เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่ายซึ่งไม่มีค่าอิมพิแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ความเพี้ยนของกระแสนี้จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย เมื่อค่าอิมพิแดนซ์ของระบบเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวค่าอิมพิแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดัน ด้วยเหตุนี้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น หรือตัวผลิตฮาร์มอนิกจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกด้วยค่าอิมพิแดนซ์ของระบบที่เหมาะสมซึ่งกระแสไฟฟ้าสลับที่เราใช้กันอยู่ทุกวันนี้โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นรูปไซน์ ดังสมการที่ (2.1) ถึงสมการที่ (2.3)

สมการแรงดัน

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \tag{2.1}$$

สมการกระแส

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \theta) \tag{2.2}$$

โดยที่

$$\omega = 2\pi f \tag{2.3}$$

$v(t) =$ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าในเวลา t ใดๆ

$V_m =$ ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของแรงดัน

$i(t) =$ ขนาดของกระแส ณ เวลา t ใดๆ

$I_m =$ ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของกระแส

$f =$ ความถี่ของแรงดันและกระแส

$\theta =$ ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน

$t =$ เวลา

2.1.2 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในรูปของกระแสไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อยทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงระยะหลังที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นอย่างมาก

2.1.3 ปัญหากระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current) ต่อระบบไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

1. ผลของกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current) ทำให้กำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นทั้งจากลวดตัวนำและแกนแม่เหล็ก
2. ผลของกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current) ที่ไหลอยู่ในระบบทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในสายตัวนำมากขึ้นเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current) ทำให้ค่ากระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้น
3. ผลของกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current)ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในคาปาซิเตอร์แก้ค่าตัวประกอบกำลัง (Cap. Bank) และทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น
4. ผลของกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current) Triplen (ลำดับที่3,6,9…) จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวตรอลทำให้เกิดความร้อนสูง
5. ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแสและแรงดันเกินพิกัด
6. ผลของฮาร์มอนิก(Harmonic) ต่อเครื่องจักรไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์และอุปกรณ์ที่มีการทำงานโดยใช้ผลของสนามแม่เหล็กทำให้กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนและมีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติ
7. ผลของฮาร์มอนิก(Harmonic) ทำให้รีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด
8. ผลของฮาร์มอนิก(Harmonic) ทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt Hour Meter) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้
9. ผลของฮาร์มอนิก(Harmonic) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน(Noise)ในระบบสื่อสารและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด

2.1.4 แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ของระบบรีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor) และแรงดันให้ดีขึ้นทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดันอันเนื่องมาจากรีแอคแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้น จะเป็นตัวสร้างความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage-Distortion) ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ (2.4)

$$V_n = Z_n I_n \quad (2.4)$$

V_n = แรงดันฮาร์มอนิก
Z_n = กระแสฮาร์มอนิกในระบบ
I_n = กระแสฮาร์มอนิกในระบบ

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายคาปาซิเตอร์มิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิกแต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ในระบบเมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกถ้าเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน หรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์มอนิก ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน (Distortion Factor) มีค่ามาก

2.1.5 ปัญหาแรงดันฮาร์มอนิก(Harmonic Voltage) ต่อระบบไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

1. ทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากจุดต่อร่วมมีส่วนประกอบฮาร์มอนิก(Harmonic)ออกไปแม้ว่าโหลดที่นำมาต่อมีคุณสมบัติเชิงเส้น
2. ถ้ามีแรงดันฮาร์มอนิก(Harmonic Voltage) ในลำดับที่ 5 และ 11 ซึ่งเป็นเนกทีฟซีแควนซ์จะทำให้มอเตอร์ที่ได้รับแรงดันนี้เข้าไปจะเกิดแรงหมุนในทิศทางกลับหรือต้านกับทิศทางการหมุนปกติทำให้มอเตอร์ร้อนเนื่องจากต้องใช้กำลังงานเพื่อต้านแรงนี้
3. อุปกรณ์ที่ทำงานโดยผลของสนามแม่เหล็ก เช่น บัลลาสต์แกนเหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า หม้อแปลงจะร้อนผิดปกติเนื่องจากผลของแรงดันฮาร์มอนิก(Harmonic Voltage) ในลำดับที่ 5 และ 11 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กต้านภายในแกนเหล็กทำให้ต้องการกระแสไฟฟ้าขาเข้าและใช้กำลังงานไฟฟ้ามากกว่าปกติ
4. เป็นสาเหตุของการเรโซแนนซ์ทางกลของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์ทำงานสั่นอย่างผิดปกติ
5. เป็นสาเหตุให้อุปกรณ์ที่ต้องทำงานเข้าจังหวะ(Synchronization)กับความถี่สายกำลัง เช่น เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) สวิตช์ถ่ายโอนอัตโนมัติ (ATS) วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังไทริสเตอร์ชนิดควบคุมเฟส ระบบการสื่อสารข้อมูลทำงานผิดพลาดได้

2.1.4 ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor, DF)

ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor, DF) ตัวประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Factor, HF) และความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion, THD) ความหมายทั้งสามคำนั้น มาตรฐานของ IEEE Std. 519 - 1992 ได้มีการให้คำนิยามความหมายไว้เหมือนกันคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล หรือเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมดตามมาตรฐาน IEEE ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก และกระแสฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6)

$$DF_v = HF_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1}} \times 100\% \tag{2.5}$$

$$DF_i = HF_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1}} \times 100\% \tag{2.6}$$

โดยที่ DF_i, DF_v = ตัวประกอบความเพี้ยนของกระแสและแรงดันตามลำดับ (Distortion Factor)

HF_i, HF_v = ตัวประกอบฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันตามลำดับ (Harmonic Factor)

THD_i, THD_v = ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดของกระแสและแรงดันตามลำดับ (Total-Harmonic Distortion)

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายของคำว่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิก (Harmonic–Distortion) คือ ปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมด

2.2 มาตรฐานฮาร์มอนิกและการประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก

(Harmonic standard & Harmonic Distortion Evaluation)

การวัดจำนวนความเพี้ยนฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันไปแต่มีสองหลักเกณฑ์ที่ใช้ประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 ดังต่อไปนี้

2.2.1 ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแส (Current Distortion Limits)

เป็นการใช้ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้โดยมีดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความเพี้ยนรวม (Total Demand Distortion , TDD) หมายถึงความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความต้องการของกระแสโหลดสูงสุด (ความต้องการในช่วงเวลา 15 หรือ 30 นาที) โดยมีขีดจำกัดความเพี้ยนของค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานIEEE 519-1992 Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120 V Through 69000 V)[6]

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
< 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	0.7	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
Even Harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
Current distortions that result in a dc offset, e.g. half-wave converters, are not allowed.						

I_{sc} = กระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม

I_L = ความต้องการของกระแสโหลดสูงสุด (องค์ประกอบความถี่พื้นฐาน) ที่จุดต่อร่วม

TDD = ความต้องการผิดเพี้ยนรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกใน % ของความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ความต้องการ 15 หรือ 30 นาที)

2.2.2 ขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดัน (Voltage Distortion Limits)

เป็นการตรวจกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่งกลับเข้าระบบเพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเหล่านี้จะไม่เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันที่มีความเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดตามที่ระบุในตารางที่ 2.2ซึ่งค่าขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันตามตารางนี้ จะต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องและในทำนองเดียวกันควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้าการทำงานที่มีคาบเวลาน้อยกว่านี้ขีดจำกัดสามารถเพิ่มถึง 50%

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานIEEE 519-1992 Voltage Distortion Limits[6]

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
NOTE: High-voltage system can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user		

2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic Sources)ของอาคาร สยามบรมราชกุมารี

อาคาร สยามบรมราชกุมารี เป็นอาคารที่ประกอบไปด้วยศูนย์คอมพิวเตอร์ เช่น อินเวอร์เตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ VSD เป็นต้น ซึ่งโหลดเหล่านี้ล้วนเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load)

2.3.1 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ตัวผกผันเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ด้านเดียวคือจากไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายผ่านวงจรเรียงกระแส และส่งต่อไปยังสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่

2.3.1.1 ประเภทอินเวอร์เตอร์

ตัวผกผันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supplies) คือโหลดไม่มีการเคลื่อนที่ เช่น ระบบไฟฟ้าโดยมีตัวผกผันเป็นอุปกรณ์หลักของระบบและอีกประเภทหนึ่ง คือ โหลดที่มีการเคลื่อนที่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น

2.3.1.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

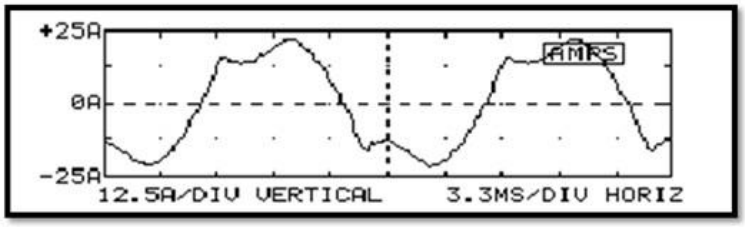
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) จะแปลงไฟกระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ให้เป็นไฟกระแสตรง โดยวงจรแปลงผัน (Converter Circuit) จากนั้น ไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดัน และความถี่ได้โดยวงจรตัวผกผัน (Inverter-Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่นและผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์

2.3.1.3 Variable Speed Drives (VSDs)

Variable Speed Drives (VSDs) คือ เครื่องเปลี่ยนความถี่ระบบไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ สามารถควบคุมได้ทั้งแรงบิดและความเร็วรอบ สามารถนำไปควบคุมความเร็วพัดลม หรือปั๊มน้ำโดยไม่ต้องดัดแปลงใดๆ VSDs บางครั้งอาจจะเรียกได้หลายแบบ

2.3.1.4 บัลลาสต์อิเลคทรอนิกส์ (Electronic Ballast)

การทำงานของบัลลาสต์อิเลคทรอนิกส์ คือการแปลงความถี่ที่ใช้งานในหลอดไฟให้สูงขึ้นจากปกติ 50 Hz ให้เป็น 50,000 – 100,000 Hz และเนื่องจากเป็นหลอดไฟชนิดแก๊ส เมื่อความถี่สูงขึ้นทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) หรือค่าความต้านทานรวมทางไฟฟ้าสูงขึ้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากเดิม 220 V อาจจะต้องเพิ่มเป็น 400 – 500 V โดยการที่ระบบเปลี่ยนความถี่คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ชิ่ง (Switching) ซึ่งถือว่าเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกส์โดยตรงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 แสดงผลของฮาร์มอนิกในบัลลาสต์อิเล็คทรอนิกส์

จากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆดังตัวอย่างข้างต้นพบว่ารูปคลื่นกระแสของอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดอาจมีรูปคลื่นที่แตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ โดยปกติจะอ้างอิงถึงความเพี้ยนฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยทั่วไปความเพี้ยนนี้มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ประเภทโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งโหลดประเภทนี้มีคุณสมบัติทำให้เป็นต้นเหตุให้เกิดความเพี้ยน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

2.4 การเกิดเรโซแนนซ์หรือผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิก

ในระบบที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ (สำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลัง) ที่ฮาร์มอนิกความถี่สูงค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์จะมีค่าต่ำ ทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าตัวคาปาซิเตอร์มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ตัวคาปาซิเตอร์ร้อน (Overheat) จนระเบิดได้ นอกจากนี้แต่ละความถี่อาจทำให้ระบบเกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งเรโซแนนซ์แบบอนุกรมและเรโซแนนซ์แบบขนานฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบดังนี้คือ

2.4.1 เรโซแนนซ์ (Resonance)

เรโซแนนซ์ (Resonance) คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่ง ผ่านวงจรไฟฟ้าที่ดีที่สุด หรือน้อยที่สุด (วงจรอนุกรมสัญญาณจะผ่านได้สูงสุด วงจรขนานสัญญาณจะผ่านได้ต่ำสุด) ปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญมากในทางสื่อสาร ในวงจรสวิตซ์ชิ่งสายส่งระบบควบคุม ฯลฯ คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินและส่งผลให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ดังนี้

- เรโซแนนซ์ขนาน คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่ง ผ่านวงจรไฟฟ้าได้น้อยที่สุดผลของเรโซแนนซ์ขนานจะทำให้เกิดอิมพิแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของเรโซแนนซ์ขนาน คือจะเพิ่มแรงดันฮาร์มอนิก และจะเกิดกระแสสูงไหลในแต่ละสาขาของวงจรเรโซแนนซ์

- เรโซแนนซ์อนุกรม คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่ง ผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด ผลที่เกิดขึ้นจากเรโซแนนซ์อนุกรมกระแสจะมีค่าสูง แรงดันฮาร์มอนิก จะมีค่าน้อย ที่คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกเนื่องจากอิมพิแดนซ์ที่มีค่าต่ำ ดังนั้นเรโซแนนซ์อนุกรมจึง

คำนึงถึงกระแสเป็นส่วนมากโดยมีผลดีกว่าแบบเรโซแนนซ์ขนานในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า

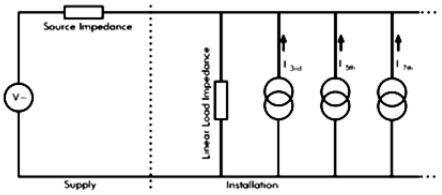
2.4.2 หลักการเบื้องต้นของการเกิดเรโซแนนซ์จากความถี่ฮาร์มอนิก

การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือโหลด ที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระแสฮาร์มอนิกจะไหลหรือแพร่ออกมาในความถี่ต่าง ๆ ตามอนุกรมของสมการที่ (2.13)

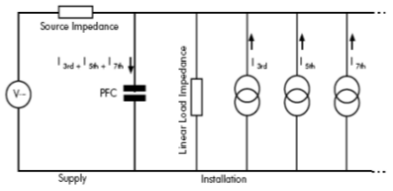
$$i(t) = I_0 + \sum_{h}^{N} I_h \sin(h\omega t + \emptyset_h) \qquad (2.7)$$

โดยที่ h = ลำดับความถี่ฮาร์มอนิก

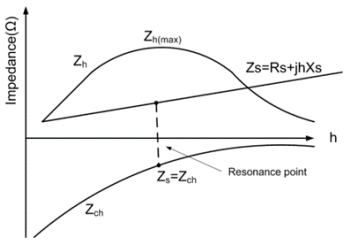
เมื่อพิจารณาค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นได้ทั้งสองส่วนจะอยู่ในรูปวงจรขนานกับวงจรของตัวคาปาซิเตอร์ เมื่อความถี่ใดความถี่หนึ่ง ทำให้ค่าอิมพิแดนซ์ 3 ส่วนคือ ระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและวงจรคาปาซิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์แบบขนานผลจะทำให้เกิดอิมพิแดนซ์รวมมีค่าสูงสุดมีผลที่แรงดันที่ตกคร่อมวงจรขนานจะมีค่าสูงมาก ดังแสดงภาพที่ 2.3 (ก – ง)



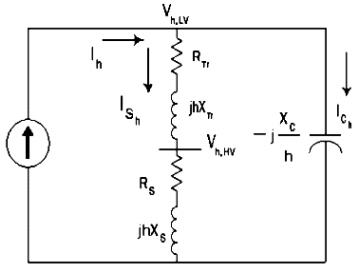
ก.ทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิก



ข.กระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่วงจรคาปาซิเตอร์



ค.การเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์



ง.วงจรสมมูลของเรโซแนนซ์แบบขนาน

ภาพที่ 2.3 แสดงการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลที่แสดงในภาพที่ 2.3 ง. จะพบว่าค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำมาก ดังนั้นค่าอิมพิแดนซ์ที่โหลดในส่วนอื่น ๆ ที่ขนานกันและมีค่าสูงกว่าก็สามารถไม่นำมาพิจารณาได้จากองค์ประกอบความถี่ h ที่แสดงในรูป เป็นตัวบ่งบอกว่าค่ารีแอคทีฟอินดัดแตนซ์ และคาปาซิทีฟอินดัคแตนซ์จะแปรเปลี่ยนตามความถี่ ซึ่งสามารถแสดงได้ในสมการที่(2.23) จะเห็นได้ว่าประเด็นสำคัญอยู่ที่ตัวหารของสมการที่ (2.23) เมื่อความถี่ใดความถี่หนึ่งของ ฮาร์มอนิกทำให้ค่า $(hX_s - \frac{X_c}{h})$ เข้าใกล้ศูนย์แล้วจะทำให้ Z_hมีค่าสูงสุดและแรงดันก็จะสูงตามไปด้วย เมื่อวิเคราะห์จากสมการที่ (2.14) ถึงสมการที่ (2.19) จะพบว่า การแปรเปลี่ยนของอิมพิแดนซ์เปรียบเสมือนกับการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลจากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เข้าไปสู่ระบบไฟฟ้าและวงจรของตัวคาปาซิเตอร์

$$h = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} \tag{2.8}$$

$$X_c = \frac{Vc^2}{Q_c} \tag{2.9}$$

$$X_s = \frac{V_s^2}{S_{sc}} \tag{2.10}$$

$$h = \frac{V_c}{V_s}\sqrt{\frac{S_{sc}}{S_c}} \tag{2.11}$$

$$\beta_s = \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \tag{2.12}$$

$$\beta_c = \frac{Z_{ch}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \tag{2.13}$$

โดยที่ Z_h = ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรสมมูลที่ความที่ h

Z_{sh} = อิมพิแดนซ์ของระบบ ที่ h

Z_{ch} = อิมพิแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ ที่ h

h = ลำดับความถี่ฮาร์มอนิก

X_c = ค่าคาปาซิทีฟอิมพิแดนซ์

X_s = ค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้ารวมกัน

βs = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้า

βc = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่คาปาซิเตอร์

β = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิก (Current Amplifier Gain)

S_{sc} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจร

S_c = กำลังไฟฟ้าปรากฏที่คาปาซิเตอร์

V_c = แรงดันที่คาปาซิเตอร์

V_s = แรงดันที่ระบบไฟฟ้า

Q_c = กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่คาปาซิเตอร์

เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดมากกว่าอิมพีแดนซ์ของระบบมากๆแล้ว ถ้าอิมพีแดนซ์ของโหลดต่อขนานกับอิมพีแดนซ์ของระบบจะได้อิมพีแดนซ์ของระบบสูตรคำนวณหาจุดเรโซแนนซ์ จากภาพที่ 2.6 ใช้ Current Divider หาค่า I_c

$$I_c = \frac{I_h \times Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{2.14}$$

$$I_c = \frac{I_h \times \sqrt{{R_{eq}}^2 + (X_{eq} \times h)^2}}{\sqrt{{R_{eq}}^2 + [(X_{eq} \times h) - (\frac{X_c}{h})]^2}} \tag{2.15}$$

$$\text{Current Amplifier Gain } (\beta) = \frac{I_c}{I_h} \tag{2.16}$$

ดังนั้น

$$\beta = \frac{\sqrt{{R_{eq}}^2 + (X_{eq} \times h)^2}}{\sqrt{{R_{eq}}^2 + [(X_{eq} \times h) - (\frac{X_c}{h})]^2}} \tag{2.17}$$

โดยที่ Z_h = ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรสมมูลที่ความที่ h

Z_{sh} = อิมพิแดนซ์ของระบบ ที่ h

Z_{ch} = อิมพิแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ ที่ h

h = ลำดับความถี่ฮาร์มอนิก

X_c = ค่าคาปาซิทีฟอิมพิแดนซ์

X_s = ค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้ารวมกัน

β_s = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้า

β_c = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่คาปาซิเตอร์

β = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิก (Current Amplifier Gain)

S_{sc} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจร

S_c = กำลังไฟฟ้าปรากฏที่คาปาซิเตอร์

V_c = แรงดันที่คาปาซิเตอร์

V_s = แรงดันที่ระบบไฟฟ้า

Q_c = กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่คาปาซิเตอร์

2.4.3 การสร้างวงจรสมมูลของการเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนาน

กระบวนการในขั้นแรกของการศึกษาจะนำข้อมูลของอาคารเช่นระบบไฟฟ้าขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าและข้อมูลของโหลดมาทำการหาค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและโหลดในแต่ละส่วนดังแสดงในตารางที่4.1มาสร้างวงจรสมมูลการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานเพื่อวิเคราะห์การไหลของ กระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าและวงจรตัวคาปาซิเตอร์

2.5 ผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าจากปัญหาฮาร์มอนิก

จากสิ่งที่ได้กล่าวแล้วสามารถสรุปผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกได้ดังนี้

1. ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก เป็นผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแสและแรงดันเกินพิกัด
2. ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ประสิทธิภาพการส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกทำให้ค่าของกระแสเฉลี่ยและความต้านทานของสายสูงขึ้น
3. ผลของกระแสฮาร์มอนิก Triplen (ลำดับที่3, 6, 9, ...) จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ (Zero – Sequence)ในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะรวมกันกันไหลอยู่ในสายนิวตรอล อาจทำให้สายนิวตรอนหรือหม้อแปลงเสียหายได้หากไม่มีการออกแแบบรองรับไว้
4. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการในรับโหลดของหม้อแปลงลดลงไป (Derating) ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน(Eddy - Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซีส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น

5. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเลคตริก (Dielectric - Stress) กับตัวคาปาซิเตอร์และอาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์และผลจากสภาวะเรโซแนนซ์ที่ ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก คาปาซิเตอร์ที่ออกแบบสร้างจากผู้ผลิตได้กำหนดตามมาตรฐาน มาตรฐาน IEEE Std. 18-1992
6. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้นทำให้ลักษณะเวลา - กระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป กรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำเกิดขึ้นฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนด หรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบสาเหตุจะเป็นเหตุมาจากฮาร์มอนิกในกรณีที่เกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน
7. ผลของฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงานของชนิดรีเลย์ การทำงานของรีเลย์ชนิด Electromagnetic ขึ้นอยู่กับค่ากระแสและแรงดัน RMS ส่วนการทำงานของรีเลย์ชนิด Digital ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) จากการสุ่มและตรวจค่า Zero Crossing ค่ากระแสหรือแรงดันที่ศูนย์ โดยลักษณะที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดดังนี้
    - ทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลงหรือทำงานด้วยค่า (Pickup Values) ที่สูง โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ
    - กรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก Triplen (ลำดับที่ 3, 6, 9, …) มากพออาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด (False Trip)
    - ทำให้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay)ทำงานผิดพลาด ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพิแดนซ์เพิ่มขึ้นต่างจากค่าอิมพิแดนซ์ที่ทำการเซทติ้งที่ความถี่หลักมูล
    - ทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static Underfrequency Relay) มีความไวกว่าปกติอาจทำให้เกิดการทริปผิดพลาด
    - ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and Overvoltage Relay) ทำงานผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ตั้งไว้
    - ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง
8. ผลของกระแสฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current - Interruption Capacity) ของอุปกรณ์สวิตซ์เกียร์ คือทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลาdi/dt มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรคเกอร์ไม่

สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิก ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

9. ผลของฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt-Hour Meter) ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล
10. ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้าทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเกิดปรากฏการณ์ค็อกกิ้ง(Cogging)คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิเลตทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร
11. ผลของฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารเช่นในระบบโทรศัพท์