพธ์ของการแปลงกระแสไฟฟ้า

## 2.9.2.5 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

การควบคุมจาก V1 to V2 ( $I > 0$ )

(ก) Step การแปลงกระแสไฟฟ้าขั้นตอนที่ 1 และ 2

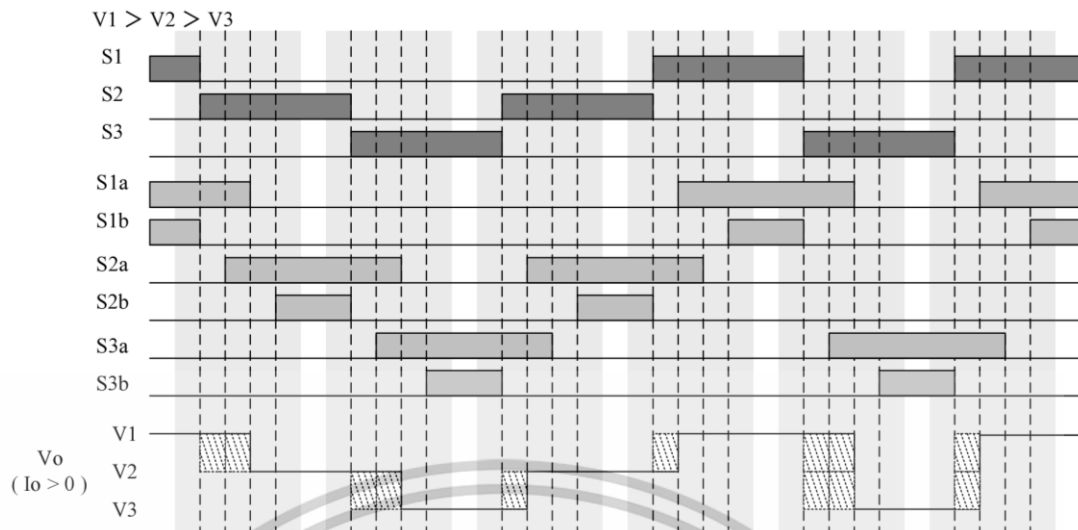
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) Step การแปลงกระแสไฟฟ้าขั้นตอนที่ 3 และ 4

รูปที่ 2.18 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

รูปที่ 2.19 กระแสไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอน ในปัจจุบันการกำหนดเวลาการสวิตช์ซึ่งของสองสวิตช์ในชั่วกระแสเดียวกันนั้น พิจารณาจากการกำหนดระยะเวลาการเชื่อมต่อกระแสเพื่อเปิดสวิตช์อุปกรณ์ที่มีชั่วกระแสเอาต์พุตเดียวกัน จากนั้นกำหนดเวลาการสวิตช์ซึ่งของสวิตช์ตัวอื่น ๆ โดยพิจารณาจาก Dead Time เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน

## 2.10 ระบบเอาต์พุต

ระบบเอาต์พุตของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นส่วนที่ส่งไฟฟ้าไปยังโหลดหรือระบบที่ต้องการไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้

### 2.10.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันตามความต้องการในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าในเมืองหรือชุมชน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังมีบทบาทสำคัญในระบบไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันต้องถูกควบคุมอย่างถูกต้องเพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีเสถียรภาพ ทั้งนี้เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ให้เป็นไปตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายหรือระบบส่งจ่ายเป็นระบบทำหน้าที่จำหน่ายไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าไปยังผู้ใช้โดยใช้ระบบเครือข่ายไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานที่เสถียรภาพและปลอดภัย กล่าวได้ว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญในระบบไฟฟ้า

## 2.11 ชุดควบคุม

ชุดควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุม คือระบบหรืออุปกรณ์ที่ถูกออกแบบและนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบหรืออุปกรณ์อื่น ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบหรืออุปกรณ์ทำงานอย่างเหมาะสมตามความต้องการและเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ชุดควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมมีทั้งซอฟต์แวร์ (software) ที่มีการกล่าวถึงในหัวข้อของระบบควบคุมสวิตซ์ซิง และฮาร์ดแวร์ (hardware) ที่จะมีการกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

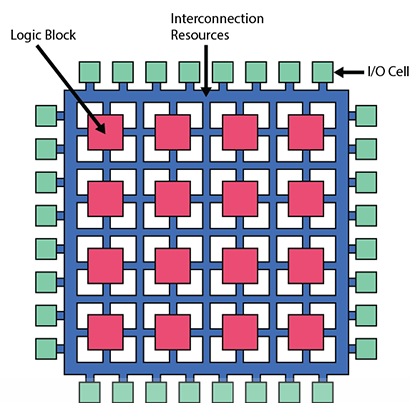
โดยการใช้งานเอฟพีจีเอหรืออุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field Programmable Gate Array : FPGA) ที่เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดโปรแกรมได้มีโครงข่ายการเชื่อมต่อภายในแบบแมตริกซ์ โครงสร้างภายในของ FPGA สามารถโปรแกรมให้มีหน้าที่การทำงานเหมือนลอจิกเกตพื้นฐาน เช่น AND, OR, XOR, NOT หรือรวมกันหลาย ๆ ชนิด (combinational logic) เพื่อทำหน้าที่ให้ความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เช่น decoders หรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ FPGA จะประกอบด้วยส่วนของวงจรถ่ายลอจิกแบบโปรแกรมได้แล้ว ยังมีบล็อกของหน่วยความจำซึ่งอาจจะสร้างด้วยฟลิปฟล็อปอย่างง่ายหรือใช้พื้นที่ของสารกึ่งตัวนำสร้างเป็นหน่วยความจำจริง ๆ อยู่ภายในก็ได้



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างไอซี FPGA ของบริษัท Xilinx และบริษัท Intel

ที่มา : <https://www.amd.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 โครงสร้างภายใน FPGA ทั่วไป

ในการออกแบบวงจรดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ที่มี FPGA อยู่บนแผงวงจรจะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถลดขนาดของแผงวงจร รวมทั้งสามารถออกแบบได้รวดเร็วไม่ต้องทดสอบรายละเอียดภายในให้เสร็จสมบูรณ์ 100% ก็สามารถออกแบบแผงวงจรได้ เมื่อได้รับแผงวงจรและประกอบอุปกรณ์ต่างๆ เสร็จจึงค่อยกำหนดหน้าที่การทำงานของ FPGA ได้ในภายหลัง ต่างจากการออกแบบด้วยลอจิกเกตขนาดเล็กที่ต้องออกแบบทางเดินของลายทองแดงให้เสร็จสมบูรณ์ก่อนและไม่สามารถแก้ไขได้ในภายหลัง นอกจากนี้ การใช้งาน FPGA สามารถโปรแกรมการทำงานได้ในทุกขณะแม้แต่ขณะที่ส่งมอบงานแล้วก็ยังสามารถเข้าไปแก้ไขวงจรได้โดยง่ายดาย จึงเป็นที่มาของคำว่า "Field Programmable" ซึ่งหมายถึงโปรแกรมได้ในภาคสนามหรือที่หน้างาน อย่างไรก็ตามข้อกำหนด (Configuration) ของ FPGA จะหายไปหลังจากปิดไฟเลี้ยง ดังนั้นจะต้องมีหน่วยความจำภายนอก (Flash) มาคอยรักษาข้อกำหนดของ FPGA ไว้ ซึ่ง FPGA จะมีกระบวนการอ่านข้อกำหนดนั้นโดยอัตโนมัติหลังจากได้รับไฟเลี้ยง

### 2.11.1 ภาษาคอมพิวเตอรืที่ใช้ออกแบบ

การเขียนบอร์ด FPGA ใช้ภาษา Hardware Description Language (HDL) เพื่อออกแบบหรือการเขียนรหัสสำหรับไปประยุกต์ใช้งาน โดยมีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่ 3 ส่วน ได้แก่

- 1) Library และ Package: เป็นฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวภาษา
- 2) Entity: สำหรับบอกว่าอุปกรณ์ที่ออกแบบมี Input / Output อย่างไร
- 3) Architecture: เป็นส่วนของการอธิบายพฤติกรรมของฮาร์ดแวร์ที่กำลังออกแบบรูปแบบของภาษา HDL ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.1.1 VHDL Hardware Description Language

VHDL Hardware Description Language (VHDL) เป็นหนึ่งในภาษา HDL ที่แนะนำอย่างมากเพื่อออกแบบระบบโครงสร้างแบบฮาร์ดแวร์ โดยได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในวงจรรูปแบบขนานและเป็นหนึ่งในภาษา HDL ที่เป็นมาตรฐานสำหรับการออกแบบบอร์ดควบคุม FPGA

### 2.11.1.2 Verilog

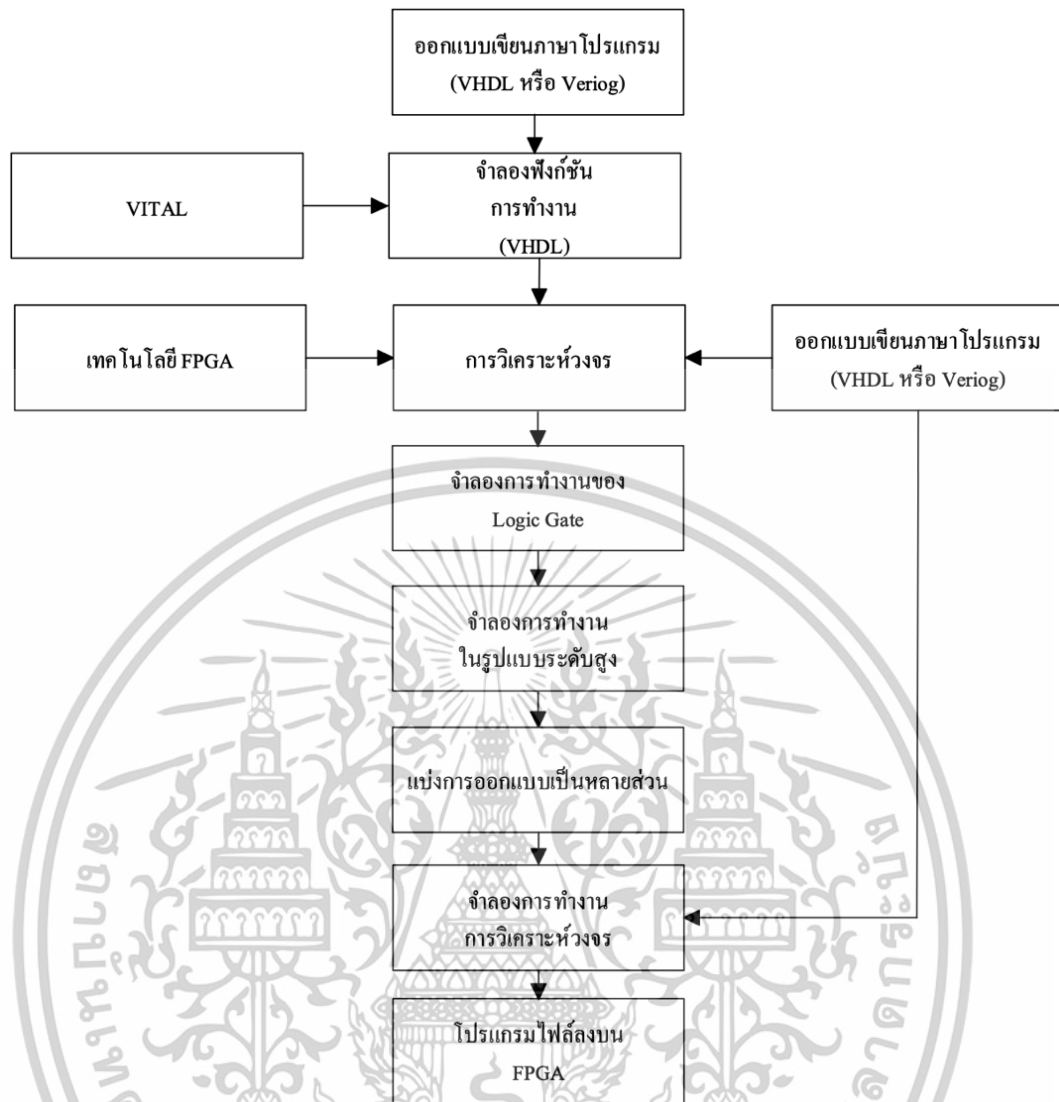
Verilog เป็นภาษา HDL อีกตัวที่ใช้ในการออกแบบบอร์ดควบคุม FPGA และระบบ ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) มีการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ (Interface) ที่คล้ายกับภาษา C และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและการออกแบบชิปที่กำหนดเอง

### 2.11.1.3 System Verilog

System Verilog เป็นการขยายของ Verilog ที่มีความสามารถมากกว่าในการออกแบบระบบที่ซับซ้อนและมักถูกใช้ในการออกแบบที่มีการทดสอบและการยืนยันที่เข้มงวด

### 2.11.1.4 VHDL

VHDL เป็นภาษา HDL ที่มีพื้นฐานบน Python และนำเสนอวิธีการเขียนรหัสในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและที่สามารถทดสอบได้ง่าย การเลือกภาษา HDL ใช้งานออกแบบบอร์ดควบคุม FPGA ขึ้นอยู่กับความถนัดและความคุ้นเคยของผู้ใช้



รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนการออกแบบโดยใช้ FPGA

กล่าวได้ว่าการออกแบบวงจรดิจิทัลทำได้ทั้งโดยการวาดวงจรหรือใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ ในกรณีที่ออกแบบโดยวิธีการวาดวงจร ผู้ทำการออกแบบจะต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีความแตกต่างกันไป แต่กรณีที่ใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ในการออกแบบจะทำให้สะดวกกว่า เพราะผู้ทำการออกแบบไม่ต้องมาคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ อีกทั้งวิธีนี้สามารถแก้ไขโมเดลได้ โดยที่ไม่ต้องวาดวงจรใหม่ นั่นคือการออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์จะทำให้โมเดลที่ได้ไม่ขึ้นกับเทคโนโลยี ซึ่งสำหรับภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ที่ใช้ก็มี VHDL หรือ Verilog ในการเขียนรหัส

### 2.11.2 ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบ

ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบวงจรดิจิทัลและใช้งาน FPGA มีหลายตัวเลือก แต่ที่ได้รับความนิยมสูงมากมีดังนี้

#### 2.11.2.1 Xilinx Vivado

บริษัทผู้พัฒนา : Xilinx อธิบายว่า Vivado เป็นเครื่องมือออกแบบที่ใช้ในการออกแบบวงจรดิจิทัลและโปรแกรม FPGA ของ Xilinx มีความสามารถที่รองรับทั้งกระบวนการสังเคราะห์วงจรระดับสูง (High-Level Synthesis), IP Integrator, การ Place-and-Route, การโปรแกรม Bitstream, และมีเครื่องมือต่าง ๆ ที่ช่วยในการทดสอบและการปรับปรุง

#### 2.11.2.2 Altera Quartus Prime

บริษัทผู้พัฒนา : Altera (ที่เป็นส่วนหนึ่งของ Intel) อธิบายว่า Quartus Prime เป็นเครื่องมือออกแบบที่ใช้ในการออกแบบวงจรดิจิทัลและโปรแกรม FPGA ของ Altera (Intel) มีความสามารถที่รองรับการใช้งานกับชิป FPGA ต่าง ๆ ของ Altera, การโปรแกรม Bitstream, และเครื่องมือการทดสอบ

#### 2.11.2.3 Lattice Diamond

บริษัทผู้พัฒนา : Lattice Semiconductor อธิบายว่า Lattice Diamond เป็นเครื่องมือออกแบบที่ใช้ในการออกแบบวงจรดิจิทัลและโปรแกรม FPGA ของ Lattice Semiconductor มีความสามารถในการโปรแกรม Bitstream และมีเครื่องมือสำหรับการทดสอบ

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้งานชิป Xilinx FPGA จึงเลือกใช้งาน Xilinx Vivado ที่ให้บริการทั้งในด้านการออกแบบวงจรดิจิทัลและการโปรแกรม FPGA ของ Xilinx

Vivado มีความสามารถเพียงพอที่จะรองรับกระบวนการออกแบบทั้งหมดตั้งแต่การสร้างโมเดลของวงจรจนถึงการนำโปรแกรมลงในชิป FPGA โดยรองรับชิปทั้งหมดของ Xilinx ทั้งในตระกูล Artix, Kintex, Virtex, และ Ultra Scale Vivado มีหลายลักษณะเด่นที่ช่วยในกระบวนการออกแบบด้วย FPGA อย่างเช่น High-Level Synthesis (HLS) ในการสังเคราะห์แปลงรหัสระดับสูง (เช่น C, C++) เป็นรหัสที่สามารถนำเข้าไปใน Vivado

1) IP Integrator ช่วยในการสร้างวงจรดิจิทัลโดยใช้ IP (Intellectual Property) ที่พร้อมให้บริการ

2) Implementation Tools มีเครื่องมือสำหรับการ Place-and-Route และการสร้างและโปรแกรมไฟแบบนำทาง (Bitstream)

3) Simulation Tools มีเครื่องมือ Simulation ใน Vivado Simulator หรือสามารถใช้ Model Sim

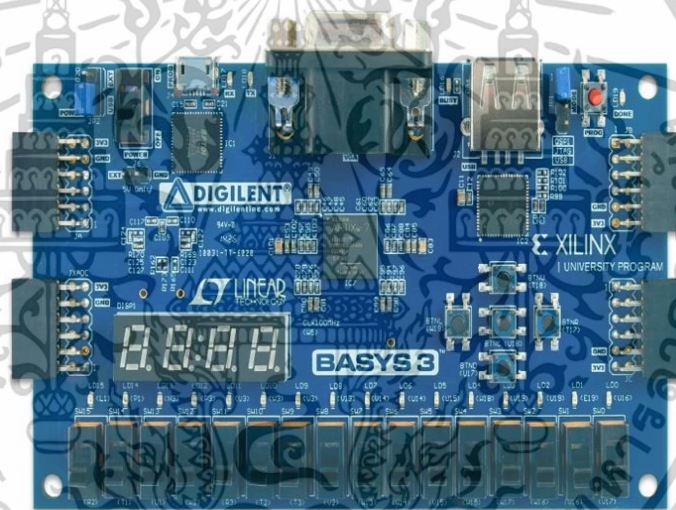
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) Programming Tools ช่วยในกระบวนการนำโปรแกรมลงในชิป FPGA ที่ได้สร้างขึ้น

5) Xilinx Vivado มีประสิทธิภาพสูงและมีความหลากหลายในการรองรับชิปต่าง ๆ ทำให้เป็นเครื่องมือที่นักวิศวกรรมระดับมืออาชีพนิยมใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบดิจิทัลที่ใช้ FPGA ของ Xilinx

### 2.11.3 Basys3 FPGA Board

บอร์ด FPGA Basys3 เป็นฐานโครงสร้างการพัฒนาวงจรดิจิทัลที่สมบูรณ์และพร้อมใช้งานด้วย Artix-7 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้จาก Xilinx ประกอบด้วยสวิทช์ ฟิน I/O ที่เพียงพอเพื่อให้การออกแบบจำนวนมากเสร็จสมบูรณ์ได้โดยไม่ต้องใช้ฮาร์ดแวร์เพิ่มเติมใด ๆ พอร์ต USB, VGA และพอร์ตอื่น ๆ ที่ทำให้ Basys3 สามารถโฮสต์การออกแบบได้ตั้งแต่วงจรผสมเบื้องต้นไปจนถึงวงจรลำดับที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.23 Basys3 FPGA Board

ที่มา : basys3:basys3\_rm.pdf

FPGA Artix-7 ได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับบรรดาประสิทธิภาพสูงและมอบความจุที่มากขึ้น ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและทรัพยากรที่มากกว่ารุ่นก่อน ๆ ชุดพอร์ตและอุปกรณ์ต่อพ่วงของบอร์ด FPGA Basys3 ประกอบด้วย :

- สวิตช์เลื่อน 16 ตัว
- ไฟ LED 16 ดวง
- สวิตช์ปุ่มกด 5 ปุ่ม
- จอแสดงผล 7 ส่วน 4 หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้วต่อ Pmod 3 ตัว
- ขั้วต่อ Pmod สำหรับสัญญาณ XADC
- เอาต์พุต VGA 12 บิต
- ตัวเชื่อม USB-UART
- หน่วยความจำแฟลช
- พอร์ต Digilent USB-JTAG สำหรับการเขียนโปรแกรมและการสื่อสาร FPGA
- USB HID Host สำหรับเมาส์ คีย์บอร์ดและเมมโมรี่สติ๊ก

### 2.11.3.1 การจ่ายไฟ

บอร์ด Basys3 สามารถรับพลังงานจาก Digilent USB-JTAG Port (J4) หรือแหล่งจ่ายไฟภายนอก 5V จัมเปอร์ JP3 (ใกล้กับสวิทช์ไฟ) ซึ่งพอร์ต USB ส่วนใหญ่สามารถให้พลังงานเพียงพอสำหรับการใช้งาน แต่ในบางการใช้งานที่มีความต้องการสูงอาจต้องใช้พลังงานมากกว่าที่พอร์ต USB สามารถให้ได้และบางโปรแกรมอาจต้องทำงานโดยไม่ต้องมีพอร์ต USB ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ก็สามารถใช้พลังงานจากภายนอกหรือจากชุดแบตเตอรี่ ซึ่งแหล่งจ่ายไฟภายนอกสามารถใช้งานได้โดยเสียบปลั๊กไฟภายนอก (J6) และตั้งค่าจัมเปอร์ JP2 เป็น "EXT" แหล่งจ่ายไฟจะต้องให้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 4.5VDC ถึง 5.5VDC และอย่างน้อย 1A

พลังงานจากภายนอกหรือจากชุดแบตเตอรี่ใช้งานได้โดยเชื่อมต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้ากับพิน "EXT" ของ J6 และขั้วลบเชื่อมต่อกับพิน "GND" ของ J6 ที่แรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำ 3.6V โดยจำเป็นต้องจำกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของชุดแบตเตอรี่ภายนอกไว้ที่ 5.5VDC

### 2.11.3.2 หน่วยความจำ

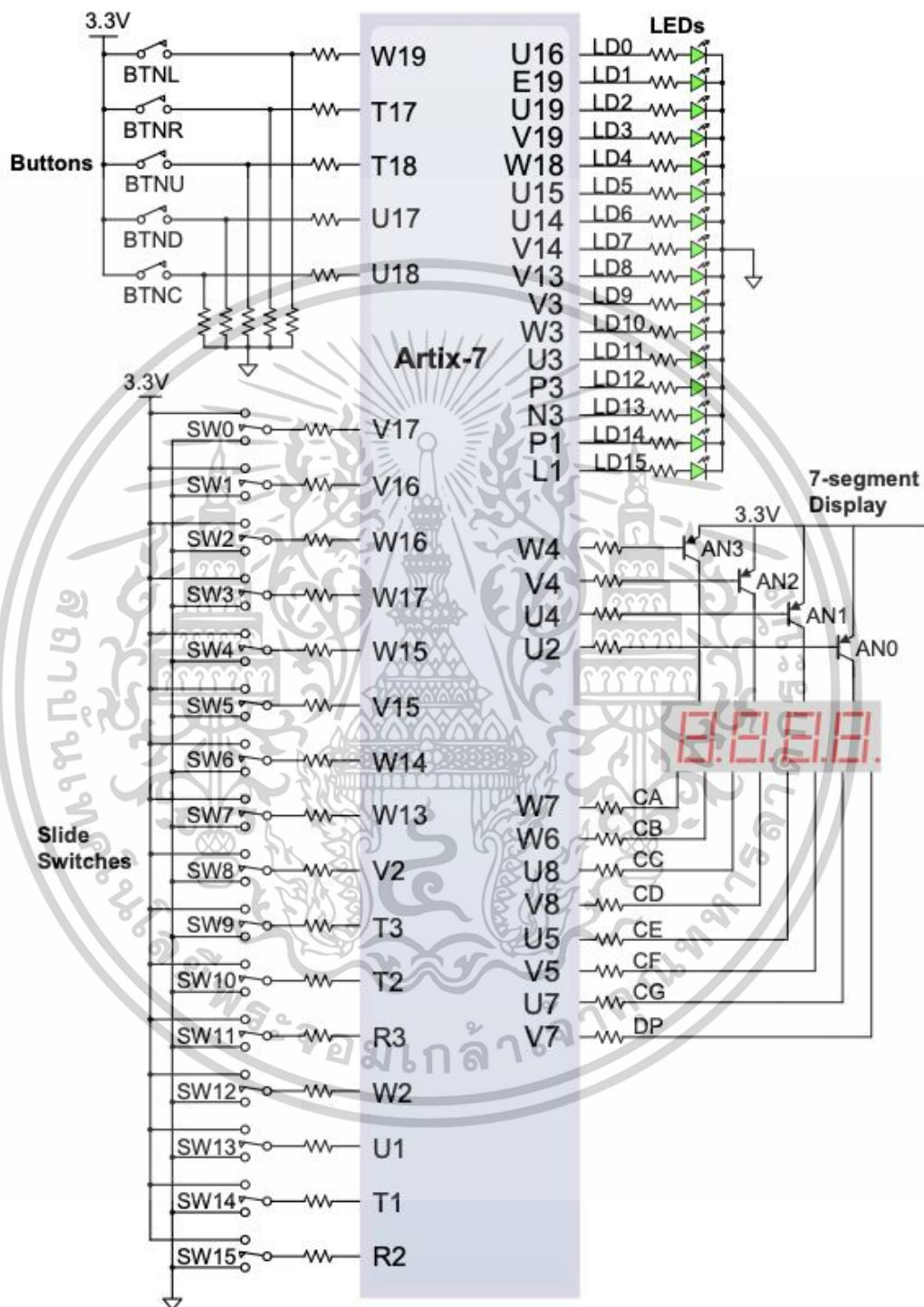
บอร์ด Basys3 มีหน่วยความจำแบบแฟลชขนาด 32Mbit ซึ่งเชื่อมต่อกับ Artix-7 FPGA โดยใช้บัสสี่โหมด (x4) สามารถเขียนลงในหน่วยความจำแฟลช Quad SPI (Spansion Part No. S25FL032) และการตั้งค่าโหมดสามารถใช้เพื่อให้ FPGA อ่านการกำหนดค่าจากอุปกรณ์โดยอัตโนมัติเมื่อเปิดเครื่อง ลักษณะของ Artix-7 35T ต้องการหน่วยความจำมากกว่า 2MB และมีอุปกรณ์แฟลชประมาณ 48% สำหรับข้อมูลผู้ใช้

### 2.11.3.3 อินพุต/เอาต์พุต

บอร์ด Basys3 ประกอบด้วยสวิทช์เลื่อน 16 ตัว สวิทช์ปุ่มกด 5 ปุ่ม ไฟ LED 16 ดวงแยกกัน และจอแสดงผล 7 ส่วน 4 หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ปุ่มกดและสวิทช์สไลด์เชื่อมต่อกับ FPGA ผ่านตัวต้านทานแบบอนุกรมเพื่อป้องกันความเสียหายจากการลัดวงจร (อาจเกิดการลัดวงจรได้หากพิน FPGA ที่กำหนดให้กับปุ่มกดหรือสวิทช์เลื่อนถูกกำหนดให้เป็นเอาต์พุตโดยไม่ตั้งใจ) สวิทช์ปุ่มกดทั้ง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ่มซึ่งจัดเรียงในรูปแบบเครื่องหมายบวกคือสวิตช์ "ชั่วขณะ" ที่ปกติจะสร้างเอาต์พุตต่ำเมื่อไม่ได้ใช้งาน และเป็นเอาต์พุตสูงเมื่อมีการกดใช้งาน โดยสวิตช์เลื่อนจะสร้างอินพุตสูงหรือต่ำคงที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง



รูปที่ 2.24 อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตบนบอร์ด Basys3

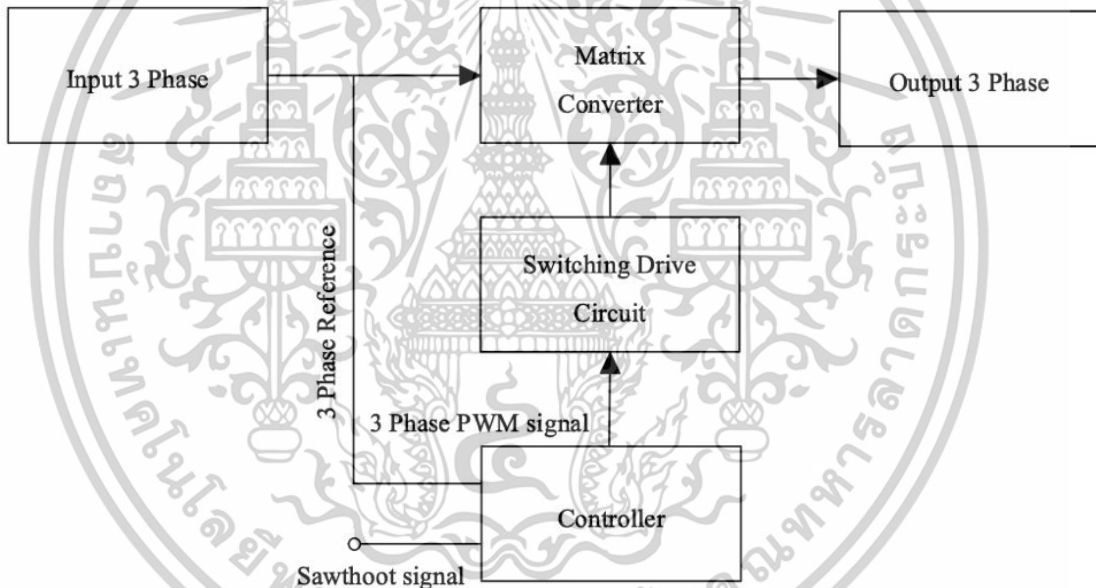
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการ

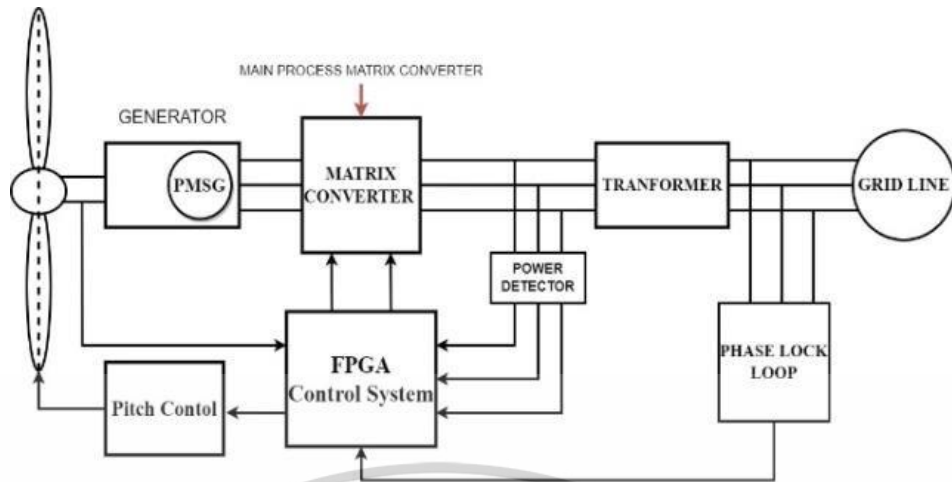
### 3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบ

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ ซึ่งในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองระบบการแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ในระบบกักเก็บลมผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน ในโปรแกรม MATLAB & Simulink ที่เป็นหัวใจหลักของการแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ นำมาใช้ในการออกแบบการควบคุมผ่านบอร์ดควบคุม FPGA โดยจะแสดงสถานะการทำงานเปิดและปิดของสวิตช์ซึ่ง IGBT ผ่านไดโอดเปล่งแสง



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบกักเก็บลมผลิตกระแสไฟฟ้า

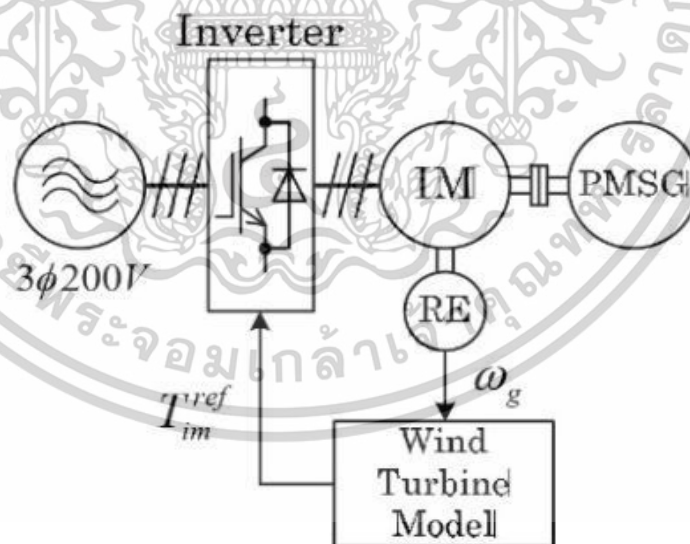
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

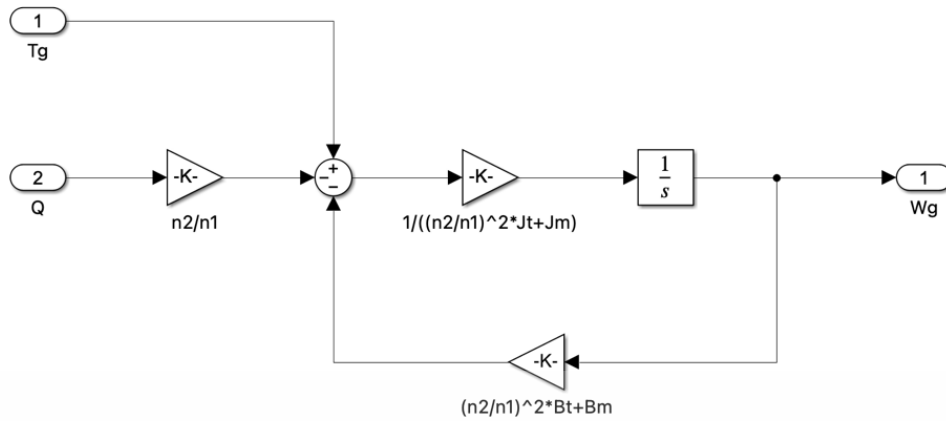
### 3.1.1 แบบจำลองระบบอินพุต

เป็นแบบจำลองระบบอินพุตในโปรแกรม MATLAB & Simulink สร้างจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เพื่อแสดงระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

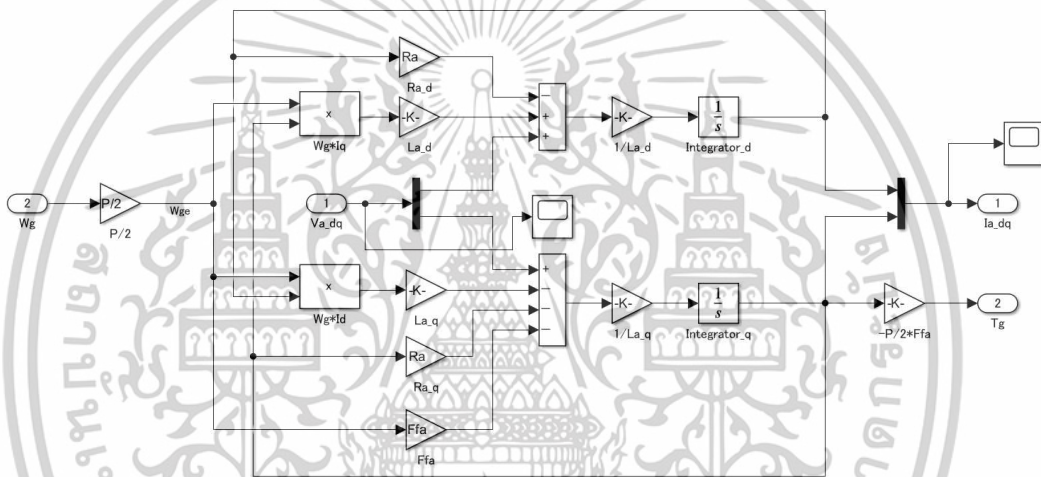


รูปที่ 3.3 กังหันลมจำลอง

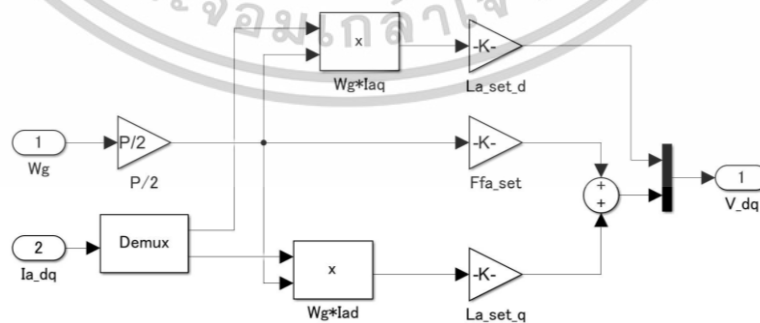
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบอินพุตของชุดกึ่งหนึ่งขนาดกำลัง 300 วัตต์

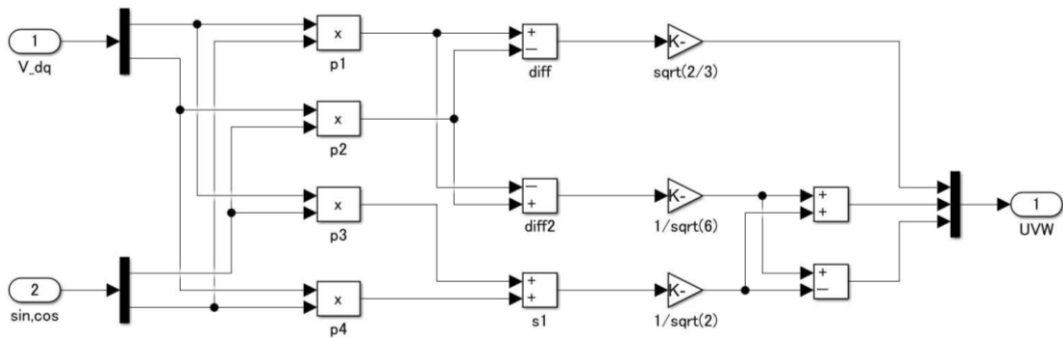


รูปที่ 3.5 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร  
รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis



รูปที่ 3.6 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร  
รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

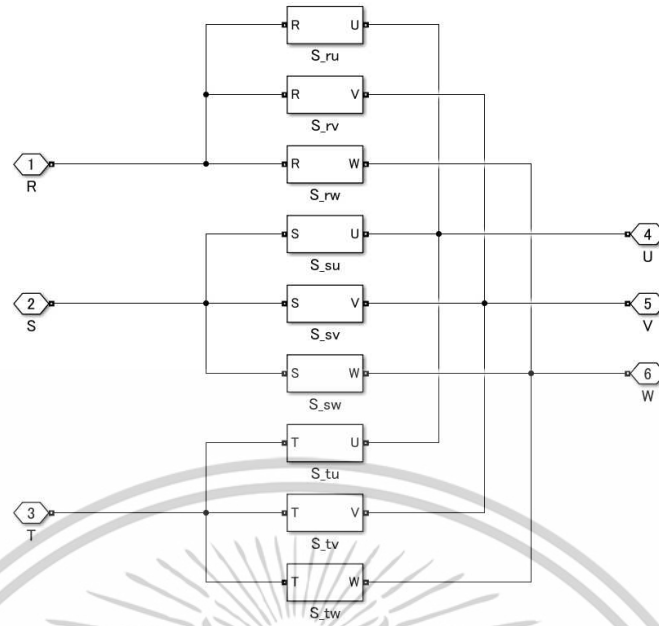


รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบกำลังสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 3.1.2 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่ง

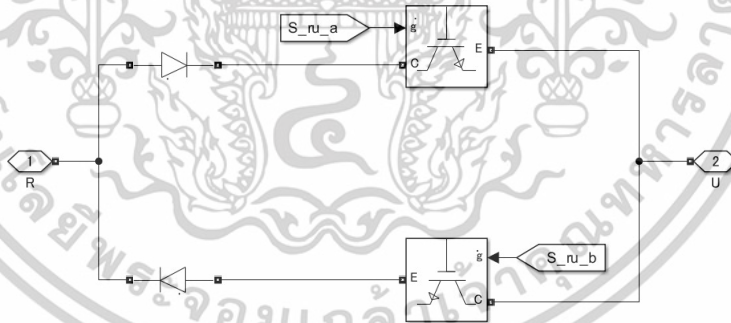
เป็นแบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่งในโปรแกรม MATLAB & Simulink สร้างจากความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เพื่อแสดงวงจรสวิตซ์ซิ่ง ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.9 ภายในแบบจำลองวงจรสวิตซ์ซิ่งในโปรแกรม MATLAB & Simulink จะประกอบด้วยแบบจำลองย่อยวงจรสวิตซ์ซิ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ MATLAB & Simulink ซึ่งจะทำการต่อแบบกลับหัวต่อชนกันดังรูปที่ 3.9



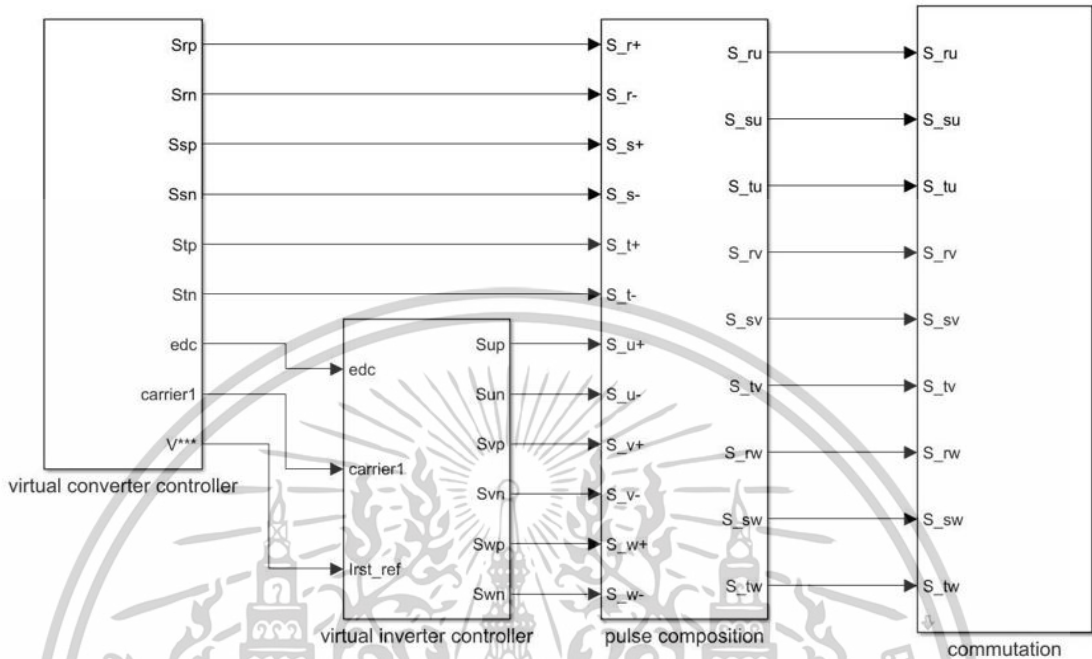
รูปที่ 3.10 แบบจำลองย่อยระบบสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 3.1.3 ระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่ง

ระบบการแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีความยุ่งยากในการควบคุมสวิตซ์ซิ่งสองทิศทาง เนื่องจากความซับซ้อนของการควบคุมสวิตซ์ซิ่งในทิศทางที่ต่างกันในเวลาเดียวกันและเพื่อป้องกันการลัดวงจรที่อาจทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมวงจรกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

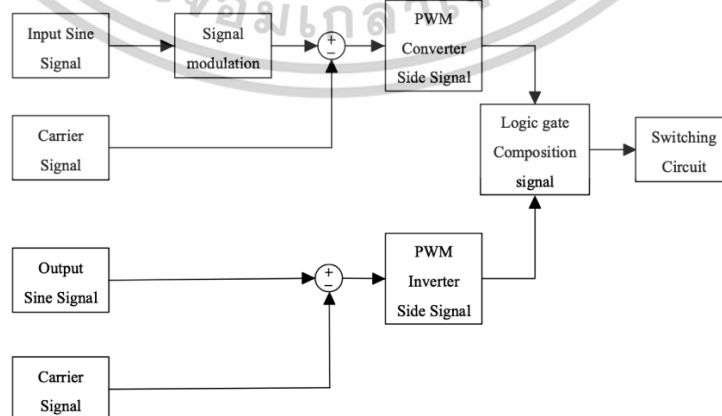
สวิตช์ซึ่ง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ 1.ระบบ Converter controller 2.ระบบ Inverter controller 3.ระบบ Pulse composition และ 4.ระบบ Commutation ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 แบบจำลองระบบควบคุมสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 3.1.4 ระบบ Converter controller

เป็นการควบคุมการทำงานของสวิตช์ซึ่งให้อยู่ในสถานะที่ต้องการอย่างถูกต้อง โดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณสวิตช์ซึ่งที่ถูกเปิดปิดเพื่อควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจร ซึ่งวิธีการควบคุมจะเป็นไปตามไดอะแกรมดังรูปที่ 3.11

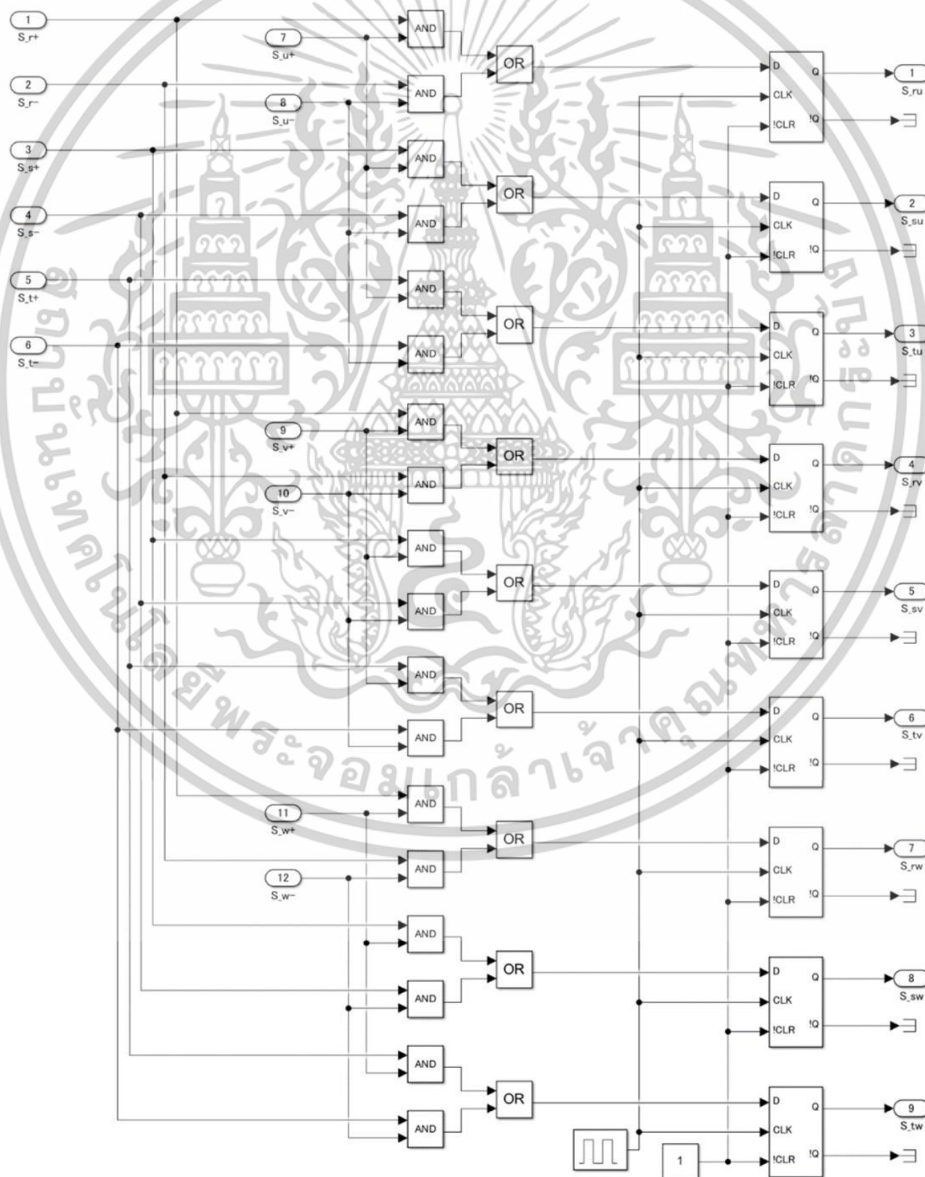


รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสวิตช์ซึ่งด้วยสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณสวิทช์ซึ่งสามารถทำได้โดยการอาศัยสัญญาณควบคุมที่มาจากสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณมอดูเลตและสัญญาณ PWM ซึ่งเริ่มด้วยการสร้างสัญญาณอินพุตไซน์ (Sinusoidal) ของระบบที่จะถูกควบคุมผ่านความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณ PWM จากนั้นจะมีการใช้สัญญาณสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้นทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ ซึ่งในขณะที่สัญญาณไซน์กำลังทำงานและสัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา ระบบจะทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณไซน์กับค่าสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งการเปรียบเทียบนี้จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณ PWM ให้สอดคล้องกับความต้องการในการควบคุมความกว้างของสัญญาณไซน์ หลังจากการเปรียบเทียบและควบคุมความกว้างของช่วงเวลาเสร็จสิ้น ระบบจะสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณไซน์ที่ถูกปรับค่าตามความต้องการ

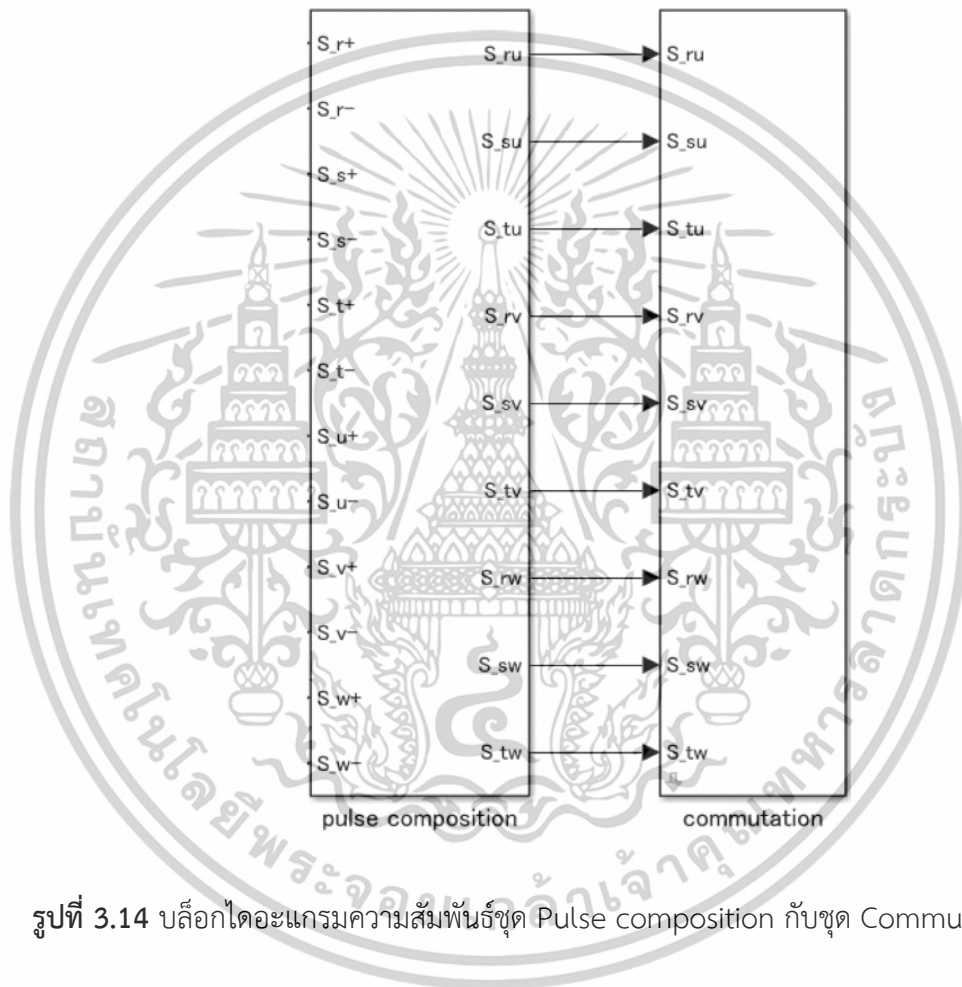


รูปที่ 3.13 แบบจำลองชุดวงจร Pulse composition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 ระบบ Commutation

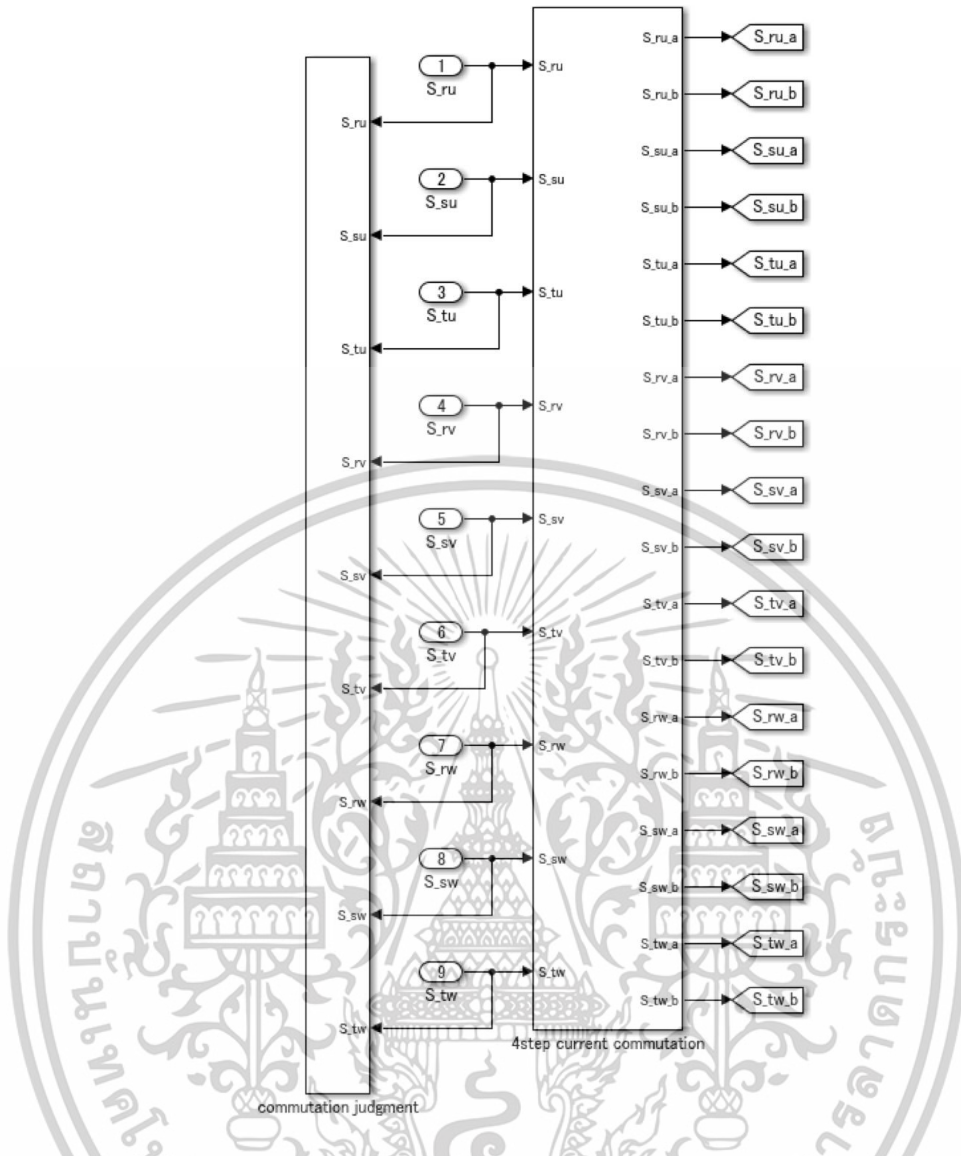
โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเสถียรสูง มีโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรของวงจรวจรสวิตซ์ซึ่งที่ต่ำที่สุดจากทั้งหมด 5 วิธี ซึ่งการทำงาน Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation ได้ดังรูปที่ 3.13



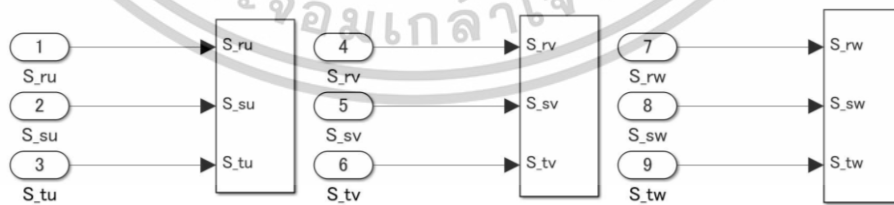
รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation

จากรูปที่ 3.13 วงจร Commutation จะรับสัญญาณพัลส์ของชุดวงจร Pulse composition ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณพัลส์ระหว่างชุดวงจร Converter และ Inverter โดยในชุด Commutation สามารถสร้างเป็นชุดจำลองภาควงจรระบบ Commutation ใน โปรแกรม MATLAB & Simulink ได้ดังรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

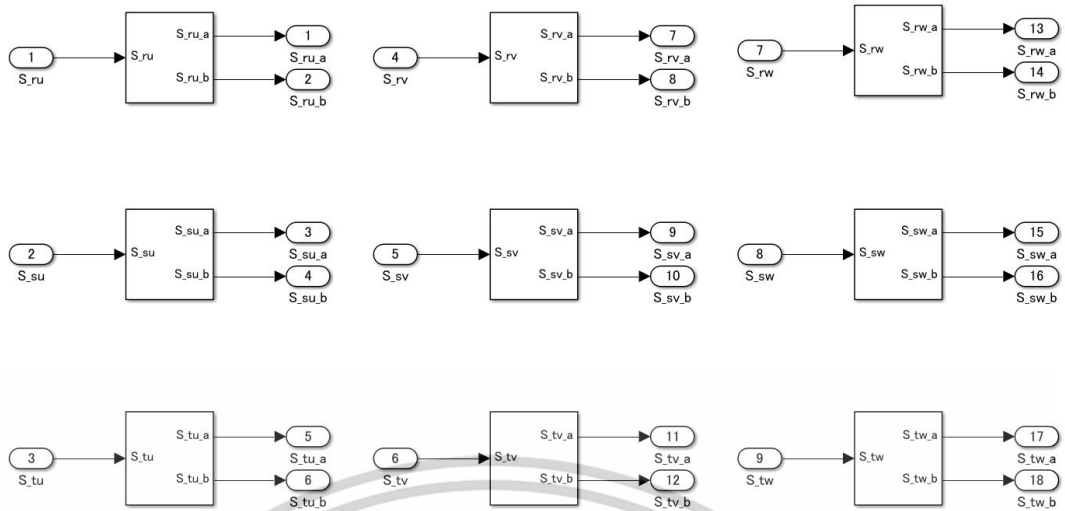


รูปที่ 3.15 แบบจำลองชุดวงจร Commutation

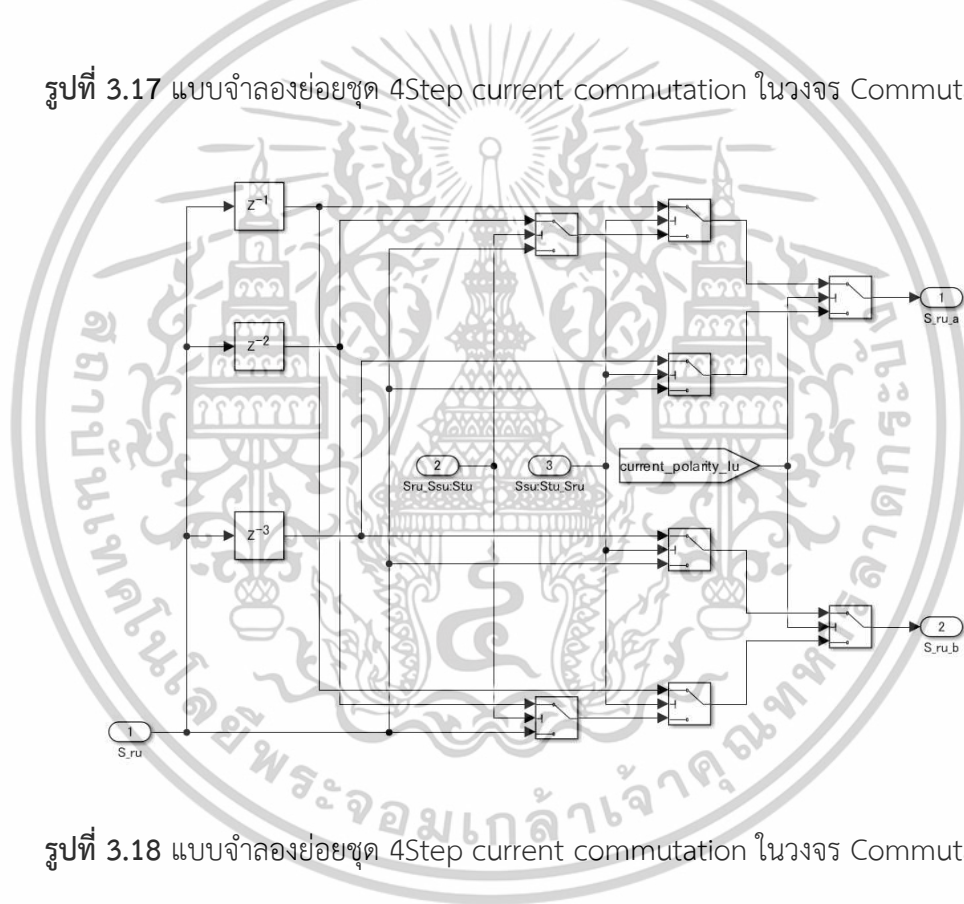


รูปที่ 3.16 แบบจำลองย่อยชุด Commutation judgment ในวงจร Commutation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



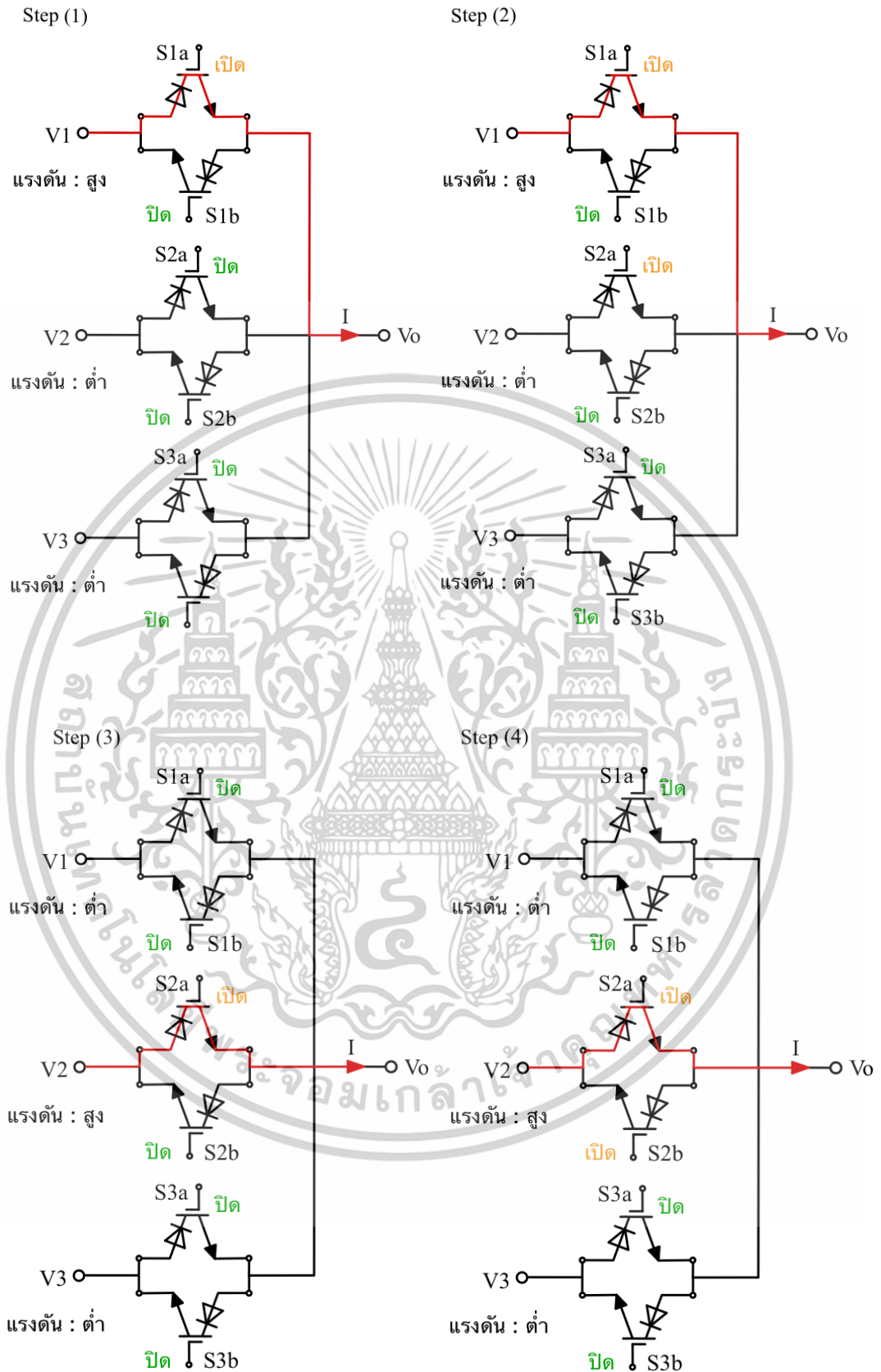
รูปที่ 3.17 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation



รูปที่ 3.18 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation

ระบบนี้เป็นการกำหนดเวลาสวิตซ์ซึ่งของสองสวิตซ์ในชั่วกระแสเดียวกัน โดยพิจารณาจากการกำหนดระยะ Dead Time ให้สอดคล้องกับการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าตามวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.18 เพื่อเปิดและปิดสวิตซ์อุปกรณ์ จากนั้นกำหนดเวลาและปรับค่าสวิตซ์ซึ่งตามทฤษฎีอ้างอิงเพื่อป้องกันการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

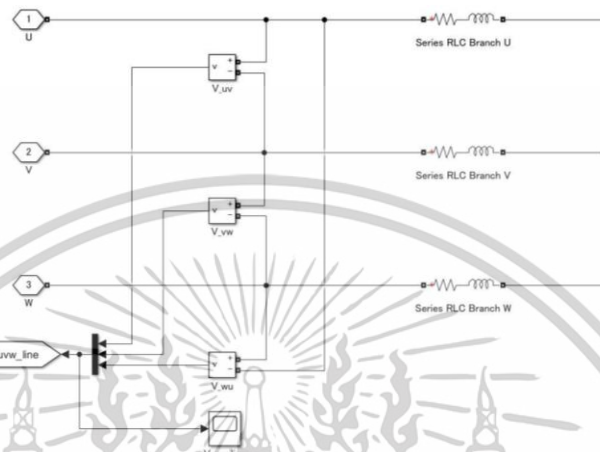


รูปที่ 3.19 วงจรการไหลของแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.6 ระบบเอาต์พุต

เมื่อสัญญาณผ่านชุดสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จะได้สัญญาณ 3 เฟส สามารถควบคุมเฟสและความถี่นำไปใช้งานได้ ซึ่งในแบบการจำลองของระบบเอาต์พุตจะต่อโหลดแบบ RL เพื่อจำลองเป็นระบบสายส่งต่อไปดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.20 แบบจำลองระบบเอาต์พุตโหลด RL ของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.19 นอกจากสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรกำลังสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์จ่ายไปยังโหลด RL แล้ว ก็จะมีการนำสัญญาณ 3 เฟส เอาต์พุตบางส่วนมาเปรียบเทียบเพื่อเข้าไปยังวงจรชุด Control Inverter โดยที่เฟส  $V_u$  จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส  $V_v$  ซึ่งจะได้สัญญาณ  $V_{uv}$ , เฟส  $V_v$  จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส  $V_w$  ซึ่งจะได้สัญญาณ  $V_{vw}$  และ เฟส  $V_w$  จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส  $V_u$  ซึ่งจะได้สัญญาณ  $V_{wu}$  จากนั้นสัญญาณ  $V_{uv}$ ,  $V_{vw}$ ,  $V_{wu}$  จะผ่านมายัง Mux แล้วเป็น  $V_{uvw\_line}$  เพื่อเป็นเอาต์พุตอ้างอิงของวงจร Control Inverter ระบบต่อไป

### 3.1.7 ทดสอบระบบเอาต์พุตกับความเร็วลม

กังหันลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจลน์ของลมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการหมุนของใบพัดซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพของกังหันลมสามารถวิเคราะห์ได้โดยการทดสอบเอาต์พุตแรงดันภายใต้สภาวะความเร็วลมที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษานี้เน้นการวิเคราะห์เอาต์พุตแรงดันที่ความเร็วลมต่ำและสูง และเราได้ใช้ระบบการจำลอง ผ่าน Matlab Simulink โดยผลลัพธ์ที่ได้จะออกมาดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับและในงานวิจัยเราจะเลือกใช้ความเร็วลมสูงเพื่อทดสอบการใช้กับบอร์ด FPGA เพราะต้องการแรงดันสูงเพื่อทดสอบให้ผลตรงกับการใช้งานจริง

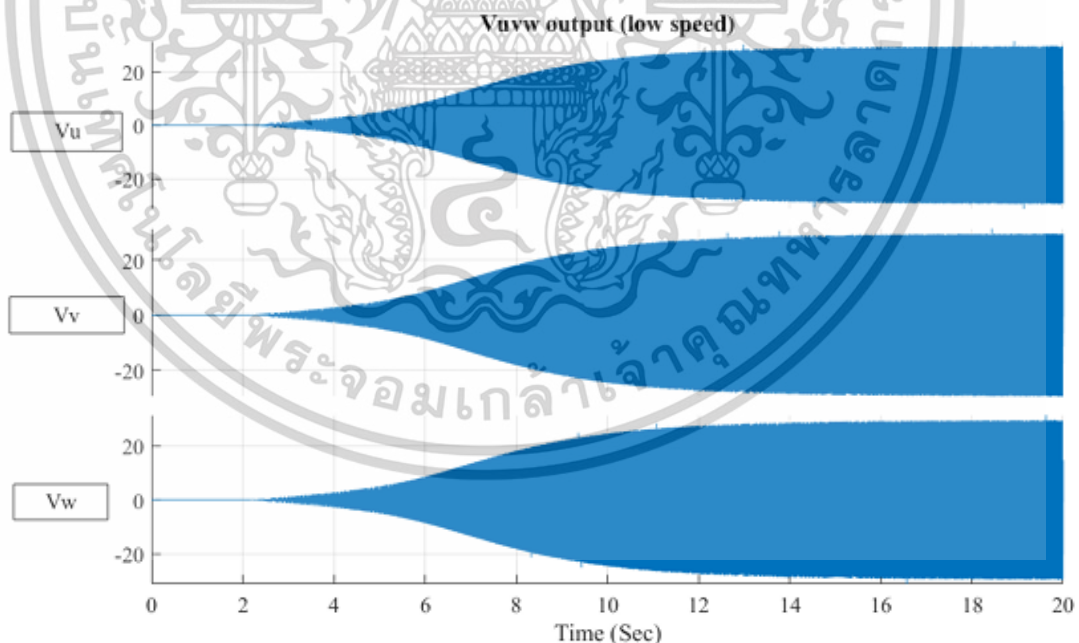
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) ความเร็วลมต่ำ (Low Wind Speed)

ความเร็วลมต่ำ (โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 2 - 4 เมตรต่อวินาที) กังหันลมอาจเริ่มหมุนแต่ยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบางกรณีแรงดันไฟฟ้าที่ได้อาจอยู่ในระดับต่ำมาก หรือไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานจริง ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมที่ใช้ การทดสอบพบว่าที่ความเร็วลมระดับนี้ กังหันลมอาจสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 20 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่

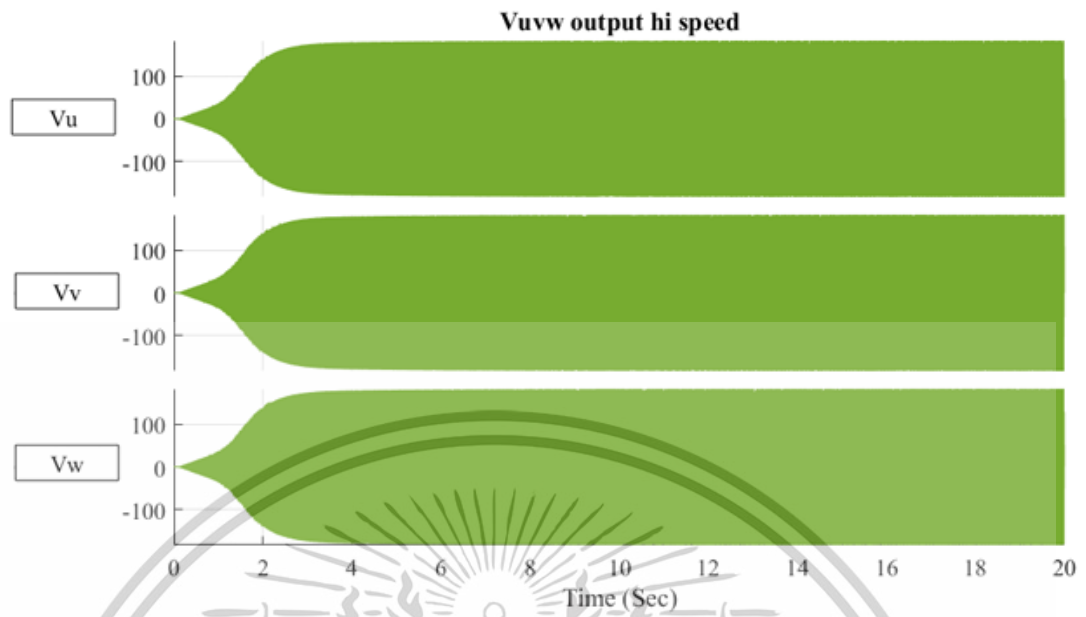
### 2) ความเร็วลมสูง (High Wind Speed)

เมื่อความเร็วลมสูงขึ้น (มากกว่า 10 เมตรต่อวินาที) กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ใบพัดหมุนด้วยความเร็วสูงขึ้น ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย การทดสอบในสภาวะความเร็วลมสูงพบว่าระบบสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 48 โวลต์ขึ้นไป ขึ้นอยู่กับขนาดและการออกแบบของกังหันลม อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความเร็วลมสูงเกินไป ระบบอาจต้องมีการควบคุมหรือจำกัดความเร็วของใบพัดเพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์และรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ การทดสอบที่ระดับความเร็วลมต่ำและสูงนี้ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ขีดจำกัดของกังหันลม และช่วยในการออกแบบระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.21 ค่าแรงดัน Vuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ความเร็วลมต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ค่าแรงดัน Vuvw Output จากชุดแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ความเร็วลมสูง

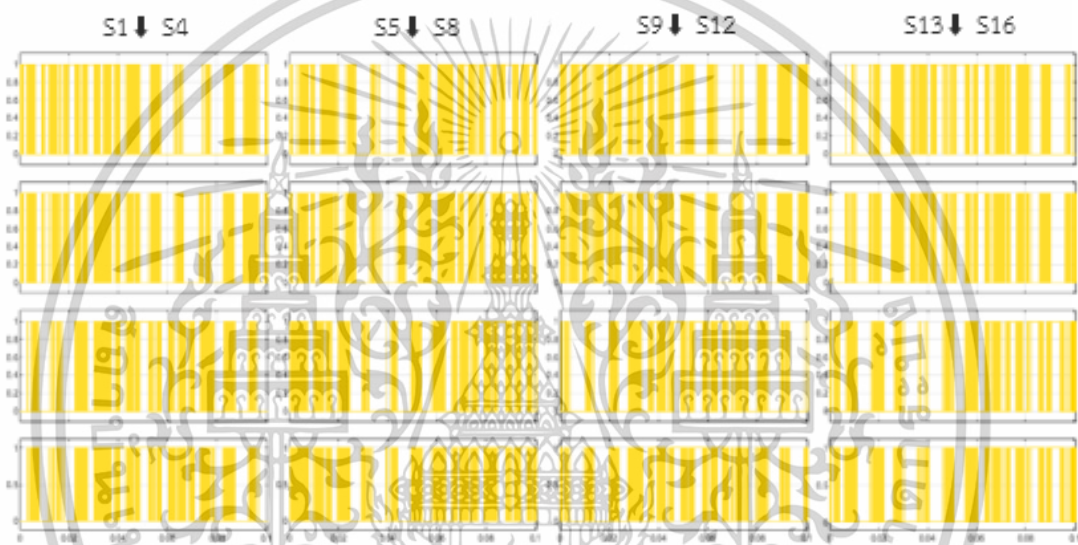
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ

#### 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อความชัดเจนและการทำความเข้าใจที่ดีขึ้น ขอแยกกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกดังแสดงที่ตาราง 4.1 ประกอบด้วย ระบบอินพุต ระบบสวิตซ์ซิ่ง และระบบเอาต์พุต ส่วนที่สองดังแสดงที่ตาราง 4.2 กล่าวถึงระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่ง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบทั้งหมดดังแสดงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟผลการทดลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ	หน่วย
แรงดันอินพุต	35	โวลต์
ความถี่	50	เฮิร์ตซ์
ความต้านทานทำงานของ IGBT	0.25	โอห์ม
ความเหนี่ยวนำของ IGBT	0.1	โวลต์
เวลาของกระแส IGBT ลดลงถึง 10%	1	นาโน-วินาที
เวลาของกระแส IGBT สิ้นสุด	0.02	ไมโคร-วินาที
ความต้านทาน Snubber ของ IGBT	10	โอห์ม
ความเหนี่ยวนำ Snubber ของ IGBT	0.1	ไมโคร-วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

ระบบ 4 step current commutation		
Frequency of MC with IGBT 1	1.721	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.602	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 2	2.132	กิโลเฮิร์ตซ์
	57.404	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 3	1.962	กิโลเฮิร์ตซ์
	65.021	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 4	1.973	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.120	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 5	1.991	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.918	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 6	1.971	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.192	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 7	1.891	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.341	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 8	2.070	กิโลเฮิร์ตซ์
	51.914	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 9	1.797	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.226	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 10	1.887	กิโลเฮิร์ตซ์
	59.503	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 11	1.644	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.810	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 12	1.821	กิโลเฮิร์ตซ์
	59.340	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 13	1.766	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.263	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 14	1.981	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.786	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 15	1.747	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.349	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency of MC with IGBT 16	1.917	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.579	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 17	1.784	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.454	เปอร์เซ็นต์
Frequency of MC with IGBT 18	1.911	กิโลเฮิร์ตซ์
	59.035	เปอร์เซ็นต์

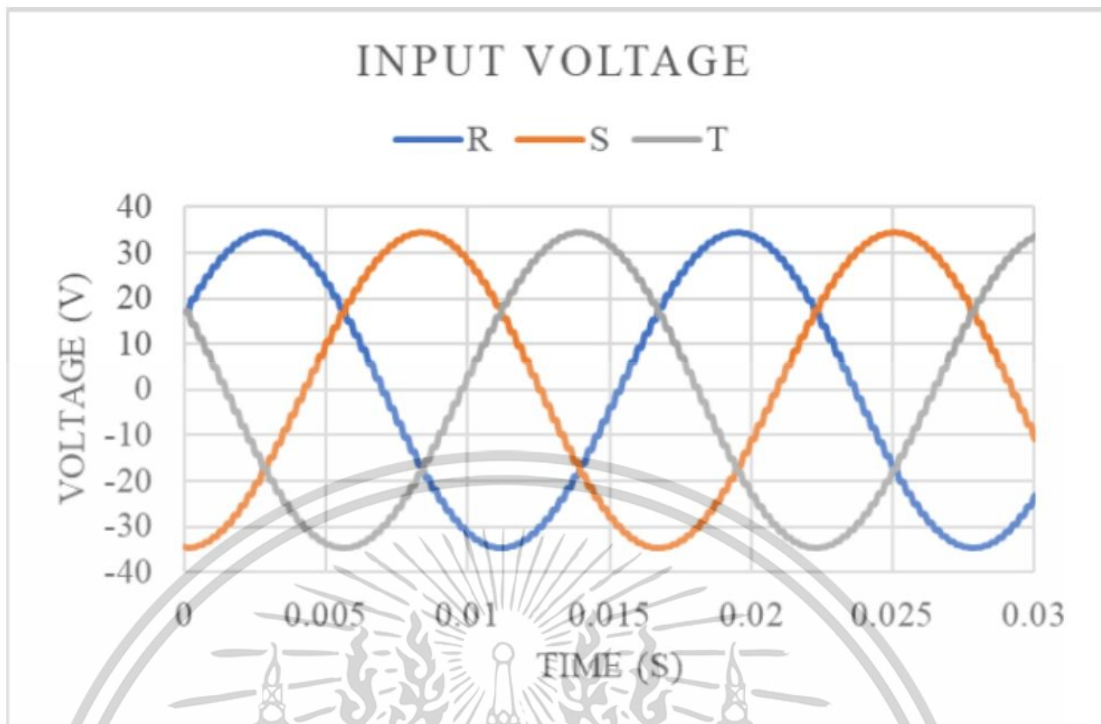
## 4.2 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ

การทดสอบในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Matrix Converter) ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเน้นการวิเคราะห์ความสอดคล้องของแรงดันเฟส การเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันจากด้านอินพุตไปยังด้านเอาต์พุต และประสิทธิภาพของระบบภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน รวมถึงการพิจารณาความถูกต้องของรูปคลื่น การเพี้ยนของสัญญาณ และสมรรถนะของการควบคุม

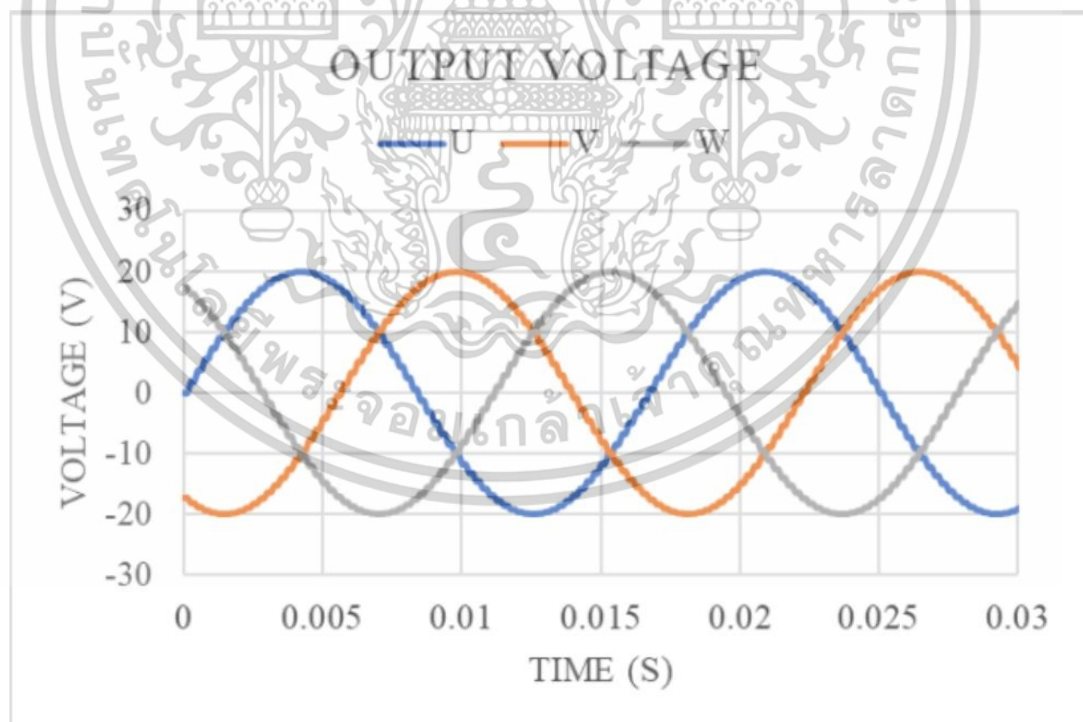
## 4.3 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดสอบแรงดันด้านอินพุตที่ได้มาจาก (PMSG) และแรงดันด้านเอาต์พุตแสดงดังในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ โดยแรงดันด้านอินพุต (เฟส R, S, T) เป็นรูปคลื่นไซน์มีค่าพีคประมาณ  $\pm 40$  โวลต์ แสดงถึงการจ่ายไฟแบบสมมาตรจากแหล่งจ่ายสามเฟส ซึ่งมีความถี่อยู่ที่ 50 Hz และลำดับเฟสเรียงกันอย่างถูกต้อง โดยไม่มีการเบี่ยงหรือคลื่นสัญญาณผิดเพี้ยนมากนัก สำหรับแรงดันด้านเอาต์พุต (เฟส U, V, W) หลังจากผ่านแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์พบว่าคลื่นแรงดันยังคงเป็นรูปไซน์เช่นกัน แต่ค่าพีคลดลงมาอยู่ในช่วงประมาณ  $\pm 30$  โวลต์ ซึ่งเกิดจากการควบคุมของวงจรแปลงและการสูญเสียบางส่วนภายในระบบ สัญญาณเอาต์พุตยังคงมีความถี่และลำดับเฟสที่สอดคล้องกับด้านอินพุต ซึ่งเป็นข้อพิสูจน์ถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แรงดันอินพุต (เฟส R, S, T)



รูปที่ 4.3 แรงดันด้านเอาต์พุต (เฟส U, V, W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า

ในการทดสอบค่ากระแสในแต่ละเฟสมีการวัดค่ากระแสทั้งด้านอินพุตและด้านเอาต์พุต พบว่ากระแสด้านอินพุตมีลักษณะสมมาตร และเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สัมพันธ์กับแรงดัน กล่าวคือ มีการส่งพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจากแหล่งจ่ายไปยังระบบกระแสด้านเอาต์พุตมีลักษณะคล้ายกับด้านอินพุต โดยมีค่าแอมพลิจูดต่ำลง ซึ่งเป็นผลจากการปรับแรงดันและความต้านทานของโหลด รูปคลื่นกระแสยังคงความเป็นไซน์อยู่ในระดับที่น่าพอใจ ไม่มีการผิดเพี้ยนมากนัก การคำนวณค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD) ของกระแสอยู่ในระดับต่ำกว่า 5% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งานในระบบพลังงานหมุนเวียนหรือเชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้าแต่ค่าที่ทดสอบเป็นเพียงค่าที่ใช้การทดสอบเท่านั้นไม่สามารถนำไปใช้ทดสอบในงานจริงได้

#### 4.5 การวิเคราะห์พลังงานและประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ด้านพลังงานไฟฟ้าทำโดยการคำนวณค่ากำลังงานที่จ่ายเข้าและออกจากระบบ ทั้งในรูปของกำลังจริง (Real Power, P) กำลังรีแอคทีฟ (Reactive Power, Q) และกำลังปรากฏ (Apparent Power, S) กำลังด้านอินพุตเฉลี่ย 240 W กำลังด้านเอาต์พุตเฉลี่ย 225 W ประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ประมาณ 93.75% ค่าประสิทธิภาพที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีการสูญเสียพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับระบบแปลงพลังงานแบบอื่น เช่น อินเวอร์เตอร์แบบมีตัวเก็บประจุ โดยไม่มีการสูญเสียจากการชาร์จ/ดิสชาร์จ ทำให้สามารถถ่ายโอนพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันได้ว่าระบบมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบผลิตพลังงาน เช่น ระบบกังหันลม หรือระบบพลังงานทดแทนอื่น ๆ

#### 4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงพลังงานด้วยแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ พบว่าผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะที่ระบุไว้ในเอกสารทางวิชาการ เช่น การรักษารูปคลื่นไซน์ ความถูกต้องของลำดับเฟส และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกต่ำ นอกจากนี้ เมื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ “X. Yu et al. (2019)” ซึ่งศึกษาระบบควบคุมแบบ Space Vector Modulation สำหรับแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในระบบพลังงานลม ก็พบว่าค่าความเพี้ยนของแรงดันและกระแสในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงใกล้เคียง และมีประสิทธิภาพของระบบมากกว่า 90% เช่นเดียวกัน จากการเปรียบเทียบนี้สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ออกแบบและทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีพฤติกรรมสอดคล้องกับทฤษฎี และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของงานวิจัยระดับสากล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การอภิปรายผล

จากผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปประเด็นที่น่าสนใจได้ดังนี้ ประสิทธิภาพของระบบ การสูญเสียพลังงานอยู่ในระดับต่ำ และสามารถส่งผ่านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า 90% ซึ่งเป็นข้อดีของแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีตัวเก็บประจุ ทำให้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการการตอบสนองรวดเร็ว คุณภาพของแรงดันและกระแส รูปคลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นไซน์อย่างสมบูรณ์ แรงดันและกระแส ส่งผลดีต่อระบบโหลด เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ต้องการแรงดันคุณภาพสูง ข้อจำกัดระบบยังมีข้อจำกัดในเรื่องของแรงดันพีคที่เอาต์พุตต่ำกว่าด้านอินพุตเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการควบคุมของสวิตช์และการสูญเสียในวงจร ซึ่งอาจต้องมีการปรับปรุงหรือติดตั้งวงจรชดเชยในกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ความเหมาะสมของเทคนิคควบคุมการใช้ Matrix converter ทำให้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ดีและลดการสวิตชิงฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้เทคนิคนี้ในระบบแปลงพลังงาน โดยสรุป การทดสอบและการวิเคราะห์ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบแปลงพลังงานด้วยแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทั้งในด้านคุณภาพของสัญญาณและประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบพลังงานหมุนเวียนได้อย่างเหมาะสมแต่เป็นเพียงค่าที่ใช้ทดสอบในห้องทดลองเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ

### 5.1 บทสรุป

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบและวิเคราะห์ระบบแปลงพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยไม่ต้องอาศัยตัวเก็บประจุในการพักพลังงาน การใช้เทคนิคการสวิตช์แบบ Matrix converter ทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันและกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการจำลองและทดสอบระบบพบว่า แรงดันและกระแสเอาต์พุตมีลักษณะเป็นไซน์ มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกต่ำ และประสิทธิภาพของระบบโดยรวมสูงกว่า 90% แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ โดยเฉพาะในระบบพลังงานหมุนเวียน เช่น กังหันลม หรือระบบเชื่อมต่อกริดไฟฟ้า

### 5.2 ปัญหาที่พบ

แม้ผลการทดลองจะอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แต่ยังคงพบปัญหาบางประการ ได้แก่:

1. แรงดันเอาต์พุตมีค่าพีคต่ำกว่าด้านอินพุตประมาณ 20-25% ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานกับโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง
2. มีการสูญเสียพลังงานในกระบวนการสวิตช์ซึ่งแม้จะไม่สูง แต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในช่วงเวลา
3. การควบคุมด้วย Matrix converter แม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ยังต้องการความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้หากไม่ได้สอบเทียบอย่างถูกต้อง

### 5.3 แนวทางการแก้ปัญหา

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว สามารถพิจารณาแนวทางดังต่อไปนี้:

1. เพิ่มวงจรชดเชยแรงดัน (Voltage Compensation Circuit): เช่น การเพิ่ม Boost Converter ด้านอินพุตก่อนเข้าสู่แมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้แรงดันที่สูงขึ้นและคงที่
  2. ปรับปรุงรูปแบบการสวิตช์โดยการเลือกความถี่สวิตช์ที่เหมาะสมหรือนำเทคนิคการควบคุมแบบ Predictive Control มาร่วมใช้งานกับ Matrix converter เพื่อลดการสูญเสียจากสวิตช์
  3. พัฒนาโมเดลการควบคุมอัจฉริยะ เช่น การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) หรือการควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตอบสนองของระบบต่อพารามิเตอร์ที่
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงจากการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่าระบบแมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีศักยภาพสูงในการนำไปใช้งานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการระบบแปลงพลังงานที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] S. Tammaruckwattana and K. Ohyama. 2012. “Experimental Verification of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Generator by Wind Turbine Emulator.” Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajirohigashi, Higashi-ku, Fukuoka (Japan).
- [2] K. Ohyama and T. Nakashima. 2010. “Wind Turbine Emulator Using Wind Turbine Model Based on Blade Element Momentum Theory.” Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajirohigashi, Higashi-ku, Fukuoka (Japan).
- [3] S. Tammaruckwattana, C. Yue, and K. Ohyama. 2014. “Comparison of Switching Losses of Matrix Converters for Commutation Methods.” Fukuoka Institute of Technology 3-30-1 Wajirohigashi, Higashi-ku Fukuoka, Japan.
- [4] N. Suppaadirek, S. Ruengkittrakarn, and S. Tammaruckwattana. 2022. “Wind Turbine Emulator for Wind Power Generation System.” School of Engineering King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
- [5] S. Tammaruckwattana, P. Kawpukdee, N. Suppaadirek, R. Gullayanono and A. Rerkratn. 2022. “Commutation Methods of AC-AC Converter for Wind Power Generation System.” School of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
- [6] Prof H.du T. Mouton. 2004. “A THREE-PHASE AC/AC MATRIX CONVERTER SYSTEM.” degree of Master of Science in Engineering at the University of Stellenbosch.
- [7] Z. Luca. 2007. “Control of Matrix Converters.” DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING at the University of Bologna.
- [8] R. Ghoni and H. Rashag. 2011. “Issues of matrix converters: Technical review.” TATI University College and Al-Furat Al-Awsat Technical University.
- [9] วิโชค โห้ทองคำ และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ. 2545. “การออกแบบ สร้าง และพัฒนา 3-เฟส เมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์.” นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ.
- [10] ชัชวาลย์ เจริญบุตร เจษฎา ธีระนันท์ และ ประจักษ์ บุญภักดี. 2015. “การพัฒนาและควบคุมเมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์ป้อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแหล่งพลังงานหมุนเวียน.” ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] จันจิรา เจือกโ้ว้น และ ชำนาญ ปัญญาใส. 2023. การออกแบบวงจรด้วย FPGA (FPGA Design). [Online]. [https://gear.kku.ac.th/~ying/188360%20AdvDSD/fpga\\_design.pdf](https://gear.kku.ac.th/~ying/188360%20AdvDSD/fpga_design.pdf).
- [12] Prof H. du T. Mouton. 2004. "A THREE-PHASE AC/AC MATRIX CONVERTER SYSTEM." degree of Master of Science Engineering at the University of Stellenbosch.
- [13] Z. Luca. 2007. "Control of Matrix Converters." DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING at the University of Bologna.
- [14] R. Ghoni and H. Rashag. 2011. "Issues of matrix converters: Technical review." TATI University College and Al-Furat Al-Awsat Technical University
- [15] M. A. Mueller, "Design of Low Speed Switched Reluctance Machines for Wind Energy Converters," 9th International Conference on Electrical Machines and Drives, Canterbury, 1999, pp. 60-64.
- [16] M. A. Mueller, "Design and Performance of a 20 kW, 100 rpm, Switched Reluctance Generator for a Direct Drive Wind Energy Converter," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, 2005, pp. 56-63. doi:10.1109/IEMDC.2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่และตีพิมพ์


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่และการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการระดับนานาชาติในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีรายละเอียดดังนี้

- [1] C. Juntham and S. Tammaruckwattana, "Application of Matrix Converter to Wind Power Generation System," 20th International Conference on Engineering Applied Sciences, and Technology (ICEAST), 2024, pp. 1-6.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**The 10th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology 1 – 4 May 2024, at Luang Prabang, Lao PDR**

The International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) was inaugurated in 2007 to provide opportunities for enhancing collaboration and exploring current interdisciplinary topics. This year is the 10th event and being held in Luang Prabang, Lao PDR, a prime location in Lao PDR which has overfull of things to see and things to do.

## Call for Paper

**Track 1 - Industrial Engineering, Materials, Nanotechnology, and Manufacturing**

Operations Research  
Production and Operations Management  
Quality Control and Management  
Maintenance Engineering  
Logistics and Supply Chain Management  
Systems Modeling and Simulation  
CAD/CAE/CAM  
Machine Tools and Manufacturing Processes  
Biomaterials and carbon-based materials  
Theoretical and computational science of materials  
Nanomaterial and applications  
Energy and environment materials  
Materials for health science  
Optical and electronic materials  
Metal alloys and composite materials  
Material process and manufacturing  
Materials Characterization  
Materials Degradation  
Nanotechnology

**Track 2 - Mechanical, and Civil Engineering**

Mechanical Design and Dynamics of Mechanism  
Fluid Mechanics, Combustion and Engineering Physics  
Heat and Mass Transfer  
Vibration Measuring and Reliability Analysis  
Finite Element Analysis for Mechanical Engineering  
Civil and Environmental Engineering  
Applied Computer for Civil and Environmental Engineering  
Construction Engineering and Management  
Geographical Information Systems  
Geotechnical Analysis and Design  
Infrastructure Life-Cycle Management

**Track 3 - Food, Chemical and Agricultural Engineering**

Agricultural Machinery  
Soil and Water Engineering  
Agricultural Process Engineering  
Agricultural Environmental Engineering  
Precision Agriculture and Smart Farm Technology  
Petroleum and Petrochemical Technology  
Chemical Process Design, Simulation and Control  
Catalysis and Reaction Engineering  
Separation and Purification Technology  
Environmental, Safety, Health and Risk Management  
Food Engineering  
Food Process Engineering  
Food Biotechnology  
Post-Harvest Technology  
Food Science and Technology

**Track 4 - Electrical Engineering, Electronic Engineering, Telecommunication Engineering, Instrument and Control Engineering, Computer Science and Computer Engineering, Mechatronics Engineering, and Robotic and AI Engineering.**

**Track 4.1 - Electrical Engineering**  
Power generation, transmission, and distribution  
Renewable energy systems and technologies  
Power electronics and drives  
Electric machines and control  
Microgrids and smart grids  
Electrical energy storage systems  
High voltage engineering  
Energy efficiency and conservation  
Electromagnetic compatibility  
Power system stability and control  
Power quality and reliability  
Electrical safety and standards  
Energy management systems  
Transmission and lightning protection  
Electrical machines and drives for electric and hybrid vehicles

**Track 4.2 - Electronic Engineering**  
Analog and digital circuit design  
VLSI design and testing  
Electronic devices and materials  
MEMS and NEMS  
Nanoelectronics and nanotechnology  
Optoelectronics and photonics  
Electronic packaging and interconnects  
Printed and flexible electronics  
Electronic sensors and sensor systems  
RF and microwave circuits  
Power electronics and energy conversion  
Electronic design automation (EDA)  
Electronic testing and verification  
Cybersecurity for electronic systems  
Wearable and implantable electronics

**Track 4.3 - Telecommunications and Networking**  
Wireless communication systems  
Network architecture and protocols  
Internet of Things (IoT)  
5G and beyond  
Antennas and propagation  
Network security and privacy  
Satellite communication systems  
Cognitive radio networks  
Cloud computing and networking  
Vehicle-to-everything (V2X) communication

**Track 4.3 - Cont.**  
Optical communication systems  
Machine-to-machine (M2M) communication  
Mobile ad hoc networks  
Social networking and computing  
Network virtualization





**Track 4.4 - Computer Science and Information Technology**  
Artificial intelligence and machine learning  
Data science and analytics  
Computer vision and image processing  
Human-computer interaction  
Natural language processing  
Computer graphics and visualization  
Algorithms and data structures  
High-performance computing  
Information retrieval and search engines  
Cloud computing and services  
Computer security and privacy  
Software engineering and development  
Blockchain technology and applications  
Computational biology and bioinformatics  
Computer networks and distributed systems

**Track 4.5 - Instrumentation and Control Engineering**  
Sensors and actuators  
Control systems design and analysis  
Robotics and automation  
Biomedical instrumentation  
Intelligent control systems  
Industrial process control  
Mechatronics systems and design  
Control of renewable energy systems  
Fault diagnosis and fault-tolerant control  
Instrumentation for smart cities  
Process monitoring and optimization  
Control of electric drives and power electronics  
Motion control systems  
Navigation and guidance systems  
Cyber-physical systems

**IMPORTANT DATES**

Online Submission Open	Jan 04, 2024
Paper Submission Deadline	Feb 19, 2024
Notification of Acceptance	Mar 11, 2024
Camera Ready Deadline	April 01, 2024
Author Registration Deadline	April 01, 2024
Conference Date	May 1-4, 2024

**CONTACT**  
<https://iceast.kmitl.ac.th/2024/>  
email: iceast.con@gmail.com

Post-conference Publication  
\* The accepted paper in Track 1, Track 2, and Track 3 will not be submitted for inclusion into IEEE Xplore.  
\* The accepted papers in Track 4 will be submitted for inclusion into IEEE Xplore. (Project be allowed in track 4 are invited to submit a digital full version WITHOUT authors names and affiliations, in English, of 4 pages in standard IEEE two-column format only, retaining their original work and results, applications, and/or implementation in one or more of the listed areas. Papers must be submitted online only through the submission system of the conference website)  
\* High quality papers will be invited to submit an extended version of their work for potential publication in Engineering and Technology Horizons (formerly known as Engineering and Technology Journal) ESH, 0125-1724 (Print Version) which is an international peer-reviewed journal focusing on all aspects of engineering, published by School of Engineering, KMITL and indexed by TCI (T1) and Journal of Mobile Multimedia (JMM)  
ESH, 1550-4646 (Print Version) JMM is an international peer-reviewed journal focusing on all aspects of communication, industrial and manufacturing engineering, and media technology published by River Publishers, it is indexed by SJR (2022 Q3, Impact factor: 0.17), Scopus.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# APPLICATION OF MATRIX CONVERTER TO WIND POWER GENERATION SYSTEM

C. Juntham  
School of Engineering, King Mongkut's  
Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok, 10520, Thailand  
66016031@kmitl.ac.th

S. Tammaruckwattana\*  
School of Engineering, King Mongkut's  
Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok, 10520, Thailand  
sirichai.ta@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper presents the application of a three-phase matrix converter for wind power generation based on a permanent magnet synchronous generator (PMSG). The topology applied in the research is the  $3 \times 3$  - matrix topology consisting of nine bi-directional switches. This paper focuses on the simulation of the proposed system using the MATLAB/Simulink program to design the control algorithm for the PMSG. The algorithm and switching strategies acquired from the simulation will then be implemented on the real system using FPGA as the processor.

**Keywords**—Bi-Direction Switch, Commutation method, Matrix converter, Simulation, Switching loss.

## I. INTRODUCTION

Wind Energy has been interesting nowadays as it emits zero pollution into the atmosphere. Several research has been conducted based on a doubly fed induction Generator (DFIG) and a permanent magnet synchronous generator (PMSG). However, the PMSG has more efficiency as it has no copper loss on the rotor because there is no conductor installed in the rotor system. Wind power generation requires the power converter to control the PMAG to track the maximum power point as well as to control the reactive power at the grid side. Back-to-back converters are the common choice because of their mature technology. However, they require a dc-link capacitor causing an increase in the size of the converter system. A matrix converter is a converter that can convert an alternating current source to a variable frequency output. Several research have been conducted to check the feasibility of using it for driving generators.

This paper is organized by starting from the application of the matrix converter for wind energy conversion in section 2. Section 3 concerns the simulation system of the matrix converter for driving the PMSG. Section 4 presents the simulation results and finally concludes in section 5.

## II. SYSTEMS OF MATRIX CONVERTER USED WITH WIND TURBINE

The structure of the wind generator system consists of the generator connected to the grid via a matrix converter. In this paper, the nine-bi-directional switch converter is applied for driving the generator as shown in Fig. 1. In this research, the FPGA is used for controlling and generating the PWM signal for the converter. Several types of switches have been

applied to construct the matrix converter. However, in this research, the anti-parallel type is applied as shown in Fig.2. This topology has low conduction loss as well as a sparse number of switching devices.

The main advantage of the matrix converter is that no DC-link is required compared with the normal back-to-back converter, so the degradation problem of the DC-link capacitor is eliminated.

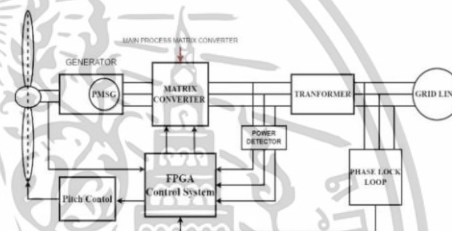


Fig. 1. Wind turbine system using matrix converter.

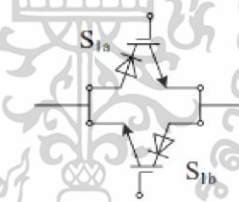


Fig. 2. Inside systems of matrix converter used with wind turbine.

## III. CONTROL SYSTEM

The section focuses on a detailed explanation of the proposed system. The system consists of the wind turbine simulator working with the PMSG. Control of the matrix converter is the main purpose of this research. In this paper, the simulation of a matrix converter using the MATLAB/Simulink program is discussed. This section is separated into sub-sections: wind turbine system model, switching system simulation model, and commutation method for matrix converter.

A. Wind Turbine system model.

This section discusses the researcher who has designed a wind turbine systems model shown in Fig. 3 to test the performance of the matrix converter for actual use in wind turbines and considers the benefits in the future of producing the hardware. to be used in future industries

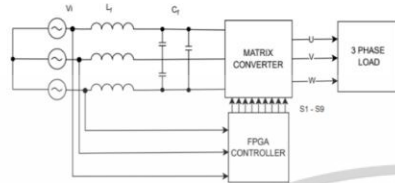


Fig. 3. The proposed control system.

B. Wind Turbine Emulator. [9]

Fig. 4 shows the basic structure of the wind turbine emulator. The wind turbine model is based on the blade element momentum theory [13]. The wind turbine model consists of the three-dimensional table data of wind turbine characteristics and the mechanical model considers the difference between real wind turbine and induction motor. The wind velocity  $V_0$  is given as a condition of emulation. The windmill rotational speed  $\omega_r$  is detected with the rotary encoder (RE). The  $V_0$  and  $\omega_r$  are used as inputs of the three-dimensional table.

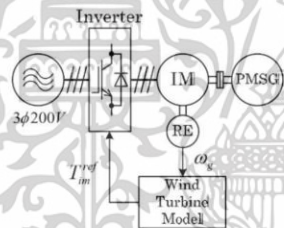
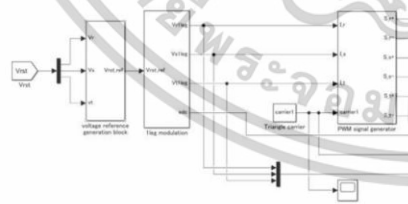


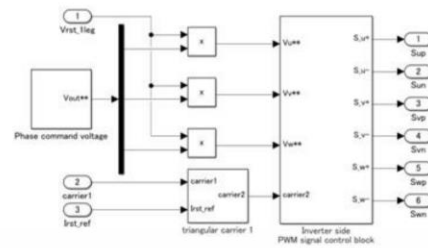
Fig. 4. Wind turbine emulator.

C. Switching control system simulation model.

From Fig. 5 the model in MATLAB/Simulink program, as shown in Fig. 5



(a). Converter control



(b). Inverter control

Fig. 5. Switching control system model of a matrix energy conversion system in MATLAB/Simulink program.

D. Switching circuit model.

From Fig. 6 we will set the switching circuit to 1 block out of 9 blocks to see an overview of the internal circuit set.

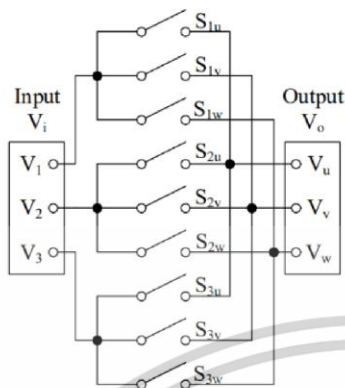


Fig. 6. Switching Circuit model of a matrix energy conversion system in MATLAB and Simulink programs.

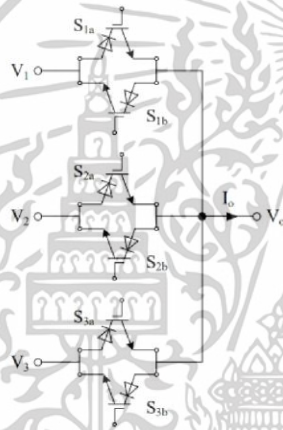
E. Commutation method of matrix converter.

A commutation system [10-11] is a system that controls the flow direction of current in the switching body, which is a type of reverse-blocking insulated gate bipolar transistor. There are 5 types of commutation methods: Commutation with a 2-step voltage control method (2V), 2-step current control method (2C), control method Current and voltage in 3 steps (3VC), Commutation with a 4-step voltage control method (4V), Commutation with a 4-step current control method (4C) as shown in Fig 7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a). Main circuit.



(b). RB-IGBT circuit.

Fig. 7. Main circuit using commutation method of matrix converter.

IV. SIMULATION SYSTEM

Some prototypes of machines have been designed with various types of controls and switching. Using mathematical calculations this control is offered as a solution for FPGA by the Xilinx flexible programmable gate array (FPGA) chip. FPGAs are an attractive alternative for building matrix converter systems. Steps to use the device The results obtained from the experiment are presented in the simulation results section.

V. SIMULATION RESULTS

The simulation results for the 4-step current control are shown in Fig. 8. Method Take the switching model block of a matrix converter energy conversion system and set the

desired signal value in the range of 3-phase sine waveform at a time of 0.001 seconds to 0.03 seconds and set the switching on and off control as Follow the 4-step control method, then run the simulation and check the results to determine the switching of the matrix energy conversion system. Is the converter working as intended? Improve and evaluate the system as needed. Testing and simulating the on and off control system of the 4-step current control switching method in the matrix converter power conversion system is a key step in the analysis and development of the control system of the matrix converter. The results are according to the circuit shown in Fig. 9.

However, after we have the PWM signal used to control the Gate pin of the IGBT in each phase as shown in Fig 10. The result will be that the input signal will have a stable signal as shown in Fig 11. but in the part of the signal that passes through the matrix converter shown in Fig 12. we can see from the signal period that occurs at any time there will be a different signal period. The reason is due to the commutation of the system.

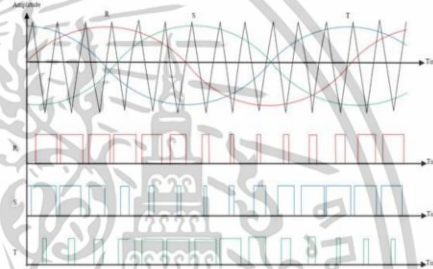


Fig. 8. PWM modulated triangle signal.

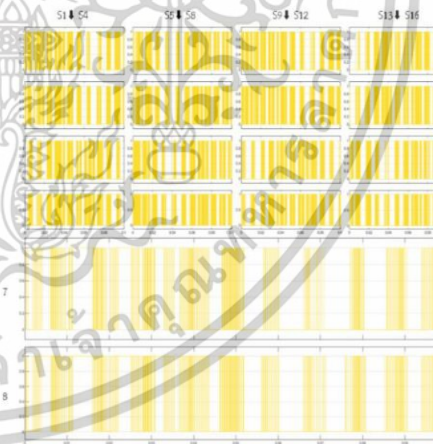


Fig. 9. Switching on-off switches of 18 matrix converters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย โชติวัฒน์ จันธรรม  
วัน เดือน ปีเกิด 6 มิถุนายน 2543  
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 32/57 หมู่ 6 ตำบล สัตหีบ อำเภอ สัตหีบ จังหวัด ชลบุรี  
รหัสไปรษณีย์ 20180

### ประวัติการศึกษา:

2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตขั้นสูงสถาบัน(เกียรตินิยมอันดับ 2) เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
2566 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:

2567 ตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการในหัวข้อ "Application of Matrix Converter to Wind Power Generation System," 20th International Conference on Engineering Applied Sciences, and Technology (ICEAST), 2024"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้