โดยที่

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

เมื่อ $v(t)$ = นาดของแรงดันไฟฟ้าในเวลา t ใดๆ

V_m = ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของแรงดัน

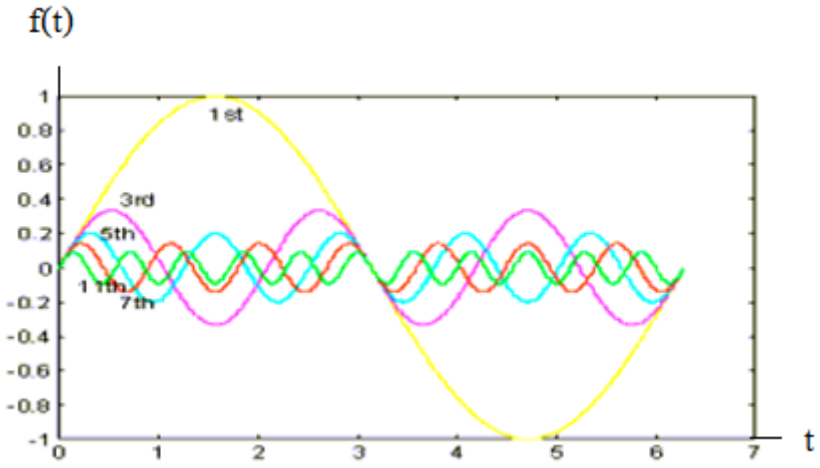
$i(t)$ = ขนาดของกระแส ณ เวลา t ใดๆ

I_m = ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของกระแส

f = ความถี่ของแรงดัน และกระแส

θ = ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน

t = เวลา



ภาพที่ 2.1 ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ

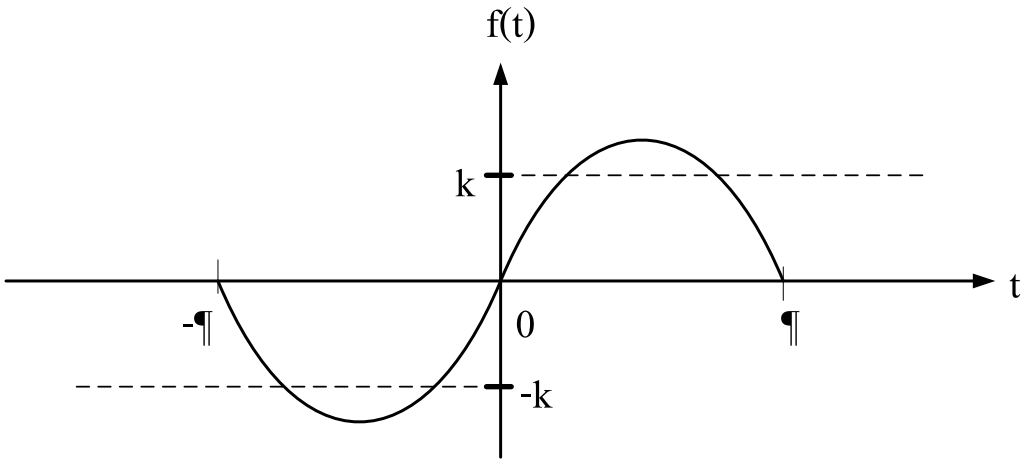
ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกส์ได้ โดยสัญญาณหรือฟังก์ชัน ที่เป็นคาบใดๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ความถี่ต่างๆเป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนด้วย $f(t)$ ดังสมการ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \tag{2.4}$$

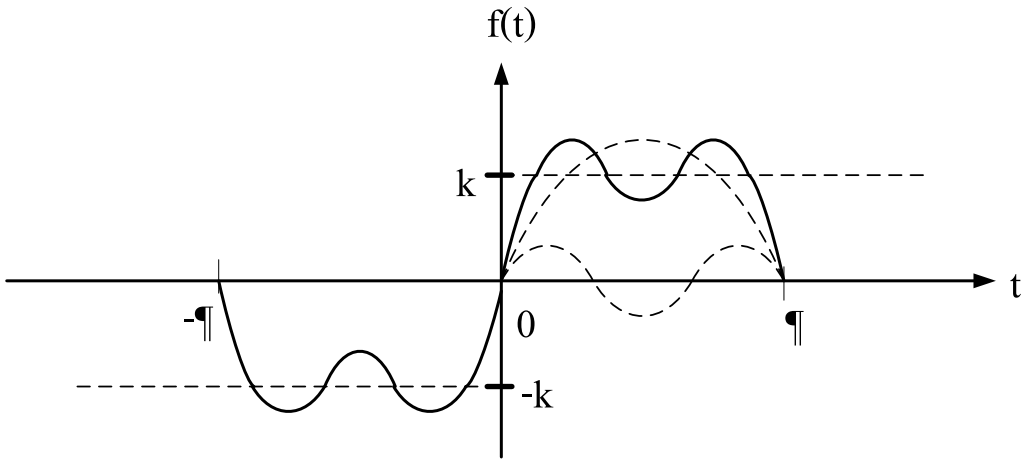
$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)dt \tag{2.5}$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\cos(n\omega_0 t)dt \tag{2.6}$$

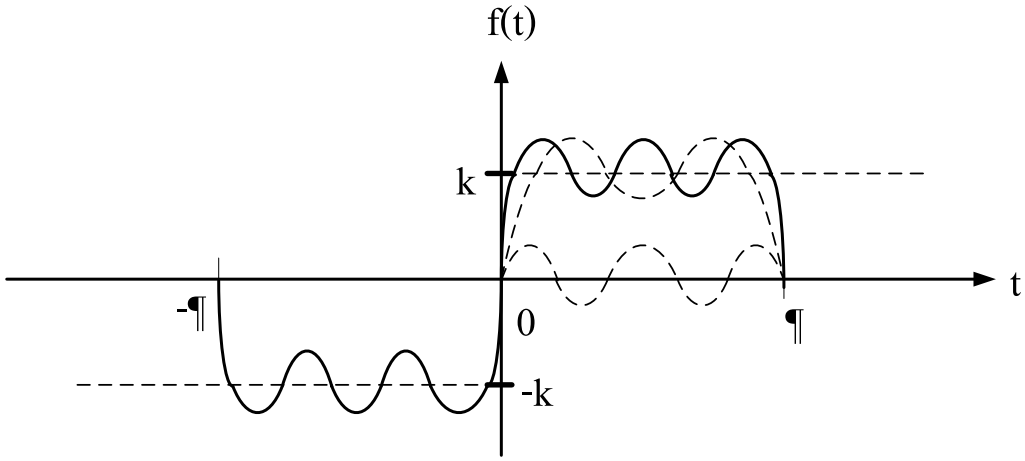
$$b_n = \frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\sin(n\omega_0 t)dt \tag{2.7}$$



ก. ฟังก์ชัน Sin เมื่อ n = 1



ข. ผลบวกของฟังก์ชัน Sin เมื่อ n = 1 และ n = 3



ค. ผลบวกของฟังก์ชัน Sin เมื่อ n = 1, n = 3 และ n = 5

ภาพที่ 2.2 ผลบวกของฟังก์ชันไซน์ แต่ละเทอม

จากสมการ (2.5)

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

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

$$a_0 = 0$$

เพราะว่าพื้นที่ใต้กราฟในช่วง $-\pi$ ถึง π เป็นศูนย์ ดังนั้น $a_0 = 0$ จึงไม่จำเป็นต้องอินทิเกรต

จากสมการ (2.6)

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

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

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{-\pi}^{\pi} (k)\cos(n\omega_0 t)dt$$

$$a_n = \frac{2(k)}{T}\left[\int_0^{\pi} \frac{\cos(n\omega_0 t)}{n\omega_0} d(n\omega_0 t) - \int_{-\pi}^{0} \frac{\cos(n\omega_0 t)}{n\omega_0} d(n\omega_0 t)\right]$$

เมื่อ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad , \quad T = 2\pi$$

ดังนั้น

$$\omega = 1$$

จะได้

$$a_n = \frac{k}{\pi}\left[\left(\frac{\sin(n\pi)}{n} - \frac{\sin(0)}{n}\right) - \left(\frac{\sin(0)}{n} - \frac{\sin(-n\pi)}{n}\right)\right]$$

$$a_n = \frac{k}{n\pi}[(\sin(n\pi) - \sin(0)) - (\sin(0) - \sin(-n\pi))]$$

เมื่อ

$$\sin(n\pi) = 0 \qquad \text{ที่ n จำนวนเต็มใดๆ}$$

ดังนั้น

$$a_n = \frac{k}{n\pi}(0)$$

$$a_n = 0$$

จากสมการ (2.7)

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

$$b_n = \frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi} (k)\sin(n\omega_0 t)\,dt + \int_{-\pi}^{0} (-k)\sin(n\omega_0 t)dt$$

$$b_n = \frac{k}{\pi}\int_0^{\pi} \frac{\sin(n\omega_0 t)}{(n\omega_0)}\,d(n\omega_0 t) - \int_{-\pi}^{0} \frac{\sin(n\omega_0 t)}{(n\omega_0)}\,d(n\omega_0 t)$$

เมื่อ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad , \quad T = 2\pi$$

ดังนั้น

$$\omega = 1$$

จะได้

$$b_n = \frac{k}{\pi}\left[\left(\frac{-\cos(n\pi)}{n} + \frac{\cos(0)}{n}\right) + \left(\frac{\cos(0)}{n} - \frac{\cos(n\pi)}{n}\right)\right]$$

$$b_n = \frac{k}{n\pi}[(-\cos(n\pi) + \cos(0)) + (\cos(0) - \cos(n\pi))]$$

$$b_n = \frac{4k}{n\pi} \quad ; n = 1 , 3 , 5 , \ldots$$

$$b_n = 0 \quad ; n = 2 , 4 , 6 , \ldots$$

จากสมการ (2.8) จะได้

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

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4k}{n\pi} \sin(n t) ; \; n = 1 , 3 , 5 , \ldots$$

2.1.2 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในรูปของกระแสไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อยทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงระยะหลังที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นผลทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นอย่างมาก

2.1.3 แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ของระบบรีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor) และแรงดันให้ดีขึ้นทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอคแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้น จะเป็นตัวสร้างความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic - Voltage Distortion) ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ (2.9)

$$V_n = Z_n I_n \tag{2.9}$$

เมื่อ V_n = แรงดันฮาร์มอนิก
Z_n = กระแสฮาร์มอนิกในระบบ
I_n = กระแสฮาร์มอนิกในระบบ

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิก แต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ในระบบเมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกถ้าเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน (Distortion Factor) มีค่ามาก

2.1.4 ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor, DF)

ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor, DF) ตัวประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Factor, HF) และความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion, THD) ความหมายทั้งสามคำนั้นมาตรฐานของ IEEE Std. 519 - 1992 ได้มีการให้คำนิยามความหมายไว้เหมือนกันคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูลหรือเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมดตามมาตรฐาน IEEE ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11)

$$DF_v = HF_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1}} \times 100\% \quad (2.10)$$

$$DF_i = HF_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1}} \times 100\% \quad (2.11)$$

โดยที่ DF = ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor)
HF = ตัวประกอบฮาร์มอนิก (Harmonic Factor)
THD = ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion)

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

2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

2.2.1 อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Inter Harmonic)

อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Inter Harmonic) หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์มอนิกส่วนมากจะพบในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ค เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็กโดยเฉพาะช่วงการเริ่มต้นการหลอม กระแสอาร์คจะยังไม่เสถียรทำให้คาบของกระแสยังไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz จะใช้เวลา 20 ms แต่กระแสจะมีคาบเวลาไม่เท่ากับ 20 ms ทุกคาบ ทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้น

2.2.2 ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic) หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า ที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง หรือ แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยใช้สารกึ่งตัวนำเป็นสวิตซ์ตัดต่อกระแสโดยในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์มอนิกคุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$h = kq \pm 1 \quad (2.12)$$

เมื่อ h = ลำดับฮาร์มอนิกคุณลักษณะ
k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1,2,3,…)
q = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

2.2.3 ฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non-characteristic Harmonic)

ฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non-characteristic Harmonic) หมายถึง ฮาร์มอนิกที่สร้างโดยตัวแปลงผันไฟฟ้า โดยลำดับฮาร์มอนิกไม่เป็นไปตามสมการ h = kq±1 เช่น ตัวแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์มอนิกคุณลักษณะที่มีลำดับ 11, 13, 23, 25, 35, 37 ดังนั้น ถ้ามีฮาร์มอนิกที่มีลำดับเป็น 5, 7, 17, 19 ปนมาด้วย ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

2.2.4 ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic)

ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic) หมายถึง ฮาร์มอนิกกลุ่มที่มีลำดับที่หารด้วยสามลงตัว ได้แก่ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 6, 9, … ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มลำดับเป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวตรอลทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวตรอลอาจจะร้อนจนฉนวนเสียหายและเกิดลัดวงจรได้ เป็นต้น

2.3 มาตรฐานฮาร์มอนิกและการประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic standard & Harmonic Distortion Evaluation)

การวัดจำนวนความเพี้ยนฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันไปแต่มีสองหลักเกณฑ์ที่ใช้ประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 ดังต่อไปนี้

2.3.1 ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแส (Current Distortion Limits)

เป็นการใช้ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้โดยมีดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความเพี้ยนรวม (Total Demand Distortion , TDD) หมายถึง ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความต้องการของกระแสโหลด

สูงสุด (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.						

เมื่อ I_{SC} = กระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม

I_L = ความต้องการของกระแสโหลดสูงสุด (องค์ประกอบความถี่พื้นฐาน) ที่จุดต่อร่วม

TDD = ความต้องการผิดเพี้ยนรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก ใน % ของความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ความต้องการ 15 หรือ 30 นาที)

2.3.2 ขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดัน (Voltage Distortion Limits)

เป็นการตรวจกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่งกลับเข้าระบบเพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเหล่านี้จะไม่เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันที่มีความเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดตามที่ระบุในตารางที่ 2.2 ซึ่งค่าขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันตามตารางนี้ จะต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้อง และในทำนองเดียวกันควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (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		

2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic Sources)ของอาคาร 11

อาคาร 11 เป็นอาคารที่มีเทคโนโลยีที่ทันสมัยประกอบไปด้วยสิ่งอำนวยความสะดวกมากมาย ทั้งนี้จึงต้องใช้อุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์จำนวนมาก ซึ่งโหลดเหล่านี้ล้วนเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load) เช่น

2.4.1 ตัวผกผัน (Inverter)[9]

ตัวผกผัน (Inverter) คือ อุปกรณ์อิเล็คทรอนิคส์ที่ใช้ในการปรับเปลี่ยน ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบกรงกระรอกโดยวิธีการปรับแรงดันและความถี่ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับมอเตอร์บางครั้งจะเรียกว่า "V/F Control" อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ตัวผกผันเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ด้านเดียวคือจากไฟฟ้ากระแสสลับของแหล่งจ่ายผ่านวงจรเรียงกระแส และส่งต่อไปยังสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่

2.4.1.1 ประเภทของตัวผกผัน

ตัวผกผันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ตัวผกผันที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supplies) คือโหลดไม่มีการเคลื่อนที่ เช่น ระบบไฟฟ้าโดยมีตัวผกผันเป็นอุปกรณ์หลักของระบบ และอีกประเภทหนึ่ง คือ โหลดที่มีการเคลื่อนที่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น

2.4.1.2 หลักการทำงานของตัวผกผัน

ตัวผกผัน (Inverter) จะแปลงไฟกระแสสลับ จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นไฟกระแสตรง โดยวงจรแปลงผัน (Converter Circuit) จากนั้น ไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดัน และความถี่ได้โดยวงจรตัวผกผัน (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่ แปลงรูปคลื่นและผ่านพลังงานของตัวผกผัน

2.4.1.3 Variable speed drives (VSDs)

Variable speed drives (VSDs) คือ เครื่องเปลี่ยนความถี่ระบบไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ สามารถควบคุมได้ทั้งแรงบิด และความเร็วรอบ สามารถนำไปควบคุมความเร็วพัดลม หรือปั๊มน้ำโดยไม่ต้องดัดแปลงใดๆVSDs บางครั้งอาจจะเรียกได้หลายแบบ เช่น

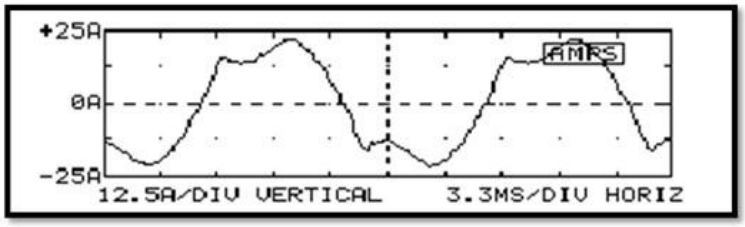
- Variable-Frequency Drives (VFD)
- Adjustable-Speed Drives (ASD)
- Variable-Frequency Inverters (VFI)
- Frequency Converters (FC)
- Variable-Voltage Variable-Frequency (VVVF)
- Inverter or Converter

ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่อาจจะมีคำเพิ่มเติมเป็นศัพท์ทางการค้า เช่น Vector Control, Direct torque control, V/F Control, Flux control เมื่อนำ VSD ไปติดตั้งกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะทำให้มอเตอร์ร้อนกว่าปกติเพราะผลจากฮาร์มอนิก และการระบายความร้อนลดลง

2.4.1.4 บัลลาสต์อิเลคทรอนิกส์ (Electronic Ballast)

การทำงานของบัลลาสต์อิเลคทรอนิกส์ คือการแปลงความถี่ที่ใช้งานในหลอดไฟให้สูงขึ้นจากปกติ 50 Hz ให้เป็น 50,000 – 100,000 Hz และเนื่องจากเป็นหลอดไฟชนิดแก๊ส เมื่อความถี่สูงขึ้นทำให้ค่าอิมพิแดนซ์ (Impedance) หรือค่าความต้านทานรวมทางไฟฟ้าสูงขึ้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจากเดิม 220 V อาจจะต้องเพิ่มเป็น 400 – 500 V โดยการที่ระบบเปลี่ยนความถี่คือการ

ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ชิ่ง (Switching) ซึ่งถือว่าเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกส์โดยตรงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงผลของฮาร์มอนิกในบัลลาสต์อิเล็คทรอนิกส์

จากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆดังตัวอย่างข้างต้นพบว่ารูปคลื่นกระแสของอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดอาจมีรูปคลื่นที่แตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ โดยปกติจะอ้างอิงถึงความเพี้ยนฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยทั่วไปความเพี้ยนนี้มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ประเภทโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งโหลดประเภทนี้มีคุณสมบัติทำให้เป็นต้นเหตุให้เกิดความเพี้ยน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

2.5 การเกิดเรโซแนนซ์หรือผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิก

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

2.5.1 เรโซแนนซ์ (Resonance)

เรโซแนนซ์ (Resonance) คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าที่ดีที่สุด หรือน้อยที่สุด (วงจรอนุกรมสัญญาณจะผ่านได้สูงสุด วงจรขนานสัญญาณจะผ่านได้ต่ำสุด) ปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญมากในทางสื่อสาร ในวงจรสวิตซ์ชิ่งสายส่ง

ระบบควบคุม ฯลฯ คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินและส่งผลให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ดังนี้

- เรโซแนนซ์ขนาน คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้น้อยที่สุด ผลของเรโซแนนซ์ขนานจะทำให้เกิดอิมพิแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของเรโซแนนซ์ขนาน คือจะเพิ่มแรงดันฮาร์มอนิก และจะเกิดกระแสสูงไหลในแต่ละสาขาของวงจรเรโซแนนซ์

- เรโซแนนซ์อนุกรม คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด ผลที่เกิดขึ้นจากเรโซแนนซ์อนุกรม กระแสจะมีค่าสูง แรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าน้อย ที่คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกเนื่องจากอิมพิแดนซ์ที่มีค่าต่ำ ดังนั้นเรโซแนนซ์อนุกรมจึงคำนึงถึงกระแสเป็นส่วนมากโดยมีผลดีกว่าแบบเรโซแนนซ์ขนาน ในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า

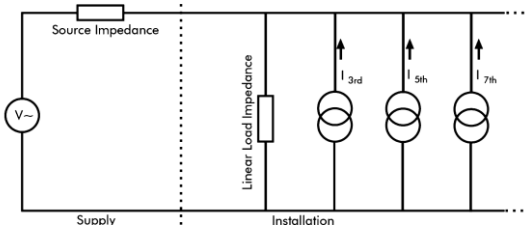
2.5.2 หลักการเบื้องต้นของการเกิดเรโซแนนซ์จากความถี่ฮาร์มอนิก

การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระแสฮาร์มอนิกจะไหลหรือแพร่ออกมาในความถี่ต่าง ๆ ตามอนุกรมของสมการที่ (2.13)

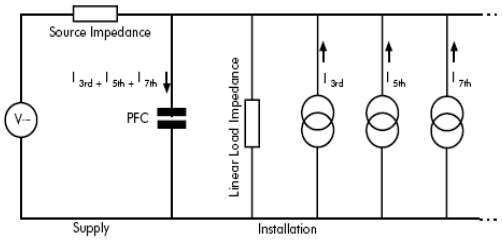
$$i(t) = I_0 + \sum_{h}^{N} I_h \sin(h\omega t + \emptyset_h) \qquad (2.13)$$

โดยที่ h = ลำดับความถี่ฮาร์มอนิก

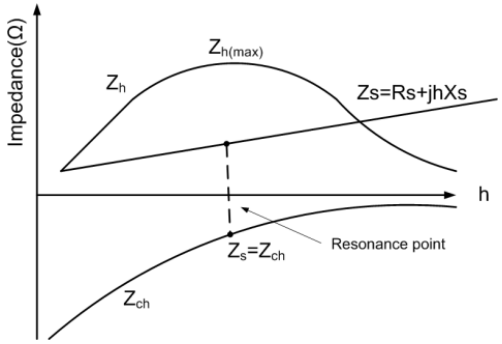
เมื่อพิจารณาค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า จะเห็นได้ทั้งสองส่วนจะอยู่ในรูปวงจรขนานกับวงจรของตัวคาปาซิเตอร์ เมื่อความถี่ใดความถี่หนึ่ง ทำให้ค่าอิมพิแดนซ์ 3 ส่วนคือระบบไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้าและวงจรคาปาซิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์แบบขนานผลจะทำให้เกิดอิมพิแดนซ์รวมมีค่าสูงสุดมีผลที่แรงดันที่ตกคร่อมวงจรขนานจะมีค่าสูงมาก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



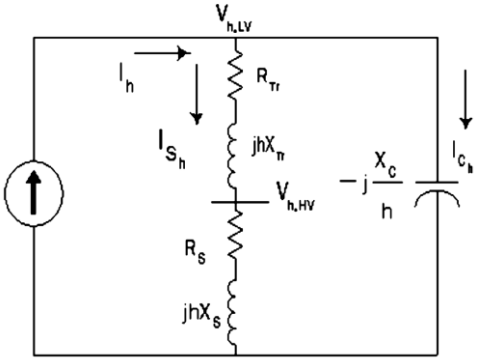
ก. ทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิก



ข. กระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่วงจรคาปาซิเตอร์



ค. การเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพิแดนซ์



ง.วงจรสมมูลของเรโซแนนซ์แบบขนาน

ภาพที่ 2.4 แสดงการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

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

$$h = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} \tag{2.14}$$

$$X_c = \frac{Vc^2}{Q_c} \tag{2.15}$$

$$X_s = \frac{V_s^2}{S_{sc}} \tag{2.16}$$

$$h = \frac{V_c}{V_s}\sqrt{\frac{S_{sc}}{S_c}} \tag{2.17}$$

$$\beta_s = \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \tag{2.18}$$

$$\beta_c = \frac{Z_{ch}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \tag{2.19}$$

โดยที่ Z_h = ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจรสมมูลที่ความที่h

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)

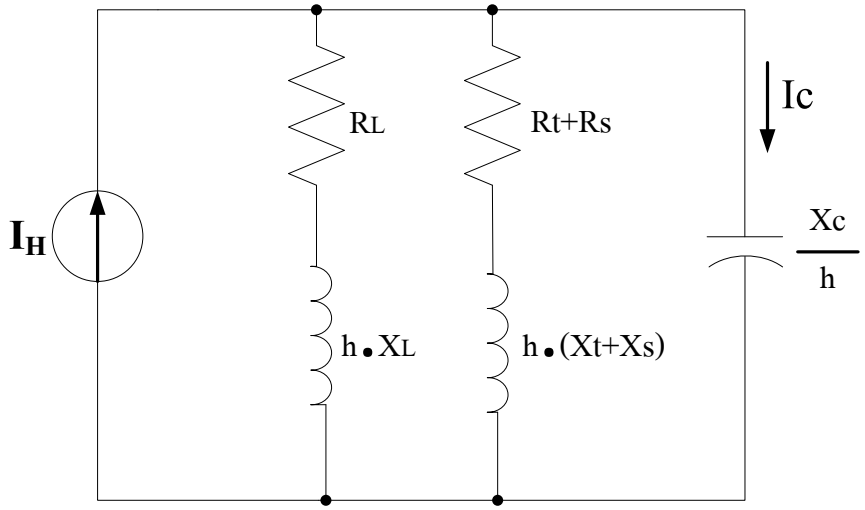
S_{sc} = กำลังไฟฟ้าลัดวงจร

S_c = กำลังไฟฟ้าปรากฏที่คาปาซิเตอร์

V_c = แรงดันที่คาปาซิเตอร์

V_s = แรงดันที่ระบบไฟฟ้า

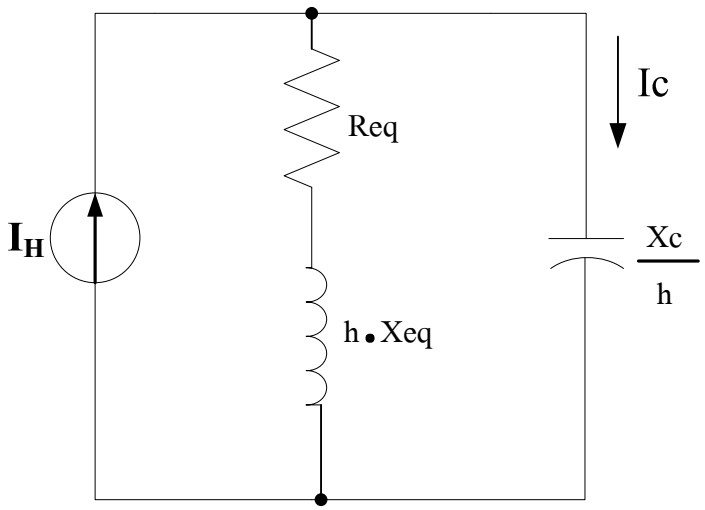
Q_c = กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่คาปาซิเตอร์



ภาพที่ 2.5 วงจรสมมูลของแบบจำลอง

โดยที่

R_L	= 4.6817	Ω
X_L	= 0.66714	Ω
R_t+R_s	= 0.0007687	Ω
X_t+X_s	= 0.00627	Ω
X_c/h	= 3.46112	Ω/h



ภาพที่ 2.6 วงจรสมมูลของแบบจำลองเมื่อยุบรวมแล้ว

จากวงจรในรูปที่ 2.5 สามารถคำนวนค่าต่างๆได้ดังนี้

$$R_{eq} = R_{trans}+R_{sys} = 0.0007687\ \Omega$$

$$X_{eq} = X_{trans}+X_{sys} = 0.00627\ \Omega$$

$$X_c/h = 3.46112\ \Omega/h$$

เมื่ออิมพิแดนซ์ของโหลดมากกว่าอิมพิแดนซ์ของระบบมากๆแล้ว ถ้าอิมพิแดนซ์ของโหลดต่อขนานกับอิมพิแดนซ์ของระบบจะได้อิมพิแดนซ์ของระบบ

สูตรคำนวณหาจุดเรโซแนนซ์

จากภาพที่ 2.6 ใช้ Current divider หาค่า I_c

$$I_c = \frac{I_h \times Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{2.20}$$

$$I_c = \frac{I_h \times \sqrt{{R_{eq}}^2 + (X_{eq} \times h)^2}}{\sqrt{{R_{eq}}^2 + [(X_{eq} \times h) - (\frac{X_c}{h})]^2}} \tag{2.21}$$

$$\text{Current Amplifier Gain } (\beta) = \frac{I_c}{I_h} \tag{2.22}$$

ดังนั้น

$$\beta = \frac{\sqrt{{R_{eq}}^2 + (X_{eq} \times h)^2}}{\sqrt{{R_{eq}}^2 + [(X_{eq} \times h) - (\frac{X_c}{h})]^2}} \tag{2.23}$$

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

2.5.3 การสร้างวงจรสมมูลของการเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนาน

กระบวนการในขั้นแรกของการศึกษาจะนำข้อมูลของอาคาร 11 เช่น ระบบไฟฟ้า ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าและข้อมูลของโหลดมาทำการหาค่าอิมพิแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและโหลดในแต่ละส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาสร้างวงจรสมมูลการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน เพื่อวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าและวงจรตัวคาปาซิเตอร์

2.6 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 ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ 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 คือทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา di/dt มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรคเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิก ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

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

10. ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้าทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเกิดปรากฏการณ์ค็อกกิ้ง(Cogging) คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิเลตทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร

11. ผลของฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารเช่นในระบบโทรศัพท์

2.7 ข้อเสนอแนะการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

วิธีแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมีอยู่5แบบ[12]ได้แก่

1. การใช้วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filter)
2. การใช้วงจรกรองแอกทีฟ (Active Filter)
3. การใช้วงจรแก้ตัวประกอบกำลังPFC (Power Factor Correction Circuit)
4. การติดLine Reactor หรือติด DC Reactor
5. การใช้หม้อแปลงพิเศษ เช่นหม้อแปลงซิกแซก หรือ หม้อแปลงแบบ12 พัลส์

2.7.1 การใช้วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filter)

การใช้ Passive Filter ซึ่งวิธีการนี้ทำง่ายและเป็นที่นิยมพบเห็นโรงงาน วิธีการจากเดิมที่ติดตั้งเฉพาะ Cap Bank ซึ่งมีเฉพาะคาปาซิเตอร์ที่ตู้เมน MDB ก็เปลี่ยนมาติดเป็นวงจร LC แทนซึ่งก็มีทั้งแบบ LC Tune และแบบ LC Detune ซึ่งที่นิยมกันมากกว่าก็คือแบบ LC Detune วิธี Passive Filter เป็นวิธีที่ราคาไม่สูง แต่ขนาดก็จะใหญ่โตหน่อยและการออกแบบก็ทำได้ยาก ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญและควรจะต้องทำการศึกษาระบบให้ดี ควรจะมีการทำ System Modeling และคำนวณค่า LC ที่เหมาะสม โดยต้องดูผลการชดเชย Power Factor ประกอบไปด้วยเพราะว่าวงจรต้องใช้คาปาซิเตอร์

2.7.2 การใช้วงจรกรองแอกทีฟ (Active Filter)

การใช้ Active Filter เป็นวิธีการที่ดีและทันสมัย นิยมติดตั้งที่ตู้ไฟเมน MDB แต่ราคาก็แพงกว่าแบบ Passive Filter มากกว่า 2 เท่า แต่ข้อดีก็คือใช้พื้นที่น้อย แล้วก็ออกแบบติดตั้งไม่ยาก เพราะ Active Filter ทำงานด้วย Microprocessor โดยเป็นอุปกรณ์ประเภทฉลาด วงจรภายในจะประกอบไปด้วย Power Convertor และระบบควบคุม รวมทั้งระบบตรวจวัดฮาร์มอนิก ซึ่ง Active Filter จะใช้วงจร Switching สร้างกระแสฮาร์มอนิกออกมาหักล้างกับฮาร์มอนิกที่วัดได้จนกระทั่งฮาร์มอนิกในระบบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ตอนนี้บ้านเราก็ก็มีใช้กันหลายที่มีผู้ผลิตรายใหญ่ๆก็นำเข้ามาแล้วเช่น ABB, Schneider แล้วก็มีผู้ผลิตไทยบางรายก็สามารถทำตัวต้นแบบได้แล้วเช่นกัน

2.7.3 การใช้วงจรแก้ตัวประกอบกำลัง PFC (Power Factor Correction Circuit)

การใช้วงจร PFC อันนี้ชื่อจะเป็นวงจรแก้ตัวประกอบกำลังหรือ Power Factor แต่สามารถแก้ฮาร์มอนิกได้ วงจรประเภทนี้จะเป็นวงจรเฉพาะสำหรับแต่ละอุปกรณ์ ก็คือเป็น option เสริมที่ติดตั้งเพิ่มเติมหรือใส่เข้าไปเพิ่มเติมแต่แรก โดยติดตั้งที่วงจรไฟเข้าของอุปกรณ์ที่สร้างฮาร์มอนิก ซึ่งวงจรประเภทนี้จะควบคุมกระแสด้านเข้าให้มีรูปร่างไม่เพี้ยนไปจากรูปไซน์มากจนเกินไปนัก เราจะพบได้เช่น วงจรด้านเข้าของ UPS ที่ไม่สร้างฮาร์มอนิก วงจรด้านเข้าของ Supply คอมพิวเตอร์ หรือว่า Option เสริมแก้ฮาร์มอนิก ด้านไฟเข้าขอ งDrive ยี่ห้อต่างๆ ปัจจุบันก็มี IC สำเร็จรูปพร้อมวงจรแนะนำเสร็จสรรพสามารถทำตามได้

2.7.4 การติด Line Reactor หรือติด DC Reactor

การติดLine Reactor หรือ DC Reactor วิธีการนี้พบทั่วไปก็คือเป็นพวก Option เสริมของ Drive โดยช่วยลดฮาร์มอนิกได้ระดับหนึ่งแต่ก็ยังคงเหลือมาก เช่น อาจจะลดได้จาก 40% เหลือ 20% ข้อดี คือ ติดตั้งง่าย ไม่ซับซ้อน ราคาก็ไม่แพงนัก และเป็นการกำจัดฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิดด้วยวิธีนี้ ตัว Reactor จะช่วยกรองกระแสด้านเข้าของ Drive ไม่ให้กระชากจนเกินไป ดังนั้นจึงสามารถลดฮาร์มอนิกลำดับสูงๆได้

2.7.5 การใช้หม้อแปลงพิเศษ

การใช้หม้อแปลงพิเศษ วิธีนี้ค่อนข้างแพงมาก แต่บางทีก็จำเป็นสำหรับโรงงานประเภทโรงเหล็ก หรือว่าพวก Convertor ใหญ่ๆประเภทพิกัดกำลังมากกว่า 1 MW ขึ้นไป ข้อดีของวิธีนี้คือประสิทธิภาพสูงมาก เนื่องจากไม่ได้ใช้วงจร Switching และไม่มีผลกระทบต่อ Power Factor เพราะไม่ได้ใช้ทั้ง L และ C แต่วิธีที่คณะผู้จัดทำโครงงานอยากเสนอวิธีแก้ปัญหาฮาร์มอนิกคือวิธีใช้วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filter) แบบ LC Detune ซึ่งเป็นการติดตั้งตัวรีแอคเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ เพราะเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และใช้กันมาก นอกจากข้อดีที่กล่าวมานั้นแล้ว ข้อดีอีกข้อคือ ไม่ต้องเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์เหมือนวิธีอื่นๆ ซึ่งการเปลี่ยนคาปาซิเตอร์เท่ากับต้องจัดหาคาปาซิเตอร์ชุดใหม่ทั้งชุดซึ่งมีราคาสูง แต่วิธีนี้อาจเกิดปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของคาปาซิเตอร์บ้าง แต่ไม่ส่งผลมากนักเพราะคาปาซิเตอร์มีหลายระดับการออกแบบขนาดของรีแอคเตอร์จะใช้รีแอคเตอร์มีขนาดของค่ารีแอคแตนซ์เป็น 7% ของค่าขนาดรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ ผลของการติดตั้งจะทำให้ตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์มากกว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เพราะปัญหาที่เกิดจะเป็นฮาร์มอนิกลำดับคี่ ตั้งแต่ลำดับ 5 ขึ้นไป ดังแสดงให้เห็นอัตราการขยายจะถูกชดเชยด้วยค่าอิมพิแดนซ์ของรีแอคเตอร์ดังสมการ (2.24)

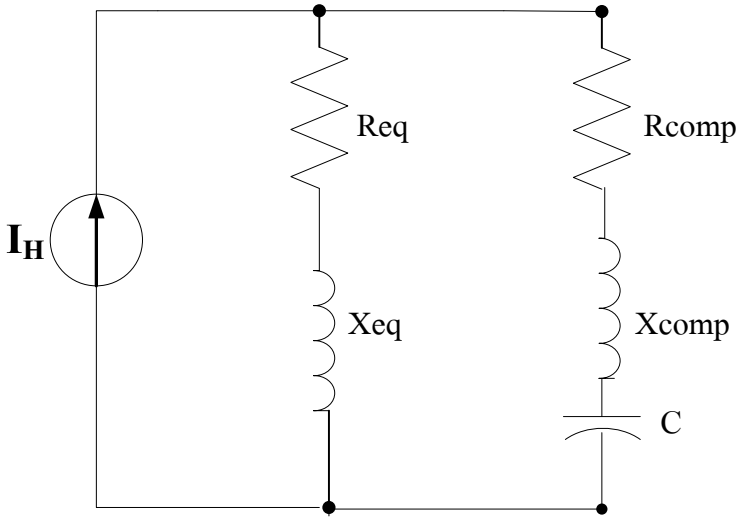
$$\beta_c = \frac{Z_{ch}}{Z_{sh} + Z_{ch} + Z_{comp}} \tag{2.24}$$

โดยที่ Z_{comp} = อิมพิแดนซ์ของตัวรีแอคเตอร์ที่นำมาชดเชย

Z_{sh} = อิมพิแดนซ์ของระบบ ที่ h

Z_{ch} = อิมพิแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ ที่ h

βc = อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่คาปาซิเตอร์



ภาพที่ 2.7 วงจรชดเชยค่ารีแอคเตอร์