

การศึกษาผลกระทบฮาร์มอนิกส์ ณ ศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9

ต่อระบบไฟฟ้าภายในอาคาร

THE STUDY ON HARMONICS IMPACT OF COMPUTER CENTER  
IN 9<sup>th</sup> FLOOR BUILDING 5

นายสิทธิชัย	ทัศนีย์ทิพากร
นายนิรันดร์	ปั้นฉาย
นางสาวอรรวรรณ	สิริวัฒน์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีการศึกษา 2552

52EE110

หัวข้อโครงการ การศึกษาผลกระทบฮาร์โมนิกส์ ณ ศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5  
ชั้น 9 ต่อระบบไฟฟ้าภายในอาคาร

โดย นายสิทธิชัย ทศนีย์ทิพากร  
นายนิรันดร์ ปั้นฉาย  
นางสาวอรวรรณ สิริวัฒน์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. นิमित บุญภิรมย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
( ดร. นิमित บุญภิรมย์ )

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ดร. นิमित บุญภิรมย์ )

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2553

รหัสโครงการ 52EE110

การศึกษาผลกระทบฮาร์มอนิกส์ ณ ศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9

ต่อระบบไฟฟ้าภายในอาคาร

THE STUDY ON HARMONICS IMPACT OF COMPUTER CENTER

IN 9<sup>th</sup> FLOOR BUILDING 5

### บทคัดย่อ (Abstract)

โครงการนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ ณ ศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9 ต่อระบบไฟฟ้าภายในอาคาร เนื้อหาประกอบด้วย รายละเอียดพื้นฐานของคุณภาพไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์ ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ การออกแบบและการจำลองตัวกรองฮาร์มอนิกส์ด้วยคอมพิวเตอร์ วัตถุประสงค์ของโครงการต้องการศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกส์และผลกระทบอันเนื่องมาจากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่อระบบไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์จากคอมพิวเตอร์ในศูนย์คอมพิวเตอร์ วิเคราะห์ผลฮาร์มอนิกส์ให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 สร้างแบบจำลองการกรองฮาร์มอนิกส์และออกแบบเพื่อสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ซึ่งในส่วนการออกแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการนำผลการออกแบบมาจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ ผลการจำลองจะพบว่าสามารถกรองฮาร์มอนิกส์ออกจากระบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนที่ 2 เป็นการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้กับศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 และส่วนที่ 3 เป็นการออกแบบและสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้กับห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 14 ห้อง 1405 ผลจากการวัดและวิเคราะห์หลังจากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ได้รับผลตามวัตถุประสงค์ทุกประการสามารถแก้ไขกระแสฮาร์มอนิกส์ได้ตรงตามมาตรฐาน IEEE 519 - 1992 และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อสร้างตัวกรองให้กับศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9 ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการเล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ อันเนื่องจากการการถ่ายทอดความรู้และการให้คำแนะนำที่ดีจากท่าน ดร.นิมิต บุญภิรมย์ ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน เจ้าหน้าที่และเพื่อนๆ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในหลายๆเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงการนี้ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.นิมิต บุญภิรมย์ และมหาวิทยาลัยศรีปทุมเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้ด้วย

คุณความดีสิ่งใดที่บังเกิดขึ้นจากโครงการนี้ ผู้จัดทำขออุทิศให้กับ บิดามารดาและบูรพคณาจารย์สืบต่อไป

คณะผู้จัดทำ

ปีการศึกษา 2552

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 โครงสร้างของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ประโยชน์ของโครงการ	3
บทที่ 2 คุณภาพไฟฟ้าและการเกิดฮาร์มอนิกส์	
2.1 ความรู้เบื้องต้นด้านรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส	4
2.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้า	5
2.3 ประเภทของฮาร์มอนิกส์	13
2.4 ส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์	14
2.5 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์	19
2.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์	20
2.7 การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์	27
2.8 วิธีการป้องกันฮาร์มอนิกส์	29
2.9 ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับการควบคุมฮาร์มอนิกส์	30
2.10 หลักการลดและตัวกรอง	30
2.11 ทฤษฎีของแกนเหล็กและตัวเหนี่ยวนำ	33
2.12 รูปร่างของแกนเหล็ก	35
2.13 คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 เส้นแรงแม่เหล็ก	37
2.15 ค่าความเหนี่ยวนำ	38
2.16 การออกแบบอินดักเตอร์	39
<b>บทที่ 3 การวัดและวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกส์</b>	
3.1 ทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์อาคาร 5 ชั้น 9	43
3.2 การเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวัดอาคาร 5 ชั้น 9 กับค่ามาตรฐาน	49
3.3 การวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405	54
3.4 การเปรียบเทียบฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวัดอาคาร 5 ห้อง 5-1405 กับค่ามาตรฐาน	61
<b>บทที่ 4 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์</b>	
4.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกส์	63
4.2 จำนวนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดอาคาร 5 ชั้น 9	65
4.3 จำนวนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดอาคาร 5 ห้อง 5-1405	75
4.4 การออกแบบ Inductor อาคาร 5 ห้อง 5-1504 มหาวิทยาลัยศรีปทุม	84
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง</b>	
5.1 การจำลองระบบไฟฟ้าของอาคาร 5 ชั้น 9 โดยใช้โปรแกรม MATLAB	89
5.2 การจำลองระบบไฟฟ้าของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 โดยใช้โปรแกรม MATLAB	93
5.3 การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า อาคาร 5 ห้อง 5-1405	97
5.4 ผลการวัดที่ได้หลังจากติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบ อาคาร 5 ห้อง 5-1405	100
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
สรุปและข้อเสนอแนะ	103
อ้างอิง	105
ภาคผนวก	

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ผลจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส a	44
ตารางที่ 3.2 ผลจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส b	46
ตารางที่ 3.3 ผลจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส c	48
ตารางที่ 3.4 IEEE 519 – 1992 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V through 69 KV)	50
ตารางที่ 3.5 IEEE 519 – 1992 Voltage Distortion Limits	50
ตารางที่ 3.6 ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส a	55
ตารางที่ 3.7 ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส b	57
ตารางที่ 3.8 ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส c	59
ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> และ %THD <sub>v</sub> ของเฟส a, b และ c ในอันดับที่ 1, 3, 5 และ 7	65
ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> ของเฟส a ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7	66
ตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> ของเฟส b ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7	69
ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> ของเฟส c ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7	72
ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> และ %THD <sub>v</sub> ของเฟส a, b และ c ในอันดับที่ 1, 3, 5 และ 7	75
ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> ของเฟส a ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7	76
ตารางที่ 4.7 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> ของเฟส b ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7	78
ตารางที่ 4.8 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD <sub>i</sub> ของเฟส c ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7	81
ตารางที่ 5.1 ค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้จากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์เฟส c	100

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงการ	3
ภาพที่ 2.1 สัญญาณทางไฟฟ้าของแรงดัน และกระแส	4
ภาพที่ 2.2 สัญญาณของกระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดสภาวะอิมพัลส์ชั่วคราว จากการเกิดโดยฟ้าผ่า	6
ภาพที่ 2.3 สัญญาณของกระแสออสซิลเลทชั่วคราวที่เกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบ Back – to –Back	7
ภาพที่ 2.4 สัญญาณของแรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วคราวซึ่งเกิดจากการสวิตชิง คาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ	7
ภาพที่ 2.5 สัญญาณของแรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วคราวที่เกิดจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ในสภาวะหม้อแปลงไม่มีโหลด	8
ภาพที่ 2.6 สัญญาณของ Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้าลงดิน	9
ภาพที่ 2.7 สัญญาณของ Voltage Sag จากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่	9
ภาพที่ 2.8 สัญญาณของ Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้าลงดิน	10
ภาพที่ 2.9 สัญญาณไฟฟ้าดับชั่วคราวจากสาเหตุรีโคลสเซอร์มีการทำงาน เนื่องจากการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า	10
ภาพที่ 2.10 สัญญาณของแรงดันไม่สมดุลที่สายป้อนที่จ่ายไฟฟ้าให้ที่พักอาศัย	12
ภาพที่ 2.11 คลื่นส่วนประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 และอันดับที่ 5	15
ภาพที่ 2.12 คลื่นสัญญาณของฮาร์มอนิกที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น ของอุปกรณ์ประเภทอาร์ค	20
ภาพที่ 2.13 เฟสเซอร์โคอะแกรมที่ใช้ในการหาค่า True Power Factor	26
ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด ความถี่ในการสวิตซ์ และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค SPWM แบบสองขั้ว	28
ภาพที่ 2.15 วงจรกรองความถี่และการทำงานของวงจรกรองความถี่	32
ภาพที่ 2.16 แสดงการตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, BPF)	33



## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.17 แกนเหล็กแบบแกน EI	35
ภาพที่ 2.18 แกนเหล็กแบบแกน C – core	35
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงาน	42
ภาพที่ 3.2 Single Line Diagram ของตู้ MDB และ Feeder 9 <sup>th</sup> Panel Board	43
ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์	43
ภาพที่ 3.4 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส a	45
ภาพที่ 3.5 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส a	45
ภาพที่ 3.6 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส b	47
ภาพที่ 3.7 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส b	47
ภาพที่ 3.8 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส c	49
ภาพที่ 3.9 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส c	49
ภาพที่ 3.10 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์และสเปกตรัมของชั้น 9	51
ภาพที่ 3.11 สัญญาณแรงดันฮาร์มอนิกส์และสเปกตรัมของอาคาร 5 ชั้น 9	52
ภาพที่ 3.12 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากอาคาร 5 ชั้น 9 กับมาตรฐาน IEEE519-1992	53
ภาพที่ 3.13 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากอาคาร 5 ชั้น 9 กับมาตรฐาน IEEE519-1992	53
ภาพที่ 3.14 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์	54
ภาพที่ 3.15 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส a	56
ภาพที่ 3.16 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส a	56
ภาพที่ 3.17 กราฟแท่งแสดงเปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส b	58
ภาพที่ 3.18 กราฟแท่งแสดงเปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส b	58
ภาพที่ 3.19 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส c	60
ภาพที่ 3.20 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส c	60
ภาพที่ 3.21 สัญญาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์จากการวัดของอาคาร 5 ห้อง 5-1405	61

## สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.22 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวัด กับมาตรฐาน IEEE 519-1992	62
ภาพที่ 3.23 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวัด กับมาตรฐาน IEEE 519-1992	62
ภาพที่ 4.1 วงจรตัวกรองฮาร์มอนิกส์	63
ภาพที่ 5.1 วงจรของระบบก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	90
ภาพที่ 5.2 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 ก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	90
ภาพที่ 5.3 วงจรจำลองการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9	91
ภาพที่ 5.4 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9	92
ภาพที่ 5.5 สัญญาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลผ่านตัวกรองกราวด์	92
ภาพที่ 5.6 สัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ	92
ภาพที่ 5.7 วงจรของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	93
ภาพที่ 5.8 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	94
ภาพที่ 5.9 วงจรจำลองการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5 -1405	95
ภาพที่ 5.10 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405	95
ภาพที่ 5.11 สัญญาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลผ่านตัวกรองกราวด์	96
ภาพที่ 5.12 สัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ	96
ภาพที่ 5.13 ตำแหน่งการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405	97
ภาพที่ 5.14 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	97
ภาพที่ 5.15 สเปกตรัมของแรงดันก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	98
ภาพที่ 5.16 สเปกตรัมของกระแสก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	99
ภาพที่ 5.17 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์หลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์	101

## สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 5.18 เปอร์เซ็นต์แรงดันฮาร์โมนิกส์หลังติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์

101

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตมนุษย์มากขึ้น คอมพิวเตอร์เป็นอีกหนึ่งของเทคโนโลยีที่ตอบสนองความสะดวกในชีวิตมนุษย์ ทำให้ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากการใช้อุปกรณ์เหล่านี้เพิ่มมากขึ้น มักก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง และเข้ามาในระบบจำหน่าย ทำให้เกิดการรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียง เป็นผลทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย

ด้วยเหตุนี้จึงต้องศึกษาและเข้าใจในเรื่องของฮาร์มอนิกส์ ตั้งแต่ระบบสัญญาณทางไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ และผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์ เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมและแก้ไขให้สอดคล้องกับมาตรฐาน และยกระดับให้ระบบเกิดการดำเนินงานอย่างมีประสิทธิภาพ

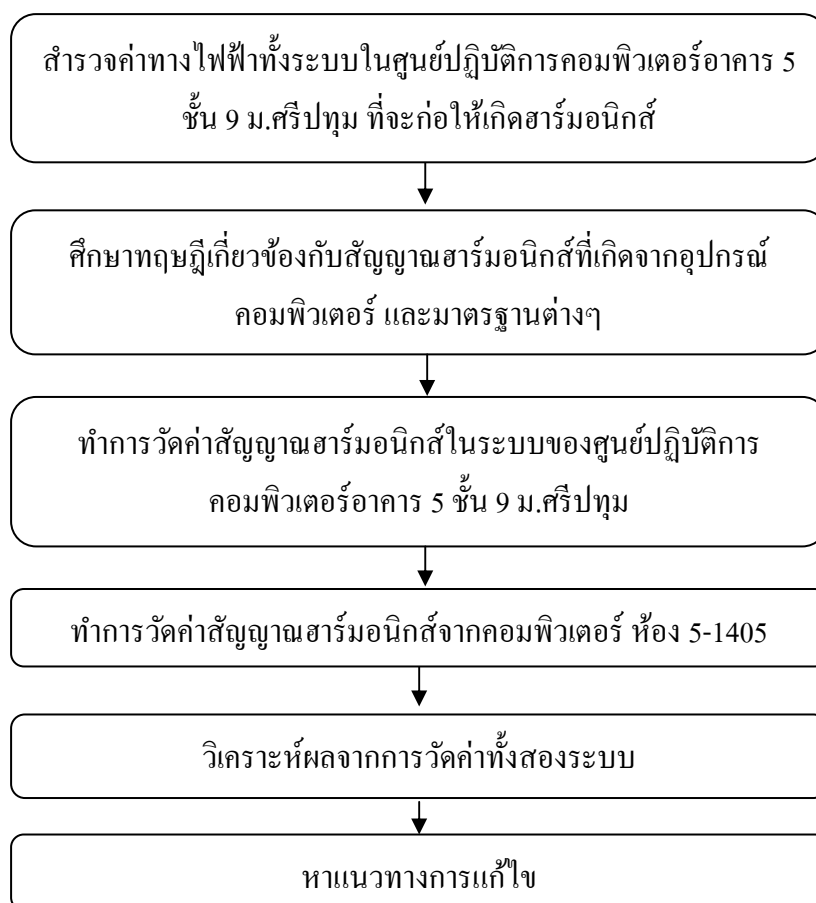
### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

- ปัญหาจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า
- คอมพิวเตอร์เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณฮาร์มอนิกส์ประเภทหนึ่งซึ่งจะพบมากในอาคารสำนักงาน ร้านอินเทอร์เน็ต รวมไปถึงศูนย์คอมพิวเตอร์ เป็นต้น
- ผลของการเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงทำงานผิดปกติ เช่น มอเตอร์ร้อน หลอดฟลูออเรสเซนต์กระพริบ ภาพสัญญาณโทรทัศน์ไม่ชัด เป็นต้น
- ผลของการเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์อาจจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ถ้าหากเกิดสภาวะเรโซแนนซ์
- ผลของการเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามีค่าสูญเสียมากกว่าปกติ
- ผลการเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนทั้ง Conducted Emission และ Radiated Emission

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกส์ และผลกระทบอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์ในระบบ ไฟฟ้า
- เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์จากคอมพิวเตอรืในศูนย์คอมพิวเตอร์ จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลให้สอดคล้องกับมาตรฐาน
- เพื่อออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์และสร้างแบบจำลอง

## 1.3 โครงสร้างของโครงการ



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงการ

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

- ทำการวิเคราะห์ระบบคอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุมในระบบสายป้อน
- วิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 519-1992
- สร้างแบบจำลองกรณีศึกษาในคอมพิวเตอร์ ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ กระแสไม่เกิน 5 แอมป์
- คำนวณ ออกแบบ จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบ Passive Filter ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ กระแสไม่เกิน 5 แอมป์

#### 1.5 ประโยชน์ของโครงการ

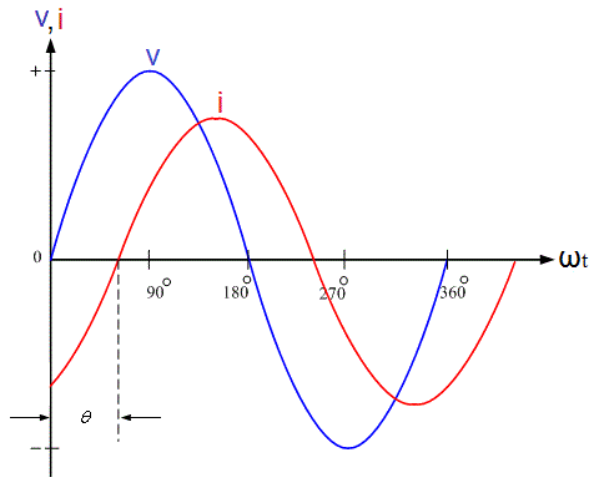
- ทำให้ทราบถึงการเกิดฮาร์มอนิกส์ และผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง
- เพื่อให้ทราบผลจากการวิเคราะห์ระบบ และนำมาเป็นแหล่งข้อมูลในการแก้ปัญหา
- เพื่อให้ทราบถึงการออกแบบวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์
- สามารถนำความรู้ในเชิงวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ให้เกิดการพัฒนาอย่างเป็นประโยชน์

## บทที่ 2

### คุณภาพไฟฟ้าและการเกิดฮาร์มอนิกส์

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นด้านรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส [3]

ไฟฟ้ากระแสสลับที่เราใช้งานกันอยู่ทุกวันนี้โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 สัญญาณทางไฟฟ้าของแรงดัน และกระแส

จากภาพที่ 2.1 นี้สามารถเขียนเป็นสมการแสดงขนาดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ดังนี้

สมการแรงดัน ดังสมการที่ (2.1)

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\omega = 2\pi f \quad \text{rad/sec}$$

ดังนั้นจะได้สมการแรงดันใหม่ดังสมการที่ (2.2)

$$v(t) = V_m \sin(2\pi ft) \quad (2.2)$$

สมการกระแส ดังสมการที่ (2.3)

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \theta) \quad (2.3)$$

ดังนั้นจะได้สมการกระแสใหม่ดังสมการที่ (2.4)

$$i(t) = I_m \sin(2\pi ft - \theta) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$v(t)$  = ขนาดแรงดัน ณ เวลา  $t$  ใดๆ

$V_m$  = ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของแรงดัน

$i(t)$  = ขนาดกระแส ณ เวลา  $t$  ใดๆ

$I_m$  = ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของกระแส

$f$  = ความถี่ของแรงดันและกระแส

$\theta$  = ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน

$t$  = เวลา

## 2.2 คุณภาพไฟฟ้า

ความมั่นคงในการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าและกรณีเมื่อเกิดปัญหาอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงานจากผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเห็นได้ว่าคำนิยามของ คำว่า คุณภาพไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟจะพูดถึงในกรณีที่แตกต่างกันไป แต่ในความเป็นจริงแล้วมีความหมายเดียวกันซึ่งนิยามของคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE ให้ ความหมายของคุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ คุณลักษณะกระแสแรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ในสภาวะปกติไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงาน ผิดพลาดหรือเกิดการเสียหาย

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าที่แน่นอนได้แก่ค่า Power Factor, Noise และ Harmonics ถ้าเราสามารถควบคุมและกำจัดค่าดังกล่าวจะทำให้ได้ไฟฟ้ามี คุณภาพและประสิทธิภาพที่ดี

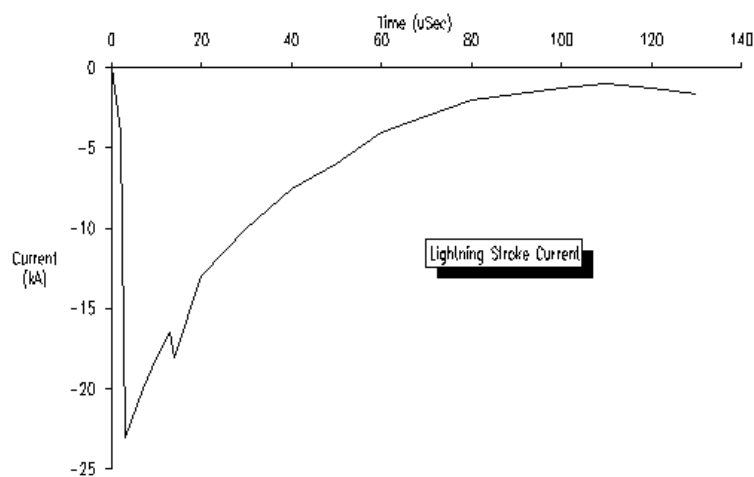


ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุใหญ่ ได้แก่

- จากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า
- จากการเกิดสภาวะความผิดปกติ (fault) ในระบบสายส่งและจำหน่ายของการไฟฟ้า
- จากการกระทำการสวิตชิงอุปกรณ์ในระบบ
- จากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น
- จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

**2.2.1 สภาวะชั่วคราว (Transient State)** คือปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพกระแสหรือแรงดันในเวลาทันทีทันใดจากสภาพปกติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Impulsive Transients และ Oscillatory Transients

**2.2.1.1 สภาวะอิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transients State)** คือขนาดกระแสและแรงดันที่มีค่าความชันสูงมาก เกิดขึ้นในทันทีทันใดไม่มีความถี่เปลี่ยนแปลงกำหนดให้มีชั่วทิศทางเดียวหรือเรียกว่าเสิร์จ (Surge) ดังภาพที่ 2.2 มีสาเหตุเกิดจากฟ้าผ่าซึ่งอาจเกิดได้โดยตรงหรือในบริเวณใกล้เคียงมีผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน

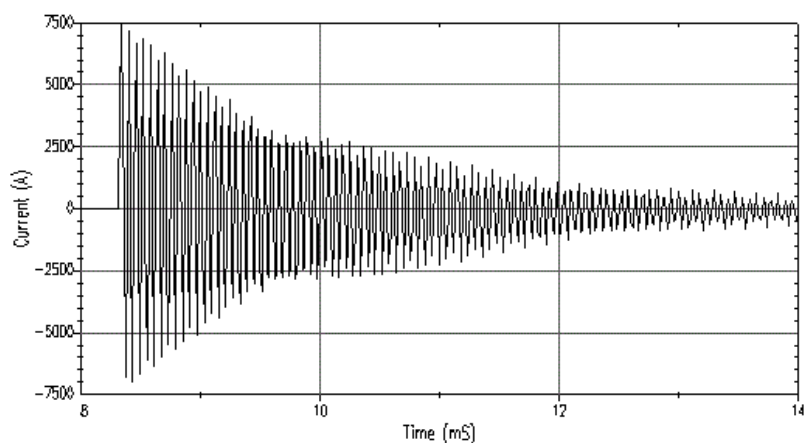


Lightning Stroke Current Impulsive Transient

ภาพที่ 2.2 สัญญาณของกระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดสภาวะอิมพัลส์ชั่วคราวจากการเกิดโดยฟ้าผ่า

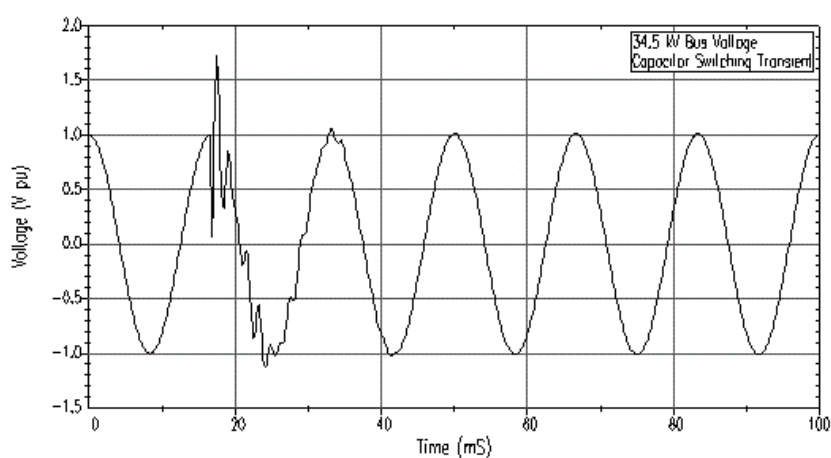
**2.2.1.2 การสวิตชิงชั่วคราว (Oscillatory Transient)** คือ ลักษณะของแรงดันหรือกระแสแรงดันมีค่าสูง เกิดขึ้นในทันทีทันใด ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงแต่มีการเปลี่ยนแปลงชั่ววอกของรูปคลื่นอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 มีสาเหตุเกิดจากการสวิตชิงของอุปกรณ์ใน

ระบบ ผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหายและฉนวนของอุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพหรือมีการสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น



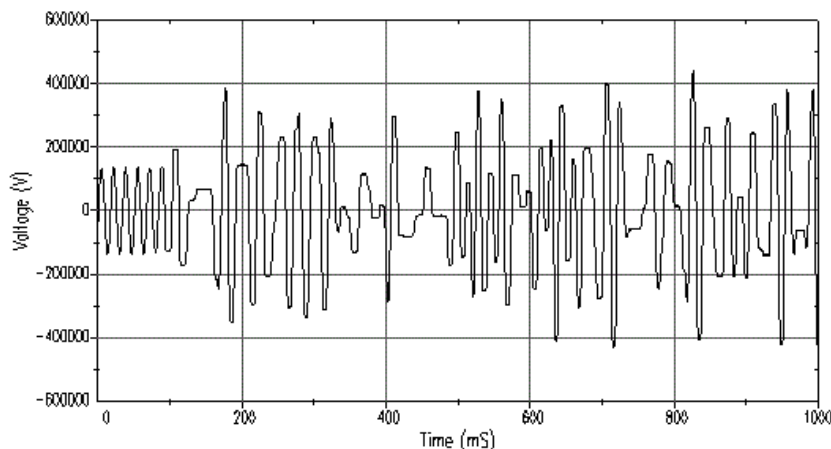
Oscillatory Transient Current Caused by Back-to-Back Capacitor Switching

ภาพที่ 2.3 สัญญาณของกระแสซิชิลิตชั่วคราวที่เกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบ Back – to –Back



Low Frequency Oscillatory Transient Caused by Capacitor-Bank Energization

ภาพที่ 2.4 สัญญาณของแรงดันออสซิลิตความถี่ต่ำชั่วคราวซึ่งเกิดจากการสวิตชิงคาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ



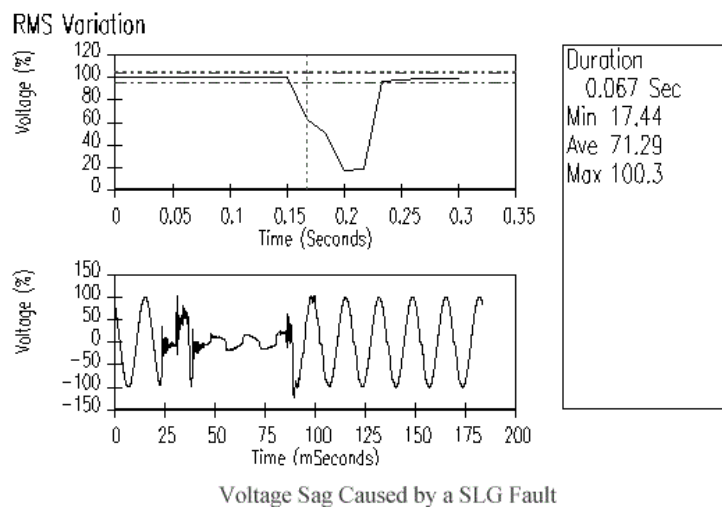
Low Frequency Oscillatory Transient Caused by Ferroresonance of an Unloaded Transformer

ภาพที่ 2.5 สัญญาณของแรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วคราวที่เกิดจากเฟอร์โรเรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไม่มีโหลด

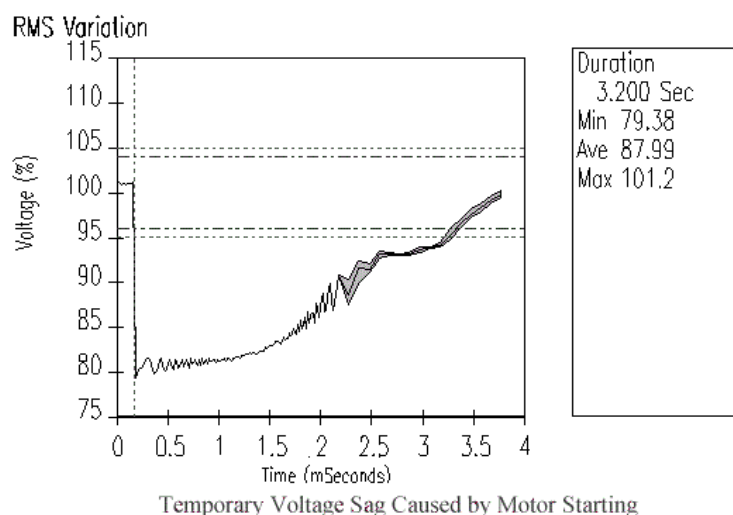
### 2.2.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน RMS ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาทีที่มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดปกติ (fault) ทางไฟฟ้าทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Voltage Sag หรือ Voltage Dip) แรงดันเกิน (Voltage Swell) และไฟดับ (Interruptions) มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิด คือ เวลาทันทีทันใด (Instantaneous) ชั่วขณะ (Momentary) และชั่วคราว (Temporary)

**2.2.2.1 แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag)** คือ ค่าแรงดัน RMS มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 มิลลิวินาที – 1 นาทีที่มีสาเหตุส่วนใหญ่ เกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดปกติทางไฟฟ้าลงดิน ดังภาพที่ 2.6 ทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 p.u. ของแรงดันปกติ (80% sag) ในช่วงเวลา 3 ไซเคิล และภาพที่ 2.7 แรงดันมีค่าลดลงจากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะสตาร์ทจะมีกระแสสูงสูงถึง 6-10 เท่าของกระแสโหลดปกติ มีผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟ มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน

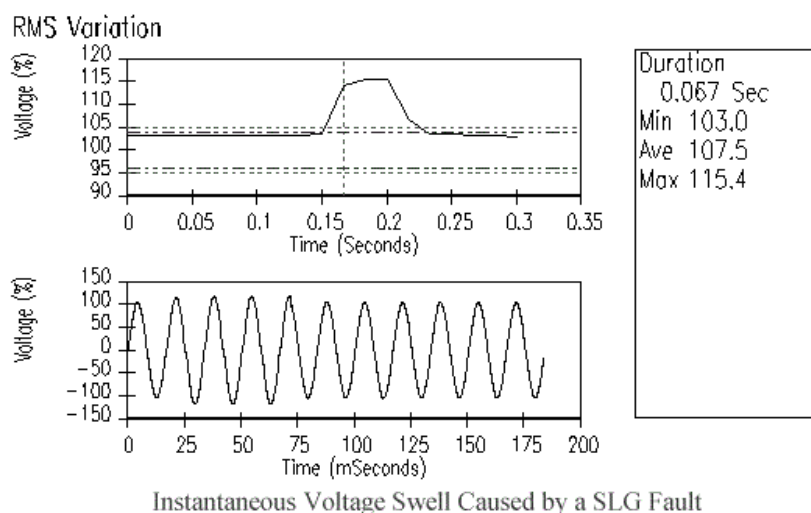


ภาพที่ 2.6 สัญญาณของ Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของไฟฟ้าลงดิน



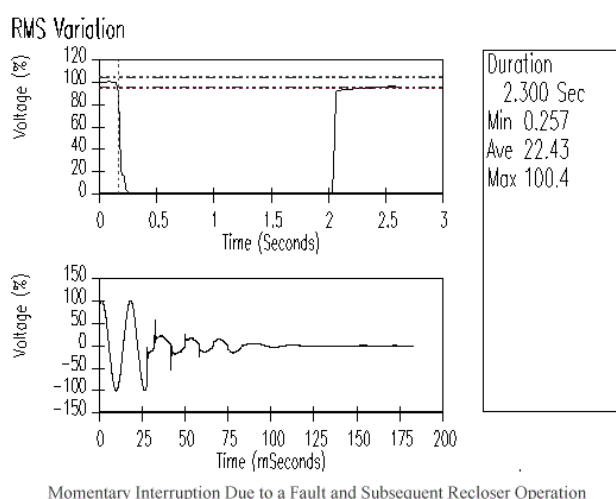
ภาพที่ 2.7 สัญญาณของ Voltage Sag จากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่

**2.2.2.2 แรงดันเกินช่วงสั้น (Voltage Swell)** คือ ค่าแรงดัน RMS มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 p.u. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 มิลลิวินาที – 1 นาที ดังภาพที่ 2.8 มีสาเหตุส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดปกติของไฟฟ้าลงดินโดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือมีการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าระบบมีผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายหรือทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟมีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



ภาพที่ 2.8 สัญญาณของ Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดปกติของไฟฟ้าลงดิน

**2.2.2.3 ไฟดับช่วงสั้น (Voltage Interruption)** คือ ค่าแรงดัน RMS มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 p.u. ในช่วงระหว่าง 10 มิลลิวินาที - 1 นาทีที่มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติของไฟฟ้าในระบบทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกดังรูปที่ 2.9 แสดงการเกิดไฟดับช่วงระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 1.8 วินาทีจากการทำงานของรีโคสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบก่อนจะมีการต่อวงจรเข้าไปดังเดิมอีกผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน



ภาพที่ 2.9 สัญญาณไฟฟ้ายับช่วงสั้นจากสาเหตุรีโคสเซอร์มีการทำงานเนื่องจากการเกิดความผิดปกติของไฟฟ้า

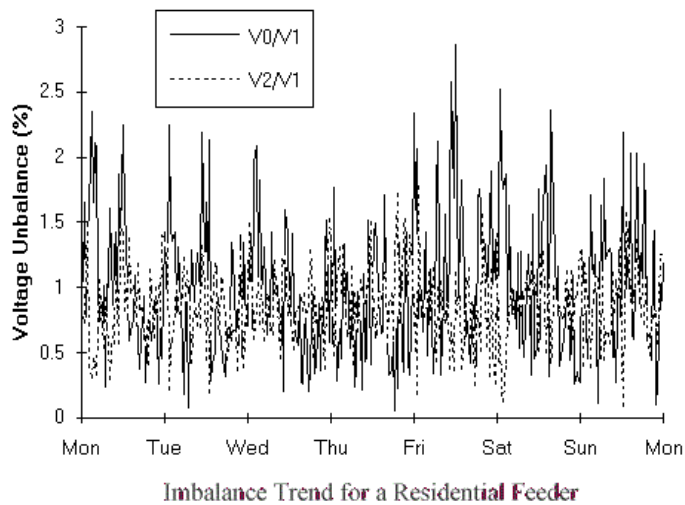
**2.2.3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation)** คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน RMS ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าเกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานโหลดขนาดใหญ่ ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Under voltage) แรงดันเกิน (Overvoltage) และ ไฟดับ (Sustained Interruptions)

**2.2.3.1 แรงดันตก (Under Voltage)** คือ ค่าแรงดัน RMS มีขนาดลดลงระหว่าง 0.8-0.9 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการสวิตช์ใหญ่โหลดขนาดใหญ่เข้าระบบหรือมีการปลดคาปาซิเตอร์ออกจากระบบ มีผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากเกิดการรับภาระเกิน (Overload)

**2.2.3.2 แรงดันเกิน (Overvoltage)** คือ ค่าแรงดัน RMS ขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.2 p.u. ในช่วงเวลานานกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดขึ้นจากผลของการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือมีการสวิตช์คาปาซิเตอร์เข้าระบบ หรือการปรับแก้หม้อแปลงไม่เหมาะสมกับระบบ มีผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน

**2.2.3.3 ไฟดับ (Voltage Interruption)** คือ ค่าแรงดัน RMS มีค่าลดลง 0.0 p.u. ในช่วงเวลาเกินกว่า 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดปกติของไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออกเมื่อเกิดไฟดับช่วงระยะยาวจากการทำงานของรีโกลสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบถาวร (Lockout) เมื่อสภาวะความผิดปกติของไฟฟ้ายังอยู่ในระบบเป็นผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน

**2.2.4 แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance)** คือ แรงดันของระบบ 3 เฟสมีขนาดแตกต่างกัน (0.5-2%) หรือมีมุมเปลี่ยนไปจาก 120 องศา เกิดจากความไม่สมดุลขนาดของโหลด แต่ละเฟสสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนขององค์ประกอบลำดับลบ  $V_2$  หรือองค์ประกอบลำดับศูนย์  $V_0$  ต่อองค์ประกอบลำดับบวก  $V_1$  ดังภาพที่ 2.10 ผลทำให้อุปกรณ์เช่นมอเตอร์หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานน้อยลงเนื่องจากผลความร้อนที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 2.10 สัญญาณของแรงดันไม่สมดุลที่สายป้อนที่จ่ายไฟฟ้าให้ที่พักอาศัย

**2.2.5. ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น (Waveform Distortion)** การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือ การเบี่ยงเบนในสถานะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า และสามารถอธิบายคุณลักษณะได้โดยแยกองค์ประกอบทางความถี่ออกมา

การผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแบ่งออกได้ 5 ชนิด ได้แก่

- องค์ประกอบไฟตรง (DC Offset)
- ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic)
- อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic)
- คลื่นรอยบาก (Notching)
- สัญญาณรบกวน (Noise)

## 2.3 ประเภทของฮาร์โมนิกส์ [4]

สามารถแบ่งฮาร์โมนิกส์ออกเป็น 5 ประเภท คือ

### 2.3.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

หมายถึงส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของสัญญาณความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency)

### 2.3.2 อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic)

อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic) หมายถึง ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ที่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล ส่วนมากพบได้ในกระแสของโหลดประเภทเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) เนื่องจากในระหว่างการหลอมเหล็กโดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบเวลาของสัญญาณไม่เท่ากันทุกคาบ กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz จะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่ กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เท่ากับ 20 มิลลิวินาที

### 2.3.3 ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonics)

ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonics) หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้น โดยการแปลงผันทางไฟฟ้า แปลงจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง หรือ แปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (AC to DC or DC to AC) โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทโอด SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส โดยลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6)

$$n = k \cdot q \pm 1 \quad (2.5)$$

เมื่อ

$n$  = ลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ

$k$  = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1, 2, 3...)

$q$  = จำนวนพัลส์ (Pulse Number) ของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าต่อคาบ

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2.6)$$



เมื่อ

$I_n$  = กระแสฮาร์โมนิกอันดับ  $n$  (A)

$I_1$  = กระแสที่ความถี่หลักมูล (Fundamental) (A)

$n$  = ลำดับของฮาร์โมนิก

### 2.3.4 ฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics)

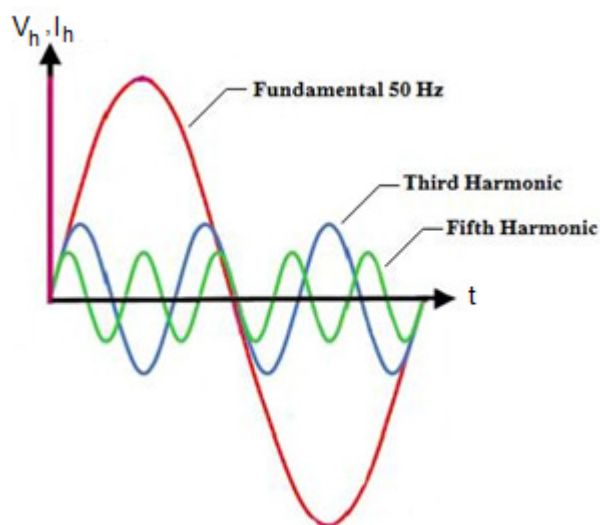
ฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics) หมายถึง ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยลำดับของฮาร์โมนิกที่ไม่เป็นไปตามสมการ เช่น เครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีฮาร์โมนิกคุณลักษณะที่มีอันดับ 11, 13, 23, 25, 35 ดังนั้น ถ้ามีฮาร์โมนิกอันดับที่ 5, 7, 17, 19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

### 2.3.5 ฮาร์โมนิกลำดับที่สามหารลงตัว (Triple Harmonics)

ฮาร์โมนิกลำดับที่สามหารลงตัว (Triple Harmonics) หมายถึง ฮาร์โมนิกกลุ่มที่หารด้วย 3 ลงตัว 3, 6, 9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีอันดับเป็นศูนย์ (Zero Sequence System) ซึ่งในระบบ 3 เฟสสมดุล ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้มักจะรวมกัน (ทางเฟสเซอร์) ไหลอยู่ในสายนิวตรอน เช่น ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย สมดุลมีกระแสสายนิวตรอนจะเท่ากับ  $3 \times (1A) = 3A$  ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลัง สายนิวตรอนอาจจะร้อนจนฉนวนเสียหาย และเกิดการลัดวงจรได้

## 2.4 ส่วนประกอบฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิก (Harmonics) คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยนั้นใช้ความถี่ 50 Hz ดังนั้นฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่ 150 Hz และฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250Hz เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11คลื่นส่วนประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 และอันดับที่ 5

#### 2.4.1 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current)

กระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current) คือ ฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปแบบของกระแสในระบบไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีน้อยทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในปัจจุบันในตลาดอุตสาหกรรมนั้นอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ขยายตัวอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

#### 2.4.2 แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonics Voltage)

แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonics Voltage) คือ เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านค่ารีแอกแตนซ์ของระบบรีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (PF) หรือแรงดันให้ดีขึ้น ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดันอันเนื่องมาจากค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonics Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.7)

$$V_n = I_n \cdot Z_n \quad ; \quad \text{เมื่อ } n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$V_n = \text{แรงดันฮาร์มอนิกส์ (V)}$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (\Omega)}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ (A)}$$

กรณีในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกส์ในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์ไม่ได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิกส์ แต่จากการต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับระบบนั้นอาจจะมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไข เรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ของระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ ถ้าเรโซแนนซ์ขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน หรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่าน ระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบ และรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์มอนิกส์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน (Distortion Factor) มีค่ามาก

#### 2.4.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion, THD)

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion, THD) คือ อัตราส่วนระหว่างรากที่สองของผลบวกกำลังสอง ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ (Harmonics component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบของความถี่มูลหลัก (Fundamental component) เทียบเป็นร้อยละ ซึ่งจะแสดงสมการค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันดังสมการที่ 2.8 และแสดงสมการค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสดังสมการที่ (2.9)

$$THD (Voltage) = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + \dots}{V_1^2}} \quad (2.8)$$

$$THD (Current) = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots}{I_1^2}} \quad (2.9)$$

#### 2.4.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor, QF)

ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor, QF) คือ อัตราส่วนของแรงดันตกคร่อมที่  $X_L$  หรือ  $X_C$  ต่อแรงดันตกคร่อม R เรียกว่า Voltage Magnification ถ้าวงจร เรโซแนนซ์ที่รวมของ L และ C ที่ต่ออนุกรมกับ R จะมีค่า QF ดังสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11)

$$QF = \frac{\omega L}{R} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$\omega L = \text{อินดักทีฟรีแอกแตนซ์ } (\Omega)$$

$$R = \text{ความต้านทาน } (\Omega)$$

$$QF = \frac{\omega_0}{PB} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\omega_0 = \text{ความถี่กึ่งกลาง (rad/sec)}$$

$$PB = \text{Pass Band}$$

โดยค่า QF จะบ่งบอกให้ทราบถึงความกว้างของช่วงความถี่ที่จะยอมให้ผ่าน ถ้า QF มาก ตัวกรองที่ออกแบบนั้นจะทำการกรองแถบความถี่ให้ผ่านไปได้ในช่วงที่แคบมากขึ้น นั่นคือจะผ่านแถบความถี่ไปได้น้อยลง มีความชัน หรือ Sharpness มากขึ้น เมื่อเทียบกับความถี่กึ่งกลางทฤษฎี องค์ประกอบที่สมมาตร (Symmetrical Component)

#### 2.4.5 ตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor, DPF)

ตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor, DPF) คือค่าโคไซน์ของมุมต่างเฟสระหว่างรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่ความถี่มูลฐาน นั่นคือการนิยามจากค่าของฟังก์ชันโคไซน์,  $\cos(\theta)$  ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยนั่นเอง ดังสมการที่ (2.12)

$$DPF = \cos(\theta_1) = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.12)$$

#### 2.4.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor, PF)

ตัวประกอบกำลัง (Power Factor, PF) คือ อัตราส่วนของกำลังจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA หรือ kVA) อย่างไรก็ตาม รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) มุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

กรณีรูปคลื่นของแรงดันและกระแสอินพุตไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ได้จากสมการที่ 2.13

$$PF = \frac{P_{Total}}{S_{Total}} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2 + V_3 I_3 + \dots + V_n I_n \cos \theta_n}{V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 + \dots + V_n I_n} \quad (2.13)$$

กรณีรูปคลื่นของกระแสอินพุตไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อย่างเดียว แรงดันมีความผิดเพี้ยนน้อย จะหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ได้จากสมการที่ 2.14

$$PF = \frac{V_S I_I \cos \theta_1}{V_S I_S} = \frac{I_I \cos \theta_1}{I_S} \quad (2.14)$$

เมื่อ

- $I_I$  = กระแส RMS ที่ความถี่หลักมูล
- $I_S$  = กระแส RMS ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง
- $V_S$  = แรงดัน RMS ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง
- $\cos \theta_1$  = ค่าโคไซน์ของมุมระหว่างรูปคลื่นความถี่หลักมูลของกระแสอินพุตและแรงดันอินพุต

#### 2.4.7 ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน (Distortion Factor, DF)

DF (Distortion) ,HF (Harmonics Factor) และ THD (Total Harmonics Distortion) สามค่านี้มีความหมายใกล้เคียงกัน โดยที่ DF , HF และ THD มีการให้คำนิยามไว้ในมาตรฐาน IEEE 519-1992 ต่างก็ใช้ระบุปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่มูลหลัก หรือเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมด ทั้งนี้แล้วแต่มาตรฐานต่างๆจะกำหนดนิยามไว้ ถ้าพูดถึง THD ของอุปกรณ์ใดๆแล้ว จะมีการนำมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อข้อดีและข้อเสีย จะต้องทำความเข้าใจให้ตรงกันตั้งแต่แรกก่อนว่า THD นั้น นิยามไว้แบบใด ไม่เช่นนั้นจะทำให้การเปรียบเทียบได้ผลที่ผิดไปจากที่ต้องการ

## 2.5 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติ การไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่างๆของผู้ใช้ไฟ แต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางรายมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ กระแสฮาร์มอนิกส์นั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเองและระบบไฟฟ้าข้างเคียง ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์จะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปจากรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง อาจไปรบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่นๆและอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้นเรามีความจำเป็นที่จะต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเรานั้น มีโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์หรือไม่ และโหลดประเภทใดเป็นโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ เพื่อทำความเข้าใจก่อนที่จะทำการแก้ไขและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เราสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังต่อไปนี้

### 2.5.1 หม้อแปลง (Transformer)

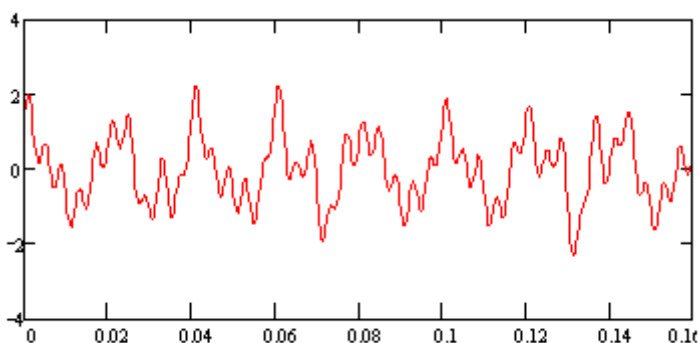
ในสภาพอยู่ตัวปกติ (Normal Steady State) หม้อแปลงไม่ทำให้เกิดความเพี้ยนแก่ข่ายวงจร (Network) หรือ สถานะชั่วครู่ (Transient State) แต่ขณะที่หม้อแปลงทำงานเกินขอบเขตสถานะปกติ (Normal State Range) จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น กรณีหม้อแปลงไม่มีโหลด (No Load) แรงดันปฐมภูมิของคลื่นไซน์ (Sinusoidal Waveform) ของหม้อแปลงจะสร้างฟลักซ์รูปคลื่นไซน์ แต่กระแสปฐมภูมิจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ฟลักซ์ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing Current)

### 2.5.2 เครื่องจักรไฟฟ้า (Electric Machine)

เครื่องจักรไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นคือ ในสภาพอยู่ตัวมันไม่ทำให้เกิดการเพี้ยนแก่ข่ายวงจร แต่ในสถานะชั่วครู่ หรือ ขณะที่เครื่องจักรทำงานเกินขอบเขตสถานะปกติก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น เครื่องจักรไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์มอนิกส์ออกมาในฟังก์ชันของความเร็วกับจำนวนร่องของอาร์เมเจอร์ การออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ดีต้องทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์น้อยที่สุด ในทางปฏิบัติ กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 จะสกัดกั้นได้โดยการต่อกับหม้อแปลงแบบเดลต้า – สตาร์

### 2.5.3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ค (Arc Device)

ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเภทนี้ที่สำคัญได้แก่ เต้าหลอมแบบอาร์ค และ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกได้แก่ หลอดแสงสว่างที่ให้อาร์ค (Arc Lighting) โดยฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นจากความไม่เป็นเชิงเส้นของลำอาร์ค ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 คลื่นสัญญาณของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ประเภทอาร์ค

### 2.5.4 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Device)

ตัวกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญในปัจจุบัน คือ อินเวอร์เตอร์ และวงจรเร็คติไฟเออร์ ที่ใช้การควบคุมแบบควบคุมเฟส (Phase Angle) โดยรูปคลื่นที่เกิดขึ้นสามารถใช้กับการวิเคราะห์โดยอนุกรมฟูเรียร์ได้โดยตรง

## 2.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิก [6]

ปัญหาอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกอาจพิจารณาได้เป็นสองประเด็น นั่นคือ ประเด็นแรกมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบไม่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ สำหรับปัญหาฮาร์มอนิกประเด็นที่สองเป็นปัญหาใหญ่ที่จะกล่าวถึงวิธีแก้ไขในภายหลัง ส่วนประเด็นแรก แม้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายมากนัก แต่ก็ควรพิจารณาไว้ในรายละเอียด เพื่อให้เข้าใจในปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้เพราะอุปกรณ์บางอย่างในระบบอาจจะเสียหาย หรือ ทำงานผิดพลาดเนื่องจากฮาร์มอนิกได้ ถ้าไม่เข้าใจความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิกว่าไปสร้างปัญหาได้อย่างไรก็อาจทำให้แก้ไขไม่ตรงกับเป้าหมาย สิ้นเปลืองทุนในการเปลี่ยนแปลงหรือซื้ออุปกรณ์โดยไม่จำเป็น

ในระบบที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ที่ฮาร์มอนิกส์ความถี่สูง ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์จะมีค่าลดลง ทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกส์ไหลเข้าตัวคาปาซิเตอร์มากขึ้น ซึ่งทำให้ตัวคาปาซิเตอร์ร้อนจนระเบิดได้ นอกจากนี้ แต่ละความถี่อาจทำให้ระบบเกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งเรโซแนนซ์แบบอนุกรม และเรโซแนนซ์แบบขนาน ฮาร์มอนิกส์จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบดังต่อไปนี้

### 2.6.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการเกิดเรโซแนนซ์

- **เรโซแนนซ์ (Resonance)** คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด หรือน้อยที่สุด (วงจรอนุกรมสัญญาณจะผ่านได้สูงสุด วงจรขนานจะผ่านได้ต่ำสุด) ปรากฏการณ์นี้สำคัญมากในทางสื่อสาร ในวงจรสวิตช์สายส่ง ระบบควบคุม เป็นต้น คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไปและส่งผลให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ดังนี้

- **เรโซแนนซ์ขนาน** คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับผ่านวงจรไฟฟ้าได้น้อยที่สุด ผลของเรโซแนนซ์ขนาน จะทำให้เกิดค่าของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ เรโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์เป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของการเรโซแนนซ์แบบขนาน คือ การเพิ่มแรงดันฮาร์มอนิกส์ และเกิดกระแสไหลในแต่ละสาขาของเรโซแนนซ์มีค่าสูง แสดงการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่จุด Point of Common Coupling (PCC) ซึ่งสามารถแยกประเภทของการเกิดเรโซแนนซ์ได้ดังนี้

- เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์กับคาปาซิเตอร์ที่บัสบาร์เดียวกันซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ขนานหาได้จากสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.16)
- เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของระบบกับตัวกรองฮาร์มอนิกส์
- เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของระบบกับคาปาซิเตอร์ของระบบ
- เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์



$$f_p = f \frac{S_s}{S_c} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$f$  = ความถี่หลักมูล

$f_p$  = ความถี่เรโซแนนซ์ขนาน

$S_s$  = พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย

$S_c$  = พิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_s + L_n)C_n}} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$L_s$  = อินдукเตอร์ของระบบ (H)

$L_n$  = อินдукเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่  $n$  (H)

$C_n$  = คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่  $n$  (F)

ในกรณีที่จะตรวจสอบว่าเกิดเรโซแนนซ์ขนานหรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกในโหลดที่ต่ออยู่ในระบบแต่ละจุดและแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสบาร์ แล้วทำการวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้น

• **เรโซแนนซ์อนุกรม** คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด เมื่อความถี่สูงมาก อาจทำให้โหลดถูกตัดออกจากระบบได้เช่นเดียวกับเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ ซึ่งเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์หาได้จากสมการที่ 2.17

$$f_s = f \cdot \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c + Z_t}\right) - (S_t^2 - S_c^2)} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$f_s$  = ความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Hz)

$S_t$  = พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า (VA)

$Z_t$  = เปรอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

$S_t$  = พิกัดของโหลดความต้านทาน (VA)

$S_c$  = พิกัดของคาปาซิเตอร์ (VA)

ผลที่เกิดขึ้นจากเรโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสจะมีค่าสูง แรงดันฮาร์โมนิกส์จะมีค่าน้อยที่คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์โมนิกส์เนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำดังนั้นเรโซแนนซ์อนุกรมต้องคำนึงถึงกระแสเป็นส่วนมาก โดยมีผลดีกว่าแบบเรโซแนนซ์ขนาน ในส่วนของแรงดันฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยกว่า ในการพิจารณาฮาร์โมนิกส์จะพิจารณาเรโซแนนซ์อนุกรม

### 2.6.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้ามีค่าลดลง ระบบสายส่ง กระแสฮาร์โมนิกส์จะสร้างผลกระทบเนื่องจากกระแส 2 อย่าง คือ เพิ่มความสูญเสียของสายส่งจากการเพิ่มขึ้นของค่า RMS ของรูปคลื่นกระแส และเกิดแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ต่างๆ ในวงจร ดังนั้นระบบที่อ่อนแอจะเกิดผลกระทบกระเทือนของแรงดันมากและมีระดับการพอลิตต่ำ ส่วนระบบที่แข็งแรงก็จะมี ความหมายที่ตรงข้ามกันแรงดันของฮาร์โมนิกส์ก็จะทำให้เกิดความเครียดของฉนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสัดส่วนของค่ายอดของรูปคลื่น จะทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลง และฮาร์โมนิกส์ยังมีผลกระทบต่อระดับการเกิดโคโรน่าด้วย และหม้อแปลงไฟฟ้า ผลกระทบต่อหม้อแปลงมีดังนี้

- กระแสฮาร์โมนิกส์ ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และ กำลังสูญเสีย สเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) เพิ่มมากขึ้น
- แรงดันฮาร์โมนิกส์ ทำให้กำลังสูญเสียกระแสวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น และความเครียดของฉนวนโดยถ้าแหล่งจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.18)

$$P_{Core} = (k_1 f + k_2 f^2) \times V^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} P_{Core} &= \text{กำลังสูญเสียแกนเหล็ก} \\ k_1 f &= \text{กำลังสูญเสียฮิสเตอร์รีซิส} \\ k_2 f &= \text{กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก} \\ V &= \text{แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย (V)} \end{aligned}$$

- ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์สาย (Line capacitor) จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ซึ่งเกิดขึ้นกับความถี่โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์โมนิกส์สูงจึงทำให้

เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิกส์ต่ำๆ อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

### 2.6.3 ผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวนไฟฟ้า

ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า อาจทำให้ค่ายอดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากระดับแรงดันปกติ ซึ่งเป็นผลให้ความเครียดของฉนวนเพิ่มขึ้นสูง และผลของความร้อนนี้จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนที่ใช้ในระบบดังกล่าวลดลง

### 2.6.4 ผลกระทบที่ทำให้การทำงานของโรงจักรผิดพลาด

**สวิตช์เกียร์** ผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกส์อาจทำให้ความชันของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในจุดที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ (Zero Crossing) นั้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรทำได้ยากขึ้น

**เซอร์กิตเบรกเกอร์** กระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นอาจจะมีผลทำให้ขดลวดที่ทำหน้าที่ควบคุมการตัดต่อของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะที่ดวงจรออกไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ให้ทำงานที่ความถี่หลักมูล ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำการดับอาร์คที่เกิดขึ้นได้และในที่สุดก็จะเป็นผลให้เกิดความเสียหายขึ้นที่เซอร์กิตเบรกเกอร์

**ฟิวส์** กระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ฟิวส์ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุคุณสมบัติของการทำงานของฟิวส์ (Time Current Characteristic) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

**รีเลย์ในระบบป้องกัน** กระแสฮาร์มอนิกส์อาจทำให้หม้อแปลงกระแสที่ใช้ร่วมกับคัสเตนซ์รีเลย์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการอิ่มตัวได้ซึ่งจะทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดไปจากที่ทำการตั้งค่าไว้ที่ความถี่หลักมูล และอีกตัวอย่างหนึ่งก็คือในกรณีการใช้ดิฟเฟอเรนเชียลรีเลย์ในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลของกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) อาจจะทำให้รีเลย์ทำการปลดวงจรออกในขณะที่เริ่มจ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจาก Inrush Current จะทำให้เกิดผลต่างระหว่างกระแสทางด้านเข้า และทางด้านออกของหม้อแปลงมีค่าสูง

### 2.6.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อมิเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องวัดไฟฟ้า

ก่อนการใช้จะต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบฮาร์มอนิกส์ ค่าที่วัดได้จะผิดพลาด หรือ กรณีเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า มีผลทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์ค่าสูงในวงจร ทำให้มิเตอร์

ประเภทงานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) เช่นมิเตอร์วัดต์ – ชั่วโมง ทำงานผิดพลาด เนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์ โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์มากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

#### 2.6.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่ออุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า

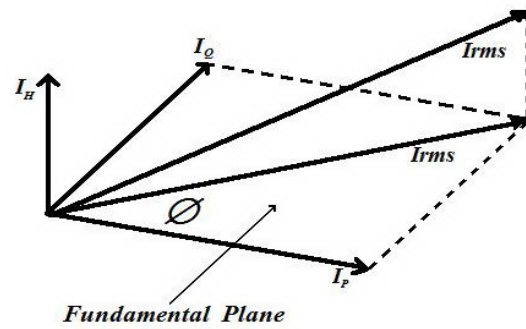
- ฮาร์มอนิกส์จะมีผลต่อแรงดันยอด (Peak Voltage) ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพของโทรทัศน์เปลี่ยนไป
- หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดเมอริคิวรีอาร์ค การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วยซึ่งอาจเกิดเรโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์ และวงจรเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหายได้
- คอมพิวเตอร์ จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์อย่างมากทุกบริษัทที่มีขีดจำกัดฮาร์มอนิกส์ค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบแต่ละบริษัท ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกส์มากกว่าขีดจำกัด จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหาย

#### 2.6.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกส์จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ (Low Level Noise) เช่น ในระบบโทรศัพท์ อาจก่อให้เกิดความรำคาญฮาร์มอนิกส์ขณะเหนี่ยวนำทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติ หรือมีเสียงรบกวน แต่สัญญาณรบกวนระดับสูง (High Level Noise) ฮาร์มอนิกส์ทำให้คุณภาพลดลง และอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือระบบสื่อสารถึงระดับใช้การไม่ได้

#### 2.6.8 ผลกระทบต่อค่า True Power Factor (PF)

ค่า True Power Factor (PF) คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานจริง ซึ่งจะลดลง วิเคราะห์ได้จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังภาพที่ 2.4 ซึ่งค่า DPF หาได้จากสมการที่ (2.19) ค่า HPF หาได้จากสมการที่ (2.20) และค่า PF หาได้จากสมการที่ (2.13)



ภาพที่ 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่ใช้ในการหาค่า True Power Factor

$$\text{DPF} = \frac{I_p}{I_{rms}} \quad (2.19)$$

$$\text{HPF} = \frac{I_{rms}}{I_{rms}} \quad (2.20)$$

$$\text{PF} = \frac{I_p}{I_{rms}} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$I_p = \text{Electric Heaters}$$

$$I_p + I_Q = \text{Induction Motors}$$

$$I_p + I_Q + I_H = \text{Variable Frequency Drives}$$

- การแก้ DPF ต้องลด  $I_Q$  เพื่อให้  $I_{rms}$  มีค่าเท่ากับ  $I_p$  โดยใช้การ Capacitor Bank หรือ Active Filter
- การแก้ HPF ต้องลด  $I_H$  เพื่อให้  $I_{rms}$  มีค่าเท่ากับ  $I_{rms}$  โดยการ Active Filter หรือเทคนิคการปรับรูปคลื่นกระแส

## 2.7 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์

เมื่อระบบไฟฟ้ามีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non – Linear Load) เป็นปริมาณมาก โหลดเหล่านี้จะให้กำเนิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น ทำการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยการลดขนาดของแรงดัน และขนาดของกระแสที่ความถี่หนึ่งๆ หรือ ที่หลาย ๆ ความถี่ที่ไม่ต้องการ การลดปริมาณฮาร์มอนิกส์มีหลายวิธี แต่ละวิธีจะมีความยุ่งยากและราคาที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีต่าง ๆ ในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์ กระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลผ่านในระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

**2.7.1 เปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ หรือเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์** การที่ระบบไฟฟ้ามีปัญหาฮาร์มอนิกส์นั้น ส่วนใหญ่เนื่องจากระดับฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงกับของฮาร์มอนิกส์ที่ผลิตออกมา เช่น 3, 5, 7 เป็นต้น ถ้าเปลี่ยนตำแหน่งคาปาซิเตอร์ให้ไกลจากข้อหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ จะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรทำให้ระดับฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้นลดลง อย่างไรก็ตามการลด หรือการเพิ่มขนาดคาปาซิเตอร์ทำให้ค่าระดับฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่ม หรือลดลงตามด้วย

**2.7.2 การทำเฟสมัลติพลิเคชัน (Phase Multiplication)** ถ้าคอนเวอร์เตอร์มีจำนวนเฟสหรือจำนวนพัลส์มาก ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นอันดับสูงและมีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรใช้คอนเวอร์เตอร์พัลส์หลายๆหรือนำคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์จำนวนหลาย ๆ ชุดมาต่อกัน โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีมุมต่างกัน 15 องศา เดลต้า-เดลต้า หรือ เดลต้า-สตาร์

**2.7.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ หรือฟิลเตอร์** เมื่อเกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์มาก จนกระทั่งสองวิธีดังกล่าวข้างต้นไม่ได้ผล แสดงว่าการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างคาปาซิเตอร์กับแหล่งเกิดฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดโหลดสถานะ โหลดเกิน (Over Load) ทั้งกระแส และแรงดันที่ตัวคาปาซิเตอร์ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การใส่ฟิลเตอร์ (Filters) โดยการนำตัวเหนี่ยวนำ (Inductors) หรือรีแอคเตอร์ (Reactor) มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อปรับความถี่เรโซแนนซ์โดยฟิลเตอร์จะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันระบบหรือจูนฟิลเตอร์ (Tuned Filters) เพื่อไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกส์ไหลเข้าระบบ โดยปรับค่าเรโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ตรงกับกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีในระบบ และวงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันคาปาซิเตอร์ หรือ ดิจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filters) โดยจะปรับรีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่มีความถี่ต่ำกว่าระดับฮาร์มอนิกส์ต่ำสุดที่มีในระบบปกติ

**2.7.3.1 ดีจูนฟิลเตอร์ (Detune Filter)** คือการนำรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การออกแบบจะให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของฟิลเตอร์มีค่าลดลงค่าหนึ่ง โดยการปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิด เรโซแนนซ์อนุกรมกับค่าคาปาซิแตนซ์ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง โดยจะให้ความถี่ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าลำดับฮาร์โมนิกส์ต่ำสุดที่มีอยู่ในระบบ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้น และป้องกันไม่ให้คาปาซิเตอร์ได้รับความเสียหายเนื่องจากปัญหาฮาร์โมนิกส์ ดังกล่าว ดังเช่น การแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ลำดับที่ 5 โดยทั่วไปจะใช้ฟิลเตอร์ที่มีค่ารีแอคแตนซ์ 6 - 7% ของค่าคาปาซิแตนซ์ คือ  $X_L = 0.06X_C$  ที่ความถี่จูน 204 Hz ซึ่งจากคุณสมบัติของดีจูนฟิลเตอร์ ความถี่ที่จูนจะไม่ให้ตรงกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ในระบบ ทำให้ฟิลเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ผลมากนักกล่าวคือจะลดกระแสฮาร์โมนิกส์ได้เพียง 10 - 30% เท่านั้นในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากง่ายต่อออกแบบและมีราคาถูกกว่าฟิลเตอร์ชนิดอื่น ๆ

**2.7.3.2 จูนฟิลเตอร์ (Tune Filter)** คือการนำรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ มาทำเป็นฟิลเตอร์เช่นเดียวกับดีจูนฟิลเตอร์ แต่การออกแบบจะให้ค่ารีแอคแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกัน ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกำจัดออกไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวฟิลเตอร์ชนิดนี้มีค่า น้อย ที่สุด คุณสมบัติของฟิลเตอร์ชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อที่จะกำจัดกระแสฮาร์โมนิกส์ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ถึง 70- 90 % การจูนนิยมจูนต่ำกว่า 3-10% ของความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกำจัดออกไป เพื่อเป็นการป้องกันความถี่จูนที่อาจมีการเลื่อนออกไป เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิลเตอร์หรือค่าพารามิเตอร์ของระบบอาจเปลี่ยนแปลงไป และป้องกันไม่ให้ตัวคาปาซิเตอร์มีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านมากเกินไป

เปรียบเทียบวงจรกรองแบบจูนและดีจูน

วงจรกรองแบบจูน

- จูนไปหาฮาร์โมนิกส์ในระบบเพื่อกรองออก
- กรองกระแสฮาร์โมนิกส์ออกจากระบบได้เกือบทั้งหมด
- ต้องการการวิเคราะห์และการออกแบบที่ซับซ้อน
- ไม่มีความยืดหยุ่นหากฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนแปลง
- ถ้าระบบมีโหลดเพิ่มจะต้องทำการออกแบบใหม่
- ราคาสูงเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ขนาดใหญ่และแม่นยำ

### วงจรกรองแบบดีจูน

- จูนหนีฮาร์โมนิกส์ทุกค่าในระบบเพื่อป้องกันเรโซแนนซ์
- กรองกระแสฮาร์โมนิกส์ได้บางส่วน
- วงจรมาตรฐานสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าทั่วไป
- มีผลกระทบไม่มากนักหากฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลง
- ถ้าโหลดในระบบเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มวงจรกรองได้โดยไม่ต้องรื้อของเก่าออก
- ราคาไม่สูงเพราะไม่ต้องกรองฮาร์โมนิกส์โดยตรง

#### 2.7.4 โดยใช้เทคนิคการชดเชยของสนามแม่เหล็ก

จะเป็นการใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) เป็นตัวตรวจจับ (Detect) กระแสรวมในระบบแล้วนำมาผ่านวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน และวงจรกรองความถี่ (Frequency Filter) เพื่อทำการแยกสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกำจัดออกไป จากนั้นผ่านวงจรขยายแรงดัน (Amplifier) เพื่อควบคุมระดับแรงดันให้เหมาะสม แล้วส่งสัญญาณนี้เข้าสู่ขดลวดชุดที่ 3 (Tertiary) ของหม้อแปลง ซึ่งขดลวดนี้จะเป็นตัวผลิตเส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศทางหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ทำให้ปริมาณฮาร์โมนิกส์ลดทอนลงได้

## 2.8 วิธีการป้องกันฮาร์โมนิกส์ [5]

มี 2 แบบด้วยกันคือ

- การป้องกันฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อคาปาซิเตอร์ ที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้คาปาซิเตอร์เสี่ยงต่อความเสียหายจากการระเบิดได้
- ป้องกันระบบไฟฟ้าไม่ให้ฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าระบบ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานน้อยลง เนื่องจากฮาร์โมนิกส์คร่อมอยู่ กระแสสูงสุดทำให้สายไฟ และหม้อแปลงไหม้ได้ทั้ง ๆ ที่กระแสหลักมูลไม่มากนัก



## 2.9 ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับการควบคุมฮาร์มอนิก

- กระแสฮาร์มอนิกต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกทำให้โดยบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์
- แรงดันอิมพีแดนซ์ (Impedance Voltage) ของหม้อแปลง
- วัดค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ระดับต่าง ๆ โดยใช้ Harmonic Analyzer
- ค่า Harmonic Generation Load ที่อาจเพิ่มเข้าไปในระบบในอนาคต คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในวงจรฟิลเตอร์
- ต้องมีการลดพิกัด (Derate) สำหรับ คาปาซิเตอร์ที่ใช้เนื่องจากฮาร์มอนิก
- ในการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ ต้องคำนวณค่าเรโซแนนซ์ขนานใหม่ และต้องให้แน่ใจว่าค่าไม่ตรงที่ระดับฮาร์มอนิกที่มีในระบบ
- แรงดันที่คาปาซิเตอร์จะสูงกว่าปกติ เนื่องจากมีรีแอกเตอร์ต่ออยู่ เช่น ถ้าปรับตั้งที่ระดับฮาร์มอนิก 4.5 ( 225 Hz ) แรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5% ดังนั้นสำหรับระบบไฟฟ้า 416 V คาปาซิเตอร์ควรออกแบบสำหรับทำงานได้ที่  $416/0.95 = 450$  V

## 2.10 หลักการลดและตัวกรองฮาร์มอนิก

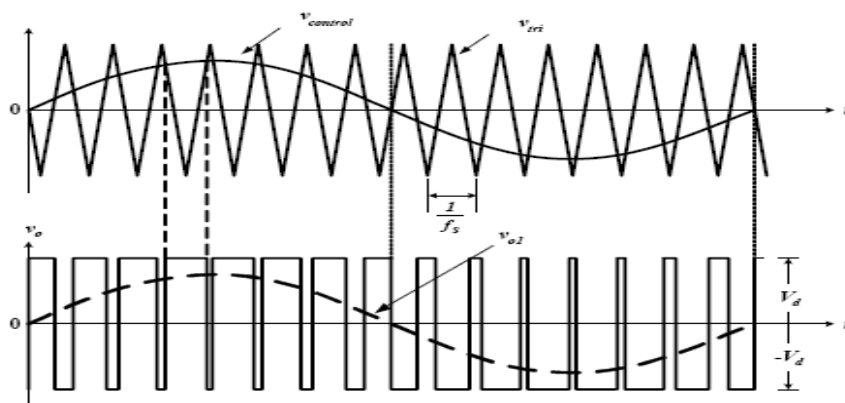
เนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นภายในระบบส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการลดปริมาณฮาร์มอนิกภายในระบบนั้นๆ ซึ่งหลักการลดฮาร์มอนิกมีหลากหลายวิธี โดยจะกล่าวถึงหลักการลดดังต่อไปนี้

### 2.10.1 การควบคุมอินเวอร์เตอร์

การควบคุมแบบ SPWM โดยทั่วไปมีตัวแปรในการควบคุมสำคัญอยู่สองตัวแปรได้แก่ ดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด และ ดัชนีการมอดูเลตด้านความถี่ หาได้จากสมการที่ (2.22) และสมการ (2.23) ตามลำดับ

$$m_a = \frac{V_{p,control}}{V_{p,tri}} \quad (2.22)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_o} \quad (2.23)$$



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด ความถี่ในการสวิตช์และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค SPWM แบบสองขั้ว

จากภาพที่ 2.14 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของการมอดูเลตของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ตัดสัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้แรงดันด้านออกตามต้องการ โดยมีค่าแรงดันด้านออกดังสมการ (2.24)

$$V_{o1} = 0.707 m_a V_a \quad (2.24)$$

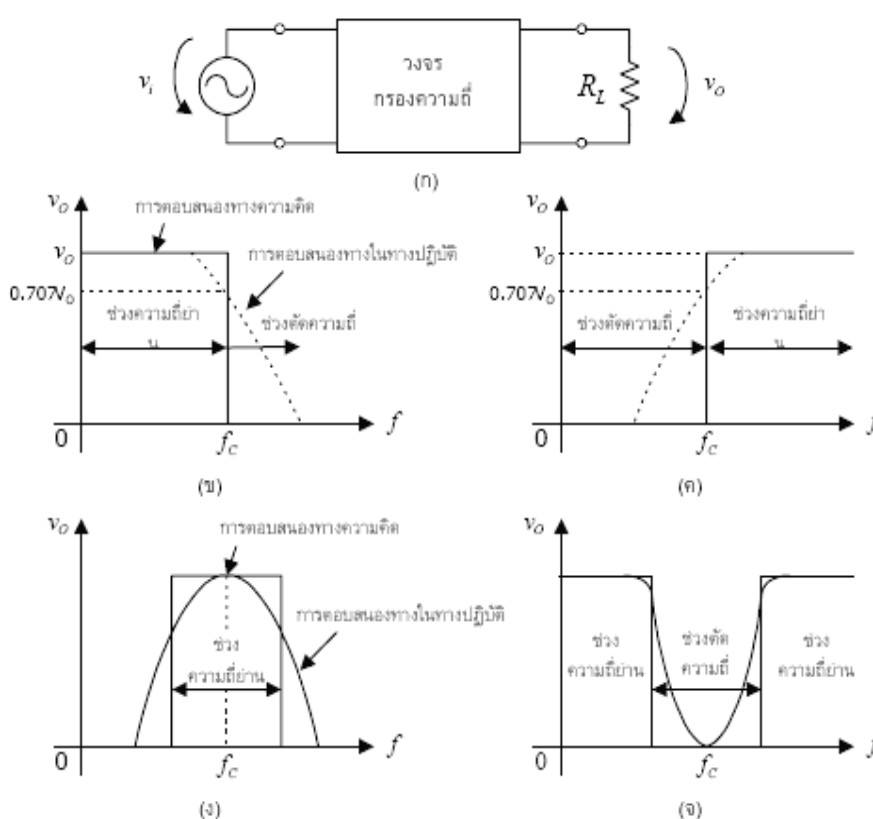
เมื่อ

- $V_{tri}$  = สัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยม
- $V_{p,tri}$  = ค่ายอดของสัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยม
- $f_s$  = ความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม หรือความถี่ในการสวิตช์
- $V_{ctrl}$  = สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์
- $V_{p,ctrl}$  = ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์
- $f_o$  = ความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ไซน์
- $m_a$  = ดัชนีการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
- $m_s$  = ดัชนีการมอดูเลตด้านความถี่
- $V_{o1}$  = แรงดันด้านออกที่ความถี่มูลฐาน
- $V_d$  = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

### 2.10.2 วงจรกรองความถี่ (Filters)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

แบบพาสซีฟ (Passive Filters) และแบบแอคทีฟ (Active Filters) วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกก็ได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรกรองความถี่ ถ้าเป็นแบบพาสซีฟจะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ส่วนในวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ จะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจรร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถทำการขยายสัญญาณวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟดังแสดงในภาพที่ 2.15 (ก)



ภาพที่ 2.15 วงจรกรองความถี่และการทำงานของวงจรกรองความถี่

(ก) วงจรทดสอบวงจรกรองความถี่

(ข) การทำงานของวงจร LPF

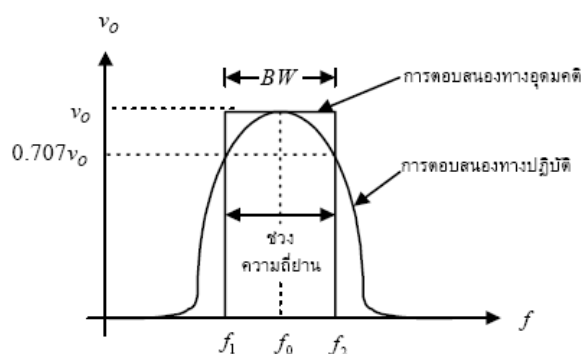
(ค) การทำงานของวงจร HPF

(ง) การทำงานของวงจร BPF

(จ) การทำงานของวงจร BEF

### 2.10.3 วงจรกรองแถบความถี่

วงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, BPF) หรือ BPF เป็นวงจรที่กรองเอาเฉพาะความถี่ช่วงที่ต้องการออกมาเท่านั้น ดังนั้นการตอบสนองความถี่ของวงจร BPF นี้จะเป็นดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 แสดงการตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, BPF)

## 2.11 ทฤษฎีของแกนเหล็กและตัวเหนี่ยวนำ [2]

### 2.11.1 ชนิดของแกนเหล็ก

จำนวน Electron ในวัสดุใด ๆ ย่อมเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าวัสดุชิ้นนั้น ๆ สามารถเป็นแม่เหล็กได้ดีหรือไม่เพียงใด ในอันดับต่อไปนี้จะขอกล่าวถึงธรรมชาติและคุณสมบัติบางประการของวัสดุแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็นจำพวกได้ดังนี้

### 2.11.2 วัสดุพวกไดอะแมกเนต

สนามแม่เหล็กรวมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของในแต่ละวงโคจรมีค่าเกือบเป็นศูนย์ นอกจากนี้โมเมนต์สนามแม่เหล็กที่เกิดมีค่าน้อยมากเช่นกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้ามา ก็อาจจะไม่ทำให้เกิดกำลังอัดของแต่ละอะตอม ดังนั้นวัสดุจำพวกนี้ทำเป็นวัสดุแม่เหล็กได้ยาก ตัวอย่างวัสดุจำพวกไดอะแมกเนต ได้แก่ บิสมีท, ไฮโดรเจน, ฮีเลียม, นีออน, อาร์กอน นอกจากนี้ก็ยังมีวัสดุอื่น ๆ ก็คือ ทองแดง ซิลิคอน เฮอร์มันเนียม กราไฟท์ และกำมะถัน เป็นต้น ( $\mu_r < 1$  เล็กน้อย)

### 2.11.3 วัสดุจำพวกพาราแมกเนต

สนามแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมที่มีค่ามากกว่าศูนย์ไม่มากนักอย่างไรก็ตามถ้ามีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องอาจทำให้บิดเบือนสนามแม่เหล็กรวมขึ้น นั่นคือจะมีโมเมนต์สนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงสามารถเป็นแม่เหล็กได้ วัสดุจำพวกพาราแมกเนต ได้แก่ โปรตัสเซียม ทังสแตน แมงกานีส โครเมียม เป็นต้น ( $\mu_r \geq 1$  เล็กน้อย)

### 2.11.4 วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนต

เป็นวัสดุที่มีจำพวกอะตอมหนาแน่นแต่อะตอมทำให้เกิด โมเมนต์สนามแม่เหล็กสูง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กอันเกิดจากอะตอมของมันก็มีทิศล้อยตามกันเป็นส่วนใหญ่เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาช่วยเสริมให้สนามแม่เหล็กทั้งหลายไปในทางเดียวกันมากขึ้น ถึงแม้ว่าจะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้วส่วนใหญ่ยังมีสนามแม่เหล็กที่ไปในทางเดียวกันหลงเหลืออยู่จึงทำให้วัสดุจำพวกนี้เป็นแม่เหล็กถาวรได้ วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนต ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล พวกโลหะผสม เช่น อังนิโก เป็นส่วนผสมของอลูมิเนียม นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง เล็กน้อย เป็นต้น ( $\mu_r \gg 1$  มาก ๆ)

### 2.11.5 วัสดุจำพวกแอนติเฟอร์โรแมกเนต

เนื่องจากแรงที่เกิดจากอะตอมหนึ่ง ไปหักล้างแรงที่เกิดจากอะตอมหนึ่งทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากอะตอมทั้งหลายถูกหักล้างกันเป็นศูนย์ดังนั้น โมเมนต์สนามแม่เหล็กจึงเป็นศูนย์ไปด้วยถึงแม้จะมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาที่ขากที่จะบังคับให้สนามแม่เหล็กของอะตอมเหล่านั้น ไปในทางเดียวกันได้วัสดุจำพวกแอนติเฟอร์โรแมกเนต ได้แก่ สารพวกออกไซด์ต่างๆ เช่น นิกเกิล-ออกไซด์ (NiO) พวกซัลไฟด์ คือ เฟอร์ซัลไฟด์ (FeS) เป็นต้น

### 2.11.6 วัสดุจำพวกเฟอร์ริแมกเนต

เป็นวัสดุที่มีจำนวนอะตอมหนาแน่นแต่ไดโพล - โมเมนต์ที่เกิดจากอะตอมทั้งหลายมีทิศทางไม่ไปในทางเดียวกันหมด นอกจากนี้ผลรวมสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กของแต่ละอะตอมที่เคลื่อนไหวไปยังต่ำกว่าสนามแม่เหล็กของวัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนตที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่ไปในทางเดียวกันมากขึ้นนั่นก็หมายความว่า มันสามารถเป็นแม่เหล็กได้ง่ายเหมือนกัน วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกเนตเป็นวัสดุจำพวกเฟอร์ไรท์ ที่มีสภาพเป็นสื่อไฟฟ้า (Conductivity) ต่ำกว่าจำพวก

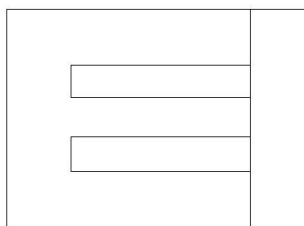
เฟอร์โรแมกเนต ดังนั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนตทั้งหลายจึงมีความต้านทานสูงกว่าตัวอย่างได้แก่ เหล็ก ออกไซด์ ( $\text{FeO}_x$ )

## 2.12 รูปร่างของแกนเหล็ก

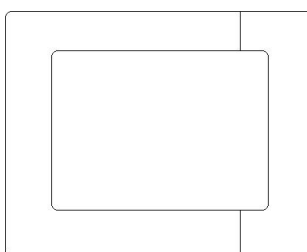
รูปร่างของแกนเหล็กที่มีผลต่อการนำ Magnetic Flux อาจแบ่งได้ดังนี้

**2.12.1 แกนเหล็กแบบ Lamination** มีรูปร่างชิ้นส่วนแบบ EI มีลักษณะ คือ ช่วยลด Eddy Current ดังแสดงในภาพที่ 2.17

**2.12.2 แกนเหล็กแบบ “C-Core”** ใช้เหล็กที่มีลักษณะเด่นคือ มีคุณสมบัติแม่เหล็กที่ดีทำให้ Flux Density สูงกว่าแบบ Lamination ถึง 20% ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.17 แกนเหล็กแบบแกน EI



ภาพที่ 2.18 แกนเหล็กแบบแกน C – core

เมื่อนำแกน EI ดังแสดงในภาพที่ 2.17 กับ C-Core ดังแสดงในภาพที่ 2.18 มาสร้างเป็น Inductor โดยให้ทั้งสองใช้งานได้เหมือนกันจะพบว่ากำลังสูญเสียใน  $P_{\text{core}}$ ,  $P_{\text{cu}}$  ของแกน C-Core มีค่าน้อยกว่าแกน EI มาก

## 2.13 คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก

แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็กใน Free Space สามารถพิจารณาจากความสัมพันธ์ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ , Tesla) กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $H$ , AT/m) ซึ่งทั้งสองตัว เป็นเวกเตอร์ที่จุดใดจุดหนึ่งซึ่งมีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดนั้น จะทำให้เกิดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดนั้นด้วย อาจเขียนความสัมพันธ์ ได้ดังสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25)

$$B = \mu H \quad (2.25)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.26)$$

เมื่อ  $B$  = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา [Turn]  
 $H$  = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมแปร์เทอร์ต่อเมตร [AT/m]  
 $\mu$  = สัมประสิทธิ์ของการซาบซึมของเส้นแรงแม่เหล็ก (Permeability) มีหน่วยเป็น เฮนรี่ต่อเมตร [H - m] หรือ เวเบอร์ต่อแอมแปร์เทอร์น - เมตร [Wb/AT - m]  
 $\mu_0$  = สัมประสิทธิ์ของการซาบซึมของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$   
 $\mu_r$  = สัมประสิทธิ์ของการซาบซึมของเส้นแรงแม่เหล็ก ในวัสดุที่ให้เส้นทางเดินแม่เหล็ก

ความซาบซึมของความเป็นตัวกลาง  $\mu$  จะทำให้จำแนกสารตัวกลางออกได้เป็น 3 ชนิด ขึ้นกับชนิดของสารนั้น โดยสารใดมีค่า  $\mu_r$  มากกว่า 1 เล็กน้อยสารนั้นเป็นชนิดสารพาราแมกเนติก (Paramagnetic Material) เช่น น้ำ อากาศ และสาร ใดมีค่า  $\mu_r$  เล็กน้อย ซึ่งสารนั้น เป็นสารไดอะแมกเนติก (Diamagnetic Material) เช่น พวกอลูมิเนียมหรือสารตัวนำสมบูรณ์  $\mu_r = 0$  ส่วนสารใดมีค่า  $\mu_r$  มาก ๆ สารนั้นเป็นชนิดสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) โดยทั่วไป  $\mu_r$  จะอยู่ระหว่าง 1,000 – 1,000,000 โดยขึ้นกับชนิดของสารแม่เหล็กนั้น แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, MMF) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2.27)

$$MMF = NI \quad (2.27)$$

ซึ่งถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ค่าสม่ำเสมอ ก็จะได้ดังสมการที่ (2.28)

$$NI = N \ell \quad (2.28)$$

เมื่อ

$N$  = จำนวนรอบของขดลวด [Turn]

$I$  = กระแสที่ไหลเข้าขดลวด [A]

$l$  = ความยาวของขดลวด [m]

## 2.14 เส้นแรงแม่เหล็ก

ขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากนิยามคือ Surface Integral ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกันซึ่งการหาขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ (2.29)

$$\varphi = \oint_S B da \quad (2.29)$$

ถ้าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) มีค่าสม่ำเสมอโดยตลอดแล้วจะสามารถหาค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก ( $\varphi$ ) ได้โดยการคูณพื้นที่หน้าตัด (A) กับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่นั้นแสดงดังสมการที่ (2.30)

$$\varphi = BA \quad (2.30)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กกับแรงเคลื่อนสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.31)

$$\varphi = \rho A \quad (2.31)$$

เมื่อ

$\varphi$  = เส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์ [Wb/AT]

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่าน

$\rho$  = ความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Permanent) มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อแอมแปร์รอบ [Wb/AT]



ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กนั้น สามารถหาได้จากรูปลักษณะของตัวกลางแม่เหล็กต่าง ๆ กัน ถ้าเป็นแกนเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $A$  ตารางเมตร มีความยาว 1 เมตร และมีความซาบซึมแม่เหล็ก (Permeability) เท่ากับ  $\mu$  ดังนั้นค่าความนำแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ (2.32)

$$\rho = \frac{\mu A}{\ell} \quad (2.32)$$

สามารถกำหนดค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) ส่วนตัดของค่าความนำแม่เหล็ก ดังนั้นจะหาค่าความต้านทานแม่เหล็กได้จากสมการที่ (2.33)

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu A} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\mathfrak{R}$  = ค่าความต้านแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเวเบอร์ [AT/Wb]

## 2.15 ค่าความเหนี่ยวนำ

นิยามของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่ถูกตัวนำไฟฟ้าคล้อง (Total Flux Linkage) หารด้วยจำนวนกระแส ดังสมการที่ (2.34)

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.34)$$

เมื่อ

$L$  = ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็นเฮนรี [H]

$\lambda$  = เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกคล้อง มีหน่วยเป็นเวเบอร์-เทอรัน [Wb-T]

$I$  = กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ [A]

ปกติค่าความเหนี่ยวนำมี 2 ชนิด คือ ค่าความเหนี่ยวนำในตัวเองและค่าความเหนี่ยวนำจากวงจรอื่น

• ค่าความเหนี่ยวนำในตัวเอง (L)

ในกรณีที่มี Magnetic flux คล้องขดลวดเท่ากันทุกขดมีจำนวนขดลวดเท่ากับ N ขด จะได้ จากสมการที่ (2.35) และสมการที่ (2.36)

$$\lambda = N \phi \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{\lambda}{i} = \frac{N \phi}{i} \\ &= \frac{NBA}{i} \\ &= \frac{N \mu \mu_0 H}{i} \\ L &= \frac{N^2 \mu A}{i} \end{aligned} \quad (2.36)$$

เมื่อ

$N$  = จำนวนรอบของขดลวด [Turn]

$i$  = กระแสที่ไหลเข้าขดลวด [A]

$\mu$  = สัมประสิทธิ์ของการซึมซาบของเส้นแรงแม่เหล็ก (Permeability)

หน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร [H -m] หรือ เวเบอร์ต่อแอมแปร์รอบ - เมตร [Wb/AT - m]

$\mu_0$  = สัมประสิทธิ์ของการซึมซาบของเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$

$\mu_r$  = สัมประสิทธิ์ของการซึมซาบของเส้นแรงแม่เหล็กในวัสดุที่ทำให้เป็นทางเดินแม่เหล็ก

## 2.16 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ

- หาค่าพลังงานของอินดักเตอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.37)

$$Energy = \frac{Li^2}{2} \quad (2.37)$$

- หาค่าพื้นที่ของแกนเหล็กคูณพื้นที่ของขดลวด สามารถหาได้จากสมการที่ (2.38)

$$A_p = \frac{2Energy \times 10}{B_m K_u K_j} \quad (2.38)$$

- หาความหนาแน่นของกระแส สามารถหาได้จากสมการที่ (2.39)

$$J = K_j A_p^y \quad (2.39)$$

- หาขนาดของขดลวดทองแดง สามารถหาได้จากสมการที่ (2.40)

$$Aw_{(B)} = \frac{I_{peak (total)}}{J} \quad (2.40)$$

- หาพื้นที่เมื่อพันขดลวดลงในบ็อบบิ้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.41)

$$Wa_{(eff)} = Wa \times S_3 \quad (2.41)$$

- หาจำนวนรอบที่ใช้ในการสร้างฟิลเตอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.42)

$$N = \frac{Wa_{(eff)} S_2}{Aw} \quad (2.42)$$

- คำนวณระยะการปรับแก้ของแกนเหล็ก สามารถหาได้จากสมการที่ (2.43)

$$L_g = 0.4\pi V_2 A_c \times 10^{-8} \quad (2.43)$$

เมื่อ

*Energy* = ค่าพลังงานสะสมของฟิลเตอร์ [W-s]

*L* = ค่าอินดักเตอร์ [mH]

*i* = กระแสสลับมูลฐาน

*Ap* = พื้นที่ของแกนเหล็กคูณกับพื้นที่ของขดลวด [cm<sup>4</sup>]

*Bm* = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก [Tesla]

*Ku* = ค่าตัวของฉนวนขดลวดทองแดง

*Kj* = สัมประสิทธิ์ความหนาแน่นของกระแส

*J* = ความหนาแน่นของกระแส [A/cm<sup>2</sup>]

*Aw<sub>(B)</sub>* = ขนาดของขดลวดทองแดง [cm<sup>2</sup>]

*Wa<sub>(eff)</sub>* = พื้นที่เมื่อพันขดลวดลงในบ็อบบิ้น [cm<sup>2</sup>]

*N* = จำนวนรอบของขดลวด [Turn]

*Ac* = พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก [cm<sup>2</sup>]

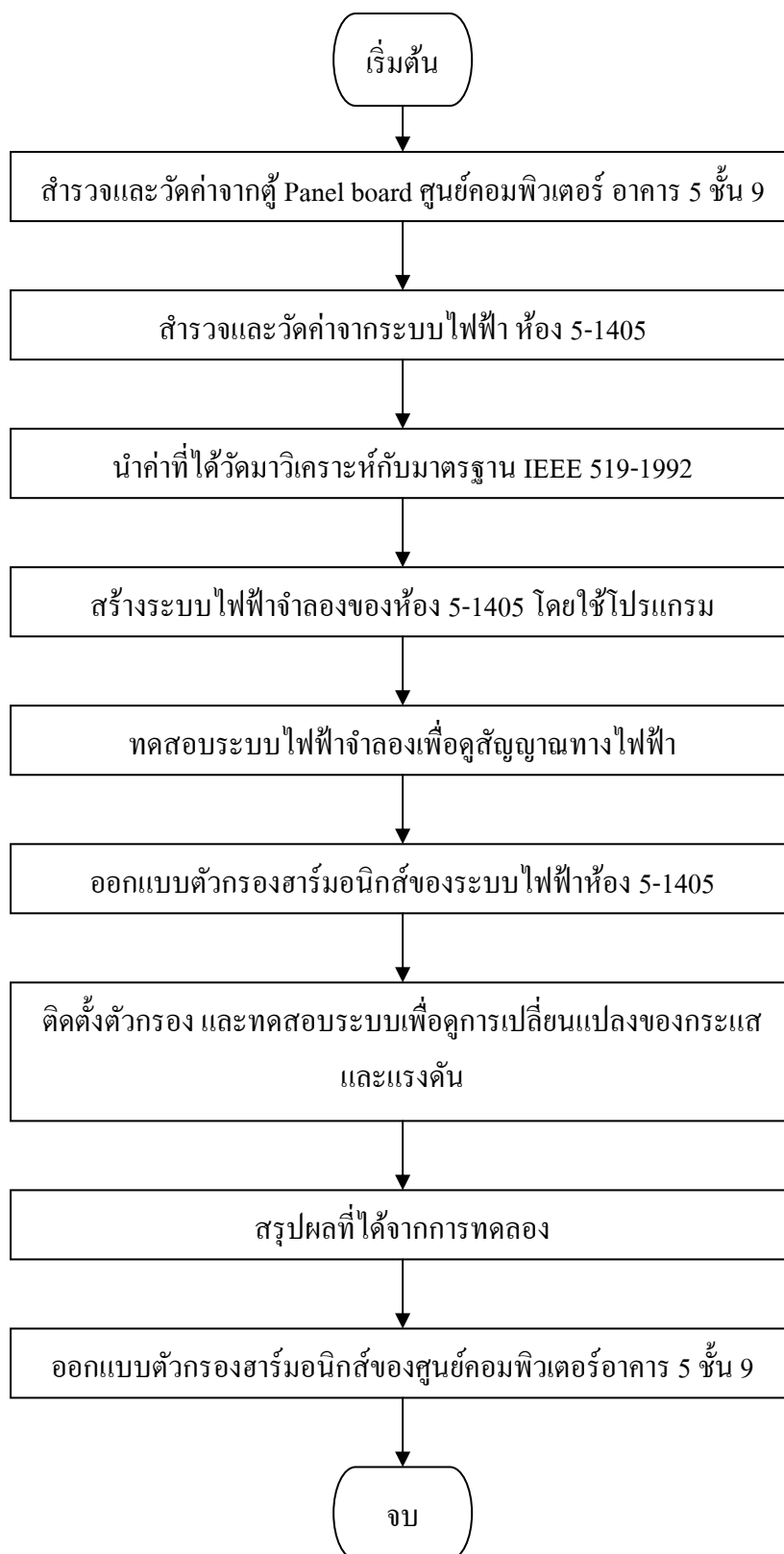
*L<sub>g</sub>* = ระยะห่างช่องอากาศหรือระยะแก้ [cm]

### บทที่ 3

#### การวัดและวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกส์

ในการศึกษาเรื่องฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้านั้นมีความสำคัญมาก เพราะในปัจจุบันฮาร์มอนิกส์เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงในด้านคุณภาพของไฟฟ้า เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นทางกลุ่มของโครงการนี้ได้ทำการวัดค่าฮาร์มอนิกส์ในระบบของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 และวัดค่าฮาร์มอนิกส์ในระบบจำลองโดยใช้แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์จากโหลดคอมพิวเตอร์ห้อง 5-1405 แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่มาตรฐาน IEEE 519-1992 กำหนด แล้วจำลองลักษณะของฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆในระบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบจำลองระบบไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดสอบผลและกรองปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าจำลองต่อไป

ในส่วนของการวัดค่าฮาร์มอนิกส์ ทางผู้จัดทำจะแบ่งการวัดค่าเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของระบบไฟฟ้าศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 และส่วนที่สอง เป็นการวัดค่ากระแสและแรงดันของห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์อาคาร 5 ห้อง 5-1405 ซึ่งผลของค่าฮาร์มอนิกส์ที่แสดงนั้นจะเป็นผลเปอร์เซ็นต์ THD ของทั้งกระแสและแรงดันในแต่ละเฟส จากนั้นทำการสร้างระบบไฟฟ้าจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในที่นี้ใช้แหล่งจ่ายกระแสมาต่ออนุกรมเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ จำลองโหลดของคอมพิวเตอร์ และจำลองตัวกรองฮาร์มอนิกส์จากพารามิเตอร์ที่คำนวณ ซึ่งผลที่วิเคราะห์นั้น เราจะวิเคราะห์จากรูปสัญญาณของกระแสและแรงดันที่ไหลออกจากตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ว่าตัวกรองที่เราทำการจำลองนั้นมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด และผลจากการจำลองนั้นจึงนำมาสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับติดตั้งใช้งานจริงของห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ห้อง 5-1405 เนื่องจากเป็นระบบที่เล็กกว่าอาคาร 5 ชั้น 9 เพื่อเป็นการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกส์ คุณภาพไฟฟ้า และการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ซึ่งแสดงแผนการทำงานดังภาพที่ 3.1



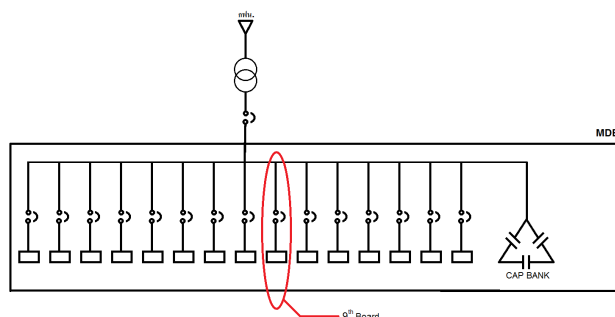
ภาพที่ 3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงาน

### 3.1 ทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์อาคาร 5 ชั้น 9

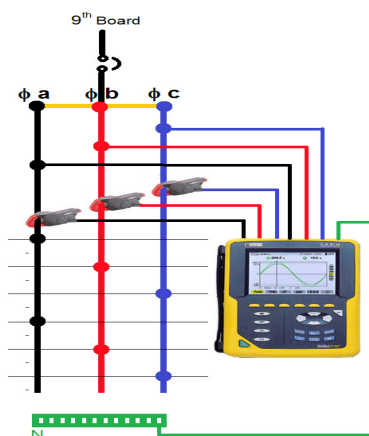
ในการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์นี้ เราทำการวัดค่าจากอาคาร 5 ชั้น 9 ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม และวัดค่าจากห้องคอมพิวเตอร์ 5-1405 ซึ่งเราให้เป็นระบบจำลองที่ เราจะทำการออกแบบและติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ จุดประสงค์ในการวัดค่านี้ เพื่อเป็นการเก็บ บันทึกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ THD ของกระแสและแรงดัน มาทำการวิเคราะห์ห้และคำนวณตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสม

#### - ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของระบบไฟฟ้ามหาวิทยาลัยศรีปทุม

ในขั้นแรกเราจะทำการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์จาก อาคาร 5 ชั้น 9 และห้อง 5-1405 มหาวิทยาลัยศรีปทุม โดยตำแหน่งการวัดเราจะทำการวัดที่ตู้ Panel Board อาคาร 5 ชั้น 9 และห้อง 5 – 1405 โดยใช้ Power Quality Analyzer Chauvin arnoux รุ่น C.A 8334 เป็นเครื่องมือวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์



ภาพที่ 3.2 Single Line Diagram ของตู้ MDB และ Feeder 9<sup>th</sup> Panel Board



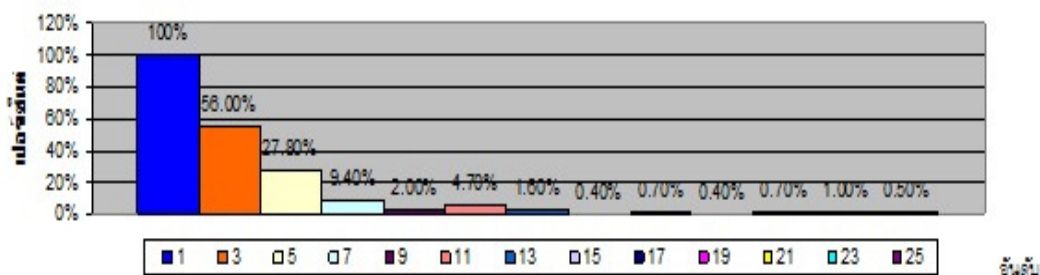
ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์

จากภาพที่ 3.2 และ 3.3 เราทำการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ตู้ Panel Board อาคาร 5 ชั้น 9 โดยใช้ Power Quality Analyzer Chauvin armoux ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละเฟส

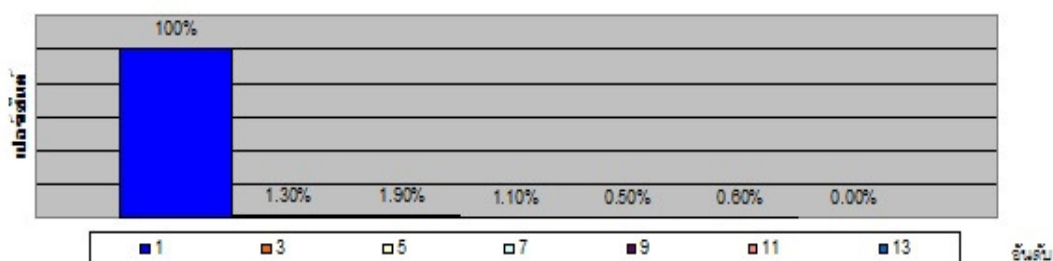
ตารางที่ 3.1 ผลจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส a

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เฟส a			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	20.7	100%	222	100%
3	11.6	56.00%	2.9	1.30%
5	5.8	27.80%	4.2	1.90%
7	2	9.40%	2.4	1.10%
9	0.3	2.00%	1.1	0.50%
11	1	4.70%	1.3	0.60%
13	0.3	1.60%	0	0.00%
15	0.1	0.40%		
17	0.1	0.70%		
19	0.1	0.40%		
21	0.1	0.70%		
23	0.2	1.00%		
25	0.1	0.50%		

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกดังตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ นั้นมีค่าที่เกินมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกนั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 3.4 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส a



ภาพที่ 3.5 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส a

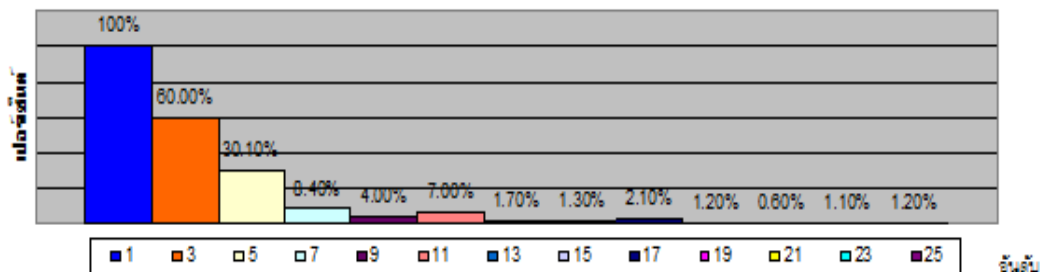
จากภาพที่ 3.4 และ 3.5 แสดงให้เห็นถึงกราฟแท่งแสดงเปอร์เซนต์ของกระแสฮาร์มอนิก และแรงดันฮาร์มอนิกของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ตู้ Panel Board อาคาร 5 ชั้น 9 โดยใช้ Power Quality Analyzer Chauvin arnoux ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับโดยแสดงผลการวัดฮาร์มอนิกเป็นอันดับคี่ ในเฟส a ซึ่งจะเห็นว่า %THDi ของอันดับฮาร์มอนิกอันดับ 3 มีค่าสูงสุดที่ 56% อันดับ 5 %THDi มีค่า 27.80% และฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มี %THD 9.40% ซึ่งมีค่าเกินมากกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 กำหนดที่ 4% ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับนั้น มีค่าน้อยที่ประมาณ 2 % ซึ่งน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับไม่เกิน 5%



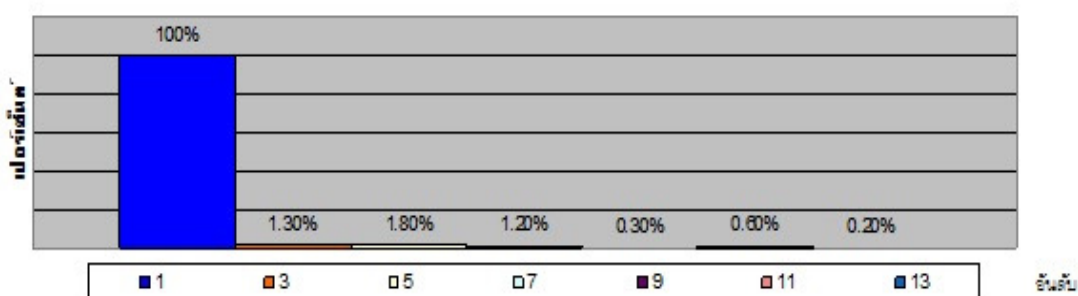
ตารางที่ 3.2 ผลจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส b

ลำดับ ฮาร์มอนิกส์	เฟส b			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	32.1	100%	224.3	100%
3	20.4	60.00%	2.9	1.30%
5	9.9	30.10%	4	1.80%
7	2.7	8.40%	2.9	1.20%
9	1.4	4.00%	0.7	0.30%
11	2.3	7.00%	1.3	0.60%
13	0.6	1.70%	0.4	0.20%
15	0.5	1.30%		
17	0.7	2.10%		
19	0.4	1.20%		
21	0.2	0.60%		
23	0.3	1.10%		
25	0.4	1.20%		

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ดังตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆนั้นมีค่าที่เกินมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ที่มีขนาดของกระแสลดลงไป ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกส์นั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 3.6 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส b



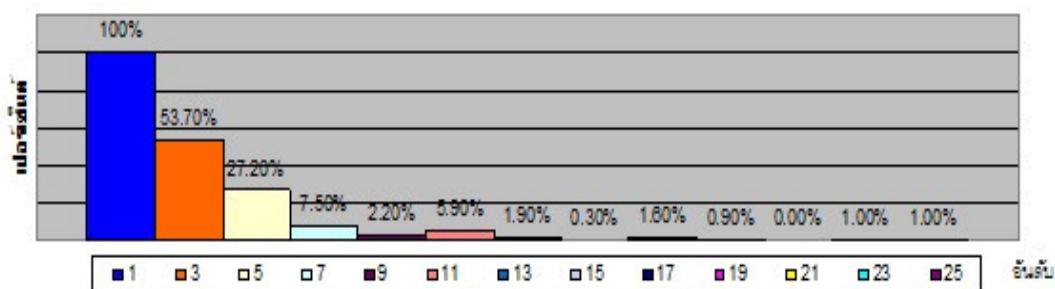
ภาพที่ 3.7 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส b

จากภาพที่ 3.6 และ 3.7 แสดงให้เห็นถึงกราฟแท่งแสดงเปอร์เซนต์ของกระแสฮาร์มอนิก และแรงดันฮาร์มอนิกของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ตู้ Panel Board อาคาร 5 ชั้น 9 ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับโดยแสดงผลการวัดฮาร์มอนิกเป็นอันดับที่ ในเฟส b โดยภาพที่ 3.6 เป็นการแสดงเปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกของเฟส b จะเห็นว่า %THDi ของอันดับฮาร์มอนิกอันดับ 3 มีค่าสูงสุดที่ 60% อันดับ 5 %THDi มีค่า 30.10% และ ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มี %THD 8.48% ซึ่งมีค่าเกินมากกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับนั้น มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานกำหนด

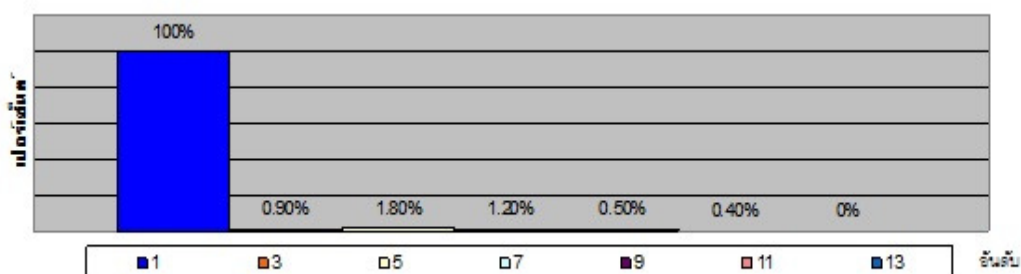
ตารางที่ 3.3 ผลจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส c

ลำดับ ฮาร์มอนิกส์	เฟส c			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	43.3	100%	224.3	100%
3	23.3	53.70%	2	0.90%
5	11.5	27.20%	4	1.80%
7	3.2	7.50%	2.7	1.20%
9	0.9	2.20%	1.1	0.50%
11	2.5	5.90%	0.9	0.40%
13	0.8	1.90%	0	0%
15	0.1	0.30%		
17	0.9	1.60%		
19	0.5	0.90%		
21	0	0.00%		
23	0.4	1.00%		
25	0.4	1.00%		

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ดังตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆนั้นมีค่าที่เกินมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกส์นั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 3.8 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์โมนิกของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส c



ภาพที่ 3.9 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์โมนิกของอาคาร 5 ชั้น 9 เฟส c

จากภาพที่ 3.8 และ 3.9 แสดงให้เห็นถึงกราฟแท่งแสดงเปอร์เซนต์ของกระแสฮาร์โมนิก และแรงดันฮาร์โมนิกของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่ตู้ Panel Board อาคาร 5 ชั้น 9 ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกในแต่ละอันดับโดยแสดงผลการวัดฮาร์โมนิกเป็นอันดับที่ ในเฟส c โดยภาพที่ 3.8 เป็นการแสดงเปอร์เซนต์กระแสฮาร์โมนิกของเฟส c จะเห็นว่า %THDi ของอันดับฮาร์โมนิกอันดับ 3 มีค่าสูงสุดที่ 53.7% อันดับ 5 %THDi มีค่า 27.2% และฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 มี %THD 7.5% ซึ่งมีค่าเกินมากกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 ส่วนแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละอันดับนั้น มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานกำหนด

### 3.2 การเปรียบเทียบฮาร์มอนิกที่ได้จากการวัดอาคาร 5 ชั้น 9 กับค่ามาตรฐาน

การสำรวจและวัดค่าจากตู้ Panel board ศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9 เป็นการนำข้อมูลไปทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ในระบบกำลังไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ผลการวัดเปรียบเทียบโดยอ้างอิงกับ มาตรฐาน IEEE 519-1992 ดังแสดงในตาราง 3.4 และตาราง 3.5 ตารางที่ 3.4 IEEE 519 – 1992 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V through 69 KV)

Maximum Harmonics Current Distortion in Percent of $I_L$						
Individual Harmonics Oder (Odd Harmonics)						
$I_{sc}/I_L$	$<11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6		0.3
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0		0.5
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5		0.7
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0		1.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5		1.4

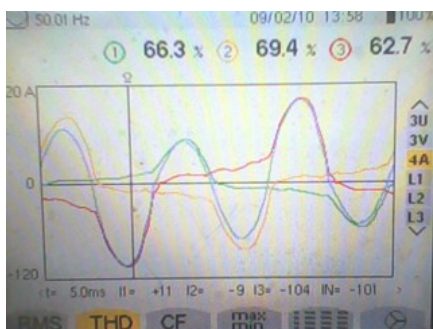
Eve Harmonics are limited to 25 % of the odd harmonics limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half – wave converters, are not allowed.

\*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual  $I_{sc}/I_L$

ตารางที่ 3.5 IEEE 519 – 1992 Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

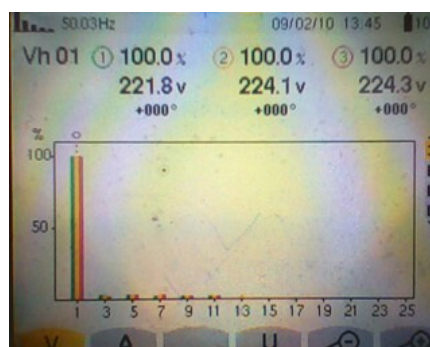
ภาพที่ 3.10 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกและสเปกตรัมของชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

- (ก) สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกป้อนอยู่ของอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม
- (ข) สเปกตรัมกระแสของกระแสมาตรฐาน
- (ค) สเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิกของอันดับ 3
- (ง) สเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิกของอันดับ 5
- (จ) สเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิกของอันดับ 7

ภาพที่ 3.10 เป็นการแสดงการวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม จากภาพที่ (ก) เป็นรูปสัญญาณทางไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ แสดงให้เห็นว่ามีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย ซึ่งสามารถดูค่า %THD<sub>i</sub> ของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับได้จากสเปกตรัมภาพ (ข), (ค), (ง) และภาพ (จ)



(ก)



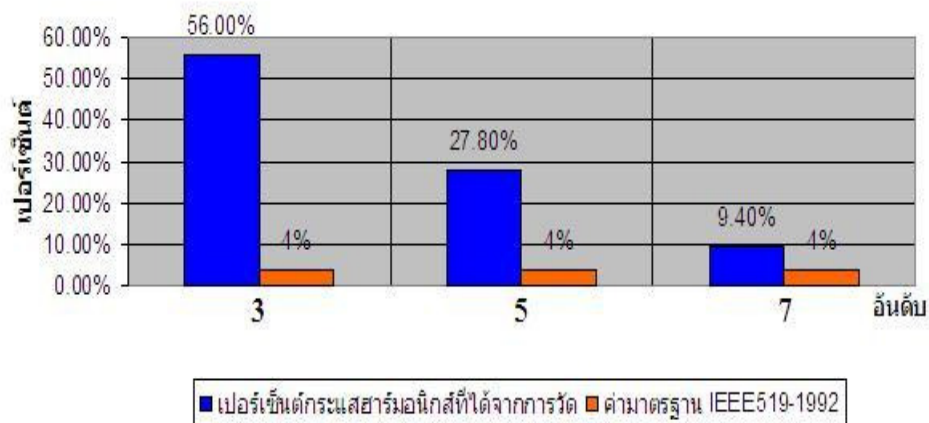
(ข)

ภาพที่ 3.11 สัญญาณแรงดันฮาร์มอนิกและสเปกตรัมของอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

(ก) สัญญาณแรงดันที่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ อาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

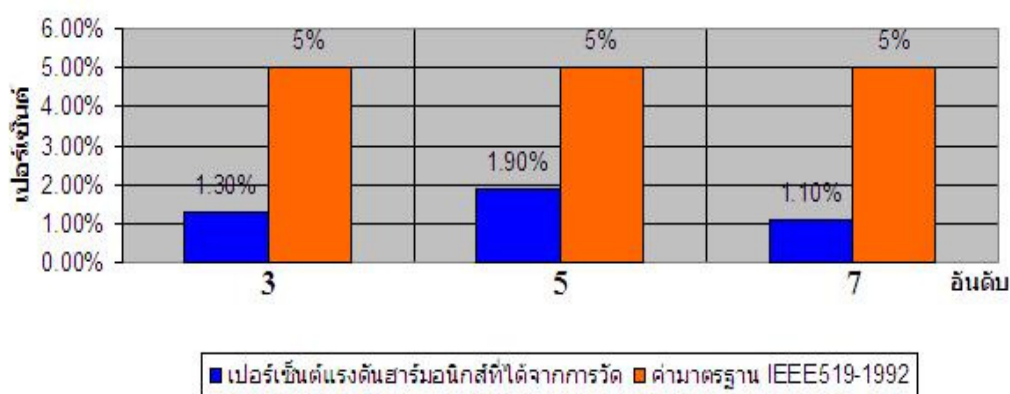
(ข) สเปกตรัมแรงดันของแรงดันมูลฐาน

ภาพที่ 3.11 เป็นการแสดงการวัดค่าแรงดันฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม จากภาพที่ (ก.)เป็นรูปสัญญาณทางไฟฟ้าของแรงดันที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แสดงให้เห็นว่าแรงดันฮาร์มอนิกในระบบนี้มีความผิดเพี้ยนน้อยมาก ซึ่งสามารถดูค่า %THD<sub>v</sub> ของฮาร์มอนิกแต่ละอันดับได้จากสเปกตรัมภาพ (ข)



ภาพที่ 3.12 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากอาคาร 5 ชั้น 9 กับมาตรฐาน IEEE519-1992

จากภาพที่ 3.12 แผนภูมิแสดงค่ากระแสฮาร์มอนิกส์จากการวัดเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 ของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม จะสรุปได้ว่ากระแสในระบบศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์เกินมาตรฐาน โดยมาตรฐาน IEEE519-1992 กำหนดให้กระแสฮาร์มอนิกส์มีอยู่ในระบบที่  $I_{sc}/I_1 > 20$  A อันดับคี่ของฮาร์มอนิกส์ไม่เกินอันดับที่ 11 มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ไม่เกิน 4% ของกระแส fundamental ซึ่งในระบบของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 นั้นควรมีระดับกระแสฮาร์มอนิกส์ที่อยู่ในมาตรฐาน

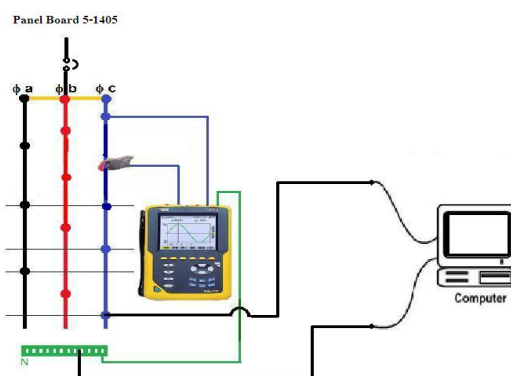


ภาพที่ 3.13 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากอาคาร 5 ชั้น 9 กับมาตรฐาน IEEE519-1992



จากภาพที่ 3.13 แผนภูมิแสดงค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์จากการวัดเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 ของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม จะสรุปได้ว่าแรงดันในระบบศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 มีขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกส์ไม่เกินเกินมาตรฐาน โดยมาตรฐาน IEEE519-1992 กำหนดให้แรงดันฮาร์มอนิกส์มีอยู่ในระบบต่ำกว่า 69 kV มีขนาดแรงดันฮาร์มอนิกส์ไม่เกิน 5% ของแรงดัน fundamental ซึ่งในระบบของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 นั้นมีระดับแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่อยู่ในมาตรฐานอยู่แล้ว

### 3.3 การวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405



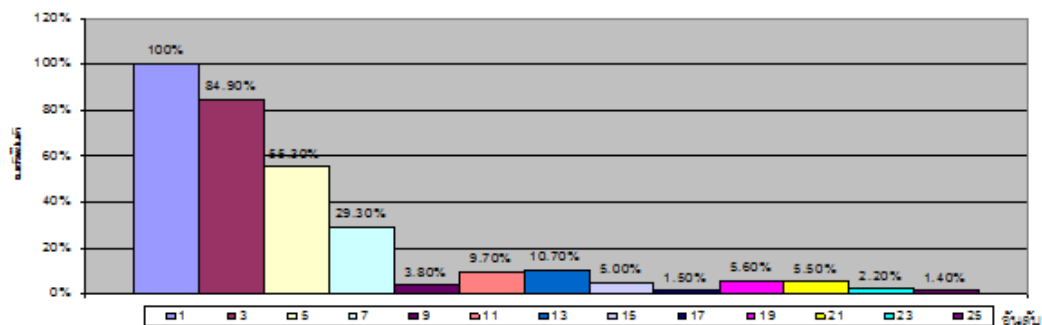
ภาพที่ 3.14 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์

จากภาพที่ 3.14 ทำการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ตู้ Panel Board อาคาร 5 ห้อง 5-1405 โดยใช้ Power Quality Analyzer Chauvin Arnoux ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในแต่ละเฟส

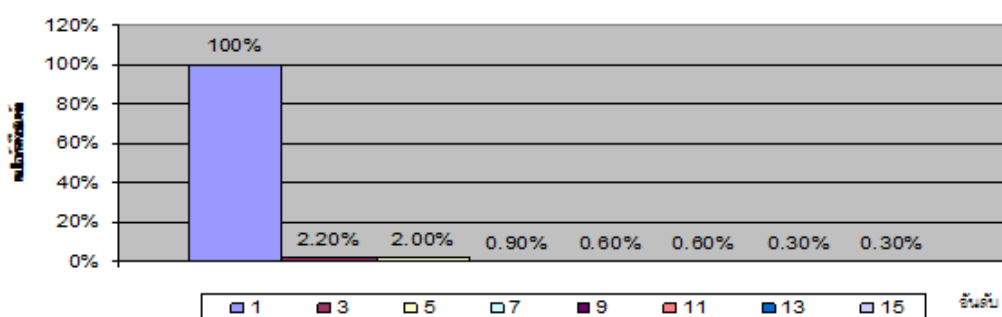
ตารางที่ 3.6 ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซ์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส a

ลำดับ ฮาร์มอนิกซ์	เฟส a			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	1.9	100%	221.8	100%
3	1.6	84.90%	4.9	2.20%
5	1.1	55.30%	4.4	2.00%
7	0.5	29.30%	2	0.90%
9	0.1	3.80%	1.6	0.60%
11	0.2	9.70%	1.3	0.60%
13	0.2	10.70%	0.7	0.30%
15	0.1	5.00%	0.7	0.30%
17	0	1.50%		
19	0.1	5.60%		
21	0.1	5.50%		
23	0	2.20%		
25	0	1.40%		

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซ์ดังตารางที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกซ์อันดับต่างๆนั้นมีค่าที่เกินมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกซ์นั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 3.15 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส a



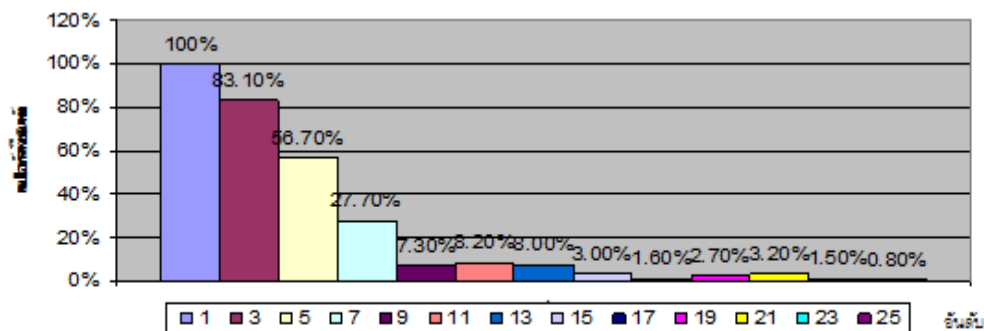
ภาพที่ 3.16 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส a

จากภาพที่ 3.15 และ 3.16 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิก และแรงดันฮาร์มอนิกของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ตู้ Panel Board ห้อง 5-1405 โดยใช้ Power Quality Analyzer Chauvin arnoux ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ โดยแสดงผลการวัดฮาร์มอนิกเป็นอันดับคี่ในเฟส a ซึ่งเป็นการนำค่าจากการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกมาแสดงเป็นแท่งสเปกตรัมเพื่อเปรียบเทียบปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ จะเห็นได้ชัดว่าอันดับกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับมีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนดที่ 4% ส่วนทางด้านแรงดันนั้นมีปริมาณที่ต่ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

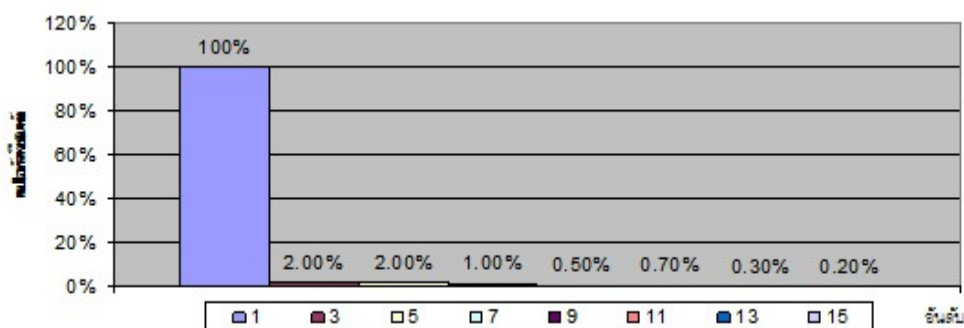
ตารางที่ 3.7 ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซ์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส b

ลำดับ ฮาร์มอนิกซ์	เฟส b			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	2	100%	224	100%
3	1.5	83.10%	4.5	2.00%
5	1	56.70%	4.5	2.00%
7	0.5	27.70%	2.2	1.00%
9	0.1	7.30%	0.9	0.50%
11	0.1	8.20%	1.8	0.70%
13	0.2	8.00%	0.7	0.30%
15	0.1	3.00%	0.4	0.20%
17	0	1.60%		
19	0.1	2.70%		
21	0.1	3.20%		
23	0	1.50%		
25	0	0.80%		

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซ์ดังตารางที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกซ์อันดับต่างๆนั้นมีค่าที่เกินมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ระบุไว้ว่ากระแสฮาร์มอนิกซ์แต่ละอันดับไม่ควรมีกระแสฮาร์มอนิกซ์เกิน 4% ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกซ์นั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนดที่ 5%



ภาพที่ 3.17 กราฟแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์มอนิกซ์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส b



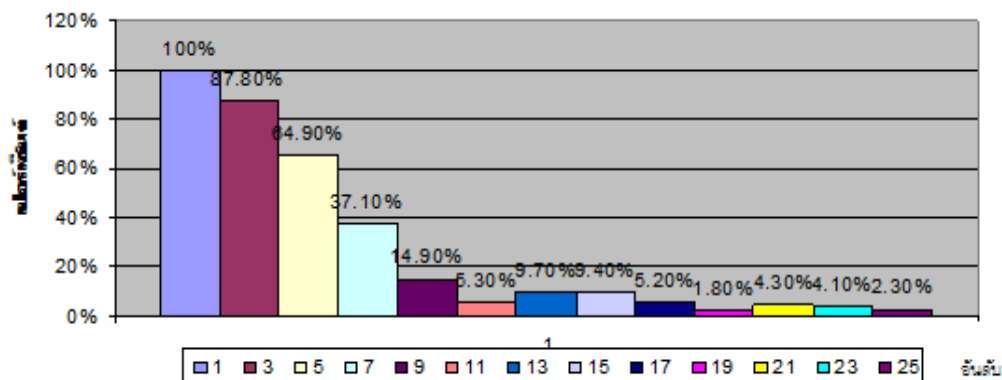
ภาพที่ 3.18 กราฟแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์แรงดันฮาร์มอนิกซ์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส b

จากภาพที่ 3.17 และ 3.18 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกซ์และแรงดันฮาร์มอนิกซ์ของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซ์ที่ตู้ Panel Board ห้อง 5-1405 ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซ์ในแต่ละอันดับโดยแสดงผลการวัดฮาร์มอนิกซ์เป็นอันดับคี่ในเฟส b โดยภาพที่ 3.17 เป็นการแสดงเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์มอนิกซ์ของเฟส b จะเห็นว่า %THDi ของอันดับฮาร์มอนิกซ์อันดับ 3 มีค่าสูงสุดที่ 83.10% อันดับ 5 %THDi มีค่า 66.70% และฮาร์มอนิกซ์อันดับที่ 7 มี %THD 27.70% ซึ่งมีค่าเกินมากกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกซ์แต่ละอันดับนั้น มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานกำหนดดังแสดงในภาพที่ 3.18

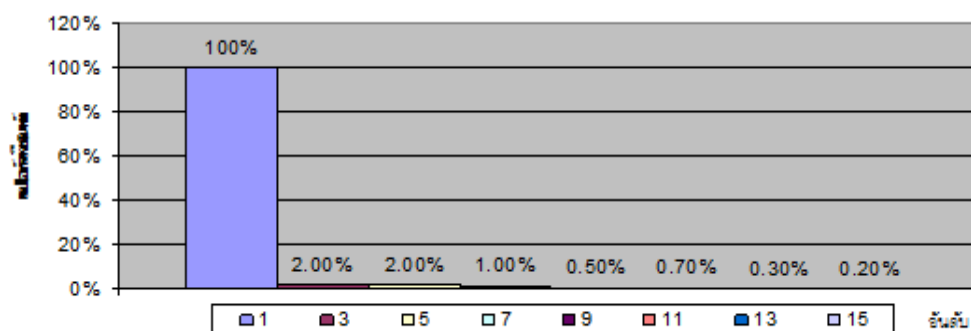
ตารางที่ 3.8 ค่าการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส c

ลำดับ ฮาร์มอนิกส์	เฟส c			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	1.3	100%	223.8	100%
3	1.1	87.80%	4	1.70%
5	0.8	64.90%	4.7	2.10%
7	0.5	37.10%	2.2	1.00%
9	0.2	14.90%	1.3	0.60%
11	0.1	5.30%	0.9	0.40%
13	0.1	9.70%	0	0%
15	0.1	9.40%	0.7	0.20%
17	0.1	5.20%		
19	0	1.80%		
21	0.1	4.30%		
23	0.1	4.10%		
25	0	2.30%		

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ดังตารางที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆนั้นมีค่าที่เกินมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกส์นั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 3.19 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส c

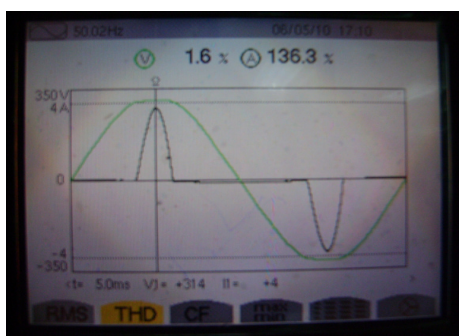


ภาพที่ 3.20 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์ของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เฟส c

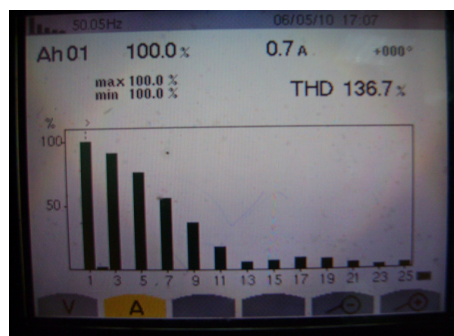
จากภาพที่ 3.19 และ 3.20 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงเปอร์เซนต์ของกระแสฮาร์มอนิกส์และแรงดันฮาร์มอนิกส์ของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ตู้ Panel Board ห้อง 5-1405 ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ในแต่ละอันดับโดยแสดงผลการวัดฮาร์มอนิกส์เป็นอันดับที่ในเฟส c โดยภาพที่ 3.19 เป็นการแสดงเปอร์เซนต์กระแสฮาร์มอนิกส์ของเฟส c จะเห็นว่า %THDi ของอันดับฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 มีค่าสูงสุดที่ 87.80% อันดับ 5 %THDi มีค่า 64.90% และฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 มี %THD 37.10% ซึ่งมีค่าเกินมากกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 ส่วนภาพที่ 3.20 แสดงเปอร์เซนต์แรงดันฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับนั้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานกำหนด

### 3.4 การเปรียบเทียบฮาร์มอนิกที่ได้จากการวัดอาคาร 5 ห้อง 5-1405 กับค่ามาตรฐาน

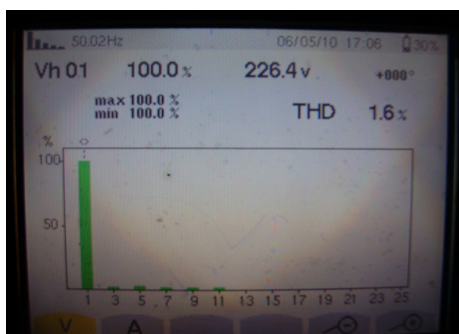
การสำรวจและวัดค่าจากตู้ Panel board ศูนย์คอมพิวเตอร์ อาคาร 5 ห้อง 5-1405 เป็นการนำข้อมูลไปทำการศึกษาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกในระบบกำลังไฟฟ้า โดยวิเคราะห์ผลอ้างอิงกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 จากตาราง



(ก)



(ข)



(ค)

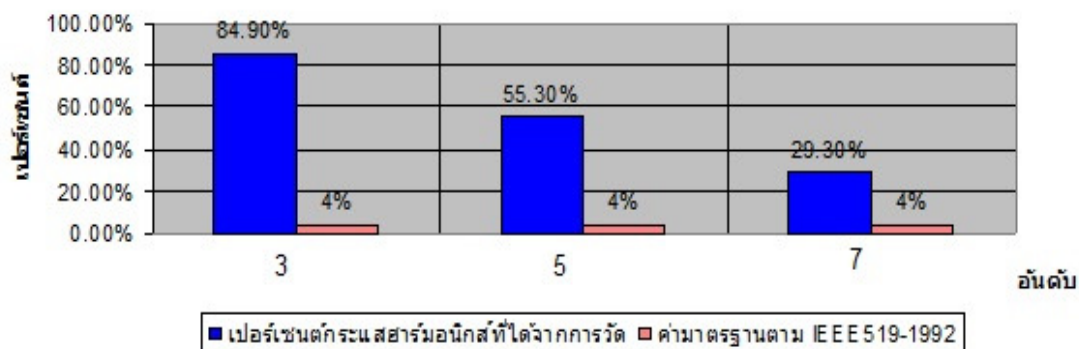
ภาพที่ 3.21 สัญญาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกจากการวัดของอาคาร 5 ห้อง 5-1405

(ก) สัญญาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกจากการวัดของอาคาร 5 ห้อง 5-1405

(ข) สเปกตรัมกระแสของ Fundamental อาคาร 5 ห้อง 5-1405

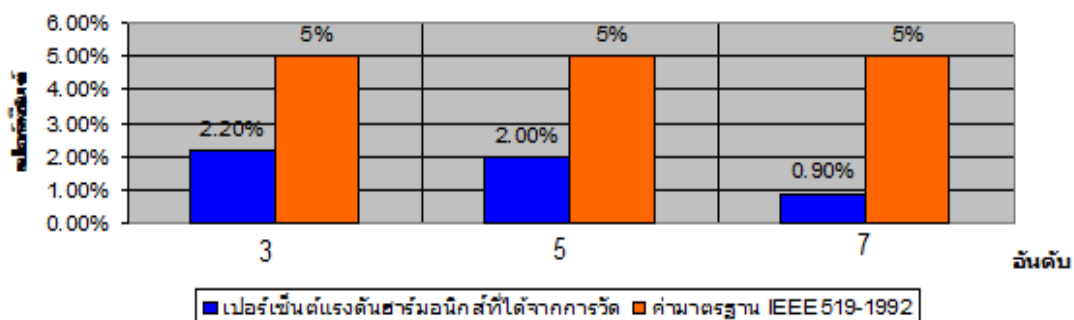
(ค) สเปกตรัมแรงดันของ Fundamental อาคาร 5 ห้อง 5-1405





ภาพที่ 3.22 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการวัดกับมาตรฐาน IEEE 519-1992

จากภาพที่ 3.22 แสดงกระแสฮาร์มอนิกจากการวัดเปรียบเทียบกับ IEEE 519-1992 Std. ของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ห้อง 5-1405 ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม จะสรุปได้ว่ากระแสในระบบ ศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ห้อง 5-1405 มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกเกินมาตรฐานโดยมาตรฐาน IEEE519-1992 กำหนดให้กระแสฮาร์มอนิกมีอยู่ในระบบไม่เกิน 4% ของกระแสมูลหลัก



ภาพที่ 3.23 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการวัดกับมาตรฐาน IEEE 519-1992

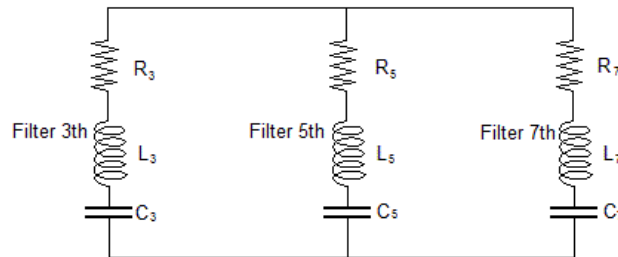
จากภาพที่ 3.23 แสดงแรงดันฮาร์มอนิกจากการวัดเปรียบเทียบกับ IEEE 519-1992 Std. ของศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ห้อง 5-1405 ของมหาวิทยาลัยศรีปทุม จะสรุปได้ว่าแรงดันในระบบ ศูนย์คอมพิวเตอร์อาคาร 5 ห้อง 5-1405 มีขนาดของแรงดันฮาร์มอนิกไม่เกินเกินมาตรฐาน โดยมาตรฐาน IEEE519-1992 กำหนดให้แรงดันฮาร์มอนิกมีอยู่ในระบบต่ำกว่า 69 kV มีขนาดแรงดันฮาร์มอนิกไม่เกิน 5% ของแรงดัน fundamental ซึ่งในระบบของศูนย์คอมพิวเตอร์ห้อง 5-1405 นั้น มีระดับแรงดันฮาร์มอนิกที่อยู่ในมาตรฐานอยู่แล้ว

## บทที่ 4

### การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการออกแบบตัวกรองนั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ทำการวัดค่าจากอาคาร 5 ชั้น 9 และส่วนของอาคาร 5 ชั้น 14 ห้อง 5 – 1405 ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะใช้ขั้นตอนการออกแบบเดียวกันดังต่อไปนี้

#### 4.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกส์



ภาพที่ 4.1 วงจรตัวกรองฮาร์มอนิกส์

#### หลักการคำนวณตัวกรองฮาร์มอนิกส์

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าแรงดันของระบบ ที่จะนำตัวกรองฮาร์มอนิกส์ไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟรวมที่ต้องการใช้ เพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังที่กำหนด

$$Q_{FT} = kVA_{old} - kVA \quad (4.1)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดจำนวนชุดตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการใช้ ทั้งนี้การเลือกจำนวนชุดตัวกรอง ต้องอาศัยข้อมูลประมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ตรวจวัดได้จริง

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดจุดปรับคลื่น (tuning point:  $n_h$ ) ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์แต่ละชุด

ขั้นตอนที่ 5 เลือกขนาดของแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุที่มีแรงดันมูลฐาน 50 Hz.

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุที่ต้องการใช้

$$Q_C = Q_{Phi} \left( \frac{V_{cr}}{V_s} \right)^2 \left( \frac{n_{hi}^2 - 1}{n_{hi}^2} \right) \quad (4.2)$$

**ขั้นตอนที่ 7** หาค่าตัวเก็บประจุและค่า  $X_C$  ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C = \frac{Q_{Chi} \times 1000}{2\pi f V_{cr}^2} \quad (4.3)$$

$$X_C = \frac{V_{cr}^2}{Q_{crhi} \times 1000} \quad (4.4)$$

**ขั้นตอนที่ 8** หาค่า L ของตัวรีแอคเตอร์หรือตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก

$$L_{hi} = \frac{10^9}{(2\pi f n_{hi}) \times C} \quad (\text{mH ต่อเฟส}) \quad (4.5)$$

**ขั้นตอนที่ 9** กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

Q-Factor ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์จะเป็นตัวบอกสมรรถนะของตัวกรองในการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ หาก Q-Factor มีค่าสูง จะกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่กำหนดให้กรองได้มาก แต่จะกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับข้างเคียงได้น้อย และไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าขององค์ประกอบ หาก Q-Factor มีค่าต่ำ จะกรองกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่กำหนดได้น้อย และมีการสูญเสียมาก แต่จะกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับข้างเคียงได้มากขึ้น และไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าองค์ประกอบน้อยกว่า โดยปกติ Q-Factor ของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกส์จะมีค่าประมาณ 40-60 สำหรับค่า R หาได้จาก

$$R = \frac{2\pi f L \times n}{Q - Factor} \quad (4.6)$$

**ขั้นตอนที่ 10** การหาค่าอิมพีแดนซ์ระบบ

หาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบโดยจำลองด้วยค่าพารามิเตอร์ R, L, C ทำได้โดยการคำนวณหาอิมพีแดนซ์จากกฎของโอห์ม ดังนี้

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (4.7)$$

ซึ่งในระบบโหลดเป็น R,L จะได้

$$Z = \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} = R + jX_L \quad (4.8)$$

แทนค่าตัวแปรดังต่อไปนี้

1. ค่า p.f. ที่ได้จากการวัด
2. ค่าแรงดันที่ได้จากการวัด
3. ค่ากระแสที่ได้จากการวัด

จะได้ค่า R ของระบบ และ  $X_L$  ซึ่ง  $X_L = 2\pi fL$  จะได้ค่า L ของระบบด้วย

## 4.2 คำนวณการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดอาคาร 5 ชั้น 9

ข้อกำหนดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์

1. แรงดันระบบ 416 V
2. กระแสฮาร์มอนิกส์ในแต่ละเฟสที่ได้จากการวัด
3. ค่ากระแสที่ได้จากการวัด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> และ %THD<sub>v</sub> ของเฟส a, b และ c ในอันดับที่ 1, 3, 5 และ 7

current	เฟส a	%THD	เฟส b	%THD	เฟส c	%THD
I <sub>1</sub>	20.70	100%	32.10	100%	43.30	100%
I <sub>3</sub>	11.60	56.5%	19.40	61.35	23.30	54.2%
I <sub>5</sub>	50.8	27.8%	9.70	30.4%	11.50	27.3%
I <sub>7</sub>	2.00	9.4%	2.60	8.3%	3.20	7.3%

4. กำหนดชุดกรองฮาร์มอนิกส์อันดับ 3, 5, 7 อย่างละ 1 ชุด
5. หากำลักรีแอกทีฟรวม เพื่อเพิ่มเพาเวอร์แฟกเตอร์ในแต่ละเฟส

เฟส a

$$P = 4.64 \text{ kW}$$

$$Q = 3.14 \text{ kVAR}$$

$$S = 5.60 \text{ kVA}$$

$$\text{p.f.} = 0.828$$

จาก

$$Q_{old} = P \tan \theta \quad (4.9)$$

$$Q_{old} = 4,640 \tan(34.1^\circ) = 3,141.516 \text{ VAR}$$

$$Q = P \tan(\cos^{-1} 0.95) = 4640 \tan(\cos^{-1} 0.95) = 1,525.094 \text{ VAR}$$

$$Q_{FT} = Q_{old} - Q \quad (4.10)$$

$$Q_{FT} = 3,141.516 - 1,525.094 = 1,616.422 \text{ VAR}$$

6. จากกระแสฮาร์โมนิกส์ในเฟส a ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์โมนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> ของเฟส a ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7

current	เฟส a	%THD
I <sub>1</sub>	20.70	100%
I <sub>3</sub>	11.60	56.5%
I <sub>5</sub>	50.8	27.8%
I <sub>7</sub>	2.00	9.4%

$$Q_3 = 1,616.422 (56.5\%) = 913.278 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = 1,616.422 (27.8\%) = 441.283 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = 1,616.422 (9.4\%) = 151.944 \text{ VAR}$$

7. เลือกขนาดตัวเก็บประจุ 450 V หาค่ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ

$$Q_3 = (913.278) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{3^2 - 1}{3^2} \right) = 949.924 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = (441.283) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} \right) = 493.952 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = 151.944 \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} \right) = 173.951 \text{ VAR}$$

8. หาขนาดคาปาซิเตอร์และค่าคาปาซิแตนซ์ ( $X_C$ ) ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C_3 = \frac{949.924}{2\pi(50)(450)^2} = 14.932 \mu\text{F}$$

$$C_5 = \frac{493.952}{2\pi(50)(450)^2} = 7.764 \mu\text{F}$$

$$C_7 = \frac{173.951}{2\pi(50)(450)^2} = 2.734 \mu\text{F}$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi(50)(16 \times 10^{-6})} = 198.944 \Omega$$

$$X_{C_5} = \frac{1}{2\pi(50)(10 \times 10^{-6})} = 318.309 \Omega$$

$$X_{C_7} = \frac{1}{2\pi(50)(4 \times 10^{-6})} = 795.775 \Omega$$

9. หาขนาดอินดักเตอร์ของตัวรีแอกเตอร์

$$X_{L_3} = \frac{X_{C_3}}{n^2} = \frac{198.944}{3^2} = 22.105 \Omega$$

$$X_{L_5} = \frac{X_{C_5}}{n^2} = \frac{318.309}{4.8^2} = 13.815 \Omega$$

$$X_{L_7} = \frac{X_{C_7}}{n^2} = \frac{795.775}{6.8^2} = 17.209 \Omega$$

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f} = \frac{22.105}{2\pi(50)} = 70.362 \text{ mH}$$

$$L_5 = \frac{X_{L_5}}{2\pi f} = \frac{13.815}{2\pi(50)} = 43.975 \text{ mH}$$

$$L_7 = \frac{X_{L_7}}{2\pi f} = \frac{17.209}{2\pi(50)} = 54.778 \text{ mH}$$

10. กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

$$R_3 = \frac{2\pi(50)(70.362 \times 10^{-3}) \times 3}{60} = 1.105 \Omega$$

$$R_5 = \frac{2\pi(50)(43.975 \times 10^{-3}) \times 4.8}{50} = 1.326 \Omega$$

$$R_7 = \frac{2\pi(50)(54.778 \times 10^{-3}) \times 6.8}{50} = 2.340 \Omega$$

10. หาค่าอิมพีแดนซ์ระบบของอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

$$\text{p.f.} = 0.828$$

$$\text{แรงดัน} = 240 \text{ V}$$

$$\text{กระแส} = 20.70 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z &= \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} = R + jX_L \\ &= \frac{240 \angle 0}{20.70 \angle -\cos^{-1} 0.828} = 9.6 + j6.501 \Omega \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } R = 9.6 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{6.501}{2\pi(50)} = 20.69 \text{ mH}$$

## เฟส b

$$P = 7.10 \text{ kW}$$

$$Q = 5.08 \text{ kVAR}$$

$$S = 8.73 \text{ kVA}$$

$$\text{p.f.} = 0.814$$

## จาก

$$\text{สมการ(4.9)} \quad Q_{old} = P \tan \theta$$

$$Q_{old} = 7,100 \tan(35.51^\circ) = 5,066.25 \text{ VAR}$$

$$Q = P \tan(\cos^{-1} 0.95) = 7,100 \tan(\cos^{-1} 0.95) = 2,333.657 \text{ VAR}$$

$$\text{สมการ(4.10)} \quad Q_{FT} = Q_{old} - Q$$

$$Q_{FT} = 5,066.25 - 2,333.657 = 2,732.593 \text{ VAR}$$

1. จากกระแสฮาร์โมนิกส์ในเฟส b ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์โมนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> ของเฟส b ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7

current	เฟส b	%THD
I <sub>1</sub>	32.10	100%
I <sub>3</sub>	19.40	61.35
I <sub>5</sub>	9.70	30.4%
I <sub>7</sub>	2.60	8.3%

$$Q_3 = 2,732.593(61.35\%) = 1,675.079 \text{ Var}$$

$$Q_5 = 2,732.593(30.4\%) = 830.708 \text{ Var}$$

$$Q_7 = 2,732.593(8.3\%) = 226.805 \text{ Var}$$



2. เลือกขนาดตัวเก็บประจุ 450 V หาค่ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ

$$Q_3 = (1,675 .079) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{3^2 - 1}{3^2} \right) = 1,742 .292 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = (830 .708) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} \right) = 929 .856 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = (226 .805) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} \right) = 259 .654 \text{ VAR}$$

3. หาขนาดคาปาซิเตอร์และค่าคาปาซิแตนซ์ ( $X_C$ ) ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C_3 = \frac{2,000}{2\pi (50)(450)^2} = 31 .438 \mu F$$

$$C_5 = \frac{1000}{2\pi (50)(450)^2} = 15 .719 \mu F$$

$$C_7 = \frac{300}{2\pi (50)(450)^2} = 4.716 \mu F$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi (50)(35 \times 10^{-6})} = 90 .95 \Omega$$

$$X_{C_5} = \frac{1}{2\pi (50)(16 \times 10^{-6})} = 198 .944 \Omega$$

$$X_{C_7} = \frac{1}{2\pi (50)(5 \times 10^{-6})} = 636 .619 \Omega$$

4. หาขนาดอินดักเตอร์ของตัวรีแอกเตอร์

$$X_{L_3} = \frac{X_{C_3}}{n^2} = \frac{90 .95}{3^2} = 10 .105 \Omega$$

$$X_{L_5} = \frac{X_{C_5}}{n^2} = \frac{198 .944}{4.8^2} = 8.635 \Omega$$

$$X_{L_7} = \frac{X_{C_7}}{n^2} = \frac{636 .619}{6.8^2} = 13.767 \Omega$$

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f} = \frac{10.105}{2\pi(50)} = 32.167 \text{ mH}$$

$$L_5 = \frac{X_{L_5}}{2\pi f} = \frac{8.635}{2\pi(50)} = 27.486 \text{ mH}$$

$$L_7 = \frac{X_{L_7}}{2\pi f} = \frac{13.767}{2\pi(50)} = 43.822 \text{ mH}$$

5. กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

$$R_3 = \frac{2\pi(50)(32.167 \times 10^{-3}) \times 3}{60} = 0.505 \Omega$$

$$R_5 = \frac{2\pi(50)(27.486 \times 10^{-3}) \times 4.8}{50} = 0.829 \Omega$$

$$R_7 = \frac{2\pi(50)(43.822 \times 10^{-3}) \times 6.8}{50} = 1.872 \Omega$$

6. หาค่าอิมพีแดนซ์ระบบของอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

$$\text{p.f.} = 0.814$$

$$\text{แรงดัน} = 240 \text{ V}$$

$$\text{กระแส} = 32.10 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z &= \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} = R + jX_L \\ &= \frac{240 \angle 0}{32.10 \angle -\cos^{-1} 0.814} = 6.086 + j4.343 \Omega \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } R = 6.086 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{4.343}{2\pi(50)} = 13.824 \text{ mH}$$

เฟส c

$$P = 9.39 \text{ kW}$$

$$Q = 6.13 \text{ kVAR}$$

$$S = 11.21 \text{ kVA}$$

$$\text{p.f.} = 0.859$$

จาก

$$\text{สมการ (4.9)} \quad Q_{old} = P \tan \theta$$

$$Q_{old} = 9,390 \tan(30.796^\circ) = 5,596.675 \text{ VAR}$$

$$Q = P \tan(\cos^{-1} 0.95) = 9,390 \tan(\cos^{-1} 0.95) = 3,086.344 \text{ VAR}$$

$$\text{สมการ (4.10)} \quad Q_{FT} = Q_{old} - Q$$

$$Q_{FT} = 5,596.675 - 3,086.344 = 2,510.331 \text{ VAR}$$

1. จากกระแสฮาร์โมนิกส์ในเฟส c ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์โมนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> ของเฟส c ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7

current	เฟส c	%THD
I <sub>1</sub>	43.30	100%
I <sub>3</sub>	23.30	54.2%
I <sub>5</sub>	11.50	27.3%
I <sub>7</sub>	3.20	7.3%

$$Q_3 = 2,510.331 (54.2\%) = 1,360.6 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = 2,510.331 (27.3\%) = 685.32 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = 2,510.331 (7.3\%) = 183.254 \text{ VAR}$$

2. เลือกขนาดตัวเก็บประจุ 450 V หาค่ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ

$$Q_3 = (1,360 .6) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{3^2 - 1}{3^2} \right) = 1,415 .2VAR$$

$$Q_5 = (685 .32) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} \right) = 767 .12VAR$$

$$Q_7 = (183 .254) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} \right) = 209 .8VAR$$

3. หาขนาดคาปาซิเตอร์และค่าคาปาซิแตนซ์ ( $X_C$ ) ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C_3 = \frac{1,500}{2\pi(50)(450)^2} = 23 .58 \mu F$$

$$C_5 = \frac{800}{2\pi(50)(450)^2} = 12 .58 \mu F$$

$$C_7 = \frac{300}{2\pi(50)(450)^2} = 4.72 \mu F$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi(50)(25 \times 10^{-6})} = 127 .324 \Omega$$

$$X_{C_5} = \frac{1}{2\pi(50)(15 \times 10^{-6})} = 212 .21 \Omega$$

$$X_{C_7} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636 .62 \Omega$$

4. ขนาดอินดักเตอร์ของตัวรีแอกเตอร์

$$X_{L_3} = \frac{X_{C_3}}{n^2} = \frac{127.324}{3^2} = 14.147 \Omega$$

$$X_{L_5} = \frac{X_{C_5}}{n^2} = \frac{212.21}{4.8^2} = 9.21 \Omega$$

$$X_{L_7} = \frac{X_{C_7}}{n^2} = \frac{636.62}{6.8^2} = 13.77 \Omega$$

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f} = \frac{14.147}{2\pi(50)} = 45.03 \text{ mH}$$

$$L_5 = \frac{X_{L_5}}{2\pi f} = \frac{9.21}{2\pi(50)} = 29.32 \text{ mH}$$

$$L_7 = \frac{X_{L_7}}{2\pi f} = \frac{13.77}{2\pi(50)} = 43.83 \text{ mH}$$

5. กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

$$R_3 = \frac{2\pi(50)(45.03 \times 10^{-3}) \times 3}{60} = 0.707 \ \Omega$$

$$R_5 = \frac{2\pi(50)(29.32 \times 10^{-3}) \times 4.8}{50} = 0.884 \ \Omega$$

$$R_7 = \frac{2\pi(50)(43.83 \times 10^{-3}) \times 6.8}{50} = 1.873 \ \Omega$$

6. หาค่าอิมพีแดนซ์ระบบของอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

$$\text{p.f.} = 0.814$$

$$\text{แรงดัน} = 240 \text{ V}$$

$$\text{กระแส} = 43.40 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z &= \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} = R + jX_L \\ &= \frac{240 \angle 0}{43.30 \angle -\cos^{-1} 0.814} = 4.512 + j3.22 \ \Omega \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } R = 4.512 \ \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{3.22}{2\pi(50)} = 10.25 \text{ mH}$$

### 4.3 จำนวนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกสำหรับโหลดอาคาร 5 ห้อง 5-1405

ข้อกำหนดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

1. แรงดันระบบ 416 V
2. กระแสฮาร์มอนิกในแต่ละเฟสที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> และ %THD<sub>v</sub> ของเฟส a, b และ c ในอันดับที่ 1, 3, 5 และ 7

Current	เฟส a	%THD	เฟส b	%THD	เฟส c	%THD
I <sub>1</sub>	1.9	100%	2	100%	1.3	100%
I <sub>3</sub>	1.6	84.90%	1.5	83.10%	1.1	87.80%
I <sub>5</sub>	1.1	55.30%	1	56.70%	0.8	64.90%
I <sub>7</sub>	0.5	29.30%	0.5	27.70%	0.5	37.10%

3. กำหนดชุดกรองฮาร์มอนิกอันดับ 3, 5, 7 อย่างละ 1 ชุด
4. หากกำลังรีแอกทีฟรวม เพื่อเพิ่มเพาเวอร์แฟกเตอร์ในแต่ละเฟส

เฟส a

$$P = 351.3 \text{ W}$$

$$Q = 388.7 \text{ VAR}$$

$$S = 524.0 \text{ VA}$$

$$\text{p.f.} = 0.680$$

จาก

$$\text{สมการ (4.9)} \quad Q_{old} = P \tan \theta$$

$$Q_{old} = 351.3 \tan(47.156^\circ) = 378.78 \text{ VAR}$$

$$Q = P \tan(\cos^{-1} 0.95) = 351.3 \tan(\cos^{-1} 0.95) = 115.467 \text{ VAR}$$

$$\text{สมการ (4.10)} \quad Q_{FT} = Q_{old} - Q$$

$$Q_{FT} = 378.78 - 115.467 = 263.313 \text{ VAR}$$

5. จากกระแสฮาร์มอนิกในเฟส a ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> ของเฟส a ในอันดับที่ 1,3,5,7

current	เฟส a	%THD
I <sub>1</sub>	1.9	100%
I <sub>3</sub>	1.6	84.90%
I <sub>5</sub>	1.1	55.30%
I <sub>7</sub>	0.5	29.30%

$$Q_3 = 263.313 (84.9\%) = 223.55 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = 263.313 (55.30\%) = 145.612 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = 263.313 (29.3\%) = 77.151 \text{ VAR}$$

6. เลือกขนาดตัวเก็บประจุ 450 V หาค่ารีแอกทีฟ

$$Q_3 = (223.55) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{3^2 - 1}{3^2} \right) = 232.52 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = (145.612) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} \right) = 163 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = (77.151) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} \right) = 88.325 \text{ VAR}$$

7. หาขนาดคาปาซิเตอร์และค่าคาปาซิแตนซ์, X<sub>C</sub> ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C_3 = \frac{300}{2\pi(50)(450)^2} = 4.72 \mu\text{F}$$

$$C_5 = \frac{200}{2\pi(50)(450)^2} = 3.144 \mu\text{F}$$

$$C_7 = \frac{100}{2\pi(50)(450)^2} = 1.572 \mu\text{F}$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

$$X_{C_5} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

$$X_{C_7} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

8. ขนาดอินดักเตอร์ของตัวรีแอกเตอร์

$$X_{L_3} = \frac{X_{C_3}}{n^2} = \frac{636.62}{3^2} = 70.73 \Omega$$

$$X_{L_5} = \frac{X_{C_5}}{n^2} = \frac{636.62}{4.8^2} = 27.63 \Omega$$

$$X_{L_7} = \frac{X_{C_7}}{n^2} = \frac{636.62}{6.8^2} = 13.768 \Omega$$

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f} = \frac{70.73}{2\pi(50)} = 0.225 H$$

$$L_5 = \frac{X_{L_5}}{2\pi f} = \frac{27.63}{2\pi(50)} = 0.088 H$$

$$L_7 = \frac{X_{L_7}}{2\pi f} = \frac{13.768}{2\pi(50)} = 0.044 H$$

9. กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

$$R_3 = \frac{2\pi(50)(0.225) \times 3}{60} = 3.534 \Omega$$

$$R_5 = \frac{2\pi(50)(0.088) \times 4.8}{50} = 2.654 \Omega$$

$$R_7 = \frac{2\pi(50)(0.044) \times 6.8}{50} = 1.88 \Omega$$

10. หาค่าอิมพีแดนซ์ระบบของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

$$\text{p.f.} = 0.680$$

$$\text{แรงดัน} = 240 V$$

$$\text{กระแส} = 1.9 A$$



$$\begin{aligned} \text{จาก } Z &= \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} &= R + jX_L \\ &= \frac{240 \angle 0}{1.9 \angle -\cos^{-1} 0.680} &= 85.895 + j92.616 \, \Omega \end{aligned}$$

**เฟส b**

$$P = 365.9 \text{ W}$$

$$Q = 344.3 \text{ VAR}$$

$$S = 502.4 \text{ VA}$$

$$\text{p.f.} = 0.680$$

จาก

$$\text{สมการ (4.9)} \quad Q_{old} = P \tan \theta$$

$$Q_{old} = 365.9 \tan(47.156^\circ) = 394.53 \text{ VAR}$$

$$Q = P \tan(\cos^{-1} 0.95) = 365.9 \tan(\cos^{-1} 0.95) = 120.23 \text{ VAR}$$

$$\text{สมการ (4.10)} \quad Q_{FT} = Q_{old} - Q$$

$$Q_{FT} = 394.53 - 120.23 = 274.3 \text{ VAR}$$

1. จากกระแสฮาร์มอนิกส์ในเฟส b ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> ของเฟส b ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7

current	เฟส b	%THD
I <sub>1</sub>	2	100%
I <sub>3</sub>	1.5	83.10%
I <sub>5</sub>	1	56.70%
I <sub>7</sub>	0.5	27.70%

$$Q_3 = 274.3(83.10\%) = 227.94 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = 274.3(56.7\%) = 155.53 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = 274.3(27.7\%) = 75.98 \text{ VAR}$$

2. เลือกขนาดตัวเก็บประจุ 450 V

$$Q_3 = (227.94) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{3^2 - 1}{3^2} \right) = 237.1 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = (155.53) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} \right) = 174.1 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = (75.98) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} \right) = 86.985 \text{ VAR}$$

3. หาขนาดคาปาซิเตอร์และค่า  $X_C$  ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C_3 = \frac{300}{2\pi(50)(450)^2} = 4.716 \mu\text{F}$$

$$C_5 = \frac{200}{2\pi(50)(450)^2} = 3.144 \mu\text{F}$$

$$C_7 = \frac{100}{2\pi(50)(450)^2} = 1.572 \mu\text{F}$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

$$X_{C_5} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

$$X_{C_7} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

4. ขนาดอินดักเตอร์ของตัวรีแอคเตอร์

$$X_{L_3} = \frac{X_{C_3}}{n^2} = \frac{636.62}{3^2} = 70.73 \Omega$$

$$X_{L_5} = \frac{X_{C_5}}{n^2} = \frac{636.62}{4.8^2} = 27.63 \Omega$$

$$X_{L_7} = \frac{X_{C_7}}{n^2} = \frac{636.62}{6.8^2} = 13.77 \Omega$$

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f} = \frac{70.73}{2\pi(50)} = 0.225 \text{ H}$$

$$L_5 = \frac{X_{L_5}}{2\pi f} = \frac{27.63}{2\pi(50)} = 0.088 \text{ H}$$

$$L_7 = \frac{X_{L_7}}{2\pi f} = \frac{13.77}{2\pi(50)} = 0.044 \text{ H}$$

5. กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

$$R_3 = \frac{2\pi(50)(0.225) \times 2.8}{60} = 3.534 \Omega$$

$$R_5 = \frac{2\pi(50)(0.088) \times 4.8}{50} = 2.654 \Omega$$

$$R_7 = \frac{2\pi(50)(0.044) \times 6.8}{50} = 1.88 \Omega$$

6. หาค่าอิมพีแดนซ์ระบบของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

$$\text{p.f.} = 0.680$$

$$\text{แรงดัน} = 240 \text{ V}$$

$$\text{กระแส} = 2 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z &= \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} = R + jX_L \\ &= \frac{240 \angle 0}{2 \angle -\cos^{-1} 0.680} = 81.6 + j87.985 \Omega \end{aligned}$$

เฟส c

$$P = 286.8 \text{ W}$$

$$Q = 347.1 \text{ VAR}$$

$$S = 450.4 \text{ VA}$$

$$\text{p.f.} = 0.680$$

จาก

$$Q_{old} = P \tan \theta \quad ; \quad \theta = \cos^{-1} 0.680 = 47.156^\circ$$

$$Q_{old} = 286.8 \tan(47.156^\circ) = 309.24 \text{ VAR}$$

$$Q = P \tan(\cos^{-1} 0.95) = 286.8 \tan(\cos^{-1} 0.95) = 94.27 \text{ VAR}$$

$$Q_{FT} = Q_{old} - Q$$

$$Q_{FT} = 309.24 - 94.27 = 214.97 \text{ VAR}$$

1. จากกระแสฮาร์โมนิกส์ในเฟส c ดังแสดงในตารางที่ 4.8  
ตารางที่ 4.8 ค่าที่ได้จากวัดกระแสฮาร์โมนิกส์ แสดงเป็น %THD<sub>i</sub> ของเฟส c ในอันดับที่ 1, 3, 5, 7

current	เฟส c	%THD
I <sub>1</sub>	1.3	100%
I <sub>3</sub>	1.1	87.80%
I <sub>5</sub>	0.8	64.90%
I <sub>7</sub>	0.5	37.10%

$$Q_3 = 214.97 (87.8\%) = 188.74 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = 214.97 (64.9\%) = 139.52 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = 214.97 (37.10\%) = 79.754 \text{ VAR}$$

2. เลือกขนาดตัวเก็บประจุ 450 V หาค่ารีแอกทีฟ

$$Q_3 = (188.74) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{3^2 - 1}{3^2} \right) = 196.313 \text{ VAR}$$

$$Q_5 = (139.52) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{4.8^2 - 1}{4.8^2} \right) = 156.172 \text{ VAR}$$

$$Q_7 = (79.754) \left[ \frac{450}{416} \right]^2 \left( \frac{6.8^2 - 1}{6.8^2} \right) = 91.3 \text{ VAR}$$

3. หาขนาดคาปาซิเตอร์และค่าคาปาซิแตนซ์,  $X_C$  ที่ความถี่ 50 Hz.

$$C_3 = \frac{200}{2\pi(50)(450)^2} = 3.144 \mu F$$

$$C_5 = \frac{200}{2\pi(50)(450)^2} = 3.144 \mu F$$

$$C_7 = \frac{100}{2\pi(50)(450)^2} = 1.572 \mu F$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

$$X_{C_5} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

$$X_{C_7} = \frac{1}{2\pi(50)(5 \times 10^{-6})} = 636.62 \Omega$$

4. ขนาดอินดักเตอร์ของตัวรีแอคเตอร์

$$X_{L_3} = \frac{X_{C_3}}{n^2} = \frac{636.62}{3^2} = 70.73 \Omega$$

$$X_{L_5} = \frac{X_{C_5}}{n^2} = \frac{636.62}{4.8^2} = 27.63 \Omega$$

$$X_{L_7} = \frac{X_{C_7}}{n^2} = \frac{636.62}{6.8^2} = 13.77 \Omega$$

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f} = \frac{70.73}{2\pi(50)} = 0.225 H$$

$$L_5 = \frac{X_{L_5}}{2\pi f} = \frac{27.63}{2\pi(50)} = 0.088 H$$

$$L_7 = \frac{X_{L_7}}{2\pi f} = \frac{13.77}{2\pi(50)} = 0.044 H$$

5. กำหนดค่า Q-Factor และหาค่า R

$$R_3 = \frac{2\pi(50)(0.258) \times 3}{60} = 3.534 \Omega$$

$$R_5 = \frac{2\pi(50)(0.088) \times 4.8}{50} = 2.654 \Omega$$

$$R_7 = \frac{2\pi(50)(0.044) \times 6.8}{50} = 1.88 \Omega$$

6. หาค่าอิมพีแดนซ์ระบบของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

$$\text{p.f.} = 0.680$$

$$\text{แรงดัน} = 240 \text{ V}$$

$$\text{กระแส} = 1.3 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z &= \frac{V}{I \angle -\cos^{-1} \theta} &= R + jX_L \\ &= \frac{240 \angle 0}{1.3 \angle -\cos^{-1} 0.680} &= 125.54 + j135.362 \Omega \end{aligned}$$

จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ข้างต้น เป็นการคำนวณหาพารามิเตอร์ R, L และ C ภายในวงจรของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ซึ่งทางผู้จัดทำเล็งเห็นว่า กระแสฮาร์มอนิกส์ของเฟส c ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 มี %THD สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเฟส a และ เฟส b ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงทำการสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 โดยเป็นแบบเฟสเดียว คือเฟส c แรงดัน 220 V กระแสไม่เกิน 5 A. ซึ่งในส่วนต่อไปจะเป็นการออกแบบการสร้างตัว Inductor สำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกส์ของระบบไฟฟ้าห้อง 5-1405

#### 4.4 การออกแบบ Inductor อาคาร 5 ห้อง 5-1504 มหาวิทยาลัยศรีปทุม

วิธีการออกแบบอินดักเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ตามที่ต้องการนั้น มีการออกแบบ คล้ายหม้อแปลง 1 เฟส จะแตกต่างกันตรงที่หม้อแปลงมีขดลวด 2 ชุด ส่วนอินดักเตอร์มีขดลวดพัน ตรงอยู่แกนกลางของแกนเหล็ก โดยจะทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในอันดับ 3, 5 และ 7 ดังนี้

##### - การออกแบบ Inductor Order 3<sup>rd</sup>.

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

1. Inductance	91.35 mH.
2. $I_{\text{peak}(1)}$	1.9 A.
3. $I_{\text{peak}(3)}$	1.6 A.
4. Frequency (1),(3)	50,250 Hz.
5. Flux Density	0.6 T.
6. Core Material	Silicon
7. Core Configuration	EI, ขดลวด AC พันแกนกลาง
8. Temperature rise	50 °C

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาค่าพลังงานสะสม

$$\text{Energy} = \frac{Li^2}{2} = \frac{(91.35 \times 10^{-3})(1.9 + 1.6)^2}{2} = 0.559 \text{ [w - s]}$$

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาพื้นที่ของแกนเหล็กคูณกับพื้นที่ของขดลวด (Area product)

$$A_p = \left[ \frac{2\text{Energy} \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right]^x = \left[ \frac{2 \times 0.559 \times 10^4}{1.6 \times 0.4209 \times 534} \right] = 31.089 \text{ [cm}^4 \text{]}$$

ขั้นตอนที่ 3: ทำการเลือกแกน EI 112 โดยที่ค่า  $A_p = 47.504$ ,  $A_c = 7.757$ ,  $w_a = 6.124 \text{ cm}^2$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส

$$J = K_j A_p^y = 534 \times 47.504^{0.12} = 848.7 [A/cm^2]$$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณหาขนาดขดลวดทองแดง  $A_{w(B)}$

$$A_{w(B)} = \frac{I_p}{J} = \frac{1.9}{848.7} = 0.00224 [cm^2]$$

ขั้นตอนที่ 6: เลือกขนาดลวดทองแดงจากตารางใช้ขนาด AWG No. #23

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณหาค่าพื้นที่เมื่อพันขดลวดลงในบ็อบบี้

$$W_{a(eff)} = W_a \times S_3 = 6.124 \times 0.75 = 4.593 [cm^2]$$

ขั้นตอนที่ 8: คำนวณหาจำนวนรอบที่ใช้ในการสร้างอินดักเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์  
เมื่อ  $A_{w(B)}$  ของ No. 23 = 0.003135  $cm^2$

$$N = \frac{W_{a(eff)} \times S_2}{A_w} = \frac{(4.593)(0.61)}{0.003135} \approx 900 \text{ turns} .$$

ขั้นตอนที่ 9: คำนวณระยะการปรับแก้ของแกนเหล็ก EI

$$l_g = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} = \frac{0.4\pi (900)^2 (7.757) \times 10^{-8}}{91.35 \times 10^{-3}} = 0.864 [cm]$$



### - การออกแบบ Inductor Order 5<sup>th</sup>.

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

1. Inductance	43.26 mH.
2. $I_{\text{peak}(1)}$	2 A.
3. $I_{\text{peak}(3)}$	1.5 A.
4. Frequency (1),(3)	50,250 Hz.
5. Flux Density	0.6 T.
6. Core Material	Silicon
7. Core Configuration	EI, ขดลวด AC พันแกนกลาง
8. Temperature rise	50 °C

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาค่าพลังงานสะสม

$$\text{Energy} = \frac{Li^2}{2} = \frac{(43.26 \times 10^{-3})(2 + 1.5)^2}{2} = 0.265 \text{ [w - s]}$$

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาพื้นที่ของแกนเหล็กคูณกับพื้นที่ของขดลวด (Area product)

$$A_p = \left[ \frac{2\text{Energy} \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right]^x = \left[ \frac{2 \times 0.265 \times 10^4}{1.6 \times 0.4209 \times 534} \right] = 14.82 \text{ [cm}^4\text{]}$$

ขั้นตอนที่ 3: ทำการเลือกแกน EI 875 โดยที่ค่า  $A_p = 17.38$ ,  $A_c = 4.693$ ,  $w_a = 3.705 \text{ cm}^2$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส

$$J = K_j A_p^y = 534 \times 17.38^{0.12} = 725.245 \text{ [A/cm}^2\text{]}$$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณหาขนาดขดลวดทองแดง  $A_{w(B)}$

$$A_{w(B)} = \frac{I_p}{J} = \frac{2}{725.245} = 0.00276 \text{ [cm}^2\text{]}$$

ขั้นตอนที่ 6: เลือกขนาดขดลวดทองแดงจากตารางใช้ขนาด AWG No. #22  $A_{w(B)} = 0.003857$

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณหาค่าพื้นที่เมื่อพันขดลวดลงในบ๊อบบี้

$$W_{a(eff)} = W_a \times S_3 = 3.705 \times 0.75 = 2.7788 [cm^2]$$

ขั้นตอนที่ 8: คำนวณหาจำนวนรอบที่ใช้ในการสร้างอินดักเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์

เมื่อ  $A_w(B)$  ของ No. 23 = 0.003857  $cm^2$

$$N = \frac{W_{a(eff)} \times S_2}{A_w} = \frac{(2.7788)(0.61)}{0.003857} \approx 440 \text{ turns} .$$

ขั้นตอนที่ 9: คำนวณระยะการปรับแก้ของแกนเหล็ก EI

$$l_g = \frac{0.4\pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} = \frac{0.4\pi (440)^2 (4.695) \times 10^{-8}}{43.26 \times 10^{-3}} = 0.264 [cm]$$

- การออกแบบ Inductor Order 7<sup>th</sup>.

ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ

1. Inductance	26.52 mH.
2. $I_{peak(1)}$	1.3 A.
3. $I_{peak(3)}$	1.1 A.
4. Frequency (1),(3)	50,250 Hz.
5. Flux Density	0.6 T.
6. Core Material	Silicon
7. Core Configuration	EI, ขดลวด AC พันแกนกลาง
8. Temperature rise	50 °C

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาค่าพลังงานสะสม

$$Energy = \frac{Li^2}{2} = \frac{(26.52 \times 10^{-3})(1.3 + 1.1)^2}{2} = 0.0764 [w - s]$$

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาพื้นที่ของแกนเหล็กคูณกับพื้นที่ของขดลวด (Area product)

$$A_p = \left[ \frac{2 \text{Energy} \times 10^4}{B_m K_u K_j} \right]^x = \left[ \frac{2 \times 0.0764 \times 10^4}{1.6 \times 0.4209 \times 534} \right] = 4.2723 \text{ [cm}^4 \text{]}$$

ขั้นตอนที่ 3: ทำการเลือกแกน EI 750 โดยที่ค่า  $A_p = 9.384$ ,  $A_c = 3.448$ ,  $w_a = 2.723 \text{ cm}^2$

ขั้นตอนที่ 4: คำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแส

$$J = K_j A_p^y = 534 \times 9.384^{0.12} = 698.59 \text{ [A/cm}^2 \text{]}$$

ขั้นตอนที่ 5: คำนวณหาขนาดขดลวดทองแดง  $A_{w(B)}$

$$A_{w(B)} = \frac{I_p}{J} = \frac{1.3}{698.59} = 0.00186 \text{ [cm}^2 \text{]}$$

ขั้นตอนที่ 6: เลือกขนาดขดลวดทองแดงจากตารางใช้ขนาด AWG No. #12;  $A_{w(B)} = 0.03564$

ขั้นตอนที่ 7: คำนวณหาค่าพื้นที่เมื่อพันขดลวดลงในบ๊อบบี้

$$W_{a(\text{eff})} = W_a \times S_3 = 2.723 \times 0.75 = 2.042 \text{ [cm}^2 \text{]}$$

ขั้นตอนที่ 8: คำนวณหาจำนวนรอบที่ใช้ในการสร้างอินดักเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์

$$N = \frac{W_{a(\text{eff})} \times S_2}{A_w} = \frac{(2.042)(0.61)}{0.003564} \approx 36 \text{ turns .}$$

ขั้นตอนที่ 9: คำนวณระยะการปรับแก้ของแกนเหล็ก EI

$$l_g = \frac{0.4 \pi N^2 A_c \times 10^{-8}}{L} = \frac{0.4 \pi (36)^2 (3448) \times 10^{-8}}{26.52 \times 10^{-3}} = 0.00212 \text{ [cm]}$$

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

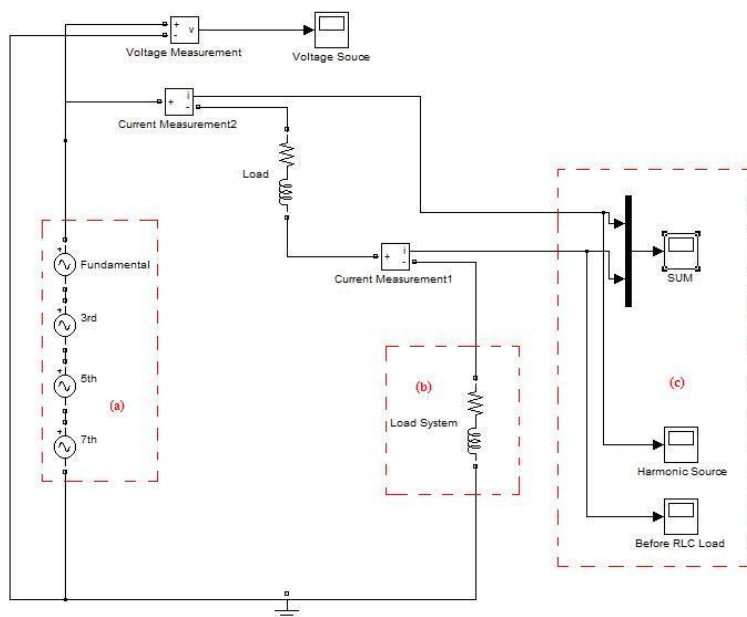
ในส่วนของ การทดลองนี้ ทำผู้จัดทำต้องการนำเสนอการจำลองการกรองฮาร์มอนิกส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูผลการกรองของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ จากค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการจำลองระบบไฟฟ้าของอาคาร 5 ชั้น 9 และส่วนที่สองเป็นการจำลองระบบไฟฟ้าของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 โดยแสดงผลการกรองออกเป็นรูปสัญญาณทางไฟฟ้าของกระแส เพื่อตรวจสอบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ออกแบบนั้นมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด และผลการกรองนั้นเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

#### 5.1 การจำลองระบบไฟฟ้าของอาคาร 5 ชั้น 9 โดยใช้โปรแกรม MATLAB

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ทำการออกแบบแล้ว มาทดลองสร้างวงจรจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทดสอบว่าค่าองค์ประกอบที่ได้จากการคำนวณสามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ได้จริงหรือไม่

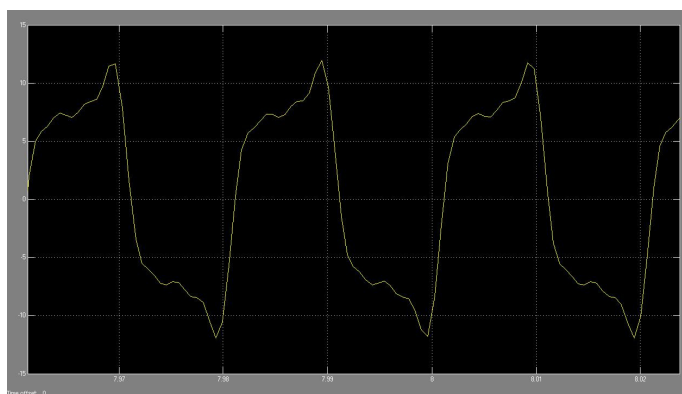
##### ขั้นตอนการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

- สร้างไฟล์ model สร้างวงจรโดยดึงอุปกรณ์จาก Library browser เลือก SimPowerSystems
- เลือก Elements เพื่อเลือกอุปกรณ์ในการสร้างวงจร
- กำหนดค่าต่างๆของอุปกรณ์ที่สร้าง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์วงจร
- ทำการ start simulation ดูผลลัพธ์ทางไฟฟ้าจาก scope
- สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



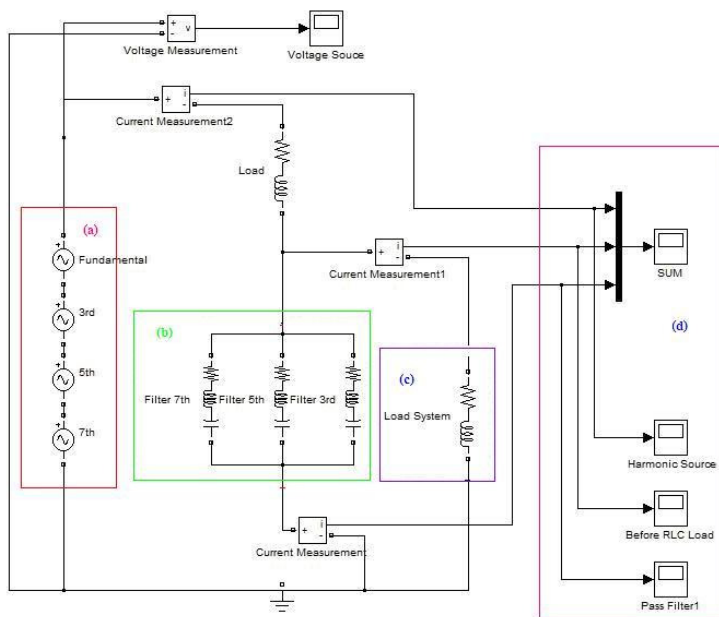
ภาพที่ 5.1 วงจรของระบบก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

จากภาพที่ 5.1 เป็นภาพแสดงการจำลองวงจรระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม โดยแบ่งเป็น zone (a) เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ zone (b) เป็นพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 และ zone (c) เป็นที่เราต้องการทราบรูปสัญญาณทางไฟฟ้าของระบบ ซึ่งก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้กับระบบ จะพบว่า Oscilloscope (Osc.) แสดงสัญญาณของฮาร์มอนิกส์ในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 5.2



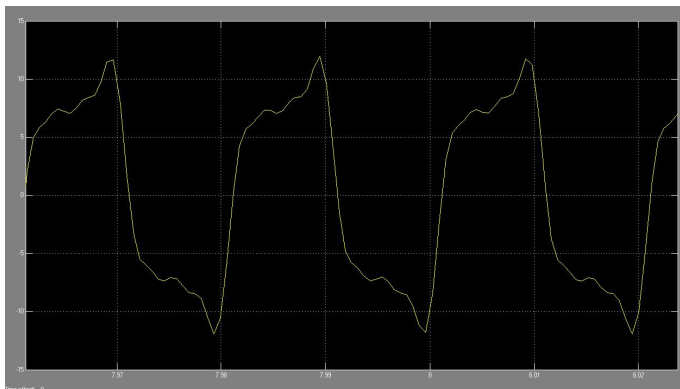
ภาพที่ 5.2 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 ก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

จากนั้นติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกให้กับระบบโดยแบ่งเป็น zone (a) เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ zone (b) เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิก zone (c) เป็นพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 และ zone (d) เป็น Oscilloscope (Osc.) ที่เราต้องการทราบรูปสัญญาณทางไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 5.3

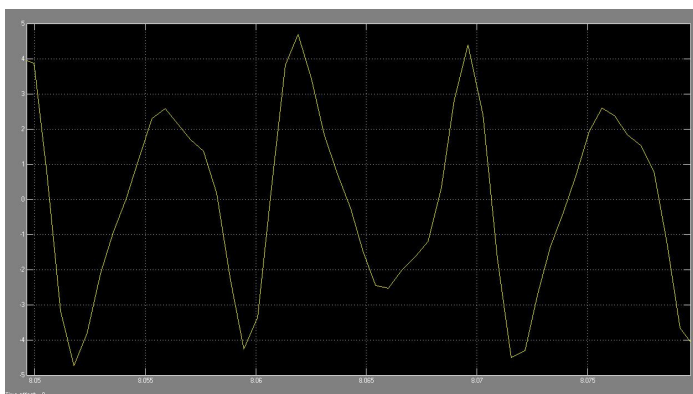


ภาพที่ 5.3 วงจรจำลองการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9

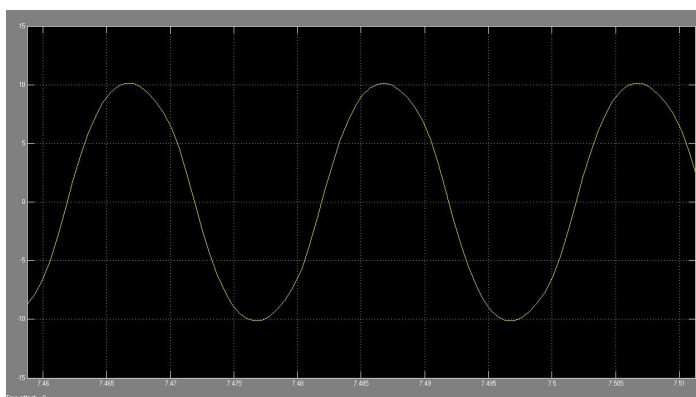
หลังจากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกให้กับระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 ที่เราทำการจำลองขึ้นนั้น จะพบว่า Osc. จะแสดงสัญญาณทางไฟฟ้าโดยแบ่งเป็น สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าซึ่งแสดงดังภาพที่ 5.3 สัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกส่งกราฟด์ ดังแสดงในภาพที่ 5.4 และสัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ดังแสดงในภาพที่ 5.5



ภาพที่ 5.4 สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9



ภาพที่ 5.5 สัญญาณของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลผ่านตัวกรองกราวด์

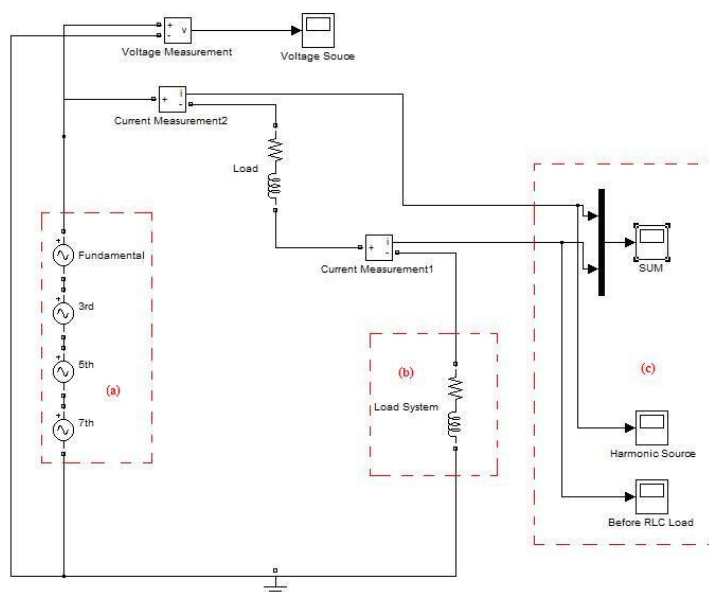


ภาพที่ 5.6 สัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบ

จากการทดลองการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์จากคอมพิวเตอร์อาคาร 5 ชั้น 9 ในระบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะเห็นว่า ก่อนที่เราจะทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบจำลองนั้น Osc. แสดงรูปคลื่นสัญญาณไซน์ ที่ผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ปกติ ซึ่งบ่งบอกว่าในระบบนั้นมีกระแสฮาร์มอนิกส์ปะปนอยู่ โดยเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 มีค่าสูงสุด เมื่อเราทำการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ขนานเข้าไปในระบบจำลองดังแสดงในภาพ 5.3 Osc. แสดงรูปสัญญาณของกระแสที่ได้จากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ทั้งก่อนและหลัง ดังแสดงในภาพที่ 5.2 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 ก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ และ ภาพที่ 5.6 สัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบ จะเห็นได้ชัดว่าสัญญาณของกระแสก่อนที่จะไหลผ่านเข้าระบบเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์นั้นต่างกันสิ้นเชิง โดยหลังการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์มีรูปสัญญาณของกระแสที่เป็นไซน์มากขึ้น ซึ่งแสดงว่าคุณภาพไฟฟ้าหลังจากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์นั้นดีขึ้น

## 5.2 การจำลองระบบไฟฟ้าของอาคาร 5 ห้อง 5-1405 โดยใช้โปรแกรม MATLAB

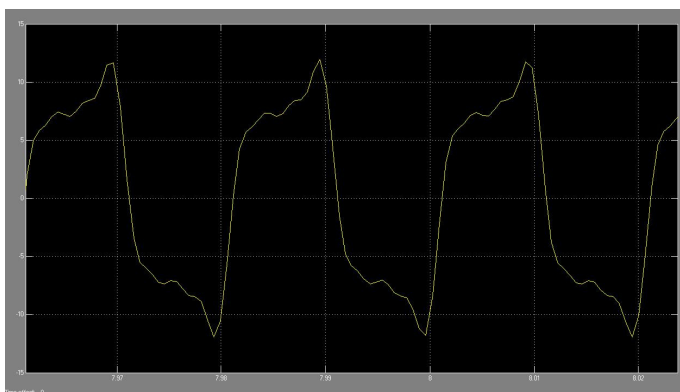
ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ทำการออกแบบแล้ว มาทดลองสร้างวงจรจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทดสอบว่าค่าองค์ประกอบที่ได้จากการคำนวณสามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ได้จริงหรือไม่ ซึ่งจำลองระบบดังภาพที่ 5.7



ภาพที่ 5.7 วงจรของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

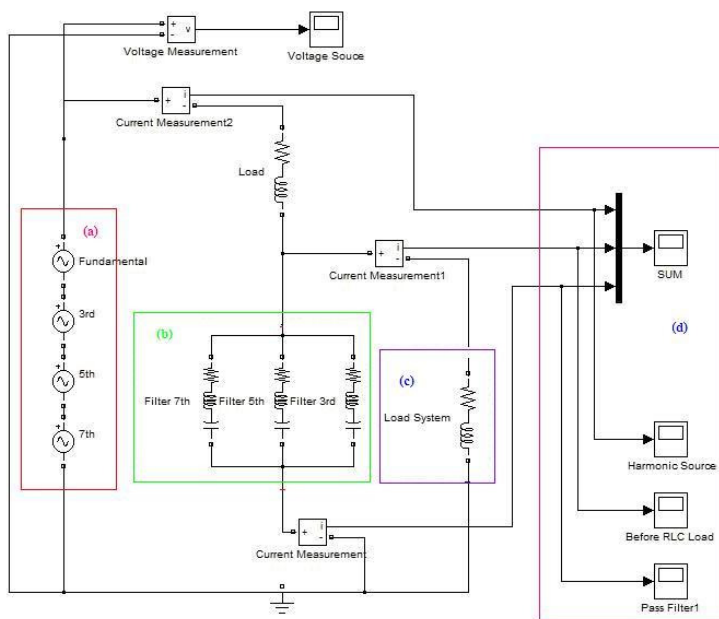


จากภาพที่ 5.7 เป็นภาพแสดงการจำลองวงจรระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 มหาวิทยาลัยศรีปทุม โดยแบ่งเป็น zone (a) เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ zone (b) เป็นพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 และ zone (c) เป็น Osc. ที่เราต้องการทราบรูปสัญญาณทางไฟฟ้าของระบบ ซึ่งก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้กับระบบ จะพบว่า Osc. แสดงสัญญาณของฮาร์มอนิกส์ในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 5.8



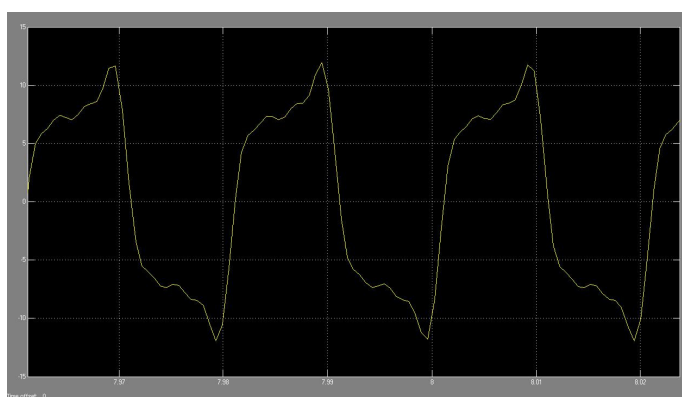
ภาพที่ 5.8 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

จากนั้นติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้กับระบบโดยแบ่งเป็น zone (a) เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ zone (b) เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ zone (c) เป็นพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 และ zone (c) เป็น Osc. ที่เราต้องการทราบรูปสัญญาณทางไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 5.9

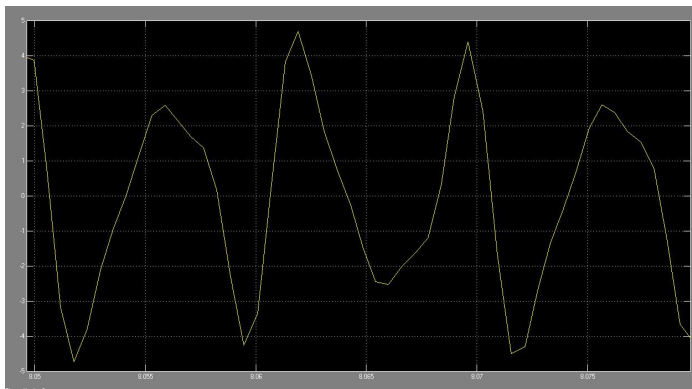


ภาพที่ 5.9 วงจรจำลองการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405

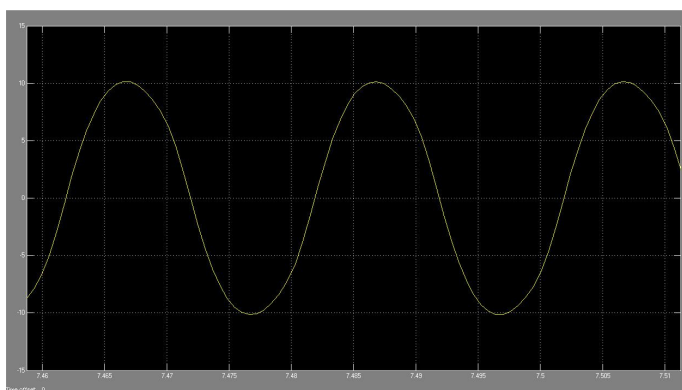
หลังจากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกให้กับระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ที่เราทำการจำลองขึ้นนั้น จะพบว่า Osc. จะแสดงสัญญาณทางไฟฟ้าโดยแบ่งเป็น สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าซึ่งแสดงดังภาพที่ 5.10 สัญญาณของกระแสที่ไหลผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกสัณฐานกราวด์ ดังแสดงในภาพที่ 5.11 และสัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ดังแสดงในภาพที่ 5.12



ภาพที่ 5.10 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405



ภาพที่ 5.11 สัญญาณของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลผ่านตัวกรองกราวด์

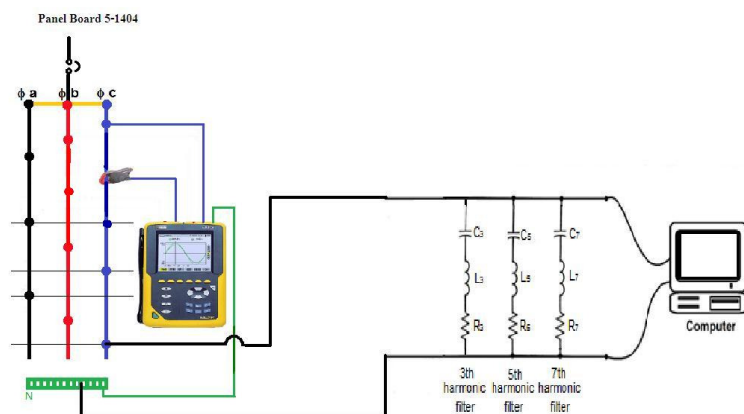


ภาพที่ 5.12 สัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบ

จากการทดลองการกรองกระแสฮาร์โมนิกส์จากคอมพิวเตอร์อาคาร 5 ห้อง 5-1405 มหาวิทยาลัยศรีปทุมในระบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB จะเห็นว่า ก่อนที่เราจะทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบจำลองนั้น Osc. แสดงรูปคลื่นสัญญาณไซน์ ที่ผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ปกติ ซึ่งบ่งบอกว่าในระบบนั้นมีกระแสฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่ โดยเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 มีค่าสูงสุด เมื่อเราทำการใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ ขนานเข้าไปในระบบจำลองดังแสดงในภาพ 5.9 Osc. รูปสัญญาณของกระแสที่ได้จากการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ทั้งก่อนและหลัง ดังแสดงในภาพที่ 5.8 สัญญาณกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ และ ภาพที่ 5.12 สัญญาณของกระแสหลังจากผ่านตัวกรองฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบ จะเห็นได้ชัดว่าสัญญาณของกระแสก่อนที่จะไหลผ่านเข้าสู่ระบบเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์นั้นต่างกันโดยสิ้นเชิง ซึ่งแสดงว่าคุณภาพไฟฟ้าหลังจากการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์นั้นดีขึ้น

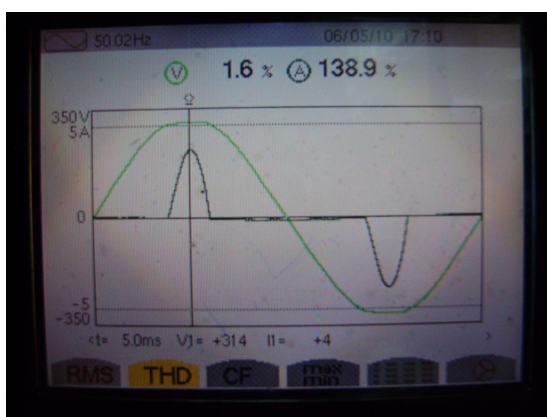
### 5.3 การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า อาคาร 5 ห้อง 5-1405

ในที่นี้เราจะทำการสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกแบบ Passive จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้คำนวณและจำลองแล้วข้างต้น เพื่อนำไปกรองฮาร์มอนิกสำหรับอาคาร 5 ห้อง 5-1405 มหาวิทยาลัยศรีปทุม ซึ่งแสดงตำแหน่งในการติดตั้งดังนี้

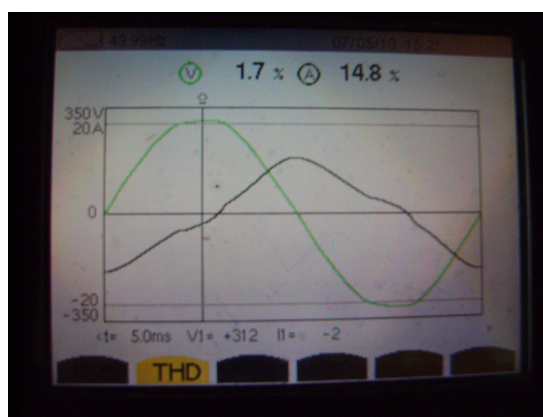


ภาพที่ 5.13 ตำแหน่งการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405

ในการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกนี้ เราเลือกสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกแบบ Passive ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่เฟส c โดยสังเกตเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ %THDi มีค่าสูงที่สุด จึงเลือกกรองเฟสนี้ เพื่อให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5.14 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก

(ก) สัญญาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก

(ข) สัญญาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก

จากภาพที่ 5.14(ก) แสดงรูปสัญญาณของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้จากอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณของกระแสมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ ปกติ แสดงให้เห็นถึงว่าระบบมีฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก และภาพที่ 5.14(ข) แสดงรูปสัญญาณของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์หลังติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ จะเห็นได้ชัดว่าสัญญาณของกระแสจากรูป (ก) ที่ผิดเพี้ยน เปลี่ยนเป็นรูปสัญญาณไซน์ ที่ดีขึ้นใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ดังแสดงในรูป (ข)



(ก)



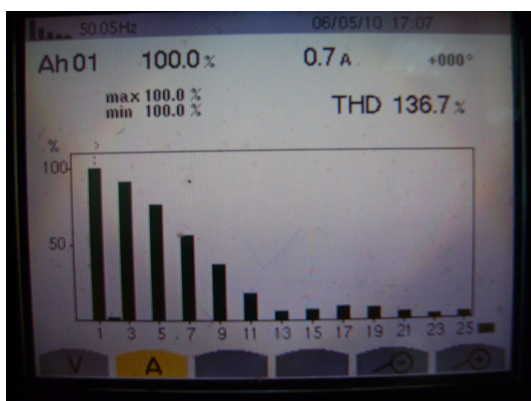
(ข)

ภาพที่ 5.15 สเปกตรัมของแรงดันก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์

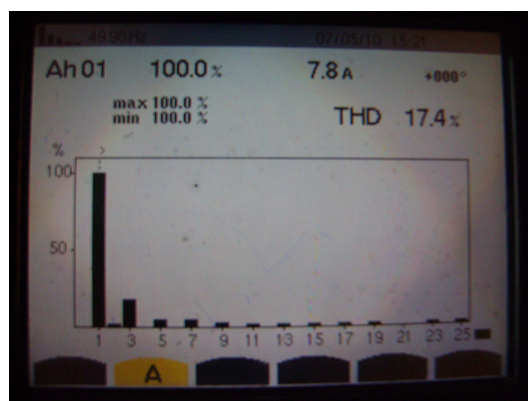
(ก) สเปกตรัมของแรงดันก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์

(ข) สเปกตรัมของแรงดันหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์

จากภาพที่ 5.15 แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมก่อนการติดตั้งและหลังการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ ซึ่งไม่มีผลต่อแรงดันเนื่องจากเราทำการออกแบบให้กรองกระแสฮาร์โมนิกส์ในอันดับฮาร์โมนิกส์ที่ออกแบบไว้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5.16 สเปกตรัมของกระแสก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

(ก) สเปกตรัมของกระแสก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

(ข) สเปกตรัมของกระแสหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์

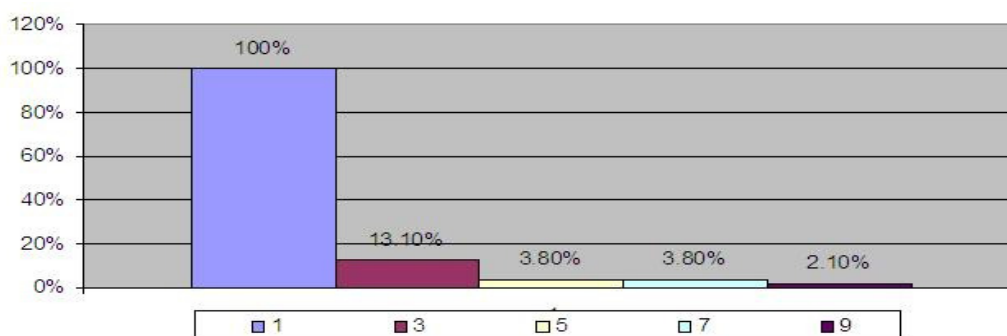
จากภาพที่ 5.16(ก) แสดงสเปกตรัมกระแสก่อนการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ จะเห็นว่า มี %THDi 136.7% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE519-1992 ระบุที่ 4% แต่หลังจากติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ดังแสดงในรูป 5.16(ข) แสดงสเปกตรัมกระแสหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ พบว่า %THDi ลดลงเหลือ 17.4% ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ลดลงจากเดิมมาก

#### 5.4 ผลการวัดที่ได้หลังจากติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบ อาคาร 5 ห้อง 5-1405

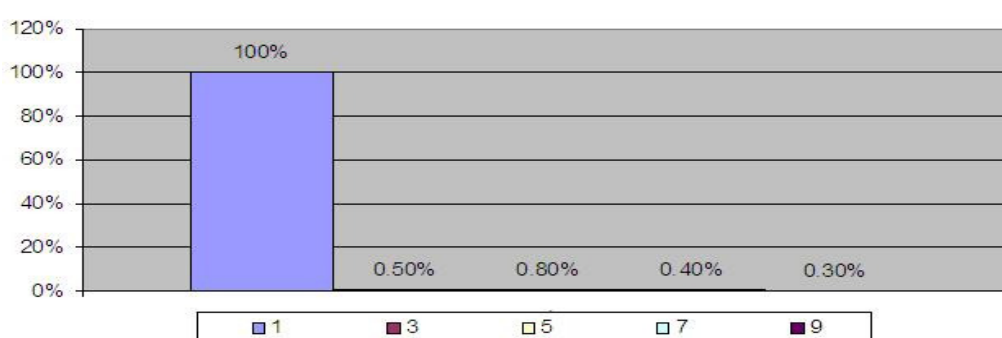
ตารางที่ 5.1 ค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้จากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกเฟส c

ลำดับ ฮาร์มอนิกส์	เฟส c			
	กระแส (A)		แรงดัน (V)	
	I	%THD	V	%THD
1	7.8	100%	226.2	100%
3	1	13.10%	1.1	0.50%
5	0.3	3.80%	2.3	0.80%
7	0.3	3.80%	0.8	0.40%
9	0.1	1.0%	0.4	0.2%
11				
13				
15				
17				
19				
21				
23				
25				

จากผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ดังตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆนั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐาน IEEE 519 – 1992 ส่วนแรงดันฮาร์มอนิกส์นั้นมีค่าที่อยู่ในมาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 5.17 เปอร์เซนต์กระแสฮาร์โมนิกหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์



ภาพที่ 5.18 เปอร์เซนต์แรงดันฮาร์โมนิกหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์

จากภาพที่ 5.17 และ 5.18 แสดงให้เห็นถึงกราฟแท่งแสดงเปอร์เซนต์ของกระแสฮาร์โมนิกส์และแรงดันฮาร์โมนิกส์ของการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ผู้ Panel Board ห้อง 5-1405 หลังจากทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ที่ออกแบบ ได้ผลการวัดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ในแต่ละอันดับ แสดงผลว่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีเปอร์เซนต์ที่ลดลงจาก %THDi 136.7% ก่อนการติดตั้งซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE519-1992 ระบุที่ 4% แต่หลังจากติดตั้งตัวกรอง ฮาร์โมนิกส์ %THDi มีเปอร์เซนต์ลดลงเข้าในระดับมาตรฐาน

จากผลการทดลองการกรองกระแสฮาร์โมนิกส์จากคอมพิวเตอร์ในระบบจำลองอาคาร 5 ห้อง 5-1405 โดยเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ จะเห็นว่า ก่อนที่เราจะทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบนั้น Osc. แสดงรูปคลื่นสัญญาณ ไซน์ที่ผิดเพี้ยนจากสัญญาณ ไซน์ปกติ ซึ่งบ่งบอกว่าในระบบนั้นมีกระแสฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่ โดยเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 จะมีค่าสูงที่สุด เมื่อเราทำการใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ ขนานเข้าไปในระบบ Osc. แสดงรูปสัญญาณ ไซน์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่ติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ เมื่อเราทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกส์ที่ได้ออกแบบไว้มาติดตั้งแล้วทำการวัดค่ากระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ พบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีเปอร์เซนต์ที่ลดลง จาก %THDi 136.7% ก่อนการติดตั้งซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน



IEEE519-1992 ระบุที่ 4% แต่หลังจากติดตั้งตัวกรอง ฮาร์มอนิกส์ %THDi มีเปอร์เซ็นต์ลดลงเข้า  
ในระดับมาตรฐาน และแรงดันฮาร์มอนิกส์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากว่าแรงดันฮาร์มอนิกส์  
อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ IEEE 519-1992 ระบุที่ %THDv ที่ 5%

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองวัดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ทำให้ทราบถึงรูปสัญญาณทางไฟฟ้า และสเปกตรัมของระบบที่คิดเขียน ซึ่งบ่งบอกว่าระบบนี้มีกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์จำนวนมาก โดยเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกส์ในอันดับที่ 3 (150 Hz) ซึ่งเป็นกระแสที่รบกวนฮาร์มอนิกส์ตามทฤษฎีแล้วกระแสประเภทนี้มีทิศทางการไหลของกระแสลงไปในสายนิวทรัล อาจก่อให้เกิดปัญหาของสายนิวทรัลร้อนจนอาจเกิดการเสียหาย กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 จะมีค่าสูงที่สุด กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 และกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 ตามลำดับ เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการกำหนดข้อจำกัดของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า โดยกล่าวอ้างมาตรฐาน IEEE 519-1992 ที่ระบุไว้ว่า กระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าที่ระดับ  $I_{sc}/I$  น้อยกว่า 20A และอันดับกระแสฮาร์มอนิกส์ที่น้อยกว่าอันดับที่ 11 ระบุว่า %THDi ไม่เกิน 4% และแรงดันฮาร์มอนิกส์ในมาตรฐานระบุไว้ว่า ที่แรงดันระบบไม่เกิน 69 kV %THDv ต้องไม่เกิน 5% ตามที่มาตรฐานระบุ ซึ่งจากค่าที่ทำการวัดจากระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ชั้น 9 มี %THDi แต่ละเฟส โดยกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 เฟส a (56.5%) เฟส b (61.3%) เฟส c (54.2%) กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 5 เฟส a (27.4%) เฟส b (30.4%) เฟส c (27.3%) และกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 7 เฟส a (9.4%) เฟส b (8.3%) เฟส c (7.3%) จะเห็นว่า %THDi มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ 4% ทางผู้จัดทำจึงนำเสนอการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟฟิลเตอร์พร้อมทั้งจำลองประสิทธิภาพของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง ซึ่งเมื่อเราทำการใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 3, 5 และ 7 เข้าไปขนานกับระบบ จะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่เข้าระบบมีความผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ และเมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ออกแบบไว้โดยจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์นี้มองเป็นอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์จึงทำกระแสฮาร์มอนิกส์ถูกไหลผ่านลงกราวด์ไป ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ใกล้เคียงสัญญาณไซน์ และสเปกตรัมมีแอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 3, 5 และ 7 ลดลงเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่ได้ใส่ตัวกรอง

จากนั้นทางผู้จัดยังได้ศึกษาโดยสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ออกแบบไว้สำหรับโหลดของระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาหลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยเลือกสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟฟิลเตอร์ ระบบไฟฟ้า 1 เฟส แรงดัน 220 V กระแสไม่เกิน 5 A ซึ่งในขั้นต้นได้ทำการวัดค่า %THDi เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ซึ่งเลือกเฟส c มาเป็นข้อมูลในการสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ เนื่องจากมี %THDi สูง

ที่สุดเมื่อเทียบกับเฟส a และเฟส b ซึ่งได้ค่าดังนี้ เฟส c ฮาร์มอนิกอันดับ 3 %THDi (87.80%) ฮาร์มอนิกอันดับ 5 %THDi (64.9%) ฮาร์มอนิกอันดับ 7 %THDi (37.1%) ทางผู้จัดทำได้สร้างตัวกรองฮาร์มอนิก 3 ชุด คือ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับ 3 , 5 และ 7 ต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ซึ่ง %THDi ที่ได้หลังจากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จะพบว่า %THDi แต่ละอันดับลดลง ผลที่ได้หลังการวัดแสดงดังนี้ เฟส c ฮาร์มอนิกอันดับ 3 %THDi (13.10%) ฮาร์มอนิกอันดับ 5 %THDi (3.80%) ฮาร์มอนิกอันดับ 7 %THDi (3.80%) ซึ่งจะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกมี %THDi ลดลงเข้าใกล้มาตรฐาน IEEE 519-1992 ที่ระบุไม่เกิน 4% สัญญาณกระแสที่ได้มีความใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้น เมื่อเทียบกับสัญญาณกระแสก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก ซึ่งถือว่าตัวกรองฮาร์มอนิกนี้มีประสิทธิภาพในการกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าอาคาร 5 ห้อง 5-1405 ตามที่ออกแบบไว้

นอกจากนี้ตัวกรองฮาร์มอนิกยังเป็นประโยชน์ในเรื่องการแก้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์อย่างไรก็ตามตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบ จะสามารถใช้ได้ในช่วงของโหลดที่กำหนดไว้เท่านั้น และไม่สามารถใช้ตัดแปลงในกรณีที่มีโหลดเพิ่มขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE STD. 519 – 1992, IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonics Control in Electrical Power System, American National Standard (ANSI), USA, April 12, 1993.
- [2] Colonel Wm. T.Mclyman, TRANSFORMER AND INDUCTOR DESIGN HANDBOOK, 1<sup>st</sup> Edition, 2004.
- [3] ไชยะ แซ่มซ้อย ฮาร์โมนิกส์ (1) มาตรฐานฮาร์โมนิกส์ เทคนิค ฉบับที่ 122 หน้า 109 ปี 2538
- [4] ไชยะ แซ่มซ้อย ฮาร์โมนิกส์ (2) มาตรฐานฮาร์โมนิกส์ เทคนิค ฉบับที่ 134 หน้า 103 ปี 2539
- [5] ไชยะ แซ่มซ้อย คู่มือการลดค่าไฟฟ้า พิมพ์ครั้งที่ 1 ฉบับที่ 1 หน้า 126 ปี 2544
- [6] สุรสิทธิ์ ทองจันทร์พย์ รวบรวมบทความจากวารสารเทคนิคไฟฟ้า ชุดที่ 746 เรื่องนำรู้ไฟฟ้าทั่วไป, ต่อดงคิน, ฮาร์โมนิกส์ หน้า 72 พิมพ์ครั้งที่ 1 ปี 2546