

ระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์  
MATRIX CONVERTER POWER CONVERSION




ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของภาคการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2566

# MATRIX CONVERTER POWER CONVERSION

THANAKORN TIAMSORN

NUREENA KALONG

PHOPTHAM WONGWANTHANAKUL




A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2023

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ ระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์  
MATRIX CONVERTER POWER CONVERSION

นักศึกษาผู้จัดทำ นายธนกร เทียมสอน รหัสนักศึกษา 64015055  
นางสาวนุรีนาร์ กาหลง รหัสนักศึกษา 64015073  
นายพชรธรรม ว่องวรรณะกุล รหัสนักศึกษา 64015095

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2566

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สิริชัย ธรรมรักษ์วัฒน์	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ MATRIX CONVERTER POWER CONVERSION	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายธนกร เทียมสอน	รหัสนักศึกษา 64015055
	นางสาวนุรีนาร์ กาหลง	รหัสนักศึกษา 64015073
	นายพบธรรม ว่องวรรณะกุล	รหัสนักศึกษา 64015095
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ศิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์	
ปีการศึกษา	2566	

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมและจำลองการทำงานของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Matrix Converter) ในระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้า จุดประสงค์เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในความเร็วที่แตกต่างกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยวงจรถูกอินพุต วงจรกำลังสวิตช์ซึ่งของระบบการแปลงพลังงาน วงจรควบคุม วงจรกำลังสวิตช์ซึ่งของระบบการแปลงพลังงาน และวงจรถูกเอาต์พุต ซึ่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นในส่วนของการควบคุมการเปิดและปิดของวงจรถูกสวิตช์แบบสองทิศทาง (Bi-Direction Switch) จำนวน 9 ตัว ซึ่งเป็นหัวใจหลักในระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB & Simulink ในการทดสอบการทำงานของระบบและใช้การจำลองการควบคุมสวิตช์ด้วยบอร์ดควบคุม FPGA เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการทำงานและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบก่อนที่จะนำไปใช้งานในระบบจริง

**Thesis** MATRIX CONVERTER POWER CONVERSION  
**Student** Mr. Thanakorn Tiamsorn Student ID. 64015055  
Miss Nureena Kalong Student ID. 64015073  
Mr. Phoptham Wongwanthanakul Student ID. 64015095  
**Thesis Advisor** Asst.Prof.Dr.Sirichai Tammaruckwattana  
**Year** 2023

## ABSTRACT

This thesis presents the control and simulation of the Matrix Converter power conversion system in a wind turbine generation system to produce electricity. The purpose is to test the power conversion efficiency at different speeds. It consists of an input circuit, switching power circuit of a power conversion system, control circuit, switching power circuit of a power conversion system and output circuit. This thesis will focus on controlling the opening and closing of bidirectional switching circuits, consisting of nine switches, which is the core of the Matrix Converter power conversion system by using MATLAB & Simulink programs to test the system's operation and using a simulation of switching control with an FPGA control board to demonstrate the feasibility and efficiency of the system before testing it in the real system.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขเนื้อหาสาระข้อบกพร่องต่าง ๆ ของโครงการ รวมถึงจัดหาสิ่งสำคัญอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำปริญญาโทในครั้งนี้ อีกทั้งยังเอื้อเพื่ออุปการณที่จำเป็นต่อโครงการมากมาย จนทำให้ตลอดระยะเวลาของการศึกษาโครงการในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้สั่งสอนในเนื้อหาวิชาการ ประสิทธิ์ประสาทความรู้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาวิศวกรรมการวัดคุมที่คอยช่วยเหลือและต่างก็ให้กำลังใจในระหว่างการทำโครงการที่อาจพบเรื่องผิดพลาดและไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยคณะผู้จัดทำ

และที่ลืมไม่ได้เสีย ทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอขอบคุณคุณขอขอบคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้านการศึกษาด้วยดีเสมอมา อีกทั้งยังเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาโทจนประสบผลสำเร็จเช่นนี้ได้ คุณค่าและคุณประโยชน์จากการทำปริญญาโทในครั้งนี้ ผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยในโครงการชิ้นนี้ประสบผลสำเร็จ

ธนกร เทียมสอน  
นุรีนาร์ กาหลง  
พชรธรรม ว่องวรรณกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์ .....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์ .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ .....</b>	<b>4</b>
2.1 อิเล็กทรอนิกส์กำลัง .....	4
2.1.1 อุปกรณ์โซลิตสแตต .....	4
2.1.1.1 ไดโอด .....	4
2.1.1.2 ไดโอดเปล่งแสง .....	5
2.1.1.3 ตัวต้านทาน .....	5
2.1.1.4 Clamp Circuit .....	6
2.1.1.5 Insulated Gate Bipolar Transistor .....	6
2.1.2 การแปลงระบบไฟฟ้า.....	7
2.1.2.1 AC to DC วงจรเรียงกระแส .....	7
2.1.2.2 DC to AC วงจรอินเวอร์เตอร์ .....	8
2.1.2.3 DC-DC วงจรชอปเปอร์ .....	8

## สารบัญ (ต่อ)

2.1.2.4 AC-AC วงจรควบคุมแรงดัน .....	8
2.2 Matrix Laboratory .....	11
2.3 ระบบอินพุต.....	12
2.3.1 กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า .....	13
2.3.1.1 ชุดจำลองกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า .....	13
2.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	14
2.3.2.1 ชุดจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	15
2.4 ระบบสวิตซ์ซิ่ง .....	17
2.4.1 การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	17
2.5 ระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่ง.....	19
2.5.1 การวิเคราะห์และการสังเคราะห์ความถี่สูง .....	19
2.5.2 ระบบ Commutation .....	19
2.5.2.1 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V).....	20
2.5.2.2 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....	22
2.5.2.3 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC).....	23
2.5.2.4 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V).....	25
2.5.2.5 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C).....	26
2.6 ระบบเอาต์พุต.....	27
2.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง.....	27
2.6.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	27
2.7 ชุดควบคุม .....	28
2.7.1 ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ออกแบบ .....	29
2.7.1.1 VHDL Hardware Description Language .....	29
2.7.1.2 Verilog .....	29
2.7.1.3 SystemVerilog.....	29
2.7.1.4 MyHDL.....	29
2.7.2 ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบ .....	31
2.7.2.1 Xilinx Vivado .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

2.7.2.2 Altera Quartus Prime.....	31
2.7.2.3 Lattice Diamond.....	31
2.7.3 Basys3 FPGA Board.....	32
2.7.3.1 ภาคจ่ายไฟ.....	33
2.7.3.2 หน่วยความจำ.....	33
2.7.3.3 อินพุต/เอาต์พุต.....	34
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการ.....</b>	<b>35</b>
3.1 วิธีดำเนินการ.....	35
3.2 ภาพรวมการทำงานของระบบ.....	36
3.2.1 แบบจำลองระบบอินพุต.....	37
3.2.2 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่ง.....	39
3.2.3 ระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่ง.....	40
3.2.3.1 ระบบ Converter controller.....	41
3.2.3.2 ระบบ Inverter controller.....	44
3.2.3.3 ระบบ Pulse composition.....	46
3.2.3.4 ระบบ Commutation.....	49
3.2.4 ระบบเอาต์พุต.....	53
3.4 การออกแบบ.....	54
3.5 สร้าง Prototype.....	55
<b>บทที่ 4 การทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ.....</b>	<b>58</b>
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	58
4.2 ผลการทดสอบระบบการทำงานการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	59
4.3 กราฟสัญญาณไซน์อินพุตและสัญญาณไซน์เอาต์พุตเมื่อผ่านการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	75
4.4 แสดงสถานะการทำงานสวิตซ์ซิ่ง IGBT ผ่าน LED.....	79

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ.....	81
5.1 บทสรุป.....	81
5.2 ปัญหาที่พบ.....	81
5.3 วิธีแก้ปัญหา.....	81
5.4 ข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อ.....	81
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	99

# สารบัญตาราง

รูปที่	หน้า
3.1 ตารางความจริงของ AND Gate .....	47
3.2 ตารางความจริงของ OR Gate.....	47
3.3 ตารางความจริงของ D-flip flop .....	48
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบอินพุต ระบบสวิตซ์ซิง และระบบเอาต์พุต.....	58
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุมสวิตซ์ซิง.....	59
4.3 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์.....	60
4.4 ผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์.....	61
4.5 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	63
4.6 ผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	64
4.7 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์.....	66
4.8 ผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์.....	67

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ไดโอด.....	5
2.2 สัญลักษณ์ไดโอดเปล่งแสง.....	5
2.3 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ .....	6
2.4 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ .....	6
2.5 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดปรับแต่งค่าได้.....	6
2.6 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดแบ่งค่าได้.....	6
2.7 สัญลักษณ์ IGBT.....	7
2.8 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back-to-Back PWM Converter .....	9
2.9 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบการแปลงพลังงานแบบ Boost Converter.....	10
2.10 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter.....	10
2.11 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter.....	11
2.12 ระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	12
2.13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดกักเก็บพลังงานขนาดกำลัง 300 วัตต์ .....	13
2.14 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ของชุดกักเก็บพลังงานกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	14
2.15 ระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	15
2.16 วงจรสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	18
2.17 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	18
2.18 วงจรสวิตซ์ซิงแบบนำกระแสหนึ่งทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบ .....	18
Back to Back converter	
2.19 สวิตซ์ซิงชนิด RB IGBT Bi-direction switch.....	20
2.20 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V) .....	20
2.21 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V) .....	21
2.22 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....	22
2.23 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C).....	22
2.24 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC).....	23
2.25 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC).....	24
2.26 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V) .....	25

## สารบัญรูป (ต่อ)

2.27 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V) .....	25
2.28 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) .....	26
2.29 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) .....	27
2.30 ตัวอย่างไอซี FPGA ของบริษัท Xilinx และบริษัท Intel .....	28
2.31 โครงสร้างภายใน FPGA ทั่วไป .....	28
2.32 แสดงขั้นตอนการออกแบบโดยใช้ FPGA .....	30
2.33 Basys3 FPGA Board .....	32
2.34 อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตบนบอร์ด Basys3 .....	34
3.1 Flow Chart แสดงวิธีการดำเนินงาน .....	35
3.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบกักเก็บผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบ เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB & Simulink .....	36
3.3 ระบบกักเก็บผลิตรกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	37
3.4 แบบจำลองระบบกำลังสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	37
3.5 แบบจำลองระบบอินพุตของชุดกักเก็บขนาดกำลัง 300 วัตต์ .....	38
3.6 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	38
รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis	
3.7 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	38
รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis	
3.8 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร .....	39
จากรูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis เป็นเฟส UWW	
3.9 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	39
3.10 แบบจำลองย่อยระบบสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	40
3.11 แบบจำลองระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	40
3.12 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสวิตซ์ซิ่งด้วยสัญญาณ PWM .....	41
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณมอดดูเลต และสัญญาณ PWM .....	42
3.14 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของชุด Converter ที่ใช้ในการควบคุม .....	42
3.15 แบบจำลองชุดวงจร Converter controller โดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุม .....	43
3.16 แบบจำลองย่อยชุดกำเนิดแรงดันอ้างอิงในวงจร Converter controller .....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

3.17 แบบจำลองย่อยชุด 1leg modulation ในวงจร Converter controller.....	43
3.18 แบบจำลองย่อย Triangle carrier ในวงจร Converter controller.....	44
3.19 แบบจำลองย่อยสัญญาณ PWM signal generator ในวงจร Converter controller.....	44
3.20 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของชุด Inverter ที่ใช้ในการควบคุม .....	45
3.21 แบบจำลองชุดวงจร Inverter controller โดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุม.....	45
3.22 แบบจำลองย่อยชุด Phase command voltage ในวงจร Inverter controller.....	45
3.23 แบบจำลองย่อยชุด Triangular carrier2 ในวงจร Inverter controller.....	46
3.24 แบบจำลองย่อยชุด Inverter side PWM signal control block ในวงจร Inverter controller.....	46
3.25 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุด Pulse composition.....	47
3.26 วงจร Logic gate ของ D-flip flop.....	48
3.27 แบบจำลองชุดวงจร Pulse composition.....	49
3.28 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation.....	50
3.29 แบบจำลองชุดวงจร Commutation.....	51
3.30 แบบจำลองย่อยชุด Commutation judgment ในวงจร Commutation .....	51
3.31 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation .....	52
3.32 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation .....	52
3.33 วงจรการไหลของแรงดันไฟฟ้า.....	53
3.34 แบบจำลองระบบเอาต์พุตโหลด RL ของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ .....	53
3.35 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้า.....	54
3.36 แผนภาพลายวงจรการเชื่อมต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้า.....	55
3.37 Prototype เชื่อมต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้า.....	55
3.38 บล็อกไดอะแกรมการประมวลผลด้วยบอร์ดควบคุม FPGA.....	56
4.1 กราฟผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์.....	69
4.2 กราฟผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์.....	70
4.3 กราฟผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์.....	71
4.4 กราฟผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์.....	72
4.5 กราฟผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์.....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

4.6 กราฟผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์.....	74
4.7 กราฟสัญญาณแรงดันอินพุต Vrst จาก 3 Phase Voltage ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์.....	75
4.8 กราฟสัญญาณแรงดันอินพุต Vrst จาก 3 Phase Voltage ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	75
4.9 กราฟสัญญาณแรงดันอินพุต Vrst จาก 3 Phase Voltage ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์.....	76
4.10 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์.....	76
4.11 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	77
4.12 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์.....	77
4.13 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์ เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ .....	78
4.14 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ .....	78
4.15 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ .....	79
4.16 ภาพโดยรวมของวงจรทั้งหมดในการทดลอง .....	79
4.17 ผลการจำลองวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน ผ่านบอร์ดควบคุม FPGA.....	80

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

แหล่งพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันของประเทศไทยผลิตมาจากก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก รองลงมาเป็นถ่านหิน เชื้อเพลิง และพลังงานหมุนเวียน แต่การผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติในไทยมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากต้องมีการควบคุมพลังงานและพิจารณาถึงความยั่งยืนของก๊าซธรรมชาติที่กำลังลดลงเรื่อย ๆ ทำให้อาจต้องมีการนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าในอนาคต ซึ่งอาจทำให้ประเทศมีความมั่นคงด้านพลังงานที่น้อยลง และมีความเสี่ยงหากเกิดปัญหาการนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากต่างประเทศ ในขณะที่เดียวกันหลายประเทศได้ให้ความสำคัญกับพลังงานหมุนเวียนเพราะมีหลายข้อได้เปรียบทั้งทางเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และความมั่นคงทางพลังงาน

ด้วยเหตุนี้ทางผู้จัดทำได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนในรูปแบบของพลังงานลมซึ่งเป็นทางเลือกเพื่อลดการพึ่งพาก๊าซธรรมชาติ มีความมั่นคงในการผลิต เพราะแหล่งพลังงานนี้ไม่จำเป็นต้องขึ้นอยู่กับทรัพยากร ทำให้ลดความเสี่ยงต่อการขาดแคลนทรัพยากรพลังงาน อีกทั้งยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน หากแต่มีการใช้ระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back PWM Converter ระหว่างการสร้างไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบพลังงานลมและการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่เครือข่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบการแปลงพลังงานที่มีความซับซ้อนในการควบคุม ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าดำเนินการสูงไปด้วย นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียพลังงานค่อนข้างมากระหว่างการแปลงพลังงาน

จากข้อเสียของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back PWM Converter ที่กล่าวมาข้างต้นด้วยความซับซ้อนของโครงสร้างการแปลงพลังงานไฟฟ้าถึง 2 ขั้นตอน คือ การแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ทางผู้จัดทำจึงได้ศึกษาค้นคว้าที่จะทำระบบการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (Matrix Converter) เป็นระบบการแปลงพลังงานเพียงขั้นตอนเดียว คือ การแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง ซึ่งมีจำนวนชุดระบบควบคุมที่น้อยกว่าระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back PWM Converter จึงส่งผลให้ค่าบำรุงรักษาของระบบลดลง ตลอดจนลดการสูญเสียพลังงานจากการแปลงพลังงานแบบ 2 ขั้นตอน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อสร้างระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

แปลงพลังงานด้วยระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ในความเร็วลมที่แตกต่างกันของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดกำลัง 300 วัตต์ ให้เป็นแรงดัน 380 โวลต์ และสัญญาณความถี่มาตรฐาน 50 เฮิรตซ์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทำการลดขั้นตอนในการแปลงพลังงานไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเก่าที่มีการแปลงพลังงานไฟฟ้า 2 ขั้นตอน คือ แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว คือ แปลงพลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง
- 2) สามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์กำลังที่ใช้ทำหน้าที่ตัดต่อในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเก่าให้ลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดต้นทุนของอุปกรณ์ลง
- 3) มีทักษะในการประยุกต์ใช้และบูรณาการความรู้ที่ได้เรียนมาดำเนินการโครงการ
- 4) สามารถนำผลงานนี้ไปตีพิมพ์เผยแพร่ได้

### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1) ศึกษากระบวนการแปลงพลังงาน เพื่อให้เข้าใจหลักการของการแปลงพลังงานที่มีมา
- 2) ศึกษาสวิตซ์ชิ่งและอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อทำการควบคุมกระแสและแรงดันในระบบการแปลงพลังงาน
- 3) ศึกษาวิธีการโปรแกรมบอร์ดควบคุม FPGA เพื่อทำการควบคุมการสวิตซ์ของระบบการแปลงพลังงาน
- 4) ประกอบโครงสร้างและทดสอบระบบการทำงานทั้งระบบ

### 1.6 รายละเอียดของปริญญาโท

ในปริญญาโทฉบับนี้มีรายละเอียดของเนื้อหาบทต่าง ๆ ซึ่งแบ่งได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ มีเนื้อหาเกี่ยวกับการอธิบายหัวข้อความสำคัญและประเด็นหลักของปริญญาโท รวมถึงวัตถุประสงค์ที่ต้องการดำเนินงานและขอบเขตที่ครอบคลุมระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีทางอุปกรณ์การแปลงพลังงานทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซอฟต์แวร์ทางวิทยาศาสตร์ที่มีการใช้งานในปริญญาโทรวมไปถึงงานวิจัยที่เคยมี

การตีพิมพ์และมีความเกี่ยวข้อง โดยจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สาระสำคัญของงานและเรียบเรียงให้ สอดคล้องกับระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 3 วิธีดำเนินการ มีเนื้อหาเกี่ยวกับวิธีที่มีการใช้ในการดำเนินงาน ระบุถึงเครื่องมือและเทคนิค ที่มีการใช้ในปริญญาโท พร้อมทั้งอธิบายการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมการแปลงพลังงานแบบ เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 4 การทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ มีเนื้อหาเกี่ยวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการ ดำเนินการ มีการวิเคราะห์ผลลัพธ์และเปรียบเทียบกับทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมการ แปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ มีเนื้อหาของการสรุปความสำคัญของ ผลลัพธ์และมีการเสนอแนวทางการวิจัยเพิ่มเติมที่เป็นไปได้ในอนาคต



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี ความรู้ในสาขา วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ที่เน้นการควบคุมและจ่ายพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบที่เหมาะสมตาม ความต้องการของระบบหรืออุปกรณ์ในลักษณะที่สอดคล้องกับระบบการทำงานและประสิทธิภาพที่ ต้องการ โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์โซลิดสเตต (Solid-State) ในการทำงานและ ควบคุมสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์

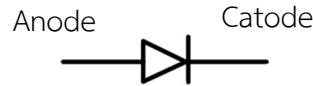
#### 2.1.1 อุปกรณ์โซลิดสเตต

โซลิดสเตต (Solid-State) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทฤษฎีและเทคโนโลยีของ ของแข็งจำพวกสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ เจอร์เมเนียม (Ge) และซิลิคอน (Si) เป็นต้น ซึ่ง สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดหลัก คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี (P-Type) ประกอบเป็นโครงสร้างรอยต่อพีเอ็น (P – N Junction) ที่เป็นส่วนสำคัญในการทำงาน ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

กลุ่มอุปกรณ์โซลิดสเตตมีหลากหลายชนิดและแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงกลุ่มอุปกรณ์ที่มีการใช้ในปริยญาณพนธ์ ดังนี้

##### 2.1.1.1 ไดโอด

ไดโอด (Diode) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งประกอบด้วยสองขั้ว คือ ขั้วบวก A (Anode) และขั้วลบ K (Cathode) ดังรูปที่ 2.1 ไดโอดมีคุณสมบัติพื้นฐานในการนำไฟฟ้า ทิศทางเดียวเท่านั้น คือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียวจากขั้ว A ไปหาขั้ว K และไม่ยอมให้ กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้ว K ไปยังขั้ว A วิธีการกระตุ้นให้ไดโอดทำงานจะเรียกว่าการไบแอส (Bias) ได้แก่ การให้ไบแอสตรง (Forward Bias) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดได้ และการให้ไบแอสกลับ (Reverse Bias) จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดไม่ได้ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงนิยมนำไดโอดมาใช้ เป็นตัวควบคุมทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกันและเป็นตัว ป้องกันกระแสไหลกลับทิศทางเดิม



รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ไดโอด

### 2.1.1.2 ไดโอดเปล่งแสง

ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปล่งแสงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศทางตรง โดยแสงถูกสร้างจากการทำงานของโครงสร้างรอยต่อพีเอ็น (การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน) ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสง ซึ่งปริมาณของแสงสามารถควบคุมได้โดยการปรับแปลงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ไดโอดเปล่งแสง

### 2.1.1.3 ตัวต้านทาน

ตัวต้านทาน (Resistor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ต้านการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าถูกจำกัดหรือถูกลดทอนลงเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์ เรียกว่าความต้านทาน (Resistance) ซึ่งความต้านทานมีความสัมพันธ์ต่อกระแสและแรงดันในวงจรไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ที่เป็นหลักการพื้นฐานในวงจรไฟฟ้าระบุว่า แรงดันไฟฟ้าเป็นผลลัพธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน กล่าวคือถ้าความต้านทานมีค่าสูงแรงดันไฟฟ้าก็จะมีค่าสูง แต่ถ้าความต้านทานมีค่าต่ำแรงดันไฟฟ้าก็จะมีค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกันกระแสไฟฟ้าเป็นผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วของวงจรและความต้านทาน เมื่อความต้านทานมากจะทำให้กระแสลดลงมากและเมื่อความต้านทานน้อยจะทำให้กระแสมาก โดยค่าความต้านทานจะขึ้นอยู่กับวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้ในตัวต้านทานนั้น สามารถคำนวณค่าความต้านทานที่ต้องการได้จากกฎของโอห์มที่ระบุว่าค่าความต้านทาน คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็นโอห์ม (สัญลักษณ์ :  $\Omega$ )

การเลือกใช้ตัวต้านทานขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและความต้องการเฉพาะของวงจร ในกรณีที่แบ่งตามการใช้งาน ได้แก่ ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ (Fixed Resistor) ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้ (Variable Resistor) ตัวต้านทานชนิดปรับแต่งค่าได้ (Adjustable Resistor) ตัวต้านทานชนิดแบ่งค่าได้ (Tapped Resistor) และตัวต้านทานชนิดพิเศษ (Special Resistor)



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดเปลี่ยนค่าได้



รูปที่ 2.5 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดปรับแต่งค่าได้



รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์ตัวต้านทานชนิดแบ่งค่าได้

#### 2.1.1.4 วงจรปรับระดับแรงดัน

วงจรปรับระดับแรงดัน (Clamp Circuit) เป็นวงจรที่ถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมและรักษาระดับของสัญญาณไม่ให้เกินหรือต่ำกว่าขอบเขตที่กำหนดไว้ ซึ่ง Clamp Circuit นิยมใช้ในการปรับระดับแรงดัน (Voltage) หรือปรับระดับกระแส (Current) ของสัญญาณ การทำงานของ Clamp Circuit ทำให้สัญญาณที่ผ่านนั้นไม่สามารถเกินระดับที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ Clamp Circuit สามารถใช้เพื่อลดหรือกำหนดสัญญาณให้ต่ำหรือระดับที่ต้องการได้

#### 2.1.1.5 Insulated Gate Bipolar Transistor

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า โดย IGBT เป็นอุปกรณ์ที่รวมคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์สองประเภท คือ Bipolar Junction Transistor (BJT) และ Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) มารวมกันในอุปกรณ์เดียว เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและความเสถียรสูงในการทำงานเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์แต่ละชนิดที่ใช้เพียงอย่างเดียว โดยใช้ประโยชน์จากการมีค่าความต้านทานอินพุตและความเร็วในการสวิตช์ที่สูงของ MOSFET ร่วมกับค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ต่ำของ BJT สร้าง

ทรานซิสเตอร์แบบใหม่ที่มีกระแสควบคุมที่ Collector-Emitter สูงและกระแสที่ใช้ในการขับ Gate ต่ำ กล่าวได้ว่า IGBT เป็นอุปกรณ์ถูกออกแบบมาแทนที่การใช้ MOSFET และ BJT ในงานที่ต้องการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันและกระแสสูง อีกทั้ง IGBT ยังมีความสามารถในการรับความถี่ของการสวิตช์ที่ค่อนข้างสูงได้อีกด้วย โดยโครงสร้างของ IGBT มีทั้งหมด 3 ขาหลัก ได้แก่ ขา Collector(C) ใช้ในการนำกระแสไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการจ่ายไฟ ขา Emitter(E) ใช้ในการนำกระแสไฟฟ้ากลับมา และขา Gate(G) ใช้ในการควบคุมการเปิดและปิดของ IGBT ดังรูปที่ 2.7

IGBT จะทำงานเมื่อมีการป้อนสัญญาณที่ขา Gate ซึ่งถ้าจ่ายแรงดันบวกระหว่างขา Gate กับขา Emitter จะเป็นการสั่งการให้ IGBT ทำงาน ในทำนองเดียวกันถ้าจ่ายแรงดันลบเข้าที่ขา Gate จะทำให้ IGBT ปิดการทำงาน



รูปที่ 2.7 สัญลักษณ์ IGBT

อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ในระบบสมัยใหม่มีหลายประเภทและมีหน้าที่ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพให้เหมาะสมกับงานควบคุมที่ต้องการ โดยมักเห็นอุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือการแปลงจากพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น IGBT หรือ MOSFET เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการเปิดและปิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำ

## 2.1.2 การแปลงระบบไฟฟ้า

ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าสามารถจำแนกตามชนิดของอินพุตและเอาต์พุตของพลังงานไฟฟ้า ได้แก่

### 2.1.2.1 AC to DC วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส (Rectifier) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ไดโอดหนึ่งตัวในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นหรือใช้ไดโอดหลายตัวในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นทิศทางเดียว

### 2.1.2.2 DC to AC วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์เพื่อสร้างรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกมาสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ของไฟฟ้าได้

### 2.1.2.3 DC-DC วงจรชอปเปอร์

วงจรชอปเปอร์ (Chopper) เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกค่าหนึ่งที่ต้องการ โดยจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างสวิตช์เปิดและปิดในรูปต่าง ๆ เพื่อควบคุมการไหลของไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้ามาสร้างรูปคลื่นแรงดันและความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ตามความต้องการ

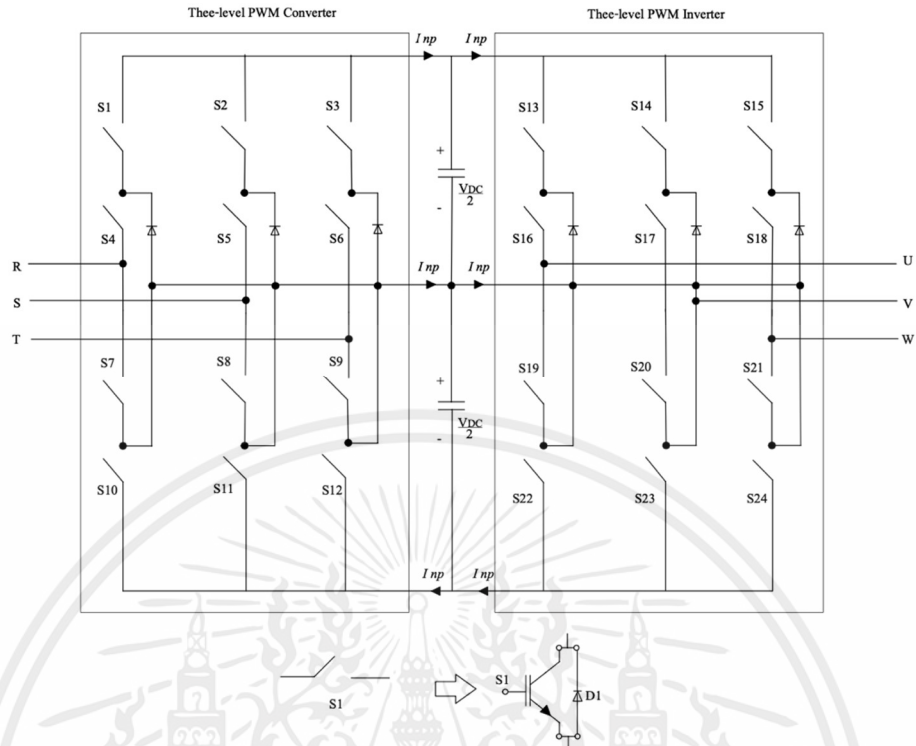
### 2.1.2.4 AC-AC วงจรควบคุมแรงดัน

ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับใช้สำหรับการแปลงรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอีกค่าหนึ่งที่ต้องการ

โดยในทางปฏิบัติระบบแปลงพลังงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ได้กล่าวไปข้างต้นอาจจะทำงานแปลงพลังงานไฟฟ้าวรร่วมกันได้ ตัวอย่างของระบบอินพุตกึ่งหนึ่งลมที่ใช้การแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับในการควบคุมและแปลงแรงดันความถี่ของไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานหรือควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามความต้องการ เช่น

#### 1) Back-to-Back PWM Converter

ระบบการแปลงพลังงานแบบ Back-to-Back PWM Converter เป็นตัวแปลงพลังงานแบบ back-to-back ชนิดเฉพาะที่ใช้เทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ (PWM) เพื่อควบคุมการไหลของพลังงานระหว่างสองระบบ คอนเวอร์เตอร์ PWM ใช้สวิตซ์ซึ่งความถี่สูงเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตหรือกระแสไฟฟ้าที่ต้องการโดยการปรับความกว้างของพัลส์ในรูปคลื่น โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจรเชื่อมโยงทาง DC และอินเวอร์เตอร์ ระบบการแปลงพลังงานแบบ Back-to-Back PWM Converter แสดงดังรูปที่ 2.8

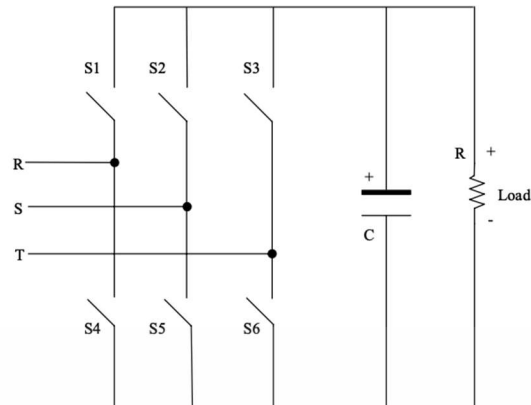


รูปที่ 2.8 วงจรสวิตซ์ซิ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back-to-Back PWM Converter

## 2) Boost Converter

ระบบการแปลงพลังงานแบบ Boost Converter โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจรวงจรขอปเปอร์ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ วงจรบูสต์ และอินเวอร์เตอร์ เริ่มการทำงานด้วยการควบคุมแรงดันและความถี่ของไฟฟ้าโดยใช้การสวิตซ์ซิ่งเปิดปิดการจ่ายไฟ ต่อมาเป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ หลังจากแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะเข้าสู่วงจรบูสต์เพิ่มแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบพลังงานก่อนแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งโดยใช้อินเวอร์เตอร์

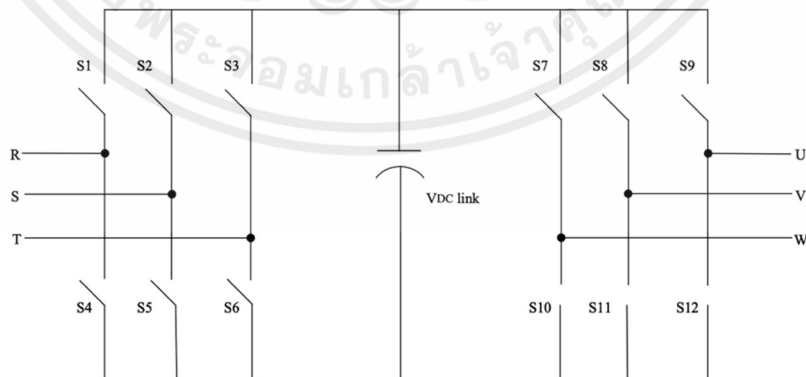
ระบบการแปลงพลังงานแบบ Boost Converter แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสวิตซ์ซิ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบ Boost Converter

### 3) Back-to-Back Converter

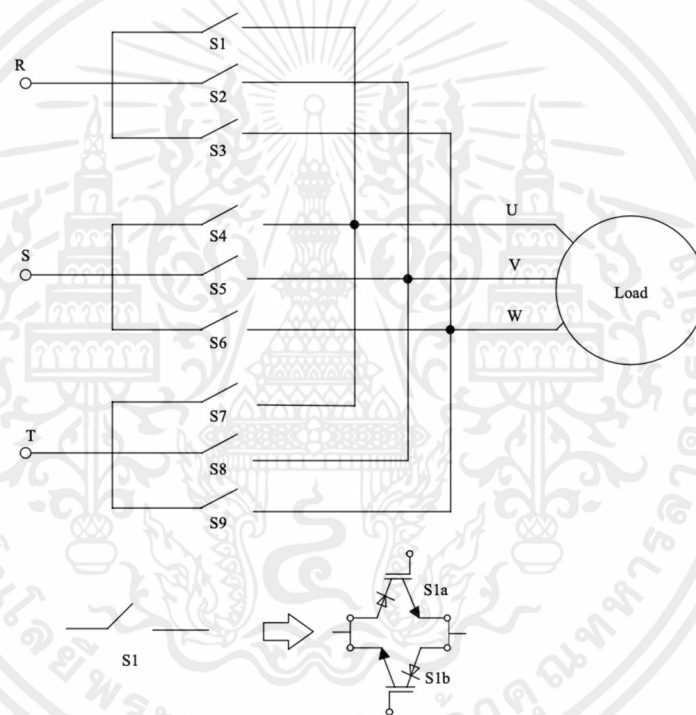
ระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter โดยทั่วไปประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ วงจรเชื่อมโยงทาง DC และอินเวอร์เตอร์ โดยที่ไฟฟ้ากระแสสลับถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และหลังจากแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วพลังงานจะถูกเก็บโดยวงจรเชื่อมโยงทาง DC จากนั้นจะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรสวิตซ์ซิ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter

#### 4) Matrix Converter

ระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter ใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงโดยไม่ต้องใช้วงจรเชื่อมโยงทาง DC ใด ๆ ดังแสดงในรูป 2.11 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบและลดการสูญเสียภายในวงจรเชื่อมโยงทาง DC โดยเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยสวิตช์สองทิศทางที่ไม่มีอุปกรณ์สวิตช์สองทิศทางโมดูลเดียวในปัจจุบัน แต่เพื่อตอบสนองความต้องการ ซึ่งใช้ IGBT กำหนดค่าในลักษณะของการใช้งานอุปกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อสร้างหน่วยสวิตช์สองทิศทางที่สามารถนำกระแสในทั้งสองทิศทางและปิดกั้นแรงดันไฟฟ้าทั้งสองขั้วได้



รูปที่ 2.11 วงจรสวิตช์ซึ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบ Matrix Converter

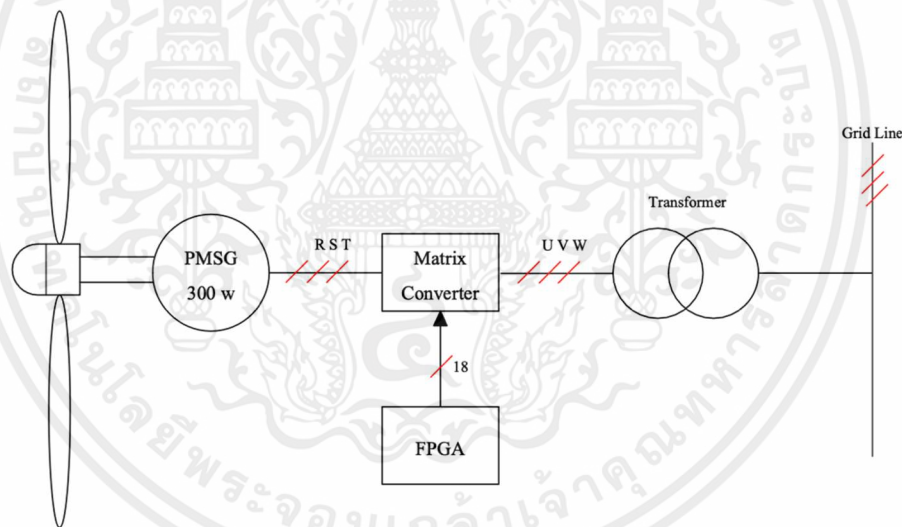
## 2.2 Matrix Laboratory

Matrix Laboratory (MATLAB) 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 สำหรับการประมวลผลค่าภาพ, MATLAB Signal Processing Toolbox สำหรับประมวลผลสัญญาณ, และ MATLAB Simulink สำหรับจำลองระบบ

ซอฟต์แวร์ MATLAB ถูกพัฒนาโดยบริษัท MathWorks และมีการให้บริการในรูปแบบที่ใช้งานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์ มีประโยชน์มากในหลายด้าน จึงได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม

โดยปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีการนำเสนอทฤษฎีและหลักการจำลองการทำงานของระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink ซึ่งจะมีระบบหลัก ๆ อยู่ 4 ระบบ ได้แก่ ระบบอินพุต ระบบสวิตซ์ชิ่ง ระบบเอาต์พุต และระบบควบคุม



รูปที่ 2.12 ระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 2.3 ระบบอินพุต

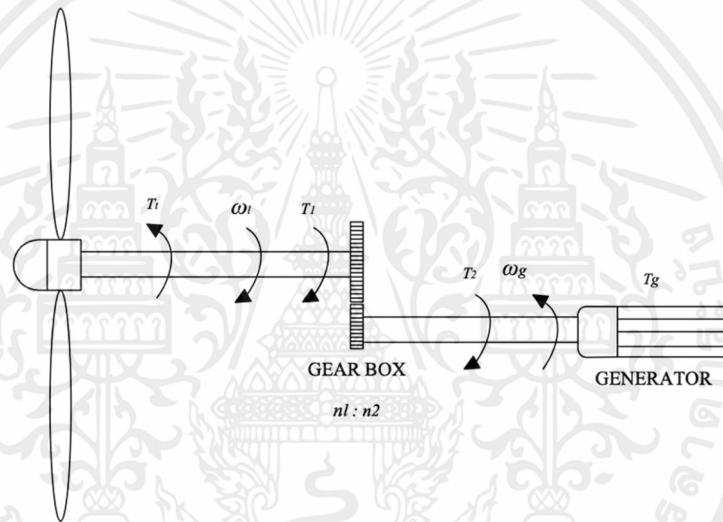
ระบบอินพุตกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วน ได้แก่ กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

### 2.3.1 กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

กังหันลมผลิตไฟฟ้า หมายถึง ระบบที่ใช้เครื่องกังหันลม (Wind Turbine) เพื่อแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ลมเป็นแหล่งพลังงาน ใบกังหันลมของเครื่องกังหันลมจะหมุนเมื่อลมพัดผ่านและทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

#### 2.3.1.1 ชุดจำลองกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

ในปฏิญานิพนธ์ใช้ชุดกังหันลมนั้นขนาดกำลัง 300 วัตต์ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะเป็นไปตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดกังหันลมขนาดกำลัง 300 วัตต์

จากความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปที่ 2.13 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.1

$$\omega_g = [T_g - Q(n_2/n_1) - \{B_g + B_t(n_2/n_1)^2\}\omega_g] \frac{1}{(J_g + J_t(n_2/n_1)^2)s} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\omega_g$  คือ ความเร็วเชิงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

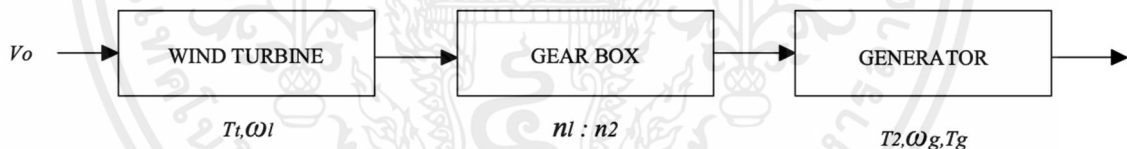
$\omega_t$  คือ ความเร็วเชิงมุมของชุดกังหันลม

$T_g$  คือ แรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$Q$  คือ แรงบิดของชุดกังหันลม

- $n_2/n_1$  คือ อัตราทดระหว่างชุดกังหันลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 $B_g$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 $B_t$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชุดกังหันลม  
 $J_g$  คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
 $J_t$  คือ โมเมนต์แรงเฉื่อยของชุดกังหันลม

จากสมการ 2.1 เมื่อมีแรงลมมากระทบกับตัวใบกังหันลมจะทำให้แกนเพลลาที่ต่อกับใบกังหันลมเกิดการหมุน ทำให้เกิดความเร็วจีงมุมของชุดกังหันลม ( $\omega_t$ ) ซึ่งจะแปรผันตามค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของชุดกังหันลม ( $J_t$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชุดกังหันลม ( $B_t$ ) โดยในขณะที่เกิดการหมุนด้วยความเร็วจีงมุมจะทำให้เกิดแรงบิดของชุดกังหันลม ( $Q$ ) ซึ่งจะถูกส่งไปยังชุดอัตราทดระหว่างชุดกังหันลมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $n_2/n_1$ ) โดยในปริญญาณิพจน์นี้ชุดกังหันลมจะทำการต่อโดยตรงกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังจากนั้นความเร็วจีงมุมของชุดกังหันลม ( $\omega_t$ ) และแรงบิดของชุดกังหันลม ( $Q$ ) จะถูกส่งไปยังเพลลาขับของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการหมุน ทำให้เกิดความเร็วจีงมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $\omega_g$ ) และแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $T_g$ ) โดยจะแปรผันตามค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $J_g$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $B_g$ ) ซึ่งจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ของชุดกังหันลมกับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

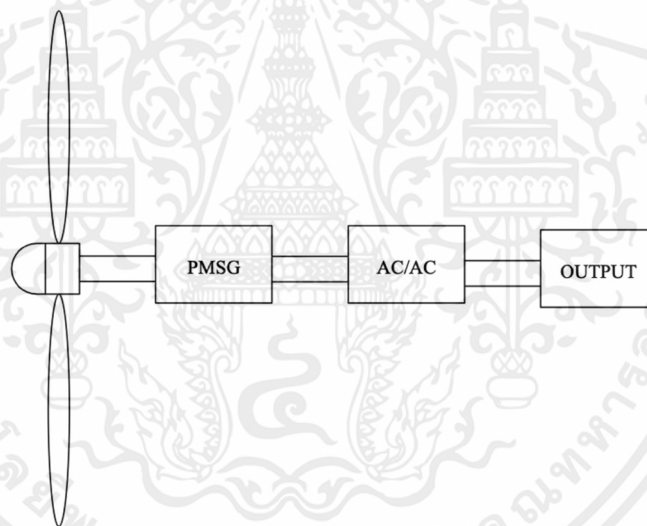
จากสมการที่ 2.1 และบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.14 นำไปใช้เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink

### 2.3.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator : PMSG) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ซึ่งมีขั้วแม่เหล็ก 16 ขั้ว ส่วนประกอบหลักประกอบด้วยดังนี้

- 1) สเตเตอร์ (Stator) คือ ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รับการเหนี่ยวนำจากเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า มีชุดขดลวดหรือสายตัวนำที่จะถูกเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเพื่อการใช้งาน
- 2) โรเตอร์ (Rotor) คือ ส่วนที่สามารถหมุนเคลื่อนที่อยู่แกนกลางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อโรเตอร์มีการหมุนจะสร้างสนามแม่เหล็กในขดลวดหรือสายตัวนำของสเตเตอร์ตามหลักความถี่ของการหมุนและจำนวนขั้วแม่เหล็ก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติพิเศษเมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอื่น ๆ ที่มีการออกแบบให้สามารถต่อเข้าโดยตรงกับชุดกังหันลมโดยไม่ต้องมีชุดทดกำลัง (Gear Box) ซึ่งมักจะเป็นแหล่งเสียงรบกวนในระบบผลิตไฟฟ้าเมื่อมีการหมุนด้วยความเร็วสูง เป็นข้อได้เปรียบของ PMSG ในเรื่องประสิทธิภาพของการลดเสียงรบกวนในระบบ



รูปที่ 2.15 ระบบกังหันลมโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

### 2.3.2.1 ชุดจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

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

- 1) ขดลวดสเตเตอร์เฟส (เฟส a, b และ c) อยู่ในสถานะวางทำมุมห่างกัน 120 องศา เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้เป็นแบบ 3 เฟส

- 2) ขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟส (เฟส a, b, และ c) มีค่าความต้านทาน (R) และค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่ต่ออนุกรมเชื่อมต่อกับ Direct Axis และ Quadrature Axis ซึ่งเป็นแกนอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์และควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 3) โรเตอร์เริ่มทำงานโดยการหมุนตามความถี่ที่ต้องการเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในสถานะที่ตรงกับสนามแม่เหล็ก (Direct Axis) และสถานะที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก (Quadrature Axis) โดยหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ( $\omega_r$ ) และตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ ( $\theta_r$ )

จากสถานะและพฤติกรรมที่เกิดขึ้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรได้ตามสมการที่ 2.2

$$\begin{aligned} U_a &= R i_a + L \frac{d}{dt} i_a + -\omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r) \\ U_b &= R i_b + L \frac{d}{dt} i_b + -\omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ U_c &= R i_c + L \frac{d}{dt} i_c + -\omega_r \lambda_{pm} \sin(\theta_r - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2.2)$$

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 2.3 และ 2.4

$$U_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r \left( L_q i_q + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \right) \quad (2.3)$$

$$U_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r \left( L_d i_d + \frac{d}{dt} \lambda_{pm} \right) \quad (2.4)$$

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 2.3 และ 2.4 นำไปใช้เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink

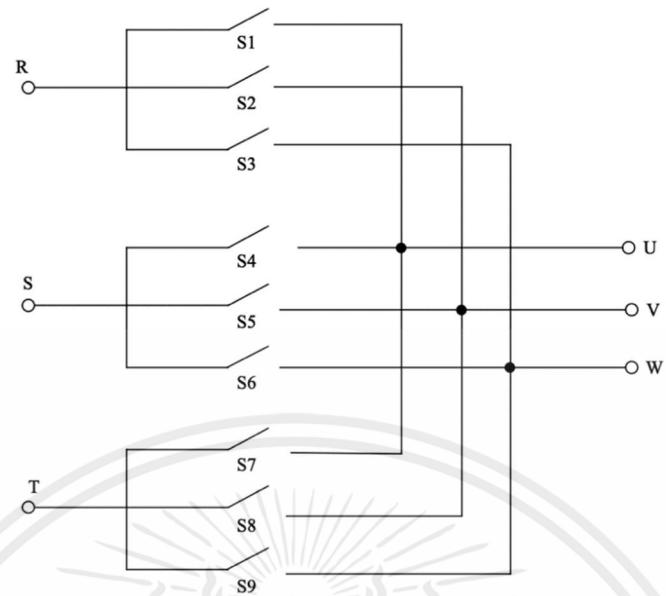
## 2.4 ระบบสวิตซ์ซิ่ง

ระบบสวิตซ์ซิ่ง เป็นส่วนหนึ่งของระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยสวิตซ์ซิ่งคือ กระบวนการเปลี่ยนสถานะของสวิตซ์หรืออุปกรณ์ควบคุมในระบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ มีส่วนประกอบหลัก คือ สวิตซ์หรืออุปกรณ์ควบคุมการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งสามารถเปิดหรือปิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร เป็นระบบที่กำหนดเงื่อนไขของกระแสไฟฟ้าเข้าออกจากเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ให้เป็นตามลักษณะที่ต้องการ

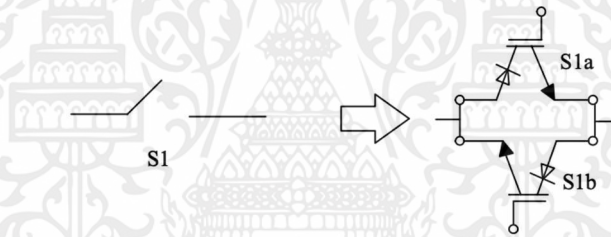
### 2.4.1 การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ คือ ระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความถี่โดยอิสระ ซึ่งจะเข้ามาแทนที่การทำงานของระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter ที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง อีกทั้งระบบแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ไม่จำเป็นต้องมีวงจรเชื่อมโยงทาง DC จึงส่งผลทำให้วงจรมีอายุการใช้งานที่สูงกว่าและไม่มีปัญหาการเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุของวงจรเชื่อมโยงทาง DC

ระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุมการสังเคราะห์ความถี่สูง โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้สวิตซ์แบบสองทิศทาง (Bi-Direction Switch) จำนวน 9 ตัว ประกอบเป็นวงจรหลักของระบบการแปลงพลังงาน ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งสวิตซ์แบบสองทิศทางสามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้สองทิศทางและมีความสามารถในการทำงานสลับไปสลับมาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไม่มีโมดูล IGBT แบบสองทิศทาง จึงใช้อุปกรณ์แบบแยกส่วนทำการต่อแบบกลับหัวต่อชนกัน (Anti parallel) ซึ่งประกอบไปด้วย IGBT และไดโอดป้องกันการย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.17 ต่างจากระบบการแปลงพลังงานแบบ Back to Back Converter ที่มีสวิตซ์ทั้งหมด 12 ตัว และใช้สวิตซ์แบบทิศทางเดียว จึงสามารถควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าได้เพียงทิศทางเดียว ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.16 วงจรสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.17 วงจรสวิตซ์ซิ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.18 วงจรสวิตซ์ซิ่งแบบนำกระแสหนึ่งทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบ

Back to Back converter

จากรูปที่ 2.16 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุตเอาต์พุตของวงจรสวิตซ์ซิ่งได้ตามสมการที่ 2.5

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ab}(t) & S_{Ac}(t) \\ S_{Ba}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Bc}(t) \\ S_{Ca}(t) & S_{Cb}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 นำไปใช้เขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink และเนื่องด้วยไม่มีโมดูล IGBT แบบสองทิศทาง จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องศึกษาวิธีการควบคุมสวิตช์และวิธีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสัญญาณคลื่นความถี่ไฟฟ้าตามเทคโนโลยีการสังเคราะห์รูปคลื่นความถี่สูงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## 2.5 ระบบควบคุมสวิตช์ซิ่ง

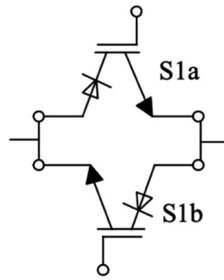
ระบบควบคุมสวิตช์ซิ่งเป็นส่วนสำคัญของระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการไหลของแรงดันและกระแสไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนสถานะของส่วนประกอบทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในระบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ช่วยควบคุมแรงดันและความถี่ของไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและส่งออกจากเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในลักษณะที่ต้องการ

### 2.5.1 การวิเคราะห์และการสังเคราะห์ความถี่สูง

ระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีส่วนประกอบของสวิตช์ทำให้อุปกรณ์ที่สังเคราะห์ออกมาไม่ต่อเนื่อง เพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าวจึงมีการนำเทคโนโลยีการสังเคราะห์รูปคลื่นมาใช้ เพื่อสร้างรูปคลื่นเอาต์พุตที่ราบเรียบและมีความต่อเนื่อง โดยใช้เทคนิคและเครื่องมือเฉพาะเปรียบเทียบความถี่และความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่มีอยู่ในระบบ รวมถึงการใช้การแปลงความถี่เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ

### 2.5.2 ระบบ Commutation

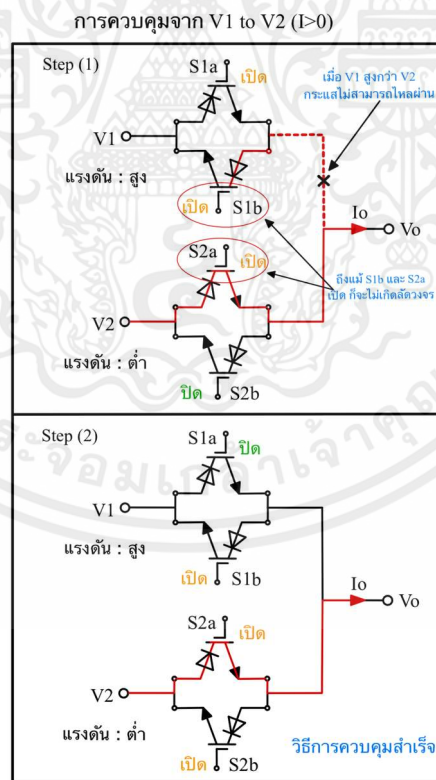
ระบบ Commutation คือระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลทิศทางของกระแสสวิตช์ซิ่ง ซึ่งเป็นชนิดแบบ Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor ดังรูปที่ 2.19



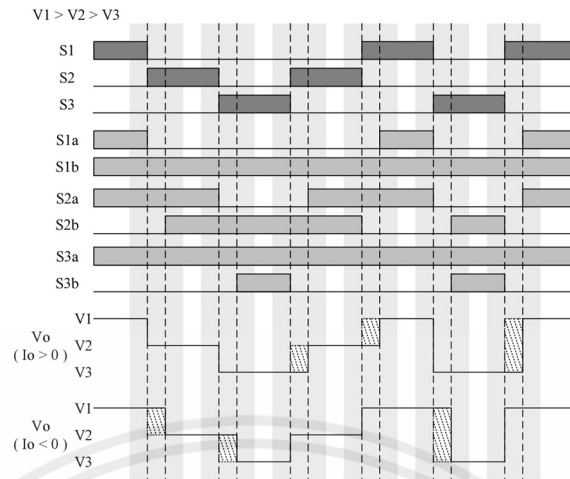
รูปที่ 2.19 สวิตช์ซิงชนิด RB IGBT Bi-direction switch

ซึ่งวิธีการ Commutation 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) ดังนี้

### 2.5.2.1 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)



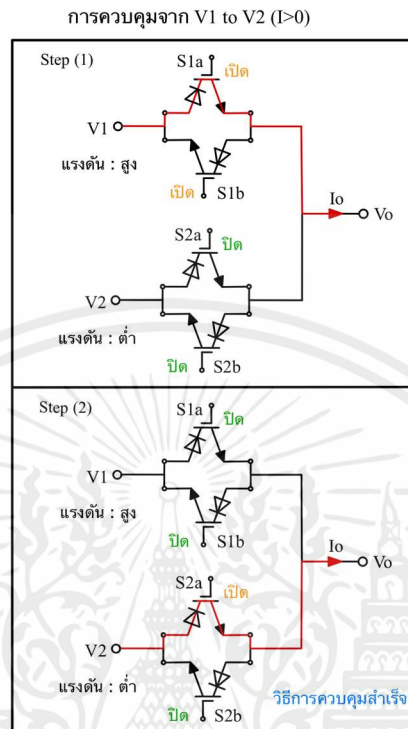
รูปที่ 2.20 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)



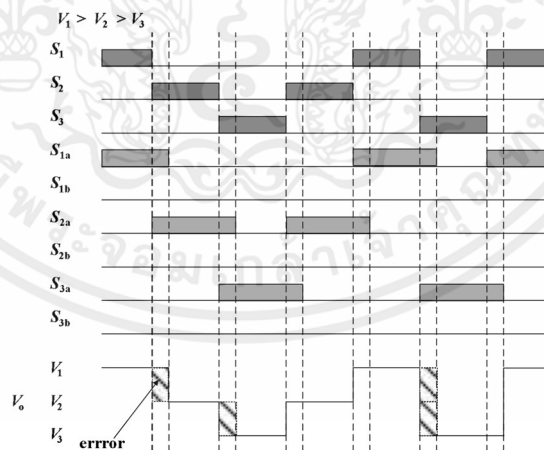
รูปที่ 2.21 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 2 ขั้นตอน (2V)

รูปที่ 2.21 แสดงแผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอนโดยที่  $I_o > 0$  ในวิธีแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอน สวิตช์ที่ไม่เกิดการลัดวงจรของแหล่งพลังงานในวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอนจะเปิดอยู่เสมอ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะลดระยะเวลาเพื่อให้เส้นทางของกระแสมีน้คง สวิตช์ที่มีสถานะเปิดจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าของผลลัพธ์ในการแปลงและแหล่งที่มาของการแปลง ดังนั้นสวิตช์สถานะเปิดสำหรับเฟสแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและเฟสแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดสามารถอยู่กับที่ได้จนกว่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม สวิตช์ที่มีสถานะเปิดสำหรับแรงดันไฟฟาระหว่างเฟสจะต้องเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของปลายทางของการแปลงหรือแหล่งที่มาของการแปลง ดังนั้นแม้ว่าคำสั่งการสวิตช์ซึ่งจะไม่ถูกกำหนดให้กับสวิตช์ของระหว่างเฟสแต่ก็จำเป็นต้องทำการสวิตช์ซึ่ง

### 2.5.2.2 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)



รูปที่ 2.22 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

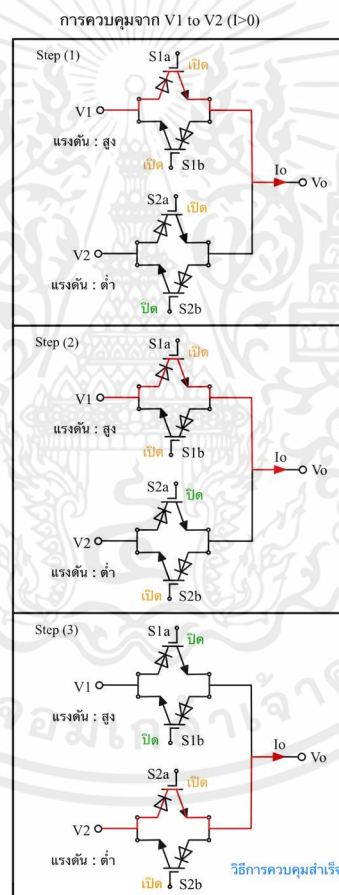


รูปที่ 2.23 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 2 ขั้นตอน (2C)

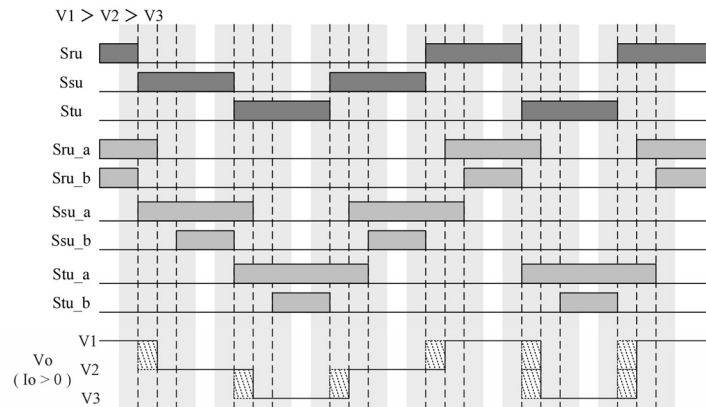
รูปที่ 2.23 แผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงกระแสไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอน (2C) ซึ่งการแปลงแบบ 2 ขั้นตอนจะสามารถกำจัด Dead Time ได้ เนื่องจาก RB-IGBT ในเส้นทางที่ไม่มีกระแสไหล

ผ่านจะไม่ทำงาน ซึ่งจะเสมือนการแปลงกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) เพื่ออธิบายหลักการทำงานขั้นพื้นฐาน สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าคือ  $V_1 > V_2 > V_3$  และทิศทางของกระแสไฟเอาต์พุตเป็นบวก  $S_{1a}$ ,  $S_{2a}$  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

### 2.5.2.3 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)



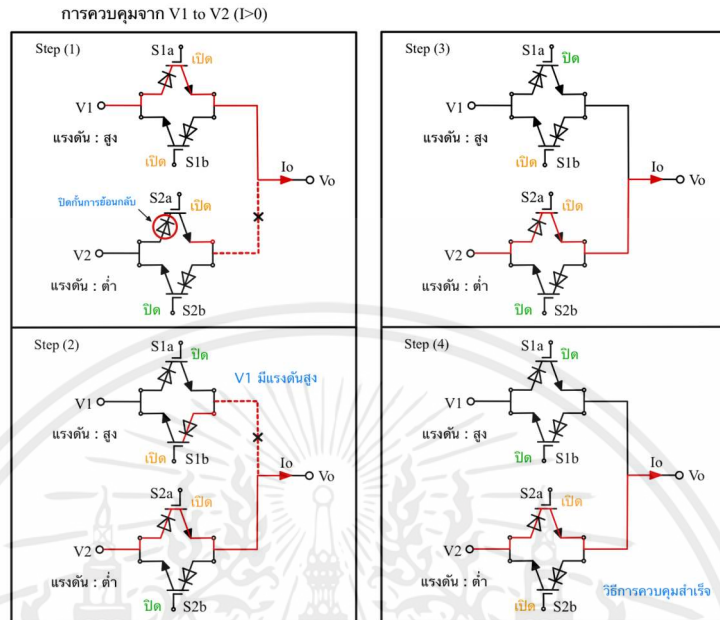
รูปที่ 2.24 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ขั้นตอน (3VC)



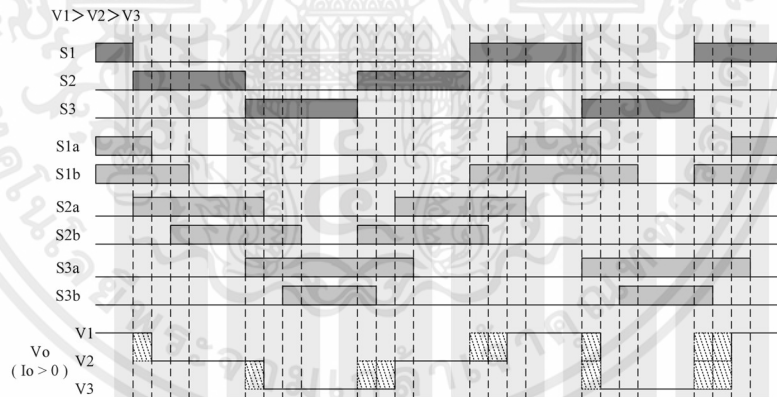
รูปที่ 2.25 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันและกระแสแบบ 3 ชั้นตอน (3VC)

รูปที่ 2.25 แสดงกราฟเวลาสำหรับการแปลงกระแสและแรงดัน 3 ชั้นตอนโดยที่  $I_o > 0$  ในวิธีการแปลงกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบ 3 ชั้นตอน รูปแบบการแปลงจะถูกกำหนดโดยความสัมพันธ์ขนาดของแรงดันไฟฟ้าอินพุตและขั้วของกระแสไฟเอาต์พุต รูปแบบการสวิตช์ซึ่งจะถูกกำหนดในขั้นต้นตามวิธีแปลงแรงดันไฟฟ้าหรือวิธีแปลงกระแสไฟฟ้า ขั้นตอนการแปลงที่สามารถกำจัดได้โดยใช้ข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ (ขั้วกระแสไฟเอาต์พุตสำหรับวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้าและความสัมพันธ์ขนาดของแรงดันอินพุตสำหรับวิธีการแปลงกระแสไฟฟ้า) โดยไม่เป็นปัญหา จากนั้นเลือกรูปแบบการสวิตช์ซึ่งของ 3 ชั้นตอน สำหรับวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 ชั้นตอนรูปแบบการสวิตช์ซึ่งสามารถเลือกได้เอง เนื่องจากไม่มีข้อจำกัด (จากวงจรเปิดโหลดและการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน) ในช่วงเวลาการเปิด/ปิดของสวิตช์ที่ดำเนินการในขั้นตอนนี้ถูกกำจัดออกไป

2.5.2.4 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)



รูปที่ 2.26 Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

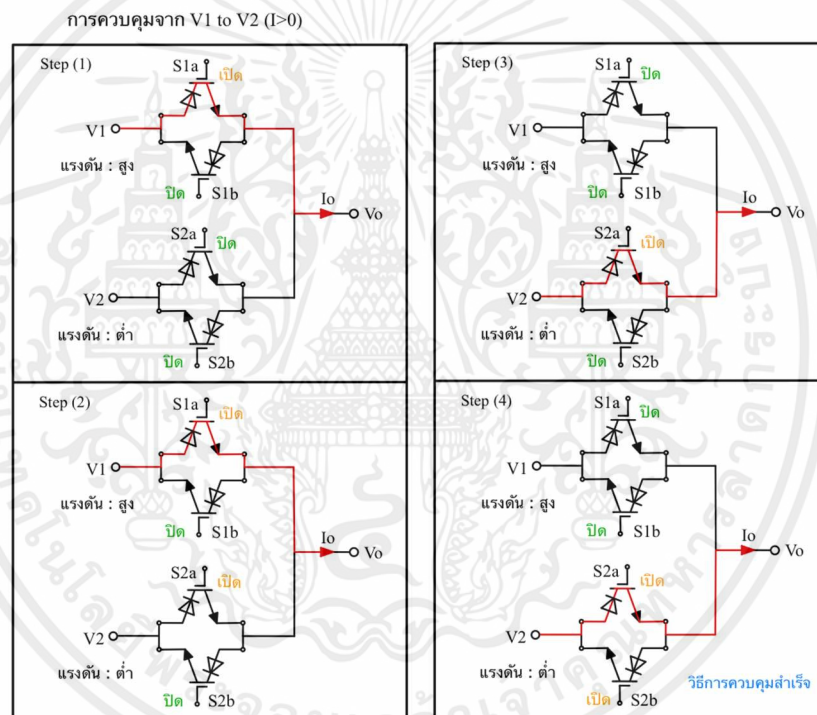


รูปที่ 2.27 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมแรงดันแบบ 4 ขั้นตอน (4V)

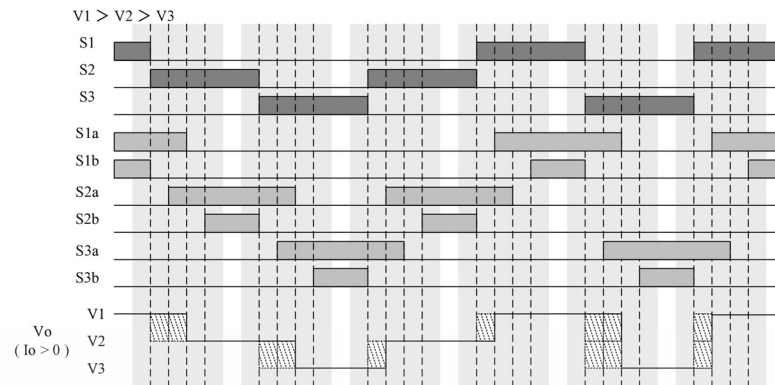
รูปที่ 2.27 แผนภูมิเวลาสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอนที่  $I_o > 0$  สำหรับขั้นตอนที่ (1) การเปิด  $S_{2b}$  หมายถึงเกิดการลัดวงจร ชั่วเอาต์พุตจะเปิดขึ้นเมื่อ  $S_{1a}$  หรือ  $S_{1b}$  ถูกปิดและไม่มีความเป็นไปได้ที่จะรักษาเส้นทางของกระแส การลัดวงจรและวงจรเปิดจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้หากไม่ได้เปิด  $S_{2a}$  ในขั้นตอนที่ (2) เนื่องด้วยเส้นทางของกระแสมีทิศทางเป็นบวก เมื่อ  $S_{2a}$  เปิด  $S_{1a}$  สามารถปิดได้ ในขั้นตอนที่ (3) การลัดวงจรจะไม่เกิดขึ้นแม้ว่า  $S_{2b}$  จะเปิดอยู่เนื่องจาก  $S_{1a}$  ปิด

อยู่ในขั้นตอน (4)  $S_{1b}$  สามารถปิดได้ เนื่องจากเส้นทางของกระแสมีทิศทางกลับจึงสามารถมั่นใจได้เมื่อเปิด  $S_{2b}$  ในวิธีการแปลงแรงดันไฟฟ้า 4 ขั้นตอน รูปแบบการสวิตซ์ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน ซึ่งจะถูกกำหนดโดยการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของขนาดของแรงดันไฟฟ้าอินพุต นอกจากนี้วิธีการแปลงสามารถเลือกรูปแบบการแปลงที่แน่นอนได้โดยพิจารณาถึงการรักษาสัญญาณของกระแส ข้อผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจะเกิดขึ้นในรูปแบบการแปลงทั้งหมดและขนาดของข้อผิดพลาดจะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับขั้วของกระแสเอาต์พุตและความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันไฟฟ้าสำหรับผลลัพธ์ของการแปลงกระแสไฟฟ้า

### 2.5.2.5 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)



รูปที่ 2.28 Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)



รูปที่ 2.29 แผนภูมิเวลา Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C)

กระแสไฟฟ้าแบบ 4 ขั้นตอน ในปัจจุบันการกำหนดเวลาการสวิตช์ซึ่งของสองสวิตช์ในชั่วกระแสเดียวกันนั้น พิจารณาจากการกำหนดระยะเวลาการเชื่อมต่อกระแสเพื่อเปิดสวิตช์อุปกรณ์ที่มีชั่วกระแสเอาต์พุตเดียวกัน จากนั้นกำหนดเวลาการสวิตช์ซึ่งของสวิตช์ตัวอื่น ๆ โดยพิจารณาจาก Dead Time เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งพลังงาน

## 2.6 ระบบเอาต์พุต

ระบบเอาต์พุตของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นส่วนที่ส่งไฟฟ้าไปยังโหลดหรือระบบที่ต้องการไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้

### 2.6.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

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

### 2.6.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายหรือระบบส่งจ่ายเป็นระบบทำหน้าที่จำหน่ายไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าไปยังผู้ใช้โดยใช้ระบบเครือข่ายไฟฟ้าเพื่อให้มีการทำงานที่เสถียรภาพและปลอดภัย กล่าวได้ว่าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญในระบบไฟฟ้า

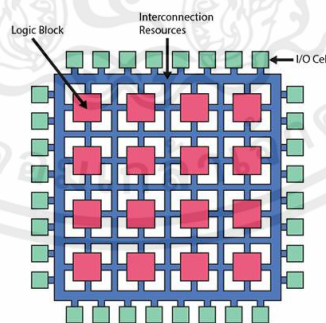
## 2.7 ชุดควบคุม

ชุดควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุม คือระบบหรืออุปกรณ์ที่ถูกออกแบบและนำมาใช้ในการควบคุมการทำงาน ของระบบหรืออุปกรณ์อื่น ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบหรืออุปกรณ์ทำงานอย่างเหมาะสมตามความต้องการและเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ชุดควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมมีทั้งซอฟต์แวร์ (software) ที่มีการกล่าวถึงในหัวข้อของระบบควบคุมสวิตซ์ซิ่ง และฮาร์ดแวร์ (hardware) ที่จะมีการกล่าวถึงในหัวข้อนี้ ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

โดยการใช้งานเอฟพีจีเอหรืออุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field Programmable Gate Array : FPGA) ที่เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดโปรแกรมได้มีโครงข่ายการเชื่อมต่อภายในแบบเมตริกซ์ โครงสร้างภายในของ FPGA สามารถโปรแกรมให้มีหน้าที่การทำงานเหมือนลอจิกเกตพื้นฐาน เช่น AND, OR, XOR, NOT หรือรวมกันหลาย ๆ ชนิด (combinational logic) เพื่อทำหน้าที่ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เช่น decoders หรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ FPGA จะประกอบด้วยส่วนของวงจรลอจิกแบบโปรแกรมได้แล้ว ยังมีบล็อกของหน่วยความจำซึ่งอาจจะสร้างด้วยฟลิปฟล็อปอย่างง่าย หรือใช้พื้นที่ของสารกึ่งตัวนำสร้างเป็นหน่วยความจำจริง ๆ อยู่ภายในก็ได้



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างไอซี FPGA ของบริษัท Xilinx และบริษัท Intel



รูปที่ 2.31 โครงสร้างภายใน FPGA ทั่วไป

ในการออกแบบวงจรดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ที่มี FPGA อยู่บนแผงวงจรจะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถลดขนาดของแผงวงจร รวมทั้งสามารถออกแบบได้รวดเร็วไม่ต้องทดสอบรายละเอียดภายในให้เสร็จสมบูรณ์ 100% ก็สามารถออกแบบแผงวงจรได้ เมื่อได้รับแผงวงจรและประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เสร็จ

จึงค่อยกำหนดหน้าที่การทำงานของ FPGA ได้ในภายหลัง ต่างจากการออกแบบด้วยลอจิกเกตขนาดเล็กที่ต้องออกแบบทางเดินของสายทองแดงให้เสร็จสมบูรณ์ก่อนและไม่สามารถแก้ไขได้ในภายหลัง นอกจากนี้การใช้งาน FPGA สามารถโปรแกรมการทำงานได้ในทุกขณะแม้แต่ขณะที่ส่งมอบงานแล้วก็ยังสามารถเข้าไปแก้ไขวงจรได้โดยง่ายตาย จึงเป็นที่มาของคำว่า "Field Programmable" ซึ่งหมายถึงโปรแกรมได้ในภาคสนามหรือที่หน้างาน อย่างไรก็ตามข้อกำหนด (Configuration) ของ FPGA จะหายไปหลังจากปิดไฟเลี้ยง ดังนั้นจะต้องมีหน่วยความจำภายนอก (Flash) มาคอยรักษาข้อกำหนดของ FPGA ไว้ ซึ่ง FPGA จะมีกระบวนการอ่านข้อกำหนดนั้นโดยอัตโนมัติหลังจากได้รับไฟเลี้ยง

### 2.7.1 ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ออกแบบ

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 : เป็นส่วนของการอธิบายพฤติกรรมของฮาร์ดแวร์ที่กำลังออกแบบ

รูปแบบของภาษา HDL ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางมีดังนี้

#### 2.7.1.1 VHASIC Hardware Description Language

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

#### 2.7.1.2 Verilog

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

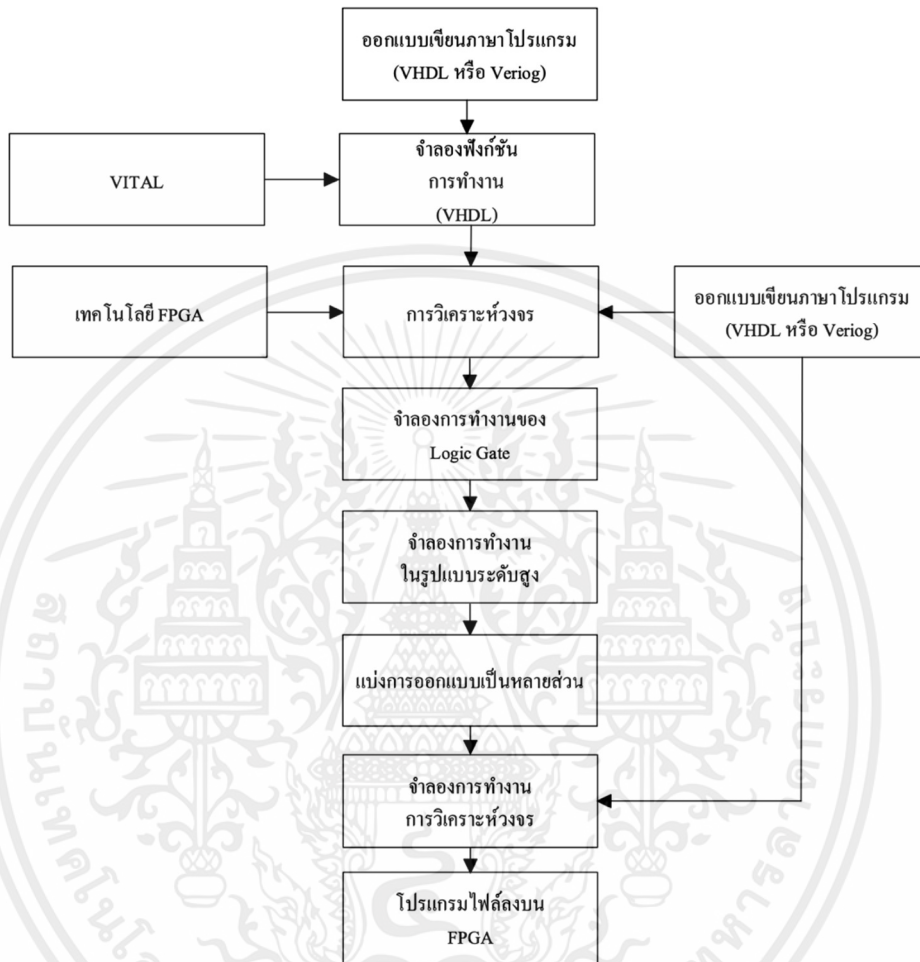
#### 2.7.1.3 SystemVerilog

SystemVerilog เป็นการขยายของ Verilog ที่มีความสามารถมากกว่าในการออกแบบระบบที่ซับซ้อนและมักถูกใช้ในการออกแบบที่มีการทดสอบและการยืนยันที่เข้มงวด

#### 2.7.1.4 MyHDL

MyHDL เป็นภาษา HDL ที่มีพื้นฐานบน Python และนำเสนอวิธีการเขียนรหัสในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและที่สามารถทดสอบได้ง่าย

การเลือกภาษา HDL ใช้งานออกแบบบอร์ดควบคุม FPGA ขึ้นอยู่กับความถนัดและความคุ้นเคยของผู้ใช้ รวมถึงสภาพแวดล้อม รูปแบบและความซับซ้อนของงาน



รูปที่ 2.32 แสดงขั้นตอนการออกแบบโดยใช้ FPGA

กล่าวได้ว่าการออกแบบวงจรดิจิทัลทำได้ทั้งโดยการวาดวงจรหรือใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ ในกรณีที่ออกแบบโดยวิธีการวาดวงจร ผู้ทำการออกแบบจะต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีความแตกต่างกันไป แต่กรณีที่ใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ในการออกแบบจะทำได้สะดวกกว่า เพราะผู้ทำการออกแบบไม่ต้องมาคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ อีกทั้งวิธีนี้สามารถแก้ไขโมเดลได้โดยไม่ต้องวาดวงจรใหม่ นั่นคือการออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์จะทำให้โมเดลที่ได้ไม่ขึ้นกับเทคโนโลยี ซึ่งสำหรับภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ที่ใช้ก็มี VHDL หรือ Verilog ในการเขียนรหัส

## 2.7.2 ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบ

ซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบวงจรดิจิทัลและใช้งาน FPGA มีหลายตัวเลือก แต่ที่ได้รับความนิยมสูงมากมีดังนี้

### 2.7.2.1 Xilinx Vivado

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

### 2.7.2.2 Altera Quartus Prime

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

### 2.7.2.3 Lattice Diamond

- บริษัทผู้พัฒนา : Lattice Semiconductor
- คำอธิบาย : Lattice Diamond เป็นเครื่องมือออกแบบที่ใช้ในการออกแบบวงจรดิจิทัลและโปรแกรม FPGA ของ Lattice Semiconductor มีความสามารถในการโปรแกรม Bitstream และมีเครื่องมือสำหรับการทดสอบ

โดยในปฏิญานิพนธ์นี้ได้ใช้งานชิป Xilinx FPGA จึงเลือกใช้งาน Xilinx Vivado ที่ให้บริการทั้งในด้านการออกแบบวงจรดิจิทัลและการโปรแกรม FPGA ของ Xilinx

Vivado มีความสามารถเพียงพอที่จะรองรับกระบวนการออกแบบทั้งหมดตั้งแต่การสร้างโมเดลของวงจรจนถึงการนำโปรแกรมลงในชิป FPGA โดยรองรับชิปทั้งหมดของ Xilinx ทั้งในตระกูล Artix, Kintex, Virtex, และ UltraScale.

Vivado มีหลายลักษณะเด่นที่ช่วยในกระบวนการออกแบบด้วย FPGA อย่างเช่น :

- 1) High-Level Synthesis (HLS) : ช่วยในการสังเคราะห์แปลงรหัสระดับสูง (เช่น C, C++) เป็นรหัสที่สามารถนำเข้าได้ใน Vivado
- 2) IP Integrator : ช่วยในการสร้างวงจรถิทัศน์โดยใช้ IP (Intellectual Property) ที่พร้อมให้บริการ
- 3) Implementation Tools : มีเครื่องมือสำหรับการ Place-and-Route และการสร้างและโปรแกรมไฟแบบนำทาง (Bitstream)
- 4) Simulation Tools : มีเครื่องมือ Simulation ใน Vivado Simulator หรือสามารถใช้ ModelSim
- 5) Programming Tools : ช่วยในกระบวนการนำโปรแกรมลงในชิป FPGA ที่ได้สร้างขึ้น

Xilinx Vivado มีประสิทธิภาพสูงและมีความหลากหลายในการรองรับชิปต่าง ๆ ทำให้เป็นเครื่องมือที่นักวิศวกรรมระดับมืออาชีพนิยมใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบดิจิทัลที่ใช้ FPGA ของ Xilinx

### 2.7.3 Basys3 FPGA Board

บอร์ด FPGA Basys3 เป็นฐานโครงสร้างการพัฒนาวงจรถิทัศน์ที่สมบูรณ์และพร้อมใช้งานด้วย Artix-7 อุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้จาก Xilinx ประกอบด้วยสวิตช์ ฟิน I/O ที่เพียงพอเพื่อการออกแบบจำนวนมากเสร็จสมบูรณ์ได้โดยไม่ต้องใช้ฮาร์ดแวร์เพิ่มเติมใด ๆ พอร์ต USB, VGA และพอร์ตอื่น ๆ ที่ทำให้ Basys3 สามารถโฮสต์การออกแบบได้ตั้งแต่วงจรผสมเบื้องต้นไปจนถึงวงจรลำดับที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.33 Basys3 FPGA Board

FPGA Artix-7 ได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับตระกูลประสิทธิภาพสูงและมอบความจุที่มากขึ้น ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและทรัพยากรที่มากกว่ารุ่นก่อน ๆ จุดพอร์ตและอุปกรณ์ต่อพ่วงของบอร์ด FPGA Basys3 ประกอบด้วย :

- สวิตช์เลื่อน 16 ตัว
- ไฟ LED 16 ดวง
- สวิตช์ปุ่มกด 5 ปุ่ม
- จอแสดงผล 7 ส่วน 4 หลัก
- ขั้วต่อ Pmod 3 ตัว
- ขั้วต่อ Pmod สำหรับสัญญาณ XADC
- เอาต์พุต VGA 12 บิต
- ตัวเชื่อมต่อ USB-UART
- หน่วยความจำแฟลช
- พอร์ต Digilent USB-JTAG สำหรับการเขียนโปรแกรมและการสื่อสาร FPGA
- USB HID Host สำหรับเมาส์ คีย์บอร์ดและเมมโมรี่สติ๊ก

### 2.7.3.1 ภาคจ่ายไฟ

บอร์ด Basys3 สามารถรับพลังงานจาก Digilent USB-JTAG Port (J4) หรือแหล่งจ่ายไฟภายนอก 5V จัมเปอร์ JP3 (ใกล้กับสวิตช์ไฟ) 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

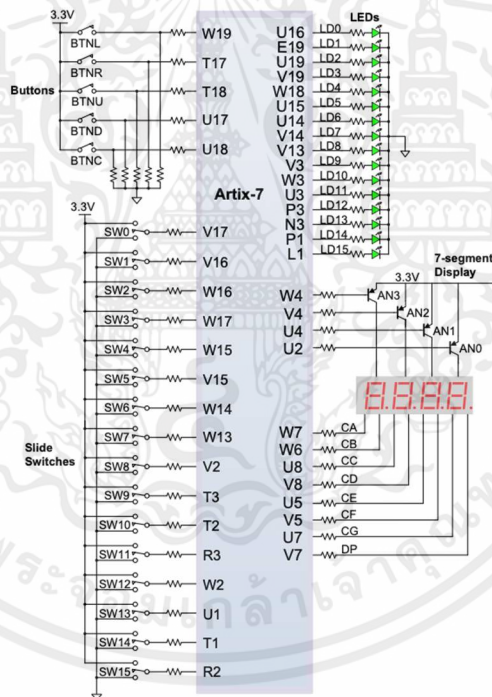
### 2.7.3.2 หน่วยความจำ

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

### 2.7.3.3 อินพุต/เอาต์พุต

บอร์ด Basys3 ประกอบด้วยสวิตช์เลื่อน 16 ตัว สวิตช์ปุ่มกด 5 ปุ่ม ไฟ LED 16 ดวงแยกกัน และจอแสดงผล 7 ส่วน 4 หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ปุ่มกดและสวิตช์สไลด์เชื่อมต่อกับ FPGA ผ่านตัวต้านทานแบบอนุกรมเพื่อป้องกันความเสียหายจากการลัดวงจร (อาจเกิดการลัดวงจรได้หากพิน FPGA ที่กำหนดให้กับปุ่มกดหรือสวิตช์เลื่อนถูกกำหนดให้เป็นเอาต์พุตโดยไม่ตั้งใจ) สวิตช์ปุ่มกดทั้ง 5 ปุ่มซึ่งจัดเรียงในรูปแบบเครื่องหมายบวกคือสวิตช์ "ชั่วคราว" ที่ปกติจะสร้างเอาต์พุตต่ำเมื่อไม่ได้ใช้งานและเป็นเอาต์พุตสูงเมื่อมีการกดใช้งาน โดยสวิตช์เลื่อนจะสร้างอินพุตสูงหรือต่ำคงที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง

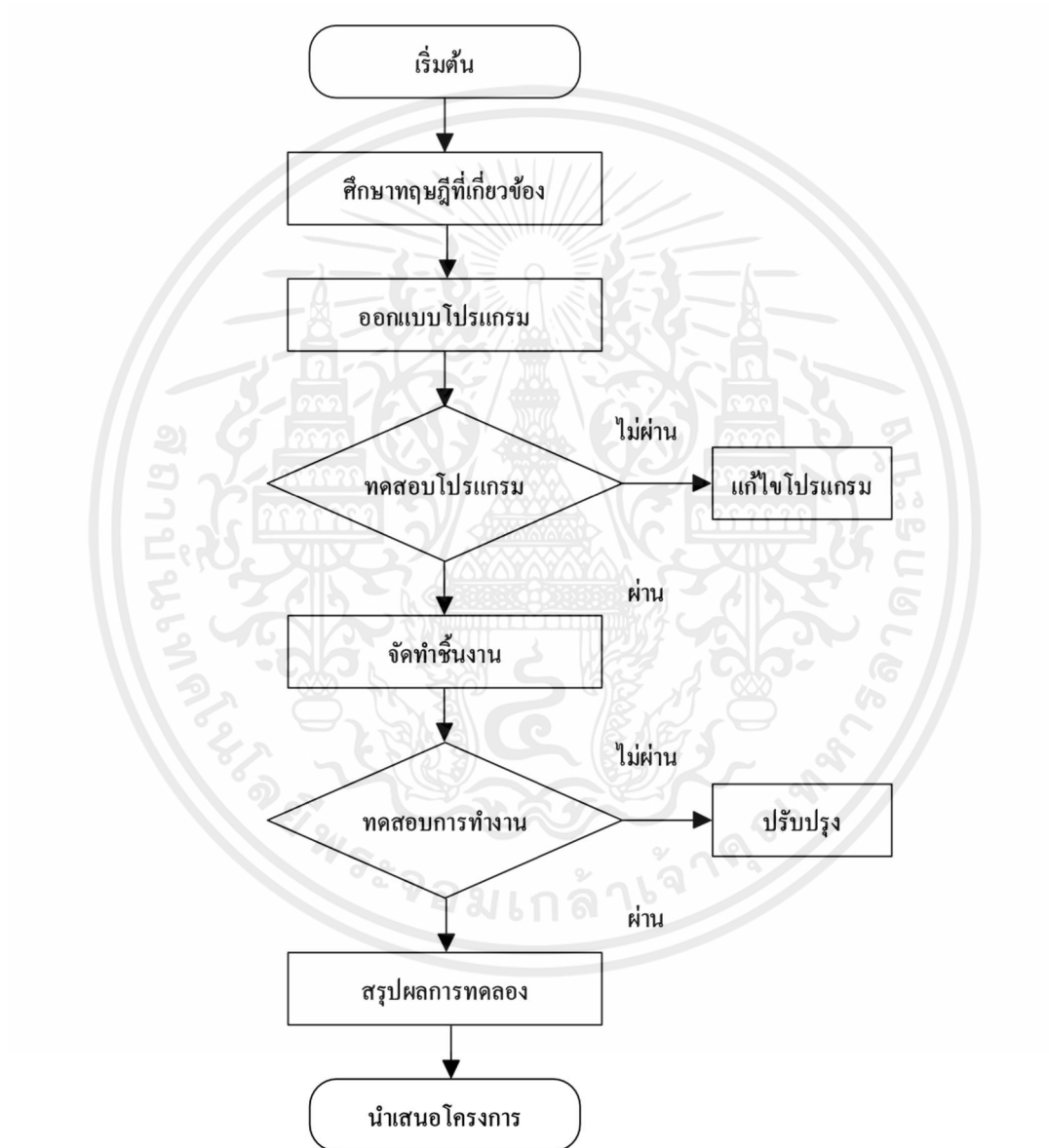


รูปที่ 2.34 อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตบนบอร์ด Basys3

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการ

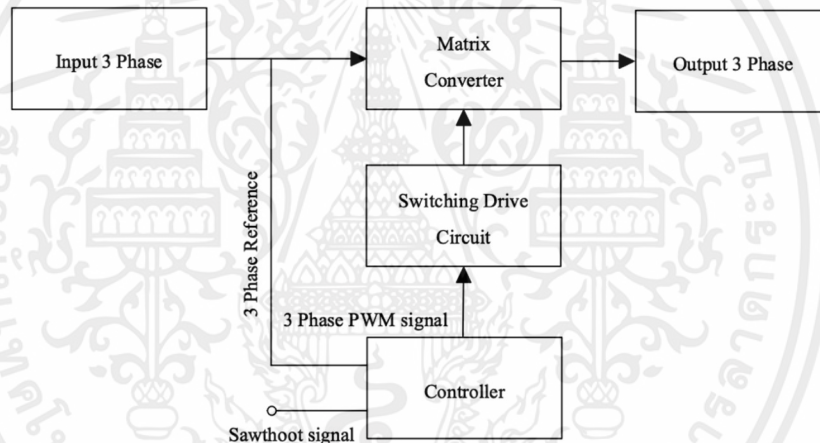
### 3.1 วิธีดำเนินการ



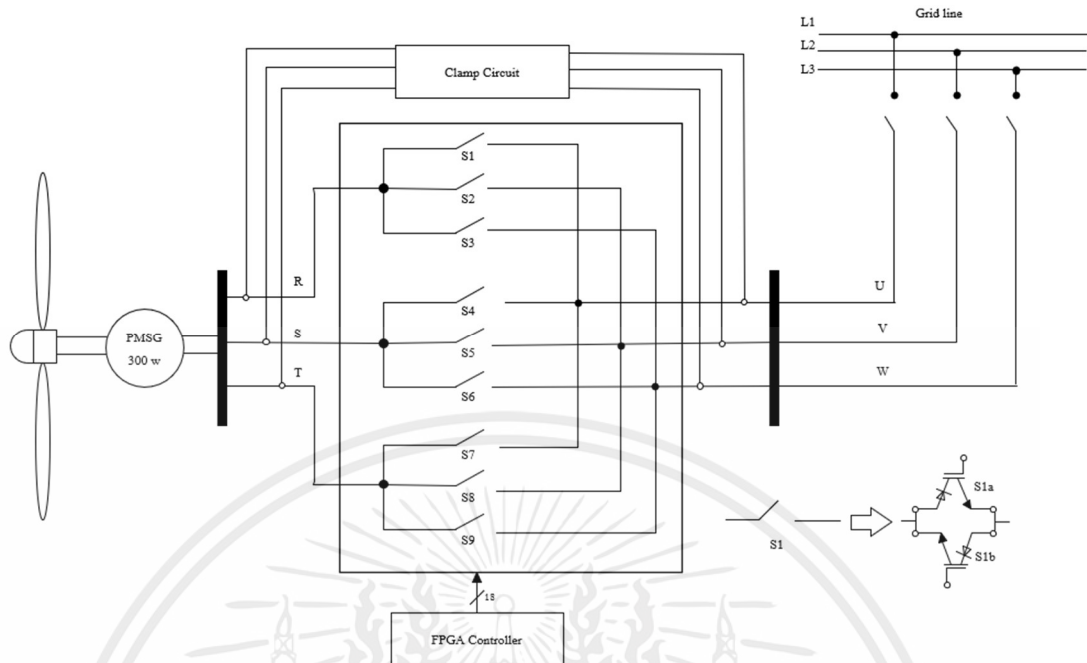
รูปที่ 3.1 Flow Chart แสดงวิธีการดำเนินงาน

### 3.2 ภาพรวมการทำงานของระบบ

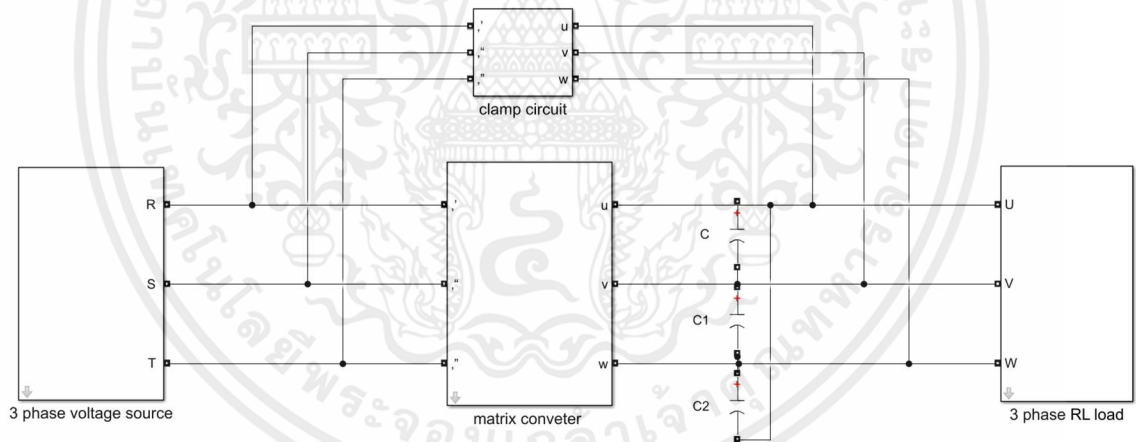
ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการที่ใช้ศึกษาในปริญญาโท ซึ่งในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ชั้นตอน ในโปรแกรม MATLAB & Simulink ที่เป็นหัวใจหลักของการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ นำมาใช้ในการออกแบบการควบคุมผ่านบอร์ดควบคุม FPGA โดยจะแสดงสถานะการทำงานเปิดและปิดของสวิตซ์ซึ่ง IGBT ผ่านไดโอดเปล่งแสง ซึ่งเป็นวิธีในการอธิบายและสื่อสารให้เห็นสถานะการทำงานตามวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ชั้นตอนของสวิตซ์ซึ่ง IGBT ได้อย่างชัดเจน โดยระบบการจำลองหลัก ๆ จะประกอบด้วย 4 ระบบ ได้แก่ ระบบอินพุต ระบบสวิตซ์ซึ่ง IGBT ระบบเอาต์พุต และระบบควบคุม



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบกักเก็บพลังงานผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB & Simulink



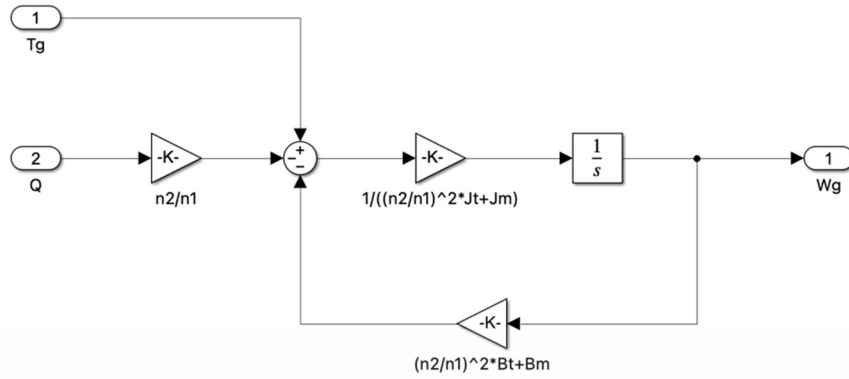
รูปที่ 3.3 ระบบกักเก็บผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์



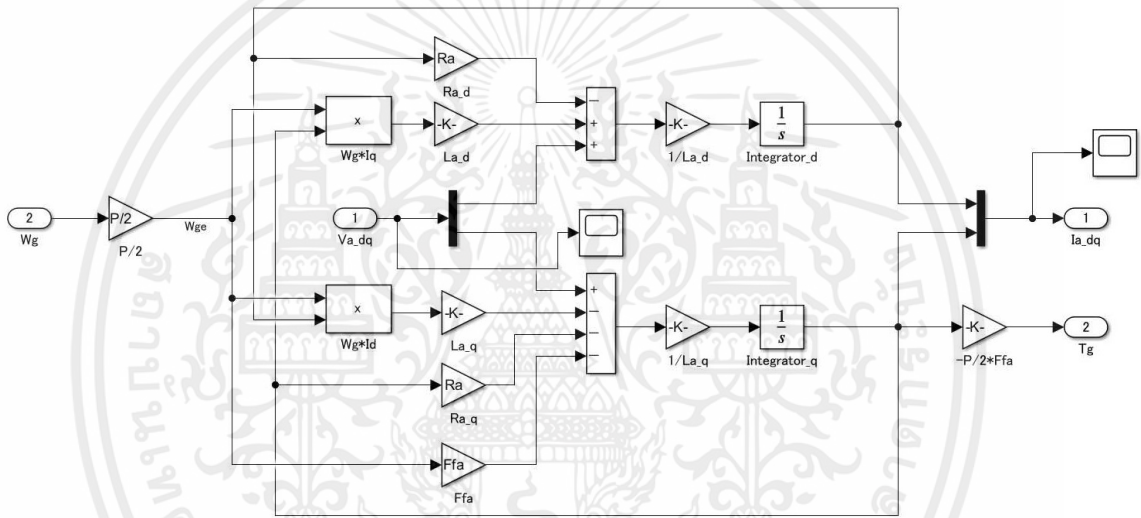
รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบกำลังสวิตซ์ซิงของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 3.2.1 แบบจำลองระบบอินพุต

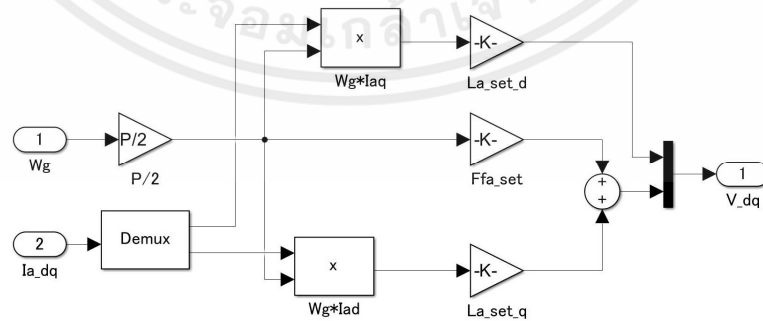
เป็นแบบจำลองระบบอินพุตในโปรแกรม MATLAB & Simulink สร้างจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เพื่อแสดงระบบกักเก็บผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ กักเก็บผลิตกระแสไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร



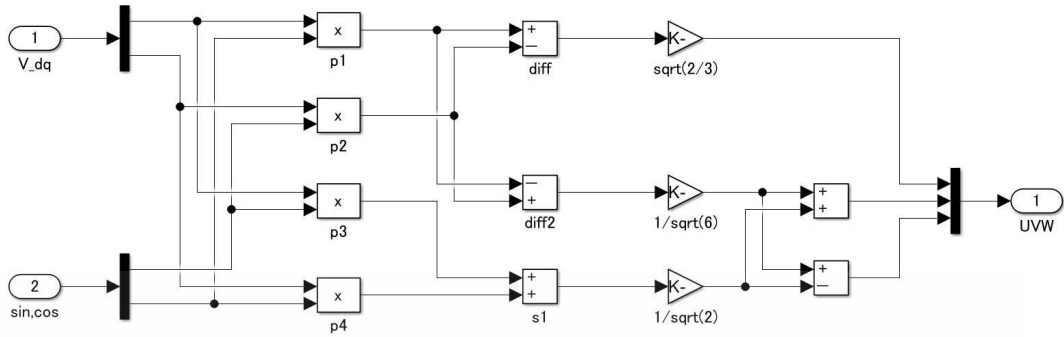
รูปที่ 3.5 แบบจำลองระบบอินพุตของชุดกึ่งหั่นขนาดกำลัง 300 วัตต์



รูปที่ 3.6 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร  
รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis



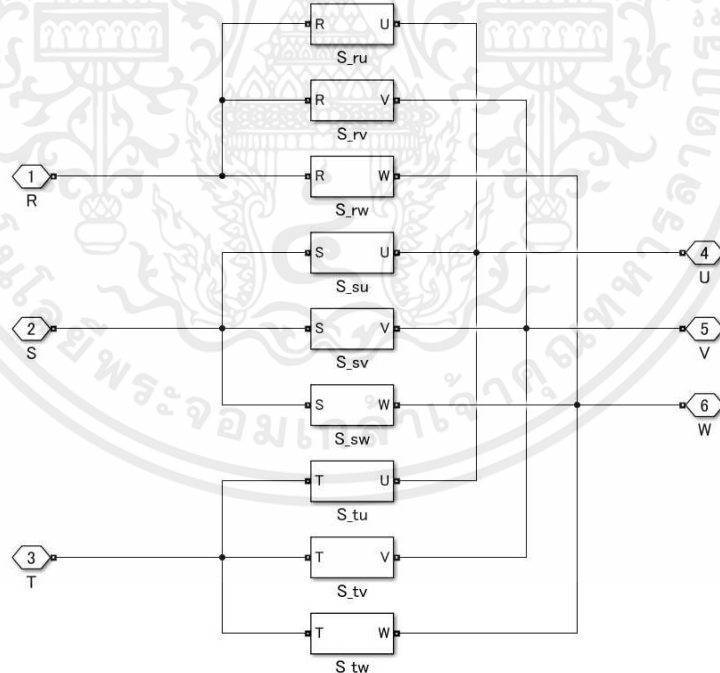
รูปที่ 3.7 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร  
รูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis



รูปที่ 3.8 แบบจำลองย่อยระบบอินพุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร จากรูปแบบแกนอ้างอิงโรเตอร์ d-axis และ q-axis เป็นเฟส UVW

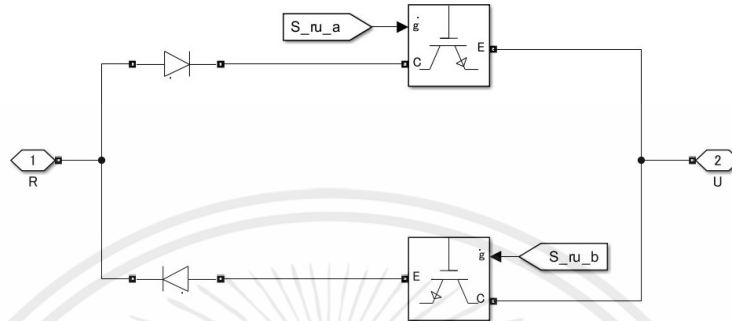
### 3.2.2 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่ง

เป็นแบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่งในโปรแกรม MATLAB & Simulink สร้างจากความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเมตริกซ์ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เพื่อแสดงวงจรสวิตซ์ซิ่ง



รูปที่ 3.9 แบบจำลองระบบสวิตซ์ซิ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

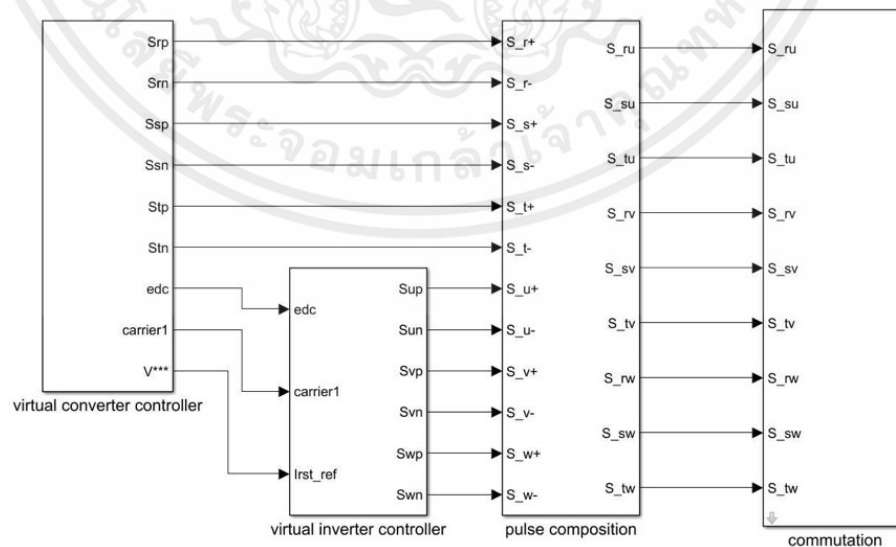
จากรูปที่ 3.9 ภายในแบบจำลองวงจรสวิตซ์ซึ่งในโปรแกรม MATLAB & Simulink จะประกอบด้วยแบบจำลองย่อยวงจรสวิตซ์ซึ่งแบบนำกระแสสองทิศทางของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์ในโปรแกรม MATLAB & Simulink ซึ่งจะทำการต่อแบบกลับหัวต่อชนกันดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองย่อยระบบสวิตซ์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

### 3.2.3 ระบบควบคุมสวิตซ์ซึ่ง

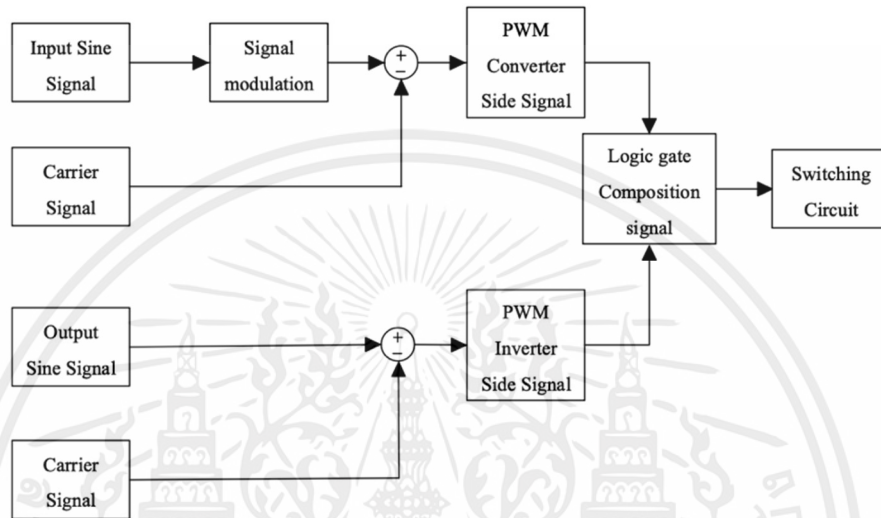
ระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์มีความยุ่งยากในการควบคุมสวิตซ์ซึ่งสองทิศทาง เนื่องจากความซับซ้อนของการควบคุมสวิตซ์ซึ่งในทิศทางที่ต่างกันในเวลาเดียวกันและเพื่อป้องกันการลัดวงจรที่อาจทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมวงจรกิจกรรมสวิตซ์ซึ่ง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ 1.ระบบ Converter controller 2.ระบบ Inverter controller 3.ระบบ Pulse composition และ 4.ระบบ Commutation ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบจำลองระบบควบคุมสวิตซ์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

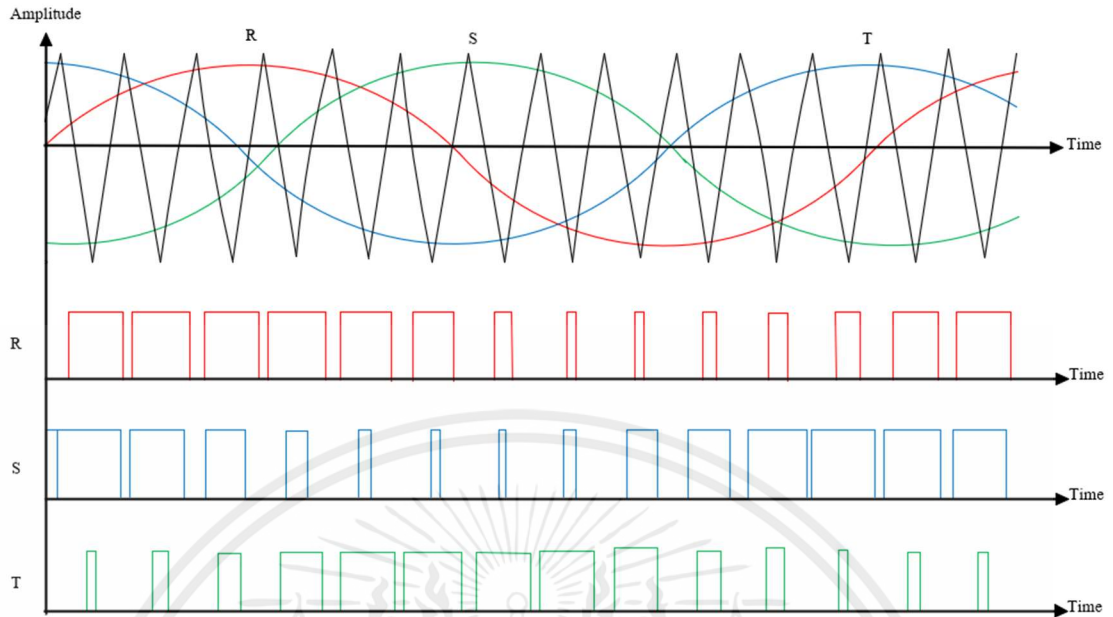
### 3.2.3.1 ระบบ Converter controller

เป็นการควบคุมการทำงานของสวิตช์ซึ่งให้อยู่ในสถานะที่ต้องการอย่างถูกต้อง โดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณสวิตช์ซึ่งที่ถูกเปิดปิดเพื่อควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจร ซึ่งวิธีการควบคุมจะเป็นไปตามไดอะแกรมดังรูปที่ 3.12



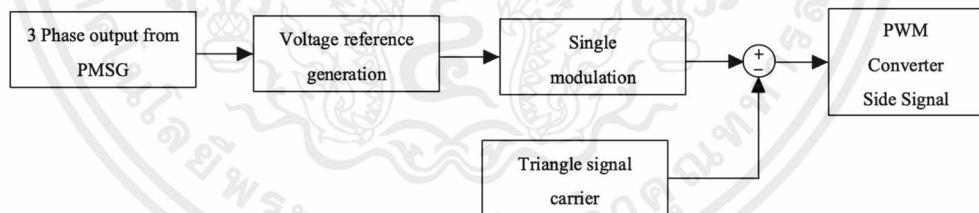
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสวิตช์ซึ่งด้วยสัญญาณ PWM

การควบคุมการเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณสวิตช์ซึ่งสามารถทำได้โดยการอาศัยสัญญาณควบคุมที่มาจากสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณมอดดูเลตและสัญญาณ PWM ซึ่งเริ่มด้วยการสร้างสัญญาณอินพุตไซน์ (Sinusoidal) ของระบบที่จะถูกควบคุมผ่านความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณ PWM จากนั้นจะมีการใช้สัญญาณสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้นทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ซึ่งในขณะที่สัญญาณไซน์กำลังทำงานและสัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าคงที่ตลอดเวลา ระบบจะทำการเปรียบเทียบค่าสัญญาณไซน์กับค่าสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งการเปรียบเทียบนี้จะเป็นตัวควบคุมความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณ PWM ให้สอดคล้องกับความต้องการในการควบคุมความกว้างของสัญญาณไซน์ หลังจากการเปรียบเทียบและควบคุมความกว้างของช่วงเวลาเสร็จสิ้น ระบบจะสร้างสัญญาณ PWM ที่มีความกว้างของช่วงเวลาสัญญาณไซน์ที่ถูกปรับค่าตามความต้องการ

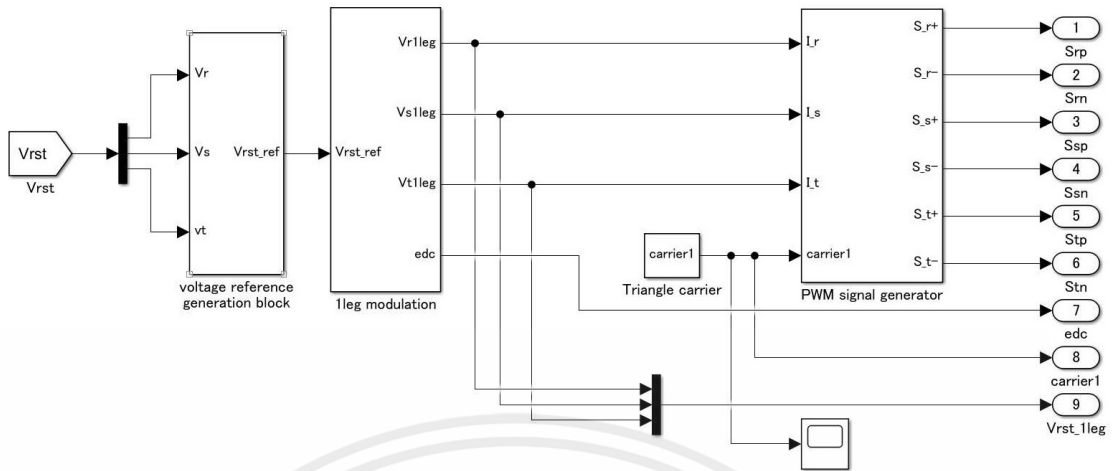


รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณมอดดูเลต และสัญญาณ PWM

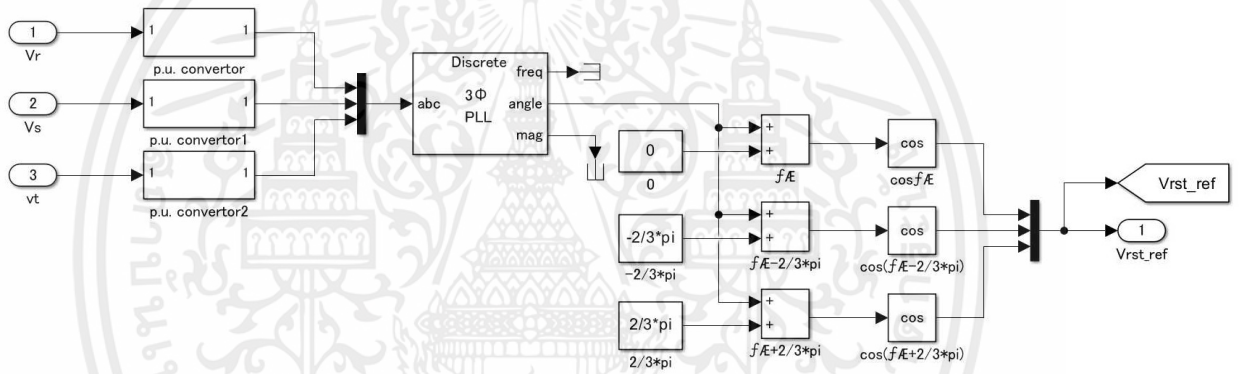
จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้น สัญญาณ PWM ที่ได้จะนำไปใช้ในการควบคุมวงจรสวิตซ์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์ต่อไป ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.14 และสามารถเขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink ได้ดังรูปที่ 3.15



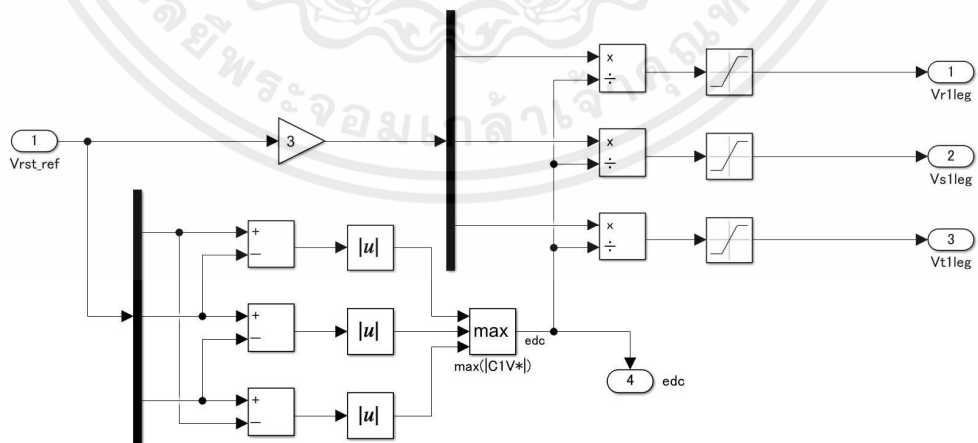
รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของชุด Converter ที่ใช้ในการควบคุม



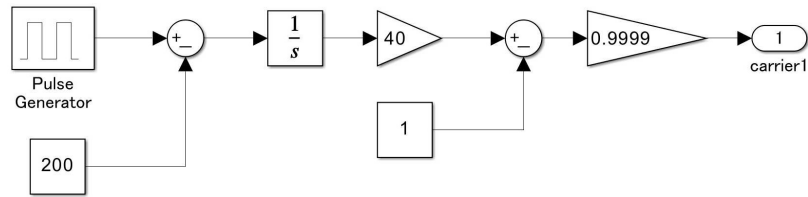
รูปที่ 3.15 แบบจำลองชุดวงจร Converter controller โดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุม



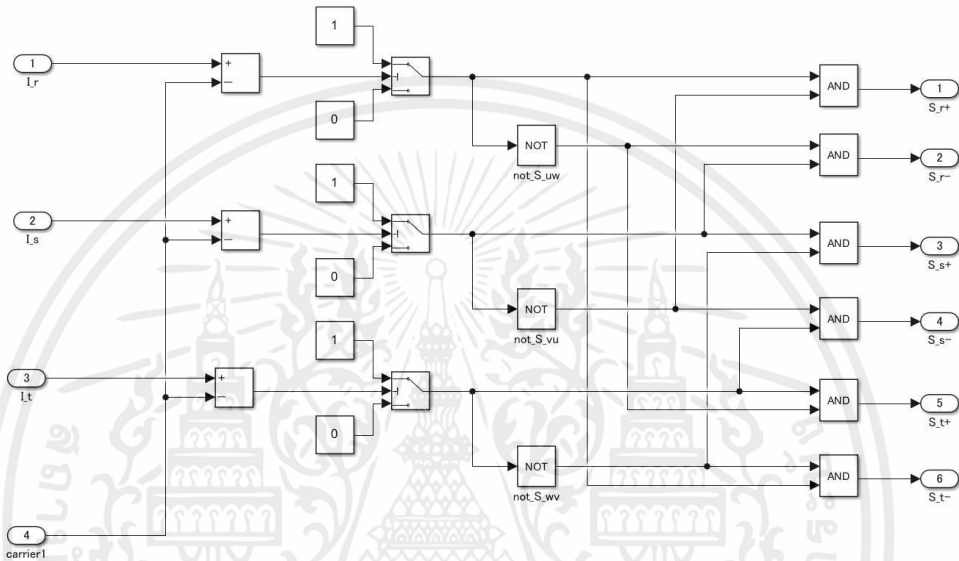
รูปที่ 3.16 แบบจำลองย่อยชุดกำเนิดแรงดันอ้างอิงในวงจร Converter controller



รูปที่ 3.17 แบบจำลองย่อยชุด 1leg modulation ในวงจร Converter controller



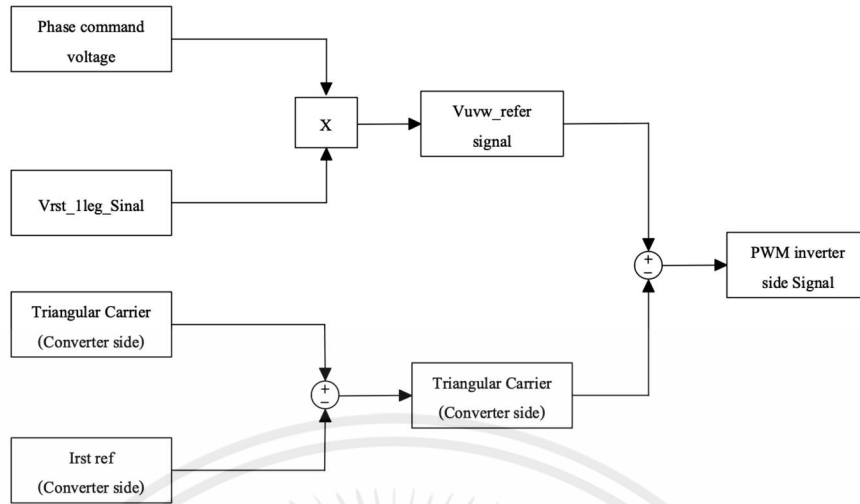
รูปที่ 3.18 แบบจำลองย่อย Triangle carrier ในวงจร Converter controller



รูปที่ 3.19 แบบจำลองย่อยสัญญาณ PWM signal generator ในวงจร Converter controller

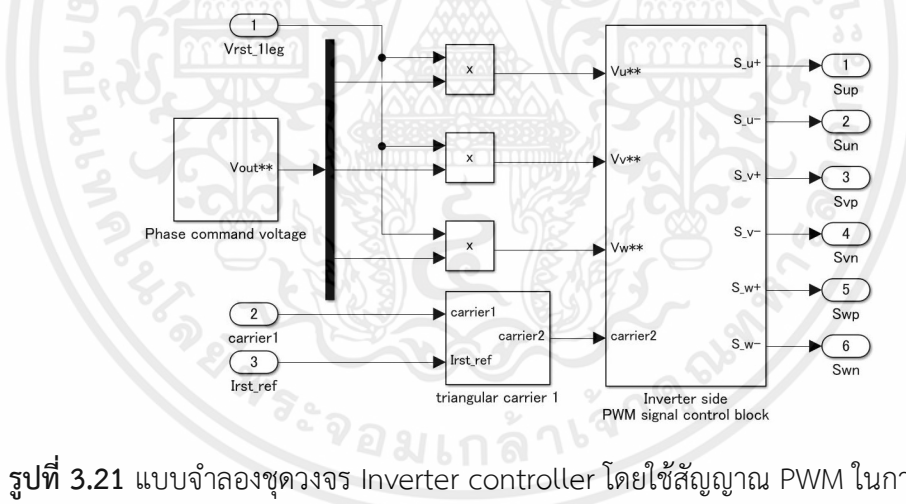
### 3.2.3.2 ระบบ Inverter controller

การแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์นั้นจะทำการแปลง (convert) และกลับ (invert) แสไฟฟ้าในช่วงเวลาเดียวกัน เนื่องในวงจรสวิตซ์ซึ่งของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามารถนำกระแสได้สองทิศทางในหนึ่งตัว โดยระบบ Inverter controller จะมีการทำงานใกล้เคียงกับชุด Converter controller แต่จะมีความแตกต่างในการสร้างสัญญาณ Triangular carrier ด้วยชุด Inverter controller นำไปเปรียบเทียบกับกระแสด้านอินพุตที่เป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อใช้ในการควบคุมวงจรสวิตซ์ซึ่งของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ฝั่งเอาต์พุตต่อไป

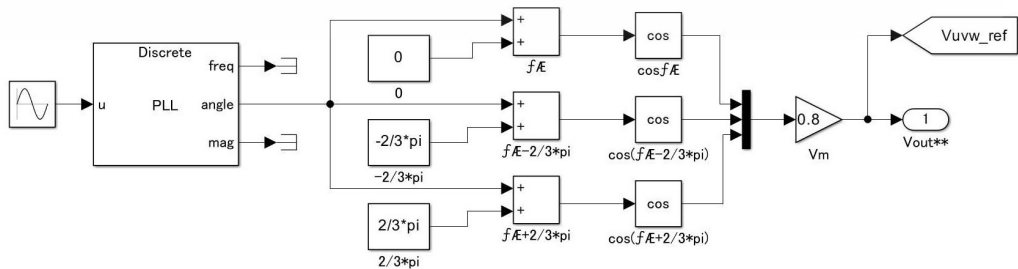


รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ในส่วนของชุด Inverter ที่ใช้ในการควบคุม

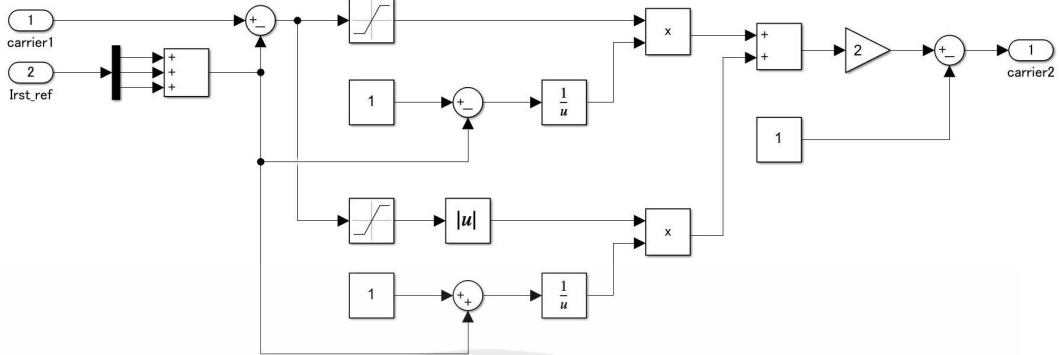
จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.20 สามารถเขียนแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink ได้ดังรูปที่ 3.21



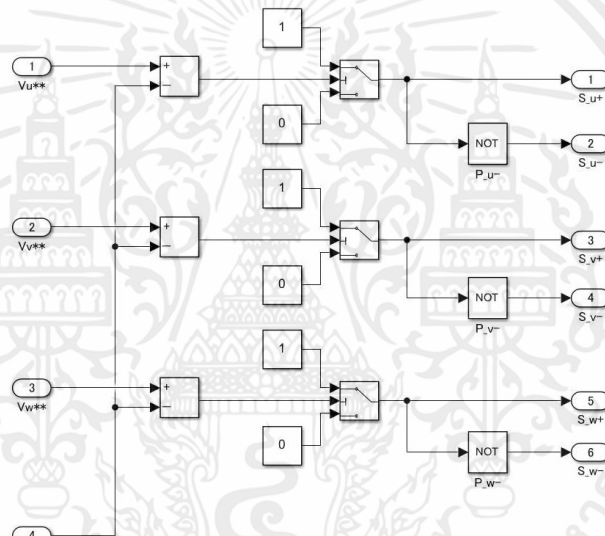
รูปที่ 3.21 แบบจำลองชุดวงจร Inverter controller โดยใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุม



รูปที่ 3.22 แบบจำลองย่อยชุด Phase command voltage ในวงจร Inverter controller



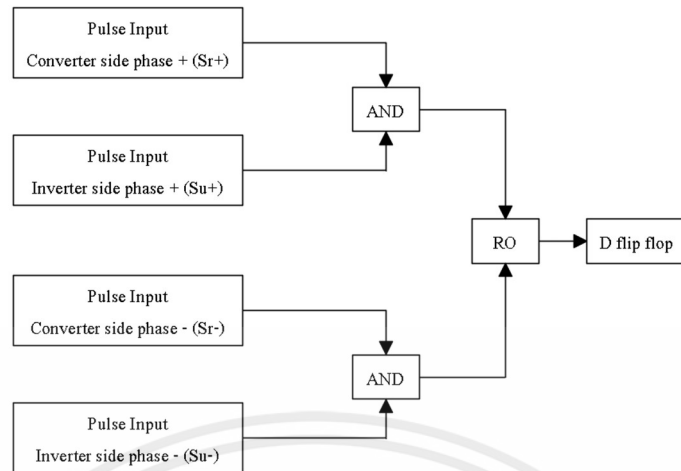
รูปที่ 3.23 แบบจำลองย่อยชุด Triangular carrier2 ในวงจร Inverter controller



รูปที่ 3.24 แบบจำลองย่อยชุด Inverter side PWM signal control block  
ในวงจร Inverter controller

### 3.2.3.3 ระบบ Pulse composition

ชุดระบบ Pulse composition เป็นระบบที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณพัลส์ที่ได้มาจากชุดวงจร Converter controller และชุด Inverter controller โดยใช้วงจรลอจิกเกตและวงจร D-Flip Flop ในการเปรียบเทียบเพื่อทำการสร้างสัญญาณควบคุมไปยังชุด Commutation ในการควบคุมสวิตซ์ซึ่งต่อไป ซึ่งจะเป็นไปตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุด Pulse composition

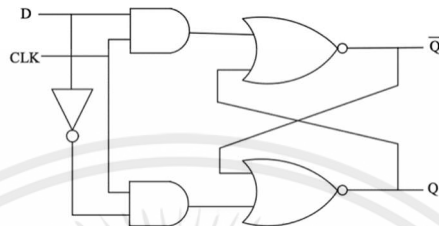
ตารางที่ 3.1 ตารางความจริงของ AND Gate

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

ตารางที่ 3.2 ตารางความจริงของ OR Gate

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

ซึ่งในส่วนของวงจร D-Flip flop จะทำหน้าที่หน่วงสัญญาณและจำค่าข้อมูลของการกำหนดช่วงเวลาสัญญาณนาฬิกาในการควบคุมค่าเอาต์พุตนำมาสร้างช่วง Dead time เพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจรของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นในวงจรสวิตซ์ซึ่ง โดยวงจร D-flip flop จะเป็นไปตามรูปที่ 3.26



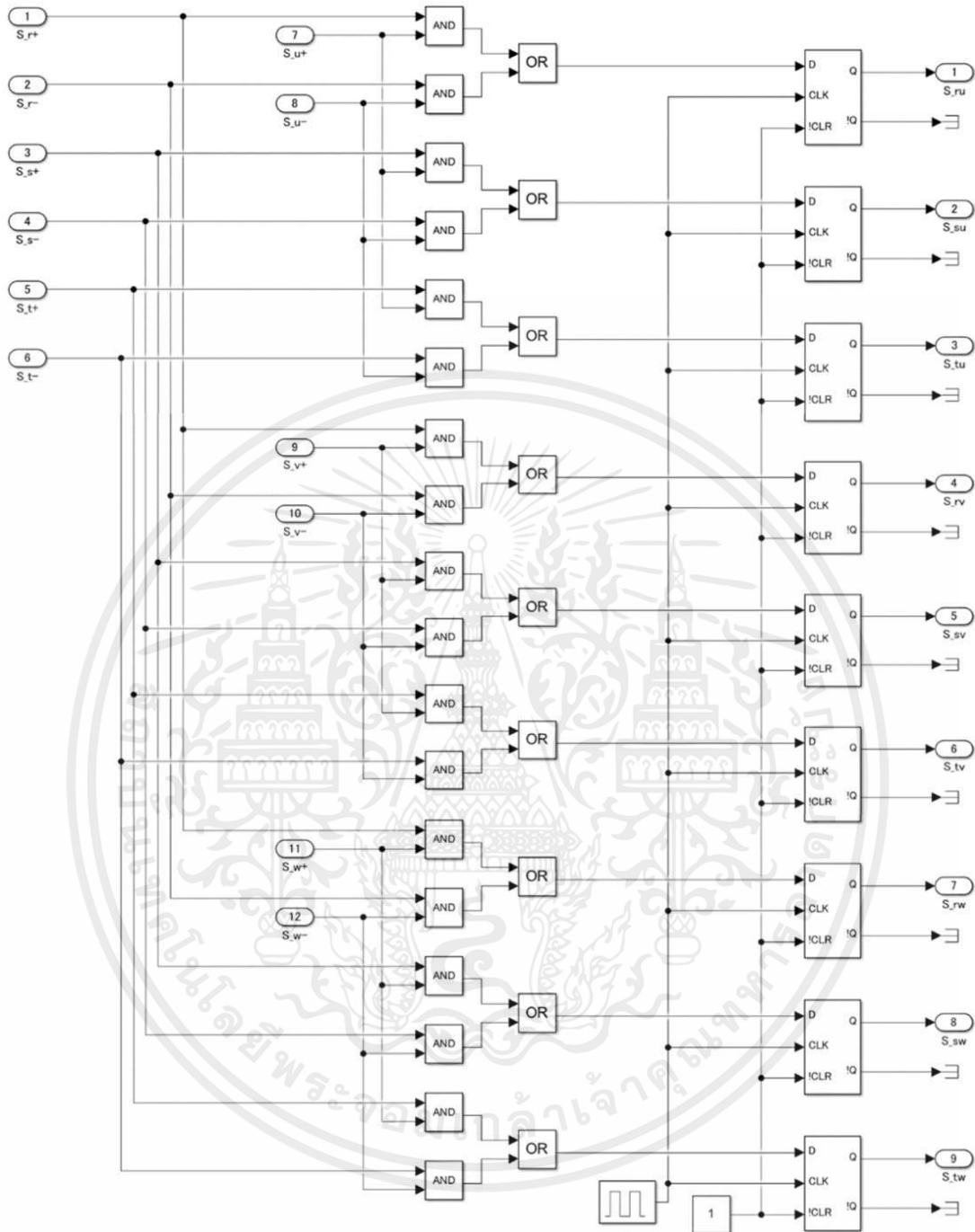
รูปที่ 3.26 วงจร Logic gate ของ D-flip flop

ตารางที่ 3.3 ตารางความจริงของ D-flip flop

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

โดยวงจร D-flip flop จะมีสัญญาณนำเข้าหลัก 2 สัญญาณ คือ D (Data) และ CLK (Clock) และมีสัญญาณเอาต์พุตคือ Q (Output) จากตารางที่ 3.3 สถานะที่ 1 คือ เมื่อมีอินพุตข้อมูลผ่านขา D ไม่ว่าจะ เป็น 0 หรือ 1 ถ้าอินพุต CLK เป็น 0 (ขอบขาลงจาก 1→0) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุต Q จากสถานะก่อนหน้า ต่อมาเมื่อเข้าสถานะที่ 2 คือ เมื่อมีอินพุต D เข้ามาเช่นเดียวกันแต่ถ้าอินพุต CLK เป็น 1 (ขอบขาขึ้นจาก 0→1) สัญญาณนาฬิกา CLK จะทำให้ข้อมูลที่อยู่ที่ขา D จดจำและแสดงค่า Q ที่เปลี่ยนแปลงตามอินพุต D

จากหลักการที่กล่าวมาสามารถนำมาสร้างแบบจำลองภาควงจรควบคุมระบบ Pulse composition ในโปรแกรม MATLAB & Simulink ดังรูปที่ 3.27

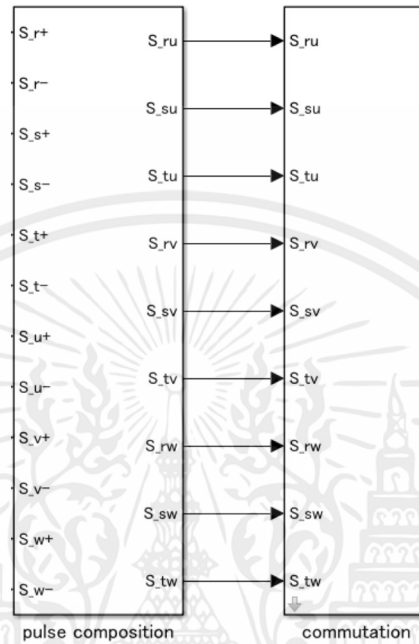


รูปที่ 3.27 แบบจำลองชุดวงจร Pulse composition

### 3.2.3.4 ระบบ Commutation

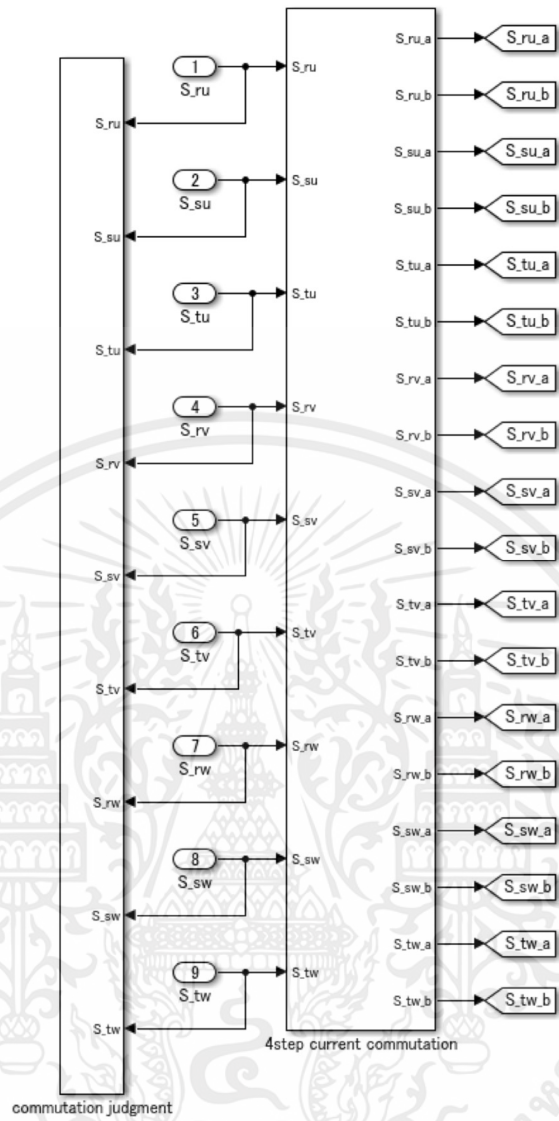
โดยในปริภูมิพหุนามนี้จะใช้ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเสถียรสูง มีโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรของวงจรสวิตซ์ซึ่งที่ต่ำที่สุด

จากทั้งหมด 5 วิธี ซึ่งการทำงาน Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation ได้ดังรูปที่ 3.28

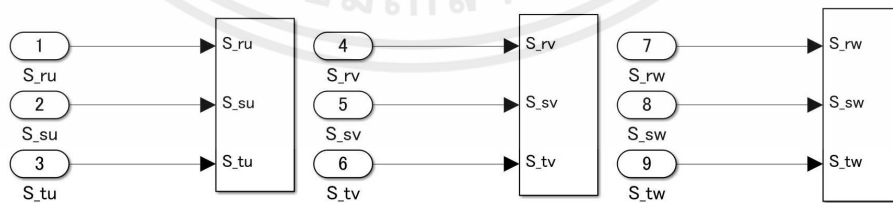


รูปที่ 3.28 บล็อกไดอะแกรมความสัมพันธ์ชุด Pulse composition กับชุด Commutation

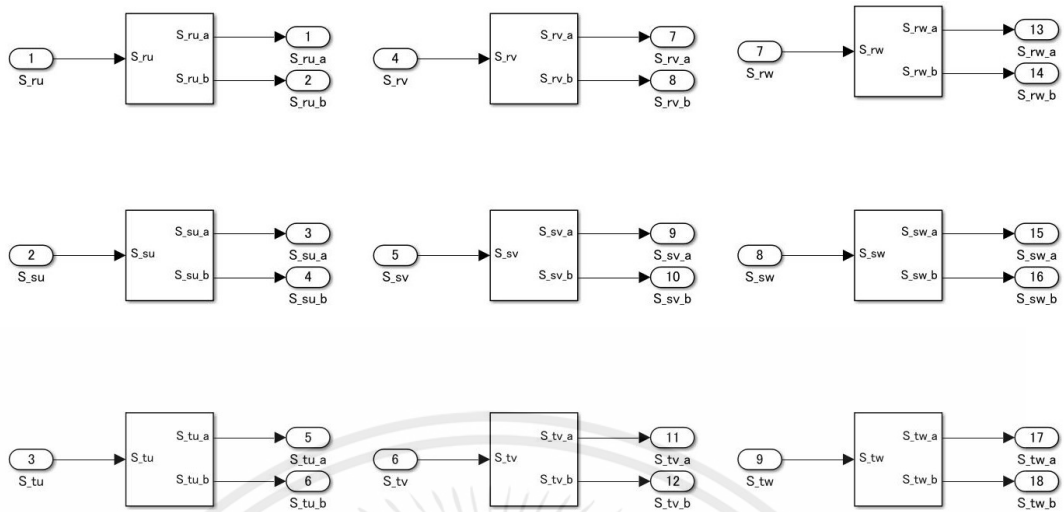
จากรูปที่ 3.28 วงจร Commutation จะรับสัญญาณพัลส์ของชุดวงจร Pulse composition ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณพัลส์ระหว่างชุดวงจร Converter และ Inverter โดยในชุด Commutation สามารถสร้างเป็นชุดจำลองภาควงจรระบบ Commutation ใน โปรแกรม MATLAB & Simulink ได้ดังรูปที่ 3.29



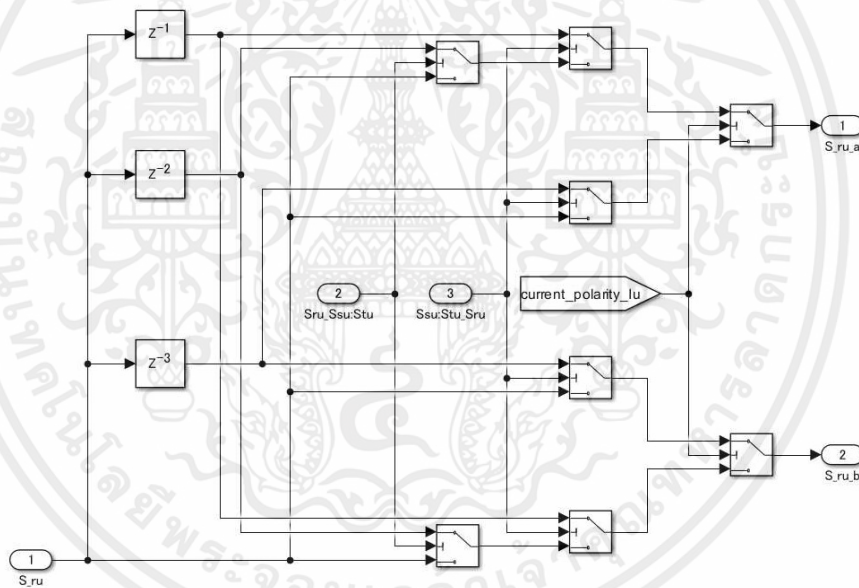
รูปที่ 3.29 แบบจำลองชุดวงจร Commutation



รูปที่ 3.30 แบบจำลองย่อยชุด Commutation judgment ในวงจร Commutation

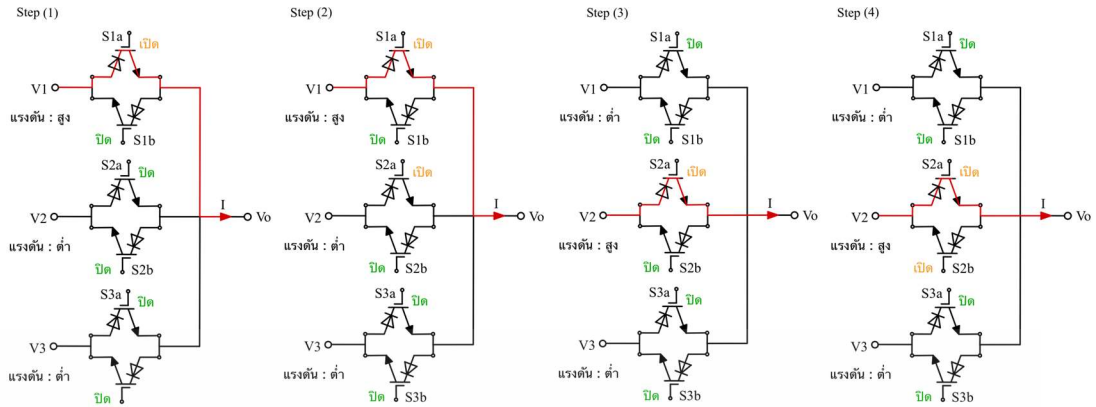


รูปที่ 3.31 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation



รูปที่ 3.32 แบบจำลองย่อยชุด 4Step current commutation ในวงจร Commutation

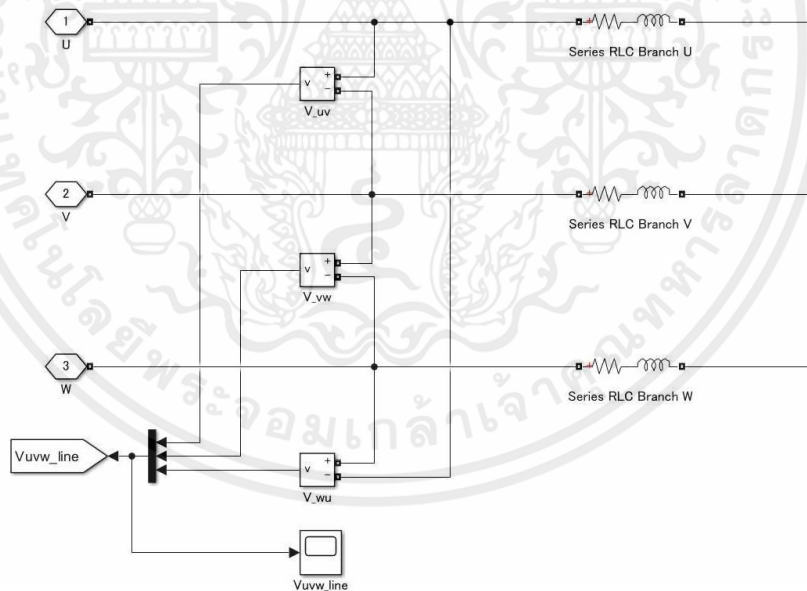
ระบบนี้เป็นการกำหนดเวลาสวิตซ์ซึ่งของสองสวิตซ์ในชั่วกระแสเดียวกัน โดยพิจารณาจากการกำหนดระยะเวลา Dead Time ให้สอดคล้องกับการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าตามวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.33 เพื่อเปิดและปิดสวิตซ์อุปกรณ์ จากนั้นกำหนดเวลาและปรับค่าสวิตซ์ซึ่งตามทฤษฎีอ้างอิงเพื่อป้องกันการลัดวงจร



รูปที่ 3.33 วงจรการไหลของแรงดันไฟฟ้า

### 3.2.4 ระบบเอาต์พุต

เมื่อสัญญาณผ่านชุดสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์จะได้สัญญาณ 3 เฟส สามารถควบคุมเฟสและความถี่นำไปใช้งานได้ ซึ่งในแบบการจำลองของระบบเอาต์พุตจะต่อโหลดแบบ RL เพื่อจำลองเป็นระบบสายส่งต่อไปดังรูปที่ 3.34



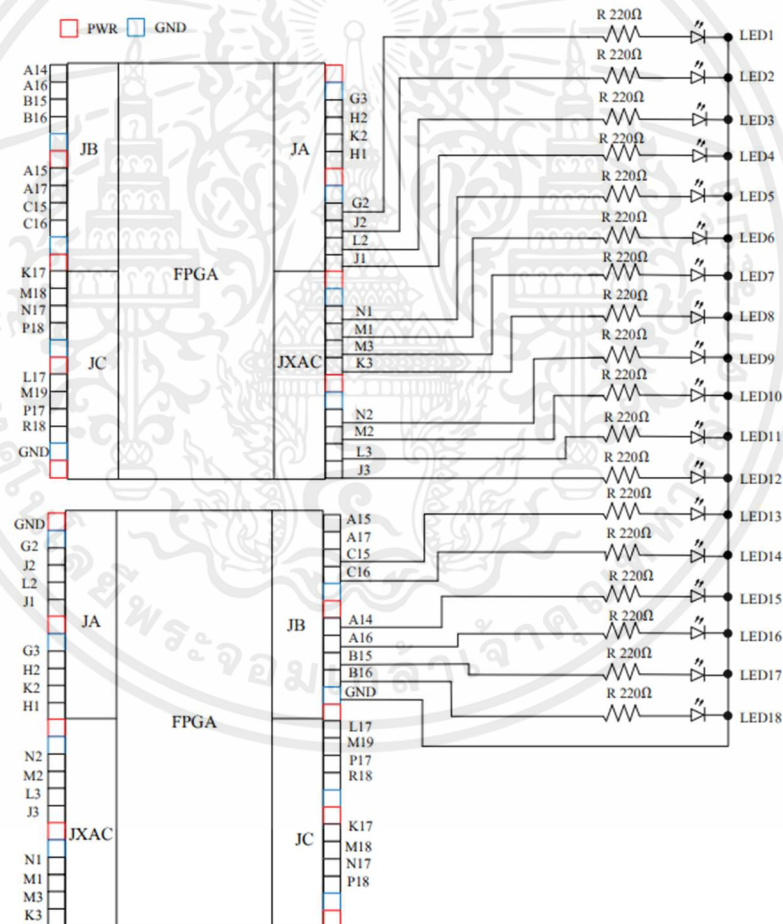
รูปที่ 3.34 แบบจำลองระบบเอาต์พุตโหลด RL ของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 3.34 นอกจากสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรกำลังสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์จ่ายไปยังโหลด RL แล้ว ก็จะมีการนำสัญญาณ 3 เฟส เอาต์พุตบางส่วนมาเปรียบเทียบเพื่อเข้าไปยังวงจรชุด Control Inverter โดยที่เฟส  $V_u$  จะถูกเปรียบเทียบกับเฟส  $V_v$  ซึ่งจะ

ได้สัญญาณ  $V_{uv}$ , 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

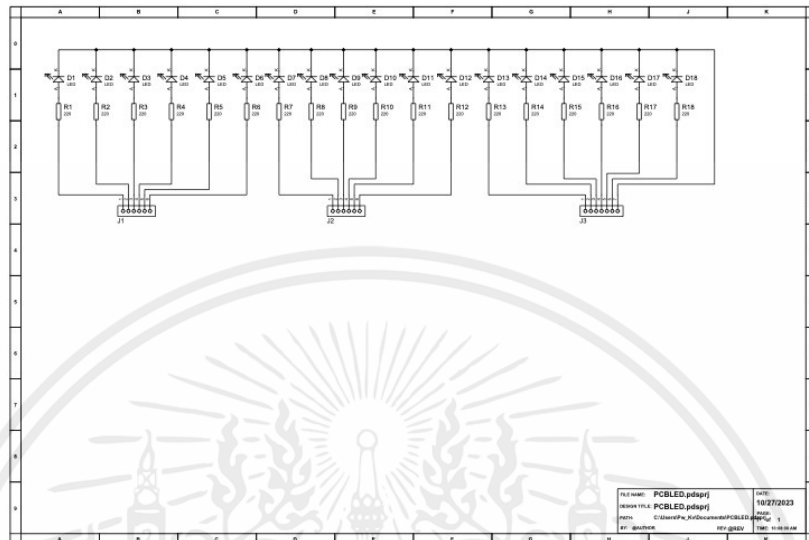
### 3.4 การออกแบบ

ทำการออกแบบวงจรเพื่อแสดงถึงการเชื่อมต่อองค์ประกอบระหว่างบอร์ดควบคุม FPGA และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ โดย เลือกใช้งานบอร์ด FPGA Basys3 ที่มีพอร์ต I/O เพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทาน 220 โอห์มและไดโอดเปล่งแสง ทำการเชื่อมต่อให้เป็นไปตามภาระงานที่กำหนดไว้เพื่อให้วงจรทำงานตามประสิทธิภาพที่ต้องการ



รูปที่ 3.35 แผนภาพวงจรการเชื่อมต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้า

ทำการออกแบบสร้างแผนภาพลายวงจรแสดงการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของวงจรดังรูปที่ 3.36 เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการสร้างวงจรทางกลไกหรืออิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

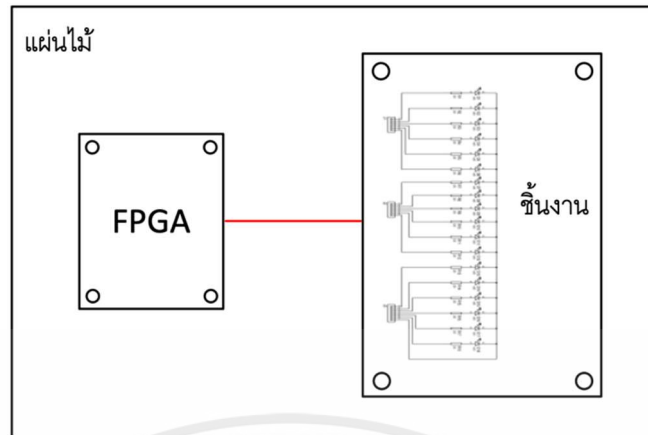


รูปที่ 3.36 แผนภาพลายวงจรการเชื่อมต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้า

### 3.5 สร้าง Prototype

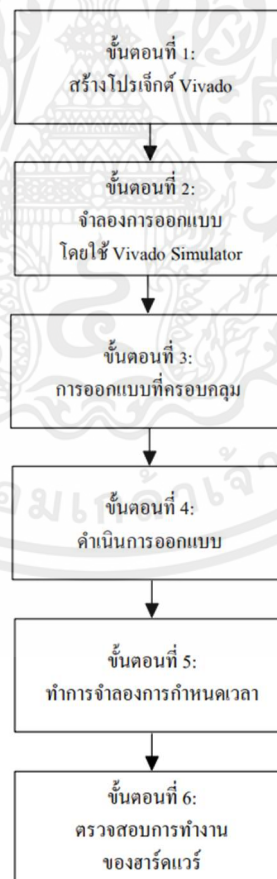
สร้าง Prototype จากลายวงจรที่ออกแบบ ดังนี้

- 1) เลือกชิ้นงานหรือวัสดุสำหรับการเชื่อมต่อองค์ประกอบและวงจร โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- 2) ทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์
  - เชื่อมต่อตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทาน 220 โอห์ม กับพอร์ต I/O ของ FPGA ที่ได้วาดไว้ในแผนภาพ
  - เชื่อมต่อ LED กับพอร์ต I/O ของ FPGA ที่ได้วาดไว้ในแผนภาพ



รูปที่ 3.37 Prototype เชื่อมต่อองค์ประกอบทางไฟฟ้า

- 3) เขียนคำสั่งในโปรแกรม Vivado นอกจากนี้จะมีการกำหนดพอร์ต I/O ที่จะให้สัญญาณไปยัง LED โดยมีบล็อกไดอะแกรมการประมวลผลด้วยบอร์ดควบคุม FPGA ดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 บล็อกไดอะแกรมการประมวลผลด้วยบอร์ดควบคุม FPGA

- 4) ทดสอบการทำงานของวงจรโดยการตรวจสอบการทำงานของ LED ที่ถูกเชื่อมต่อไปตามวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอนของระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หรือไม่
- 5) ปรับปรุงและแก้ไขหากมีปัญหาหรือข้อผิดพลาด เพื่อให้การควบคุมทำงานได้อย่างถูกต้องและตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด



## บทที่ 4

### การทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงรายละเอียดแบบจำลองวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน ด้วยบล็อกการจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink ซึ่งในบทที่ 4 จะมีการกล่าวถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบของระบบการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในระบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB & Simulink ซึ่งมีเนื้อหาของ การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองจากบล็อกการจำลองและการจำลองจากการควบคุมด้วยบอร์ด FPGA เพื่อให้เห็นภาพรวมของระบบและวิธีการทำงานของแต่ละบล็อกวงจรย่อย

#### 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

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

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบอินพุต ระบบสวิตซ์ซิ่ง และระบบเอาต์พุต

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ	หน่วย
ระบบอินพุต		
แรงดัน	5	โวลต์
ความถี่	60	เฮิรตซ์
ระบบสวิตซ์ซิ่ง		
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

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ระบบเอาต์พุต		
ความต้านทานของโหลด	15	โอห์ม
ความเหนียวของโหลด	10	มิลลิเฮนรี
ความถี่	40,50,60	เฮิรตซ์

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุมสวิตซ์ซึ่ง

โดยจะประกอบไปด้วย ระบบ Converter controller ระบบ Inverter controller ระบบ Pulse composition และระบบ Commutation

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดสอบ	หน่วย
<b>ระบบ Converter controller</b>		
อัตราเพิ่มขยายสัดส่วนของตัวกรองลูป 3 เฟส PLL	200	-
อัตราเพิ่มขยายอนุพันธ์ของตัวกรองลูป 3 เฟส PLL	2000	-
ความถี่เริ่มต้น 3 เฟส PLL	60	เฮิรตซ์
ความถี่ของ Triangle carrier1	2000	เฮิรตซ์
ความกว้างของสัญญาณพัลส์	50	เปอร์เซ็นต์
<b>ระบบ Inverter controller</b>		
ความกว้างอ้างอิงของสัญญาณไซน์	1	-
ความถี่อ้างอิงของสัญญาณไซน์	50	เฮิรตซ์
อัตราขยายอนุพันธ์ของตัวตรวจจับลูป 1 เฟส PLL	1000	-
อัตราขยายสัดส่วนของตัวกรองลูป 1 เฟส PLL	400	-
อัตราขยายอนุพันธ์ของตัวกรองลูป 1 เฟส PLL	20000	-
ความถี่เริ่มต้น 1 เฟส PLL	50	เฮิรตซ์
<b>ระบบ Pulse composition</b>		
ระยะเวลาสร้างสัญญาณพัลส์ CLK ของ D flip-flop	15.5	ไมโครวินาที
ความกว้างสร้างสัญญาณพัลส์ CLK ของ D flip-flop	50	เปอร์เซ็นต์
<b>ระบบ Commutation</b>		
เวลาที่เปลี่ยนสถานะของการควบคุม	5	ไมโครวินาที

#### 4.2 ผลการทดสอบระบบการทำงานการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

ในการจำลองระบบจะทำการแบ่งทดสอบเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ เงื่อนไขที่ 1 คือ ความถี่ที่ต้องการ 40 เฮิร์ตซ์ เงื่อนไขที่ 2 คือ ความถี่ที่ต้องการ 50 เฮิร์ตซ์ และเงื่อนไขที่ 3 คือ ความถี่ที่ต้องการ 60 เฮิร์ตซ์

**ตารางที่ 4.3** ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์

ระบบ 4 step current commutation		
Frequency and Duty Cycle of LED 1	1.643	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.906	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 2	1.952	กิโลเฮิร์ตซ์
	56.823	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 3	2.027	กิโลเฮิร์ตซ์
	65.103	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 4	1.984	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.615	เปอร์เซ็นต์
Frequency And Duty Cycle of LED 5	1.801	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.577	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 6	1.871	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.409	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 7	1.725	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.859	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 8	2.054	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.614	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 9	1.837	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.529	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 10	1.907	กิโลเฮิร์ตซ์
	57.713	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 11	1.760	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.562	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 12	1.906	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.288	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Frequency and Duty Cycle of LED 13	1.712	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.276	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 14	2.005	กิโลเฮิร์ตซ์
	54.313	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 15	1.777	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.074	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 16	1.892	กิโลเฮิร์ตซ์
	57.497	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 17	1.738	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.166	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 18	1.835	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.701	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์

ระบบ 4 step current commutation		
Frequency and Duty Cycle of LED 1	1.641	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.864	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 2	2.032	กิโลเฮิร์ตซ์
	48.073	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 3	2.198	กิโลเฮิร์ตซ์
	64.587	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 4	1.984	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.800	เปอร์เซ็นต์
Frequency And Duty Cycle of LED 5	1.730	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.228	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 6	1.871	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.495	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 7	1.730	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.859	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Frequency and Duty Cycle of LED 8	2.044	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.883	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 9	1.921	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.711	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 10	1.901	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.003	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 11	1.764	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.193	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 12	1.895	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.153	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 13	1.712	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.276	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 14	1.984	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.399	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 15	1.771	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.498	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 16	1.881	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.100	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 17	1.744	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.375	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 18	1.841	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.773	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

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

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

Frequency and Duty Cycle of LED 15	1.747	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.349	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 16	1.917	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.579	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 17	1.784	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.454	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 18	1.911	กิโลเฮิร์ตซ์
	59.035	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

ระบบ 4 step current commutation		
Frequency and Duty Cycle of LED 1	1.723	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.549	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 2	2.162	กิโลเฮิร์ตซ์
	48.019	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 3	2.197	กิโลเฮิร์ตซ์
	64.201	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 4	1.973	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.189	เปอร์เซ็นต์
Frequency And Duty Cycle of LED 5	1.831	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.459	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 6	1.970	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.029	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 7	1.891	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.676	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 8	2.080	กิโลเฮิร์ตซ์
	51.599	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 9	1.857	กิโลเฮิร์ตซ์
	60.484	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

Frequency and Duty Cycle of LED 10	1.897	กิโลเฮิร์ตซ์
	59.094	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 11	1.655	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.196	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 12	1.831	กิโลเฮิร์ตซ์
	59.625	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 13	1.766	กิโลเฮิร์ตซ์
	63.263	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 14	2.009	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.243	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 15	1.768	กิโลเฮิร์ตซ์
	61.049	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 16	1.927	กิโลเฮิร์ตซ์
	57.969	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 17	1.778	กิโลเฮิร์ตซ์
	62.244	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 18	1.905	กิโลเฮิร์ตซ์
	58.846	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์

ระบบ 4 step current commutation		
Frequency and Duty Cycle of LED 1	2.331	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.327	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 2	2.550	กิโลเฮิร์ตซ์
	46.974	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 3	1.008	กิโลเฮิร์ตซ์
	92.178	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 4	1.404	กิโลเฮิร์ตซ์
	88.305	เปอร์เซ็นต์
Frequency And Duty Cycle of LED 5	2.219	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.852	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 6	2.119	กิโลเฮิร์ตซ์
	48.058	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 7	2.199	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.900	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 8	2.338	กิโลเฮิร์ตซ์
	44.697	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 9	2.363	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.425	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 10	2.423	กิโลเฮิร์ตซ์
	48.084	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 11	1.047	กิโลเฮิร์ตซ์
	92.203	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 12	1.401	กิโลเฮิร์ตซ์
	87.727	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 13	839.793	กิโลเฮิร์ตซ์
	92.629	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 14	1.666	กิโลเฮิร์ตซ์
	70.327	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

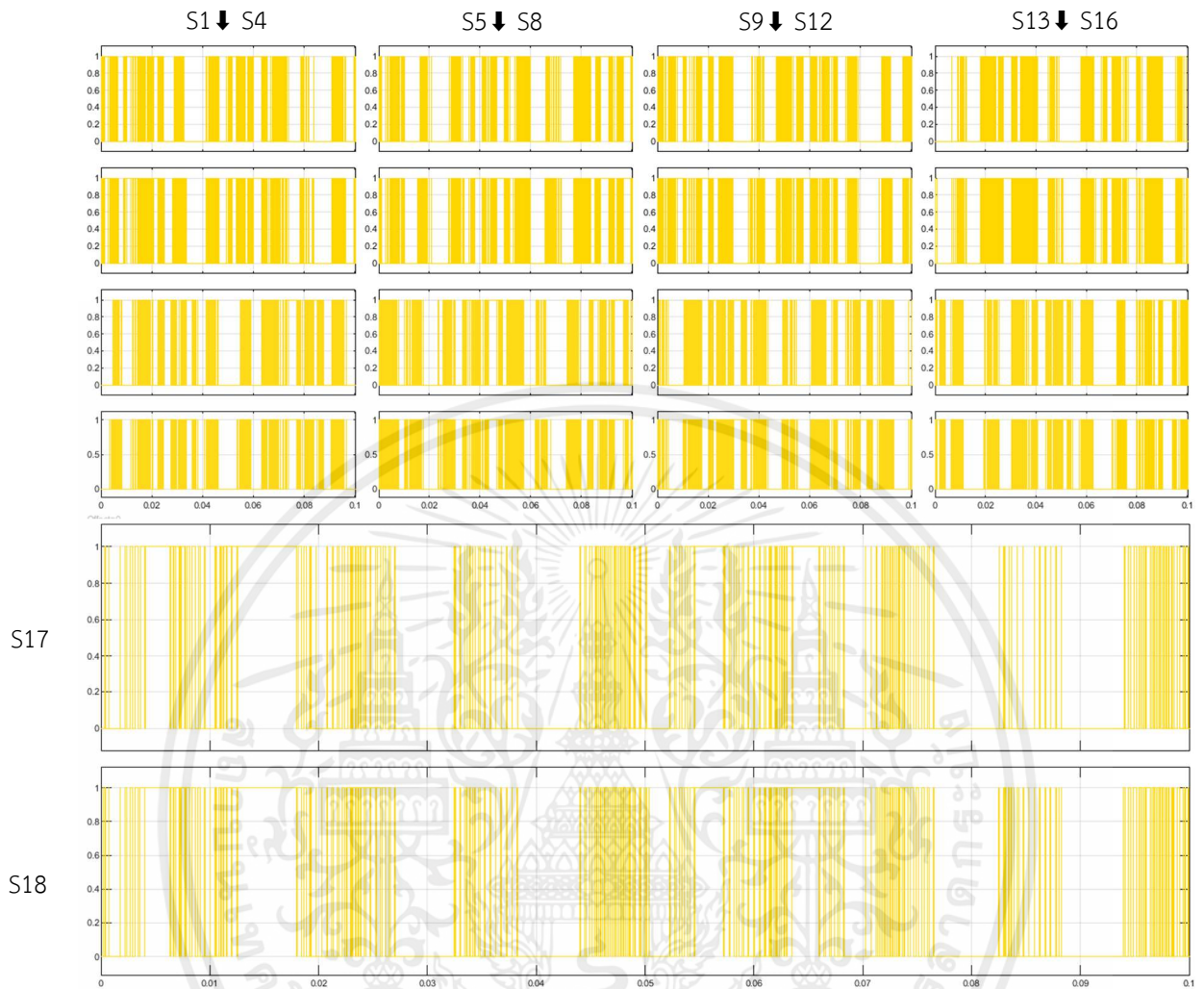
Frequency and Duty Cycle of LED 15	2.061	กิโลเฮิร์ตซ์
	54.952	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 16	2.062	กิโลเฮิร์ตซ์
	50.754	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 17	2.326	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.130	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 18	2.351	กิโลเฮิร์ตซ์
	47.132	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์

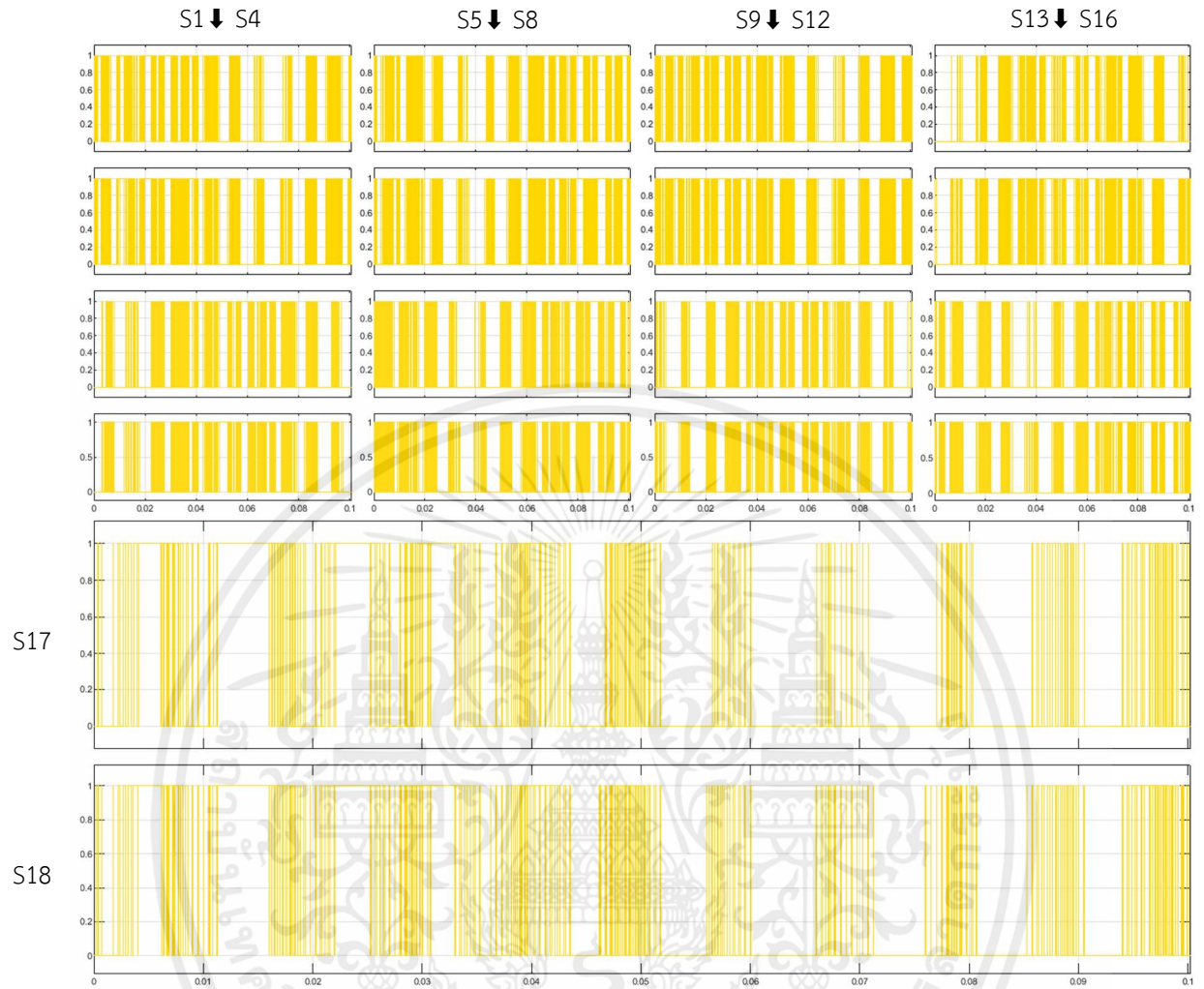
ระบบ 4 step current commutation		
Frequency and Duty Cycle of LED 1	2.331	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.327	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 2	2.558	กิโลเฮิร์ตซ์
	41.570	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 3	1.188	กิโลเฮิร์ตซ์
	87.494	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 4	1.404	กิโลเฮิร์ตซ์
	88.126	เปอร์เซ็นต์
Frequency And Duty Cycle of LED 5	2.129	กิโลเฮิร์ตซ์
	53.061	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 6	2.119	กิโลเฮิร์ตซ์
	48.178	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 7	2.199	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.900	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 8	2.343	กิโลเฮิร์ตซ์
	44.109	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 9	2.413	กิโลเฮิร์ตซ์
	50.391	เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

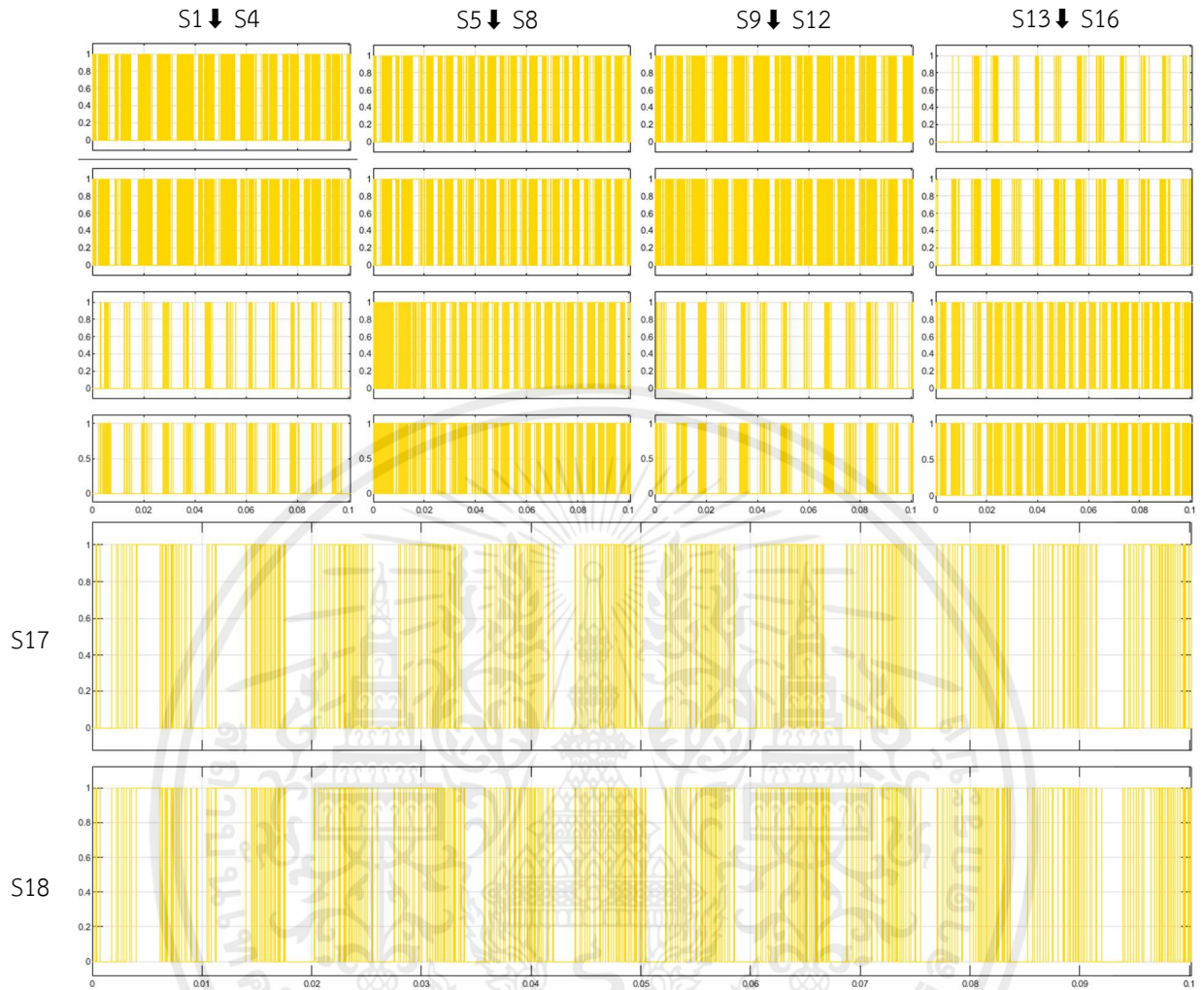
Frequency and Duty Cycle of LED 10	2.423	กิโลเฮิร์ตซ์
	48.012	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 11	1.055	กิโลเฮิร์ตซ์
	92.182	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 12	1.401	กิโลเฮิร์ตซ์
	87.758	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 13	839.793	กิโลเฮิร์ตซ์
	92.629	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 14	1.665	กิโลเฮิร์ตซ์
	69.580	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 15	2.061	กิโลเฮิร์ตซ์
	54.952	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 16	2.062	กิโลเฮิร์ตซ์
	50.792	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 17	2.326	กิโลเฮิร์ตซ์
	52.130	เปอร์เซ็นต์
Frequency and Duty Cycle of LED 18	2.351	กิโลเฮิร์ตซ์
	47.177	เปอร์เซ็นต์



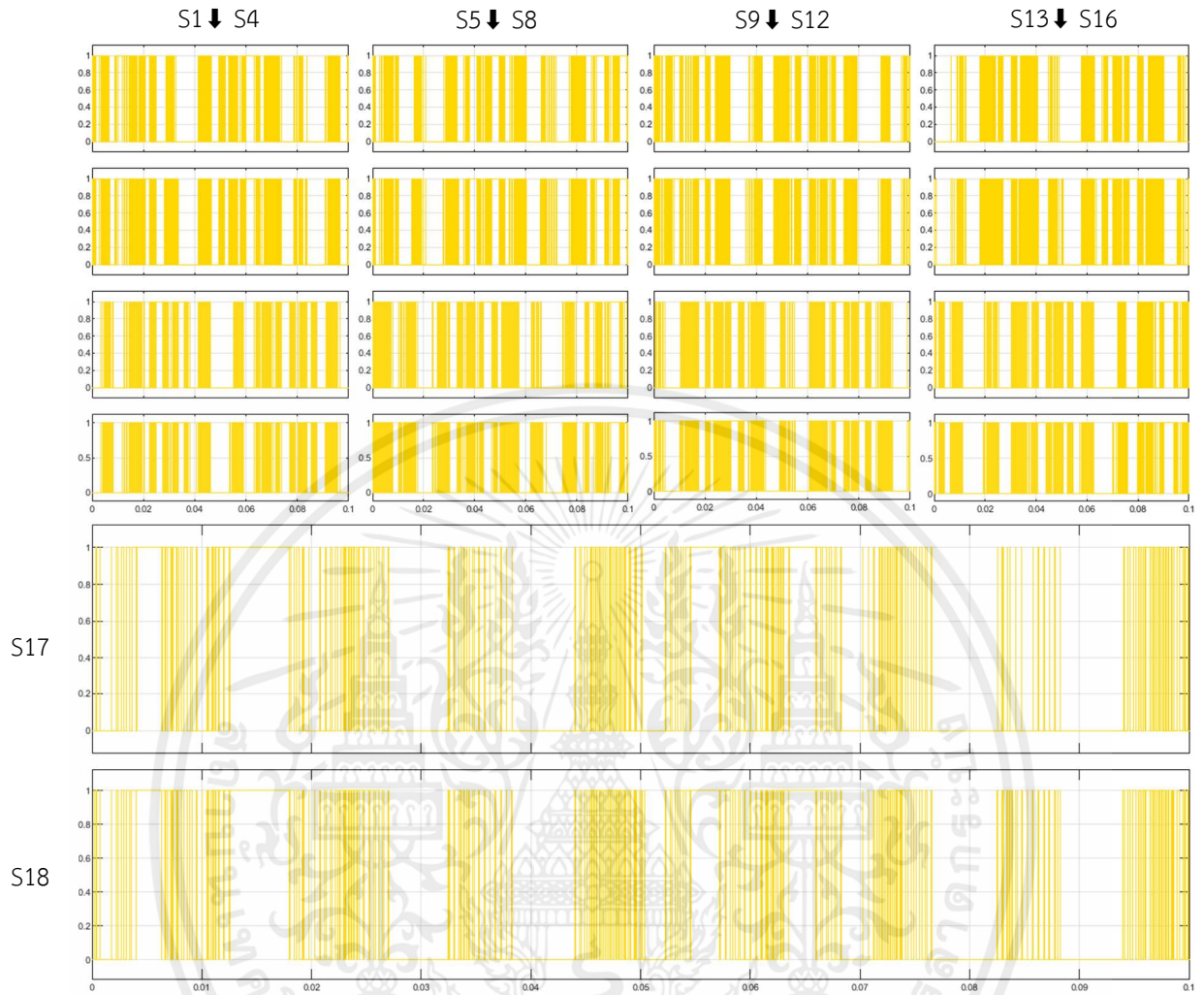
รูปที่ 4.1 กราฟผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮอร์ตซ์



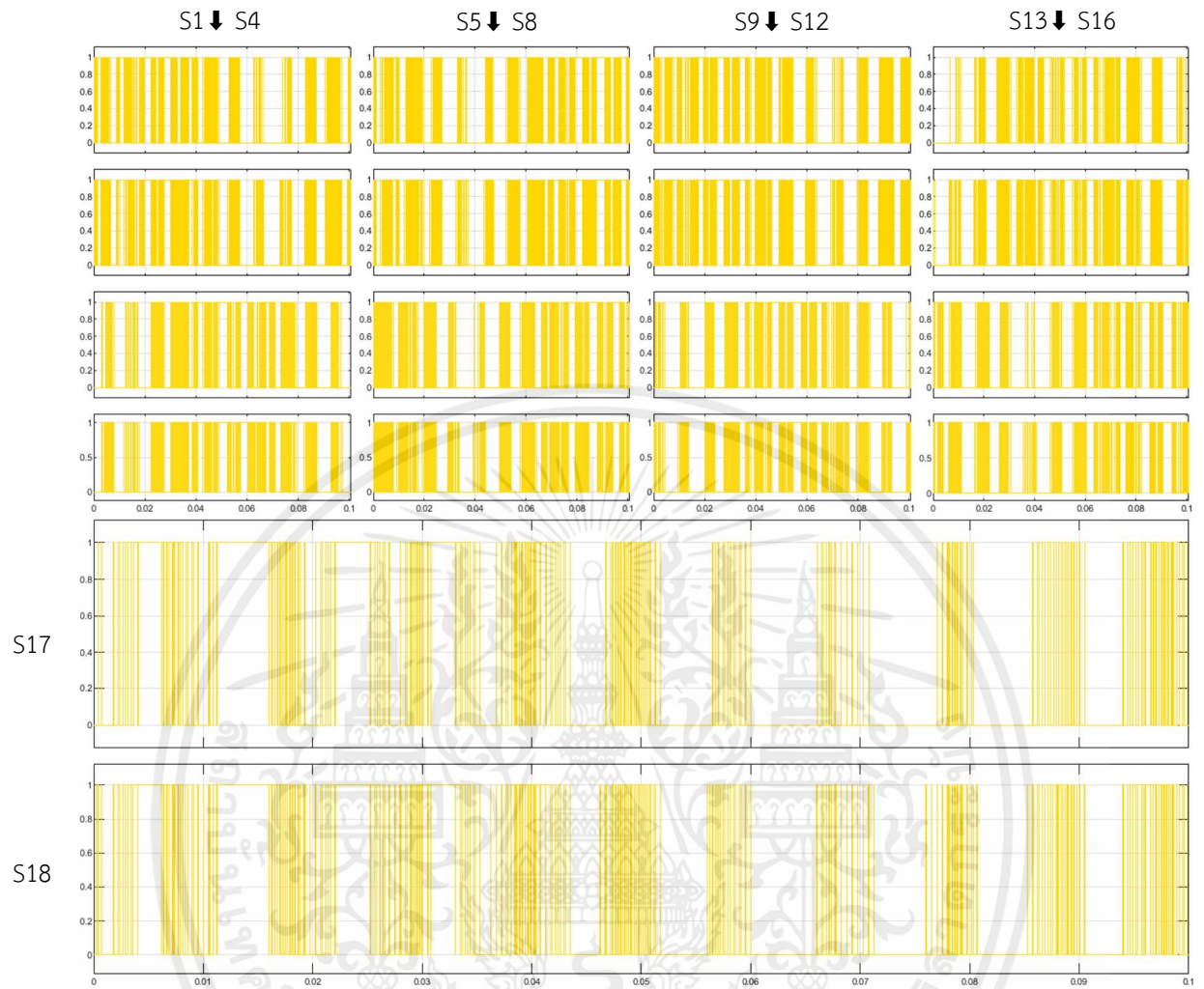
รูปที่ 4.2 กราฟผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.3 กราฟผลการจำลองการแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.4 กราฟผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์



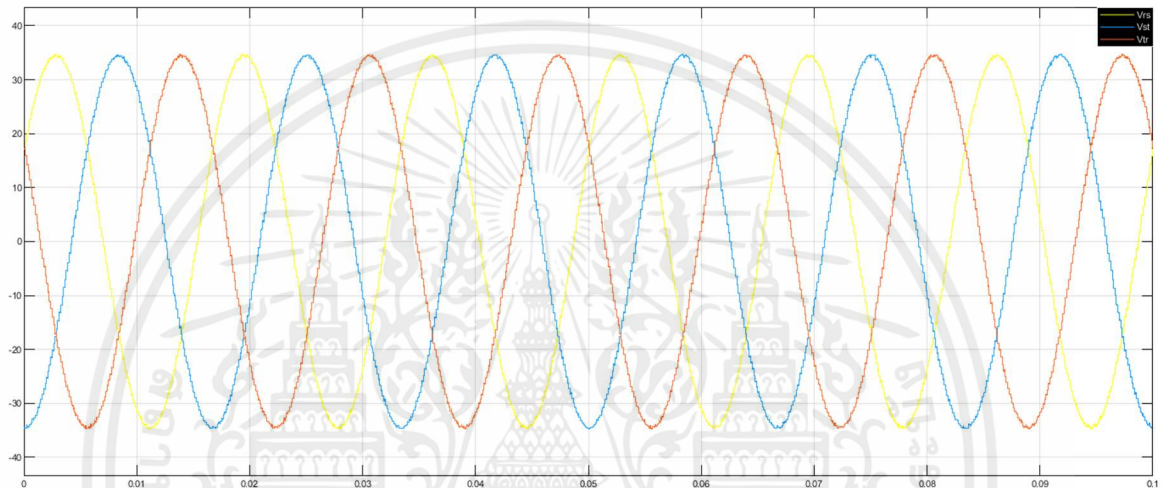
รูปที่ 4.5 กราฟผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์



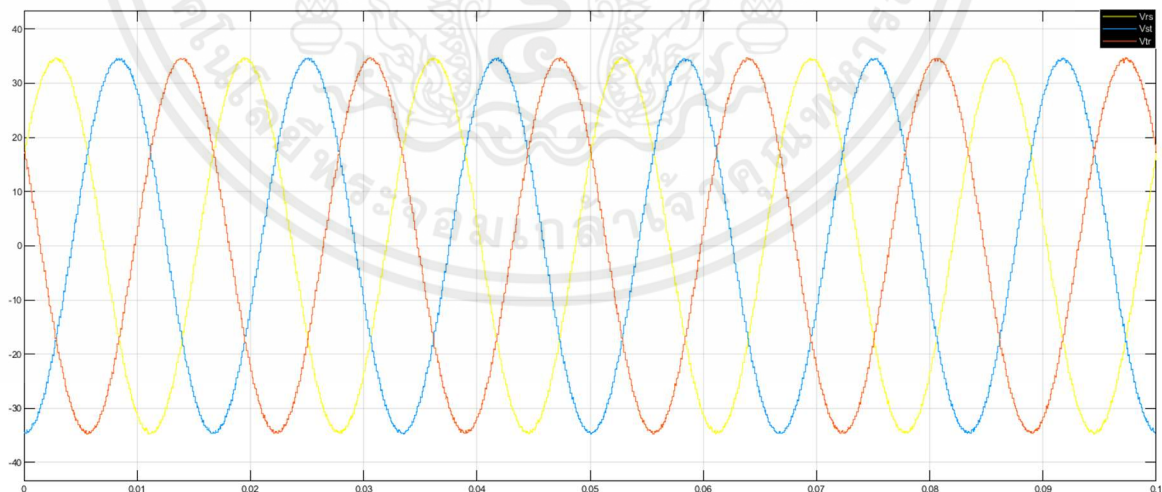
รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดลอง FPGA การแปลงพลังงานของเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์

### 4.3 กราฟสัญญาณไซน์อินพุตและสัญญาณไซน์เอาต์พุตเมื่อผ่านการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์

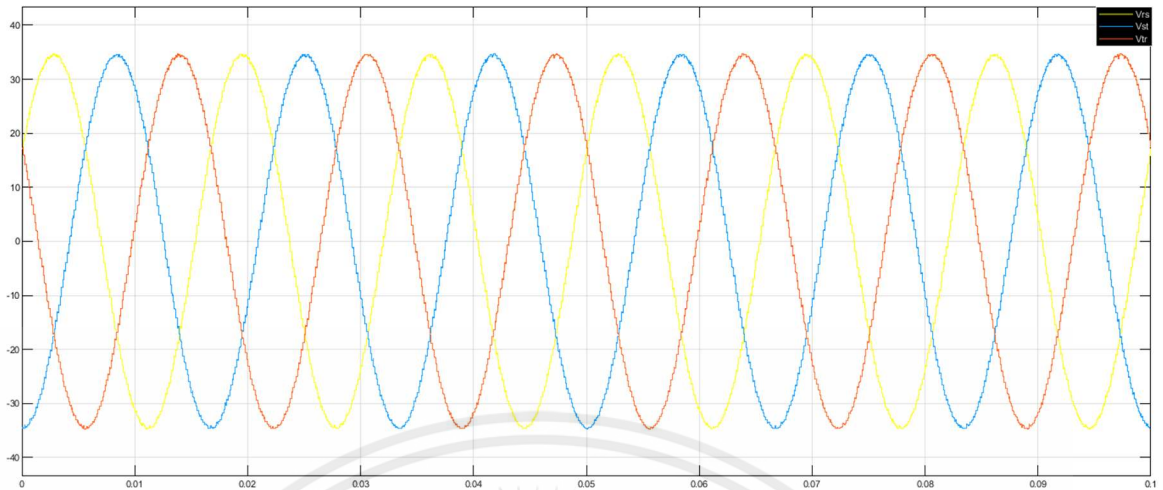
การจำลองระบบในหัวข้อที่ 4.2 ได้ทำการแบ่งทดสอบเป็น 3 เงื่อนไข ฉะนั้นแล้วผลของกราฟสัญญาณไซน์อินพุตและสัญญาณไซน์เอาต์พุตที่ได้จากการแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ จึงได้ 3 เงื่อนไขเช่นเดียวกัน ได้แก่ กราฟเงื่อนไขที่ 1 คือ ความถี่ที่ต้องการ 40 เฮิรตซ์ กราฟเงื่อนไขที่ 2 คือ ความถี่ที่ต้องการ 50 เฮิรตซ์ และกราฟเงื่อนไขที่ 3 คือ ความถี่ที่ต้องการ 60 เฮิรตซ์



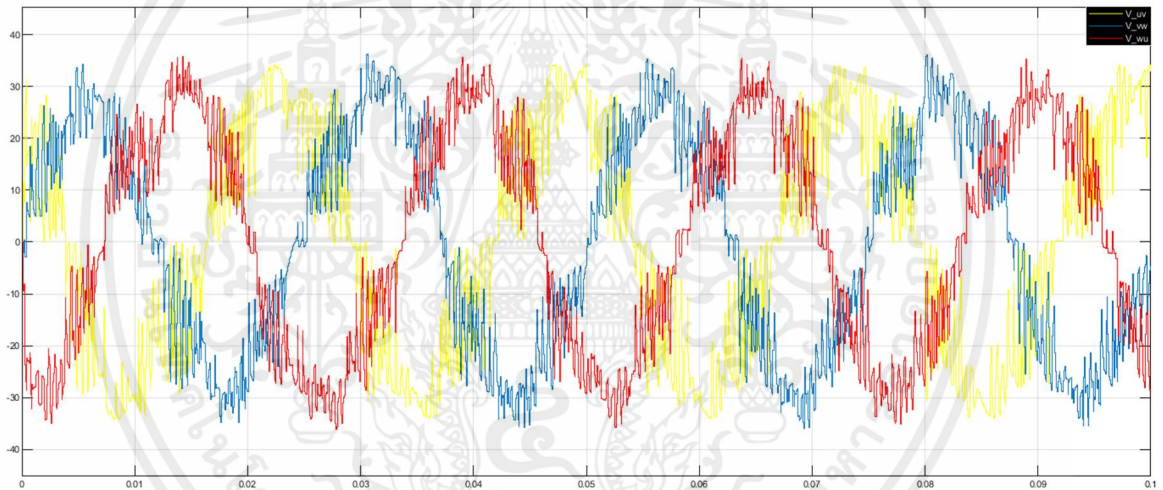
รูปที่ 4.7 กราฟสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{rst}$  จาก 3 Phase Voltage ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์



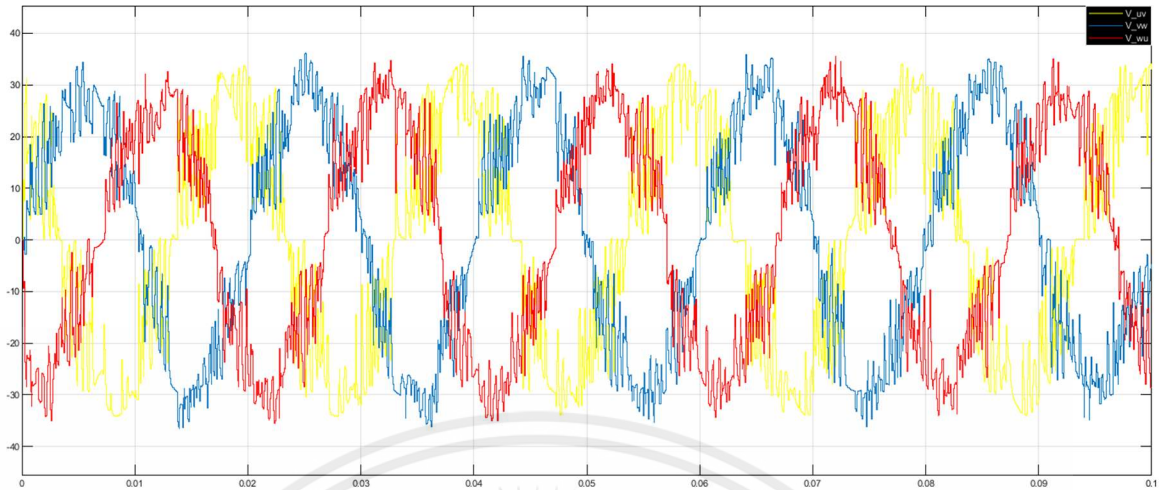
รูปที่ 4.8 กราฟสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{rst}$  จาก 3 Phase Voltage ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์



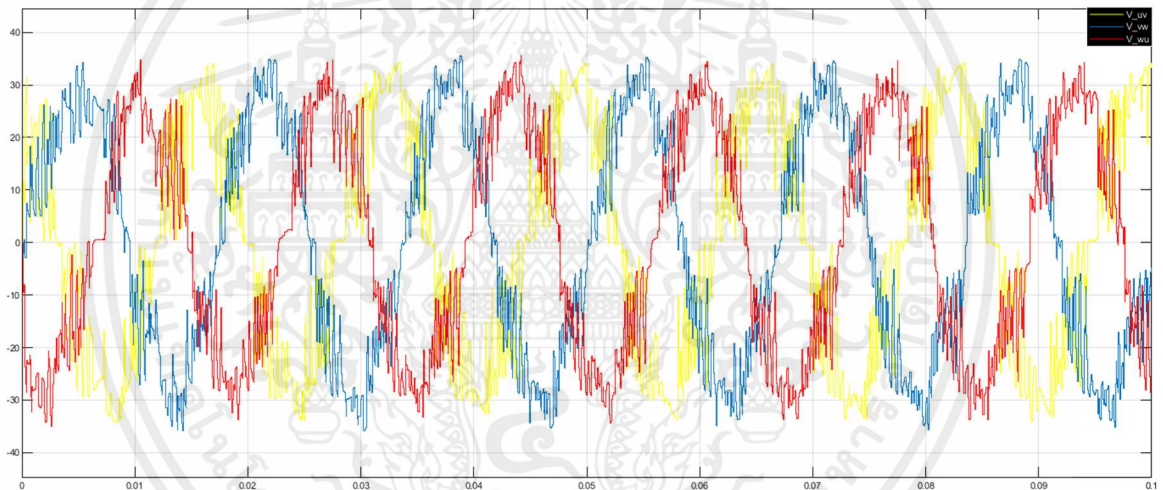
รูปที่ 4.9 กราฟสัญญาณแรงดันอินพุต  $V_{rst}$  จาก 3 Phase Voltage ที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์



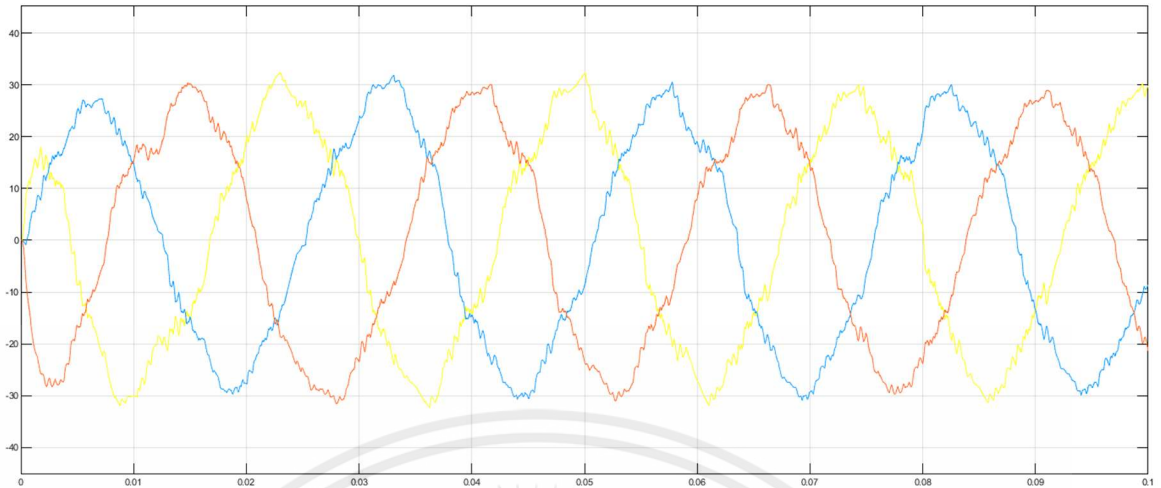
รูปที่ 4.10 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{uvw}$  ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์



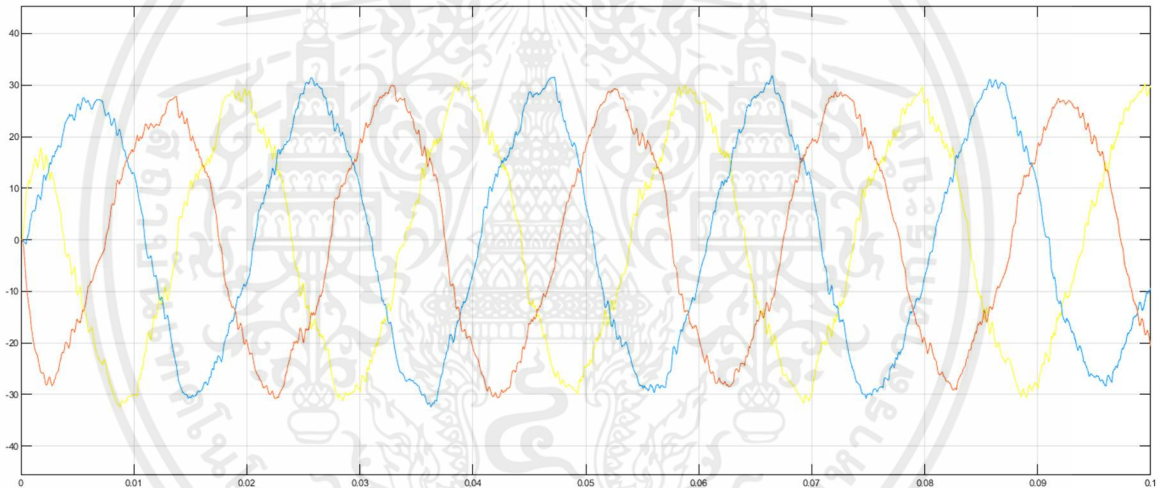
รูปที่ 4.11 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{uv}$  ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์



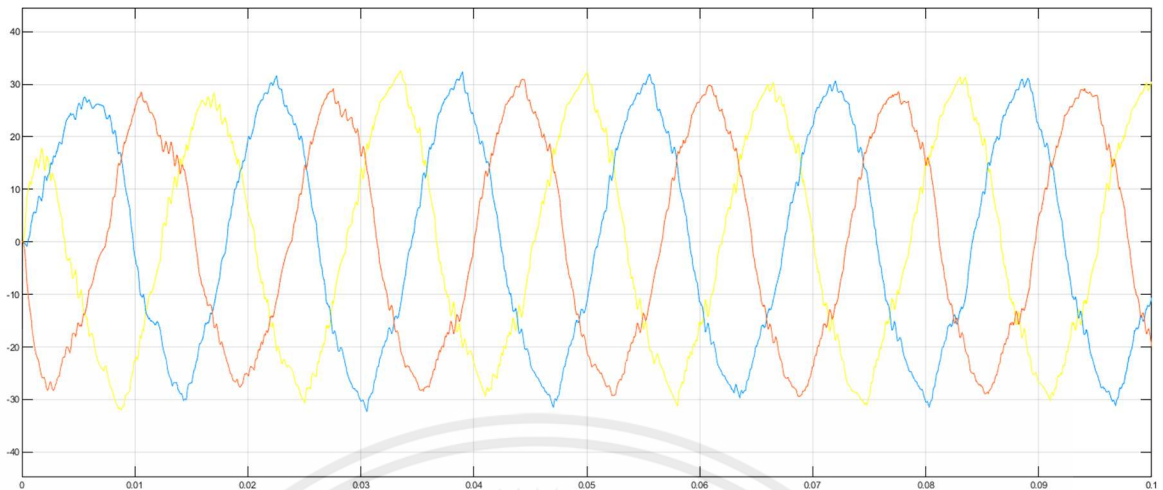
รูปที่ 4.12 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{uv}$  ที่ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.13 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์ เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ



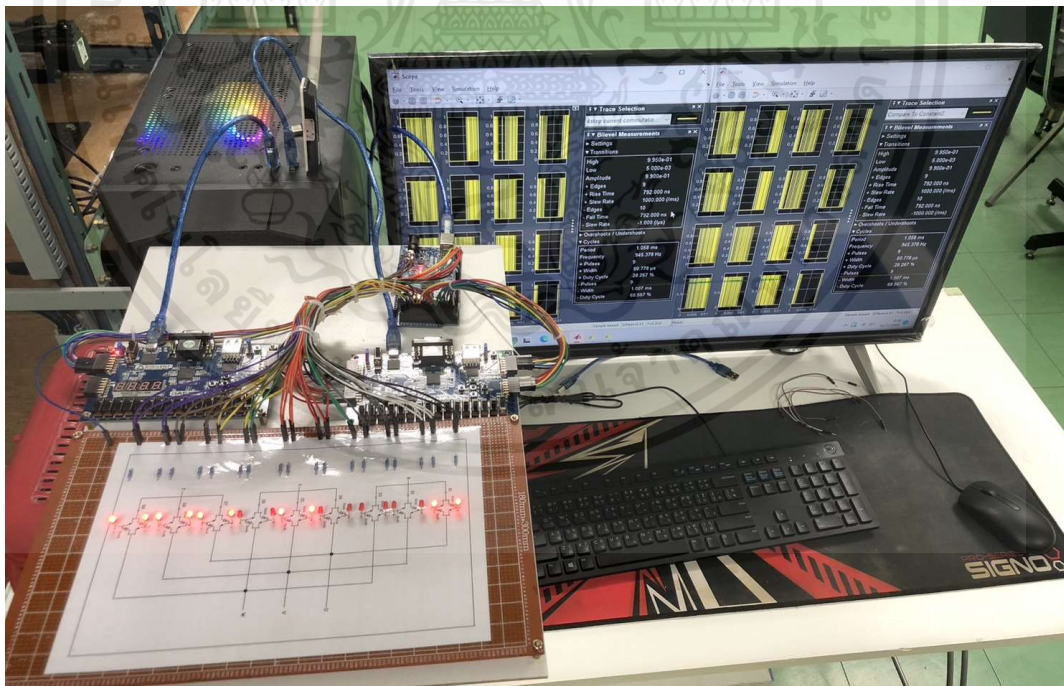
รูปที่ 4.14 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต Vuvw ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ



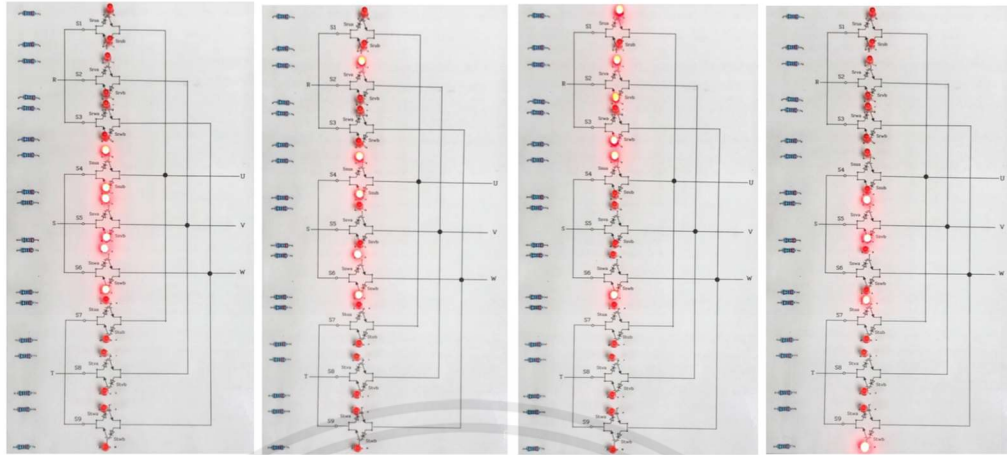
รูปที่ 4.15 กราฟสัญญาณแรงดันเอาต์พุต  $V_{uv}$  ที่ความถี่ เมื่อผ่านชุดกรองความถี่ต่ำ

#### 4.4 แสดงสถานะการทำงานของสวิตช์ซิง IGBT ผ่าน LED

แสดงการทำงานของสวิตช์ซิง IGBT โดยใช้ LED ในการแสดงสถานะเพื่อให้ตรงตามหลักการ Commutation ด้วยวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน (4C) ดังนี้



รูปที่ 4.16 ภาพโดยรวมของวงจรทั้งหมดในการทดลอง



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน ผ่านบอร์ดควบคุม FPGA

ขั้นตอนการจำลองวิธีการควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน มีดังนี้

- 1) นำบล็อกแบบจำลองสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์มากำหนดค่าสัญญาณที่ต้องการในช่วง 1 รูปคลื่นไซน์ 3 เฟส ที่เวลา 0.001 วินาที ถึง 0.02 วินาที
- 2) กำหนดการควบคุมการเปิดและปิดของสวิตช์ซึ่งให้เป็นไปตามวิธีการควบคุมแบบ 4 ขั้นตอน
- 3) สร้างการจำลองและตรวจสอบผลลัพธ์เพื่อดูว่าสวิตช์ซึ่งของระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำงานตามที่ต้องการหรือไม่
- 4) ปรับปรุงและทดสอบระบบตามความต้องการ
- 5) บันทึกและเก็บผลการจำลองเพื่ออ้างอิงในบทที่ 4 การทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ

## บทที่ 5

# บทสรุปและข้อเสนอแนะแนวทางการวิจัยต่อ

### 5.1 บทสรุป

จากวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อออกแบบและจำลองการทำงานของสวิตช์ซึ่งในระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยเป็นหลักการทำงานที่ซับซ้อน ซึ่งใช้การวิธีควบคุมกระแสแบบ 4 ขั้นตอน และทดสอบการจำลองในโปรแกรม MATLAB & Simulink การควบคุมระบบการแปลงพลังงานจะใช้วิธีการโดยใช้สัญญาณ PWM ของแต่ละเฟส ในการควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ซึ่ง ซึ่งจากการออกแบบและจำลองการทำงานของสวิตช์ซึ่งแล้วนั้น สามารถทำงานและควบคุมการเปิด-ปิดของสวิตช์ซึ่งได้ตามวัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

### 5.2 ปัญหาที่พบ

- 1) การเขียนชุดคำสั่งการทำงานโดยใช้ภาษา VHDL เนื่องจากเป็นภาษาขั้นสูงต่างกับภาษา C, C++ ที่มีการใช้งานโดยทั่วไป
- 2) ปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ที่หลากหลายให้เลือกใช้งาน ทำให้การทำงานมีความซับซ้อนเพราะต้องทดลองหลายซอฟต์แวร์ที่ตรงตามต้องการ
- 3) การเขียนชุดคำสั่งภาษา VHDL ที่ผิดพลาดเนื่องจากผลที่ได้ไม่ตรงกับความต้องการ

### 5.3 วิธีแก้ปัญหา

- 1) ดำเนินการศึกษาข้อมูลจากอินเทอร์เน็ตและได้มีการสอบถามผู้รู้ เช่น อาจารย์ ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเขียนชุดคำสั่งการทำงานโดยใช้ภาษา VHDL โดยตรง
- 2) ได้ทำการทดสอบหาซอฟต์แวร์ที่รองรับในการเขียนชุดคำสั่งด้วยภาษา VHDL
- 3) มีการทดลองเขียนชุดคำสั่งภาษา VHDL หลายขั้นตอนเพื่อทดสอบผลลัพธ์ให้ตรงกับโครงการ

### 5.4 ข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อ

โดยที่กล่าวในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการจำลองการทำงานของสวิตช์ซึ่งในระบบแปลงพลังงานแบบเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่เป็นหัวใจสำคัญของระบบ ซึ่งในอนาคตสามารถพัฒนาต่อด้วยการนำ IGBT มาต่อฮาร์ดแวร์จริง แต่การทำวิจัยต่อนั้นอาจต้องคำนึงเกี่ยวกับการทดลองสวิตช์ซึ่ง IGBT โดยการศึกษาและทดสอบการทำงานของ IGBT ในสภาวะการใช้งานตามข้อกำหนดอย่างรอบคอบ เนื่องจาก

IGBT เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนและมีความไวต่อการเปลี่ยนสถานะ การใช้งานไม่ถูกต้องหรือการทดลองที่ไม่ถูกต้องอาจทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้



## 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. Ruengkitrakarn, 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. Rerkratr. 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 ไห้ทองคำ และ วิริยะ พิเชฐจำเริญ. 2545. “การออกแบบ สร้าง และพัฒนา 3-เฟส เมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์.” นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ.

- [10] ชัชวาลย์ เยรบบุตร เจริญญา ธีระนันท์ และ ประจักษ์ บุญภักดี. 2015. “การพัฒนาและควบคุมเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ป้อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแหล่งพลังงานหมุนเวียน.” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [11] จันจิรา เจือกโvain 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] forfpgadesign. 2017. 1.1 ทำไมต้อง FPGA. [Online]. <https://forfpgadesign.wordpress.com/2017/01/27/first-blog-post/>.
- [13] NECTEC. 2020. เรียนรู้การออกแบบเอฟพีจีเอ (FPGA) สำหรับ IoT. [Online]. <https://www.nectec.or.th/news/news-public-document/fpga-design-iot-html.html>.



ภาคผนวก ก. เอกสารข้อมูล (Datasheet)



## Basys 3™ FPGA Board Reference Manual

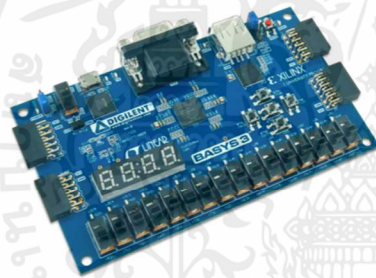
Revised April 8, 2016

This manual applies to the Basys 3 rev. C

### Overview

The Basys 3 board is a complete, ready-to-use digital circuit development platform based on the latest Artix®-7 Field Programmable Gate Array (FPGA) from Xilinx®. With its high-capacity FPGA (Xilinx part number XC7A35T-1CPG236C), low overall cost, and collection of USB, VGA, and other ports, the Basys 3 can host designs ranging from introductory combinational circuits to complex sequential circuits like embedded processors and controllers. It includes enough switches, LEDs, and other I/O devices to allow a large number of designs to be completed without the need for any additional hardware, and enough uncommitted FPGA I/O pins to allow designs to be expanded using Digilent Pmods or other custom boards and circuits.

The Artix-7 FPGA is optimized for high performance logic, and offers more capacity, higher performance, and more resources than earlier designs. Artix-7 35T features include:



*The Basys 3.*

- 33,280 logic cells in 5200 slices (each slice contains four 6-input LUTs and 8 flip-flops)
- 1,800 Kbits of fast block RAM
- Five clock management tiles, each with a phase-locked loop (PLL)
- 90 DSP slices
- Internal clock speeds exceeding 450MHz
- On-chip analog-to-digital converter (XADC)

The Basys 3 also offers an improved collection of ports and peripherals, including:

- 16 user switches
- 4-digit 7-segment display
- 12-bit VGA output
- Digilent USB-JTAG port for FPGA programming and communication
- 16 user LEDs
- Three Pmod ports
- USB-UART Bridge
- USB HID Host for mice, keyboards and memory sticks
- 5 user pushbuttons
- Pmod for XADC signals
- Serial Flash

The Basys 3 works with Xilinx's new high-performance Vivado™ Design Suite. Vivado includes many new tools and design flows that facilitate and enhance the latest design methods. It runs faster, allows better use of FPGA resources, and allows designers to focus their time evaluating design alternatives. The System Edition includes an on-chip logic analyzer, high-level synthesis tool, other cutting-edge tools, and the free WebPACK™ version allows Basys 3 designs to be created at no additional cost.

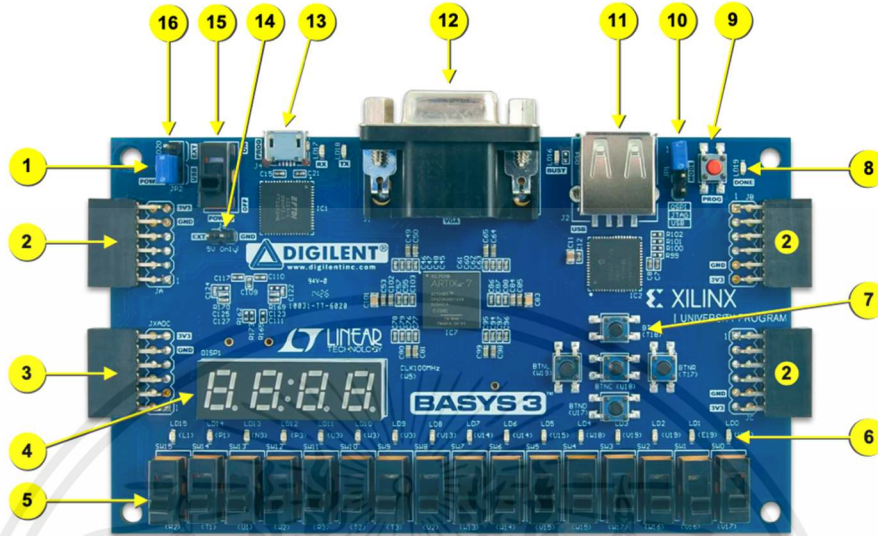


Figure 1. Basys 3 FPGA board with callouts.

Callout	Component Description	Callout	Component Description
1	Power good LED	9	FPGA configuration reset button
2	Pmod port(s)	10	Programming mode jumper
3	Analog signal Pmod port (XADC)	11	USB host connector
4	Four digit 7-segment display	12	VGA connector
5	Slide switches (16)	13	Shared UART/ JTAG USB port
6	LEDs (16)	14	External power connector
7	Pushbuttons (5)	15	Power Switch
8	FPGA programming done LED	16	Power Select Jumper

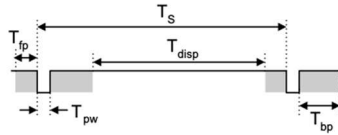
Table 1. Basys 3 Callouts and component descriptions.

A growing collection of board support IP, reference designs, and add-on boards are available on the Digilent website. See the Basys 3 page at [www.digilentinc.com](http://www.digilentinc.com) for more information.

## 1 Power Supplies

The Basys 3 board can receive power from the Digilent USB-JTAG port (J4) or from a 5V external power supply. Jumper JP3 (near the power switch) determines which source is used.

All Basys 3 power supplies can be turned on and off by a single logic-level power switch (SW16). A power-good LED (LD20), driven by the "power good" output of the LTC3633 supply, indicates that the supplies are turned on and operating normally. An overview of the Basys 3 power circuit is shown in Fig. 2.



Symbol	Parameter	Vertical Sync			Horiz. Sync	
		Time	Clocks	Lines	Time	Clks
$T_S$	Sync pulse	16.7ms	416,800	521	32 us	800
$T_{disp}$	Display time	15.36ms	384,000	480	25.6 us	640
$T_{pw}$	Pulse width	64 us	1,600	2	3.84 us	96
$T_{fp}$	Front porch	320 us	8,000	10	640 ns	16
$T_{bp}$	Back porch	928 us	23,200	29	1.92 us	48

Figure 14. Signal timings for a 640-pixel by 480 row display using a 25 MHz pixel clock and 60 Hz vertical refresh.

A VGA controller circuit, such as the one diagramed in Fig. 15, decodes the output of a horizontal-sync counter driven by the pixel clock to generate HS signal timings. You can use this counter to locate any pixel location on a given row. Likewise, the output of a vertical-sync counter that increments with each HS pulse can be used to generate VS signal timings, and you can use this counter to locate any given row. These two continually running counters can be used to form an address into video RAM. No time relationship between the onset of the HS pulse and the onset of the VS pulse is specified, so you can arrange the counters to easily form video RAM addresses, or to minimize decoding logic for sync pulse generation.

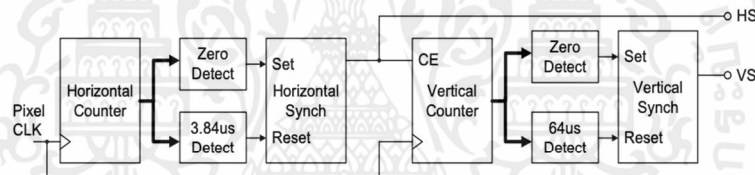


Figure 15. VGA display controller block diagram.

## 8 Basic I/O

The Basys 3 board includes sixteen slide switches, five push buttons, sixteen individual LEDs, and a four-digit seven-segment display, as shown in Fig. 16. The pushbuttons and slide switches are connected to the FPGA via series resistors to prevent damage from inadvertent short circuits (a short circuit could occur if an FPGA pin assigned to a pushbutton or slide switch was inadvertently defined as an output). The five pushbuttons, arranged in a plus-sign configuration, are "momentary" switches that normally generate a low output when they are at rest, and a high output only when they are pressed. Slide switches generate constant high or low inputs depending on their position.

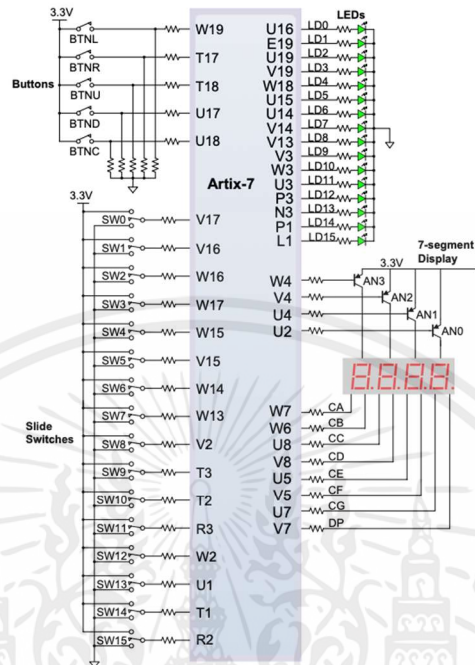


Figure 16. General purpose I/O devices on the Basys 3.

The sixteen individual high-efficiency LEDs are anode-connected to the FPGA via 330 ohm resistors, so they will turn on when a logic high voltage is applied to their respective I/O pin. Additional LEDs, which are not user-accessible, indicate power-on, FPGA programming status, and USB port status.

### 8.1 Seven-Segment Display

The Basys 3 board contains one four-digit common anode seven-segment LED display. Each of the four digits is composed of seven segments arranged in a "figure 8" pattern, with an LED embedded in each segment. Segment LEDs can be individually illuminated, so any one of 128 patterns can be displayed on a digit by illuminating certain LED segments and leaving the others dark, as shown in Fig. 17. Of these 128 possible patterns, the ten corresponding to the decimal digits are the most useful.

in digit position 1. Then, if AN1 is asserted while CA, CB, and CC are asserted, a "7" will be displayed in digit position 2. If AN0, CB, and CC are driven for 4ms, and then AN1, CA, CB, and CC are driven for 4ms in an endless succession, the display will show "71" in the first two digits. An example timing diagram for a four-digit controller is shown in Fig. 19.

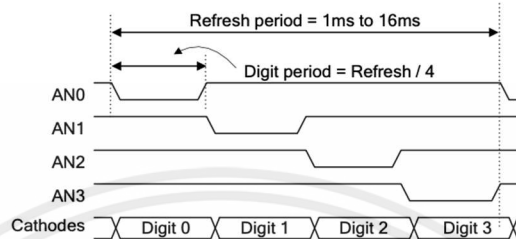


Figure 19. Four digit scanning display controller timing diagram.

## 9 Pmod Ports

The Pmod ports are arranged in a 2x6 right-angle, and are 100-mil female connectors that mate with standard 2x6 pin headers. Each 12-pin Pmod port provides two 3.3V VCC signals (pins 6 and 12), two Ground signals (pins 5 and 11), and eight logic signals, as shown in Fig. 20. The VCC and Ground pins can deliver up to 1A of current. Pmod data signals are not matched pairs, and they are routed using best-available tracks without impedance control or delay matching. Pin assignments for the Pmod I/O connected to the FPGA are shown in Table 6.

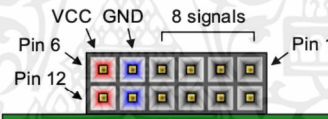


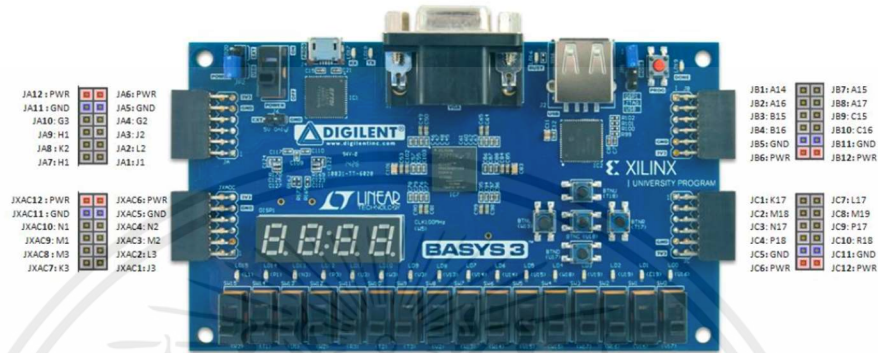
Figure 20. Pmod ports; front view as loaded on PCB.

Pmod JA	Pmod JB	Pmod JC	Pmod XDAC
JA1: J1	JB1: A14	JC1: K17	JXADC1: J3
JA2: L2	JB2: A16	JC2: M18	JXADC2: L3
JA3: J2	JB3: B15	JC3: N17	JXADC3: M2
JA4: G2	JB4: B16	JC4: P18	JXADC4: N2
JA7: H1	JB7: A15	JC7: L17	JXADC7: K3
JA8: K2	JB8: A17	JC8: M19	JXADC8: M3
JA9: H2	JB9: C15	JC9: P17	JXADC9: M1
JA10: G3	JB10: C16	JC10: R18	JXADC10: N1

Table 6. Basys 3 Pmod pin assignment.

Digilent produces a large collection of Pmod accessory boards that can attach to the Pmod expansion ports to add ready-made functions like A/Ds, D/As, motor drivers, sensors, and other functions. See [www.digilentinc.com](http://www.digilentinc.com) for more information.

Basys3: Pmod Pin-Out Diagram



## 9.1 Dual Analog/Digital Pmod

The on-board Pmod expansion port, labeled "JXADC", is wired to the auxiliary analog input pins of the FPGA. Depending on the configuration, this connector can be used to input differential analog signals to the analog-to-digital converter inside the Artix-7 (XADC). Any or all pairs in the connector can be configured either as analog input or digital input-output.

The Dual Analog/Digital Pmod on the Basys 3 differs from the rest in the routing of its traces. The eight data signals are grouped into four pairs, with the pairs routed closely coupled for better analog noise immunity. Furthermore, each pair has a partially loaded anti-alias filter laid out on the PCB. The filter does not have capacitors C33-C36. In designs where such filters are desired, the capacitors can be manually loaded by the user.

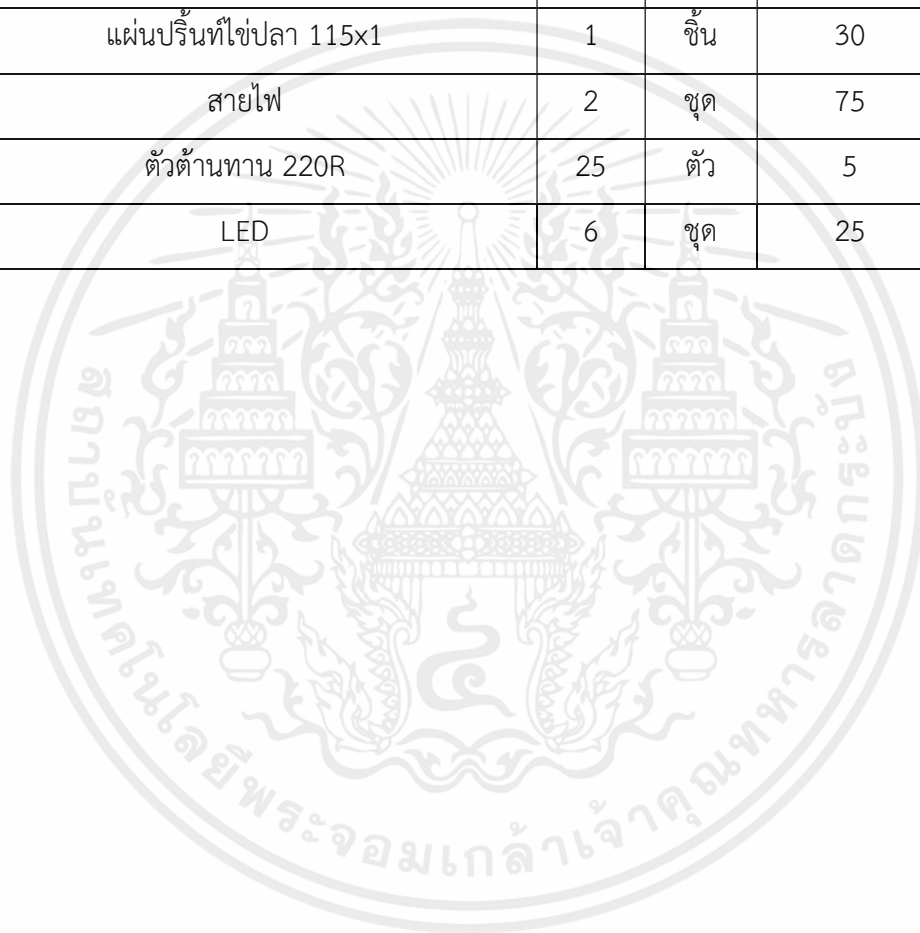
**NOTE:** The coupled routing and the anti-alias filters might limit the data speeds when used for digital signals.

The XADC core within the Artix-7 is a dual channel 12-bit analog-to-digital converter capable of operating at 1 MSPS. Either channel can be driven by any of the auxiliary analog input pairs connected to the JXADC header. The XADC core is controlled and accessed from a user design via the Dynamic Reconfiguration Port (DRP). The DRP also provides access to voltage monitors that are present on each of the FPGA's power rails, and a temperature sensor that is internal to the FPGA. For more information on using the XADC core, refer to the Xilinx document titled "7 Series FPGAs and Zynq-7000 All Programmable SoC XADC Dual 12-Bit 1 MSPS Analog-to-Digital Converter."

ภาคผนวก ข. รายการราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมด



ลำดับที่	รายการ	ปริมาณ		ค่าวัสดุ	
		จำนวน	หน่วย	ราคาหน่วยละ (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
1	Basys3™ FPGA Board Reference Manual	2	ชิ้น	6,902	13,804
2	3PINS Terminal Block	3	ชิ้น	7	21
3	600V/15A 3P Terminal Block	2	ชิ้น	30	60
4	แผ่นปริ้นท์ไขปลา 115x1	1	ชิ้น	30	30
5	สายไฟ	2	ชุด	75	150
6	ตัวต้านทาน 220R	25	ตัว	5	125
7	LED	6	ชุด	25	150



# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายธนกร เทียมสอน  
วัน เดือน ปี เกิด วันที่ 19 มีนาคม  
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ประเภทวิชา  
อุตสาหกรรม สาขาวิชาไฟฟ้า สาขางานไฟฟ้าควบคุม จากวิทยาลัยเทคนิค  
นครสวรรค์ ปีการศึกษา 2564 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี หลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม (ต่อเนื่อง) ภาควิชา  
วิศวกรรมการวัดคุมและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล                      นางสาวนุรีนาร์ กาหลง  
วัน เดือน ปี เกิด                 วันที่ 25 มกราคม 2544  
ประวัติการศึกษา                   สำเร็จการศึกษาหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ประเภทวิชา  
อุตสาหกรรม สาขาวิชาไฟฟ้า สาขางานไฟฟ้าควบคุม จากวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่  
ปีการศึกษา 2564 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม (ต่อเนื่อง) ภาควิชาวิศวกรรมการวัด  
คุมและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง



# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายพชรธรรม ว่องวรรณะกุล  
วัน เดือน ปี เกิด วันที่ 7 พฤษภาคม 2544  
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ประเภทวิชา  
อุตสาหกรรม สาขาวิชาไฟฟ้า สาขางานไฟฟ้ากำลัง จากวิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่  
ปีการศึกษา 2564 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม (ต่อเนื่อง) ภาควิชาวิศวกรรมการวัด  
คุมและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง

