

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม  
เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นในการสร้างกระแสอ้างอิงโดยใช้  
ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

A SINGLE-PHASE SHUNT ACTIVE POWER FILTER USING MULTILAYER  
PERCEPTRON NEURAL NETWORK FOR REFERENCE CURRENT  
GENERATION BASED ON DIGITAL SIGNAL CONTROLLER

เอกวิทย์ หายักวงษ์  
EKKAWID HAYAKWONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

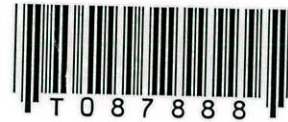
พ.ศ. 2551

KMUTL-2003-EN-14-020-191

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม  
เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นในการสร้างกระแสอ้างอิงโดยใช้  
ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

A SINGLE-PHASE SHUNT ACTIVE POWER FILTER USING MULTILAYER  
PERCEPTRON NEURAL NETWORK FOR REFERENCE CURRENT  
GENERATION BASED ON DIGITAL SIGNAL CONTROLLER



เอกวิทย์ หายักวงษ์

EKKAWID HAYAKWONG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87888  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ค. 2552

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-020-181

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์      วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นในการสร้างกระแสอ้างอิงโดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

Thesis Title              A Single-Phase Shunt Active Power Filter using Multilayer Perceptron Neural Network for Reference Current Generation Based-on Digital Signal Controller

นักศึกษา                      นายเอกวิทย์ หายังวงษ์

รหัสประจำตัว              46060721

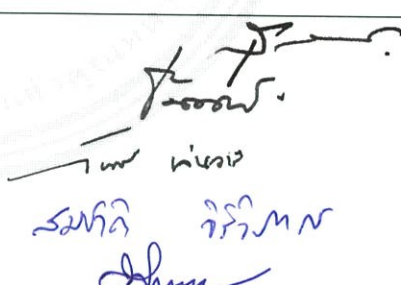
ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                    วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.วิจิตร      กิณเรศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม      รศ.ดร.สมชาติ      จิริวิภากร

หมายเลขวิทยานิพนธ์              KMITL-2008-EN-M-020-181

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สุรินทร์	คำฝอย	
รศ.ดร.ชนินทร์	บุญลักษณ์ นุสรณ์	
ดร.วันจักรี	เล่นวารี	
รศ.ดร.สมชาติ	จิริวิภากร	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ      วันศุกร์ที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2551 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ      ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 29 กันยายน พ.ศ. 2551

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่ใช้โครงข่าย ประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นในการสร้างกระแสอ้างอิง โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล
นักศึกษา	นายเอกวิทย์ หายักวงษ์
รหัสนักศึกษา	46060721
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2551
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบพื้นฐานในการสร้างกระแสอ้างอิงให้กับวงจรของอินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายกระแสชดเชยให้กับระบบ ทำให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นที่นำมาใช้จะเป็นโครงข่ายแบบป้อนไปหน้า ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผลสูง ทำให้ได้สัญญาณกระแสอ้างอิงแบบทันทีทันใด ในการวิจัยได้ออกแบบจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK ส่วนการควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบจะอยู่ในระบบดิจิทัล โดยใช้ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ได้มีการทดสอบการทำงานภายใต้สภาวะคงที่กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เช่น วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

<b>Thesis Title</b>	A Single-Phase Shunt Active Power Filter using Multilayer Perceptron Neural Network for Reference Current Generation Based on Digital Signal Controller
<b>Student</b>	Mr.Ekkawid Hayakwong
<b>Student ID.</b>	46060721
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares
<b>Thesis Cooperate Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Somchat Jiriwibhakorn

### **ABSTRACT**

This paper presents a single-phase shunt Active Power Filter (APF) using Multi Layer Perceptron (MLP) neural network which is a basic type for generating reference current. The reference current is used for controlling inverter operation supplying the compensated current to the system. The proposed APF is able to eliminate current harmonics and improve power factor. The MLP neural network is a feed forward type. The processing speed is very high for obtaining the real-time reference current. The proposed system is analyzed by using MATLAB/SIMULINK program. All of the possessing control systems are implemented by a single chip Digital Signal Controller (DSC). Testing under a steady-state condition with non-linear loads such as full-wave diode bridge rectifiers is given. The results appear satisfactory.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. วิจิตร ถิณเรศ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.สมชาติ จิรวิภากร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ และทุนการศึกษา รวมทั้งเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณทุกๆ คนในห้องวิจัย ECC405 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา และบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเสกสรร คุณแม่วิไลพร หายักวงษ์ และน้องๆ ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกวิทย์ หายักวงษ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 วิธีการศึกษาและวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ประเภทของวงจรกรอง.....	5
2.2.1 วงจรกรองแพสซีฟ.....	5
2.2.1.1 วงจรกรองชนิดกรองเดี่ยว.....	6
2.2.1.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน.....	6
2.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	6
2.2.2.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	7
2.2.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	7
2.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ.....	10
2.4 การประเมินสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยดัชนีคุณภาพ.....	11
2.4.1 แรงดันและกระแสมูลฐานอาร์เอ็มเอส.....	11
2.4.2 แรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอส.....	12
2.4.3 ค่าประกอบกำลังด้านเข้า.....	12
2.4.4 ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 ค่าองค์ประกอบความผิดพลาดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิก.....	12
2.5 การชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ.....	13
2.5.1 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	12
2.5.2 ประโยชน์จากการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ.....	14
2.6 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก.....	15
2.6.1 มาตรฐาน IEC.....	16
2.6.2 มาตรฐาน IEEE.....	16
2.7 สรุป.....	16
บทที่ 3 โคร่งข่ายประสาทเทียม.....	17
3.1 บทนำ.....	17
3.2 ความเป็นมาของ โคร่งข่ายประสาทเทียม.....	17
3.3 โคร่งข่ายประสาททางชีววิทยา.....	18
3.4 สถาปัตยกรรมของโคร่งข่ายประสาทเทียม.....	19
3.4.1 แบบจำลองของนิวรอน-นิวรอนแบบอินพุตเดียว.....	19
3.4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน.....	20
3.4.3 แบบจำลองของนิวรอน-นิวรอนแบบหลายอินพุต.....	22
3.5 สถาปัตยกรรมของข่ายงาน.....	23
3.5.1 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว.....	24
3.5.2 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น.....	24
3.5.3 ข่ายงานแบบเวียนเกิด.....	25
3.5.4 ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ.....	26
3.6 กระบวนการเรียนรู้.....	27
3.6.1 การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด.....	28
3.6.2 การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน.....	29
3.6.3 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน.....	30
3.7 โคร่งข่ายเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น.....	30
3.8 โคร่งข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา.....	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8.1 การเรียนรู้ตามลำดับเวลา.....	33
3.8.2 โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา.....	34
3.9 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	35
3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
3.11 สรุป.....	41
บทที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	42
4.1 บทนำ.....	42
4.2 การวิเคราะห์และหลักการสร้างกระแสอ้างอิง.....	42
4.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ากระแสแอกทีฟ.....	43
4.4 การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ากระแสแอกทีฟ.....	44
4.4.1 การเลือกตัวแปรในการฝึกสอน.....	44
4.4.2 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ.....	45
4.4.3 เงื่อนไขการฝึกสอน.....	44
4.4.3.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส.....	47
4.4.3.2 ลำดับขั้นตอนในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส.....	47
4.4.3.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส.....	47
4.4.3.4 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม.....	48
4.4.3.5 ชนิดของฟังก์ชันการถ่ายโอน.....	49
4.4.4 การฝึกสอน.....	49
4.4.5 ผลการฝึกสอน.....	50
4.4.6 โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการฝึกสอน.....	51
4.5 หลักการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	54
4.5.1 การวิเคราะห์เทคนิคการควบคุมกระแสแบบขอบเขตอีสเตอริซีส.....	55
4.5.2 หลักการทำงานของโหมดการสวิตช์.....	59
4.5.2.1 โหมดการทำงานที่ 1.....	60
4.5.2.2 โหมดการทำงานที่ 2.....	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.2.3 โหมดการทำงานที่ 3 .....	61
4.5.2.2 โหมดการทำงานที่ 4 .....	61
4.6 ผลการจำลองการทำงาน .....	62
4.7 บทสรุป .....	66
บทที่ 5 การออกแบบและสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟ .....	67
5.1 บทนำ .....	67
5.2 การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า .....	68
5.2.1 ตัวเก็บประจุไฟตรง .....	68
5.2.2 ตัวเหนี่ยวนำรอกกระแส .....	68
5.2.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน .....	69
5.2.4 วงจรสวิตช์กำลัง .....	69
5.3 การออกแบบและสร้างวงจรประวิงเวลา .....	71
5.4 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสเกิน .....	73
5.5 การออกแบบวงจรป้องกันภาคกำลัง .....	74
5.6 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณของวงจรควบคุม .....	75
5.6.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน .....	75
5.6.1.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ .....	75
5.6.1.2 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟตรง .....	76
5.6.2 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส .....	77
5.7 ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล .....	78
5.7.1 คุณสมบัติของซีพียู .....	78
5.7.2 สถาปัตยกรรมของ dsPIC30F6010 .....	80
5.8 การออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุม .....	82
5.8.1 โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล .....	83
5.8.2 โปรแกรมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม .....	84
5.8.3 โปรแกรมส่วนควบคุมการสร้างกระแส .....	84
5.9 บทสรุป .....	85

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ผลการทดลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ.....	86
6.1 บทนำ.....	86
6.2 ผลการทดลองการตรวจับกระแสฮาร์โมนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....	86
6.3 ผลการทดลองวงจรรอกำลังแอกทีฟในกรณีโหลดไดโอดเรียงกระแส.....	87
6.4 การประเมินสมรรถนะของวงจรรอกำลังแอกทีฟ.....	89
6.5 บทสรุป.....	91
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	92
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
7.2 ข้อเสนอแนะและการพัฒนางานวิจัยต่อไป.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์.....	96
ภาคผนวก ข. โครงงานต้นแบบในงานวิทยานิพนธ์.....	99
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	120

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบวงจรกรองแอสซีฟและแอกทีฟ..... 8
2.2	เปรียบเทียบวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานและอนุกรม..... 9
2.3	นิยามของดัชนีและปริมาณที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพรูปคลื่นกระแสอินพุต..... 13
2.4	ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC61000-3-2..... 16
2.5	ข้อกำหนดของกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE 519..... 16
3.1	เปรียบเทียบแบบจำลองนิวรอนกับสมองมนุษย์..... 20
3.2	ฟังก์ชันการกระตุ้นชนิดต่างๆ..... 21
3.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 39
4.1	จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาท..... 46
4.2	ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน hyperbolic-tangent sigmoid และฟังก์ชัน linear..... 51
4.3	ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน log sigmoid และฟังก์ชัน linear..... 51
4.4	เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันของตัวเก็บประจุ..... 62
4.5	ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน..... 62
6.1	การทดลองโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส แบบเต็มคลื่น..... 90
6.2	ค่าดัชนีคุณภาพทดสอบที่พิกัดไฟฟ้าก่อนใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน..... 90
6.3	ค่าดัชนีคุณภาพทดสอบที่พิกัดไฟฟ้าหลังใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน..... 90

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบที่ใช้วงจรกรองแพสซีฟ.....	5
2.2 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....	7
2.3 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม.....	8
2.4 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานแบบผสม.....	10
2.5 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	14
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์ประสาท.....	18
3.2 นิวรอนอินพุตเดียว.....	19
3.3 ฟังก์ชันการกระตุ้นชนิด Hard limit และฟังก์ชันการกระตุ้นที่ถูกเลื่อนในแกนนอนตามค่าไบอัส.....	20
3.4 ฟังก์ชันการกระตุ้นชนิด Linear และฟังก์ชันการกระตุ้นที่ถูกเลื่อนในแกนนอนตามค่าไบอัส.....	21
3.5 ฟังก์ชันการกระตุ้นชนิด Log-sigmoid และฟังก์ชันการกระตุ้นที่ถูกเลื่อนในแกนนอนตามค่าไบอัส.....	21
3.6 นิวรอนหลายอินพุต.....	23
3.7 การกำหนดรูปแบบสัญลักษณ์ของนิวรอน.....	23
3.8 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีนิวรอนชั้นเดียว.....	24
3.9 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นที่มีชั้นซ่อนหนึ่งชั้น.....	25
3.10 ข่ายงานแบบเวียนเกิดที่ไม่มีวงป้อนกลับในตัวเองและไม่มีนิวรอนซ่อน.....	25
3.11 ข่ายงานแบบเวียนเกิดที่มีนิวรอนซ่อน.....	26
3.12 ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ.....	27
3.13 การจำแนกประเภทกระบวนการเรียนรู้.....	28
3.14 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน.....	29
3.15 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน.....	30
3.16 โครงข่ายชั้นเดียวที่มี S นิวรอน.....	31
3.17 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายชั้นเดียวในรูปของเมตริกซ์.....	32
3.18 โครงข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์.....	33
3.19 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายหลายชั้นในรูปของเมตริกซ์.....	33
3.20 โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา.....	34
3.21 ขั้นตอนวิธีเรียนรู้แบบแพร่กลับ.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	วงจรรูปร่างพื้นฐานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....42
4.2	การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างกระแสอ้างอิง.....44
4.3	รูปคลื่นข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....45
4.4	การลู่เข้าหาคำตอบของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสในแต่ละรอบของการฝึกสอน.....48
4.5	โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนที่มีจำนวน 3 ชั้น.....48
4.6	ฟังก์ชันการถ่ายโอน.....50
4.7	โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนที่ได้จากการฝึกสอน.....52
4.8	โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก.....52
4.9	โครงสร้างวงจรถ่วงกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 1 เฟส แบบขนาน ที่ใช้ในงานวิจัย.....55
4.10	สัญญาณกระแสและการสวิตช์ของการควบคุมกระแสแบบติดตาม ขอบเขตฮิสเตอร์รีซีต.....56
4.11	รูปคลื่นกระแสของอินเวอร์เตอร์ตามสภาวะโหมดการควบคุมของสวิตช์.....59
4.12	การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 1.....60
4.13	การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 2.....60
4.14	การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 3.....61
4.15	การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 4.....61
4.16	รูปแบบของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่จำลองการทำงาน ด้วยโปรแกรม Matlab / Simulink.....63
4.17	โครงข่ายประสาทเทียมที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink.....63
4.18	ผลการจำลองการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในช่วงสภาวะคงตัว.....64
4.19	กระแสชดเชย กระแสชดเชยอ้างอิง และแรงดันการสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....65
4.20	ผลการตอบสนองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการเพิ่ม โหลดอย่างฉับพลัน.....66
5.1	โครงสร้างส่วนประกอบของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส.....67
5.2	โครงสร้างไอจีบีทีโมดูลกำลัง PM25RSB120 (IPM) .....70
5.3	วงจรแยกกราวด์ก่อนเข้าสู่จุดขั้วเกต ไอจีบีทีกำลัง.....71
5.4	อินเวอร์เตอร์ของเครื่องต้นแบบ.....71
5.5	วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา.....72
5.6	วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลาของวงจรต้นแบบ.....72
5.7	วงจรตรวจจับกระแสเกิน.....73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 วงจรป้องกันภาคกำลัง.....	74
5.9 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน.....	76
5.10 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันของเครื่องต้นแบบ.....	76
5.11 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	77
5.12 ชุดวงจรตรวจจับสัญญาณกระแสของเครื่องต้นแบบ.....	77
5.13 บอร์ดตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010 ของเครื่องต้นแบบ.....	80
5.14 โครงสร้างของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010.....	81
5.15 เครื่องต้นแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส.....	81
5.16 โครงสร้างโปรแกรมหลักที่ใช้ในการควบคุมของวงจรกำลังแอกทีฟ.....	82
5.17 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล.....	83
5.18 โครงสร้างโปรแกรมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....	84
5.19 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมกระแสแบบขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส.....	85
6.1 รูปคลื่นกระแสแอกทีฟที่ได้จากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล โดยใช้โครงข่ายประสาท.....	87
6.2 รูปคลื่นกระแสโหลด กระแสแหล่งจ่าย และกระแสชดเชย กรณีโหลดเป็นวงจร เรียงกระแสเต็มคลื่นภาระโหลด 600VA.....	88
6.3 สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่าย กรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น 600VA.....	88
6.4 รูปคลื่นกระแสโหลด กระแสแหล่งจ่าย และกระแสชดเชย กรณีโหลดเป็นวงจร เรียงกระแสเต็มคลื่นภาระโหลด 1.2 kVA.....	89
6.5 สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่าย กรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น 1.2 kVA.....	89

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานที่เพิ่มขึ้น ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบัน ดังเช่น คอนเวอร์เตอร์และ อุปกรณ์สวิตชิง ทำให้เกิดปัญหาสำคัญซึ่งไม่อาจจะเลยได้ นั่นก็คือปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิด จากฮาร์มอนิก โดยที่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่ง อาจกล่าวได้ว่าฮาร์มอนิกเป็นมลพิษในระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกจึงเป็น ปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่ต้องตระหนัก และหาหนทางแก้ไข โดยผลเสียที่เกิดจากฮาร์มอนิกพอ จำแนกได้ดังต่อไปนี้

1. เครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสีย ที่ขดลวด และกำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็กมากขึ้น จึงทำให้มอเตอร์มีความร้อนสูง อีกทั้งเกิดการ สั่นสะเทือนในขณะที่มอเตอร์หมุน ส่งผลให้เกิดเสียงรบกวนขึ้น ด้วยเหตุดังกล่าวจะทำให้มอเตอร์มี อายุการใช้งานสั้นลง

2. หม้อแปลงไฟฟ้า ผลจากกระแสฮาร์มอนิก จะทำให้หม้อแปลงมีความร้อนสูงขึ้นเนื่อง จากกำลังงานสูญเสียที่ขดลวด และกำลังงานสูญเสียปลิกซ์ลอยเนื่องจากฟลักซ์ (stray flux loss) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ อาจเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวดในหม้อแปลง และตัวเก็บประจุใน ระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์อย่างยิ่งในระบบ

3. สายเคเบิลกำลัง ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบสายส่ง จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) และปรากฏการณ์ความใกล้เคียง (proximity effect) ส่งผลให้มี ความร้อนสูงขึ้น อาจทำให้ฉนวนของสายส่งชำรุดเสียหายได้ อีกทั้งความต้านทานในสายส่งจะมีค่า มากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าเดิม

4. ตัวเก็บประจุ ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปมีการต่อชุดตัวเก็บประจุ (capacitor bank) เพื่อ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และเมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าตัวเก็บประจุ ทำให้ตัวเก็บประจุ มีความร้อนสูง เนื่องจากเกิดกำลังงานสูญเสียที่ไดอิเล็กตริก นอกจากนี้การเกิดฮาร์มอนิก อาจทำให้ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้

5. เครื่องมือวัดปริมาณทางไฟฟ้า เช่น วัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้ รับผลกระทบอย่างมากจากการเกิดฮาร์มอนิกในระบบ เนื่องจากเครื่องมือวัดดังกล่าว ถูกออกแบบ เพื่อวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่มีรูปสัญญาณเป็นไซน์บริสุทธิ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมิเตอร์วัดวัตต์-ชั่วโมง จะมีความคลาดเคลื่อนในการบันทึกค่า เมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้น ส่งผลให้ผู้ใช้บริการจ่ายค่าไฟมากขึ้น กว่าความเป็นจริง

1. ศึกษาหลักการ และคุณสมบัติของวงจรรอกกำลังแบบต่างๆ
2. ศึกษาทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ
3. จำลองการทำงานของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบทฤษฎีในการหากระแสฮาร์มอนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
4. ออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบ โปรแกรมควบคุมการทำงาน เพื่อทำการศึกษา
5. ตรวจสอบผล ปรับปรุงระบบที่ได้พัฒนาขึ้น สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

พัฒนาและสร้างเครื่องต้นแบบ วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส ที่ใช้เทคนิคการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น สำหรับใช้กับระบบไฟฟ้ากำลัง 1 เฟส 220 V 50 Hz โดยโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 1 kVA วงจรรอกกำลังแอกทีฟ สามารถใช้แก้ไขตัวประกอบกำลังและกรองกระแสฮาร์มอนิกได้

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการศึกษาด้านพื้นฐานเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น
2. เป็นแนวทางในการศึกษาวิธีกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ข้อดี ข้อเสียของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่น่าเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วงจรรอกกำลังแบบอื่น
3. เป็นข้อมูลทางเทคนิค ในการประยุกต์ใช้งาน ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) เบอร์ dsPIC30F6010 ในการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

#### 1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึง ความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในแบบต่างๆ การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ การประเมินกระแสด้วยดัชนีคุณภาพ และมาตรฐานของฮาร์มอนิก

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีของโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 4 กล่าวถึง การวิเคราะห์ และออกแบบพารามิเตอร์ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ขนานแบบ ที่มีการสร้างกระแสอ้างอิงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับสร้างกระแสอ้างอิง พร้อมจำลองการทำงานทั้งระบบด้วย โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

บทที่ 5 การออกแบบวงจรกำลัง วงจรควบคุมการทำงาน และวงจรป้องกันความเสียหาย  
ของเครื่องต้นแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 6 การทดลอง และผลการทดลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่ทดสอบกับโหลดชนิด  
ไม่เป็นเชิงเส้น

บทที่ 7 บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

### 2.1 บทนำ

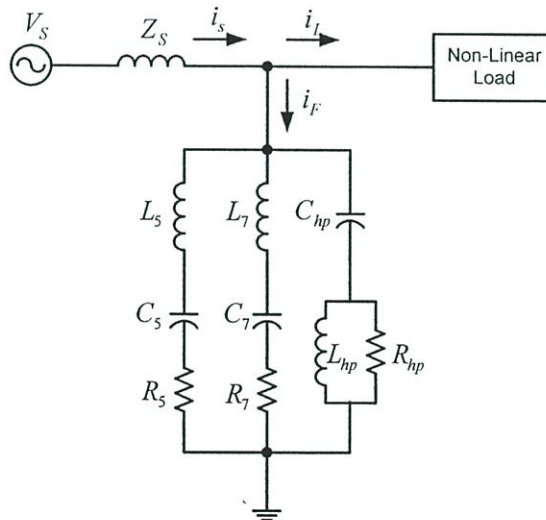
ในบทนี้จะกล่าวถึง รายละเอียดของหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ด้วยวงจรกรองชนิดต่างๆ เช่น วงจรกรองกำลังพาสซีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม รวมถึงการวิเคราะห์คุณภาพของกระแสแหล่งจ่ายที่ผิดเพี้ยน เนื่องจากฮาร์มอนิก และเรื่องข้อกำหนดและมาตรฐานฮาร์มอนิก

### 2.2 ประเภทของวงจรกรอง [1]

โดยทั่วไป วงจรกรองที่นิยมใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ แบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ

#### 2.2.1 วงจรกรองพาสซีฟ

วงจรกรองพาสซีฟ ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานต่ออนุกรม เป็นวงจรเรโซแนนซ์โดยมีหลักการทำงานคือ วงจรกรองจะประพฤติตัวเป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ ความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดจึงทำให้กระแสส่วนที่เหลือมีฮาร์มอนิกลดลง และสามารถจำแนกตามความนิยมใช้ออกเป็น 2 ชนิด คือ



รูปที่ 2.1 ระบบที่ใช้วงจรกรองพาสซีฟ

### 2.2.1.1 วงจรกรองชนิดกรองเดี่ยว (Turning Filter)

การทำงานของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว เกิดจากส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานที่อยู่ในรูปขดลวดเหนี่ยวนำมาต่อเป็นวงจรโซแนนซ์แบบอนุกรม เพื่อทำให้วงจรกรองมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดที่ความถี่ปรับคลื่น (Turning Frequency) โดยมีค่าเท่ากับความต้านทานเนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่ารีแอกทีฟรีแอกแตนซ์เท่ากับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ แต่จะมีขั้วตรงกันข้ามจึงทำให้ค่ารีแอกแตนซ์หักล้างกันหมด

### 2.2.1.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (Height-Pass Filter)

จากรูปที่ 2.1 วงจรกรองความถี่สูงผ่านมีหลักการเหมือนกับวงจรกรองชนิดกรองเดี่ยว แต่จะมีตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ เพื่อทำให้เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าต่ำที่ความถี่สูง โดยคุณสมบัติการกรองจะขึ้นอยู่กับความถี่หักมุมและค่าตัวประกอบคุณภาพ

### 2.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ คือ วงจรที่มีคุณสมบัติการกำจัดกระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายโดยทำการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังงาน (Power Converter) ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกให้จ่ายแรงดัน หรือกระแสป้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมทำให้กระแสฮาร์มอนิกไม่ไหลกลับไปแหล่งจ่าย หรือแก้ไขความเพี้ยนของแรงดันในระบบได้ วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยทั่วไป จะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ

1 ส่วนตรวจจับกระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิก กระแสหรือแรงดันในระบบจะถูกตรวจจับแล้วนำมาคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกในระบบโดยอาศัยวิธีการต่างๆ

2 ส่วนควบคุม ค่ากระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จากส่วนที่ 1 จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดค่าแรงดันหรือกระแสที่วงจรกรองจะต้องจ่ายเข้าสู่ระบบ เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกตามที่ต้องการ โดยค่าแรงดันหรือกระแสจะแตกต่างกันตามหลักการของแต่ละวงจร

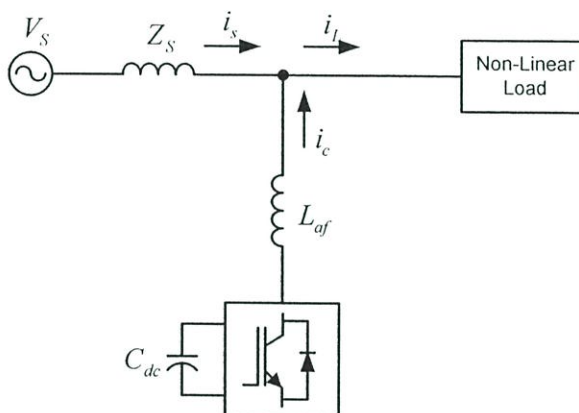
3 วงจรแปลงผันกำลัง จะทำการควบคุมแรงดันหรือกระแสของวงจรกรองให้มีค่าตามที่ส่วนควบคุม(2) กำหนด วงจรในส่วนนี้โดยทั่วไปจะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันบัสไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับ โดยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ และมีวงรอบการควบคุมกระแสรวมอยู่ด้วย สวิตช์กำลังที่ส่วนใหญ่จะเป็น IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor) หรือ GTO (Gate Turn-Off Transistor) ความถี่การสวิตช์จะอยู่ที่ประมาณ 1-20 kHz

4 วงจรเชื่อมระหว่างอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่าย วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะมีการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟผ่านตัวเหนี่ยวนำและวงจรกรองระลอกคลื่นความถี่การสวิตช์ และ

กรณีที่ใช้กับระดับแรงดันสูงก็อาจมีการต่อผ่านหม้อแปลงหรือตัวเก็บประจุ เพื่อลดขนาดแรงดันที่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ มีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับวงจรแพสซีฟ ประกอบกับปัญหาฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นและราคาอุปกรณ์ที่มีแนวโน้มลดลง ทำให้มีการนำเอาวงจรกรองแอกทีฟมาใช้เป็นจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คุณสมบัติการกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟอยู่ในระดับ 80-95% เราสามารถจำแนกชนิดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟตามวิธีการติดตั้งได้เป็น 2 ชนิด คือ

### 2.2.2.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

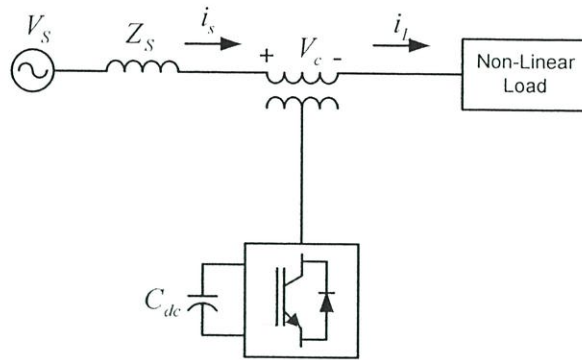


รูปที่ 2.2 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

วงจรกรองชนิดนี้จะติดตั้งขนานกับโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกดังแสดงในรูปที่ 2.2 และวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีการใช้งานจริงส่วนใหญ่ก็จะเป็นชนิดนี้ โดยมีหลักการทำงานคือวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะประพฤติตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสฮาร์มอนิกจากโหลด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกให้กับโหลดแทนแหล่งจ่าย

### 2.2.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม

วงจรกรองชนิดนี้จะต่ออนุกรมกับโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 หลักการทำงานของวงจรกรองชนิดนี้คือ วงจรกรองจะทำการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบแล้วนำไปสร้างแรงดันของวงจรให้มีเฟสตรงกันกับกระแสฮาร์มอนิก วงจรกรองจึงประพฤติตัวเป็นเสมือนความต้านทานค่าสูงเฉพาะที่ความถี่ฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกก็จะถูกกั้นไม่ให้ไหลไปยังแหล่งจ่ายได้ ในทางกลับกันกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายก็ไม่สามารถไหลไปทางด้านโหลดด้วย ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในกรณีที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนของแรงดัน และโหลดมีอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่ำ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจึงทำหน้าที่เป็นตัวแยกฮาร์มอนิกระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด



รูปที่ 2.3 ระบบที่ใช้วงจรรอกำลังแอคทีฟแบบอนุกรม

ในกรณีที่โหลดเป็นแบบแหล่งจ่ายกระแส เราจะใช้วงจรรอกแพสซีฟเป็นทางไหลของกระแสฮาร์มอนิกแทน ข้อดีข้อเสียของวงจรรอกแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบวงจรรอกแพสซีฟและแอคทีฟ

คุณสมบัติ	วงจรรอกแบบแพสซีฟ	วงจรรอกกำลังแอคทีฟ
การกำจัดฮาร์มอนิก	แยกกำจัดแต่ละลำดับได้ แต่ต้องติดตั้งวงจรกรองเรียงลำดับต่ำเสมอเพื่อป้องกันการเกิดรีโซแนนซ์	แยกกำจัดลำดับใดๆ ก็ได้ (ไม่ต้องเรียง) หรือจะกำจัดหมดก็ได้
ขนาด	ใหญ่	เล็กกว่า
ความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิก	ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายออกแบบให้ค่าสูงยาก	ไม่ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย กำจัดฮาร์มอนิกอันดับสูงได้ไม่ดี
ความเปลี่ยนแปลงของควมถี่แหล่งจ่าย	คุณสมบัติการกรองลดลง โดยเฉพาะเมื่อค่า Q สูง	ไม่เปลี่ยนแปลง
การเพิ่มปริมาณของฮาร์มอนิก	ทำให้เกิดโหลดเกิน เกิดความร้อนและเสียหายได้ การเพิ่มขนาดโดยการขนานวงจรรอกต้องระวังเรื่องการแบ่งโหลด	ไม่เกิดการโหลดเกินและสามารถเพิ่มขนาดกำลังจ่ายโดยเพิ่มเฉพาะในส่วนอินเวอร์เตอร์
ปริมาณกำลังงานรีแอคทีฟ	จ่ายกำลังงานรีแอคทีฟเสมอซึ่งอาจเกินความต้องการ	เลือกให้จ่ายกำลังงานรีแอคทีฟหรือไม่จ่ายก็ได้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบวงจรกรองแพลซีฟและแอกทีฟ (ต่อ)

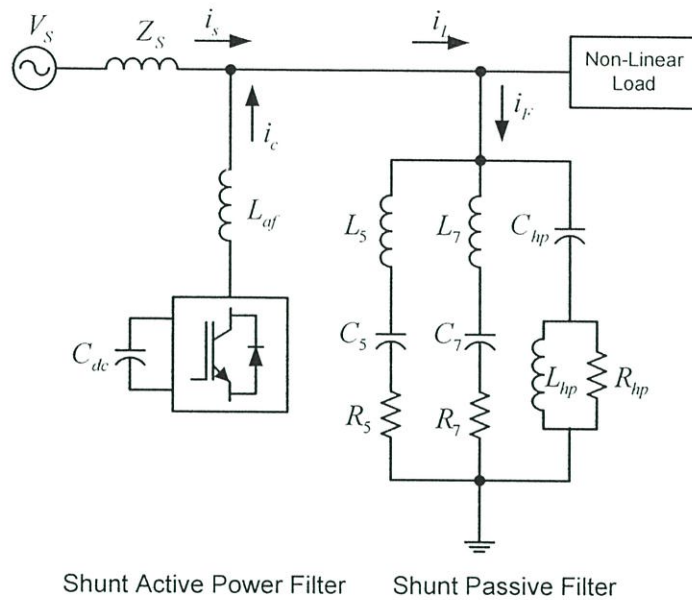
คุณสมบัติ	วงจรกรองแบบแพลซีฟ	วงจรกรองกำลังแอกทีฟ
กำลังงานสูญเสีย	น้อย	มากกว่า (ประสิทธิภาพระหว่าง 80-95%)
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า
ปัญหาเรโซแนนซ์กับอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย	อาจเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานเมื่อมองจากโหลดหรือเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมเมื่อมองจากแหล่งจ่ายทำให้เกิดกระแสและแรงดันเกินในวงจรกรอง	ไม่มี
การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของระบบ	ต้องวิเคราะห์อย่างละเอียด	โดยทั่วไปไม่จำเป็น
การออกแบบ	เป็นกรณีๆ ไป	ใช้ได้ทันทีไม่ต้องออกแบบ

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานและอนุกรม

คุณสมบัติ	วงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน	วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม
ขนาดกระแส/แรงดัน	แก้ได้ดีเฉพาะกรณีที่โหลดมีอิมพีแดนซ์สูงเทียบกับแหล่งจ่าย	แก้ได้โดยอาศัยวงจรกรองแพลซีฟช่วย
แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิก	แก้ไม่ได้	แก้ได้
ความน่าเชื่อถือ	สูงเพราะต่อขนานกับระบบเหมือนโหลดทั่วไป	ต่ำเพราะต้องต่ออนุกรมกับระบบ
หลักการทำงาน	ทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส	ทำตัวเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน

เนื่องจากกรณีที่มีขนาดพิกัดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่จำกัด และเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงที่กว้างขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนานำเอาวงจรกรองแพลซีฟมาใช้ร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อลดขนาดกำลังของอุปกรณ์ ซึ่งเราเรียกววงจรกรองแบบนี้ว่าแบบไฮบริดหรือแบบผสม การควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟปรับหน้าที่กำจัดกระแสฮาร์มอนิกเพียงบางส่วนจะทำให้ขนาดพิกัดกระแสของวงจรกรองลดลงหรือในบางวงจรตัวเก็บประจุในวงจรกรองแพลซีฟจะทำให้ระดับแรงดันตกคร่อมวงจรกรองลดลง กล่าวโดยสรุปแล้วการใช้วงจรกรองแบบ

ผสมจะส่งผลดีทำให้ขนาด kVA ของวงจรกรองลดลง โดยโครงสร้างการต่อวงจรกรองกำลัง แอคทีฟขนานแบบผสมแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟขนานแบบผสม

### 2.3 การวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณ [2]

การวิเคราะห์ในเรื่องของค่าดัชนีที่ใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของคลื่นประสิทธิภาพของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะอาศัยทฤษฎีของอนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์ (non-sinusoidal periodic) ซึ่งตามทฤษฎีสามารถอธิบายได้ดังนี้

ฟังก์ชันคาบ  $f(t)$  ทั่วไป จะสามารถเขียนอยู่ในอนุกรมได้ดังสมการที่ 2.1

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.2 ถึง 2.4 นิพจน์  $a_0$  คือค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นส่วนนิพจน์  $a_n$  และ  $b_n$  จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบไซน์และโคไซน์ตามลำดับ ซึ่งจากการรวมสมการทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งในสมการที่ 2.5

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{และ} \quad \theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{-b_n}{a_n} \right) \quad (2.6)$$

หรือ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{และ} \quad \theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{b_n} \right) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.5 ถึง 2.8 สามารถนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบฮาร์มอนิกของสัญญาณรูปคลื่นกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายได้ ซึ่งจะใช้วิธีอนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์หาค่าดัชนีคุณภาพของกระแสในหัวข้อต่อไป

## 2.4 การประเมินสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอคทีฟด้วยค่าดัชนีคุณภาพ [3]

แฟคเตอร์คุณภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อประเมินสัญญาณกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่าย และเป็นตัวบ่งชี้ถึงสมรรถนะของวงจรรอกในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกประกอบด้วย

### 2.4.1 แรงดันและกระแสมาตรฐานอาร์เอ็มเอส

ค่าอาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบความถี่มูลฐานของแรงดัน ( $V_{rms}$ ) และกระแส ( $I_{rms}$ ) เป็นค่าระดับแรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอส ที่ความถี่มูลฐานซึ่งเป็นความถี่ของระบบส่งจ่าย องค์ประกอบนี้จะเป็นองค์ประกอบที่สร้างกำลังไฟฟ้าและเป็นองค์ประกอบที่ต้องการใช้งาน

#### 2.4.2 แรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอส

ค่าอาร์เอ็มเอส ของแรงดัน ( $V_{rms}$ ) และกระแส ( $I_{rms}$ ) อินพุตเป็นค่าระดับแรงดันและกระแสอาร์เอ็มเอสของสัญญาณอินพุต ซึ่งเป็นค่ารวมขององค์ประกอบทุกตัวทั้งความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิก

#### 2.4.3 ค่าประกอบกำลังด้านเข้า (Input Power Factor; PF)

ลักษณะรูปคลื่นกระแส (Current Waveform) และมุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันจะเป็นตัวกำหนดค่าตัวประกอบกำลังของวงจร ซึ่งโดยรวมค่าตัวประกอบกำลังจะเป็นตัวประกอบของวงจรจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของวงจร กล่าวคือ ถ้าคิดที่กำลังที่ก้างไฟฟ้า (Watt) เดียวกัน วงจรที่มีค่า  $PF$  สูงจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยกว่าวงจรที่มีค่า  $PF$  ต่ำ ฉะนั้นวงจรที่มีค่า  $PF$  สูง (ไม่เกิน 1) ทำให้สามารถลดพิคกกระแสของอุปกรณ์ต่อรวมในระบบลงได้ โดยที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่าเดิม

#### 2.4.4 ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยน (Distortion Factor ;DF)

สำหรับ  $DF$  ที่นิยามในวิทยานิพนธ์เป็นค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของกระแสอินพุตอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐานต่อกระแสอาร์เอ็มเอส ที่รวมผลของฮาร์มอนิก โดยอัตราส่วนจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 นั้นหมายถึงสัญญาณไม่มีความผิดเพี้ยน ส่วนกรณีที่ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนมีค่าต่ำๆ แสดงว่าเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแสมาก

#### 2.4.5 ค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมของอาร์เอ็มอนิก (Total Harmonic Distortion ;THD)

ค่า Total Harmonic Distortion ของกระแส ( $THD$ ) คำนีที่ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายที่แตกต่างจากองค์ประกอบกระแสความถี่มูลฐาน ในการหาค่า  $THD$  นี้จะต้องอาศัยการวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีฟูเรียร์ เพื่อหาองค์ประกอบ กระแสความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณกระแสอินพุตทางด้านแหล่งจ่ายจึงสามารถนำไปเข้าสู่ตรและหาค่าออกมาได้ โดยถ้าเปอร์เซ็นต์  $THD$  มีค่ามากแสดงว่ารูปคลื่นสัญญาณมีความผิดเพี้ยน (distortion) มาก [ ] ค่าดัชนีคุณภาพทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นสามารสรูปเป็นสมการ ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 นิยามของดัชนีและปริมาณที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพ รูปคลื่นกระแสอินพุต

ค่า	นิยาม	ค่า	นิยาม
$V_{rms}$	$\frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} (V)$	$I_{rms}$	$\frac{I_{peak}}{\sqrt{2}} (A)$
$V_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} (V)$	$I_{rms}$	$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} (A)$
$PF$	$\frac{I_{rms}}{I_{rms}} \cos \phi$	$DF$	$\frac{I_{rms}}{I_{rms}}$
$THD_i$	$\frac{100}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} (\%)$		

- เมื่อ  $V_h$  : ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$   
 $I_h$  : ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกอันดับที่  $h$   
 $DF$  : ค่าตัวประกอบความผิดเพี้ยนของกระแส (Distortion Factor)  
 $PF$  : ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางดำนอินพุต (Input Power Factor)  
 $THD_i$  : ค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์โมนิก  
 (Total Harmonic Distortion)

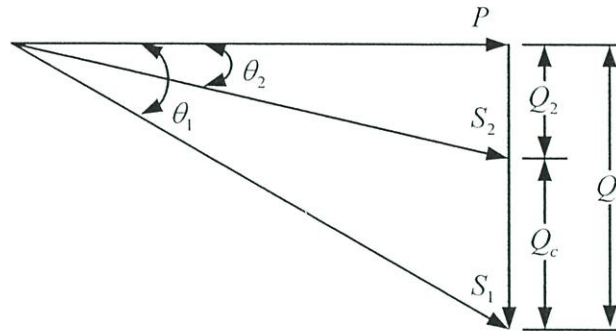
## 2.5 การชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ [4]

เนื่องจากโหลดในระบบจำหน่ายส่วนใหญ่จะมีตัวประกอบกำลังแบบล่าหลัง (lagging) กล่าวคือ จะรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟคั้งนั้นกระแสโหลดจะค่ามากขึ้นกว่าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่ายเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้นที่ใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนรูปพลังงานส่วนกระแสโหลดเกินจะเป็นที่สูญเปล่า ซึ่งไม่เพียงแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการใช้สายที่มีขนาดใหญ่แต่ยังเกิดความสูญเสียในรูปพลังงานความร้อนที่สายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพิ่มเติมจากการจ่ายไฟของการไฟฟ้า

### 2.5.1 การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

โดยทั่วไปการปรับปรุงตัวประกอบกำลังนิยมใช้ตัวเก็บประจุ เพราะมีราคาค่อนข้างถูก ไม่ต้องทำการบำรุงรักษามาก และมีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำมาก โดยจะทำการควบคุมให้ตัวเก็บประจุจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟใกล้เคียงกับที่โหลดต้องการ จนทำให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง แต่จะมีปัญหาเมื่อการใช้โหลดที่เป็นเชิงเส้นอาจทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นซึ่งจำทำให้เกิดการขยายของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบจำหน่าย จนเกินค่าพิคคของโหลดต่างๆ ที่ต่อร่วมอยู่ เป็นผลทำให้โหลดต่างๆ ได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงใช้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิ

นิกแทนตัวเก็บประจุ เพราะตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่ทั้งการชดเชยกำลังรีแอกทีฟและจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าระบบจำหน่ายได้



รูปที่ 2.5 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.5 สามเหลี่ยมกำลังโหลดประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าจริง ( $P$ ) กำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบล่าหลัง ( $Q$ ) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ ( $S_1$ ) จากความสัมพันธ์สามารถหาค่าตัวประกอบกำลังได้คือ

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1} \quad (2.9)$$

เมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกขนานกับโหลด ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังถูกปรับเปลี่ยนจาก  $\cos \theta_1$  เป็น  $\cos \theta_2$  โดยที่

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{P}{S_2} \\ &= \frac{P}{[P^2 + (Q_1 - Q_c)^2]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากรูปที่ 2.5 จะได้กำลังไฟฟ้าปรากฏและกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าลดลงจาก  $S_1$  เป็น  $S_2$  และเปลี่ยนจาก  $Q_1$  เป็น  $Q_2$  (โดยการจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟของ  $Q_c$ ) ตามลำดับ ซึ่งทำให้กระแสรวมทั้งหมดลดลง และทำให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีคุณภาพและประสิทธิภาพดีขึ้น

### 2.5.2 ประโยชน์จากการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ

1 หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มขึ้น เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้สูงขึ้นจะทำให้กระแสของระบบลดลงนั่นคือกำลังไฟฟ้าปรากฏของโหลดรวมรวมลดลงทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้ มากขึ้น กำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นคือ

$$kVA = kWx\left(\frac{1}{\cos\theta_1} - \frac{1}{\cos\theta_2}\right) \quad (2.11)$$

2 ปรับปรุงแรงดันของระบบจำหน่ายให้ดีขึ้น และลดแรงดันตกคร่อมในสายส่ง หม้อแปลง

3 กำลังสูญเสียของระบบลดลง เนื่องจากกำลังสูญเสียในสายตัวนำไฟฟ้าของระบบ เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของกระแส เมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นจะทำให้กระแส ลดลงดังนั้นกำลังสูญเสียจึงเป็นสัดส่วนกลับกับค่าตัวประกอบกำลังสอง

$$\%P_{loss} = \left|\frac{PF_1}{PF_2}\right|^2 \times 100\% \quad (2.12)$$

$$\%\Delta P_{loss} = \left(1 - \left|\frac{PF_1}{PF_2}\right|^2\right) \times 100\% \quad (2.13)$$

$$P_{loss2} = P_{loss1} \times \left(1 - \left|\frac{PF_1}{PF_2}\right|^2\right) \quad (2.14)$$

เมื่อ  $PF_1$  = ค่าตัวประกอบกำลังก่อนทำการปรับปรุง

$PF_2$  = ค่าตัวประกอบกำลังหลังทำการปรับปรุง

$P_{loss1}$  = กำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนทำการปรับปรุง

$P_{loss2}$  = กำลังไฟฟ้าสูญเสียหลังทำการปรับปรุง

ระบบไฟฟ้า 1 เฟส กำลังสูญเสียในสายไฟฟ้า =  $I^2R$  ดังนั้นเมื่อกระแสลดลงทำให้กำลังสูญเสียในสายลดลงด้วย

4 กำลังสูญเสียในหม้อแปลงลดลงกำลังสูญเสียในหม้อแปลงประกอบด้วย 2 ส่วน คือกำลังสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง ซึ่งกำลังสูญเสียในขดลวดทองแดงนี้จะแปรผันตามกระแสกำลังสองเมื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้นแล้ว กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงจะลดลงทำให้กำลังสูญเสียเนื่องจากความต้านทานในขดลวดทองแดงลดลง

5 ลดขนาดสายส่งกำลัง และสายของหม้อแปลงให้มีขนาดเล็กลง

6 ไม่ต้องเสียค่าปรับให้การไฟฟ้าฯ

## 2.6 ข้อกำหนดและมาตรฐานของฮาร์มอนิก

มาตรฐานในการกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยส่วนใหญ่มี 2 ประเภท ดังนี้

### 2.6.1 มาตรฐาน IEC

ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2

h	3	5	7	9	11	13	15-39
Max, $I_h$ , A	2.3	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	0.15-15/h
Equipment input current $\leq 16A$ per phase							

### 2.6.2 มาตรฐาน IEEE

ตารางที่ 2.5 ข้อกำหนดของกระแสฮาร์โมนิกตามมาตรฐาน IEEE 519

$I_{sc}/I_L$	Ih/IL, %- General distribution systems (120V – 69kV)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50-100	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1000	15	7.0	6.0	2.5	1.4	20

Above current distortion limits are for odd harmonics.  
 Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics limits.  
 For all power generation equipment, distortion limits are those with  $I_{sc}/I_L < 20$ .  
 $I_{sc}$  is the maximum short circuit current at the point of common coupling "PCC".  
 $I_L$  is the fundamental frequency 15- or 30- minute load current at PCC.  
 TDD is the total demand distortion (THD normalized by  $I_L$ ).

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎี และหลักการกำจัดกระแสฮาร์โมนิก รวมถึงข้อดี และข้อเสียของวงจรกรองแบบต่างๆ ผลของการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟด้วยการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังนิยาม และการประเมินค่าสัญญาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และข้อกำหนดมาตรฐานของฮาร์โมนิก

### โครงข่ายประสาทเทียม

#### 3.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network: ANN) มาประยุกต์ใช้ในงานหลายๆ ด้าน เช่น ระบบขับยานอัตโนมัติ, ระบบควบคุม, ระบบสังเคราะห์เสียง ที่มีความสามารถมากขึ้น และมีรูปแบบโครงสร้างและการทำงานของประมวลผลเหมือนกับสมองในสิ่งมีชีวิต ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม, ชนิดของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม รวมไปถึงโครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย

โครงข่ายประสาทเทียม สามารถปรับเปลี่ยนตัวเองต่อการตอบสนองของอินพุต ตามกฎของการเรียนรู้ (learning rule) หลังจากที่โครงข่ายได้เรียนรู้สิ่งที่ต้องการแล้ว โครงข่ายนั้นจะสามารถทำงานที่กำหนดไว้ได้ ความสามารถในการเรียนรู้ (learn) จากตัวอย่างและการทำให้เป็นกรณีทั่วไป (generalize) ถือเป็นคุณลักษณะสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม ตัวโครงข่ายจะถูกฝึกสอนโดยการแสดงรูปแบบ (pattern) ต่างๆ ที่ต้องการให้โครงข่ายเรียนรู้ด้วยกฎการเรียนรู้ (learning rule) ขบวนการเรียนรู้ได้ของโครงข่ายนี้ทำให้มีความแตกต่างไปจากการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การที่โครงข่ายถูกทำให้เป็นกรณีทั่วไป จะทำให้ตัวโครงข่ายสามารถที่จะจำแนกแยกแยะรูปแบบของอินพุตแบบใหม่ๆ ที่ตัวโครงข่ายไม่รู้จักมาก่อนได้ ในระดับที่เป็นที่ยอมรับ

#### 3.2 ความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม

ความเจริญก้าวหน้าของโครงข่ายประสาทเทียม เป็นไปดังนี้

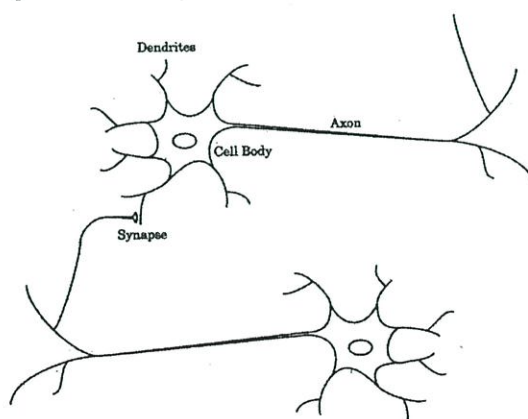
1. Warren S. McCulloch และ Walter Pitts (1943) ได้สร้างแบบจำลองนิวรอนของ McCulloch-Pitts เป็นจุดเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียม
2. Donald Hebb (1949) จุดเริ่มต้นของการนำเสนอขบวนการเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม
3. John von Neumann (1958) ผู้พัฒนาดีจิตอลคอมพิวเตอร์ยุคแรก
4. Frank Rosenblatt (1958) ผู้เริ่มต้นแนวคิดของเพอร์เซ็ปตรอน (perceptron)
5. Bernard Widrow และ Marcian Hoff (1960) นำเสนอ ADALINE (adaptive linear element) ซึ่งทำการฝึกฝนโดยอัลกอริทึมกำลังสองน้อยที่สุดหรือ LMS (least-squares) และขยายผลเป็น MADALINES (many ADALINES) ในเวลาต่อมา

6. Paul Werbos (1974) ผู้เริ่มต้นแนวคิดของอัลกอริทึมแบบแพร่กลับ (backpropagation) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการเรียนรู้ที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายที่สุด
7. John Hopfield (1982) เป็นผู้ที่ยกได้ว่าพาลอของโครงข่ายประสาทเทียมเข้าสู่ยุคใหม่ Hopfield นำเสนอเนื้อหาที่ลึกซึ้งและซับซ้อนของโครงข่ายแบบเชื่อมโยงกับตัวเอง (recurrent network) ซึ่งสามารถจดจำข้อมูลรูปแบบในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีประสิทธิภาพได้ โครงข่ายสามารถจำแนกข้อมูลอินพุตที่มีสัญญาณรบกวนได้
8. Teuvo Kohonen (1982) นำเสนอแผนผังคุณลักษณะการจัดการตัวเอง (self-organizing feature map) ซึ่งเป็นโครงข่ายการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (unsupervised learning) มีการเรียนรู้แบบแข่งขัน (competitive learning) และเป็นโครงข่ายที่เป็นกลุ่มก้อน (clustering)
9. Gail Carpenter และ Stephen Grossberg (1987) พัฒนาโครงข่ายแบบจัดการตัวเองจาก ART (adaptive resonance theory)
10. David Broomhead และ David Lowe (1988) นำเอา RBF (radial basis function) มาประยุกต์ใช้

ในปัจจุบันนักวิจัยยังคงวิจัยคิดค้นแบบจำลองทางโครงข่ายประสาทเทียมใหม่ๆ ขึ้นมาอีก เพื่อลดเวลาการเรียนรู้ และเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนมากขึ้น

### 3.3 โครงข่ายประสาททางชีววิทยา [5]

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดต่างๆ ที่ใช้ในปัจจุบัน มีต้นแบบในการพัฒนามาจากโครงข่ายประสาททางชีววิทยาทั้งตัวโครงสร้างและหลักการทำงาน โครงข่ายประสาททางชีววิทยามีเซลล์ประสาท (neuron) หลายร้อยล้านเซลล์เป็นส่วนประกอบ และมีกิ่งก้านมากมายที่ต่อกันเป็นระบบประสาท ดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์ประสาท (neuron)

เซลล์ประสาทจัดเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของระบบประสาทที่สามารถทำงานได้ โดยเซลล์ประสาท มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1. ตัวเซลล์ (cell body) มีรูปร่างหลายแบบ เช่น กลม หรือ รี ประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่กลางเซลล์ ตัวเซลล์มีเดนไดรต์ (dendrites) เป็นส่วนที่รับสัญญาณกระแสประสาทเข้ามาประมวลผล และมีแอกซอน (axon) เป็นตัวส่งกระแสประสาทออก
2. เดนไดรต์ (dendrites) เป็นกิ่งก้านที่ยื่นออกมาของตัวเซลล์มีลักษณะเป็นเส้น หรือใย เดนไดรต์อาจมีหนึ่งเส้น หรือหลายเส้น ทำหน้าที่นำกระแสประสาทไฟฟ้าเข้าสู่ตัวเซลล์
3. แอกซอน (axon) เป็นส่วนที่ยื่นออกมาจากตัวเซลล์เพียงเส้นเดียวเท่านั้น แตกต่างกับเดนไดรต์ที่มีมากกว่าหนึ่งเส้นได้ แอกซอนทำหน้าที่นำกระแสประสาทออกจากตัวเซลล์ไปยังเซลล์ประสาทอื่น
4. ไซแนปส์ (synapse) เป็นจุดที่ต่อระหว่าง เดนไดรต์กับตัวเซลล์ ถ้าเดนไดรต์มีหลายเส้น ไซแนปส์ก็จะมีหลายจุด อาจกล่าวได้ว่าจำนวนไซแนปส์ขึ้นอยู่กับจำนวนเดนไดรต์

### 3.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network Architecture) [6]

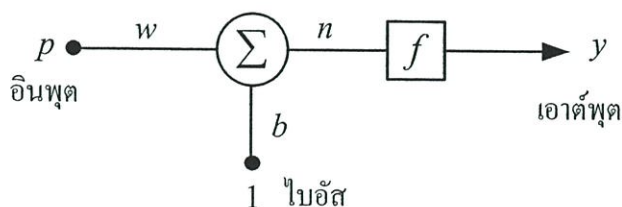
โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยสองส่วนใหญ่ๆ คือ แบบจำลองของนิวรอน และ สถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายของนิวรอน

#### 3.4.1 แบบจำลองของนิวรอน - นิวรอนแบบอินพุตเดียว

โครงสร้างพื้นฐานของนิวรอนที่มีอินพุตเดียวแสดงในรูปที่ 3.2 อินพุต  $x$  ถูกคูณด้วยค่าน้ำหนักประสาท (weight)  $w$  โดยมีไบอัส  $b$  (หรือออฟเซต - offset) เป็นอีกอินพุตหนึ่งซึ่งมีค่าน้ำหนักประสาทคงที่เท่ากับ 1 อินพุตทั้งสองถูกรวม (sum) ได้เอาต์พุตเป็น  $n$  มักจะเรียกว่า เน็ตอินพุต (net input) ซึ่งจะเป็นอินพุตของฟังก์ชันถ่ายโอน  $f$  (transfer function หรือ activation function) และได้เอาต์พุตของนิวรอนคือ  $y$

เอาต์พุตของนิวรอนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$y = f(wp + b) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 นิวรอนอินพุตเดียว

จากแบบจำลองข้างต้น เราสามารถเปรียบเทียบแบบจำลองนิวรอนนี้กับนิวรอนของสมองมนุษย์ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบแบบจำลองนิวรอนกับสมองมนุษย์

แบบจำลองนิวรอน	สมองมนุษย์
น้ำหนักประสาท $w$	ไซแนปส์
ตัวรวม $\sum$ และฟังก์ชันถ่ายโอน	ตัวเซลล์
เอาต์พุต $y$	สัญญาณจากแอกซอน

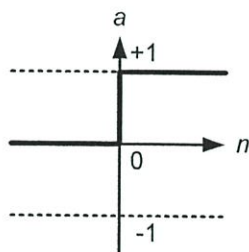
เอาต์พุตของนิวรอนจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันถ่ายโอน  $w$  และ  $b$  จะสามารถปรับค่าได้ นั่นคือเป็นพารามิเตอร์ของนิวรอน โดยปกติแล้วฟังก์ชันถ่ายโอนจะถูกออกแบบเลือกโดยผู้ใช้และพารามิเตอร์  $w$  และ  $b$  จะถูกปรับค่าจากกฎการเรียนรู้

### 3.4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน

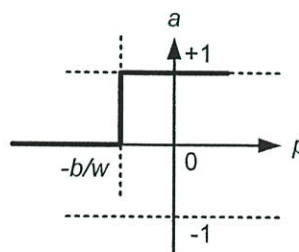
ฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ ฟังก์ชันการกระตุ้น สามารถเป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันถ่ายโอนมีอยู่หลายแบบ แบบที่มีการใช้งานทั่วไป มากที่สุดมีรายละเอียดดังนี้

1. ฟังก์ชันชนิด Hard Limit อินพุต/เอาต์พุตจะเป็น

$$\begin{aligned} a(n) &= 0 \text{ เมื่อ } n < 0 \\ a(n) &= 1 \text{ เมื่อ } n \geq 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$



$$a = \text{hardlim}(n)$$

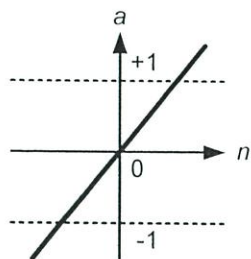


$$a = \text{hardlim}(wp+b)$$

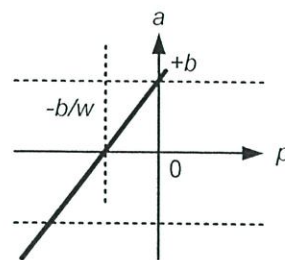
รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Hard limit และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ถูกเลื่อนในแกนอนตามค่าไบอัส

2. ฟังก์ชันชนิด Linear อินพุต/เอาต์พุตจะเป็น

$$a(n) = n \quad (3.3)$$



$$a = \text{purelin}(n)$$

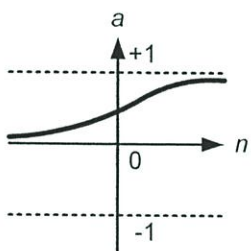


$$a = \text{purelin}(wp+b)$$

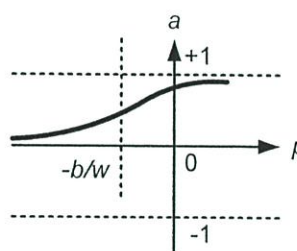
รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Linear และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ถูกเลื่อนในแกนอนตามค่าไบอัส

3. ฟังก์ชันชนิด Log-sigmoid อินพุต/เอาต์พุตจะเป็น

$$a(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (3.4)$$



$$a = \text{logsig}(n)$$









$$a = \text{logsig}(wp+b)$$

รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิด Log-sigmoid และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ถูกเลื่อนในแกนอนตามค่าไบอัส

ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันการกระตุ้นชนิดต่างๆ

ฟังก์ชัน	อินพุต/เอาต์พุต	สัญลักษณ์	MATLAB Function
Hard Limit	$a = 0 \quad n < 0$ $a = 1 \quad n \geq 0$		<b>hardlim</b>
Symmetrical Hard Limit	$a = -1 \quad n < 0$ $a = +1 \quad n \geq 0$		<b>hardlims</b>
Linear	$a = n$		<b>purelin</b>

ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันการกระตุ้นชนิดต่างๆ (ต่อ)

ฟังก์ชัน	อินพุต/เอาต์พุต	สัญลักษณ์	MATLAB Function
Saturating Linear	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n < 1$ $a = 1 \quad n > 1$		satlin
Symmetric Saturating Linear	$a = -1 \quad n < -1$ $a = n \quad -1 \leq n < 1$ $a = 1 \quad n > 1$		satlins
Log-Sigmoid	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		logsig
Hyperbolic Tangent Sigmoid	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig
Positive Linear	$a = 0 \quad n < 0$ $a = n \quad 0 \leq n$		poslin
Competitive	$a = 1$ neuron with max $n$ $a = 0$ all other neurons		compet

### 3.4.3 แบบจำลองของนิวรอน - นิวรอนแบบหลายอินพุต

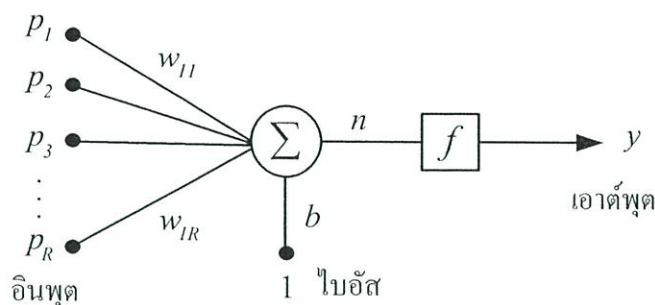
โดยปกติแล้วนิวรอนจะมีอินพุตมากกว่าหนึ่งอินพุต นิวรอนในรูปที่ 3.6 มี  $R$  อินพุต แต่ละอินพุตย่อย  $p_1, p_2, \dots, p_R$  มีค่าน้ำหนักประสาทของตัวเองคือ  $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1R}$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์ เรียกว่า เมตริกซ์น้ำหนักประสาท (weight matrix) มีสัญลักษณ์ คือ  $W$

พิจารณาเน็ตอินพุต  $n$

$$n = w_{11}p_1 + w_{12}p_2 + \dots + w_{1R}p_R + b \quad (3.5)$$

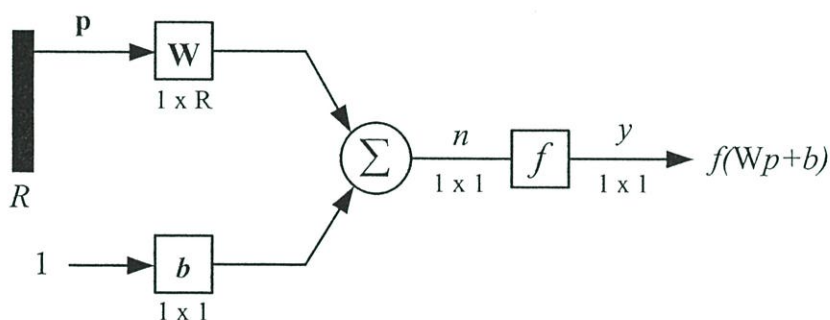
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$n = Wp + b \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.6 นิวรอนหลายอินพุต

ตัวห้อยของค่าน้ำหนักประสาทเป็นตัวระบุความสัมพันธ์ระหว่างนิวรอน กล่าวคือ ตัวห้อยตัวแรกหมายถึงนิวรอนปลายทาง (ซึ่งในที่นี้มีอยู่เพียงหนึ่งนิวรอน) ในขณะที่ตัวห้อยตัวที่สองหมายถึงที่มาของอินพุตที่เชื่อมมายังนิวรอนนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น  $w_{13}$  หมายถึง ค่าน้ำหนักประสาทที่เชื่อมอินพุตที่ 3 มายังนิวรอนที่ 1 โดยทั่วไปแล้ว เมื่อโครงสร้างของโครงข่ายประกอบไปด้วยนิวรอนจำนวนมาก การใช้สัญลักษณ์อาจจะเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การกำหนดรูปแบบสัญลักษณ์ของนิวรอน

โดยเมตริกซ์  $W$  เป็นเมตริกซ์หลัก (column matrix) นั่นคือ มีเพียง 1 แถว ดังนั้นเอาต์พุตของนิวรอน  $y$  สามารถเขียนได้เป็น

$$y = f(Wp + b) \quad (3.7)$$

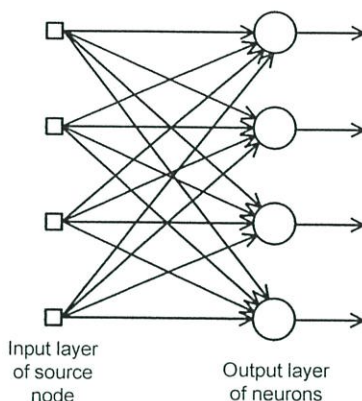
### 3.5 สถาปัตยกรรมของข่ายงาน (Network Architecture) [7]

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ข่ายงานระบบประสาทจะถูกสร้างขึ้นโดยการนำนิวรอนมาประกอบกัน สถาปัตยกรรมของข่ายงานระบบประสาทสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทหลักคือข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว (Single-Layer Feed-Forward Network) ข่ายงานแบบป้อน

ไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed-forward Network) ข่ายงานแบบเวียนเกิด (Recurrent Network) และข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ (Network with a Lattice Structure)

### 3.5.1 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียว (Single-Layer Feed-forward Network)

ข่ายงานระบบประสาทที่มีโครงสร้างเป็นชั้นก็คือข่ายงานของนิวรอนซึ่งเรียงตัวเป็นชั้นในรูปแบบที่ง่ายที่สุด นิวรอนจะเรียงตัวเป็นแถวเดียว ตามแผนภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.8



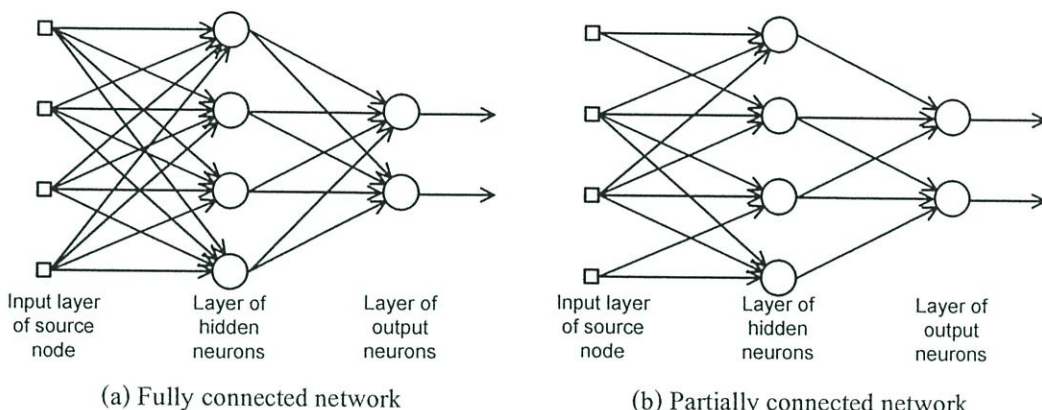
รูปที่ 3.8 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีนิวรอนชั้นเดียว

จากรูปที่ 3.8 แถวของข้อมูลเข้าของนิวรอนจะเรียกว่าชั้นข้อมูลเข้า (Input Layer) ในขณะที่แถวของนิวรอนจะเรียกว่าชั้นข้อมูลออก (Output Layer) นิวรอนทั้งสี่นิวรอนในชั้นข้อมูลออกจะได้รับข้อมูลเข้าเดียวกันจากชั้นข้อมูลเข้าของปมแหล่งต้นทาง (Source Node) หลังจากที่มีการคำนวณแบบป้อนไปข้างหน้าตามที่ได้อธิบายไว้ในส่วนแรก ที่เกิดขึ้นภายในแต่ละนิวรอนในข่ายงานได้สิ้นสุดลงแล้ว ข้อมูลออกของข่ายงานก็จะได้มาจากข้อมูลออกของนิวรอนทุกนิวรอนในชั้นข้อมูลออก ตัวอย่างของข่ายงานระบบประสาทที่มีสถาปัตยกรรมแบบนี้ คือข่ายงานความทรงจำของความสัมพันธ์ (Associative Memory Network) ในกรณีนี้ข่ายงานจะเป็นตัวสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ข้อมูลออกและเวกเตอร์ข้อมูลเข้า โดยที่ข้อมูลความสัมพันธ์ (Association Information) ก็จะถูกเก็บอยู่ในข่ายงานระบบประสาทโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงภายในข่ายงานระบบประสาท

### 3.5.2 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed-forward Network)

ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นสามารถถูกสร้างขึ้นได้โดยการต่อข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าชั้นเดียวเข้าด้วยกัน โดยที่ข้อมูลออกจากชั้นหนึ่งของนิวรอนจะถูกส่งไปเป็นข้อมูลเข้าของนิวรอนในอีกชั้นหนึ่ง ชั้นของนิวรอนซึ่งข้อมูลเข้าของนิวรอนเป็นข้อมูลเข้าของข่ายงานหรือข้อมูลออกของนิวรอนที่อยู่ในชั้นก่อนจะถูกเรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) แผนภาพของข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 จากรูปที่ 3.9 นิวรอนในชั้นซ่อน

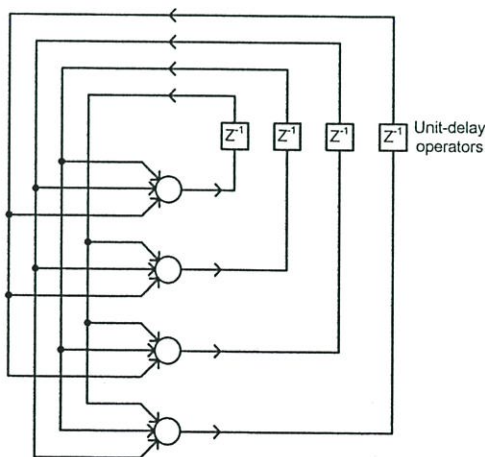
ได้รับสัญญาณจากชั้นข้อมูลเข้าของปมแหล่งต้นทาง จากนั้นข้อมูลออกของชั้นซ่อนจะถูกใช้เพื่อเป็นข้อมูลเข้าของนิวรอนในชั้นข้อมูลออก ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นในรูปแบบที่ 3.9 (a) จะเรียกว่าข่ายงานแบบเชื่อมโยงเต็มอัตรา (Fully Connected Network) เนื่องจากทุกปมในแต่ละชั้นของข่ายงานจะต่อกับทุกๆ ปมในชั้นข้างหน้าที่อยู่ถัดไป ในทางตรงกันข้ามข่ายงานที่แสดงอยู่ในรูป 3.9 (b) จะเรียกว่า ข่ายงานแบบเชื่อมโยงบางส่วน (Partially Connected Network) เนื่องจากตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงที่มีอยู่ได้ในข่ายงานได้หายไป ตัวอย่างของข่ายงานระบบประสาทที่มีสถาปัตยกรรมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น ได้แก่ มัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน (Multilayer Perceptron) และข่ายงานเรเดียลเบสฟังก์ชัน (Radial-Basis Function Network)



รูปที่ 3.9 ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นที่มีชั้นซ่อนหนึ่งชั้น

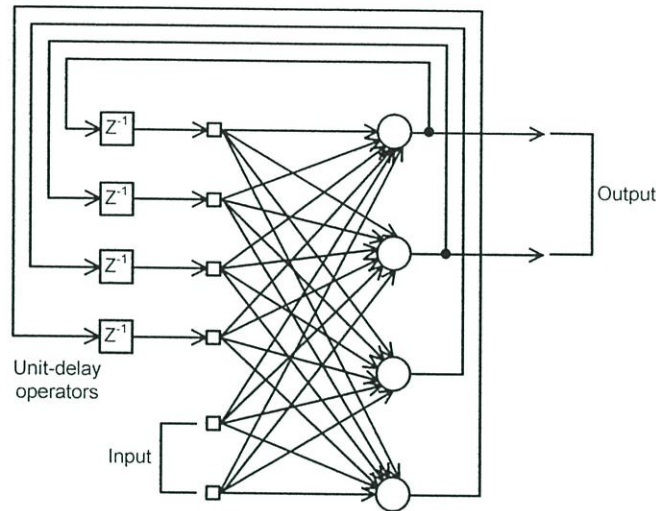
### 3.5.3 ข่ายงานแบบเวียนเกิด (Recurrent Network)

ข่ายงานแบบเวียนเกิดจะต่างจากข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าตรงที่ข่ายงานแบบเวียนเกิดจะมีวงป้อนกลับ (Feedback Loop) อย่างน้อยหนึ่งวงในข่ายงาน ตัวอย่างของข่ายงานแบบเวียนเกิดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ข่ายงานแบบเวียนเกิดที่ไม่มีวงป้อนกลับในตัวและไม่มีนิวรอนซ่อน

ในรูปที่ 3.10 ข่ายงานแบบเวียนเกิดประกอบด้วยชั้นของนิวรอนจำนวนหนึ่งชั้น โดยที่แต่ละนิวรอนจะส่งข้อมูลออกไปยังนิวรอนอื่นๆ ทุกนิวรอน ในอีกนัยหนึ่งข่ายงานแบบเวียนเกิดชนิดนี้จะไม่มียังป้อนกลับในตัว (Self-feedback Loop) ตัวอย่างของข่ายงานแบบเวียนเกิดในรูปแบบนี้ได้แก่ ข่ายงานฮอปฟิลด์ (Hopfield Network) ในทำนองเดียวกับข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น ข่ายงานแบบเวียนเกิดก็สามารถที่จะมีนิวรอนซ่อน (Hidden Neuron) ได้เช่นกัน ตัวอย่างของข่ายงานแบบเวียนเกิดที่มีนิวรอนซ่อนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11



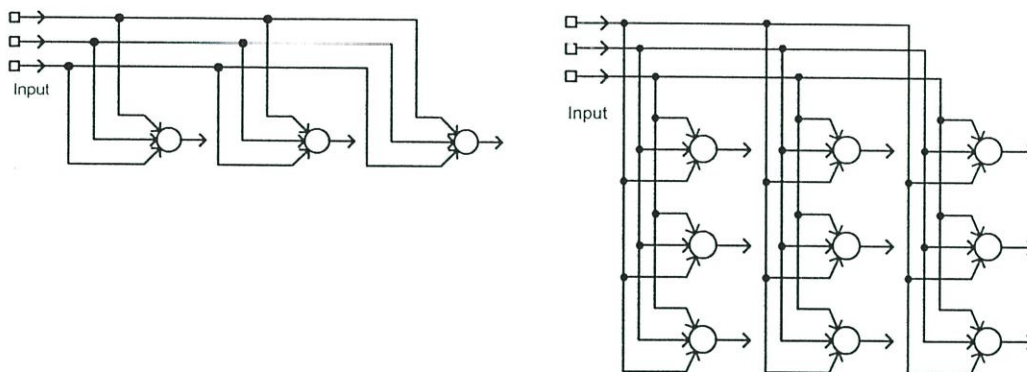
รูปที่ 3.11 ข่ายงานแบบเวียนเกิดที่มีนิวรอนซ่อน

ในรูปที่ 3.11 การเชื่อมโยงป้อนกลับ (Feedback Connection) เริ่มต้นจากนิวรอนซ่อนและนิวรอนข้อมูลออก (Output Neuron) จะสังเกตได้ว่าวงป้อนกลับของข่ายงานแบบเวียนเกิดจะมีการใช้หน่วยหน่วงเวลา (Unit-Delay Element) ซึ่งแทนโดย  $z^{-1}$  หน่วยหน่วงเวลานี้จะทำให้เกิดพฤติกรรมพลวัตแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Dynamic Behavior) ของข่ายงาน โดยที่พลวัตแบบไม่เชิงเส้นนี้จะมีบทบาทสำคัญต่อวิธีการที่ข่ายงานแบบเวียนเกิดจัดเก็บข้อมูลในข่ายงาน

#### 3.5.4 ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ (Network with a Lattice Structure)

ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซจะประกอบด้วย แถวลำดับหนึ่งมิติ (One-Dimensional Array) แถวลำดับสองมิติ (Two-dimensional Array) หรือ แถวลำดับหลายมิติ (Multi-dimensional Array) ของนิวรอนซึ่งมีเซตของปมข้อมูลเข้าเป็นตัวจ่ายสัญญาณเข้าสู่แถวลำดับ มิติของแลตทิซจะหมายถึงมิติในปริภูมิซึ่งแถวลำดับของนิวรอนเรียงตัวอยู่ แผนภาพของข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 โครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 3.12 (a) เป็นแลตทิซหนึ่งมิติของนิวรอน 3 นิวรอนโดยที่นิวรอนทุกตัวจะได้รับสัญญาณเข้าจากชั้นของปมแหล่งต้นทางจำนวน 3 ปม ในทางตรงกันข้าม โครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 3.12 (b) เป็นแลตทิซสองมิติของ

นิวรอน  $3 \times 3$  ซึ่งได้รับสัญญาณจากชั้นของปมแหล่งต้นทางจำนวน 3 ปม จะสังเกตได้ว่าในทั้งสองกรณีแต่ละปมข้อมูลเข้าจะต่อกับทุกนิวรอนในแลตทิซ กล่าวโดยสรุปได้ว่าข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซเป็นข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งนิวรอนข้อมูลออกมีการเรียงตัวเป็นแถวและคอลัมน์นั่นเอง ตัวอย่างของข่ายงานระบบประสาทที่มีลักษณะเช่นนี้ได้แก่ ข่ายงานโคโฮเน็น (Kohonen Network)



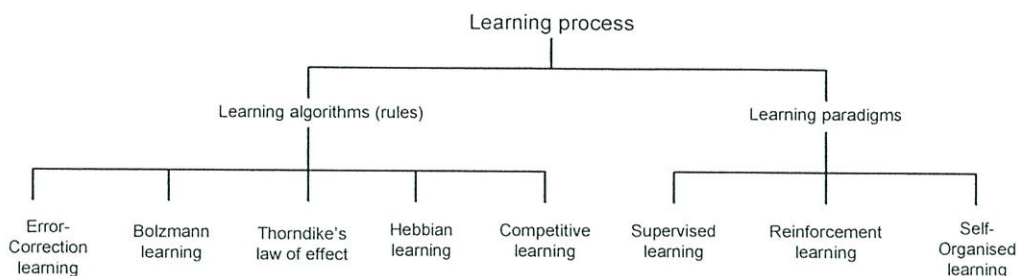
(a) One-dimensional lattice of 3 neurons

(b) Two-dimensional lattice of 3-by-3 neurons

รูปที่ 3.12 ข่ายงานที่มีโครงสร้างแบบแลตทิซ

### 3.6 กระบวนการเรียนรู้ (Learning Process)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ข่ายงานระบบประสาทจะเก็บข้อมูลหรือความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานที่ข่ายงานระบบประสาทจะต้องกระทำโดยอาศัยกระบวนการเรียนรู้ หรือการฝึกสอน (Training) กระบวนการเรียนรู้ของข่ายงานระบบประสาทสามารถแบ่งเป็นหลายประเภท โดยการใช้ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ (Learning Algorithm) หรือกฎการเรียนรู้ (Learning Rule) เป็นแนวทางในการจำแนกประเภท กระบวนการเรียนรู้จะสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ การเรียนรู้โดยการแก้ไขข้อผิดพลาด (Error-Correction Learning) การเรียนรู้แบบโบลซ์มันน์ (Boltzmann Learning) การเรียนรู้โดยใช้กฎของผลกระทบของธอร์นไดค์ (Learning Using Thorndike's Law of Effect) การเรียนรู้แบบเฮบบ์ (Hebbian Learning) และการเรียนรู้โดยการแข่งขัน (Competitive Learning) ในอีกทางหนึ่ง โดยการใช้รูปแบบการเรียนรู้ (Learning Paradigm) เป็นแนวทางในการจำแนกประเภท กระบวนการเรียนรู้จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบเสริมสร้าง (Reinforcement Learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised Learning or Self-Organized Learning) การจำแนกประเภทกระบวนการเรียนรู้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การจำแนกประเภทกระบวนการเรียนรู้

ซึ่งจะขอกกล่าวถึงเฉพาะเรื่องการเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน และการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน

### 3.6.1 การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด (Error-Correction Learning)

การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาดคือ การเรียนรู้โดยที่พารามิเตอร์อิสระหรือตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงภายในข่ายงานระบบประสาท มีการเปลี่ยนแปลงค่าในช่วงที่มีการเรียนรู้โดยใช้ความแตกต่างระหว่างการตอบสนองที่ต้องการ (Desired Response or Target Response) กับการตอบสนองที่ได้ (Actual Response) จากข่ายงานระบบประสาทเป็นตัวกำหนดแนวทางในการเปลี่ยนแปลง ให้  $d_k(n)$  เป็นการตอบสนองที่ต้องการจากนิวรอนที่  $k$  ในชั้นข้อมูลออกของข่ายงานระบบประสาท ณ ขั้นตอนเวลา (Time Step)  $n$  และให้การตอบสนองที่ได้จากนิวรอนที่  $k$  ณ ขั้นตอนเวลา  $n$  มีค่าเป็น  $y_k(n)$  สัญญาณข้อผิดพลาด (Error Signal) ซึ่งก็คือค่าความแตกต่างระหว่างการตอบสนองที่ต้องการกับการตอบสนองที่ได้ของนิวรอนที่  $k$  จะสามารถหาได้โดย

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (3.8)$$

โดยที่  $e_k(n)$  คือสัญญาณข้อผิดพลาด ณ ขั้นตอนเวลา  $n$  พิจารณาฟังก์ชันค่าใช้จ่าย (Cost Function) ซึ่งสร้างจากค่าบัคคิล (Instantaneous Value) ของผลรวมข้อผิดพลาดกำลังสอง (Sum of Squared Errors) ที่คำนวณจากทุกนิวรอนในชั้นข้อมูลออกและอยู่ในรูปของ

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} \sum_k e_k^2(n) \quad (3.9)$$

โดยที่  $\varepsilon(n)$  คือฟังก์ชันค่าใช้จ่ายที่ขั้นตอนเวลา  $n$  อาศัยการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายโดยเทียบจากตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง เป้าหมายของการเรียนรู้ที่จะได้ คือให้การตอบสนองที่ได้จากข่ายงานระบบประสาทมีค่าเข้าใกล้การตอบสนองที่ต้องการให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีการที่นิยมใช้ในการที่จะทำให้ได้ตามเป้าหมายนี้ คือวิธีลดตามความชัน (Gradient Descent Method) และการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักจะสามารถทำได้จาก

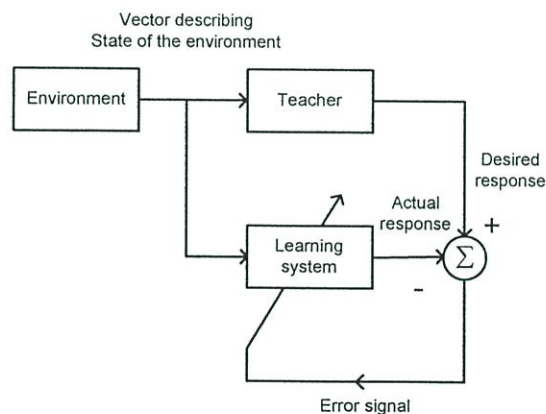
$$w(n+1) = w(n) - \eta \frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w} \quad (3.10)$$

โดยที่  $w(n)$  คือตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงที่ชั้นเวลา  $n$   $\frac{\partial \mathcal{E}(n)}{\partial w}$  คือค่าความชันในปริภูมิตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (Connection Weight Space) และค่า  $\eta$  คือพารามิเตอร์อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate Parameter) สมการที่ 3.13 นี้เรียกว่า กฎการเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด (Error-Correction Learning Rule) หรือกฎการเรียนรู้แบบเดลตา (Delta Learning Rule)

ถึงแม้ว่าสัญญาณข้อผิดพลาดที่ใช้ในการเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาดจะเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างการตอบสนองที่ต้องการกับการตอบสนองที่ได้ของข่ายงานระบบประสาท ในบางกรณีนั้นค่าของสัญญาณข้อผิดพลาดจะไม่สามารถหาได้โดยตรง ตัวอย่างของกรณีเช่นนี้คือกรณีที่ข่ายงานระบบประสาทถูกใช้เป็นตัวควบคุม (Controller) ในการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) จะถูกนำมาใช้แทนสัญญาณข้อผิดพลาด และการเรียนรู้จะเปลี่ยนเป็นการเรียนรู้จากค่าคลาดเคลื่อนการป้อนกลับ (Feedback Error Learning)

### 3.6.2 การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Learning)

ในกรณีของการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน ข่ายงานระบบประสาทจะสามารถเก็บรวบรวมความรู้ได้โดยการใช้สัญญาณฝึกสอนภายนอก (External Teaching Signal) ซึ่งได้จากผู้ฝึกสอน (External Teacher or Supervisor) ในกรณีเช่นนี้ผู้ฝึกสอนจะมีบทบาทในการส่ง (Mapping) ข้อมูลเข้าข่ายงานระบบประสาทไปเป็นการตอบสนองที่ต้องการ แผนภาพของการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน

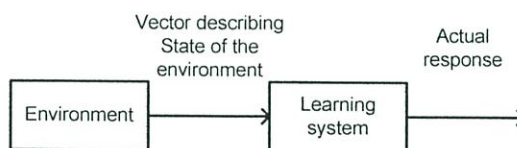
จากรูปที่ 3.14 จะสามารถเห็นได้ว่ากฎการเรียนรู้ที่ใช้ในกรณีนี้ก็คือกฎการเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาดจะได้จากความแตกต่างระหว่างการตอบสนองที่ต้องการซึ่งได้มาจากผู้ฝึกสอนกับการตอบสนองที่ได้จากข่ายงานระบบประสาท

ข่ายงานระบบประสาทที่ใช้การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้การเรียนรู้โดยการแก้ข้อผิดพลาด ซึ่งใช้วิธีลดตามความชันในการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามสำหรับข่ายงานระบบประสาทที่ใช้การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนบางข่ายงานนั้น กระบวนการเรียนรู้จะไม่ได้กระทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายซึ่งสร้างจากสัญญาณข้อผิดพลาด ตัวอย่างของข่ายงานดังกล่าว ได้แก่ ข่ายงานมอดูลาร์ (Moular Network) ในกรณีของข่ายงานมอดูลาร์นั้น การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนจะกระทำโดยการหาค่าสูงสุด (Maximisation) ของฟังก์ชันความควรจะเป็นแบบล็อก (Log-Likelihood Function) ซึ่งการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงจะกระทำโดยใช้วิธีเพิ่มตามความชัน (Gradient Ascend Method)

### 3.6.3 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised Learning)

ในทางตรงกันข้ามกับการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน ในการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอนนั้นจะไม่มีผู้ฝึกสอนซึ่งมีหน้าที่ป้อนสัญญาณฝึกสอน (Teaching Signal) ให้กับข่ายงานระบบประสาท แผนภาพของการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15

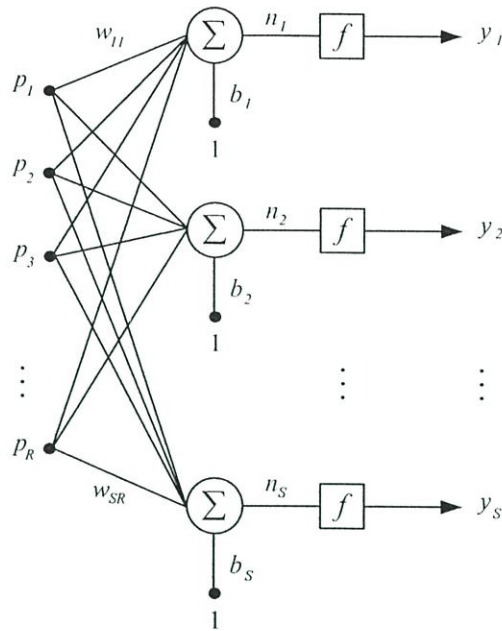


รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าข้อมูลเข้าของข่ายงานนั้นจะมีอยู่เพียงข้อมูลเดียว ซึ่งก็คือเวกเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายสถานะของสิ่งแวดล้อม แผนภาพนี้ชี้ให้เห็นว่าเป้าหมายของการเรียนรู้ของข่ายงานระบบประสาทจะขึ้นอยู่กับกลยุทธ์การเรียนรู้ (Learning Strategy) ซึ่งได้ฝัง (Embed) ในข่ายงานระบบประสาท วิธีการที่นิยมใช้ในกระบวนการเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน คือ การใช้กฎฮิวริสติก (Heuristic Rule) ในการทำให้เกิดการเรียนรู้ภายในข่ายงานระบบประสาท ตัวอย่างหนึ่งของกลยุทธ์การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน คือการใช้กฎฮิวริสติกปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงของนิวรอนซ่อนในข่ายงานเรเดียลเบสซิสฟังก์ชัน ในกรณีนี้เวกเตอร์ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (ซึ่งเรียกว่าศูนย์กลางของฟังก์ชันฐานหลักเชิงรัศมี หรือ Radial-Basis Function) ที่มีระยะทางแบบยุคลิดที่สั้นที่สุดจากเวกเตอร์ข้อมูลเข้าของข่ายงาน ณ ชั้นเวลาหนึ่ง จะถูกย้ายตำแหน่งในปริภูมิของข้อมูลเข้าไปในทิศทางที่ชี้เข้าหาเวกเตอร์ข้อมูลเข้านั้น

### 3.7 โครงข่ายเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multilayer Perceptron Neural Network) [9]

โดยปกติแล้วโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วยนิวรอนหลายๆ ตัวและเชื่อมต่อกันแบบขนานกันหลายๆ ชั้นหรือเรียกว่า layer โครงสร้างของโครงข่ายแบบชั้นเดียว (single layer) แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 โครงข่ายชั้นเดียวที่มี  $S$  นิวรอน

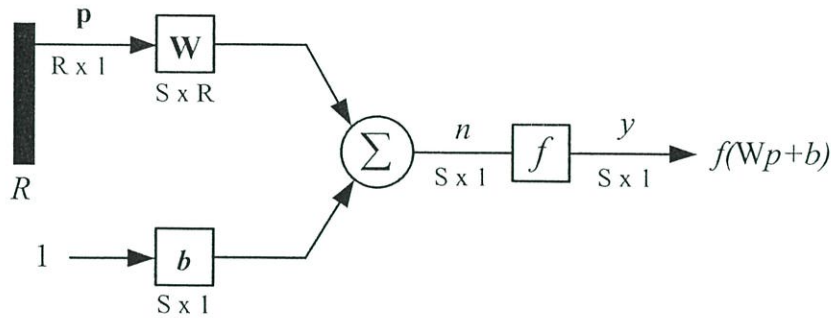
พิจารณาโครงข่ายชั้นเดียวที่มี  $R$  อินพุตและ  $S$  คำนวณน้ำหนักประสาทต่อเข้าสู่แต่ละนิวรอน แต่ละนิวรอนจะมีตัวรวม ไปอัส (b) ฟังก์ชันถ่ายโอนและเอาต์พุต ( $y = f(Wp + b)$ ) โครงสร้างของโครงข่ายนี้สามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_R \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_S \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1R} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2R} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{S1} & w_{S2} & \cdots & w_{SR} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยปกติแล้วจำนวนของอินพุตไม่จำเป็น ไม่จำเป็นต้องเท่ากับจำนวนของนิวรอนในชั้นนั้นๆ (นั่นคือ  $R \neq S$ ) เช่นเดียวกันกับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่จำเป็นจะต้องเป็นชนิดเดียวกันทั้งหมด พิจารณาเมตริกซ์  $W$  จะเห็นได้ว่าค่าน้ำหนักประสาทของแต่ละแถวมีตัวห้อยแรกแสดงว่าเป็นของนิวรอนตัวไหน (มีทั้งหมด  $S$  แถวสำหรับ  $S$  นิวรอน) และมีตัวห้อยที่สองแสดงว่ามาจากอินพุตไหน (มีทั้งหมด  $R$  อินพุต) โครงสร้างทั้งหมดของโครงข่ายชั้นเดียวสามารถแสดงในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังรูปที่ 3.17



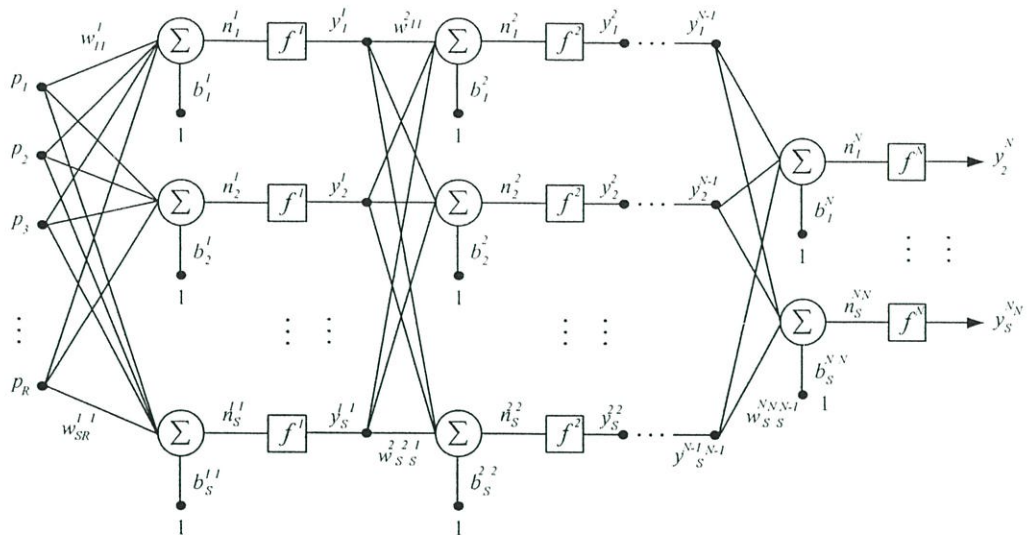
รูปที่ 3.17 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายชั้นเดียวในรูปของเมตริกซ์

โดยปกติในทางปฏิบัติทั่วไปแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมจะมีโครงสร้างหลายชั้น (multiple layers หรือ multilayer network) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 แต่ละชั้นมีเมตริกซ์น้ำหนักประสาท  $W$  ไบอัส  $b$  เน็ตเอาต์พุต  $n$  และเอาต์พุต  $y$  ของชั้นนั้น จากรูปจะเห็นว่าแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนนิวรอนที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือโครงข่ายชั้นแรก (ชั้นอินพุต) มี  $R$  อินพุต ชั้นที่ 1 มี  $S^1$  นิวรอน ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงชั้นสุดท้าย (ชั้นเอาต์พุต) ซึ่งมี  $S^N$  นิวรอน เอาต์พุตของชั้นแรกจะเป็นอินพุตให้กับชั้นที่สอง โครงข่ายที่ไม่ใช่ชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุตเรียกว่าเป็นชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) เอาต์พุตแต่ละชั้นมีค่าดังนี้

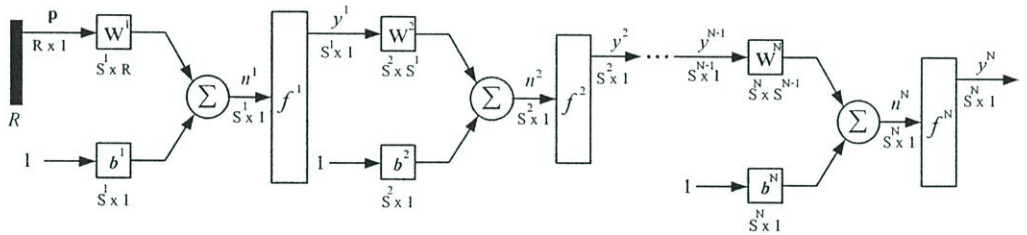
$$\begin{aligned} y^1 &= f^1(W^1 p + b^1) \\ y^2 &= f^2(W^2 y^1 + b^2) \\ &\vdots \\ y^N &= f^N(W^N y^{N-1} + b^N) \end{aligned} \quad (3.14)$$

โครงข่ายหลายชั้นจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าโครงข่ายชั้นเดียวมาก ยกตัวอย่างเช่นโครงข่ายสองชั้นที่ชั้นแรกเป็นฟังก์ชันซิกมอยด์ และชั้นที่สองเป็นฟังก์ชันเส้นตรงสามารถถูกฝึกสอนให้เป็นฟังก์ชันประมาณค่าได้เกือบทุกฟังก์ชัน ที่ซึ่งโครงข่ายชั้นเดียวไม่สามารถทำได้ โครงข่ายหลายชั้นนี้มีพารามิเตอร์ค่อนข้างมาก ดังนั้นสิ่งแรกที่จะนำเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องทำการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่นจำนวนชั้น จำนวนนิวรอนในแต่ละชั้น จำนวนอินพุต จำนวนเอาต์พุต ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน ฯลฯ อย่างไรก็ตามการ

กำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ยกตัวอย่างเช่น จำนวนชั้นของโครงข่าย ที่ตั้งเพียงสองชั้นก็เพียงพอต่อปัญหาต่างๆ ไป ถึงแม้ว่าโครงข่ายที่มากกว่าสามชั้นจะมีใช้บ้างแต่ก็ไม่มาก



รูปที่ 3.18 โครงข่ายหลายชั้นในรูปแบบของเมตริกซ์



รูปที่ 3.19 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายหลายชั้นในรูปแบบของเมตริกซ์

### 3.8 โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา (Tapped Delay Lines / Time Delay Neural Networks) [10]

#### 3.8.1 การเรียนรู้ตามลำดับเวลา (learning time sequences)

มีงานจำนวนมากที่ต้องการเรียนรู้เหตุการณ์อย่างเป็นลำดับในชั่วเวลาหนึ่ง ปัญหาจากงานเหล่านี้สามารถที่จะจำแนกอย่างชัดเจนออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. การรู้จำลำดับ (sequence recognition): จะสร้างรูปแบบเอาต์พุตที่เฉพาะเจาะจงเมื่อพบเห็นอินพุตที่เป็นลำดับโดยเฉพาะ เช่น การรู้จำคำพูด
2. การจำลองลำดับ (sequence reproduction): จะทำให้เกิดจังหวะหยุดของลำดับ เมื่อโครงข่ายเห็นเพียงบางส่วนของลำดับ การใช้งานเช่น การทำนายลำดับของเวลา (สินค้าคงคลัง, จุดตัดำบนดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว, อื่นๆ)

3. ความสัมพันธ์ลักษณะชั่วคราว (temporal association) สร้างลำดับของเอาต์พุตที่เฉพาะเจาะจงในการตอบสนองต่อลำดับอินพุตเฉพาะ เช่น การให้กำเนิดเสียงพูด

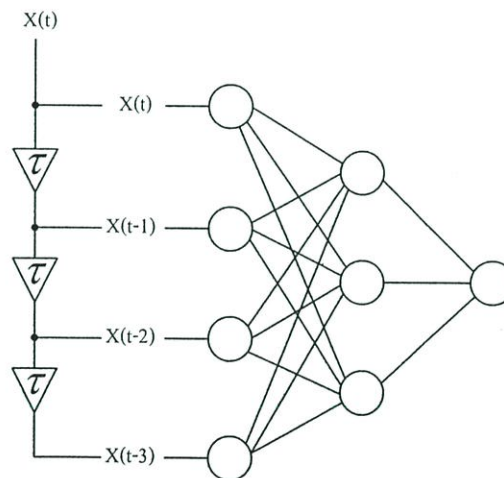
วิธีการอื่นเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่เป็นลำดับชั่วคราว ที่ใช้กันประกอบด้วย

1. วิธีจุดแยกหน่วงเวลาตามแนว (tapped delay lines / time delay networks)
2. วิธีคอนเทคยูนิต (context units เช่น เฮลแมนเน็ต, จอร์แดนเน็ต)
3. วิธีการแพร่กลับผ่านเวลา (back propagation through time; BPTT)
4. วิธีการเรียนรู้ย้อนกลับเวลาจริง (real time recurrent learning; RTRL)

### 3.8.2 โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา (time delay neural networks; TDNN)

การใช้โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา เป็นวิธีการที่ง่ายอย่างหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของการรู้จำอันดับ เพราะสามารถใช้กับขั้นตอนวิธีแบบแพร่กลับธรรมดาๆ ได้

ดังรูปที่ 3.20 จำนวนความจำหรือจำนวนนิวรอนจะถูกกำหนดโดยความยาวของจุดแยกหน่วงเวลาตามแนว โดยถ้าจำนวนยูนิตอินพุตมีจำนวนมาก คือความต้องการให้การคำนวณสามารถเป็นไปอย่างซ้ำได้ และต้องการตัวอย่างเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 3.20 โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา

จากรูปที่ 3.20 เป็นโครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา ซึ่งสามารถพิจารณาการสุ่มตัวอย่างที่ไม่เหมือนกันได้ดังสมการ

$$\bar{x}_i(t) = x(t - \omega_i) \quad (3.15)$$

เมื่อ  $\omega_i$  เป็น ส่วนประกอบการเชื่อมโยงด้วยการหน่วงเวลาที่  $i$

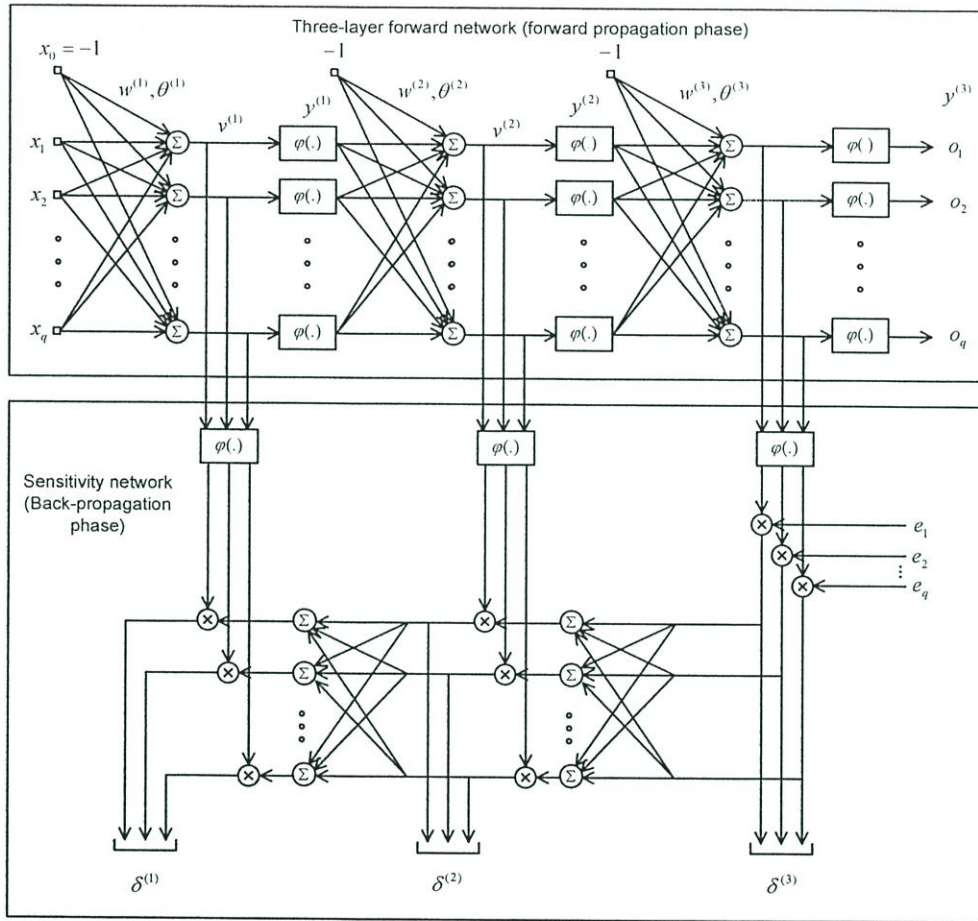
ด้วยเหตุนี้ถ้าโครงข่ายมีจำนวนอินพุต  $n$  ยูนิต ดังนั้นจำนวนความจำหรือจำนวนนิวรอนต้องมีเพียงก่อนถึงขอบเขตชั้นเวลา  $n$

ส่วนต่อขยายอื่นๆ ที่เหลือจะมาจากอินพุตลำดับแรก ดังสมการที่ 3.16

$$\bar{x}_i(t) = \sum_{\tau=1}^l c_i(t-\tau) \times \tau \tag{3.16}$$

### 3.9 การเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Backpropagation learning)

โครงสร้างของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนได้แสดงไว้ในแผนภาพในรูปที่ 3.18 ในขณะที่ ส่วนของเฟสไปข้างหน้า (Forward Phase) และเฟสย้อนหลัง (Backward Phase) ของขั้นตอนวิธี แพร่ย้อนหลัง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.20



$w^{(l)}$  – synaptic weight vector of a neuron in layer  $l$        $y^{(l)}$  – vector of function signals of neurons in layer  $l$   
 $\theta^{(l)}$  – threshold of a neuron in layer  $l$        $\delta^{(l)}$  – vector of local gradients of neurons in layer  $l$   
 $v^{(l)}$  – vector of net internal activity levels of neurons in layer  $l$        $e$  – error vector represented by  $e_1, e_2, \dots, e_q$  as elements

รูปที่ 3.21 ขั้นตอนวิธีเรียนรู้แบบแพร่กลับ

ขั้นตอนวิธีแพร่กลับ สำหรับฝึกสอนมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอน ในรูปที่ 3.20 ดัชนี (Index) ของชั้น ( $l$ ) จะครอบคลุมจากชั้นข้อมูลเข้า ( $l=0$ ) ไปถึงชั้นข้อมูลออก ( $l=L$ ) ในกรณีนี้  $L=3$

ข่ายงานที่อยู่ในส่วนบนของรูปจะเป็นส่วนเฟสไปข้างหน้า ในขณะที่ข่ายงานที่อยู่ในส่วนล่างของรูปจะเป็นส่วนเฟสย้อนหลัง ส่วนล่างของแผนภาพในรูปที่ 3.20 นี้เรียกว่าข่ายงานความไหว (Sensitivity Network) ซึ่งมีหน้าที่คำนวณค่าความชันเฉพาะที่ (Local Gradient) ในขั้นตอนวิธีแพร่ย้อนหลัง

ขั้นตอนวิธีแพร่ย้อนหลังจะใช้กฎการปรับค่าทีละแบบรูป (Pattern-by-Pattern Updating Rule) ในการปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงภายในข่ายงาน ในอีกนัยหนึ่ง ในการทำซ้ำ (Iteration) 1 ครั้ง โดยขั้นตอนวิธี แบบรูป 1 แบบรูปจะเป็นข้อมูลเข้าของข่ายงาน และขั้นตอนวิธีแพร่ย้อนหลัง จะทำการปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงภายในแต่ละชั้นของข่ายงานตามกฎการเรียนรู้ มัลติเลเยอร์จะถูกฝึกสอน โดยการให้เซตของแบบรูปสำหรับฝึกสอน (Training Pattern) ข้อมูลสำหรับฝึกสอน (Training Data) จะสามารถแสดงในรูปของ  $\{[x(n), d(n)]; n = 1, 2, \dots, N\}$  โดยที่  $x(n)$  เป็นตัวอย่าง (Sample) ที่  $n$  ของแบบรูปข้อมูลเข้าซึ่งจะเป็นสัญญาณเข้าสู่ข่ายงาน  $d(n)$  เป็นตัวอย่างที่  $n$  ของแบบรูปข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการ (Desired Response Output Pattern) จากข่ายงาน และ  $N$  เป็นจำนวนของแบบรูปทั้งหมดในเซตของแบบรูปสำหรับฝึกสอน เมื่อทำการฝึกสอนข่ายงานระบบประสาทโดยทำซ้ำครบ  $N$  ครั้ง จะกล่าวได้ว่าข่ายงานระบบประสาทได้รับการฝึกสอนไปแล้วเป็นจำนวน 1 รอบเวลา (Epoch) ขั้นตอนวิธีแพร่ย้อนหลังจะสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. Initialization เริ่มต้นจากการเลือกโครงสร้างหรือสถาปัตยกรรมของมัลติเลเยอร์เพอร์เซ็ปตรอนซึ่งรวมถึงจำนวนของปมข้อมูลเข้า (Input Node) จำนวนของชั้นซ่อน จำนวนของปมซ่อน (Hidden Node) ในแต่ละชั้นซ่อน และจำนวนของปมข้อมูลออก (Output Node) จำนวนของปมข้อมูลเข้าและข้อมูลออกจะถูกกำหนดโดยคุณลักษณะของงานที่ข่ายงานระบบประสาทต้องทำ ในขณะที่จำนวนของชั้นซ่อนและจำนวนของปมซ่อนในแต่ละชั้นซ่อนจะเป็นปัญหาเชิงการออกแบบ (Design Problem) เมื่อได้กำหนดสถาปัตยกรรมของข่ายงานระบบประสาทแล้ว ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงและค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในข่ายงานก็就会被กำหนดค่าขึ้นอย่างสุ่ม โดยการแจกแจงค่าที่สุ่มขึ้นจะมีลักษณะเป็นการแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution)

2. Presentation of Training Examples ป้อนข้อมูลแบบรูปฝึกสอนเข้าข่ายงาน ซึ่งตามปกติแล้วลำดับก่อนหลังของแบบรูปในเซตของแบบรูปฝึกสอนจะถูกจัดลำดับใหม่ (Reshuffle) หลังจากที่มีการเรียนรู้ใน 1 รอบเวลาได้เสร็จสิ้นลง สำหรับแต่ละแบบรูปที่ใช้ในการฝึกสอนข่ายงานระบบประสาทในแต่ละการทำซ้ำ ให้ทำการคำนวณไปข้างหน้า (Forward Computation) และการคำนวณย้อนหลัง (Backward Computation) ตามข้อ 3 และข้อ 4

3. Forward Computation ให้แบบรูปฝึกสอนที่ถูกป้อนเข้าข่ายงานระบบประสาทเป็น  $[x(n), d(n)]$  โดยที่  $x(n)$  เป็นเวกเตอร์ข้อมูลเข้าซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่ปมข้อมูลเข้าของข่ายงาน และ  $d(n)$  เป็นเวกเตอร์ข้อมูลออกของการตอบสนองที่ต้องการที่แสดงค่าไว้ที่ปมข้อมูลออกของข่ายงาน ทำการคำนวณไปข้างหน้าโดยที่ระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  จะมีค่าเป็น

$$v_j^{(l)}(n) = \sum_{i=0}^p w_{jo}^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (3.17)$$

โดยที่  $y_i^{(l-1)}$  เป็นข้อมูลออกของนิวรอนที่  $i$  ในชั้นก่อน (Previous Layer) ที่  $l-1$  ที่การทำซ้ำครั้งที่  $n$   $w_{jo}^{(l)}(n)$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักระหว่างนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  และนิวรอนที่  $i$  ในชั้นที่  $l-1$   $v_j^{(l)}(n)$  เป็นระดับการกระตุ้นภายในสุทธิของนิวรอนที่  $j$  และ  $p$  เป็นจำนวนของนิวรอนในชั้นที่  $l-1$  ในกรณีที่  $i = 0$   $y_o^{(l-1)}(n)$  จะมีค่าเท่ากับ  $-1$  และ  $w_{jo}^{(l)}(n)$  จะมีค่าเท่ากับ  $\theta_j^{(l)}(n)$  ซึ่งก็คือค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  โดยการใช้ฟังก์ชันเชิงตรรกะเป็นฟังก์ชันการกระตุ้นในแต่ละนิวรอน ข้อมูลออกของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  จะมีค่าเป็น

$$y_j^{(l)}(n) = \frac{1}{1 + \exp(-v_j^{(l)}(n))} \quad (3.18)$$

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

$$y_i^0(n) = x_i(n), \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3.19)$$

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

$$y_j^{(L)}(n) = o_j(n), \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (3.20)$$

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

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n), \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (3.21)$$

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

4. Backward Computation คำนวณค่าความชันเฉพาะที่ ( $\delta$ ) ของข่ายงานโดยการคณนย้ายย้อนหลังจากชั้นหนึ่งถอยหลังกลับไปยังชั้นก่อน ถ้านิวรอนที่  $j$  อยู่ในชั้นข้อมูลออก ค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $j$  จะมีค่าเป็น

$$\delta_j^{(L)}(n) = e_j(n) o_j(n) [1 - o_j(n)] \quad (3.22)$$

โดยที่  $\delta_j^{(l)}(n)$  เป็นค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $j$  ในชั้นข้อมูลออก  $L$  แต่ถ้านิวรอนที่  $j$  อยู่ในชั้นซ่อนที่  $l$  ค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $j$  จะมีค่าเป็น

$$\delta_j^{(l)}(n) = y_j^{(l)}(n)[1 - y_j^{(l)}(n)] \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) w_{kj}^{(l+1)}(n) \quad (3.23)$$

โดยที่  $\delta_k^{(l+1)}(n)$  เป็นค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $k$  ในชั้นที่  $l+1$   $w_{kj}^{(l+1)}(n)$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงระหว่างนิวรอนที่  $k$  ในชั้นที่  $l+1$  กับนิวรอนที่  $j$  ในชั้นที่  $l$  เมื่อคำนวณค่าความชันเฉพาะที่ได้แล้ว การปรับตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงโดยใช้การเรียนรู้แบบแก้ข้อผิดพลาดจะสามารถทำได้โดยให้

$$w_{\mu}^{(l)}(n+1) = w_{\mu}^{(l)}(n) + \alpha[w_{\mu}^{(l)}(n) - w_{\mu}^{(l)}(n-1)] + \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (3.24)$$

โดยที่  $\eta$  เป็นพารามิเตอร์อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate Parameter) และ  $\alpha$  เป็นค่าคงตัวโมเมนตัม

5. Iteration ให้ทำการคำนวณซ้ำโดยการป้อนข้อมูลด้วยรูปฝึกสอนเป็นจำนวน  $m$  รอบ เวลาจนกระทั่งค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงลู่เข้า ซึ่งการลู่เข้าของค่าตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงจะสามารถสังเกตได้จากการลู่เข้าของค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean of Sum of Squared Errors) จากปมข้อมูลออก ซึ่งคำนวณโดยใช้ค่าผิดพลาดระหว่างการเรียนรู้ใน 1 รอบเวลา ค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสองนี้สามารถคำนวณได้โดย

$$\text{Mean of Sum of Squared Errors} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^q (e_i(j))^2}{N} \quad (3.25)$$

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

### 3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

การสำรวจงานวิจัยในหัวข้อนี้มุ่งเน้นสำหรับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับการใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวงจรกรองกำลัง แอคทีฟ

ปีที่พิมพ์ (ก.ศ.)	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1993	Simon D. Round and Ned Mohan	ได้นำเสนอวงจรกรองกำลังที่ใช้โครงข่ายควบคุมเชิงความถี่ (frequency domain) เปรียบเทียบกับโครงข่ายควบคุมเชิงเวลา (time domain) พิจารณาประสิทธิภาพในช่วงสภาวะคงที่และสภาวะชั่วขณะ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายควบคุมเชิงความถี่จะใช้สัญญาณกระแสโพลคเป็นอินพุต การคำนวณผลขององค์ประกอบความถี่ที่ต่ำจะทำให้ผลการตอบสนองชั่วคราวที่แย่ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายควบคุมเชิงเวลาซึ่งจะถูกสอนให้จดจำรูปคลื่นกระแสโพลคที่มีการเปลี่ยนแปลงโพลค ทำให้ผลการตอบสนองชั่วคราวได้ยอด่างดี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟ
1994	Narade Pecharanin, Mototaka Sone and Hideo Mitsui	ได้ประยุกต์นำโครงข่ายประสาทเทียมมาตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลัง โดยการฝึกสอนโครงข่ายได้จำลองรูปคลื่นที่มีฮาร์มอนิกที่ 3, 5 และ 7 เพื่อให้โครงข่ายแยกแยะฮาร์มอนิกแต่ละลำดับออกมา ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทสามารถที่จะตรวจจับฮาร์มอนิกแต่ละอันดับได้
1998	El-Amin and Arafah	ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (neural network) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก โดยมีการเปรียบเทียบผลกับวิธี FFT ซึ่งผลการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมให้ความถูกต้องสูงกว่าแต่ข้อเสียคือ ใช้เวลานานในการระบุเอกลักษณ์ โดยเฉพาะในช่วงการฝึก (train) ให้กับโครงข่ายประสาท
1999	M. Rukonuzzaman and Mutsuo Nakaoka	ได้นำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ายอดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิก โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้นแบบแพร่กลับ ที่มีกระบวนการเรียนรู้ ซึ่งมีการลู่เข้าสู่เป้าหมายที่รวดเร็วกว่าโครงข่ายประสาทแพร่กลับพื้นฐาน โดยวิธีการที่นำเสนอต้องการสัญญาณรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนเพียงครั้ง ไซเคิลเพื่อหาค่ายอดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิก

ตารางที่ 3.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวงจรกรองกำลัง แอคทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	M. Rukonuzzaman and Mutsuo Nakaoka	นำเสนอวงจรกรองกำลังแอคทีฟที่ก้าวหน้า โดยการใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมที่ปรับตัวได้ เพื่อตรวจจับฮาร์มอนิกจากกระแสโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและสามารถที่จะหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกชั่วขณะได้อย่างมีประสิทธิภาพในเวลาจริง การควบคุมกระแสเพื่อชดเชยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบจะใช้เทคนิคมอดูเลตแบบสเปซโวลต์เชิงเวกเตอร์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่ใช้เทคนิคนี้สามารถที่จะตรวจสอบองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพและเที่ยงตรง และสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในเวลาจริงได้
2002	F.B. Libano, R.A.M. Braga, G. Willmann and S.L. Muller	ได้นำเสนอวิธีหาสัญญาณควบคุมอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้น ซึ่งวิธีการนี้ต้องการรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนของแรงดัน หนึ่งในสาเหตุที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น วิธีการควบคุมที่ใช้โครงข่ายจะถูกเปรียบเทียบกับวิธีการแยกแยะแบบ SRF (Synchronous Reference Frame) ผลการวิจัยโครงข่ายประสาทสามารถสร้างกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังได้อย่างน่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอไม่จำเป็นสำหรับการแก้ปัญหาการผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดัน และการนำวิธีการนี้ไปใช้กับโหลดชนิดอื่นๆ จำเป็นต้องมีการปรับค่าน้ำหนักถ่วงให้เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ ด้วย
2006	Abdelaziz Zouidi, Farhat Fnaiech, Karmal AL-Haddad and Salem Rahmani	ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจสอบฮาร์มอนิก โดยการใช้โครงข่ายประสาทป้อนไปหน้าที่มีการแพร่ค่ากลับ โดยรูปแบบอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมคือ เซตของกระแสโหลดที่วัดได้ และเป้าหมายของการคำนวณ คือ ค่ายอดของฮาร์มอนิกที่ถูกคำนวณ โดยใช้วิธี FFT ซึ่งผลการวิจัยได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถทำงานได้

### 3.11 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม สถาปัตยกรรมโครงข่าย ชนิดการฝึกสอนแก่โครงข่ายประสาท และยังได้กล่าวถึงโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (MLP) และโครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา (TDNN) รวมถึงการเรียนรู้แบบแพร่กลับที่มีการใช้เป็นขั้นตอนวิธีในการฝึกสอนโครงข่ายไปข้างหน้าแบบหลายชั้นที่แพร่หลายที่สุด และส่วนสุดท้ายของบทนี้ยังได้กล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับวงจรรอกำลึงแอกทีฟ โดยจะเป็นพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรรอกำลึงแอกทีฟแบบขนาน หนึ่งเฟสที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

## บทที่ 4

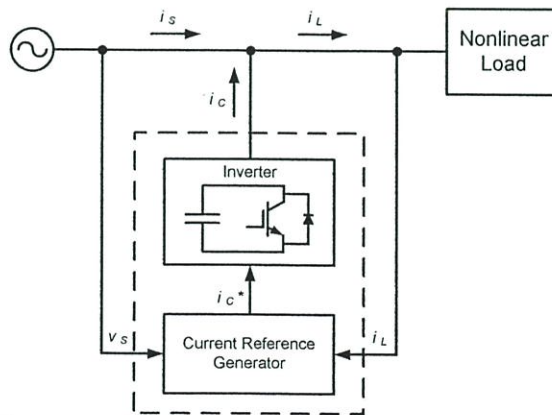
# การวิเคราะห์และออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน หนึ่งเฟสที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

### 4.1 บทนำ

วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสที่นำเสนอที่นี่ เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบที่ต่ออยู่กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น วงจรรอกำลังแอกทีฟที่ออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้เทคนิคการสร้างกระแสอ้างอิงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบหนึ่งเฟส ซึ่งจะกล่าวถึงการวิเคราะห์และออกแบบโครงข่ายประสาทเทียม พารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ รวมทั้งได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับตรวจสอบการทำงานของวงจร เพื่อให้มั่นใจว่าวงจรที่ออกแบบมีความถูกต้องสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้

### 4.2 การวิเคราะห์และหลักการสร้างกระแสอ้างอิง [10]

โครงสร้างพื้นฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยวงจรรอกำลังแอกทีฟจะเป็นตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งกระแสของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามาจากค่าเฉลี่ยของความกว้างพัลส์สัญญาณ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าวงจรรอกำลังแอกทีฟต่ออยู่กับโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้นในลักษณะขนาน โดยวงจรรอกำลังแอกทีฟจะทำการสร้างกระแสฮาร์มอนิกเพื่อที่จะไปทำการชดเชยกระแส



รูปที่ 4.1 วงจรพื้นฐานของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

สมมติว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณชายน้จริงๆ ดังนั้น

$$V_S(t) = v_m \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

กระแสแหล่งจ่ายที่มีการผิดเพี้ยนเนื่องจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น โดยกระแสโหลดประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลัก คือ

$$i_L(t) = \sum_{n=0}^{\alpha} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (4.2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} i_L(t) &= I_0 + I_1 \cos \phi_1 \sin(\omega t) + I_1 \sin \phi_1 \cos(\omega t) + \sum_{n=2}^{\alpha} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \\ &= i_0(t) + i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $i_0(t)$  คือ องค์ประกอบไฟตรง

$i_p(t)$  คือ กระแสแอกทีฟ

$i_q(t)$  คือ กระแสรีแอกทีฟ

$i_h(t)$  คือ กระแสฮาร์มอนิก

จากสมการที่ (4.3) พบว่าถ้าวงจรรองรับกำลังแอกทีฟสามารถสร้างกระแส  $i_C(t)$  ซึ่งต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแส  $i_q(t) + i_h(t)$  เป็นผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายจะเหลือเพียงกระแสแอกทีฟเพียงอย่างเดียว ที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นลักษณะรูปชายน้และมีเฟสเดียวกันกับแหล่งจ่าย  $V_S(t)$  ดังนั้น

$$i_C(t) = i_L(t) - i_p(t) \quad (4.4)$$

### 4.3 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ากระแสแอกทีฟ

เนื่องจากการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวงจรรองรับกำลังแอกทีฟแบบขนานจะต้องทำการฉีดกระแสชดเชยกลับเข้าไปในระบบ เพื่อหักล้างกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเพื่อให้ในระบบเหลือแต่องค์ประกอบความถี่มูลฐานเท่านั้น สำหรับการหาค่ากระแสฮาร์มอนิกในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีซึ่งมีข้อดีและข้อเสียต่างๆ กันไป โดยงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความสามารถวิเคราะห์

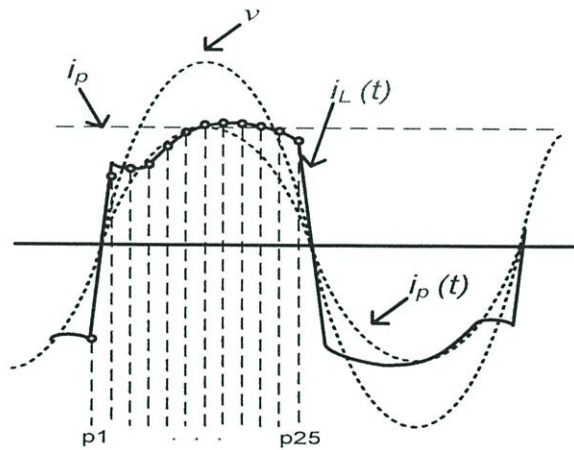


และตัวแปรเอาต์พุต โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ตัวแปรอินพุตสำหรับการฝึกสอน คือกระแสไหลออกจากจอร์เรียงกระแสเฟสเดียว ( $i_L(t)$ ) กรณีโหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ค่าความต้านทาน 40-100 โอห์ม และตัวเหนี่ยวนำ 50mH, 100mH, 150mH, 200mH และ 250mH ตามลำดับ ที่ความถี่ 50Hz จำนวน 300 รูปแบบ โดยรูปคลื่นกระแสไหลจะถูกสุ่มค่ายอด ที่เวลาห่างกันทุกๆ 0.4ms จำนวน 25 จุด เพื่อป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 4.3

ค่ายอดของกระแสแอกทีฟ ( $i_p$ ) จากกระแสไหลค่าต่างๆ ถูกใช้เป็นเป้าหมาย (target) สำหรับการสอนแบบชี้แนะ (Supervised learning) โดยตัวอย่างในการฝึกสอน (training set) จะอยู่ในรูปของคู่อินพุตและเป้าหมายที่ต้องการให้โครงข่ายตอบสนอง พิจารณาคู่ลำดับอินพุตและเป้าหมายได้ดังนี้

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_{300}, t_{300}\} \quad (4.5)$$

โดยที่  $p_i$  เป็นอินพุตของโครงข่ายและ  $t_i$  เป็นเป้าหมายของอินพุตนั้นๆ เมื่ออินพุตถูกป้อนให้กับระบบ เอาต์พุตของโครงข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายของอินพุต แล้วโครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบอัสตามกฎการเรียนรู้ เพื่อให้เอาต์พุตของโครงข่ายลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

#### 4.4.2 ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลที่น่ามาใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมนั้น โดยส่วนมากจะขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมข้อมูล ถ้าข้อมูลดังกล่าวได้มาโดยวิธีการเก็บบันทึกค่าจากงานจริง ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับโหลดและความถี่ในการเก็บบันทึก ส่วนในกรณีที่ข้อมูลดังกล่าวเกิดจากการจำลองเหตุการณ์ (simulation) ปริมาณของข้อมูลก็จะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของการจำลองเหตุการณ์ เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นการเลือกปริมาณของข้อมูลฝึกสอนจึงต้องพิจารณาตามวิธีการเตรียมข้อมูลด้วย

ข้อมูลทดสอบ คือ ข้อมูลที่นำมาทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว โดยเป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุต เช่นเดียวกันกับข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน หากแต่ค่าของตัวแปรดังกล่าวในชุดข้อมูลทดสอบจะเป็นค่าที่ไม่ถูกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นค่าที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน (unseen)

การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะใช้ค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลทดสอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้วเป็นเกณฑ์ ซึ่งจะนำเสนอในรูปแบบของค่าผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (mean absolute percentage error; mape) ดังสมการที่ 4.6

$$mape = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Ip_{ANN} - Ip_{FFT}}{Ip_{FFT}} \right| \times 100\% \quad (4.6)$$

โดยที่  $Ip_{ANN}$  คือ กระแสแอกทีฟที่เป็นคำตอบของโครงข่ายประสาทเทียม  
 $Ip_{FFT}$  คือ กระแสแอกทีฟที่เป็นคำตอบของวิธี FFT  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทดสอบ

ปริมาณของข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ สำหรับการหาค่ากระแสแอกทีฟจากกระแสไหลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอนอินพุต ประกอบด้วย กระแสไหลจากวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟส โหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ จำนวน 300 รูปแบบ ส่วนข้อมูลเป้าหมายในการฝึกสอน ก็คือขนาดของกระแสแอกทีฟที่เกิดจากกระแสไหลที่ใช้เป็นรูปแบบข้อมูลอินพุตจำนวน 300 รูปแบบเช่นกัน สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

กระแสไหลที่พิจารณา	เงื่อนไขที่	จำนวนข้อมูลฝึกสอน	จำนวนข้อมูลทดสอบ
กระแสไหลจากวงจรเรียง	1	180	30
กระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟส โหลด	2	240	30
ตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ	3	300	30

#### 4.4.3 เงื่อนไขของการฝึกสอน

เงื่อนไขทั้งหมดที่กำหนดขอบเขตการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งมีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.4.3.1 ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

การเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส หากเลือกค่าแรกได้ใกล้เคียงกับคำตอบ ทำให้สามารถตอบคำถามได้ถูกต้องอย่างรวดเร็ว และใช้จำนวนรอบในการตอบคำถามน้อยลง

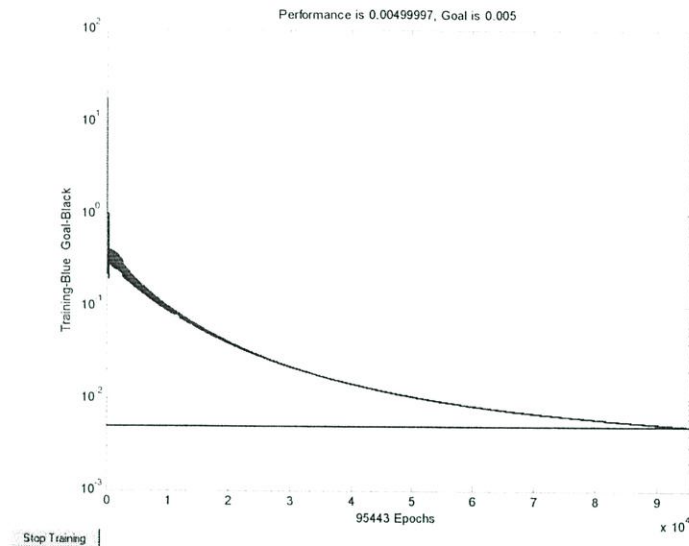
การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้วิธีการเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสแบบสุ่ม เพื่อให้การฝึกสอนในแต่ละรอบมีทิศทางการลู่เข้าหาคำตอบแตกต่างกันออกไป

#### 4.4.3.2 ลำดับขั้นตอนในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

ลำดับขั้นตอน (algorithm) ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส สำหรับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมชนิดป้อนไปข้างหน้า (feed-forward neural network) โดยใช้ neural network toolbox นั้นมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น levenberg-maquardt algorithm, resilient backpropagation, conjugate gradient, gradient descent backpropagation เป็นต้น แต่ละวิธีก็จะมีประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการฝึกสอนแตกต่างกัน ตามที่ระบุไว้ใน neural network toolbox user's guide นั้น gradient descent backpropagation (traingd) สามารถที่จะฝึกสอนให้โครงข่ายประสาทเทียมใดๆ ก็ได้ด้วยระยะเวลาที่ยาวนาน อีกทั้งยังสามารถใช้ฟังก์ชันกระตุ้นที่แตกต่างกันได้ การฝึกสอนใช้การคำนวณแบบแพร่ค่าย้อนกลับ (backpropagation) ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเอาการฝึกสอนแบบนี้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

#### 4.4.3.3 จำนวนครั้งของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส

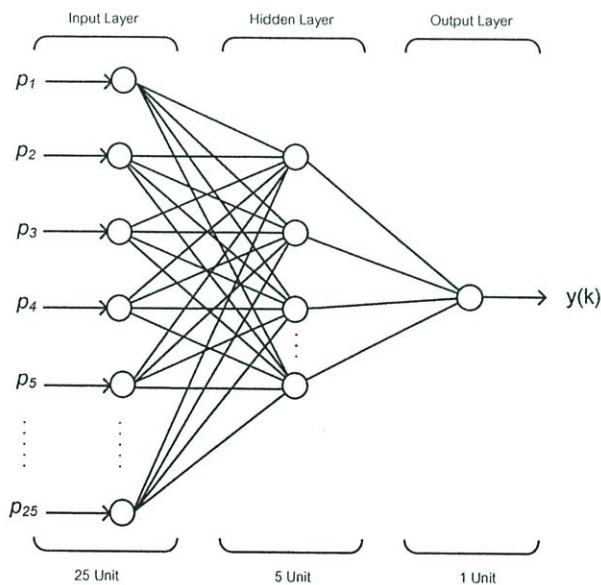
ในขณะที่ทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละรอบสำหรับกระแสไหลทั้งสองกรณี จะกำหนดให้มีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสเป็นจำนวน 1,000,000 ครั้ง (epoch) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบระยะเวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ในแต่ละเงื่อนไข และการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสแต่ละ epoch จะทำการคำนวณหาค่าผิดพลาดของคำตอบของข้อมูลฝึกสอนแต่ละชุด เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดกำลังสอง (mean square error; MSE) ของชุดข้อมูลฝึกสอนใน epoch ปัจจุบัน กับค่า MSE ของชุดข้อมูลฝึกสอนก่อนหน้านี้นี้ และเก็บค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสใน epoch ที่ทำให้ค่า MSE ของชุดข้อมูลฝึกสอนมีค่าที่ต่ำที่สุดไว้ไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การลู่เข้าหาคำตอบของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัสในแต่ละรอบของการฝึกสอน

#### 4.4.3.4 จำนวนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนชั้นอยู่ 3 ชั้น ประกอบไปด้วย ชั้นอินพุตที่มี 25 ยูนิต, ชั้นซ่อนเร้นที่มี 5 ยูนิต และชั้นเอาต์พุตที่มี 1 ยูนิต แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยให้มีการเรียนรู้แบบแพร่กลับ



รูปที่ 4.5 โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนที่มีจำนวน 3 ชั้น

#### 4.4.3.5 ชนิดของฟังก์ชันการถ่ายโอน

ฟังก์ชันการถ่ายโอน (transfer function) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ใช้กับโครงข่ายประสาทเทียมชนิด feed-forward neural network มีอยู่หลายชนิดดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเปรียบเทียบฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ log-sigmoid ในชั้นซ่อน และฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ linear ในชั้นเอาต์พุต กับฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ tan-sigmoid ในชั้นซ่อนแทน โดยชั้นข้อมูลเอาต์พุตยังคงเป็นฟังก์ชัน linear เช่นเดิม เพื่อเลือกฟังก์ชันการถ่ายโอนที่เหมาะสมสำหรับโครงข่าย

#### 4.4.4 การฝึกสอน

ในขั้นตอนการฝึกสอนจะเป็นการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบ เมื่อได้ข้อมูลจากการจำลองเหตุการณ์ตามที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.4.1 นำข้อมูลดังกล่าวมาจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยเมตริกซ์ดังกล่าวจะมีจำนวนหลักเท่ากับจำนวนตัวแปรอินพุต และมีจำนวนเท่ากับจำนวนชุดของข้อมูลฝึกสอน หรือข้อมูลทดสอบ

ดังนั้นข้อมูลฝึกสอนสำหรับโครงข่ายประสาทในแต่ละกรณี จะเป็นเมตริกซ์ขนาด  $25 \times 180$ ,  $25 \times 240$  และ  $25 \times 300$  โดยมีข้อมูลทดสอบที่เป็นเมตริกซ์ขนาด  $25 \times 30$

ขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเรียนรู้ (learning) และขั้นตอนการทดสอบ (testing) ซึ่งในการเรียนรู้นั้นมี 2 ลักษณะ คือ การคำนวณไปข้างหน้า (forward propagation) และการคำนวณแพร่กระจายกลับ (backward propagation) ส่วนแรกการคำนวณไปข้างหน้า จะเป็นการป้อนข้อมูลอินพุตให้กับโครงข่าย จากนั้นโครงข่ายจะทำการคำนวณจากชั้นอินพุตไปยังชั้นเอาต์พุต โดยให้  $P_n = (P_{n_1}, P_{n_2}, \dots, P_{n_{25}})$  เป็นข้อมูลขนาดของกระแสไหล โดยที่  $n$  หมายถึง ลำดับของการเรียนรู้ และจะได้รับการกระตุ้นภายใน (net) ที่  $j$  ของชั้นซ่อน (hidden layer) เป็น

$$net_1(n) = \sum_{i=1}^{25} w^1_{ji}(n)p_i(n) + b_j^1 \quad (4.7)$$

คำนวณข้อมูลออกชั้นซ่อนได้จากสมการ

$$a_j(n) = f(net_1(n)) \quad (4.8)$$

เมื่อ  $f(.)$  เป็นฟังก์ชันล็อกซิมมอยด์ (Log-sigmoid function) ที่ชั้นซ่อน และสมการที่ชั้นเอาต์พุตเป็น

$$net_2(n) = \sum_{i=1}^5 w^2_{ji}(n)a_i(n) + b_j^2 \quad (4.9)$$

$$y_j = f(net_2(n)) \quad (4.10)$$

เมื่อ  $f(.)$  เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) ที่ชั้นเอาต์พุต

ส่วนที่สองการคำนวณแพร่กระจายกลับ จะเป็นการคำนวณจากชั้นเอาต์พุตมายังชั้นอินพุต โดยคำนวณหาค่าผิดพลาด (error) เพื่อที่จะปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต โดยการปรับน้ำหนักถ่วงจะคำนวณได้จากสมการ โดยมีลำดับขั้นตอนการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบอัส ดังสมการ

$$w_{\mu}^{(l)}(n+1) = w_{\mu}^{(l)}(n) + [w_{\mu}^{(l)}(n) - w_{\mu}^{(l)}(n-1)] + \alpha \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (4.11)$$

โดยที่  $w_{\mu}$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง

$\alpha$  คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

$\delta_j^{(L)}(n)$  คือ ค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $j$

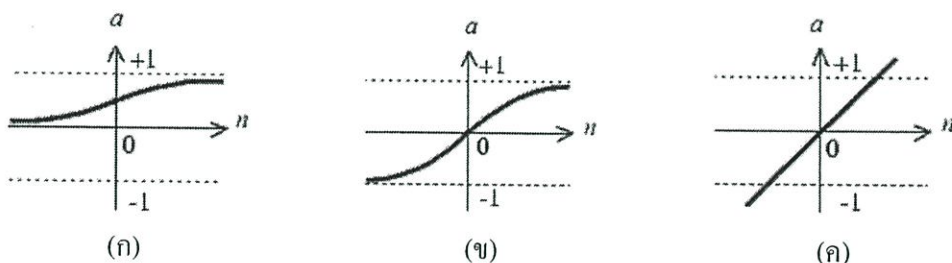
การฝึกสอนจะคำนวณซ้ำ โดยการป้อนรูปแบบฝึกสอนเป็นจำนวน  $N$  รอบเวลา จนกระทั่งค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำกว่าที่ตั้งไว้ โดยดูจากค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error; MSE) คำนวณได้จาก

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_i(j))^2 \quad (4.12)$$

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

#### 4.4.5 ผลการฝึกสอน

ผลการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink มีผลการฝึกสอนดังรายละเอียดต่อไปนี้ ฟังก์ชันการถ่ายโอนหรือฟังก์ชันการกระตุ้นซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำฟังก์ชันการถ่ายโอน 2 ชนิดมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาประสิทธิภาพของโครงข่ายภายหลังการเรียนรู้โดยมีฟังก์ชัน tangent sigmoid และฟังก์ชัน log sigmoid เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนในชั้นซ่อน ส่วนในชั้นเอาต์พุตใช้ฟังก์ชัน linear ทั้งสองกรณี



รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันการถ่ายโอน (ก) ชนิด log sigmoid, (ข) ชนิด hyperbolic tangent sigmoid และ (ค) ชนิด linear

หลังจากการฝึกสอนได้เสร็จสิ้นแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมต้องถูกทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ โดยการใช้ข้อมูลใหม่ที่โครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยเรียนรู้มาก่อน การทดสอบได้จำลองค่าพารามิเตอร์ใหม่ 30 กรณี ผล Mean absolute percentage error (mape) เป็นตามตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน hyperbolic tangent sigmoid และฟังก์ชัน linear

จำนวนข้อมูลสอน	mape ของผลทดสอบจากข้อมูลทดสอบ 30 ชุด
180	2.814
240	1.672
300	1.594

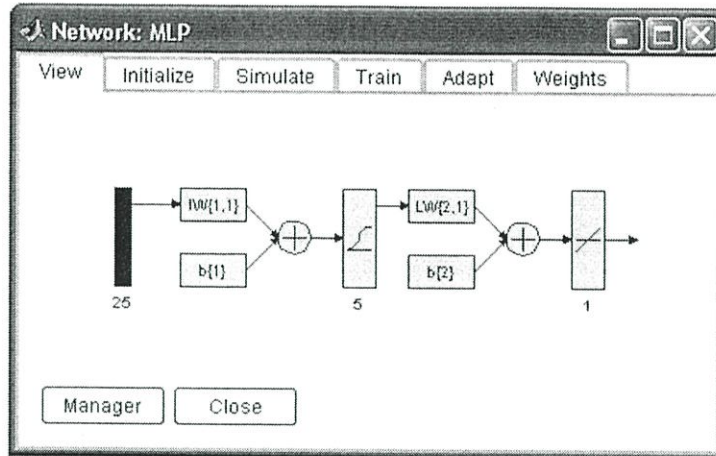
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน log sigmoid และฟังก์ชัน linear

จำนวนข้อมูลสอน	mape ของผลทดสอบจากข้อมูลทดสอบ 30 ชุด
180	1.756
240	1.591
300	1.238

ผลการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นอินพุตจำนวน 25 หน่วย ชั้นซ่อนเร้นจำนวน 5 หน่วย และชั้นเอาต์พุตจำนวน 1 หน่วย จากจำนวนข้อมูลทดสอบ 30 ชุด โครงข่ายประสาทที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้จากการใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอน log sigmoid ที่ชั้นซ่อนและฟังก์ชัน linear ที่ชั้นเอาต์พุต ซึ่งมี mape ประมาณ 1.238 และจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการฝึกสอนโครงข่ายด้วยจำนวนข้อมูลสอนที่มากขึ้นจะทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย

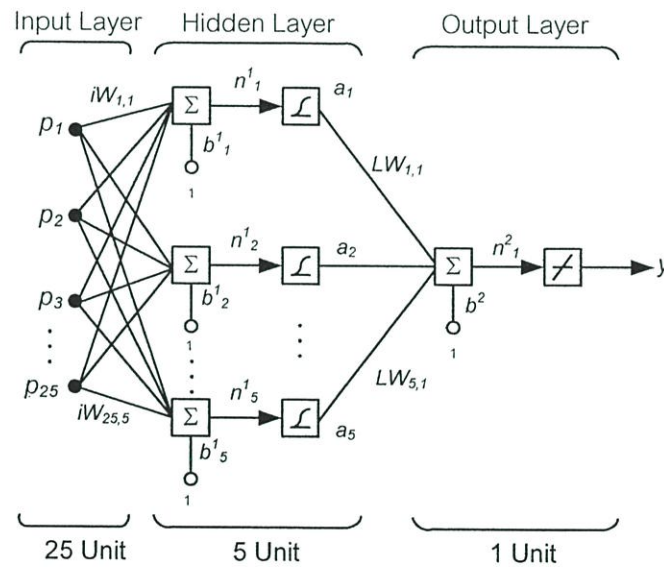
#### 4.4.6 โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากฝึกสอน

จากขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เราจะได้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเก็บตรอนหลายชั้นสำหรับการหาค่ากระแสแอกทีฟจากสัญญาณกระแสโหนด ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนที่ได้จากการฝึกสอน

จากรูปที่ 4.7 สามารถเขียนโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่นำมาใช้ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 4.8 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วย

1 ชั้นอินพุต (input layer) จำนวน 25 ยูนิต สำหรับรับสัญญาณอินพุต คือ  $p_1, p_2, \dots, p_{25}$  ตามลำดับ ซึ่งก็คือค่ายอดของกระแสไหลในชั่วครั้งหนึ่งของไซเคิล ดังรูปที่ 4.3 และสัญญาณอินพุตที่รับเข้ามาจะถูกส่งออกไปยังชั้นถัดไป

2 ชั้นซ่อน (hidden layer) จำนวน 5 ยูนิท จะรับสัญญาณจากชั้นอินพุตเข้ามา แต่ละข่ายเชื่อมโยงจะถูกเชื่อมโยงโดยค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) คือ  $iw_{1,1}$ ,  $iw_{1,2}$ , ...,  $iw_{25,5}$  ค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะถูกคูณกับสัญญาณอินพุตเพื่อส่งออกไปยังโครงข่ายประสาทเทียมถัดไป จากนั้นค่าที่รับมาจากการคูณของค่าถ่วงน้ำหนักจะนำมารวมกัน แล้วนำค่าที่ได้มาผ่านฟังก์ชันการกระตุ้น (activation function) โดยฟังก์ชันการกระตุ้นที่ใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมชั้นนี้ คือ ฟังก์ชันแบบ log sigmoid transfer function

3 ชั้นเอาต์พุต (output layer) จำนวน 1 ยูนิท โครงข่ายประสาทเทียมที่ชั้นนี้จะได้รับค่าระดับการกระตุ้น (net) คือ  $a_1$ ,  $a_2$ , ...,  $a_5$  มาจากชั้นซ่อน ซึ่งจะถูคูณเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักที่ชั้นเอาต์พุต คือ  $lw_{1,1}$ ,  $lw_{2,1}$ , ...,  $lw_{5,1}$  หลังจากนำมารวมกันแล้วผ่านฟังก์ชันการกระตุ้น แบบ linear transfer function จะทำให้ได้ผลเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม  $y$  ซึ่งก็คือขนาดของกระแสแอกทีฟนั่นเอง

ค่าน้ำหนักถ่วงและค่าไบอัสในชั้นต่าง ๆ ของโครงข่ายประสาทเทียม เป็นดังนี้

- ค่าน้ำหนักถ่วง ที่ชั้นซ่อน  $iw$  :

$iw_{11} = -0.071636$	$iw_{12} = -0.018047$	$iw_{13} = 0.1285$	$iw_{14} = 0.16892$	$iw_{15} = 0.056818$
$iw_{21} = 0.26975$	$iw_{22} = 0.052578$	$iw_{23} = 0.27274$	$iw_{24} = 0.22116$	$iw_{25} = 0.042966$
$iw_{31} = 0.24685$	$iw_{32} = 0.035221$	$iw_{33} = 0.7873$	$iw_{34} = 0.4232$	$iw_{35} = 0.13524$
$iw_{41} = -0.23333$	$iw_{42} = -0.47641$	$iw_{43} = 0.31561$	$iw_{44} = -0.51303$	$iw_{45} = 0.31347$
$iw_{51} = -0.01856$	$iw_{52} = -0.3515$	$iw_{53} = -0.1965$	$iw_{54} = -0.21952$	$iw_{55} = 0.67469$
$iw_{61} = -1.154$	$iw_{62} = -0.58012$	$iw_{63} = 0.23677$	$iw_{64} = 0.77946$	$iw_{65} = -0.35365$
$iw_{71} = -0.35991$	$iw_{72} = -0.16984$	$iw_{73} = -0.15322$	$iw_{74} = -0.13506$	$iw_{75} = -0.09826$
$iw_{81} = -0.02414$	$iw_{82} = 0.21272$	$iw_{83} = 0.17582$	$iw_{84} = -0.11934$	$iw_{85} = 0.60113$
$iw_{91} = 0.40467$	$iw_{92} = 0.25851$	$iw_{93} = 0.45646$	$iw_{94} = 0.58041$	$iw_{95} = 0.38059$
$iw_{101} = 0.37376$	$iw_{102} = 0.36952$	$iw_{103} = 0.24808$	$iw_{104} = 0.24537$	$iw_{105} = 0.06939$
$iw_{111} = 0.63021$	$iw_{112} = -2.2593$	$iw_{113} = -0.7557$	$iw_{114} = 0.39628$	$iw_{115} = 0.79231$
$iw_{121} = 1.1879$	$iw_{122} = 0.96205$	$iw_{123} = 0.68048$	$iw_{124} = 0.02707$	$iw_{125} = -0.3048$
$iw_{131} = -1.1431$	$iw_{132} = -1.6113$	$iw_{133} = -0.7469$	$iw_{134} = -0.16356$	$iw_{135} = -0.3478$
$iw_{141} = 0.04100$	$iw_{142} = 0.57258$	$iw_{143} = 0.02666$	$iw_{144} = 0.25193$	$iw_{145} = -0.15066$
$iw_{151} = 0.2551$	$iw_{152} = 0.02867$	$iw_{153} = 0.06881$	$iw_{154} = -0.15076$	$iw_{155} = -0.27957$
$iw_{161} = 0.64434$	$iw_{162} = 0.42983$	$iw_{163} = -0.37829$	$iw_{164} = -0.43002$	$iw_{165} = 0.13121$
$iw_{171} = -0.00985$	$iw_{172} = 1.9178$	$iw_{173} = -0.69956$	$iw_{174} = 0.1706$	$iw_{175} = 0.73573$
$iw_{181} = -1.3903$	$iw_{182} = -0.23571$	$iw_{183} = -1.5167$	$iw_{184} = -0.5479$	$iw_{185} = 0.51851$
$iw_{191} = -0.04206$	$iw_{192} = -0.01186$	$iw_{193} = 0.3471$	$iw_{194} = 0.13154$	$iw_{195} = 0.16285$

$iw_{201} = 0.05056$	$iw_{202} = 0.21164$	$iw_{203} = -0.11519$	$iw_{204} = 0.15857$	$iw_{205} = -0.19149$
$iw_{211} = -0.72263$	$iw_{212} = -1.693$	$iw_{213} = -0.66197$	$iw_{214} = 0.22273$	$iw_{215} = 0.67297$
$iw_{221} = 0.67127$	$iw_{222} = 0.62075$	$iw_{223} = 0.6383$	$iw_{224} = 0.40626$	$iw_{225} = -0.08946$
$iw_{231} = -0.48757$	$iw_{232} = -1.0766$	$iw_{233} = -0.1699$	$iw_{234} = 0.02467$	$iw_{235} = 0.03876$
$iw_{241} = 0.54751$	$iw_{242} = -0.06014$	$iw_{243} = 0.01134$	$iw_{244} = -0.13671$	$iw_{245} = 0.22485$
$iw_{251} = -0.18672$	$iw_{252} = 0.0307$	$iw_{253} = -0.05586$	$iw_{254} = 0.02046$	$iw_{255} = 0.41012$

- คำนวณหาค่าที่ชั้นเอาต์พุต (LW) :

$$lw_{11} = 1.9651 \quad lw_{21} = 2.4745 \quad lw_{31} = 2.718 \quad lw_{41} = -2.4453 \quad lw_{51} = -1.8255$$

- ค่าไบอัสที่ชั้นซ่อน ( $b^1$ ) :

$$b_1^1 = -7.5438 \quad b_2^1 = -5.7717 \quad b_3^1 = -2.0924 \quad b_4^1 = 11.7262 \quad b_5^1 = -1.9984$$

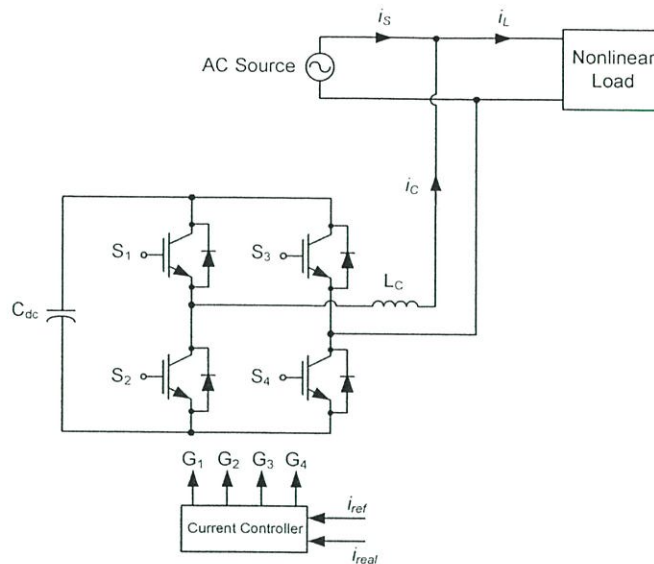
- ค่าไบอัสที่ชั้นเอาต์พุต ( $b^2$ ) :

$$b_1^2 = 3.5204$$

#### 4.5 หลักการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ [11]

การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์สวิตช์ซึ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ เปลี่ยนสถานะสวิตช์และไดโอด จะถูกใช้เป็นส่วนควบคุมให้มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในรูปของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน  $V_{DC}$  และกระแสชดเชย  $i_C$  ตามลำดับ

โครงสร้างวงจรกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทำการสวิตช์ IGBT จำนวน 4 ตัว  $S_1, S_2, S_3, S_4$  ซึ่งสวิตช์  $(S_1, S_4), (S_2, S_3)$  จะทำหน้าที่ในการควบคุมกระแสชดเชยเฟสของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.9

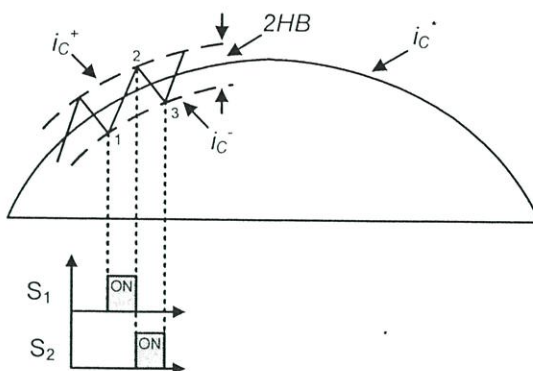


รูปที่ 4.9 โครงสร้างวงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ 1 เฟส แบบขนาน ที่ใช้ในงานวิจัย

เทคนิคที่ใช้ควบคุมกระแสของวงจรกำลังในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส

#### 4.5.1 การวิเคราะห์เทคนิคการควบคุมกระแสแบบขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส (Adaptive Hysteresis band current control)

การควบคุมกระแสที่ใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสนั้นมีหลักการ คือ การนำสัญญาณอ้างอิง  $i_c^*$  ที่ต้องการนำมาลบกับกระแสที่ตรวจวัดได้จริง ซึ่งจะได้สัญญาณผิดพลาด (error) แล้วจึงนำไปทำการเปรียบเทียบกับขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส โดยเมื่อสัญญาณกระแสจริง  $i_c$  มีค่ามากกว่าขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสด้านบน สวิตช์  $S_2$  ทำงานส่วนสวิตช์  $S_1$  จะหยุดทำงานจึงเป็นผลให้กระแสมีความชันลดลง แต่ในทางกลับกันถ้ากระแสจริง  $i_c$  มีค่าน้อยกว่าขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสด้านล่างสวิตช์  $S_1$  ทำงานส่วนสวิตช์  $S_2$  จะหยุดทำงานแทน จากหลักการนี้จะกระทำซ้ำ ๆ กันตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมา โดยรูปสัญญาณกระแสของการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สัญญาณกระแสและการสวิตช์ของการควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮีสเตอร์รีซิส

จากรูปที่ 4.10 พบว่าในการวิเคราะห์หลักการทำงาน ของวิธีควบคุมกระแสแบบติดตามขอบเขตฮีสเตอร์รีซิสจะมีอยู่สองสถานะ คือ เมื่อกระแส  $i_C +$  เดินทางจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 โดยกระแส  $i_C$  จะวิ่งจากขอบเขตล่างไปหาขอบเขตบนจึงทำให้ความชันของกระแสเป็นบวกและจากจุดที่ 2 ไปยังจุดที่ 3 กระแส  $i_C -$  ซึ่งมีความชันเป็นลบ ดังนั้นในการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.10 สามารถเขียนเป็นสมการที่เกิดจากการสวิตช์ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  เมื่อ  $S_1$  ทำงานและ  $S_2$  ไม่ทำงานที่เวลา  $t_1$

$$L \frac{di_C +}{dt} = V_{dc} \quad (4.13)$$

และเมื่อ  $S_2$  ทำงานและ  $S_1$  ไม่ทำงานที่เวลา  $t_2$

$$L \frac{di_C -}{dt} = -V_{dc} \quad (4.14)$$

ดังนั้นเมื่อนำ  $t_1 + t_2$  จะได้

$$\frac{di_C +}{dt} + \frac{di_C -}{dt} = 0 \quad (4.15)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่าย  
 $i_a +$  คือ กระแสขดเซยที่มีความชันเป็นบวกเมื่อกระแสเดินทางไปชนขอบเขตบน  
 $i_a -$  คือ กระแสขดเซยที่ความชันเป็นลบเมื่อกระแสเดินทางไปชนขอบเขตล่าง  
 $HB +$  คือ ขอบเขตบนของฮีสเตอร์รีซิส  
 $HB -$  คือ ขอบเขตล่างของฮีสเตอร์รีซิส  
 $i_C^*$  คือ กระแสอ้างอิง

จากหลักการตรีโกณมิติในรูปที่ 4.10 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{di_C +}{dt} t_1 - \frac{di_C^*}{dt} t_1 = 2HB \quad (4.16)$$

$$\frac{di_C^-}{dt}t_2 - \frac{di_C^*}{dt}t_2 = -2HB \quad (4.17)$$

$$t_1 + t_2 = T_c = \frac{1}{f_c} \quad (4.18)$$

เมื่อ  $t_1$  และ  $t_2$  คือ เวลาในการสวิตช์ของ IGBT แล้ว  $f_c$  คือ ความถี่สวิตช์ซิ่ง และ เมื่อนำสมการที่ (4.16) และ (4.17) มาบวกกันแล้วแทนในสมการที่ (4.18) จะได้สมการที่ (4.19) และ (4.20) ตามลำดับ

$$t_1 \frac{di_C^+}{dt} + t_2 \frac{di_C^-}{dt} - \frac{di_C^*}{dt}(t_1 + t_2) = 0 \quad (4.19)$$

$$t_1 \frac{di_C^+}{dt} + t_2 \frac{di_C^-}{dt} - \frac{1}{f_c} \frac{di_C^*}{dt} = 0 \quad (4.20)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.16) ลบสมการที่ (4.17) จะได้สมการที่ (4.21)

$$t_1 \frac{di_C^+}{dt} - t_2 \frac{di_C^-}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_C^*}{dt} = 4HB \quad (4.21)$$

จากสมการที่ (4.15) แทนลงในสมการที่ (4.21) จะได้สมการที่ (4.22)

$$\begin{aligned} \frac{di_C^+}{dt} &= -\frac{di_C^-}{dt} \\ 4HB &= \frac{1}{f_c} \frac{di_C^+}{dt} - (t_1 - t_2) \frac{di_C^*}{dt} \end{aligned} \quad (4.22)$$

นำสมการที่ (4.15) แทนลงในสมการที่ (4.20) จะได้สมการที่ (4.23)

$$(t_1 - t_2) = \frac{\frac{di_C^*}{dt}}{f_c \frac{di_C^+}{dt}} \quad (4.23)$$

นำสมการที่ (4.23) แทนลงในสมการที่ (4.22) จะได้สมการที่ (4.24)

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[ \frac{di_C^+}{dt} - \frac{\left( \frac{di_C^*}{dt} \right)^2}{\frac{di_C^+}{dt}} \right] \quad (4.24)$$

จากสมการที่ (4.13) แทนลงในสมการที่ (4.24) จะได้สมการที่ (4.25) และ (4.26)

$$\frac{di_C^+}{dt} = \frac{Vdc}{L}$$

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[ \frac{Vdc}{L} - \frac{\left( \frac{di_c^*}{dt} \right)^2}{Vdc} \right]$$

เมื่อ  $m = \frac{di_c^*}{dt}$  คือ ความชันของกระแสอ้างอิง

$$4HB = \frac{1}{f_c} \left[ \frac{Vdc}{L} - \frac{m^2}{Vdc} \right]$$

$$4HB = \frac{Vdc}{Lf_c} \left[ 1 - \frac{m^2 L^2}{Vdc^2} \right]$$

$$HB = \frac{0.25Vdc}{Lf_c} \left[ 1 - \frac{m^2 L^2}{Vdc^2} \right] \quad (4.25)$$

$$f_c = \frac{0.25Vdc}{(HB)L} \left[ 1 - \frac{m^2 L^2}{Vdc^2} \right] \quad (4.26)$$

โดยสมการที่ (4.25) แสดงถึงแถบความถี่ฮีสเตอร์ซิสซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของการมอดูเลตความถี่ จากสมการที่ (4.26) แสดงถึงขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นค่าคงที่ ดังนั้นความถี่ในการสวิตช์ซึ่งสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์ซิสในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้ตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์ซิสมีค่าน้อยๆ ได้เพราะทำให้ความถี่ในการสวิตช์สูงเกินพิกัดของอุปกรณ์การสวิตช์เป็นเหตุให้อุปกรณ์การสวิตช์เสียหาย แต่ถ้ากำหนดขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์ซิสมีค่ามาก การตอบสนองต่อการสร้างกระแสชา ดังนั้นในการกำหนดขนาดตัวเหนี่ยวนำและความกว้างขอบเขตฮีสเตอร์ซิสจะต้องเลือกให้เหมาะสมและความถี่สวิตช์ซึ่ง  $f_c$  ยังขึ้นอยู่กับ  $m$  ความถี่การสวิตช์มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับองศาทางไฟฟ้าของสัญญาณกระแสอ้างอิงและสัญญาณแรงดัน จากสมการที่ (4.26) สามารถหาความถี่สวิตช์สูงสุด เมื่อ  $\omega t = 0, \pi$  โดยที่  $i_c = I_p^* \sin \omega t$

$$m^2 = \left[ \frac{d}{dt} I_p^* \sin \omega t \right]^2 = 0.5 \omega^2 I_p^{*2} (1 + \cos 2\omega t) \quad (4.27)$$

และ  $v_s = V_m \sin \omega t$  ทำให้  $v_s = 0$  จะได้ว่า

$$f_{c \max} = \frac{0.25Vdc}{(HB)L} \left[ 1 - \frac{\omega^2 I_p^{*2} L^2}{Vdc^2} \right]$$

สมมติให้  $\frac{\omega^2 I_p^{*2} L^2}{Vdc^2} \ll 1$  จะได้ว่า

$$f_{c \max} = \frac{0.25Vdc}{(HB)L} \quad (4.28)$$

จากสมการที่ (4.26) สามารถหาความถี่สวิตช์ต่ำสุด เมื่อ  $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$

$$f_{C\min} = \frac{0.25(V_{dc} - v_s)}{(HB)L}$$

และ  $V_s = V_m \sin \omega t$  ทำให้  $v_s = V_m$  จะได้ว่า

$$f_{C\min} = \frac{0.25(V_{dc} - v_m)}{(HB)L} \quad (4.29)$$

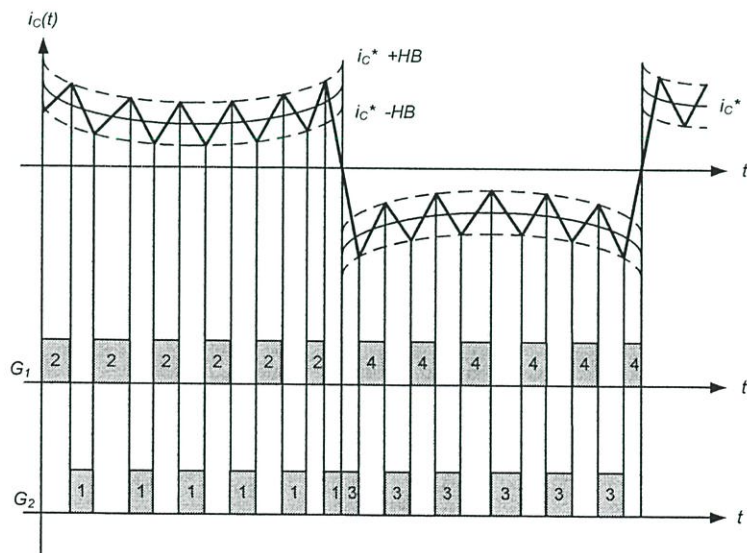
เมื่อ  $f_{C\max}$  คือ ความถี่สวิตช์ซึ่งสูงสุด

$f_{C\min}$  คือ ความถี่สวิตช์ซึ่งต่ำสุด

ดังนั้นในการควบคุมขอบเขตฮิสเตอร์รีซีสให้คงที่นั้น (fix band) เมื่อต้องการออกแบบให้ความถี่สวิตช์ซึ่งสูงสุด  $f_{C\max}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างแรงดันไฟตรง  $V_{dc}$  กับแรงดันแหล่งจ่าย  $V_s$  มากที่สุดอยู่ที่  $\omega_i = 0, \pi$  เรเดียน และความถี่สวิตช์ซึ่งต่ำสุด  $f_{C\min}$  อยู่ที่  $\omega_i = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$  ในหนึ่งรอบสัญญาณ

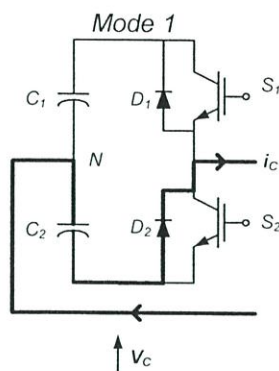
#### 4.5.2 หลักการทำงานของโหมดการสวิตช์

จากรูปที่ 4.10 สามารถอธิบายหลักการทำงานของโหมดการควบคุมกระแสของสวิตช์วงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟนั้นจะทำการควบคุมการส่งถ่ายกำลังงานไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันกับอินเวอร์เตอร์ให้กระแสของอินเวอร์เตอร์  $i_c^*$  มีมุมต่างเฟสกับแรงดันแหล่งจ่าย  $V_s$  เป็นมุม  $180^\circ$  รูปแบบการทำงานของสวิตช์แบ่งเป็น 4 โหมดการทำงานซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสของอินเวอร์เตอร์ตามสภาวะโหมดการควบคุมของสวิตช์

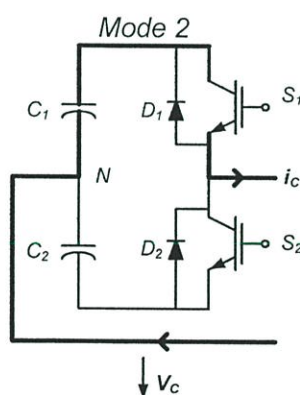
## 4.5.2.1 โหมดการทำงานที่ 1



รูปที่ 4.12 การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 1

การทำงานในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วงมุมของกระแส  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  (ซีกบวก) ดังนั้นจะส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_2$  ของสวิตช์  $S_2$  ส่วนสวิตช์  $S_1$  จะไม่มีการส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_1$  โดยที่  $V_s + V_L < V_c$  จึงทำให้กระแส  $i_c$  จะไหลจากตัวเก็บประจุ  $C_2$  ไปยังไดโอด  $D_1$  เป็นผลให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง  $\left(\frac{di_c}{dt} < 0\right)$

## 4.5.2.2 โหมดการทำงานที่ 2

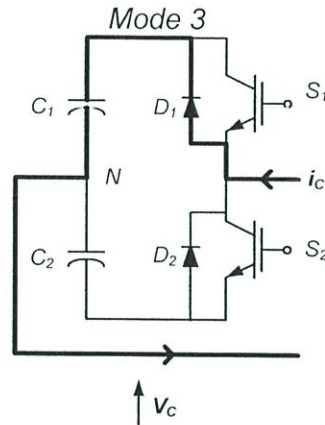


รูปที่ 4.13 การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 2

การทำงานในโหมดนี้ทำงานอยู่ในช่วงมุมของกระแส  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  (ซีกบวก) ดังนั้นจะส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_1$  ของสวิตช์  $S_1$  ส่วนสวิตช์  $S_2$  จะไม่มีการส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_2$  โดยที่  $V_s + V_L < V_c$  จึงทำให้กระแส  $i_c$  จะไหลจากตัวเก็บประจุ  $C_1$  ไปยังสวิตช์  $S_1$  เป็นผลให้แรงดันที่ตัว

เก็บประจุ  $C_1$  มีค่าลดลง เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น  $\left(\frac{di_C}{dt} > 0\right)$

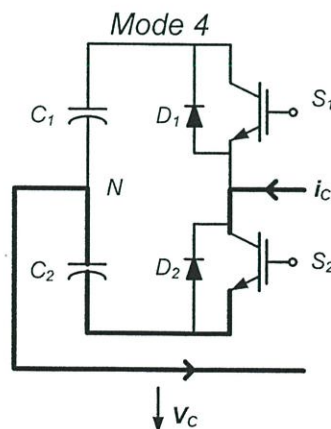
#### 4.5.2.3 โหมดการทำงานที่ 3



รูปที่ 4.14 การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 3

การทำงานในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วงมุมของกระแส  $180^\circ$  ถึง  $360^\circ$  (ซีกลบ) ดังนั้นจะส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_1$  ของสวิตช์  $S_1$  ส่วนสวิตช์  $S_2$  จะไม่มีการส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_2$  โดยที่  $V_s + V_L > V_c$  จึงทำให้กระแส  $i_C$  จะไหลจากไดโอด  $D_1$  ไปยังตัวเก็บประจุ  $C_1$  เป็นผลให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ  $C_1$  มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น  $\left(\frac{di_C}{dt} > 0\right)$

#### 4.5.2.4 โหมดการทำงานที่ 4



รูปที่ 4.15 การทำงานของสวิตช์ในโหมดการทำงานที่ 4

การทำงานในโหมดนี้จะทำงานอยู่ในช่วงมุมของกระแส  $180^\circ$  ถึง  $360^\circ$  (ซีกลบ) ดังนั้น จะส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_2$  ของสวิตช์  $S_2$  ส่วนสวิตช์  $S_1$  จะไม่มีการส่งสัญญาณไปขับที่ขา  $G_1$  โดยที่  $V_S + V_L > V_C$  จึงทำให้กระแส  $i_C$  จะไหลจากสวิตช์  $S_2$  ไปยังตัวเก็บประจุ  $C_2$  เป็นผลให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุ  $C_2$  มีค่าลดลง เพราะฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง  $\left(\frac{di_C}{dt} < 0\right)$

จากโหมดการทำงานของสวิตช์ในโหมดอินเวอร์เตอร์เราสามารถแบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงาน ซึ่งแต่ละโหมดการทำงานจะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับว่าในขณะนั้นวงจรมีการสวิตช์อยู่ในโหมดการทำงานใด โดยสามารถสรุปเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันของตัวเก็บประจุได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงแรงดันของตัวเก็บประจุ

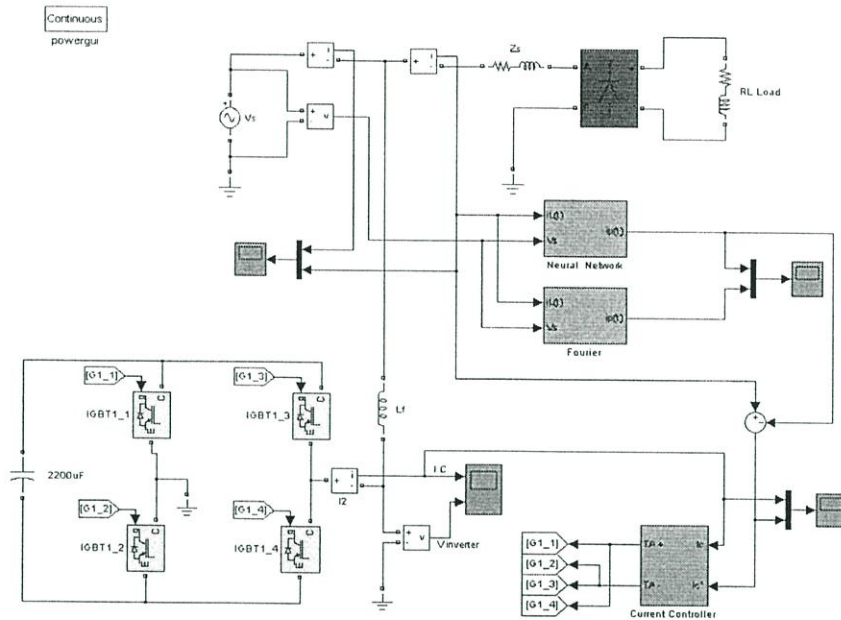
เงื่อนไข	การเปลี่ยนแปลงแรงดันของตัวเก็บประจุ
$i_C > 0$ และ $di_C / dt < 0$	ค่าแรงดัน $V_{C2}$ เพิ่มขึ้น
$i_C < 0$ และ $di_C / dt < 0$	ค่าแรงดัน $V_{C2}$ ลดลง
$i_C < 0$ และ $di_C / dt > 0$	ค่าแรงดัน $V_{C1}$ เพิ่มขึ้น
$i_C > 0$ และ $di_C / dt > 0$	ค่าแรงดัน $V_{C1}$ ลดลง

#### 4.6 ผลการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของวงจรรอกกำลังแอคทีฟ 1 เฟส แบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับงานวิจัยนี้ จะเป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรม Matlab / Simulink เพื่อที่จะทำการศึกษาหลักการการทำงานแล้วจึงนำไปใช้ในการออกแบบวงจรจริง ซึ่งมีตัวแปรดังตารางที่ 3.7 นี้ มีโหนดเป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ชนิดเต็มคลื่นขนาด 1kVA โดยรูปแบบที่ใช้ในการทำงานของวงจรรอกกำลังแอคทีฟแสดงได้ดังในรูปที่ 3.15

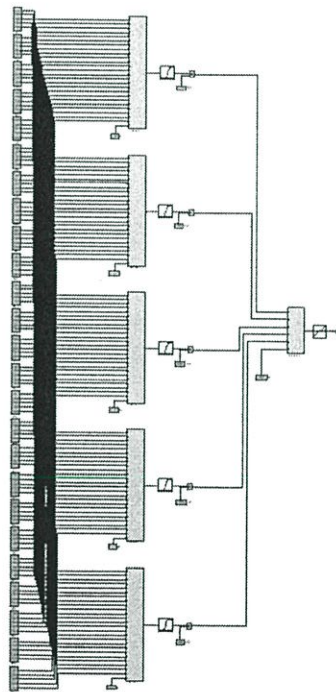
ตารางที่ 4.5 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ตัวแปร	ขนาด	หน่วย	ตัวแปร	ขนาด	หน่วย
$V_S$	220	V	$V_{dc}$	350	V
$C_{dc}$	2200	$\mu F$	$L_f$	17.5	mH
$L_S$	0.25	mH	$R_f$	0.1	$\Omega$
$R_S$	0.05	$\Omega$			



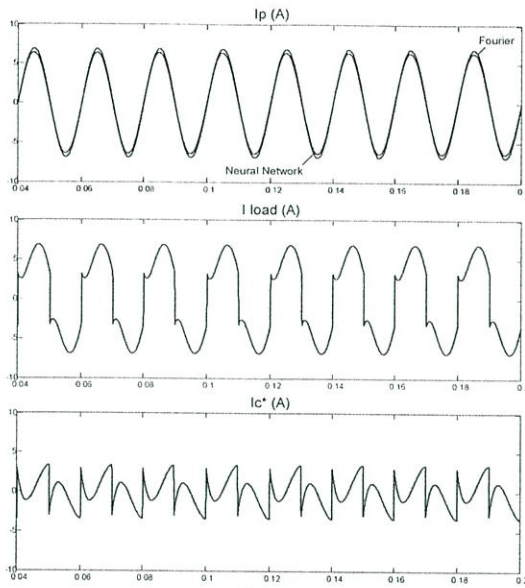
รูปที่ 4.16 รูปแบบของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน หนึ่งในเฟสที่จำลองการทำงานด้วย

โปรแกรม Matlab/Simulink

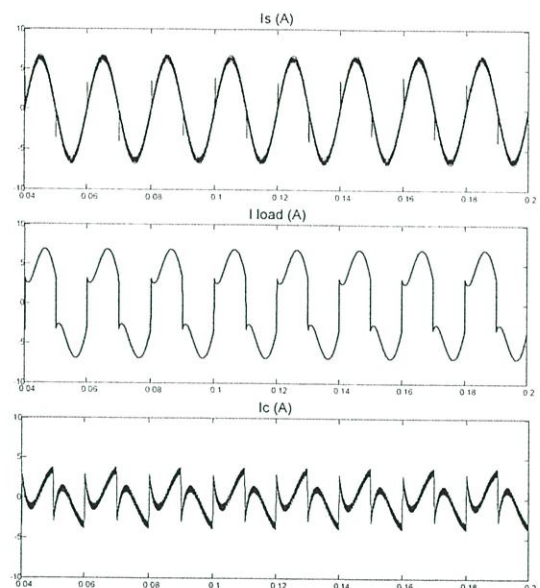


รูปที่ 4.17 โครงข่ายประสาทเทียมที่จำลองการทำงานด้วย โปรแกรม Matlab/Simulink

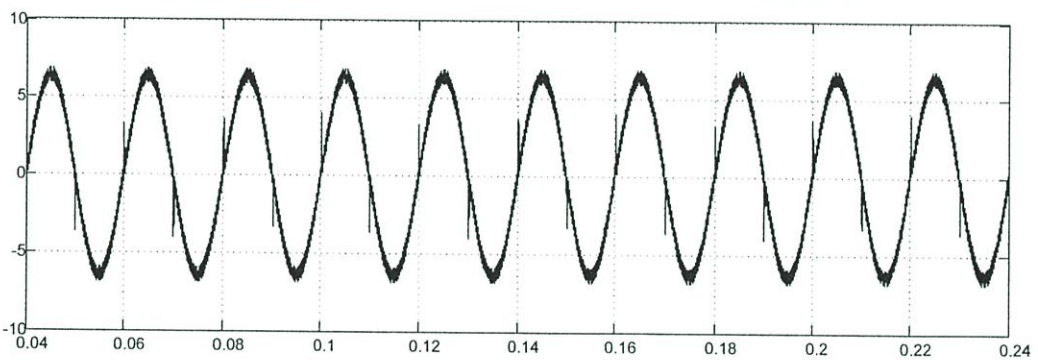
จากรูปที่ 4.16 ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบ ที่มีการสร้างกระแสอ้างอิงควบคุมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น กับโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น หนึ่งในเฟส ขนาด 1,200VA ได้ผลการทำงานในช่วงสภาวะคงตัว ดังรูปต่อไปนี้



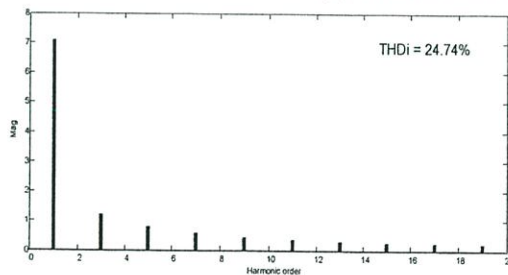
(ก) กระแสชดเชยที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม



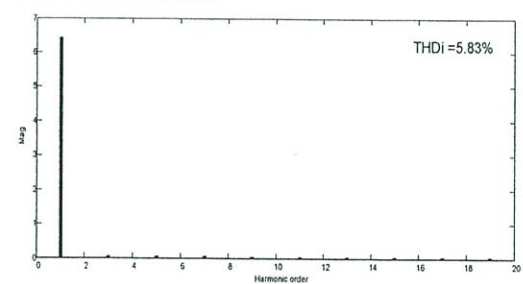
(ข) กระแสชดเชยที่ได้จากการจำลองการทำงานทั้งระบบ



(ค) กระแสแหล่งจ่ายหลังการชดเชยกระแส



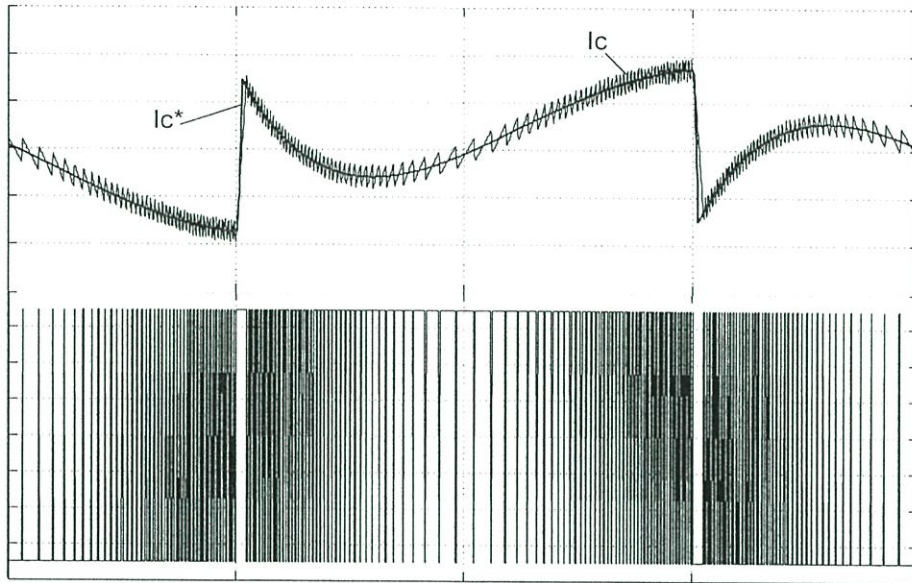
(ง) สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่ายก่อนการชดเชย



(จ) สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่ายหลังการชดเชย

รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟในช่วงสภาวะคงตัว

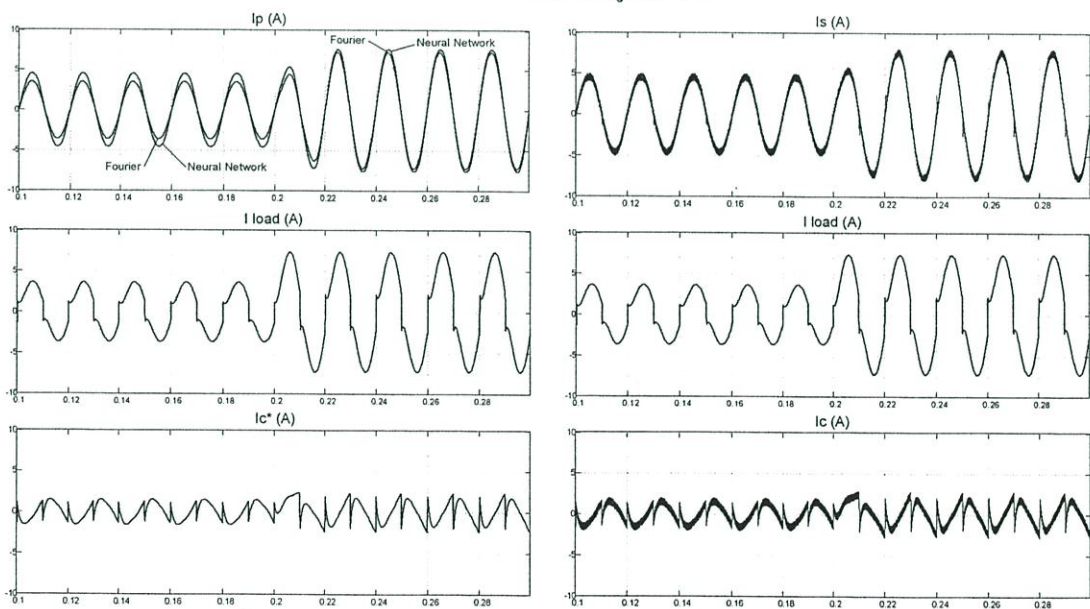
การจำลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟทั้งระบบ แสดงกระแสชดเชย กระแสชดเชยอ้างอิงและแรงดันการสวิตช์ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กระแสชดเชย กระแสชดเชยอ้างอิง และแรงดันการสวิตช์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

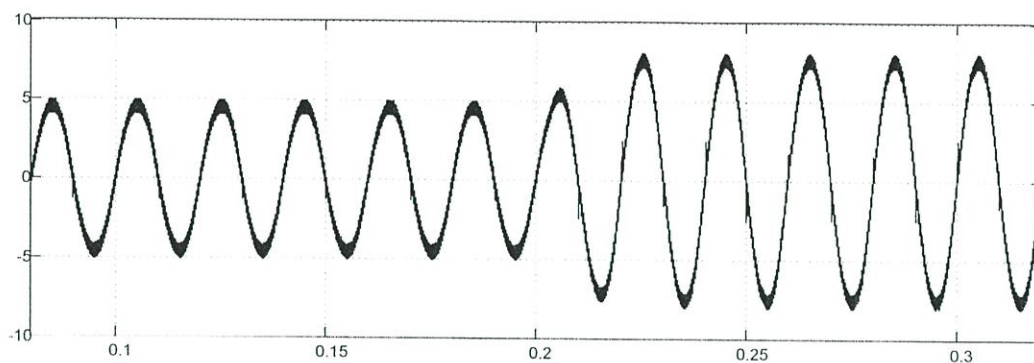
จากผลการจำลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ที่ใช้การตรวจจับกระแสด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม พบว่าค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวมฮาร์มอนิกของกระแสแหล่งจ่าย หลังการชดเชยมีค่าลดลงจาก 24.74% เป็น 5.83% และร่วมเฟสกับแรงดันแหล่งจ่าย

ในส่วนตัวมา เป็นการจำลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลันจาก 0.6kVA ไปเป็น 1.2kVA แสดงดังรูปที่ 4.20



(ก) กระแสชดเชยที่ได้จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

(ข) กระแสชดเชยที่ได้จากการจำลองการทำงานของระบบ



(ค) กระแสแหล่งจ่ายหลังการชดเชยกระแส

รูปที่ 4.20 ผลการตอบสนองของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่มีการเพิ่ม โหลดอย่างฉับพลัน

#### 4.7 บทสรุป

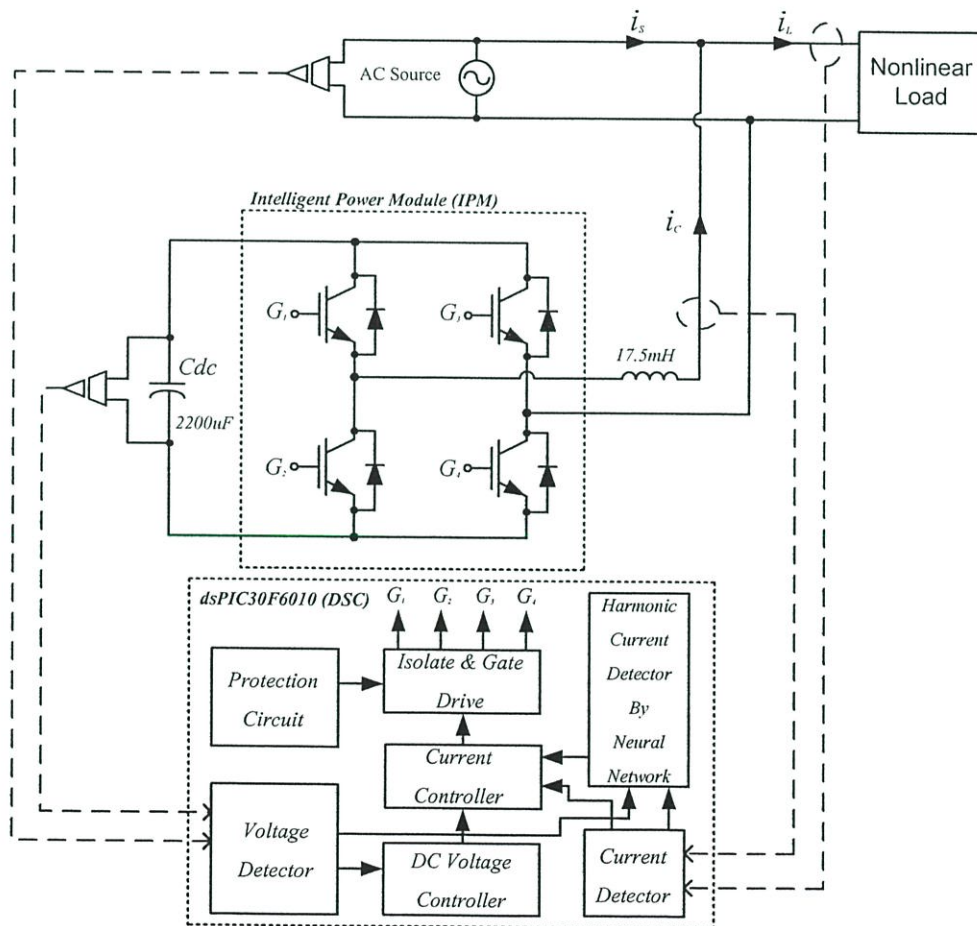
ในบทนี้ได้กล่าวถึง หลักการวิเคราะห์และออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้หลักการสร้างกระแสอ้างอิงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม และในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อศึกษาพฤติกรรมและทำความเข้าใจการทำงานของวงจร เพื่อให้มั่นใจว่าวงจรที่ออกแบบมีความเป็นไปได้ตามทฤษฎี ก่อนที่จะนำไปสร้างวงจรจริงและทดสอบการทำงานในทางปฏิบัติต่อไป

## บทที่ 5

### การออกแบบและสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟ

#### 5.1 บทนำ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ลักษณะโครงสร้างของระบบควบคุมและวงจรกำลังของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ได้ออกแบบ โดยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วย วงจรการตรวจจับกระแส วงจรการตรวจจับแรงดัน วงจรควบคุมหลักที่ควบคุมโดยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) และวงจรกำลังของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งจะทำหน้าที่สร้างกระแสชดเชยตามที่ได้คำนวณมาจากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล เพื่อที่จะนำมำห้กำลังกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นประเภทต่างๆ สามารถแสดงโครงสร้างส่วนประกอบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โครงสร้างส่วนประกอบของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน หนึ่งเฟส

## 5.2 การออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า

ในการที่เราต้องการสร้างกระแสขึ้นมา เพื่อทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เนื่องจากโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น เราจำเป็นต้องมีวงจรกำลังเพื่อทำหน้าที่ในการแปรผันพลังงานจากไฟตรงไปเป็นกระแสสลับ ซึ่งจะมีส่วนประกอบดังนี้

### 5.2.1 ตัวเก็บประจุไฟตรง

ตัวเก็บประจุไฟตรง ( $C_{dc}$ ) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานให้กับวงจรกำลังของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากวงจรแปรผันพลังงานที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้เป็นชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่อขนานอยู่กับระบบ ขนาดของตัวเก็บประจุนั้นจะขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและชนิดของโหลด โดยกำหนดจากรูปแปลของแรงดันไฟตรง หาได้จากสมการที่ 5.1

$$C_{dc} \geq \frac{P_o}{2f_{line}(V_{dc}^2 \max - V_{dc}^2 \min)} \quad (5.1)$$

โดยที่	$P_o$	คือ	กำลังงานไฟฟ้าจริงของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (W)
	$f_{line}$	คือ	ความถี่ของระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (Hz)
	$V_{dc} \max$	คือ	ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุไฟตรงสูงสุด (V)
	$V_{dc} \min$	คือ	ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุไฟตรงสูงสุด (V)

### 5.2.2 ตัวเหนี่ยวนำกรองกระแส

การเชื่อมโยงระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า จะทำการเชื่อมโยงผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งหน้าที่ของตัวเหนี่ยวนำ คือ ทำการกรองกระแสริปเปิลที่เกิดจากการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ ทำให้กระแสชดเชยที่จ่ายจากอินเวอร์เตอร์มีความเรียบมากขึ้น แต่ในกรณีที่เราต้องการให้ผลตอบสนองทางไดนามิกที่ดีนั้น ขนาดของตัวเหนี่ยวนำควรมีขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ตัวเหนี่ยวนำมีขนาดเล็กเกินไป จะมีผลทำให้กระแสริปเปิลที่เกิดจากการสวิตช์มาก ดังนั้นในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำจึงควรออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยค่าของตัวเหนี่ยวนำสามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$f_{C \max} = \frac{0.25V_{dc}}{(HB)L} \quad (5.2)$$

โดยที่	$L$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่าย
	$HB$	คือ	ขอบเขตของฮิสเตอร์รีส
	$V_{dc}$	คือ	แรงดันไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ
	$f_c$	คือ	ความถี่ในการสวิตช์สูงสุด

### 5.2.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำล้างแอกทีฟแบบขนาน

ในการออกแบบวงจรรอกำล้างแอกทีฟแบบขนานซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ วงจรอินเวอร์เตอร์ ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงและตัวเก็บประจุไฟตรง โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ intelligent power module IGBT ทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทนกระแสและแรงดันได้สูง และทำงานที่ความถี่สูงได้ดี

#### กำหนด

- 1 กำลังงานไฟฟ้าจริงของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น  $P_o = 1000 \text{ W}$
- 2 แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย  $V_s = 220 \text{ Vrms}$
- 3 ความถี่สวิตช์  $f_{sw} = 10 \text{ kHz}$
- 4 แรงดันไฟตรง  $V_{dc} = 350 \text{ V}$
- 5 ขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส  $= \pm 0.5$
- 6 ความถี่ของระบบไฟฟ้า 1 เฟส  $f_{inc} = 50 \text{ Hz}$

#### การคำนวณ

- 1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำกรองเชื่อมโยง ( $L_f$ )

$$L_f = \frac{0.25 \times 350}{0.5 \times 10 \times 10^3}$$

$$L_f = 0.0175 \text{ H}$$

เลือก  $L_f = 17.5 \text{ mH}$

- 2 การออกแบบตัวเก็บประจุไฟตรง ( $C_{dc}$ )

$$C_{dc} \geq \frac{1000}{2 \times 50(355^2 - 345^2)}$$

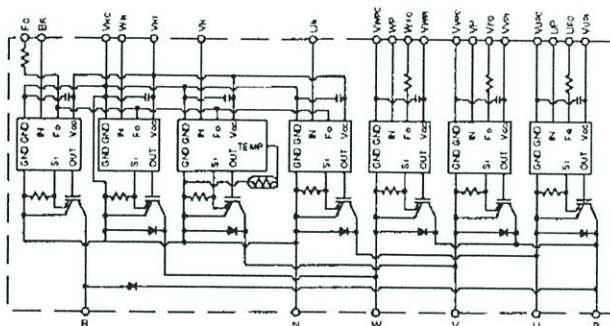
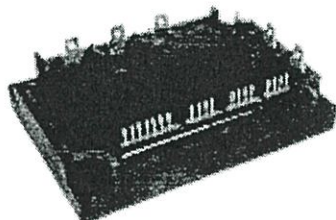
$$C_{dc} \geq 1428.57 \mu\text{F}$$

เลือก  $C_{dc} = 2200 \mu\text{F}$

### 5.2.4 วงจรสวิตช์กำลัง

วงจรสวิตช์กำลังเป็นส่วนในการทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นกระแสสลับ ด้วยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ โดยการสวิตช์นั้นจะถูกควบคุมจากส่วนของการควบคุมที่ได้กำหนดไว้จากตัวประมวลผลเพื่อใช้สำหรับการสร้างกระแสของวงจร โดยอุปกรณ์กำลังที่ทำหน้าที่ในการสวิตช์จะเป็นส่วนที่มีการเสียหายบ่อยที่สุด เพราะว่าเป็นส่วนที่ทำการแปลงจากสัญญาณควบคุมกำลังต่ำให้มาเป็นไฟกำลังงานสูง อุปกรณ์สวิตช์ที่จะนำมาใช้นี้ต้องคำนึงถึงพิกัดของขนาดแรงดัน, กระแสและความถี่ในการสวิตช์สูงสุดที่สามารถรองรับได้ ในส่วนของชุดสวิตช์กำลังนี้ได้เลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลกำลังของบริษัทมิตซูบิชิเบอร์ PM25RSB120 (Intelligent Power Module : IPM) มีพิกัดแรงดัน 1,200 โวลต์ รองรับพิกัดกระแส 25 แอมแปร์ โดยภายในของไอจีบีทีโมดูล

กำลังประกอบไปด้วยไอจีบีทีโมดูลแบบนี้มีข้อดีกว่าไอจีบีทีแบบตัวเดี่ยว คือ สามารถส่งสัญญาณฟอลท (Fault) จากตัวไอจีบีทีโมดูลเพื่อใช้ในการหยุดสัญญาณขับเคลื่อนในกรณีที่เกิดการลัดวงจรภายในกึ่ง, กระแสเกินหรืออุณหภูมิภายในตัวเองมีค่าสูง ไอจีบีทีโมดูลนี้มีความสามารถในการรองรับความถี่สวิตช์สูงสุดได้ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งโครงสร้างของไอจีบีทีโมดูลนี้แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 5.2



(ก)

(ข)

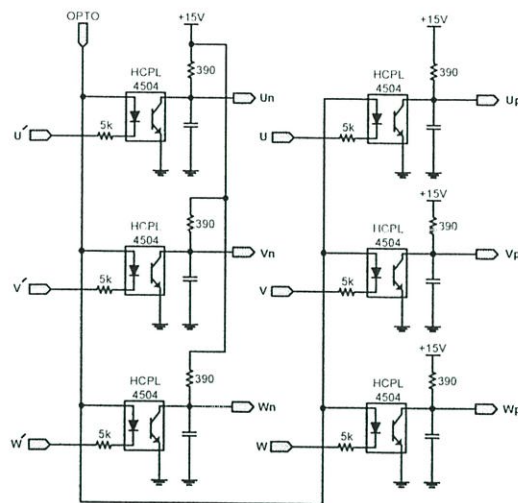
รูปที่ 5.2 โครงสร้างไอจีบีทีโมดูลกำลังเบอร์ PM25RSB120 (IPM)

(ก) โครงสร้างภายนอกไอจีบีทีโมดูลกำลัง

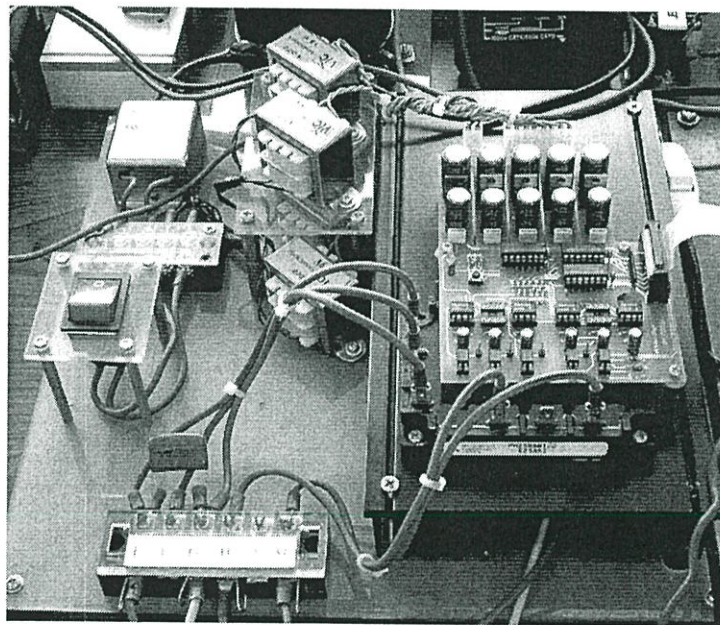
(ข) โครงสร้างภายในไอจีบีทีโมดูลกำลัง

การควบคุมการทำงานของไอจีบีทีกำลัง จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทำการแยกแยะระหว่างสัญญาณขับเคลื่อนกับสัญญาณควบคุม ในการแยกกันของสัญญาณนี้ เพื่อต้องการแยกกราวด์ไม่ให้ไอจีบีทีกำลังตัวบนและตัวล่างในกึ่งเดียวกันเกิดการลัดวงจร เนื่องจากใช้กราวด์ร่วมกันแสดงวงจรดังรูปที่ 5.2 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกกราวด์ได้ใช้ออปโต (OPTO) เบอร์ HCPL4506 จำนวน 4 ตัว โดยออปโตที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์ 2 กึ่งบนจะต้องการแยกไฟเลี้ยงขนาด 15 โวลต์ ออกจากกันกับส่วนออปโตที่ใช้การควบคุมสวิตช์ 2 กึ่งล่างจะรับไฟเลี้ยงขนาด 15 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟชุดเดียวกัน สำหรับการควบคุมการทำงานของโมดูลสวิตช์นี้สามารถทำได้โดยการจ่ายแรงดันที่ขาออปโต (U,W, U',W') ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นผลทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงที่อยู่ภายในออปโตจึงทำให้ชุดไอจีบีทีด้านเอาต์พุตทำงาน ส่วนวงจรที่ใช้ในการส่งสัญญาณฟอลทที่ออกจากตัวโมดูลเพื่อใช้หยุดสัญญาณขับเคลื่อนได้ใช้ออปโต เบอร์ TLP521 จำนวน 4 ตัว โดยสัญญาณที่มาจากออปโต 3 ตัวแรกนี้จะมาจากการตรวจจับบริเวณสวิตช์ 3 กึ่งบน ส่วนออปโตอีกตัวจะได้จากการตรวจจับบริเวณสวิตช์ 3 กึ่งล่าง การทำงานของวงจรนี้สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าในกรณีที่สภาวะปกติ สัญญาณฟอล์ทจะมีสถานะเป็นแรงดันขนาด 15 โวลต์ แต่ถ้ากรณีที่เกิดฟอลทขึ้นจะมี

การส่งสัญญาณระดับแรงดันศูนย์โวลต์ออกมาแทน จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่วงจรป้องกัน เพื่อไปตัดการทำงานของระบบต่อไป



รูปที่ 5.3 วงจรแยกกราวด์ก่อนเข้าสู่ชุดขับเกดไอจีบีทีกำลัง

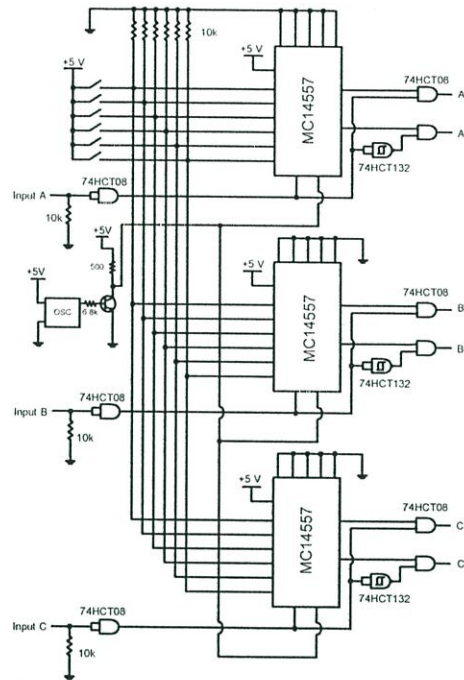


รูปที่ 5.4 อินเวอร์เตอร์ของเครื่องต้นแบบ

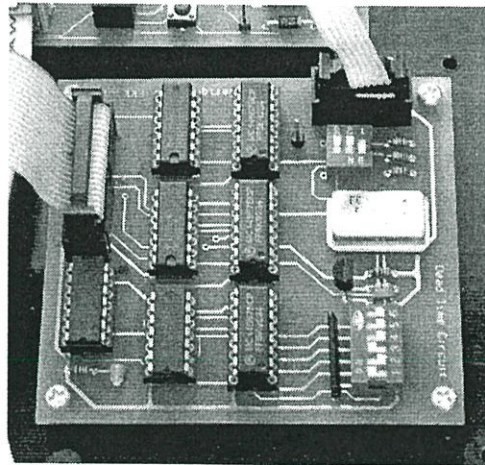
### 5.3 การออกแบบและสร้างวงจรประวิงเวลา

เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิทช์นั้น อาจมีการที่สวิทช์ในกึ่งเดียวกันทำงานพร้อมกันจึงเป็นผลทำให้เกิดการลัดวงจรภายในกึ่งเดียวกัน และทำให้อุปกรณ์สวิทช์เสียหายได้ โดยวงจรที่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณประวิงเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์สวิทช์เกิดการสวิทช์พร้อมกันจะใช้วงจรประวิงเวลาซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 สัญญาณขับเกดที่กึ่งบนและ

กึ่งกลางต้องมีค่าเวลาหน่วงกันเล็กน้อย และเวลาในการประวิงเวลานี้จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการไต่ขึ้น และการไต่ลงของอุปกรณ์สวิตซ์นั้น ๆ



รูปที่ 5.5 วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา (Dead time)



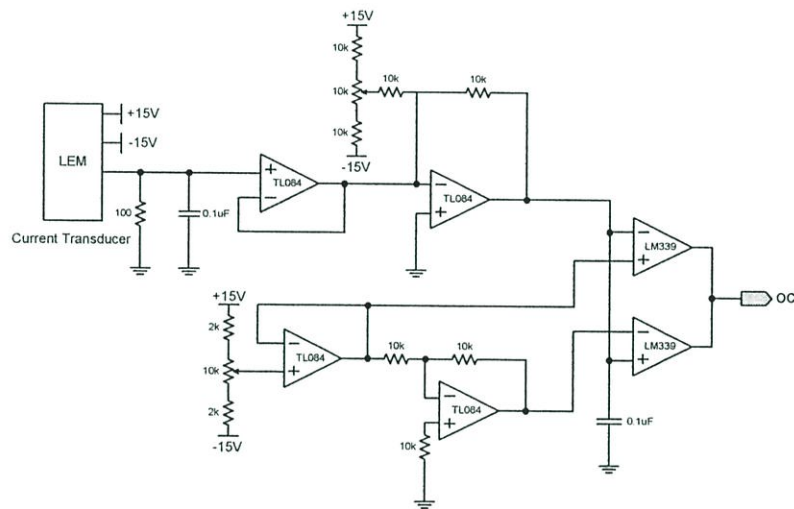
รูปที่ 5.6 วงจรสร้างช่วงการประวิงเวลา (Dead time) ของวงจรต้นแบบ

การทำงานของวงจรประวิงเวลาจากรูปที่ 5.5 นั้นจะอาศัยไอซีเบอร์ MIC14557 ที่มีคุณสมบัติในการเลื่อนบิต โดยจะรับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกที่มีความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ป้อนเข้าที่ขา 4 ซึ่งช่วงเวลาของการเวลาประวิงนี้สามารถกำหนดได้จากการกำหนดสถานะสูงหรือต่ำที่ให้กับขาสัญญาณ L1 ถึง L32 ในกรณีที่ทำการป้อนแรงดัน 5 โวลต์ เข้าที่ขาเหล่านั้นจะเป็นการเพิ่มค่าการหน่วงเวลาขึ้นทีละขั้น แต่ละขั้นเวลาที่ทำการเพิ่มขึ้นนี้เพิ่มครั้งละ 1,2,4,8,16 และ 32

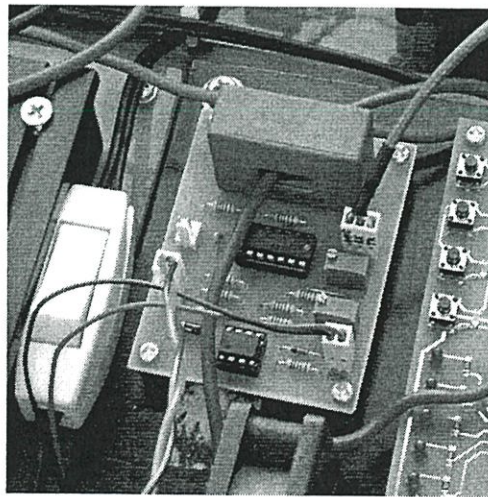
ไมโครวินาที ตามลำดับยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ต้องการให้เกิดการประวิงเวลา 10 ไมโครวินาที จะต้องทำการเซตที่ขา 1(L2) และขา 14 (L8) เป็นแรงดัน 5 โวลต์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกค่าประวิงเวลาให้มีค่าเท่ากับ 4 ไมโครวินาที ดังนั้นจะต้องป้อนให้ขา 15(L4) เป็นแรงดัน 5 โวลต์ ส่วนขาที่เหลือ(L1, L2, L8,L16, L32) ป้อนแรงดัน 0 โวลต์

#### 5.4 การออกแบบวงจรตรวจจับกระแสเกิน

วงจรตรวจจับกระแสเกินนี้เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการป้องกันกระแสไม่ให้เกินพิกัดที่เรา กำหนดไว้ งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวตรวจจับกระแส (Current Transducer) ซึ่งอุปกรณ์นี้ใช้หลักการในการตรวจจับกระแสที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟค” วงจรตรวจจับกระแสเกินแสดงดังรูปที่ 5.7



(ก) วงจรตรวจจับกระแสพร้อมวงจรป้องกันกระแสเกิน



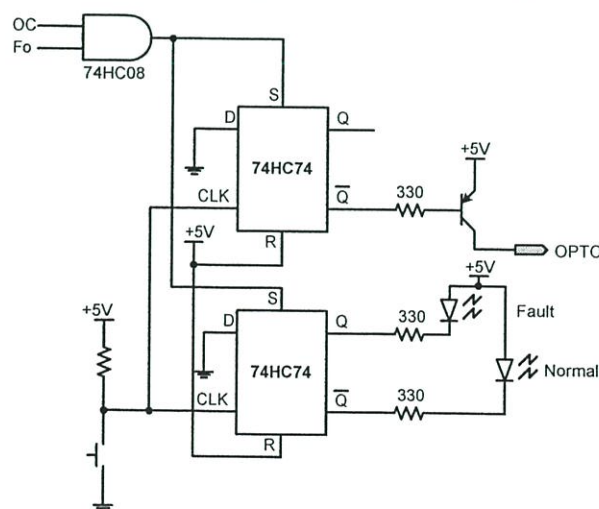
(ข) วงจรตรวจจับกระแสพร้อมวงจรป้องกันของเครื่องต้นแบบ

รูปที่ 5.7 วงจรตรวจจับกระแสเกิน

เนื่องจากการใช้ตัวตรวจจับกระแสชนิดนี้มีข้อดีกว่าการใช้ Current Transducer ในด้านที่สามารถตรวจจับกระแสได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ มีช่วงความถี่การตอบสนอง (Bandwidth) ถึง 200 kHz สำหรับการใช้งานนี้ ได้ตั้งอัตราส่วนของกระแสอินพุตและเอาต์พุตไว้ที่ 1 : 1000 โดยสัญญาณที่ได้จะส่งออกมายังขา M ซึ่งมีตัวต้านทานค่า 100 โอห์มต่ออยู่ระหว่างขา M กับกราวด์ ดังนั้นในการตรวจจับกระแสในกรณีที่กระแสอินพุตมีค่าเป็น 1 แอมป์ แรงดันที่ได้จะมีค่าเป็น 0.1 โวลต์ สัญญาณที่ได้นี้จะถูกส่งไปยังวงจรบัฟเฟอร์และวงจรปรับค่าออฟเซต ในกรณีที่กระแสมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ สัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์จะมีสถานะเป็นศูนย์ซึ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งไปในวงจรป้องกันเพื่อทำการหยุดสัญญาณขับเคลื่อนต่อไป

### 5.5 การออกแบบวงจรป้องกันภาคกำลัง

วงจรป้องกันที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 โดยวงจรนี้จะทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายขณะที่ระบบทำงานผิดปกติ วงจรป้องกันที่ออกแบบนี้จะเป็นส่วนป้องกันที่รับสัญญาณมาจากสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นสัญญาณที่รับจากวงจรตรวจจับกระแสเกิน (OC) และส่วนที่สองจะรับสัญญาณมาจากส่วนป้องกันที่สร้างสัญญาณฟอลทจากตัวไอจีบีทีโมดูล (Fo) โดยสัญญาณทั้งสองนี้สถานะปกติจะมีแรงดันอยู่ที่ 15 โวลต์ แรงดันที่รับเข้ามาจะส่งไปยังวงจรแอนแกตซึ่งจะได้ค่าเอาต์พุตของ 74HC74 มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ แล้วทำให้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC324 ชนิด PNP ทำงานจึงมีผลทำให้มีแรงดัน 5 โวลต์ ออกไปยังเอาต์พุตเพื่อนำไปเลี้ยงออปโด้ที่ใช้ในการขับเคลื่อนต่อไป เมื่อเกิดสถานะที่ระบบผิดปกติ สัญญาณที่ขาอินพุตของแอนแกตอินพุตไดอินพุตหนึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตของ 74HC74 ที่นำไปขับทรานซิสเตอร์มีค่าเป็น 5 โวลต์ จึงทำให้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ไม่ทำงานเป็นผลให้ไม่มีแรงดัน 5 โวลต์ ที่เอาต์พุตเพื่อนำไปเลี้ยงออปโด้ เพราะฉะนั้นวงจรขับเคลื่อนจะไม่สามารถส่งสัญญาณขับเคลื่อนไปยังไอจีบีทีโมดูลได้



รูปที่ 5.8 วงจรป้องกันภาคกำลัง

## 5.6 การออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณของวงจรควบคุม

เนื่องจากการประมวลผลสัญญาณของวงจรควบคุม จะต้องมีการรับสัญญาณทั้งกระแสและแรงดันตามจุดต่างๆ แล้วทำการส่งมายังตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) แล้วนำสัญญาณเหล่านั้นมาทำการประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณที่จะนำไปใช้ในการควบคุมภาคกำลังต่อไป ซึ่งใน ส่วนของการตรวจจับกระแสจะมีทั้งหมด 2 ส่วน คือ ส่วนแรกใช้ในการตรวจจับกระแสของโหลด ส่วนที่สองใช้ในการตรวจจับกระแสที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ โดยที่ส่วนของการตรวจจับระดับแรงดันจะมีทั้งหมด 2 ส่วนคือส่วนการตรวจจับแรงดันไฟตรงและส่วนการตรวจจับแรงดันไฟสลับ

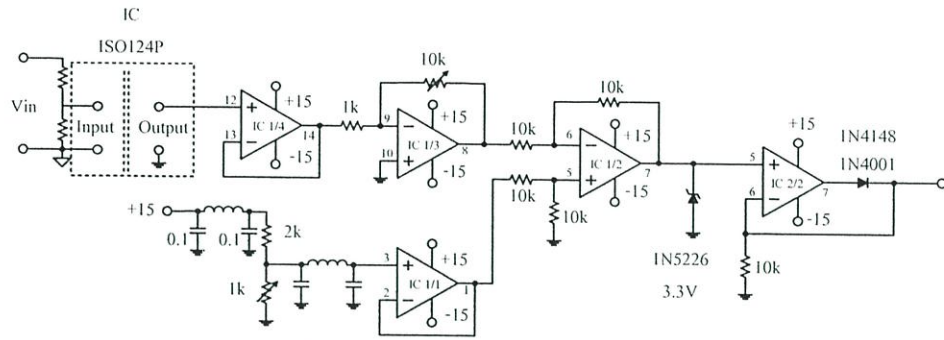
### 5.6.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน

ส่วนของการตรวจจับระดับแรงดันในระบบนั้น เราทำการตรวจจับระดับแรงดันโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

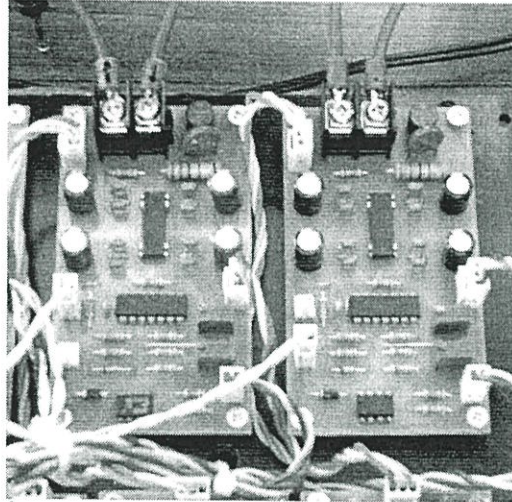
#### 5.6.1.1 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟสลับ

การตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับนั้น เราจะทำการจับระดับแรงดันระหว่างสายเฟสกับสายนิวทรัล เพื่อนำสัญญาณที่ได้ขึ้นไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับส่วนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

วงจรที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันของวงจรควบคุมนั้น จะใช้ไอซีขยายสำหรับแยกโคด (Isolation Amplifiers) เบอร์ ISO124 เพื่อทำการแยกกราวด์จากแรงดันของระบบไฟฟ้า (220 โวลต์ ในแต่ละเฟส) ที่เรารับเข้ามาที่ระบบควบคุม โดยแรงดันที่รับเข้ามาจะมีระดับแรงดันขนาด 220 โวลต์ ซึ่งเราไม่สามารถที่นำระดับแรงดันขนาดนั้นมาเข้าสู่ไอซีขยายสำหรับแยกโคดได้ เพราะสัญญาณอินพุตสูงสุดของไอซีขยายสำหรับแยกโคดที่สามารถรับได้จะมีค่าไม่เกิน 10 โวลต์ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการลดระดับแรงดันด้วยวิธีการลดทอนแรงดัน ซึ่งใช้ความต้านทานมาเป็นส่วนแบ่งของแรงดัน (Voltage Divider) เมื่อได้ระดับแรงดันที่เหมาะสมแล้วจะนำมาผ่านวงจรปรับอัตราขยายให้เหมาะสมแล้วทำการยกกระแสของสัญญาณไปที่ 2.5 โวลต์ จากนั้นจะส่งไปยังวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณ เพื่อให้สัญญาณที่รับเข้ามามีระดับแรงดันเหมาะสมกับพอร์ตของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล ที่ใช้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลต่อไป ซึ่งวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณนี้จะทำการปรับแต่งไม่ให้อัตราสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเกิน 5 โวลต์ และจะต้องเป็นระดับแรงดันบวกโดยใช้ไดโอดในการตัดแต่งสัญญาณ แล้วทำการส่งยังไปตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำไปประมวลผลต่อไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดัน



รูปที่ 5.10 ชุดตรวจจับสัญญาณแรงดันของเครื่องต้นแบบ

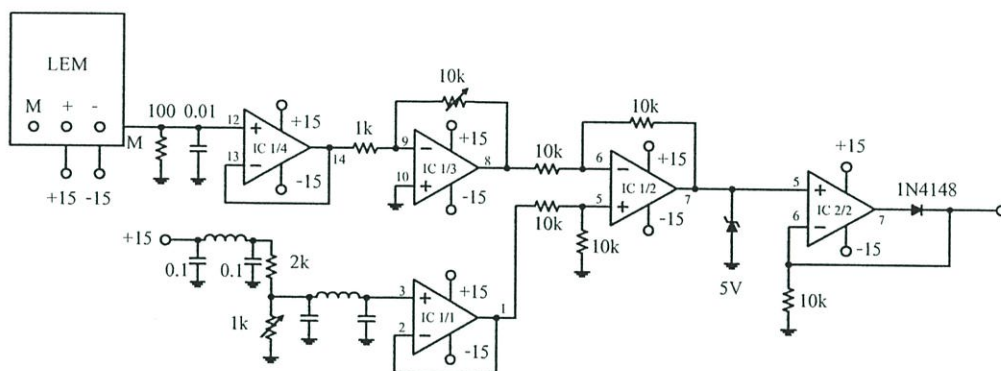
### 5.6.1.2 วงจรตรวจสัญญาณแรงดันไฟตรง

การตรวจจับระดับแรงดันไฟตรง จะทำการจับระดับแรงดันไฟตรงเพื่อนำมาใช้ในการรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุ ใช้ในการจับระดับแรงดันไฟตรงที่คร่อมระหว่างตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งกับตัวเก็บประจุตัวที่สอง ( $V_{dc}$ )

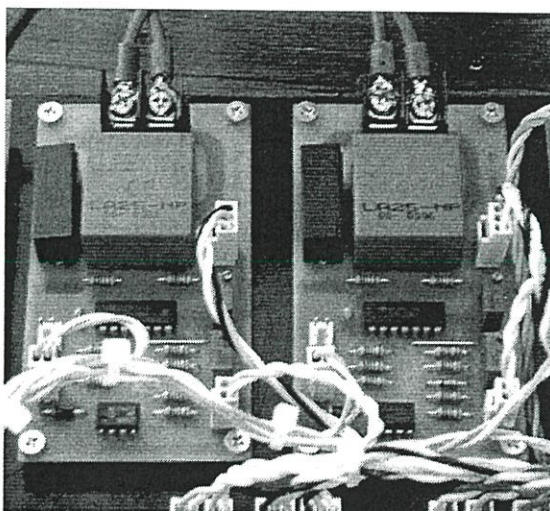
ในส่วนของวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟตรงนี้ จะมีลักษณะเหมือนกับวงจรที่ใช้ในการตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับ แต่จะต่างกันตรงที่วงจรในส่วนนี้จะไม่ต้องการปรับระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 2.5 โวลต์ แต่จะทำการปรับระดับออฟเซตของสัญญาณไปที่ 0 โวลต์แทนเนื่องจากในการตรวจจับระดับแรงดันไฟตรงนี้จะไม่มีส่วนของสัญญาณลบ ดังนั้นในการรับสัญญาณของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลจะรับสัญญาณที่เป็นชนิดยูนิโพลาร์ (Unipolar) ซึ่งไม่เหมือนกับการตรวจจับสัญญาณที่รับจะเป็นชนิดไบโพลาร์ (Bipolar)

### 5.6.2 วงจรตรวจจับกระแส

การตรวจจับกระแสของวงจรควบคุมนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนการตรวจจับกระแสของโหลดเพื่อใช้หาค่ากระแสอาร์ม่อนิกของกระแสโหลด และส่วนการตรวจจับกระแสที่แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นในการตรวจจับกระแสของวงจรควบคุมจะมีจำนวนอยู่ที่ทั้งหมด 2 จุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้พิกัดของกระแสไม่เกิน 25A ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแส LEM เบอร์ LA25-NP แล้วทำการเลือกอัตรากระแสอินพุตต่อกระแสเอาต์พุตไว้ที่ 1000:1 จากนั้นสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับกระแส จะส่งไปยังวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและปรับระดับออฟเซต ซึ่งมีลักษณะวงจรเหมือนกับวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟสลับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงไว้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส



รูปที่ 5.12 ชุดตรวจจับสัญญาณกระแสของเครื่องต้นแบบ

## 5.7 ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล

ความก้าวหน้าทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และความต้องการใช้งานทางด้านความเร็วในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ ส่งผลให้มีการประดิษฐ์คิดค้นตัวประมวลผลที่ออกแบบสำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ต้องการความเร็วสูง โดยเฉพาะที่เรียกว่า ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) หรือที่นิยมเรียกว่า ดีเอสพี (DSP) ซึ่งตัวประมวลผลดังกล่าวจะเน้นความเร็วของการทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์ โดยมีสถาปัตยกรรมการทำงานแบบขนานด้วยฮาร์ดแวร์ เช่น มีฮาร์ดแวร์การคูณ (Multiplier), ฮาร์ดแวร์สเกลลิงชิฟเตอร์ (Scaling Shifter), ส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์ของรีจิสเตอร์ (Auxiliary Register Arithmetic Unit) แยกอิสระเป็นต้น จึงมีผลทำให้ระบบควบคุมที่ออกแบบโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะมีความเร็วในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับตัวประมวลผลแบบทั่วๆ ไป ที่มีความเร็วเท่ากันซึ่งทางผู้ผลิตชิปดีเอสพีในปัจจุบันมีหลายบริษัท ได้แก่ บริษัท Texas Instrument, Analog Devices, Motorola, Microchip Technology, Lucent Technology, Hitachi ฯลฯ ชิปดังกล่าวจะถูกออกแบบให้ใช้ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยที่แต่ละบริษัทจะมีคุณสมบัติของชิปที่ใกล้เคียงกันแต่จะแตกต่างกันในเรื่องของราคาและอุปกรณ์ที่ใช้ต่อรวมภายนอก ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ dsPIC ของบริษัท Microchip Technology Inc. ผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ซึ่งรู้จักกันเป็นอย่างดีในแวดวงนักพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย Microchip Technology ได้กำหนดชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า Digital Signal Controller หรือ DSC นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูงซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

### 5.7.1 คุณสมบัติของซีพียู

ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010 ของบริษัท Microchip Technology ซึ่งถือว่าเป็นตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) ตระกูลแรกที่มีใช้เชิงพาณิชย์สำหรับประยุกต์ในงานควบคุมโดยเฉพาะ โครงสร้างเน้นความอ่อนตัวในการประยุกต์ใช้งานหลายลักษณะ โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบจุดทศนิยมคงที่ขนาด 16 บิต (16-bit fixed-point digital processors) ทางด้านฮาร์ดแวร์ภายในถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คุณสมบัติภายในมีดังนี้

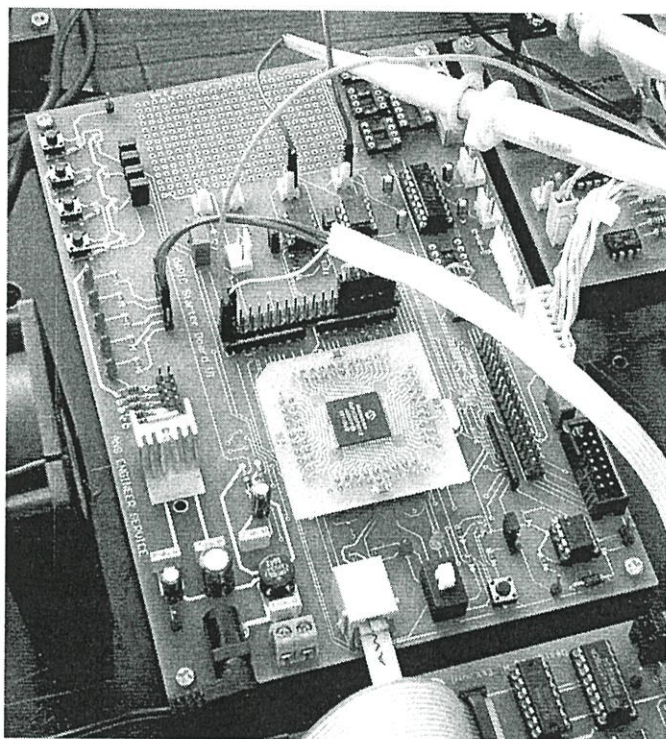
- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูแบบ RISC
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอ้างแอดเดรส

ได้อย่างอิสระ

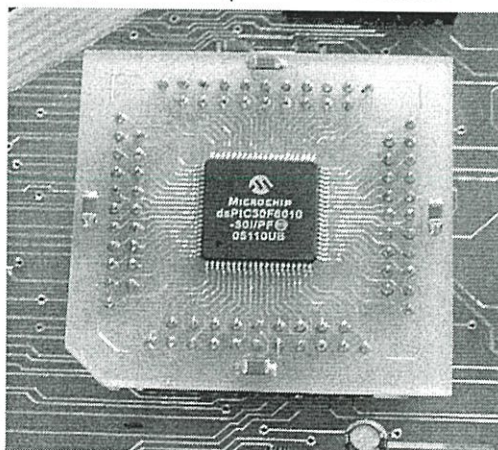
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลช สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง สามารถป้องกันการอ่านได้ และสามารถโปรแกรมตัวเอง โดยใช้กระบวนการทางซอฟต์แวร์
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอมที่สามารถลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมาก จึงรองรับการตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีเพาเวอร์-อนรีเซต, เพาเวอร์-อัปเดตไทมเมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ท- อัปเดตไทมเมอร์
- มีวอตช์ดอกไทมเมอร์แบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
- รองรับการโปรแกรมในวงจรแบบอนุกรม (ICSP : In-Circuit Serial Programming)
- สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
- มีแอกคิวแลเตอร์ขนาด 40 บิต 2 ตัว รองรับการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ได้เป็นอย่างดี
- มีหน่วยประมวลผลด้านการคูณและหารเลข 17 บิตในรูปของฮาร์ดแวร์ จึงทำให้สามารถคูณและหารเลขได้อย่างรวดเร็ว
- ทำการคูณเลข 16 บิต ได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไซเคิล
- มีตัวเลื่อนข้อมูลบาร์เรล 40 สเตจ ช่วยให้การประมวลผลข้อมูลที่มีจำนวนบิตมากๆ สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว
- มีวงจรเฟตซ์ข้อมูลคู่ จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว
- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25mA ทั้งแบบกระแสซิงค์และซอร์ส
- ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์มีขนาด 16 บิต ไม่น้อยกว่า 5 ตัว ต่อใช้งานร่วมกันเป็น ไทมเมอร์ 32 บิตได้
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล
- มีส่วนเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้งแบบ SPI และผ่านระบบบัส I2C
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม UART พร้อมบัฟเฟอร์แบบ FIFO
- มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล ความละเอียด 10 หรือ 12 บิต
- มีโมดูลสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมมอเตอร์
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์

### 5.7.2 สถาปัตยกรรมของ dsPIC30F6010

ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010 มีหน่วยความจำโปรแกรม 48 กิโลเวิร์ด มีขาต่อใช้งาน 80 ขา ในรูปที่ 5.13 แสดงบอร์ดต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย และรูปที่ 5.14 แสดงไดอะแกรมการทำงานและส่วนประกอบทั้งหมด

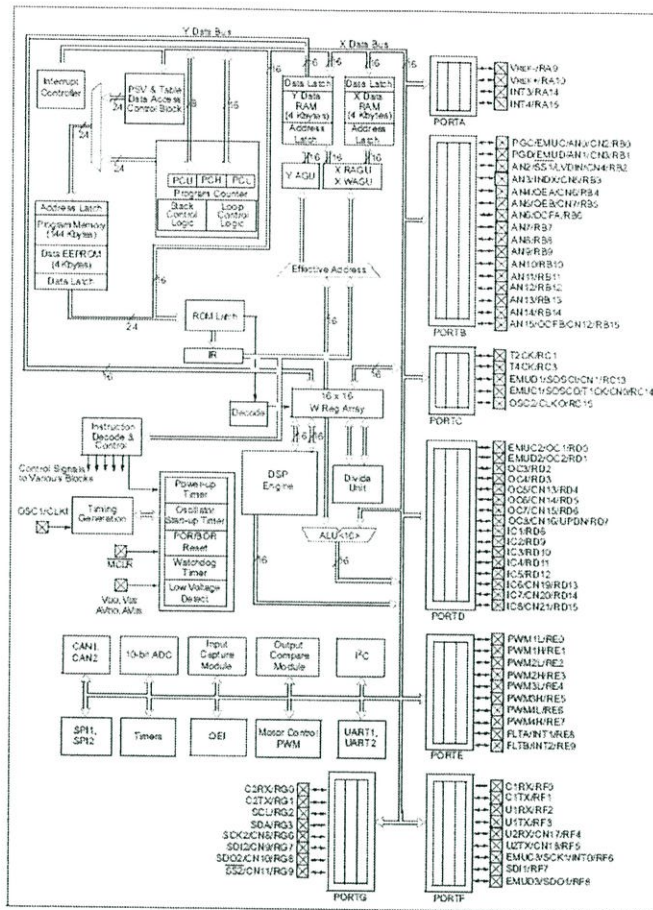


(ก) บอร์ดควบคุมของเครื่องต้นแบบ

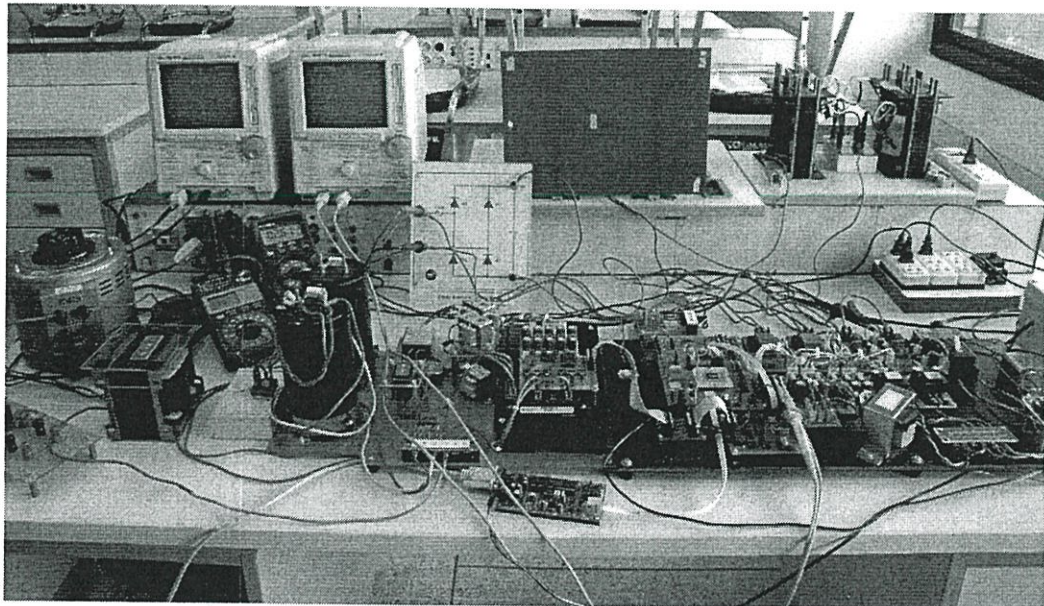


(ข) ตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC)

รูปที่ 5.13 บอร์ดควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010 ของเครื่องต้นแบบ



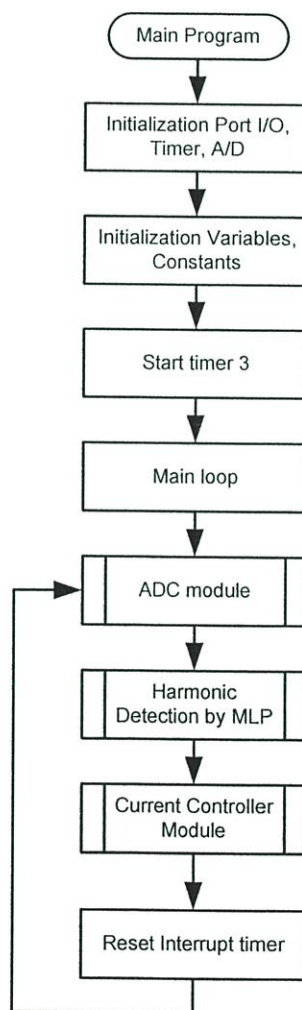
รูปที่ 5.14 โครงสร้างของตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010



รูปที่ 5.15 เครื่องต้นแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาดหนึ่งเฟส

## 5.8 การออกแบบโครงสร้างทางซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุม

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้กล่าวถึงการสร้างและส่วนประกอบต่างๆ ทางฮาร์ดแวร์ ซึ่งมีทั้ง วงจรกำลัง วงจรการตรวจจับค่าแรงดัน และวงจรการตรวจจับกระแสแล้วทำการส่งสัญญาณมายัง ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เพื่อประมวลผลสัญญาณที่ได้เหล่านั้นแล้วส่งไปยังวงจรภาคกำลังต่อไป ในการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการควบคุมสามารถใช้ได้ทั้งภาษาระดับสูง ( ภาษาซี ) และภาษาระดับต่ำ ( แอสเซมบลี ) โดยการเขียนโปรแกรมในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ภาษาซี เนื่องจากในโปรแกรมภาษาซีมีส่วนที่เป็นโมดูลทางคณิตศาสตร์ช่วยเหลืออยู่มาก ดังนั้นในส่วนของการเขียนโปรแกรมในส่วนของการขยายประสิทธิภาพจะสะดวกมากกว่า โดยโปรแกรมที่ใช้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟนี้ สามารถแสดงแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 5.16

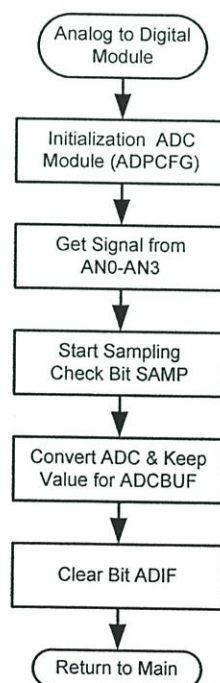


รูปที่ 5.16 โครงสร้างโปรแกรมหลักที่ใช้ในการควบคุมของวงจรกำลังแอกทีฟ

จากรูปที่ 5.16 เป็นผังการทำงานของโปรแกรมหลักที่ใช้ในการควบคุม โดยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลจะรับสัญญาณที่ได้จากขา A/D แล้วทำการแปลงสัญญาณเหล่านั้นไปเป็นดิจิทัลเพื่อทำการประมวลผล จากนั้นค่าที่ได้จะส่งไปยังส่วนการตรวจหาค่ากระแสฮาร์มอนิกซึ่งจะทำการหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับกระแสโพล และทำการส่งไปยังส่วนการรักษาระดับแรงดันแล้วสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปเป็นสัญญาณกระแสอ้างอิง เพื่อนำไปสร้างกระแสชดเชยฮาร์มอนิก โดยในส่วนของการทำงานสร้างกระแสจะรับสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้มา นำมาทำการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อส่งไปยังภาคกำลังต่อไป วงรอบการทำงานของโปรแกรมทั้งหมดจะถูกกำหนดโดยตัวจับเวลา (Timer)

### 5.8.1 โปรแกรมการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล (A/D Module)

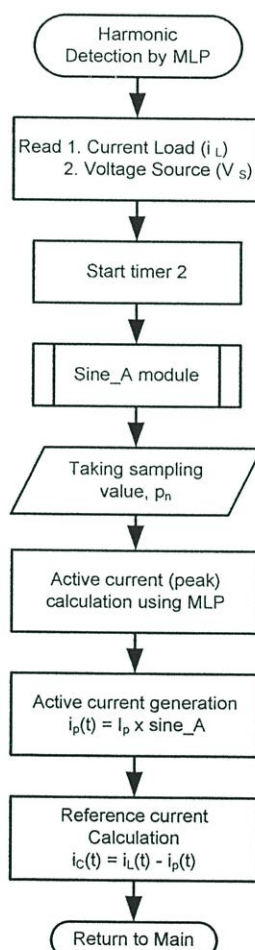
ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงจากสัญญาณอะนาลอกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งสัญญาณที่รับเข้ามานั้นเป็นสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับกระแสและแรงดัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้จำนวนช่องการแปลงสัญญาณอะนาลอกไปเป็นดิจิทัลจำนวน 4 ชุด และสัญญาณที่รับเข้ามามีแรงดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ ส่วนของโปรแกรมนี้อาจทำการแปลงสัญญาณอะนาลอกไปเป็นดิจิทัลแล้วทำการเตรียมสัญญาณเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนการประมวลผลอื่นๆ ต่อไป โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลแสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล

### 5.8.2 โปรแกรมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Harmonics Current Detector using MLP Module)

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการตรวจหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น โดยสัญญาณที่รับเข้ามาจะผ่านการคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นอินพุต หลังจากรวมกันแล้วคูณกับฟังก์ชันชนิด Log-sigmoid สัญญาณที่ออกจากอินพุตจะถูกคูณเข้ากับค่าน้ำหนักถ่วงในชั้นซ่อนรวมกันแล้วคูณ กับฟังก์ชัน Linear สัญญาณที่ออกจากโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกใช้เพื่อหาค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละเฟสต่อไป โครงสร้างโปรแกรมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 5.18

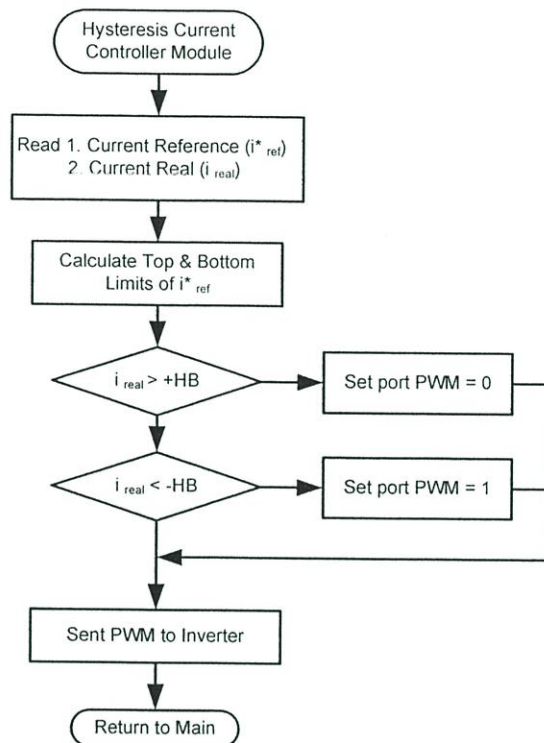


รูปที่ 5.18 โครงสร้างโปรแกรมการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

### 5.8.3 โปรแกรมส่วนควบคุมการสร้างกระแส (Current Controller Module)

ส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการควบคุมการสร้างกระแสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งจะรับสัญญาณที่ได้จากการประมวลผล ที่ได้จากการตรวจจับสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกมาเป็นกระแส

อ้างอิงให้กับส่วนควบคุมกระแสเพื่อทำการฉีดกระแสเข้าไปในระบบ ซึ่งเรียกว่าการควบคุมกระแส โดยวิธีของเขตฮิสเตอร์รีซิส (Bang Bang) แสดงได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 โครงสร้างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมกระแสแบบขอบเขตฮิสเตอร์รีซิส

## 5.9 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การออกแบบและสร้างทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมานี้จะประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของวงจรกำลังซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างกระแสชดเชยเพื่อฉีดเข้าไปในระบบ ส่วนที่สองจะเป็นส่วนที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ ที่รับสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาทำการประมวลผลแล้วส่งสัญญาณไปขับอุปกรณ์สวิตซ์ของวงจรกำลังต่อไป การประมวลผลของสัญญาณทั้งหมดได้นำตัวควบคุมสัญญาณทางด้านดิจิทัลมาทำการประมวลผลทั้งหมด ซึ่งข้อมูลการออกแบบนี้ได้ถูกนำไปสร้างจริงและทำการทดสอบ เพื่อยืนยันว่าระบบที่ได้ออกแบบนี้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

## บทที่ 6

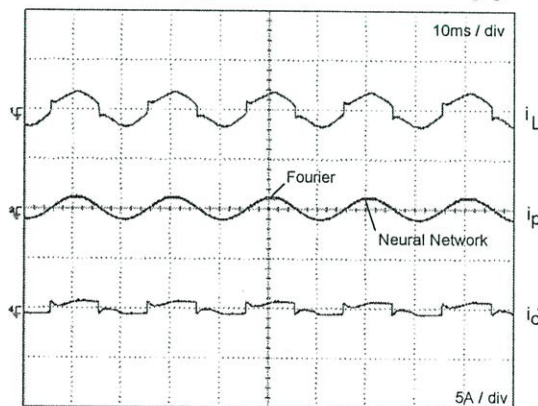
# ผลการทดลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

### 6.1 บทนำ

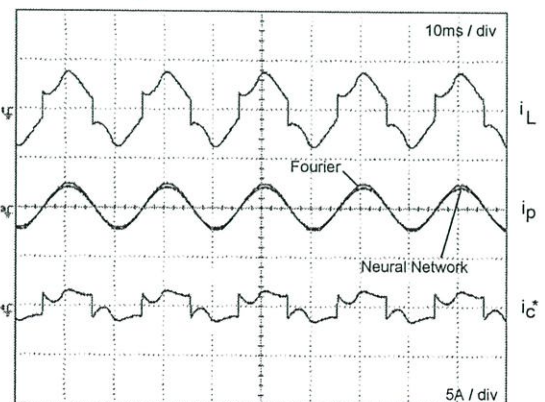
ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น มาทำการทดสอบความสามารถในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกกับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่ใช้การสร้างกระแสอ้างอิงด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัลเบอร์ dsPIC30F6010 โดยระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ 1 เฟส 220 V 50 Hz โหลดที่ใช้เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาดพิกัด 1.2 kVA โดยแบ่งการทดลองกับวงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น ต่ออยู่กับโหลดตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ โดยสามารถแสดงการทดลองออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

### 6.2 ผลการทดลองการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

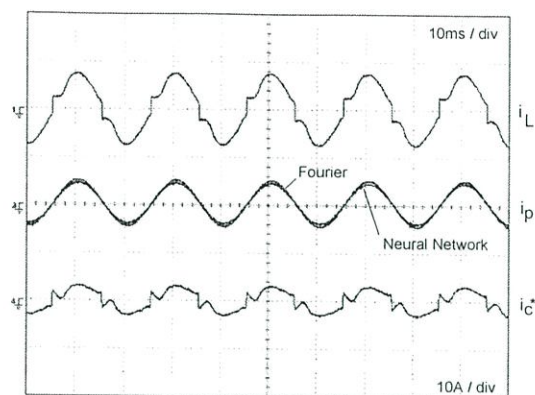
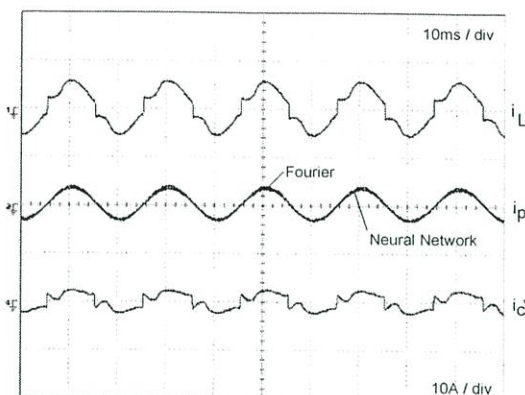
ส่วนนี้จะเป็นการทดลองความสามารถในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น เปรียบเทียบกับหลักการ Fast Fourier Transform (FFT) โดยทำการวัดรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการประมวลผลภายในตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล dsPIC30F6010 ใช้การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ด้วยไอซีเบอร์ MCP4921 ผ่านโมดูล SPI ภายในตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล ซึ่งโหลดที่นำมาทดลองจะเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น ต่ออยู่กับตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ โดยแสดงผลสัญญาณกระแสอ้างอิง สัญญาณกระแสเดสเซน และสัญญาณกระแสโหลด ดังรูปที่ 6.1



(ก) การหาค่ากระแสแอกทีฟจากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล เมื่อโหลดมีขนาด 300VA



(ข) การหาค่ากระแสแอกทีฟจากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล เมื่อโหลดมีขนาด 600VA



(ค) การหาค่ากระแสแอกทีฟจากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล เมื่อโหลดมีขนาด 900VA (ง) การหาค่ากระแสแอกทีฟจากตัวควบคุมสัญญาณ

ดิจิทัล เมื่อโหลดมีขนาด 900VA

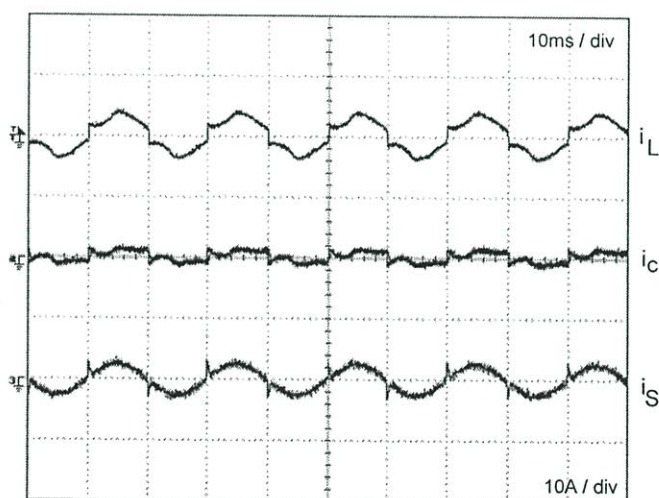
ดิจิทัล เมื่อโหลดมีขนาด 1.2kVA

รูปที่ 6.1 รูปคลื่นกระแสแอกทีฟที่ได้จากตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล โดยใช้หลักการของ

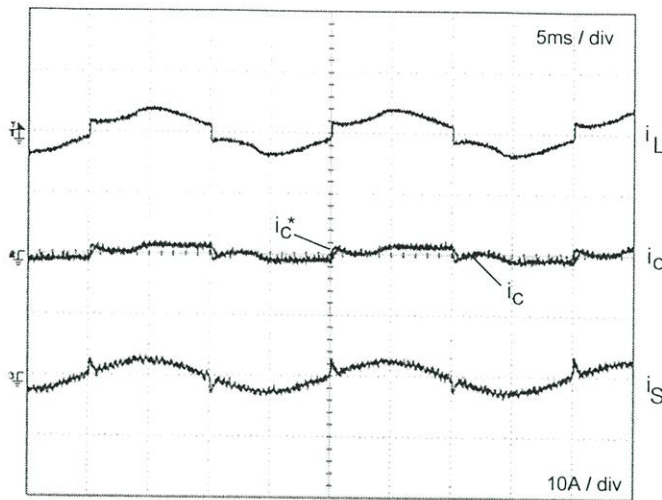
โครงข่ายประสาทเทียม

### 6.3 ผลการทดลองวงจรรอกำลังแอกทีฟในกรณีวงจรไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

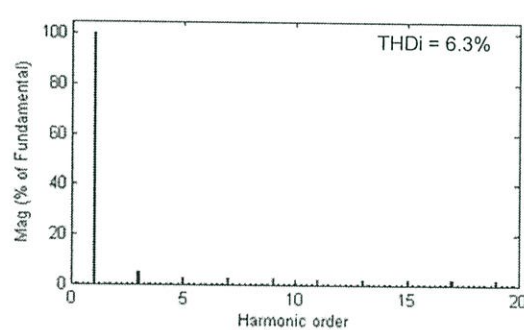
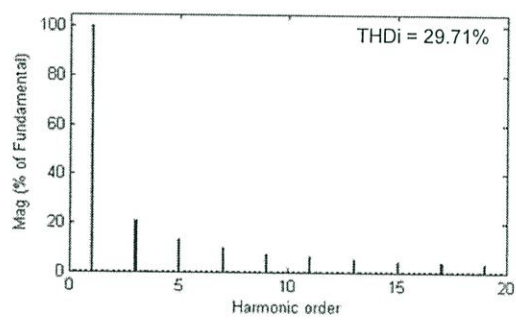
สำหรับการทดลองการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมกับโหลดในกรณีวงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ต่ออยู่กับตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ ภาระโหลด 600VA มีผลการทดลองดังรูปที่ 6.2 และสเปกตรัมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสดังรูปที่ 6.3 ส่วนรูปที่ 6.4 และ 6.5 เป็นผลการทดลองที่ภาระโหลด 1.2kVA



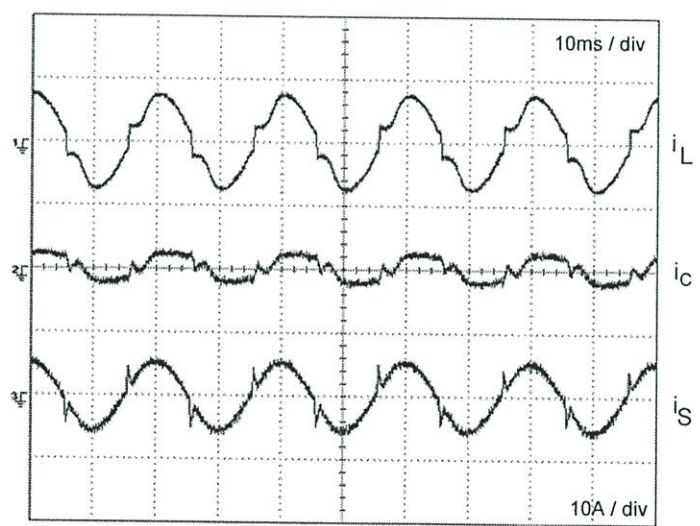
(ก) รูปคลื่นกระแสโหลด กระแสชดเชย และกระแสแหล่งจ่ายของระบบ



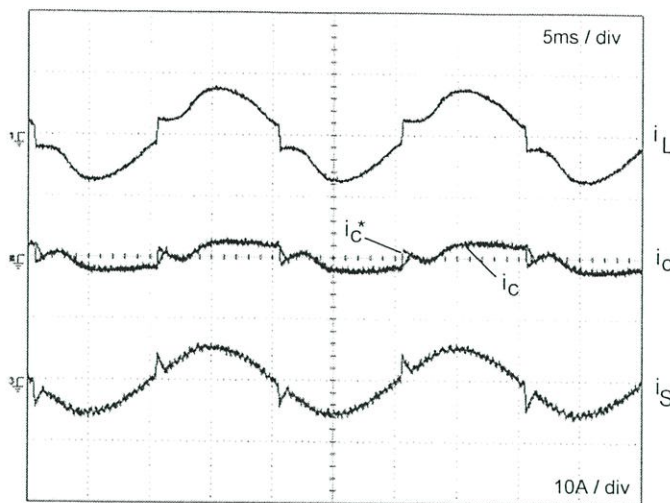
(ข) รูปคลื่นกระแสโหลด กระแสชดเชย กระแสชดเชยอ้างอิง( $i_c^*$ ) และกระแสแหล่งจ่ายของระบบ  
 รูปที่ 6.2 รูปคลื่นกระแสโหลด ( $i_L$ ) กระแสชดเชย ( $i_c$ ) และกระแสแหล่งจ่าย ( $i_s$ )  
 กรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นภาระโหลด 600VA



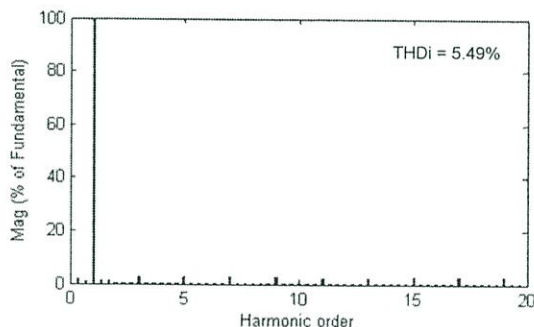
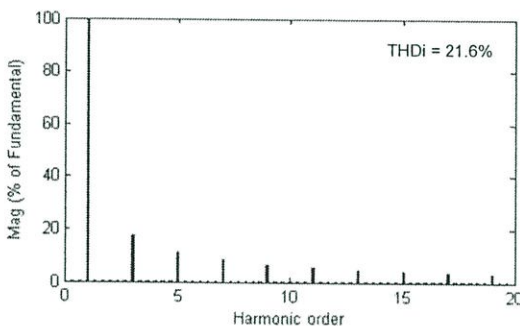
(ก) สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่ายก่อนการชดเชย (ข) สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่ายหลังการชดเชย  
 รูปที่ 6.3 สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่าย กรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น600VA



(ก) รูปคลื่นกระแสโหลด กระแสชดเชย และกระแสแหล่งจ่ายของระบบ



(ข) รูปคลื่นกระแสโหลด กระแสชดเชย กระแสชดเชยอ้างอิง( $i_c^*$ ) และกระแสแหล่งจ่ายของระบบ  
 รูปที่ 6.4 รูปคลื่นกระแสโหลด ( $i_L$ ) กระแสชดเชย ( $i_c$ ) และกระแสแหล่งจ่าย ( $i_s$ )  
 กรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ภาระโหลด 1.2 kVA



(ก) สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่ายก่อนการชดเชย (ข) สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่ายหลังการชดเชย  
 รูปที่ 6.5 สเปกตรัมกระแสแหล่งจ่าย กรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น 1.2 kVA

จากผลการทดลองในกรณีโหลดเป็นวงจรไดโอดเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น 1 เฟส พบว่า วงจรรอกกำลังแอคทีฟ สามารถทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งแสดงได้โดยกระแสแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากขึ้น โดยมีค่าความผิดเพี้ยนรวมของ ฮาร์มอนิกมีค่าลดลงจาก 21.6% เป็น 5.49%

### 6.4 การประเมินสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอคทีฟ

การทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอคทีฟ ที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยได้ทำการทดลองกับโหลดประเภทต่างๆ ซึ่งได้แก่ วงจรไดโอดเรียงกระแสเต็มคลื่น 1 เฟส ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของค่าองค์ประกอบความผิดเพี้ยนรวม ( $THD_i$ ) ค่า

ประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ค่าตัวประกอบการผิดเพี้ยน (DF) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นเปอร์เซ็นต์ แสดงผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 การทดลองโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส แบบเต็มคลื่น

Input voltage (Volt)	Input current (Amp)	Input power (kW)	Output voltage (Volt)	Output current (Amp)
220.4	0.9054	0.198	199	0.88
220.0	2.2	0.480	197.4	2.11
219.0	3.533	0.775	196.6	3.33
220.6	4.872	1.08	196.9	4.55

Output power (kW)	Efficiency (%)	Total harmonic distortion	Power factor	Displacement power factor
0.175	88.38	23.5	0.956	0.987
0.416	86.67	23.7	0.956	0.984
0.655	84.51	22.1	0.959	0.984
0.896	82.96	21.6	0.964	0.985

ผลการทดลองตามตารางที่ 6.1 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคุณภาพ ได้แก่ %THDi  $\eta$  PF และ DF กับค่าการเปลี่ยนแปลงโหลดไม่เป็นเชิงเส้นขนาดต่างๆ และจากการทดสอบที่พิกัดไฟฟ้าสามารถสรุปค่าดัชนีคุณภาพก่อน และหลังใช้วงจรกรองได้ดังตารางที่ 6.2 และ 6.3

ตารางที่ 6.2 ค่าดัชนีคุณภาพทดสอบที่พิกัดไฟฟ้าก่อนใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ประเภทโหลดไม่เป็นเชิงเส้น	%THDi	% $\eta$	PF	DF
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น	21.6	82.96	0.964	0.985

ตารางที่ 6.3 ค่าดัชนีคุณภาพทดสอบที่พิกัดไฟฟ้าหลังใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ประเภทโหลดไม่เป็นเชิงเส้น	%THDi	% $\eta$	PF	DF
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น	5.49	80.72	0.99	0.989

จากตารางที่ 6.2 และ 6.3 แสดงผลสรุปค่าดัชนีคุณภาพรูปคลื่นทดสอบที่พิกัดไฟฟ้าก่อนและหลังใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งจากผลการทดลองหลังใช้วงจรกรองทำให้เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์มอนิกมีขนาดลดลงโดยเกินมาตรฐานสากล 5% ไปเล็กน้อย ส่วนค่าตัวประกอบกำลังใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น C.A 8334B ผลที่ได้คือค่าตัวประกอบกำลังและค่าความผิดเพี้ยนของกระแสมีค่าลดลง จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวงจรกรองที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาค่ากระแสฮาร์มอนิกตามที่นำเสนอสามารถกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบได้ แต่ที่ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสสูงกว่ามาตรฐาน อาจเกิดจากขั้นตอนการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมและเทคนิคการควบคุมกระแส

## 6.5 สรุป

จากผลการทดสอบ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นในการวิเคราะห์หาค่ากระแสแอกทีฟเพื่อสร้างกระแสชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟ เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น กระแสฮาร์มอนิกมีขนาดลดลงทำให้กระแสแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากขึ้น

## บทที่ 7

# บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ และออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ที่ใช้การ  
สร้างกระแสชดเชยด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ทำการ  
ทดสอบกับระบบ 1 เฟส ที่พิกัดแรงดัน 220V 50Hz โหลดที่นำมาทดสอบสร้างกระแสฮาร์มอนิกใน  
ระบบเป็นวงจรเรียงกระแสไดโอดแบบเต็มคลื่น ชนิด 1 เฟส ต่ออยู่กับตัวต้านทาน-ตัวเหนี่ยวนำ  
พิกัดขนาด 1.2 kVA ซึ่งในการทดสอบนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจเฉพาะในช่วงเวลาคงที่ แต่ในช่วงเวลา  
ที่มีการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน การสร้างกระแสชดเชยด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์  
เซ็ปตรอนหลายชั้น ไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้อย่างถูกต้อง จากผล  
การศึกษาและทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

### 7.1 สรุปผลการวิจัย

1. การหาค่ากระแสแอกทีฟ ด้วยหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลาย  
ชั้นที่ได้นำเสนอ เป็นหลักการที่ไม่ทำให้เกิดการเลื่อนเฟสทางสัญญาณ และสามารถสร้างกระแส  
ชดเชยที่มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนักในช่วงเวลาคงที่ แต่ถ้าเป็นช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง  
โหลดอย่างทันทีทันใด โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นที่นำเสนอ ไม่สามารถ  
ติดตามการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างฉับพลันได้ ทำให้ได้กระแสชดเชยที่ไม่ถูกต้อง
2. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ แสดงให้เห็นว่าการนำโครงข่ายประสาทเทียม  
เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นมาใช้ ในการหาค่ากระแสแอกทีฟเพื่อสร้างกระแสชดเชยให้กับวงจรรอก  
กำลังแอกทีฟตามวิธีการที่นำเสนอ นั้น ไม่เหมาะสม เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมที่เลือกใช้เป็น  
โครงข่ายประสาทที่เหมาะสมกับงานในลักษณะคงที่ (static) ทำให้ในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง  
โหลดโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถตอบสนองได้อย่างถูกต้องและทันทีทันใด ซึ่งวงจรรอก  
กำลังแอกทีฟนั้นจะต้องมีประสิทธิภาพในการชดเชยฮาร์มอนิกในที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่าง  
ฉับพลันด้วย
3. การหาค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ที่นำโครงข่ายประสาทเทียม  
เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นมาใช้นั้น หากต้องการนำไปใช้กับโหลดชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่วงจรเรียงกระแส  
แบบเต็มคลื่น ต่ออยู่กับความต้านทาน-ความเหนี่ยวนำ จะต้องมีการฝึกสอนให้กับโครงข่ายด้วย  
รูปคลื่นกระแสโหลดชนิดนั้นๆ เพิ่มเติมอีกด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าจะต้องมีการปรับค่าน้ำหนักถ่วง  
ที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายใหม่ ทำให่วงจรรอกกำลังแอกทีฟไม่มีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งาน  
กับโหลดชนิดต่างๆ

## 7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

1. การใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น(MLP) กับงานที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงฉับพลันไม่สามารถตอบสนองได้ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรศึกษาโครงข่ายประสาทเทียมอื่นๆ ที่มีความสามารถเหมาะสมกว่ามาใช้งานสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังเช่นโครงข่ายประสาทแบบที่ปรับตัวเอง (ADALINE) , โครงข่ายประสาทแบบหน่วงเวลา (TDNN) เป็นต้น

2. การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่มีการคำนวณไปข้างหน้าเพื่อหาคำตอบเพียงอย่างเดียว ตัวแปรที่จะทำให้โครงข่ายแก้ปัญหาได้อย่างถูกต้องจะขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและจำนวนของโหนดในแต่ละชั้นของโครงข่าย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงข้อมูลที่เหมาะสมในการฝึกสอนและจำนวนของโหนดในแต่ละชั้นของโครงข่ายที่เหมาะสมด้วย

3. เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยงและค่าไบอัสของโครงข่ายประสาทเทียม ที่เขียนด้วยโปรแกรมภาษาซีเป็นเลขทศนิยม จึงทำให้ใช้พื้นที่หน่วยความจำข้อมูลจำนวนมากในการเก็บ อีกทั้งหากมีจำนวนโหนดและชั้นซ่อนมาก ก็จะทำให้การประมวลผลเพิ่มมากขึ้นไปอีก ดังนั้นจึงควรมีการนำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) ที่มีความเร็วมากขึ้น (มากกว่า 30 MIPS) และมีหน่วยความจำปริมาณมากมาใช้แทน เพื่อให้การประมวลผลมีการตอบสนองที่รวดเร็วมมากขึ้น

4. การนำเอาวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานไปใช้งานจริง จำเป็นต้องพิจารณาในการตัดต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าออกจากระบบกำลัง ดังนั้นจึงควรพัฒนาระบบให้มีส่วนที่ทำหน้าที่ในการตัดต่อระบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าออกจากระบบกำลังรวมอยู่ด้วย

5. เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้ทำการวิจัยนี้ในส่วนของควบคุมกระแสใช้การควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์รีซีส จึงทำให้การกระจายของกลุ่มสเปกตร้าของฮาร์มอนิกของการสวิตช์มีมาก และทำให้การกำจัดฮาร์มอนิกเหล่านี้ออกไปได้ยาก การพัฒนาต่อไปควรใช้การควบคุมกระแสที่มีความถี่ในการสวิตช์คงที่ เพื่อให้ง่ายต่อการกำจัดฮาร์มอนิกในส่วนที่เกิดจากการสวิตช์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิรัตน์ เกตุสวัสดิ์สมควร, “การวิเคราะห์ และออกแบบวงจรกรองกำลังแบบผสมแพสซีฟ และแอกทีฟที่มีการชดเชยกระแสรีแอกทีฟและฮาร์มอนิก” วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [2] J. Arrillaga, D.A. Bradley and P.S. Bodger. **Power System Harmonics**. John Wiley & Sons, 1985.
- [3] ลิขิต ชูทรัพย์, “วงจรถองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล”, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [4] สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, “ชนิดหลักการและการประยุกต์ใช้วงจรถองแอกทีฟ”, เอกสารประกอบการอบรมการไฟฟ้านครหลวง ภาควิชาไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541, หน้า 1-47.
- [5] H. Demuth, M. Beale, “**Neural Network Toolbox for Use with MATLAB**”, July 2002.
- [6] อาทิตย์ ศรีแก้ว. “การคำนวณเชิงนิวรอล”, เอกสารคำสอนรายวิชาบัณฑิตศึกษา, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550.
- [7] ณชล ไชยรัตน์, “เอกสารประกอบการสอนวิชา Intelligent Systems”, ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
- [8] อาทิตย์ ศรีแก้ว. “การคำนวณเชิงนิวรอล”, เอกสารคำสอนรายวิชาบัณฑิตศึกษา, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550.
- [9] Peltarion. “**Time delay neural network**” [Online] Available: [http://www.peltarion.com/doc/index.php?title=Synapse:Snippet#Time\\_Delay\\_Neural\\_Network](http://www.peltarion.com/doc/index.php?title=Synapse:Snippet#Time_Delay_Neural_Network). 2008.
- [10] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins. “**Power Electronics Converter, Applications, and Design.**” 1995. John Wiley & Sons, Inc.
- [11] F. B. Libano, R. A. M. Braga, G. Willmann and S. L. Muller. “Application of Neural Networks for the Control Strategy for Series Active Power Filters.” **Harmonics and Quality of Power**. Vol. 2, 2002. pp. 519-523.

- [12] Simon D. Round and Ned Mohan, “**Comparison of Frequency and Time Domain Neural Network Controllers for an Active Power Filter**”, IEEE Transactions on Power Electronics, 1993.
- [13] Narade Pecharanin, Mototaka Sone, Hideo Mitsui, “**An Application of Neural Network for Harmonic Detection in Active Filter**”, IEEE Transactions on Power Electronics, 1994.
- [14] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth and Mark Beale, **Neural Network Design**, PWS Publishing Company., Boston, 1996.
- [15] A. A. Mohd. Zin, Md. Rukonuzzaman, H. Shaibon, “**Neural Network Approach of Harmonics Detection**”, IEEE Transactions of Power Electronics, 1998.
- [16] M. Rukonuzzaman and Mutsuo Nakaoka, “**Magnitude and Phase Determination of Harmonic Currents by Adaptive Learning Back-Propagation Neural Network**”, IEEE Transactions on Power Electronics, 1999.
- [17] M. Rukonuzzaman and Mutsuo Nakaoka, “**Adaptive Neural Network Based Harmonic Current Compensation in Active Power Filter**”, IEEE Transactions on Power Electronics, 2001.
- [18] F. B. Libano and S. L. Muller. “**Application of Neural Networks for the Control Strategy for Series Active Power Filters.**” Harmonics and Quality of Power. Vol. 2, 2002. pp.519-523.
- [19] Abdelaziz Zouidi, Farhat Fnaiech and Salem Rahmani. “**Artificial Neural Networks as Harmonic Detectors.**” IEEE Transactions on Power Electronics, 2006.

ภาคผนวก ก.

เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

## เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์



ผลิตภัณฑ์ Multi Meter  
 ผู้ผลิต GOSSEN  
 รุ่น METRAHit 15S  
 รายละเอียด Frequency, Hz  
 Duty Cycle, %  
 MIN/MAX-Recording  
 10A Current AC  
 1000V Voltage AC



ผลิตภัณฑ์ Multi Meter  
 ผู้ผลิต GOSSEN  
 รุ่น METRAmax 12  
 รายละเอียด Frequency, Hz  
 10A Current AC  
 400V Voltage AC



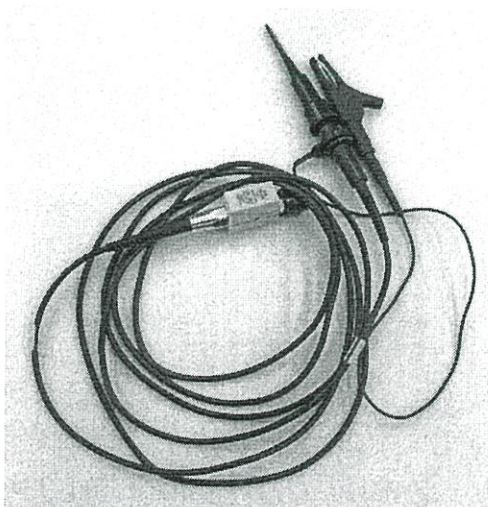
ผลิตภัณฑ์ LCR Meter  
 ผู้ผลิต ESCORT  
 รุ่น ELC-131D  
 รายละเอียด Dual Display,  
 Dual testing frequency  
 120Hz and 1kHz  
 Capacitance/Resistance/  
 Inductance Measurement



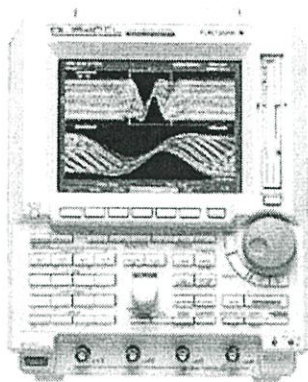
ผลิตภัณฑ์ Differential Probe  
 ผู้ผลิต Tektronix  
 รุ่น P5200  
 รายละเอียด 1300V peak  
 Attenuation ratio  
 1/50 and 1/500



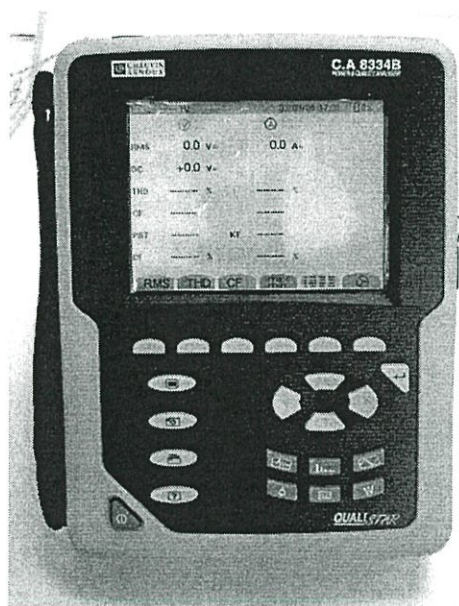
ผลิตภัณฑ์ Current Probe  
 ผู้ผลิต Tektronix  
 รุ่น A621  
 รายละเอียด 1000A Current AC  
 600V Voltage AC  
 Output 1000A : 1mV/A



ผลิตภัณฑ์ Probe x 100  
 ผู้ผลิต Tektronix  
 รุ่น P5100  
 รายละเอียด 100x  
 2500Vp



ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope  
 ผู้ผลิต (YOKOGA)  
 รุ่น รุ่น DL1540 /DL (4 Channel)  
 รายละเอียด รายละเอียด 150 MHz Analog  
 Bandwidth 200 MS/s on two  
 channel  
 8 bit vertical resolution  
 DC to 30 MHz, 850V  
 (DC+AC peak)2% DC accuracy,  
 Internal low pass filter

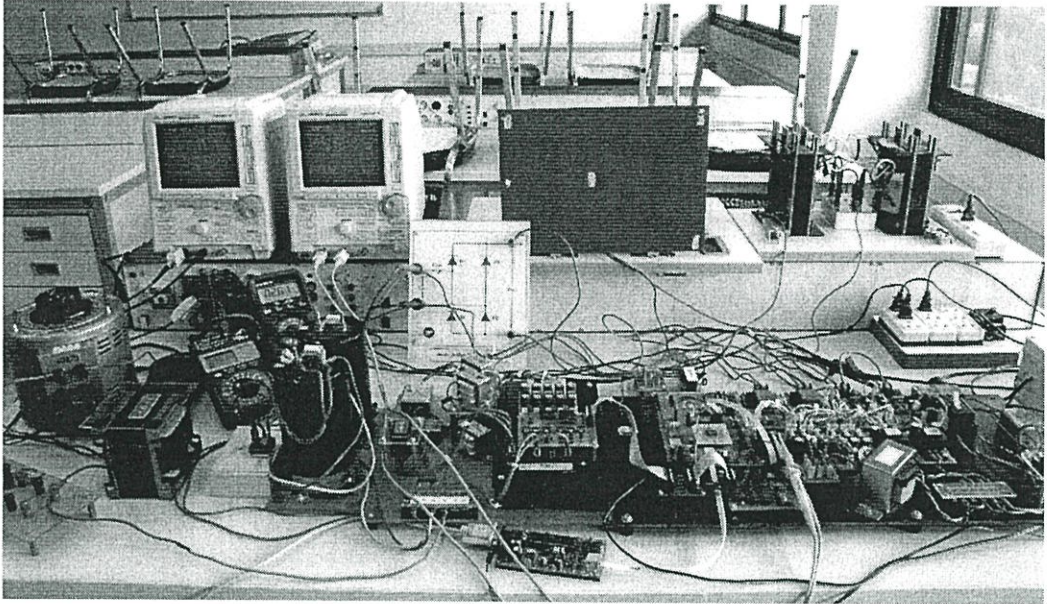


ผลิตภัณฑ์ Power Quality Analyzer  
 ผู้ผลิต (CHAUVIN ARNOUX)  
 รุ่น C.A. 8334B  
 รายละเอียด 5 to 600 Vrms. 1.00 to 1000 Arms  
 Up to 600 kw., 6 Hz to 99.9 Hz.  
 8 bit vertical resolution  
 Indicates fundamental to 13th  
 harmonics  
 Measures crest factor, PF, DPF, K-  
 factor  
 %THDi, %THD-R

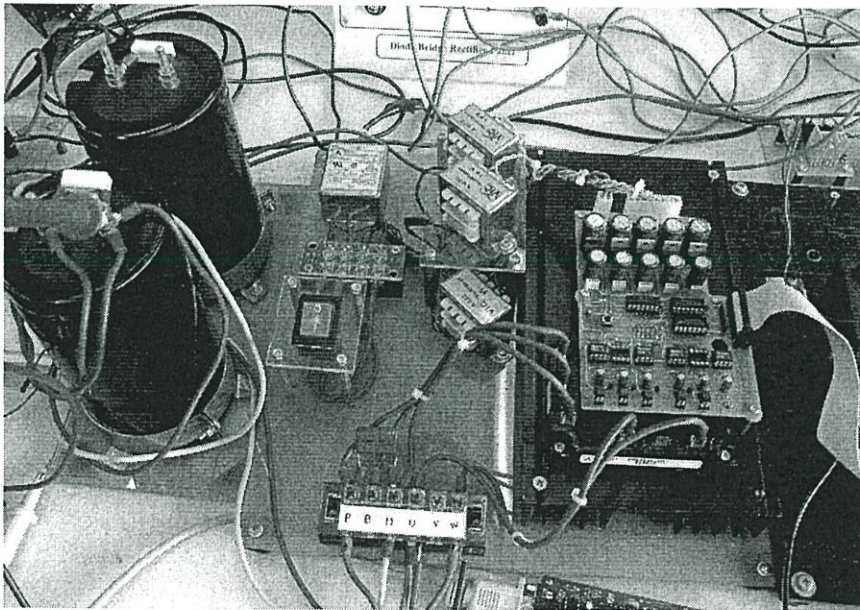
ภาคผนวก ข.

**โครงการต้นแบบในงานวิทยานิพนธ์**

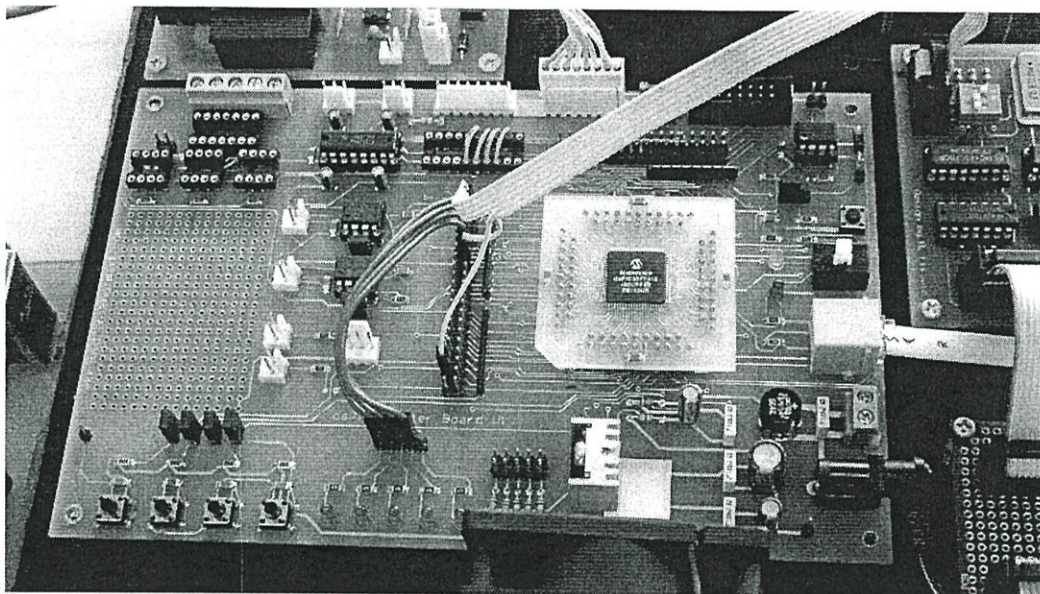
## โครงการต้นแบบในงานวิทยานิพนธ์



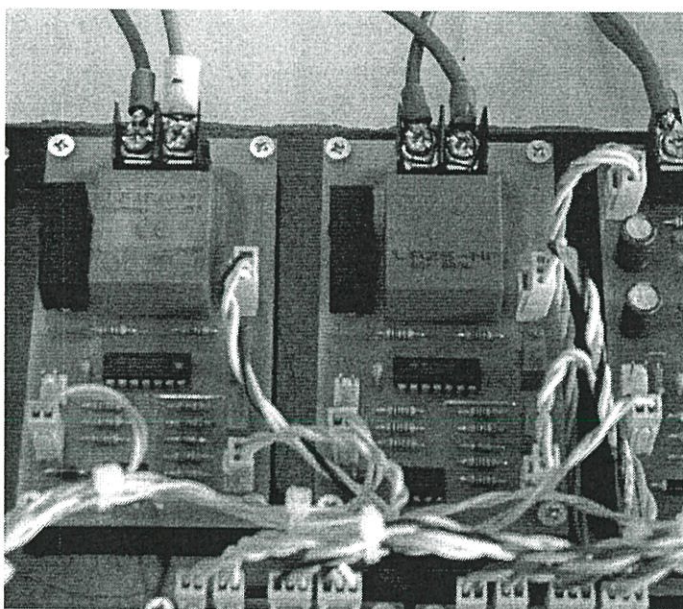
รูปที่ 1 แสดงระบบโดยรวมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



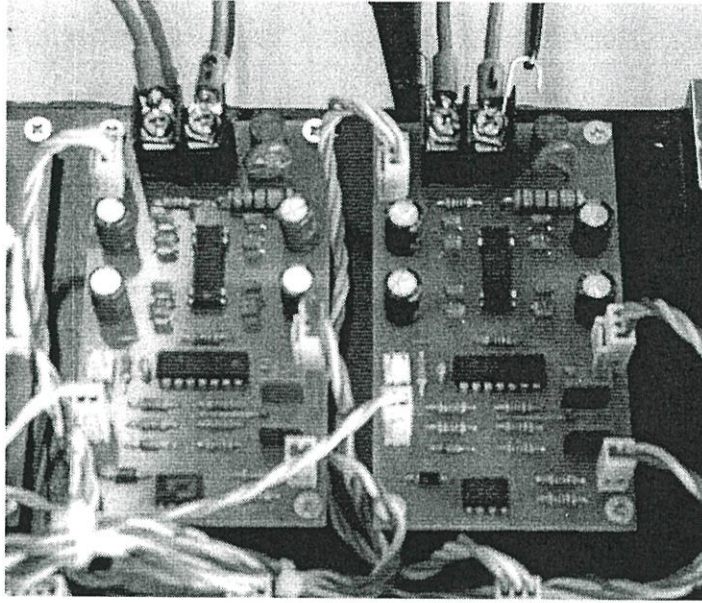
รูปที่ 2 วงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน



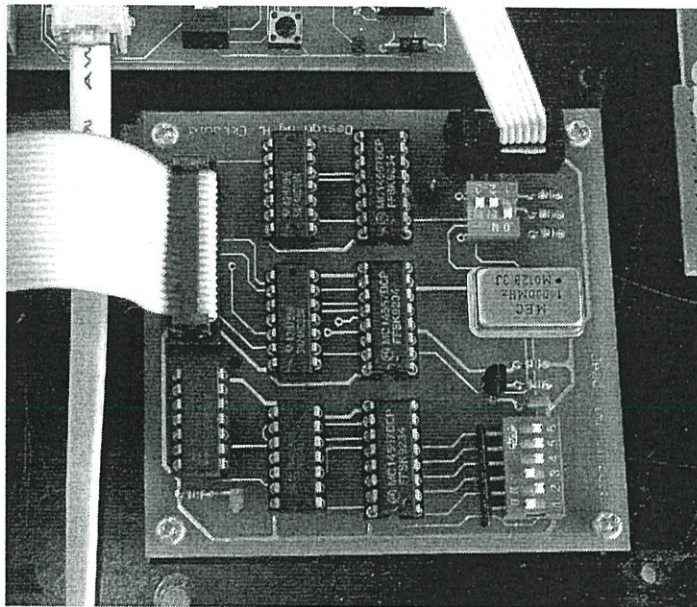
รูปที่ 3 วงจรตัวควบคุมสัญญาณดิจิทัล (DSC) เบอร์ dsPIC30F6010



รูปที่ 4 วงจรตรวจจับกระแสที่ใช้ Hall Effect Sensor รุ่น LA25-NP



รูปที่ 5 วงจรตัวตรวจจับแรงดันที่ใช้ไอซีเบอร์ ISO-124



รูปที่ 6 วงจรประวิงเวลา (Dead Time) และจับเกต

ภาคผนวก ก.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. เอกวิทย์ หายักวงษ์ และวิจิตร กิณเรศ, “การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยการใส่โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น”, วิศวกรรมลาดกระบัง, หน้าที่ 65-70, ปีที่ 22 ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548.
2. เอกวิทย์ หายักวงษ์, วิจิตร กิณเรศและสมชาติ จิริวิภากร, “การหาค่ากระแสแอกทีฟของการสังเคราะห์กระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟส โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น”, วิศวกรรมลาดกระบัง, หน้าที่ 19-24, ปีที่ 23 ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2549.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

## 1.



ปีที่ 22 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2548

1. การศึกษาการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธีพลาสมาซีวีความถี่สูง	1
อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง พงษ์พันธ์ ลิขณนุกฤษฎ์	
2. การพัฒนาฟิล์มบางซิลิคอนชนิดพีด้วยวิธี PECVD เพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าทางรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	7
อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง พงษ์พันธ์ ลิขณนุกฤษฎ์	
3. การเกิดกระแสแสงของโพลีไดออกไซด์ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> แบบพลาสมาที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง	13
ธนศ โษะเหม มาณิตา ดวงแสง สุรศักดิ์ เมียนเจริญ	
4. ระบบวัดมลภาวะแบบรีโมทข้อมูล โดยการตรวจจับกระแสรั่วไหล	19
สุพัต ผาพันธุ์ มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์	
5. การคำนวณหาทิศทางกระแสและขนาดของสายเคเบิลแรงดันไฟฟ้าต่ำ และแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง โดยคำนึงถึงลักษณะการติดตั้งแรงดันตกในสาย และผลกระทบจากฮาร์มอนิก	25
ทัฬหายุ ดิขสุธรรม สุทธิ บรรจงจิตร ปะพาพรรณ เดลือบรรณรัตน์ บุญเลิศ สือเฉย สิริวิชัย ทัดสวน	
6. การประมาณข้อสังเกตคุณภาพสำหรับการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบ OFDM-CDMA บนช่องสัญญาณสื่อสารการบิน	31
วันวิวัฒน์ กลั่นงาม กอบชัย เดชหาญ	
7. การรู้จำใบหน้าโดยใช้หลักการของ 2DLDA	37
สิทธิพันธ์ คงสนทนา บุทธพงษ์ วัชรศักดิ์เสรี	
8. การจัดการประเภทแฟ้มเกิดตามกฎด้วยวิธี Bitmap Intersection Lookup (BIL) พร้อมการปรับปรุงกฎ	43
ณัฐโชติ พรหมฤทธิ์ อัครินทร์ คุณกิตติ	
9. บทคัดกรองความถี่ที่ทำงานในโหมดกระแสปรับค่าได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย CCM แบบหลายเข้าพุท	49
ทรงพล กิ่งมัสคุณธ์ มนต์วี ศำเงิน กอบชัย เดชหาญ พิพัฒน์ พรหมมี นรงค์ อัจฉฤทธิ์	
10. วงจรตรวจจับค่าสูงสุดใช้แรงดันต่ำโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส	54
กฤษณ์ อ่างแก้ว สุรัชย์ จันทร์ฉาย พิพัฒน์ พรหมมี กอบชัย เดชหาญ มนต์วี สมดุลยกนก	
11. วงจรคุณสัญญาณอนาล็อกแบบซีมอส ความเพี้ยนต่ำโดยใช้ไฟเลี้ยงต่ำสุดเดียว	59
มนตรี สมดุลยกนก พิพัฒน์ พรหมมี กอบชัย เดชหาญ กฤษณ์ อ่างแก้ว	
12. การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อระบุชั้นฮาร์มอนิกหลายชั้น	65
เอกวิทย์ หายักษ์วงษ์ วิจิตร กิณเรศ	
13. วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟสที่ขั้วอิเล็กทรอนิกส์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ชั่วขณะควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	71
สันติภาพ โคตทะเล วิจิตร กิณเรศ	
14. The Management of Lead Waste Water Using Power Source 1440 Watts with Microcontroller	77
Siseerot Ketkuew	



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม  
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

# LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 22 Number 1

March 2005

1.	Study on the Deposition of Intrinsic Amorphous Silicon Thin Film by VHF-PECVD	1
	<i>A. Hongsingthong W. Titroongwang and P. Sichanugrist</i>	
2.	The Development Of p-types Of Microcrystalline Silicon Thin Film by PECVD for Its Application for Window Layer in a-Si Silicon Solar Cells	7
	<i>A. Hongsingthong W. Titroongwang and P. Sichanugrist</i>	
3.	Photocurrent Generation of Planar Al/n-Si/Al Photodiodes with Wide Electrode Gap	13
	<i>T. Sothame M. Dvangsang and S. Niemchareon</i>	
4.	Remote Pollution Monitoring System using Leakage Current Detection	19
	<i>S. Papun and M. Leelajindakrairerk</i>	
5.	The Calculation to Find Ampacity and Size of Low Voltage Cable and Medium Voltage Cable Depend on Type of Installation, Voltagedrop and the Impact of Harmonic	25
	<i>T. Dissutam S. Bunjongjit P. Kleubvannarat B. Suechae and S. Tadsuan</i>	
6.	Channel Estimation for Uplink OFDM-CDMA System on Aeronautical Channel	31
	<i>W. Klimgam and K. Dejhan</i>	
7.	Face Recognition Using 2DLDA Algorithm	37
	<i>S. Kongsonthana and Y. Rangsunaree</i>	
8.	Bitmap Intersection Lookup (BIL) : A Packet Classification's Algorithm with Rules Updating	43
	<i>N. Promrit and A. Khunkit</i>	
9.	Electronically Tunable Current-Mode Filter Blocks Using Multi-Output CCCIs	49
	<i>T. Klinsukhon M. Kungem K. Dejhan P. Prommee and N. Atj-Rith</i>	
10.	Low-Voltage CMOS Maximum Circuit	54
	<i>K. Angkaew S. Janchay P. Prommee K. Dejhan and M. Somduhkanok</i>	
11.	Low-Distortion Single Low-Supply CMOS Analog Multiplier	59
	<i>M. Somduhkanok P. Prommee K. Dejhan and K. Angkaew</i>	
12.	Harmonic Detection by Using Multilayer Perceptron Neural Network	65
	<i>E. Hayakwong and V. Kinnares</i>	
13.	DSP Controlled Three Phase Active Power Filter Based on Instantaneous Reactive Power	71
	<i>S. Kothale and V. Kinnares</i>	
14.	The Management of Lead Waste Water Using Power Source 1440 Watts with Microcontroller	77
	<i>S. Ketkaew</i>	

# การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น

## Harmonic Detection by Using Multilayer Perceptron Neural Network

เอกวิทย์ หายักวงษ์\*      วิจิตร กิมเรศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
\*ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multilayer Perceptron Neural Network; MLP) เพื่อหาค่าประกอบฮาร์มอนิกแต่ละอันดับจากรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน โดยค่าแอมพลิจูดจากการสุ่มค่ารูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนจะถูกป้อนเข้าไปเป็นข้อมูลให้กับโหนดของชั้นอินพุต จากนั้นองค์ประกอบฮาร์มอนิกแต่ละอันดับจะถูกตรวจจับไปยังโหนดที่ชั้นเอาต์พุต ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะต้องมีการฝึกสอนด้วยกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ โครงข่ายจึงจะสามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ในการฝึกสอนจะจำลองรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนซึ่งจะประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd , 5th และ 7th แล้วใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อระบุองค์ประกอบฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

### Abstract

This paper presents a harmonic detection in power system based on multilayer perceptron neural network (MLP) in order to determine the components of harmonics from the distorted wave. By providing the amplitude values of distorted wave to each unit of the input layer, the content of each harmonic component will be detected to each unit in the output layer. As the neural network enable to detect harmonics effectively, the learning process with back-propagation algorithm is necessary. In this paper, a simulation using neural network to specify each harmonic component of the distorted wave which includes 3rd, 5th and 7th harmonic component is also presented.

### 1. บทนำ

การใช้งานที่เพิ่มขึ้น ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังเช่น คอนเวอร์เตอร์และอุปกรณ์สวิตซ์ ทำให้เกิดปัญหาที่สำคัญซึ่งไม่อาจละเลยได้ นั่นก็คือปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิก โดยที่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะไปรบกวนระบบ

ไฟฟ้ากำลัง ทำให้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสผิดเพี้ยนไป ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพกำลังไฟฟ้าลดต่ำลง และมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆให้มีประสิทธิภาพลดลง

ด้วยเหตุนี้ การตรวจจับแต่ละองค์ประกอบฮาร์มอนิกแยกออกจากองค์ประกอบพินคแมนทอล ที่ต้องการจะต้องเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว เพื่อการแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าสิ่งที่จะต้องรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของฮาร์มอนิก ก็คือขนาดและเฟส ซึ่งค่าที่ได้ จะทำให้สามารถชดเชยองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ โดยการจำลององค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เหมือนกัน แคมป์เฟสตรง กันข้ามเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นหลักการทำงานของวงจรกรองแบบแอคทีฟ ในวิธีการตามแบบธรรมดา [3] การตรวจจับฮาร์มอนิกจะทำโดยใช้เทคนิค ดังเช่น FFT (Fast Fourier Transform) ซึ่งเทคนิค FFT อันดับแรกจะสุ่มค่ารูปคลื่นที่คิดเทียบไปแล้วก็เป็นข้อมูล หลังจากนั้นจะทำตามกระบวนการของ Fast Fourier Transformation เพื่อตรวจแยกแยะแต่ละองค์ประกอบของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ แต่การตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีนี้จะใช้เวลาและหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์จำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นการยากที่จะวิเคราะห์ในเวลาจริงได้

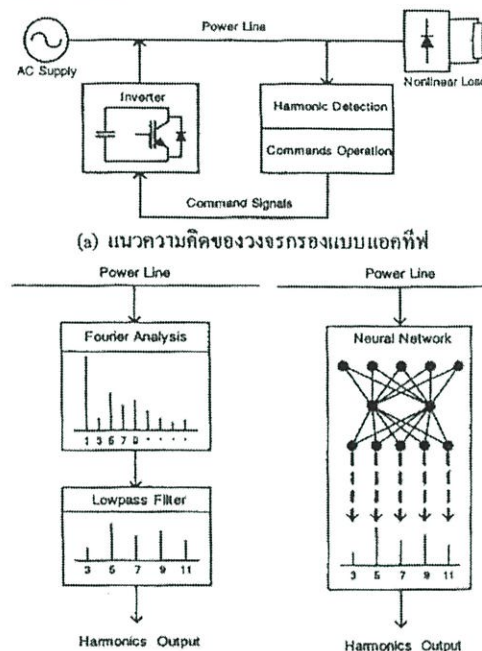
บทความนี้ จะประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (MLP) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกแต่ละอันดับจากรูปคลื่นที่คิดเทียบ ซึ่งสามารถที่จะเรียนรู้และให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว เพื่อยืนยันว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้งานได้ กระแสไหลดที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จะถูกสร้างขึ้นเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมตรวจจับ จากผลการจำลองจะแสดงให้เห็นว่า วิธีนี้เป็นวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำมาก และสามารถที่จะตรวจจับฮาร์มอนิกในเวลาจริงได้

2. การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

2.1 ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดและขั้นตอนของการตรวจจับฮาร์มอนิก ในวงจรกรองแบบแอคทีฟ [4] วิธีการเดิมที่ใช้เพื่อตรวจจับฮาร์มอนิกก็คือ การวิเคราะห์และสังเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความถี่ โดยมีขั้นตอนดังนี้ คือ

อันดับแรก รูปคลื่นกระแสที่คิดเทียบจะถูกวิเคราะห์ให้เป็นสเปกตรัมของความถี่ หลังจากนั้นองค์ประกอบของรูปคลื่นพินคแมนทอล จะถูกกำจัดไป เหลือเพียงฮาร์มอนิกที่เป็นเอาท์พุท สำหรับใช้สร้างกระแสชดเชย แต่สำหรับบทความนี้ จะใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อตรวจจับแต่ละองค์ประกอบฮาร์มอนิก ซึ่งจะได้เอาท์พุทเช่นเดียวกันกับวิธีการแบบเดิม



วิธีการแบบ Fourier transform วิธีการแบบ Neural network  
(b) ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิก

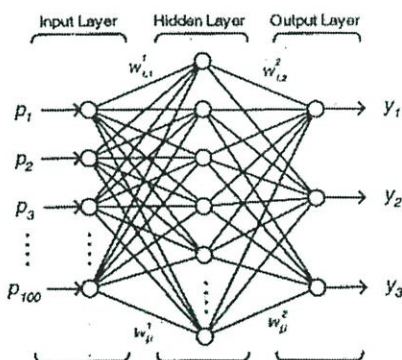
รูปที่ 1 แนวความคิดของวงจรกรองแบบแอคทีฟและขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิก

โดยขั้นตอน จะเริ่มต้นจากการสุ่มค่ารูปคลื่นที่คิดเทียบในระยะเวลาครึ่งไซเคิล ค่าการสุ่มค่าจำนวน 100 จุด ด้วยระยะห่างที่เท่ากันของแกนเวลา จะถูกใช้เป็นสัญญาณอินพุทให้กับโครงข่ายประสาทเทียม โดยไม่ต้องประมวลผลใดๆก่อน โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกจะประกอบด้วยชั้นจำนวน 3 ชั้น คือ ชั้นอินพุท, ชั้นซ่อน (Hidden layer)

และชั้นเอาต์พุท ซึ่งในบทความนี้จะตรวจจับฮาร์มอนิกเพียง 3 อันดับ คือ 3rd, 5th และ 7th ดังนั้น ชั้นเอาต์พุทจะมีโหนดเพียง 3 โหนดเท่านั้น โดยที่เอาต์พุทที่ได้ก็คือ องค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd, 5th และ 7th ที่ตรวจจับได้จากรูปคลื่นที่คิดเทียบ

### 2.2 โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (MLP)

โครงข่ายประสาทเทียม เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น [2] เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward Neural Network) ซึ่งประกอบด้วยนิวรอนที่เรียกว่าเพอร์เซ็ปตรอน (Perceptron) โดยที่เพอร์เซ็ปตรอนจะประกอบด้วยนิวรอนเพียงหนึ่งนิวรอน ที่มีตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (Weight) และค่าไบแอส (Bias) โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นจะสามารถสร้างได้ จากการนำเพอร์เซ็ปตรอนมาต่อกันเป็นโครงข่าย ดังในรูปที่ 2- ซึ่งเป็นโครงข่ายที่สร้างขึ้นมาเพื่อตรวจจับฮาร์มอนิกจากกระแสไหล



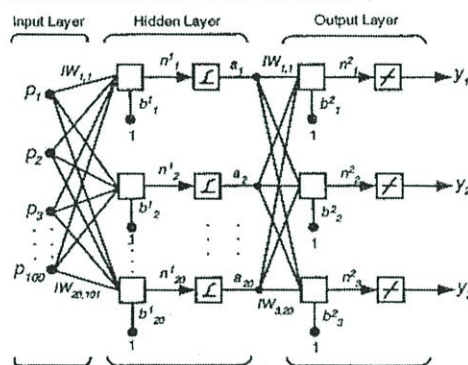
รูปที่ 2 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนที่มีจำนวน 2 ชั้น

จากรูปที่ 2 โครงข่ายประกอบด้วยชั้นอินพุท, ชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุท โดยชั้นอินพุทเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณข้อมูลขนาดของรูปคลื่นกระแสที่คิดเทียบ จำนวน 100 ค่า ( $p_1, p_2, \dots, p_{100}$ ) เข้าไปที่ชั้นซ่อน ซึ่งมีจำนวน 20 โหนด ( $a_1 - a_{20}$ ) และ โหนดที่ชั้นเอาต์พุท จำนวน 3 โหนด

( $y_1 - y_3$ ) ซึ่งเป็นค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd, 5th และ 7th

### 2.3 กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม [1],[5] จะมีประสิทธิภาพเพียงใด ขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักถ่วงการเชื่อมโยงของโครงข่าย ซึ่งการเรียนรู้ของโครงข่ายก็คือ การหาค่าน้ำหนักถ่วงที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายนั้นๆ



รูปที่ 3 แสดงโครงข่ายประสาทที่จำลองขึ้นมาจาก

โปรแกรม MATLAB / Simulink

การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งาน จะต้องมีการเรียนรู้ (Learning) และขั้นตอนการทดสอบ (Testing) ซึ่งในการเรียนรู้มี 2 ลักษณะ คือ การคำนวณไปข้างหน้า (Forward propagation) และการคำนวณแพร่กระจายกลับ (Backward propagation) ส่วนแรก การคำนวณไปข้างหน้า จะเป็นการป้อนข้อมูลอินพุทให้กับโครงข่าย จากนั้นโครงข่ายจะทำการคำนวณจากชั้นอินพุทไปยังชั้นเอาต์พุท โดยให้  $P_n = (p_{n1}, p_{n2}, \dots, p_{n100})$  เป็นข้อมูลของขนาดของกระแสที่คิดเทียบ โดยที่  $n$  หมายถึง ลำดับของการเรียนรู้ และจะได้การกระตุ้นภายใน ( $net$ ) ที่  $j$  ของชั้นซ่อน (Hidden layer) เป็น

$$net_j(n) = \sum_{i=1}^{100} w_{ji}^1 p_i(n) + b_j^1 \quad (1)$$

คำนวณข้อมูลออกชั้นซ่อนได้จากสมการ

$$a_j(n) = f(net_j(n)) \quad (2)$$

เมื่อ  $f(.)$  เป็นฟังก์ชันล็อกซิกมอยด์ (Log-sigmoid function) ที่ซับซ้อน และสมการที่ ซันเอาท์พุทเป็น

$$net_2(n) = \sum_{i=1}^{20} w_{ij}^2(n)a_i(n) + b_j^2 \quad (3)$$

$$y_j = f(net_2(n)) \quad (4)$$

เมื่อ  $f(.)$  เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) ที่ซันเอาท์พุท

ส่วนที่สองการคำนวณแพร่กระจายกลับ จะเป็น การคำนวณจากซันเอาท์พุทมายังซันอินพุท โดยคำนวณหา ค่าผิดพลาด (error) เพื่อที่จะปรับปรุงค่าตัวน้ำหนักของซัน ซ้อนและซันเอาท์พุท โดยการปรับน้ำหนักดังกล่าวจะคำนวณ ได้จากสมการ

$$w_{ij}^2(n+1) = w_{ij}^2(n) + [w_{ij}^2(n) - w_{ij}^2(n-1)] + \alpha \delta_j^{(2)}(n)y_i^{(1)}(n) \quad (5)$$

โดยที่  $w_{ij}$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง,  $\alpha$  เป็นอัตราการเรียนรู้ (Learning rate),  $\delta_j^{(2)}(n)$  เป็นค่าความ ซันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $j$

การฝึกสอนจะคำนวณซ้ำ โดยการป้อนรูปแบบ ฝึกสอนเป็นจำนวน  $N$  รอบเวลา จนกระทั่งค่าความ ผิดพลาดมีค่าต่ำกว่าที่ตั้งไว้ โดยดูจากค่าเฉลี่ยของผลรวม ค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error; MSE) คำนวณ ได้จาก

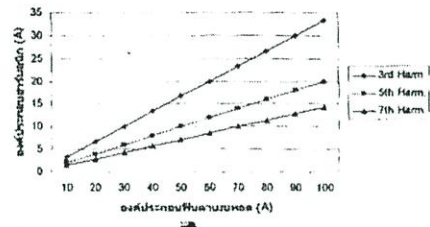
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_k(j))^2 \quad (6)$$

โดยที่  $e_k(j)$  เป็นสัญญาณค่าผิดพลาดจากโหนด ข้อมูลออกที่  $i$  ในการทำซ้ำครั้งที่  $j$  ของรอบเวลา

### 3. การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

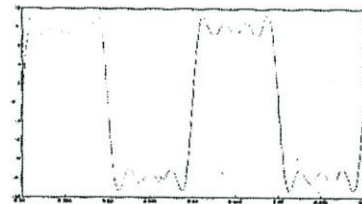
เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถที่จะ ตรวจสอบฮาร์โมนิกได้ จะต้องใช้รูปคลื่นที่คิดเพี้ยนบาง ส่วนสำหรับการเรียนรู้ของโครงข่าย รูปคลื่นที่คิดเพี้ยนจะ สร้างขึ้น โดยการผสมองค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่ 3rd, 5th และ 7th ในองค์ประกอบพินคามาเนทอลที่ความถี่ 50 Hz ซึ่งในบทความนี้จะใช้ Neural Network Toolbox ของ โปรแกรม Matlab ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Basic gradient descent (traingd) [2] กำหนดค่า MSE เท่ากับ 0.5 โดยที่ระหว่างกระบวนการเรียนรู้ รูปแบบการ

ฝึกสอนที่แตกต่างกัน 10 รูปแบบ ของรูปคลื่นที่คิดเพี้ยนจะ ถูกป้อนให้กับโครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบที่ใช้ฝึกสอน MLP จำนวน 10 รูปแบบ

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบฮาร์โมนิก ที่องค์ประกอบ พินคามาเนทอลต่างๆ ก็จะถูกใช้เป็นเป้าหมายสำหรับการ สอนแบบซึ้นนำ (Supervised learning) ในกระบวนการ เรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอสของโครงข่ายทั้งหมด เพื่อที่จะทำให้มัน สามารถที่จะสร้างเอาท์พุทออกมาได้ เช่นเดียวกับที่เรา ต้องการ การเรียนรู้จะกระทำซ้ำจนกว่าค่าความ คลาดเคลื่อนจะน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้



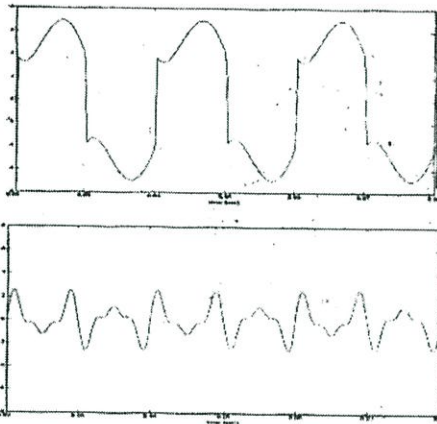
รูปที่ 5 รูปคลื่นกระแสที่คิดเพี้ยน ใช้สำหรับฝึกสอน MLP ที่องค์ประกอบพินคามาเนทอล 10 A

เมื่อกระบวนการเรียนรู้เสร็จสิ้น โครงข่าย ประสาทเทียม ก็จะสามารถใช้แก้ปัญหาจริงที่ใช่และไม่ได้ ถูกใช้ในการฝึกสอนได้

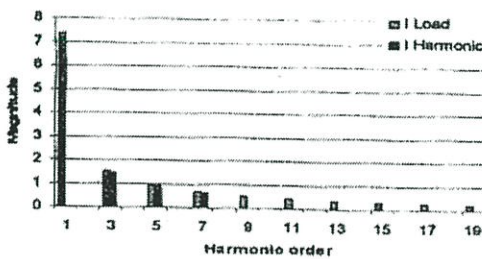
### 4. ผลการทดสอบ

เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของโครงข่าย จะต้องมีการทดสอบ โดยการใช้อุปกรณ์ที่ต่างจากข้อมูลที่ใช้ใน กระบวนการฝึกสอน[4] การจำลองจะกำหนดค่า พารามิเตอร์ 3 กรณี เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมที่สร้าง ขึ้น ตรวจสอบองค์ประกอบฮาร์โมนิกของสัญญาณกระแสที่

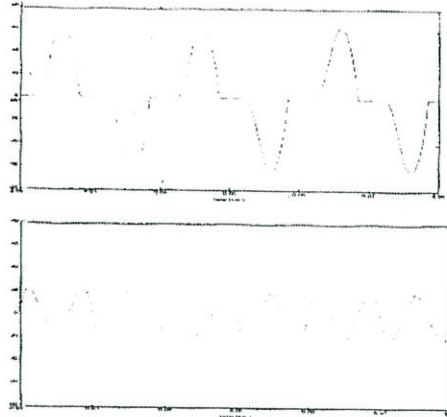
ผิดเห็นไป โดยเอาที่พหุที่ได้จะมีเพียงองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับ 3rd, 5th, 7th เท่านั้น คังรายละเอียดต่อไปนี้ คือ 1) กรณีเป็นบริดจ์เรกติไฟร์ โหลดเป็น RL : แรงดันแหล่งจ่าย 220 Vrms, โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) 37 $\Omega$ , โหลดอินดักเตนซ์ ( $L_L$ ) 100mH ผลการทดสอบการตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก 2) กรณีเป็นบริดจ์เรกติไฟร์ โหลด RC : โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) 10 $\Omega$ , โหลดคาปาซิแตนซ์ ( $C_L$ ) 4700uF และ 3) กรณีโหลดเป็นวงจรไทรสเตอร์ ที่มีมุมจุดชนวน 30 องศา โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) 10 $\Omega$  แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 6 ถึง 11 ตามลำดับ



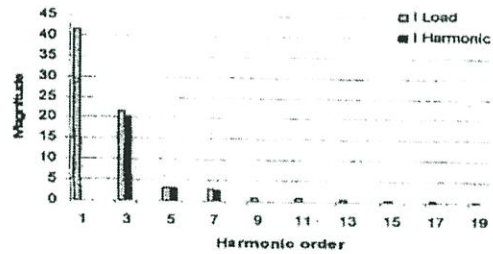
รูปที่ 6 รูปคลื่นของกระแสโหลด, องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ไม่รวมพินคามาเนทอลจาก MLP กรณีโหลด RL



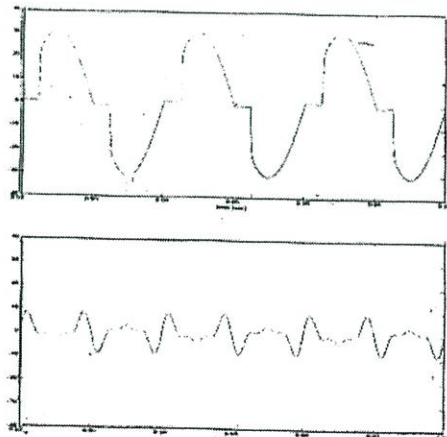
รูปที่ 7 สเปคตรากของรูปคลื่นกระแสโหลดเปรียบเทียบกับองค์ประกอบ ฮาร์มอนิกที่ไม่รวมพินคามาเนทอลจาก MLP



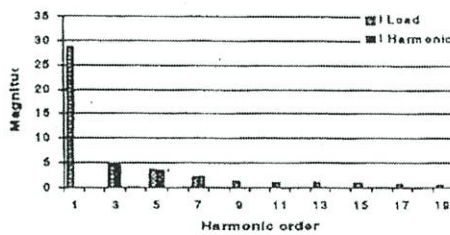
รูปที่ 8 รูปคลื่นของกระแสโหลด, องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ไม่รวมพินคามาเนทอลจาก MLP กรณีโหลด RC



รูปที่ 9 สเปคตรากของรูปคลื่นกระแสโหลดเปรียบเทียบกับองค์ประกอบ ฮาร์มอนิกที่ไม่รวมพินคามาเนทอลจาก MLP



รูปที่ 10 รูปคลื่นของกระแสโหลด, องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ไม่รวมพินคามาเนทอลจาก MLP ในกรณีวงจร ไทรสเตอร์



รูปที่ 11 ชมปรกติของรูปคลื่นกระแสโหลดเปรียบเทียบกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ไม่รวมพินความหนอลจาก MLP

จากผลการจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยคอมพิวเตอร์ สามารถที่จะตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องเป็นข้อมูลจากการฝึกสอนเท่านั้น แต่มันยังสามารถตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ จากรูปคลื่นสัญญาณจริงๆ ได้ด้วย โดยที่ยังฝึกสอนให้กับโครงข่ายมากเพียงใดก็ยิ่งจะทำให้โครงข่าย คอบสนของต่อสัญญาณที่ตรวจจับได้ถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียม สามารถที่จะนำไปใช้งานจริงได้ ในบทความนี้โครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ เพียงแค่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3rd, 5th และ 7th เท่านั้นส่วนฮาร์มอนิกอันดับสูงกว่านี้จะไม่สามารถแสดงค่าได้ และให้ค่าออกมาเป็นศูนย์

## 5. บทสรุป

ปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิก นับวันยิ่งจะทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแม่นยำและความรวดเร็วในการตรวจจับฮาร์มอนิก เป็นสิ่งสำคัญที่จะลดเซฮาร์มอนิกเหล่านั้น เพื่อไม่ให้รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนของแหล่งจ่ายไปก่อปัญหา และรบกวนการทำงานของอุปกรณ์รอบข้างอื่นๆ ในบทความนี้ได้้นำโครงข่ายประสาทเทียมที่เป็นแบบพื้นฐานที่สุด มาประยุกต์ใช้ในงานสำหรับตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก ในระบบกำลังไฟฟ้า ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมนี้จะใช้สัญญาณอินพุทของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนเพียงครั้งคาบเท่านั้น ในการตรวจจับฮาร์มอนิก แต่ในวิธีการฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์ม (FFT) จะต้องใช้สัญญาณอินพุทของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปมากกว่า

สองคาบ สำหรับการตรวจจับ และวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ซึ่งจะเห็นได้ว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม จะมีความเร็วกว่าวิธีการเดิม

การตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ 3rd, 5th และ 7th จะทำโดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB / Simulink จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น สามารถที่จะตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิกได้ทั้งจากสัญญาณรูปคลื่นที่ถูกฝึกสอน และที่ไม่ได้ถูกฝึกสอน โดยมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมเทอร์เซ็ปครอนหลายชั้น จึงมีประสิทธิภาพ ความรวดเร็ว และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้สำหรับตรวจจับองค์ประกอบฮาร์มอนิก ในเวลาจริง สำหรับสร้างกระแสอ้างอิง ให้กับวงจรรอกกำลังแบบแอคทีฟ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.A.Mohd. Zin, Md. Rukonuzzaman, H. Shaibon, "Neural Network Approach of Harmonics Detection", IEEE Transactions on Power Electronics, 1998.
- [2] Howard Demuth, Mark Beale, "Neural Network Toolbox For Use with MATLAB", July 2002.
- [3] Md. Rukonuzzaman, A.A.Mohd. Zin, H. Shaibon, "An Application of Neural Network in Power System Harmonic Detection", IEEE Transactions on Power Electronics, 1998.
- [4] Narade Pecharanin, Mototaka sone, Hideo Mitsui, "An Application of Neural Network for Harmonic Detection in Active Filter" IEEE Transactions on Power Electrons, 1994.
- [5] ณชล ไชยรัตน์, "เอกสารประกอบการสอนวิชา Intelligent Systems", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.

## 2.



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม  
**ลาดกระบัง**

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL**

ปีที่ 23 ฉบับที่ 2

มิถุนายน 2549

1. The Automatic Flight Control System of Flying Robot by FUZZY PI 1  
ชาติ ฤทธิ์หิรัญ ปิติเชต สุวัชชา
2. การควบคุมการสั่นสะเทือนบนชั้นเก็บวัสดุด้วยวิธีใช้แรงบังคับ 7  
สกนธ์ คล่องบุญจิต
3. การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ 13  
ฉัตรชัย เทียบศรไชย ศุภี บรรจงจิตร นันทัน กฤษณจินดา
4. การหาค่ากระแสแอดที่ฟของการสังเคราะห์กระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอดที่หนึ่งเฟสโดยใช้โครงข่าย 19  
ประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น  
เอกวิทย์ หายีทองษ์ วิจิตร กิณเรศ สมชาติ จิรวินากร
5. การออกแบบและวิเคราะห์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 วัตต์ 2 หลอดที่สามารถหรี่แสง 25  
ได้โดยใช้การออสซิลเลตด้วยตัวเอง  
ณรงค์กรณ์ ผกาแก้ว วิจิตร กิณเรศ
6. ผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดในระบบเซลล์สุริยะ ซีดีเอ็มเอ แถบกว้าง เมื่อมีการใช้งานบริการลักษณะ 31  
ต่าง ๆ  
คมสัน กอชัชวาล สมยศ จุณณะปิยะ ทิเชษฐ ม่วงนวล
7. การประยุกต์ใช้เวฟเลนแอกเสียงพหุขนะ เสียงสระ ภาษาไทย 37  
นริศ บุญศักดิ์เฉลิม ไกรสิน สงวัฒมา
8. การสังเคราะห์วัสดุประกอบจากขดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ เพื่อให้ทดแทนไม้หมอนรองรถไฟ 42  
จินทนา เทศเจริญ ไพศาล นาคทิทัศน์
9. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่อเนื่องจากอะลกอฮอล์ และ Ferrocene 48  
ปฏิคม ศรีชมพล สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์
10. การสร้างชาโดว์มาสค์โดยวิธีการขุดลอกด้วยไฟฟ้า 54  
สุรศักดิ์ มนัสขง พิษณุนาถ จิวสิทธิ์ประไพ ถนอม โลมาศ อนุรัตน์ วิศิษฐ์สุวรรณ  
อดิสร เตือนตรานนท์ สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์
11. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์จากแอลกอฮอล์ด้วยวิธี CVD 60  
พิษณุนาถ จิวสิทธิ์ประไพ จิตติ หนูแก้ว อดิสร เตือนตรานนท์ สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์
12. ผลของความหนาแน่นฟิล์มเพชรและอินทรีนซิคที่มีผลต่อโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n<sup>+</sup>-Si 66  
จักรพงษ์ คุณเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์ไย



Volume 23 Number 2

June 2006

1. The Automatic Flight Control System of Flying Robot by FUZZY PI 1  
*C. Rithiran and P. Sooraksa*
2. Vibration Control of a Storage Rack Using Constraint Forces 7  
*S. Klongboonjit*
3. Unequally Spaced Ground Grids Design of Substation Grounding System 13  
*C. Tiebsornchai S. Bunjongjit and N. Krisanachinda*
4. Active Current Determination of Reference Current Synthesis for a 1-Phase Active Power Filter Using Multilayer Perceptron Neural Network 19  
*E. Hayakwong V. Kinnares and S. Jiriwibhakorn*
5. Design and Analysis of a Self Oscillating Dimmable Electronic Ballast for Two 36-W-Fluorescent Lamps 25  
*N. Phakakaew and V. Kinnares*
6. Interference Effect in Cellular W-CDMA System with Different Services 31  
*K. Korchatchawarn S. Junnapiya and P. Maungnoul*
7. Application of Wavelet Transforms for Consonant/Vowel Segmentation on Thai Speech Signal 37  
*N. Boonsakchalearn and K. Songwattana*
8. Synthesis of a Composite Material from Used PE Bottles and Leather Dust for Alternative Sleepers Application 42  
*C. Teschareon and P. Nakpipat*
9. Effect of of Temperature on the Continuous Synthesis of Carbon Nanotubes from Alcohol-Ferrocene Mist 48  
*P. Srichompol and S. Chaisitsak*
10. Fabrication of Shadow Masks Using Nickel Electroplating 54  
*S. Manussong P. Chiwsitthiprapai T. Lomas A. Wisitsorart A. Teuntranont and S. Chaisitsak*
11. Optimization of Alcohol CVD Synthesis Conditions for Carbon Nanotubes 60  
*P. Chiwsitthiprapai J. Nhukeaw A. Teuntranont and S. Chaisitsak*
12. Effect and Application of Diamond Films and Intrinsic Thickness for p-Diamond / i-Si / n<sup>+</sup>-Si Structure Photodiode  
*J. Supadech W. Titiroongruang and A. Poyai*

# การหาค่ากระแสแอกทีฟของการสังเคราะห์กระแสอ้างอิงสำหรับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟสโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น

## Active Current Determination of Reference Current Synthesis for a 1-Phase Active Power Filter Using Multilayer Perceptron Neural Network

เอกวิทย์ หายัถวงษ์      วิจิตร กิณเรศ      สมชาติ จิรวิภากร

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาค่าของกระแสแอกทีฟจากรูปคลื่นของกระแสโหลด เพื่อนำไปสร้างกระแสอ้างอิงควบคุมในวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟ โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น การปรับกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบแพร่กระจายกลับ ฟังก์ชันการถ่ายโอน 2 ชนิด ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวิธีการนำเสนอที่มีจำนวนปมในชั้นซ่อนและฟังก์ชันการถ่ายโอนที่เหมาะสมในการสร้างกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟ

### Abstract

This paper presents a methodology for determining peak value of active current by analyzing the load current in order to produce a reference signal used in the Multilayer Perceptron Neural Network. The technique is based on back-propagation algorithm to compare the two transfer functions. The simulation results reveal the performance of the proposed method to obtain suitable number of node in hidden layer and transfer functions in producing reference current for the active current.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังเช่น คอนเวอร์เตอร์และอุปกรณ์สวิตชิง ก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณกระแส และแรงดันไฟฟ้า ทำให้คุณภาพของระบบลดต่ำลง อีกทั้งยังมี

ผลกระทบต่อโหลด ได้แก่ มอเตอร์เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น ผลกระทบต่อแหล่งจ่ายทำให้เกิดกระแสเกินในสายนิวตรอลเป็นต้น เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าดังกล่าว ได้มีการนำวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter) เข้ามาใช้โดยหลักการทำงาน คือ การฉีดกระแสชดเชยที่เป็นองค์ประกอบฮาร์มอนิก แต่มีเฟส

ตรงกันข้ามเข้าไปในระบบ เพื่อหักล้างกับฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ในวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบทั่วไป [1] การตรวจจับฮาร์มอนิกจะทำโดยการใช่วงจรกรองความถี่ เป็นผลให้เกิดการเลื่อนเฟสทางสัญญาณและมีผลการตอบสนองค่อนข้างช้า ส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ FFT (Fast Fourier Transform) มีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน

บทความนี้ ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (Multilayer Perceptron Neural Network: MLP) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นได้ เพื่อประมาณค่าของกระแสแอกทีฟจากรูปคลื่นของกระแสโหลด แล้วนำไปคำนวณหากระแสชดเชยต่อไป โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมมีการตอบสนองที่รวดเร็วและสามารถเรียนรู้ได้ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีนี้เป็นวิธีการหาค่ากระแสชดเชยที่มีความผิดพลาดต่ำ ไม่เกิดการเลื่อนเฟสทางสัญญาณ และสามารถจะให้การตอบสนองได้ในเวลาจริง

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

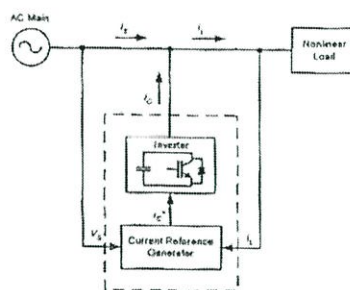
จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน [3] โดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เป็นตัวควบคุมอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้จ่ายกระแสชดเชย ( $i_c$ ) ซึ่งเป็นกระแสฮาร์มอนิก ( $i_h$ ) รวมกับกระแสรีแอกทีฟ ( $i_q$ ) ที่เกิดจากโหลดแต่มีทิศทางตรงข้ามเข้าไปสู่ระบบ จึงเป็นผลให้กระแสแหล่งจ่าย ( $i_s$ ) เหลือเพียงกระแสที่ความถี่มูลฐานเพียงอย่างเดียว สมมติว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณขาเข้าจริงๆ

$$v_s(t) = V_m \sin(\omega t) \tag{1}$$

กระแสของโหลดไม่เชิงเส้น

$$i_L(t) = I_1 \cos \phi_1 \sin(\omega t) + I_1 \sin \phi_1 \cos(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \tag{2}$$

$$i_L(t) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \tag{3}$$



รูปที่ 1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

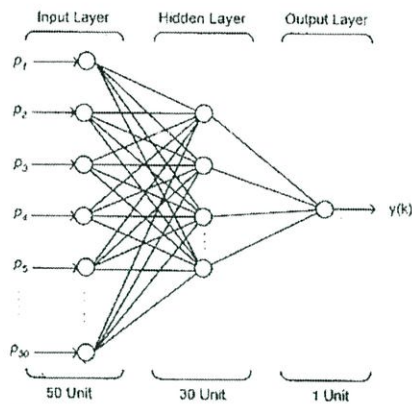
เมื่อ  $i_p(t)$  คือ กระแสแอกทีฟ  
 $i_q(t)$  คือ กระแสรีแอกทีฟ  
 $i_h(t)$  คือ กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมด  
 และ  $i_c(t) = i_q(t) + i_h(t)$  ดังนั้นวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะสร้างกระแสชดเชย  $i_c(t)$  ได้จากสมการ

$$i_c(t) = i_L(t) - i_p(t) \tag{4}$$

2.2 โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น (MLP)

โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-forward neural network) [2] ประกอบด้วยปมประสาท (Neuron) ที่เรียกว่า เพอร์เซ็ปตรอน (Perceptron) โดยที่เพอร์เซ็ปตรอนประกอบด้วยปมประสาทเพียงหนึ่งยูนิต ที่มีตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง (Weight) และค่าไบแอส (Bias) โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้นสามารถสร้างได้ จากการนำเพอร์เซ็ปตรอนมาต่อกันเป็นโครงข่าย ดังในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 โครงข่ายประกอบด้วยชั้นอินพุท, ชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุท โดยชั้นอินพุทเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณข้อมูลขนาดของรูปคลื่นกระแสโหลด จำนวน 50 ค่า ( $p_1, p_2, \dots, p_{50}$ ) เข้าไปให้ชั้นซ่อน ที่มีจำนวน 30 ยูนิต ( $a_1 - a_{30}$ ) และส่งต่อไปยังปมประสาทที่ชั้นเอาต์พุท ซึ่งมีจำนวน 1 ยูนิต ( $y$ ) โดยเอาต์พุทที่ได้เป็นค่าของกระแสแอกทีฟ



รูปที่ 2 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนที่มีจำนวน 2 ชั้น

2.3 กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม [2], [4] จะมีประสิทธิภาพเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักตัวการเชื่อมโยงของโครงข่าย ซึ่งการเรียนรู้ของโครงข่ายก็คือการหาค่าน้ำหนักตัวที่เหมาะสมให้กับโครงข่ายนั้นๆ การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งานต้องมี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเรียนรู้ (Learning) และขั้นตอนการทดสอบ (Testing) ซึ่งในการเรียนรู้มี 2 ลักษณะ คือ การคำนวณไปข้างหน้า (Forward propagation) และการคำนวณแพร่กระจายกลับ (Backward propagation) ส่วนแรกการคำนวณไปข้างหน้า เป็นการป้อนข้อมูลเข้าให้กับโครงข่าย จากนั้นโครงข่ายจะทำการคำนวณ จากชั้นอินพุตไปยังชั้นเอาต์พุต โดยให้  $P_n = (P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{n50})$  เป็นข้อมูลขนาดของกระแสมัดที่เห็น โดยที่  $n$  หมายถึง ลำดับของการเรียนรู้ ได้การกระตุ้นภายใน (net) ที่  $j$  ของชั้นซ่อน (Hidden layer) เป็น

$$net_1(n) = \sum_{j=1}^{50} w^1_{jn}(n)p_j(n) + b_j^1 \quad (5)$$

คำนวณข้อมูลออกชั้นซ่อนได้จากสมการ

$$a_j(n) = f(net_1(n)) \quad (6)$$

และสมการที่ ชั้นเอาต์พุตเป็น

$$net_2(n) = \sum_{j=1}^{30} w^2_{jn}(n)a_j(n) + b_j^2 \quad (7)$$

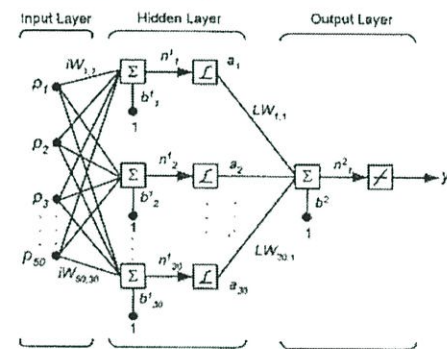
$$y_j = f(net_2(n)) \quad (8)$$

เมื่อ  $f(\cdot)$  เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function)

ส่วนที่สองการคำนวณแพร่กระจายกลับ เป็นการคำนวณจากชั้นเอาต์พุตกลับมายังชั้นอินพุต โดยคำนวณหาค่าผิดพลาด (error) เพื่อที่จะปรับปรุงค่าวงน้ำหนักของชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต การปรับน้ำหนักตัวคำนวณได้จากสมการ

$$w^i_{jn}(n+1) = w^i_{jn}(n) + [w^i_{jn}(n) - w^i_{jn}(n-1)] + \alpha \delta_j^{(i)}(n) y_j^{(i-1)}(n) \quad (9)$$

โดยที่  $w_{jn}$  เป็นตัวถ่วงน้ำหนักการเชื่อมโยง,  $\alpha$  เป็นอัตราการเรียนรู้ (Learning rate),  $\delta_j^{(i)}(n)$  เป็นค่าความชันเฉพาะที่ของนิวรอนที่  $j$



รูปที่ 3 แสดงโครงข่ายประสาทที่จำลองขึ้นมาจากโปรแกรม MATLAB / Simulink

การฝึกสอนจะคำนวณซ้ำ โดยการที่อนุกรมแบบฝึกสอนเป็นจำนวน  $N$  รอบเวลา จนกระทั่งค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำกว่าที่ตั้งไว้ คุ้ได้จากค่าเฉลี่ยของผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error; MSE)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_k(j))^2 \quad (10)$$

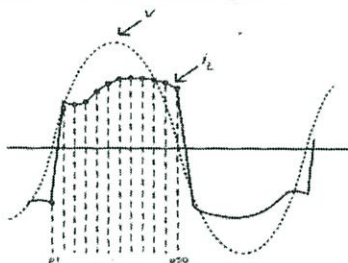
โดยที่  $e_k(j)$  เป็นสัญญาณค่าผิดพลาดจากปมประสาทข้อมูลออกที่  $i$  ในการทำซ้ำครั้งที่  $j$  ของรอบเวลา.

ในบทความนี้ใช้ Neural Network Toolbox ของโปรแกรม MATLAB ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วย Basic gradient descent (traingd) [5]

2.4 การเตรียมข้อมูลและการฝึกสอน

เขตของรูปแบบฝึกสอน และทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ได้มาจากการจำลองวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว กรณีโหลดตัวต้านทาน - ตัวเหนี่ยวนำ ค่าต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz โดยรูปคลื่นกระแสโหลดได้มาจากการสุ่มค่าในหนึ่งคาบเวลา ที่ความถี่การสุ่มเป็น 100 กิโลแซมเปิลต่อวินาที (ksp/s) แล้วนำค่าที่ระยะห่างแกนเวลาเท่ากับ 0.2  $\mu$ s จำนวน 50 จุด หรือครึ่งหนึ่งของไซเคิลมาใช้เป็นรูปแบบข้อมูลเข้า สำหรับรูปแบบข้อมูลออก ใช้ค่ายอดของกระแสแอกทีฟเป็นการตอบสนองที่ต้องการจาก MLP

การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียม จะทำให้โครงข่ายสามารถตอบสนองต่อข้อมูลเข้าได้อย่างถูกต้อง ซึ่งรูปแบบของการฝึกสอน คือกระแสโหลดจากวงจรเรียงกระแสเฟสเดียว กรณีโหลดตัวต้านทาน - ตัวเหนี่ยวนำ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ค่าความต้านทาน 40 - 100 โอห์ม และตัวเหนี่ยวนำ 50m, 100m, 150m, 200m และ 250mH ที่ความถี่ 50 Hz จำนวน 300 รูปแบบ โดยรูปคลื่นกระแสโหลดถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในรูปที่ 4

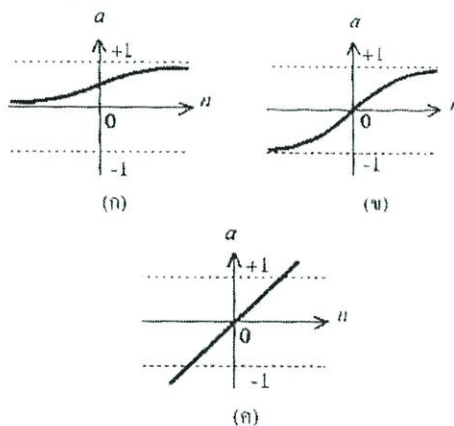


รูปที่ 4 รูปคลื่นข้อมูลเข้าที่ใช้ฝึกสอน MLP

ค่ายอดของกระแสแอกทีฟ จากกระแสโหลดค่าต่างๆ ถูกใช้เป็นเป้าหมาย สำหรับการสอนแบบชี้แนะ (Supervised learning) ในกระบวนการเรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมจะปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก และค่าไบแอสของโครงข่ายทั้งหมด ด้วยกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถสร้างรูปแบบข้อมูลออกได้เช่นเดียวกับที่เราต้องการ การเรียนรู้จะคำนวณซ้ำจนกว่าค่า MSE น้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ เมื่อกระบวนการเรียนรู้เสร็จสิ้น โครงข่ายประสาทเทียมก็สามารถใช้แก้ปัญหาจริงที่ไม่ได้ถูกใช้ในการฝึกสอนได้

### 3. ผลการจำลอง

ฟังก์ชันการถ่ายโอนหรือฟังก์ชันการกระตุ้น จะเป็นตัวกำหนดค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม ในบทความนี้ได้มีฟังก์ชันการถ่ายโอน 2 ชนิดมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาประสิทธิภาพของโครงข่ายภายหลังการเรียนรู้ โดยมีฟังก์ชัน Hyperbolic tangent sigmoid และฟังก์ชัน Log sigmoid เป็นฟังก์ชันการถ่ายโอนในชั้นซ่อน ส่วนในชั้นเอาต์พุตใช้เป็นฟังก์ชัน Linear ทั้งสองกรณี



รูปที่ 5 ฟังก์ชันการถ่ายโอน (ก) ชนิด Log sigmoid, (ข) ชนิด Hyperbolic tangent sigmoid และ (ค) ชนิด Linear

หลังจากการฝึกสอนได้เสร็จสิ้นแล้ว โครงข่ายประสาทเทียมต้องถูกทดสอบหาค่าประสิทธิภาพ โดยการให้ข้อมูลใหม่ที่ MLP ไม่เคยเรียนรู้มาก่อน[4] การทดสอบได้จำลองค่าพารามิเตอร์ใหม่ 30 กรณี ผล Mean absolute percentage error (mape) เป็นตามตารางที่ 1, 2, 3 และ 4

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน Hyperbolic tangent sigmoid และฟังก์ชัน Linear

จำนวนข้อมูลสอน	mape ของผลทดสอบจากข้อมูลทดสอบ 30 ชุด ตามจำนวนโครงสร้างของ MLP 5 แบบ				
	10-1*	15-1	20-1	25-1	30-1
180	3.117	2.238	2.594	2.701	4.068
240	1.482	1.582	1.457	1.745	1.632
300	1.533	1.608	1.367	1.482	1.509

\* 10-1 คือ จำนวนปมประสาทในชั้นซ่อนและเอาต์พุตตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ ฟังก์ชัน Log sigmoid และฟังก์ชัน Linear

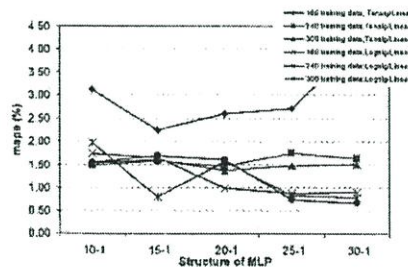
จำนวน ข้อมูล	mape ของผลทดสอบจากข้อมูลทดสอบ 30 ชุด ตามจำนวนโครงข่ายของ MLP 5 แบบ				
	10-1	15-1	20-1	25-1	30-1
180	1.733	1.659	0.984	0.868	0.900
240	1.976	0.793	1.564	0.824	0.772
300	1.535	1.688	1.609	0.726	0.671

ตารางที่ 3 แสดงปมประสาทที่ทำให้ได้ค่า mape ต่ำสุดจาก โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน Hyperbolic tangent sigmoid และฟังก์ชัน Linear

จำนวนข้อมูลฝึกสอน (ชุด)	เวลาที่ใช้ (นาที)	จำนวนปมประสาทในชั้นซ่อน-เอาต์พุต	mape ต่ำสุดของผลการทดสอบ
180	22.31	15-1	2.238
240	36.45	20-1	1.457
300	5.28	20-1	1.367

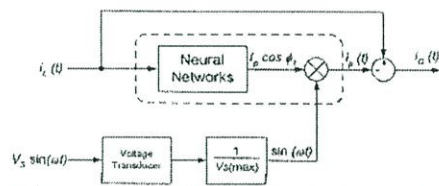
ตารางที่ 4 แสดงปมประสาทที่ทำให้ได้ค่า mape ต่ำสุดจาก โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ฟังก์ชัน Log sigmoid และฟังก์ชัน Linear

จำนวนข้อมูลฝึกสอน (ชุด)	เวลาที่ใช้ (นาที)	จำนวนปมประสาทในชั้นซ่อน-เอาต์พุต	mape ต่ำสุดของผลการทดสอบ
180	2.34	25-1	0.868
240	1.28	30-1	0.772
300	1.56	30-1	0.671



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียม จาก จำนวนข้อมูลสอน 300 ชุด โครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูง ที่สุดในส่วนแรกที่ใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hyperbolic tangent sigmoid ในชั้นซ่อนและฟังก์ชัน Linear ที่ชั้น เอาต์พุต คือ โครงสร้างแบบ 20-1 มี mape ประมาณ 1.367 ส่วนที่สองใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอน Log sigmoid ที่ชั้นซ่อน และฟังก์ชัน Linear ที่ชั้นเอาต์พุต คือ โครงสร้างแบบ 30-1 มี mape ประมาณ 0.671 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างที่ใช้ฟังก์ชัน Log sigmoid / Linear มี ประสิทธิภาพสูงกว่าอีกทั้งยังใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าแบบ Hyperbolic tangent sigmoid ในบทความนี้จะ เลือกโครงสร้างของ MLP ที่มีปมประสาทในชั้นซ่อน จำนวน 30 ยูนิคดังรูปที่ 7

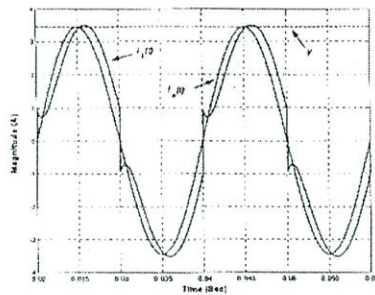


รูปที่ 7 การสร้างกระแสอ้างอิงจากโครงข่ายประสาทเทียม

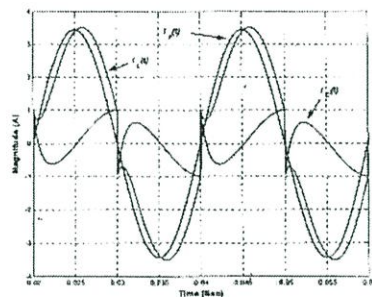
รูปที่ 7 แสดงการคำนวณหากระแสแสดคชยให้กับ วงจรรอกกำลังแอคทีฟ โดยเอาหัยเอาต์พุตของโครงข่าย ประสาทเทียม คือ ค่าของกระแสแอคทีฟ ซึ่งเป็นค่า  $i_s \cos \phi$ , ตามสมการที่ 3 คูณเข้ากับจายันหนึ่งยูนิคที่เฟส ตรงกับแรงดันอินพุต เพื่อให้ได้ค่าประมาณของกระแส แอคทีฟ  $i_p(t)$  แล้วลบออกจกกระแสโวลต  $i_s(t)$  ผลลัพธ์ที่ ได้ก็คือกระแสคชยอ้างอิง  $i_c(t)$  ผลการจำลองการสร้าง กระแสคชยเป็นไปดังรูปที่ 8 - 10

4. บทสรุป

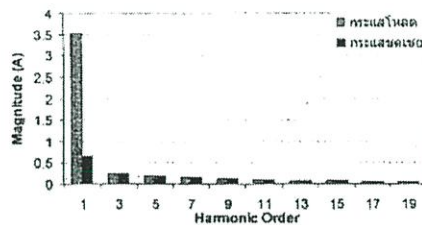
บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการหากระแสคชย อ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอคทีฟ ที่ใช้การประมาณค่า ยอดกระแสแอคทีฟด้วย MLP ซึ่งมีการตอบสนองที่รวดเร็ว ไม่เกิดการเลื่อนเฟส และมีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ต่ำมาก โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ MLP นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน, ฟังก์ชันการถ่ายโอน และ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 8 รูปคลื่นของกระแสโหลด,กระแสแอกทีฟและค่ายอดของกระแสแอกทีฟที่ได้จาก MLP



รูปที่ 9 รูปคลื่นของกระแสโหลด,กระแสชดเชยและกระแสแอกทีฟจาก MLP



รูปที่ 10 สเปกตรามของรูปคลื่นกระแสโหลดเปรียบเทียบกับกระแสชดเชยจาก MLP

จำนวนข้อมูลที่ฝึกสอน ถ้ามีปริมาณข้อมูลเพิ่มขึ้น MLP จะสามารถเรียนรู้และจดจำข้อมูลของปัญหาภายในขอบเขตที่ศึกษาได้ดีขึ้น จะเห็นได้จากตารางที่ 3 และ 4 จำนวนข้อมูลฝึกสอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของ MLP เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเลือกชนิดฟังก์ชันการถ่ายโอนจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับปัญหาที่ต้องการให้ MLP

แก้ไข ซึ่งฟังก์ชันชนิด Log sigmoid มีความเหมาะสมกับงานนี้มากกว่าฟังก์ชันชนิด Hyperbolic tangent sigmoid เพราะให้ค่า mape เพียง 0.671 อีกทั้งจำนวนรอบที่ใช้ในการฝึกสอนมีจำนวนน้อยกว่า การเลือกโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ต้องเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมไม่เล็กไป หรือใหญ่มากเกินไป แต่ต้องเพียงพอสำหรับแก้ปัญหาได้ จากตารางที่ 3 และ 4 จะเลือกโครงสร้างที่มีจำนวนปมประสาทในชั้นซ่อน/เอาต์พุตเป็น 30-1

จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น สามารถที่จะประมาณค่ายอดกระแสแอกทีฟได้ทั้งจากสัญญาณรูปคลื่นที่ถูกฝึกสอน และที่ไม่ได้ถูกฝึกสอน โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่น้อยมาก ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น จึงมีประสิทธิภาพ ความรวดเร็ว และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ สร้างกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแบบแอกทีฟในทางปฏิบัติจริงได้

### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกวิทย์ ทรายแก้ว, วิจิตร กิณเรศ. "การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น." วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548. หน้า 65-70.
- [2] ณชด ไชยรัตน์, "เอกสารประกอบการสอนวิชา Intelligent Systems", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
- [3] D. Gao, X. Sun. "A new method to generate Current reference for active power filters." *Power Electronics Congress*. Vol. 2, Oct. 2000. pp. 99-103.
- [4] F. B. Libano, R. A. M. Braga, G. Willmann and S. L. Muller. "Application of Neural Networks for the Control Strategy for Series Active Power Filters." *Harmonics and Quality of Power*. Vol. 2, 2002. pp. 519-523.
- [5] H. Demuth, M. Beale, "Neural Network Toolbox For Use with MATLAB", July 2002.

## ประวัติผู้เขียน

นายเอกวิทย์ หายักวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2518 ณ จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลขอนแก่น ปีการศึกษา 2539 และวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี ปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการศึกษา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2545

ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ระดับ 6 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร