บทที่2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดฮาร์มอนิก[3]

2.1.1 ฮาร์มอนิก (Harmonic)

ในศาสตร์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ฮาร์มอนิก คือสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่หลักมูลคือ 50 เฮิรตซ์ ฮาร์มอนิก คือ 100,200 เป็นต้น ความถี่หลักมูลเรียกว่าฮาร์มอนิกที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่หลักมูล การวัดความเพี้ยนของฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดความถี่หลักมูลและเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกทั้งหลายจะแสดงผลความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมและความเพี้ยนของฮาร์มอนิกแต่ละส่วน ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

2.1.2 กระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current)

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในสายในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อยทำให้เกิดผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากซึ่งก็เป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์อย่างมากมายตามมาด้วยเช่นกัน

2.1.3 แรงดันฮาร์มอนิก(Harmonic Voltage)

เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านค่ารีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เช่น รีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายสายส่งหรือรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังและแรงดันให้ดีขึ้นทำให้เกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันอันต่อเนื่องมาจากค่ารีแอคแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงกระแส

ฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะทำให้เกิดตัวสร้างให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \tag{2.1}$$

เมื่อ V_n = แรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับ n

Z_n = ค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสอันดับที่ n

I_n = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายตัวเก็บประจุมิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิกแต่จากการต่อวงจรเข้าในระบบมีความจำเป็นที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนานระหว่างตัวเก็บประจุและรีแอคแตนซ์ของระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก ถ้าเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำเกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุกระแสนี้กับกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันมีค่ามาก

2.1.4 ความหมายของค่าต่างๆ

ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion) THD ตัวประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Factor) HF ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกันคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอสของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

ตามมาตรฐาน IEEE ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ 2.2, 2.3 ตามลำดับ

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V^2_{h(rms)}}}{V_{1(rms)}} \times 100\% \tag{2.2}$$

โดยที่

THD_V = ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก

V_n = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ n

V_1 = แรงดันที่ความถี่มูลฐาน

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{h(rms)}}}{I_{1(rms)}} \times 100\% \qquad (2.3)$$

โดยที่

THD_I = ตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก

I_n = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ n

I_1 = กระแสที่ความถี่มูลฐาน

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายของคำว่า ความเพี้ยนของฮาร์มอนิกคือปริมาณฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดเปรียบเทียบกับอาร์เอ็มเอสของปริมาณทั้งหมด

2.1.5 ลำดับฮาร์มอนิก (Harmonic Order)

คืออัตราส่วนของความถี่ฮาร์มอนิกและความถี่หลักมูล เช่น เมื่อกล่าวถึงลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 เฮิรตซ์จะได้รับความถี่ที่ 3 เป็น 150 เฮิรตซ์

2.1.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ KW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA หรือ KVA)

2.1.7 Displacement Power Factor (DPF)

คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังงานจริงที่ความถี่มูลฐานกับกำลังปรากฏที่ความถี่เดียวกัน หรือ DPF คือค่าโคไซน์ (Cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันที่ความถี่มูลฐานกับกระแสความถี่มูลฐาน

$$DPF = \frac{ActivePower(Watt)}{ApparentPower(VA)} \tag{2.4}$$

2.2ประเภทของฮาร์มอร์นิก [2]

2.2.1 ฮาร์มอนิก(Harmonic)

หมายถึงส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีฮาร์มอนิกปนอยู่มากตั้งแต่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2, 3, 4 เป็นต้น

2.2.2 อินเตอร์ฮาร์มอนิก(Inter Harmonic)

หมายถึงส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลอินเตอร์ฮาร์มอนิกส่วนมากจะพบในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ค เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็กโดยเฉพาะช่วงต้นการหลอม กระแสอาร์คจะยังไม่เสถียรทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน

2.2.3 ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด เอสซีอาร์ เป็นสวิตซ์ตัดต่อกระแสในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์มอนิกคุณลักษณะหาได้จาก

$$n = kp \pm 1 \tag{2.5}$$

$n =$ ลำดับฮาร์มอนิก

$k =$ เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ

$p =$ จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

2.2.4 ฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่สร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่น เครื่องแปลงผันชนิด12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์มอนิกที่มีคุณลักษณะที่มีลำดับ 11, 13, 23, 25, 35, 37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์มอนิกเป็น 5, 7, 17, 19 ปนมาด้วยฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

2.2.5 ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว (Tripple Harmonic)

ได้แก่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 6 ซึ่งจัดให้อยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกเหล่านี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวตรอนทำให้เกิดปัญหาไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวตรอนร้อน ฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic Sources)

ระบบไฟฟ้ากำลังในอุดมคติจะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันที่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ แต่ในความเป็นจริงรูปคลื่นแรงดันมักมีความเพี้ยนซึ่งการที่รูปคลื่นไซน์เบี่ยงเบนไปจากรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ โดยปกติจะอ้างอิงถึงเทอมความเพี้ยนฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยทั่วไปความเพี้ยนนี้มีสาเหตุมากจากอุปกรณ์ประเภทโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งโหลดประเภทนี้มีคุณสมบัติในการทำให้เป็นต้นเหตุให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันและไปปรากฏอยู่ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นมาให้กับระบบไฟฟ้าและเราสามารถแบ่งโหลดเหล่านี้ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.3.1 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Devices)

อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เครื่องแปลงผันที่สามารถใช้ได้หลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ เช่น ตัวเรียงกระแส ระบบขับเคลื่อนปรับความเร็วได้และอินเวอร์เตอร์

2.3.2 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Ferromagnetic Devices)

ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้ ได้แก่ หม้อแปลง เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันเกินพิกัดจะทำให้กระแสแม่เหล็กเพิ่มขึ้นและเกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กหม้อแปลงจึงเกิดฮาร์มอนิกขึ้นมา

2.3.3 อุปกรณ์ประเภทอาร์ค (Arcing Devices)

อุปกรณ์ประเภทนี้ ได้แก่ เตาหลอม จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกเป็นจำนวนมาก เพราะสาเหตุเกิดจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นในการอาร์ค นอกจากนี้หลอดฟูออเรสเซ็นต์ก็มีคุณลักษณะพื้นฐานของการอาร์คเช่นเดียวกันและมีการใช้งานอย่างมากมาย

ปัจจุบันโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีการใช้กันในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมและธุรกิจขนาดใหญ่ซึ่งจะเห็นได้ว่าด้วยคุณสมบัติการทำงานของโหลดประเภทนี้จะทำให้รูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ของแรงดันและกระแสเกิดฮาร์มอนิกไหลกลับเข้าไปในระบบของการไฟฟ้า โดยจะไปมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆจึงเป็นการทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพกำลังลดต่ำลง

2.4 ความเพี้ยนของฮาร์มอนิก(Harmonic Distortion)

ฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่หลักมูล เมื่อแรงดันที่มีความถี่หลักมูลมีแรงดันฮาร์มอนิกผสมเข้าไปจะมีผลทำให้แรงดันที่ความถี่หลักมูลเกิดความเพี้ยนขึ้น

สำหรับรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสที่เป็นคาบและมีความเพี้ยนสามารถแสดงโดยการใช้ทฤษฎีฟูเรียร์ในรูปของสมการเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n cos\ nwt + b_n sinnwt) \tag{2.6}$$

โดยขนาดของสัญญาณหรือสัมประสิทธิ์ของความถี่ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$a_0 = \frac{1}{2p}\int_0^{2p} f(t)d(wt) \tag{2.7}$$

$$a_n = \frac{1}{p}\int_0^{p} f(t)\cos nwtd(wt) \tag{2.8}$$

$$b_n = \frac{1}{p}\int_0^{p} f(t)\sin nwtd(wt) \tag{2.9}$$

2.5 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก(Harmonic Distortion Evaluation) [1]

การวัดจำนวนความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันไปแต่มี 2 หลักเกณฑ์ที่ใช้ประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE 519 ดังต่อไปนี้

2.5.1 ขีดจำกัดกระแสเพี้ยน (Current Distortion Limits)

เป็นการใช้ขีดจำกัดความเพี้ยนของฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้ โดยมีดัชนีที่กำหนดขีดจำกัดความเพี้ยนรวม หมายถึง ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ในช่วงเวลา 15 วินาที หรือ 30 วินาที) โดยมีขีดจำกัดความเพี้ยนของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 และขีดจำกัดในตารางเหล่านี้ควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่แรงดัน 120 ถึง 69000 โวลต์

Isc / I_L	กระแสฮาร์มอนิกสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_L ในแต่ละอันดับ					
	<11	11-16	17-22	23-34	>34	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.4	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่แรงดัน69001 ถึง 161000โวลต์

Isc / I_L	กระแสฮาร์มอนิกสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นของ I_L ในแต่ละอันดับ					
	<11	11-16	17-22	23-34	>34	THD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	5.5	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

ตารางที่2.3 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่แรงดัน>161000V

Isc / I_L	กระแสฮาร์มอนิกสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นของ I_L ในแต่ละอันดับ					
	<11	11-16	17-22	23-34	>34	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
³ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Isc คือ กระแสลัดวงจรที่จุดเชื่อมของระบบไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า

I_L คือ ความต้องการของกระแสโหลดสูงสุดระหว่างระบบของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า

2.5.2 ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน (Voltage Distortion Limits)

เป็นการตรวจกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่งกลับเข้าระบบ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเหล่านี้จะไม่เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันที่มีความเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดตามที่ระบุในตารางที่ 2.3 ซึ่งค่าขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันตามตารางที่ 3.2 นี้ จะต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องและในทำนองเดียวกันควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้าการทำงานที่มีคาบเวลาน้อยกว่านี้ขีดจำกันสามารถเพิ่มถึง 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน

ระดับแรงดันของบัสที่ PCC (Point of Common Coupling)	ความเพี้ยนของแรงดันในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิก	ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกรวม
69KV และต่ำกว่า	3.0	5.0
69.001KV ถึง 161KV	1.5	2.5
มากกว่า 161KV	1.0	1.5

นอกจากนี้ดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดของแรงดันเพี้ยนนั้นก็ คือ ค่าความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกรวมค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่ระบุตามความถี่หลักมูล

2.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิก [4]

ปัญหาอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกอาจพิจารณาได้เป็นสองประเด็น นั่นคือ ประเด็นแรกคือ มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบไม่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ สำหรับปัญหาฮาร์มอนิกประเด็นที่สองเป็นปัญหาใหญ่ที่จะกล่างถึงวิธีแก้ไขในภายหลัง ส่วนประเด็นแรก แม้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายมากนัก แต่ก็ควรพิจารณาไว้ในรายละเอียด เพื่อให้เข้าใจในปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้เพราะอุปกรณ์บ้างอย่างในระบบอาจจะเสียหาย หรือ ทำงานผิดพลาดเนื่องจากฮาร์มอนิกได้ ถ้าไม่เข้าใจความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิกว่าไปสร้างปัญหาได้อย่างไรก็อาจทำให้แก้ไขไม่ตรงกับเป้าหมาย สิ้นเปลืองทุนในการเปลี่ยนแปลงหรือซื้ออุปกรณ์โดยไม่จำเป็น

ในระบบที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ ที่ฮาร์มอนิกความถี่สูง ค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์จะมีค่าลดลง ทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าตัวคาปาซิเตอร์มากขึ้น ซึ่งทำให้ตัวคาปาซิเตอร์ร้อนจนระเบิดได้นอกจากนี้ แต่ละความถี่อาจทำให้ระบบเกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและเรโซแนนซ์แบบขนาน ฮาร์มอนิกจะส่งผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบดังต่อไปนี้

2.6.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการเกิดเรโซแนนซ์

- **เรโซแนนซ์ (Resonance)** คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด หรือน้อยที่สุด (วงจรอนุกรมสัญญาณจะผ่านได้สูงสุด วงจรขนานจะผ่านได้ต่ำสุด) ปรากฏการณ์นี้สำคัญมากในการสื่อสาร ในวงจรสวิตซ์สายส่ง ระบบควบคุม เป็นต้น คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินและส่งผลให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ดังนี้

- **เรโซแนนซ์ขนาน** คือ การเกิดปรากฏารณ์ของสัญญาณไฟสลับวงจรไฟฟ้าได้น้อยที่สุด ผลของเรโซแนนซ์ขนาน จะทำให้เกิดค่าของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกที่ความถี่ เรโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเป็นแหล่งจ่ายกระแสไหล

ในแต่ละสาขาวงจรเรโซแนนซ์มีค่าสูง แสดงการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่จุด Point of Common Coupling(PCC) ซึ่งสามารถแยกประเภทของการเกิดเรโซแนนซ์ได้ดังนี้

ก. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดัคเตอร์ของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์กับคาปาซิเตอร์บัส บาร์เดียวกันซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ขนานหาได้ จากสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11)

ข. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดัคเตอร์ของระบบกับตัวกรองฮาร์มอนิก

ค. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดัคเตอร์ของระบบกับคาปาซิเตอร์ของระบบ

ง. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดัคเตอร์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์

$$f_p = f\frac{S_S}{S_C} \tag{2.10}$$

เมื่อ

f = ความถี่หลักมูล

f_p = ความถี่เรโซแนนซ์ขนาน

S_S = พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย

S_C = พิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์

$$f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S+L_n)C_n}} \tag{2.11}$$

เมื่อ L_s = อินดัคเตอร์ของระบบ (H)

L_n = อินดัคเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดันที่n (H)

c_n = คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดันที่n (F)

ในกรณีที่จะตรวจสอบว่าเกิดเรโซแนนซ์ขนานหรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกในโหลดที่ต่ออยู่ในระบบแต่ละจุดและแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสบาร์แล้วทำการวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้น

• **เรโซแนนซ์อนุกรม** คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด เมื่อความถี่สูงมากๆ อาจทำให้โหลดถูกตัดออกจากระบบได้เช่นเดียวกับเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ ซึ่งเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์หาได้จากสมการที่ 2.12

$$f_s = f \cdot \sqrt{\left(\frac{s_t}{s_c + z_t}\right) - (s_1^2 - s_c^2)} \qquad (2.12)$$

เมื่อ

f_s= ความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Hz)
s_t= พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า (VA)
z_t= เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
s_1 = พิกัดของโหลดความต้านทาน (VA)
s_c= พิกัดของคาปาซิเตอร์ (VA)

ผลที่เกิดขึ้นจากเรโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสจะมีค่าสูง แรงดันฮาร์มอนิกส์จะมีค่าน้อยที่คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกเนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำดังนั้นเรโซแนนซ์อนุกรมต้องคำนึงถึงกระแสเป็นส่วนมาก โดยมีผลดีกว่าแบบเรโซแนนซ์ขนาน ในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า ในการพิจารณาเรโซแนนซ์อนุกรม

2.6.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

• **คาปาซิเตอร์ (Capacitor)** การใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์และแรงดันให้ดีขึ้นนั้นจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ในความเป็นจริงคาปาซิเตอร์ไม่ได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิกแต่การต่อคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์เข้าไปในระบบจะมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ของระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ถ้าเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกันกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้มีกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์และกระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเพี้ยนของแรงดันมีค่ามาก ดังนั้นวิธีการเลือกขนาด

คาปาซิเตอร์ควรหลีกเลี่ยงขนาดที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์เดียวกัน หรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิก

• **เซอร์กิตเบรกเกอร์** ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแสของเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อฮาร์มอนิกมีความถี่สูงมากกว่าความถี่หลักมูลมีผลทำให้เกิดความร้อน เนื่องจากการสูญเสียในขดลวดโซลีนอยด์รวมกับความร้อนที่เกิดขึ้นรอบๆตัว ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้อุปกรณ์ตัดวงจรด้วยความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและจะทำให้จุดตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์มีค่าลดลง

• **หลอดไฟฟ้าแสงสว่าง** เมื่อใช้งานหลอดไฟแบบเผาไส้ด้วยแรงดันที่มีความเพี้ยนจะทำให้อายุการใช้งานของหลอดไฟสั้นลง เพราะหลอดไฟจะมีความไวต่อระดับแรงดันที่ใช้งาน ถ้าแรงดันประสิทธิผลขณะใช้งานมีค่าสูงกว่าพิกัดเนื่องจากความเพี้ยนของฮาร์มอนิกจะทำให้มีผลต่ออุณหภูมิของหลอดไส้และจะไปลดอายุการใช้งานของหลอดไฟ สำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่องของหลอดไฟที่ 105 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดแรงดันประสิทธิผลจะมีผลให้อายุการใช้งานของหลอดไฟลดลง 47 เปอร์เซ็นต์

• **รีเลย์ป้องกัน** รูปคลื่นที่มีความเพี้ยนจะมีผลต่อสมรรถนะของรีเลย์ป้องกัน โดยอาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์ทำงานไม่ถูกต้องเมื่อต้องการให้ทำ หม้อแปลงแรงดันและโดยเฉพาะหม้อแปลงกระแสจะเป็นตัวส่งสัญญาณความเพี้ยนของฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบรีเลย์ โดยปกติหม้อแปลงกระแสจะมีการทำงานที่ระดับของกระแสโหลดแต่เมื่อเกิดกระแสฟอลท์สูงๆจะทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงกระแสอิ่มตัวซึ่งทำให้เกิดสัญญาณความเพี้ยนเข้าไปในระบบรีเลย์ ดังนั้นความเพี้ยนนี้อาจเป็นสาเหตุให้รีเลย์สั่งตัดวงจรไม่ถูกต้องในกรณีที่ฟอลท์เกิดขึ้นหรืออาจสร้างความเดือดร้อนให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า โดยการสั่งตัดวงจรขณะที่ไม่ได้เกิดฟอลท์ขึ้นในระบบไฟฟ้า

2.6. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่มีต่อหม้อแปลง คือ มีการเพิ่มความร้อนในรูปแบบของกำลังสูญเสียมากขึ้น ซึ่งกำลังสูญเสียเหล่านี้ได้แก่

- กำลังสูญเสียของขดลวด กำลังสูญเสียส่วนนี้จะเกิดความร้อนขึ้นในตัวนำและปรากฏการณ์ทางผิว

- กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด กำลังสูญเสียในส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแสโหลดและกำลังสองของความถี่

- กำลังสูญเสียปลีกย่อย เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กไปคล้องผ่านส่วนประกอบต่างๆที่เป็นโลหะของหม้อแปลงซึ่งกำลังสูญเสียเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามคาวมถี่เมื่อหม้อแปลงมีความร้อนสูงขึ้นกว่าค่าที่กำหนดจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง

2.6.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อ เครื่องจักรชนิดหมุน(Rotating Machine)

เมื่อจ่ายแรงดันไม่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะเป็นเหตุให้เกิดความร้อนสูงมาก การสั่นของทอร์กหรือคลื่นรบกวนขึ้นและกำลังสูญเสียในเครื่องจักรกลจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของความถี่แรงดันที่จ่ายความเพี้ยนของแรงดันทำให้โรเตอร์เกิดความร้อนมากเกิน ซึ่งปัญหาหลักของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์มีอุณหภูมิขณะทำงานสูงขึ้นจะเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลง

2.6.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ความเพี้ยนของฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายอย่าง เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจสอบแรงดันผ่านศูนย์ของความถี่หลักมูลเมื่อเกิดฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่หลักมูล จึงทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์นี้ทำงานผิดพลาด เช่น นาฬิกาดิจิตอลจะมีเวลาเร็วขึ้น

นอกจากนี้อุปกรณ์โซลิทสเตทที่ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ที่ตำแหน่งแรงดันผ่านศูนย์ เพื่อลดการรบกวนของสนามแม่เหล็กและกระแสพุ่งเข้า การที่มีจุดผ่านศูนย์มากขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิกจะทำให้เวลาของการสวิตซ์เปลี่ยนไป ดังนั้นอุปกรณ์ที่ต่อกับสวิตซ์นี้จะทำงานผิดพลาดไปด้วย แหล่งจ่ายกำลังอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ยอดคลื่นของแรงดันในการอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์ที่เป็นวงจรกรองให้เต็ม แต่ความถี่ของฮาร์มอนิกและความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างแรงดันหลักมูลและแรงดันฮาร์มอนิกที่เพี้ยนสามรถทำให้ยอดคลื่นสูงขึ้นหรือแบนราบ ด้วยเหตุนี้แหล่งจ่ายกำลังจึงมีแรงดันขาออกไม่คงที่หรือต่ำกว่าระดับแรงดันที่ต้องการ ดังนั้นอุปกรณ์อื่นๆที่ต้องรับไฟจากแหล่งจ่ายกำลังนี้ก็จะมีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง

เศษส่วนของฮาร์มอนิกและฮาร์มอนิกย่อย (Fraction and Sub-Harmonic) สามารถมีผลกระทบต่อวีดีโอหรือโทรทัศน์ ซึ่งเศษส่วนของฮาร์มอนิกคือฮาร์มอนิกที่มีจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลไม่เป็นจำนวนเต็มและฮาร์มอนิกย่อยคือ ฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่หลักมูล

2.6.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อการรบกวนโทรศัพท์(Telephone Interference)

เมื่อติดตั้งสายโทรศัพท์บนเสาใกล้กับสายไฟฟ้าจะมีโอกาสที่สัญญาณรบกวนจากสายไฟฟ้าเข้าไปรบกวนระบบสื่อสารทางโทรศัพท์ได้และถ้ามีฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วยซึ่งความถี่ของฮาร์มอนิกสามารถที่จะสร้างปัญหาได้มากกว่าความถี่หลักมูล เมื่อผู้ใช้โทรศัพท์มีความไวต่อการได้ยินและโทรศัพท์ตอบสนองได้ใกล้ในระยะ 1 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับการรบกวนสามารถวัดได้หลายวิธีแต่งต่างกัน แต่มีวิธีการหนึ่ง คือ TIF (Telephone Influence Factor) เป็นแฟกเตอร์ที่รวมเอาความถี่ ขนาดและน้ำหนักของความถี่ซึ่งในทางปฏิบัติการวัดการรบกวนโทรศัพท์จะใช้ผลคูณ ITซึ่งผลคูณระหว่างกระแสประสิทธิผลเป็นแอมแปร์และ TIFถ้าผลคูณ ITมีค่าน้อยกว่า 10000 จะไม่มีผลกระทบต่อการรบกวนแต่ถ้าผลคูณ IT มีค่าเกิน 25500 จะสร้างปัญหาในการรบกวนการสื่อสารทางโทรศัพท์

2.7 มาตราฐานทางด้านฮาร์มอนิก

เนื่องจากฮาร์มอนิกได้ก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในระบบไฟฟ้าหลายๆด้านด้วยกันดังนั้นหน่วยงานที่ร่างมาตรฐานต่างๆจึงได้มีการวางแผนป้องกันและประกาศใช้มาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิก เพื่อควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและบางประเทศก็ได้ทำการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานขึ้นใช้ภายในประเทศเอง

2.7.1 มาตราด้านฮาร์มอนิกของประเทศไทย

คณะกรรมการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยผู้แทนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) ได้พิจารณาเห็นว่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในการใช้ไฟฟ้า สมควรให้มีการวางข้อกำหนดกฎเกณฑ์วิธีตรวจสอบและขีดจำกัดของฮาร์มอนิก ไฟกระพริบและแรงดันกระเพื่อม สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทรวมทั้งการบังคับใช้ข้อกำหนดกับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีระบบไฟฟ้าซึ่งก่อให้เกิดฮาร์มอนิก ไฟกระพริบและแรงดันกระเพื่อม เพื่อวางข้อกำหนดกฎเกณฑ์ดังกล่าว คณะกรรมการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจึงได้มีมติในการประชุมครั้งที่ 2/2538 วันที่ 1 พฤศจิกายน 2538 ให้ตั้งคณะทำงานกำหนดกฎเกณฑ์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกและแรงดันกระเพื่อมซึ่งภายหลังได้เปลี่ยนเป็นคณะทำงานศึกษาและกำหนดค่าที่เหมาะสมของคุณภาพไฟฟ้า คณะทำงานและคณะผู้เกี่ยวข้องได้ร่วมมือกันจัดทำข้อกำหนดกฎเกณฑ์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกและแรงดันกระเพื่อม สำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมและบ้านอยู่อาศัยเสร็จตามที่ได้รับมอบหมายโดย

อ้างอิงจากมาตรฐานสากล เช่น มาตรฐาน IEC มาตรฐานของออสเตรเลีย (AS) และมาตรฐานของสหราชอาณาจักร (UK) โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ในประเทศไทยมี 4 ฉบับ ดังนี้

1. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
2. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
3. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน
4. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน

โดยข้อกำหนดฉบับที่ 1 และ 2 มีจุดประสงค์เพื่อให้มีผลบังคับกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ส่วนข้อกำหนดฉบับที่ 3 และ 4 มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอให้สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้นำไปพิจารณาบังคับผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านข้อกำหนดกฎเกณฑ์นี้ได้ผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าทั้ง 3 การไฟฟ้าแล้ว

ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีขอบเขตดังต่อไปนี้

1.เพื่อเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับขีดจำกัดและวิธีการตรวจสอบฮาร์มอนิกให้ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

2. เพื่อกำหนดมาตรฐานให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแก้ไขและปรับปรุงวงจรที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

3. ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้นในอุตสาหกรรมในระบบไฟฟ้าทั้งอุปกรณ์ชนิดเฟสเดียวและสามเฟส

2.7.2 มาตราฐานด้านฮาร์มอนิกของประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิกขึ้นมาใช้งานครั้งแรกเมื่อปี 1981 โดยใช้ชื่อว่า ANSI/IEEE Std.519-1981 มาตรฐานฉบับนี้ได้กำหนดค่าจำกัดในเรื่องเกี่ยวกับ

- Line Voltage Notch
- Voltage Distortion

- Telephone Interference
- Flicker

ในเรื่อง Distortion นั้นกล่าวถึงเฉพาะ Voltage Distortion เท่านั้นและไม่ได้ระบุค่าจำกัดทางด้านกระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายป้อนเข้าสู่ระบบแต่จะอาศัย Voltage Distortion เป็นตัวควบคุมแทน

2.8 การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก

2.8.1 การแก้ปัญหาในกรณีที่สายนิวตรอนรับภาระโหลดเกิน

ถ้าหากมีกระในสายนิวตรอนเกินนั้นวิธีแก้ไขสามารถกระทำได้โดยการปรับโหลดให้สมดุลกันในแต่ละเฟสและ Triple ฮาร์มอนิกสามารถลดลงได้โดยการใส่ฟิลเตอร์เข้าที่โหลดแต่ถ้าหากไม่สามารถทำในสองกรณีที่กล่าวมาข้างต้นได้ ก็อาจแก้ไขได้โดยการลากสายนิวตรอนเพิ่มเข้าไปและในอุดมคติแล้วเราใช้หนึ่งสายนิวตรอนกับหนึ่งสายเฟสหรือใช้สายนิวตรอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในระบบสามเฟส

2.8.2 การDeratingหม้อแปลง

วิธีหนึ่งที่จะป้องกันหม้อแปลงจากฮาร์มอนิกคือ การจำกัดโหลดที่นำมาต่อกับมัน ซึ่งเรียกว่า Deratingหม้อแปลง ถ้าหากหม้อแปลงนั้นจ่ายโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ วิธีการนี้เราจะต้องทำการวัดค่ากระแสทุกเฟสของหม้อแปลงทั้งค่า True-rmsและค่า Instantaneous Peak

2.8.3 การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งและขนาดของคาปาซิเตอร์

การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งหรือเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดเรโซแนนซ์ เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์จะขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำและความจุตามสมการ

$$f = \frac{1}{2n\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{KVA_{SC}}{KVA_C}} \qquad (2.13)$$

การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งคาปาซิเตอร์สามารถหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดเรโซแนนซ์ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกแต่ในทางปฏิบัติรูปแบบของระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าอาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการสวิตซ์ของวงจรในระบบของการไฟฟ้าเองหรือเพิ่มวงจรในอนาคตทำให้อิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปและอาจเกิดเรโซแนนซ์ในภายหลังได้อีก นอกจากนี้การเปลี่ยนตำแหน่งคาปาซิเตอร์อาจไปสร้างปัญหาทางอื่นได้ เช่น นำคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ย้ายไปติดตั้งใกล้โหลดขนาดเล็กอาจมีปัญหาทางด้านศักดาไฟฟ้าเกินขนาดได้ ซึ่งจะแก้ปัญหาฮาร์มอนิกได้แต่จะไปสร้างปัญหาอย่างอื่นไว้อีกการเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์ก็ช่วยแก้ปัญหาฮาร์มอนิกแต่ต้องตระหนักเสมอว่าถ้าเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์ไปมากเกินไปอาจทำให้การแก้ปัญหาเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงกว่า 0.85 แต่เมื่อมีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกและเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์จนกระทั่งเพาเวอร์เฟคเตอร์จำเป็นต้องต่ำกว่า 0.85 ก็ถือว่าการแก้ปัญหาดังกล่าวไม่ดีนัก

2.8.4 การใส่ฟิลเตอร์

การใส่ฟิลเตอร์เข้าไปในระบบเพื่อกำจัดหรือลดขนาดฮาร์มอนิกเป็นวิธที่ให้ประสิทธิภาพสูง การกำจัดฮาร์มอนิกให้มีขนาดต่ำมากๆอาจจะต้องใช้ฟิลเตอร์หลายชุดทำให้ต้องลงทุนค่าใช้จ่ายสูงมาก การใส่ฟิลเตอร์เพื่อแก้ปัญหาฮาร์มอนิกต้องพิจารณาวัตถุประสงค์หรือขนาดของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดให้มีค่าลดลงมากเพียงใด จึงทราบว่าควรใช้จำนวนฟิลเตอร์มากน้อยเพียงใดและก่อนที่จะเข้าไปในรายละเอียดการเลือกใช้ขนาดฟิลเตอร์ให้พิจารณาถึงชนิดของฟิลเตอร์ที่มีเสียก่อน

2.8.5 การใส่รีแอคเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์

การใช้คาปาซิเตอร์เพื่อเพิ่มเพาเวอร์เฟคเตอร์ให้ระบบแต่มีปัญหาเรื่องเรโซแนนซ์ที่เกิดไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิก นอกจากสามารถแก้ไขด้วยวิธีอื่นแล้วอีกวิธีหนึ่งที่ไม่ต้องใส่ฟิลเตอร์เพิ่มแต่ใส่รีแอคเตอร์อนุกรมไปกับคาปาซิเตอร์เพื่อทำหน้าที่ฟิลเตอร์ด้วยก็นิยมใช้กันมากและส่วนใหญ่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจด้วย

โดยหลักการของการใส่รีแอคเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ก็เหมือนกับการใส่ฟิลเตอร์ คือ ใส่รีแอคเตอร์เพื่อจูนให้มีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 สำหรับระบบที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกตั้งแต่ที่ 5 ขึ้นไป เช่น เรคติไฟเออร์ เป็นต้น แต่กรณีระบบที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกแบบเฟสเดียวหรือสามเฟสแบบไม่สมมาตร (Unbalance Tree Phase System) เช่น อุตสาหกรรมแก้ว เป็นต้น การจูนให้ความถี่เรโซแนนซ์ไปที่ 2.5 จะปลอดภัยที่สุดเพื่อจำกัดฮาร์มอนิกที่ 3 ที่เกิดขึ้นในระบบนี้ออก

2.9 วิธีการป้องกันฮาร์มอนิก[5]

มี 2 แบบด้วยกันคือ

- การป้องกันฮาร์มอนิกที่มีผลต่อคาปาซิเตอร์ ที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้คาปาซิเตอร์เสี่ยงต่อความเสียหายจากการระเบิดได้
- ป้องกันระบบไฟฟ้าไม่ให้ฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานน้อยลง เนื่องจากฮาร์มอนิกคร่อมอยู่ กระแสสูงสุดทำให้สายไฟ และหม้อแปลงไหม้ได้ทั้งๆที่กระแสหลักมูลไม่มากนัก

2.10 ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับการควบคุมฮาร์มอนิก

- กระแสฮาร์มอนิกต่างๆจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกให้โดยบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์
- แรงดันอิมพีแดนซ์ (Impedance Voltage) ของหม้อแปลง
- วัดค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ระดับต่างๆ โดยใช้ Harmonic Analyzer
- ค่า Harmonic Generation Load ที่อาจจะเพิ่มเข้าไปในระบบในอนาคตคาปาซิเตอร์ทีใช้ในวงจรฟิลเตอร์
- ต้องมีการลดพิกัด (Derate) สำหรับ คาปาซิเตอร์ที่ใช้เนื่องจากฮาร์มอนิก
- ในการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ ต้องคำนวณค่าเรโซแนนซ์ขนานใหม่ และต้องให้แน่ใจว่าไม่ไปตรงที่ระดับฮาร์มอนิกที่มีในระบบ
- แรงดันที่คาปาซิเตอร์จะสูงกว่าปกติ เนื่องจากมีรีแอคเตอร์ ต่ออยู่ เช่น ถ้าปรับตั้งที่ระดับฮาร์มอนิก4.5 (225 Hz) แรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5 % ดังนั้นสำหรับระบบไฟฟ้า 415 V คาปาซิเตอร์ควรออกแบบสำหรับทำงานได้ที่ 415/0.95 = 440 V.

2.11 หลักการลดและตัวกรองฮาร์มอนิก

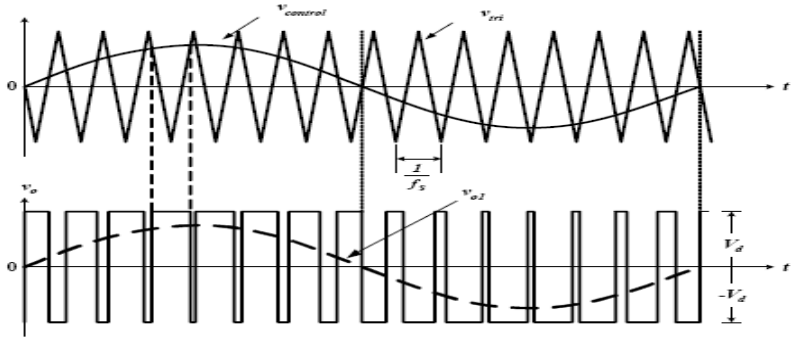
เนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นภายในระบบส่งผลกระทบทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการลดปริมาณฮาร์มอนิกภายในระบบนั้นๆซึ่งหลักการลดฮาร์มอนิกมีหลากหลายวิธีโดยจะกล่าวถึงหลักการลดดังต่อไปนี้

2.11.1 การควบคุมอินเวอร์เตอร์

การควบคุมแบบ SPWM โดยทั่วไปมีตัวแปรในการควบคุมสำคัญอยู่สองตัวแปรได้แก่ ดัชนีการมอดูเลตด้านแอมปริจูด และดัชนีการมอดูเลตด้านความถี่ หาได้จากสมการ (2.14) และสมการ (2.12) ตามลำดับ

$$m_a = \frac{V_{p,control}}{V_{p,tri}} \tag{2.14}$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_o} \tag{2.15}$$



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของดัชนีการมอดูเลตด้านแอมปริจูด ความถี่ในการสวิตซ์และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิค SPWM แบบสองขั้ว

ดังภาพที่ 2.1เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของการมอดูเลตของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ตัดสัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้แรงดันด้านออกตามต้องการ โดยมีค่าแรงดันด้านออกดังสมการ 2.16

$$V_{o1} = 0.707 m_a V_a \tag{2.16}$$

เมื่อ

V_{tri} = สัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยม

$V_{p,tri}$ = ค่ายอดของสัญญาณพาหะรูปคลื่นสามเหลี่ยม

f_s = ความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม

V_{ctrl} = สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์

V_{ptri} = ค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์

f_o = ความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ไซน์

m_a = ดัชนีการมอดูเลตด้านแอมปริจูด

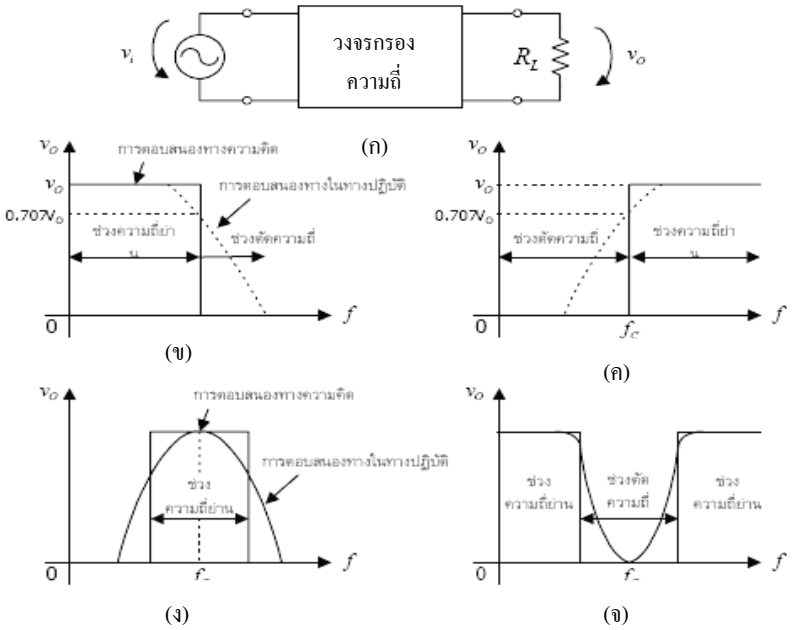
m_s = ดัชนีการมอดูเลตด้านความถี่

V_{o1} = แรงดันด้านออกที่ความถี่มูลฐาน

V_d = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเข้า

2.11.2 วงจรกรองความถี่ (Filters)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่คือ แบบพาสซีฟ (Passive Filters) และแบบแอกทีฟ (Active Filters) วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกก็ได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรกรองความถี่ ถ้าเป็นแบบพาสซีฟจะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำส่วนในวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟจะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถทำการขยายสัญญาณวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 วงจรกรองความถี่และการทำงานของวงจรกรองความถี่

ก วงจรทดสอบวงจรกรองความถี่

ข การทำงานของวงจร LPF

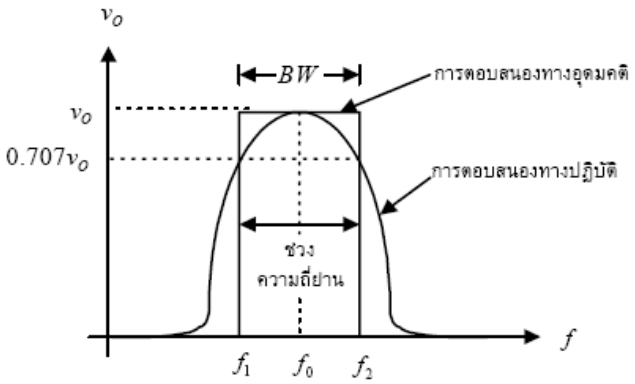
ค การทำงานของวงจร HPF

ง การทำงานของวงจร BPF

จ การทำงานของวงจร BEF

2.11.3 วงจรกรองแถบความถี่

วงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, BPF) หรือ BPF เป็นวงจรที่กรองเอาเฉพาะความถี่ช่วงที่ต้องการออกมาเท่านั้น ดังนั้นการตอบสนองความถี่ของวงจรBPF นี้จะเป็นดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงการตอบสนองวงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, BPF)

2.12 แนวคิดทฎษฎี ดีจูน ฟิลเตอร์ และ จูนฟิลเตอร์

2.12.1 ดีจูนฟิลเตอร์ (Detune Filter) คือ การนำรีแอกเตอร์มาต่ออนุกรมกับปาคาซิเตอร์ การออกแบบจะให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของฟิลเตอร์มีค่าลงลงค่า หนึ่ง โดยการปรับค่ารีแอกแตนซ์ให้เกิด เรโซแนนซ์อนุกรมกับค่าคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ใดความถี่ หนึ่ง โดยจะให้ความถี่ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีอยู่ในระบบ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์เรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้น และป้องกันไม่ให้ปาคาซิเตอร์ได้รับความเสียหายเนื่องจากปัญหาฮาร์มอนิก ดังกล่าวดังเช่น การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ลำดับที่ 5 โดยทั่วไปจะใช้ฟิลเตอร์ที่มีค่ารีแอกแตนซ์ 6-7% ของค่าปาคาซิแตนซ์ คือ $X_L = 0.06X_C$ที่ความถี่จูน204 Hzซึ่งจากคุณสมบัติของดีจูนฟิลเตอร์ความถี่ที่จูนจะไม่ให้ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ ทำให้ฟิลเตอร์ชนิดนี้ไม่สามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ผลมากนักกล่าวคือจะลดกระแสฮาร์มอนิกได้เพียง 10-30% เท่านั้นในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากง่ายต่อออกแบบและมีราคาถูกกว่าฟิลเตอร์ชนิดอื่นๆ

2.12.2 จูนฟิลเตอร์ (Tune Filter) คือ การนำรีแอกเตอร์มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์มาทำเป็นฟิลเตอร์เช่นเดียวกับดีจูนฟิลเตอร์ แต่การออกแบบจะให้ค่ารีแอกแตนซ์กับคาปาซิแตนซ์เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกัน ที่ความถี่ใกล้กับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดออกไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวฟิลเตอร์ชนิดนี้มีค่า น้อยที่สุด คุณสมบัติของฟิตเตอร์ชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งโดยทั่วไปสามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ถึง70-90% การจูนนิยมจูนต่ำกว่า 3-10% ของความถี่ของอาร์มินกที่ต้องการกำจัดออกไป เพื่อเป็นการป้องกันความถี่จูนที่อาจมีการเลื่อนออกไป เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิลเตอร์หรือค่าพารามิเตอร์ของระบบอาจเปลี่ยนแปลงไป และป้องกันไม่ให้ตัวคาปาซิเตอร์มีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านมากเกินไป

เปรียบเทียบวงจรกรองแบบจูนและดีจูนดังนี้

วงจรกรองแบบจูน

- จูนไปหาฮาร์มอนิกในระบบเพื่อกรองออก
- กรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบได้เกือบทั้งหมด
- ต้องการการวิเคราะห์และการออกแบบที่ซับซ้อน

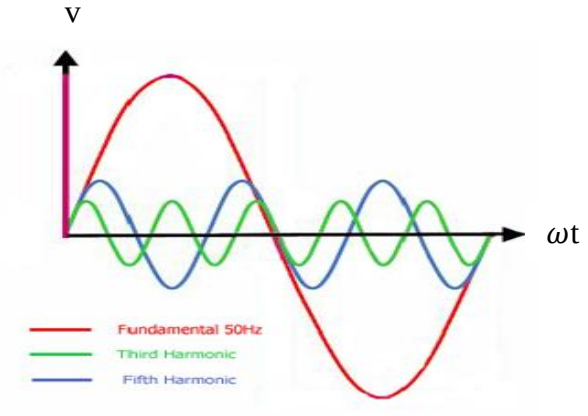
- ไม่มีความยืดหยุ่นหากฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนแปลง
- ถ้าระบบมีโหลดเพิ่มจะต้องทำการออกแบบใหม่
- ราคาสูงเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ขนานใหญ่และแม่นยำ

วงจรกรองแบบดีจูน

- จูนหนีฮาร์มอนิกทุกค่าในระบบเพื่อป้องกันเรโซแนนซ์
- กรองกระแสฮาร์มอนิกได้บางส่วน
- วงจรมาตรฐานสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าทั่วๆไป
- มีผลกระทบไม่มากนักหากฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลง
- ถ้าโหลดในระบบเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มวงจรกรองได้โดยไม่ต้องรื้อของเก่าออก
- ราคาไม่สูงเพราะไม่ต้องกรองฮาร์มอนิกโดยตรง

2.12.3 ความหมายและประโยชน์ดีจูนฟิลเตอร์

เมื่อกล่าวถึงระบบไฟฟ้าในอาคารและโรงงาน จะมีการพูดถึง capacitor bank (คาปาซิเตอร์หลายตัวประกอบกัน) ที่ทำหน้าที่เพิ่มค่าตัวประกอบกำลังหรือเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) แต่ในปัจจุบัน มีการพูดถึงดีจูนฟิลเตอร์แทนที่ capacitor bank กันมากขึ้น เหตุผลคือ เราได้นำเทคโนโลยีมากมายมาใช้ในชีวิตประจำวัน หรือการทำงาน หรือการผลิตมากขึ้นซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวส่วนใหญ่ จะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ จะสร้างฮาร์มอนิก (Harmonic) ขึ้นมาในระบบไฟฟ้าส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ตัวอื่นๆ ดังที่จะได้กล่าวต่อไป



ภาพที่ 2.4 แสดงฮาร์มอนิกอันดับ 3rd 5th และ 7th

ฮาร์มอนิกคือส่วนประกอบของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่เราใช้งานกันอยู่เพียงแต่ว่าเราไม่มีการพูดถึงกันมากนักฮาร์มอนิคจะถูกพูดถึงในลักษณะเป็นจำนวนเท่าของความถี่ที่ใช้งานอยู่ เช่น ในประเทศไทย ใช้ระบบไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์ (Hz) หรือ Fundamental ซึ่งเราจะเรียกไฟฟ้านี้ว่า ฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 ดังนั้น

- ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 ก็คือไฟฟ้า 150 เฮิรตซ์ (3 x 50 Hz)
- ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 คือไฟฟ้า 250 เฮิรตซ์ (5 x50 Hz)
- ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 คือไฟฟ้า 350 เฮิรตซ์ (7 x50 Hz)

ไปเรื่อยๆ ไม่รู้จบ

ระบบไฟฟ้าทั่วโลกจะมีฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ปะปนกันแทบจะทุกอันดับ ต่างกันที่ว่าจะมีอยู่มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับว่าส่วนใหญ่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ชนิดใด บางคนอาจจะสงสัยว่าแล้วอุปกรณ์อะไรที่สร้างฮาร์มอนิกขึ้น อธิบายแบบง่ายๆ ก็คืออุปกรณ์ทุกอย่างที่มีตัวแปลงไฟจากกระแสสลับ (AC) เป็นกระแสตรง (DC) หรือแปรจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ อุปกรณ์ดังกล่าวจะเป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกบางที่สามารถดูได้ที่ฉลากหรือป้ายบนตัวอุปกรณ์ว่ามีค่า % THD เท่าไหร่ ยิ่งมีค่ามากก็ยิ่งมีฮาร์มอนิกสูงนอกจากนี้ อุปกรณ์ที่ใช้หลักการ ของกระแสลัดวงจรมาใช้งาน เช่นเครื่องเชื่อม เครื่องหลอม และอื่นๆ ก็ถือว่าเป็นตัวสร้างฮาร์มอนิคด้วยเช่นกัน

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบัน เราไม่สามารถหลีกเลี่ยงฮาร์มอนิกได้เลยเพราะอุปกรณ์หลายๆ อย่างใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ในการทำงานเกือบทั้งนั้นแล้วฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น จะเกี่ยวข้องและส่งผลกระทบอย่างไรกับ capacitor bank ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.12.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิค (Harmonic) ต่อ capacitor bank

นอกจากฮาร์มอนิกอันดับที่ 1 หรือไฟฟ้าที่ 50Hz ที่เราใช้งานกันแล้วฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ ไม่ได้นำไปใช้งานแต่จะก่อให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงที่สุดคือ capacitor bank เนื่องจาก capacitor จะมีความต้านทาน (Xc) หรือ impedance ลดลง เมื่อความถี่ของไฟฟ้า (f) สูงขึ้นหรือจากสูตรทางไฟฟ้า $Xc = 1 / 2fC$ ซึ่งจะเห็นว่า ถ้าความถี่ของไฟฟ้า (f) สูงขึ้นค่า Xcจะลดลง โดยหลักการทางไฟฟ้าแล้ว กระแสไฟฟ้าจะไหลไปหาที่ที่มีความต้านทานต่ำดังนั้น ฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ เช่น ฮาร์มอนิกอันดับที่5 หรือ 250Hz และอันดับที่ 7 หรือ 350Hz ที่มีความถี่สูง จะทำให้ค่าความต้านทานของ capacitor ต่ำลงมากทำให้ฮาร์มอนิกดังกล่าวส่วนใหญ่ จะไหลเข้าสู่ตัว capacitor ทำให้ capacitor เสียหายหรือเสื่อมสภาพ

เร็ว เพราะความร้อนภายในสูงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเกิน (overcurrent) หรือ แรงดันไฟฟ้าเกิน (overvoltage) จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ในปัจจุบัน นิยมนำชุดดีจูนฟิลเตอร์ (detuned filter) มาใช้งานแทน capacitor bank ซึ่งชุดดังกล่าวจะประกอบไปด้วย capacitor unit และ reactor หลายตัว ประกอบกันซึ่ง reactor จะทำหน้าที่กันไม่ให้กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกความถี่สูง ไหลเข้าตัว capacitor โดยจะใช้หลักการทางไฟฟ้า คือ เพิ่มความต้านทานให้สูงขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากความต้านทานของขดลวดหรือ reactor นี้จะสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น หรือจากสูตรทางไฟฟ้า XL = 2fL ดังนั้นความต้านทานรวมของชุดดีจูนฟิลเตอร์คือ Xc + XL จะสูงขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่สูงไหลเข้า
ตัวcapacitor bank น้อยลง

ปัจจุบันเราจะเรียกชุดดีจูนฟิลเตอร์เป็นสัดส่วนของความต้านทานของ reactor (XL) ต่อความต้านทานของ capacitor (Xc) เช่น6%, 7% หรือ 13% ซึ่ง 6% หมายถึงความต้านทานของ reactor (XL) มีค่าเท่ากับ 6% เมื่อเทียบกับความต้านทานของ capacitor (Xc) โดยค่า % ยิ่งสูงขึ้นจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ capacitor bank ยิ่งน้อยลงบางคนถามว่า แล้วถ้าฮาร์มอนิกความถี่สูง ไม่ไหลเข้า capacitor bank แล้วจะไหลไปที่ไหนล่ะ คำตอบก็คือส่วนใหญ่จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า ซึ่งการไฟฟ้าฯได้มีข้อกำหนดในการที่อาคารหรือโรงงานต่างๆ จะต้องรักษาคุณภาพของไฟฟ้าไม่ให้มีฮาร์มอนิกเกินกว่าที่การไฟฟ้ากำหนด ไหลเข้าสู่การไฟฟ้าฯ