

การศึกษาวิธีการควบคุมแบบสถานะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ  
AN INVESTIGATION ON AN INHERENT ROBUSTNESS CONTROL  
OF THREE-LEVEL INVERTER

บริษัท อมรพิทักษ์วัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การศึกษาวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

บริษัท อมรพิทักษ์วัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

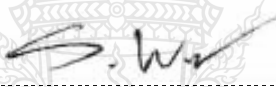
ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ  
An Investigation on an Inherent Robustness Control of Three-Level Inverter  
ชื่อ – นามสกุล นายบริพัฒน์ อมรพิทักษ์วัฒนา  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.  
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการสอบ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรินทร์ แห่งมงาม, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์, วศ.ด.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 2 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ
ชื่อ – นามสกุล	นายบริพัฒน์ อมรพิทักษ์วัฒนา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

## บทคัดย่อ

โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ มักนิยมใช้ในงานที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าและแรงดันสูง เนื่องจากมีฮาร์โมนิกส์ค่อนข้างต่ำและมีอัตราการใช้งานของสวิตช์กำลัง (Switch Utility Ratio) ต่ำกว่าของอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ระดับที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับจะมีจุดด้อยคือ ใช้สวิตช์กำลังจำนวนมาก ทำให้มีความเสี่ยงต่อเสถียรภาพการทำงานของวงจร เมื่อเกิดความบกพร่องขึ้นกับสวิตช์กำลังในวงจรอินเวอร์เตอร์นั้น

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดไดโอดแคปเปลป์พร้อมระบบควบคุมการทำงานของวงจรแบบสภาวะคงทน เพื่อให้วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องไปได้หลังจากเกิดความบกพร่องขึ้นที่สวิตช์กำลังใดๆ ในวงจรทั้งแบบการลัดวงจรและแบบการเปิดวงจร ทั้งนี้ผลการจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าหลักการควบคุมแบบสภาวะคงทนที่นำเสนอสามารถคืนกลับสภาวะการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้หลังจากการเกิดความบกพร่องขึ้นในวงจร

อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในระบบควบคุมสภาวะคงทน พร้อมทดสอบกับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับเชิงปฏิบัติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมการทำงานของวงจรขณะจำลองการเกิดความบกพร่องของสวิตช์กำลังในวงจรได้ สอดคล้องกับผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

**คำสำคัญ:** อินเวอร์เตอร์หลายระดับ การควบคุมแบบสภาวะคงทน แผนภาพสถานะ

<b>Thesis Title</b>	An Investigation on an Inherent Robustness Control of Three-Level Inverter
<b>Name-Surname</b>	Mr. Boripat Amonpitakwattana
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Wanchai Subsingha, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

A multi-level inverter is generally applied in various high power and high voltage rating work due to the less harmonics contents and lower Switching Utility Ratio of main power switching devices compared to a traditional two-level inverter. However, its significant weak point is the risk of instability when the fault occurs in inverter circuit, resulting from using a great number of main power switching devices.

This research has proposed the integration of a novel inherent robustness control into a diode clamped three-level inverter (DCTLI) as a fault tolerant control of power switching devices in the inverter. The proposed robustness control was able to restore the normal functioning of DCTLI during power switch failure. MATLAB/Simulink was utilized to simulate the proposed diode clamped three-level inverter in the absence and presence of power switch failure. The simulation result indicated that the proposed inherent robustness control scheme was operationally compatible with the three-phase diode clamped three-level inverter as a fault tolerant control against power switch failure.

However, the Digital Signal Processor board such as TMS32F28335 and STM32F4 was implemented in such inherent robustness control in order to recover the operation of 3-phase 3-level diode clamped inverter in case of power switch failure. This corresponded to the simulation result in that the control scheme was able to recover the system operation practically.

**Keywords:** DCMLI, fault tolerant control, inherent robustness, switch failure, MATLAB/Simulink

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง ตลอดจนเสนอแนะข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และประสบการณ์จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ และขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณมารดา ผู้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา ตลอดจน เพื่อนๆกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลังและควบคุม (Power Electronic and Control Research Group ; PEC-RG) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ และวิธีการในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดามารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความรักและเมตตา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจศึกษา หากวิทยานิพนธ์นี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

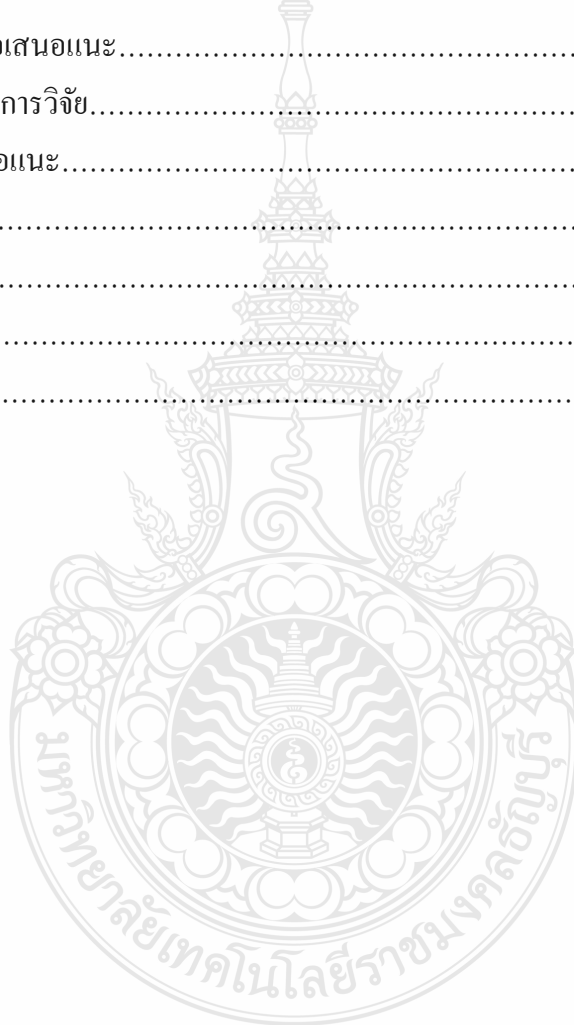
บริพัฒน์ อมรพิทักษ์วัฒนา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง .....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	16
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
1.4 สมมุติฐานการวิจัย.....	17
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	17
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18
2.1 เทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์.....	18
2.2 อินเวอร์เตอร์สองระดับ.....	19
2.3 อินเวอร์เตอร์สามระดับชนิดไดโอดแคลมป์.....	21
2.4 หลักการสวิตชิงแบบ SPWM.....	25
2.5 ข่ายงานระบบประสาท (Neural Network) .....	29
2.6 ชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	45
2.7 การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทน.....	47
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	57
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	57
3.2 การจำลองการทำงาน.....	58
3.3 ผลการจำลองการทำงาน.....	69

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบวงจร.....	72
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	89
4.1 ผลการทดสอบวงจรจากเครื่องต้นแบบ.....	90
4.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จาก MATLAB/Simulink และเครื่องต้นแบบ.....	97
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	99
บรรณานุกรม.....	100
ภาคผนวก.....	106
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	114





## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รูปแบบการสวิตช์กับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ.....	20
ตารางที่ 2.2 รูปแบบการสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....	24
ตารางที่ 2.3 สถานะของสวิตช์เมื่อเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสอ่านค่าได้.....	50
ตารางที่ 3.1 รูปแบบอินพุตที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	65
ตารางที่ 3.2 รูปแบบอินพุตและเอาต์พุตของข้อมูล.....	66



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์.....	13
รูปที่ 1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ.....	15
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์กลุ่มต่างๆ.....	18
รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 2 ระดับ.....	20
รูปที่ 2.3 รูปแบบสวิตช์กับเวกเตอร์แรงดันในอินเวอร์เตอร์สองระดับ.....	21
รูปที่ 2.4 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์.....	22
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นแรงดันไลน์ขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....	22
รูปที่ 2.6 การสร้างแรงดันขาออกของไดโอดแคลมป์อินเวอร์เตอร์.....	23
รูปที่ 2.7 สถานการณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	23
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามหลักการ SPWM.....	25
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ในช่วง Over Modulation.....	27
รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามหลักการ SPWM.....	27
รูปที่ 2.11 ความถี่ฮาร์โมนิกที่แรงดันขาออกของ SPWM Inverter ที่ $M_a 0.8$ .....	28
รูปที่ 2.12 ความถี่ฮาร์โมนิกที่แรงดันขาออกของ SPWM Inverter ที่ $M_a 1.5$ .....	28
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะสัญญาณภายในนิวรอน.....	30
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีนิวรอนชั้นเดียว.....	31
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นที่มีชั้นซ่อนหนึ่งชั้น.....	32
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างแบบเวียนเกิดที่ไม่มีวงป้อนกลับในตัวและไม่มีนิวรอนซ่อน.....	32
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างแบบเวียนเกิดที่มีนิวรอนซ่อน.....	33
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างที่มีโครงสร้างแบบ Lattice.....	33
รูปที่ 2.19 การจำแนกประเภทกระบวนการเรียนรู้.....	34
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน.....	36
รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน.....	37
รูปที่ 2.22 แผนภาพของเพอร์เซ็ปตรอน.....	37
รูปที่ 2.23 แผนภาพของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน.....	39
รูปที่ 2.24 พัลส์ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 แผนภาพของวิธีการ Back Propagation Algorithm.....	41
รูปที่ 2.26 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F28335.....	45
รูปที่ 2.27 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ STM32F417G.....	46
รูปที่ 2.28 แผนภาพการควบคุมแบบสภาวะคงทน.....	47
รูปที่ 2.29 โครงสร้างการควบคุมแบบสภาวะคงทน.....	47
รูปที่ 2.30 ลักษณะการทำงานของระบบการควบคุมแบบสภาวะคงทน.....	48
รูปที่ 2.31 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า.....	48
รูปที่ 2.32 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของระบบควบคุมแบบสภาวะคงทน.....	49
รูปที่ 2.33 วงจรสมมูลของการควบคุมการทำงานของสวิตช์.....	51
รูปที่ 2.34 ผังการทำงานของระบบควบคุมสวิตช์ S1A or S3B เป็ดวงจร.....	51
รูปที่ 2.35 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์ S1B.....	53
รูปที่ 2.36 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์ S2C.....	54
รูปที่ 2.37 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์ S3A.....	55
รูปที่ 2.38 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์ S4A.....	56
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนิน โครงการวิจัย.....	58
รูปที่ 3.2 แบบจำลองวงจรกำลังที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
รูปที่ 3.3 แบบจำลองวงจรสร้างสัญญาณ PWM.....	59
รูปที่ 3.4 แบบจำลองส่วนกำเนิดสัญญาณ(เฟส A).....	60
รูปที่ 3.5 สัญญาณที่สร้างจากส่วนกำเนิดสัญญาณ.....	60
รูปที่ 3.6 แบบจำลองส่วนสร้างรูปแบบการสวิตช์.....	61
รูปที่ 3.7 แบบจำลองส่วนควบคุมและเลือกรูปแบบการทำงาน.....	61
รูปที่ 3.8 โมเดลส่วนควบคุมและเลือกรูปแบบการทำงาน.....	62
รูปที่ 3.9 แบบจำลองการทำงานของระบบการควบคุมแบบสภาวะคงทน.....	69
รูปที่ 3.10 แรงดันเอาต์พุต Vline ขณะทำงานแบบสามระดับ.....	70
รูปที่ 3.11 แรงดันเอาต์พุต Vphase ขณะทำงานแบบสามระดับ.....	70
รูปที่ 3.12 การจำลองการทำงานช่วงที่สลับจากสามระดับไปเป็นสองระดับเมื่อวัดเอาต์พุต Vline....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.13	การจำลองการทำงานช่วงที่สลับจากสามระดับไปเป็นสองระดับเมื่อวัดเอาท์พุท Vphase .71
รูปที่ 3.14	ลักษณะของสัญญาณเซ็นเซอร์กระแส และแรงดันทั้งก่อนและหลังวงจรกรอง.....72
รูปที่ 3.15	แผนภาพวงจร..... 72
รูปที่ 3.16	วงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อน (ต่อ 1 เฟส)..... 73
รูปที่ 3.17	ส่วนของวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นทั้งสามเฟส..... 74
รูปที่ 3.18	ไอซีเบอร์ SN74HTC244..... 74
รูปที่ 3.19	วงจรบัฟเฟอร์.....75
รูปที่ 3.20	วงจรบัฟเฟอร์ที่สร้างขึ้น (1 เฟส)..... 75
รูปที่ 3.21	ไอซีเบอร์ 74LS04P..... 76
รูปที่ 3.22	วงจร Dead Time สำหรับไดโอดเคลมปีอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....77
รูปที่ 3.23	วงจร Dead Time ที่สร้างขึ้น..... 77
รูปที่ 3.24	สัญญาณ PWM ก่อนและหลังทำการกลับที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป.....78
รูปที่ 3.25	รูปขยายสัญญาณ PWM ก่อนและหลังทำการกลับที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป..... 78
รูปที่ 3.26	วงจรวัดค่ากระแส..... 79
รูปที่ 3.27	วงจรวัดค่ากระแสที่สร้างขึ้น.....79
รูปที่ 3.28	ขณะทำการทดสอบและปรับแต่งชุดเซ็นเซอร์วัดกระแส..... 80
รูปที่ 3.29	วงจรวัดค่าแรงดัน..... 80
รูปที่ 3.30	วงจรวัดแรงดันที่สร้างขึ้นและขณะทำการทดสอบ.....81
รูปที่ 3.31	วงจรวัดค่ากระแสและแรงเมื่อทำการติดตั้ง..... 81
รูปที่ 3.32	โหลดแบบ R ที่ใช้ในการทดสอบวงจรในงานวิจัย..... 82
รูปที่ 3.33	วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรขับเคลื่อนสวิตช์กำลัง..... 83
รูปที่ 3.34	วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรถูกกำเนิดสัญญาณควบคุมและวงจรควบคุมต่างๆ..... 83
รูปที่ 3.35	วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้น..... 83
รูปที่ 3.36	บอร์ด TMS320F28335 ที่ประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุม..... 84
รูปที่ 3.37	วงจรสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม..... 85
รูปที่ 3.38	วงจรสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่ติดตั้งพร้อมใช้งาน..... 85

## สารบัญรูป (ต่อ)

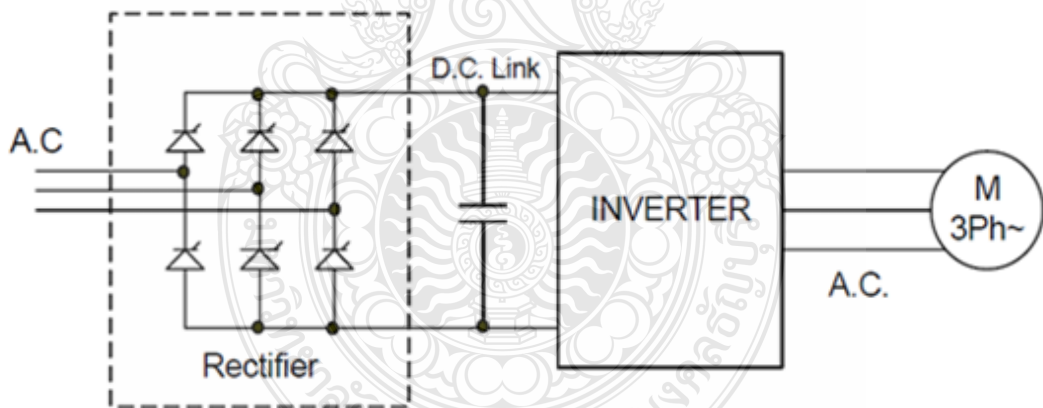
	หน้า
รูปที่ 3.39 รีเลย์ที่ใช้ในการจำลองการเกิดสภาวะลัดวงจรและสภาวะเปิดวงจร.....	86
รูปที่ 3.40 ชุดควบคุมการจำลองการเกิดสภาวะลัดวงจรและสภาวะเปิดวงจร.....	86
รูปที่ 3.41 ขณะประกอบวงจรส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน.....	87
รูปที่ 3.42 วงจรการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับขณะทำการทดสอบ.....	88
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันด้านออก MATLAB/Simulink กับ เครื่องต้นแบบ	89
รูปที่ 4.2 แรงดันขาออกที่เฟส A (Vline) ทำงานแบบสามระดับ โดยแบบจำลอง.....	90
รูปที่ 4.3 แรงดันขาออก (Vline) ทำงานแบบสามระดับ โดยเครื่องต้นแบบ.....	90
รูปที่ 4.4 แรงดันขาออกเมื่อทำงานแบบสองระดับ โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink.....	91
รูปที่ 4.5 แรงดันขาออกเมื่อทำงานแบบสองระดับ โดยเครื่องต้นแบบ.....	91
รูปที่ 4.6 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S1A โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink...	92
รูปที่ 4.7 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S1A โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink.....	92
รูปที่ 4.8 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S1A โดยเครื่องต้นแบบ.....	93
รูปที่ 4.9 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S2B โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink....	93
รูปที่ 4.10 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S2B โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink.....	94
รูปที่ 4.11 การทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit ที่ S2B โดยเครื่องต้นแบบ	94
รูปที่ 4.12 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S3B โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink...	95
รูปที่ 4.13 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S3B โดยเครื่องต้นแบบ.....	95
รูปที่ 4.14 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S4C โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink..	96
รูปที่ 4.15 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S4C โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink.....	96
รูปที่ 4.16 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S4C โดยเครื่องต้นแบบ.....	97

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในงานควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากอินเวอร์เตอร์สามารถที่จะใช้ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบแรงบิดตามต้องการและมีประสิทธิภาพสูง อินเวอร์เตอร์ (Inverter) หมายถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ ชนิดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supplies) ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่เช่น ระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าขาดช่วง (Uninterruptible Power Supplies) และอีกประเภทหนึ่งคือชนิดที่ใช้กับโหลดที่มีการเคลื่อนที่เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้น จุดประสงค์ที่เหมือนของทั้งสองชนิดคือต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาด และความถี่ บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไป (อินเวอร์เตอร์สามเฟส) แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของอินเวอร์เตอร์

โดยจะเห็นว่าส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์แบ่งออกเป็นสามส่วนหลักคือ วงจรเรียงกระแส, วงจรเชื่อมโยงทางคิซี และวงจรอินเวอร์เตอร์

### 1.1.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแสจะทำหน้าที่แปลงผันสัญญาณจาก ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงวงจรกำลังจะประกอบด้วย ไดโอด 4 ตัวกรณีที่อินพุตเป็นแบบเฟสเดียว และไดโอด 6 ตัวกรณีที่อินพุตเป็นแบบสามเฟส

### 1.1.2 วงจรเชื่อมโยงทางดิซี (DC Link)

วงจรเชื่อมโยงทางดิซี คือวงจรที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้เรียบขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรกหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว

### 1.1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit)

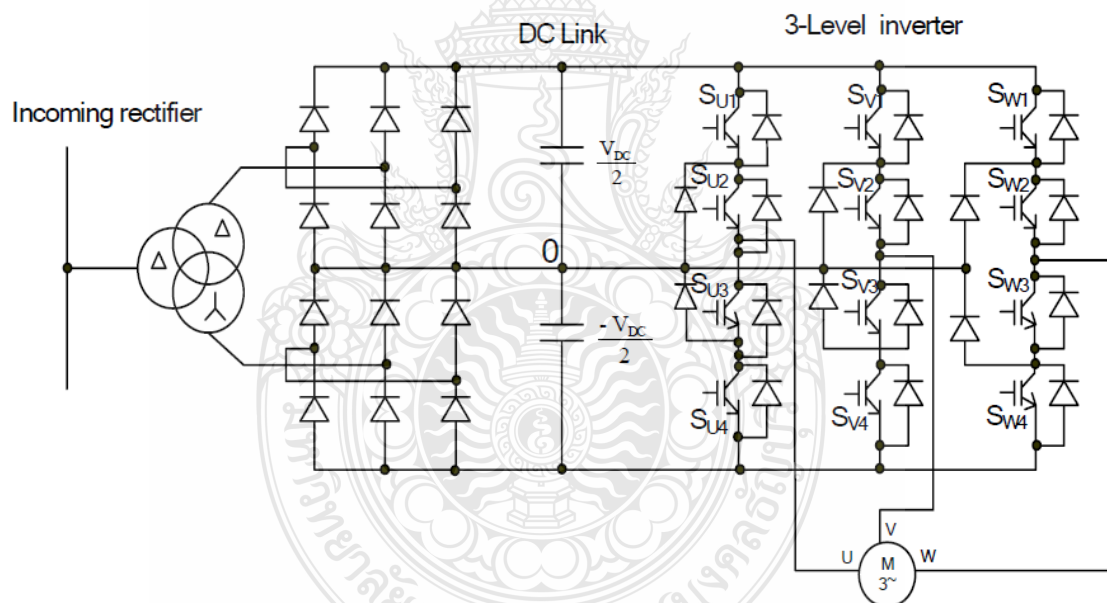
วงจรอินเวอร์เตอร์คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่ผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงทางดิซี เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรกำลังจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ 6 ชุด (ในปัจจุบันจะนิยมใช้ IGBT) ทำหน้าที่ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้เทคนิค PWM (Pulse width modulations) โดยการเปลี่ยนจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงและแปลงกลับมาเป็นกระแสสลับอีกครั้ง จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ได้สูงกว่าความถี่ทางด้านขาเข้าจึงสามารถที่จะปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้มากกว่าความเร็วพิกัดได้

ในอดีตที่ผ่านมา การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แรงดันสูงเป็นไปด้วยความลำบากเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ต้องใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักเพราะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทนต่อแรงดันระดับสูงๆเป็นกิโลโวลต์ได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในหลายด้าน ทำให้การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงค่อนข้างล่าช้าเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการควบคุมมอเตอร์แรงต่ำซึ่งพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากสามารถนำเอาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในตระกูลทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีความง่ายในการในการควบคุมเป็นอุปกรณ์หลักได้ทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการขับเคลื่อนในหลายรูปแบบเช่น เทคนิคการสร้างรูปคลื่นแบบPWM, การควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์ , การควบคุมแบบเวกเตอร์ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในตระกูลทรานซิสเตอร์ ที่นิยมใช้กันอยู่ในระบบการขับเคลื่อนในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันต่ำคือ ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor) มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแบ่งแนวทางในการพัฒนาเป็นสองแนวทางคือแนวทางที่หนึ่ง

พัฒนา IGBT ให้สามารถทนต่อแรงดันได้สูงขึ้น และอีกแนวทางหนึ่งคือการนำเอา IGBT แรงดันต่ำ มาต่ออนุกรมหลายๆตัวเพื่อให้สามารถรับระดับแรงดันสูงได้จากนั้นใช้เทคนิคการต่อวงจรเพื่อสร้าง รูปคลื่น PWM แบบหลายระดับเพื่อให้ได้ระดับแรงดันที่เหมาะสมกับมอเตอร์

#### 1.1.4 อินเวอร์เตอร์สามระดับ (Three Level Inverter)

การใช้อินเวอร์เตอร์สองระดับควบคุมมอเตอร์แรงสูงจะทำให้เกิดปัญหาในด้าน ข้อจำกัดพิคตแรงดันของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ,ค่าแรงดันเกิน (Stress Voltage) ที่มีต่อฉนวนของ มอเตอร์ และผลของ  $dv/dt$  ที่มีค่าสูงมากจะส่งผลต่อฉนวนของสายเคเบิล และตัวมอเตอร์ทำให้ อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายโหลดมากกว่าปกติอินเวอร์เตอร์สามระดับจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาที่ กล่าวมาในตอนต้น เพื่อที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถใช้กับแรงดันสูงได้ วงจรของอินเวอร์เตอร์ สามระดับแสดงได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ



### 1.1.5 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบ หรือ สมการความเร็วเชิง โครน์ดังต่อไปนี้

$$\text{Synchronous Speed}(N_s) = \frac{120f}{P} \quad (1.1)$$

จากสมการที่ (1.1) ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ( $f$ ) และเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) วิธีการควบคุมมอเตอร์ด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้นความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงครั้งละมากๆ ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนความเร็วรอบได้อย่างละเอียดและทำได้เฉพาะในกรณีที่ไม่มีโหลด มอเตอร์ต้องมีการออกแบบพิเศษเพื่อที่จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็กได้ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับงานหลายประเภทที่ต้องการการปรับความเร็วรอบขณะที่มีโหลด และต้องการปรับความเร็วรอบอย่างละเอียด ดังนั้นในภาคอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจึงนิยมใช้วิธีการควบคุมแบบเปลี่ยนแปลงความถี่ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมก็คืออินเวอร์เตอร์นั่นเอง เนื่องจากสามารถปรับความเร็วได้อย่างคงที่ และสามารถควบคุมความเร็วได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

## 1.2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานอุตสาหกรรมทั่วไปนิยมใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาให้อินเวอร์เตอร์มีการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น ลดกระแสฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion) ลดการสูญเสียจากการสวิตช์ และเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้กับอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการพัฒนาจากรวมอินเวอร์เตอร์สองระดับไปเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีระดับสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์สองระดับกับอินเวอร์เตอร์สามระดับในงานอุตสาหกรรมทั่วไป จะมีพิคกิ้งกำลังไฟฟ้าเท่ากันขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุต แต่อินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีค่าฮาร์โมนิกคิฮาร์โมนิกของกระแสต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับเมื่อทำงานที่ความถี่สวิตช์เท่ากัน อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นจะใช้จำนวนของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมากกว่านอก จากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงมากกว่า กรณีที่เครื่องจักรมีความจำเป็นที่จะต้องเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชำรุดหรือเสียหาย การหยุดเพื่อซ่อมบำรุงอาจมีผลกระทบต่อสายงานการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงาน

ได้อย่างต่อเนื่อง โดยระบบควบคุมจะทำการตรวจสอบหาจุดที่สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชำรุดหรือเสียหายจากนั้นจะทำการต่อตรง(Bypass) สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ชำรุดหรือเสียหายนั้นแล้วทำการปรับ โครงสร้างของสัญญาณควบคุมจากสามระดับเป็นสัญญาณควบคุมสองระดับทำให้อินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานต่อไปได้

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วยวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนที่ควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

1.3.2 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Board) ในการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

1.3.3 เพื่อทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

### 1.4 สมมุติฐานการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนโดยการสลับการทำงานจากอินเวอร์เตอร์สามระดับไปเป็นแบบสองระดับเป็นสำคัญดังนั้นจึงได้ตั้งค่ามอดูเลชันอินเด็ก (Modulation index) ที่ค่า 0.9 เพียงค่าเดียว

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับขนาดพิกัดกำลังไม่เกิน 1 กิโลวัตต์ จำนวน 1 ชุด โดยการประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Board)

1.5.2 ทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรที่ได้จัดสร้างขึ้นทั้งความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบเมื่อเทียบกับระบบเดิม

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบหลักการออกแบบและสร้างชุดวงจรควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วยเทคโนโลยีภายในประเทศ

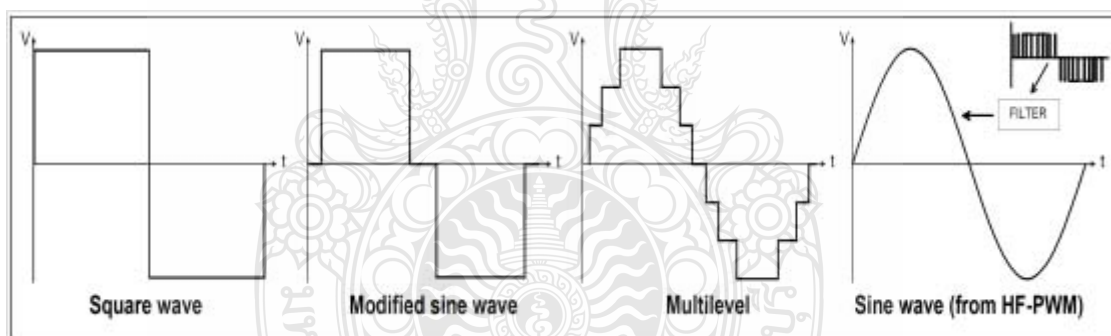
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและงานวิจัยที่จะกล่าวถึงในบทนี้เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ชนิด 2 ระดับและ 3 ระดับ ลักษณะของสัญญาณควบคุมเพื่อสั่งงานอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่ง สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ในรูปแบบการ Modulation แบบ Harmonic Injected Pulse Width Modulation (HIPWM) การทำงานในลักษณะของวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับรวมถึงผลกระทบและค่าสำคัญของตัวแปรชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบอินเวอร์เตอร์

#### 2.1 เทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งตามสัญญาณรูปคลื่นด้านออกได้ 4 กลุ่มคือ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม, รูปคลื่นไซน์ประยุกต์ (Modified sine wave), รูปคลื่นแบบหลายระดับ และแบบรูปคลื่นไซน์ ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์ในแต่ละกลุ่ม



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์กลุ่มต่างๆ

อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ จะมีลักษณะของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมและรูปคลื่นไซน์ประยุกต์ (Modified sine wave) มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการใช้งานทั่วไปในตลาดในปัจจุบัน แต่เนื่องจากมีรูปคลื่นแรงดันขาออก เป็นรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมทำให้มีค่าฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำๆ และทำให้มีค่า  $THD_v$  สูงมากซึ่งเป็นผลให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าสูงทำให้ในบางกรณีจึงไม่เหมาะสมกับงานอุตสาหกรรมทั่วไป

ส่วนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับหรืออินเวอร์เตอร์หลายระดับ จากการพิจารณาจะเห็นว่า แรงดันขาออกมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ ทำให้มีค่า  $THD_v$  ค่อนข้างต่ำ ข้อแตกต่างหลักของอินเวอร์เตอร์หลาย

ระดับกับอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นไซน์คือความถี่ในการสวิตช์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นไซน์ โดยการใช้เทคนิค HF-PWM เกิดจากการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่สูงซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับหรืออินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานที่ค่าฮาร์มอนิกส์มีผลกระทบต่อการผลิตหรือใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าสูง

## 2.2 อินเวอร์เตอร์สองระดับ

อินเวอร์เตอร์แบบสองระดับเป็นอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้ทั่วไปในปัจจุบัน มีทั้งแบบ 1 เฟส และแบบ 3 เฟส รูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับดังแสดงในรูป 2.2 จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก  $+V_d$  ไปสู่ 0 เพียงสองระดับ ซึ่งรูปคลื่นแรงดันขาออกในลักษณะนี้จะมีค่าเฉลี่ยโมดูลัสปะปนอยู่ค่อนข้างมากขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ส่วนรูปคลื่นกระแสจะมีลักษณะใกล้เคียงชาแนลมากกว่ารูปคลื่นแรงดัน เนื่องจากคุณลักษณะของตัวเหนี่ยวนำที่มีอยู่ในโหลดทั่วไป

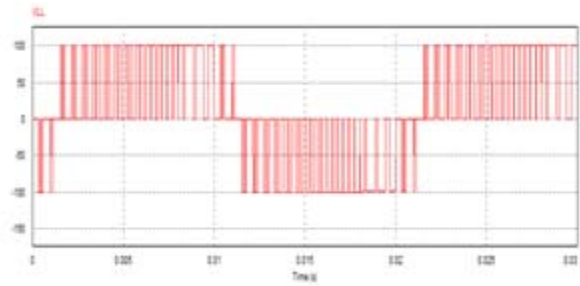
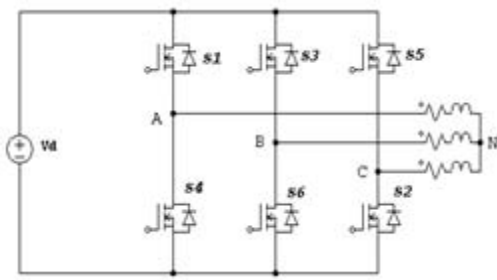
จากโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สองระดับรูปที่ 2.2 ซึ่งมีสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัวคือ S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 สถานะของการสวิตช์จะแบ่งเป็นสองสถานะ คือถ้าสวิตช์ตัวบนทำงาน (เฟส A, เฟส B, เฟส C) มีสถานะเป็น 1 และถ้าสวิตช์ตัวล่างทำงานจะมีสถานะศูนย์ (เฟส A', เฟส B', เฟส C') ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างสาย กับสถานะของการสวิตช์ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสกับสถานะ การสวิตช์แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จากรูปที่ 2.2 ก จะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับในแต่ละเฟสจะมีสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสองตัว ดังนั้นรูปแบบการสวิตช์ทั้งหมดเท่ากับ 8 รูปแบบ เมื่อแทนค่ารูปแบบการสวิตช์ลงใน สมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้ขนาดแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสายดังตารางที่ 1



(ก) โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

(ข) รูปคลื่นแรงดันไลน์ขาออก

รูปที่ 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ 2 ระดับ

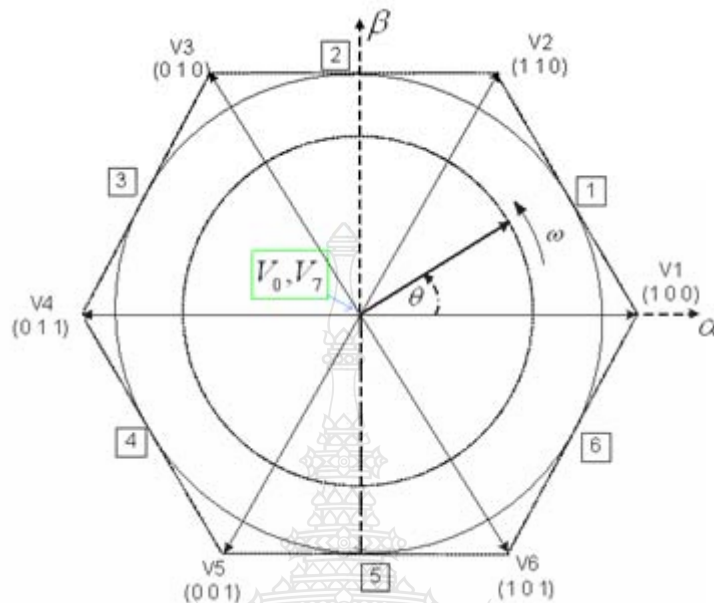
ตารางที่ 2.1 รูปแบบการสวิตช์กับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

A	B	C	$V_{A0}$	$V_{B0}$	$V_{C0}$	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$
0	0	0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	0	0
0	0	1	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-2V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$4V_{dc}/3$
0	1	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-2V_{dc}/3$	$4V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
0	1	1	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-4V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
1	0	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$4V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
1	0	1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$2V_{dc}/3$	$-4V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
1	1	0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-4V_{dc}/3$
1	1	1	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	0	0

เมื่อกำหนดให้แกน  $\alpha$  และ แกน  $\beta$  คือแกนในแนวตั้งและแนวนอนของมอเตอร์สามเฟสจะ  
ได้สมการในการแปลงจากระบบ 3 แกนเป็น 2 แกน ซึ่งเรียกว่า Park's Transformation ดังสมการที่  
(2.3)

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) จะได้ขนาดของเวกเตอร์แรงดันทั้งหมด 8 เวกเตอร์ โดยมีเวกเตอร์ศูนย์ 2 เวกเตอร์ซึ่งมีรูปแบบการสวิตช์เป็น (0, 0, 0) และ (1, 1, 1) ดังรูปที่ 2.3

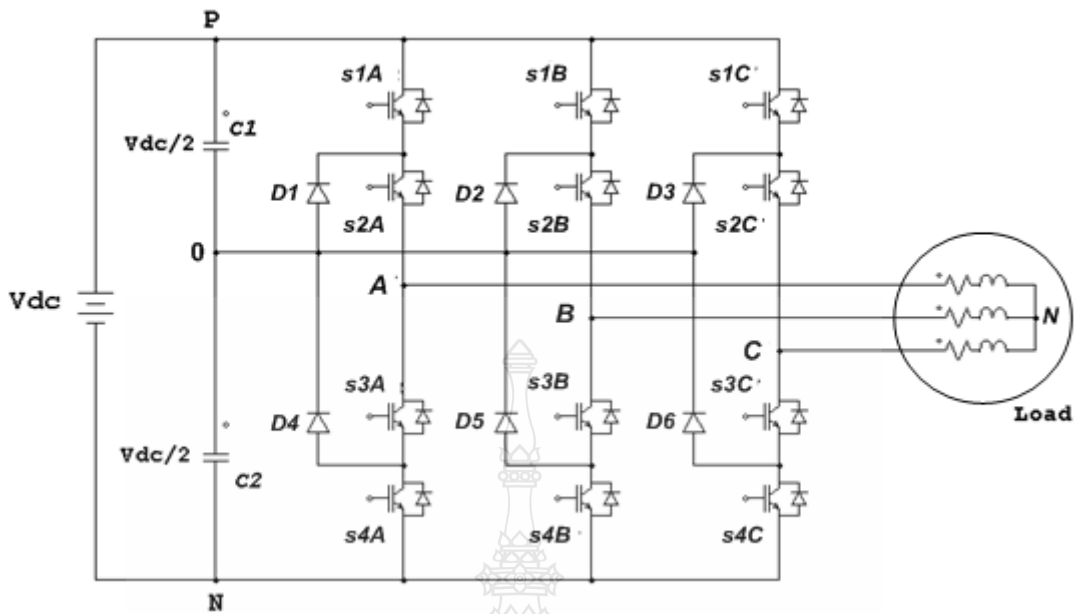


รูปที่ 2.3 รูปแบบสวิตช์กับเวกเตอร์แรงดันในอินเวอร์เตอร์สองระดับ

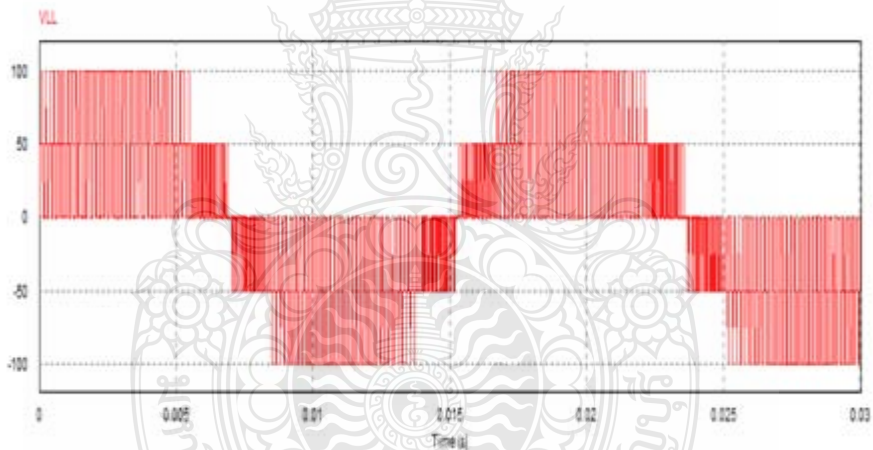
ส่วนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับหรืออินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้น โดยทั่วไปมีหลายรูปแบบแต่ที่นิยมใช้คือแบบไดโอดแคลมป์ (Diode Clamped Multilevel Inverter) ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้

### 2.3 อินเวอร์เตอร์สามระดับชนิดไดโอดแคลมป์

อินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับมีโครงสร้างและการควบคุมที่ซับซ้อนกว่าอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับ โดยระดับของรูปคลื่นแรงดันขาออกขึ้นอยู่กับระดับของอินเวอร์เตอร์นั้น ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ดังแสดงในรูป 2.5 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระดับจาก  $+V_d$  ไปสู่ 0 จำนวน 3 ระดับ ตัวอย่างโครงสร้างวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งรูปคลื่นแรงดันขาออกจะมีความถี่ฮาร์โมนิกสปีปน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับที่ความถี่สวิตช์ซึ่งเท่ากัน

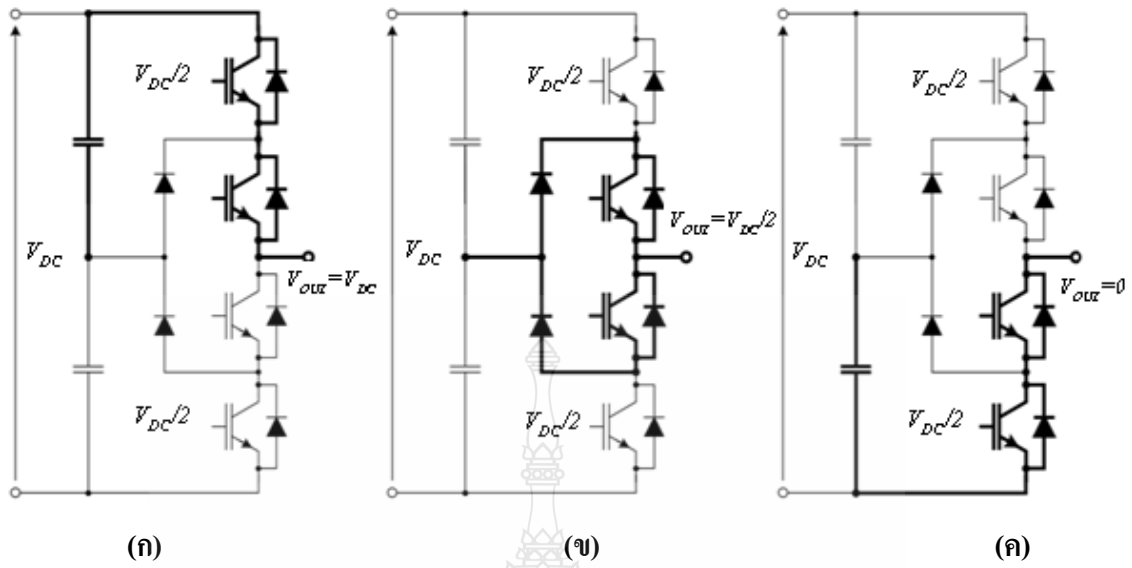


รูปที่ 2.4 โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับชนิดไดโอดแคลมป์



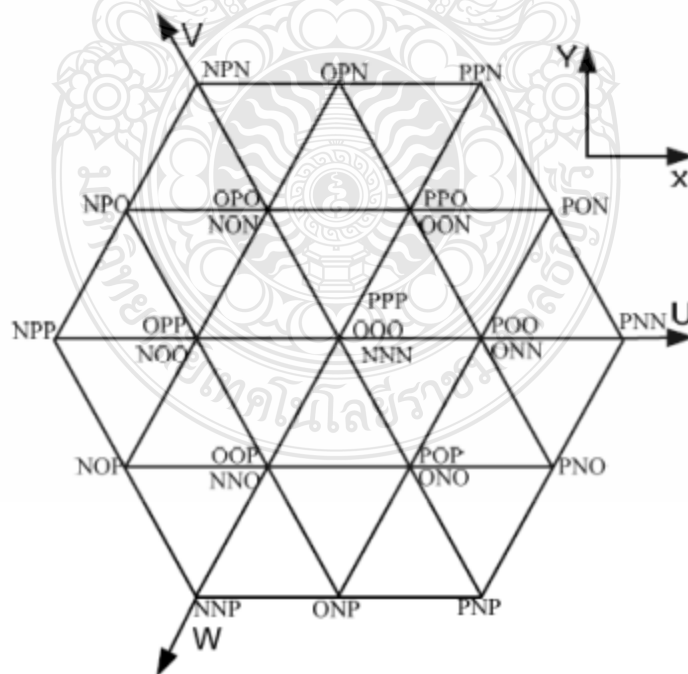
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นแรงดันไลน์ขาออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 2.4 แต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย Free-Wheeling Diode สี่ตัว Clamping Diodes สองตัวต่ออยู่กับจุด Neutral Point (O) แรงดันที่จุด P O N เทียบกับจุดอ้างอิง O จะได้แรงดัน 3 ระดับคือ VPO เป็นแรงดันไฟคร่อม C1, แรงดัน VOO เป็นแรงดันที่จุดอ้างอิง และแรงดัน VNO เป็นแรงดันไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุ C2 ซึ่งสามารถสรุปสถานะของการสวิตช์ในแต่ละเฟสได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 2.6 การสร้างแรงดันขาออกของไดโอดเคลมปีอินเวอร์เตอร์ (ก) แรงดันขาออก =  $V_{DC}$ , (ข) แรงดันขาออก =  $V_{DC}/2$ , และ (ค) แรงดันขาออก = 0

เนื่องจาก มีสถานการณ์สวิตช์ในแต่ละเฟสมีอยู่ 3 สถานะ ดังนั้นจึงสามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 สถานะ ดังรูปที่ 2.7 และตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.7 สถานการณ์สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



ตารางที่ 2.2 รูปแบบการสวิตช์และแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

A	B	C	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$
P	P	P	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	N	N	0	0	0	0	0	0
P	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
0	P	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0
0	0	P	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
P	P	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$
0	P	P	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$
P	0	P	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	??	$-V_{dc}$	0
N	0	0	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$
0	N	0	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
0	0	N	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$
N	N	0	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
0	N	N	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
N	0	N	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0
P	N	N	$4V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}$	0	$-2V_{dc}$
P	P	N	$2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-4V_{dc}/3$	0	$2V_{dc}$	$-2V_{dc}$
N	P	P	$-4V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-2V_{dc}$	0	$2V_{dc}$
N	N	P	$-2V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$4V_{dc}/3$	0	$-2V_{dc}$	$2V_{dc}$
P	N	P	$2V_{dc}/3$	$-4V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$2V_{dc}$	$-2V_{dc}$	0
N	P	N	$-2V_{dc}/3$	$4V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$-2V_{dc}$	$2V_{dc}$	0
P	0	N	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$	$-2V_{dc}$
0	P	N	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$2V_{dc}$	$-V_{dc}$
N	P	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0	$-2V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$
N	0	P	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	??
P	N	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	$2V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
0	N	P	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$	$-2V_{dc}$	$V_{dc}$

กำหนดให้แรงดันระหว่างเฟสของมอเตอร์แทนด้วย  $V_{UN}$ ,  $V_{VN}$  และ  $V_{WN}$  แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เทียบกับจุดศูนย์แทนด้วย  $V_{U0}$ ,  $V_{V0}$  และ  $V_{W0}$  จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสของมอเตอร์กับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (2.4)

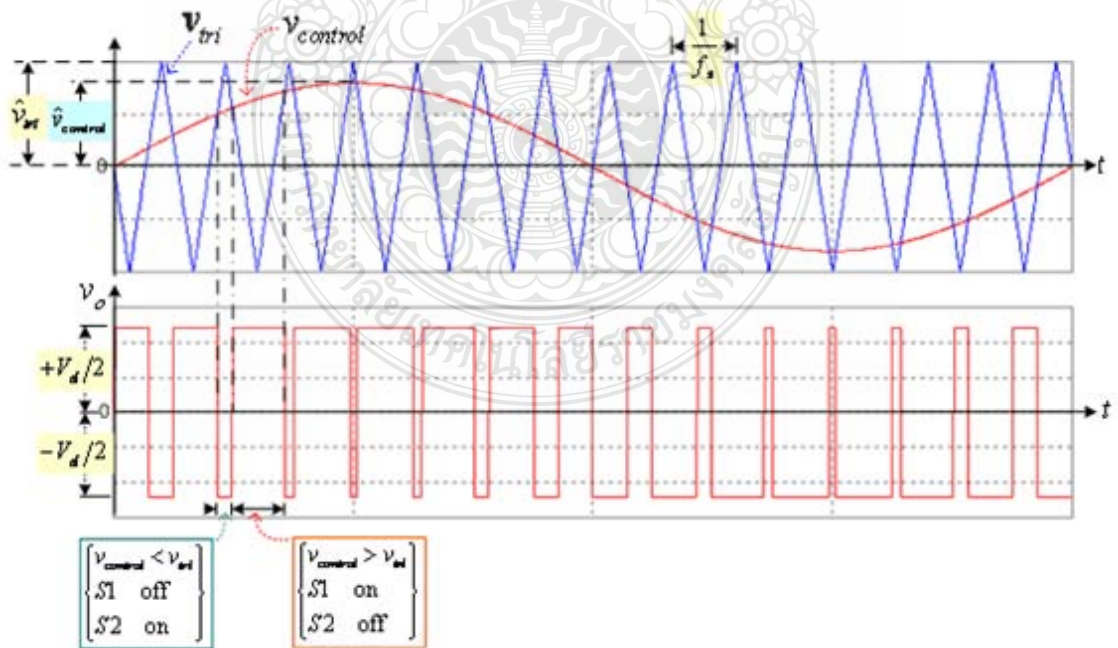
$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \frac{V_{dc}}{2} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยที่แรงดันที่เวลาใดๆของมอเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \hat{V} \times \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

## 2.4 หลักการสวิตชิงแบบ SPWM

ในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์แบบ Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ Triangle Waveform กับ Sinusoidal Waveform ดังแสดงในรูป 2.8



รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามหลักการ SPWM

จากหลักการสร้างสัญญาณพิตับบลิวเอ็มในรูปที่ 2.8

$V_{tri}$	สัญญาณรูปสามเหลี่ยมซึ่งเป็นตัวกำหนดความถี่สวิตซ์
$\hat{V}_{tri}$	ค่ายอดคลื่นของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม
$f_s$	ค่าความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์
$V_{control}$	สัญญาณควบคุมรูปซายน์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดแรงดันและความถี่ขาออก
$\hat{V}_{control}$	ค่ายอดคลื่นของสัญญาณควบคุมรูปซายน์
$f_1$	ค่าความถี่หลักมูลขาออกของอินเวอร์เตอร์

จะได้ว่า

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (2.6)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$m_a$	เป็นอัตราการมอดูเลตด้านขนาด หรือ “Amplitude Modulation Ratio”
	$m_f$	เป็นอัตราการมอดูเลตด้านความถี่ หรือ “Frequency Modulation Ratio”

#### 2.4.1 ข้อกำหนดในหลักการสวิตซ์แบบ SPWM

1. อัตราการมอดูเลตด้านขนาด ( $m_a$ ) ควรอยู่ในย่านเชิงเส้น

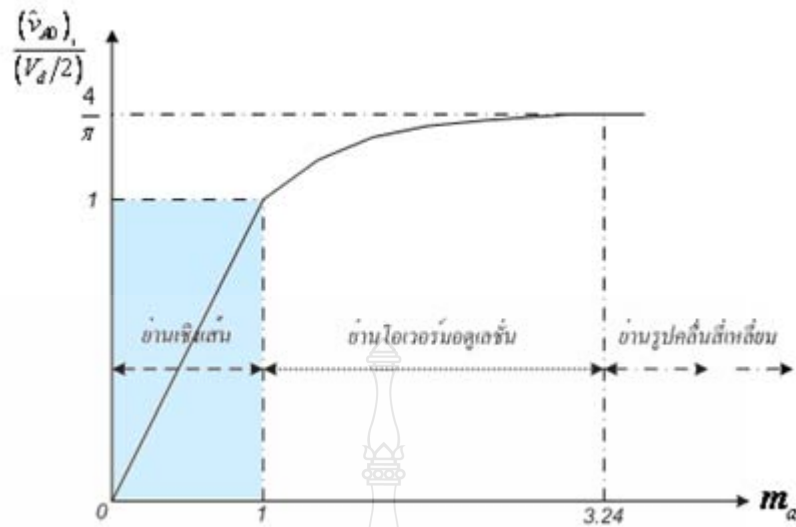
- กรณี  $0 < m_a \leq 1$  จะเป็นช่วง Linear Modulation แรงดันขาออก  $(V_{A0})_1$  จะ

เท่ากับ

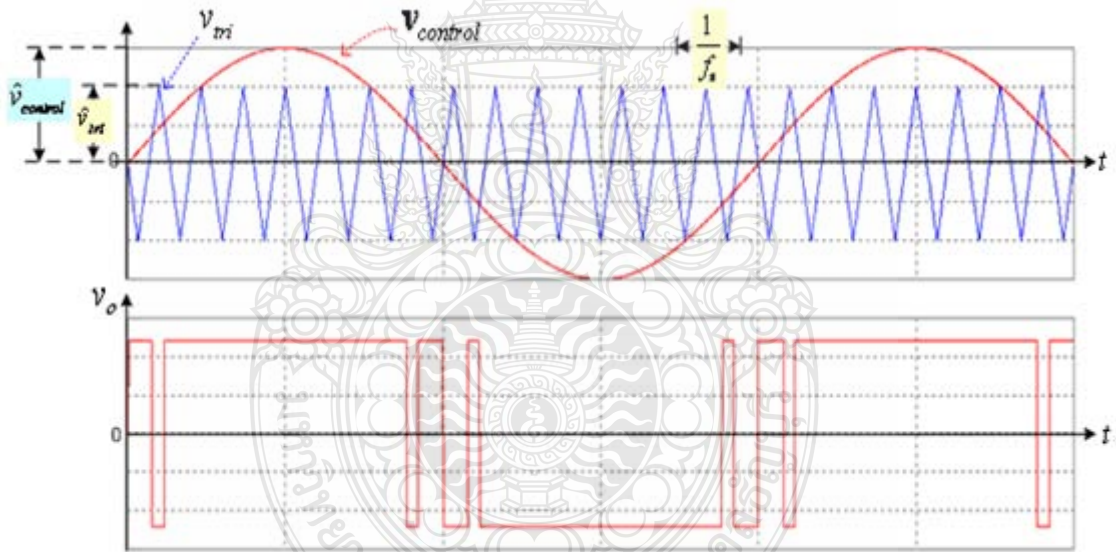
$$(v_{A0})_1 = m_a \cdot \left( \frac{V_d}{2} \right) \cdot \sin \omega_1 t \quad \left| \begin{array}{l} m_a < 1 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

- กรณี  $m_a > 1$  เป็นช่วง Over Modulation แรงดันขาออกแปรผันกับค่า  $m_a$  ดัง

รูปที่ 2.9 ซึ่งจะทำให้แรงดันขาออกมีรูปคลื่นใกล้เคียง Square Wave ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\hat{v}_{A0})_1 / \left(\frac{V_d}{2}\right)$  กับค่า  $m_a$  ในช่วง Over Modulation



รูปที่ 2.10 รูปคลื่นแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ตามหลักการ SPWM ขณะ Over Modulation

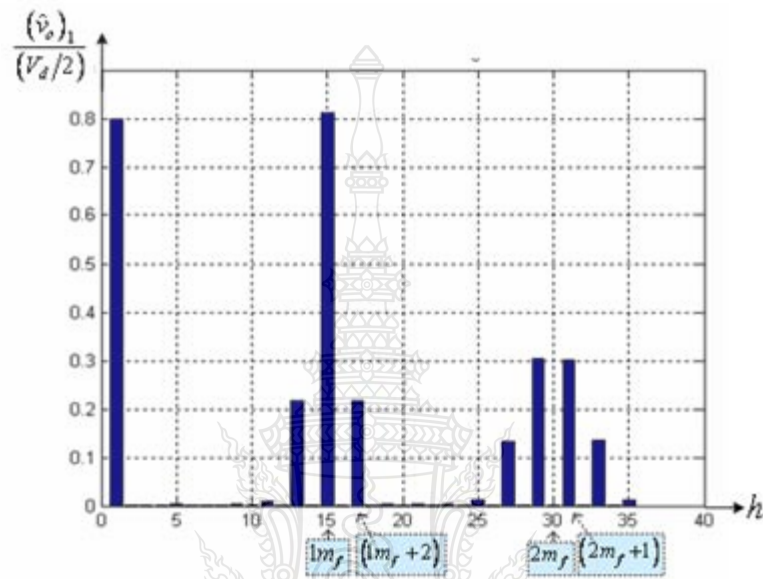
## 2. อัตราการมอดูเลตด้านความถี่ ( $m_f$ )

โดยทั่วไปใช้ค่า  $m_f$  ที่ใช้ตามหลักการ SPWM ต้องเป็นจำนวนเต็มคี่ลำดับคูณสาม (Triple-N number) เท่านั้น เช่น  $m_f = 9, 15, 21$  หรือ  $27$  เป็นต้น เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันขาออกอยู่ในลักษณะสมมาตรในแต่ละช่วง  $\frac{1}{4}$  ไซเคิล ในกรณีที่ไม่ใช่ค่า  $m_f$  ตามข้อกำหนดจะทำให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับคู่ขึ้นที่รูปคลื่นแรงดันขาออกได้

### 3. ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นที่แรงดันขาออกของ SPWM Inverter

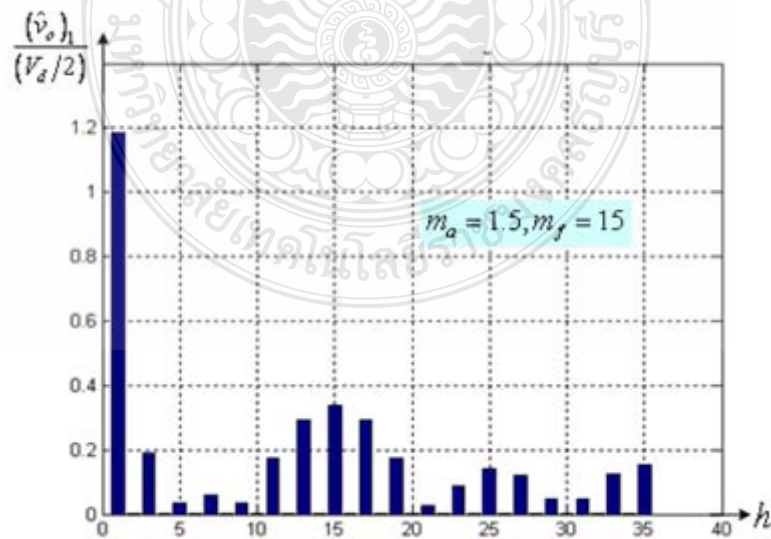
- ขณะทำงานในช่วง Linear Modulation แรงดันขาออกของ SPWM Inverter จะมีสัญญาณความถี่สูงปะปน ที่ลำดับความถี่  $1m_f, 2m_f, 3m_f, \dots$  และบริเวณความถี่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.11

- ขณะทำงานในช่วง Over Modulation แรงดันขาออกจะมีรูปคลื่นเพี้ยนจาก



รูปที่ 2.11 ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่แรงดันขาออกของ SPWM Inverter ที่  $m_a = 0.8, m_f = 15$

รูปคลื่นซายน์ ดังรูปที่ 2.8 และจะมีความถี่สูงปะปนแทบทุกลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.12 ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่แรงดันขาออกของ SPWM Inverter ที่  $m_a = 1.5, m_f = 15$

## 2.5 ข่ายงานระบบประสาท (Neural Network)

Neural Network เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอิงแบบจากโครงสร้างระบบประสาท มีลักษณะเป็นหน่วยประมวลผลแบบแจกแจงและขนานขนาดใหญ่ สามารถเก็บความรู้จากประสบการณ์ (Experience) และนำมาใช้ภายหลังได้ จึงมีลักษณะคล้ายกับการทำงานของสมองในแง่ที่สามารถรวบรวมความรู้ผ่านกระบวนการเรียนรู้ (Learning Process) และจะถูกเก็บอยู่ในข่ายงานในรูปของพารามิเตอร์อิสระ (Free Parameter) ที่ถูกปรับเปลี่ยนค่าไป โดยทั่วไปแล้ว Neural Network จะประกอบขึ้นจากปมการคำนวณ (Computing Node) หรือนิวรอน (Neuron) ซึ่งจะถูกจัดวางอยู่ในรูป Network

### 2.5.1 แบบจำลองของนิวรอน (Model of Neuron)

Neuron เป็นหน่วยประมวลผลข้อมูลพื้นฐานของ Neural Network ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ละแบบมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกัน โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (Connection Weight) และ ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation Function)

#### 1. ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง หรือ Synaptic Weight

เป็นตัวแปรอิสระใน Neuron ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บข้อมูลที่ได้อมา เมื่อการเรียนรู้เสร็จสิ้นลง ขั้นตอนการเรียนรู้ (Learning Algorithm) จะทำให้ตัวถ่วงน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงจาก Initial State ไปเป็น Final State โดยที่ Initial State ของตัวถ่วงน้ำหนักจะบอกถึงสถานะข่ายงานระบบประสาทขณะยังไม่มีข้อมูลเก็บไว้ ในขณะที่ Final State ของตัวถ่วงน้ำหนักจะบอกถึงสถานะของข่ายงานระบบประสาทหลังจากที่ได้เก็บข้อมูลไว้แล้ว เมื่อนำตัวถ่วงน้ำหนักนี้ไปประมวลร่วมกับข้อมูลเข้าของ Neuron ผ่านกระบวนการคณิตศาสตร์ ผลที่ได้จะเรียกว่าระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ (Net Internal Activity Level) ตัวอย่างของระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของ Neuron Feed-forward Neural Network จะมีลักษณะดังนี้

$$v = \sum_{i=1}^p w_i x_i \quad (2.9)$$

โดยที่  $v$  คือระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ

$w_i$  คือตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงระหว่างระดับการกระตุ้นภายในสุทธิและข้อมูล เข้าที่  $i$  ของนิวรอน

$x_i$  คือข้อมูลเข้าที่  $i$  ของนิวรอน และ

$p$  คือจำนวนปมข้อมูลเข้า (Input Node)

ในกรณีนี้ระดับการกระตุ้นภายในสุทธิจะเป็นผลรวมถ่วงน้ำหนักของข้อมูลเข้าของนิวรอน ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการกระตุ้นภายในสุทธิและข้อมูลเข้าของนิวรอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$v = \|\mathbf{x} - \mathbf{w}\|^2 \quad (2.10)$$

โดยที่  $\mathbf{x}$  คือเวกเตอร์ข้อมูลเข้าที่มีมิติ  $p$

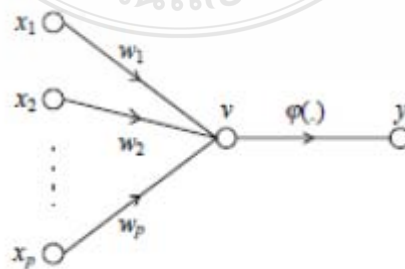
$\mathbf{w}$  คือเวกเตอร์ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงที่มีมิติ  $p$  และ  $\|\cdot\|$  เป็นนอร์มแบบยูคลิด (Euclidean Norm)

## 2. ฟังก์ชันการกระตุ้น

เป็นฟังก์ชันภายในนิวรอนมีหน้าที่เปลี่ยนระดับการกระตุ้นภายในสุทธิเป็นข้อมูลออกของนิวรอน (Neuron Output) ฟังก์ชันการกระตุ้นอาจเป็นเชิงเส้น (Linear Function) เช่น ฟังก์ชันการขยาย (Amplification Function) ฟังก์ชันการปรับมาตรา (Scaling Function) หรืออาจเป็น ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Non-linear Function) ก็ได้เช่น ฟังก์ชันเชิงตรรกะ (Logistic Function) ฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Function) ก็ได้ โดยทั่วไป นิวรอนภายในข่ายงานระบบประสาทอาจมีฟังก์ชันการกระตุ้นที่เป็น Non-linear Function ซึ่งเป็นผลให้ข่ายงานระบบประสาทมีคุณลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นไปด้วย ความสัมพันธ์ของระดับการกระตุ้นภายในสุทธิและข้อมูลออกของนิวรอนจะมีลักษณะดังนี้

$$y = \varphi(v) \quad (2.11)$$

โดย  $y$  คือข้อมูลออกของนิวรอน  $v$  คือระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ และ  $\varphi(\cdot)$  คือฟังก์ชันการกระตุ้น



รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะสัญญาณภายในนิวรอน

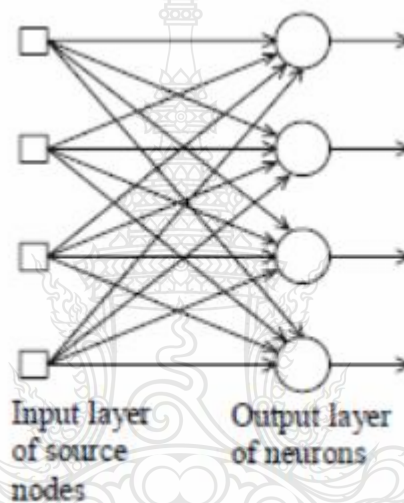
### 2.5.2 สถาปัตยกรรมของข่ายงาน (Network Architecture)

สถาปัตยกรรมข่ายงานระบบประสาทจำแนกได้เป็น 4 ประเภทคือ ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว (Single-Layer Feed-forward Network) ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed-forward Network) ข่ายงานแบบเวียนเกิด (Recurrent Network) และข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ (Network with a Lattice Structure)

- ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว

เป็นข่ายงานที่มีโครงสร้างข่ายงานนิวรอนเรียงตัวเป็นชั้น ดังแสดงในแผนภาพ

รูปที่ 2.14

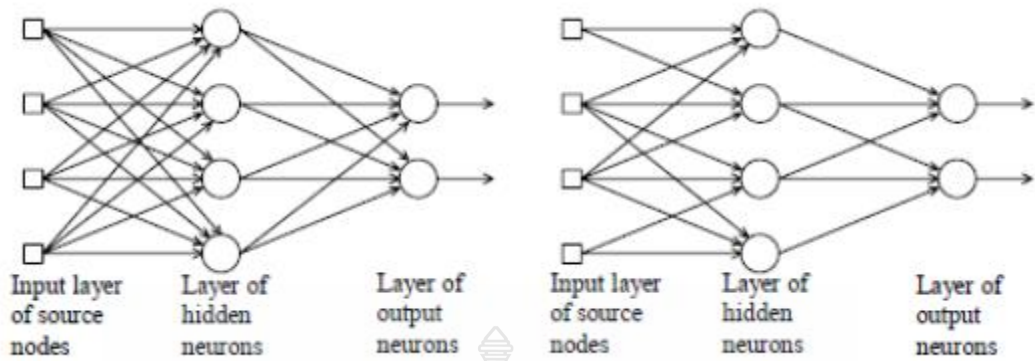


รูปที่ 2.14 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีนิวรอนชั้นเดียว

- ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น

เป็นข่ายงานที่สร้างขึ้นได้โดยการต่อข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียวเข้าด้วยกัน โดยข้อมูลออกจากนิวรอนชั้นหนึ่งจะถูกส่งไปเป็นข้อมูลเข้าของนิวรอนอีกชั้นหนึ่ง ชั้นของนิวรอนระหว่างกลางเรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.15





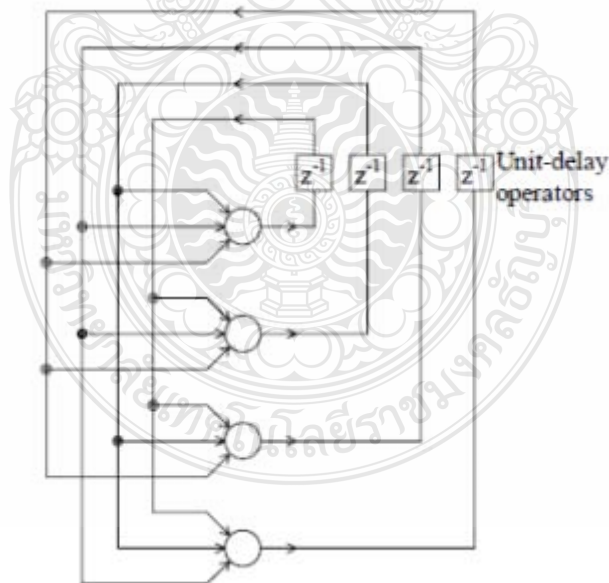
(ก) ข่ายงานแบบเชื่อมโยงเต็มอัตรา

(ข) ข่ายงานแบบเชื่อมโยงบางส่วน

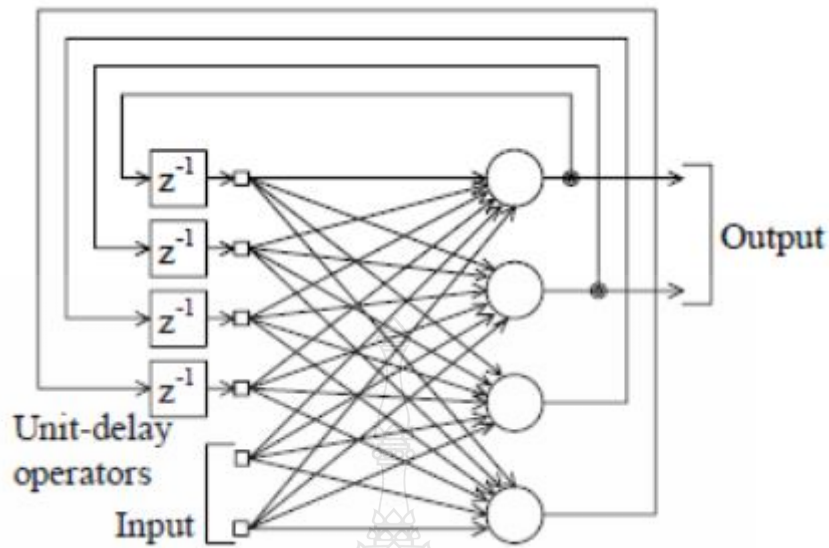
รูปที่ 2.15 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นที่มีชั้นซ่อนหนึ่งชั้น

- ข่ายงานแบบเวียนเกิด

เป็นข่ายงานที่มีวงป้อนกลับ (Feedback Loop) อย่างน้อยหนึ่งวงในข่ายงาน ซึ่งมีทั้งแบบข่ายงานแบบเวียนเกิดชนิดไม่มีวงป้อนกลับในตัว (Self-Feedback Loop) ตัวอย่างเช่นข่ายงานแบบฮอปฟิลด์ (Hopfield Network) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.16 และข่ายงานแบบเวียนเกิดที่มีนิวรอนซ่อน (Hidden Neuron) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.17



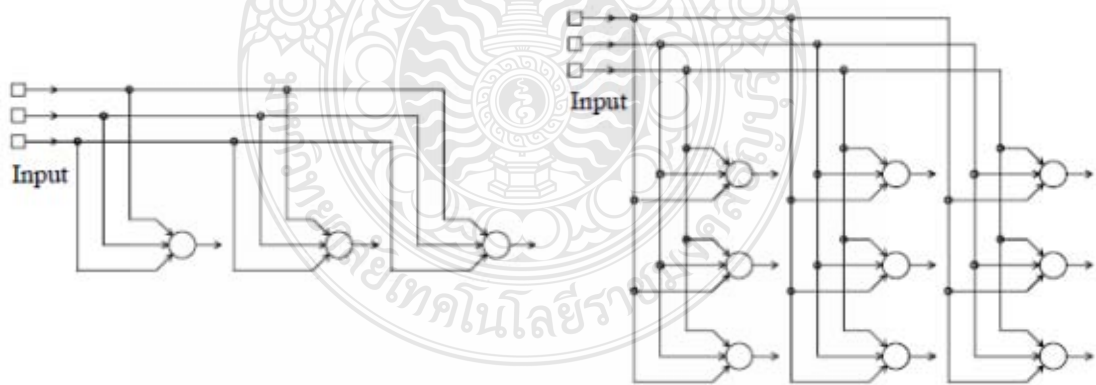
รูปที่ 2.16 ข่ายงานแบบเวียนเกิดที่ไม่มีวงป้อนกลับในตัวและไม่มีนิวรอนซ่อน



รูปที่ 2.17 ข่ายงานแบบเวียนเกิดที่มีนิวรอนซ่อน

- ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ

เป็นข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบ Lattice ประกอบด้วยแถวลำดับหนึ่งมิติ (One-dimensional Array) แถวลำดับสองมิติ (Two-dimensional Array) หรือแถวลำดับหลายมิติ (Multi-dimensional Array) ของนิวรอน ดังแสดงตัวอย่างแผนภาพข่ายงานในรูปที่ 2.16 ตัวอย่างของข่ายงานระบบประสาทที่มีลักษณะเช่นนี้ได้แก่ ข่ายงานโคโฮเน็น (Kohonen Network)



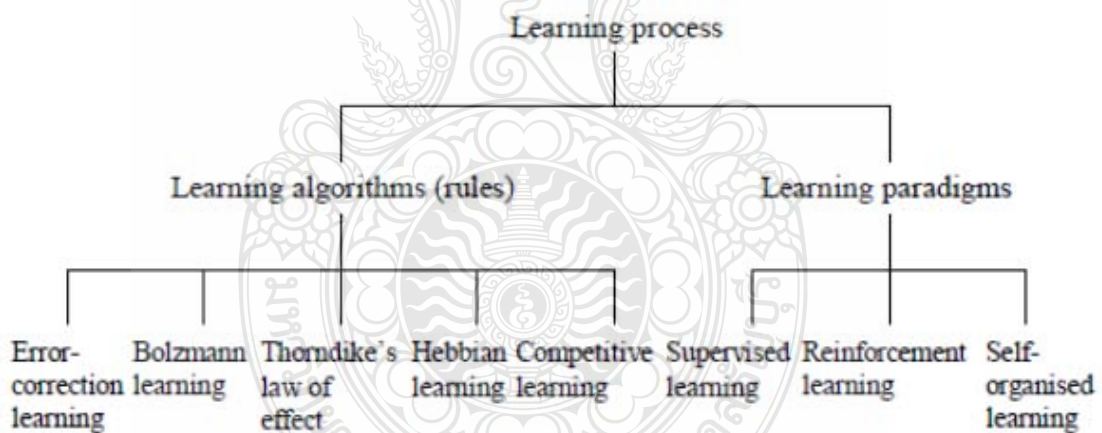
(ก) แบบ Lattice หนึ่งมิติของนิวรอน 3 นิวรอน      (ข) แบบ Lattice สองมิติของนิวรอนชนิด  $3 \times 3$  Array

รูปที่ 2.18 ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบ Lattice

### 2.5.3 กระบวนการเรียนรู้ (Learning Process)

โดยทั่วไปทำงานระบบประสาทจะเก็บข้อมูลหรือความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานที่ต้องกระทำ โดยอาศัยกระบวนการเรียนรู้หรือการฝึกสอน (Training) กระบวนการเรียนรู้ของข่ายงานระบบประสาทสามารถแบ่งเป็นหลายประเภทโดยใช้ขั้นตอนการเรียนรู้ (Learning Algorithm) หรือกฎการเรียนรู้ (Learning Rule) เป็นแนวทางในการจำแนกประเภท กระบวนการเรียนรู้แบ่งออกเป็น 5 ประเภทคือ การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด (Error-Correction Learning) การเรียนรู้แบบโบลซ์มันน์ (Boltzmann Learning) การเรียนรู้โดยใช้กฎผลกระทบทของธอร์นไดค์ (Learning Using Thorndike's Law of Effect) การเรียนรู้แบบเฮบบ์ (Hebbian Learning) และการเรียนรู้โดยการแข่งขัน (Competitive Learning)

ทั้งนี้จะใช้รูปแบบการเรียนรู้ (Learning Paradigm) เป็นแนวทางการจำแนกประเภท กระบวนการเรียนรู้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบเสริมสร้าง (Reinforcement Learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised Learning or Self-Organized Learning) แผนภาพประเภทกระบวนการเรียนรู้แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.19 การจำแนกประเภทกระบวนการเรียนรู้

- การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด (Error-Correction Learning)

เป็นการเรียนรู้โดยที่ตัวถ่วงน้ำหนักในข่ายงานระบบประสาทมีการเปลี่ยนแปลงค่าในขณะที่มีการเรียนรู้โดยใช้ความแตกต่างระหว่างการตอบสนองที่ต้องการ (Desired Response)

กับการตอบสนองที่ได้ (Actual Response) เป็นตัวกำหนดแนวทางการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ค่าสัญญาณผิดพลาด (Error Signal ;  $e_k(n)$ ) ของนิวรอนที่  $k$  จะสามารถหาได้จาก

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (2.12)$$

กำหนดให้  $d_k(n)$  เป็นการตอบสนองที่ต้องการจากนิวรอนที่  $k$  ในชั้นข้อมูลออก ณ เวลา  $n$  และให้การตอบสนองที่ได้จากนิวรอนที่  $k$  ณ เวลา  $n$  มีค่าเป็น  $y_k(n)$  ทั้งนี้  $\varepsilon(n)$  เป็นค่า cost function ที่เวลา  $n$  โดยเทียบจากตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงดังสมการ

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} \sum_k e_k^2(n) \quad (2.13)$$

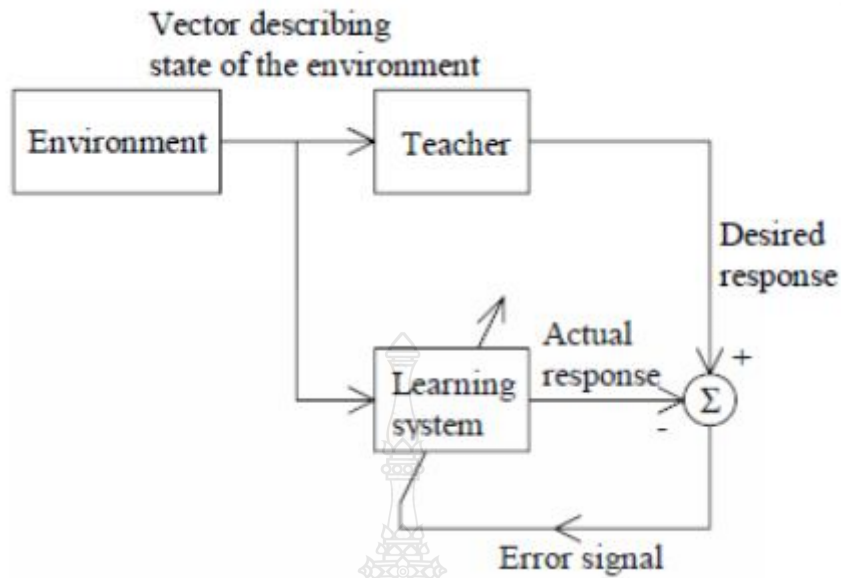
อย่างไรก็ตามเพื่อให้การตอบสนองที่ได้จากข่ายงานเข้าใกล้การตอบสนองที่ต้องการมากที่สุด จะใช้วิธีการ Gradient Descent Method ซึ่งการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักจะสามารถทำได้จากสมการ

$$w(n+1) = w(n) - \eta \frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w} \quad (2.14)$$

โดยที่  $w(n)$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักที่เวลา  $n$  ค่า  $\frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w}$  เป็นค่าความชันในปริภูมิตัวถ่วงน้ำหนัก และค่า  $\eta$  เป็นพารามิเตอร์อัตราการเรียนรู้

- การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Learning)

เป็นการเรียนรู้ที่ข่ายงานระบบประสาทสามารถเก็บรวบรวมความรู้ได้โดยการใช้สัญญาณฝึกสอนภายนอก (External Teaching Signal) ในกรณีนี้ผู้ฝึกสอนจะมีบทบาทในการส่งข้อมูล (Mapping) เข้าข่ายงานให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ แผนภาพของการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนแสดงในรูปที่ 2.20



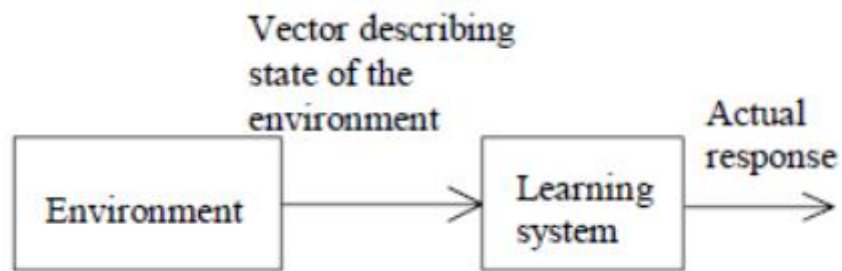
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน

จากรูปที่ 2.20 กฎการเรียนรู้ที่ใช้ในกรณีนี้เป็นกฎการเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาดระหว่างการตอบสนองที่ต้องการจากผู้ฝึกสอนกับการตอบสนองที่ได้จากข่ายงานระบบประสาท ทั้งนี้ส่วนใหญ่จะใช้การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาดซึ่งใช้วิธี Gradient Descent Method ในการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก

อย่างไรก็ตามข่ายงานที่ใช้การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนบางข่าย กระบวนการเรียนรู้อาจจะไม่ใช้วิธีการหาค่าต่ำสุดของ cost function เช่น ข่ายงานมอดูลาร์ (Modular Network) เป็นการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน โดยใช้วิธีหาค่าสูงสุด (Maximization) ของ Log-Likelihood Function ซึ่งการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักจะใช้วิธีการ Gradient Ascend Method

- การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised Learning)

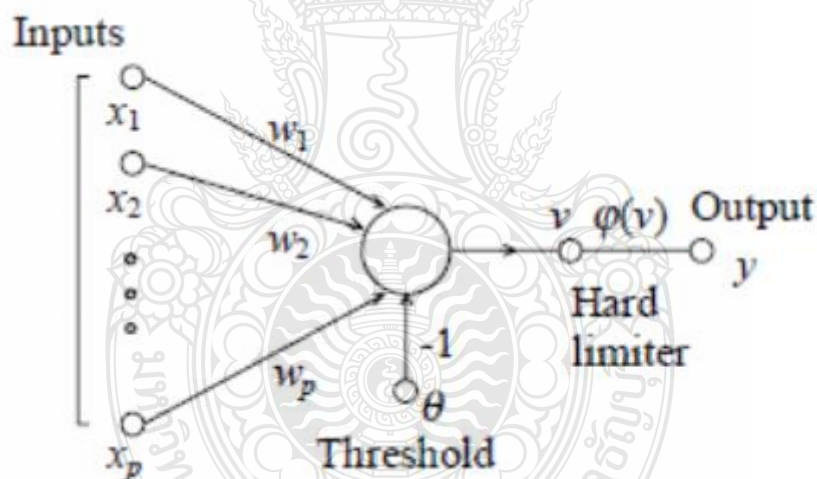
เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอนที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณฝึกสอนให้กับข่ายงานระบบประสาท ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 2.21 ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลเข้าของข่ายงานจะมีอยู่เพียงข้อมูลเดียว ซึ่งก็คือเวกเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายสถานะสิ่งแวดลอม ซึ่งให้เห็นว่าเป้าหมายการเรียนรู้ของข่ายงานจะขึ้นอยู่กับกลยุทธ์การเรียนรู้ ซึ่งได้ฝังตัวอยู่ในข่ายงานระบบประสาท



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน

วิธีการที่นิยมใช้ทั่วไปในการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอนนี้คือ การใช้กฎ Heuristic Rule ในการทำให้เกิดการเรียนรู้ภายในข่ายงานระบบประสาทเพื่อปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักของนิวรอนซ่อนในข่ายงานเรเดียลเบซีสฟังก์ชัน

#### 2.5.4 เพอร์เซ็ปตรอน



รูปที่ 2.22 แผนภาพของเพอร์เซ็ปตรอน

เพอร์เซ็ปตรอน (Perceptron) เป็นนิวรอนในข่ายงานระบบประสาทแบบป้อนไปข้างหน้า อาจประกอบด้วยเพียงหนึ่งนิวรอนที่มีตัวถ่วงน้ำหนักและค่า Threshold จากแผนภาพรูปที่ 2.22 จะมีจำนวน  $p$  สัญญาณเข้า เพื่อใช้ในการหาผลรวมถ่วงน้ำหนัก ค่าผลลัพธ์จะเป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ ( $v$ ) ดังสมการ

$$v = \sum_{i=1}^p w_i x_i - \theta \quad (2.15)$$

โดย  $x_i$  เป็นข้อมูลเข้าที่นิวรอน  $i$   $w_i$  เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก  $\theta$  เป็นค่า Threshold และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$v = \sum_{i=1}^p w_i x_i \quad (2.16)$$

ทั้งนี้ค่า  $w_0$  จะเท่ากับค่า Threshold ( $\theta$ ) และ  $x_0 = -1$  ซึ่งข้อมูลออกจากเพอร์เซ็ปตรอนจะมีค่าเป็น

$$y = \varphi(v) \begin{cases} 1; & v \geq 0 \\ 0; & v < 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

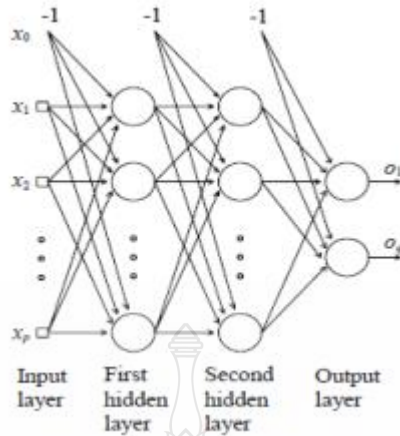
โดยที่  $y$  เป็นข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน และ  $(\cdot)$  เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นซึ่งในกรณีนี้เป็น Hard Limiter วิธีที่นิยมใช้ปรับค่าพารามิเตอร์อิสระหรือตัวถ่วงน้ำหนักของเพอร์เซ็ปตรอนที่เรียกว่า Perceptron Algorithm ซึ่งนำมาใช้ในการฝึกสอนเพอร์เซ็ปตรอนแบบ pattern เชิงเส้นที่สามารถแยกเป็น 2 กลุ่มแล้ว ขั้นตอนวิธีเพอร์เซ็ปตรอนนี้จะลู่เข้า (Converge) ภายขอบการตัดสินใจ (Decision Boundary) ได้และจะเกิด Hyper-plane ระหว่าง pattern ทั้ง 2 กลุ่ม ทฤษฎีลู่เข้าของวิธีเพอร์เซ็ปตรอนเรียกว่า Perceptron Convergence Theorem

### 2.5.5 โครงสร้างของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน (Structure of a Multilayer Perceptron)

มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนจะสามารถสร้างได้จากการนำเพอร์เซ็ปตรอนมาต่อกันเป็นข่ายงาน แผนภาพของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21

ตามปกติ Hard Limiter จะไม่ถูกนำมาใช้เป็นฟังก์ชันการกระตุ้นในมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนแต่ Logic function หรือ Hyperbolic Tangent Function จะถูกนำมาใช้แทน สำหรับกรณีที่ใช้ Logic function เป็นฟังก์ชันการกระตุ้น ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนก็จะมีค่าเป็น

$$y = \varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}}; \quad -\infty < v < \infty \quad (2.18)$$



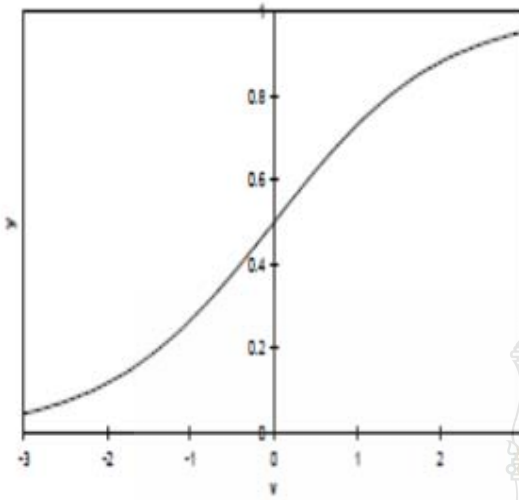
รูปที่ 2.23 แผนภาพของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน

โดยที่  $v$  เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิ ทั้งนี้ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมี Range เป็น  $0 < v < 1$  และพิสัยข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนขณะใช้ Logic function เป็นฟังก์ชันการกระตุ้น แสดงดังรูปที่ 2.24 (ก)

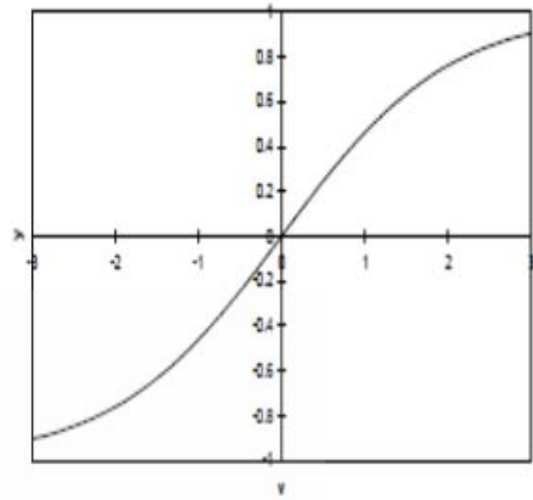
แต่ถ้าใช้ Hyperbolic Tangent Function มาเป็นฟังก์ชันการกระตุ้น ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีค่าดังสมการ (2.19) ข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอนจะมีพิสัยเป็น  $-1 < v < 1$  ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.24 (ข)

$$y = \varphi(v) = \frac{1 - e^{-v}}{1 + e^{-v}} ; \quad -\infty < v < \infty \quad (2.19)$$





(ก) กรณิฟังก์ชันกระตุ้นเป็น Logic function

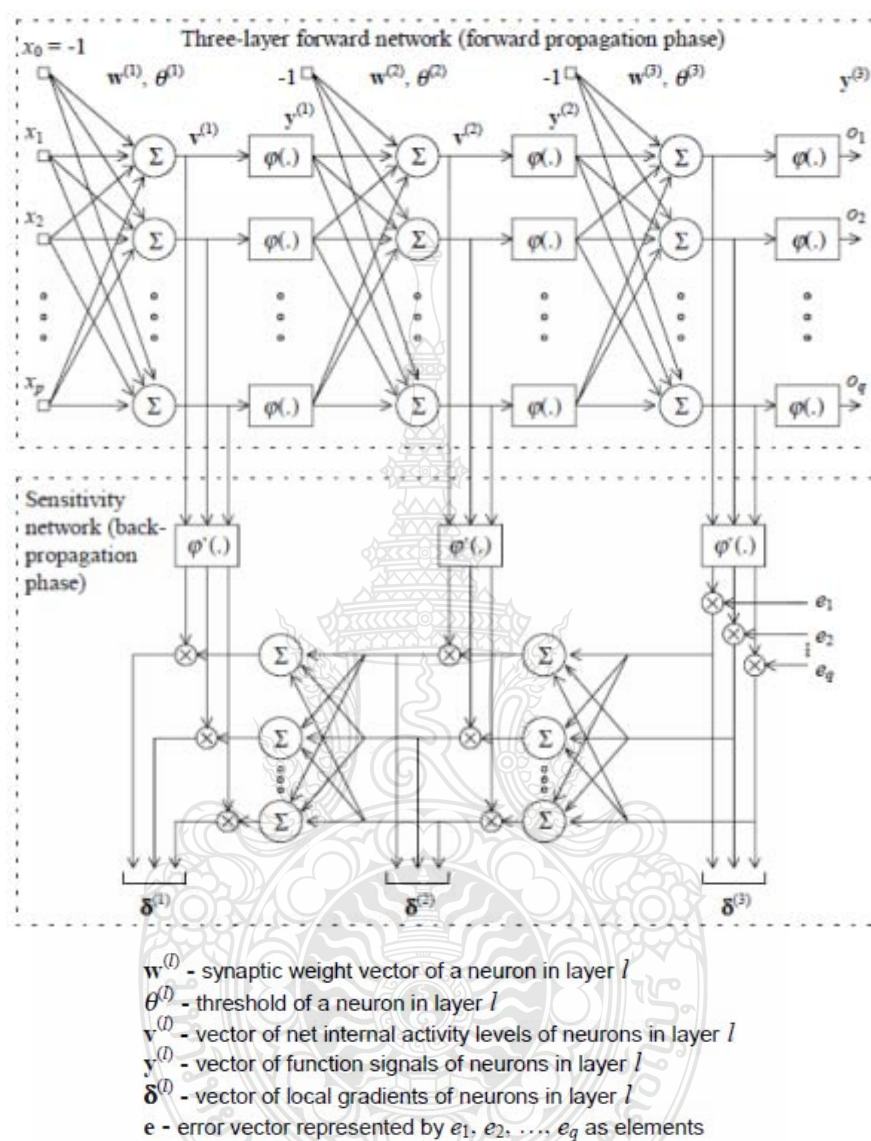


(ข) กรณิฟังก์ชันกระตุ้นเป็น Hyperbolic Tangent Function

**รูปที่ 2.24** พิสัยข้อมูลออกของเพอร์เซ็ปตรอน

เมื่อเปลี่ยนฟังก์ชันการกระตุ้นและนำเพอร์เซ็ปตรอนมาประกอบกันเป็นมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน คุณสมบัติการจำแนกชนิดข่างานก็จะขยายขึ้นจากเดิมที่สามารถจำแนก pattern ที่แยกกันได้เชิงเส้นเท่านั้น โดยมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนจะสามารถสร้าง Non-linear Hyper-plane เพื่อใช้ในการจำแนก pattern ที่แยกกันไม่ได้เชิงเส้น (Non-linearly Separable Patterns) ได้วิธีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Learning Algorithm) ที่สามารถใช้ในการปรับตัวถ่วงน้ำหนักในมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนเรียกว่า วิธีการแพร่ย้อนหลัง (Back-Propagation Algorithm)

### 2.5.6 วิธีการแพร่ย้อนหลัง (Back-Propagation Algorithm)



รูปที่ 2.25 แผนภาพของวิธีการ Back Propagation Algorithm สำหรับฝึกสอนมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน

จากรูป 2.25 ดัชนีของชั้น ( $l$ ) จะครอบคลุมจากชั้นข้อมูลเข้า ( $l = 0$ ) ไปถึงชั้นข้อมูลออก ( $l = L$ ) ในกรณีนี้  $L = 3$  ข่ายงานในส่วนบนของรูปจะเป็นส่วนเฟสไปข้างหน้า ส่วนข่ายงานในส่วนล่างของรูปจะเป็นส่วนเฟสย้อนหลัง ส่วนล่างของแผนภาพในรูปที่ 2.25 นี้เรียกว่า ข่ายงานความไหว (Sensitivity Network) มีหน้าที่คำนวณค่าความชันเฉพาะที่ (Local Gradient)

ในวิธีการ Back Propagation Algorithm จะใช้กฎการปรับค่าแบบ Pattern-by-Pattern ในการปรับตัวถ่วงน้ำหนักภายในข่ายงาน โดยในการทำซ้ำ (Iteration) 1 ครั้ง pattern จำนวน 1 pattern จะเป็นข้อมูลเข้าของข่ายงาน และขั้นตอนวิธีแพร่ย้อนหลังนี้จะทำการปรับตัวถ่วงน้ำหนักภายในแต่ละชั้นของข่ายงานตามกฎการเรียนรู้ โดยมัลติเลเยอร์จะถูกฝึกสอน โดยการใช้เซตของ Training Pattern ข้อมูล Training Data จะสามารถแสดงในรูปของ  $\{[x(n), d(n)]; n = 1, 2, \dots, N\}$  โดยที่  $x(n)$  เป็นตัวอย่าง (Sample) ที่  $n$  ของแบบ pattern ข้อมูลเข้าซึ่งจะเป็นสัญญาณเข้าสู่ข่ายงาน  $d(n)$  เป็นตัวอย่างที่  $n$  ของ pattern ข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการ (Desired Response Output Pattern) จากข่ายงาน และ  $N$  เป็นจำนวน pattern ทั้งหมดในเซตของ pattern สำหรับฝึกสอน เมื่อทำการฝึกสอนข่ายงานระบบประสาทโดยทำ ซ้ำครบ  $N$  ครั้ง จะกล่าวได้ว่าข่ายงานระบบประสาทได้รับการฝึกสอนไปแล้วเป็นจำนวน 1 รอบเวลา (Epoch) ขั้นตอนวิธีแพร่ย้อนหลังอธิบายได้ดังนี้

1 Initialization เริ่มต้นจากการเลือกโครงสร้างหรือสถาปัตยกรรมของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนซึ่งรวมถึงจำนวนของปมข้อมูลเข้า (Input Node) จำนวนชั้นซ่อน จำนวนของปมซ่อน (Hidden Node) ในแต่ละชั้นซ่อน และจำนวนปมข้อมูลออก (Output Node) ซึ่งจำนวนปมข้อมูลเข้าและข้อมูลออกจะถูกกำหนดโดยคุณลักษณะงานที่ข่ายงานระบบประสาทต้องทำ ในขณะที่จำนวนชั้นซ่อนและจำนวนปมซ่อนในแต่ละชั้นซ่อนจะเป็นปัญหาเชิงการออกแบบ (Design Problem) เมื่อได้กำหนดสถาปัตยกรรมของข่ายงานระบบประสาทแล้ว ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงและค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในข่ายงานก็จะถูกกำหนดค่าขึ้นอย่างสุ่ม โดยการแจกแจงค่าที่สุ่มขึ้นจะมีลักษณะเป็นการแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution)

2 Presentation of Training Examples เป็นการป้อนข้อมูล Training pattern เข้าข่ายงาน ซึ่งตามปกติ ลำดับก่อนหลังของ Training pattern set จะถูกจัดลำดับใหม่ (Reshuffle) หลังจากที่มีการเรียนรู้ใน 1 รอบเวลาได้เสร็จสิ้นลง สำหรับแต่ละ pattern ที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานระบบประสาทในแต่ละการทำซ้ำ ให้ทำการคำนวณไปข้างหน้า (Forward Computation) และการคำนวณย้อนหลัง (Backward Computation) ตามข้อ 3 และ 4

3 Forward Computation เป็นการให้ training pattern ที่ถูกป้อนเข้าข่ายงานระบบประสาทคือ  $[x(n), d(n)]$  โดยที่  $x(n)$  เป็นเวกเตอร์ข้อมูลเข้าซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่ปมข้อมูลเข้าของข่ายงาน และ  $d(n)$  เป็นเวกเตอร์ข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการที่แสดงค่าไว้ที่ปมข้อมูลออกของข่ายงาน ทำการคำนวณไปข้างหน้าโดยที่ระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  จะมีค่าเป็น

$$v_j^{(l)}(n) = \sum_{i=0}^p w_{ij}^{(l)}(n) \cdot y_i^{(l-1)}(n) \quad (2-20)$$

โดยที่  $y_i^{(l-1)}(n)$  เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่  $i$  ในชั้นก่อนที่  $l-1$  ที่การทำซ้ำครั้งที่  $n$   $w_{ij}^{(l)}(n)$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักระหว่างนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  และนิวรอนที่  $i$  ในชั้นที่  $l-1$   $v_j^{(l)}(n)$  เป็นระดับกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอนที่  $j$  และ  $p$  เป็นจำนวนนิวรอนในชั้นที่  $l-1$  ในกรณีที่  $i=0$  ค่า  $y_0^{(l-1)}(n)$  มีค่าเท่ากับ  $-1$  และ  $w_{j0}^{(l)}(n)$  มีค่าเท่ากับ  $\theta_j^{(l)}(n)$  ซึ่งเป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  โดยใช้ Logic function เป็นฟังก์ชันกระตุ้นในแต่ละนิวรอน ข้อมูลออกของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  มีค่าเป็น

$$y_j^{(l)}(n) = \frac{1}{1 + e^{(-v_j^{(l)}(n))}} \quad (2-21)$$

โดยที่  $y_j^{(l)}(n)$  เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  ที่การทำซ้ำครั้งที่  $n$  ถ้านิวรอนที่  $j$  อยู่ในชั้นซ่อนที่หนึ่ง ( $l=1$ ) ให้จัดข้อมูลเข้านิวรอนที่  $j$  เป็น

$$y_j^{(0)}(n) = x_i(n), \quad i=1, 2, \dots, p \quad (2-22)$$

โดยที่  $x_i(n)$  เป็นสมาชิกที่  $i$  ของเวกเตอร์ข้อมูลเข้า  $x(n)$   $p$  เป็นจำนวนปมข้อมูลเข้าในข่ายงานและ  $y_i^{(0)}(n)$  เป็นข้อมูลเข้าสู่นิวรอนที่  $j$  จากปมข้อมูลเข้าที่  $i$  ในทางตรงกันข้ามถ้านิวรอนที่  $j$  อยู่ในชั้นข้อมูลออก ( $l=L$ ) ให้จัดข้อมูลออกของนิวรอนที่  $j$  เป็น

$$y_j^{(L)}(n) = o_j(n), \quad i=1, 2, \dots, p \quad (2-23)$$

โดยที่  $o_j(n)$  เป็นข้อมูลออกของปมข้อมูลออกที่  $j$   $q$  เป็นจำนวนปมข้อมูลออก และ  $y_j^{(L)}(n)$  เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นข้อมูลออก  $L$  ดังนั้นค่าสัญญาณข้อผิดพลาดจะสามารถคำนวณได้จาก

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n) \quad (2-24)$$

โดยที่  $d_j(n)$  เป็นสมาชิกที่  $j$  ของเวกเตอร์ข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการ  $d(n)$  และ  $e_j(n)$  เป็นสัญญาณข้อผิดพลาดจากนิเวรอนข้อมูลออกที่  $j$

**4 Backward Computation** เป็นการคำนวณค่าความชันเฉพาะที่ ( $\delta$ ) ของข่ายงาน โดยการคำนวณย้อนหลังจากชั้นหนึ่งถอยหลังกลับไปยังชั้นก่อน ถ้านิเวรอนที่  $j$  อยู่ในชั้นข้อมูลออก ค่าความชันเฉพาะที่ของนิเวรอนที่  $j$  จะมีค่าเป็น  $\delta_j$

$$\delta_j^{(L)}(n) = e_j(n) o_j(n) [1 - o_j(n)] \quad (2-25)$$

โดยที่  $\delta_j^{(L)}(n)$  เป็นค่าความชันเฉพาะที่ของนิเวรอนที่  $j$  ในชั้นข้อมูลออก  $L$  แต่ถ้านิเวรอนที่  $j$  อยู่ในชั้นซ่อนที่  $l$  ค่าความชันเฉพาะที่ของนิเวรอนที่  $j$  จะมีค่าเป็น

$$\delta_j^{(L)}(n) = y_j^{(l)}(n) [1 - y_j^{(l)}(n)] \cdot \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) \cdot w_{kj}^{(l+1)}(n) \quad (2-26)$$

โดยที่  $\delta_k^{(l+1)}(n)$  เป็นค่าความชันเฉพาะที่ของนิเวรอนที่  $k$  ในชั้นที่  $l+1$   $w_{kj}^{(l+1)}(n)$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักระหว่างนิเวรอนที่  $k$  ในชั้นที่  $l+1$  กับนิเวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  เมื่อคำนวณค่าความชันเฉพาะที่แล้ว การปรับตัวถ่วงน้ำหนักโดยใช้การเรียนรู้แบบแก้ข้อผิดพลาดจะทำได้โดยกำหนดให้

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + \alpha [w_{ji}^{(l)}(n) - w_{ji}^{(l)}(n-1)] + \eta \delta_j^{(l)}(n) \cdot y_i^{(l-1)}(n) \quad (2-27)$$

โดย  $\eta$  เป็นพารามิเตอร์อัตราการเรียนรู้ และ  $\alpha$  เป็นค่าคงตัวโมเมนตัม (Momentum Constant)

**5 Iteration** เป็นการคำนวณซ้ำโดยการป้อนข่ายงานด้วย training pattern จำนวน  $m$  รอบเวลาจนกระทั่งค่าตัวถ่วงน้ำหนักจะลู่เข้า ซึ่งการลู่เข้าของค่าตัวถ่วงน้ำหนักจะสังเกตได้จากการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean of Sum of Squared Errors) จากปมข้อมูลออก ซึ่งคำนวณโดยใช้ค่าผิดพลาดระหว่างการเรียนรู้ใน 1 รอบเวลา ค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสองคำนวณหาได้โดย

$$\text{Mean of Sum of Squared errors} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^q (e_i(j))^2}{N} \quad (2-28)$$

โดยที่  $e_i(j)$  เป็นสัญญาณค่าผิดพลาดจากปมข้อมูลออกที่  $i$  ในการทำซ้ำครั้งที่  $j$  ของรอบเวลา

## 2.6 ชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

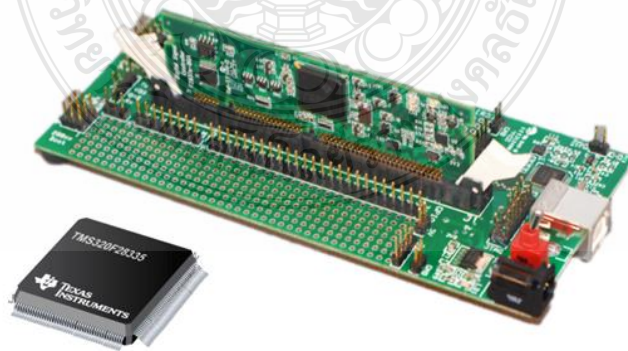
ในงานวิจัยนี้จะแบ่งชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลออกเป็นสองหน้าที่คือ ชุดประมวลผลหลักจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM และสร้างรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 และ 3 ระดับ โดยจะใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F28335 และชุดประมวลผลรองใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ STM32F417G ซึ่งจะทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์มาประมวลผลหาชุดที่เกิด Fault แล้วส่งสัญญาณต่อไปยังชุดประมวลผลหลัก

### 2.6.1 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F28335

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F28335 ผลิตโดยบริษัท Texas Instrument มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard) นั่นคือมีการแยกบัสของหน่วยความจำกับบัสของข้อมูลออกจากกันทำให้มีความรวดเร็วในการจัดการข้อมูล นอกจากนี้ TMS320F28335 ยังมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

- เป็นซีพียู 32-bit แบบ floating point unit ทำงานด้วยความเร็วสูงสุด 150 MHz
- มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิดแฟลช (Flash program memory) ขนาด 512kb และหน่วยความจำแบบสแตติก (Static RAM) ขนาด 256kb อยู่ภายใน
- มีโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 12 บิต จำนวน 16 ช่อง
- มีการทำงานแบบขนาน (pipeline) 8 stage
- หน่วยประมวลผลคณิตศาสตร์แบบ 32 บิต
- มีโมดูล PWM จำนวน 12 ช่อง

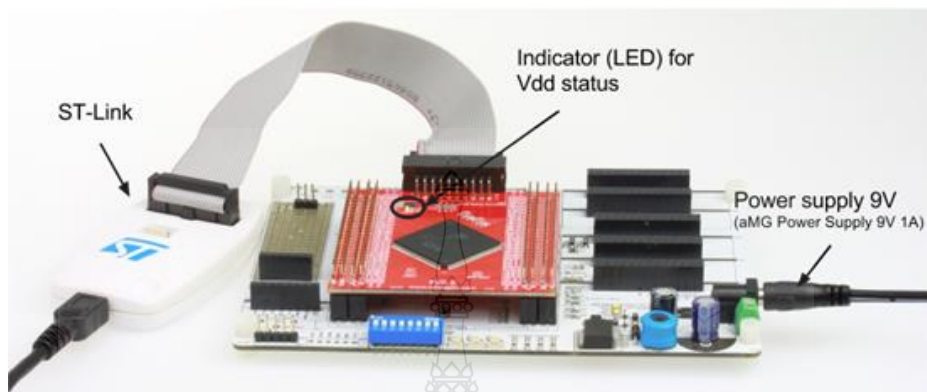
ข้อมูลเพิ่มเติมสามารถดูได้ที่ <http://www.st.com>



รูปที่ 2.26 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F28335

## 2.6.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ STM32F417G

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ STM32F417G ผลิตโดยบริษัท STMicroelectronics



รูปที่ 2.27 บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ STM32F417G

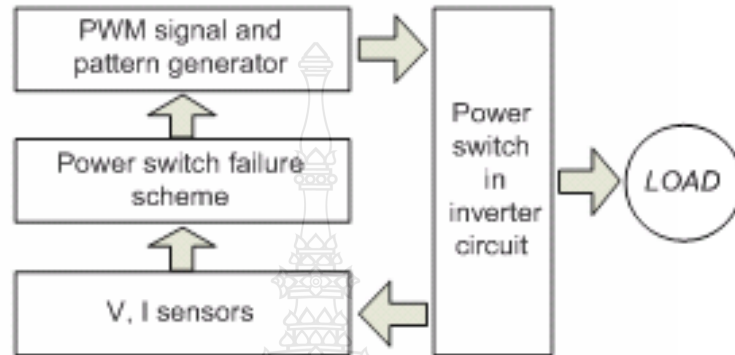
ซึ่งได้ชื่อลักษณะของซีพียูตระกูล ARM Cortex-F4 มาทำการพัฒนาต่อ โดยการเพิ่มหน่วยความจำภายในและโมดูลของอุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ โดยจะมีคุณสมบัติเด่นดังนี้

- แกนกลางเป็นซีพียู ARM 32-bit Cortex-F4 ที่ทำงานด้วยความเร็วสูงสุด 72 MHz
- มีตัวหารเลขแบบฮาร์ดแวร์ และหน่วยประมวลผลคณิตศาสตร์สามารถคูณเลข 32 บิตได้ภายในหนึ่งสัญญาณนาฬิกา
- มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิดแฟลช (Flash program memory) ขนาด 128kb และหน่วยความจำแบบสแตติก (Static RAM) ขนาด 20kb อยู่ภายใน
- สามารถโปรแกรมได้โดยผ่าน In-System Programming (ISP)
- มีโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ความเร็ว 1 ไมโครวินาที ความละเอียด 12 บิต จำนวน 2 ชุดรวม 16 ช่อง รับแรงดันได้ 0-3.6Vdc มีวงจรสุ่มและพักข้อมูล (Sample & Hold) 2 ชุด
- มีโมดูลแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ความละเอียด 12 บิต จำนวน 2 ชุด
- มีวงจรถ่ายทอดสัญญาณ 12 ตัว
- มีวงจรถ่ายทอดอนุกรม UART จำนวน 3 ชุด
- มีวงจรถ่ายทอดอนุกรม I<sup>2</sup>C ความเร็วสูง 2 วงจร
- มีวงจรถ่ายทอดอนุกรม SPI ความเร็วสูง 12Mbit/s 2 วงจร

ข้อมูลเพิ่มเติมสามารถดูได้ที่ <http://www.st.com>

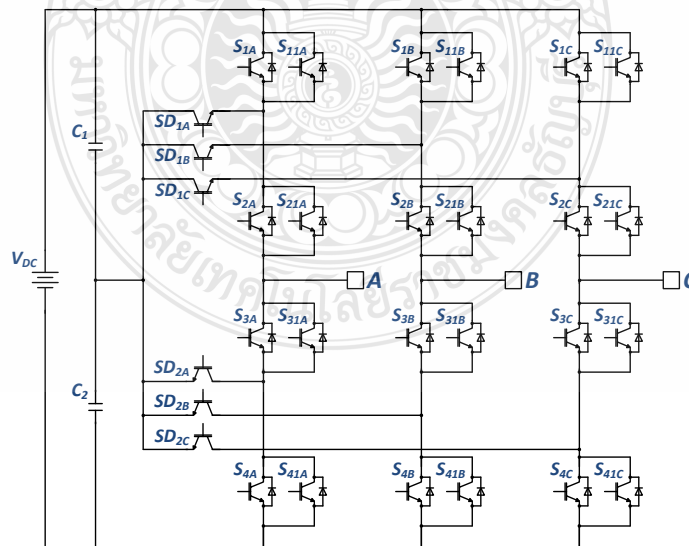
## 2.7 การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทน

ไดอะแกรมแสดง โครงสร้างการควบคุมแบบสภาวะคงทนที่นำเสนอของอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 2.28 โดยจะรับค่าแรงดันและกระแสจากเซ็นเซอร์แล้วทำการเปรียบเทียบกับเวกเตอร์แรงดันในแต่ละสถานะของการสวิตช์เพื่อหาตำแหน่งที่ผิดพลาดของวงจรกำลัง



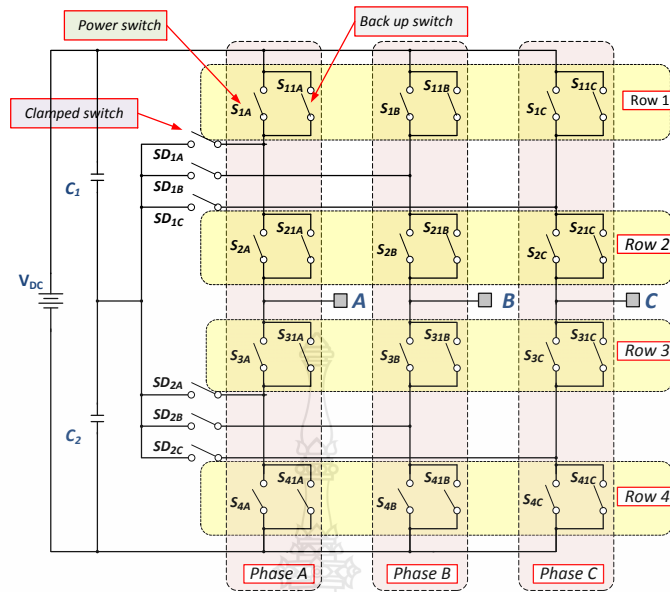
รูปที่ 2.28 แผนภาพการควบคุมแบบสภาวะคงทน

วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้การควบคุมแบบสภาวะคงทนจะเพิ่มสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำหน้าที่ Back up ( $S_{1ix}$ ) การทำงานของสวิตช์หลัก ( $S_{ix}$ ) และใช้งานแทนไดโอด ( $SD_{ix}$ ) ดังรูปที่ 2.29 และรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 โครงสร้างการควบคุมแบบสภาวะคงทน



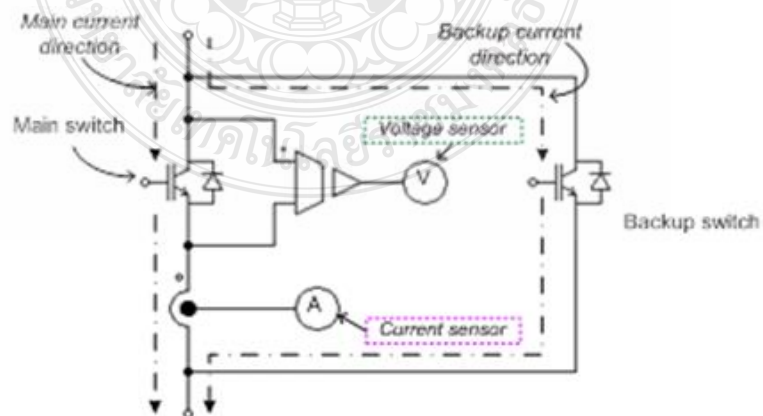


รูปที่ 2.30 ลักษณะการทำงานของ การควบคุมแบบสภาวะคงทน

ซึ่งรูปแบบการตรวจหาจุดผิดปกติของสวิตช์กำลังและการทำงานแบบสภาวะคงทนจะมีการทำงานของระบบควบคุมแบบต่อเนื่องในช่วงที่อินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานอยู่ตลอดซึ่งหมายถึงการควบคุมแบบสภาวะคงทนจะทำงานในรูปแบบทันทีเวลา (Real time)

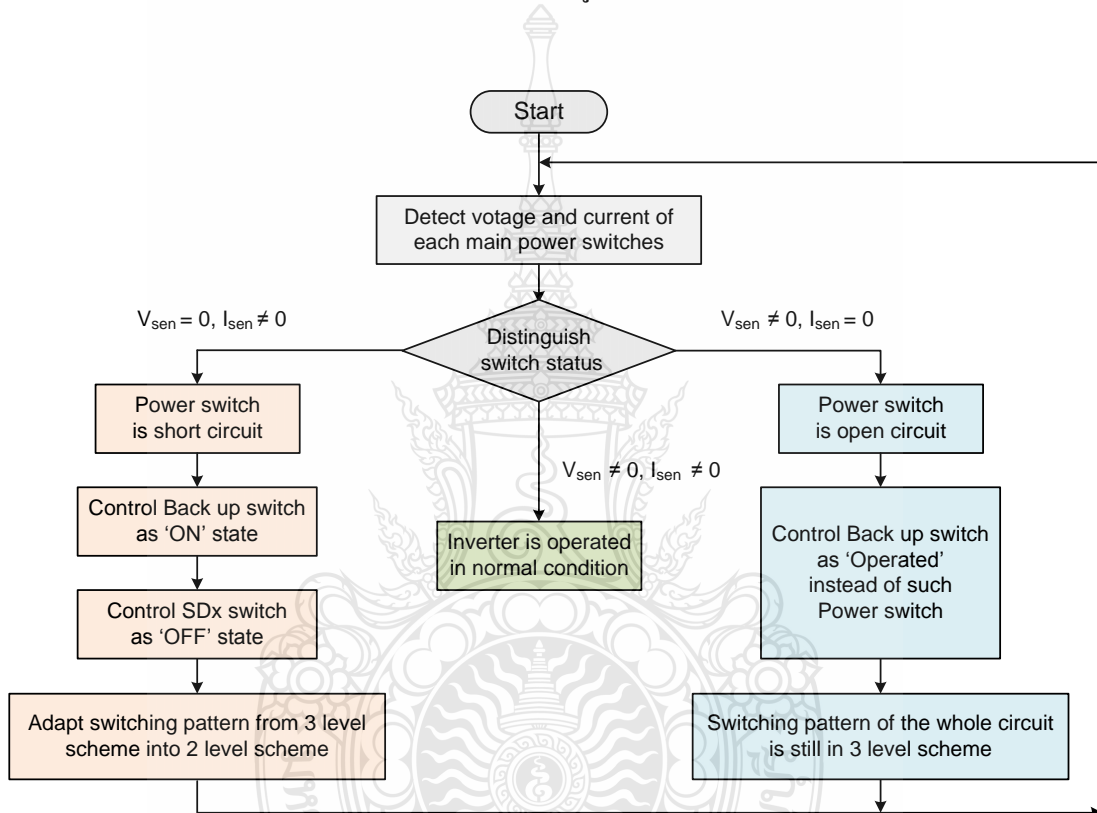
### 2.7.1 สวิตช์และเงื่อนไขการตรวจสอบสถานะ (Switch and operating Condition)

รูปแบบการควบคุมการทำงานจะใช้วิธีการตรวจสอบค่ากระแสและแรงดันที่สวิตช์แต่ละค่าแบบอิสระจากกันโดยตำแหน่งมีติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.31 พฤติกรรมของกระแสและแรงดันที่สวิทช์จะใช้เป็นตัวกำหนดว่าอยู่ในสถานะใดเช่นถ้าแรงดันตกคร่อมสวิทช์มีค่าเป็นศูนย์ หรือใกล้เคียง โดยยังมีกระแสไหลอยู่แสดงว่าสวิทช์ตัวนั้นเกิดสภาวะลัดวงจร(Short Circuit : SC) แต่ถ้าสวิทช์ตัวนั้นไม่มีกระแสไหลผ่าน โดยมีแรงดันตกคร่อมมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายหรือใกล้เคียงแสดงว่าสวิทช์ตัวนั้นเกิดสภาวะเปิดวงจร(Open Circuit : OC) จากพฤติกรรมของกระแสและแรงดันนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นเงื่อนไขการตรวจสอบสถานะของสวิทช์แต่ละตัวและทำการประมวลผลหารูปแบบ (Pattern) การทำงานที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 2.32 โฟร์ซาร์ตการทำงานของระบบควบคุมแบบสภาวะคงทน

**ตารางที่ 2.3** สถานะของสวิตช์เมื่อเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสอ่านค่าได้

$V_{sen}$	$I_{sen}$	Switch status
$V_{sen} = 0$	$I_{sen} \neq 0$	Short
$V_{sen} \neq 0$	$I_{sen} = 0$	Open
$V_{sen} \neq 0$	$I_{sen} \neq 0$	Normal operating condition
$V_{sen} = 0$	$I_{sen} = 0$	Not applicable

การตรวจจับสถานะการทำงานของสวิตช์ตัวหลักจะทำได้โดยใช้เซ็นเซอร์แรงดันและกระแส (รูปที่ 2.31) และจากตารางที่ 2.3 แสดงผลการตรวจจับของเซ็นเซอร์ทั้งสองและสถานะสวิตช์ตัวหลักที่จะทำงานสอดคล้องกัน ผลการตรวจจับจะถูกนำมาใช้เพื่อระบุความผิดปกติของสวิตช์ตัวหลัก

**2.7.2** รูปแบบการทำงาน (Pattern of operation)

รูปแบบการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวในวงจรจะมีอยู่สองลักษณะคือ

- รูปแบบการทำงานของสวิตช์เมื่อเกิดสถานะเปิดวงจร (Open Circuit : OC)
- รูปแบบการทำงานของสวิตช์เมื่อเกิดสถานะลัดวงจร (Short Circuit : SC)

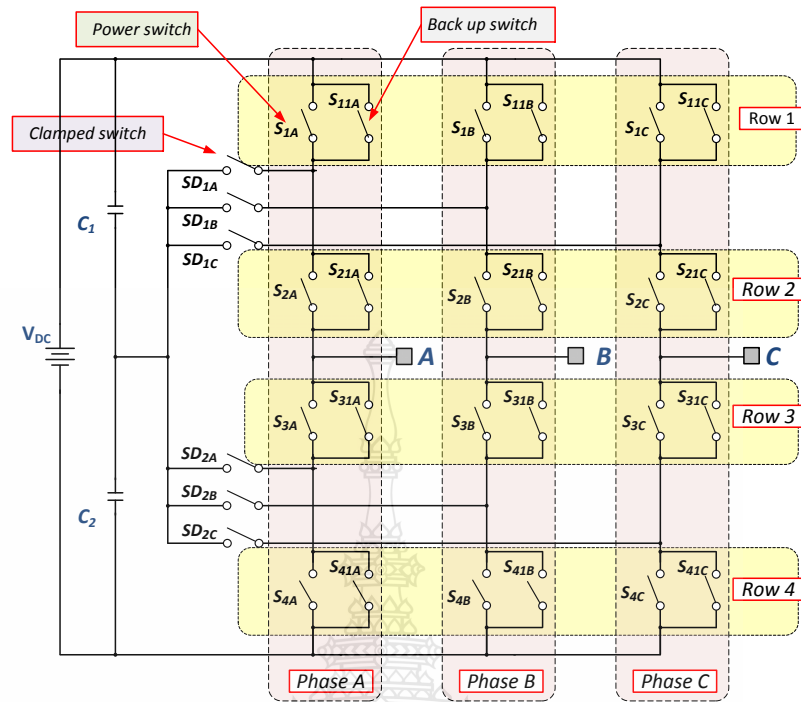
การทำงานทั้ง 2 ลักษณะสามารถอธิบายได้โดยใช้วงจรสมมูลของสวิตช์ในแต่ละเฟส ดังนั้นในหนึ่งเฟสจะมีสวิตช์ทั้งหมด 10 ตัว นั่นคือ

Main SW 4 ตัว เป็นสวิตช์หลักที่ใช้ทำงานในสถานะปกติกำหนดโดยใช้ sub-scrip 1-4 แทนจำนวนสวิตช์และใช้ sub-scrip A, B และ C แทนเฟส ดังนั้นจะได้เป็น  $S_{1A}, S_{2A}, S_{3A}$  และ  $S_{4A}$  ตามลำดับ

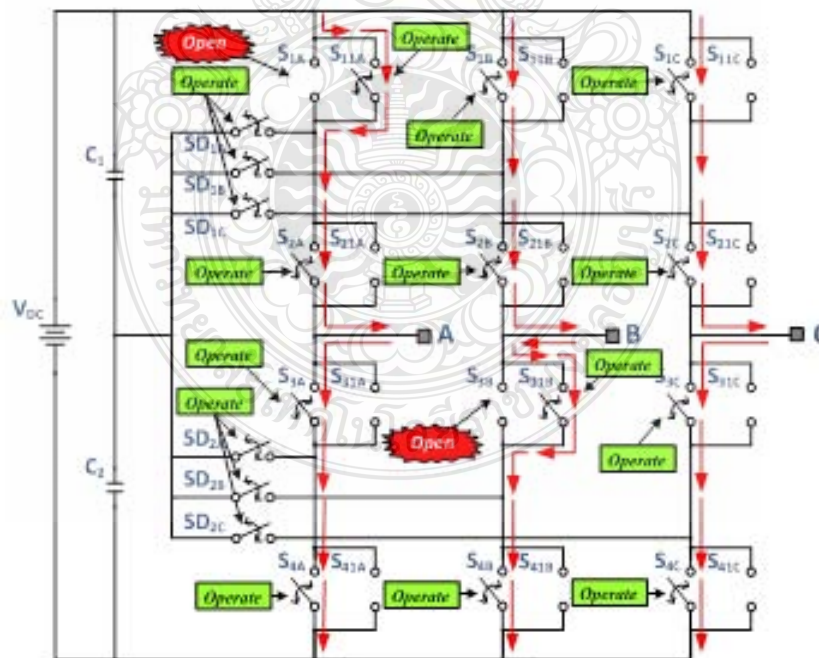
Back Up SW 4 ตัว เป็นสวิตช์ที่จะทำงานแทน Main SW ในกรณีที่เกิดสถานะ OC หรือ SC การเรียกชื่อกำหนด Sub-Script 11, 21, 31 และ 41 และใช้ Sub-Script A, B และ C แทนเฟสดังนั้นจะได้เป็น  $S_{1A}, S_{21A}, A_{31A}$  และ  $S_{41A}$

SW ทำหน้าที่แทนไดโอด 2 ตัว เป็นสวิตช์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนระดับแรงดันในช่วงที่ทำงานแบบ 3 ระดับ การเรียกชื่อจะกำหนดอักษร SD และใช้ Sub-Script 1-2 เพื่อระบุลำดับและใช้ Sub-Script A, B และ C แทนในแต่ละเฟสดังนั้นจะได้เป็น  $SD_{1A}$  และ  $SD_{2A}$  เมื่อเขียนวงจรสมมูลจะได้ดังรูปที่

2.33



รูปที่ 2.33 วงจรสมมูลของการควบคุมการทำงานของสวิตช์



รูปที่ 2.34 ฟังก์ชันการทำงานของการควบคุมสวิตช์  $S_{1A}$  or  $S_{3B}$  เปิดวงจร

รูปแบบการทำงานของสวิตช์เมื่อเกิดสถานะเปิดวงจร(Open Circuit : OC)

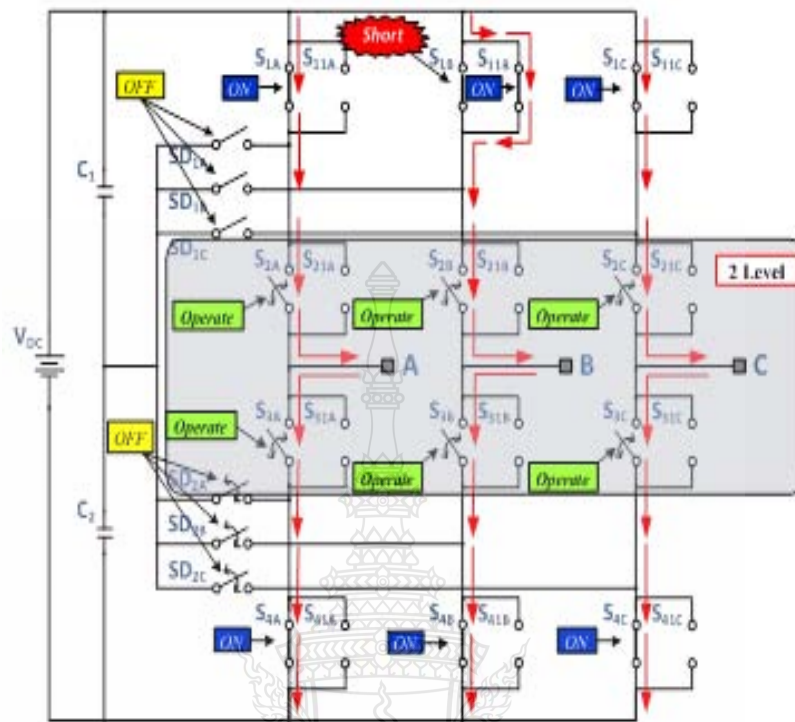
ในสถานะปกติการทำงานของวงจรจะทำในแบบ 3 ระดับโดย Main SW และ Diode SW จะทำหน้าที่สลับกันตามรูปแบบของ 3 ระดับ เมื่อตัว Sensor ตรวจสอบพบว่าเกิดสถานะ OC มีค่า Main SW ตัวใดตัวหนึ่ง Back Up SW ของสวิตช์ตัวนั้นก็เข้ามาทำงานแทน Diode SW จะยังคงทำงานตามปกติ ตัวอินเวอร์เตอร์จึงทำงานแบบ 3 ระดับ ได้ตามปกติถึงแม้ว่าจะเกิด OC นี้ Main SW ตัวใดตัวหนึ่ง

จากรูปที่ 2.34 แสดงตัวอย่างการเกิด OC มี Main SW  $S_{1A}$  และ  $S_{3B}$  ที่  $S_{1A}$  เมื่อเกิด OC ตัว Back Up SW  $S_{11A}$  จะถูกสั่งให้เข้ามาทำงานแทน  $S_{1A}$  ในทันทีที่กรไหลของกระแสจากเดิมนี้ไหลผ่าน  $S_{1A}$  ก็จะเปลี่ยนทิศทางมาไหลผ่าน  $S_{11A}$  ให้ตัวอินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานแบบ 3 ระดับเช่นเดิม ส่วนที่  $S_{3B}$  ก็จะมีรูปแบบการทำงานเช่นเดียวกันนั่นคือ Back Up SW  $S_{31B}$  จะถูกสั่งให้เข้ามาทำงานแทน  $S_{3B}$  ในทันที ทิศทางของกระแสที่ไหลผ่าน  $S_{3B}$  ก็จะเปลี่ยนมาไหลผ่าน  $S_{31B}$  แทน

รูปแบบการทำงานของสวิตช์เมื่อเกิดสถานะลัดวงจร(Short Circuit : SC)

ในกรณีที่เกิดสถานะลัดวงจรที่ Main SW ตัวใดตัวหนึ่ง จากปกติที่ทำงานในแบบ 3 ระดับ รูปแบบการทำงานจะถูกเปลี่ยนให้เป็น 2 ระดับทันที เนื่องจากเมื่อมีการลัดวงจรจะทำให้สวิตช์ปกติทำงานแบบ 3 ระดับขาดหายไปซึ่งไม่สามารถทำงานในแบบ 3 ระดับต่อไปได้รูปแบบการทำงาน SC Diode SW จะไม่ทำงาน

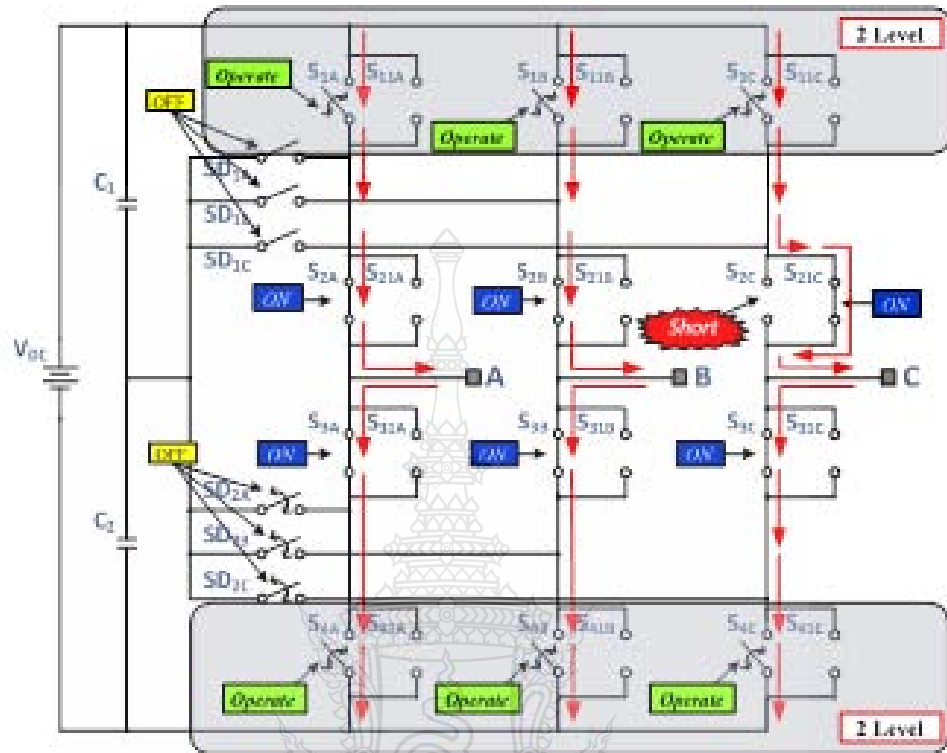
กรณีที่ 1 เกิด SC ในแถวที่ 1



รูปที่ 2.35 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{1B}$

จากรูปที่ 2.35 เมื่อเกิดลัดวงจรที่ Main SW  $S_{1B}$  สวิตช์อยู่ในระดับเดียวกันกับ  $S_{1B}$  จะถูกบังคับให้ปิดวงจร (Close Circuit : NO) ค้างตลอดในขณะที่เดียวกับ Back Up SW ของ  $S_{1B}$  นั่นคือ  $S_{11B}$  ก็จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ NO เช่นเดียวกัน พร้อมกันนี้สวิตช์แถวล่างสุด  $S_{4A}$ ,  $S_{4B}$  และ  $S_{4C}$  ก็จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ ON เหมือนกับแถวบน ดังนั้น Main SW ในแถวที่ 2 และ 3 จะถูกควบคุมให้ทำงานในแบบ 2 ระดับ

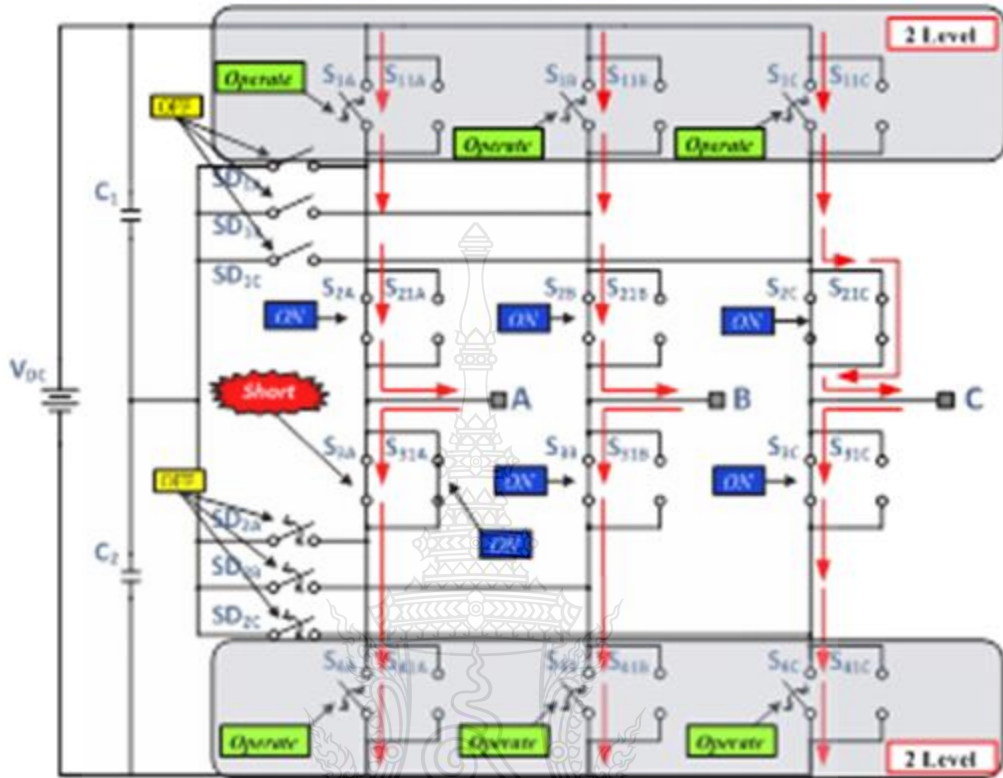
กรณีที่ 2 เกิด SC ในแถวที่ 2



รูปที่ 2.36 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{2C}$

กรณีที่ 2 เกิด SC ในแถวที่ 2 จากรูปที่ 2.36 เมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{2C}$  สวิตซ์ที่อยู่ในแถวเดียวกัน(แถวที่ 2) กับ  $S_{2C}$  จะถูกบังคับให้ทำงานค้างหรือ ปิดวงจร(Close Circuit : NO) นั่นคือ  $S_{2A}$ ,  $S_{2B}$  ในขณะเดียวกัน Back Up SW ของ  $S_{2C}$  นั่นคือ  $S_{21C}$  ก็จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ ON เช่นเดียวกัน พร้อมกับที่สวิตซ์แถวที่ 3  $S_{3A}$ ,  $S_{3B}$  และ  $S_{3C}$  จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ ON เช่นเดียวกับแถวที่ 2 ดังนั้น Main SW ในแถวที่ 1 และแถวที่ 4 จะถูกควบคุมให้ทำงานแบบ 2 ระดับ

กรณีที่ 3 เกิด SC ในแถวที่ 3

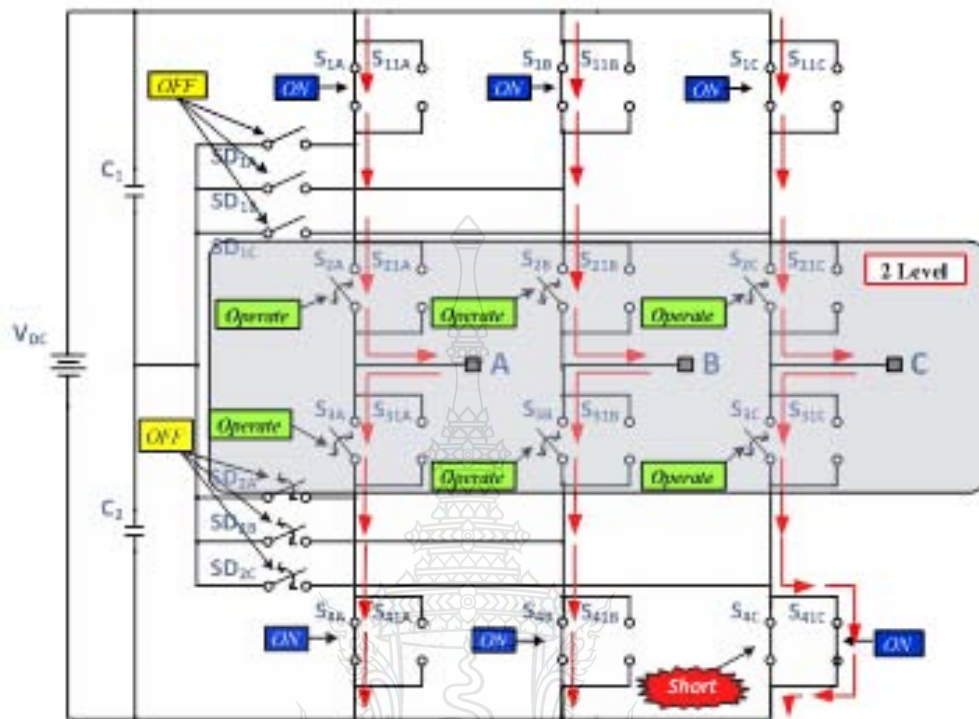


รูปที่ 2.37 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{3A}$

จากรูปที่ 2.37 เมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{3A}$  สวิตช์ที่อยู่ในแถวเดียวกันกับ  $S_{3A}$  นั้นคือ  $S_{3B}$  และ  $S_{3C}$  จะถูกบังคับให้ NO ค้างในขณะเดียวกัน Back Up SW ของ  $S_{3A}$  คือ  $S_{31A}$  ก็จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ NO ค้างเช่นเดียวกัน พร้อมกันนี้ สวิตช์ในแถวที่ 2 นั้นคือ  $S_{2A}, S_{2B}$  และ  $S_{2C}$  ก็จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ ON ค้างเช่นเดียวกันกับแถวที่ 3 ดังนั้น Main SW ในแถวที่ 1 และ 4 จะถูกควบคุมให้ทำงานแบบ 2 ระดับ โดย Diode SW  $SD_{1A}, SD_{1C}, SD_{2A}, SD_{2B}$  และ  $SD_{2C}$  จะถูกบังคับให้ OFF ไม่ทำงานในกรณีที่เกิด SC



กรณีที่ 4 เกิด SC ในแถวที่ 4



รูปที่ 2.38 การทำงานของระบบควบคุมเมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{4A}$

จากรูปที่ 2.38 เมื่อเกิดลัดวงจรที่สวิตช์  $S_{4C}$  สวิตช์ที่อยู่ในแนวเดียวกันกับ  $S_{4C}$  นั่นคือ  $S_{4A}$  และ  $S_{4B}$  จะถูกบังคับให้ ON ค้าง ในขณะเดียวกัน Back Up SW ของ  $S_{4C}$  นั่นคือ  $S_{41C}$  ก็จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ ON ค้างเช่นเดียวกัน พร้อมกันนี้ สวิตช์ในแถวที่ 1 นั่นคือ  $S_{1A}, S_{1B}$  และ  $S_{1C}$  จะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะ ON ค้างเช่นเดียวกับแถวที่ 4 ดังนั้น Main SW ในแถวที่ 2 และ 3 จะถูกควบคุมให้ทำงานแบบ 2 ระดับ โดยมี Diode SW  $SD_{1A}, SD_{1B}, SD_{1C}, SD_{2B}$  และ  $SD_{2C}$  จะถูกบังคับให้ OFF ไม่ทำงานในกรณีที่เกิด SC

จากรูปแบบการเกิด OC และ SC ของ Main SW ที่จุดต่างๆสามารถนำมาเขียนเป็น Truth Table ได้โดยการเกิด OC จะสามารถเขียนแยกเป็น Table ของแต่ละเฟสได้เนื่องจากมีรูปแบบการทำงานที่เหมือนกันและแยกอิสระกันได้ ส่วนการเกิด SC นั้นจะรวมทุกเฟสอยู่ในตารางเดียว เนื่องจากเมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งเกิด SC จะมีผลไปถึง การทำงานของเฟสที่เหลือด้วย Truth Table รูปแบบการทำงานเมื่อเกิด OC

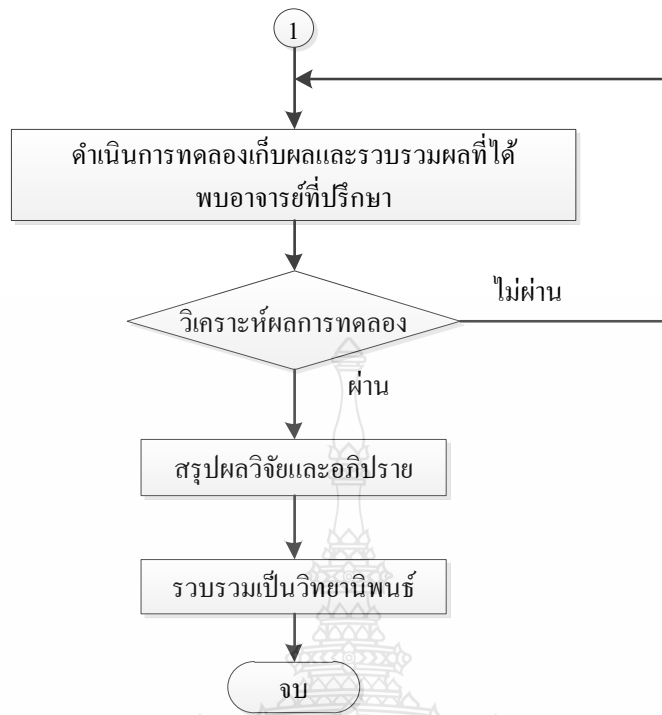
# บทที่ 3

## ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานการวิจัย ซึ่งแสดงรูปแบบของระบบทั้งหมดในงานวิจัย รวมถึง ขั้นตอนการออกแบบและสร้างชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยได้นำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบขั้นตอนในการออกแบบสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังนี้





รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย

### 3.2 การจำลองการทำงาน

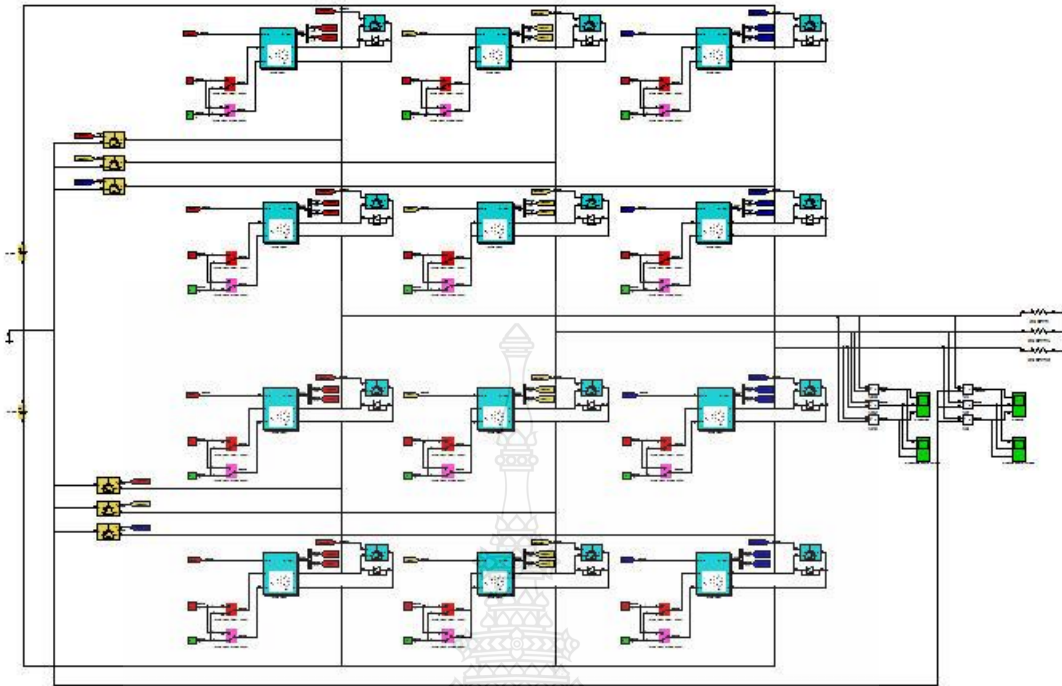
หลังจากที่ได้ทำการศึกษาข้อมูลหลักการควบคุมแบบสภาวะคงทนเรียบร้อยแล้วลำดับต่อไปคือการนำหลักการดังกล่าวมาสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบเพื่อเป็นการทดสอบถึงลักษณะการทำงานของวงจรเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ศึกษามา ก่อนที่จะมีการสร้างชิ้นงานจริง

ในการสร้างแบบจำลองการทำงานในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการสร้างและจำลองการทำงาน โดยจะทำการแบ่งออกเป็นส่วนๆดังนี้

#### 3.2.1 แบบจำลองวงจรกำลัง

วงจรกำลังเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่สวิตซ์สัญญาณในภาคกำลังทำให้เกิดรูปแบบของ PWM ที่ใช้ในการขับโหลด วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับชนิดไดโอดแค้มป์โดยทั่วไปจะใช้ IGBT จำนวน 4 ตัวต่อหนึ่งเฟส เมื่อรวมทั้งสามเฟสก็จะใช้ทั้งหมด 12 ตัว และใช้ไดโอดทั้งหมด 6 ตัว

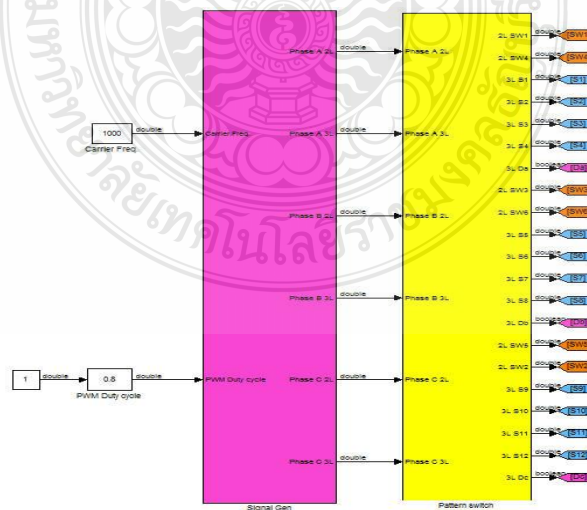
วงจรกำลังที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะมี IGBT ของส่วนที่ทำงาน Back up การทำงานของ IGBT ตัวหลักเพิ่มขึ้นมา และมีส่วนที่เป็น IGBT ที่ทำหน้าที่แทนไดโอด ดังนั้นในหนึ่งเฟสจะมี IGBT อยู่ 10 ตัว เมื่อรวมทั้งสามเฟสก็จะใช้ทั้งหมด 30 ตัว ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองวงจรกำลังที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.2 แบบจำลองวงจรสร้างสัญญาณ PWM

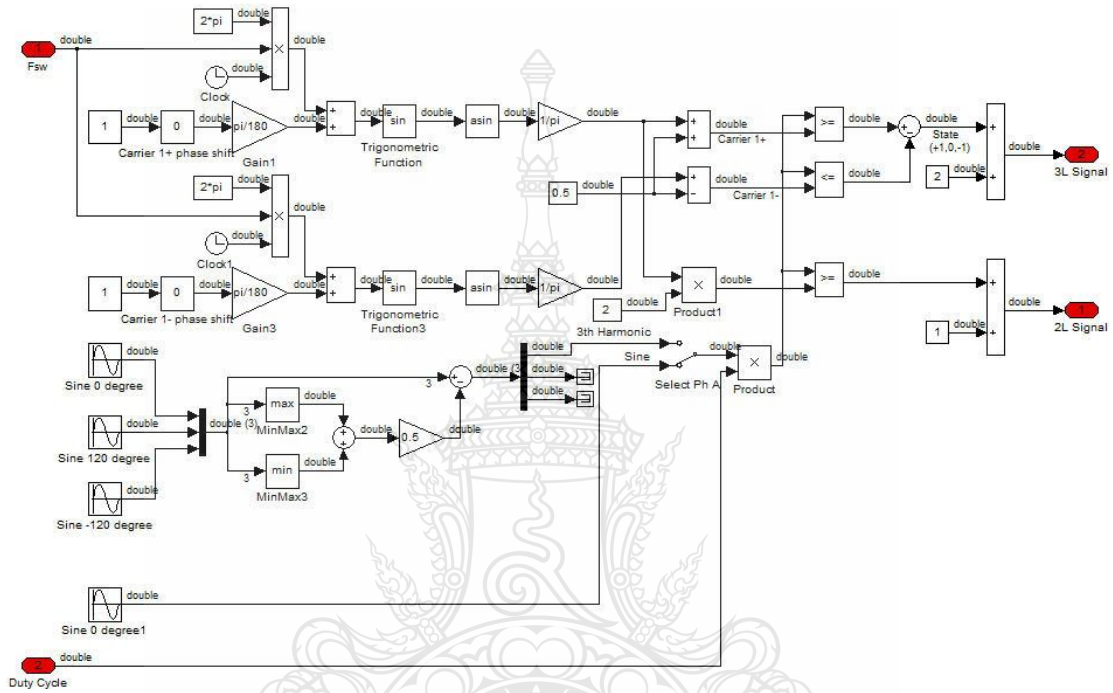
ชุดสร้างสัญญาณ PWM สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนกำเนิดสัญญาณ จะทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณความถี่พาห้ (Carrier) ที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยม



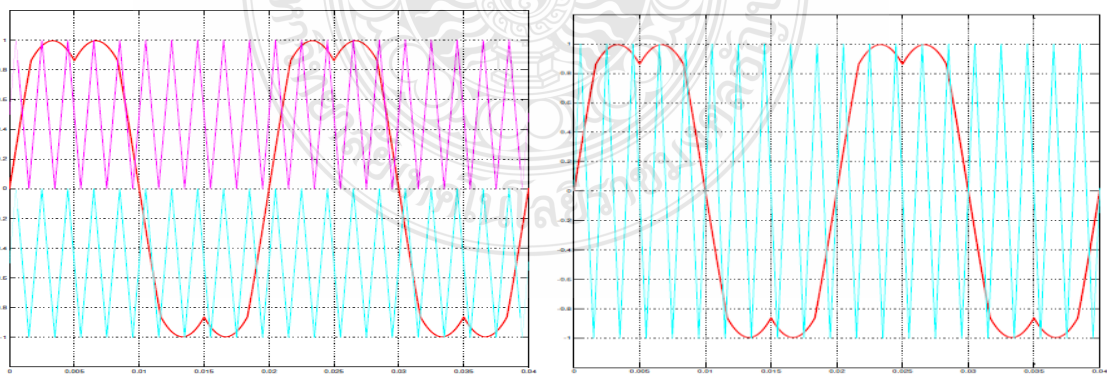
รูปที่ 3.3 แบบจำลองวงจรสร้างสัญญาณ PWM

โดยในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่พาห้ที่ 1kHz ซึ่งรูปแบบสร้างจากส่วนกำเนิดสัญญาณจะทั้งแบบสองระดับและสามระดับเพื่อส่งต่อให้ส่วนสร้างรูปแบบการสวิตซ์ทำงานต่อไป

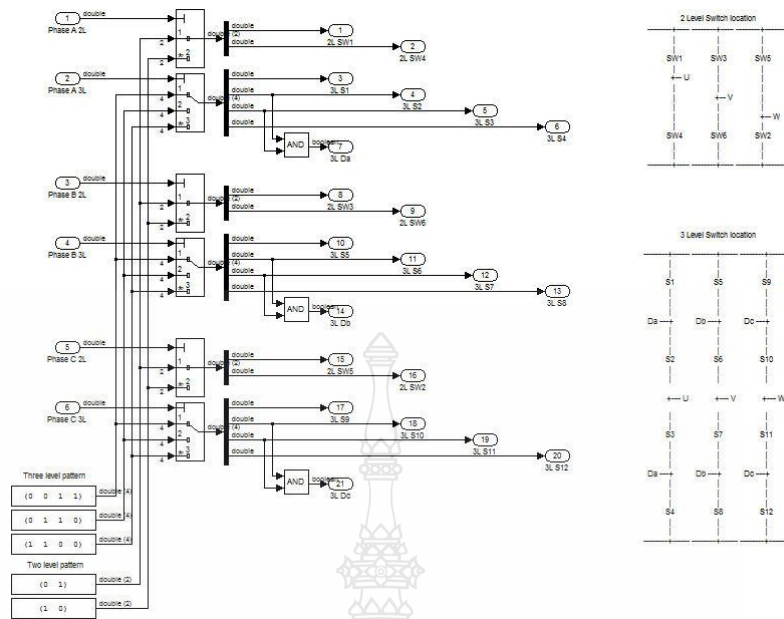
ในส่วนสร้างรูปแบบการสวิตซ์จะทำหน้าที่สร้างรูปแบบ (Pattern) การทำงานของทั้งสามระดับและสองระดับโดยใช้สัญญาณที่ได้จากส่วนกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 3.4 แบบจำลองส่วนกำเนิดสัญญาณ(เฟส A)



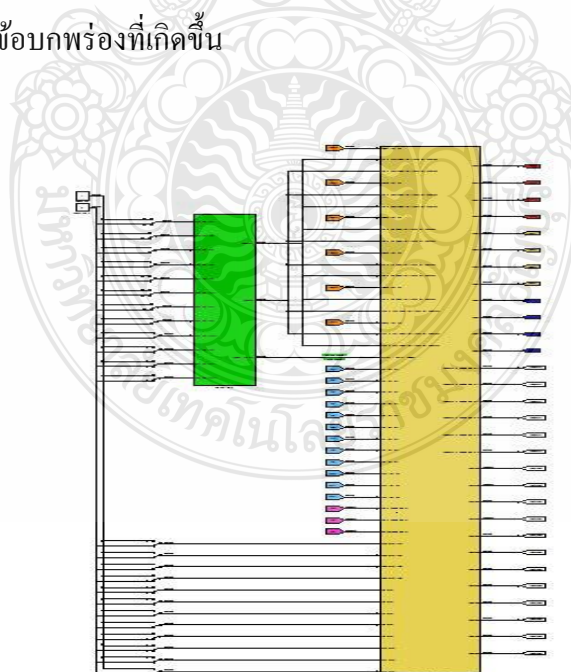
รูปที่ 3.5 สัญญาณที่สร้างจากส่วนกำเนิดสัญญาณ



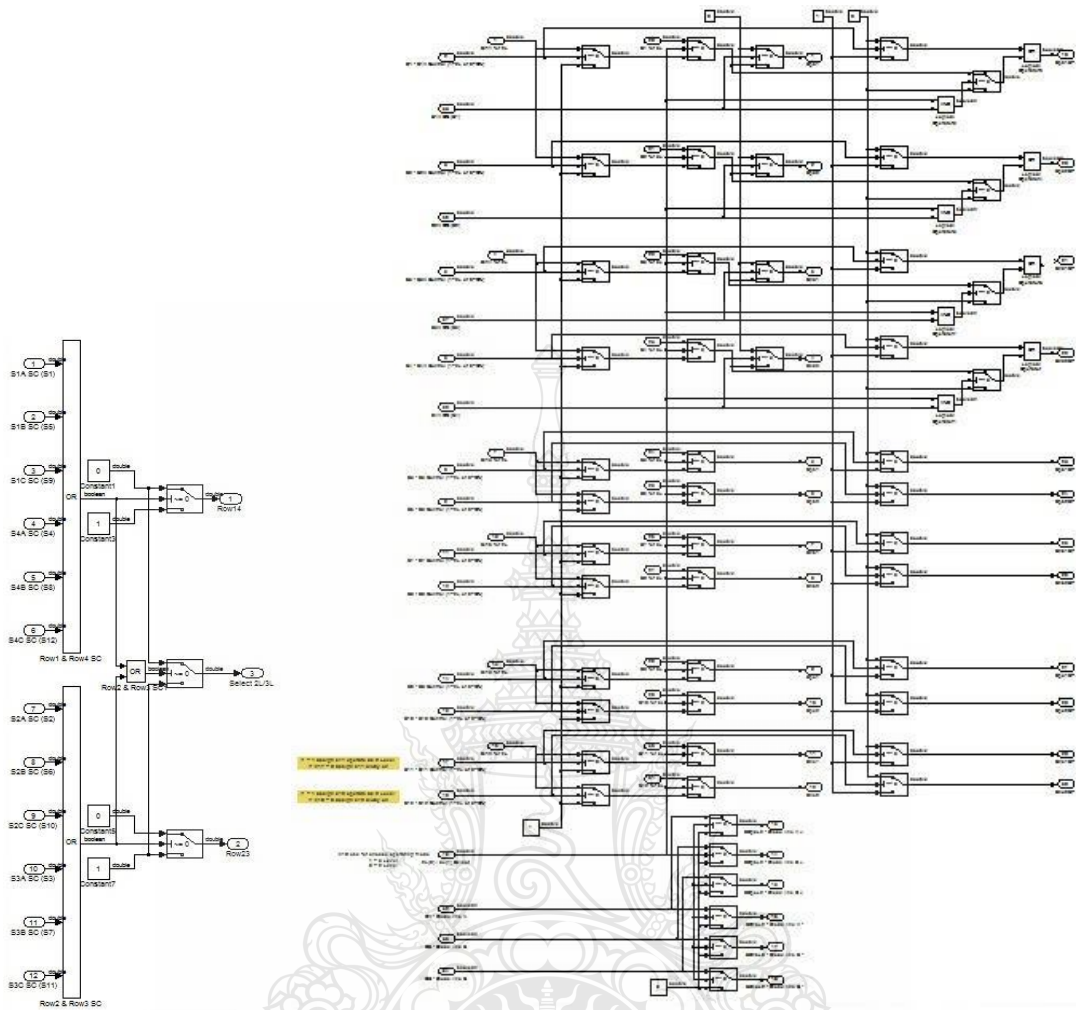
รูปที่ 3.6 แบบจำลองส่วนสร้างรูปแบบการสวิตช์

### 3.2.3 แบบจำลองวงจรควบคุมและเลือกรูปแบบการทำงาน

ทำหน้าที่สลับการทำงานไปมาระหว่างการทำงานแบบสามระดับและสองระดับ โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.7 แบบจำลองส่วนควบคุมและเลือกรูปแบบการทำงาน



รูปที่ 3.8 โมเดลส่วนควบคุมและเลือกรูปแบบการทำงาน

3.2.4 แบบจำลองชุดตรวจสอบและกรองสัญญาณ

ในส่วนนี้จะเป็นวงจรเซ็นเซอร์วัดสัญญาณกระแสที่ผ่านตัว IGBT และวงจรเซ็นเซอร์วัดสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัว IGBT สัญญาณกระแสและแรงดันที่วัดได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณกระแสสลับความถี่สูง โดยจะมีทั้งซีบววกและซีกลบดังนั้นจึงจะต้องผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter) เพื่อให้ได้สัญญาณในลักษณะของกระแสตรงส่งต่อให้ส่วนควบคุมและวิเคราะห์ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการประมวลผลวิเคราะห์ชนิดของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้ค่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์

### 3.2.5 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการควบคุมการทำงานแบบสภาวะคงทน

การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในการควบคุมการทำงานแบบสภาวะคงทน งานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการทำงานแบบของการจัดรูปแบบหรือการแบ่งกลุ่ม (Pattern Classification) กล่าวคือโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการแบ่งกลุ่มและแยกชนิดของ fault ที่เกิดขึ้น

โดยจะใช้รูปแบบการสอนแบบ supervised training ในลักษณะหลายชั้นเรียกว่า Multilayer Perception (MLP) โดยข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนเป็นการป้อนมาข้างหน้าเรียกว่า Feed forward โดยอาศัยการปรับค่า weight แบบแพร่ค่าย้อนกลับ เรียกว่า Back propagation ขึ้นตอนโดยคร่าวๆ ในการออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม จะแบ่งได้คือ

- การจัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการฝึกสอน
- สร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมและกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ โดยใช้คำสั่ง “newff”
- ฝึกสอนชุดโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นด้วยคำสั่ง “train” โดยใช้ชุดข้อมูลที่จัดเตรียมมา
- ทดสอบเปรียบเทียบ ผลการคำนวณที่ได้จากเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมด้วยค่าที่ใช้ฝึกสอนและข้อมูลที่ถูกต้อง โดยใช้คำสั่ง “Sim”

#### 1. การเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการฝึกสอน

รูปแบบของอินพุตเพื่อใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเรียกว่า Pattern (P) โดย Pattern จะมีลักษณะการจัดรูปข้อมูลในแบบ Matrix ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจสอบการเกิด Fault ทั้งหมด 2 ลักษณะ คือการลัดวงจร (Short-circuit: SC) และการเปิดวงจร (Open-circuit: OC) ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ชนิดไดโอดแคดมัม โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดกระแส (Current Monitor: CM) และอุปกรณ์วัดแรงดัน (Voltage Monitor: VM) ที่ตัว IGBT ที่เป็นตัวทำงานหลัก เมื่อมี Fault เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็น SC หรือ OC โครงข่ายประสาทเทียมจะตรวจสอบชนิดของ fault แล้วสั่งงานใช้ปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานจากอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับเป็นอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเมื่อเกิด SC หรือสั่งงานใช้ตัว IGBT สำรอง (Back up IGBT) ทำงานแทนตัวหลักในกรณีที่เกิด OC



ดังนั้นจากหลักการที่กล่าวมาในข้างต้นจะได้ pattern อยู่ 2 ลักษณะคือ SC และ OC ที่ IGBT แต่ละตัวซึ่งในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะมี IGBT ที่เป็นตัว สวิตช์หลักอยู่ 4 ตัว ดังนั้นรูปแบบ Matrix ของ pattern ต่อหนึ่งเฟสจะได้คือ

- ในแนวตั้งจะเป็นชื่อของ Pattern นั้นๆ เช่น SC-IGBT 1, SC-IGBT 2 เป็นต้น
- ในแนวนอนจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของ Pattern นั้นๆ เช่น แรงดันที่ตกคร่อม IGBT หรือ กระแสที่ไหลผ่านตัว IGBT

ในงานวิจัยที่จะใช้คุณสมบัติเฉพาะของการเกิด Fault เพื่อเป็นเงื่อนไขการตรวจสอบคือ

1. แรงดันตกคร่อม IGBT มีค่าเป็น 0 ( $VM=0$ ) และกระแสไหลผ่าน IGBT มีค่าไม่เป็น 0 ( $CM \neq 0$ ) จะหมายถึงเกิด SC ขึ้น
2. แรงดันตกคร่อม IGBT มีค่าไม่เป็น 0 ( $VM \neq 0$ ) และกระแสไหลผ่าน IGBT มีค่าเป็น 0 ( $CM=0$ ) จะหมายถึงเกิด OC ขึ้น
3. แรงดันตกคร่อม IGBT มีค่าไม่เป็น 0 ( $VM \neq 0$ ) และกระแสไหลผ่าน IGBT มีค่าเป็น 0 ( $CM=0$ ) จะหมายถึงอินเวอร์เตอร์ ทำงานปกติ
4. แรงดันตกคร่อม IGBT มีค่าเป็น 0 ( $VM=0$ ) และกระแสไหลผ่าน IGBT มีค่าเป็น 0 ( $CM=0$ ) จะหมายถึงอินเวอร์เตอร์ หยุดทำงาน

เมื่อได้ Pattern เงื่อนไขการตรวจสอบของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วต่อมาคือการนำมา เขียนในรูปแบบตารางของ Input/Output เพื่อให้ง่ายในการจัดข้อมูลเพื่อสร้างโมดูลโครงข่าย ประสาทเทียมแต่เนื่องจากอินพุตจาก VM และ CM ของ IGBT ทั้ง 4 ตัว (IGBT 1 ตัวจะมี VM และ CM อย่างละ 1 ตัว) จึงมีอินพุตทั้งหมด 8 ตัว ทำให้สถานการณ์ทำงานของตารางส่วนอินพุตมีทั้งหมด 256 สถานะ ( $2^8=256$ )ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะสถานการณ์เกิด SC และ OC ที่ IGBT เท่านั้น ด้วยเหตุที่ซึ่งได้เลือกใช้งานเฉพาะอินพุตที่ถูกต้องตามเงื่อนไขเท่านั้น ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 รูปแบบอินพุตที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

Properties	Pattern															
	SC-IGBT				OC-IGBT				Normal				Stop			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
VM 1 = 0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
VM 2 = 0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
VM 3 = 0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
VM 4 = 0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CM 1 = 0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
CM 2 = 0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CM 3 = 0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CM 4 = 0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
VM 1 ≠ 0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
VM 2 ≠ 0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
VM 3 ≠ 0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
VM 4 ≠ 0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
CM 1 ≠ 0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CM 2 ≠ 0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
CM 3 ≠ 0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
CM 4 ≠ 0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

ข้อสังเกต จากตารางจะได้ว่า 16 Input × 16 Pattern เรียกว่า Pattern 16×16

- กรณีเมื่อเกิด SC

ในสถานะ SC ที่ IGBT ตัวใดตัวหนึ่ง แรงดันตกคร่อม IGBT ตัวนั้น ( $VM_x$ )จะมีค่าเป็น 0 ในขณะที่เดียวกันกับมีกระแสไหลผ่านที่ตัว IGBT เช่นเดิม ( $CM_x$ )ดังนั้นอินพุตของสถานะที่จะได้เช่น

$$VM_x=0 \text{ และ } CM_x=1$$

เมื่อ X หมายถึง IGBT ตัวที่ 1,2,3 หรือ 4

- กรณีเมื่อเกิด OC

ในสถานะ OC ที่ IGBT ตัวใดตัวหนึ่ง กระแสที่ไหลผ่าน IGBT ตัวนั้น ( $CM_x$ )จะมีค่าเป็น 0 ในขณะที่เดียวกันกับมีแรงดันตกคร่อมที่ตัว IGBT ก็ยังคงมีค่าอยู่เช่นเดิม ( $VM_x$ )ดังนั้นอินพุตของสถานะที่จะได้เช่น

$$VM_x=1 \text{ และ } CM_x=0$$

เมื่อ X หมายถึง IGBT ตัวที่ 1,2,3 หรือ 4

ตารางที่ 3.2 รูปแบบอินพุตและเอาต์พุตของข้อมูล

INPUT								OUTPUT							
VM	VM	VM	VM	CM	CM	CM	CM	SC	SC	SC	SC	OC	OC	OC	OC
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

## 2. การสร้างโมดูลโครงข่ายประสาทเทียมและกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ

หลังจากที่ได้จัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการฝึกสอนแล้วขั้นตอนต่อมาคือ การสร้างโมดูลโครงข่ายประสาทเทียมโดยคำสั่งและขั้นตอนต่างๆ ใช้งานวิจัยที่จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink คำสั่งที่ใช้สร้างโครงข่ายประสาทเทียม โมดูลคือ

```
net = newff(P,t,HL,{TF},'TM')
```

เมื่อ	net	หมายถึงชื่อโมดูลของโครงข่ายประสาทเทียมที่ตั้งขึ้น
	Newff()	หมายถึงคำสั่งในการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบ feedforward
	P	หมายถึง Pattern(Input)
	t	หมายถึง Target(Output)
	HL	หมายถึง จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer)
	TF	หมายถึง Transfer function ที่ใช้งานใน Hidden layer และ Output layer เช่น Hard limit, Sigmoid, Tansigmoid, Logsigmoid หรือ pureliner
	TM	หมายถึง Trining methed หรือวิธีการที่ใช้ในการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียม เช่น Trainingd, Traingda หรือ Trainlm

ในส่วนของการกำหนดค่าเริ่มต้นเพื่อใช้สร้าง โมดูล โครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

- กำหนดให้แสดงรอบการฝึกสอนโดยใช้คำสั่ง

```
net.trainParam.show =xx;
```

เมื่อ xx หมายถึงจำนวนรอบการฝึกสอนที่ต้องการใช้แสดง

- กำหนดรอบการคำนวณหรือการฝึกสอนโดยใช้คำสั่ง

```
net.trainParam.epochs =yy;
```

เมื่อ yy หมายถึงจำนวนรอบการฝึกสอน

- กำหนดขอบเขตค่าผิดพลาดในการคำนวณที่ยอมรับได้ด้วยใช้คำสั่ง

```
net.trainParam.goal =zz;
```

เมื่อ zz หมายถึงค่าผิดพลาดในการทำงานที่ยอมรับได้ เช่น  $1e^{-10}$  เป็นต้น

### 3. การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะใช้ชุดข้อมูล Pattern ที่ได้จัดเตรียมไว้แล้วมาทำการฝึกสอนโดยใช้คำสั่ง

```
net = train(net,P,t);
```

เมื่อ net หมายถึง ชื่อของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้สร้างขึ้น  
train() หมายถึง คำสั่งที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ANN  
P หมายถึง Pattern(Input)  
t หมายถึง Target(output)

หลังจากที่ได้ทำการฝึกสอนเสร็จแล้วสามารถตรวจสอบค่า weight และ bias ที่ได้จากการฝึกสอนโดยใช้คำสั่ง

```
w = net.iw{1,1},b=net.b{1}
```

### 4. การทดสอบและเปรียบเทียบผลการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อได้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างนั้นด้วยชุด Pattern ที่เตรียมมาไว้แล้วนั้นขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบและเปรียบเทียบเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมกับค่า Pattern และค่าจริงโดยใช้คำสั่ง

```
a = sim(net,P)
```

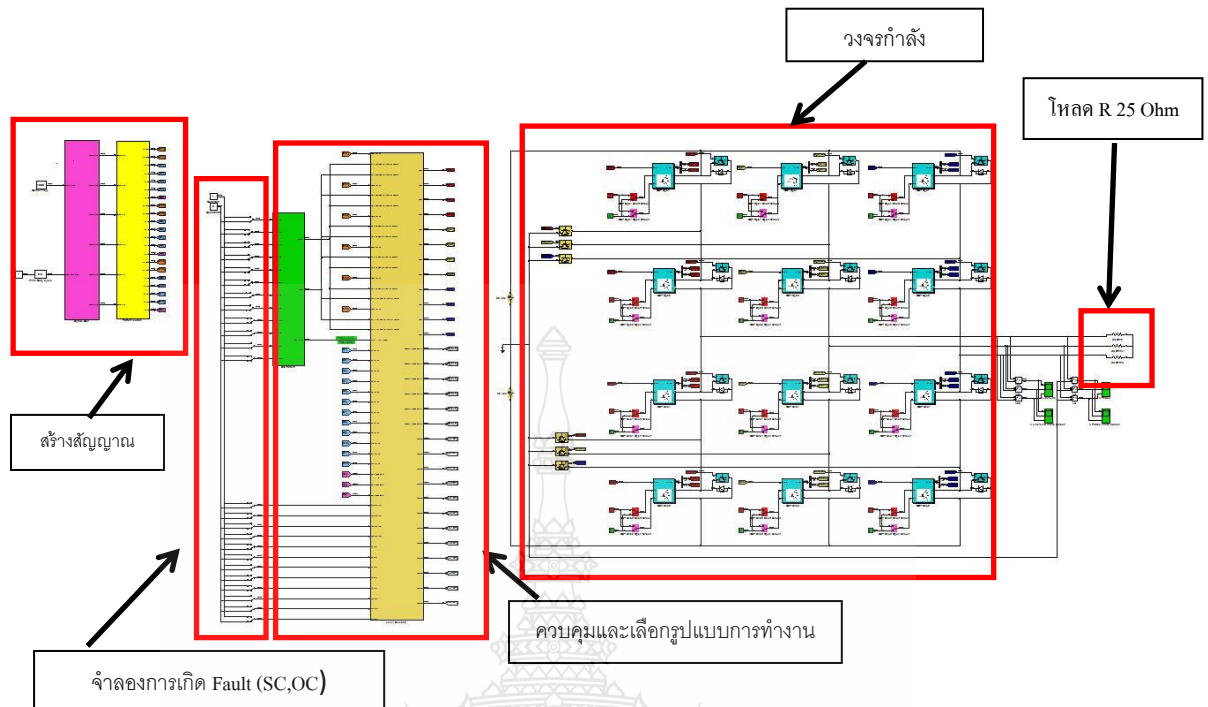
เมื่อ a หมายถึง ผลของการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้สร้างขึ้น  
net หมายถึง ชื่อโครงข่ายประสาทเทียมที่ต้องจะทดสอบ  
P หมายถึง Pattern หรือข้อมูลจริงที่ใช้ในการทดสอบ

หลังจากการทดสอบแล้วสามารถหาค่าความผิดพลาด (error) ของค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกับค่าจริงได้จากคำสั่ง

```
error = a-t
```

และสามารถ simulink model ได้จากคำสั่ง

```
gensim(net)
```



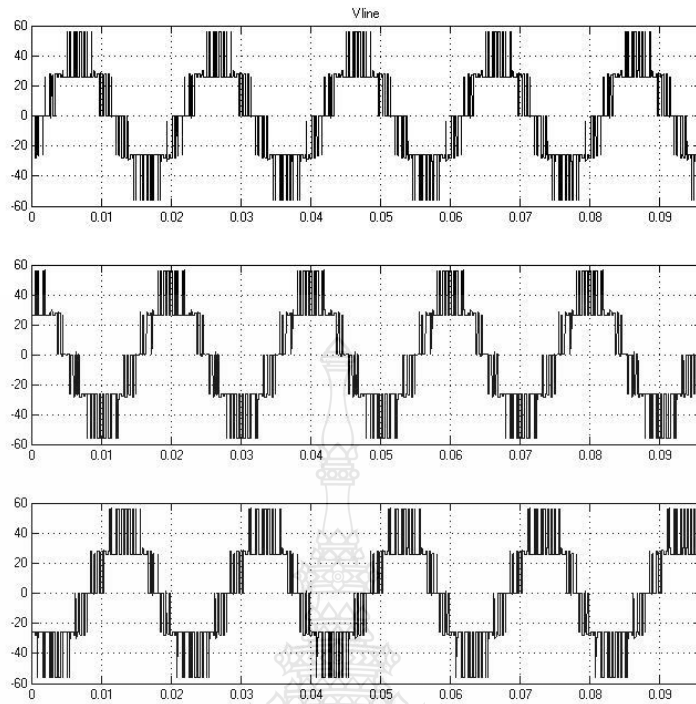
รูปที่ 3.9 แบบจำลองการทำงานของการควบคุมการทำงานแบบสภาวะคงทน

### 3.3 ผลการจำลองการทำงาน

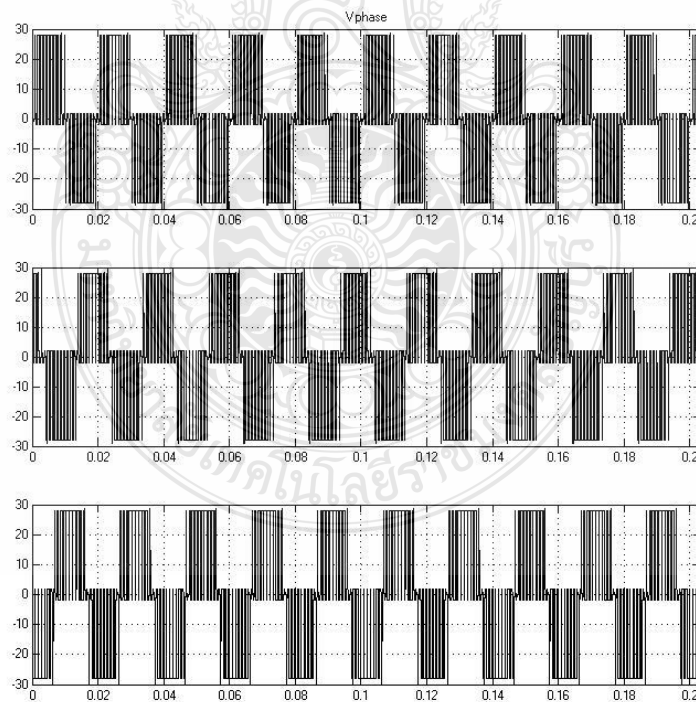
การจำลองการทำงานจะจำลองการเกิดข้อบกพร่องทั้ง การเกิดลัดวงจร (SC) และการเกิดเปิดวงจร (OC) บันทึกผลที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่ได้ค้นคว้ามาก่อนหน้านี้ก่อนที่จะทำการสร้างชิ้นงานจริงต่อไป

โดยในการจำลองการทำงานจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างดังนี้

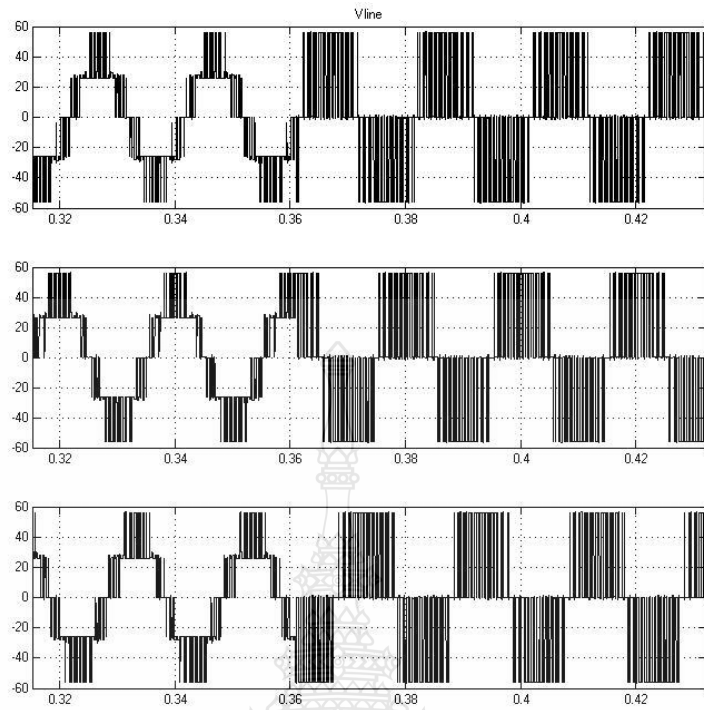
ความถี่พาห้	1 kHz
ค่าอินเด็คมอดูเลชัน	0.9
ความถี่หลักมูล	50 Hz
ระดับแรงดันขาเข้า	60 VDC (-30, 0, +30)
โหลดตัวต้านทาน	25 $\Omega$ , 250 W



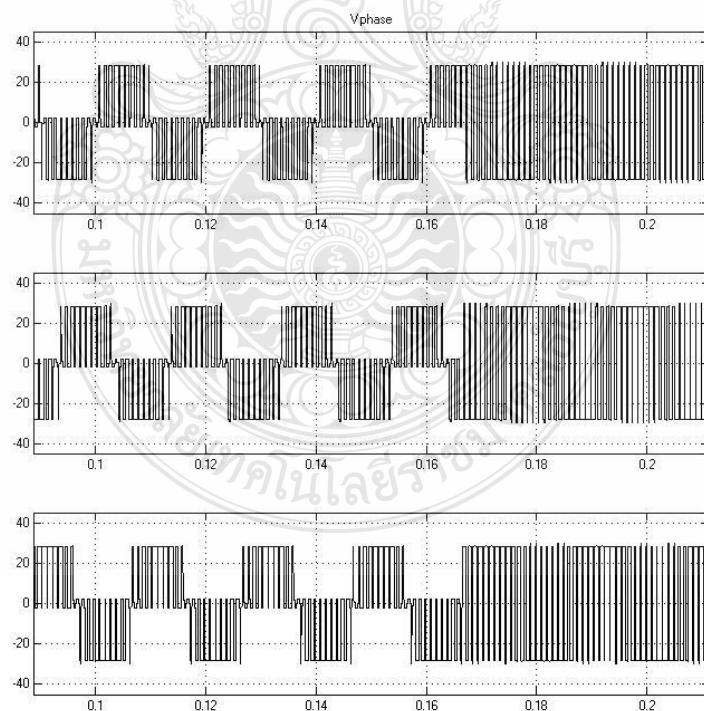
รูปที่ 3.10 แรงดันเอาต์พุต Vline ขณะทำงานแบบสามระดับ



รูปที่ 3.11 แรงดันเอาต์พุต Vphase ขณะทำงานแบบสามระดับ

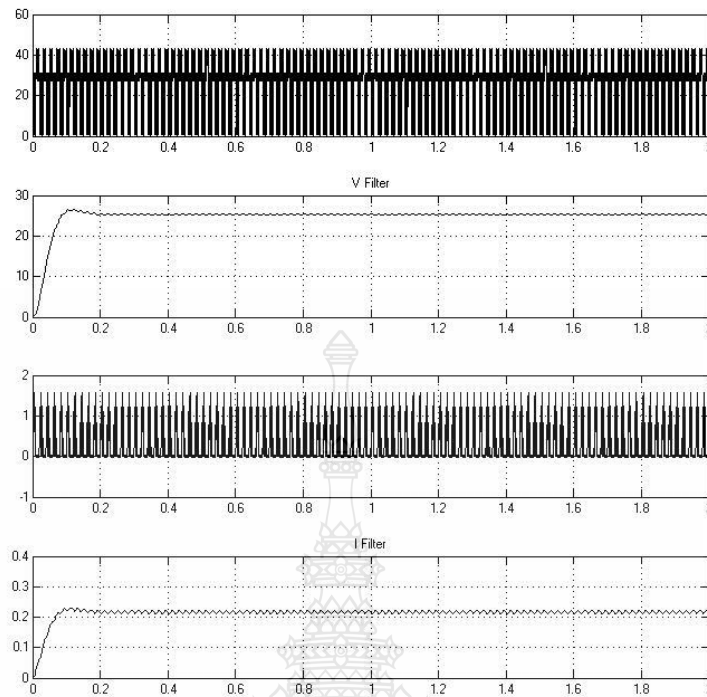


รูปที่ 3.12 การจำลองการทำงานช่วงที่สลับจากสามระดับ ไปเป็นสองระดับเมื่อวัดเอาต์พุต Vline



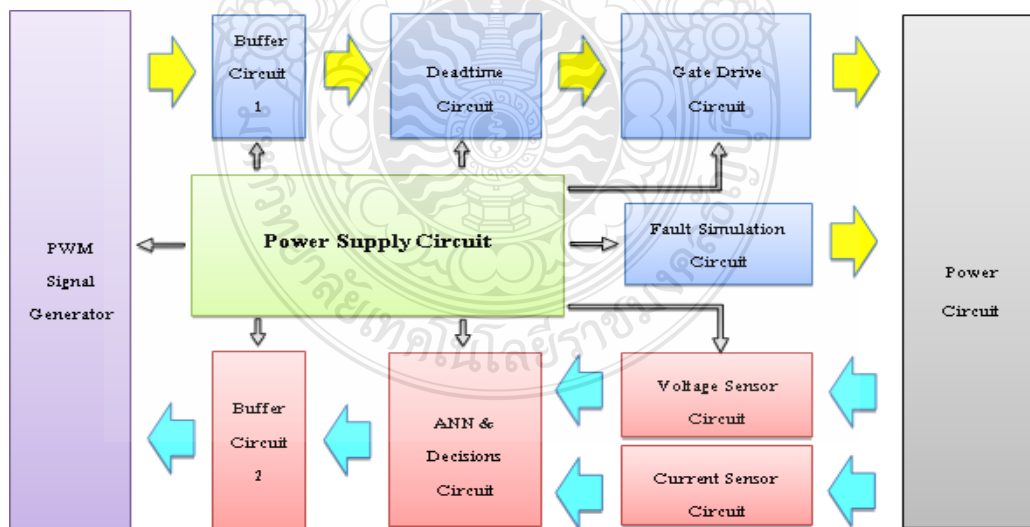
รูปที่ 3.13 การจำลองการทำงานช่วงที่สลับจากสามระดับ ไปเป็นสองระดับเมื่อวัดเอาต์พุต Vphase





รูปที่ 3.14 ลักษณะของสัญญาณเซ็นเซอร์กระแส และแรงดันทั้งก่อนและหลังวงจรกรอง

### 3.4 การออกแบบวงจร

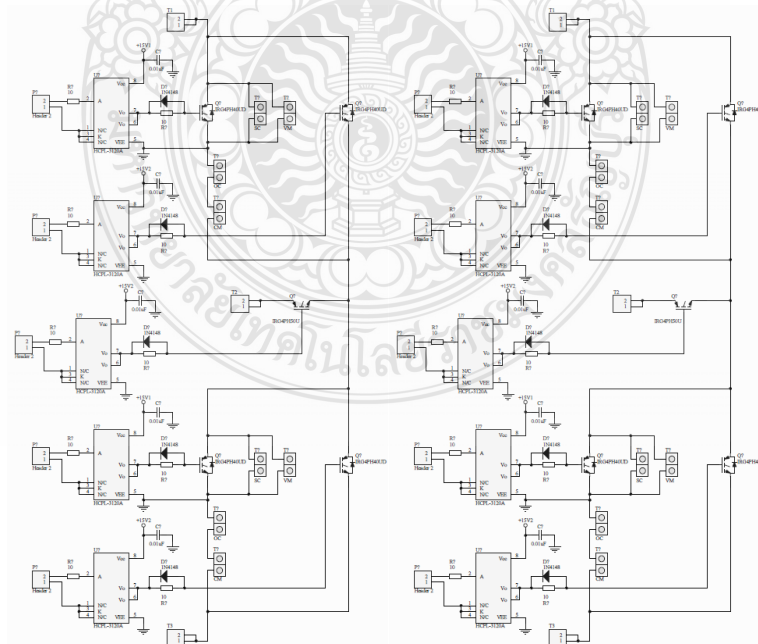


รูปที่ 3.15 แผนภาพวงจร

จากรูปที่ 3.15 ได้แสดงแผนภาพของวงจรการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทน โดยที่การทำงานจะเริ่มจากส่วนที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM Signal Generator) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบสามระดับและสองระดับ จากนั้นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มจะส่งผ่านไปยังวงจรบัฟเฟอร์ 1 (Buffer1) เพื่อทำการขยายสัญญาณ ก่อนจะส่งไปที่วงจรหน่วงสัญญาณ (Deadtime) ซึ่งจำหน่วงเวลาการทำงานของสัญญาณ PWM เพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจร จากนั้นสัญญาณ PWM ก็จะส่งไปที่วงจรขับเกต (Gate Drive) ซึ่งจะทำการส่งสัญญาณต่อไปที่ชุดวงจรกำลัง (Power Circuit) โดยที่ชุดวงจรกำลังนี้จะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแสเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์กำลังแต่ละตัว โดยที่ค่าของกระแสและแรงดันจะถูกส่งเข้าไปที่ชุดประมวลผลและตัดสินใจ (ANN & Decisions) เพื่อประมวลผลสัญญาณแล้วส่งสัญญาณแจ้งไปที่ชุดสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มโดยผ่านวงจรบัฟเฟอร์ 2 (Buffer2)

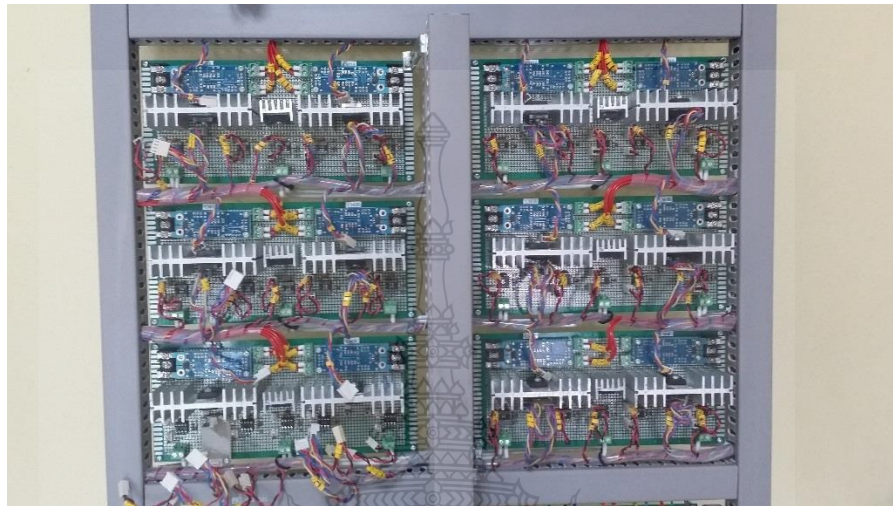
อย่างไรก็ตาม วงจรหลักที่กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ได้ ต้องอาศัยสัญญาณควบคุมการทำงานอย่างถูกต้องทั้งขนาดและจังหวะเวลาในการควบคุมอีกด้วย ซึ่งในส่วน of วงจรควบคุมจะประกอบด้วยหลายวงจรย่อยที่สำคัญ ดังนั้นวงจรการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทนนี้จะมีดังนี้

### 3.4.1 วงจรกำลังและวงจรขับเกต (Power circuit and Gate drive)



รูปที่ 3.16 วงจรกำลังและวงจรขับเกต (ต่อ 1 เฟส)

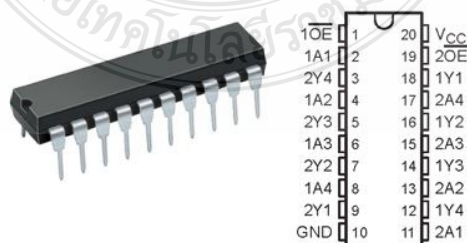
สวิตช์กำลังที่ใช้ เป็น N Channel IGBT เบอร์ IRG4PH40UD ของบริษัท International Rectifier มีพิกัดแรงดันสูงสุด 1200V. ทนกระแสสูงสุดได้ 21A. วงจรขับเคลื่อนใช้ IC เบอร์ HCPL-3120 ซึ่งมีภาคขาออกแบบ Push-Pull จ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 2.5A.



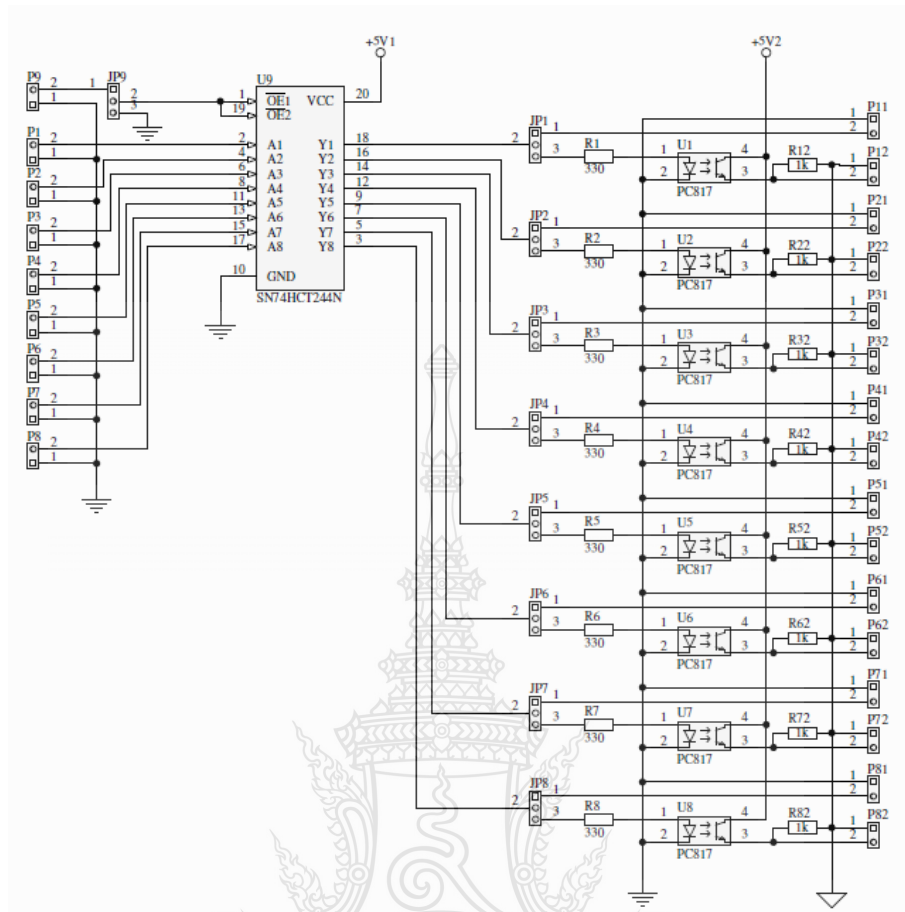
รูปที่ 3.17 ส่วนของวงจรกำลังและวงจรขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นทั้งสามเฟส

#### 3.4.2 วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer circuit)

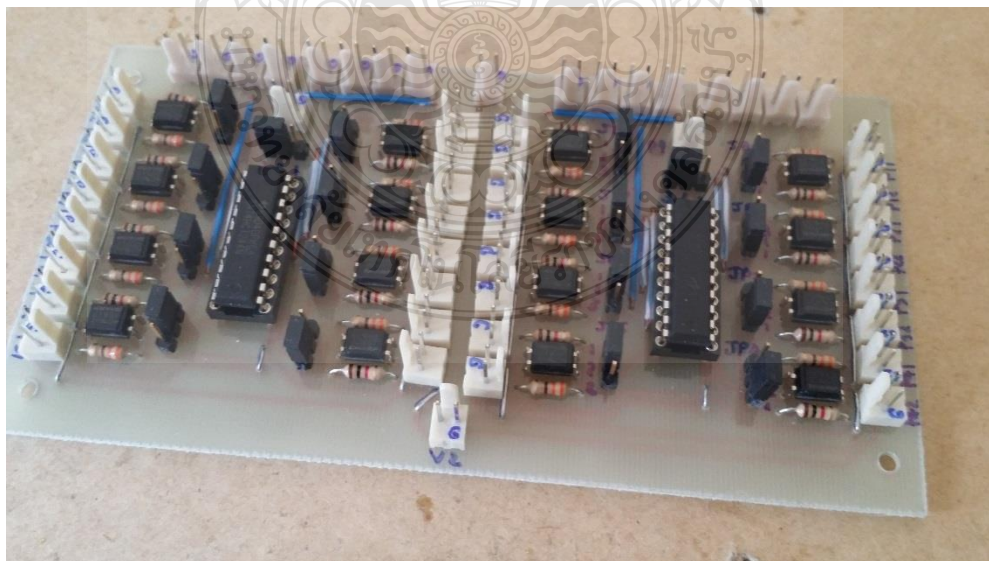
เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากบอร์ดควบคุม มีระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ 3.3V และกระแสที่จ่ายซึ่งไม่เพียงพอที่จะส่งงานการทำงานของไอซีชุดขับไอจีบีที (IGBT) Opto Isolate TLP250 ทั้ง 24 ชุด ซึ่งต้องการแรงดันไฟฟ้าส่งงานที่ 5V ดังนั้น จึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ SN74HTC244ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 3.18 เพื่อแยกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าส่งงานให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าของส่งงานชุดขับไอจีบีที (IGBT) อยู่ระดับแรงดันไฟฟ้า 5V และกระแสที่เพียงพอ



รูปที่ 3.18 ไอซีเบอร์ SN74HTC244



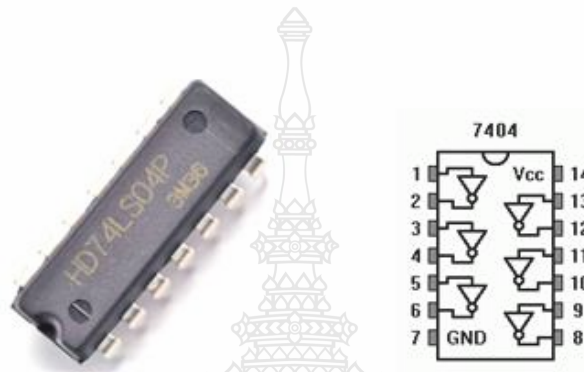
รูปที่ 3.19 วงจรบัพเฟอร์



รูปที่ 3.20 วงจรบัพเฟอร์ที่สร้างขึ้น (1 เฟส)

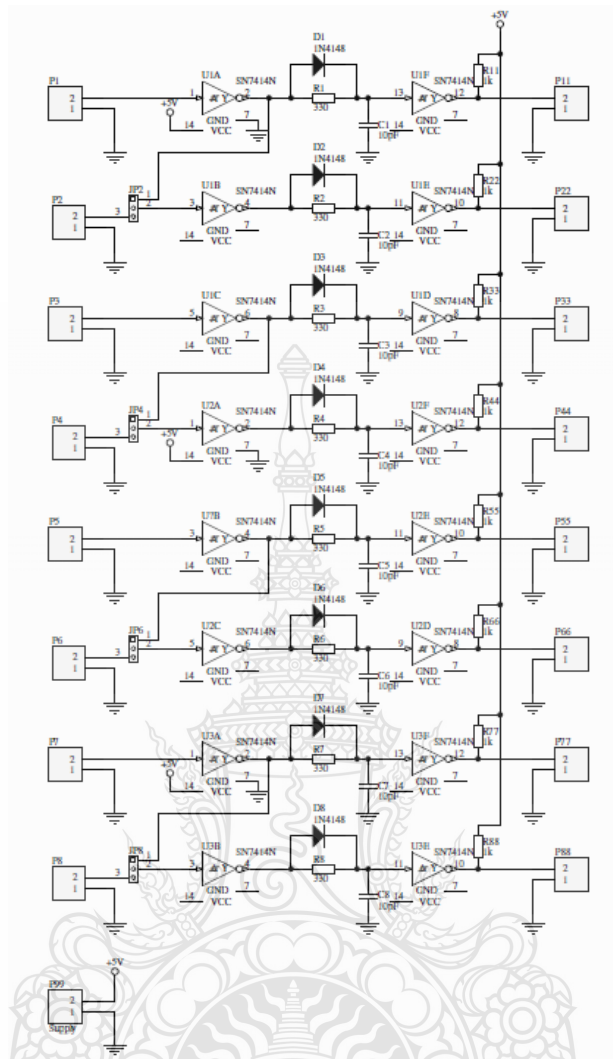
### 3.4.3 วงจรหน่วงสัญญาณ (Deadtime circuit)

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากบอร์ดควบคุมต้องทำการกลับรูปคลื่นสัญญาณเพราะในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบไดโอดเคลมป์ชนิด 3 ระดับ ต้องการสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ สวิตช์ IGBT ที่อยู่ในเฟสเดียวกัน จะมีสัญญาณที่มีเฟสตรงข้ามกันอยู่ 2 สัญญาณ รวม 3 เฟส ต้องกลับสัญญาณทั้งหมด 6 สัญญาณ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ 74LS04P ในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในการกลับสัญญาณดังรูปที่ 3.21

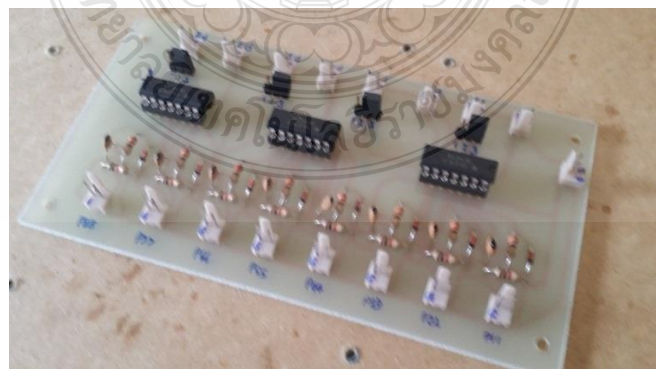


รูปที่ 3.21 ไอซีเบอร์ 74LS04P

ในการทำการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ IGBT เมื่อมีการกลับเฟสอุปกรณ์ IGBT จะไม่สามารถเปลี่ยนสถานะการทำงานได้รวดเร็วเท่ากับสัญญาณที่ออกจากบอร์ดควบคุม จึงต้องทำการหน่วงเวลาสัญญาณที่ทำการกลับ ให้มีค่ามากกว่าค่า  $t_d$  ของอุปกรณ์สวิตช์ IGBT เพื่อป้องกันการลัดวงจร ของรูปคลื่นสัญญาณ ในงานวิจัยนี้ใช้ IGBT เบอร์ IRG4PH40UD ซึ่งมีค่า  $t_d = 240$  ns ดังนั้นจึงทำการออกแบบวงจร Dead Time ที่หน่วงสัญญาณที่  $2.7 \mu s$  ซึ่งเพียงพอกับการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ IGBT ดังรูปที่ 3.22

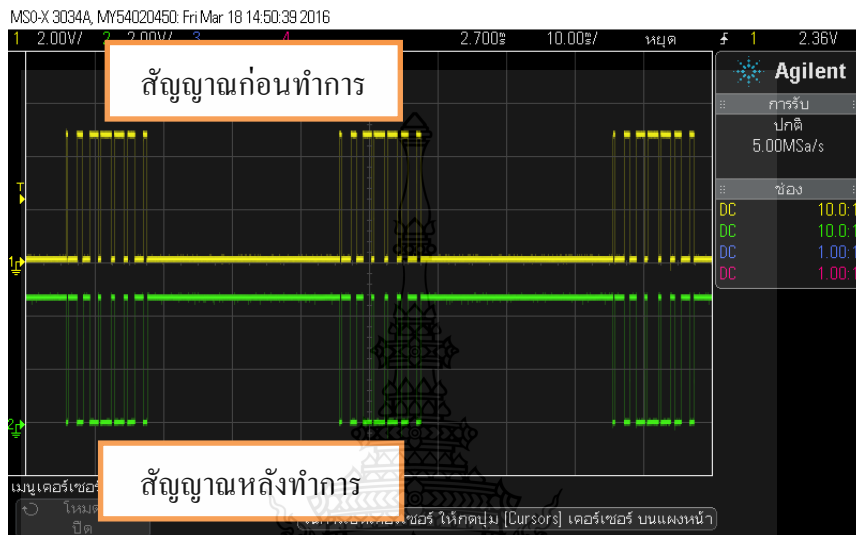


รูปที่ 3.22 วงจร Dead Time สำหรับไดโอดเคลมปีอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

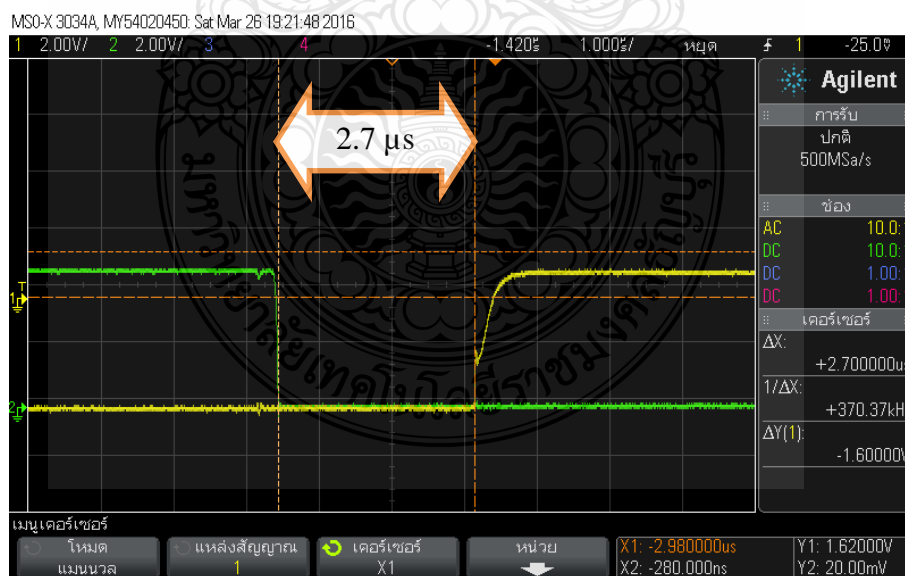


รูปที่ 3.23 วงจร Dead Time ที่สร้างขึ้น

จากวงจร Dead Time ที่ทำการออกแบบ ทำให้ได้สัญญาณที่วัดจากออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.24 และเมื่อทำการขยายรูปสัญญาณออกจะพบว่า สัญญาณก่อนและหลังทำการกลับมีการหน่วงเวลาที่  $2.7 \mu\text{s}$  ดังรูปที่ 3.25 เพื่อป้องกันการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิตชิง IGBT

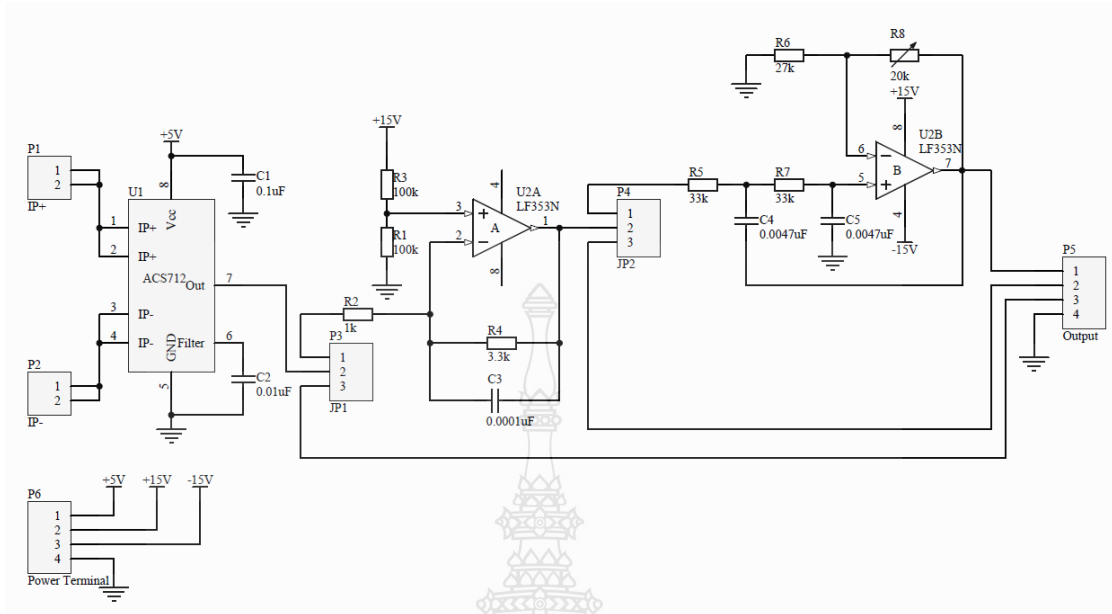


รูปที่ 3.24 สัญญาณ PWM ก่อนและหลังทำการกลับที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป



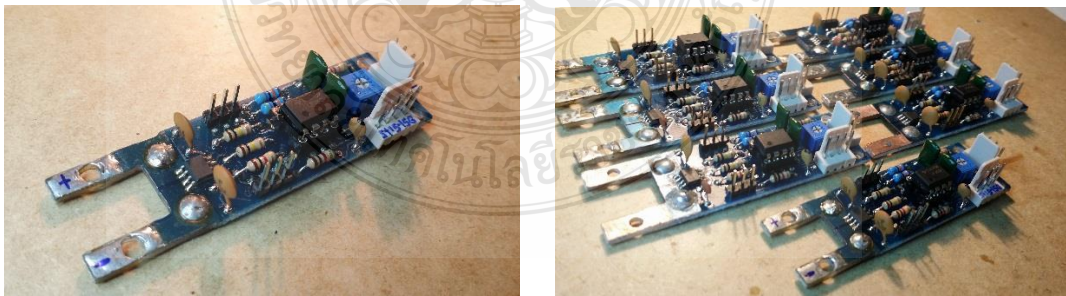
รูปที่ 3.25 รูปขยายสัญญาณ PWM ก่อนและหลังทำการกลับที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป

### 3.4.4 วงจรตรวจจับกระแส (Current sensor circuit)



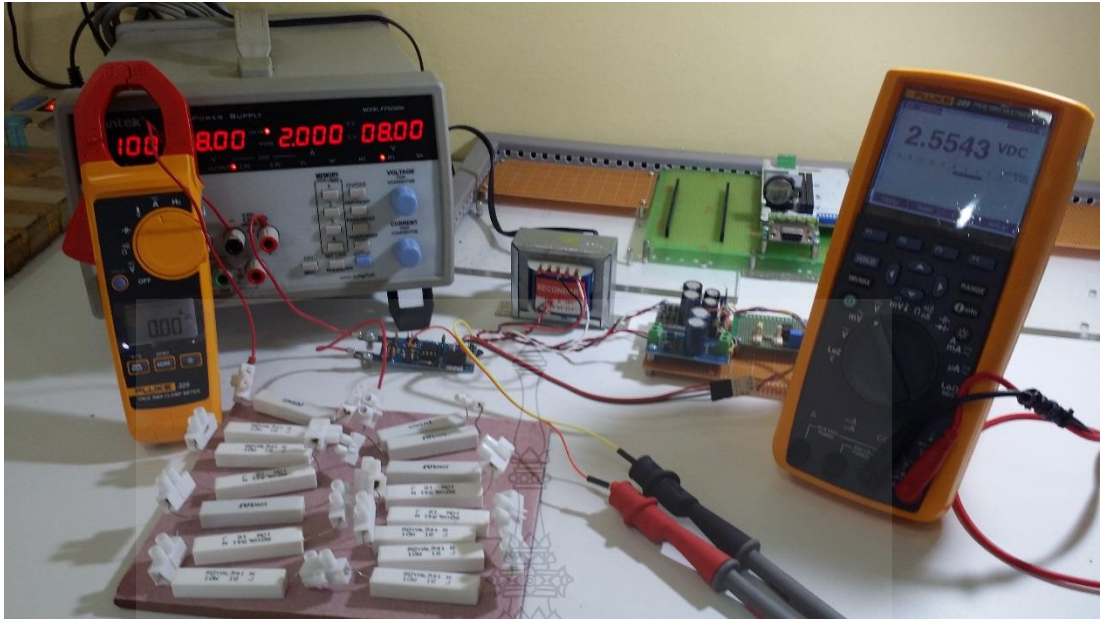
รูปที่ 3.26 วงจรวัดค่ากระแส

วงจรวัดและตรวจจับทิศทางกระแสในงานวิจัยนี้ ใช้ IC เบอร์ ACS712 แบบ 8 pin SOIC package เป็น Current sensor แบบ Hall Effect ที่สามารถรับกระแสได้ 2 ทิศทาง พิกัดกระแสสูงสุดที่ทนได้อยู่ที่ 20A โดยทำงานร่วมกับวงจร filter ด้วย IC Op-Amp เบอร์ LF353 ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ทำหน้าที่ตรวจสอบทิศทางกระแสทางด้านขาออก พร้อมส่งสัญญาณเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมในวงจรสร้างสัญญาณควบคุมดังแสดงไว้แล้วในแผนภาพระบบ รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.27 วงจรวัดค่ากระแสที่สร้างขึ้น

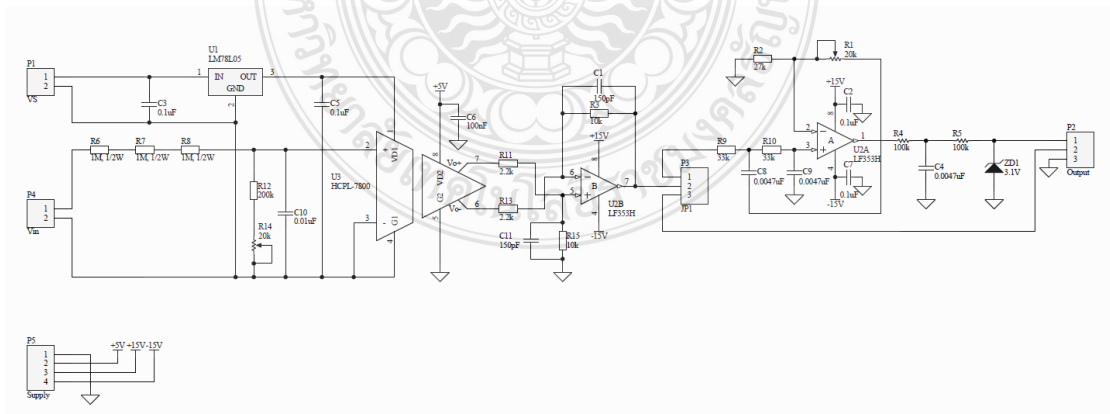




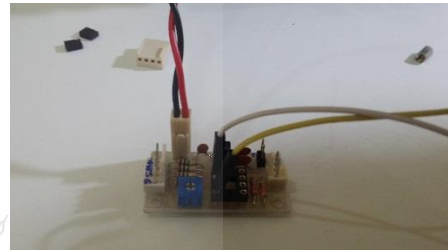
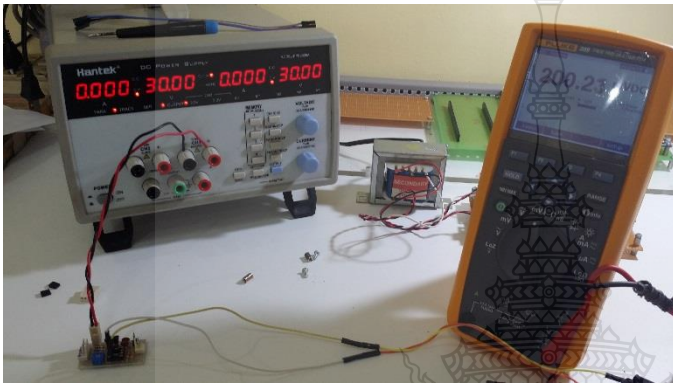
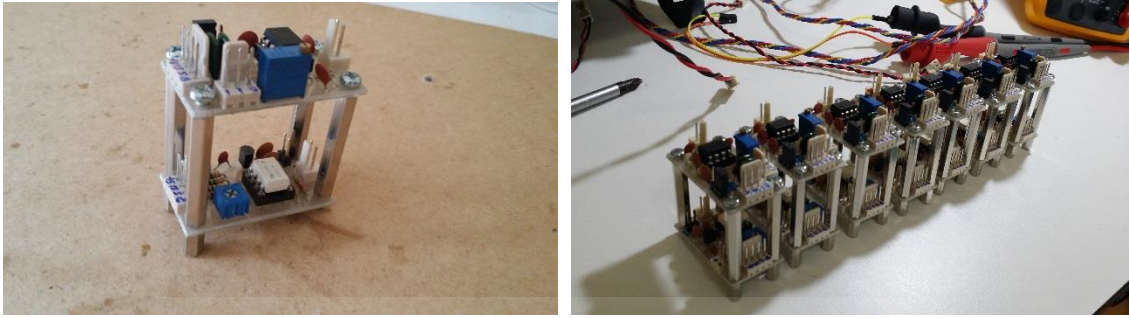
รูปที่ 3.28 ขณะทำการทดสอบและปรับแต่งชุดเซ็นเซอร์วัดกระแส

### 3.4.5 วงจรตรวจจับแรงดัน (Voltage sensor circuit)

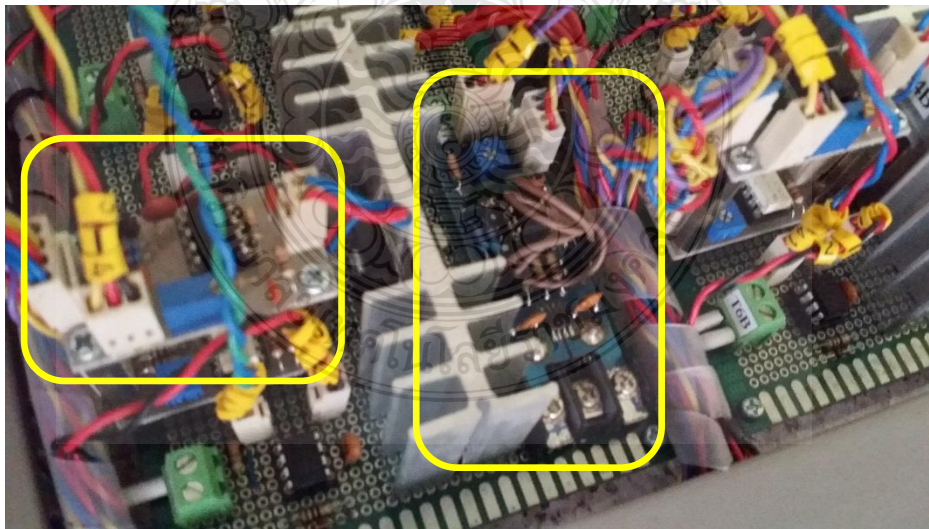
วงจรวัดค่าแรงดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ IC เบอร์ HCPL7800 ซึ่งเป็นออปแอมป์ชนิดที่มีกรแยกโคตระหว่างอินพุตและเอาท์พุตเพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเข้าไปทำความเสียหายกับส่วนควบคุมอื่นจากนั้นสัญญาณที่ได้จะผ่านไปยังวงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียล และวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ตามลำดับ



รูปที่ 3.29 วงจรวัดค่าแรงดัน



รูปที่ 3.30 วงจรวัดแรงดันที่สร้างขึ้นและขณะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.31 วงจรวัดค่ากระแสและแรงดันเมื่อทำการติดตั้งเสร็จแล้ว

### 3.4.6 ภาระทางไฟฟ้า (Load)



รูปที่ 3.32 โหลดแบบความต้านทาน (R) ที่ใช้ในการทดสอบวงจรในงานวิจัย

ในการทดสอบงานวิจัยนี้ใช้โหลด แบบ 3 phase series R Load ทั้งนี้ 3 phase series R Load มีค่าความต้านทานที่ 25 โอห์ม 250 วัตต์ ในแต่ละเฟส

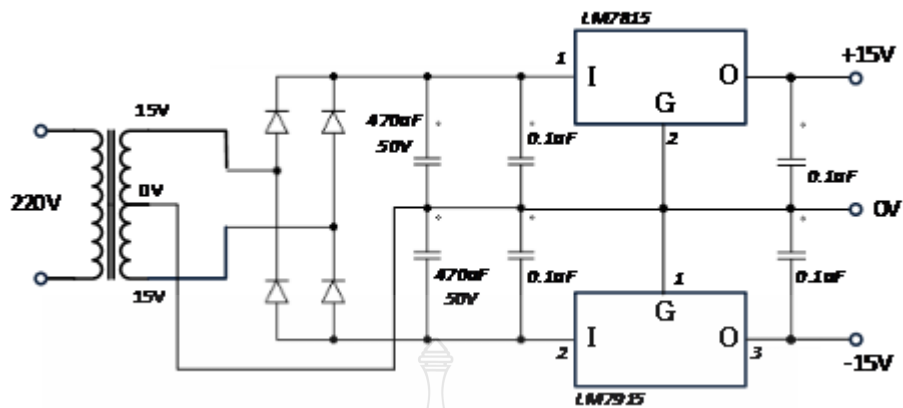
### 3.4.7 วงจรไฟเลี้ยง (Power supply circuit)

ขนาดแรงดันไฟเลี้ยงของวงจรควบคุมต่างๆ ในวงจรเป็นแรงดันไฟตรงหลายระดับแรงดัน ดังนี้

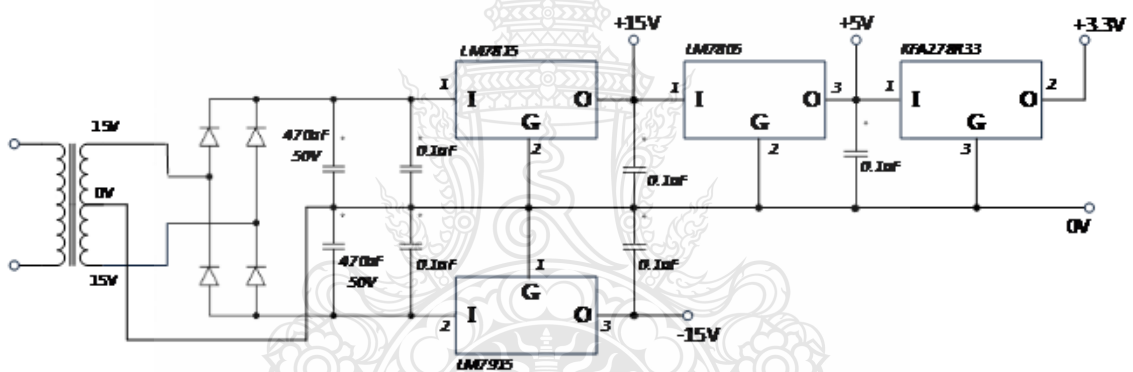
- แรงดันไฟตรงขนาด +15V, 0V, -15V สำหรับวงจรขับเคลื่อนสวิตช์กำลัง
- แรงดันไฟตรงขนาด +5V และ +3.3V สำหรับวงจรสร้างสัญญาณควบคุม วงจร

สับเปลี่ยนทิศทางกระแส และวงจรตรวจจับทิศกระแส ตามลำดับ

วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรขับเคลื่อนสวิตช์กำลังแสดงดังรูปที่ 3.33 และวงจรแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 3.34 ตามลำดับ



รูปที่ 3.33 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรจับเกิดสวิตช์กำลัง

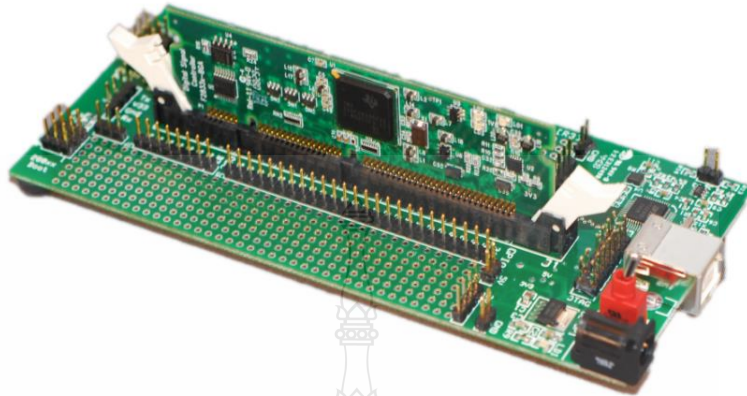


รูปที่ 3.34 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมและวงจรควบคุมต่างๆ



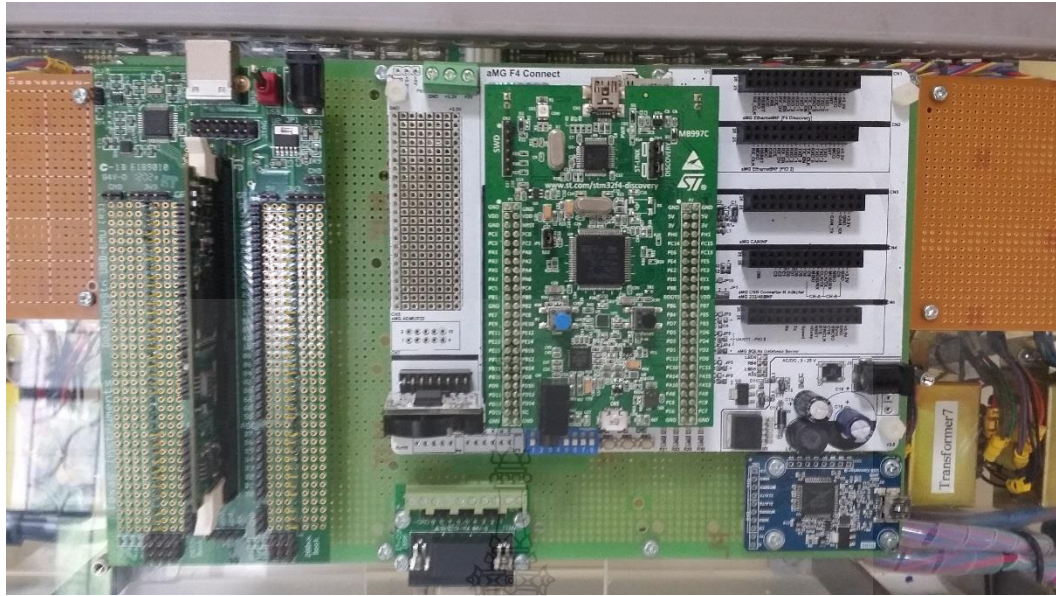
รูปที่ 3.35 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงที่สร้างขึ้น

### 3.4.8 ชุดสร้างสัญญาณพีดีบีเอ็ม (PWM signal generator unit)

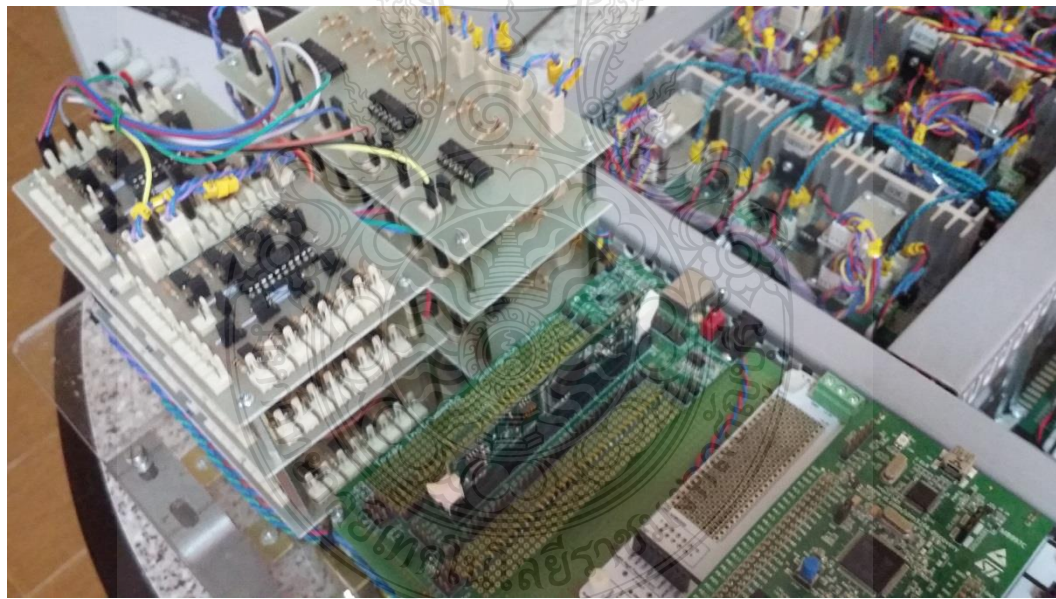


รูปที่ 3.36 บอร์ด TMS320F28335 ที่ประยุกต์ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุม

การสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลังของวงจรแปลงกำลังไฟฟ้าถือเป็นหัวใจสำคัญในการทำงานของการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทนในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณรุ่น TMS320F28335 ของบริษัท Texas Instrument ในการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง เนื่องจากเป็นบอร์ดประมวลผลสัญญาณที่สามารถแปลง Simulink Model เป็น Source code พร้อมทั้งดาวน์โหลด Source code ลงบนบอร์ดได้ ทำให้บอร์ดสามารถสร้างสัญญาณควบคุมได้ตามต้องการ อีกทั้งยังสะดวกในการปรับเปลี่ยน Control scheme หรือเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมได้ ทั้งนี้หลักการใช้งานบอร์ด TMS320F28335 สามารถหาได้จากเว็บไซต์ [www.ti.com](http://www.ti.com) ซึ่งมีข้อมูลต่างที่ใช้ในการเชื่อมต่อการทำงานระหว่าง Matlab/Simulink program กับบอร์ดประมวลผลตระกูลดังกล่าวอย่างไรก็ตาม Control scheme ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ จะเขียนอยู่ในรูปของ Simulink Model



รูปที่ 3.37 วงจรสร้างสัญญาณพีคัมเบิลยูเอ็ม(PWM)



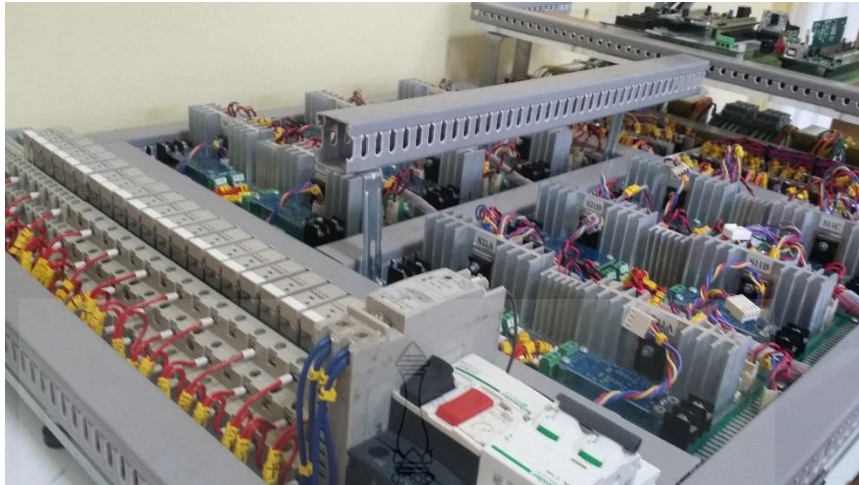
รูปที่ 3.38 วงจรสร้างสัญญาณพีคัมเบิลยูเอ็มที่ติดตั้งพร้อมใช้งาน



รูปที่ 3.39 รีเลย์ที่ใช้ในการจำลองการเกิดสภาวะลัดวงจรและสภาวะเปิดวงจร



รูปที่ 3.40 ชุดควบคุมการจำลองการเกิดสภาวะลัดวงจรและสภาวะเปิดวงจร



รูปที่ 3.41 ขณะประกอบวงจรส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน





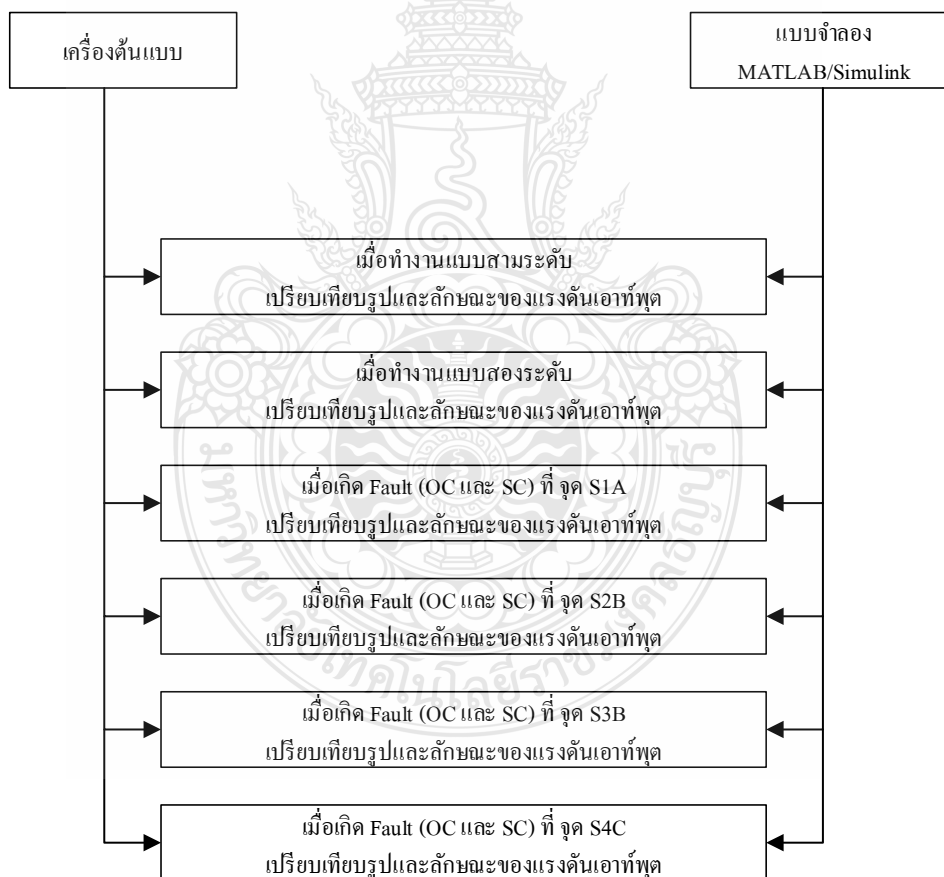
รูปที่ 3.42 วงจรการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับขณะทำการทดสอบ



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

หลังจากทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับดังที่กล่าวในบทที่ 3 ด้วยโหลดตัวต้านทานขนาด  $25 \Omega$  ขึ้นตอนลำดับต่อมาคือทำการทดสอบและเปรียบเทียบแรงดันด้านออกจากเครื่องต้นแบบ (prototype) ของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดเคลมพ์โดยวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนด้วยโหลดแบบเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องต้นแบบ ว่าให้ผลที่เป็นทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink หรือไม่



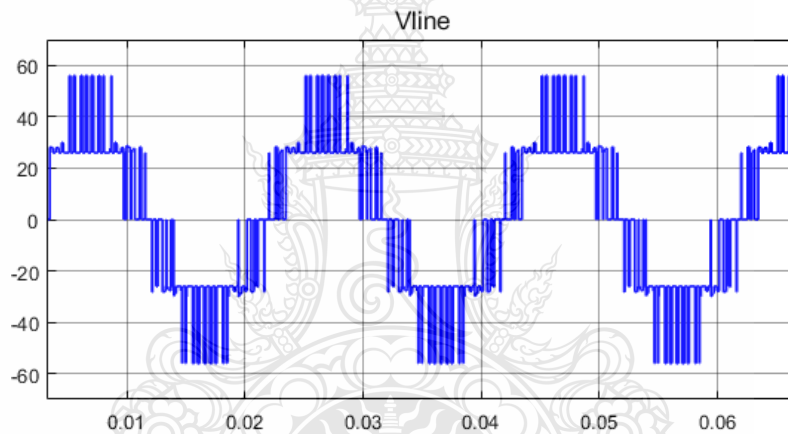
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดสอบเปรียบเทียบแรงดันด้านออก MATLAB/Simulink กับเครื่องต้นแบบ

#### 4.1 ผลการทดสอบวงจรจากเครื่องต้นแบบ

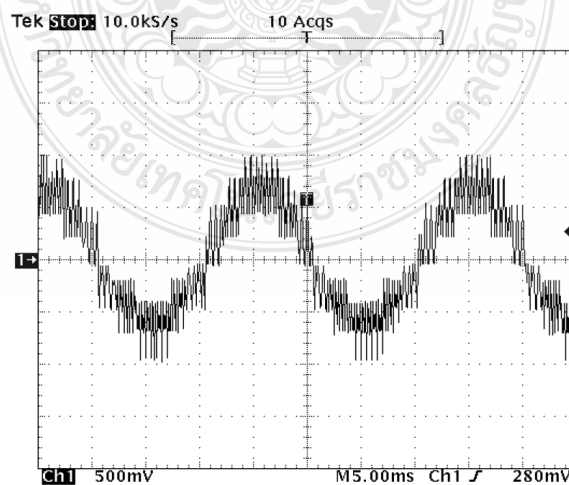
การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ของเครื่องต้นแบบจะทำงานในลักษณะสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยใช้วิธีการมอดูเลชันบนสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier Signal) แบบ SPWM ที่ 1 kHz ที่ความถี่หลักมูล 50 เฮิรตซ์ ค่าอินเต็กรมอดูเลชันที่ 0.8 และเมื่อนำเครื่องต้นแบบไปวัดค่าแรงดันเอาต์พุตได้ผลดังรูปที่ 4.3 - 4.26 โดยแสดงเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

##### 4.1.1 ลักษณะการทำงานแบบสามระดับ

จากรูปจะเป็นลักษณะของแรงดันเอาต์พุตโดยปกติของอินเวอร์เตอร์สามระดับขณะที่ไม่มี Fault ใดเกิดขึ้น



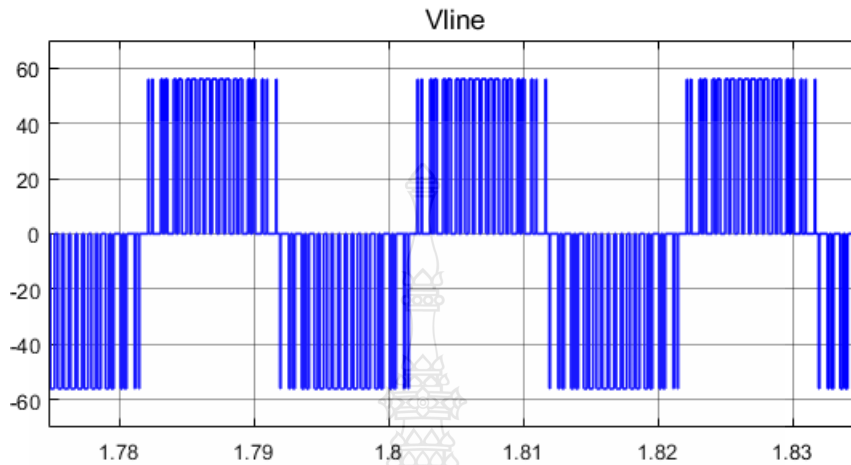
รูปที่ 4.2 แรงดันขาออกที่เฟส A ( $V_{line}$ ) ทำงานแบบสามระดับ โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



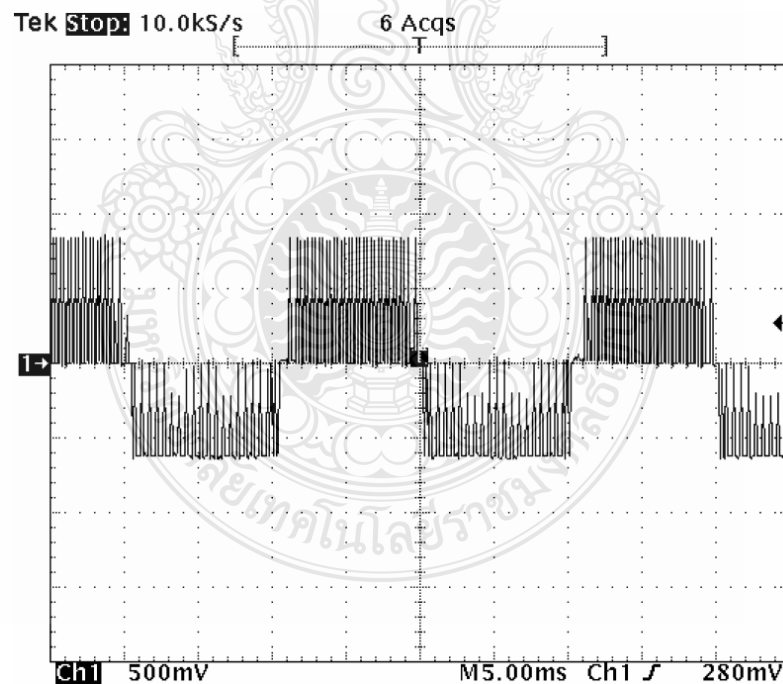
รูปที่ 4.3 แรงดันขาออก ( $V_{line}$ ) ทำงานแบบสามระดับ โดยเครื่องต้นแบบ

#### 4.1.2 ลักษณะการทำงานแบบสองระดับ

จากรูปจะเป็นลักษณะของแรงดันเอาต์พุตโดยปกติของอินเวอร์เตอร์สองระดับขณะที่ไม่มี Fault ใดเกิดขึ้น



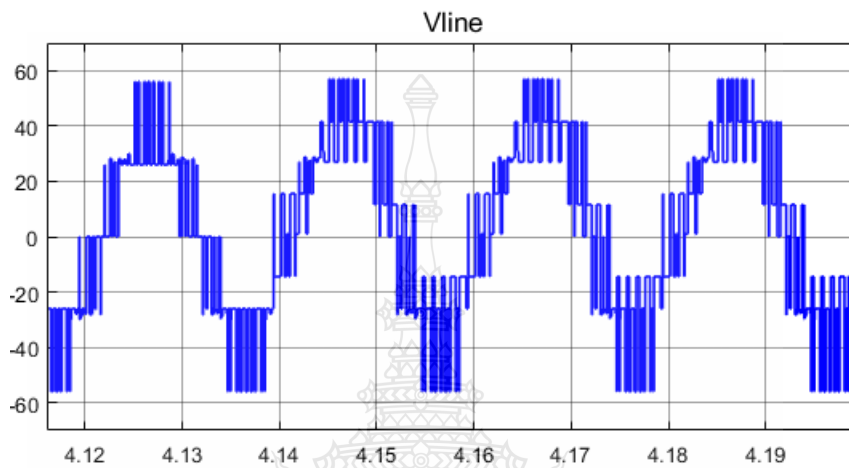
รูปที่ 4.4 แรงดันขาออกเมื่อทำงานแบบสามระดับโดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



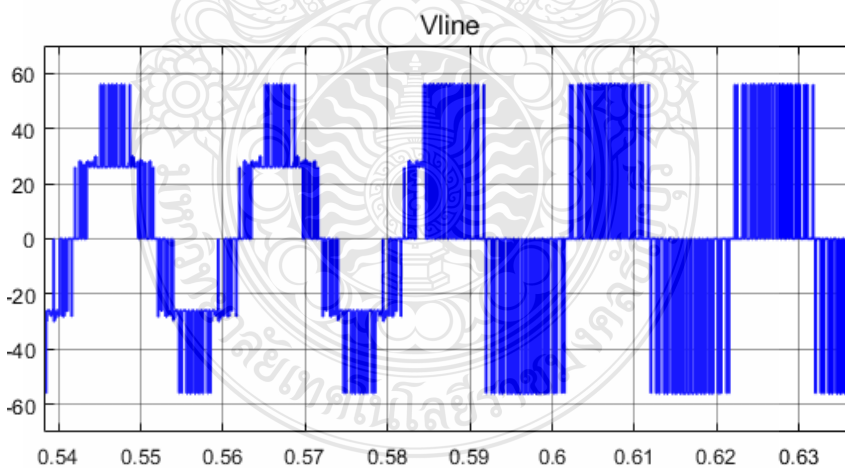
รูปที่ 4.5 แรงดันขาออกเมื่อทำงานแบบสามระดับโดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink

#### 4.1.3 กรณีเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) และ Open Circuit (OC) ที่ สวิตช์ S1A

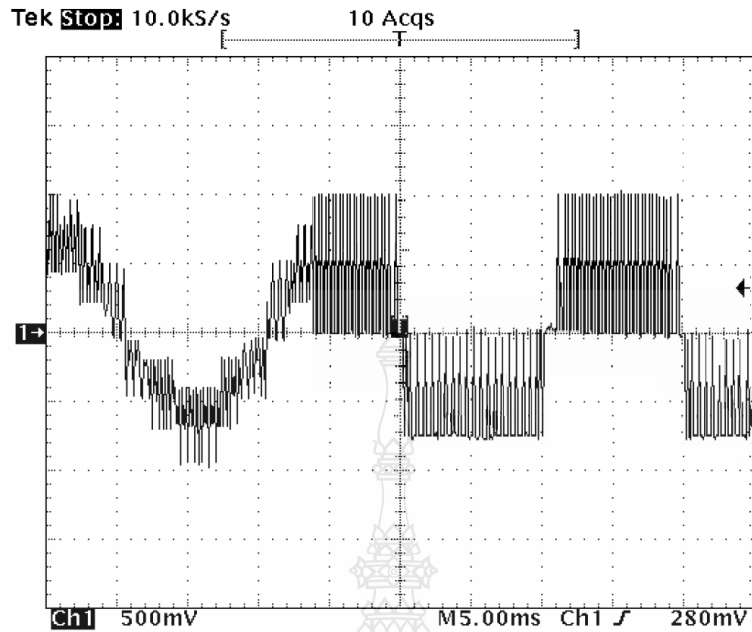
เมื่อเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) ที่สวิตช์ S1A เครื่องต้นแบบจะทำการเปลี่ยนการทำงานจากแบบสามระดับไปเป็นสองระดับ แต่ถ้าเกิด Open Circuit (OC) เครื่องจะยังคงทำงานแบบสามระดับเช่นเดิม



รูปที่ 4.6 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S1A โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



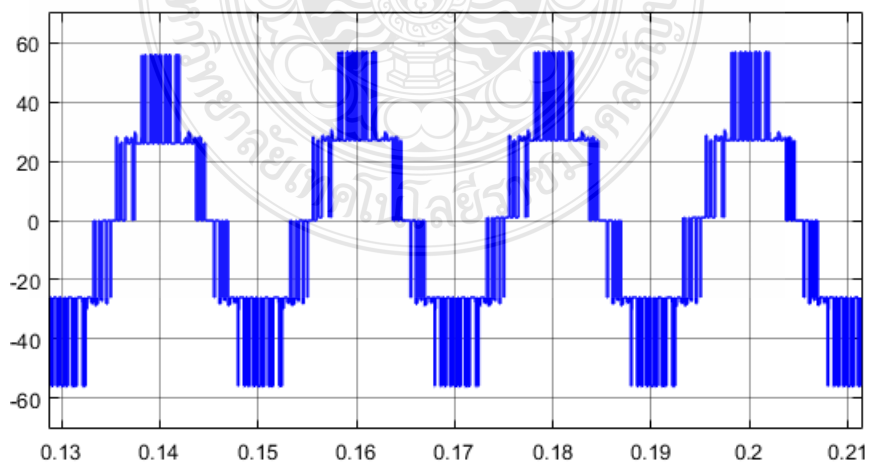
รูปที่ 4.7 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S1A โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



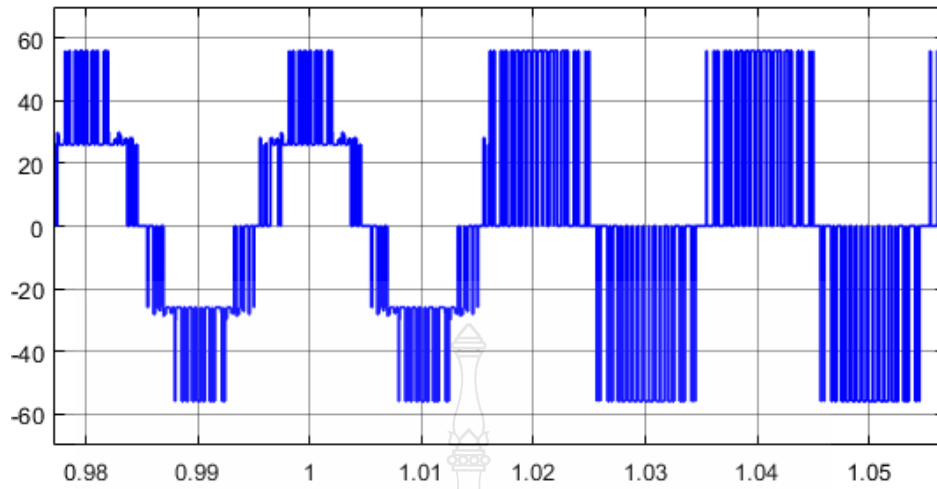
รูปที่ 4.8 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S1A โดยเครื่องต้นแบบ

#### 4.1.4 กรณีเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) และ Open Circuit (OC) ที่ สวิตช์ S2B

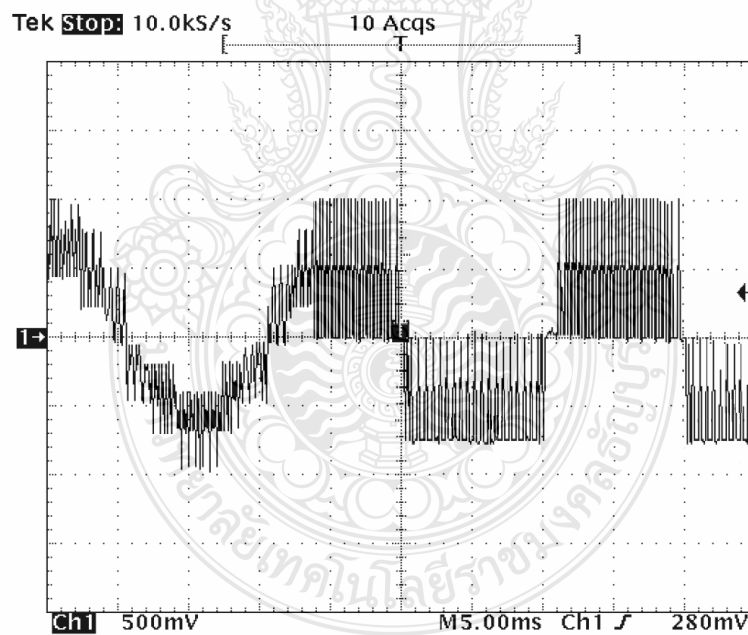
เมื่อเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) ที่สวิตช์ S2B เครื่องต้นแบบจะทำการเปลี่ยนการทำงานจากแบบสามระดับ ไปเป็นสองระดับ แต่ถ้าเกิด Open Circuit (OC) เครื่องจะยังคงทำงานแบบสามระดับเช่นเดิม



รูปที่ 4.9 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S2B โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



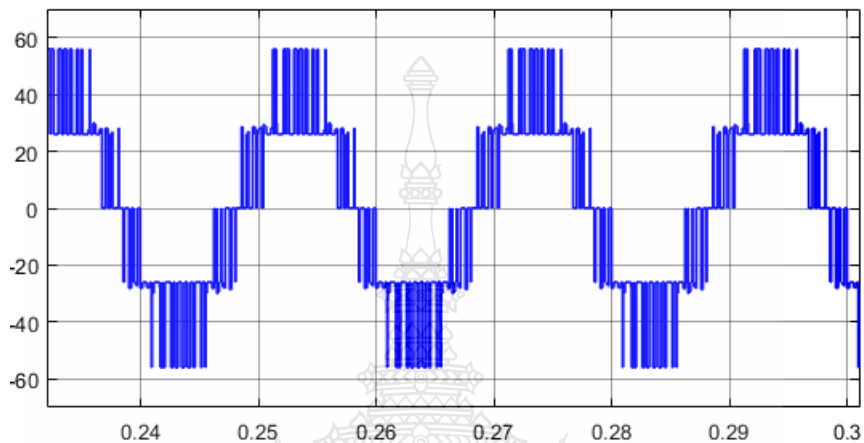
รูปที่ 4.10 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S2B โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



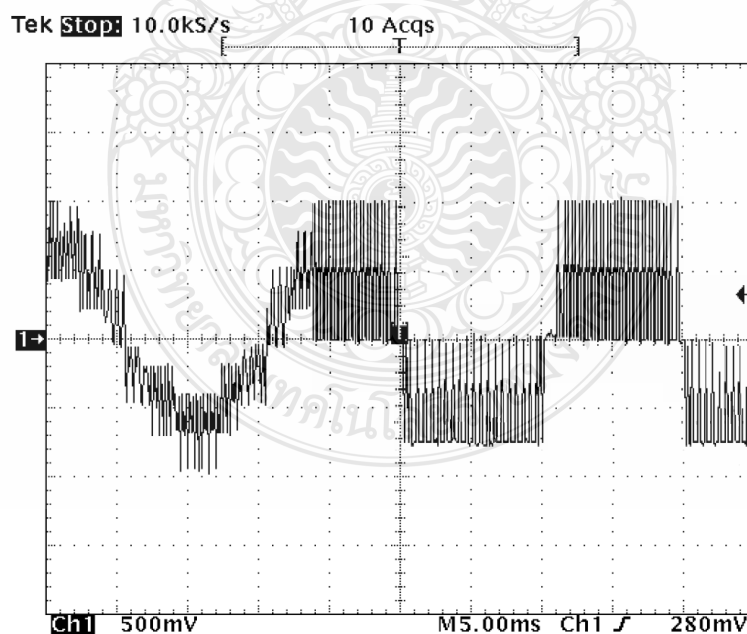
รูปที่ 4.11 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S2B โดยเครื่องต้นแบบ

#### 4.1.5 กรณีเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) และ Open Circuit (OC) ที่ สวิตช์ S3B

เมื่อเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) ที่สวิตช์ S3B เครื่องต้นแบบจะทำการเปลี่ยนการทำงานจากแบบสามระดับ ไปเป็นสองระดับ แต่ถ้าเกิด Open Circuit (OC) เครื่องจะยังคงทำงานแบบสามระดับเช่นเดิม



รูปที่ 4.12 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S3B โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink

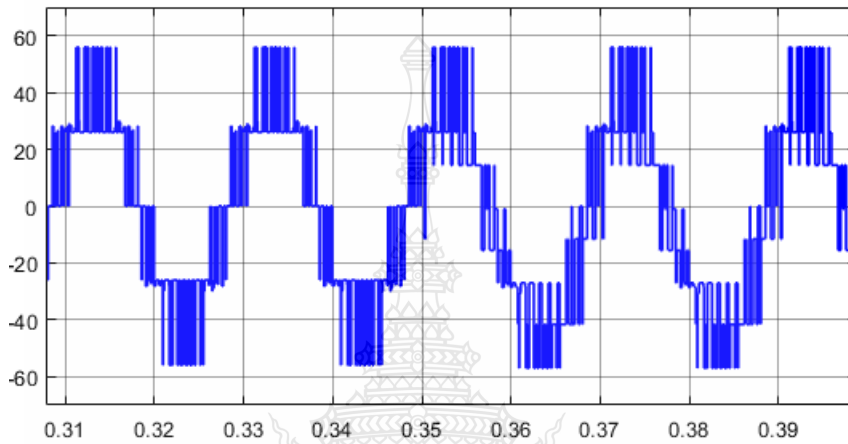


รูปที่ 4.13 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S3B โดยเครื่องต้นแบบ

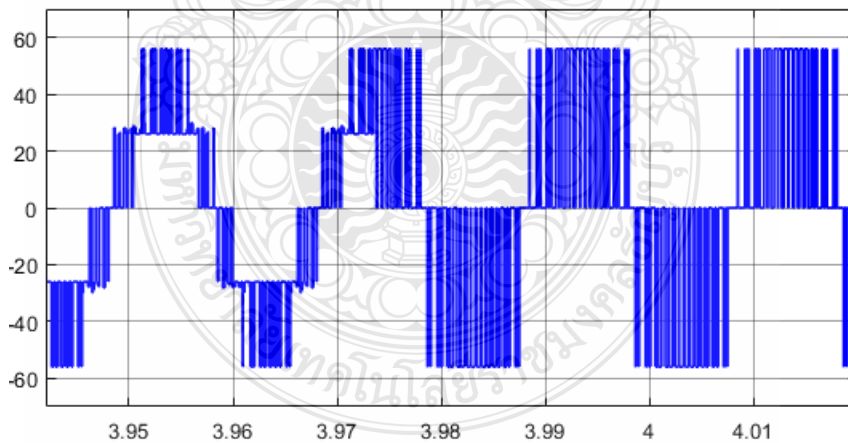


#### 4.1.4 กรณีเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) และ Open Circuit (OC) ที่ สวิตช์ S4C

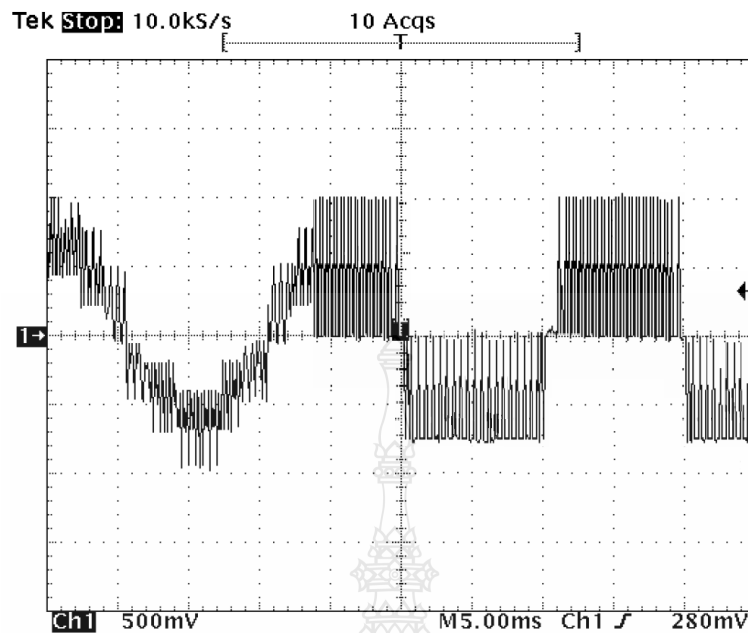
เมื่อเกิด Fault แบบ Short Circuit (SC) ที่สวิตช์ S4C เครื่องต้นแบบจะทำการเปลี่ยนการทำงานจากแบบสามระดับไปเป็นสองระดับ แต่ถ้าเกิด Open Circuit (OC) เครื่องจะยังคงทำงานแบบสามระดับเช่นเดิม



รูปที่ 4.14 แรงดันขาออกเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S4C โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



รูปที่ 4.15 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S4C โดยแบบจำลอง MATLAB/Simulink



รูปที่ 4.16 ลักษณะการเปลี่ยนการทำงานจากสามระดับเป็นสองระดับเมื่อเกิด Short Circuit (SC) ที่ S4C โดยเครื่องต้นแบบ

#### 4.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จาก MATLAB/Simulink และเครื่องต้นแบบ

จากการการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบทำงานในลักษณะสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับและจากเครื่องต้นแบบพบว่าผลของค่าแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับจาก MATLAB/Simulink และเครื่องต้นแบบให้ผลของค่าแรงดันด้านออกเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยระบบควบคุมจะทำการตรวจสอบหาจุดที่สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชำรุดหรือเสียหายจากนั้นจะทำการต่อตรง(Bypass) สวิทช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ชำรุดหรือเสียหายนั้นแล้วทำการปรับ โครงสร้างของสัญญาณควบคุมจากสามระดับเป็นสัญญาณควบคุมสองระดับทำให้อินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานต่อไปได้ โดยทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในรูปแบบการมอดูเลชันแบบ Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) หลังจากนั้นนำรูปแบบสัญญาณมอดูเลชันที่ได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink แปลงลงในบอร์ดควบคุมเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ซิงของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคแลมป์ที่สร้างขึ้น

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ความถี่เอาต์พุตเท่ากับ 50 Hz ความถี่สวิทช์ซิงเท่ากับ 1 kHz แรงดันอินพุตเท่ากับ  $30V_{ac}$  ในสภาวะที่มีโหลด  $25\Omega$  จากการจำลองการทำงาน พบว่าวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ได้สร้างขึ้นสามารถทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ นั่นคือเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ตัวสวิทช์ตัวใดตัวหนึ่ง วงจรควบคุมจะทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานจากเดิมที่ทำงานแบบสามระดับไปเป็นการทำงานแบบสองระดับ ซึ่งทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องไม่ต้องหยุดการทำงาน เช่นเดียวกับการเกิดข้อบกพร่องแบบเปิดวงจรตัวสวิทช์ตัวใดตัวหนึ่ง ชุดควบคุมจะทำการสลับการทำงานของสวิทช์สำรองเพื่อทำงานทดแทนตัวที่เสียหายในทันทีทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในแบบสามระดับไม่ต้องหยุดการทำงาน

และเมื่อทำการทดสอบเครื่องต้นแบบ หลังจากที่ได้แปลงสัญญาณลงในบอร์ดควบคุม เพื่อทำการเชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคแลมป์พบว่าแรงดันด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคแลมป์ที่จำลองจาก MATLAB/Simulink และเครื่องต้นแบบให้ผลของค่าแรงดันขาออกเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

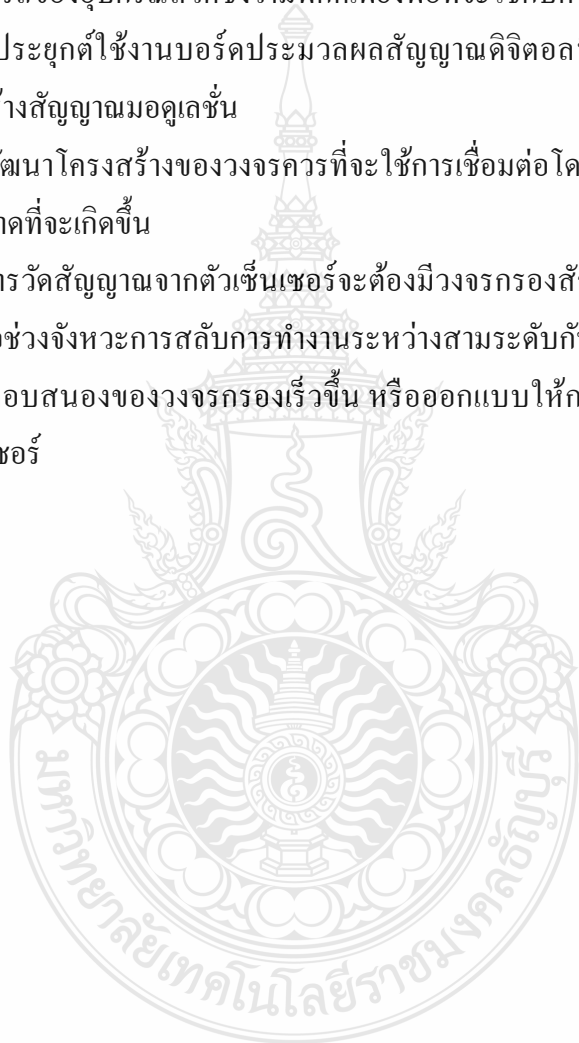
วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ ซึ่งเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาขั้นต่อไป โดยมีข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยดังนี้

5.2.1 ในการพัฒนารูปแบบสัญญาณมอดูเลชันที่ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ไดโอดเคลมป์เพื่อลดค่า  $THD_v$  หากความถี่สวิตช์ที่มีความถี่ที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่า  $THD_v$  มีค่าที่ต่ำลง ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงความสามารถของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งว่ามีพิกัดเพียงพอที่จะใช้กับความถี่นั้นได้หรือไม่

5.2.2 ควรประยุกต์ใช้งานบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพที่สูง เพื่อความแม่นยำในการสร้างสัญญาณมอดูเลชัน

5.2.3 การพัฒนาโครงสร้างของวงจรควรที่จะใช้การเชื่อมต่อโดยใช้สายไฟให้น้อยเท่าที่จะทำได้เพื่อลดข้อผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น

5.2.4 ในการวัดสัญญาณจากตัวเซ็นเซอร์จะต้องมีวงจรกรองสัญญาณทำให้ผลตอบสนองของวงจรช้าลงมีผลต่อช่วงจังหวะการสลับการทำงานระหว่างสามระดับกับสองระดับ ดังนั้นจึงควรที่จะปรับปรุงให้มีการตอบสนองของวงจรกรองเร็วขึ้น หรือออกแบบให้การตรวจสอบการเกิด Fault โดยไม่ต้องใช้ตัวเซ็นเซอร์



## บรรณานุกรม

- [1] เส็งี่ยม จันท์จรัส, การออกแบบและวิเคราะห์คอนเวอร์เตอร์หลายระดับ แบบ 4 สถานะ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553
- [2] P. Bhagwat and V.R. Stefanovic, **Generalized Structure of Multilevel PWM Inverters**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-19, No. 6, pp. 1057-1069, November/December 1983.
- [3] S. Daher, R. S. The and F. Antunes, **Multilevel Current Source Inverters – The Switching Control Strategy for High Power Application**, Conference of IEEE Industrial Electronics Society-IECON96, Taipei-Taiwan, 1996.
- [4] Malinowski M. and Stynski S., **Simulation of Single-phase Cascade Multilevel PWM Converters**, EUROCON 2007, 9-12th Sep. Warsaw, Poland, on CD"
- [5] Gopakumar, K., Kanchan, R. S. and Tekwani, P. N., **Three-Level Inverter Scheme With Common Mode Voltage Elimination and DC Link Capacitor Voltage Balancing for an Open-End Winding Induction Motor Drive**, Transactions on Power Electronics, IEEE Vol.21, Issue 6, Nov. 2006 ,pp.1676 – 1683
- [6] Gopakumar, K., Tekwani, P.N. and Kanchan, R.S., **A Dual Five-Level Inverter-Fed Induction Motor Drive With Common-Mode Voltage Elimination and DC-Link Capacitor Voltage Balancing Using Only the Switching-State Redundancy—Part I**, Transactions on Industrial Electronics, IEEE, Vol.54, Issue 5, Oct. 2007, pp.2600 – 2617
- [7] S. Mariethoz and A. Rufer, Design and control of asymmetrical multi-level inverters, **International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation – IECON**, 2002, 5-8 November, Sevilla, Spain.
- [8] C. Rech, H. A. Gründling, H. L. Hey, H. Pinheiro and J. R. Pinheiro, **Uma Metodologia de Projeto Generalizada para Inversores Multiníveis Híbridos**, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, Brazil, pp. 763-769, September, 2002.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] S. Mariethoz, A. Rufer, **Design and control of asymmetrical multi-level inverters**, IECON 2002: The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2002, 5-8 November, Sevilla, Spain.
- [10] S. Mariethoz and A. Rufer, **New configurations for the three phase asymmetrical multilevel inverter**, IEEE 39th IAS Annual Meeting Conference Record, vol. 2, pp. 828-835, 2004.
- [11] J. Hung and K. A. Corzine, **Extended Operation of Flying Capacitor Multilevel Inverters**, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.21, No.1, January 2006
- [12] S. Sirisukprasert, **Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter**, Master Dissertation - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg - Virginia, September, 1999
- [13] Nikola Celanovic, **Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters**, Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg - Virginia, September 20, 2000.
- [14] Rodriguez J., **Tutorial on Multilevel Converters**, International Conference on Power Electronics and Intelligent Control for Energy Conservation , Pelincec 2005, Warsaw, 17-19 October, 2005
- [15] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, **A New Neutral-Point Clamped PWM Inverter**, Proceeding of the Industry Applications Society Conference, pp. 171-176, September/October 1980.
- [16] V. Wojciech Kolomyjski M. Sc., **Modulation Strategies for Three-level PWM Inverter-fed Induction Machine Drives**, Faculty of Electrical Engineering , Warsaw, 2009
- [17] X. Zheng, L. Song, and P. Hongying, **Study of Five-level diodes-clamped Inverter Modulation Technology Based on Three-harmonic Injection Method**, EMEIT-2012, pp.1973-1976.
- [18] In-Dong Kim, Eui-Cheol Nho, **A Generalized Undeland Snubber for Flying Capacitor Multilevel Inverters and Converter**, IEEE Transaction on Industrial Electronics” Vol.51, No.6, December 2004

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] S. M. Tencony, M. Carpita, C. Bacigalupo and R. Cali, **Multilevel Voltage Source Converters for Medium Voltage Adjustable Speed Drives**, Proceeding of the IEEE International Symposium of Industrial Electronics, ISIE'95 Conference, Vol. 1, pp. 91-98, 1991.
- [20] T. Biskup, C. Buhner, B. Grzesik, J. Krijgsman, J. Michalak, S. Pasko and M. Zygmowski , **Multilevel Converter for Power Conditioning System with SMES**, Przegląd Elektrotechniczny, pp. 609-614, June 2004.
- [21] Alonso, O., Marroyo, L., Sanchis, P., Gubia, E. and Guerrero, A., **Analysis of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped inverters with SVPWM modulation**, IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the, Vol.2, 5-8 Nov. 2002, pp.920 - 925
- [22] Bruckner, T. and Holmes, D.G., **Optimal pulse-width modulation for three-level inverters**", **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 20, Issue 1 Jan. 2005 ,pp.82 - 89
- [23] Blasko V., **Analysis of a Hybrid PWM based on modified space-vector and triangle comparison methods**, IEEE Transactions on Industry Application, vol.33, no.3, pp. 756-764, 1997.
- [24] Celanovic, N. and Boroyevich, D., **A Fast Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three-Phase Converters**, IEEE Transactions on industry applications, vol.37, no. 2, March/April 2001, pp. 637-641
- [25] Dalessandro, L., Round, S.D., Drofenik, U. and Kolar, J.W., **Discontinuous Space-Vector Modulation for Three-Level PWM Rectifiers**, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 23, Issue 2, March 2008 ,pp.530 – 542
- [26] Franquelo L. G.,Prats M. M., Portillo R., León J. I., Perales M., Mora J. L., Carrasco J. M. and Galvan E., **Three dimensional space vector modulation algorithm for four-leg diode clamped converters using abc coordinates**, IEEE Transactions on, Vol. 53, no. 2, April 2006 , pp.458-466

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [27] Franquelo, L.G., Prats, M.M., Portillo, R., Leon, J.I., Perales, M., Carrasco, J.M., Galvan, E. and Mora, J.L., **Simple and advanced three dimensional space vector modulation algorithm for four-leg multilevel converters topology**, IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE, 2-6 Nov. 2004, Vol.3, pp.2285 – 2289
- [28] Kazmierkowski, M.P. and Bujak, G., **Review of direct torque control methods for voltage source inverter-fed induction motors**, Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE, vol.1,2-6 Nov. 2003, pp.981 - 991
- [29] Loh, P.C., Pang, G.H.H. and Holmes, D.G., **Multi-level discontinuous pulse width modulation: common mode voltage minimization analysis**, Electric Power Applications, IEEE Proceedings –Vol.151, Issue 4, 7 July 2004, pp.477 – 486
- [30] Meynard, T.A. and Foch, H., **Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters**, Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE, vol.1,29 June-3 July 1992, pp.397 - 403
- [31] J. Pou, **Modulation and control of three-phase PWM multilevel converters**, PhD Thesis, Technical University of Catalonia, Spain, 2002
- [32] Pou, J., Rodriguez, P., Boroyevich, D., Pindado, R. and Candela, I., **Efficient Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Converters with Low Switching Frequencies in the Devices**, 36th Power Electronics Specialists Conference, PESC '05. IEEE 2005 , pp.2521 –2526
- [33] Prats, M.M., Franquelo, L.G., Portillo, R., Leon, J.I., Galvan, E., Carrasco, J.M., **“A 3-D space vector modulation generalized algorithm for multilevel converters**, Power Electronics Letters, IEEE, Vol.1, Issue 4, Dec. 2003, pp.110 – 114
- [34] Prats, M.M., Portillo, R., Carrasco, J.M. and Franquelo, L.G., **New fast space-vector modulation for multilevel converters based on geometrical considerations**, IECON 02 [Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th], Vol.4, 5-8 Nov. 2002 , pp.3134 – 3139



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [35] Prats, M.M., Carrasco, J.M. and Franquelo, L.G., **Effective space-vector modulation algorithm for multilevel converters**, IECON 02 [Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th], Vol.4, 5-8 Nov. 2002, pp.3129 – 3133
- [36] Prats, M.M., Franquelo, L.G., Portillo, R., Leon, J.I., Galvan, E. and Carrasco, J.M., **A 3-D space vector modulation generalized algorithm for multilevel converters**, IEEE Power Electronics Letters, Vol.1, Issue 4, Dec. 2003 , pp.110 – 114
- [37] Bueno, E.J., Garcia, R., Marron, M., Urena, J. and Espinosa, F., **Modulation techniques comparison for three levels VSI converters**, IECON 02 [Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th], Vol.2, 5-8 Nov. 2002 , pp.908 – 913
- [38] Holtz J., **Pulse width modulation for electronic power conversion**, Proceedings of the IEEE, vol. 82, no. 8, Aug. 1994
- [39] Holmes D.G. and Lipo T.A., **Pulse Width Modulation for Power Converters, Principles and Practice**, Wiley-Inter science and IEEE Press, 2003
- [40] Tallam, R.M., Naik, R. and Nondahl, T.A., **A carrier-based PWM scheme for neutral-point voltage balancing in three-level inverters**, Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol.41, Issue 6, Nov.-Dec. 2005 , pp.1734 - 1743
- [41] McGrath, B.P. and Holmes, D.G., **Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters”, IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol.49, Issue 4, Aug. 2002 , pp.858 – 867
- [42] V. Naga haskar Reddy, Ch. Sai. Babu and K. Suresh, **Advanced Modulating Techniques for Diode Clamped Multilevel Inverter Fed Induction motor**, APRN J Eng Appl Sci , vol.6, no.5, pp. 90-99, Jan 2011.
- [43] C.U. Ogbuka and M.U. Agu, **A Generalized Rectified Sinusoidal PWM Technique for Harmonic Elimination**, The Pacific Journal of Science and Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 21-26, November 2009.
- [44] Phuong Hue Tran, **MATLAB/SIMULINK IMPLEMENTATION AND ANALYSIS OF THREE PULSE-WIDTH-MODULATION (PWM) TECHNIQUES**, Master of Science in Electrical Engineering, Boise State University, 2012

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [45] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ ดร.วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง(POWER ELECTRONICS)**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [46] R. Kumar Ahuja1, A. Kumar, **MATLAB Simulation and Analysis of Nine-Level Inverter Using Different Schemes of Sinusoidal PWM**, International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 6 June 2014, pp. 13626-13633
- [47] Wanchai Subsingha, 2008, **Power Electronic (Academic book)**, Thailand. RMUTT printing
- [48] Vitezslav Benda, **Power semiconductors - state of the art and future trends**,. Global Journal of Technology & Optimization V.2, 2011, pp.29-36.
- [49] นพรัตน์ ม่วงคุ้ม, วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ SVPWM โดยใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันในแกน DQ Frame ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555
- [50] Aimagin.com, *เริ่มใช้งาน FiO2 และทดสอบการเชื่อมต่อ ST-Link (online)*, 2557. Available: <http://aimagin.com/blog/%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%95%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A-fio2-%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0-amg-labkit/?lang=th> (30 มี.ค.2558)
- [51] เลิศพันธ์ เพียรสร้างสรร และสิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์, การพัฒนาวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันเอาต์พุต 5 ระดับ, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37, ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, หน้า 429-432.
- [52] Mahmud Ismaila, Idris Ismail and Nor Zaihar Yahaya, **A Comparative Study of SPWM on A 5 - Level H-NPC Inverter**, Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, Vol. 6, No. 12, pp. 2227-2282, 2013

ภาคผนวก



ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37  
The 37<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference  
(EECON-37)

วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2557 ณ โรงแรมทูลแมน ขอนแก่น ราชธานี ออคิด

Vol.1  
PW, PE



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
KHON KAEN UNIVERSITY



BE008	ระบบเชื่อมต่อสมองกับคอมพิวเตอร์รูปแบบใหม่ด้วยคลื่นไฟฟ้าสมองขณะคิดเลขและจินตนาการภาพในใจ ยรรยงค์ พันธุ์สวัสดิ์ สิริจินดา กิจทรัพย์ทวี และ ยศชนัน วงศ์สวัสดิ์	979
BE009	การบีบอัดและกู้คืนสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้เคอร์เนลเกาส์เขียนผสมเชิงสเปกตรัม ทัศน์ัย พลอยสุวรรณ	983
GNI01	ระบบรางแบบไฮบริดที่ใช้งานได้กับรถไฟความเร็วสูงประเภทขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์หมุนรอบตัวเอง และประเภทขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นด้านเดียวชนิดขดลวดป้อนขั้ว: แบบจำลองทางวิศวกรรมที่มีประโยชน์ต่อการวางแผนและการตัดสินใจในโครงการขนส่งระบบราง ที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง อาทิตย์ ไสตรโยม และ จักรกฤษณ์ จันทร์เขียว	987
GNI02	การวิเคราะห์ความร้อน-ไฟฟ้าในงานวิจัยประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกส์ วันชัย ฉิมฉวี	993
GNI03	การจำลองการบินของอากาศยานอัตโนมัติไร้คนบังคับแบบมีฮาร์ดแวร์ประกอบการทดสอบ ชาติ ฤทธิ์หิรัญ อนุชิต เจริญ วิญญู แสงวงสินภสิกิจ และ ณธรรม เกิดสำอางค์	999
GNI04	การประมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาเซลล์และการส่งเสริมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย มงคล ตรีกิจงานนท์ วิชัย สายคติกรณ์ กิตติวุฒิ จินณะบุตร กฤตวิทย์ บัวใหญ่ และ กานท์ เกิดชื่น	1003
GNI05	DC micro plasma jet in SEM for thin-film deposition Khanit Matra, Hiroshi Furuta, and Akimitsu Hatta	1007
GNI06	การวิเคราะห์สัญญาณเสียงในการวัดการดูดซับเสียงของวัสดุจากเสียงสะท้อนกลับ ประสิทธิ์ นครราช	1011
GN001	ระบบตรวจสอบและแจ้งเตือนอุณหภูมิในตู้ห้องเย็นบนรถขนส่งของโรงงานนมหลวงชุมพรเขตอุดมศักดิ์ บุญยวีร์ จามรวิกุลกาญจน์ มานะชัย พรหมดี อัสนี แหวนหล่อ และ ปิยะพงษ์ หนูราช	1017
GN002	เครื่องต้นแบบสำหรับแสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำมันปาล์มและค่าพีเอชของทะเลลายปาล์มน้ำมัน บุญยวีร์ จามรวิกุลกาญจน์ พชรพล จันทร์จูน วิทยา เชื้อสง่า และ วิษณุ จิรพัฒนานนท์	1021
GN003	การวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกส์จากความร้อนท่อไอเสียด้วยระเบียบวิธีโครงข่ายไฟฟ้า วันชัย ฉิมฉวี	1025
GN004	การบูรณาการระบบควบคุมดาวเทียมในโครงการ VOSSCA เพื่อใช้ควบคุมดาวเทียมไทยโชต เจราณนท์ พลายด้วง อัญญาณัชณี ไควสุวรรณ อรรถวัฒน์ ภูพงษ์ และ รัช สัจจะศิริ	1029
GN005	การพัฒนาาระบบวิเคราะห์และประมวลผลวงโคจรดาวเทียม ประกาศิต อุดมธนะธีระ พรเทพ นวกิจกนก และ มานพ อ้อพิมาย	1033
GN006	การศึกษาวิธีควบคุมแบบสภาวะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ บริพัฒน์ อมรพิทักษ์วัฒนา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์	1037
GN007	การส่งสัญญาณเสียงผ่านการสื่อสารทางแสงที่มองเห็นได้แบบไร้สาย วิรัช อริยะเศรณี กฤษดา ตรีสัมพันธ์ ไกรสีหนาท โหมทวิน เต็มพงษ์ ศรีเทศ และ ปรีชา กอเจริญ	1041
GN008	ระบบควบคุมการจราจรของ AGV ประสิทธิ์ นครราช และ สุวิทย์ บัวใหญ่	1045
GN009	การพัฒนาเครื่องอบกล้วยน้ำว้าโดยใช้ความร้อนในระบบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว สุชาติ แยมแมน ปิยะนันท์ เจริญสรรค์ พีระศักดิ์ ฉายประสาท และ วรวัช พาทา	1049

# การศึกษาวิธีการควบคุมแบบสถานะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ An Investigation in an Inherent Robustness Control of Three Level Inverter

บริพัทธ์ อมรพิทักษ์วัฒนา<sup>1</sup> และ วันชัย ทรัพย์สิงห์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-3400 E-mail: w.subsinghaa@gmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาวิธีการควบคุมแบบสถานะคงทนของอินเวอร์เตอร์สามระดับ โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการทำงานและการผิดพลาด(Fault)ของอุปกรณ์กำลังในอินเวอร์เตอร์สามระดับ รวมถึงการทำงานในสภาวะคงทน(Robustness) โดยระบบประมวลผลจะทำการสร้างสัญญาณควบคุมจากสามระดับให้เป็นแบบสองระดับ ในกรณีที่เกิดผิดพลาดกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์สามระดับสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเกิดผิดพลาดกับอุปกรณ์กำลัง

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์สามระดับ, การควบคุมแบบสถานะคงทน

## Abstract

This paper presents the concept of an investigation in an inherent robustness control of three level inverter. Matlab/Simulink is utilized for simulation study in control operation and power switch device fault. Control section going to generate firing pulse for three level and alternate to two levels when power devices fault occurred. The simulation result show that three level inverter was continued running during power switch devices fault occurred.

**Keywords:** Multilevel Inverter, Robustness Control, Matlab/Simulink

## 1. บทนำ

การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานอุตสาหกรรมทั่วไปนิยมใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็ว โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาให้อินเวอร์เตอร์มีทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น ลดฮาร์โมนิกคิสมรณะของกระแส(Harmonic Distortion) ลดการสูญเสียจากการสวิตช์และเพิ่มแรงดันเอาต์พุตให้กับอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการพัฒนาจากอินเวอร์เตอร์สองระดับไปเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีระดับสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์สองระดับกับอินเวอร์เตอร์สามระดับในงานอุตสาหกรรมทั่วไป จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากันขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตแต่อินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีค่าฮาร์โมนิกคิสมรณะของกระแสต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับเมื่อทำงานที่ความถี่สวิตช์เท่ากัน อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นจะใช้

จำนวนของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมากกว่าอีกทั้งมีค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงมากกว่า กรณีที่เครื่องจักรมีความจำเป็นที่จะต้องเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเมื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชำรุดหรือเสียหาย การหยุดเพื่อซ่อมบำรุงอาจมีผลกระทบต่อสายงานการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการควบคุมแบบสถานะคงทนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์ยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยระบบควบคุมจะทำการตรวจสอบหาจุดที่สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชำรุดหรือเสียหายจากนั้นจะทำการต่อตรง(Bypass) สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ชำรุดหรือเสียหายนั้นแล้วทำการปรับโครงสร้างของสัญญาณควบคุมจากสามระดับเป็นสัญญาณควบคุมสองระดับทำให้อินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานต่อไปได้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

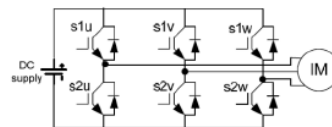
### 2.1 อินเวอร์เตอร์สองระดับ (Two Level Inverter)

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สองระดับแบบแหล่งจ่ายแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัวคือ s1u, s2u, s1v, s2v, s1w และ s2w สถานะของการสวิตช์จะแบ่งเป็นสองสถานะ คือถ้าสวิตช์ตัวบนทำงาน (เฟส a, เฟส b, เฟส c) มีสถานะเป็น 1 และถ้าสวิตช์ตัวล่างทำงานจะมีสถานะศูนย์(เฟส a', เฟส b', เฟส c') ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างสาย กับสถานะของการสวิตช์ดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_d \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสกับสถานะ การสวิตช์แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2)$$



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับ

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับในแต่ละเฟสจะมีสวิตช์อิเล็คทรอนิกส์กำลังสองตัว ดังนั้นรูปแบบการสวิตช์ทั้งหมดเท่ากับ 23 รูปแบบ เมื่อแทนค่ารูปแบบการสวิตช์ลงใน สมการที่ (1) และ (2) จะได้ขนาดแรงดันเฟสและแรงดันระหว่างสายคิ่งตารางที่ 1

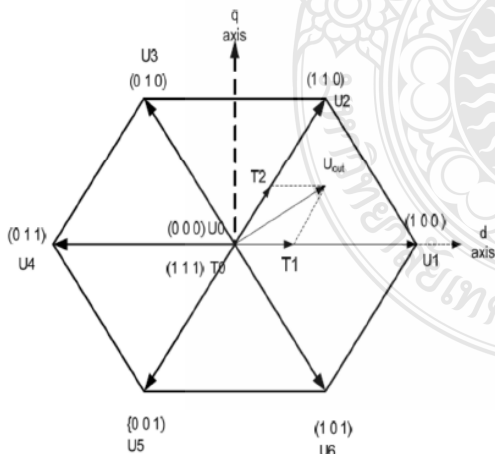
ตารางที่ 1 รูปแบบการสวิตช์กับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

a	b	c	V <sub>ao</sub>	V <sub>bo</sub>	V <sub>co</sub>	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>
0	0	0	-V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	0	0	0
0	0	1	-V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /3	-V <sub>d</sub> /3	2V <sub>d</sub> /3
0	1	0	-V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /3	2V <sub>d</sub> /3	-V <sub>d</sub> /3
0	1	1	-V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	-2V <sub>d</sub> /3	V <sub>d</sub> /3	V <sub>d</sub> /3
1	0	0	V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	2V <sub>d</sub> /3	-V <sub>d</sub> /3	-V <sub>d</sub> /3
1	0	1	V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /3	-2V <sub>d</sub> /3	V <sub>d</sub> /3
1	1	0	V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	-V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /3	V <sub>d</sub> /3	-2V <sub>d</sub> /3
1	1	1	V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	V <sub>d</sub> /2	0	0	0

เมื่อกำหนดให้แกน  $\alpha$  และ แกน  $\beta$  คือแกนในแนวตั้งและแนวนอนของมอเตอร์สามเฟสจะได้สมการในการแปลงจากระบบ 3 แกนเป็น 2 แกน ซึ่งเรียกว่า Park's Transformation ดังสมการที่ (3)

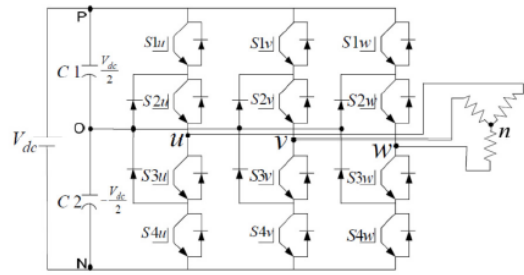
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) จะได้ขนาดของเวกเตอร์แรงดันทั้งหมด 8 เวกเตอร์โดยมีเวกเตอร์ศูนย์ 2 เวกเตอร์ซึ่งมีรูปแบบการสวิตช์เป็น (0, 0, 0) และ (1, 1, 1) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบสวิตช์กับเวกเตอร์แรงดันในอินเวอร์เตอร์สองระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยทั่วไปมีหลายรูปแบบแต่ที่นิยมใช้คือแบบไดโอดคลัมป์ (Diode Clamped Multilevel Inverter)



รูปที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดคลัมป์

## 2.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

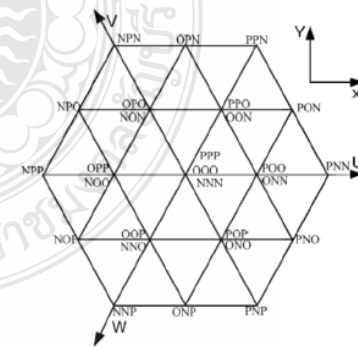
ซึ่งวงจรมอเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 3 แต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วย Free-Wheeling Diode สี่ตัว Clamping Diodes สองตัวต่ออยู่กับจุด Neutral Point (O) แรงดันที่จุด P O N เทียบกับจุดอ้างอิง O จะได้แรงดัน 3 ระดับคือ V<sub>po</sub> เป็นแรงดันไฟกร่อม C1, แรงดัน V<sub>oo</sub> เป็นแรงดันที่จุดอ้างอิง และแรงดัน V<sub>no</sub> เป็นแรงดันไฟตรงกร่อมตัวเก็บประจุ C2 ซึ่งสามารถสรุปสถานะของการสวิตช์ในแต่ละเฟสได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบการสวิตช์กับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

Switch State	S1x	S2x	S3x	S4x	V <sub>x0</sub>
P	On	On	Off	Off	V <sub>dc</sub> /2
O	Off	On	On	Off	0
N	Off	Off	On	On	-V <sub>dc</sub> /2

(พิจารณา 1 Lag เมื่อ x=u,v,w)

เนื่องจาก มีสถานการณ์สวิตช์ในแต่ละเฟสมีอยู่ 3 สถานะ ดังนั้นจึงสามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 สถานะ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 สถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

กำหนดให้แรงดันระหว่างเฟสของมอเตอร์แทนด้วย V<sub>un</sub>, V<sub>vn</sub> และ V<sub>wn</sub> แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เทียบกับจุดศูนย์แทนด้วย V<sub>uo</sub>, V<sub>vo</sub> และ V<sub>wo</sub> จะ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสของมอเตอร์กับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (4)



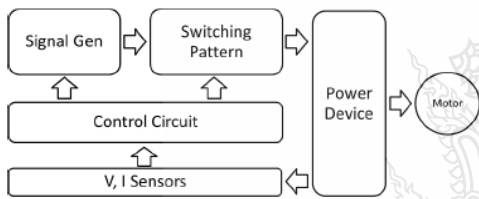
$$\begin{bmatrix} V_{UN} \\ V_{VN} \\ V_{WN} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \times \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{U0} \\ V_{V0} \\ V_{W0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่แรงดันที่เวลาใดๆของมอเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$\begin{bmatrix} V_{UN} \\ V_{VN} \\ V_{WN} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

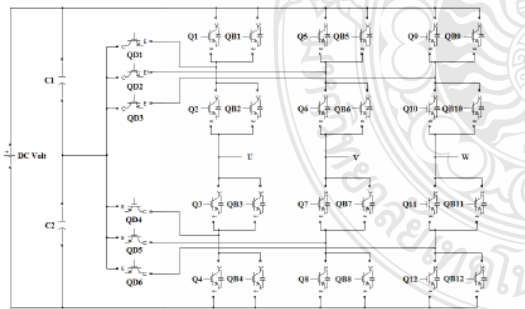
### 2.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทน

โคแอสแตรมแสดงโครงสร้างการควบคุมแบบสภาวะคงทนที่นำเสนอของอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 5 โดยจะรับค่าแรงดันและกระแสจากเซ็นเซอร์แล้วทำการเปรียบเทียบกับเวกเตอร์แรงดันในแต่ละสถานะของการสวิตช์เพื่อหาตำแหน่งที่ผิดพร่องของวงจรกำลัง



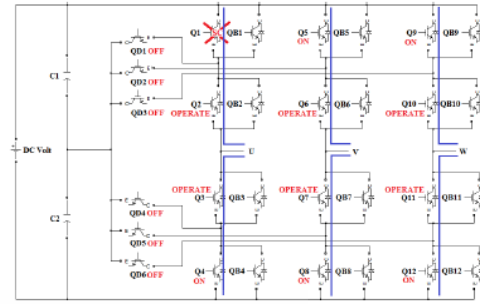
รูปที่ 5 โครงสร้างการควบคุมแบบสภาวะคงทนที่นำเสนอ

วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้การควบคุมแบบสภาวะคงทนจะเพิ่มสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำหน้าที่ Back up (QBx) การทำงานของสวิตช์หลัก(Qx) และใช้งานแทนไดโอด(QDx) ดังรูปที่ 6



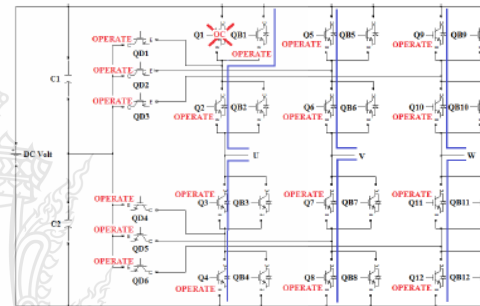
รูปที่ 6 วงจรกำลังของระบบที่นำเสนอ

กรณีที่เกิด Short Circuit(SC): ที่สวิตช์กำลังระบบควบคุมจะเปลี่ยนการทำงานจากสามเป็นสองระดับโดยสั่งให้สวิตช์กำลังที่อยู่ในระดับเดียวกันกับสวิตช์กำลังที่เกิด SC ทำการ On ค้างตลอดเวลาในขณะที่เดียวกันก็ตัดการทำงานของสวิตช์กำลัง QDx ยกตัวอย่างเช่น สวิตช์กำลัง Q1 เกิด SC สวิตช์กำลัง Q5, Q9, Q4, Q8 และ Q12 จะ On ค้าง สวิตช์กำลัง QD1-QD6 จะถูกตัดการทำงาน และระบบควบคุมจะสั่งการให้ Q2, Q6, Q10, Q3, Q7 และ Q11 ทำงานในแบบสองระดับดังรูปที่ 7



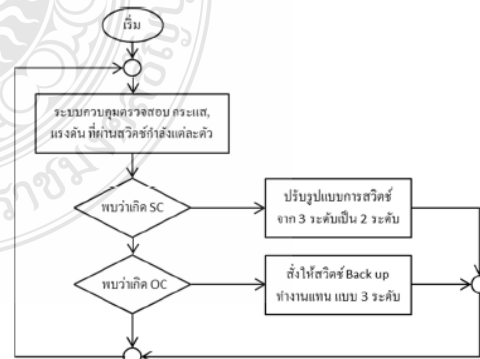
รูปที่ 7 การทำงานของควบคุมเมื่อเกิด Short Circuit(SC)

กรณีที่เกิด Open Circuit(OC): ที่สวิตช์กำลังระบบควบคุมจะเปลี่ยนการทำงานจากสวิตช์กำลังหลัก(Qx)ที่เกิด OC ไปเป็นสวิตช์กำลังที่ใช้ทำการ Back up(QBx) แทนโดยระบบควบคุมจะสั่งการให้ทำงานในแบบสามระดับเช่นเดิม ดังรูปที่ 8 เมื่อสวิตช์กำลัง Q1 เกิด OC สวิตช์กำลัง QB1 จะทำหน้าที่แทน



รูปที่ 8 การทำงานของควบคุมเมื่อเกิด Open Circuit(OC)

ซึ่งรูปแบบการตรวจหาจุดผิดพร่องของสวิตช์กำลังและการทำงานแบบสภาวะคงทนสามารถเขียนเป็น Flow chart ได้ดังรูปที่ 9 โดยการทำงานของระบบควบคุมจะทำงานต่อเนื่องในช่วงที่อินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานอยู่ตลอดซึ่งหมายถึงการควบคุมแบบสภาวะคงทนจะทำงานในรูปแบบ Real time

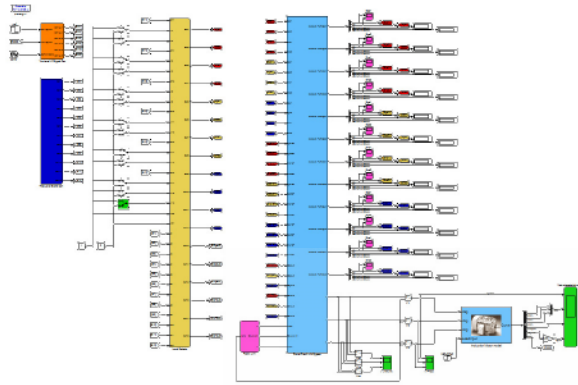


รูปที่ 9 Flow chart การทำงานของระบบ

### 2.4 จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

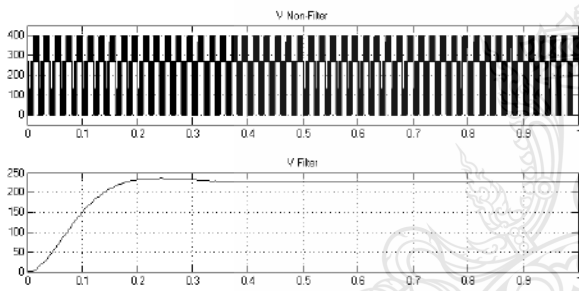
ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ของอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทนนี้จะใช้ความสามารถของสวิตช์

คลื่นพาห์ที่ 5kHz, ความถี่หลักมูล 50 Hz, และค่า Duty Cycle ที่ 0.8 ต่อเข้ากับแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3.7kW ดังรูปที่ 9



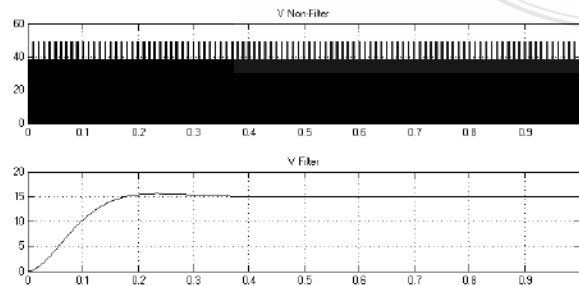
รูปที่ 9 แบบจำลองการทำงานของระบบด้วย Matlab/Simulink

เมื่อทำการกำหนดค่า Speed command ให้อินเวอร์เตอร์มีอัตราเร่งขาขึ้นและขาลงที่ 0.7 Sec กลับทางหมุนใช้เวลา 1.5 Sec เมื่อวัดค่าของกระแสและแรงดันที่ผ่านเฉพาะ Q1 จะได้รูปคลื่นของแรงดันทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านวงจรกรองอันดับ1 ที่โดยมีความถี่ตัดค่าที่ 1 kHz ดังรูปที่ 10

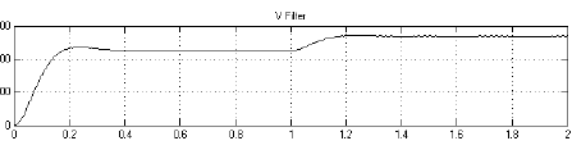
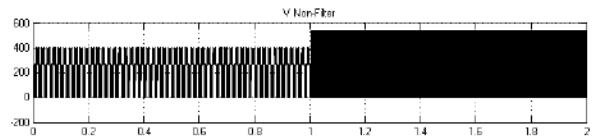


ค่าของแรงดันและกระแสที่ผ่านสวิตช์กำลังแต่ละตัวเช่น Q1 ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นตัวตรวจสอบสถานะการทำงานของสวิตช์กำลัง ดังนั้นเมื่อเกิด Short Circuit หรือ Open Circuit ที่สวิตช์กำลัง รูปคลื่นขนาดของแรงดันและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถแยกแยะได้ว่าเป็น Short Circuit หรือ Open Circuit ที่สวิตช์กำลังตัวนั้น ดังรูปที่ 11 เมื่อเกิดการ Short Circuit ที่ Q1

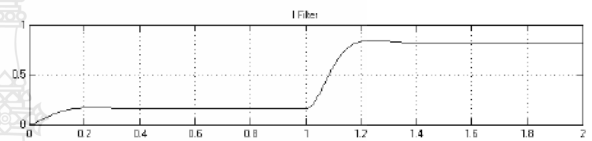
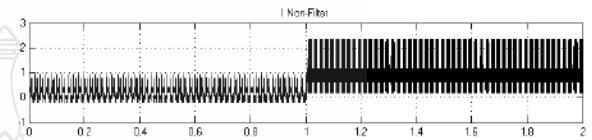
จากค่าของกระแสและแรงดันที่วัดจากสวิตช์กำลังทุกตัวเมื่อนำมาประมวลผลทำให้สามารถปรับ โครงสร้างของสัญญาณควบคุมจากสามระดับเป็นสองระดับ ดังรูปที่ 12, 13 และ 14



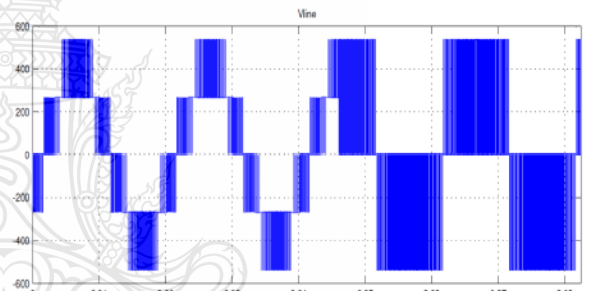
รูปที่ 11 กราฟผลการจำลองแรงดันเมื่อเกิด Short Circuit ที่ Q1



รูปที่ 12 กราฟผลการจำลองแรงดันที่ Q1 เมื่อเปลี่ยนจากสามระดับเป็นสองระดับ



รูปที่ 13 กราฟผลการจำลองกระแสที่ Q1 เมื่อเปลี่ยนจากสามระดับเป็นสองระดับ



รูปที่ 14 กราฟผลการจำลองแรงดันขณะเปลี่ยนระดับการทำงาน

### 3. สรุป

จากผลการจำลองการทำงานการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบสภาวะคงทนแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเกิดข้อผิดพลาดพร้อมๆกับอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Holdsworth Lee, "An Investigation into the Inherent Robustness and Optimal Harmonic Performance of the Advanced Static Var Compensator (ASVC)," Ph.D. Thesis, University of Northumbria at Newcastle (UNN), England, April 2001.
- [2] Meng Yeong Lee, "Three-level Neutral-point-clamped Matrix Converter Topology," Ph.D. Thesis, University of Nottingham, England, March 2009.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายบริพัฒน์ อมรพิทักษ์วัฒนา
วัน เดือน ปีเกิด	9 พฤษภาคม 2518
ที่อยู่	41/255 ซอย 16 หมู่บ้านพรชิสาร 8 ถ.ลำลูกกา-วังน้อย ต.คลองเจ็ด อ.คลองหลวง ปทุมธานี 12120
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมและโครงการ บริษัท ทอร์นัมเอเชีย จำกัด (พ.ศ. 2559 – ปัจจุบัน)
เบอร์โทรศัพท์	098-268-2920
อีเมล	boripat9@hotmail.com

