



การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยเครือข่ายประสาทเทียม  
Power Quality Analysis by Neural Network

นายรัตเทพ ฤผางามเลิศ รหัส 53363836  
นายวิธกานต์ รักษาพงษ์ รหัส 53363935

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2556

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 19 พ.ค. ๕๖
เลขทะเบียน 16๕๖1๑86
เลขเรียกหนังสือ.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๖ ๖๕ ๖

2๕๕๖



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายรัตเทพ ภูผางามเลิศ	รหัสนิสิต 53363836
	นายวิธกานต์ รัชพงษ์	รหัสนิสิต 53363935
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์เศรษฐา ตั้งคำวานิช	
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	
ปีการศึกษา	2556	

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

.....  
ไดรเรกต์ สวัสดิ์ ภูผา.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์เศรษฐา ตั้งคำวานิช)

.....กรรมการ  
(ผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

.....กรรมการ  
(ดร.พนัส นัถฤทธิ)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม	
ผู้ดำเนินโครงการ	นายรัตเทพ ภูผางามเลิศ	รหัสนิสิต 53363836
	นายวิธกานต์ รักษ์พงษ์	รหัสนิสิต 53363935
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์เศรษฐา ตั้งคำวานิช	
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	
ปีการศึกษา	2556	

### บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้ เป็นการศึกษาและทดลองคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้การออกแบบและประยุกต์โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม โดยการศึกษาและทดลองคุณภาพไฟฟ้านี้จะใช้การวัดคุณภาพของฮาร์มอนิกในคุณภาพไฟฟ้าเป็นหลักในการค้นคว้าและทดลองคุณภาพไฟฟ้า เนื่องจากการวัดคุณภาพไฟฟ้าในด้านอื่นๆเราสามารถรับรู้หรือสังเกตเองได้อย่างเช่น แรงดันเกิน,แรงดันตก,และไฟฟ้าดับ แต่ถ้าเป็นสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเราไม่สามารถรับรู้หรือสังเกตเองได้อย่างเช่น ความถี่,สัญญาณฮาร์มอนิก เป็นต้น ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้ทำการศึกษาและทดลองคุณภาพไฟฟ้าขึ้นมา

โครงการฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าด้วยการประยุกต์และออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมระบบนี้จะแสดงสถานะของคุณภาพไฟฟ้า คือ ดี หรือ ไม่ดี โดยที่ระบบจะรับสัญญาณไฟฟ้าจากอาคาร บ้านเรือนหรือสถานที่ทั่วไปจากนั้นนำมาวิเคราะห์แยกแยะคุณลักษณะทางไฟฟ้าของข้อมูลที่ได้รับเข้ามาคือ ความถี่ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 1,3,5 และแอมพิจูด เพื่อนำไปวิเคราะห์โดยใช้การประยุกต์และออกแบบของโครงข่ายประสาทเทียม

ผลที่ได้จากโครงการนี้คือระบบที่สามารถวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยที่จะแสดงผลเป็นสถานะบนจอแสดงผลแอลซีดีขนาด 16x2

**Project title** Power Quality Analysis by Neural Network  
**Name** Mr.Rattathep Pupangamlerd ID. 53363836  
Mr.Witthakant Rakphong ID. 53363935  
**Project advisor** Mr.Settha Tangkawanit  
**Major** Computer Engineering  
**Department** Computer Engineering  
**Academic year** 2013

---

### Abstract

This project was the study and experiment of power quality by using design and Neural Network. Using harmonic quality as the main tool of the study because we can measure another kinds of electrical quality by observation, for example overvoltage ,undervoltage , and voltage interruption but we can't know some kind of power quality by observation, for example frequency and harmonic signal etc. For those purpose, we set up this experimental study.

This project developed the system for electrical quality analysis by applying and designing Neural Network This system will display the electrical quality as good or not by receiving the electrical signal from building houses or common places to analyze and classify the power quality of the input: frequency harmonic no.1, 3, 5 and amplitude to analyze by applying and designing of Neural Network

The result of this project was that the system can analyzes power quality by displaying it on 16\*2 LCD display monitor.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่อง “การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม” สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้นต้องขอขอบพระคุณ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานอาจารย์เศรษฐาตั้งค้ำวานิช  
ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษา แนะนำหัวข้อโครงการ แนวทางในการดำเนินโครงการและการแก้ไข  
ปรับปรุงโครงการแก่คณะผู้จัดทำโครงการรวมถึงการช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยดีมาโดยตลอด

คณะกรรมการโครงการผศ.ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา และ อาจารย์พนัส นันทฤทธิ์  
ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำปรึกษาวิธีการดำเนินงานและแนวทางในการดำเนินโครงการและการแก้ไข  
ปรับปรุงโครงการแก่คณะผู้จัดทำโครงการรวมถึงการช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน  
และกำลังใจแก่คณะผู้จัดทำโครงการเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณที่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ  
และบุคคลอื่นๆที่เกี่ยวข้องที่มีได้เอื้อนนามที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่างๆแก่คณะผู้จัดทำ  
โครงการด้วยดีมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำโครงการ  
นายรัตเทพ ภูผางามเลิศ  
นายวิธกานต์ รักษ์พงษ์

ธันวาคม 2556

## สารบัญ

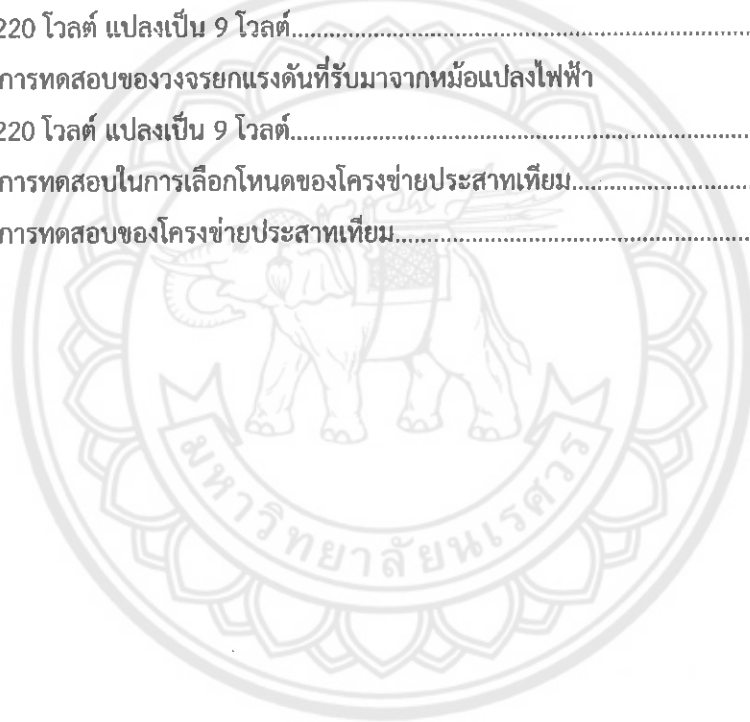
	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญ(ต่อ).....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สารบัญรูป(ต่อ).....	ฌ
<b>บทที่ 1</b> บทนำ.....	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ระยะเวลาการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	3
1.7 งบประมาณการดำเนินโครงการ.....	3
<b>บทที่ 2</b> หลักการและทฤษฎี.....	<b>4</b>
2.1 คุณภาพไฟฟ้า.....	4
2.2 ฮาร์มอนิก.....	14
2.3 โครงข่ายประสาทเทียม.....	20
2.4 ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์.....	26
2.5 ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์.....	27
2.6 บทสรุป.....	38

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....	39
3.1 ภาพรวมของระบบ.....	39
3.2 การดำเนินงานของระบบโครงการการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า โดยโครงข่ายประสาทเทียม.....	40
3.3 บทสรุป.....	53
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	54
4.1 ต้นแบบของระบบ.....	54
4.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม.....	54
4.3 ผลการทดสอบของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการทดลอง.....	70
4.3 บทสรุป.....	73
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	75
5.3 การพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคต.....	75
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ตัวอย่างของโครงข่ายประสาทเทียม.....	80
ภาคผนวก ข การทำงานของโค้ดในโปรแกรมต่างๆของโครงการ.....	90
ภาคผนวก ค ตัวอย่างชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ.....	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานโครงการ.....	3
2.1 มุมมองต้นเหตุทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าจากการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าในประเทศอเมริกา.....	5
2.2 แสดงค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้นกับช่วงระยะเวลาการเกิดของอิมพัลส์.....	7
2.3 แสดงขนาดแรงดันและช่วงเวลาตามความถี่ของสวิตช์คู่.....	7
2.4 แสดงระยะเวลาการเกิดแรงดันตกแรงดันเกินและไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน.....	8
4.1 ผลการทดสอบของวงจรลดแรงดันที่รับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์.....	59
4.2 ผลการทดสอบของวงจรยกแรงดันที่รับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า ขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์.....	60
4.3 ผลการทดสอบในการเลือกโหนดของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	63
4.4 ผลการทดสอบของโครงข่ายประสาทดัดเทียม.....	72





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิดโดยฟ้าผ่า.....	6
2.2 แรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วคราวเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ.....	7
2.3 แรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วคราวเกิดจากเฟอโรโรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไม่มีโหลด.....	8
2.4 Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้าลงดิน.....	9
2.5 Voltage Sag จากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่.....	9
2.6 Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้าลงดิน.....	10
2.7 ไฟฟ้าดับชั่วคราวจากสาเหตุรีโคลสเซอร์มีการทำงานเนื่องจากการเกิด ความผิดปกติของทางไฟฟ้า.....	10
2.8 ขั้นตอนการทำงานรีโคลสเซอร์ในระบบของ กฟภ.....	11
2.9 แรงดันไม่สมดุลที่สายป้อนที่จ่ายไฟให้ที่พักอยู่อาศัย.....	12
2.10 กระแสฮาร์มอนิก.....	13
2.11 สัญญาณรบกวน (Noise).....	13
2.12 ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ.....	14
2.13 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5 และ 7.....	15
2.14 ก. ....	16
2.14 ข. ....	16
2.15 ก. ....	16
2.15 ข. ....	16
2.16 ค่าฮาร์มอนิกที่เข้ามาในลำดับต่างๆ.....	17
2.17 ค่าฮาร์มอนิกที่เข้ามาในลำดับต่างๆ.....	17
2.18 ค่าฮาร์มอนิกที่เข้ามาในลำดับต่างๆ.....	18
2.19 การทำงานพื้นฐานของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม.....	21
2.20 แสดงรูปแบบ Back-propagation neural network.....	23
2.21 แสดงสถาปัตยกรรมของFeedforward network.....	24
2.22 การคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง.....	27
2.23 สถานะของทาสก์และการเปลี่ยนสถานะ.....	30
2.24 ผลการรันโปรแกรมการสร้างทาสก์.....	32
2.25 การแบ่งการทำงานของทาสก์.....	32
2.26 การจัดการทาสก์ด้วย Tick Interrupt.....	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 แผนภาพสถานะของทาสก์ทั้งหมด.....	35
2.28 ลำดับขั้นตอนการทำงานของทาสก์และการเรียกใช้งานvTaskDelay().....	36
3.1 ภาพรวมของระบบ (System Overview).....	40
3.2 แผนการดำเนินงานของระบบ.....	41
3.3 วงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์.....	42
3.4แสดงผลของวงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์.....	42
3.5วงจรยกแรงดัน จาก $\pm 1.2$ โวลต์ แปลงเป็น +2.4 โวลต์.....	43
3.6แสดงผลของวงจรยกแรงดัน จาก $\pm 1.2$ โวลต์ แปลงเป็น +2.4 โวลต์.....	43
3.7วงจรตัดศูนย์.....	44
3.8 แสดงผลของวงจรตัดศูนย์.....	44
3.9วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า.....	45
3.10วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ $\pm 12$ โวลต์.....	45
3.11แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟบวก 12 โวลต์.....	46
3.12แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟลบ 12 โวลต์.....	46
3.13ทดลองต่อวงจรเข้ากับโฟโต้บอร์ด.....	47
3.14วงจรที่ทำการกัปรันเรียบร้อย.....	48
3.15วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า.....	48
3.16 ตัวอย่างในการคิดโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม.....	49
3.17 การคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง.....	51
3.18 ตัวอย่างของคลื่นไซน์ในฮาร์มอนิกลำดับต่างๆและค่าแอมพิจูดกับความถี่.....	51
4.1 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า.....	55
4.2 แสดงผลของวงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์จากออสซิลโลสโคป.....	55
4.3 แสดงผลของวงจรยกแรงดัน จาก $\pm 1.2$ โวลต์ แปลงเป็น +2.4 โวลต์ ที่วัดจากออสซิลโลสโคป.....	56
4.4 แสดงผลของวงจรตัดศูนย์จากออสซิลโลสโคป.....	57
4.5 วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์.....	57
4.6 แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟบวก 12 โวลต์จากออสซิลโลสโคป.....	58

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟลบ 12 โวลต์จากออสซิลโลสโคป.....	58
4.8 ต่อหม้อแปลงเข้ากับวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าและต่อวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากับ วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์.....	59
4.9 กราฟแสดงถึงช่วงเวลาและค่าที่วัดได้ในวงจรลดแรงดัน.....	60
4.10 กราฟแสดงถึงช่วงเวลาและค่าที่วัดได้ในวงจรยกแรงดัน.....	60
4.11 ข้อมูลที่นำมาใช้เทรนในโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม.....	61
4.12 ตัวอย่างในการคิดโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย.....	62
4.13 คำน้่านักในแต่ละโหนดต่างๆของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม.....	62
4.14 ค่าเอาต์พุตของการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมต่างๆ และความแม่นยำในการวิเคราะห์.....	64
4.15 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบฮิดเด็นเลเยอร์โหนด 3 โหนด.....	64
4.16 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบฮิดเด็นเลเยอร์โหนด 10 โหนด.....	65
4.17 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบฮิดเด็นเลเยอร์โหนด 20 โหนด.....	65
4.18 การคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง.....	67
4.19 ตัวอย่างของคลื่นไซน์ในฮาร์โมนิกลำดับต่างๆและค่าแอมพิจูดกับความถี่.....	67
4.20 ทดสอบคุณภาพไฟฟ้า.....	69
4.21 ข้อมูลที่มีคุณภาพดี.....	70
4.22 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีแอมพิจูดมากกว่า 2.4.....	70
4.23 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีแอมพิจูดน้อยกว่า 2.4.....	71
4.24 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีความถี่น้อยกว่า 50.....	71
4.24 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีที่มีสัญญาณรบกวน.....	71
4.25 ข้อมูลที่รับเข้ามาทำการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและแสดงผลความผิดพลาดของ การวิเคราะห์.....	72

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันนี้เรามักจะพบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าอยู่บ่อยๆซึ่งทำให้เกิดความเดือดร้อน รำคาญ รวมทั้งความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินนั้นก็คือสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า หรือ ที่เรียกกันว่าสัญญาณฮาร์โมนิก ซึ่งก็เกิดได้จากการที่โรงไฟฟ้านั้นส่งสัญญาณฮาร์โมนิกมามากเกินไป

ปัญหาที่เกิดจากคุณภาพไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าถ้าเกิดจากธรรมชาตินั้นเราก็ไม่อาจรู้ได้ว่ามันจะเกิดขึ้นมาตอนไหน เมื่อไหร่ แต่ถ้าเกิดจากมนุษย์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าเองนั้นเราสามารถรู้ได้ว่าเกิดอะไรกับไฟฟ้าในอาคาร บ้านเรือน ของเรา เราสามารถหาได้ว่าไฟฟ้าที่เราใช้อยู่ ณ ขณะนั้นเป็นอะไรทำไมถึงเป็นเช่นนี้เกิดจากที่สัญญาณฮาร์โมนิกนั้นส่งมามากเกินไปหรือไม่

เนื่องจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ทางผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็นว่าควรมีการค้นคว้า เรียนรู้ และประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าขึ้นมา เพื่อใช้ตรวจวัดคุณภาพทางไฟฟ้าตาม อาคาร บ้านเรือน เพื่อหาว่าไฟฟ้าที่เราใช้อยู่มีคุณภาพดีหรือไม่ และยังเป็นการป้องกันการเกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินทางผู้ทำโครงการจะยกตัวอย่างของงานที่ใช้การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าหรือโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม เช่น คุณภาพกำลังไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์[1],วิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค[2],การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฮาร์โมนิกที่เกิดในจอ LCD [3],การศึกษาผลกระทบของราคาน้ำมันบนตลาดหุ้นไทยด้วยโครงข่ายประสาทเทียม [4],การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการปรับปรุงการรู้จำตัวอักษรออนไลน์ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ PHIA [5],การประเมินค่า CBR ของดินลูกรังโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม[6],การพยากรณ์ราคาขายพาราเซตามีนรายวันชั้น 3 ในประเทศไทย[7],การพยากรณ์ราคาฟิชน้ำมันโดยวิธีของบ็อกซ์-เจนกินส์และโครงข่ายประสาทเทียม[8]

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม

1.2.2 เพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์สามารถวัดคุณภาพไฟฟ้าทางฮาร์โมนิกที่ 1,3,5 ได้

1.2.3 เพื่อตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าว่า ไฟฟ้าที่เราใช้อยู่ใน อาคาร สถานที่บ้านเรือนนั้นมีฮาร์โมนิกที่ดีหรือปกติ หรือไม่ เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นได้

1.2.4 เพื่อทดสอบคุณภาพไฟฟ้าณแหล่งจ่ายแต่ละแหล่งที่จ่ายออกมาจากเต้ารับว่ามีฮาร์โมนิกตรงตามที่กำหนดหรือไม่

1.2.5 เพื่อเป็นการเรียนรู้ ทดลองงานเกี่ยวกับทางด้านคุณภาพไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงานโครงการ

1.3.1 อุปกรณ์สามารถตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าตามอาคาร บ้านเรือน หรือ จากการจำลองสัญญาณไฟฟ้า

1.3.2 อุปกรณ์สามารถตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าทางฮาร์โมนิกที่ 1,3,5

1.3.3 อุปกรณ์แสดงผลผ่านทางหน้าจอแสดงผล LCD ว่าคุณภาพไฟฟ้านั้นดี หรือ ไม่ดี โดยแสดงจากสถานะที่แสดงจากจอ LCD

1.3.4 ใช้งานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการในเรื่องต่างๆดังนี้

1.4.1.1 ศึกษาหลักการทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม

1.4.1.2 ศึกษาทฤษฎีของการวัดคุณภาพทางไฟฟ้า

1.4.1.3 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบโปรแกรม

1.4.1.4 ศึกษาวิธีพัฒนาโปรแกรมของบอร์ด STM32F4 DISCOVERY

1.4.1.5 ศึกษาการออกแบบวงจรและการต่อวงจรไฟฟ้า

1.4.2 ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา MatLAB

1.4.3 ศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C

1.4.4 ศึกษาการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม

1.4.5 ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมตามทฤษฎีและหลักการที่ได้ศึกษามา

1.4.6 ทดสอบการทำงานของโปรแกรมและปรับปรุง

1.4.7 ตรวจสอบความถูกต้องและแก้ไขข้อผิดพลาดของโปรแกรม

1.4.8 จัดทำรายงานและสรุปผลการทำงาน

1.4.9 ตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดของรายงาน

1.4.10 จัดทำเป็นรูปเล่ม

## 1.5 ระยะเวลาการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

กิจกรรม	ปี 2556								
	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. วางแผนการทำงาน และ ศึกษาค้นคว้าข้อมูล									
2. ออกแบบและเขียนโปรแกรม									
3. ทดลองโปรแกรมกับบอร์ด STM32F4 DISCOVERY									
4. ออกแบบวงจรไฟฟ้า									
5. ทดสอบอุปกรณ์									
6. แก้ไขข้อผิดพลาด และเก็บ รายละเอียดส่วนต่างๆของ โครงการ									

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1.6.1 อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปตรวจสอบคุณภาพทางไฟฟ้าได้
- 1.6.2 ได้รับความรู้เรื่องการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม
- 1.6.3 ได้รับเรียนรู้เรื่องการวางแผนการทำงานอย่างเป็นระบบ
- 1.6.4 ได้รับความรู้เรื่องการออกแบบและต่อวงจรทางไฟฟ้า
- 1.6.5 ได้รับความรู้เกี่ยวกับบอร์ด STM32F4 DISCOVERY
- 1.6.6 ได้รับความรู้เรื่องการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C , MatLAB

## 1.7 งบประมาณการดำเนินโครงการ

### 1.7.1 ค่าอุปกรณ์

- |   |     |     |
|---|-----|-----|
| 1.7.1.1 บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ STM32F4 DISCOVERY | 500 | บาท |
| 1.7.1.2 สายเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม                 | 100 | บาท |
| 1.7.1.3 วงจรไฟฟ้า                               | 200 | บาท |

### 1.7.2 ค่าจัดทำรูปเล่ม

- |       |      |     |
|-------|------|-----|
| 1.7.2 | 1000 | บาท |
|-------|------|-----|

### 1.7.3 ค่าใช้จ่ายอื่นๆ

- |       |     |     |
|-------|-----|-----|
| 1.7.3 | 200 | บาท |
|-------|-----|-----|

รวมทั้งสิ้น 2000 บาท

หมายเหตุ : ขออนุมัติด้วยเฉลี่ยทุกรายการ

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

จากการที่คณะผู้จัดทำโครงการเล็งเห็นว่าการที่เครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ทั่วไปที่ใช้ไฟฟ้านั้น มีการชำรุดหรือเสียหายนั้นอาจเกิดมาจากฮาร์มอนิกที่ไม่ดีหรือไม่ตรงตามมาตรฐานที่โรงไฟฟ้า กำหนดไว้ซึ่งเราก็ไม่สามารถรู้ได้เลยว่าฮาร์มอนิกที่ถูกส่งมานั้นคุณภาพเป็นอย่างไรทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงได้มีการศึกษาหลักการและทฤษฎีต่างๆที่จะกล่าวต่อไปนี้คือคุณภาพไฟฟ้า,ฮาร์มอนิก, โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม, อนุกรมฟูเรียร์ , A/D D/A , FreeRTOS เพื่อจัดทำอุปกรณ์การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียมขึ้น อธิบายได้ดังนี้

#### 2.1 คุณภาพไฟฟ้า

ปัจจุบันคำว่า คุณภาพไฟฟ้า ( Power Quality ) [13]เป็นคำที่พูดถึงบ่อยในเรื่องของความมั่นคง การจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าและกรณีเมื่อเกิดปัญหาอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงานจากผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งเห็นได้ว่าคานิยามของคำว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟจะพูดถึงในกรณีที่แตกต่างกันไปแต่ในความเป็นจริงแล้วมีความหมายเดียวกันซึ่งนิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE ให้ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ คุณลักษณะกระแสแรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการเสียหายเหตุผลหลักที่ทำให้มีการพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

##### 2.1.1หลักเหตุผลที่ทำให้มีการพิจารณาถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

2.1.1.1 เนื่องจากในปัจจุบันในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้นซึ่งจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังเช่นอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ ProgrammableLogicController(PLC),AdjustableSpeedDrive(ASD) และ รีเลย์บางชนิด ฯ

2.1.1.2 การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้าดังเช่นตัวอย่างของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้อุปกรณ์ASD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตซึ่ง ASD เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ก็จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้และถ้ามีคาปาซิเตอร์ติดตั้งอยู่ในระบบเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้า ก็ยังทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์รุนแรงมากยิ่งขึ้น

2.1.1.3 ผู้ใช้ไฟทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้ามากขึ้นที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น ดังเช่นปัญหาจากแรงดันตกชั่วระยะสั้น (Voltage Sag) ทำให้การไฟฟ้าหาแนวทางและวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น

2.1.1.4 ระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อถึงกัน ถ้าส่วนใดของระบบเกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าก็จะทำส่วนอื่นๆ ของระบบได้รับผลกระทบจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามไปด้วยดังเช่นโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์และฮาร์มอนิกส์นั้นอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า อาจทำให้โรงงานบริเวณข้างเคียงได้รับผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน

## 2.1.2 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุใหญ่[13]

2.1.2.1 จากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น พายุ

2.1.2.2 จากการเกิดสภาวะความผิดปกติ (fault) ทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

2.1.2.3 จากการกระทำการสวิตชิงอุปกรณ์ในระบบ

2.1.2.4 จากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม

2.1.2.5 จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

สาเหตุที่ทำให้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้างังข้างต้นเกิดจาก การไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าในมุมมองของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟ เกี่ยวกับต้นเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า อาจจะมีมุมมองแตกต่างกันไป ดังเช่นตัวอย่างการสำรวจจากหน่วยงาน (Courtesy of Georgia Power Co.) ในประเทศอเมริกาดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มุมมองต้นเหตุทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าจากการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าในประเทศอเมริกา[13][14][15]

ต้นเหตุทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า	มุมมองการไฟฟ้า	มุมมองผู้ใช้ไฟฟ้า
ธรรมชาติ	66%	60%
การไฟฟ้า	1%	17%
ผู้ใช้ไฟฟ้า	25%	12%
เพื่อนบ้าน	8%	8%
อื่นๆ	0%	3%

แนวทางการแก้ไขปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ถูกต้องนั้น จำเป็นต้องได้รับความร่วมมือกันระหว่างการไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้าเช่นในส่วนของกรไฟฟ้าจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟหรือระบบสายส่งและในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และส่วนของผู้ใช้ไฟต้องมีการควบคุมปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าจากผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นเองและอาจต้องนำข้อมูลทางไฟฟ้าและปัญหาต่างๆมารวมปรึกษากันและมีการร่วมกับบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อพิจารณาระดับการทำงานที่สัมพันธ์กันของอุปกรณ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งจะช่วยลดปัญหาคุณภาพ



ไฟฟ้าในระดับหนึ่งในบทความนี้จะกล่าวเพียงคำนิยามปัญหาคุณภาพไฟฟ้าและสาเหตุ เพื่อพื้นฐานก่อนที่นำเสนอบทความที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าต่อไป

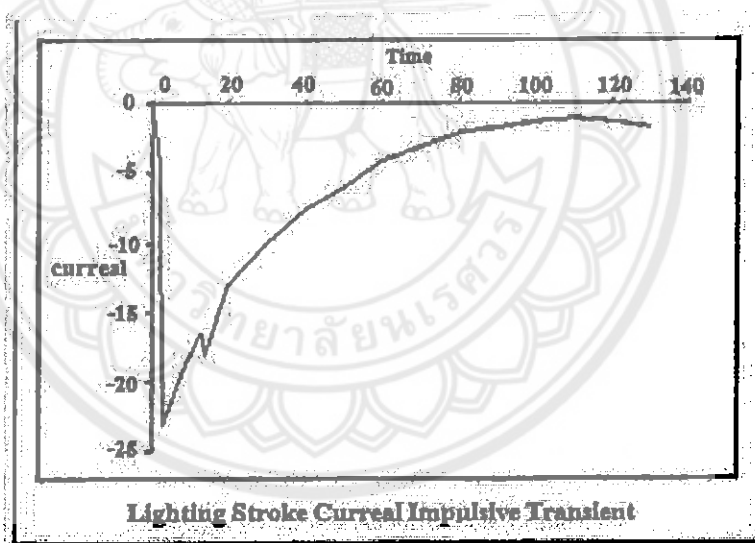
### 2.1.3 ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า

#### 2.1.3.1 ภาวะชั่วคราว (Transient)

คือปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า (แรงดัน กระแส) ในเวลาทันทีทันใดจากสภาพปกติแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ Impulsive Transients และ Oscillatory Transients

##### ก.อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transients)

คือขนาดกระแสและแรงดันที่มีค่าความชันสูงมาก เกิดขึ้นในทันทีทันใดไม่มีความถี่เปลี่ยนแปลงกำหนดให้มีชีวิตทางเดียวหรือเรียกว่าเสิร์จ (Surge) ดังรูปที่ 2.1 มีสาเหตุเกิดจากฟ้าผ่า ซึ่งอาจเกิดได้โดยตรงหรือในบริเวณใกล้เคียงผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน



รูปที่ 2.1 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วคราวเกิดโดยฟ้าผ่า[13][14][15]

มาตรฐาน IEEE std 1159 - 1995 มีการกำหนดค่าอิมพัลส์ตามช่วงระยะเวลาที่เกิดกับค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น (rise time)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้นกับช่วงระยะเวลาการเกิดของอิมพัลส์[13][14][15]

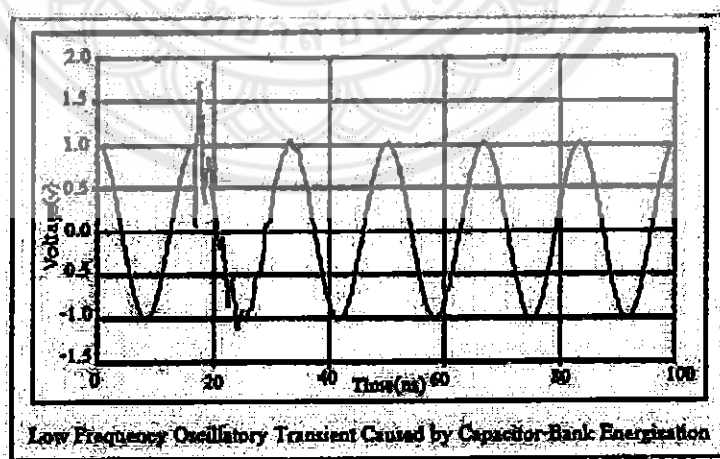
อิมพัลส์ภาวะชั่วคราว	ระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น(rise time)	ช่วงระยะเวลาการเกิด(Duration)
Nanosecond	5 ns	< 50 ns
Microsecond	1 us	50 ns - 1 ms
Millisecond	0.1 ms	> 1 ms

#### ข. ออสซิลเลชันชั่วคราว (Oscillatory Transient)

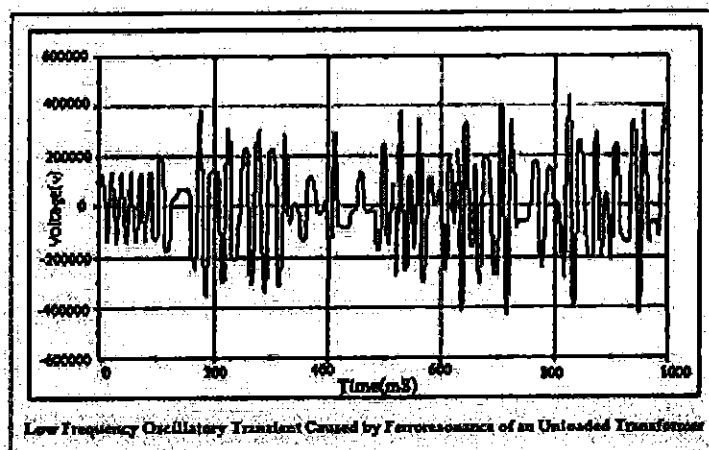
คือลักษณะของแรงดันหรือกระแสแรงดันมีค่าสูง เกิดขึ้นในทันทีทันใด ไม่มีความถี่เปลี่ยนแปลงมีการเปลี่ยนแปลงชั่ว(บวก ลบ) ของรูปคลื่นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.2และ2.3มีสาเหตุเกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์ในระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้า ได้รับความเสียหาย และฉนวนของอุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพหรือมีการสูญเสียความเป็ฉนวนเร็วขึ้นมาตรฐาน IEEE std 1159 1995 มีการแบ่งการเกิดออสซิลเลชันในภาวะชั่วคราวตามขนาดแรงดันและช่วงระยะเวลาการเกิดตามความถี่ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดแรงดันและช่วงเวลาตามความถี่ออสซิลเลชันชั่วคราว[13][14][15]

ออสซิลเลชันในภาวะชั่วคราว	ความถี่	ช่วงระยะเวลาการเกิด	ขนาดแรงดัน
Lower Frequency	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0.4 pu.
Medium Frequency	5 - 500 kHz	5 - 20 ms	0 - 8 pu.
High Frequency	0.5 - 5 MHz	0 - 5 ms	0.4 pu.



รูปที่ 2.2 แรงดันออสซิลเลชันความถี่ต่ำชั่วคราวเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ[13][14][15]



รูปที่ 2.3 แรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วคราวเกิดจากเฟอร์เรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไม่มีโหลด [13][14][15]

#### 2.1.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation)

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน rms ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาทีที่มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดปกติ (fault) ทางไฟฟ้าทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Voltage Sag หรือ Voltage Dip) แรงดันเกิน (Voltage Swell) และไฟดับ (Interruptions) มาตรฐาน IEEE Std 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิดคือเวลาทันที ทันใด (Instantaneous) ชั่วขณะ (Momentary) และชั่วคราว (Temporary) ดังตารางที่ 2.4

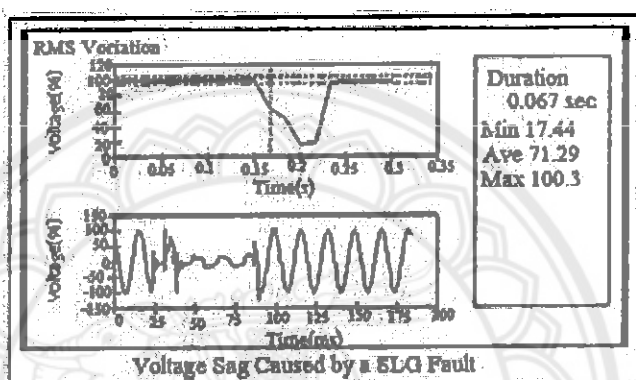
ตารางที่ 2.4 แสดงระยะเวลาการเกิดแรงดันตกแรงดันเกินและไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ช่วงเวลาสั้นๆ [13][14][15]

Voltage Sag & Swell		
Instantaneous	Momentary	Temporary
10 ms - 1 sec	1 sec - 3 sec	3 sec - 1 min

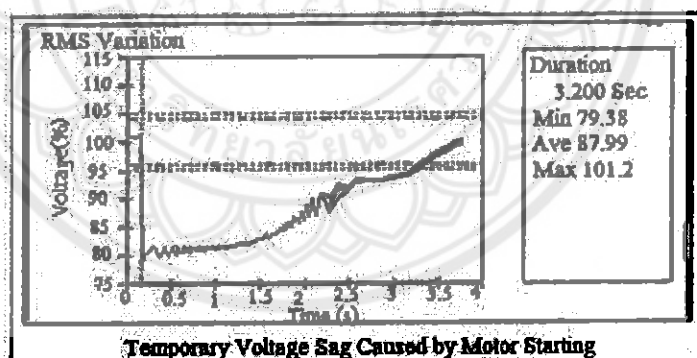
Interuption	
Momentary	Temporary
10 ms - 3 sec	3 sec - 1 min

#### 2.1.4.1 แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag )

คือค่าแรงดัน rms มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms - 1min มีสาเหตุส่วนใหญ่ เกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 ทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 pu. ของแรงดันปกติ (80% sag) ในช่วงเวลา 3 ไซเคิล และรูปที่ 2.5 แรงดันมีค่าลดลงจากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์อินดักชันขณะสตาร์ทจะมีกระแสสูงสูงถึง 6-10 เท่าของกระแสโหลดปกติ ผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟมีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



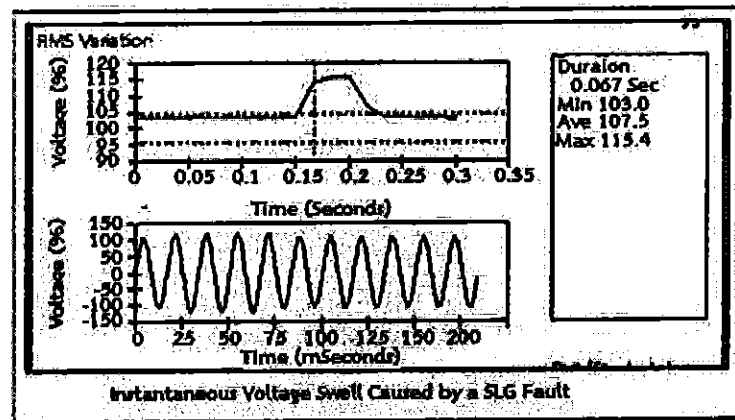
รูปที่ 2.4 Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าลงดิน[13][14][15]



รูปที่ 2.5 Voltage Sag จากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่[13][14][15]

#### 2.1.4.2 แรงดันเกินช่วงสั้น (Voltage Swell)

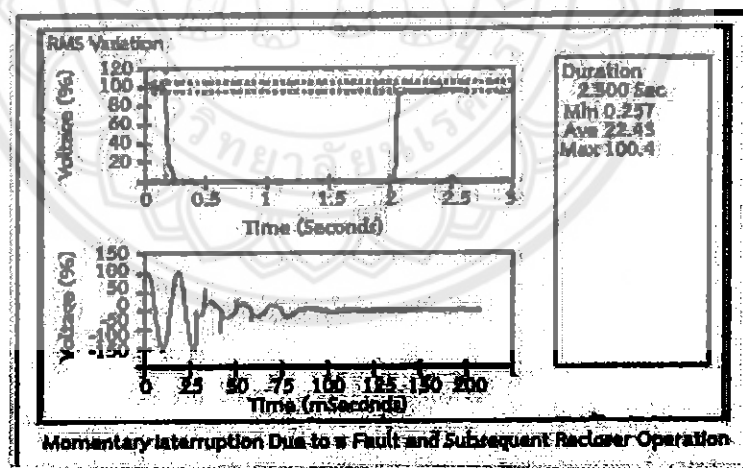
คือค่าแรงดัน rms มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms - 1min ดังรูปที่ 2.6 มีสาเหตุส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าโดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย หรือทำให้อุปกรณ์ ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟมีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



รูปที่ 2.6 Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าลงดิน[13][14][15]

#### 2.1.4.3 ไฟดับช่วงสั้น (Voltage Interruption)

คือค่าแรงดัน rms มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 pu. ในช่วงระหว่าง 10 ms - 1 min มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออก ดังรูปที่ 2.7 แสดงการเกิดไฟดับช่วงระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 1.8 sec จากการทำงานของรีคลอสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบก่อนจะมีการต่อวงจรเข้าไปดังเดิมอีกผลทำให้ อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน



รูปที่ 2.7 ไฟดับชั่วขณะจากสาเหตุรีคลอสเซอร์มีการทำงานเนื่องจากการเกิดความผิดปกติทางไฟฟ้า[13][14][15]

### 2.1.5 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation)

คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน rms ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าเกิน 1 นาทีที่มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานโหลดขนาดใหญ่ ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Undervoltage) แรงดันเกิน (Overvoltage) และไฟดับ (Sustained Interruptions)

#### 2.1.5.1 แรงดันตก (Undervoltage)

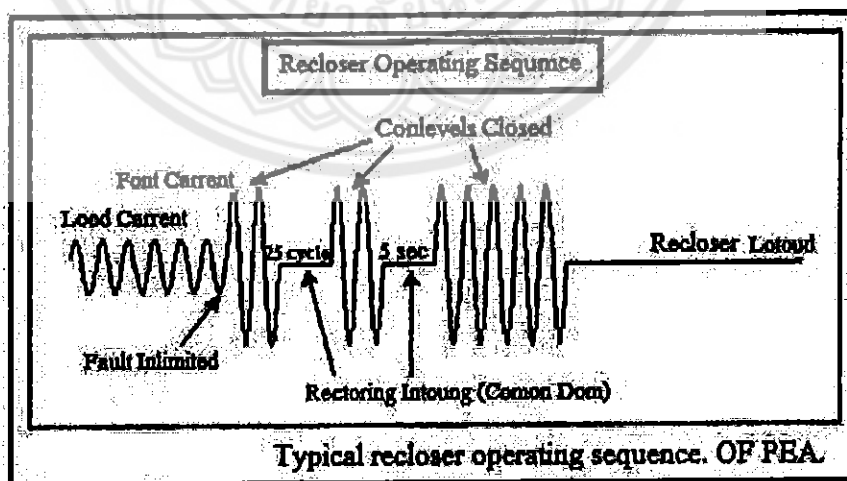
คือค่าแรงดัน rms มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8-0.9 pu. ในชวงเวลานานกว่า 1 min มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการสวิตชิงโหลดขนาดใหญ่เข้าระบบ หรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย เนื่องจากเกิดการรับภาระเกิน (Overload)

#### 2.1.5.2 แรงดันเกิน (Overvoltage)

คือค่าแรงดัน rms มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.2 pu. ในชวงเวลานานกว่า 1 min มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบ หรือมีการสวิตชิงคาปาซิเตอร์เข้าระบบ หรือการปรับแก้หม้อแปลงไม่เหมาะสมกับระบบผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน

#### 2.1.5.3 ไฟดับ (Voltage Interruption)

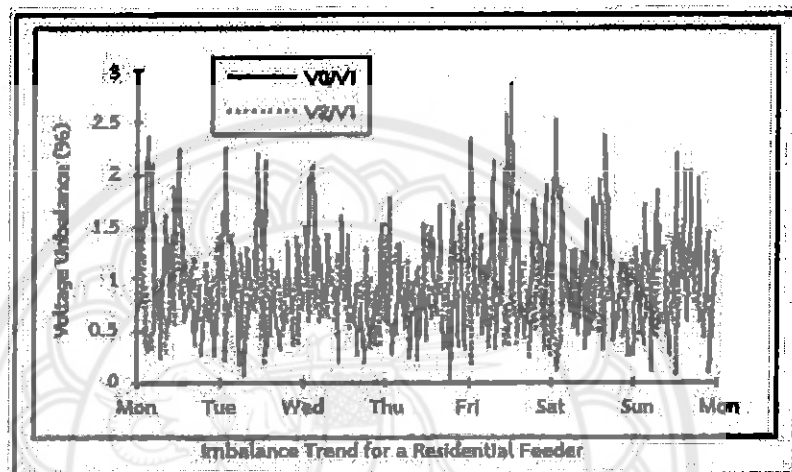
คือค่าแรงดัน rms มีค่าลดลง 0.0 pu. ในชวงเวลาเกินกว่า 1 min มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติทางไฟฟ้าในระบบทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกถาวร ดังรูปที่ 2.8 แสดงการเกิดไฟดับช่วงระยะยาวจากการทำงานของรีโคลสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบถาวร (Lockout) เมื่อสภาวะความผิดปกติทางไฟฟ้ายังอยู่ในระบบเป็นผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานรีโคลสเซอร์ในระบบของ กฟภ.[13][14][15]

### 2.1.6 แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance)

คือแรงดันของระบบ 3 เฟสมีขนาดแตกต่างกัน ( 0.5-2% ) หรือมีมุมเปลี่ยนไปจาก 120 องศา เกิดจากความไม่ สมดุลขนาดของโหลดแต่ละเฟส สามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนขององค์ประกอบลำดับลบ V2 ( Negative Sequence ) หรือองค์ประกอบลำดับศูนย์ V0 ( Zero Sequence ) ต่อบางองค์ประกอบลำดับบวก V1 (Positive Sequence) ดังรูปที่ 2.9 ผลทำให้อุปกรณ์เช่นมอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานน้อยลงเนื่องจากผลความร้อนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 แรงดันไม่สมดุลที่สายป้อนที่จ่ายไฟให้ที่พักอยู่อาศัย[13][14][15]

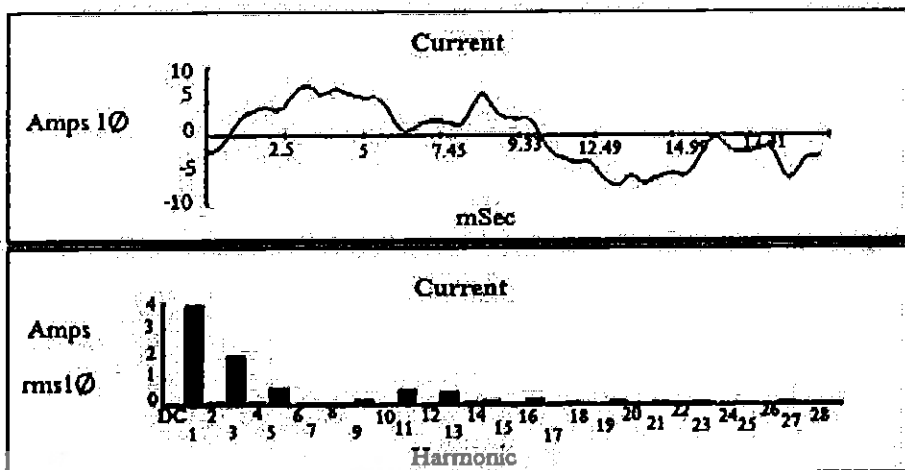
### 2.1.7 ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น (WAVEFORM DISTORTION)

การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือ การเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า และสามารถอธิบายคุณลักษณะได้โดยแยกองค์ประกอบทางความถี่ออกมา

การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแบ่งออกได้ 3 ชนิด

#### 2.1.7.1 ฮาร์โมนิก (Harmonic)

คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency ในระบบไฟฟ้าเรามีค่า 50 Hz ) เช่น ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz ผลของฮาร์โมนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส ( Phase Angle ) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยน (Distortion) ไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ เป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดและถ้ามีการขยายของฮาร์โมนิกที่มีขนาดมากพออาจจะทำให้อุปกรณ์เกิดการชำรุดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.10



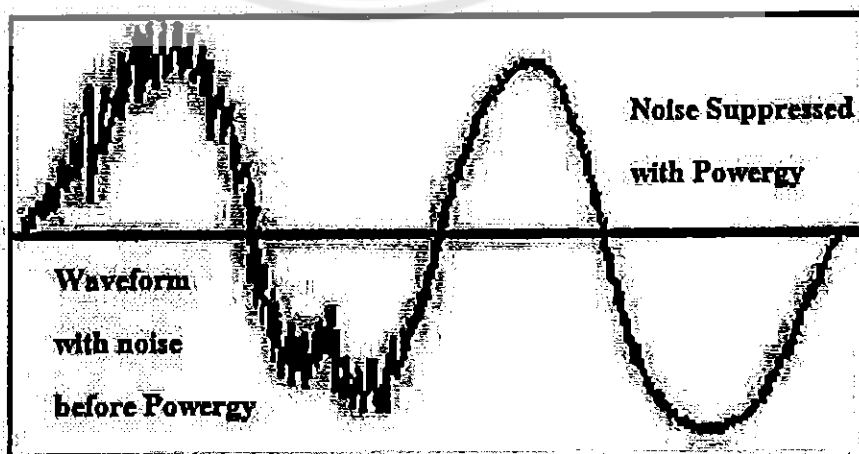
รูปที่ 2.10 กระแสฮาร์โมนิก[13][14][15]

2.1.7.2 อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic)

คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณ เป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล(Fundamental Frequency) เช่น มีความถี่ที่ 104Hz,117Hz,134Hz,147Hz ลักษณะการเกิดและผลกระทบจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ ฮาร์โมนิก

2.1.7.3 สัญญาณรบกวน (Noise)

คือสัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ จะมีความถี่ต่ำกว่า 200 kHz ปะปนบน สัญญาณแรงดัน หรือกระแสในสายเฟส เป็นผลเกิดจากการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้องที่มีการใช้ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ควบคุมอยู่ในระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีทำงาน ผิดพลาดหรือไม่สามารถทำงานได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สัญญาณรบกวน (Noise)[13][14][15]

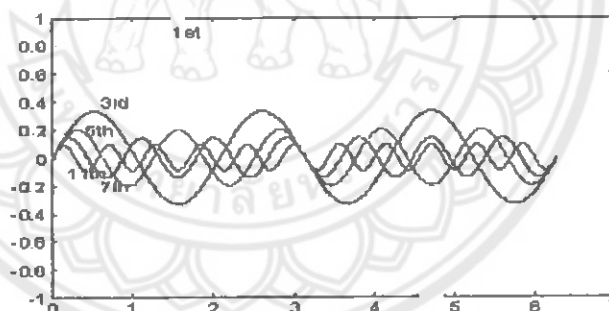


### 2.1.8 การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation)

คือปรากฏการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีค่าเปลี่ยนไปจากค่าความถี่ปกติ 50 Hz เป็นผลเกิดจากการทำงานของผลิตผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือมีการหลุดออกจากระบบ ทำให้มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานสัมพันธ์ กับความถี่ระบบไฟฟ้า เช่น เครื่องกลไฟฟ้า จากที่กล่าวมา คำว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าคงจะไม่ใช่อะไรใหม่สำหรับท่านอีกต่อไปแล้ว ซึ่งในการแก้ไขปัญหาค่าคุณภาพกำลังไฟฟ้า ที่ได้ผลสูงสุด จะต้องอาศัยความร่วมมือกันระหว่างการผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อให้การแก้ไขเป็นไปในแนวทางเดียวกัน สิ่งแรกที่ต้องทำคือ ความเข้าใจของคำจำกัดความ ลักษณะของการเกิด และผลกระทบปัญหาค่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าในเบื้องต้นและหวังว่า บทความนี้อาจจะเป็นประโยชน์สำหรับการนำมาศึกษาเพิ่มเติมเพื่อจะทำการวิเคราะห์ แก้ไข และปรับปรุงทำให้ระบบการจ่ายไฟฟ้าในบ้านเรามีคุณภาพดียิ่งขึ้น

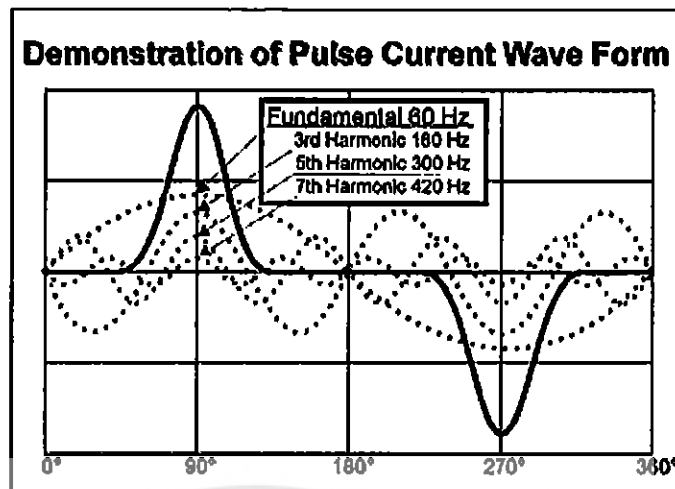
## 2.2 ฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิก (Harmonic) [16] คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency ในระบบไฟฟ้า เรามีค่าเท่ากับ 50 Hz) เช่น ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150Hz และฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250Hz ฯ แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆ [16][17][18]

ผลของฮาร์โมนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,5 และ 7[16][17][18]

แสดงถึงฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,5 และ 7 ที่มุมต่างๆ ทำให้สัญญาณไซน์มีรูปร่างผิดเพี้ยนในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์โมนิกได้ โดยสัญญาณหรือฟังก์ชันที่เป็นคาบใดๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีความถี่ต่างๆเป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนด้วย  $f(t)$  ดังสมการที่ 2.1

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

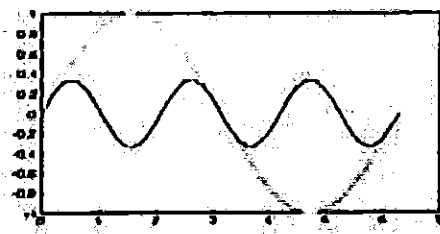
$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int f(t) \sin n\omega_0 t dt$$

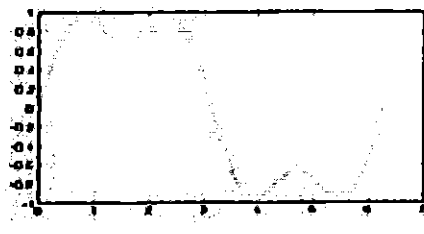
(2.1)

เมื่อ  $T$  คือ 1 คาบของสัญญาณและ  $n$  คือเลขจำนวนเต็มบวกในกรณีที่  $n = 0$  จะเป็นความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หรือกรณีที่  $n$  มีค่ามากกว่าศูนย์เราเรียกความถี่นี้ว่าฮาร์โมนิกลำดับที่  $n$  ซึ่งเป็นได้ทั้งลำดับคู่และคี่ และจากรูปที่ 2.14 ข. และรูป 2.15 ข.แสดงถึงความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากการรวมสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่หลักมูลกับคลื่นไซน์ที่เป็นฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ดังรูปที่ 2.14 ก. และรูป 2.15 ก. ตามลำดับ

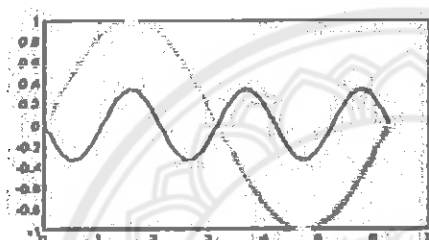


รูปที่ 2.14 ก.[16][17][18]

$$f(t) = \sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x) \tag{2.2}$$

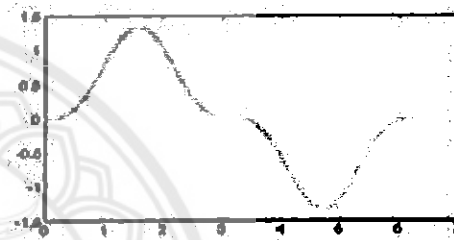


รูปที่ 2.14 ข.[16][17][18]



รูปที่ 2.15 ก.[16][17][18]

$$f(t) = \sin(x) - \frac{1}{3} \sin(3x) \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.15 ข.[16][17][18]

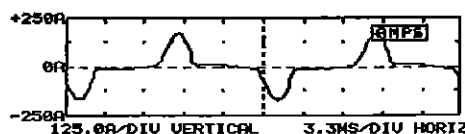
### 2.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติการไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่างๆของผู้ใช้ไฟแต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางรายมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเองและระบบไฟฟ้าข้างเคียงผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียงอาจไป รบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่นๆและอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราจึงมีความเป็นที่จะต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเรานั้นมีโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกหรือไม่ และโหลดประเภทใดเป็นโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก เพื่อที่ทำความใจก่อนที่จะทำการแก้ไขและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกต่อไป เราสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังต่อไปนี้

2.2.1.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงาน ส่วนใหญ่เป็นชนิด 1เฟส

ก. อุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง(SWITCHING MODE POWER

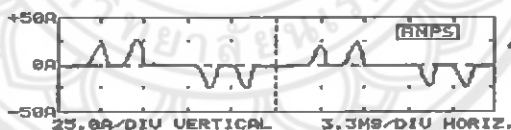
SUPPLY : SMPS เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)



Fundamental amps:			15.2 A rms		
Fundamental freq:			60.0 Hz		
HARM	PCT	PHASE	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-124°	2nd	0.2%	136°
3rd	19.9%	-144°	4th		
5th	7.4%	62°	6th		
7th	3.2%	-39°	8th		
9th	2.4%	-171°	10th		
11th	1.8%	111°	12th		
13th	0.8%	17°	14th		
15th	0.4%	-93°	16th		
17th	0.1%	-164°	18th		
19th	0.2%	-99°	20th		
21st	0.1%	160°	22nd		
23rd	0.1%	86°	24th		
25th			26th		
27th	0.1%	161°	28th		
29th			30th		
31st			32nd	0.1%	156°

รูปที่ 2.16 ค่าฮาร์มอนิกที่เข้ามาในลำดับต่างๆ[16][19][20]

ข. บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ ( Electronic Ballast)



PHASE A CURRENT SPECTRUM 12:29:46 PM					
Fundamental amps:			6.6 A rms		
Fundamental freq:			60.0 Hz		
HARM	PCT	PHASE	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-14°	2nd	3.8%	-85°
3rd	8.5%	-114°	4th	3.5%	-103°
5th	79.5%	145°	6th	0.3%	25°
7th	66.0%	124°	8th	2.5%	55°
9th	2.7%	11°	10th	1.7%	68°
11th	36.0%	-92°	12th	1.2%	132°
13th	21.8%	-118°	14th	1.2%	156°
15th	2.4%	22°	16th	0.3%	-136°
17th	10.4%	-25°	18th	0.8%	-92°
19th	8.0%	-79°	20th	0.9%	-117°
21st	1.4%	131°	22nd	0.5%	-105°
23rd	6.7%	39°	24th		
25th	4.5%	-2°	26th	0.3%	-12°
27th	0.9%	143°	28th	0.2%	76°
29th	3.7%	83°	30th	0.3%	42°
31st	3.1%	29°	32nd	0.4%	10°
33rd	0.4%	-110°	34th	0.1%	31°

รูปที่ 2.17 ค่าฮาร์มอนิกที่เข้ามาในลำดับต่างๆ[16][19][20]

### 2.2.1.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม

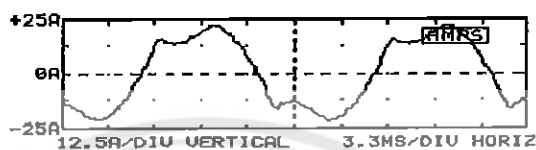
ก.ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier)

ข.เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converter :SPC)

ค.ตัวโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

(Programmable Logic Controller :PLC)

ง.ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive :ASD)



Fundamental amps:			15.2 A rms		
Fundamental freq:			60.0 Hz		
HARM	PCT	PHASE	HARM	PCT	PHASE
FUND	100.0%	-124°	2nd	0.2%	136°
3rd	19.9%	-144°	4th		
5th	7.4%	62°	6th		
7th	3.2%	-39°	8th		
9th	2.4%	-171°	10th		
11th	1.8%	111°	12th		
13th	0.8%	17°	14th		
15th	0.4%	-93°	16th		
17th	0.1%	-164°	18th		
19th	0.2%	-99°	20th		
21st	0.1%	160°	22nd		
23rd	0.1%	86°	24th		
25th			26th		
27th	0.1%	161°	28th		
29th			30th		
31st			32nd	0.1%	156°

รูปที่ 2.18 ค่าฮาร์มอนิกที่เข้ามาในลำดับต่างๆ[16][19][20]

### 2.2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

ปัญหาฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าออกเป็น 2 กรณีคือ

2.2.2.1 ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีการทำงานผิดพลาดด้วยผลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดและรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป

2.2.2.2 ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานน้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากมีค่า rms ของแรงดันหรือกระแส สูงขึ้นที่เกิดจากค่าฮาร์มอนิก หรือมีการขยายของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์

### 2.2.3 ปัญหาฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าดังนี้คือ

2.2.3.1 ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก เป็นผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแส และแรงดันเกินพิกัด

2.2.3.2 ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่งทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ทำให้ ประสิทธิภาพ การส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกทำให้ค่า rms ของกระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้น

2.2.3.3 ผลของกระแสฮาร์โมนิกTriplen ( ลำดับที่3,6,9..) จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ ( Zero Sequence) ในระบบ 3 เฟส4 สาย ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้จะรวมกันกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล อาจทำให้สายนิวทรัลหรือหม้อแปลงเสียหายได้หากไม่มี การออกแบบรองรับไว้

2.2.3.4 ผลของกระแสฮาร์โมนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลง มีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการในรับโหลดของหม้อแปลงลดลงไป(derating) ผลของแรงดันฮาร์โมนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis -Loss) เพิ่มขึ้น

2.2.3.5 ผลของกระแสฮาร์โมนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก ( Dielectric Stress )กับตัวคาปาซิเตอร์ และอาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ ผลของแรงดันฮาร์โมนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดขยายกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์โมนิกคาปาซิเตอร์ที่ออกแบบสร้างจากผู้ผลิตได้กำหนดตามมาตรฐาน มาตรฐาน IEEE Std. 18-1992

2.2.3.6 ผลของกระแสฮาร์โมนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป กรณีที่มีฟิวส์ระดับต่ำเกิดขึ้น ฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนด หรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบ สาเหตุจะเป็นเหตุมาจากฮาร์โมนิกในกรณีที่เกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน

2.2.3.7 ผลของฮาร์โมนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงานของชนิดรีเลย์ การทำงานของรีเลย์ชนิดElectromagnetic ขึ้นอยู่กับค่ากระแสและแรงดัน rmsส่วนการทำงานของรีเลย์ชนิด Digital ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) จากการ Sampling และตรวจค่า Zero Crossing ค่ากระแสหรือแรงดันที่ศูนย์ โดยลักษณะที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดดังนี้

ก. ทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่า(Pickup Values) ที่สูง โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ

ข. กรณีที่มีกระแสฮาร์โมนิกTriplenมากพออาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด (False Trip)

ค. ทำให้รีเลย์ระยะทาง(Distance Relay)ทำงานผิดพลาด ด้วยผลของกระแสฮาร์โมนิกที่ทำให้อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการเซตตั้งที่ความถี่หลักมูล

ง. ทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static Underfrequency Relay) มีความไวกว่าปกติ อาจทำให้เกิดการทริปผิดพลาด

จ.ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and Overvoltage Relay) ทำงานผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ตั้งไว้

ฉ.ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง

2.2.3.8 ผลของกระแสฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capacity) ของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา  $di / dt$  มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลทำให้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิก ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

2.2.3.9 ผลของฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt - Hour Meter) ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล

2.2.3.10 ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้าทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำ สามเฟสเกิดปรากฏการณ์คือค็อกกิ้ง (Cogging) คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิลเลตทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร

2.2.3.11 ผลของฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารเช่นในระบบโทรศัพท์

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าสำคัญเรื่องหนึ่ง เพราะปัจจุบันการใช้โหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก และโรงงานอุตสาหกรรมและในอาคารพาณิชย์นับวันมีการใช้โหลดดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นผลทำให้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเพี้ยนไปจากรูปไซน์ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาด หรืออาจเกิดการเสียหายได้

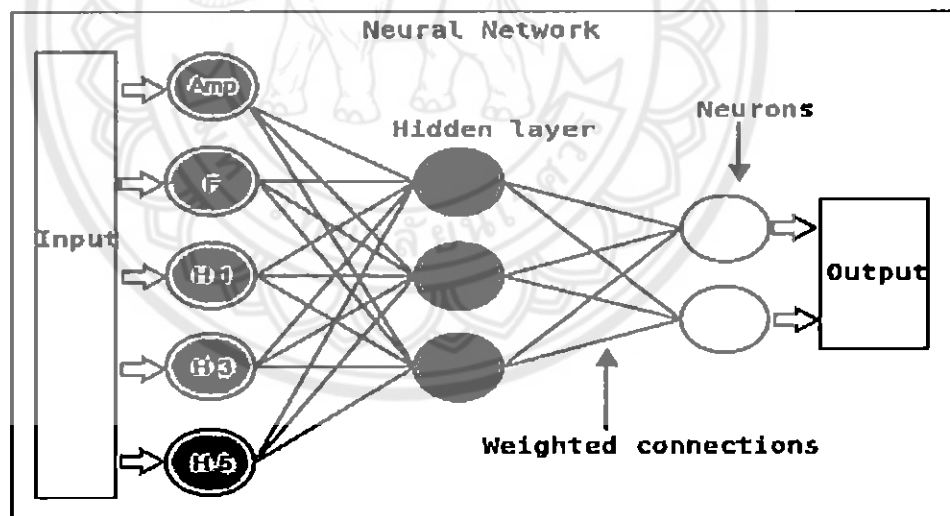
## 2.3 โครงข่ายประสาทเทียม

ในปี พ.ศ. ๒๔๘๖ อาจถือได้ว่า เป็นปีแห่งการกำเนิดของสาขาโครงข่ายประสาทเทียม [11][12] ในวงการวิทยาศาสตร์ โดย แม็คคัลลอค (McCulloch) และ พิทส์ (Pitts) ได้เสนอแบบจำลองของเซลล์ประสาท และได้แสดงให้เห็นว่า ในทางทฤษฎีแล้ว โครงข่ายของแบบจำลองเซลล์ประสาทดังกล่าว สามารถทำงานเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใดๆ ก็ได้

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) คือ การสร้างคอมพิวเตอร์ที่จำลองเอาวิธีการทำงานของสมองมนุษย์ หรือทำให้คอมพิวเตอร์รู้จักคิดและจดจำในแนวเดียวกับโครงข่ายประสาทของมนุษย์ เพื่อช่วยให้คอมพิวเตอร์ฟังภาษามนุษย์ได้เข้าใจ อ่านออก และรู้จำได้ ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “สมองกล

### 2.3.1 แนวคิดและทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม(Artificial Neural Network)[9][10][11][12]หรือที่มักจะถูกเรียกสั้นๆว่าข่ายงานประสาท(Neural Network หรือ Neural Net) คือแบบโครงสร้างทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์ (Connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ด้วยวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ(Pattern Recognition) และการอนุมานความรู้(Knowledge Deduction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาข่ายงานไฟฟ้าชีวภาพ (Bioelectric Network) ในสมองซึ่งประกอบด้วยเซลล์ประสาทหรือ "นิวรอน" (Neurons) และจุดประสานประสาท (Synapses) แต่ละเซลล์ประสาทประกอบด้วยปลายในการรับกระแสประสาทเรียกว่า "เดนไดรต์" (Dendrite) ซึ่งเป็นด้านข้อมูลขาเข้า (Input) และปลายในการส่งกระแสประสาทเรียกว่า "แอกซอน" (Axon) ซึ่งเป็นเหมือนด้านข้อมูลขาออก (Output) ของเซลล์เซลล์เหล่านี้ทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกันกระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรต์เข้าสู่นิวเคลียสซึ่งจะเป็นตัวตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่นๆต่อหรือไม่ถ้ากระแสประสาทแรงพอนิวเคลียสก็จะกระตุ้นเซลล์อื่นๆต่อไปผ่านทางแอกซอนของมัน



รูปที่ 2.19 การทำงานพื้นฐานของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

### 2.3.2 โครงสร้าง

นักวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันเห็นตรงกันว่าข่ายงานประสาทเทียมมีโครงสร้างแตกต่างจากข่ายงานในสมองแต่ก็ยังเหมือนสมองในแง่ที่ว่าข่ายงานประสาทเทียมคือการรวมกลุ่มแบบขนานของหน่วยประมวลผลย่อยและการเชื่อมต่อนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสติปัญญาของข่ายงานเมื่อพิจารณาขนาดแล้วสมองมีขนาดใหญ่กว่าข่ายงานประสาทเทียมอย่างมากรวมทั้งเซลล์ประสาทยังมี



ความซับซ้อนกว่าหน่วยย่อยของข่ายงานอย่างไรก็ดีหน้าที่สำคัญของสมองเช่นการเรียนรู้ยังคงสามารถถูกจำลองขึ้นอย่างง่ายด้วยโครงข่ายประสาทนี้

### 2.3.3 หลักการ

สำหรับในคอมพิวเตอร์โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยด้านข้อมูลขาเข้า (Input) และด้านข้อมูลขาออก (Output) เหมือนกันโดยจำลองให้ด้านข้อมูลนำเข้าแต่ละอันมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) เป็นตัวกำหนดน้ำหนักของข้อมูลขาเข้า (Input) โดยหน่วยประสาทแต่ละหน่วยจะมีค่าทำนอง (Threshold) เป็นตัวกำหนดว่าน้ำหนักรวมของข้อมูลนำเข้าต้องมากขนาดไหนจึงจะสามารถส่งออกข้อมูลไปยังโครงข่ายประสาทเทียมตัวอื่นได้เมื่อนำโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละหน่วยมาต่อกันให้ทำงานร่วมกันการทำงานนี้ในทางตรรกะแล้วก็จะเหมือนกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในสมองเพียงแต่ในคอมพิวเตอร์ทุกอย่างเป็นตัวเลขเท่านั้นเอง

พื้นฐานสามัญที่สำคัญของ Artificial Neural Network ประกอบไปด้วย 3 ส่วน หรือ 3 layer ได้แก่ ชั้นของ input units ที่ถูกเชื่อมต่อกับชั้นของ hidden units ซึ่งเชื่อมต่อกับชั้นของ output units

- Input unit จะทำหน้าที่แทนส่วนของข้อมูลดิบ ที่จะถูกป้อนเข้าสู่เครือข่าย
- Hidden units จะถูกกำหนด โดยการทำงานของ input units และค่าน้ำหนักบนความสัมพันธ์ระหว่าง input units และ hidden units
- Output units จะขึ้นอยู่กับการทำงานของ hidden units และค่าน้ำหนักระหว่าง hidden units และ output units

### 2.3.4 การทำงาน

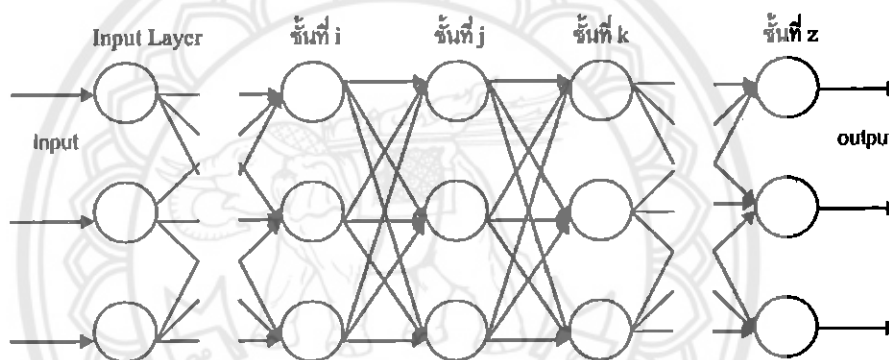
ทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมคือเมื่อมีข้อมูลขาเข้า (Input) เข้ามายังโครงข่ายก็จะเอาข้อมูลขาเข้า (Input) มาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ของแต่ละขาคผลที่ได้จากข้อมูลขาเข้า (Input) ทุกๆขาของโครงข่ายประสาทเทียมจะเอามารวมกันแล้วก็เอามาเทียบกับค่าทำนอง (Threshold) ที่กำหนดไว้ถ้าผลรวมมีค่ามากกว่าค่าทำนอง (Threshold) แล้วโครงข่ายประสาทเทียมก็จะส่งข้อมูลส่งออกยังข้อมูลขาเข้า (Input) ของโครงข่ายประสาทเทียมอื่นๆที่เชื่อมกันในโครงข่ายถ้าค่าน้อยกว่าค่าทำนอง (Threshold) ก็จะไม่เกิดส่งข้อมูลขาออก (Output) เขียนออกมาได้ดังนี้

if (sum(input \* weight) > threshold) then output

สิ่งสำคัญคือเราต้องทราบค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าทำนอง (Threshold) สำหรับสิ่งที่เราต้องการเพื่อให้คอมพิวเตอร์รู้จักซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอนแต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้โดยการสอนให้มันรู้จักรูปแบบของสิ่งที่เราต้องการให้มันรู้จักเรียกว่าการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Back Propagation) ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จักในการฝึกโครงข่ายประสาท

เทียมแบบป้อนข้อมูลไปข้างหน้า (Feed-Forward Neural Networks) จะมีการใช้อัลกอริทึมแบบการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ (Back Propagation) เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักคะแนนของเครือข่าย (Network Weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับฝึกให้แก่เครือข่ายในแต่ละครั้งแล้ว ด้านข้อมูลขาออก (Output) จากเครือข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่คาดหวังแล้วทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาดซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะถูกส่งกลับเข้าสู่เครือข่ายเพื่อใช้แก้ไขค่าน้ำหนักคะแนนต่อไป

Back-propagation เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ใน multilayer perceptron เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสมโดยการปรับค่านี้จะขึ้นกับความแตกต่างของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการพิจารณา ดังรูปที่ 20 ต่อไปนี้ประกอบ



รูปที่ 2.20 แสดงรูปแบบ Back-propagation neural network[22]

ขั้นตอนของ Back-propagation Algorithm มีดังนี้

1. กำหนดค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้ (rate parameter :  $r$ )

2. สำหรับแต่ละตัวอย่างอินพุตให้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้จนกว่าได้ระดับ performance ที่ต้องการคำนวณหาค่าเอาต์พุตโดยใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นซึ่งอาจได้จากการสุ่มและคำนวณหา

$\beta$  : แทนประโยชน์ที่จะได้รับสำหรับการเปลี่ยนค่าเอาต์พุตของแต่ละโหนด

ในชั้นเอาต์พุต (Output Layer)

$$\beta_z = d_z - o_z \quad (2.4)$$

เมื่อ  $d_z$  = ค่าเอาต์พุตที่ต้องการ

$o_z$  = ค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้

ในชั้นซ่อน (Hidden Layer)

$$\beta_j = \sum_k w_{jk} o_k (1 - o_k) \beta_k \quad (2.5)$$

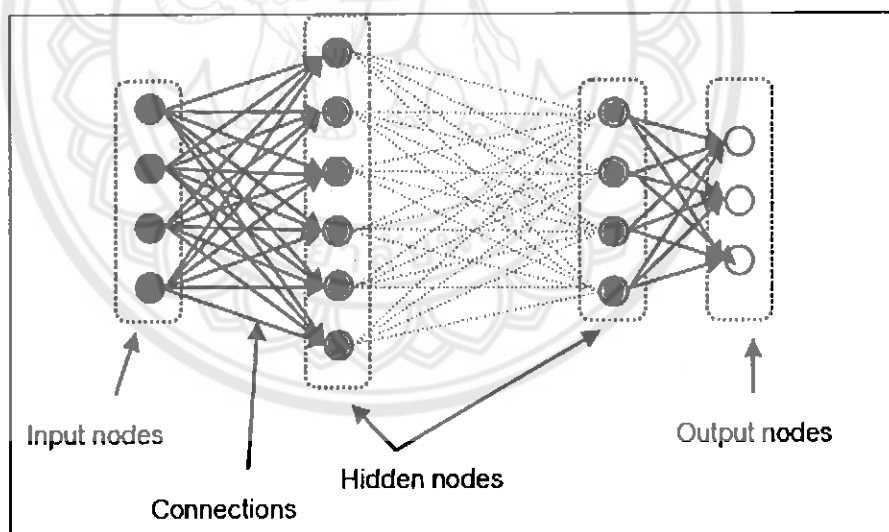
เมื่อ  $w_{jk}$  = น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นที่  $j$  กับ  $k$

คำนวณค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับในทุกน้ำหนักด้วยสมการต่อไปนี้

$$\Delta w_{ij} = r o_i o_j (1 - o_j) \beta_j \quad (2.6)$$

เพิ่มค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงสำหรับตัวอย่างอินพุตทั้งหมดและเปลี่ยนค่าน้ำหนัก

Feedforward network ข้อมูลที่ประมวลผลในวงจรข่ายจะถูกส่งไปในทิศทางเดียวจาก Input nodes ส่งต่อมาเรื่อย ๆ จนถึง output nodes โดยไม่มีการย้อนกลับของข้อมูล หรือแม้แต่ Nodes ใน layer เดียวกันก็ไม่มีการเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 2.21 แสดงสถาปัตยกรรมของ Feedforward network[22]

### 2.3.5 การเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

#### 2.3.5.1 Supervised Learning การเรียนแบบมีการสอน

เป็นการเรียนแบบที่มีการตรวจคำตอบเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมปรับตัว ชุดข้อมูลที่ใส่สอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าตอบไม่ถูก โครงข่ายประสาทเทียมก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น (เปรียบเทียบกับคน เหมือนกับการสอนนักเรียนโดยมีครูผู้สอนคอยแนะนำ)

#### 2.3.5.2 Unsupervised Learning การเรียนแบบไม่มีการสอน

เป็นการเรียนแบบไม่มีผู้แนะนำ ไม่มีการตรวจคำตอบว่าถูกต้องหรือผิด โครงข่ายประสาทเทียมจะจัดเรียงโครงสร้างด้วยตัวเองตามลักษณะของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้ โครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถจัดหมวดหมู่ของข้อมูลได้ (เปรียบเทียบกับคน เช่น การที่เราสามารถแยกแยะพันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ตามลักษณะรูปร่างของมันได้เองโดยไม่มีใครสอน)

### 2.3.6 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

เนื่องจากความสามารถในการจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่มีความซับซ้อน จากข้อมูลที่ป้อนให้เรียนรู้ การประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการควบคุม ซึ่งมีส่วนนำมาประยุกต์ใช้งานหลายประเภท ได้แก่

2.3.6.1 งานการจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอนเช่น ลายมือ ลายเซ็น ตัวอักษร รูปหน้า

2.3.6.2 งานการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ (มี inputs และ outputs แต่ไม่ทราบว่า inputs กับ outputs มีความสัมพันธ์กันอย่างไร)

2.3.6.3 งานที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (โครงข่ายประสาทเทียมสามารถปรับตัวเองได้)

2.3.6.4 งานจัดหมวดหมู่และแยกแยะสิ่งของ

2.3.6.5 งานทำนาย เช่นพยากรณ์อากาศ พยากรณ์หุ้น

2.3.6.6 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมควบคุมกระบวนการทางเคมีโดยวิธีพยากรณ์แบบจำลอง (Model Predictive Control)

2.3.6.7 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับในการทำนายพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในตัวอาคาร

2.3.6.8 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาใจโครเมตริกซาร์ท การประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทควบคุมระบบ HVAC

## 2.4 ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์

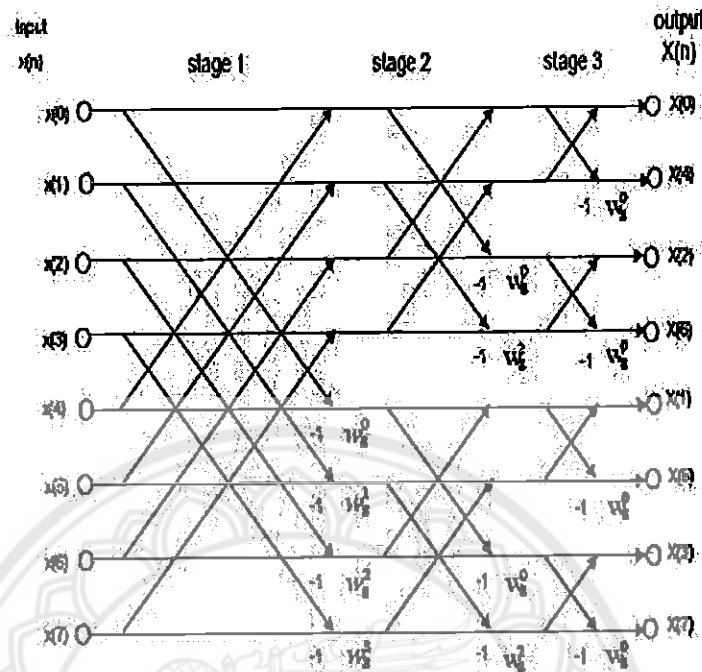
ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์[23][24]กล่าวว่า สัญญาณรายคาบใดๆจะประกอบด้วยสัญญาณไซน์ความถี่มูลฐานรวมกับสัญญาณไซน์ความถี่ เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานงานวิจัยนี้วัดสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลัง สัญญาณที่วัดไม่ว่าจะเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าล้วนแต่เป็นสัญญาณรายคาบ ดังนั้นการหาค่าฮาร์มอนิกจึงสามารถใช้ทฤษฎีฟูเรียร์หาคำตอบได้ แต่ด้วยสาเหตุของสัญญาณที่วัดอยู่ในรูปสัญญาณแบบเวลาเต็มหน่วย(Discrete Time)การหาค่าฮาร์มอนิกจึงใช้การคำนวณที่เรียกว่า DFT (Discrete Fourier Transform)สมการมีดังนี้คือสัญญาณฟังก์ชันของเวลาที่ถูกล้อมตัวอย่าง

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.7)$$

โดย  $x(n)$  คือสัญญาณฟังก์ชันของเวลาที่ถูกล้อมตัวอย่าง  
 $N$  คือ จำนวนตัวอย่างสัญญาณที่ล้อมในคาบเวลา

สมการ DFT ข้างต้นสามารถหาค่าฮาร์มอนิกในสัญญาณที่วัดได้แต่มีจำนวนครั้งในการคำนวณมากจึงทำให้สมการข้างต้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในในงานวิจัยนี้เนื่องจากงานนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์มีความเร็วในการทำงาน และมีขนาดหน่วยความจำที่จำกัด ดังนั้นการหาค่าฮาร์มอนิกในสัญญาณจึงได้หันไปใช้การคำนวณ FFT (Fast Fourier Transform)ซึ่งเป็นการคำนวณที่สามารถหาคำตอบได้เร็วกว่า เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการคำนวณน้อยกว่าสำหรับข้อจำกัดในการคำนวณ FFT คือ ต้องมีจำนวนตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลาเป็น  $2^N$  ตัวอย่าง ( $N$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก) ขั้นตอนและวิธีการคำนวณแสดงในรูป (เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณโดยใช้ จำนวนตัวอย่างสัญญาณ $2^3$  หรือ8ตัวอย่างสัญญาณใน1คาบเวลา) สัญญาณขาเข้าจะอยู่ทางซ้ายมือจากนั้นจะผ่านการคำนวณตามลูกศรจนกระทั่งได้คำตอบของแต่ละฮาร์มอนิกทางขวามือ งานวิจัยนี้ใช้จำนวนตัวอย่างสัญญาณใน1คาบเวลาเป็น128ตัวอย่าง ซึ่งทำให้จำนวนขั้น(Stage)การคำนวณเพิ่มจาก3ขั้นเป็น7ขั้นการเพิ่มจำนวนตัวอย่างสัญญาณ ทำให้ผลการคำนวณถูกต้องมากขึ้น แต่ผลเสียคือใช้เวลาคำนวณมากและใช้หน่วยความจำมากขึ้นดังนั้นขีดจำกัดของจำนวนตัวอย่างสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ และขนาดของหน่วยความจำ 128ตัวอย่างสัญญาณเป็นค่าสูงสุดที่เครื่องวัดทำได้นิยามของ $W_N^k$ ในภาพเป็นดังนี้

$$W_N^{nk} = e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.22 การคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง[24]

## 2.5 ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์

ในปัจจุบันระบบปฏิบัติการ(Operating System)[25][26]ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นได้มีการพัฒนา  
กันอย่างต่อเนื่องอันมีสาเหตุหลักมาจากแต่เดิมหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์ (Processor) นั้นมี  
ราคาสูงและมีความเร็วในการประมวลผลต่ำกว่าในปัจจุบันอย่างมากทำให้การพัฒนาระบบปฏิบัติการ  
ต้องอ้างอิงกับหน่วยประมวลผลในการที่จะให้จำนวนผู้ใช้งาน (User) ได้มีโอกาสใช้งานหน่วย  
ประมวลผลร่วมกับผู้อื่นซึ่งมีหลากหลายวิธีการในการแบ่งการใช้งานแต่ในปัจจุบันรูปแบบการใช้งาน  
หน่วยประมวลผลได้เปลี่ยนไปจากเดิมเช่นมีจำนวนของหน่วยประมวลผลมากกว่าหนึ่งตัวหน่วย  
ประมวลผลมีความเร็วสัญญาณนาฬิกาเพิ่มมากขึ้นเป็นต้นส่งผลให้ระบบปฏิบัติการต้องมีการพัฒนาไป  
ตามแนวโน้มการใช้งานหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์ด้วยฉะนั้นในการเข้าใช้งานหน่วยประมวลผล  
แต่ละตัวจึงอยู่ในรูปแบบการนำเอาโปรแกรม (Application) หลายโปรแกรมมาทำงานพร้อมกันโดย  
เปรียบเสมือนให้แต่ละโปรแกรมมีหน่วยประมวลผลเป็นของตัวเองไม่ต้องใช้ร่วมกับผู้อื่นทำให้เรา  
สามารถใช้งานโปรแกรมได้หลากหลายโปรแกรมในเวลาเดียวกัน

### 2.5.1 ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์

ในเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ(Desktop) การประมวลผลข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา (Input) อาจจัดอยู่ได้ว่าอยู่ในกลุ่มของ “Soft real time” เนื่องจากหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะนั้นสามารถตอบสนองต่อข้อมูลที่ป้อนเข้ามาได้ในเวลาอันจำกัดแต่การตอบสนองจะลดน้อยลงเมื่ออยู่ภายนอกเวลาที่หน่วยประมวลผลสามารถประมวลผลได้อาทิเช่นการกดแป้นพิมพ์นั้นจะต้องกดในช่วงเวลาที่หน่วยประมวลผลนั้นกำลังประมวลผลอยู่หากหน่วยประมวลผลนั้นไม่ได้ประมวลผลอยู่ขณะที่เรากำลังกดแป้นพิมพ์ก็จะไม่สามารถนำมาประมวลผลได้การทำมัลติทาสกิ้งในเวลาเดียวกันในระบบสมองกลฝังตัว(Embedded System) มีหลักการคล้ายกันกับการทำมัลติทาสกิ้งในเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะซึ่งจะอธิบายถึงการแบ่งงานออกเป็นเธรด (Thread) หลายๆเธรดโดยใช้หน่วยประมวลผลเพียงตัวเดียวอย่างไรก็ตามจุดประสงค์ของระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์จะมีรายละเอียดเจาะจงไปในเรื่องของจัดการแบบ “Hard real time” โดยเฉพาะ

ระบบปฏิบัติการประเภท Hard real time นั้นจะต้องทำงานให้เสร็จสิ้นภายในเวลาที่จำกัดถ้าหากส่วนใดส่วนหนึ่งทำงานล้มเหลวงานทั้งระบบก็จะล้มเหลวไปด้วยยกตัวอย่างเช่นระบบแอร์แบก (Airbag) ในรถยนต์จะต้องมีการทำงานแบบ Hard real time เพราะตัวแอร์แบกจะต้องพองตัวให้เสร็จสมบูรณ์หลังจากการชนในเวลาอันจำกัดการตอบสนองที่ช้าหรือล้มเหลวในเวลาอันจำกัดจะทำให้คนที่อยู่ในรถยนต์ได้รับบาดเจ็บแต่ส่วนมากในระบบสมองกลอัจฉริยะมักมีการใช้งานทั้งแบบ Hard real time และ Soft real time ร่วมกันระบบปฏิบัติการที่ทำงานแบบเรียลไทม์มีอยู่หลายระบบเช่น ARTOS, BeRTOS, FreeRTOS ,OpenRTOS เป็นต้นแต่ภายในโครงการเล่มนี้มีการใช้งานเฉพาะระบบปฏิบัติการ FreeRTOS เท่านั้นจึงขอกล่าวรายละเอียดเฉพาะ FreeRTOS

### 2.5.2 ระบบปฏิบัติการFreeRTOS

ระบบปฏิบัติการ FreeRTOS เป็นระบบปฏิบัติการสำหรับอุปกรณ์สมองกลฝังตัวโดยสามารถใช้ได้ในหลากหลายไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่เป็นโอเพ่นซอร์ส (OpenSource) ทำให้สามารถมีการปรับปรุงเคอร์เนล (Kernel) ของระบบได้และเป็นการง่ายต่อผู้ใช้ในการนำไปพัฒนาโปรแกรมถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีขนาดค่อนข้างเล็กภายในเคอร์เนลของระบบประกอบด้วยไฟล์ภาษาซีเพียง 3-4 ไฟล์เท่านั้นทำให้อ่านง่ายควบคุมและปรับปรุงประสิทธิภาพต่างๆได้อย่างง่ายรวมทั้งมีตัวอย่างการออกแบบและการใช้งานให้ศึกษาคุณลักษณะเด่นของ FreeRTOS

2.5.2.1 มีโครงสร้างที่เล็กและง่ายต่อการใช้งาน

2.5.2.2 การจัดการเวลาต่างๆสามารถเลือกตั้งค่าได้ทั้งเป็นแบบ Preemptive หรือ Cooperationoperation

2.5.2.3 สามารถรองรับได้ในหลายภาษาและควบคุมทาสก์ (Task) และสแต็ก (Stack) ได้ง่าย

### 2.5.3 ทาสก์ฟังก์ชัน

ในระบบปฏิบัติการFreeRTOSแต่ละเรดนั้นจะถูกเรียกว่าทาสก์ (Task) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

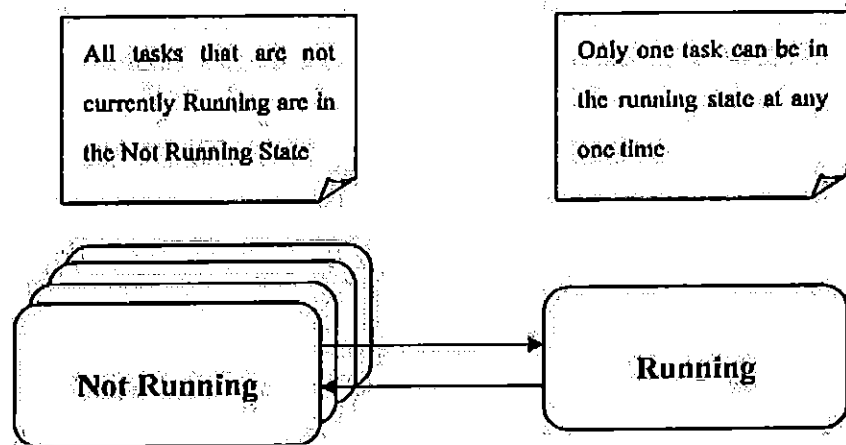
```
voidATaskFunction ( void *pvParameters )
{
    for(;;)
    {
    }
    vTaskDelete(NULL);
}
```

แต่ละทาสก์เป็นโปรแกรมย่อยขนาดเล็กมีการรันไปไม่มีที่สิ้นสุด (Infinite loop) ซึ่งจะไม่สามารถออกจากทาสก์นี้ได้และไม่สามารถคืนค่า (Return) ตัวแปรจากทาสก์ที่สร้างขึ้นได้เราสามารถกำหนดโครงสร้างทาสก์ได้หลายทาสก์จากฟังก์ชันข้างต้นซึ่งในการสร้างทาสก์ขึ้นแต่ละทาสก์ก็จะมี การแยกการรันโดยถือว่าแต่ละทาสก์นั้นจะมีสแต็กเป็นของตัวเอง

### 2.5.4 สถานะของทาสก์และการเปลี่ยนสถานะ

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถมีได้หลายทาสก์ถ้าหากไม่ใครคอนโทรลเลอร์รันโปรแกรม ที่ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลเพียงตัวเดียวทำให้ทาสก์เพียงทาสก์เดียวเท่านั้นสามารถเข้าใช้งาน หน่วยประมวลผลนั้นได้ตลอดเวลาที่กำหนดให้จากเหตุการณ์นี้สามารถระบุได้ว่าทาสก์นั้น ประกอบด้วย 2 สถานะคือสถานะทำงาน (Running) และสถานะไม่ทำงาน (Not Running) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการทำงานของแต่ละทาสก์จะประกอบด้วยสถานะการทำงานย่อยหลายสถานะเมื่อ ทาสก์อยู่ในสถานะทำงานหน่วยประมวลผลก็จะทำการรันทาสก์นั้นและเมื่อไรที่ทาสก์นั้นอยู่ในสถานะ ไม่ทำงานมันก็จะอยู่ในเิงพร้อมกับบันทึกสถานะต่างๆของทาสก์เก็บไว้เพื่อไว้รอเรียกทำงานต่อใน สถานะทำงานในเวลาถัดไปตัวจัดการตารางเวลา (Scheduler) ก็จะทำการพิจารณาว่าทาสก์ใดควร เข้าสู่สถานะทำงานและเมื่อทาสก์ถูกเรียกให้ทำงานก็จะทำงานต่อจากเดิมที่ทำค้างไว้ไม่ต้องเริ่มต้น ใหม่





รูปที่ 2.23 สถานะของทาสก์และการเปลี่ยนสถานะ[26]

จากรูป 2.23 สามารถสรุปได้ว่าหากมีหน่วยประมวลผลเพียงตัวเดียวจะทำให้ทาสก์สามารถอยู่ในสถานะทำงานได้เพียงทาสก์เดียวเท่านั้นทาสก์ที่เหลือจะต้องรออยู่ในสถานะไม่ทำงานเพื่อรอการเปลี่ยนสถานะซึ่งจะมีการจัดการโดยตัวจัดการตารางเวลาการที่แต่ละทาสก์ทำการเปลี่ยนสถานะจากไม่ทำงานเป็นสถานะทำงานนั้นจะเรียกว่า “Switch in” หรือ “Swapped in” และการเปลี่ยนสถานะจากทำงานเป็นสถานะไม่ทำงานนั้นจะเรียกว่า “Switch out” หรือ “Swapped out” ซึ่งการจัดการเปลี่ยนสถานะของแต่ละทาสก์นั้นFreeRTOSสามารถจัดการได้ทั้ง 2 ประเภท

#### 2.5.5 การสร้างทาสก์

สามารถสร้างทาสก์ได้จากฟังก์ชันXTaskCreate(); ดังรายละเอียดต่อไปนี้

```
portBASE_TYPE xTaskCreate ( pdTASK_CODE pvTaskCode ,
                             const signed portCHAR * const pcName,
                             unsigned portSHORT usStackDepth ,
                             void* pvParameters ,
                             unsigned portBASE_TYPE uxPriority ,
                             xTaskHandle * pxCreatedTask
                             );
```

จากฟังก์ชันข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

pvTaskCode คือพอยเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งที่มีการสร้างทาสก์

pcName คือชื่อของทาสก์

usStackDepth คือค่าที่ใช้บอกเคอร์เนลของระบบในการสร้างขนาดของสแต็ก

pvParameters คือค่าเริ่มต้นที่ต้องการกำหนดให้ทาสก์

uxPriority คือค่าลำดับความสำคัญ(Priority) ของทาสก์โดยที่ 0 คือความสำคัญต่ำที่สุด

pxCreatedTask คือค่าที่ใช้สำหรับอ้างอิงในกรณีที่มีการสร้างทาสก์

Returned value คือค่าที่ใช้บอกสถานะแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

ก. pdTRUE ถ้าทาสก์นั้นสร้างสำเร็จ

ข. errCOULD\_NOT\_ALLOCATE\_REQUIRED\_MEMORY

ถ้าหากไม่สามารถสร้างทาสก์ได้เพราะทรัพยากรหน่วยความจำไม่เพียงพอต่อการใช้งาน

โปรแกรมที่ 1 ตัวอย่างการสร้างทาสก์

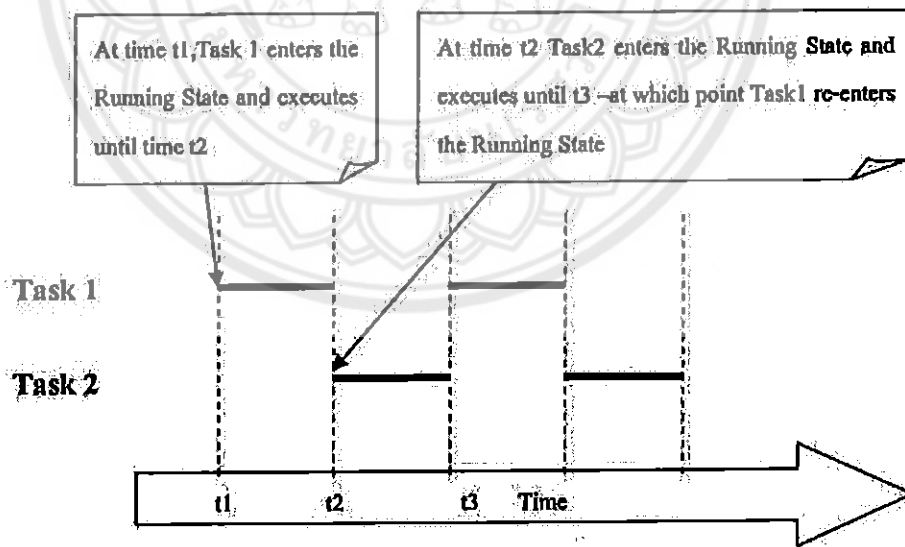
```
voidvTask1(void *pvParameters)
{
    const char *pcTaskName = "Task 1 is running\r\n" ;
    volatile unsigned long ul;
    for(;;)
    {
        vPrintString(pcTaskName);
        for(ul=0;ul<100;ul++)
        {
            // For Delay loop
        }
    }
}
voidvTask2(void *pvParameters)
{
    const char *pcTaskName = "Task 2 is running\r\n" ;
    volatile unsigned long ul;
    for(;;)
    {
        vPrintString(pcTaskName);
        for(ul=0;ul<100;ul++) { // For Delay loop }
    }
}
intmain(void)
{
    xTaskCreate( vTask1 , "Task 1" , 1000 , NULL , 1 , NULL);
    xTaskCreate( vTask2 , "Task 2" , 1000 , NULL , 1 , NULL);
    vTaskStartScheduler();
    for(;;);
}
```

จากโปรแกรมที่ 1 ดังกล่าวให้ผลลัพธ์แสดงดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 ผลการรันโปรแกรมการสร้างทาสก์[26]

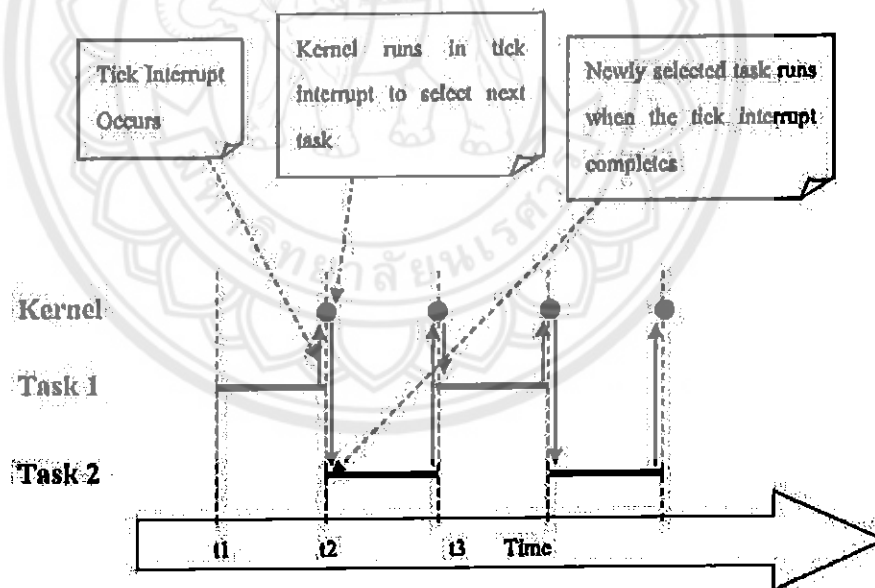
จากผลการรันโปรแกรมดังรูปที่ 2.24สามารถสรุปได้ว่าทาสก์ที่ถูกสร้างขึ้นทั้ง 2 ทาสก์มีการทำงานพร้อมกันอย่างต่อเนื่องโดยทั้งสองทาสก์มีการแบ่งผลัดกันใช้หน่วยประมวลผลเพียงตัวเดียว ซึ่งเป็นการแบ่งเวลาในการทำงาน (Time Sharing) เป็นไปอย่างรวดเร็วและเนื่องจากทั้งสองทาสก์มีลำดับความสำคัญเท่ากันจึงทำงานเท่าๆกัน



รูปที่ 2.25 การแบ่งการทำงานของทาสก์[26]

### 2.5.6 ลำดับความสำคัญของทาสก์

พารามิเตอร์ `uxPriority` ของฟังก์ชัน `xTaskCreate()`; นั้นได้กำหนดให้มีการกำหนดค่าลำดับความสำคัญของทาสก์ค่าลำดับความสำคัญนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้หลังจากมีการสร้างทาสก์ไปแล้วซึ่งสามารถกำหนดค่าได้ผ่านทางฟังก์ชัน `vTaskPrioritySet()`; ค่าที่มากที่สุดของลำดับความสำคัญสามารถกำหนดได้โดยที่ FreeRTOS ไม่ได้มีการจำกัดค่าสูงสุดไว้แต่ค่าที่ต่ำที่สุดคือค่า 0 นั่นคือหากทาสก์ใดกำหนดให้มีลำดับความสำคัญเป็น 0 ทาสก์นั้นจะได้รับการรันน้อยที่สุดตัวจัดการตารางเวลาจะทำการเลือกทาสก์ที่มีการกำหนดลำดับความสำคัญไว้มากกว่าเข้าสู่สถานะทำงานบ่อยกว่าทาสก์ที่มีลำดับความสำคัญน้อยถ้าหากมีทาสก์ใดที่มีการกำหนดลำดับความสำคัญไว้เท่ากันตัวจัดการตารางเวลาจะผลัดทาสก์ให้เข้าสู่สถานะทำงานกันและกันแต่ละทาสก์จะทำงานภายใต้เวลาที่เรียกว่าไทม์สไลด์ "Time Slice" ถ้าหากหมดเวลาก็จะเข้าสู่สถานะไม่ทำงานเพื่อให้ตัวจัดการตารางเวลาสามารถเลือกทาสก์ต่อไปมาทำงานเมื่อหมดเวลาไทม์สไลด์จำเป็นจะต้องมีอินเทอร์รัพท์ (Interrupt) เกิดขึ้นเป็นคาบเวลาซึ่งเราจะเรียกว่า "Tick Interrupt" ระยะเวลาของไทม์สไลด์ขึ้นอยู่กับเรตติ้งค่าความถี่ของ Tick Interrupt ซึ่งโดยปกติการตั้งค่าจะเป็นค่า Tick Interrupt มีค่า 100 Hz จะมีค่าประมาณ 10 มิลลิวินาที



รูปที่ 2.26 การจัดการทาสก์ด้วย Tick Interrupt[26]

ในการเกิด Tick Interrupt แต่ละครั้งจะมีการบันทึกค่าในตัวแปร `Tick_count` เสมอเพื่อตรวจสอบจำนวนการอินเทอร์รัพท์ที่เกิดขึ้น

### 2.5.7 สถานะไม่ทำงาน

จากตัวอย่างการสร้างทาสก์ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการกล่าวถึงทาสก์ที่ไม่ต้องมีการรอการทำงานจากอินพุตต่างๆแต่ทาสก์สามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้เสมอต่อไปจะเป็นการนำเสนอทาสก์อีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเราจะเรียกว่า “Continuous Processing” เป็นทาสก์ที่จะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีสิ่งหนึ่งที่มาขับเคลื่อนให้ทาสก์เข้าสู่สถานะพร้อมที่จะทำงาน (Ready) ก่อนที่ตัวจัดการตารางเวลาจะมาเลือกทาสก์อื่นไปทำงานเพราะตัวจัดการตารางเวลาจะเลือกทาสก์ที่มีลำดับความสำคัญสูงสุดที่พร้อมที่จะรันเสมอฉะนั้นถ้าหากทาสก์ที่มีลำดับความสำคัญสูงสุดไม่สามารถนำมารันได้ตัวจัดการตารางเวลาก็จะนำเอาทาสก์ที่มีลำดับความสำคัญต่ำกว่าที่พร้อมที่จะรันได้มาทำงานแทน

#### 2.5.7.1 สถานะบล็อก (The Blocked State)

ทาสก์ที่รอเหตุการณ์หนึ่งอยู่เพื่อที่รอเปลี่ยนสถานะจะเรียกว่า “Block State” ซึ่งเป็นสถานะย่อยของสถานะไม่ทำงานทาสก์จะเข้าสู่สถานะบล็อกและรอจนกว่าจะมีการเปลี่ยนสถานะใน 2 กรณีคือ

ก. Temporal events เมื่อหมดเวลาหน่วง (Delay)

ข. Synchronization events เกิดจากทาสก์อื่นหมดเวลาหรือเกิดอินเตอร์รัพท์

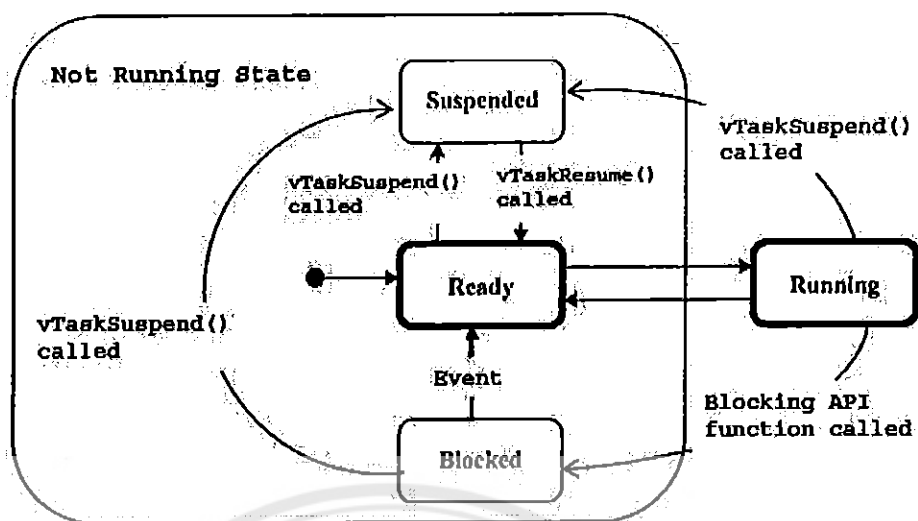
การที่ทาสก์ถูกบล็อกสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของ Synchronization events หมดเวลาส่งผลให้สถานการณ์บล็อกทั้งสองรูปแบบเกิดขึ้นพร้อมกันตัวอย่างเช่นทาสก์หนึ่งมีไทม์สไลต์ในการทำงานสูงสุด 10 มิลลิวินาทีในการรอข้อมูลที่ป้อนเข้ามาจากคิว (Queue) ทาสก์นี้จะออกจากสถานะบล็อกได้โดยการรอข้อมูลจากคิวภายใน 10 มิลลิวินาทีหรือรอจนกว่าจะหมดเวลา 10 วินาทีนั่นเอง

#### 2.5.7.2 สถานะหยุดชั่วคราว (The Suspended State)

สถานะย่อยอีกสถานะหนึ่งในสถานะไม่ทำงานคือสถานะหยุดชั่วคราวทาสก์ที่อยู่ในสถานะนี้จะไม่สามารถถูกเรียกจากตัวจัดการตารางเวลาได้เราสามารถเข้าสู่สถานะหยุดชั่วคราวได้โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน `vTaskSuspend()` เท่านั้นและสามารถออกจากสถานะหยุดชั่วคราวนี้โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน `vTaskResume()` ได้เพียงหนทางเดียวเช่นกันโดยส่วนมากในการเขียนโปรแกรมมักจะไม่ค่อยนิยมให้อยู่ในสถานะหยุดชั่วคราวเท่าใดนัก

#### 2.5.7.3 สถานะพร้อมทำงาน (The Ready State)

สถานะย่อยอื่นๆที่นอกเหนือจากสถานะบล็อกและสถานะหยุดชั่วคราวจะอยู่ในสถานะของพร้อมทำงานซึ่งเป็นสถานะที่พร้อมที่จะรอตัวจัดการตารางเวลาเลือกไปรันเพื่อเข้าสู่สถานะทำงานต่อไปแผนภาพแสดงสถานการณ์ทำงานทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผนภาพสถานะของทาสก์ทั้งหมด[26]

จากโปรแกรมที่ 1 ที่ได้แสดงไปข้างต้นภายในทาสก์มีการเรียกใช้ลูป (Loop) ในการหน่วงเวลาการทำงานของทาสก์ซึ่งเราจะเรียกว่าการทำงานเป็นคาบเวลา “Periodic” ซึ่งการกระทำเช่นนี้อาจจะทำให้เกิด “Null loop” ทำให้แต่ละทาสก์ไม่สามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้เลย เกิดเป็นสภาวะสตาร์เวชันตามมา (Starving) ซึ่งจัดเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งจากการที่เราทำการนับค่าจนถึงค่าที่ต้องการนับเป็นการเปลืองเวลาในการประมวลผลโดยเปล่าประโยชน์ซึ่งเราสามารถใช้งานฟังก์ชัน `vTaskDelay()` แทน `vTaskDelay()` จะทำการเปลี่ยนสถานะทาสก์ที่เรียกเข้าสู่สถานะบล็อกและกำหนดจำนวนในการทำ Tick interrupt เมื่อไหร่ที่ทาสก์นี้อยู่ในสถานะบล็อกจะทำให้ไม่มีการใช้หน่วยประมวลผลในการทำงานซึ่งในการเรียกใช้ฟังก์ชันนั้นระบบเคอร์เนลจะมีการใช้งานทาสก์ที่เรียกว่าทาสก์นิ่งเฉย (Idle Task) ขึ้นมาทำงานซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไปรูปแบบการใช้งานฟังก์ชัน `vTaskDelay()`

```
void vTaskDelay(portTickType xTicksToDelay);
```

โดยที่ `xTicksToDelay` คือจำนวนของ Tick interrupt ในการให้ทาสก์นั้นอยู่ในสถานะบล็อกและเมื่อหมดเวลา Tick interrupt ทาสก์นั้นก็เข้าสู่สถานะทำงานตามเดิม

โปรแกรมที่ 2 ตัวอย่างการทำงานของการใช้งานฟังก์ชัน `vTaskDelay()`

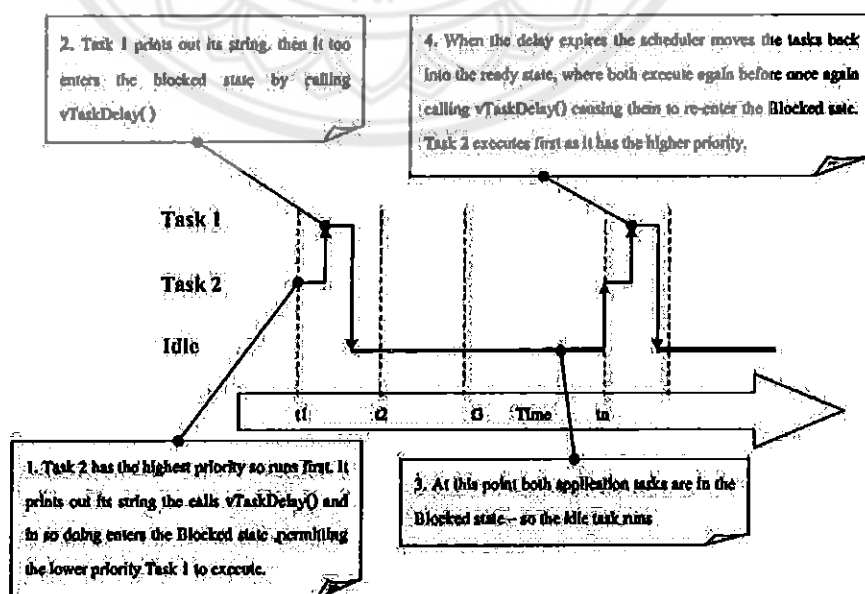
```
void vTask1(void *pvParameters)
{
    const char *pcTaskName = "Task 1 is running\r\n";
    volatile unsigned long ul;
    for(;;)
    {
```

```

        vPrintString(pcTaskName);
    }
}
void vTask2(void *pvParameters)
{
    const char *pcTaskName = "Task 2 is running\r\n" ;
    volatile unsigned long ul;
    for(;;)
    {
        vPrintString(pcTaskName);
        vTaskDelay(250 / portTICK_RATE_MS);
    }
}
int main(void)
{
    xTaskCreate( vTask1 , "Task 1" , 1000 , NULL , 1 , NULL);
    xTaskCreate( vTask2 , "Task 2" , 1000 , NULL , 2 , NULL);
    vTaskStartScheduler();
    for(;;);
}

```

จากตัวอย่างโปรแกรมที่ 2 สามารถอธิบายเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ลำดับขั้นตอนการทำงานของทาสก์และการเรียกใช้งานvTaskDelay() [26]

### 2.5.8 ทาสก์นึ่งเฉยและการใช้งานทาสก์นึ่งเฉย

หน่วยประมวลผลต้องการงานเพื่อเข้าไปรันอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงควรมีทาสก์อยู่อย่างน้อยหนึ่งทาสก์เพื่อให้หน่วยประมวลผลนำไปรันเป็นทาสก์ที่ไม่ได้มีหน้าที่ทำอะไรเลยเพียงแต่มีไว้เพื่อให้หน่วยประมวลผลเรียกใช้ในกรณีที่ไม่มีทาสก์ไหนสามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้ ทาสก์นึ่งเฉยนี้จะถูกกำหนดให้มีค่าลำดับความสำคัญต่ำที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 0 เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้นำทาสก์นี้ไปรันในกรณีที่มีทาสก์อื่นรันอยู่ ถ้าหากทาสก์นึ่งเฉยนี้มีค่าลำดับความสำคัญมากกว่า 0 แล้วจะทำให้ทาสก์อื่นที่มีลำดับความสำคัญต่ำกว่าไม่สามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้เลย

#### 2.5.8.1 การใช้งานทาสก์นึ่งเฉย (Idle Task Hook Functions)

เราสามารถทำการเพิ่มโปรแกรมเข้าไปทำงานภายในทาสก์นึ่งเฉยได้ ซึ่งการเรียกใช้งานทาสก์นึ่งเฉยนี้จะมีชื่อเรียกพิเศษว่า “Hook” หรือ “Call-back” ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันที่ทำงานอัตโนมัติโดยเคอร์เนลของระบบ

ประโยชน์ของการใช้งานทาสก์นึ่งเฉย

ก. เป็นการดำเนินงานภายใต้ลำดับความสำคัญต่ำสุดทำให้เปรียบเสมือนเป็นการทำงานแบบอยู่เป็นพื้นหลัง (Background) ของทาสก์หลักและทาสก์อื่นจะต้องไม่มีลำดับความสำคัญเท่ากับทาสก์นึ่งเฉย

ข. สามารถวัดช่วงเวลาที่หน่วยประมวลผลไม่มีการทำงานได้เนื่องจากทาสก์นึ่งเฉยจะทำงานก็ต่อเมื่อไม่มีทาสก์อื่นสามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้

ค. ช่วยประหยัดพลังงานให้กับหน่วยประมวลผลเนื่องจากไม่มีทาสก์ใดทำงานอยู่ซ้ำซ้อนของการสร้างฟังก์ชันทาสก์นึ่งเฉย

การใช้งานทาสก์นึ่งเฉยจะต้องปฏิบัติตามกฎต่อไปนี้

ก. ทาสก์นึ่งเฉยจะไม่มีโอกาสอยู่ในสถานะบล็อกหรือสถานะหยุดชั่วคราวเนื่องจากจะต้องคอยเข้าสู่สถานะทำงานในกรณีที่ไม่มีทาสก์อื่นสามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้

ข. ถ้าหากโปรแกรมมีการเรียกใช้ฟังก์ชัน `vTaskDelete()` และหลังจากนั้นเคอร์เนลทำการเรียกใช้งานทาสก์นึ่งเฉยจะต้องทำการคืนการทำงานให้กับฟังก์ชัน `vTaskDelete()` มิเช่นนั้นจะไม่สามารถทำการคืนค่าทรัพยากรต่างๆให้กับเคอร์เนลระบบได้

### 2.5.9 การเปลี่ยนค่าลำดับความสำคัญ

หลังจากที่ตัวจัดการตารางเวลาได้มีการเรียกทาสก์นั้นไปใช้งานแล้วเราสามารถเปลี่ยนลำดับความสำคัญของทาสก์ได้โดยผ่านฟังก์ชัน `vTaskPrioritySet()` โดยมีรูปแบบการใช้งานดังนี้

```
Void vTaskPrioritySet(xTaskHandle pxTask, unsigned portBASE_TYPE new)
```

โดยที่ตัวแปร `new` คือค่าลำดับความสำคัญใหม่



### 2.5.10 การลบทาสก์

ในการลบทาสก์เราสามารถเรียกใช้ฟังก์ชัน vTaskDelete() ถ้าหากเราทำการลบทาสก์ไปแล้วทาสก์นั้นจะไม่สามารถเข้าสู่สถานะทำงานได้อีกเลยเนื่องจากการคืนพื้นที่หน่วยความจำต่างๆ ทั้งหมดซึ่งเคอร์เนลของระบบจะจัดการอัตโนมัติเมื่อมีการเรียกใช้ฟังก์ชันนี้ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันมีดังนี้

```
Void vTaskDelete(xTaskHandlepxTaskToDelete);
```

## 2.6 บทสรุป

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของคุณภาพไฟฟ้า, ฮาร์มอนิก, โครงข่ายประสาทดัดเทียม, อนุกรมฟูเรียร์และระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ ซึ่งจะกล่าวถึงที่มา, การเรียนรู้, การนำมาใช้ในโครงการนี้รวมถึงความเกี่ยวข้องของตัวหลักการและทฤษฎีในการที่จะนำมาใช้งานร่วมกันของคุณภาพไฟฟ้า, ฮาร์มอนิก, โครงข่ายประสาทดัดเทียม, อนุกรมฟูเรียร์และระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ นี้จะได้นำมาปรับใช้ในบทต่อไปในการดำเนินงานต่างๆไม่ว่าจะเป็นคุณภาพไฟฟ้า, ฮาร์มอนิก, โครงข่ายประสาทดัดเทียม, อนุกรมฟูเรียร์และระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินโครงการ

จากที่กล่าวมาในบทที่ 2 คณะผู้จัดทำโครงการได้ศึกษาข้อมูลข้างต้นคือคุณภาพไฟฟ้า, ฮาร์มอนิก, โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม, อนุกรมฟูเรียร์ , A/D D/A , FreeRTOS ซึ่งเป็นส่วนในการที่จะนำมาใช้ปฏิบัติในการทำงานชิ้นนี้ขึ้นมาในบทนี้คณะผู้จัดทำโครงการจะกล่าวถึงรายละเอียดการดำเนินโครงการโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ภาพรวมของระบบจะบอกถึงภาพรวมของระบบว่าประกอบด้วยอะไรบ้างใช้โมดูลอะไรในการสร้างระบบขึ้นมาแต่ละส่วนสัมพันธ์กันอย่างไรและระบบมีการทำงานอย่างไร
2. การดำเนินงานของระบบโครงการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม

#### 3.1 ภาพรวมของระบบ (System Overview)

ในการวัดคลื่นฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้านี้ก็จะประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์, วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าประกอบไปด้วย วงจรแปลงไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ แปลงเป็น  $\pm 1.2$  โวลต์ กับวงจรยกสัญญาณ 1.2 โวลต์ และวงจรแปลงไฟฟ้าไฟเลี้ยงอปแอมป์ขนาด 12 โวลต์ แปลงเป็น  $\pm 12$  โวลต์, บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4DISCOVERY และเมื่อต่อทุกอย่างเข้าด้วยกันแล้วก็จะเป็นการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการทำงานกับโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD ซึ่งดูได้จากรูปที่ 3.1

จากนี้แสดงถึงมาตรฐานในการที่ใช้วัดมาตรฐานที่กล่าวมาข้างต้นคือ คุณภาพไฟฟ้า ฮาร์มอนิก พื้นฐานของคุณภาพไฟฟ้า ดังมาตรฐานข้างล่างนี้

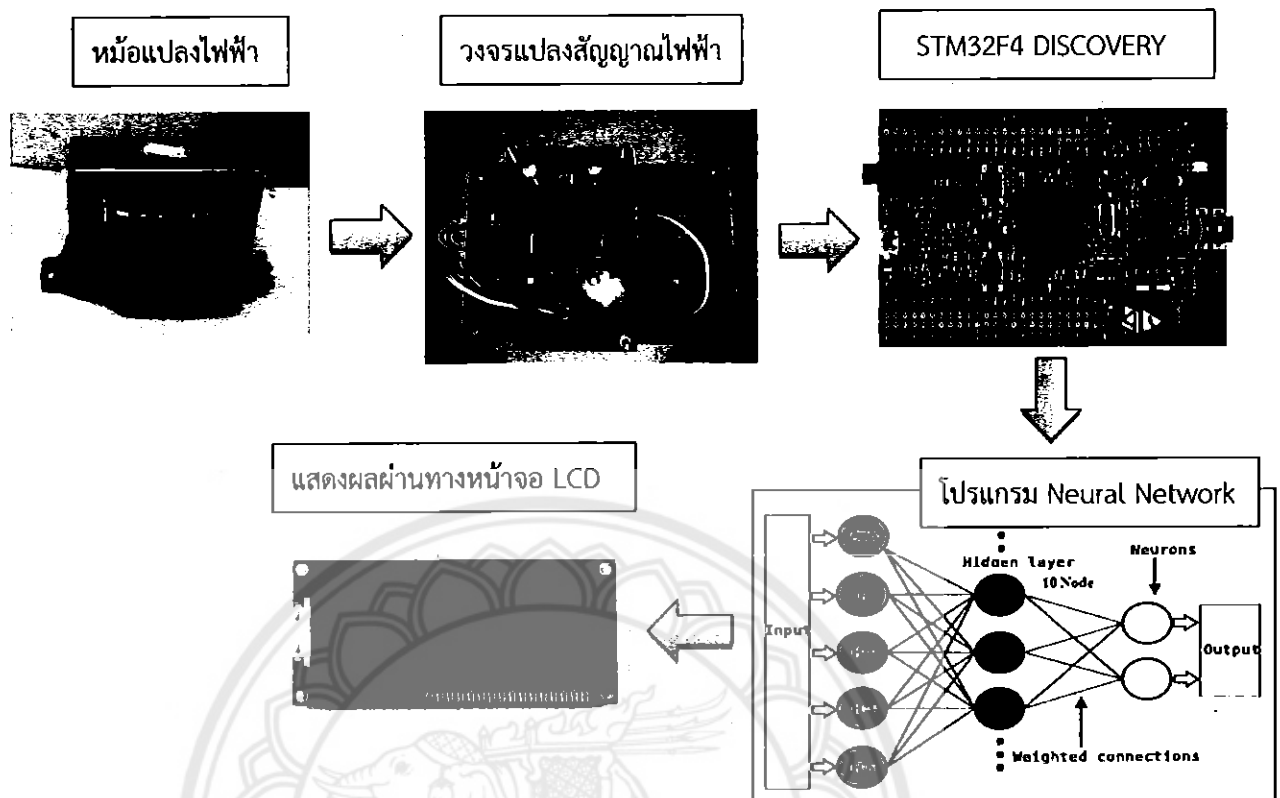
IEEE std 1159-1995 , IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality

IEEE Std. 18-1992 IEEE Standard for Shunt Power Capacitors

Effects of Harmonic on Equipment "IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.8, No.2, April 1993"

IEEE Std. C57.110-1986 Recommended practice for establishing transformer capability when supplying Nonsinusoidal load currents

ส่วนมาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานของ IEEE ในด้านคุณภาพไฟฟ้า, พื้นฐานของคุณภาพไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบ (System Overview)

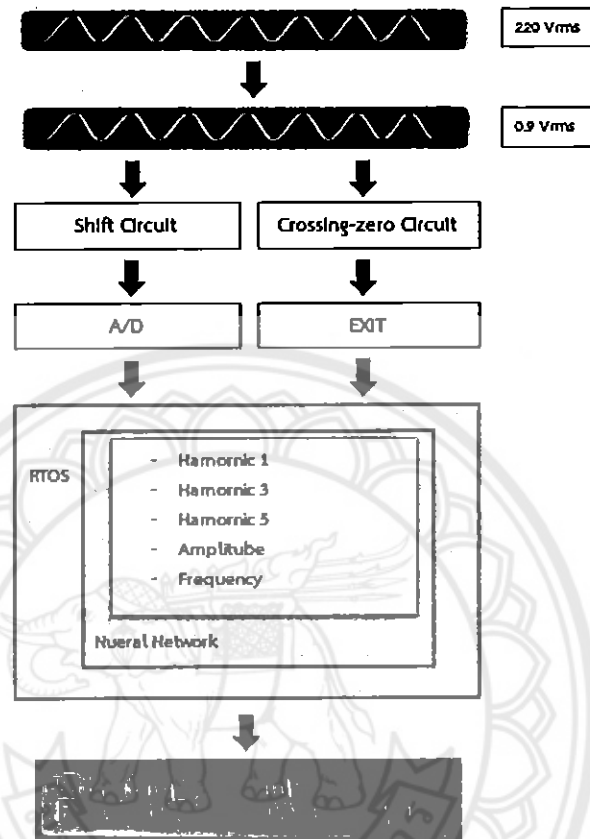
จากรูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบ (System Overview) อธิบายได้ง่ายๆ คือการทำงานทั้งหมดของงานนั้นคือการที่นำไฟฟ้าบ้านทั่วไปต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ แล้วเสียบเข้ากับวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าซึ่งวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้านั้นก็ประกอบไปด้วยวงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์ วงจรยกแรงดันเป็น 2.4 โวลต์ วงจรตัดศูนย์ และวงจรไฟเลี้ยงออฟแอมป์  $\pm 12$  โวลต์ จากนั้นก็เสียบเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY เข้าสู่กระบวนการของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมประมวลผลออกมาแสดงผ่านทางหน้าจอ LCD

### 3.2 การดำเนินงานของระบบโครงข่ายการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม

จากนั้นจะเข้าสู่การดำเนินงานของโครงข่ายการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียมในที่นี้จะกล่าวถึงการดำเนินโครงข่ายทั้งหมดตั้งแต่วิธีการทำวงจรต่างๆ เช่น วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า ส่วนของวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าประกอบไปด้วย

- วงจรลดแรงดัน
- วงจรยกแรงดัน
- วงจรตัดศูนย์
- วงจรไฟเลี้ยงออฟแอมป์

การออกแบบประยุกต์โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม, อนุกรมฟูเรียร์, A/D D/A, และ FreeRTOS ซึ่งจะได้แผนการดำเนินงานของระบบดังรูปที่ 3.2

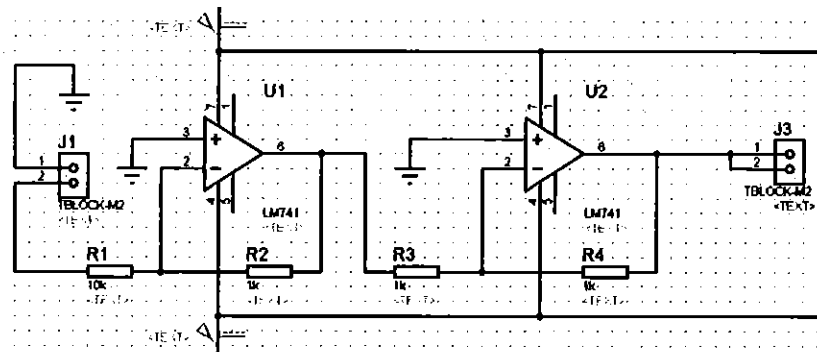


รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานของระบบ

จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงแผนการดำเนินงานของระบบตั้งแต่การแปลงแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ แล้วนำแรงดันไฟฟ้า 9 โวลต์เข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าซึ่งมีวงจรลดแรงดัน, วงจรยกแรงดัน, วงจรตัดศูนย์ และแปลงเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY โดยใช้ A/D เมื่อเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY จะมีการทำงานของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งในการควบคุมหรือใช้งานในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY จะใช้ระบบปฏิบัติการเรียลไทม์ทั้งหมด

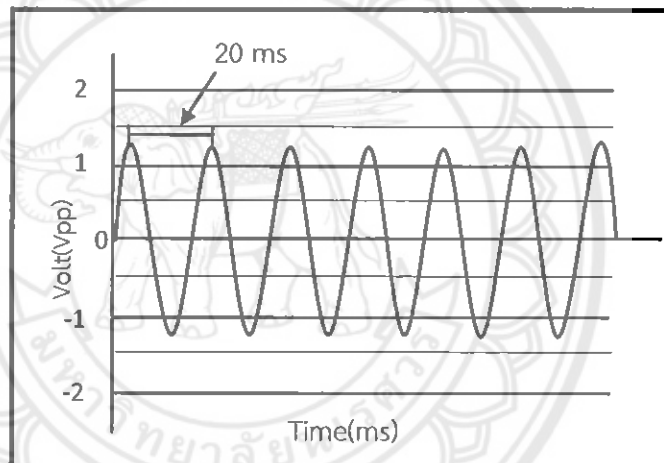
### 3.2.1 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า

วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าจะมีหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์แปลงเป็น 9 โวลต์และประกอบไปด้วยวงจรหลักอยู่ 4 วงจร ประกอบไปด้วย วงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์, วงจรยกแรงดัน จาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์, และวงจรตัดศูนย์ อีกหนึ่งวงจรแยกออกมาคือวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์  $\pm 12$  โวลต์ ซึ่งจะใช้โปรแกรมจำลอง Proteus 7 Professional ในการจำลองวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจะได้วงจรต่างๆดังรูปต่างๆต่อไปนี้



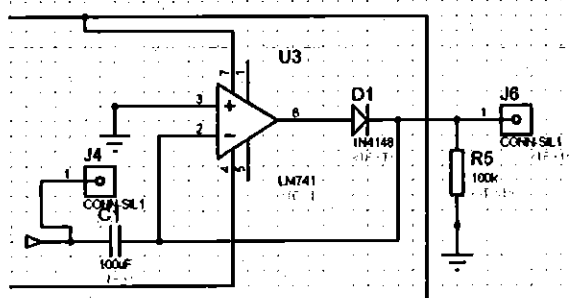
รูปที่ 3.3 วงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์

จากรูปที่ 3.3 เป็นวงจรลดแรงดันไฟฟ้าจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์ ที่ได้ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM741 จำนวน 2 ตัว และตัวต้านทาน 10KΩ จำนวน 1 ตัว กับ 1KΩ จำนวน 3 ตัว ซึ่งได้ผลออกมาตามรูปที่ 3.4



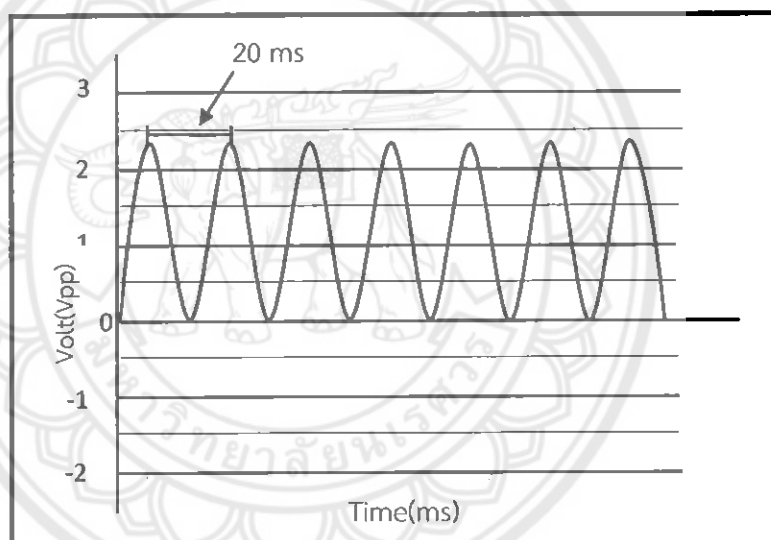
รูปที่ 3.4 แสดงผลของวงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์

จากรูปที่ 3.4 คือผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากการแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ เมื่อต่อเข้ากับวงจรที่ออกแบบมาก็จะทำให้แรงดันนั้นลดลงเหลือ  $\pm 1.2$  โวลต์ เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้และเพื่อที่จะได้ทำการยกแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาให้เป็นบวกทั้งหมดและไม่เกิน 3.3 โวลต์ เพราะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถทำงานได้ถ้าหากไฟฟ้าเป็นลบและเกิน 3.3 โวลต์ จึงต้องมีการออกแบบวงจรยกแรงดันขึ้นดังรูปที่ 3.5



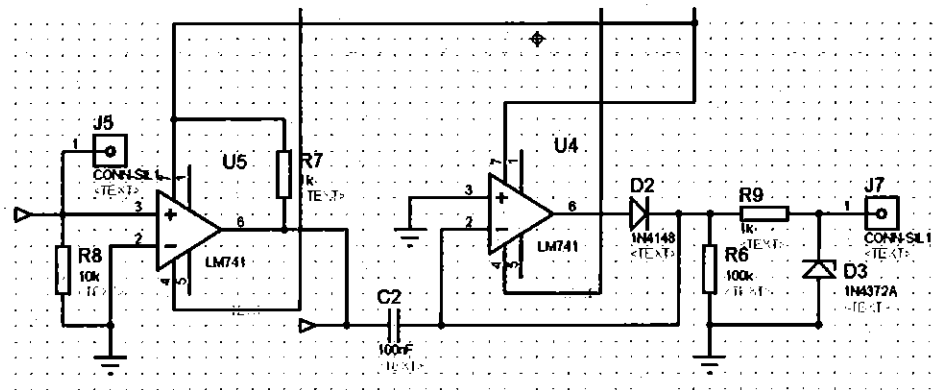
รูปที่ 3.5 วงจรยกแรงดัน จาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์

จากรูปที่ 3.5 เป็นวงจรยกแรงดัน จาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์ที่ออกแบบมา จากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้โอปแอมป์เบอร์ LM741 จำนวน 1 ตัว ไดโอด 1N4148 จำนวน 1 ตัว ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$  จำนวน 1 ตัว และตัวต้านทาน  $100\text{K}\Omega$  จำนวน 1 ตัว ซึ่งได้ผล ออกมาตามรูปที่ 3.6



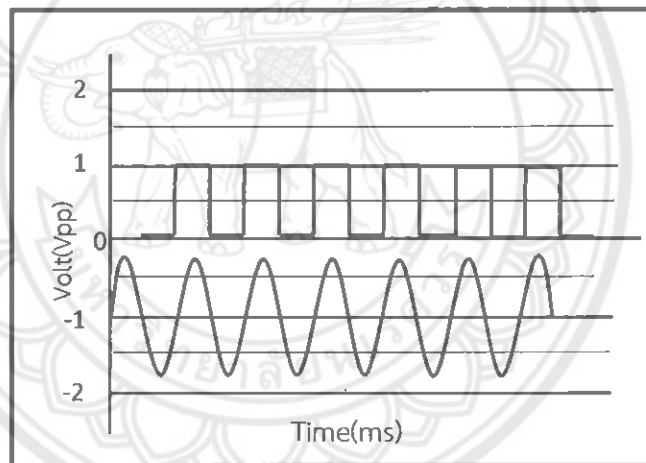
รูปที่ 3.6 แสดงผลของวงจรยกแรงดัน จาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์

จากรูปที่ 3.6 คือผลลัพธ์ที่ได้จากการยกแรงดันไฟฟ้าจากวงจรลดแรงดันไฟฟ้า 9 โวลต์ แปลงเป็น  $\pm 1.2$  โวลต์และใช้วงจรยกแรงดันจาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์ เป็นไปตามที่ได้ ออกแบบไว้และเพื่อที่จะได้ทำการยกแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาให้เป็นบวกทั้งหมดและไม่เกิน 3.3 โวลต์ เพราะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถทำงานได้ถ้าหากไฟฟ้าเป็นลบและเกิน 3.3 โวลต์ จึงต้อง มีการยกแรงดันขึ้น



รูปที่ 3.7 วงจรตัดศูนย์

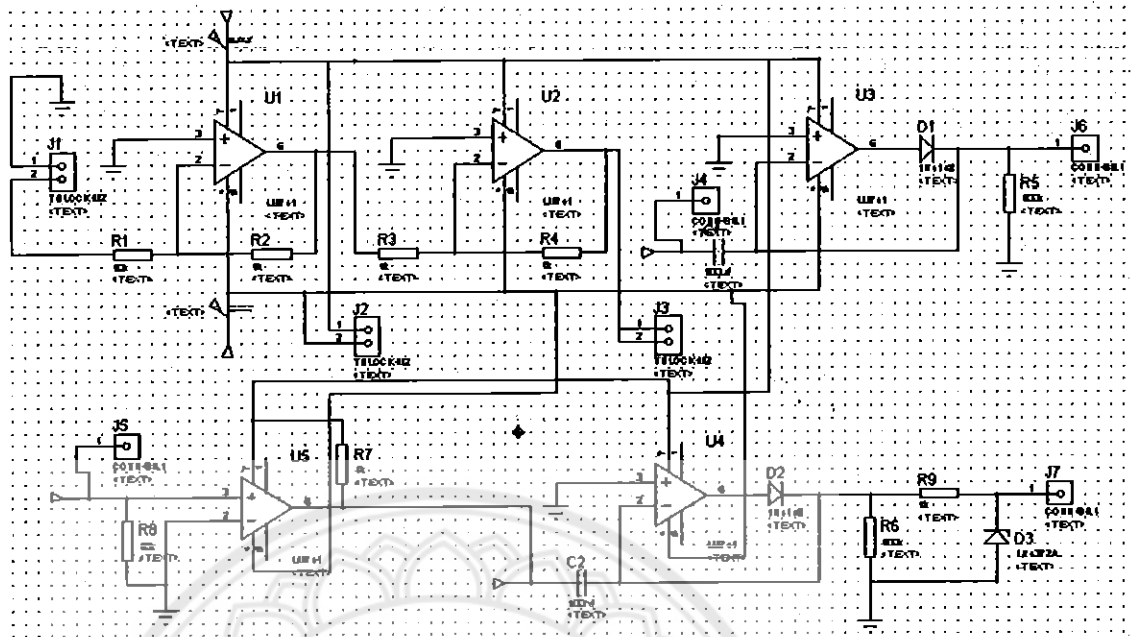
จากรูปที่ 3.7 เป็นวงจรตัดศูนย์ที่ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้ ออปแอมป์ LM741 จำนวน 2 ตัว ไดโอด 1N4148 จำนวน 1 ตัว ไดโอด 1N4372 จำนวน 1 ตัว (ไดโอดจำกัดแรงดัน 3.3 โวลต์) ตัวเก็บประจุ 100uF จำนวน 1 ตัว และตัวต้านทาน 100KΩ จำนวน 1 ตัว กับ 10KΩ จำนวน 1 ตัว และ 1KΩ จำนวน 2 ตัว ซึ่งได้ผลออกมาตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงผลของวงจรตัดศูนย์

จากรูปที่ 3.8 คือผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรตัดศูนย์ซึ่งตรงกันที่ได้ออกแบบไว้วงจรตัดศูนย์นั้นมีหน้าที่เมื่อมีสัญญาณคลื่นไซน์เข้ามาจะทำหน้าที่ในการหาช่วงของคลื่นเพื่อให้ได้ลูกคลื่นที่เต็มคลื่น ตั้งแต่เริ่มจนจบหนึ่งลูกคลื่นนั้นๆ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการคำนวณในอนุกรมฟูเรียร์เกี่ยวกับฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 1,3,5 และยังช่วยให้จับลูกคลื่นได้ง่ายในการนำมาใช้งานหรือคำนวณ

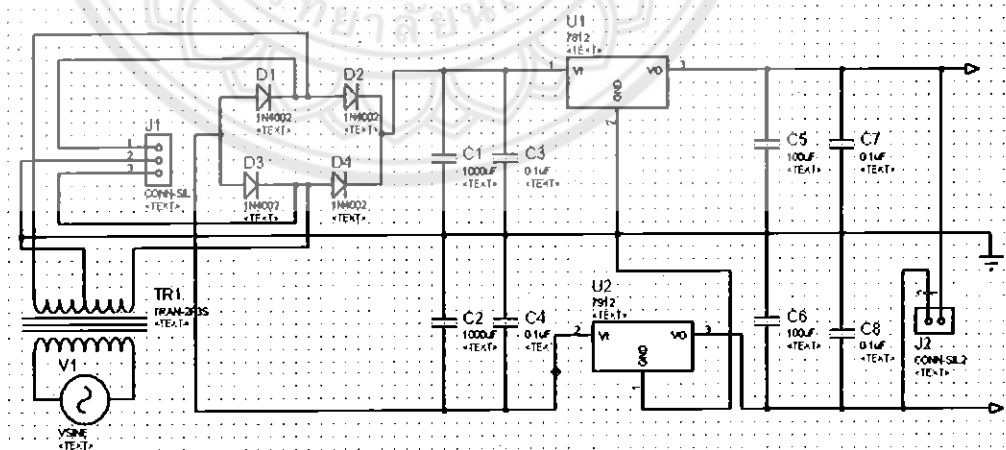
จากวงจรข้างต้นทั้งหมดที่ประกอบไปด้วย วงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์, วงจรยกแรงดัน จาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น +2.4 โวลต์, และวงจรตัดศูนย์ ทางคณะผู้จัดทำโครงการเล็งเห็นว่าควรนำ 3 วงจรนี้มารวมกันเพื่อให้ง่ายต่อการที่จะประกอบชิ้นงานหรือใช้งานจึงนำเอาทั้ง 3 วงจรมารวมเป็น 1 วงจรใหญ่ได้เป็นวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.9 เป็นวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ซึ่งจะประกอบไปด้วย วงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์, วงจรยกแรงดัน จาก ±1.2 โวลต์ แปลงเป็น +2.4 โวลต์, และวงจรตัดศูนย์ ทั้งหมดนี้รวมเข้าด้วยกันเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

มีอีกหนึ่งวงจรที่แยกออกต่างหากคือวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ ±12 โวลต์เพื่อนำมาทำไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์ทั้งหมดที่มีในวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้างี้ดังรูปที่ 3.10

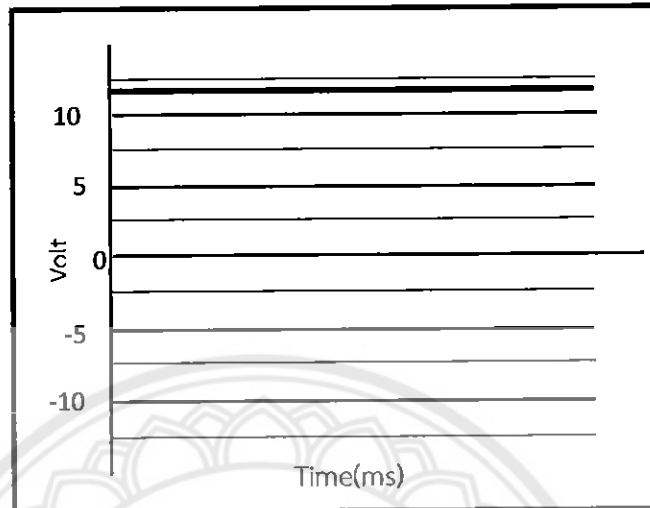


รูปที่ 3.10 วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ ±12 โวลต์

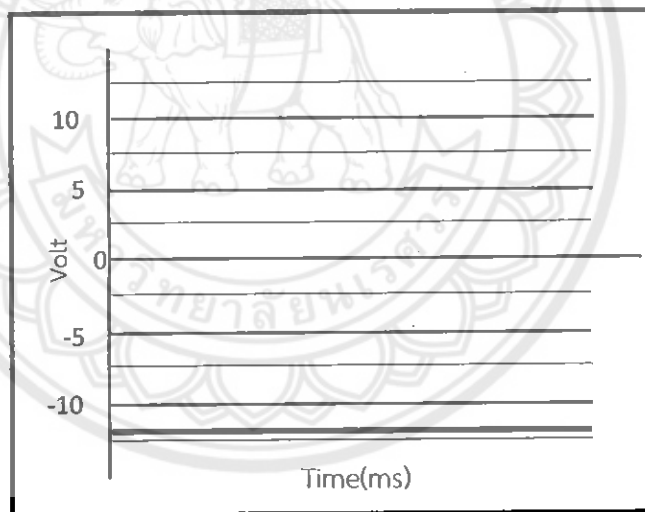
จากรูปที่ 3.10 เป็นวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ ±12 โวลต์ที่ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้ 7812 จำนวน 1 ตัว กับ 7912 จำนวน 1 ตัว ไดโอด 1N4002 จำนวน 4 ตัว ตัวเก็บประจุ 1000µF จำนวน 2 ตัว กับ 100µF จำนวน 2 ตัว และ 0.1µF จำนวน 4 ตัว รวม



ไปถึงแหล่งจ่ายไฟก็คือหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 18 โวลต์ ในการจ่ายไฟเข้าสู่วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ ซึ่งผลที่ได้ออกมาตามรูปที่ 3.11 กับ รูปที่ 3.12



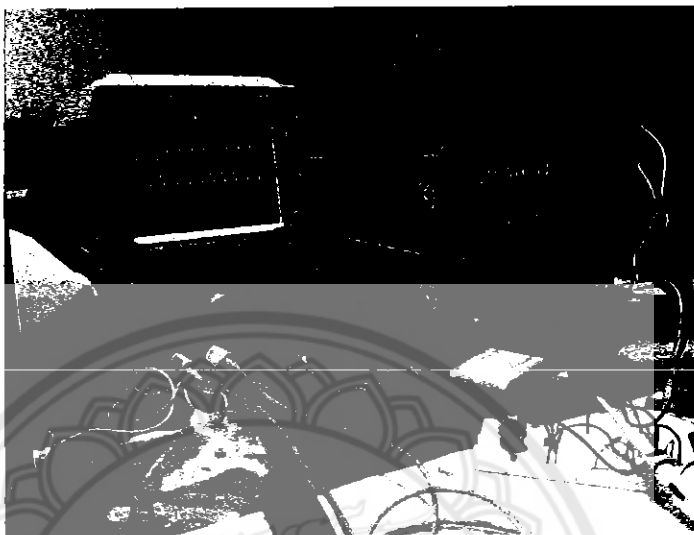
รูปที่ 3.11 แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟบวก 12 โวลต์



รูปที่ 3.12 แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟลบ 12 โวลต์

จากรูปที่ 3.11 กับ รูปที่ 3.12 คือผลลัพธ์ที่ได้ออกมาของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์เป็นแรงดันบวก 12 โวลต์ และลบ 12 โวลต์ สำหรับวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์นี้ทางคณะผู้จัดทำโครงการได้ทำแยกออกมานั้นก็เพราะเพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อเพื่อเลี้ยงไฟฟ้าให้กับออปแอมป์แล้วก็ยังทำให้ใช้งานได้สะดวกด้วยสามารถนำไปต่อกับวงจรอื่นได้ที่ใช้ไฟฟ้าเลี้ยงออปแอมป์เป็นไฟฟ้าแรงดันบวก 12 โวลต์ และลบ 12 โวลต์

หลังจากที่คณะผู้จัดทำโครงการได้ออกแบบวงจรดังกล่าวข้างต้นแล้วจึงนำมาทดสอบ โดยการต่ออุปกรณ์ทั้งหมดลงไฟโต้บอร์ดเพื่อทำการทดลองว่าวงจรที่ได้ออกแบบมานั้นใช้การได้ตามที่ต้องการหรือไม่



รูปที่ 3.13 ทดลองต่อวงจรเข้ากับไฟโต้บอร์ด

จากผลการทดลองที่ได้ออกมานั้นสามารถนำมาใช้ได้กับโครงการการวิเคราะห์คุณภาพ ไฟฟ้าของคณะผู้จัดทำโครงการได้ จากนั้นก็มาสู่ขั้นตอนการนำวงจรทั้งหมดมาทำการลงแผ่นอีพ็อกซี เพื่อทำบอร์ดวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า ขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

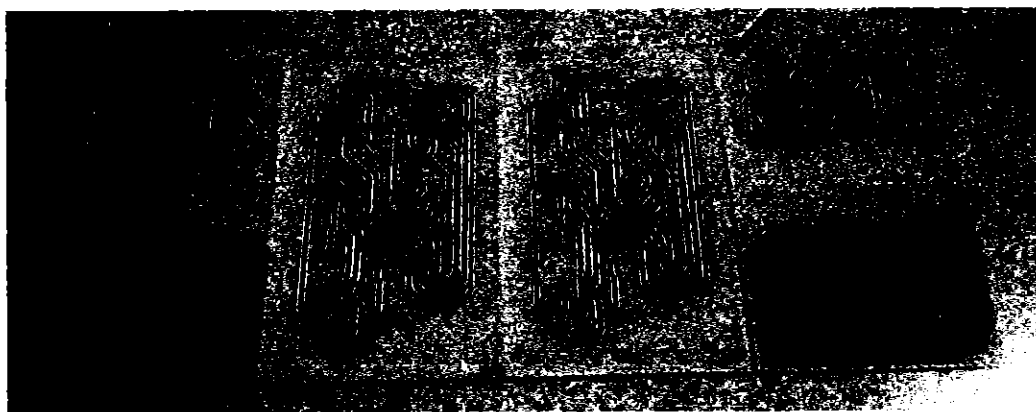
ก. นำลายวงจรที่ออกแบบมาจากโปรแกรมจำลอง Proteus 7 Professional ปริ้น เลเซอร์ใส่แผ่นใส

ข. จากนั้นนำวงจรที่ปริ้นเลเซอร์ลงในแผ่นใสมาทำการรีดโดยใช้เตารีดใช้ไฟอ่อนรีดเข้ากับแผ่นอีพ็อกซีต้องใช้กระดาษรองในการรีดด้วย รีดไปจนกว่าวงจรจะติดเข้ากับแผ่นอีพ็อกซีทั้งหมด โดยสังเกตง่าย ๆ คือกระดาษรองรีดเปลี่ยนสีไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน

ค. จากนั้นก็นำมาเข้าสู่ขั้นตอนการกัดปริ้น โดยใช้น้ำยากัดปริ้นที่หาซื้อได้ตามร้านค้า อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป นำมาผสมกับน้ำเปล่าอัตรา 1:1 แล้วเทลงในถาดที่เตรียมไว้แล้วทำการเขย่าเพื่อ ทำให้น้ำยากัดกร่อนดียิ่งขึ้น ทำการเขย่าจนกว่าจะกัดทองแดงที่ไม่ใช่ลายวงจรออกจนหมด

ง. เมื่อกัดทองแดงออกมาจนหมดแล้วก็นำแผ่นอีพ็อกซีที่ได้ไปล้างน้ำเปล่าเพื่อล้างน้ำยากัดปริ้นออกแล้วนำมาเช็ดให้แห้งจากนั้นนำทินเนอร์มาเช็ดหมึกที่ทำการรีดไว้ในตอนต้นออก

จ. จากนั้นก็จะได้บอร์ดแปลงสัญญาณไฟฟ้ามาเพื่อทำการบัดกรีแต่ก่อนที่จะทำการ บัดกรีนั้นจะต้องทำการเจาะรูเพื่อนำไอซี, ไดโอดหรือตัวต้านทาน ฯลฯ มาบัดกรีติดกับบอร์ดได้จะได้ บอร์ดแปลงสัญญาณไฟฟ้าดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรที่ทำการกักปรีนเรียบร้อย

จากรูปที่ 3.14 เป็นการกักปรีนโดยใช้เตารีดรีดแผ่นใสกับแผ่นอีพ็อกซีด้วยความร้อนอ่อนจากนั้นก็นำมาคัดกรองโดยใช้น้ำยากักปรีนผสมกับน้ำเปล่าอัตราส่วน 1:1 แล้วทำการเขย่าแผ่นอีพ็อกซีในกล่องพลาสติกจนทองแดงที่เกาะอยู่รอบนอกกลายวงจรหลุดออกจนหมดจึงนำมาล้างน้ำยากักปรีนออกแล้วเช็ดหมึกออกด้วยทินเนอร์และนำส่วนเล็กมาเจาะรูเพื่อทำการบัดกรีในขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 3.15

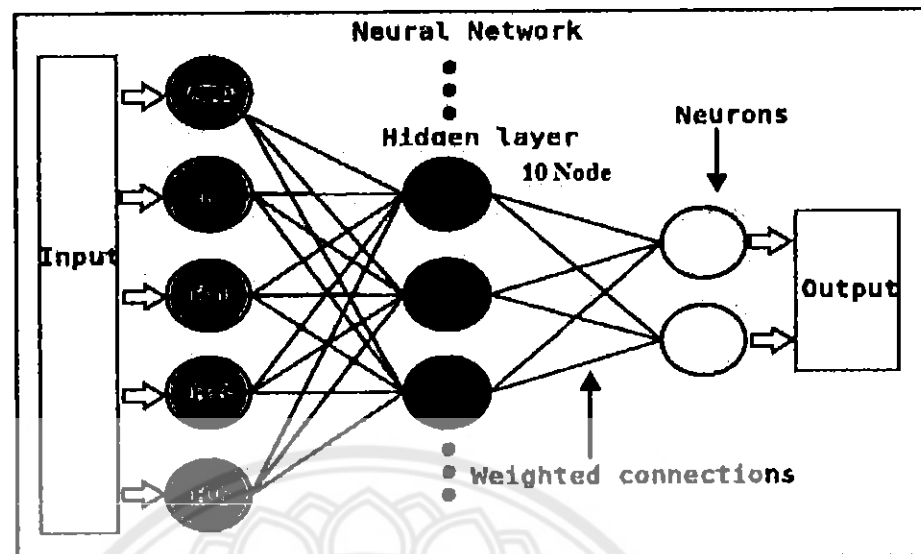


รูปที่ 3.15 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า

จากนั้นก็ทำการบัดกรีไอซี, ไดโอด, ตัวเก็บประจุตัวต้านทาน, ออปแอมป์, หรือชอกเก็ต ฯลฯ เข้ากับบอร์ดให้เรียบร้อยก็จะได้บอร์ดวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้างดรูปที่ 3.15

### 3.2.2 การออกแบบและประยุกต์โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

หลักการในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยผ่านโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมต้องใช้แอมพิจูดและค่าน้ำหนักของข้อมูลที่รับเข้ามา โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการเทรนข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าประมาณการกลางกลางออกมาและจากที่โปรแกรมกำหนดค่าน้ำหนักในการที่จะวัดค่ามาตรฐานฮาร์โมนิกที่จะทำการรับเข้ามาในการทำการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าจากนั้นเมื่อต้องการที่จะทดสอบข้อมูลที่รับเข้ามาก็จะสามารถประมวลผลออกมาได้ว่าข้อมูลที่รับเข้ามานั้นสถานะเป็นเช่นไรตัวอย่างข้อมูลโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างในการคิดโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 3.16 เป็นการอธิบายถึงหลักการทำงานของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งก็คือ เมื่อมีอินพุตเข้ามา(ก็ค่าก็ตาม)จะทำการคูณกับอิตเด็นเลเยอร์ทุกอันในแต่ละอินพุตตามรูป (สามารถกำหนดอิตเด็นเลเยอร์ที่ค่าก็ได้แล้วแต่ผู้ใช้และยังสามารถเพิ่มโหนดของอิตเด็นเลเยอร์ขึ้นมาอีกก็ได้)เมื่อค่าที่รับเข้ามานั้นคูณกับค่าน้ำหนักจากโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมและจะนำค่าที่ได้ นั้นมาคูณกับอิตเด็นเลเยอร์ในแต่ละค่าเรียบร้อยแล้วก็จะได้ค่ามาค่าหนึ่งของแต่ละค่าในโหนดซึ่งก็จะทำหน้าที่เหมือนอินพุตของโหนดต่อไปนั่นเองแล้วก็จะทำซ้ำแบบเดิมไปเรื่อยๆจนกว่าจะครบทุกโหนดเมื่อครบทุกโหนดแล้วก็จะได้ค่ามาค่าหนึ่งซึ่งนั่นคือค่าเอาต์พุตนั่นเอง

### 3.2.3 การใช้อนุกรมฟูเรียร์ช่วยวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในคุณภาพไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในคุณภาพไฟฟ้านั้นจะนำเอาอนุกรมฟูเรียร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์โดย ทฤษฎีฟูเรียร์กล่าวว่า สัญญาณรายคาบใดๆจะประกอบด้วยสัญญาณไซน์ความถี่มูลฐานร่วมกับสัญญาณไซน์ความถี่ เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานโครงงานนี้วัดสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลัง สัญญาณที่วัดไม่ว่าจะเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าล้วนแต่เป็นสัญญาณรายคาบดังนั้นการหาค่าฮาร์มอนิกจึงสามารถใช้ทฤษฎีฟูเรียร์หาค่าตอบได้แต่ด้วยสาเหตุของสัญญาณที่วัดอยู่ในรูปสัญญาณแบบเวลาเต็มหน่วย(Discrete Time)การหาค่าฮาร์มอนิกจึงใช้การคำนวณที่เรียกว่า DFT (Discrete Fourier Transform) สมการมีดังนี้คือสัญญาณฟังก์ชันของเวลาที่ถูกรู้อย่าง

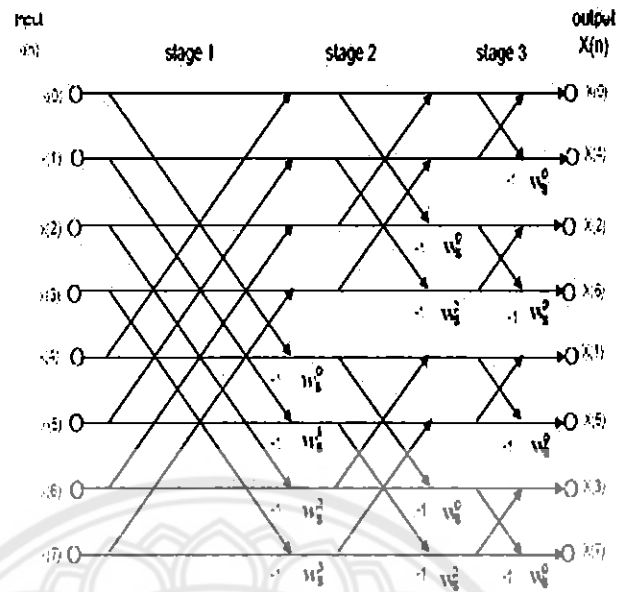
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3.1)$$

โดย  $x(n)$  คือสัญญาณฟังก์ชันของเวลาที่ถูกลูกตัวอย่าง  
 $N$  คือ จำนวนตัวอย่างสัญญาณที่สุ่มในคาบเวลา

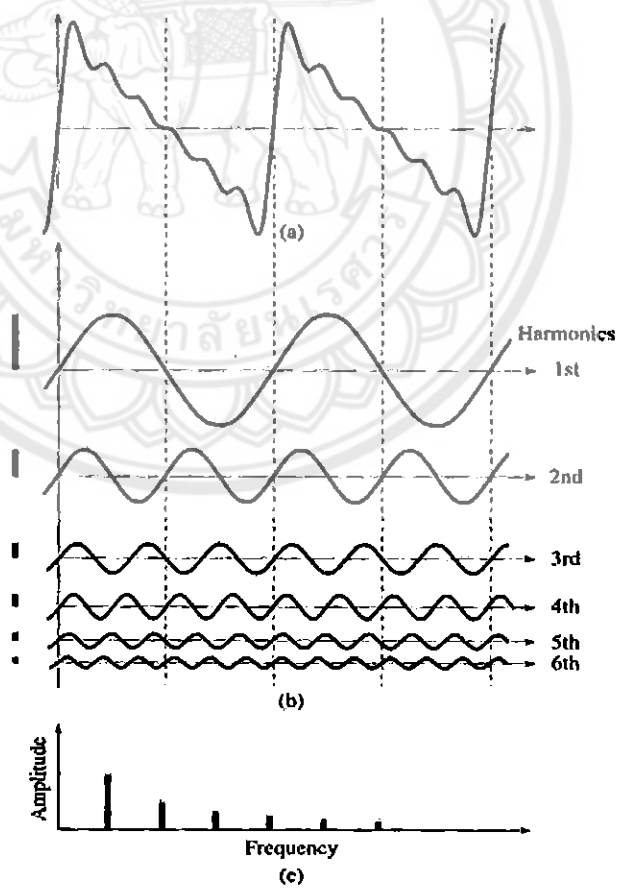
สมการ DFT ข้างต้นสามารถหาค่าฮาร์มอนิกในสัญญาณที่วัดได้ แต่มีจำนวนครั้งในการคำนวณมากจึงทำให้สมการข้างต้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์มีความเร็วในการทำงาน และมีขนาดหน่วยความจำที่จำกัด ดังนั้นการหาค่าฮาร์มอนิกในสัญญาณจึงได้หันไปใช้การคำนวณ FFT (Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นการคำนวณที่สามารถหาค่าตอบได้เร็วกว่า เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการคำนวณน้อยกว่าสำหรับข้อจำกัดในการคำนวณ FFT คือ ต้องมีจำนวนตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลาเป็น  $2^N$  ตัวอย่าง (  $N$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก ) ขั้นตอนและวิธีการคำนวณแสดงในรูป (เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณโดยใช้ จำนวนตัวอย่างสัญญาณ  $2^3$  หรือ 8 ตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลา) สัญญาณขาเข้าจะอยู่ทางซ้ายมือจากนั้นจะผ่านการคำนวณตามลูกศรจนกระทั่งได้คำตอบของแต่ละฮาร์มอนิกทางขวามือ งานวิจัยนี้ใช้จำนวนตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลาเป็น 128 ตัวอย่าง ซึ่งทำให้จำนวนขั้น(Stage)การคำนวณเพิ่มจาก 3 ขั้นเป็น 7 ขั้นการเพิ่มจำนวนตัวอย่างสัญญาณ ทำให้ผลการคำนวณถูกต้องมากขึ้น แต่ผลเสียคือใช้เวลาคำนวณมากและใช้หน่วยความจำมากขึ้นดังนั้นขีดจำกัดของจำนวนตัวอย่างสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ และขนาดของหน่วยความจำ 128 ตัวอย่างสัญญาณเป็นค่าสูงสุดที่เครื่องวัดทำได้) นิยามของ  $W_N^k$  ในภาพเป็นดังนี้

$$W_N^{nk} = e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} \quad (3.2)$$

และแสดงการการคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง[24]



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างของคลื่นไซน์ในฮาร์โมนิกลำดับต่างๆและค่าแอมพิจูดกับความถี่[16]

จากรูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างของคลื่นไซน์ในฮาร์โมนิกลำดับต่างๆและค่าแอมพิจูดกับความถี่ที่จะเข้ามาในการวิเคราะห์หาฮาร์โมนิกในคุณภาพไฟฟ้าในส่วนของอนุกรมฟูเรียร์ก็จะทำหน้าที่ในการคำนวณและวิเคราะห์ฮาร์โมนิกออกมาดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2

### 3.2.4 การใช้ฟังก์ชันของ A/D D/A (Analog to Digital ,Digital to Analog)

ในส่วนของฟังก์ชัน A/D หรือ Analog to Digital[27]จะเป็นการอ่านค่าเข้ามาเพื่อคำนวณในส่วนของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมและอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้แปลงจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอลนี้มาใช้ในส่วนของ การคำนวณต่างๆไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์หาฮาร์โมนิก การคำนวณของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมในการรับอินพุตเข้ามานั้นเอง ส่วนของ D/A หรือ Digital to Analog นั้นจะเป็นส่วนของการที่จะรับคำสั่งสัญญาณรบกวนมาเพื่อทำการเทรนให้กับข้อมูลของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมเพราะจะต้องเก็บข้อมูลในส่วนที่มีสัญญาณเข้ามารบกวนเพื่อแยกแยะในการหาคุณภาพของฮาร์โมนิกในคุณภาพไฟฟ้าที่ดี

### 3.2.5 การใช้ระบบปฏิบัติการแบบตามเวลาจริง (FreeRTOS หรือ Real Time Operating System)

ระบบปฏิบัติการ FreeRTOS เป็นระบบปฏิบัติการสำหรับอุปกรณ์สมองกลฝังตัวโดยสามารถใช้ได้ในหลากหลายไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่เป็นโอเพ่นซอร์ส (OpenSource) ทำให้สามารถมีการปรับปรุงเคอร์เนล (Kernel) ของระบบได้และเป็นการง่ายต่อผู้ใช้ในการนำไปพัฒนาโปรแกรมถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีขนาดค่อนข้างเล็กภายในเคอร์เนลของระบบประกอบด้วยไฟล์ภาษาซีเพียง 3-4 ไฟล์เท่านั้นทำให้อ่านง่ายควบคุมและปรับปรุงประสิทธิภาพต่างๆได้อย่างง่ายรวมทั้งมีตัวอย่างการออกแบบและการใช้งานให้ศึกษา

คุณลักษณะเด่นของ FreeRTOS

- 1) มีโครงสร้างที่เล็กและง่ายต่อการใช้งาน
- 2) การจัดการเวลาต่างๆสามารถเลือกตั้งค่าได้ทั้งเป็นแบบ Preemptive หรือ Cooperation operation
- 3) สามารถรองรับได้ในหลายภาษาและควบคุมทาสก์ (Task) และสแต็ก (Stack) ได้ง่ายทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็นว่าการนำมาใช้นั้นจะง่ายต่อการควบคุมและใช้งานมากขึ้นกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.3 บทสรุป

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงการดำเนินงานทั้งหมดซึ่งอันดับแรกจะกล่าวถึงภาพรวมของระบบ (System Overview) ว่าระบบนั้นมีองค์ประกอบอะไรและมีหลักการทำงานอย่างไรจากนั้นจะกล่าวถึง วงจรแปลงกระแสไฟฟ้าว่าในวงจรมีอะไรบ้างและทำอะไรได้ ต่อมาก็การเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าคุณภาพไฟฟ้าผ่านทางวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมา ประมวลผลและส่งไปให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY ว่ามีคุณภาพ ฮาร์มอนิก เป็นอย่างไรเริ่มจากหม้อแปลงไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 9 โวลต์ นำมาต่อกับวงจรแปลง สัญญาณไฟฟ้าเป็น 1.2 โวลต์ และยกแรงดันสัญญาณไฟฟ้าขึ้นให้เป็นบวกอย่างเดียวได้เป็น 2.4 โวลต์ เพื่อนำมาต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY ประมวลผลสัญญาณที่ได้ จากวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า เพื่อตรวจหาคุณภาพสัญญาณฮาร์มอนิกว่าดีหรือไม่





## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

จากบทที่ 3 ที่กล่าวถึงวิธีการทำงานต่างๆของโครงงานนี้ตั้งแต่การทำวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า การออกแบบประยุกต์ใช้งานโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมการใช้อินทรมฟูเรียร์ในการหา ฮาร์โมนิกรวมไปถึงการใช้ A/D D/A ในการอ่านค่าเข้ามาเพื่อในการคำนวณกับการควบคุมและใช้งาน ในเรื่องของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ FreeRTOS มาช่วยในการทำงานของระบบทั้งหมด ส่วน ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาท เทียมว่าผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดหวังและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่โดยจะวิเคราะห์ คุณภาพของฮาร์โมนิกเป็นหลัก

#### 4.1 ต้นแบบของระบบ

ระบบที่พัฒนาขึ้นมาชิ้นนี้คือ การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งก็จะทำ หน้าที่ในการวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยจะคำนึงถึงฮาร์โมนิกที่ 1,3,5 เป็นสำคัญในการวัดคุณภาพไฟฟ้า ใน การประมวลผลนั้นจะทำการประมวลผลโดยการเสียปลั๊กหม้อแปลงเข้ากับปลั๊กไฟทั่วไปเพื่อทำเข้าสู่ วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากนั้นจะถูกส่งต่อมาให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY เข้าสู่กระบวนการของโครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ฟังก์ชันฟูเรียร์ใน การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกที่ 1,3,5 ออกมามีคุณภาพดีหรือไม่ดีแสดงผลผ่านทางหน้าจอแสดงผลLCD

#### 4.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม

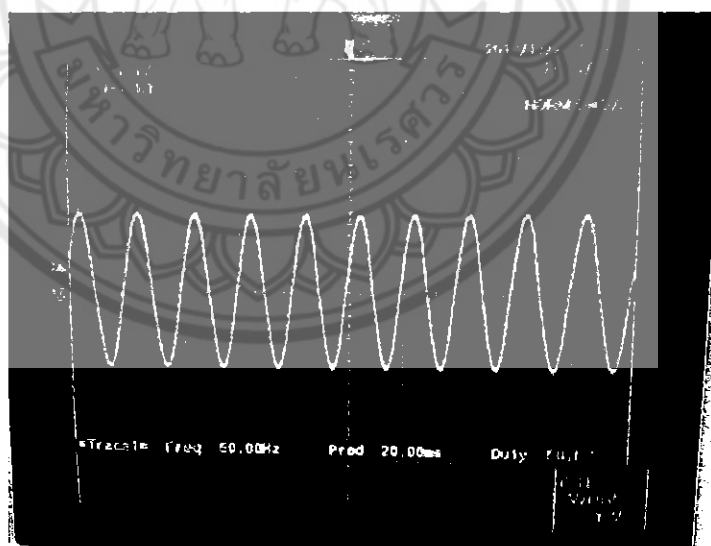
##### 4.2.1 วิธีการทดลองวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า

การทดลองนี้จะเริ่มจากการนำหม้อแปลงขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ ต่อเข้ากับ วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าเพื่อทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY ซึ่งในวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้านั้นก็จะประกอบไปด้วยวงจรหลักๆอยู่ 3 วงจรและวงจร แยกออกมาอีก 1 วงจรนั่นคือ วงจรลดแรงดันของกระแสไฟฟ้าจากที่ออกมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์ เข้าสู่วงจรยกแรงดันของกระแสไฟฟ้าจาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น 2.4 โวลต์ วงจรตัดศูนย์สำหรับวงจรนี้มีไว้เพื่อตัดคลื่นไซน์ว่าเข้ามาทั้งหมดก็ถูกโดยจะเริ่มนับตั้งแต่เมื่อถึง จุดศูนย์นั่นเอง และอีกหนึ่งวงจรที่แยกออกมาคือวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ซึ่งมีหม้อแปลงไฟฟ้าในส่วน นี้ต่างหากขนาด 220โวลต์ แปลงเป็น 18 โวลต์ เมื่อต่อเข้ากับวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์จะได้ไฟเลี้ยง ออปแอมป์ออกมาที่  $\pm 12$  โวลต์ ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.1 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้า

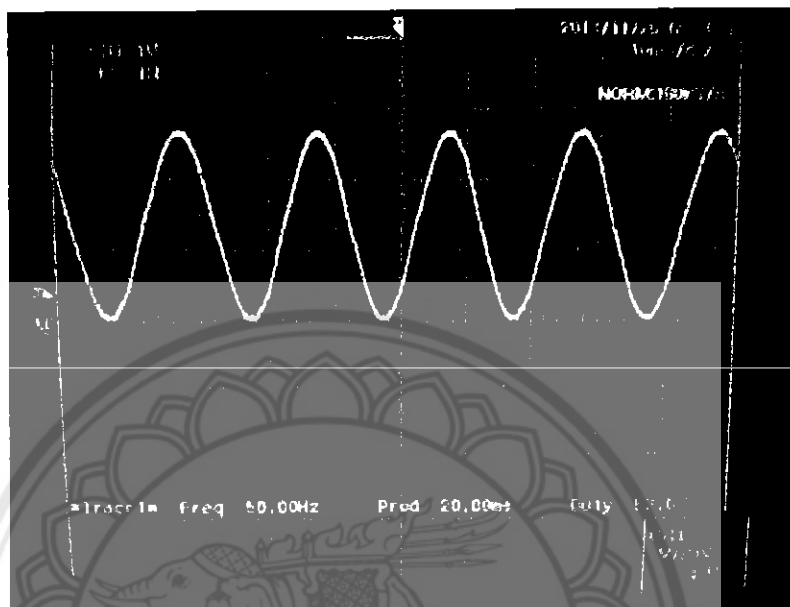
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ามี 3 วงจรย่อย อยู่ในวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้านั้นด้วยซึ่งประกอบไปด้วย วงจรลดแรงดัน วงจรยกแรงดัน และวงจรตัดศูนย์ จากวงจรทางซ้ายบนจากรูปที่ 4.1 เป็นวงจรลดแรงดันไฟฟ้าจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์ ที่ได้ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM741 จำนวน 2 ตัว และตัวต้านทาน 10K $\Omega$  จำนวน 1 ตัว กับ 1K $\Omega$  จำนวน 3 ตัวซึ่งได้ผลออกมาตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงผลของวงจรลดแรงดันจาก 9 โวลต์ แปลงเป็น 1.2 โวลต์จากออสซิโลสโคป

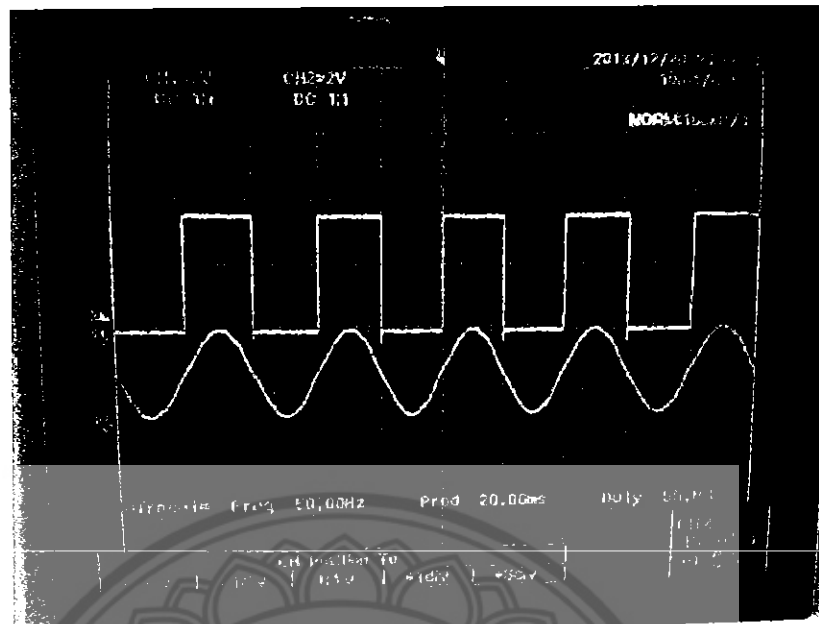
จากรูปที่ 4.2 คือผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากการแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ เมื่อต่อเข้ากับวงจรที่ออกแบบมาก็จะทำให้แรงดันนั้นลดลงเหลือ  $\pm 1.2$  โวลต์ เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้และเพื่อที่จะได้ทำการยกแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาให้เป็นบวกทั้งหมดและไม่เกิน 3.3 โวลต์เพราะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถทำงานได้ถ้าหากไฟฟ้าเป็นลบและเกิน 3.3 โวลต์จึงต้องมีการออกแบบวงจรยกแรงดันขึ้นดังรูปที่ 4.1 ทางขวาบนเป็นวงจรยก

แรงดันจาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์ที่ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้โอปแอมป์เบอร์ LM741 จำนวน 1 ตัว ไดโอด 1N4148 จำนวน 1 ตัว ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$  จำนวน 1 ตัว และตัวต้านทาน  $100\text{K}\Omega$  จำนวน 1 ตัวซึ่งได้ผลออกมาตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงผลของวงจรยกแรงดัน จาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์ที่วัดจากออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 4.3 คือผลลัพธ์ที่ได้จากการยกแรงดันไฟฟ้าจากวงจรลดแรงดันไฟฟ้า 9 โวลต์ แปลงเป็น  $\pm 1.2$  โวลต์ และใช้วงจรยกแรงดันจาก  $\pm 1.2$  โวลต์ แปลงเป็น  $+2.4$  โวลต์ เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้และเพื่อที่จะได้ทำการยกแรงดันไฟฟ้าขึ้นมาให้เป็นบวกทั้งหมดและไม่เกิน 3.3 โวลต์ เพราะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถทำงานได้ถ้าหากไฟฟ้าเป็นลบและเกิน 3.3 โวลต์ จึงต้องมีการยกแรงดันขึ้น จากรูปที่ 4.1 กลางล่างเป็นวงจรตัดศูนย์ที่ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้โอปแอมป์ LM741 จำนวน 2 ตัว ไดโอด 1N4148 จำนวน 1 ตัว ไดโอด 1N4372 จำนวน 1 ตัว (ไดโอดจำกัดแรงดัน 3.3 โวลต์) ตัวเก็บประจุ  $100\mu\text{F}$  จำนวน 1 ตัว และตัวต้านทาน  $100\text{K}\Omega$  จำนวน 1 ตัว กับ  $10\text{K}\Omega$  จำนวน 1 ตัว และ  $1\text{K}\Omega$  จำนวน 2 ตัวซึ่งได้ผลออกมาตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงผลของวงจรตัดศูนย์จากออสซิลโลสโคป

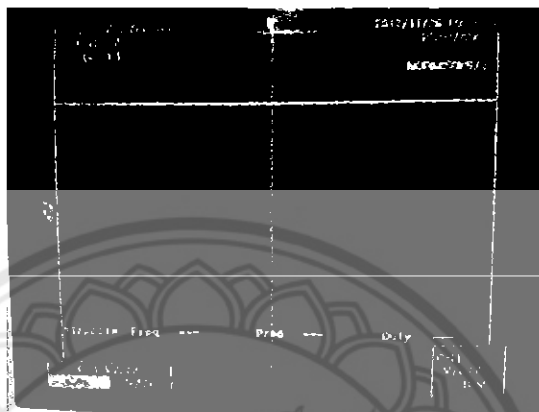
จากรูปที่ 4.4 คือผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรตัดศูนย์ซึ่งตรงกับที่ได้ออกแบบไว้วงจรตัดศูนย์นั้นมีหน้าที่เมื่อมีสัญญาณคลื่นไซน์เข้ามาจะทำหน้าที่ในการหาช่วงของคลื่นเพื่อให้ได้ลูกคลื่นที่เต็มคลื่น ตั้งแต่เริ่มจนจบหนึ่งลูกคลื่นนั้นๆ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการคำนวณในอนุกรมฟูเรียร์เกี่ยวกับฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 1,3,5 และยังช่วยให้จับลูกคลื่นได้ง่ายในการนำมาใช้งานหรือคำนวณ

มีอีกหนึ่งวงจรที่แยกออกต่างหากคือวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์  $\pm 12$  โวลต์เพื่อนำมาทำไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์ทั้งหมดที่มีในวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าดังรูปที่ 4.5

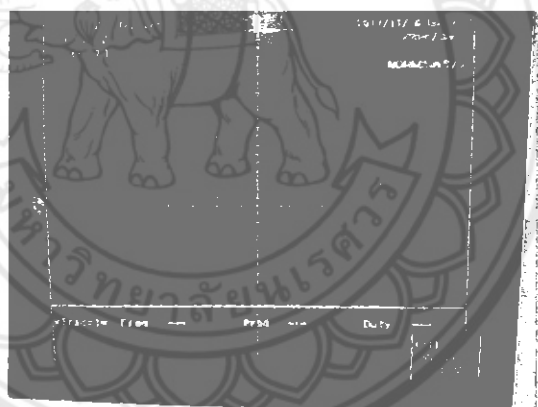


รูปที่ 4.5 วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์

จากรูปที่ 4.5 เป็นวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์  $\pm 12$  โวลต์ที่ออกแบบมาจากโปรแกรม Proteus 7 Professional ใช้ 7812 จำนวน 1 ตัว กับ 7912 จำนวน 1 ตัว ไดโอด 1N4002 จำนวน 4 ตัว ตัวเก็บประจุ 1000 $\mu$ F จำนวน 2 ตัว กับ 100 $\mu$ F จำนวน 2 ตัว และ 0.1 $\mu$ F จำนวน 4 ตัว รวมไปถึงแหล่งจ่ายไฟก็คือหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 18 โวลต์ ในการจ่ายไฟเข้าสู่วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ ซึ่งผลที่ได้ออกมาตามรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



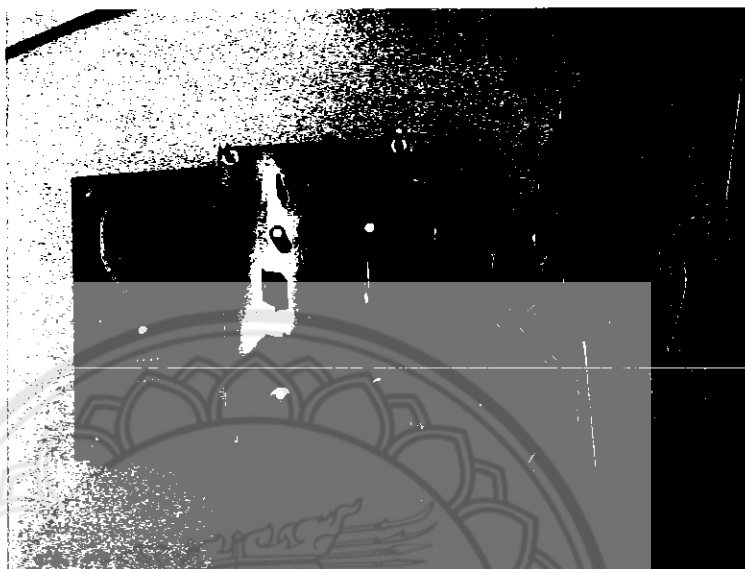
รูปที่ 4.6 แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟบวก 12 โวลต์จากออสซิโลสโคป



รูปที่ 4.7 แสดงผลของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์ไฟลบ 12 โวลต์จากออสซิโลสโคป

จากรูปที่ 4.6 กับ รูปที่ 4.7 คือผลลัพธ์ที่ได้ออกมาของวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์เป็นแรงดันบวก 12 โวลต์ และลบ 12 โวลต์ สำหรับวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์นี้ทางคณะผู้จัดทำโครงการนี้ได้ทำแยกออกมานั้นก็เพราะเพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อเพื่อเลี้ยงไฟฟ้าให้กับออปแอมป์แล้วก็ยังทำให้ใช้งานได้สะดวกด้วยสามารถนำไปต่อกับวงจรอื่นได้ที่ใช้ไฟฟ้าเลี้ยงออปแอมป์เป็นไฟฟ้าแรงดันบวก 12 โวลต์ และลบ 12 โวลต์

เมื่อทำการต่อวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากับวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์เข้ากับหม้อแปลงและทำการต่อวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากับวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์เรียบร้อยแล้วก็จะได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ต่อหม้อแปลงเข้ากับวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าและต่อวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากับวงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าการต่อสายไฟเข้าไปในบอกรันก็คือการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์ดังที่เห็นสายสีแดงและขาวทางด้านขวามือ สีแดงจะเป็นไฟบวก 12 โวลต์ และสีขาวเป็นไฟลบ 12 โวลต์ ส่วนสายไฟทางด้านซ้ายมือนั้นเป็นการจ่ายไฟให้กับวงจรยกแรงดันไฟฟ้าและวงจรตัดศูนย์สายไฟจากทางซ้ายมือสีแดงคือไฟ  $\pm 1.2$  โวลต์ที่จ่ายไปให้วงจรยกแรงดันไฟฟ้า และสีขาวคือไฟ  $\pm 1.2$  โวลต์ที่จ่ายให้กับวงจรตัดศูนย์

จากนี้เป็นการทดสอบไฟฟ้าที่เข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าในส่วนของวงจรลดแรงดันและวงจรยกแรงดันเพื่อยืนยันวงจรว่าใช้ได้จริงและจ่ายแรงดันไฟฟ้าตามที่กล่าวมาข้างต้นหรือไม่ ดังตารางที่แสดงตารางที่ 4.1

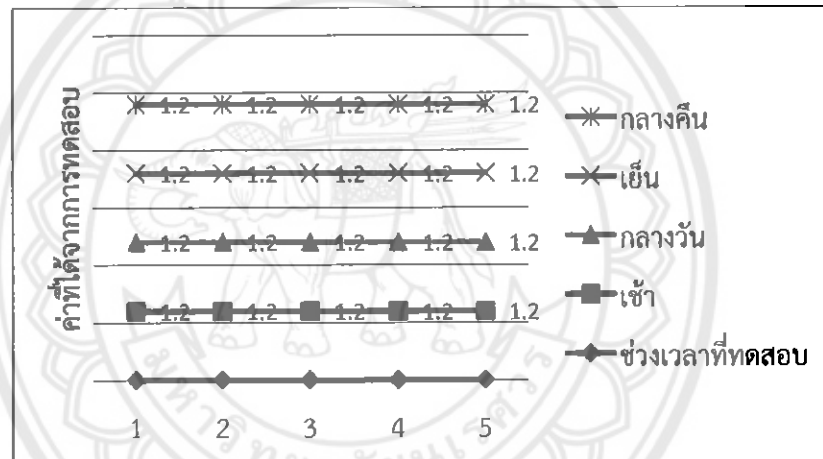
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบของวงจรลดแรงดันที่รับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์

ช่วงเวลาที่ทดสอบ	แรงดันไฟฟ้าที่ออกมา(Vpp)				
	เช้า	1.20	1.20	1.20	1.20
กลางวัน	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
เย็น	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
กลางคืน	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20

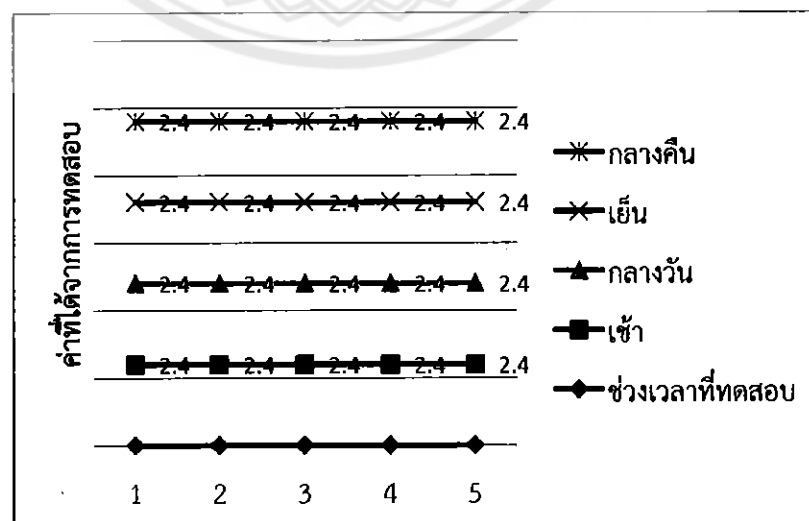
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบของวงจรยกแรงดันที่รับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์

ช่วงเวลาที่ทดสอบ	แรงดันไฟฟ้าที่ออกมา(Vpp)				
เช้า	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
กลางวัน	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
เย็น	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
กลางคืน	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40

จากตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรลดแรงดัน และวงจรยกแรงดันในช่วงเวลาต่างๆผลที่ได้ออกมานั้นมีความเสถียรในทุกช่วงเวลา วงจรลดแรงดัน และวงจรยกแรงดันที่ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นมาทำให้ผลเป็นไปตามที่คาดไว้ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 แสดงถึงช่วงเวลาและค่าที่วัดได้ในวงจรลดแรงดัน



รูปที่ 4.10 แสดงถึงช่วงเวลาและค่าที่วัดได้ในวงจรยกแรงดัน

จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 เป็นแสดงถึงช่วงเวลาและค่าที่วัดได้ในวงจรลดแรงดันและ วงจรยกแรงดันผลที่ได้ออกมาเป็นคือวงจรลดแรงดันจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ ผ่านเข้าสู่วงจรลดแรงดันเหลือ 1.2 โวลต์ตามที่ออกแบบไว้ในตอนแรกที่กล่าวมาและวงจรยกแรงดันสามารถยกสัญญาณไฟฟ้าได้ 2.4 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้ดังที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.2.2 การออกแบบโปรแกรมประยุกต์โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

ต่อมาทำการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY จะทำการเสียบอินพุตเข้าที่ขา PA5, PB2 และสายกราวด์ที่ขา GND ของ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY จากนั้นก็เข้าสู่การดาวน์โหลดโปรแกรมที่เขียน ขึ้นมาลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY โดยในโปรแกรมที่ดาวน์โหลดลงมา นั้นก็มีโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมและโปรแกรมอนุกรมฟูเรียร์นั้นจะมีกระบวนการทำงานดังนี้ หลักการในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยผ่านโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมต้องใช้ค่าแอมพิจูด , ค่าความถี่ ,ค่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 1,3,5 ของข้อมูลที่รับเข้ามา

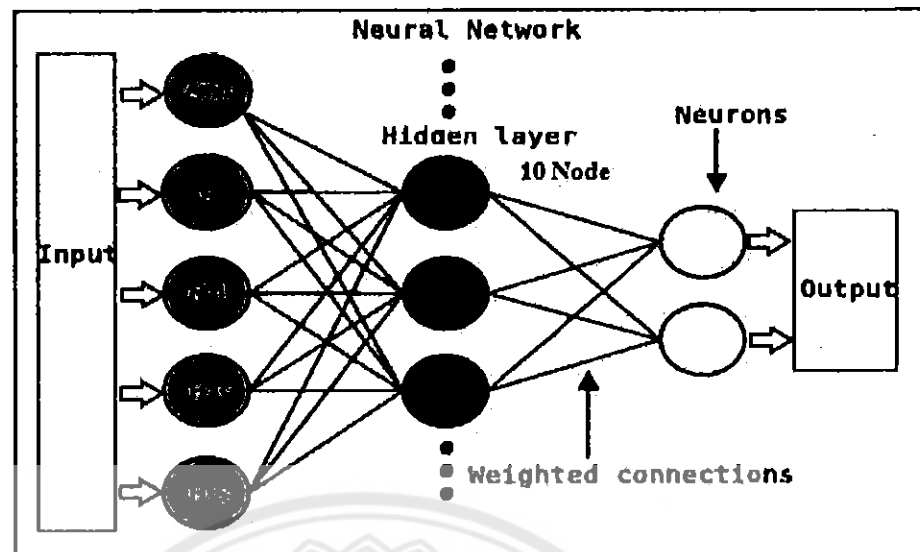
ก่อนที่จะทำการตรวจสอบคุณภาพฮาร์มอนิกในคุณภาพไฟฟ้าในโปรแกรมโครงข่าย ประสาทเทียมจะทำการเทรนข้อมูลเพื่อให้ได้ค่าประมาณการกลางกลางออกมายังมีการเทรนข้อมูล เยอะมากเพียงใดความถูกต้องของการวิเคราะห์ก็จะมากขึ้นตามด้วยจากรูปที่ 4.11

good	1724	1712	1725	1716	1719	1704	1724	1718	1723	1729	1725	1716	1715	1726	1721	1722
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
151	151	442	397	390	468	398	310	395	394	397	371	373	453	352	352	373
11	16	7	4	10	7	12	12	7	7	16	10	2	3	3	2	3
10	8	2	3	3	4	3	6	3	0	4	7	7	6	6	6	7
bad	1714	1718	1743	1712	1714	1720	1712	1720	1713	1725	1706	1704	1724	1744	1718	1718
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
426	346	447	336	368	367	471	435	330	410	412	343	418	418	326	445	445
17	16	18	16	16	11	16	26	16	6	22	23	24	3	14	20	20
6	10	0	11	7	13	13	5	7	4	10	13	12	2	7	7	7
1443	1440	1441	1417	1417	1417	1428	1420	1424	1420	1427	1440	1440	1440	1433	1442	1436
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
474	424	346	473	442	375	296	438	431	406	436	443	470	370	448	468	468
11	8	9	17	16	6	10	11	8	7	16	1	0	15	6	3	3
6	7	0	10	3	3	4	3	4	3	3	5	1	3	0	0	0

รูปที่ 4.11 ข้อมูลที่นำมาใช้เทรนในโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

จากที่โปรแกรมกำหนดค่าน้ำหนักในการที่จะวัดค่ามาตรฐานฮาร์มอนิกที่จะทำการรับเข้ามาในการทำการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าจากนั้นเมื่อต้องการที่จะทดสอบข้อมูลที่รับเข้ามาก็จะสามารถประมวลผลออกมาได้ว่าข้อมูลที่รับเข้ามานั้นสถานะเป็นเช่นไร ตัวอย่างข้อมูลโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมดังรูปที่ 4.12





รูปที่ 4.12 ตัวอย่างในการคิดโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย

จากรูปที่ 4.12 เป็นการอธิบายถึงหลักการทำงานของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่ายซึ่งก็คือ เมื่อมีอินพุตเข้ามาทั้งหมด 5 ค่าจะทำการคูณกับค่าน้ำหนักในแต่ละเส้นและนำผลคูณในแต่ละเส้นมารวมกันแล้วบวกกับไบแอสแล้วนำค่ามาเก็บไว้ในแต่ละโหนดซึ่งในที่นี้ทางคณะผู้จัดทำได้กำหนดไว้ 10 โหนด เมื่อค่าที่รับเข้ามานั้นคูณกับค่าน้ำหนักจากโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมและจะนำค่าที่ได้นั้นมารวมกันในแต่ละเส้นแล้วบวกกับไบแอสในแต่ละโหนดเรียบร้อยแล้วก็จะได้ค่ามาค่าหนึ่งของแต่ละค่าโหนดซึ่งก็จะทำหน้าที่เหมือนอินพุตของโหนดต่อไปนั่นเองแล้วก็จะทำซ้ำแบบเดิมแต่เปลี่ยนเป็น 2 โหนด เมื่อครบทุกโหนดแล้วก็จะได้ค่ามาค่าหนึ่งซึ่งนั่นคือค่าเอาต์พุตนั่นเอง จากนี้จะเป็นการนำค่าน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมนี้ดังรูปที่ 4.13

```
double weightInput[] = {0.307883014358683, 2.43074669151898, -1.85909503138585, 1.91106948147142,
2.92353710456707, -0.794331915949956, 0.945258978947535, -2.45427891403207,
-2.03008086534310, 0.405129870641000, 4.91300404055802, 5.69524429863111,
-5.91717504972267, 1.44858333796055, 0.330761136000492, -7.1868718332876,
-4.07564265998083, -4.58643207891621, 3.49067140190167, -2.71879965793211,
0.153996756472674, -0.967557295823019, 0.179944700483373, -1.43465443582062,
1.79347472913827, 0.886516847455927, 2.33616452558557, 0.0581933985721057,
-1.54422665828592, -1.28852693784367, 2.17920102658072, -1.15442617986049,
1.12575738349288, 0.209694728344172, 2.74491934781976, -1.92129693521990,
-0.332608660091707, -1.86551598779203, 1.62891521703281, -2.05935159469903,
1.42212872970490, 0.998273600677502, 1.18905614842230, -2.64772422563253,
-0.311528649814632, -0.974222646063685, 2.09118935804806, -0.410101913771075,
1.51288108937039, -1.36338261461558};

double weightHiddenLayer[] = {-0.828350592317444, -0.649663285081760, 0.464366550638910, 0.46793785711821,
0.709817936761505, 0.716257756194469, 0.862149422677178, 0.880460246848327,
-0.466753203753910, -0.470361179631777, -0.416124928945121, -0.409707870244980,
0.506162101396857, 0.518714477766340, 0.320282722514566, 0.311505786540170,
0.236522126200560, 0.267486198022911, -0.460816674077596, 0.873768223701664};

double bias[] = {-9.75814805148033, -6.67543832383550, 4.85669066820268, -0.496023972672106,
-2.70164625534481, 7.46641701207256, 0.290882226018359, 7.82307147332006,
-3.28163554941086, 8.59103881490951};

double bias2[] = {1.29711468807322, 0.179967383121939};
```

รูปที่ 4.13 ค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดต่างๆของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงค่าน้ำหนักในแต่ละโหนดต่างๆของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม จากโปรแกรม MatLAB ซึ่งค่าน้ำหนักเหล่านี้ก็จะนำไปคูณกับอินพุตที่เข้ามาในแต่ละโหนดเมื่อทำการคูณในแต่ละโหนดแล้วก็นำค่าในแต่ละเส้นมารวมกันแล้วบวกเข้าด้วยค่าไบแอสอีกทีหนึ่ง จากนั้นก็จะได้ค่ามาค่าหนึ่งซึ่งค่าที่ได้มานี้ก็จะทำหน้าที่เป็นอินพุตของโหนดต่อไปแล้วจะทำกระบวนการเหมือนที่เคยกล่าวมาแล้วเมื่อซักรุ่นนี้ทำซ้ำไปจนกว่าจะหมดค่าโหนดตามที่กำหนดและก็จะได้ค่าเอาต์พุตออกมาค่าไบแอสที่ได้มานั้นก็มาจากโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมนั้นกำหนดขึ้นมาเหมือนกับค่าน้ำหนักในแต่ละเส้นนั่นเอง

การทดสอบการใช้โหนดที่ไม่เท่ากันในโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

ในการใช้โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถกำหนดโหนดขึ้นมาเองได้ตามต้องการในตัวอย่างที่ยกมานี้เป็นการกำหนดโหนด 3\*2 โหนด, 10\*2 โหนด และ 20\*2 โหนดในการทดสอบหาค่าคุณภาพไฟฟ้าเพื่อต้องการหาว่าการเพิ่มหรือลดโหนดนั้นมีผลอย่างไรกับค่าที่วิเคราะห์ออกมาหรือไม่และต้องการทราบว่า การเพิ่มหรือลดโหนดนั้นต้องใช้โหนดเท่าไรจึงจะเหมาะสมในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลเดียวกันผลที่ได้ออกมาดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบในการเลือกโหนดของโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดสอบ	
โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	ค่าความแม่นยำ(%)
3*2	75.27950311
10*2	85.59006211
20*2	70.1863354

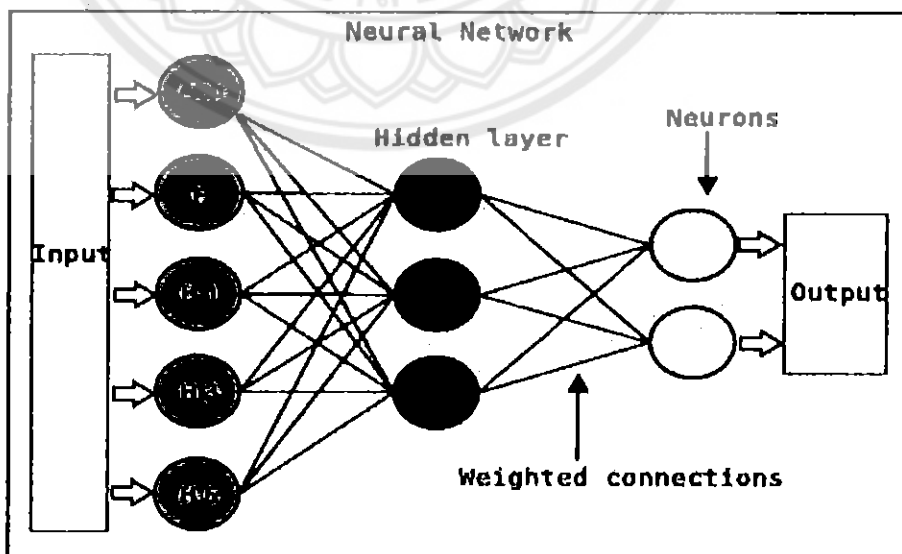
จากตารางที่ 4.3 เป็นผลการทดสอบในการเลือกโหนดของโครงข่ายประสาทเทียมว่าการที่กำหนดโหนดไปนั้นต้องใช้กี่โหนดและโครงสร้างนั้นจะกำหนดรูปแบบโหนดได้จากตารางนี้ได้กำหนดโหนดมาเป็น 3\*2 โหนด, 10\*2 โหนด และ 20\*2 โหนด จากผลการทดสอบได้ว่าโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมนั้น 10\*2 โหนด จะได้ค่าความแม่นยำดีที่สุดในที่นี้ที่ค่าความแม่นยำนั้นมีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำกว่า 90 เป็นเพราะข้อมูลที่ทำการเทรนเข้ามานั้นยังน้อยอยู่จึงทำให้ค่าที่ออกมานั้นจึงยังน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์จากรูปที่ 4.14 นี้เป็นค่าเอาต์พุตที่ออกมาแล้วมีค่าความผิดพลาดหรือความถูกต้องที่ออกมา

	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1
3*2 โหนด	0.704211936 0.70365534	0.709497031 0.708959541	0.677502074 0.677327062	0.709657197 0.708939336	0.665325921 0.665255412	0.697050039 0.696647852	0.673682205 0.67342412	0.684497707 0.684234951
	0	0	0	0	0	0	0	0
10*2 โหนด	0.610157363 0.590403773	0.575072293 0.568584841	0.506585488 0.497068117	0.464950153 0.456955237	0.475719659 0.46951525	0.514829988 0.508311125	0.474666896 0.463625481	0.488050142 0.484501134
	1	1	1	1	1	1	1	1
20*2 โหนด	0.595636479 0.596301435	0.622761376 0.620602322	0.600768054 0.599085572	0.602934129 0.602072553	0.598038707 0.595916181	0.612298408 0.610304644	0.591384289 0.590824665	0.611584307 0.609177291
	1	0	1	0	1	0	1	0

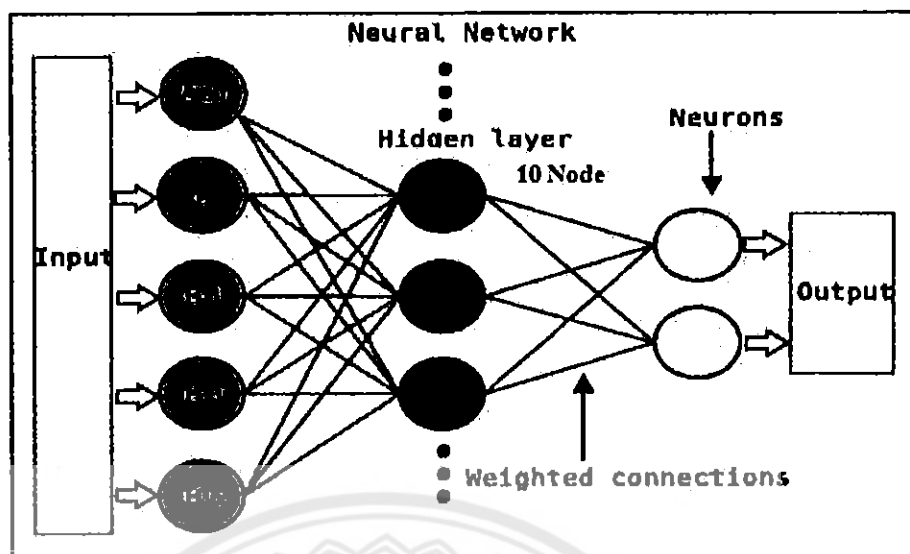
รูปที่ 4.14 ค่าเอาต์พุตของการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมต่างๆและความแม่นยำในการวิเคราะห์

จากรูปที่ 4.14 เป็นการแสดงถึงค่าเอาต์พุตของการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมต่างๆและความแม่นยำในการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ออกมานั้นจะมีความแม่นยำที่แตกต่างกันออกไปของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งสามารถบอกได้ว่าถ้าค่าเอาต์พุตที่ออกมาสองค่านี้ค่าไม่ถึง 0.6 จะถือว่าค่านี้มีความผิดพลาดแต่ถ้าค่านี้มากกว่าหรือเท่ากับ 0.6 จะถือว่าค่านี้มีความถูกต้องดังแสดงให้ดูจากรูปที่ 4.14 ถ้าค่ามีความผิดพลาดจะให้เป็น 1 ถ้าค่ามีความถูกต้องจะให้เป็น 0 ทั้งนี้ก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับว่าการสร้างโหนดขึ้นมาเยอะหรือน้อยแล้วจะทำให้ระบบวิเคราะห์ข้อมูลออกมาดีจะเห็นได้จากตารางที่ 4.3

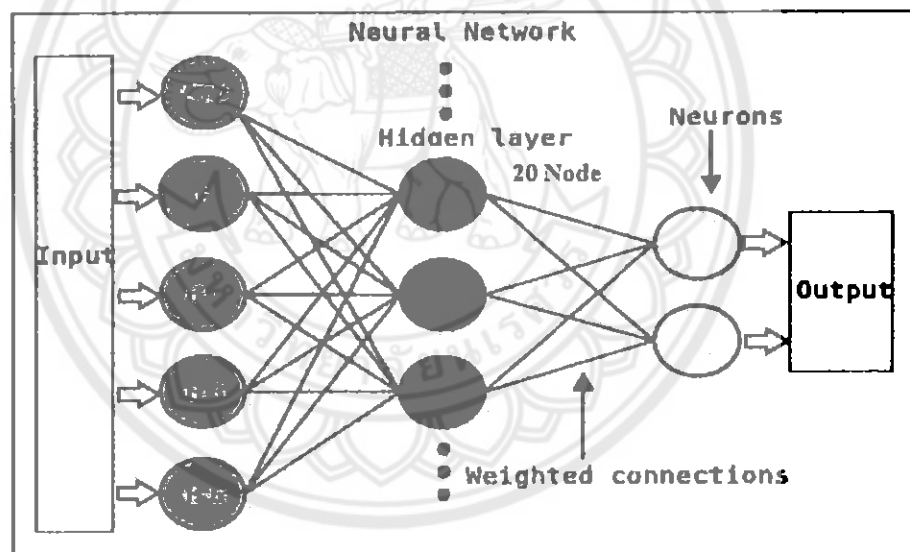
จากนี้เป็นการแสดงถึงรูปโครงสร้างของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมในฮาร์ดแวร์ โหนดต่างๆประกอบไปด้วย 3 โหนด, 10 โหนด, 20 โหนด ดังรูปที่ 4.15, รูปที่ 4.16, รูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบฮาร์ดแวร์ 3 โหนด



รูปที่ 4.16 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบอัดแน่นเลเยอร์โหนด 10 โหนด



รูปที่ 4.17 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบอัดแน่นเลเยอร์โหนด 20 โหนด

จากรูปที่ 4.15, รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงถึงโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบอัดแน่นเลเยอร์โหนด 3, 10, และ 20 โหนด เพื่อแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบมานั้นเป็นเช่นไรและมีอะไรเป็นส่วนประกอบบ้าง

#### 4.2.3 การใช้อนุกรมฟูเรียร์ช่วยวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในคุณภาพไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในคุณภาพไฟฟ้านั้นจะนำเอาอนุกรมฟูเรียร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์โดย ทฤษฎีฟูเรียร์กล่าวว่า สัญญาณรายคาบใดๆจะประกอบด้วยสัญญาณไซน์ความถี่มูลฐานร่วมกับสัญญาณไซน์ความถี่ เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานงานวิจัยนี้วัดสัญญาณในระบบไฟฟ้ากำลัง สัญญาณที่วัดไม่ว่าจะเป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าล้วนแต่เป็นสัญญาณรายคาบดังนั้นการหาค่าฮาร์มอนิกจึงสามารถใช้ทฤษฎีฟูเรียร์หาค่าตอบได้แต่ด้วยสาเหตุของสัญญาณที่วัดอยู่ในรูปสัญญาณแบบเวลาเต็มหน่วย(Discrete Time)การหาค่าฮาร์มอนิกจึงใช้การคำนวณที่เรียกว่า DFT (Discrete Fourier Transform) สมการมีดังนี้คือสัญญาณฟังก์ชันของเวลาที่ถูกลุ่มตัวอย่าง

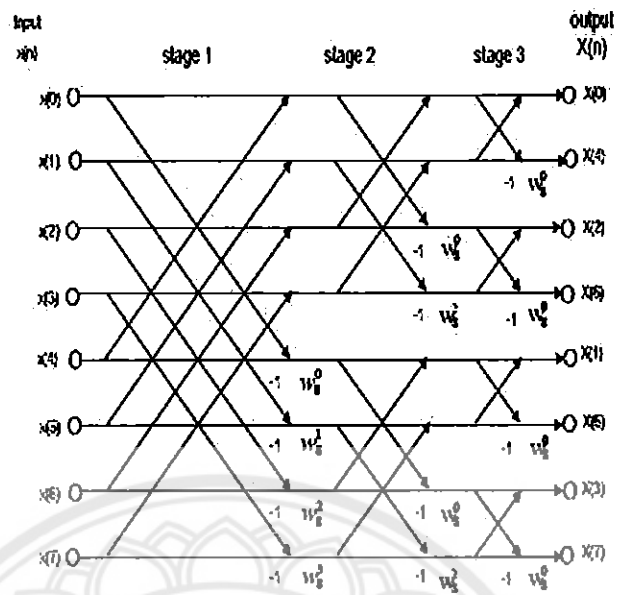
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4.1)$$

โดย  $x(n)$  คือสัญญาณฟังก์ชันของเวลาที่ถูกลุ่มตัวอย่าง  
 $N$  คือ จำนวนตัวอย่างสัญญาณที่ลุ่มในคาบเวลา

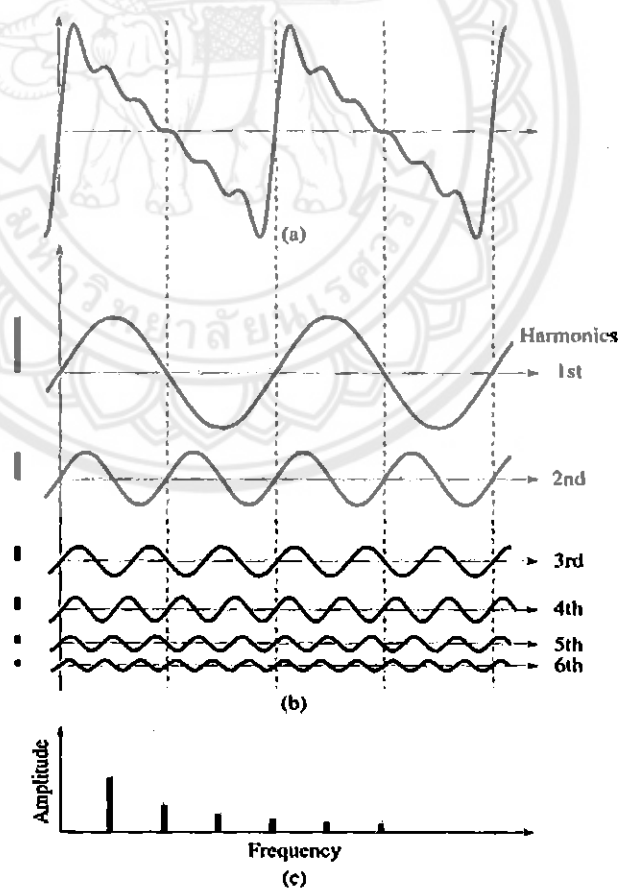
สมการ DFT ข้างต้นสามารถหาค่าฮาร์มอนิกในสัญญาณที่วัดได้ แต่มีจำนวนครั้งในการคำนวณมากจึงทำให้สมการข้างต้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์มีความเร็วในการทำงาน และมีขนาดหน่วยความจำที่จำกัด ดังนั้นการหาค่าฮาร์มอนิกในสัญญาณจึงได้หันไปใช้การคำนวณ FFT (Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นการคำนวณที่สามารถหาค่าตอบได้เร็วกว่า เนื่องจากมีจำนวนครั้งในการคำนวณน้อยกว่าสำหรับข้อจำกัดในการคำนวณ FFT คือ ต้องมีจำนวนตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลาเป็น  $2^N$  ตัวอย่าง (  $N$  เป็นเลขจำนวนเต็มบวก ) ขั้นตอนและวิธีการคำนวณแสดงในรูป ( เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณโดยใช้ จำนวนตัวอย่างสัญญาณ  $2^3$  หรือ 8 ตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลา ) สัญญาณขาเข้าจะอยู่ทางซ้ายมือจากนั้นจะผ่านการคำนวณตามลูกศรจนกระทั่งได้คำตอบของแต่ละฮาร์มอนิกทางขวามือ งานวิจัยนี้ใช้จำนวนตัวอย่างสัญญาณใน 1 คาบเวลาเป็น 128 ตัวอย่าง ซึ่งทำให้จำนวนขั้น(Stage)การคำนวณเพิ่มจาก 3 ชั้นเป็น 7 ชั้นการเพิ่มจำนวนตัวอย่างสัญญาณ ทำให้ผลการคำนวณถูกต้องมากขึ้น แต่ผลเสียคือใช้เวลาคำนวณมากและใช้หน่วยความจำมากขึ้นดังนั้นขีดจำกัดของจำนวนตัวอย่างสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไมโครคอนโทรลเลอร์ และขนาดของหน่วยความจำ 128 ตัวอย่างสัญญาณเป็นค่าสูงสุดที่เครื่องวัดทำได้)นิยามของ  $W_N^{nk}$  ในภาพเป็นดังนี้

$$W_N^{nk} = e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} \quad (4.2)$$

และแสดงการการคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การคำนวณ FFT ตัวอย่างสัญญาณ 8 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างของคลื่นไซน์ในฮาร์โมนิกลำดับต่างๆและค่าแอมพิจูดกับความถี่

จากรูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างของคลื่นไซน์ในฮาร์โมนิกลำดับต่างๆและค่าแอมพิจูดกับความถี่ที่จะเข้ามาในการวิเคราะห์หาฮาร์โมนิกในคุณภาพไฟฟ้าในส่วนของอนุกรมฟูเรียร์ก็จะทำหน้าที่ในการคำนวณและวิเคราะห์ฮาร์โมนิกออกมาดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2

#### 4.2.4 การใช้ฟังก์ชันของ A/D D/A (Analog to Digital ,Digital to Analog)

ในส่วนของฟังก์ชัน A/D หรือ Analog to Digital จะเป็นการอ่านค่าเข้ามาเพื่อคำนวณในส่วนของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมและอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้แปลงจากอะนาล็อกเป็นดิจิตอลนี้มาใช้ในส่วนของการทำงานต่างๆไม่ว่าจะเป็นวิเคราะห์หาฮาร์โมนิก การคำนวณของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมในการรับอินพุตเข้ามานั้นเอง ส่วนของ D/A หรือ Digital to Analog นั้นจะเป็นส่วนของการรับคำสั่งสัญญาณรบกวนมาเพื่อทำการเทรนให้กับข้อมูลของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมเพราะต้องเก็บข้อมูลในส่วนที่มีสัญญาณเข้ามารบกวนเพื่อแยกแยะในการหาคุณภาพของฮาร์โมนิกในคุณภาพไฟฟ้าที่ดี

#### 4.2.5 การใช้ระบบปฏิบัติการแบบตามเวลาจริง(FreeRTOSหรือReal Time Operating System)

ระบบปฏิบัติการ FreeRTOS เป็นระบบปฏิบัติการสำหรับอุปกรณ์สมองกลฝังตัวโดยสามารถใช้ได้ในหลากหลายไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่เป็นโอเพ่นซอร์ส (OpenSource) ทำให้สามารถมีการปรับปรุงเคอร์เนล (Kernel) ของระบบได้และเป็นการง่ายต่อผู้ใช้ในการนำไปพัฒนาโปรแกรมถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีขนาดค่อนข้างเล็กภายในเคอร์เนลของระบบประกอบด้วยไฟล์ภาษาซีเพียง 3-4 ไฟล์เท่านั้น,นทำให้อ่านง่ายควบคุมและปรับปรุงประสิทธิภาพต่างๆได้อย่างง่ายรวมทั้ง,มีตัวอย่างการออกแบบและการใช้งานให้ศึกษา

คุณลักษณะเด่นของ FreeRTOS

ก. มีโครงสร้างที่เล็กและง่ายต่อการใช้งาน

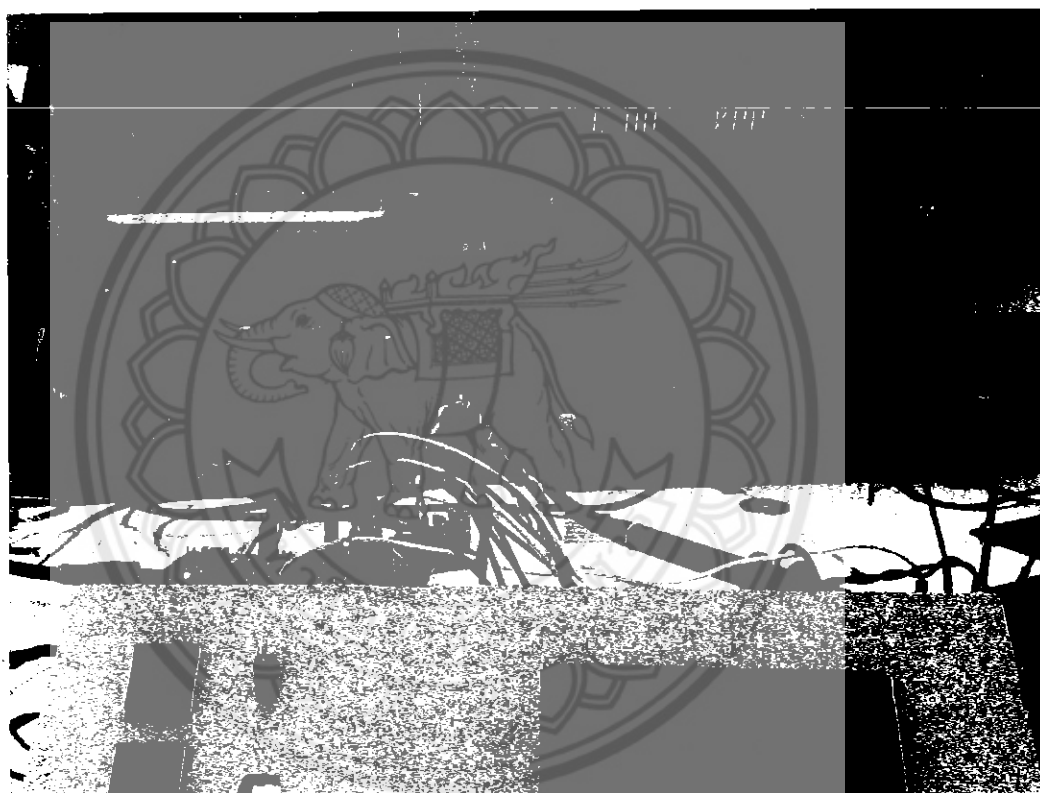
ข.การจัดการเวลาต่างๆสามารถเลือกตั้ง,งค่าได้ทั้งเป็นแบบ Preemptive หรือ Cooperationoperation

ค.สามารถรองรับได้ในหลายภาษาและควบคุมทาสก์ (Task) และสแต็ก (Stack) ได้ง่าย

ทางคณะผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็นว่าการนำมาใช้นั้นจะง่ายต่อการควบคุมและใช้งานมากขึ้นกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และเป็นประโยชน์

#### 4.2.6 ผลการทดลอง

จากการทดลองเบื้องต้นที่กล่าวมานั้นทั้งทางด้านวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่มี วงจรลดแรงดัน, วงจรยกแรงดัน, วงจรตัดศูนย์, และวงจรไฟเลี้ยงอปแอมป์ ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลที่จะนำมาใช้ในการทดลองหาคุณภาพไฟฟ้าผลที่ได้ออกมานั้นตรงตามที่สมมุติฐานไว้จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันโดย การนำหม้อแปลงขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ เข้าสู่ วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าและหม้อแปลงขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 18 โวลต์ เข้าสู่ วงจรไฟเลี้ยงอปแอมป์ และนำไปเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY เข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและแสดงผลผ่านทางหน้าจอแสดงผล LCD ดังรูปที่ 4.20



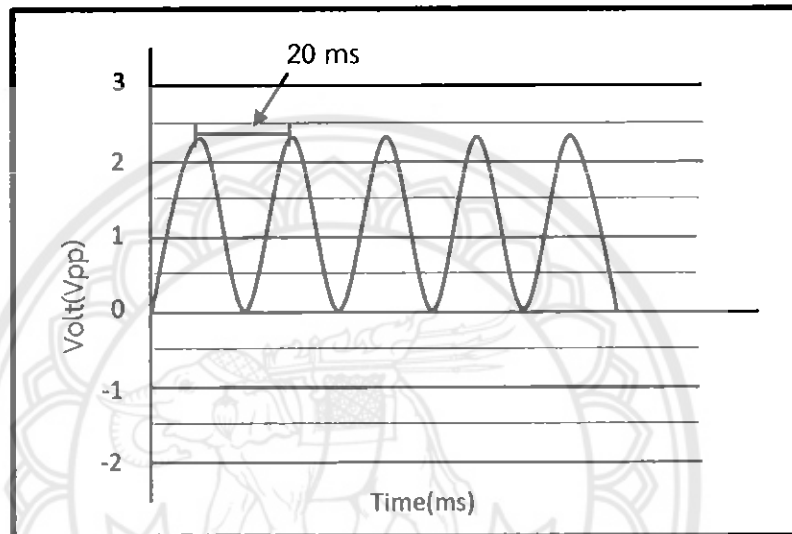
รูปที่ 4.20 ทดสอบคุณภาพไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.20 เป็นการทดสอบคุณภาพไฟฟ้าโดยแสดงผลผ่านทางหน้าจอแสดงผล LCD โดยบรรทัดแรกแสดงถึงสถานะว่าคุณภาพไฟฟ้านั้นผลเป็นอย่างไรซึ่งผลออกมาคือถ้าคุณภาพไฟฟ้าดี จะแสดงสถานะ OK!!!! และถ้าไม่ดีจะแสดงสถานะ Not OK ในบรรทัดที่สองแสดงค่าความถี่และแอมพิจูด ณ เวลานั้นๆ

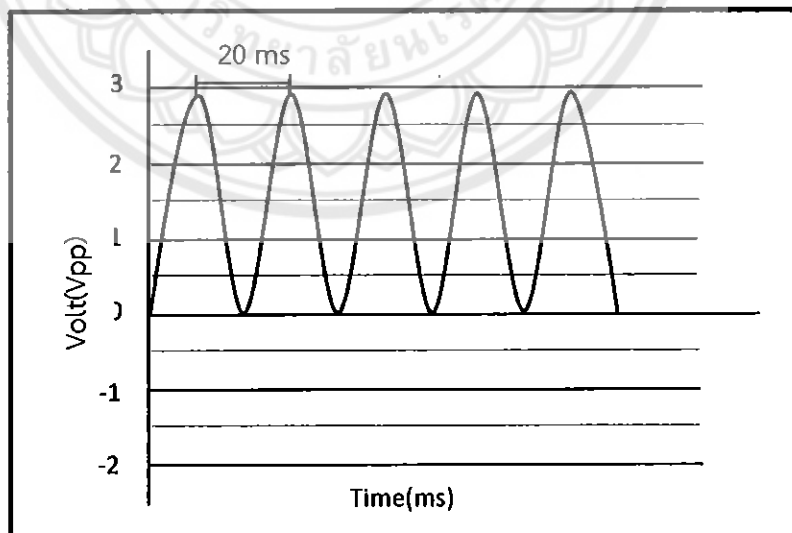


#### 4.3 ผลการทดสอบของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการทดลอง

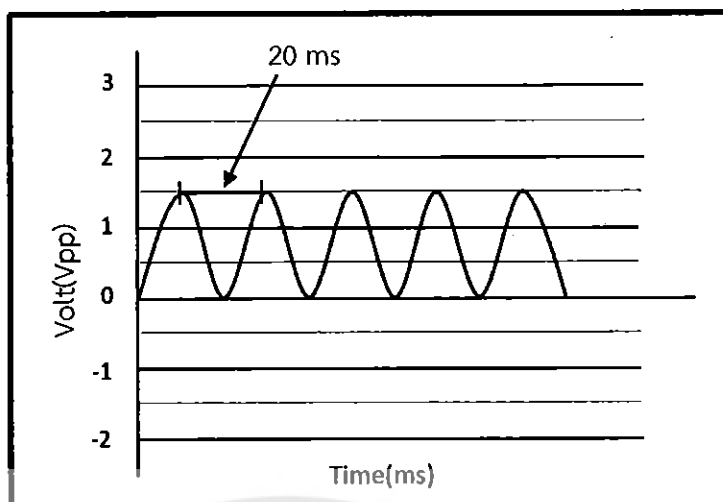
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดสอบของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ทำการทดลองมาแล้ว นั้นมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดโดยรับข้อมูลเข้ามาแบ่งเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพดี 200 ค่า และข้อมูลที่มีคุณภาพไม่ดี 600 ค่า เช่น ในกรณีที่ข้อมูลมีคุณภาพดีก็จะมีค่าแอมพิจูด 2.4 และ ความถี่ 50 ดังรูปที่ 4.21 กรณีของข้อมูลที่มีคุณภาพไม่ดีก็จะมี แอมพิจูดที่เกินหรือน้อยกว่า 2.4 และความถี่มากกว่าหรือน้อยกว่า 50 ดังรูปที่ 4.21



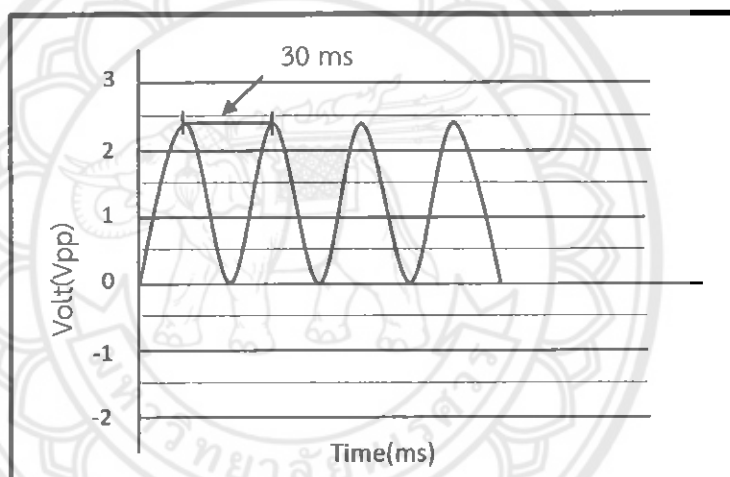
รูปที่ 4.21 ข้อมูลที่มีคุณภาพดี



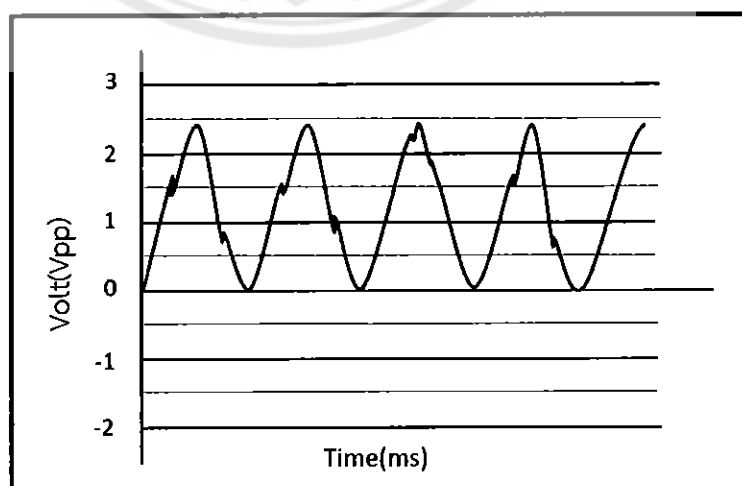
รูปที่ 4.22 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีแอมพิจูดมากกว่า 2.4



รูปที่ 4.23 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีแอมพิจูดน้อยกว่า 2.4



รูปที่ 4.24 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีความถี่น้อยกว่า 50



รูปที่ 4.24 ข้อมูลที่รับเข้ามีคุณภาพไม่ดีที่มีสัญญาณรบกวน

จากที่ได้ข้อมูลมาข้างต้นแล้วก็จะเป็นการนำข้อมูลที่รับเข้ามาทั้งที่มีคุณภาพดีหรือมีคุณภาพไม่ดี  
ทำการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าออกมาดังรูปที่ 4.25

0.458872773	0.625718598	0.515226622	0.450284778	0.49132991	0.5070058	0.612140997	0.673650909	0.513406665	0.725022541	0.750312159
0.461597762	0.632190981	0.522645077	0.449687827	0.493151516	0.504270426	0.615578554	0.673877616	0.507888231	0.728213574	0.746007033
1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
0.499847842	0.542015021	0.593301154	0.649824167	0.712089354	0.942239576	0.936968869	1.078446843	0.8093871	1.097357457	1.017951521
0.504048634	0.540828021	0.601454966	0.663137834	0.722789911	0.960614465	0.945838152	1.093801289	0.81857016	1.113745131	1.009956674
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1.119539919	1.038172172	1.275744717	1.219075702	1.054774432	1.252336131	0.767223491	0.881969854	0.50983952	0.988474814	0.79762779
1.095197592	0.872826515	1.229458192	1.047228133	1.026684541	1.114803479	0.582024201	0.876184357	0.409261659	0.93879727	0.47887795
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0.963797281	0.530518028	0.747937156	0.647890652	0.590831527	0.540437523	0.627933531	0.900806161	0.767897569	0.946155325	0.926859419
0.97275052	0.525276306	0.755493196	0.64035625	0.577109594	0.591359088	0.612275783	0.893539427	0.754082162	0.948942233	0.913004623
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0.957110156	0.915813575	0.98056294	1.005443922	1.119691975	1.040166319	1.01843966	1.064041571	1.075913635	1.079106954	1.085949042
0.9550054	0.911816653	0.977959085	1.00592805	1.120139968	1.09710691	1.018885241	1.06480356	1.074479974	1.078684634	1.085510766
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

รูปที่ 4.25 ข้อมูลที่รับเข้ามาทำการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและแสดงผลความผิดพลาดของการวิเคราะห์

จากรูปที่ 4.25 เป็นข้อมูลที่รับเข้ามาทำการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าและแสดงผลความผิดพลาดของการวิเคราะห์ซึ่งในกรณีนี้ถ้าเป็น 0 คือไม่มีความผิดพลาดของการวิเคราะห์ ถ้าเป็น 1 คือมีความผิดพลาดของการวิเคราะห์โดยสังเกตได้จากการนำค่าเอาต์พุตทั้งสองมาเปรียบเทียบกับถ้าทั้งสองค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.6 ถือว่าไม่มีความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ ถ้าเปรียบเทียบกันแล้วน้อยกว่า 0.6 ถือว่ามีความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ ซึ่งผลของการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมดูได้จากตาราง ที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียม			
สถานะข้อมูลที่ได้รับเข้า	จำนวนค่าที่ทดสอบ	ค่าความผิดพลาด	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์(%)
คุณภาพดี	200	10	0.9
คุณภาพไม่ดี	600	106	0.824793388

จากตารางที่ 4.4 แสดงถึงผลการทดสอบของโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำการรับข้อมูลเข้าสู่การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าทั้งข้อมูลที่มีคุณภาพดีและมีคุณภาพไม่ดีผลที่ได้ออกมามีค่าความผิดพลาดและคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่แสดงดังตารางที่ 4.4

#### 4.4 บทสรุป

ในบทที่ 4 นี้จะพูดถึงการทดลองและผลการทดลองของการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียมโดยการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกลำดับที่ 1,3,5 เป็นสำคัญในการวัดคุณภาพว่าดีหรือไม่โดยผ่านวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY โดยใช้กระบวนการของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์หาคุณภาพไฟฟ้าทางด้านฮาร์โมนิกลำดับที่ 1,3,5 ผลที่ได้ออกมานั้นขึ้นอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าในแต่ละที่ว่าจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีฮาร์โมนิกลำดับที่ 1,3,5 ดี หรือ ไม่ดี นำมาเข้าสู่การบวนการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียมแล้วจึงจะได้ผลลัพธ์ออกมาผ่านทางหน้าจอ LCD



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียม (Power Quality Analysis by Neural Network) นี้เป็นระบบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าตามอาคาร บ้านเรือนทั่วไปในส่วนของคุณภาพไฟฟ้านี้คือฮาร์มอนิกลำดับที่ 1,3,5 โดยการที่นำไฟฟ้าเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าโดยผ่านทางหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ แปลงเป็น 9 โวลต์ เข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าแล้วเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4DISCOVERY โดยในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4DISCOVERY มีโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมและโปรแกรมอนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์คุณภาพของฮาร์มอนิกและแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD ที่พัฒนาขึ้นมา

คณะผู้จัดทำโครงงานใช้โปรแกรม IAR ในการพัฒนาโปรแกรมลงสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ภาษา C เพราะง่ายต่อการเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้ MatLAB ในการออกแบบประยุกต์โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม เพราะง่ายต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมทางด้านของการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้าทางคณะผู้จัดทำโครงงานได้ใช้โปรแกรม Proteus 7 Professional ในการออกแบบและทดสอบวงจร

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 นั้น สรุปได้ว่าในการวิเคราะห์หาคุณภาพไฟฟ้าของฮาร์มอนิกในลำดับที่ 1,3,5 นั้นขึ้นอยู่กับสมการในการคำนวณของอนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณฮาร์มอนิกและขึ้นอยู่กับการเทรนระบบของโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมว่าได้ข้อมูลมาในการเทรนนั้นมากน้อยเพียงใดและมีการคลาดเคลื่อนของข้อมูลมากน้อยเพียงใดซึ่งในการเทรนนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่ากำหนดฮิดเด้นเลเยอร์ไหนดีไหนในการเทรนเพราะว่าถ้ายังมีหลายไหนก็จะทำให้ได้ผลออกมาที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นแต่ก็จะทำให้เขียนโค้ดยากขึ้นแต่ก็ต้องขึ้นอยู่กับว่าอินพุตที่รับเข้ามาด้วยถ้าไม่เยอะมากก็ไม่จำเป็นต้องเพิ่มไหนให้มันเยอะเพราะมันจะง่ายต่อการเขียนโค้ดลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ง่ายขึ้นอีกด้วย

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์คุณภาพของฮาร์มอนิกนั้นขึ้นอยู่กับโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมที่ดี กล่าวคือ การส่งอินพุตเข้าไปว่ามีทั้งหมดกี่ค่า การที่กำหนดขีดเริ่มต้นเลเยอร์โหนดว่ามีกี่โหนดเพราะว่ายังมีจำนวนโหนดเยอะมากเท่าไรการวิเคราะห์ก็就会有ความแม่นยำมากขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับวิธีการเขียนโค้ดด้วยส่วนหนึ่ง มีอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้การวิเคราะห์นั้นออกมาถูกต้องหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับอนุกรมฟูเรียร์ด้วยส่วนหนึ่ง เพราะว่าการที่จะวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ นั้นจำเป็นจะต้องใช้ออนุกรมฟูเรียร์ที่ดีในการวิเคราะห์หาฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ ด้วยอีกส่วนหนึ่ง

## 5.3 การพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคต

จากการวิเคราะห์คุณภาพของฮาร์มอนิกในลำดับที่ 1,3,5 นี้เน้นถือว่าทำได้ดีสามารถทำให้รู้ได้ว่าคุณภาพของฮาร์มอนิกที่ถูกส่งออกมาจากโรงไฟฟ้านั้นมีคุณภาพที่ดีหรือไม่ทั้งนี้ยังสามารถทำให้โครงการนี้มีการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าทางด้านอื่นนอกจากฮาร์มอนิกได้อีกเช่น การวิเคราะห์กระแส , แรงดัน , ความต้านทานและสัญญาณรบกวน แล้วยังสามารถนำโครงการชิ้นนี้มาปรับปรุงให้ใช้งานในการใช้งานจริงได้อย่างจริงจังเพื่อทดสอบตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้าตามอาคาร บ้านเรือน โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรม เพราะในเครื่องจักรใหญ่ๆ ถ้ามีฮาร์มอนิกที่คุณภาพไม่ดีหรือไม่ตรงตามมาตรฐานก็จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องจักรได้

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคตนั้นควรมีความรู้พื้นฐานในเรื่องต่อไปนี้

1. คุณภาพไฟฟ้า ,โครงข่ายประสาทเทียม ,อนุกรมฟูเรียร์
2. โปรแกรม IAR ,MatLAB
3. การออกแบบและสร้างวงจร
4. การโปรแกรมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM ภาษา C
5. การต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขั้นพื้นฐาน

### เอกสารอ้างอิง

- [1] คุณภาพกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2556 จาก <http://www.sut.ac.th/engineering/electrical/per/power&harmonic.htm>.
- [2] วิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2556 จาก [www.nesdb.go.th/portals/0/about/General\\_menu/meetingNesdb/year46/4-1.doc+&cd=1&hl=th&ct=clnk&gl=th](http://www.nesdb.go.th/portals/0/about/General_menu/meetingNesdb/year46/4-1.doc+&cd=1&hl=th&ct=clnk&gl=th).
- [3] การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของฮาร์มอนิกที่เกิดในจอ LCD. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2556 จาก [www.research.eng.ku.ac.th/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=harmonics-analysis-in-lcd](http://www.research.eng.ku.ac.th/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=harmonics-analysis-in-lcd).
- [4] การศึกษาผลกระทบของราคาน้ำมันบนตลาดหุ้นไทยด้วยโครงข่ายประสาทเทียม สืบค้นเมื่อ 25 ตุลาคม 2556 จาก [somalak.math.science.cm.u.ac.th/206499/206499-2555/%25E0%25B9%2581%25E0%25B8%259A%25E0%25B8%259A%25E0%25B8%25A2%25E0%25B8%25B7%25E0%25B9%2588%25E0%25B8%2599-2555/520510617.docx+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th](http://somalak.math.science.cm.u.ac.th/206499/206499-2555/%25E0%25B9%2581%25E0%25B8%259A%25E0%25B8%259A%25E0%25B8%25A2%25E0%25B8%25B7%25E0%25B9%2588%25E0%25B8%2599-2555/520510617.docx+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th)
- [5] การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการปรับปรุงการรู้จำตัวอักษรออนไลน์ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ PHIA สืบค้นเมื่อ 25 ตุลาคม 2556 จาก [http://fic.nectec.or.th/abstract\\_ysc\\_2013](http://fic.nectec.or.th/abstract_ysc_2013)
- [6] การประเมินค่า CBR ของดินลูกรังโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม สืบค้นเมื่อ 28 ตุลาคม 2556 จาก <http://rpm.rmutp.ac.th/research-detail?id=198>
- [7] การพยากรณ์ราคาอาหารชนิดแผ่นรมควันชั้น 3 ในประเทศไทย สืบค้นเมื่อ 28 ตุลาคม 2556 จาก [thaiejournal.com/journal/2556volumes2/16.pdf+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th](http://thaiejournal.com/journal/2556volumes2/16.pdf+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th)
- [8] การพยากรณ์ราคาพืชน้ำมันโดยวิธีของบ็อกซ์-เจนกินส์และโครงข่ายประสาทเทียม สืบค้นเมื่อ 28 ตุลาคม 2556 จาก [thaiejournal.com/journal/2556volumes2/16.pdf+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th](http://thaiejournal.com/journal/2556volumes2/16.pdf+&cd=2&hl=th&ct=clnk&gl=th)
- [9] โครงข่ายประสาทเทียม. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556, จาก <http://www.gotoknow.org/posts/163433>.

- [10] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 25. การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม.  
สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2556, จาก  
[http://guru.sanook.com/search/knowledge\\_search.php?qID=&wi=&hnl=&ob=&asc=&q=%A1%D2%C3%E0%C3%D5%C2%B9%C3%D9%E9%A2%CD%A7%E2%A4%C3%A7%A2%E8%D2%C2%BB%C3%D0%CA%D2%B7%E0%B7%D5%C2%C1&select=1&id=2205#ประวัติความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม](http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php?qID=&wi=&hnl=&ob=&asc=&q=%A1%D2%C3%E0%C3%D5%C2%B9%C3%D9%E9%A2%CD%A7%E2%A4%C3%A7%A2%E8%D2%C2%BB%C3%D0%CA%D2%B7%E0%B7%D5%C2%C1&select=1&id=2205#ประวัติความเป็นมาของโครงข่ายประสาทเทียม)
- [11] Wikipedia. Neural Network.สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2556, จาก  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_neural\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neural_network).
- [12] Wikipedia. โครงข่ายประสาทเทียม. สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2556, จาก  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%87%E0%B8%82%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1>
- [13] คุณภาพไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2556, จาก  
[http://www.9engineer.com/ee\\_main/Article/PQ.htm](http://www.9engineer.com/ee_main/Article/PQ.htm)
- [14] IEEE std 1159-1995 , IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Qualityสืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2556
- [15] Electrical Power Systems Quality " Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty "สืบค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2556
- [16] ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ16 มิถุนายน 2556, จาก  
[http://www.9engineer.com/ee\\_main/Article/Harmonic.htm](http://www.9engineer.com/ee_main/Article/Harmonic.htm).
- [17] Effects of Harmonic on Equipment "IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.8, No.2, April 1993"สืบค้นเมื่อ16 มิถุนายน 2556
- [18] P519A/D5Guide for Applying Harmonic Limits on Power System  
สืบค้นเมื่อ 10กรกฎาคม2556



- [19] IEC 1000-3-6 Assessment of emission limit for distorting loads in MV and HV power system Basic EMC publication สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2556
- [20] IEEE Std. 18-1992 IEEE Standard for Shunt Power Capacitors สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2556
- [21] IEEE Std. C57.110-1986 Recommended practice for establishing transformer capability when supplying Nonsinusoidal load currents สืบค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2556
- [22] โครงข่ายประสาทเทียม. สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2556, จาก <http://alaska.reru.ac.th/text/ann.pdf>
- [23] Wikipedia, อุนุกรมฟูเรียร์ สืบค้นเมื่อ 29 กันยายน 2556, จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B8%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%9F%E0%B8%B9%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%A2>
- [24] อุนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2556, จาก <http://www.journal.kmutnb.ac.th/journal/292910255019320.pdf>
- [25] Wikipedia, ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2556, จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%9B%E0%B8%8F%E0%B8%B4%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B9%80%E0%B8%A7%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%88%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%87>
- [26] ระบบปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2556, จาก [161.246.4.119/download.php%3FDOWNLOAD\\_ID%3D17%26database%3Dpj\\_download+%&cd=3&hl=th&ct=clnk&gl=th](http://161.246.4.119/download.php%3FDOWNLOAD_ID%3D17%26database%3Dpj_download+%&cd=3&hl=th&ct=clnk&gl=th)
- [27] A/D D/A ไมโครคอนโทรลเลอร์ สืบค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2556, จาก [www.ecpe.nu.ac.th/ponpisut/Microcon%2006%20interfacing%20output.pdf](http://www.ecpe.nu.ac.th/ponpisut/Microcon%2006%20interfacing%20output.pdf)



### ตัวอย่างของโครงข่ายประสาทเทียม

จากนี้ไปจะเป็นการยกตัวอย่างของการใช้โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมอย่างง่าย เพื่อให้ทำความเข้าใจได้ง่ายและมากยิ่งขึ้นทั้งนี้ตัวอย่างที่ยกมานี้ได้นำมาจากอินเทอร์เน็ตอ้างอิงจากเว็บไซต์ <http://www.ee.eng.cmu.ac.th/~kasin/Courses/252749/5.doc>

จากตัวอย่างที่นำมาแสดงถึงการใช้โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียมในการรู้จำตัวเลขดูได้จากตัวอย่างข้างล่างนี้

#### ตัวอย่างที่ 1 การรู้จำตัวเลขโดยใช้โปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

##### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม ในการรู้จำตัวเลข
2. เพื่อศึกษาผลของการชนิดของ network ที่แตกต่างกันในการ train ที่มีต่อประสิทธิภาพของ network ที่สร้างขึ้น
3. เพื่อศึกษาผลของจำนวน hidden layer ที่ต่างกัน ที่มีต่อเน็ตเวิร์คที่สร้างขึ้น

##### การเตรียมตัวอย่างข้อมูล

1. เตรียมข้อมูลที่ใช้ในการ train

พิมพ์ตัวเลขแล้วทำการบันทึกไฟล์เป็นไฟล์รูปภาพ โดยต้องกำหนดให้เป็น Grey scale ซึ่งในที่นี้เราจะกำหนดขนาดของภาพเป็น 30 x 50 pixels

1                      2                      3                      4

ภาพตัวเลขที่จะนำมาใช้ในการ train

2. เตรียมข้อมูลที่ใช้ในการ test

พิมพ์ตัวเลขแล้วทำการบันทึกไฟล์เป็นไฟล์รูปภาพ โดยต้องกำหนดให้เป็น Grey scale ซึ่งในที่นี้เราจะกำหนดขนาดของภาพเป็น 30 x 50 pixels

1                      2                      3                      4

ภาพตัวเลขที่จะนำมาใช้ในการ test ชุดที่ 1

1                      2                      3                      4

ภาพตัวเลขที่จะนำมาใช้ในการ test ชุดที่ 2

1                      2                      3                      4

ภาพตัวเลขที่จะนำมาใช้ในการ test ชุดที่ 3

ทั้งนี้ ในการทดลองของเรา จะใช้ข้อมูลเป็นตัวเลขอารบิก 1-4 เท่านั้น

### Input ใน Neural Network

Input ในที่นี่จะเป็นค่าความเข้มแสงของแต่ละ pixel ของแต่ละภาพตัวเลขในที่นี้เราจะใช้ภาพที่มีขนาด 30 x 50 pixels ถ้าหากเรานำทุก pixel มาเป็น input เราจะได้จำนวน neuron ใน input layer เท่ากับ 1500 neuron

ซึ่งเมื่อทดลอง Train ดูปรากฏว่ายังมีค่ามากเกินไปทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์จะใช้เวลานานในการเทรน ดังนั้นเราจะใช้ค่า mean และ S.D. ของแต่ละ column มาเป็น input แทน

### Output ใน Neural Network

Output ในที่นี่เราจะกำหนดให้มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

ตัวเลข 1	กำหนดให้มีค่า 1
ตัวเลข 2	กำหนดให้มีค่า 2
ตัวเลข 3	กำหนดให้มีค่า 3
ตัวเลข 4	กำหนดให้มีค่า 4

ตัวอย่างที่ 2 การใช้ MATLAB ในการแปลงค่าเป็น SD and Mean

`y = imread('pic.jpg');` โหลดรูปภาพที่เก็บอยู่ใน folder Work ไว้ในตัวแปร I

`y = double (y);` แปลงตัวแปร J เป็น double เพื่อที่จะนำไป import ใน nntool ได้

`a = mean (y);` หาค่า mean ของแต่ละ column

`b = std (y);` หาค่า S.D. ของแต่ละ column

`c = [a;b];` นำค่าจากตัวแปร a และ b มาต่อกันเป็น 2 แถวแล้วเก็บค่าไว้

โดยจะกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ที่ใช้ในการเทรน ดังนี้

Network Type = Feed-forward backprop

Training function = TRAINLM

Adaption learning function = LEARNINGDM

Performance function = MSE

Number of layers = 3

Number of neurons in hidden layer = (เปลี่ยนตามการทดลอง)

Number of neurons in output layer = 1

Transfer Function for hidden and output layer = TANSIG

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ศึกษาผลของชนิดของ function ที่ใช้ ที่มีต่อการ train

Feed-forward input-delay back propagation network

จะทำการสร้าง network โดยใช้

```
net=newfftd(PR,ID,[S1 S2...SN],[TF1 TF2...TFN],BTF,BLF,PF);
```

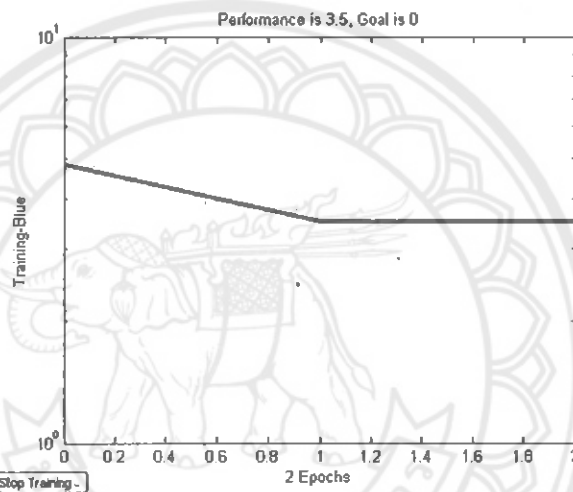
โดยกำหนด

```
net = newfftd([0 255;0 255],[0 1],[ตามการทดลอง],[purelin' purelin' tansig], 'trainlm')
```

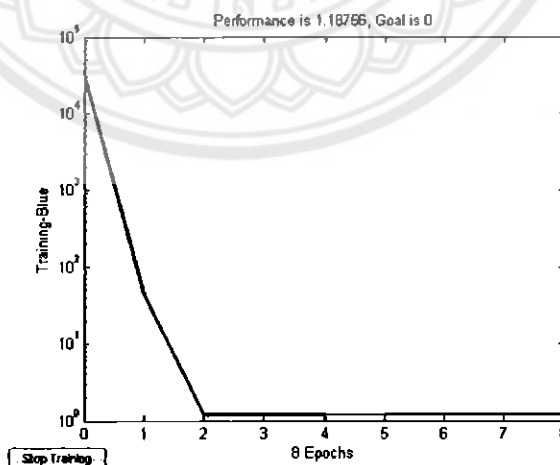
```
net.trainParam.epochs = 100
```

การ train ด้วยโปรแกรมโครงข่ายประสาทเทียม

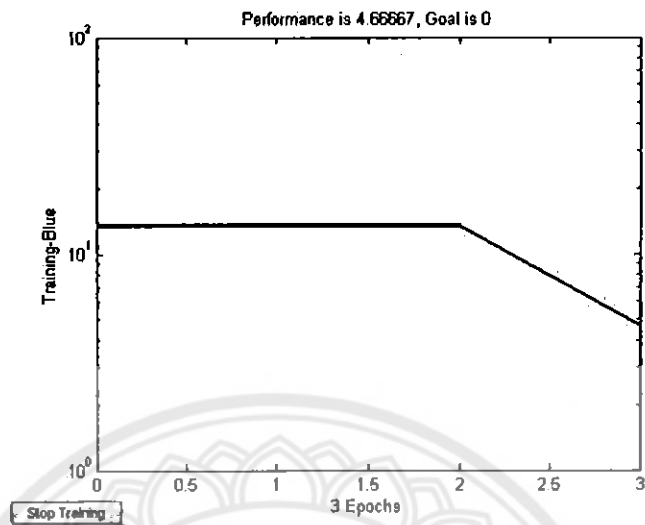
1. กำหนดให้ input คือค่า Mean และ SD และให้มีจำนวน Hidden Layer 1 layer



2. กำหนดให้ input คือค่า Mean และ SD และให้มีจำนวน Hidden Layer 10 layer



3. กำหนดให้ input คือค่า Mean และ SD และให้มีจำนวน Hidden Layer 25 layer



### การ Simulate

ใช้ network ที่มี hidden layer 10 เนื่องจากมีค่า performance เข้าใกล้ goal มากที่สุดมาใช้ในการทดสอบ หรือ simulate ทั้งนี้หลักการที่ใช้นั้นจะเหมือนกับการทดลองในตอนที 1 ซึ่งค่า output ที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

กรณีมี 1 hidden layer เมื่อนำ output ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ค่าออกมา

ชุดข้อมูล	Input	Output		
		ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	ตัวเลข 1	1	0.735	24.70%
	ตัวเลข 2	2	1.812	9.40%
	ตัวเลข 3	3	3.437	14.56%
	ตัวเลข 4	4	3.862	3.45%
2	ตัวเลข 1	1	0.612	38.80%
	ตัวเลข 2	2	2.341	17.05%
	ตัวเลข 3	3	2.911	2.96%
	ตัวเลข 4	4	4.426	10.65%
3	ตัวเลข 1	1	1.416	41.60%
	ตัวเลข 2	2	2.416	20.80%
	ตัวเลข 3	3	3.517	17.23%
	ตัวเลข 4	4	3.714	7.15%

นำข้อมูลแต่ชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่าต่างๆดังนี้

ตัวเลข 1	ค่าเฉลี่ย = 0.927	ค่าความคลาดเคลื่อน = 35.03%
ตัวเลข 2	ค่าเฉลี่ย = 2.189	ค่าความคลาดเคลื่อน = 15.75%
ตัวเลข 3	ค่าเฉลี่ย = 3.288	ค่าความคลาดเคลื่อน = 11.58%
ตัวเลข 4	ค่าเฉลี่ย = 4.006	ค่าความคลาดเคลื่อน = 7.083%

กรณีมี 10 hidden layer เมื่อนำ output ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ค่าออกมา

ชุดข้อมูล	Input	Output		
		ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	ตัวเลข 1	1	0.871	12.90%
	ตัวเลข 2	2	2.232	11.60%
	ตัวเลข 3	3	3.329	10.96%
	ตัวเลข 4	4	4.328	8.20%
2	ตัวเลข 1	1	0.923	7.70%
	ตัวเลข 2	2	1.986	0.70%
	ตัวเลข 3	3	2.874	4.20%
	ตัวเลข 4	4	4.264	6.60%
3	ตัวเลข 1	1	1.112	11.20%
	ตัวเลข 2	2	1.824	8.80%
	ตัวเลข 3	3	3.173	5.76%
	ตัวเลข 4	4	4.366	9.15%

นำข้อมูลแต่ชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่าต่างๆดังนี้

ตัวเลข 1	ค่าเฉลี่ย = 0.9686	ค่าความคลาดเคลื่อน = 10.6%
ตัวเลข 2	ค่าเฉลี่ย = 2.014	ค่าความคลาดเคลื่อน = 7.03%
ตัวเลข 3	ค่าเฉลี่ย = 3.125	ค่าความคลาดเคลื่อน = 6.973%
ตัวเลข 4	ค่าเฉลี่ย = 4.319	ค่าความคลาดเคลื่อน = 7.983%

กรณีมี 25 hidden layer เมื่อนำ output ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ค่าออกมา

ชุดข้อมูล	Input	Output		
		ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	ตัวเลข 1	1	0.662	33.80%
	ตัวเลข 2	2	1.523	23.85%
	ตัวเลข 3	3	2.654	11.53%
	ตัวเลข 4	4	4.674	16.85%
2	ตัวเลข 1	1	0.514	48.60%
	ตัวเลข 2	2	1.616	19.05%
	ตัวเลข 3	3	3.711	23.70%
	ตัวเลข 4	4	3.822	4.45%
3	ตัวเลข 1	1	0.729	27.10%
	ตัวเลข 2	2	1.432	28.50%
	ตัวเลข 3	3	3.412	13.73%
	ตัวเลข 4	4	4.532	13.30%

นำข้อมูลแต่ละชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่าต่างๆดังนี้

ตัวเลข 1	ค่าเฉลี่ย = 0.635	ค่าความคลาดเคลื่อน = 36.5%
ตัวเลข 2	ค่าเฉลี่ย = 1.524	ค่าความคลาดเคลื่อน = 23.8%
ตัวเลข 3	ค่าเฉลี่ย = 3.259	ค่าความคลาดเคลื่อน = 16.32%
ตัวเลข 4	ค่าเฉลี่ย = 4.342	ค่าความคลาดเคลื่อน = 11.53%

ตัวอย่างที่ 3 Elman back propagation network

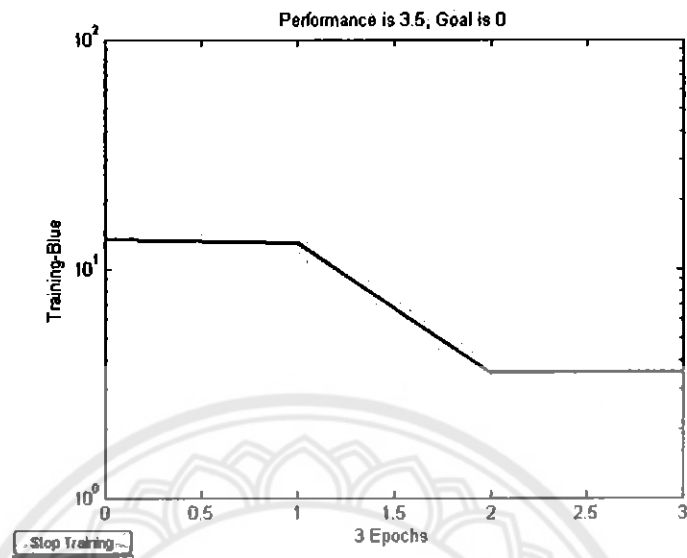
จะทำการสร้าง network โดยใช้

```
net = newelm([0 255;0 255],[hidden layer], {'tansig' 'tansig'
'tansig'}, 'traingdx','learngdm','mse');
```

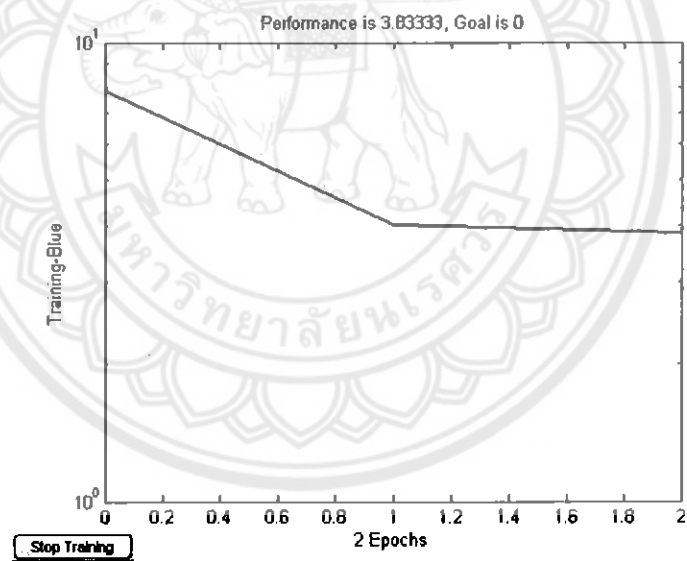
การ train ด้วย neuron network

1. กำหนดให้ input คือค่า Mean และ SD และให้มีจำนวน Hidden Layer 1 layer.

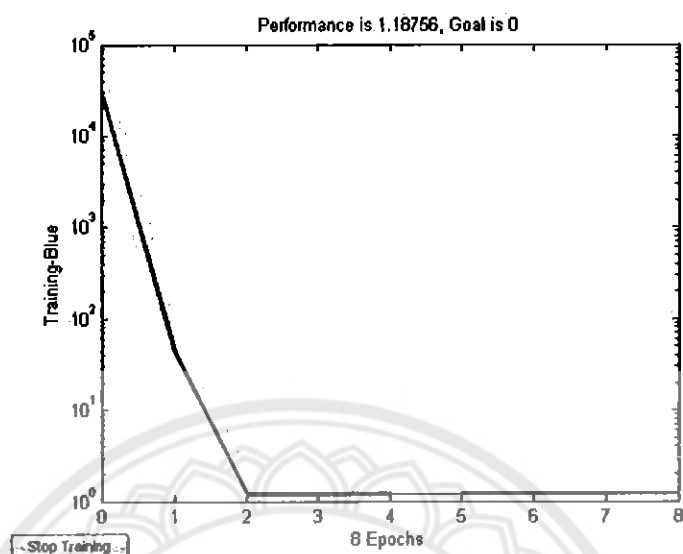




2. กำหนดให้ input คือค่า Mean และ SD และให้มีจำนวน Hidden Layer 10 layer.



3. กำหนดให้ input คือค่า Mean และ SD และให้มีจำนวน Hidden Layer 25 layer.



#### การ Simulate

ใช้ network ที่มี hidden layer 25 เนื่องจากมีค่า performance เข้าใกล้ goal มากที่สุดมาใช้ในการทดสอบ หรือ simulate ทั้งนี้หลักการที่ใช้นั้นจะเหมือนกับการทดลองในตอนต้นที่ 1 ซึ่งค่า output ที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อนได้แสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

กรณีมี 1 hidden layer เมื่อนำ output ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ออกมา

ชุดข้อมูล	Input	Output		
		ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	ตัวเลข 1	1	0.783	21.70%
	ตัวเลข 2	2	1.843	7.85%
	ตัวเลข 3	3	2.697	10.10%
	ตัวเลข 4	4	4.532	13.30%
2	ตัวเลข 1	1	0.652	34.80%
	ตัวเลข 2	2	2.316	15.80%
	ตัวเลข 3	3	2.761	7.96%
	ตัวเลข 4	4	4.217	0.54%
3	ตัวเลข 1	1	0.647	35.30%
	ตัวเลข 2	2	2.448	22.40%
	ตัวเลข 3	3	2.764	8.76%
	ตัวเลข 4	4	3.511	12.25%

นำข้อมูลแต่ละชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่าต่าง ๆ ดังนี้

ตัวเลข 1	ค่าเฉลี่ย = 0.694	ค่าความคลาดเคลื่อน = 30.60%
ตัวเลข 2	ค่าเฉลี่ย = 2.202	ค่าความคลาดเคลื่อน = 15.35%
ตัวเลข 3	ค่าเฉลี่ย = 2.741	ค่าความคลาดเคลื่อน = 8.64%
ตัวเลข 4	ค่าเฉลี่ย = 4.086	ค่าความคลาดเคลื่อน = 10.16%

กรณีมี 10 hidden layer เมื่อนำ output ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ค่าออกมา

ชุดข้อมูล	Input	Output		
		ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	ตัวเลข 1	1	1.521	52.10%
	ตัวเลข 2	2	2.433	21.65%
	ตัวเลข 3	3	3.612	20.40%
	ตัวเลข 4	4	4.674	10.30%
2	ตัวเลข 1	1	4.412	31.70%
	ตัวเลข 2	2	1.896	5.20%
	ตัวเลข 3	3	3.411	13.70%
	ตัวเลข 4	4	4.383	9.57%
3	ตัวเลข 1	1	0.612	38.80%
	ตัวเลข 2	2	2.314	6.70%
	ตัวเลข 3	3	2.811	6.30%
	ตัวเลข 4	4	3.816	4.60%

นำข้อมูลแต่ละชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่าต่าง ๆ ดังนี้

ตัวเลข 1	ค่าเฉลี่ย = 0.938	ค่าความคลาดเคลื่อน = 40.86%
ตัวเลข 2	ค่าเฉลี่ย = 2.214	ค่าความคลาดเคลื่อน = 10.18%
ตัวเลข 3	ค่าเฉลี่ย = 3.278	ค่าความคลาดเคลื่อน = 13.46%
ตัวเลข 4	ค่าเฉลี่ย = 4.203	ค่าความคลาดเคลื่อน = 8.15%

กรณีมี 25 hidden layer เมื่อนำ output ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้ว จะได้ค่าออกมา

ชุดข้อมูล	Input	Output		
		ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	ตัวเลข 1	1	0.826	17.4%
	ตัวเลข 2	2	1.793	10.35%
	ตัวเลข 3	3	3.234	7.80%
	ตัวเลข 4	4	4.316	7.90%
2	ตัวเลข 1	1	0.748	25.20%
	ตัวเลข 2	2	1.732	13.40%
	ตัวเลข 3	3	2.963	1.23%
	ตัวเลข 4	4	4.291	7.25%
3	ตัวเลข 1	1	0.874	12.6%
	ตัวเลข 2	2	1.836	8.20%
	ตัวเลข 3	3	3.276	9.20%
	ตัวเลข 4	4	4.014	0.35%

นำข้อมูลแต่ละชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่าต่าง ๆ ดังนี้

ตัวเลข 1	ค่าเฉลี่ย = 0.816	ค่าความคลาดเคลื่อน = 18.4%
ตัวเลข 2	ค่าเฉลี่ย = 1.687	ค่าความคลาดเคลื่อน = 10.64%
ตัวเลข 3	ค่าเฉลี่ย = 3.157	ค่าความคลาดเคลื่อน = 6.07%
ตัวเลข 4	ค่าเฉลี่ย = 4.207	ค่าความคลาดเคลื่อน = 5.16%

#### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้นั้น เมื่อนำผลที่ได้จากการเทรนของแต่ละชนิดของ network ที่แตกต่างกันทั้งจากการทดลองในตอนต้นที่ 1 คือแบบ Feed-Forward back propagation network และจากการทดลองตอนที่ 2 แบบ feed-forward input-delay back propagation network และแบบ Elman back propagation network มาเปรียบเทียบกันแล้ว จะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพในการเทรนที่ต่างกัน ซึ่งเราสามารถสังเกตได้จาก ในแต่ละชนิดของ network นั้นมีจำนวน hidden layer และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการ train ที่แตกต่างกันไป

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าจำนวนของ hidden layer มีผลต่อการ train ซึ่งในแต่ละชนิดของ network ที่แตกต่างกันนั้น ทั้งนี้ในการทดลองของเราใช้ feed-forward input-delay back propagation และ Elman back propagation network จะมีจำนวน hidden layer ที่เหมาะสมแตกต่างกันไป นอกจากนี้จำนวนรอบของการ train ก็มีผลทำให้ประสิทธิภาพของ network ที่สร้างขึ้นไม่เท่ากัน โดยเราจะสามารถสังเกตได้จากค่า performance ที่จะเปลี่ยนค่าไปเรื่อย ๆ เมื่อมีการ train.ใหม่

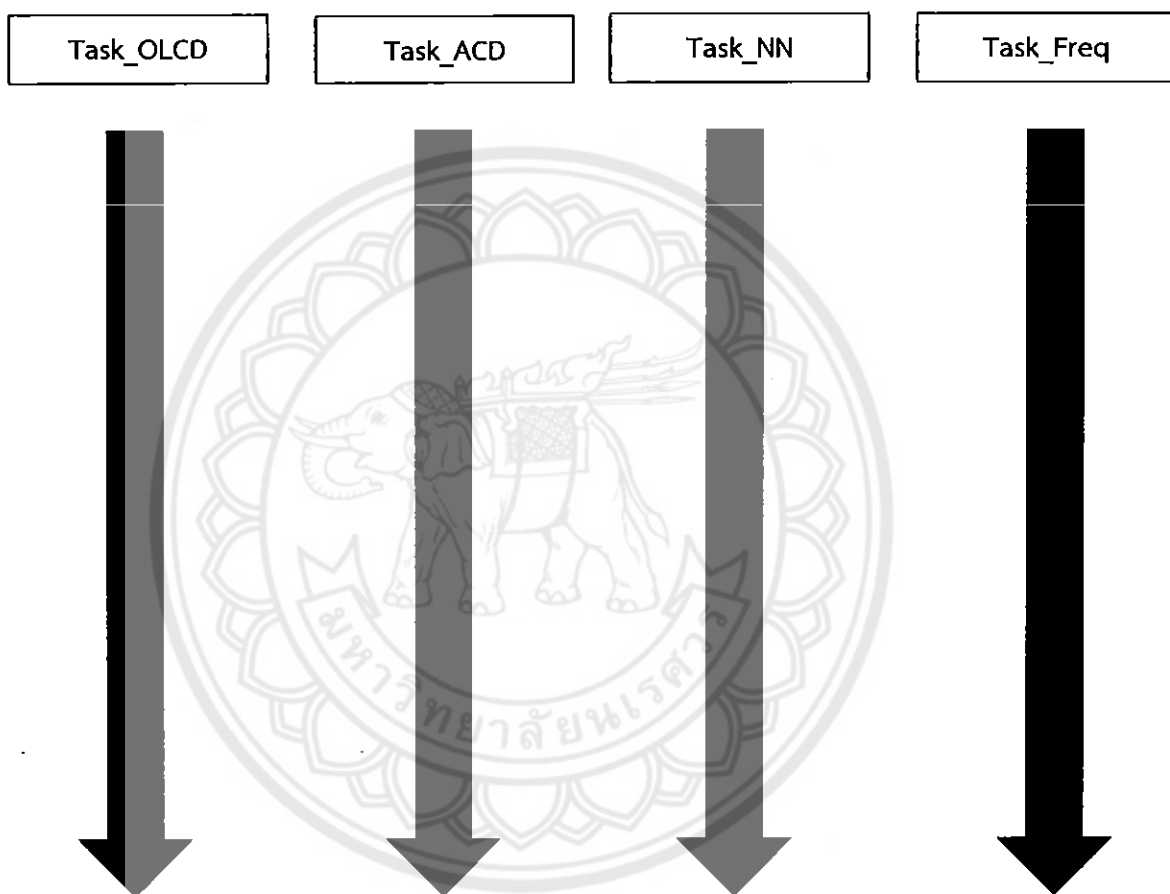
ดังนั้น ในการ train ให้ได้ network ที่มีประสิทธิภาพจึงควรเลือกใช้ ชนิดของ network และ จำนวน hidden layer ให้มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่า ค่า performance แล้วจึงนำ network ไปใช้ใน simulate ต่อไป



## การทำงานของโค้ดในโปรแกรมต่างๆของโครงการ

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรูปแบบการทำงานของโค้ดและชุดโค้ด  
Task\_OLCD, Task\_ACD, Task\_NN, Task\_Freq

รูปแบบการทำงานของโปรแกรม



Pseudo code ของ Task\_OLCD

```
void Task_OLCD(void * pvParameters){
tOLCD_MessageOLCDMsg; //ประกาศตัวแปร OLCDMsg เป็น tOLCD_Message
for(;;){ //วนลูปอนัน
xQueueReceive(tOLCDQueue, &OLCDMsg, ( portTickType )portMAX_DELAY); //รอรับ
Queue
switch(OLCDMsg.Type){
case OLCD_STRING: //ถ้า OLCDMsg.Typeเท่ากับ OLCD_STRING
{
lcd_strxy(OLCDMsg.Msg,OLCDMsg.X, OLCDMsg.Y ); //ส่ง String จาก OLCDMsg.Msg แสดงผล
บนจอ lcdm ตำแหน่ง (X,Y)
break; // จบการทำงาน
}
}
}
}
```

Pseudo code ของ Task\_ADC

```
void Task_ADC(void * pvParameters) {
static char buffer[20];
int volt;
int i;
int value;
for(;;) { //วนลูปอนัน
xSemaphoreTake(ADCSemaphore, portMAX_DELAY ); // รอรับ Semaphore
volt = getvalue(data); // ให้ตัวแปร volt เท่ากับ ข้อมูลที่อ่านได้จาก ADC
cr4_fft_1024_stm32(UBUFOUT, data, NPT); //นำข้อมูลที่ได้เข้า FFT โดยที่จะเก็บค่า output ไว้
ที่ตัวแปร LBUFOUT
for(i=0;i<NPT/2;i++) {
LBUFOUT[i] = abs((s16)(LBUFOUT[i]>>16)) + abs((s16)(0x0000FFFF&LBUFOUT[i]));
}
NN_Ham(LBUFOUT[5],LBUFOUT[15],LBUFOUT[26],LBUFOUT[36]); // ส่ง QueueMsgฮาร์มอนิก
ลำดับที่ 1 3 5 ไปให้ Task_NN
NN_Amplitude(volt); //ส่ง QueueMsgแรงดัน ไปให้Task_NN
```

```

vTaskDelay(300); // หน่วงเวลา 300 มิลลิวินาที
}
}

```

Pseudo code ของ Task\_NN

```

void Task_NN(void * pvParameters) {
    static char buffer[20];
    tNN_Message NNMsg; // ประกาศตัวแปร NNMsg เป็น tNN_Message
    for(;;) { // วนลูปอนันต์
        xQueueReceive(tNNQueue, &NNMsg, (portTickType)portMAX_DELAY); // รอรับ Queue
        hiddenLayer(NNMsg.Amplitude, NNMsg.Frequency, NNMsg.Ham1, NNMsg.Ham2,
                    NNMsg.Ham3, NNMsg.Ham4); // คำนวณ NN ชั้น hiddenLayer
        outputLayer(out); // คำนวณ NN ชั้น outputLayer
        if(out2[0] < 0.5 && out2[1] < 0.5) { // นำ output ที่ได้มาเข้าเงื่อนไขตามที่กำหนดไว้
            sprintf(buffer, "Status : OK");
            puts(buffer);
            OLED_String(0,0,buffer); // ส่ง QueueMsg ไปให้ Task_OLCD
            vTaskDelay(50); // หน่วงเวลา 50 มิลลิวินาที
        }
        else
            sprintf(buffer, "Status : Not OK");
            puts(buffer);
            OLED_String(0,0,buffer); // ส่ง QueueMsg ไปให้ Task_OLCD
            vTaskDelay(50); // หน่วงเวลา 50 มิลลิวินาที
        }
    }
}

```

Pseudo code ของ Task\_Freq

```

void Task_Freq(void * pvParameters)
{
    static char buffer[20];
    int frequency;
    for(;;) { // วนลูปอนันต์

```



```
xSemaphoreTake(Freq_Semaphore, portMAX_DELAY ); //รอรับ Semaphore  
frequency = freq;  
NN_Freq(frequency); //ส่ง QueueMsgแรงดัน ไปให้Task_NN  
freq = 0;  
vTaskDelay(300); //หน่วงเวลา 300 มิลิวินาที  
}  
}
```



## ตัวอย่างชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างชุดข้อมูล

ตัวอย่างชุดข้อมูลหลังทำการปรับค่าเพื่อนำไปเป็นข้อมูลรับเข้า โครงข่ายประสาทเทียม

1724	1712	1725	1716	1719	1704	Amp	0.663	0.658	0.663	0.66	0.661	0.655
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
551	551	442	589	550	468	H1	0.612	0.612	0.491	0.654	0.611	0.52
14	16	7	4	10	5	H3	0.28	0.32	0.14	0.08	0.2	0.1
10	8	2	3	5	4	H5	0.5	0.4	0.1	0.15	0.25	0.2
1734	1716	1723	1729	1725	1716	Amp	0.667	0.66	0.663	0.665	0.663	0.66
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
568	510	506	594	492	531	H1	0.631	0.567	0.562	0.66	0.547	0.59
12	13	7	7	16	10	H3	0.24	0.26	0.14	0.14	0.32	0.2
3	6	3	0	1	7	H5	0.15	0.3	0.15	0	0.05	0.35
1715	1726	1723	1722	1714	1710	Amp	0.66	0.664	0.663	0.662	0.659	0.658
51	50	50	50	51	50	f	0.85	0.833	0.833	0.833	0.85	0.833
572	453	553	576	416	568	H1	0.636	0.503	0.614	0.64	0.462	0.631
2	9	5	9	17	13	H3	0.04	0.18	0.1	0.18	0.34	0.26
7	6	6	7	7	7	H5	0.35	0.3	0.3	0.35	0.35	0.35
1704	1706	1705	1716	1729	1707	Amp	0.655	0.656	0.656	0.66	0.665	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
548	442	572	532	497	591	H1	0.609	0.491	0.636	0.591	0.552	0.657
5	11	15	6	7	11	H3	0.1	0.22	0.3	0.12	0.14	0.22
4	6	7	0	1	3	H5	0.2	0.3	0.35	0	0.05	0.15
1716	1722	1715	1716	1728	1746	Amp	0.66	0.662	0.66	0.66	0.665	0.672
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
501	501	574	477	552	587	H1	0.557	0.557	0.638	0.53	0.613	0.652
3	9	17	7	5	9	H3	0.06	0.18	0.34	0.14	0.1	0.18
1	1	1	5	4	4	H5	0.05	0.05	0.05	0.25	0.2	0.2

1721	1721	1723	1712	1714	1708	Amp	0.662	0.662	0.663	0.658	0.659	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
443	544	554	427	585	556	H1	0.492	0.604	0.616	0.474	0.65	0.618
3	12	17	9	4	11	H3	0.06	0.24	0.34	0.18	0.08	0.22
3	3	4	8	6	3	H5	0.15	0.15	0.2	0.4	0.3	0.15

1732	1708	1706	1718	1712	1702	Amp	0.666	0.657	0.656	0.661	0.658	0.655
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
457	566	520	498	596	504	H1	0.508	0.629	0.578	0.553	0.662	0.56
7	9	14	8	6	15	H3	0.14	0.18	0.28	0.16	0.12	0.3
9	9	8	7	6	8	H5	0.45	0.45	0.4	0.35	0.3	0.4

1702	1708	1708	1709	1706	1709	Amp	0.655	0.657	0.657	0.657	0.656	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
516	569	467	546	583	426	H1	0.573	0.632	0.519	0.607	0.648	0.473
8	8	12	5	10	15	H3	0.16	0.16	0.24	0.1	0.2	0.3
7	6	8	5	9	5	H5	0.35	0.3	0.4	0.25	0.45	0.25

1709	1713	1705	1710	1713	1742	Amp	0.657	0.659	0.656	0.658	0.659	0.67
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
566	557	428	568	540	487	H1	0.629	0.619	0.476	0.631	0.6	0.541
15	5	10	17	8	5	H3	0.3	0.1	0.2	0.34	0.16	0.1
3	5	3	5	9	7	H5	0.15	0.25	0.15	0.25	0.45	0.35

1720	1715	1725	1734	1711	1709	Amp	0.662	0.66	0.663	0.667	0.658	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
590	511	492	577	489	544	H1	0.656	0.568	0.547	0.641	0.543	0.604
10	3	11	14	12	3	H3	0.2	0.06	0.22	0.28	0.24	0.06
7	7	9	7	3	3	H5	0.35	0.35	0.45	0.35	0.15	0.15

1723	1722	1718	1721	1712	1749	Amp	0.663	0.662	0.661	0.662	0.658	0.673
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
579	433	553	569	420	573	H1	0.643	0.481	0.614	0.632	0.467	0.637
13	19	6	4	10	4	H3	0.26	0.38	0.12	0.08	0.2	0.08
4	3	7	7	4	7	H5	0.2	0.15	0.35	0.35	0.2	0.35

1709	1715	1711	1702	1704	1733	Amp	0.657	0.66	0.658	0.655	0.655	0.667
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
546	462	580	530	484	584	H1	0.607	0.513	0.644	0.589	0.538	0.649
12	14	8	5	15	12	H3	0.24	0.28	0.16	0.1	0.3	0.24
10	6	4	6	10	7	H5	0.5	0.3	0.2	0.3	0.5	0.35

1714	1712	1713	1720	1715	1739	Amp	0.659	0.658	0.659	0.662	0.66	0.669
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
498	530	579	470	533	577	H1	0.553	0.589	0.643	0.522	0.592	0.641
2	8	7	8	18	15	H3	0.04	0.16	0.14	0.16	0.36	0.3
0	3	5	6	7	1	H5	0	0.15	0.25	0.3	0.35	0.05

1711	1714	1704	1706	1709	1714	Amp	0.658	0.659	0.655	0.656	0.657	0.659
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
435	568	551	425	570	555	H1	0.483	0.631	0.612	0.472	0.633	0.617
3	11	15	5	10	11	H3	0.06	0.22	0.3	0.1	0.2	0.22
6	3	5	9	7	4	H5	0.3	0.15	0.25	0.45	0.35	0.2

1709	1712	1712	1735	1708	1721	Amp	0.657	0.658	0.658	0.667	0.657	0.662
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
477	579	505	502	587	500	H1	0.53	0.643	0.561	0.558	0.652	0.556
5	9	17	12	4	12	H3	0.1	0.18	0.34	0.24	0.08	0.24
7	6	7	1	3	4	H5	0.35	0.3	0.35	0.05	0.15	0.2

1702	1708	1713	1716	1712	1726	Amp	0.655	0.657	0.659	0.66	0.658	0.664
50	50	49	50	50	50	f	0.833	0.833	0.817	0.833	0.833	0.833
531	578	443	549	572	428	H1	0.59	0.642	0.492	0.61	0.636	0.476
16	6	6	9	3	15	H3	0.32	0.12	0.12	0.18	0.06	0.3
3	7	7	3	1	1	H5	0.15	0.35	0.35	0.15	0.05	0.05

1704	1708	1714	1707	1707	1715	Amp	0.655	0.657	0.659	0.657	0.657	0.66
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
570	555	456	572	528	475	H1	0.633	0.617	0.507	0.636	0.587	0.528
16	7	5	11	4	12	H3	0.32	0.14	0.1	0.22	0.08	0.24
11	9	6	6	9	11	H5	0.55	0.45	0.3	0.3	0.45	0.55

1714	1721	1719	1725	1716	1710	Amp	0.659	0.662	0.661	0.663	0.66	0.658
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
592	514	515	572	466	544	H1	0.658	0.571	0.572	0.636	0.518	0.604
13	6	6	18	12	4	H3	0.26	0.12	0.12	0.36	0.24	0.08
3	4	4	8	1	6	H5	0.15	0.2	0.2	0.4	0.05	0.3

1717	1706	1703	1708	1711	1704	Amp	0.66	0.656	0.655	0.657	0.658	0.655
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
591	444	555	551	428	575	H1	0.657	0.493	0.617	0.612	0.476	0.639
11	10	8	5	12	4	H3	0.22	0.2	0.16	0.1	0.24	0.08
2	2	11	6	5	6	H5	0.1	0.1	0.55	0.3	0.25	0.3

1720	1713	1729	1735	1710	1704	Amp	0.662	0.659	0.665	0.667	0.658	0.655
51	50	50	50	50	50	f	0.85	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
552	471	586	516	490	574	H1	0.613	0.523	0.651	0.573	0.544	0.638
11	15	14	2	13	18	H3	0.22	0.3	0.28	0.04	0.26	0.36
9	4	4	3	0	9	H5	0.45	0.2	0.2	0.15	0	0.45

1707	1717	1703	1721	1709	1737	Amp	0.657	0.66	0.655	0.662	0.657	0.668
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
490	547	585	441	538	564	H1	0.544	0.608	0.65	0.49	0.598	0.627
7	4	12	8	6	12	H3	0.14	0.08	0.24	0.16	0.12	0.24
10	4	7	6	7	7	H5	0.5	0.2	0.35	0.3	0.35	0.35

1706	1714	1710	1719	1714	1720	Amp	0.656	0.659	0.658	0.661	0.659	0.662
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
423	579	554	454	576	534	H1	0.47	0.643	0.616	0.504	0.64	0.593
10	3	14	17	6	5	H3	0.2	0.06	0.28	0.34	0.12	0.1
2	2	3	4	8	6	H5	0.1	0.1	0.15	0.2	0.4	0.3

1714	1704	1702	1739	1704	1707	Amp	0.659	0.655	0.655	0.669	0.655	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
486	585	499	524	579	475	H1	0.54	0.65	0.554	0.582	0.643	0.528
11	5	12	14	7	7	H3	0.22	0.1	0.24	0.28	0.14	0.14
2	9	10	5	5	8	H5	0.1	0.45	0.5	0.25	0.25	0.4

1709	1715	1716	1711	1720	1712	Amp	0.657	0.66	0.66	0.658	0.662	0.658
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
532	577	434	568	553	424	H1	0.591	0.641	0.482	0.631	0.614	0.471
17	11	3	10	12	7	H3	0.34	0.22	0.06	0.2	0.24	0.14
8	5	1	3	0	6	H5	0.4	0.25	0.05	0.15	0	0.3

1708	1712	1735	1711	1705	1704	Amp	0.657	0.658	0.667	0.658	0.656	0.655
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
569	554	479	580	501	504	H1	0.632	0.616	0.532	0.644	0.557	0.56
11	11	5	11	13	14	H3	0.22	0.22	0.1	0.22	0.26	0.28
6	7	8	7	7	1	H5	0.3	0.35	0.4	0.35	0.35	0.05

1716	1717	1708	1707	1738	1706	Amp	0.66	0.66	0.657	0.657	0.668	0.656
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
586	498	535	580	443	552	H1	0.651	0.553	0.594	0.644	0.492	0.613
2	13	16	9	4	9	H3	0.04	0.26	0.32	0.18	0.08	0.18
3	5	4	8	6	4	H5	0.15	0.25	0.2	0.4	0.3	0.2

1717	1701	1706	1733	1704	1706	Amp	0.66	0.654	0.656	0.667	0.655	0.656
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
568	421	573	556	459	572	H1	0.631	0.468	0.637	0.618	0.51	0.636
0	10	17	9	4	12	H3	0	0.2	0.34	0.18	0.08	0.24
3	2	9	4	5	7	H5	0.15	0.1	0.45	0.2	0.25	0.35

1719	1709	1702	1709	1708	1709	Amp	0.661	0.657	0.655	0.657	0.657	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
522	482	594	511	517	568	H1	0.58	0.536	0.66	0.568	0.574	0.631
7	8	11	8	7	16	H3	0.14	0.16	0.22	0.16	0.14	0.32
8	11	3	4	5	7	H5	0.4	0.55	0.15	0.2	0.25	0.35

1706	1705	1706	1705	1710	1710	Amp	0.656	0.656	0.656	0.656	0.658	0.658
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
461	548	588	442	556	548	H1	0.512	0.609	0.653	0.491	0.618	0.609
13	5	8	9	5	14	H3	0.26	0.1	0.16	0.18	0.1	0.28
1	6	2	0	1	0	H5	0.05	0.3	0.1	0	0.05	0

1710	1706	1705	1734	1716	1714	Amp	0.658	0.656	0.656	0.667	0.66	0.659
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
428	580	556	468	580	511	H1	0.476	0.644	0.618	0.52	0.644	0.568
15	4	10	16	9	4	H3	0.3	0.08	0.2	0.32	0.18	0.08
7	5	4	11	6	4	H5	0.35	0.25	0.2	0.55	0.3	0.2

1726	1706	1708	1712	1705	1726	Amp	0.664	0.656	0.657	0.658	0.656	0.664
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
500	581	495	534	585	450	H1	0.556	0.646	0.55	0.593	0.65	0.5
11	3	12	14	10	2	H3	0.22	0.06	0.24	0.28	0.2	0.04
4	7	8	4	3	3	H5	0.2	0.35	0.4	0.2	0.15	0.15

1712	1709	1712	1706	1708	1708	Amp	0.658	0.657	0.658	0.656	0.657	0.657
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
539	560	418	582	561	445	H1	0.599	0.622	0.464	0.647	0.623	0.494
13	16	7	4	13	5	H3	0.26	0.32	0.14	0.08	0.26	0.1
2	9	8	6	6	10	H5	0.1	0.45	0.4	0.3	0.3	0.5

1705	1711	1705	1702	1710	1713	Amp	0.656	0.658	0.656	0.655	0.658	0.659
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
567	528	491	593	507	516	H1	0.63	0.587	0.546	0.659	0.563	0.573
4	14	7	5	18	12	H3	0.08	0.28	0.14	0.1	0.36	0.24
6	5	4	4	6	1	H5	0.3	0.25	0.2	0.2	0.3	0.05

1713	1722	1714	1718	1743	1712	Amp	0.659	0.662	0.659	0.661	0.67	0.658
50	50	45	45	45	45	f	0.833	0.833	0.75	0.75	0.75	0.75
578	475	426	346	447	455	H1	0.642	0.528	0.473	0.384	0.497	0.506
3	8	17	16	18	20	H3	0.06	0.16	0.34	0.32	0.36	0.4
6	4	6	10	8	13	H5	0.3	0.2	0.3	0.5	0.4	0.65

1714	1714	1710	1712	1720	1713	Amp	0.659	0.659	0.658	0.658	0.662	0.659
45	45	45	45	45	45	f	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
359	397	473	435	358	443	H1	0.399	0.441	0.526	0.483	0.398	0.492
16	11	16	26	18	8	H3	0.32	0.22	0.32	0.52	0.36	0.16
7	13	13	5	7	4	H5	0.35	0.65	0.65	0.25	0.35	0.2

1725	1706	1704	1724	1744	1710	Amp	0.663	0.656	0.655	0.663	0.671	0.658
45	45	45	45	45	45	f	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
417	345	438	438	326	445	H1	0.463	0.383	0.487	0.487	0.362	0.494
22	28	24	5	14	28	H3	0.44	0.56	0.48	0.1	0.28	0.56
10	18	12	2	7	7	H5	0.5	0.9	0.6	0.1	0.35	0.35

1730	1708	1709	1715	1711	1718	Amp	0.665	0.657	0.657	0.66	0.658	0.661
45	45	45	45	45	45	f	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
464	382	387	453	405	390	H1	0.516	0.424	0.43	0.503	0.45	0.433
23	11	9	12	15	15	H3	0.46	0.22	0.18	0.24	0.3	0.3
15	15	7	12	12	8	H5	0.75	0.75	0.35	0.6	0.6	0.4

1722	1721	1719	1714	1712	1731	Amp	0.662	0.662	0.661	0.659	0.658	0.666
45	45	45	45	45	45	f	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
439	403	356	471	453	322	H1	0.488	0.448	0.396	0.523	0.503	0.358
17	10	12	21	21	14	H3	0.34	0.2	0.24	0.42	0.42	0.28
5	3	10	16	8	1	H5	0.25	0.15	0.5	0.8	0.4	0.05

1710	1720	1707	1714	1712	1714	Amp	0.658	0.662	0.657	0.659	0.658	0.659
45	55	55	55	55	55	f	0.75	0.917	0.917	0.917	0.917	0.917
356	471	444	434	447	451	H1	0.396	0.523	0.493	0.482	0.497	0.501
15	22	9	13	16	15	H3	0.3	0.44	0.18	0.26	0.32	0.3
8	17	5	1	5	10	H5	0.4	0.85	0.25	0.05	0.25	0.5

1713	2128	2155	2160	2165	2471	Amp	0.659	0.818	0.829	0.831	0.833	0.95
55	58	55	55	55	55	f	0.917	0.967	0.917	0.917	0.917	0.917
420	519	541	522	482	589	H1	0.467	0.577	0.601	0.58	0.536	0.654
10	22	29	25	19	22	H3	0.2	0.44	0.58	0.5	0.38	0.44
14	10	15	15	2	7	H5	0.7	0.5	0.75	0.75	0.1	0.35

2411	2415	2415	2417	2419	2569	Amp	0.927	0.929	0.929	0.93	0.93	0.988
55	49	46	48	48	48	f	0.917	0.817	0.767	0.8	0.8	0.8
573	745	755	855	788	761	H1	0.637	0.828	0.839	0.95	0.876	0.846
32	26	23	17	13	25	H3	0.64	0.52	0.46	0.34	0.26	0.5
19	24	10	1	5	8	H5	0.95	1.2	0.5	0.05	0.25	0.4



2581	2581	2576	2577	2585	2588	Amp	0.993	0.993	0.991	0.991	0.994	0.995
48	45	45	45	45	56	f	0.8	0.75	0.75	0.75	0.75	0.933
845	687	707	561	662	668	H1	0.939	0.763	0.786	0.623	0.736	0.742
29	16	22	28	38	13	H3	0.58	0.32	0.44	0.56	0.76	0.26
22	11	13	15	17	5	H5	1.1	0.55	0.65	0.75	0.85	0.25

2576	2580	2581	2581	2577	2962	Amp	0.991	0.992	0.993	0.993	0.991	1.139
56	56	56	52	53	53	f	0.933	0.933	0.933	0.867	0.883	0.883
690	720	704	686	511	794	H1	0.767	0.8	0.782	0.762	0.568	0.882
34	30	14	40	9	32	H3	0.68	0.6	0.28	0.8	0.18	0.64
17	13	5	10	4	11	H5	0.85	0.65	0.25	0.5	0.2	0.55

2972	2988	2977	2975	2979	2986	Amp	1.143	1.149	1.145	1.144	1.146	1.148
53	50	51	50	50	48	f	0.883	0.833	0.85	0.833	0.833	0.8
706	887	896	1071	813	996	H1	0.784	0.986	0.996	1.19	0.903	1.107
69	19	34	43	33	33	H3	1.38	0.38	0.68	0.86	0.66	0.66
27	15	18	7	12	15	H5	1.35	0.75	0.9	0.35	0.6	0.75

2972	2975	3472	3509	3529	3516	Amp	1.143	1.144	1.335	1.35	1.357	1.352
47	47	47	47	50	50	f	0.783	0.783	0.783	0.783	0.833	0.833
906	863	1230	850	1294	1135	H1	1.007	0.959	1.367	0.944	1.438	1.261
8	25	38	23	64	60	H3	0.16	0.5	0.76	0.46	1.28	1.2
3	7	12	12	12	13	H5	0.15	0.35	0.6	0.6	0.6	0.65

2038	1456	1462	1451	1442	2569	Amp	0.784	0.56	0.562	0.558	0.555	0.988
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
603	481	401	453	492	695	H1	0.67	0.534	0.446	0.503	0.547	0.772
10	2	11	7	9	17	H3	0.2	0.04	0.22	0.14	0.18	0.34
1	5	6	4	4	4	H5	0.05	0.25	0.3	0.2	0.2	0.2

2577	2581	2579	2577	2581	2581	Amp	0.991	0.993	0.992	0.991	0.993	0.993
48	45	45	45	42	53	f	0.8	0.75	0.75	0.75	0.7	0.883
693	646	702	613	788	669	H1	0.77	0.718	0.78	0.681	0.876	0.743
27	33	18	34	16	43	H3	0.54	0.66	0.36	0.68	0.32	0.86
18	18	1	8	3	14	H5	0.9	0.9	0.05	0.4	0.15	0.7

2271	2258	2173	2171	1876	1880	Amp	0.873	0.868	0.836	0.835	0.722	0.723
53	53	53	52	51	51	f	0.883	0.883	0.883	0.867	0.85	0.85
514	542	526	667	570	471	H1	0.571	0.602	0.584	0.741	0.633	0.523
24	15	35	19	13	12	H3	0.48	0.3	0.7	0.38	0.26	0.24
5	6	20	9	15	7	H5	0.25	0.3	1	0.45	0.75	0.35

1885	1870	1875	1880	1890	1894	Amp	0.725	0.719	0.721	0.723	0.727	0.728
51	49	49	50	49	50	f	0.85	0.817	0.817	0.833	0.817	0.833
488	630	629	461	636	528	H1	0.542	0.7	0.699	0.512	0.707	0.587
7	9	7	4	11	18	H3	0.14	0.18	0.14	0.08	0.22	0.36
3	2	3	4	5	10	H5	0.15	0.1	0.15	0.2	0.25	0.5

1872	1893	1886	1891	1886	1438	Amp	0.72	0.728	0.725	0.727	0.725	0.553
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
641	557	557	634	526	457	H1	0.712	0.619	0.619	0.704	0.584	0.508
10	4	12	9	5	14	H3	0.2	0.08	0.24	0.18	0.1	0.28
6	2	5	3	5	3	H5	0.3	0.1	0.25	0.15	0.25	0.15

1442	1449	1461	1436	1447	1456	Amp	0.555	0.557	0.562	0.552	0.557	0.56
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
492	369	458	468	360	494	H1	0.547	0.41	0.509	0.52	0.4	0.549
10	2	12	15	7	5	H3	0.2	0.04	0.24	0.3	0.14	0.1
6	2	1	8	5	6	H5	0.3	0.1	0.05	0.4	0.25	0.3

1582	1564	1566	1585	1582	1573	Amp	0.608	0.602	0.602	0.61	0.608	0.605
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
509	418	517	475	455	547	H1	0.566	0.464	0.574	0.528	0.506	0.608
11	6	9	14	7	7	H3	0.22	0.12	0.18	0.28	0.14	0.14
7	8	8	5	4	7	H5	0.35	0.4	0.4	0.25	0.2	0.35

1565	1562	2027	2032	2032	2016	Amp	0.602	0.601	0.78	0.782	0.782	0.775
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
462	473	679	550	648	690	H1	0.513	0.526	0.754	0.611	0.72	0.767
14	8	6	12	6	10	H3	0.28	0.16	0.12	0.24	0.12	0.2
10	6	5	4	4	5	H5	0.5	0.3	0.25	0.2	0.2	0.25

2022	2042	2028	2031	2285	2170	Amp	0.778	0.785	0.78	0.781	0.879	0.835
50	50	50	47	47	47	f	0.833	0.833	0.833	0.783	0.783	0.783
506	671	662	647	565	675	H1	0.562	0.746	0.736	0.719	0.628	0.75
18	16	5	8	6	5	H3	0.36	0.32	0.1	0.16	0.12	0.1
1	4	6	7	6	6	H5	0.05	0.2	0.3	0.35	0.3	0.3

2160	2168	2031	2026	2029	1712	Amp	0.831	0.834	0.781	0.779	0.78	0.658
46	43	43	43	43	43	f	0.767	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717
609	558	521	449	436	473	H1	0.677	0.62	0.579	0.499	0.484	0.526
15	20	34	28	10	11	H3	0.3	0.4	0.68	0.56	0.2	0.22
9	10	13	10	13	8	H5	0.45	0.5	0.65	0.5	0.65	0.4

1702	1704	1727	1709	1704	1720	Amp	0.655	0.655	0.664	0.657	0.655	0.662
43	43	43	53	57	57	f	0.717	0.717	0.717	0.883	0.95	0.95
426	302	410	357	548	551	H1	0.473	0.336	0.456	0.397	0.609	0.612
23	24	14	18	13	7	H3	0.46	0.48	0.28	0.36	0.26	0.14
13	15	5	11	5	13	H5	0.65	0.75	0.25	0.55	0.25	0.65

1704	1711	2022	2153	2157	2166	Amp	0.655	0.658	0.778	0.828	0.83	0.833
57	57	57	60	53	53	f	0.95	0.95	0.95	1	0.883	0.883
540	540	636	669	414	569	H1	0.6	0.6	0.707	0.743	0.46	0.632
7	12	9	29	36	24	H3	0.14	0.24	0.18	0.58	0.72	0.48
6	6	11	16	13	11	H5	0.3	0.3	0.55	0.8	0.65	0.55

2174	2158	2155	2157	2162	2217	Amp	0.836	0.83	0.829	0.83	0.832	0.853
53	53	53	53	53	52	f	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883	0.867
503	457	537	435	498	635	H1	0.559	0.508	0.597	0.483	0.553	0.706
13	22	31	18	16	30	H3	0.26	0.44	0.62	0.36	0.32	0.6
9	20	15	4	8	15	H5	0.45	1	0.75	0.2	0.4	0.75

2487	2503	2500	2502	2503	2505	Amp	0.957	0.963	0.962	0.962	0.963	0.963
52	52	52	52	52	52	f	0.867	0.867	0.867	0.867	0.867	0.867
693	669	792	646	682	760	H1	0.77	0.743	0.88	0.718	0.758	0.844
30	9	19	26	30	28	H3	0.6	0.18	0.38	0.52	0.6	0.56
9	6	7	19	21	16	H5	0.45	0.3	0.35	0.95	1.05	0.8

2522	2511	2503	2506	2505	2502	Amp	0.97	0.966	0.963	0.964	0.963	0.962
52	52	52	49	49	49	f	0.867	0.867	0.867	0.817	0.817	0.817
579	747	688	902	848	743	H1	0.643	0.83	0.764	1.002	0.942	0.826
22	20	25	17	25	24	H3	0.44	0.4	0.5	0.34	0.5	0.48
1	23	15	3	7	6	H5	0.05	1.15	0.75	0.15	0.35	0.3
2509	2511	2506	2563	2951	2966	Amp	0.965	0.966	0.964	0.986	1.135	1.141
49	49	49	49	49	50	f	0.817	0.817	0.817	0.817	0.817	0.833
925	828	779	941	809	1070	H1	1.028	0.92	0.866	1.046	0.899	1.189
26	20	29	31	37	38	H3	0.52	0.4	0.58	0.62	0.74	0.76
2	6	7	3	6	18	H5	0.1	0.3	0.35	0.15	0.3	0.9
2971	2981	2976	2972	2969	2978	Amp	1.143	1.147	1.145	1.143	1.142	1.145
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
832	1026	1040	788	1076	1028	H1	0.924	1.14	1.156	0.876	1.196	1.142
38	57	21	37	43	41	H3	0.76	1.14	0.42	0.74	0.86	0.82
3	16	13	16	12	14	H5	0.15	0.8	0.65	0.8	0.6	0.7
2975	2975	2972	2978	2974	2979	Amp	1.144	1.144	1.143	1.145	1.144	1.146
50	50	50	48	48	48	f	0.833	0.833	0.833	0.8	0.8	0.8
850	1070	977	999	905	1105	H1	0.944	1.189	1.086	1.11	1.006	1.228
24	48	55	48	41	70	H3	0.48	0.96	1.1	0.96	0.82	1.4
6	21	8	3	13	8	H5	0.3	1.05	0.4	0.15	0.65	0.4
2974	2977	2974	2980	2977	2977	Amp	1.144	1.145	1.144	1.146	1.145	1.145
48	48	48	49	42	42	f	0.8	0.8	0.8	0.817	0.7	0.7
992	893	1091	806	699	936	H1	1.102	0.992	1.212	0.896	0.777	1.04
34	50	36	19	37	25	H3	0.68	1	0.72	0.38	0.74	0.5
5	8	8	15	21	21	H5	0.25	0.4	0.4	0.75	1.05	1.05
2974	2985	2979	2979	2987	2985	Amp	1.144	1.148	1.146	1.146	1.149	1.148
42	42	42	42	54	58	f	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.967
973	715	847	847	712	1036	H1	1.081	0.794	0.941	0.941	0.791	1.151
12	22	41	41	28	8	H3	0.24	0.44	0.82	0.82	0.56	0.16
6	17	17	17	20	3	H5	0.3	0.85	0.85	0.85	1	0.15

2998	2978	2028	2191	2183	2176	Amp	1.153	1.145	0.78	0.843	0.84	0.837
58	58	58	58	58	58	f	0.967	0.967	0.967	0.967	0.967	0.967
1039	1028	647	694	693	685	H1	1.154	1.142	0.719	0.771	0.77	0.761
7	11	6	8	15	8	H3	0.14	0.22	0.12	0.16	0.3	0.16
8	3	7	8	8	5	H5	0.4	0.15	0.35	0.4	0.4	0.25
2177	2176	2182	2173	1297	1289	Amp	0.837	0.837	0.839	0.836	0.499	0.496
58	53	53	50	50	50	f	0.967	0.883	0.883	0.833	0.833	0.833
678	448	533	702	420	330	H1	0.753	0.498	0.592	0.78	0.467	0.367
4	30	29	5	8	10	H3	0.08	0.6	0.58	0.1	0.16	0.2
5	15	9	7	4	3	H5	0.25	0.75	0.45	0.35	0.2	0.15
1449	1560	1554	1555	1559	1881	Amp	0.557	0.6	0.598	0.598	0.6	0.723
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
492	498	428	378	509	620	H1	0.547	0.553	0.476	0.42	0.566	0.689
4	13	13	16	4	4	H3	0.08	0.26	0.26	0.32	0.08	0.08
3	4	2	1	7	5	H5	0.15	0.2	0.1	0.05	0.35	0.25
1877	1891	1873	1570	1576	1582	Amp	0.722	0.727	0.72	0.604	0.606	0.608
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
475	634	591	440	532	476	H1	0.528	0.704	0.657	0.489	0.591	0.529
11	7	10	12	6	5	H3	0.22	0.14	0.2	0.24	0.12	0.1
3	5	4	7	5	8	H5	0.15	0.25	0.2	0.35	0.25	0.4
1573	1566	1446	1443	1446	1438	Amp	0.605	0.602	0.556	0.555	0.556	0.553
50	50	51	50	50	50	f	0.833	0.833	0.85	0.833	0.833	0.833
453	534	408	454	485	384	H1	0.503	0.593	0.453	0.504	0.539	0.427
16	12	5	8	7	6	H3	0.32	0.24	0.1	0.16	0.14	0.12
8	7	3	4	6	6	H5	0.4	0.35	0.15	0.2	0.3	0.3
1453	1437	1445	1437	1303	1145	Amp	0.559	0.553	0.556	0.553	0.501	0.44
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
457	486	360	483	414	289	H1	0.508	0.54	0.4	0.537	0.46	0.321
15	13	4	9	10	3	H3	0.3	0.26	0.08	0.18	0.2	0.06
7	4	3	4	4	2	H5	0.35	0.2	0.15	0.2	0.2	0.1

1160	1165	1161	1145	1151	1297	Amp	0.446	0.448	0.447	0.44	0.443	0.499
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
382	367	335	392	329	383	H1	0.424	0.408	0.372	0.436	0.366	0.426
9	13	5	10	14	9	H3	0.18	0.26	0.1	0.2	0.28	0.18
4	6	2	2	7	9	H5	0.2	0.3	0.1	0.1	0.35	0.45
1366	1363	1394	1377	1389	1489	Amp	0.525	0.524	0.536	0.53	0.534	0.573
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
465	393	434	459	339	485	H1	0.517	0.437	0.482	0.51	0.377	0.539
3	10	4	10	10	9	H3	0.06	0.2	0.08	0.2	0.2	0.18
6	6	8	8	5	4	H5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.25	0.2
1489	1492	1504	1955	1962	1957	Amp	0.573	0.574	0.578	0.752	0.755	0.753
50	50	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
496	363	502	623	537	662	H1	0.551	0.403	0.558	0.692	0.597	0.736
5	12	12	6	7	7	H3	0.1	0.24	0.24	0.12	0.14	0.14
4	5	1	4	4	2	H5	0.2	0.25	0.05	0.2	0.2	0.1
1875	1725	1706	1710	1880	2023	Amp	0.721	0.663	0.656	0.658	0.723	0.778
50	50	53	53	50	50	f	0.833	0.833	0.883	0.883	0.833	0.833
581	482	398	402	616	656	H1	0.646	0.536	0.442	0.447	0.684	0.729
6	16	18	19	5	9	H3	0.12	0.32	0.36	0.38	0.1	0.18
4	3	16	4	5	5	H5	0.2	0.15	0.8	0.2	0.25	0.25
2016	1567	1574	1596	1570	1561	Amp	0.775	0.775	0.603	0.605	0.614	0.604
50	49	50	50	50	50	f	0.833	0.833	0.817	0.833	0.833	0.833
536	492	529	416	499	521	H1	0.596	0.596	0.547	0.588	0.462	0.554
9	14	5	8	14	8	H3	0.18	0.18	0.28	0.1	0.16	0.28
4	5	5	4	5	2	H5	0.2	0.2	0.25	0.25	0.2	0.25
1568	1568	1571	1564	1588	1561	Amp	0.6	0.603	0.603	0.604	0.602	0.611
50	50	50	50	50	49	f	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833	0.833
385	524	505	396	520	531	H1	0.579	0.428	0.582	0.561	0.44	0.578
8	13	4	9	17	5	H3	0.16	0.16	0.26	0.08	0.18	0.34
0	3	2	4	3	4	H5	0.1	0	0.15	0.1	0.2	0.15

1559	1573	1567	1570	1561	1558	Amp	0.6	0.6	0.605	0.603	0.604	0.6
49	48	48	47	47	46	f	0.817	0.817	0.8	0.8	0.783	0.783
506	492	443	464	524	421	H1	0.59	0.562	0.547	0.492	0.516	0.582
9	4	13	12	14	17	H3	0.1	0.18	0.08	0.26	0.24	0.28
4	6	6	4	12	8	H5	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.6

1565	1557	1574	1574	1561	1569	Amp	0.599	0.602	0.599	0.605	0.605	0.6
46	45	45	44	44	43	f	0.767	0.767	0.75	0.75	0.733	0.733
366	405	306	354	254	296	H1	0.468	0.407	0.45	0.34	0.393	0.282
0	15	16	4	13	28	H3	0.34	0	0.3	0.32	0.08	0.26
7	5	12	4	7	8	H5	0.4	0.35	0.25	0.6	0.2	0.35

1592	1561	1579	1564	1565	1567	Amp	0.603	0.612	0.6	0.607	0.602	0.602
43	43	42	42	42	41	f	0.717	0.717	0.717	0.7	0.7	0.7
378	418	455	430	356	486	H1	0.329	0.42	0.464	0.506	0.478	0.396
18	4	11	18	16	16	H3	0.56	0.36	0.08	0.22	0.36	0.32
8	11	7	6	12	7	H5	0.4	0.4	0.55	0.35	0.3	0.6

1561	1585	1567	1561	1566	1563	Amp	0.603	0.6	0.61	0.603	0.6	0.602
41	40	40	40	51	51	f	0.683	0.683	0.667	0.667	0.667	0.85
378	459	533	481	493	466	H1	0.54	0.42	0.51	0.592	0.534	0.548
23	5	14	12	13	10	H3	0.32	0.46	0.1	0.28	0.24	0.26
4	5	4	3	8	11	H5	0.35	0.2	0.25	0.2	0.15	0.4

1593	1581	1565	1579	1561	1565	Amp	0.601	0.613	0.608	0.602	0.607	0.6
51	52	52	54	54	54	f	0.85	0.85	0.867	0.867	0.9	0.9
402	459	346	362	375	322	H1	0.518	0.447	0.51	0.384	0.402	0.417
8	17	8	18	16	21	H3	0.2	0.16	0.34	0.16	0.36	0.32
3	1	3	4	10	11	H5	0.55	0.15	0.05	0.15	0.2	0.5

1563	1559	1566	1559	1590	1562	Amp	0.602	0.601	0.6	0.602	0.6	0.612
55	55	56	56	57	57	f	0.9	0.917	0.917	0.933	0.933	0.95
318	326	433	413	489	479	H1	0.358	0.353	0.362	0.481	0.459	0.543
4	23	23	4	22	5	H3	0.42	0.08	0.46	0.46	0.08	0.44
8	10	12	5	12	7	H5	0.55	0.4	0.5	0.6	0.25	0.6

1566	1565	1568	1566	1579	1581	Amp	0.601	0.602	0.602	0.603	0.602	0.607
58	58	59	59	60	59	f	0.95	0.967	0.967	0.983	0.983	1
543	447	435	425	499	515	H1	0.532	0.603	0.497	0.483	0.472	0.554
11	10	8	4	13	15	H3	0.1	0.22	0.2	0.16	0.08	0.26
4	4	4	3	5	4	H5	0.35	0.2	0.2	0.2	0.15	0.25
1567	1564	1560	1572	1567	1582	Amp	0.608	0.603	0.602	0.6	0.605	0.603
61	62	64	64	64	65	f	0.983	1.017	1.033	1.067	1.067	1.067
473	336	300	364	372	436	H1	0.572	0.526	0.373	0.333	0.404	0.443
23	22	25	9	19	23	H3	0.3	0.46	0.44	0.5	0.18	0.38
14	10	15	9	14	7	H5	0.2	0.7	0.5	0.75	0.45	0.7
1872	1870	1874	1885	1887	1872	Amp	0.608	0.72	0.719	0.721	0.725	0.726
65	64	64	64	63	63	f	1.083	1.083	1.067	1.067	1.067	1.05
476	458	404	405	384	389	H1	0.484	0.529	0.509	0.449	0.45	0.427
11	30	24	41	20	34	H3	0.46	0.22	0.6	0.48	0.82	0.4
13	16	9	15	13	21	H5	0.35	0.65	0.8	0.45	0.75	0.65
1876	1873	1874	1880	1882	1877	Amp	0.72	0.722	0.72	0.721	0.723	0.724
62	62	62	62	62	62	f	1.05	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033
503	506	499	526	546	528	H1	0.432	0.559	0.562	0.554	0.584	0.607
6	24	26	18	17	23	H3	0.68	0.12	0.48	0.52	0.36	0.34
3	2	11	13	7	18	H5	1.05	0.15	0.1	0.55	0.65	0.35
1893	1878	1884	1898	1891	1874	Amp	0.722	0.728	0.722	0.725	0.73	0.727
62	62	61	61	61	60	f	1.033	1.033	1.033	1.017	1.017	1.017
535	555	590	592	566	559	H1	0.587	0.594	0.617	0.656	0.658	0.629
18	13	13	10	22	24	H3	0.46	0.36	0.26	0.26	0.2	0.44
15	4	10	6	7	8	H5	0.9	0.75	0.2	0.5	0.3	0.35
1882	1874	1879	1874	1875	1875	Amp	0.721	0.724	0.721	0.723	0.721	0.721
61	60	60	59	59	59	f	1	1.017	1	1	0.983	0.983
562	561	555	645	645	643	H1	0.621	0.624	0.623	0.617	0.717	0.717
15	15	4	4	11	9	H3	0.48	0.3	0.3	0.08	0.08	0.22
2	5	3	6	3	7	H5	0.4	0.1	0.25	0.15	0.3	0.15



1880	1877	1883	1911	1891	1889	Amp	0.721	0.723	0.722	0.724	0.735	0.727
58	58	58	58	57	57	f	0.983	0.967	0.967	0.967	0.967	0.95
602	608	614	553	627	617	H1	0.714	0.669	0.676	0.682	0.614	0.697
5	8	15	20	15	6	H3	0.18	0.1	0.16	0.3	0.4	0.3
6	8	8	6	7	4	H5	0.35	0.3	0.4	0.4	0.3	0.35

1876	1871	1884	1883	1873	1875	Amp	0.727	0.722	0.72	0.725	0.724	0.72
56	56	56	55	55	55	f	0.95	0.933	0.933	0.933	0.917	0.917
513	508	531	529	506	505	H1	0.686	0.57	0.564	0.59	0.588	0.562
15	9	16	24	19	13	H3	0.12	0.3	0.18	0.32	0.48	0.38
11	10	15	9	4	2	H5	0.2	0.55	0.5	0.75	0.45	0.2

1883	1884	1879	1873	1873	1880	Amp	0.721	0.724	0.725	0.723	0.72	0.72
54	54	54	53	53	53	f	0.917	0.9	0.9	0.9	0.883	0.883
342	373	367	456	456	364	H1	0.561	0.38	0.414	0.408	0.507	0.507
24	26	19	18	18	33	H3	0.26	0.48	0.52	0.38	0.36	0.36
7	9	14	2	2	14	H5	0.1	0.35	0.45	0.7	0.1	0.1

1870	1885	1886	1873	1870	1873	Amp	0.723	0.719	0.725	0.725	0.72	0.719
53	52	52	52	52	51	f	0.883	0.883	0.867	0.867	0.867	0.867
477	468	554	456	496	560	H1	0.404	0.53	0.52	0.616	0.507	0.551
31	31	11	19	32	9	H3	0.66	0.62	0.62	0.22	0.38	0.64
17	13	0	2	14	4	H5	0.7	0.85	0.65	0	0.1	0.7

1884	1882	1873	1870	1877	1886	Amp	0.72	0.725	0.724	0.72	0.719	0.722
51	51	51	50	50	49	f	0.85	0.85	0.85	0.85	0.833	0.833
605	460	572	553	642	657	H1	0.622	0.672	0.511	0.636	0.614	0.713
8	11	18	6	8	9	H3	0.18	0.16	0.22	0.36	0.12	0.16
10	8	6	4	4	4	H5	0.2	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2

1875	1878	1877	1870	1888	1869	Amp	0.725	0.721	0.722	0.722	0.719	0.726
49	48	48	48	47	47	f	0.817	0.817	0.8	0.8	0.8	0.783
501	563	573	629	506	557	H1	0.73	0.557	0.626	0.637	0.699	0.562
7	1	9	6	13	7	H3	0.18	0.14	0.02	0.18	0.12	0.26
3	0	3	8	6	8	H5	0.2	0.15	0	0.15	0.4	0.3

1877	1890	1874	1882	1875	1874	Amp	0.719	0.722	0.727	0.721	0.724	0.721
47	46	46	45	45	44	f	0.783	0.783	0.767	0.767	0.75	0.75
574	493	498	406	451	389	H1	0.619	0.638	0.548	0.553	0.451	0.501
18	19	14	25	10	19	H3	0.14	0.36	0.38	0.28	0.5	0.2
5	12	12	18	7	10	H5	0.4	0.25	0.6	0.6	0.9	0.35

1879	1874	1872	1879	1871	1870	Amp	0.721	0.723	0.721	0.72	0.723	0.72
44	44	44	44	43	43	f	0.733	0.733	0.733	0.733	0.733	0.717
433	417	440	382	376	486	H1	0.432	0.481	0.463	0.489	0.424	0.418
22	24	15	12	10	17	H3	0.38	0.44	0.48	0.3	0.24	0.2
14	16	6	13	4	10	H5	0.5	0.7	0.8	0.3	0.65	0.2

1876	1905	1871	1873	1887	1872	Amp	0.719	0.722	0.733	0.72	0.72	0.726
42	43	43	42	42	41	f	0.717	0.7	0.717	0.717	0.7	0.7
569	540	393	503	570	624	H1	0.54	0.632	0.6	0.437	0.559	0.633
14	7	19	25	22	2	H3	0.34	0.28	0.14	0.38	0.5	0.44
6	10	12	8	6	2	H5	0.5	0.3	0.5	0.6	0.4	0.3

1874	1873	1877	1920	1962	1970	Amp	0.72	0.721	0.72	0.722	0.738	0.755
41	41	41	39	40	40	f	0.683	0.683	0.683	0.683	0.65	0.667
506	519	545	557	698	622	H1	0.693	0.562	0.577	0.606	0.619	0.776
16	25	12	5	4	8	H3	0.04	0.32	0.5	0.24	0.1	0.08
2	11	7	4	3	4	H5	0.1	0.1	0.55	0.35	0.2	0.15

1971	1974	1973	1975	1979	1972	Amp	0.758	0.758	0.759	0.759	0.76	0.761
41	42	41	42	43	43	f	0.667	0.683	0.7	0.683	0.7	0.717
587	519	645	619	586	485	H1	0.691	0.652	0.577	0.717	0.688	0.651
3	22	25	14	16	11	H3	0.16	0.06	0.44	0.5	0.28	0.32
5	11	7	5	12	1	H5	0.2	0.25	0.55	0.35	0.25	0.6

1975	1974	1971	1972	1973	1975	Amp	0.758	0.76	0.759	0.758	0.758	0.759
43	43	44	44	44	45	f	0.717	0.717	0.717	0.733	0.733	0.733
462	504	418	466	429	535	H1	0.539	0.513	0.56	0.464	0.518	0.477
13	31	25	9	22	14	H3	0.22	0.26	0.62	0.5	0.18	0.44
5	15	12	8	14	9	H5	0.05	0.25	0.75	0.6	0.4	0.7

1975	1981	1975	1973	1973	1978	Amp	0.76	0.76	0.762	0.76	0.759	0.759
46	45	45	46	46	47	f	0.75	0.767	0.75	0.75	0.767	0.767
446	470	519	586	442	582	H1	0.594	0.496	0.522	0.577	0.651	0.491
20	27	20	6	19	8	H3	0.28	0.4	0.54	0.4	0.12	0.38
20	13	2	0	3	7	H5	0.45	1	0.65	0.1	0	0.15

1976	1976	1973	1973	1973	1971	Amp	0.761	0.76	0.76	0.759	0.759	0.759
47	48	48	49	49	49	f	0.783	0.783	0.8	0.8	0.817	0.817
589	635	563	604	707	605	H1	0.647	0.654	0.706	0.626	0.671	0.786
16	0	9	3	11	4	H3	0.16	0.32	0	0.18	0.06	0.22
9	9	6	5	3	2	H5	0.35	0.45	0.45	0.3	0.25	0.15

1977	1972	1976	1972	1976	1981	Amp	0.758	0.76	0.758	0.76	0.758	0.76
49	49	49	50	50	50	f	0.817	0.817	0.817	0.817	0.833	0.833
609	703	598	672	654	528	H1	0.672	0.677	0.781	0.664	0.747	0.727
8	4	9	12	7	16	H3	0.08	0.16	0.08	0.18	0.24	0.14
5	2	3	2	9	13	H5	0.1	0.25	0.1	0.15	0.1	0.45

1974	1971	1976	1972	1976	1979	Amp	0.762	0.759	0.758	0.76	0.758	0.76
51	51	52	52	52	53	f	0.833	0.85	0.85	0.867	0.867	0.867
608	634	587	454	572	514	H1	0.587	0.676	0.704	0.652	0.504	0.636
27	14	19	10	18	11	H3	0.32	0.54	0.28	0.38	0.2	0.36
10	5	6	8	11	8	H5	0.65	0.5	0.25	0.3	0.4	0.55

1971	1992	1971	1975	1974	1973	Amp	0.761	0.758	0.766	0.758	0.76	0.759
53	54	54	55	55	56	f	0.883	0.883	0.9	0.9	0.917	0.917
367	441	477	549	516	620	H1	0.571	0.408	0.49	0.53	0.61	0.573
30	20	34	32	27	12	H3	0.22	0.6	0.4	0.68	0.64	0.54
18	5	14	10	8	5	H5	0.4	0.9	0.25	0.7	0.5	0.4

1972	1979	1971	1973	1973	1979	Amp	0.759	0.758	0.761	0.758	0.759	0.759
56	57	57	57	58	58	f	0.933	0.933	0.95	0.95	0.95	0.967
640	526	524	512	685	689	H1	0.689	0.711	0.584	0.582	0.569	0.761
26	12	5	15	9	4	H3	0.24	0.52	0.24	0.1	0.3	0.18
12	5	8	5	6	7	H5	0.25	0.6	0.25	0.4	0.25	0.3

1974	1976	1975	1982	2053	2061	Amp	0.761	0.759	0.76	0.76	0.762	0.79
58	58	59	60	60	60	f	0.967	0.967	0.967	0.983	1	1
694	700	698	674	721	718	H1	0.766	0.771	0.778	0.776	0.749	0.801
12	10	8	20	3	14	H3	0.08	0.24	0.2	0.16	0.4	0.06
5	5	3	11	4	6	H5	0.35	0.25	0.25	0.15	0.55	0.2

2069	2064	2062	2064	2061	2062	Amp	0.793	0.796	0.794	0.793	0.794	0.793
58	57	56	56	55	55	f	1	0.967	0.95	0.933	0.933	0.917
700	635	658	654	436	441	H1	0.798	0.778	0.706	0.731	0.727	0.484
7	16	23	7	9	19	H3	0.28	0.14	0.32	0.46	0.14	0.18
3	7	8	4	3	12	H5	0.3	0.15	0.35	0.4	0.2	0.15

2062	2083	2066	2066	2061	2069	Amp	0.793	0.793	0.801	0.795	0.795	0.793
54	54	52	51	50	50	f	0.917	0.9	0.9	0.867	0.85	0.833
471	478	612	536	654	602	H1	0.49	0.523	0.531	0.68	0.596	0.727
26	29	10	20	10	23	H3	0.38	0.52	0.58	0.2	0.4	0.2
6	17	7	11	4	7	H5	0.6	0.3	0.85	0.35	0.55	0.2

2067	2063	2068	2066	2071	2063	Amp	0.796	0.795	0.793	0.795	0.795	0.797
49	49	48	47	46	45	f	0.833	0.817	0.817	0.8	0.783	0.767
590	702	699	642	635	520	H1	0.669	0.656	0.78	0.777	0.713	0.706
9	9	14	6	24	9	H3	0.46	0.18	0.18	0.28	0.12	0.48
7	6	2	4	14	7	H5	0.35	0.35	0.3	0.1	0.2	0.7

2063	2073	2064	2072	2064	1554	Amp	0.793	0.793	0.797	0.794	0.797	0.794
44	43	42	41	40	41	f	0.75	0.733	0.717	0.7	0.683	0.667
474	525	612	711	607	462	H1	0.578	0.527	0.583	0.68	0.79	0.674
21	18	29	3	7	4	H3	0.18	0.42	0.36	0.58	0.06	0.14
13	3	11	6	4	1	H5	0.35	0.65	0.15	0.55	0.3	0.2

1443	1441	1437	1435	1434	1436	Amp	0.598	0.555	0.554	0.553	0.552	0.552
40	41	42	43	43	45	f	0.683	0.667	0.683	0.7	0.717	0.717
493	338	336	333	330	329	H1	0.513	0.548	0.376	0.373	0.37	0.367
11	5	15	7	27	20	H3	0.08	0.22	0.1	0.3	0.14	0.54
1	8	4	10	17	8	H5	0.05	0.05	0.4	0.2	0.5	0.85

1434	1441	1465	1448	1437	1436	Amp	0.552	0.552	0.554	0.563	0.557	0.553
45	46	46	47	48	48	f	0.75	0.75	0.767	0.767	0.783	0.8
338	447	362	464	395	459	H1	0.366	0.376	0.497	0.402	0.516	0.439
15	9	15	16	9	7	H3	0.4	0.3	0.18	0.3	0.32	0.18
8	8	7	7	4	1	H5	0.4	0.4	0.4	0.35	0.35	0.2
1437	1437	1441	1437	1435	1433	Amp	0.552	0.553	0.553	0.554	0.553	0.552
48	49	49	50	50	51	f	0.8	0.8	0.817	0.817	0.833	0.833
486	494	410	368	465	436	H1	0.51	0.54	0.549	0.456	0.409	0.517
5	6	8	5	8	21	H3	0.14	0.1	0.12	0.16	0.1	0.16
1	6	3	5	4	6	H5	0.05	0.05	0.3	0.15	0.25	0.2
1441	1441	1435	1436	1437	1453	Amp	0.551	0.554	0.554	0.552	0.552	0.553
51	52	53	54	55	56	f	0.85	0.85	0.867	0.883	0.9	0.917
450	414	295	316	302	382	H1	0.484	0.5	0.46	0.328	0.351	0.336
9	16	5	17	11	23	H3	0.42	0.18	0.32	0.1	0.34	0.22
11	9	5	3	7	10	H5	0.3	0.55	0.45	0.25	0.15	0.35
1463	1493	1446	1442	1439	1434	Amp	0.559	0.563	0.574	0.556	0.555	0.553
57	57	58	59	59	60	f	0.933	0.95	0.95	0.967	0.983	0.983
441	408	413	497	500	422	H1	0.424	0.49	0.453	0.459	0.552	0.556
14	11	5	6	8	12	H3	0.46	0.28	0.22	0.1	0.12	0.16
11	4	5	4	5	5	H5	0.5	0.55	0.2	0.25	0.2	0.25
1295	1306	1294	1323	1295	1310	Amp	0.552	0.498	0.502	0.498	0.509	0.498
60	59	58	57	57	56	f	1	1	0.983	0.967	0.95	0.95
390	447	455	320	317	347	H1	0.469	0.433	0.497	0.506	0.356	0.352
15	4	9	12	11	6	H3	0.24	0.3	0.08	0.18	0.24	0.22
9	7	6	4	2	3	H5	0.25	0.45	0.35	0.3	0.2	0.1
1295	1322	1290	1293	1327	1292	Amp	0.504	0.498	0.508	0.496	0.497	0.51
55	54	54	53	53	52	f	0.933	0.917	0.9	0.9	0.883	0.883
349	244	277	300	330	344	H1	0.386	0.388	0.271	0.308	0.333	0.367
18	22	6	17	8	6	H3	0.12	0.36	0.44	0.12	0.34	0.16
14	7	7	2	2	8	H5	0.15	0.7	0.35	0.35	0.1	0.1

1295	1301	1303	1293	1324	1315	Amp	0.497	0.498	0.5	0.501	0.497	0.509
51	50	50	49	49	48	f	0.867	0.85	0.833	0.833	0.817	0.817
320	410	447	326	344	434	H1	0.382	0.356	0.456	0.497	0.362	0.382
2	5	9	7	11	12	H3	0.12	0.04	0.1	0.18	0.14	0.22
10	5	3	4	7	4	H5	0.4	0.5	0.25	0.15	0.2	0.35

1292	1291	1292	1303	1301	1310	Amp	0.506	0.497	0.497	0.497	0.501	0.5
47	46	45	45	44	43	f	0.8	0.783	0.767	0.75	0.75	0.733
333	329	318	297	279	302	H1	0.482	0.37	0.366	0.353	0.33	0.31
8	14	17	13	17	8	H3	0.24	0.16	0.28	0.34	0.26	0.34
1	10	8	7	6	10	H5	0.2	0.05	0.5	0.4	0.35	0.3

1296	1299	1329	1293	1320	1293	Amp	0.504	0.498	0.5	0.511	0.497	0.508
42	41	41	40	40	40	f	0.717	0.7	0.683	0.683	0.667	0.667
357	372	418	382	444	399	H1	0.336	0.397	0.413	0.464	0.424	0.493
5	18	14	5	12	10	H3	0.16	0.1	0.36	0.28	0.1	0.24
2	1	10	0	5	9	H5	0.5	0.1	0.05	0.5	0	0.25

1149	1157	1154	1152	1144	1149	Amp	0.497	0.442	0.445	0.444	0.443	0.44
40	41	42	42	43	43	f	0.667	0.667	0.683	0.7	0.7	0.717
311	358	289	307	256	268	H1	0.443	0.346	0.398	0.321	0.341	0.284
5	14	15	14	2	13	H3	0.2	0.1	0.28	0.3	0.28	0.04
4	8	5	6	5	6	H5	0.45	0.2	0.4	0.25	0.3	0.25

1159	1171	1155	1145	1152	1153	Amp	0.442	0.446	0.45	0.444	0.44	0.443
44	44	45	46	46	47	f	0.717	0.733	0.733	0.75	0.767	0.767
217	267	248	308	341	314	H1	0.298	0.241	0.297	0.276	0.342	0.379
7	11	8	7	16	6	H3	0.26	0.14	0.22	0.16	0.14	0.32
3	8	7	4	3	2	H5	0.3	0.15	0.4	0.35	0.2	0.15

1149	1147	1158	1146	1164	1145	Amp	0.443	0.442	0.441	0.445	0.441	0.448
48	48	49	49	49	50	f	0.783	0.8	0.8	0.817	0.817	0.817
321	387	324	389	305	376	H1	0.349	0.357	0.43	0.36	0.432	0.339
12	10	8	7	9	15	H3	0.12	0.24	0.2	0.16	0.14	0.18
4	0	4	5	8	8	H5	0.1	0.2	0	0.2	0.25	0.4

1144	1191	1156	1158	1146	1155	Amp	0.44	0.44	0.458	0.445	0.445	0.441
51	51	52	53	53	55	f	0.833	0.85	0.85	0.867	0.883	0.883
336	313	269	283	242	312	H1	0.418	0.373	0.348	0.299	0.314	0.269
8	6	12	17	9	7	H3	0.3	0.16	0.12	0.24	0.34	0.18
3	2	9	6	5	11	H5	0.4	0.15	0.1	0.45	0.3	0.25

1145	1156	1150	1144	1151	1148	Amp	0.444	0.44	0.445	0.442	0.44	0.443
55	55	55	57	58	59	f	0.917	0.917	0.917	0.917	0.95	0.967
305	313	363	375	359	324	H1	0.347	0.339	0.348	0.403	0.417	0.399
8	14	17	0	5	10	H3	0.14	0.16	0.28	0.34	0	0.1
8	10	3	4	3	3	H5	0.55	0.4	0.5	0.15	0.2	0.15

1146	1147	1152	1146	1166	1155	Amp	0.442	0.441	0.441	0.443	0.441	0.448
58	60	60	60	60	61	f	0.983	0.967	1	1	1	1
333	289	283	273	271	292	H1	0.36	0.37	0.321	0.314	0.303	0.301
7	5	9	3	10	15	H3	0.2	0.14	0.1	0.18	0.06	0.2
6	4	3	2	3	4	H5	0.15	0.3	0.2	0.15	0.1	0.15

1014	1014	1016	1015	1045	1043	Amp	0.444	0.39	0.39	0.391	0.39	0.402
60	58	57	57	56	56	f	1.017	1	0.967	0.95	0.95	0.933
310	342	336	336	316	310	H1	0.324	0.344	0.38	0.373	0.373	0.351
7	5	11	6	5	13	H3	0.3	0.14	0.1	0.22	0.12	0.1
3	6	3	10	7	5	H5	0.2	0.15	0.3	0.15	0.5	0.35

1025	1023	1014	1011	1018	1041	Amp	0.401	0.394	0.393	0.39	0.389	0.392
55	55	54	54	53	52	f	0.933	0.917	0.917	0.9	0.9	0.883
239	256	221	203	256	268	H1	0.344	0.266	0.284	0.246	0.226	0.284
8	9	12	7	5	18	H3	0.26	0.16	0.18	0.24	0.14	0.1
11	9	11	10	5	3	H5	0.25	0.55	0.45	0.55	0.5	0.25

1015	1014	1043	1024	1038	1013	Amp	0.4	0.39	0.39	0.401	0.394	0.399
52	51	50	49	48	47	f	0.867	0.867	0.85	0.833	0.817	0.8
296	317	255	263	280	323	H1	0.298	0.329	0.352	0.283	0.292	0.311
6	6	10	7	3	4	H3	0.36	0.12	0.12	0.2	0.14	0.06
3	6	3	5	5	7	H5	0.15	0.15	0.3	0.15	0.25	0.25

1023	1056	1014	1039	1019	1015	Amp	0.39	0.393	0.406	0.39	0.4	0.392
46	46	46	45	44	44	f	0.783	0.767	0.767	0.767	0.75	0.733
288	320	257	261	236	246	H1	0.359	0.32	0.356	0.286	0.29	0.262
6	17	18	1	7	12	H3	0.08	0.12	0.34	0.36	0.02	0.14
7	8	1	2	11	8	H5	0.35	0.35	0.4	0.05	0.1	0.55

1018	1027	1026	1075	1016	1018	Amp	0.39	0.392	0.395	0.395	0.413	0.391
43	43	42	42	42	41	f	0.733	0.717	0.717	0.7	0.7	0.7
260	211	236	289	294	333	H1	0.273	0.289	0.234	0.262	0.321	0.327
12	8	11	7	5	10	H3	0.24	0.24	0.16	0.22	0.14	0.1
4	6	6	10	4	8	H5	0.4	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2

1033	1044	876	929	872	903	Amp	0.392	0.397	0.402	0.337	0.357	0.335
41	40	40	50	52	52	f	0.683	0.683	0.667	0.667	0.833	0.867
277	347	279	236	239	242	H1	0.37	0.308	0.386	0.31	0.262	0.266
5	6	9	9	0	14	H3	0.2	0.1	0.12	0.18	0.18	0
7	4	4	4	4	4	H5	0.4	0.35	0.2	0.2	0.2	0.2