

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจากกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุแรงดันต่ำร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้มาจากโหลดทางไฟฟ้าที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและได้นำปัญหาฮาร์มอนิกดังกล่าวมาวิเคราะห์หาความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจากตัวเก็บประจุที่ต่อร่วมกับหม้อแปลง

2.1 ฮาร์มอนิก

2.1.1 นิยามของฮาร์มอนิก

นิยามของฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ของสัญญาณหรือปริมาณคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ต่าง ๆ

ความถี่มูลฐาน (Hz)	ความถี่ฮาร์มอนิก (Hz)	ฮาร์มอนิกลำดับที่
50	50	1
	100	2
	150	3
	200	4
	250	5
	300	6
	350	7
	400	8
	450	9
	500	10
	550	11

โดยในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้อนุกรมฟูริเยร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกได้ โดยสัญญาณหรือฟังก์ชันคาบใด ๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีความถี่ต่าง ๆ ดังสมการที่ (2.1)

$$f(t) = a_0 \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \quad (2.1)$$

โดยที่

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

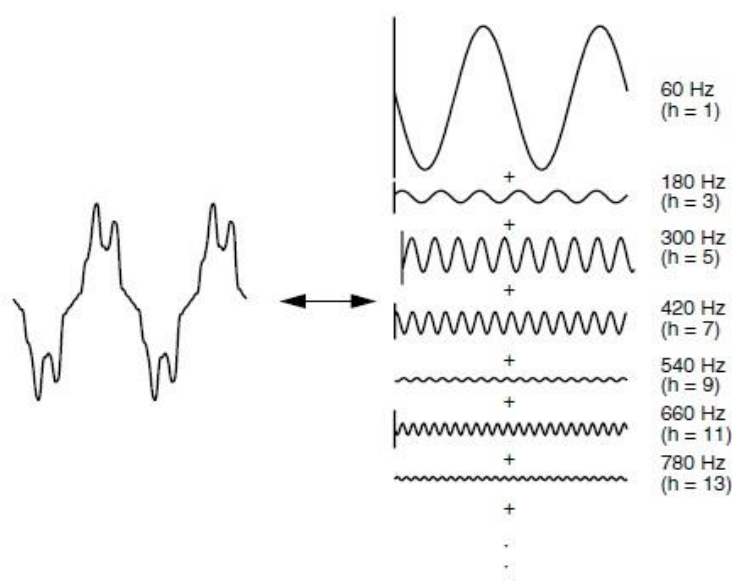
$$a_n = \frac{2}{T} \int f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

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

เมื่อ T คือ คาบเวลา (Second)
 n คือ เลขจำนวนเต็มบวก
 ω_0 คือ ความถี่มูลฐาน (Hz)

2.1.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic Distortion)

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก คือ การเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้าจากสัญญาณรูปคลื่นสัญญาณไซน์ โดยเกิดจากการรวมกันของค่าความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกอื่นๆ เข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การรวมกันของค่าความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกอื่น ๆ [7]

1. ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเฉพาะ (Individual Harmonic Distortion, IHD)

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกเฉพาะ คือ อัตราส่วนฮาร์มอนิก (Harmonic Ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบฮาร์มอนิกต่อค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่มูลฐานเป็นร้อยละ

2. ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion, THD)

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม คือ อัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่มูลฐานเทียบเป็นร้อยละดังในสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$\%THD(Voltage) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_{h(rms)}^2}}{V_{1(rms)}} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$\%THD(Current) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_{h(rms)}^2}}{I_{1(rms)}} \times 100\% \quad (2.3)$$

- เมื่อ $V_{h(rms)}$ คือ ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h (V)
 $I_{h(rms)}$ คือ ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h (A)
 $V_{1(rms)}$ คือ ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (V)
 $I_{1(rms)}$ คือ ค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (A)
 N คือ จำนวนลำดับฮาร์มอนิกทั้งหมด

2.1.3 ประเภทของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ฮาร์มอนิก

คือ ส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

2. อินเตอร์ฮาร์มอนิก

คือ ส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่มูลฐาน

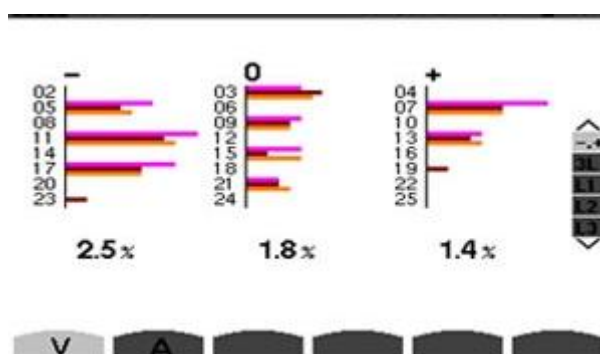
2.1.4 ลำดับฮาร์โมนิก

เมื่อมีกระแสหรือแรงดันที่มีส่วนประกอบของฮาร์โมนิกสามารถวิเคราะห์ลำดับของฮาร์โมนิก [7] ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

(-) แสดงอันดับของแรงดันฮาร์โมนิกที่เป็นลำดับลบ (Negative Sequence) ได้แก่ 2, 5, 8, 11, ...

(0) แสดงอันดับของแรงดันฮาร์โมนิกที่เป็นลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ได้แก่ 3, 6, 9, 12, 15, ...

(+) แสดงอันดับของแรงดันฮาร์โมนิกที่เป็นลำดับบวก (Positive Sequence) ได้แก่ 1, 4, 7, 10, ...



รูปที่ 2.2 แสดงลำดับฮาร์โมนิกของแรงดัน

2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

สาเหตุของการเกิดฮาร์โมนิกส์เกิดจากการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ไว้ในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่มีค่าความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น

2.2.1 ฮาร์โมนิกส์เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น

สามารถแบ่งตามคุณลักษณะการทำงานจะมีดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปชนิด 1 เฟส

ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในภาคอุตสาหกรรม

ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ ตัวเรียงกระแสไฟฟ้ากำลัง ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้

3. อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ก

ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ เตาหลอมแบบอาร์ก เครื่องเชื่อมแบบอาร์ก

4. อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกลไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปรวบรวมอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ (อ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE Std 519-1992) ได้ดังนี้

2.2.2 คอนเวอร์เตอร์แบบสแตติก (Static Converter)

ได้นำมาใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นที่อยู่อาศัย สำนักงานหรือโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพสูง คอนเวอร์เตอร์แบบสแตติกขนาดเล็กจะเป็นอุปกรณ์เฟสเดียวโดยใช้งานในอุปกรณ์จำพวกเครื่องรับโทรทัศน์ วิทยุ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้านและสำนักงาน ในกรณีคอนเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่จะเป็นสามเฟส ใช้ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า จากกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์กระแสไฟฟ้าตรง ใช้อัดประจุในแบตเตอรี่หรือใช้ในกระบวนการเคมี เช่น ใช้แยกสารละลาย หรือใช้ชุบโลหะ

2.2.3 เตาหลอมโลหะแบบอาร์ค และเครื่องเชื่อมแบบอาร์ค

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปของพลังงานโดยตรงระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับความร้อน หลักการทำงาน คือ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำในหัวอาร์ค กระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกส่งผ่านจากหัวอาร์คไปยังชิ้นงานโดยผ่านอาร์ค เมื่อตัวชิ้นงานได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปทำให้ระยะอาร์คมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหัวอาร์คมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยทำให้เกิดการไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของกระแสไฟฟ้าขึ้น หรือ ก็คือ เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นนั่นเอง อุปกรณ์อาร์คนี้มีการใช้งานเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก และในอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยการเชื่อมโลหะ เช่น โรงผลิตตัวถังรถยนต์ เป็นต้น

2.2.4 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้า (Static VAR Compensator)

เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้ารีแอคทีฟ ที่ใส่เข้าไปในระบบไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ปรับสถานะของพลังงานไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการ อันได้แก่ ชดเชยกำลังไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้า รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าลดระดับแรงดันกระแสเพื่อม และปรับปรุงค่า Power Factor เนื่องจากวงจรของอุปกรณ์เหล่านี้ประกอบด้วย ไทริสเตอร์ ที่ใช้ในการควบคุมการนำกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ควบคุมนี้จะมีรูปสัญญาณเปลี่ยนไป ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น

2.2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter for Dispersed Generation)

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรไฟฟ้าอย่างหนึ่งซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าตรงเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ (DC to AC) เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าสลับให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ หรือ

อาจจะใช้ประกอบในวงจรเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าตรง เนื่องจากวงจรอินเวอร์เตอร์ประกอบด้วยไทรสเตอร์ต่อเป็นวงจรเพื่อใช้ในการควบคุมการนำกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของการนำกระแสไฟฟ้า เกิดเป็นฮาร์มอนิกส์ขึ้น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับการแปลงไฟฟ้าเพื่อจ่ายกลับให้กับระบบมี 2 ชนิด คือ อินเวอร์เตอร์เฟสเดียว และอินเวอร์เตอร์สามเฟส โดยอินเวอร์เตอร์สามเฟสจะก่อปัญหาด้านฮาร์มอนิกส์มากกว่าอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว เนื่องจากขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงกว่ามาก ส่วนอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว เนื่องจากขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สูงมาก แต่หากมีการต่อใช้งานเป็นจำนวนมากภายใต้สายป้อน (Feeder) ชุดเดียวกัน ก็จะก่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้

2.2.6 อุปกรณ์การควบคุมเฟสแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Phase Control)

เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมการนำกระแสไฟฟ้าที่มุมต่าง ๆ ของแต่ละไซเคิล โดยความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จะมีค่าคงเดิม อุปกรณ์ควบคุมเฟสแบบอิเล็กทรอนิกส์นี้จะมีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นเนื่องมาจากการทำงานของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับจึงทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น ตัวอย่างการใช้งานอุปกรณ์ประเภทนี้ ได้แก่ ใช้ในการควบคุมความร้อนที่จ่ายออกมาจากฮีตเตอร์ และควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2.7 ไซโครคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแปลงความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับแบบโดยตรง โดยความถี่ของสัญญาณขาออกที่ได้มักจะมีค่าความถี่ต่ำกว่าสัญญาณขาเข้าและมักจะมีค่าความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่ขาเข้าวงจรไซโครคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบไทรสเตอร์ ซึ่งจะถูกรับควบคุมการทำงานโดยใช่วงจรควบคุมเฟสแบบโมดูลเลท ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ขึ้น ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟความถี่สูงให้กับเตาหลอมเหล็กชนิดเหนียว และใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2.8 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์โหมด (Switch Mode Power Supplies)

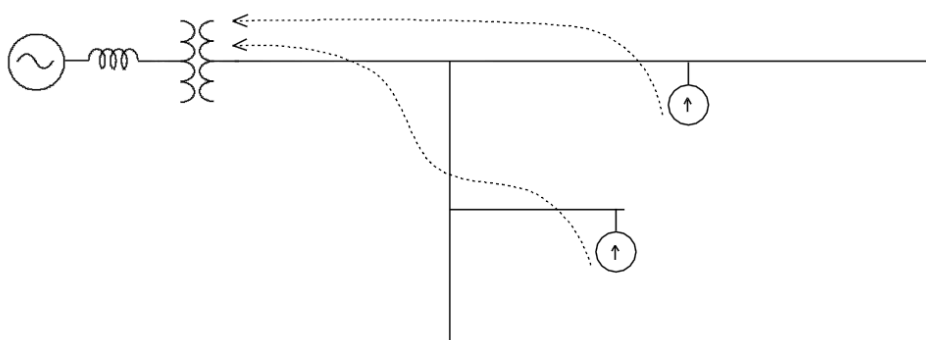
เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย วงจรไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ หรือมีค่าใกล้เคียงค่าคงที่มากที่สุด วงจรคอนเวอร์เตอร์จะมีไทรสเตอร์เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้าสำนักงาน และอุปกรณ์เครื่องมือสื่อสาร

2.2.9 ระบบส่องสว่างแบบฟลูออเรสเซนต์

ระบบส่องสว่างที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน มีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบธรรมดา และหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำเร็จรูป (Compact Fluorescent) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตามจะต้องมีการใช้งานบัลลาสต์เพื่อควบคุมการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดไฟฟ้า บัลลาสต์ที่ใช้งานจะมี 2 แบบ คือแบบแกนเหล็ก และแบบอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งสองแบบต่างก็ทำให้เกิดความเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าขึ้นในขณะเปิดไฟจะมีการอาร์คขึ้นที่ขั้วหลอดไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วหลอดจะมีค่าไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ขึ้น ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าบัลลาสต์แบบอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นมากกว่าบัลลาสต์แบบแกนเหล็ก และผลจากการทดสอบพบว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาดเล็กสำเร็จรูปจะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์มากที่สุดในการบรรดาหลอดฟลูออเรสเซนต์ทั้งหมด

2.3 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

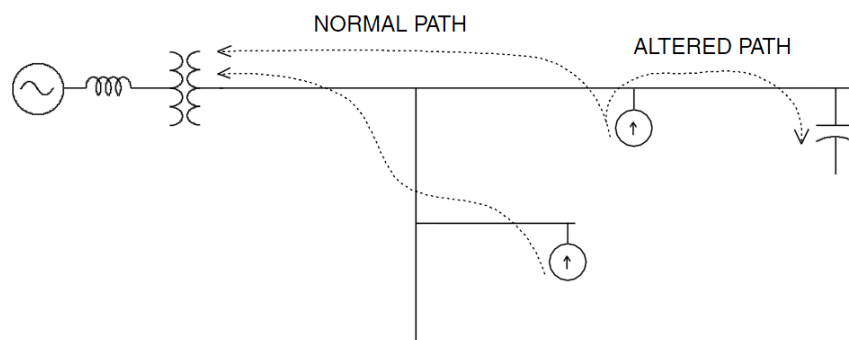
แนวโน้มหลักคือกระแสฮาร์มอนิกไหลจากโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกไปยังแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้า หากมองจากกระแสฮาร์มอนิกส์ปกติแล้วอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำ ดังนั้นแนวโน้มของกระแสไฟฟ้าจึงไหลไปยังแหล่งจ่าย จากรูปที่ 2.3 แนวโน้มการไหลของกระแสฮาร์มอนิกนี้จึงสามารถนำมาใช้ในการค้นหาแหล่งจ่ายของฮาร์มอนิกส์ได้โดยใช้เครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถรายงานข้อมูลฮาร์มอนิกจากกระแสไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.3 แนวโน้มของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไปยังแหล่งจ่าย [7]

โดยการวัดกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละวงจรโดยเริ่มจากวงจรต้นทางและติดตามฮาร์มอนิกไปยังแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ชุดตัวเก็บประจุที่ใส่เข้ามาในระบบเพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของฮาร์มอนิกส์ การใส่ชุดตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบดังรูปที่ 2.4 กระแสฮาร์มอนิกจำนวนมากไหลไปสู่ส่วนหนึ่งของวงจร ในสถานการณ์ดังกล่าวการไหลของกระแส

ฮาร์โมนิกจะไหลเข้าไปสู่ชุดตัวเก็บประจุแทนที่จะเป็นแหล่งที่มาของฮาร์โมนิกที่แท้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจัดการเชื่อมต่อชุดตัวเก็บประจุทั้งหมดชั่วคราว เพื่อที่จะสามารถหาแหล่งกำเนิดของฮาร์โมนิกที่เชื่อถือได้



รูปที่ 2.4 กระแสฮาร์โมนิกไหลเข้าสู่ชุดตัวเก็บประจุที่ต่อเข้ามาเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง [7]

2.4 การเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า

2.4.1 อิมพีแดนซ์ของระบบ

ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า คือ ความต้านทานการลัดวงจรไปยังจุดบนเครือข่ายที่ตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่ ถ้าไม่สามารถใช้ได้โดยตรงก็สามารถคำนวณได้จากผลการศึกษาการลัดวงจรที่ให้ทั้งพิกัดกำลังลัดวงจร MVA_{SC} หรือกระแสลัดวงจร I_{SC} ดังในสมการที่ (2.4) [10]

$$Z_{SC} = R_{SC} + jX_{SC} = \frac{kV^2}{MVA_{SC}} = \frac{kV}{MVA_{SC}} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3}I_{SC}} \quad (2.4)$$

- เมื่อ Z_{SC} คือ ค่าอิมพีแดนซ์เมื่อเกิดการลัดวงจร (Ω)
 R_{SC} คือ ค่าความต้านทานเมื่อเกิดการลัดวงจร (Ω)
 X_{SC} คือ ค่ารีแอคแตนซ์เมื่อเกิดการลัดวงจร (Ω)
 kV คือ ค่าพิกัดแรงดันเฟส (kV)
 MVA_{SC} คือ ค่ากำลังงานที่ปรากฏของหม้อแปลงเมื่อเกิดลัดวงจร (MVA)
 I_{SC} คือ ค่าพิกัดกระแสเมื่อเกิดการลัดวงจร (A)

Z_{sc} เป็นปริมาณเฟสเซอร์ซึ่งประกอบด้วยทั้งค่าความต้านทานและ ค่ารีแอคแตนซ์อย่างไรก็ตาม ถ้าข้อมูลการลัดวงจรไม่มีข้อมูลเฟส คือ ข้อจำกัดหนึ่งในการคำนวณ ดังนั้นมักคิดเฉพาะค่ารีแอคแตนซ์ การสมมติฐานนี้ดีพอสมควรสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมและระบบ โดยเฉพาะบัสที่ต่อกับระบบหลักและระบบจำหน่าย ค่ารีแอคแตนซ์เหล่านี้จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปตามเชิงเส้นด้วยความถี่ ข้อผิดพลาดที่เกิดโดยปกติเกิดจากผู้เริ่มต้นวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่ลิมปรีแอคแตนซ์โดยความถี่ที่ค่ารีแอคแตนซ์ฮาร์มอนิกลำดับที่ h จะถูกคำนวณได้จากสมการที่ (2.5) [7] ค่ารีแอคแตนซ์ที่เป็นอิมพีแดนซ์มูลฐาน X_1 ดังนี้

$$X_h = hX_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ X_h คือ ค่ารีแอคแตนซ์ฮาร์มอนิกลำดับที่ h (Ω)

X_1 คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐาน (Ω)

ในระบบไฟฟ้าส่วนมากโดยทั่วไปสามารถยอมให้ค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงความสำคัญเมื่อมีการศึกษาผลกระทบจากผลที่เกิดขึ้นน้อยมาก ๆ จะพบว่า เกิดขึ้นกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 9 เป็นต้นไป เช่น สายไฟ กับสายเคเบิล ค่าความต้านทานจะแปรเปลี่ยนตามรากที่สองของความถี่ทันทีที่เกิดปรากฏการณ์ สกินเอฟเฟกต์เนื่องจากความถี่ของกระแสภายในตัวนำไฟฟ้า แต่ก็ยังมีข้อยกเว้นสำหรับบางหม้อแปลง เพราะว่ามีกระแสสูญเสียไหลวนเนื่องมาจากค่าความต้านทานของหม้อแปลงขนาดใหญ่ พบว่าค่าความต้านทานเกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนตามความถี่ จึงเป็นประโยชน์ต่อการป้องกันสภาวะเรโซแนนซ์ แต่ในหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กกว่า 100 กิโลโวลต์แอมป์ พบว่า ค่าความต้านทานของขดลวดจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ดังนั้นค่าความต้านทานทั้งหมดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยจนกระทั่งความถี่มีค่าถึง 500 เฮิร์ตซ์ หม้อแปลงขนาดเล็กจะมีค่า X/R จะเป็นอัตราส่วนตั้งแต่ค่า 1 ถึง 2 ที่ความถี่มูลฐาน ในขณะที่หม้อแปลงขนาดใหญ่ที่สถานีไฟฟ้าย่อย จะมีอัตราส่วนตั้งแต่ 20 ถึง 20 เพราะฉะนั้นถ้าในสายส่งมีการติดตั้งหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจะถูกพิจารณาเป็นพิเศษ โดยจะมีการละเลยค่าความต้านทานทั่วไป เพื่อให้การทำนายความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกดีขึ้นพิจารณาแรงดันไฟฟ้า เช่น ระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีระบบรีแอคแตนซ์สมมูลซึ่งจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงบริการ การประมาณ X_{sc} จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงฝั่งขาเข้าดังนี้

$$X_{sc} \approx X_{ix}$$

เมื่อ X_{ix} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงฝั่งขาเข้า (Ω)

โดยความถูกต้องจะมีค่าโดยประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของอิมพีแดนซ์ทั้งหมดและค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง [7] สามารถคำนวณได้จากเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ซึ่งระบุไว้ในป้ายเนมเพลท ดังนี้

$$X_{tx} = \frac{kV^2}{MVA_{3\phi}} \times Z_{tx} (\%) \quad (2.1)$$

เมื่อ $Z_{tx} (\%)$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

$MVA_{3\phi}$ คือ ค่ากำลังงานที่ปรากฏของหม้อแปลงสามเฟส (MVA)

ค่า $MVA_{3\phi}$ จะเป็นค่าพิคกิโลโวลต์แอมป์ของหม้อแปลง จึงมีการสมมติว่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงมีค่ามากกว่าค่ารีแอคทีฟมาก เช่น หม้อแปลง 1,500 กิโลโวลต์แอมป์, 6 % ของหม้อแปลง, อิมพีแดนซ์สมมูลของหม้อแปลงด้าน 480 V มีค่า

$$X_{tx} = \frac{kV^2}{MVA_{3\phi}} \times Z_{tx} (\%)$$

$$X_{tx} = \frac{0.480^2}{1.5} \times 0.06$$

$$X_{tx} = 0.0092 \Omega$$

2.4.2 อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ

ชุดตัวเก็บประจุถูกใช้เพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ หรือในระบบส่งจ่ายเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุไม่สร้างฮาร์โมนิกแต่อาจจะก่อให้เกิดความผิบนองของแรงดันหรือกระแสได้ โดยขณะที่ค่าความต้านทานเชิงเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามความถี่พบว่าค่าความต้านทานเชิงความจุ X_c จะลดลงตามไปด้วยดังสมการที่ (2.7) [7]

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.7)$$

เมื่อ X_c คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (Ω)

f คือ ความถี่ (Hz)

C คือ ค่าความเก็บประจุของชุดตัวเก็บประจุ (F)

พิกัด X_C จะขึ้นอยู่กับในเทอมของ $kVAR$ หรือ $MVAR$ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.8) [7]

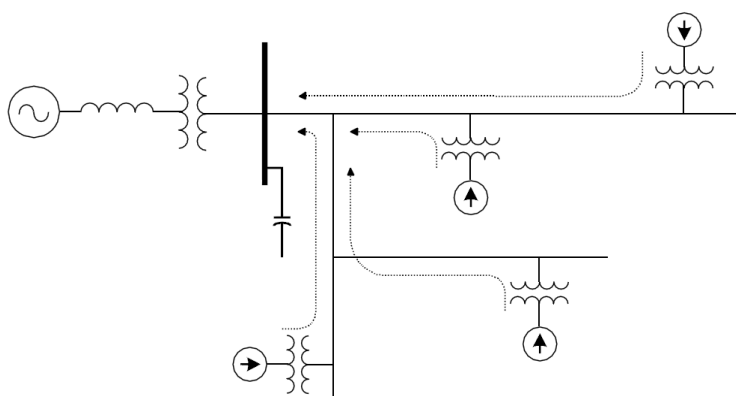
$$X_C = \frac{kV^2}{MVAR} \quad (2.8)$$

พิกัดกิโลวาร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8)

$$VAR = 2\pi fV^2C \quad (2.9)$$

2.4.3 เรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance)

วงจรที่ประกอบไปด้วย ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่ธรรมชาติความถี่เดียวหรืออาจจะมากกว่าหนึ่งความถี่ในวงจร อาจก่อให้เกิดการเรโซแนนซ์แบบขนาน เมื่อค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำเท่ากับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ผลรวมความต้านทานในวงจรจะเพิ่มขึ้นสูงมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ การกระตุ้นของวงจรเรโซแนนซ์ขนานมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงตกคร่อมอิมพีแดนซ์ และก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงมากไหลภายในวงจร จึงเป็นปัญหาที่พบมากจากการเกิดฮาร์โมนิกที่ผิดเพี้ยนในระบบไฟฟ้า จากรูปที่ 2.5 แสดงวงจรระบบส่งจ่ายที่อาจเกิดปัญหาเรโซแนนซ์ได้ จากวงจรสมมูลพบว่าเป็นการต่อขนานกันระหว่างตัวเก็บประจุ กับ ขดลวดเหนี่ยวนำในระบบจากแหล่งจ่ายและหม้อแปลง โดยมีความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ ในระบบดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้เมื่อยอมให้มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสมมูลที่ความถี่ฐานเท่านั้น แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในวงจรจะกลายเป็นลูกถ้วยวงจร



รูปที่ 2.5 ปัญหาเรโซแนนซ์แบบขนานที่อาจเกิดขึ้นในระบบ [7]

จากรูปที่ 2.5 แสดงวงจรระบบส่งจ่ายที่อาจเกิดปัญหาเรโซแนนซ์จากวงจรสมมูลพบว่าเป็นการต่อขนานกันระหว่างตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำในระบบจากแหล่งจ่ายและหม้อแปลง

การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะปรากฏเมื่อค่าความต้านของตัวเก็บประจุ (X_C) และค่าความต้านของขดลวดเหนี่ยวนำ (X_L) ในระบบหักล้างกันพอดี ค่าความถี่ในขณะที่เกิดเรโซแนนซ์จะถูกรเรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.10) [7]

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}} \quad (2.10)$$

เมื่อ f_p คือ ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน (Hz)
 L_{eq} คือ ค่าความเหนี่ยวนำรวมของแหล่งจ่ายและหม้อแปลง (H)
 C คือ ค่าความเก็บประจุของชุดตัวเก็บประจุ (F)

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการรวมกันแบบขนานระหว่างค่าความเหนี่ยวนำกับค่าความเก็บประจุจะมีค่ามาก ดังสมการที่ (2.11) [7]

$$Z_p = \frac{X_C(X_{Leq} + R)}{X_C + X_{Leq} + R} = \frac{X_C(X_{Leq} + R)}{R}$$

$$Z_p \approx \frac{X_{Leq}^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = QX_{Leq} = QX_C \quad (2.11)$$

โดย Z_p คือ ค่าอิมพีแดนซ์ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน (Ω)
 X_{Leq} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำรวมของแหล่งจ่ายและหม้อแปลง (Ω)
 Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor)
 R คือ ค่าความต้านทานรวมของแหล่งจ่ายและหม้อแปลง (Ω)

เมื่อ $Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}$
 $R \ll X_{Leq}$

ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในสมการคำนวณที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยกระแสไฟฟ้าขณะเกิดเรโซแนนซ์ที่ไหลในระบบจะมีปริมาณหลายเท่าของกระแสรั่มอนิก

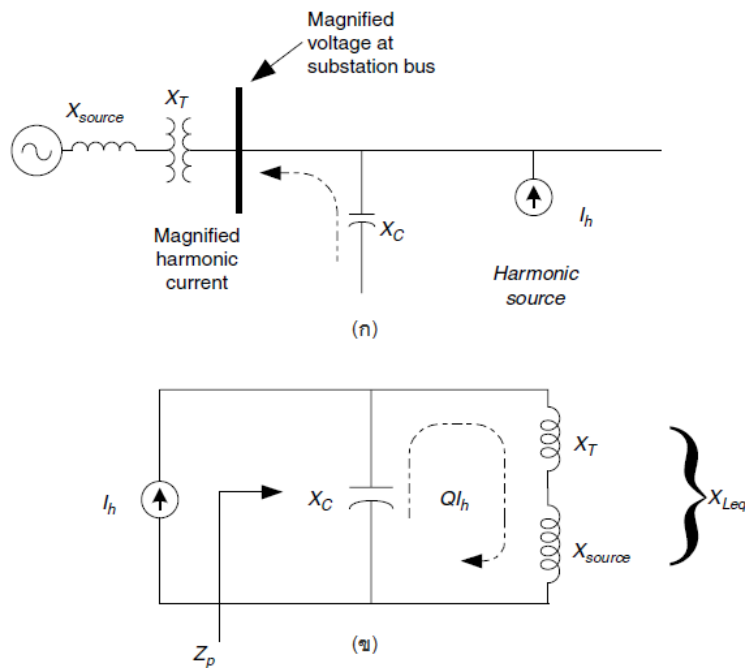
$$I_{resonance} = \frac{V_p}{X_C} = \frac{QX_C I_h}{X_C} = QI_h \quad (2.12)$$

$$I_{resonance} = \frac{V_p}{X_{Leq}} = \frac{QX_{Leq} I_h}{X_{Leq}} = QI_h \quad (2.13)$$

เมื่อ V_p คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน (V)

$I_{resonance}$ คือ กระแสไฟฟ้าขณะเกิดเรโซแนนซ์ (A)

จากสมการที่ (2.12) [7] และ (2.13) [7] เป็นสมการกระแสไฟฟ้าขณะเกิดเรโซแนนซ์ที่ไหลในชุดตัวเก็บประจุและในระบบที่มีตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีค่าเป็น Q เท่าของกระแสฮาร์โมนิก ดังนั้นเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดสภาวะเรโซแนนซ์จะก่อให้เกิดความเสียหายกับชุดตัวเก็บประจุ ฟิวส์ หรือหม้อแปลงไฟฟ้า



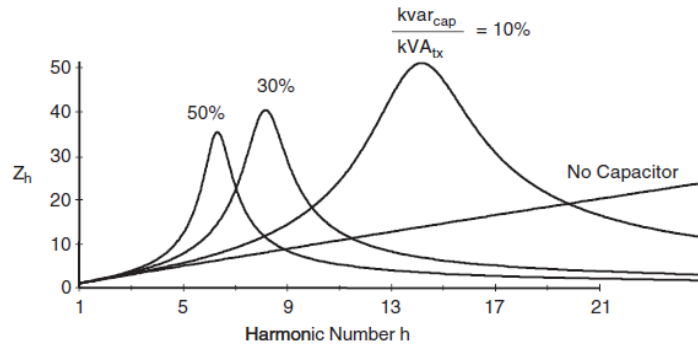
รูปที่ 2.6 ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกอยู่ในระบบ [7]

(ก) วงจรระบบจำหน่าย

(ข) วงจรเรโซแนนซ์

จาก รูปที่ 2.6(ก) แสดงผลจากการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบไฟฟ้าโดยติดตั้งใกล้กับหม้อแปลงที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ รูปที่ 2.6(ข) แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงและชุดตัวเก็บ

ประจุที่วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานโดยมีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก (I_h) ที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้งานอยู่ในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 อิมพีแดนซ์และการตอบสนองความถี่ที่ฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานเมื่อเพิ่มขนาดของชุดตัวเก็บประจุมากขึ้น [7]

รูปที่ 2.7 แสดงอิมพีแดนซ์และการตอบสนองความถี่ที่ฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน เมื่อไม่มีการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ของระบบจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่อความถี่สูงขึ้นและเมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบก็จะเกิดการตอบสนองแบบเรโซแนนซ์ขนานและเมื่อขนาดของชุดตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นความถี่เรโซแนนซ์ก็จะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.8 จากรูปกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากโหลดที่ใช้งานในระบบไฟฟ้าตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร จะเกิดการขยายแรงดันที่ความถี่ของฮาร์โมนิกอันดับนั้นๆ จึงส่งผลให้แรงดันที่หม้อแปลงเกิดความผิดปกติ (THD_v) และเมื่อเกิดแรงดันขดลวดสูงมากๆ จะส่งผลให้เกิดอันตรายกับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่ได้รับแรงดันนี้ และแรงดันที่ตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุก็มีสูงเกินพิกัดการทำงานอันเป็นสาเหตุให้เสียหายรุนแรงหรือระเบิดได้ โดยลำดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์แบบขนานคำนวณได้จากสมการที่ (2.14) [7]

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVAR_{cap}}} \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{tx}(\%)}} \quad (2.14)$$

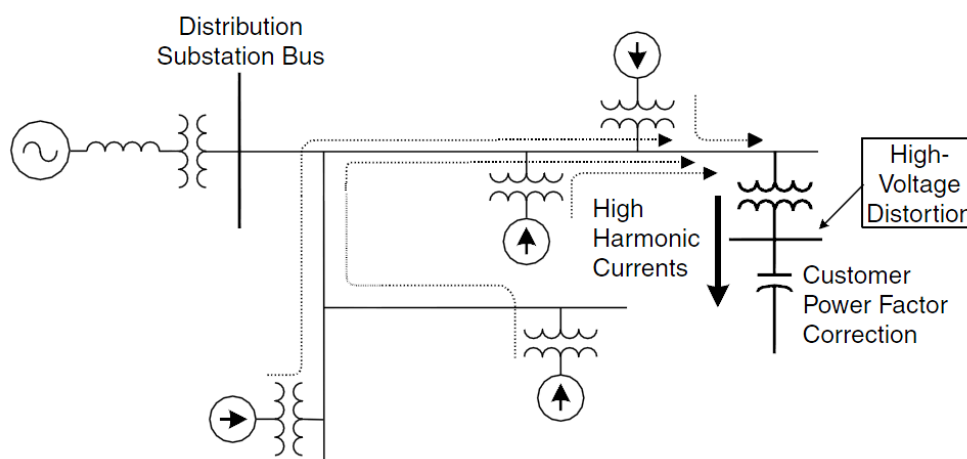
เมื่อ h_r คือ ลำดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์แบบขนาน

kVA_{tx} คือ ค่ากำลังงานที่ปรากฏที่พิกัดของหม้อแปลง (kVA)

$kVAR_{cap}$ คือ ค่ากำลังงานรีแอคทีฟที่พิกัดของชุดตัวเก็บประจุ (kVAR)

2.4.4 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance)

เมื่อมีการต่อชุดตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำของหม้อแปลงหรือระบบสายส่ง ในบางกรณีอาจจะมีวงจรตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออนุกรม ปรากฏขึ้นมาซึ่งเป็นที่มาของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ถ้าความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น วงจรตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะดึงดูดกระแสฮาร์มอนิกที่ส่วนใหญ่ถูกสร้างในระบบจัดจำหน่าย หากผู้ใช้ไฟฟ้าที่ไม่มีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่ใช้ตัวเก็บประจุในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ อาจประสบกับปัญหาแรงดันฮาร์มอนิกที่ผิดเพี้ยนสูงและอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก สถานการณ์เช่นนี้จะแสดงในรูปที่ 2.8



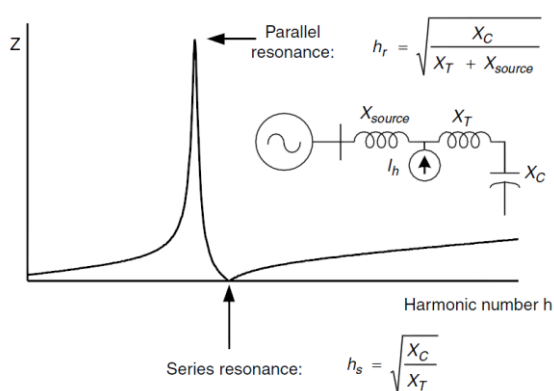
รูปที่ 2.8 ระบบที่อาจจะเกิดปัญหาเรโซแนนซ์แบบอนุกรม [7]

ในระหว่างช่วงเรโซแนนซ์ ตัวปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกับหม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะแสดงวงจรอย่างง่ายในรูปที่ 2.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่แสดงในรูป แสดงให้เห็นถึงฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ถูกสร้างโดยโหลดอื่น ๆ ขดลวดเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ ค่ารีแอคแตนซ์ของการอนุกรมกันของขดลวดหม้อแปลงเหนี่ยวนำและชุดตัวเก็บประจุ ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในระบบจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่ค่าความต้านทาน ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ตรงกับกับความถี่เรโซแนนซ์จะไหลได้อย่างอิสระในวงจรดังกล่าว แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะขยายและผิดเพี้ยนอย่างรุนแรง ซึ่งปรากฏตามสมการที่ (2.15) [7]

$$V_s = \frac{X_c}{X_T + X_C + R} V_h = \frac{X_c}{R} V_h \quad (2.15)$$

- เมื่อ V_S คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (V)
 V_h คือ แรงดันฮาร์โมนิกที่ตรงกันกับกระแสฮาร์โมนิก (V)
 I_h คือ กระแสฮาร์โมนิก (A)
 X_T คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลง (Ω)

ความต้านทานของวงจรเรโซแนนซ์ฮาร์โมนิกที่มีค่าน้อยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการซึมซับกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการได้ และเกิดการเรโซแนนซ์ฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ขนานจะเกิดขึ้นจากวงจรที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการตอบสนองต่อความถี่ในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม [7]

การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่ารีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายขนานกับค่ารีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุส่งผลให้ความถี่ของเรโซแนนซ์แบบขนานที่มีค่าต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรมอื่นเนื่องมาจากค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย หากค่าความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.14) [7] และความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานได้จากสมการที่ (2.15) [3]

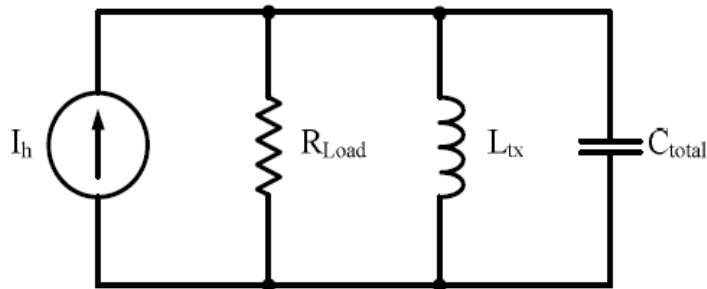
$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_{source}}} \quad (2.16)$$

$$h_s = \sqrt{\frac{X_C}{X_T}} \quad (2.17)$$

- เมื่อ X_{source} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่าย (Ω)

2.5 อิมพีแดนซ์ของระบบที่ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 2.10 เป็นวงจรสมมูลของระบบเมื่อมีการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบที่มีหม้อแปลง และมีกระแสฮาร์โมนิกไหลอยู่ในระบบมีโอกาสเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นซึ่งจะทำให้ อิมพีแดนซ์ในวงจรมีค่าสูงมาก



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลเมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุในระบบที่มีหม้อแปลง

เมื่อ R_{Load} คือ ความต้านทานของหม้อแปลงขณะที่โหลดเต็มพิกัดในการเลือกใช้วิธีการหาค่า R_{Load} โดยให้เท่ากับวิธีการหาค่า R_{AC} (ความต้านทานของหม้อแปลงในขณะที่โหลดเต็มพิกัด) เนื่องจากในความเป็นจริงนั้นการหา R_{Load} ของโหลดทั้งหมดภายในระบบในขณะนั้นทำได้ยาก จึงเลือกใช้ค่าความต้านทานของหม้อแปลงในขณะที่โหลดเต็มพิกัดมาใช้ในการประมาณค่า

$$\begin{aligned}
 Y &= \frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + \frac{1}{X_C} + \frac{1}{X_L} \\
 &= \frac{1}{R} + \omega C + \frac{1}{j\omega L} \\
 &= \frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \\
 Z &= \frac{1}{\frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)} \\
 |Z| &= \frac{1}{|Y|} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{Load}} \right)^2 + \left(\omega C_{total} - \frac{1}{\omega L_{tx}} \right)^2}}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

- โดย Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (Ω)
 Y คือ ค่าความนำไฟฟ้า (mho)
 R_{Load} คือ ค่าความต้านทานของโหลด (Ω)
 C_{total} คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมของชุดตัวเก็บประจุในวงจรขนาน (F)
 L_{tx} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง (H)

2.6 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันและกระแส

ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า คือ ค่าอัตราส่วนของกำลังงานที่ใช้จริง (Real Power :P) หารด้วยค่ากำลังงานที่ปรากฏ (Apparent Power :S) ดังแสดงในสมการที่ (2.19) โดยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดการทำงานจริงกับขนาดของกำลังงานทั้งหมดที่ต้องการจากระบบไฟฟ้า โดยส่วนที่เกินจากกำลังงานที่ใช้ทำงานจริงจะเรียกว่า กำลังงานรีแอคทีฟ (Reactive Power) ตามมาตรฐานในประเทศนั้นขีดจำกัดค่าตัวประกอบไฟฟ้า (Power Factor) ต้องมีค่ามากกว่า 0.85 ปัจจุบันถ้าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 0.85 จะเสียค่าปรับกิโลวาร์ที่เกินไปคิดเป็นกิโลวาร์ละ 56.07 บาท

$$Power\ Factor = \frac{P}{S} = \frac{Watt}{VA} \quad (2.19)$$

จากสมการข้างต้นเป็นการคำนวณหาตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบที่ไม่มีปัญหาฮาร์มอนิก แต่เมื่อในระบบไฟฟ้าเกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวมในระบบสามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) [12]

$$Total\ Power\ Factor = \frac{P}{S} \times \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2} \times \sqrt{1+THD_v^2}} \quad (2.20)$$

- โดย P คือ ค่ากำลังงานที่ใช้จริง (W)
 S คือ ค่ากำลังงานที่ปรากฏ (VA)
 THD_i คือ ค่าความผิดเพี้ยนทางกระแส
 THD_v คือ ค่าความผิดเพี้ยนทางแรงดัน

- กรณีไม่มีแรงดันฮาร์โมนิกโดยมีเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกในระบบ

$$\text{Total Power Factor} = \cos \theta \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (2.21)$$

โดย $\cos \theta$ คือ Displacement Power Factor

$\frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$ คือ Distortion Power Factor

2.7 อุปกรณ์สำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอเตอร์ พัดลม ปั๊มน้ำ ต่างต้องการทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในการทำงาน ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จึงมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นแบบตามหลัง (Lagging) อุปกรณ์ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ได้แก่ ตัวเก็บประจุ หรือ ชิงโครนสมอเตอร์ และถ้าในระบบไฟฟ้ามีกระแสฮาร์โมนิกจะนำตัวเหนี่ยวนำมาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสฮาร์โมนิกความถี่สูงไหลเข้าตัวเก็บประจุ เรียกว่า คิจุณฟิลเตอร์

2.7.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุและสามารถคายประจุได้โดยนำ 2 ชิ้นมาวางใกล้กันแต่ไม่ติดกันโดยระหว่างตัวนำทั้งสองจะมีฉนวนอยู่ตรงกลางซึ่งเรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) โดยสารไดอิเล็กตริกนี้ทำมาจาก พลาสติก, ไม้ก้ำ, เซรามิก, อากาศหรือสารที่มีสภาพเป็นฉนวน โดยค่าการเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) [1]

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.22)$$

โดย C คือ ค่าการเก็บประจุ (F)

ϵ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้าในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก

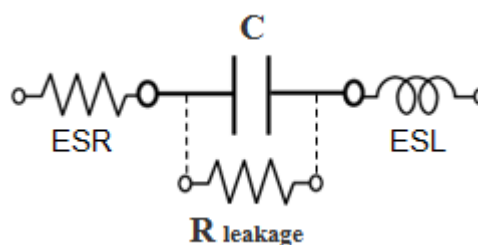
A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (m^2)

d คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำ (m)

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก

<i>Dielectric material</i>	<i>Relative dielectric constant</i> ϵ_r
Vacuum	1
Air (1 atmosphere)	1.00059
Polystyrene	2.5
Polypropylene	2.5
Polycarbonate	2.8
Polyethylene-terephthalate	3
Impregnated paper	2 - 6
Mica	6.5 - 8.7
Al ₂ O ₃	7
Glass	4 - 9.5
Ta ₂ O ₃	10 - 25
Ceramic	20 -12,000

จากรูปที่ 2.11 แสดงรูปวงจรเสมือนของตัวเก็บประจุ ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานรั่วไหลในตัวเก็บประจุ ($R_{leakage}$) ,ค่าความต้านทานเสมือนที่ต่ออนุกรมในตัวเก็บประจุ (ESR) เป็นค่าความต้านทานรวมของส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นตัวกำหนดกำลังงานสูญเสียของตัวเก็บประจุ และค่าความเหนี่ยวนำเสมือนที่ต่ออนุกรมในตัวเก็บประจุ (ESL) เป็นค่าความเหนี่ยวนำรวมของส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.11 วงจรเสมือนของตัวเก็บประจุ

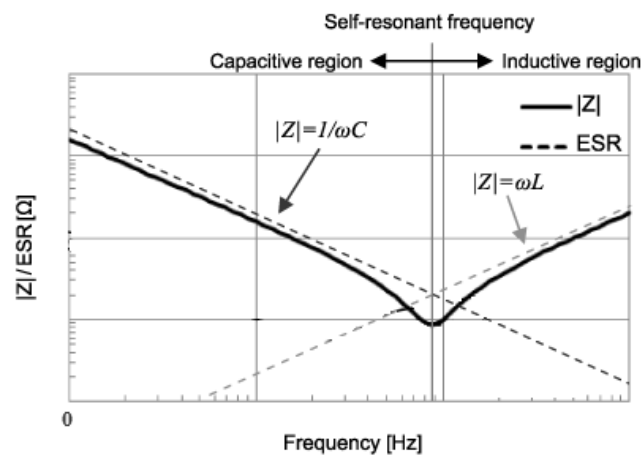
จากวงจรดังรูปที่ 2.11 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุได้ตามสมการที่ (2.23) [1] และสามารถหาค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์ได้ดังสมการที่ (2.24)

$$Z_C = ESR + jX_C = ESR + j\omega ESL - \frac{j}{\omega C} \quad (2.23)$$

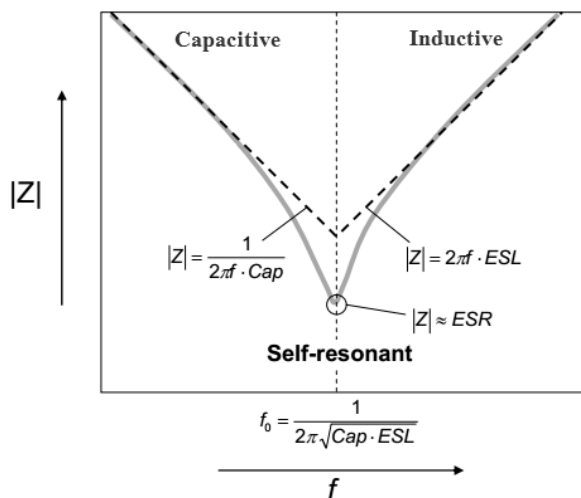
$$|Z_C| = \sqrt{ESR^2 + \left(\omega ESL - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.24)$$

- โดย Z_C คือ ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเก็บประจุ (Ω)
 X_C คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (Ω)
 ESR คือ ค่าความต้านทานอนุกรมเสมือนของตัวเก็บประจุ (Ω)
 ESL คือ ค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมเสมือนของตัวเก็บประจุ (H)
 C คือ ค่าการเก็บประจุ (F)
 ω คือ ความถี่เชิงมุม (Rad/S.)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์จะแสดงดังในรูปที่ 2.12 และกราฟแสดงคุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุจะแสดงดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุเมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง [11]



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงความถี่ของตัวเก็บประจุ [11]

1. การเลือกพิกัดตัวเก็บประจุสำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบไฟฟ้า

การเลือกใช้ตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสามารถอ้างอิงคุณสมบัติของตัวเก็บประจุตามมาตรฐานสากล (IEEE Standard for Shunt Power Capacitors) พิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับ 110 เปอร์เซ็นต์ของ V_{rms} และ 120 เปอร์เซ็นต์ของ V_{peak} พิกัดกระแสของตัวเก็บประจุเท่ากับ 135 เปอร์เซ็นต์ของ I_{rms} พิกัดกิโลวาร์เท่ากับ 135 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดกิโลวาร์ที่ต้องการของระบบไฟฟ้า โดยขนาดกิโลวาร์ของตัวเก็บประจุแต่สามารถแบ่งตามพิกัดแรงดันได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พิกัดแรงดันและกำลังงานรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุใช้งาน

Volts	kvar	Number of phases
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20, and 25	1 and 3
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, and 50	1 and 3
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, and 100	1 and 3
2400	50, 100, 150, 200, 300, and 400	1 and 3
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400, and 500	1 and 3
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 and 600	1 and 3
2400	50, 100, 150, 200, 300, and 400	1 and 3
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400, and 500	1 and 3
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 and 600	1 and 3

2. ตัวเก็บประจุสำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม (Film-Capacitor) ไดอิเล็กทริกที่นิยมใช้คือ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งชนิดของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์มแสดงดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของตัวเก็บประจุชนิดฟิล์ม

ชนิดตัวเก็บประจุ	รายละเอียด
KP	film-foil polypropylene
MMKP	polypropylene capacitors with double sided metallized film electrodes
MKP	polypropylene capacitors with single sided metallized film electrodes

ในการเลือกใช้งานตัวเก็บประจุไปใช้งานสามารถพิจารณาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้

-พิกัดตัวเก็บประจุ (Rate Capacitance) คือ พิกัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่อุณหภูมิห้อง ($20 \pm 5^{\circ}\text{C}$) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความจุทางไฟฟ้าจะลดลง

-พิกัดแรงดัน (Rate Voltage) คือ พิกัดแรงดันสูงสุดที่ตัวเก็บประจุสามารถใช้งานได้

-พิกัดกระแส (Rate Current) คือ พิกัดกระแสสูงสุดที่ตัวเก็บประจุทำงานต่อเนื่อง

-ความถี่ (Frequency) คือ ความถี่ใช้งานของตัวเก็บประจุ

-ความถี่ใช้งานสูงสุด(Maximum working frequency)คือความถี่สูงสุดที่ตัวเก็บประจุทำงานได้

-พิกัดกำลังงานรีแอคทีฟ (Rate Reactive power) คือ พิกัดกำลังงานรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุ

-กระแสกระชาก (Inrush Current) คือ ค่ากระแสกระชากของตัวเก็บประจุเมื่อเริ่มต้นเก็บประจุ

-ตัวประกอบการสูญเสีย (Dissipation Factor: D.F.) คือ กำลังงานสูญเสียที่ตัวเก็บประจุต่อพิกัดกิโลวาร์ของตัวเก็บประจุ (W /kVAR) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่ากำลังงานสูญเสียจะเพิ่มมากขึ้น

-ความต้านทานอนุกรม (R_s) คือ ค่าความต้านทานอนุกรมในตัวเก็บประจุที่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนภายในตัวเก็บประจุ

-ความต้านทานอนุกรมเสมือนของตัวเก็บประจุ (ESR) คือ ค่าความต้านทานอนุกรมเสมือนของตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 2.25 [12]

$$ESR = R_s + \frac{D.F.}{2\pi fC} \quad (2.25)$$

โดย ESR คือ ค่าความต้านทานอนุกรมเสมือนของตัวเก็บประจุ (Ω)

R_s คือ ค่าความต้านทานอนุกรมในตัวเก็บประจุ (Ω)

$D.F.$ คือ ตัวประกอบการสูญเสียของตัวเก็บประจุ (W/kVAR)

f คือ ความถี่ (Hz)

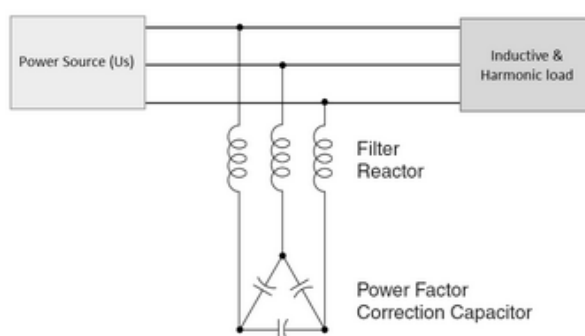
C คือ ค่าประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (F)

2.7.2 ซิงโครนัสมอเตอร์

การแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) ขับโหลดเชิงกลในโรงงาน โดยเป็นการติดตั้งแทนมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ที่ใช้งานอยู่เดิมหรือติดตั้งขึ้นมาใหม่ ซิงโครนัสมอเตอร์มีประสิทธิภาพการทำงานสูง เหมาะกับโหลดที่ต้องการประสิทธิภาพด้านความเร็วที่มีความคงที่สูงมีขนาดอย่างต่ำ 20 แรงม้า (HP) ขึ้นไป แต่การแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในโรงงานจะเกิดขึ้นต่อเมื่อซิงโครนัสมอเตอร์เริ่มทำงานเท่านั้น หรือจะใช้ซิงโครนัสมอเตอร์แก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอย่างเดียวโดยไม่ใช้กับโหลดในโรงงาน

2.7.3 ดิจูนฟิลเตอร์

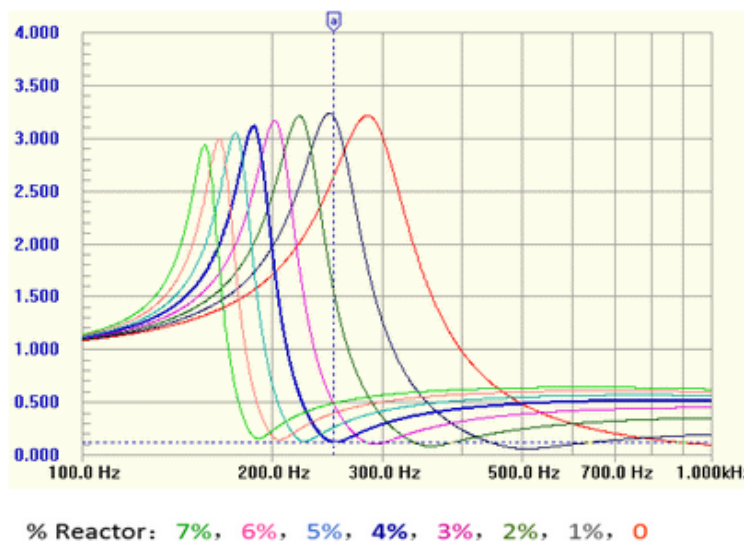
ระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างกระแสฮาร์โมนิกจำนวนมาก เมื่อต้องการปรับปรุงค่าตัวประกอบไฟฟ้าด้วยชุดตัวเก็บประจุอาจจะทำให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้าซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือชุดตัวเก็บประจุเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้นหรือเกิดการระเบิดของตัวเก็บประจุได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่จะนำมาแก้ปัญหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีปัญหาฮาร์โมนิกนั้น จำเป็นต้องสามารถทำงานได้ดีในสถานะที่มีกระแสฮาร์โมนิกอยู่ในระบบไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่นิยมใช้ได้แก่ ดิจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter) อุปกรณ์ที่ถูกเรียกว่ารีแอคเตอร์คือตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สามารถทำงานที่ค่าล่งงานสูงได้โดยอาจจะถูกสร้างโดยใช้ลวดตัวนำพันอยู่บนแกนเหล็กหรือแกนอากาศก็ได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบจากรูปที่ 2.14 แสดงการติดตั้งรีแอคเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อใช้งานในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.14 การติดตั้งดิจูนฟิลเตอร์ [12]

ค่าเปอร์เซ็นต์รีแอคเตอร์ที่ถูกกล่าวถึงในงานออกแบบติดตั้งดิจูนฟิลเตอร์นั้นก็คืค่าอัตราส่วนเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ของอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์รีแอคเตอร์เทียบกับคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ใช้เพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อคำนวณที่ความถี่สายสาเหตุที่ใช้ค่าเปอร์เซ็นต์

แอกเตอร์เป็นตัวแปรในการออกแบบหรือติดตั้งดีจูนฟิลเตอร์นั้นก็เพื่อความสะดวกในการกำหนดค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการและใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติการตอบสนองเชิงความถี่และความสามารถในการกำจัดหรือลดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบหลังการติดตั้งดีจูนฟิลเตอร์จากรูปที่ 2.15 [12] แสดงกราฟการตอบสนองเชิงความถี่ของอัตราส่วนกระแสฮาร์โมนิกที่โหลดกำเนิดและส่วนของกระแสฮาร์โมนิกที่ผ่านการกรอง



รูปที่ 2.15 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของอัตราส่วนการลดทอนของดีจูนฟิลเตอร์เมื่อใช้

เปอร์เซ็นต์รีแอกเตอร์ที่ค่าต่าง ๆ [12]

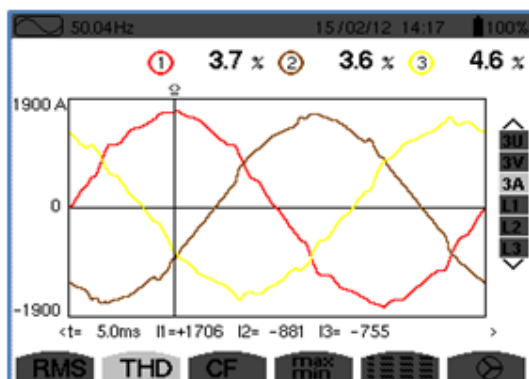
2.8 สาเหตุของตัวเก็บประจุมีอายุการใช้งานสั้นหรือเสียหาย

ตัวเก็บประจุที่ใช้งานสำหรับวัตถุประสงค์ในการแก้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้น อย่างน้อยที่สุดควรจะมีอายุการใช้งานต่อเนื่องเกิน 2 ปี ที่อุณหภูมิไม่เกิน 46 องศาเซลเซียส (อ้างอิงจากเอกสารรับประกันคุณภาพการใช้งานจากผู้ผลิตตัวเก็บประจุ) สาเหตุหลักที่ทำให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุสั้นหรือเสียหายอย่างรุนแรงนั้นสามารถแบ่งออกได้ 3 สาเหตุดังนี้

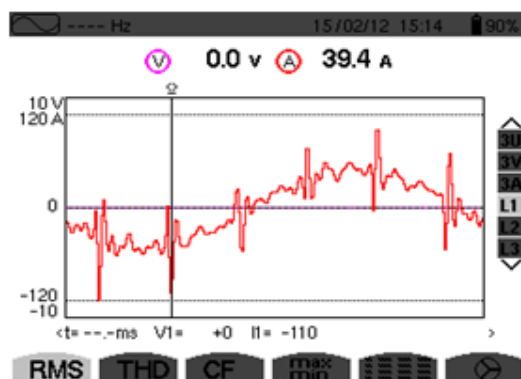
2.8.1 ตัวเก็บประจุขณะทำงานมีอุณหภูมิสูง

สาเหตุที่ทำให้ตัวเก็บประจุมีอายุการใช้งานสั้นหรือเสียหายระดับที่ไม่รุนแรงนั้นส่วนใหญ่จะเกิดจากอุณหภูมิขณะทำงานและความร้อนสะสมเนื่องจากกำลังงานสูญเสียในตัวเก็บประจุเองและสิ่งที่จะไปเร่งปรากฏการณ์นี้ได้แก่ แรงดัน และกระแสฮาร์โมนิกที่มีอยู่ในระบบ โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุ คือ จะเกิดค่ากระแสรอกที่ความถี่สูงไหลผ่านอันเป็นผลให้เกิดการสูญเสียจากค่าความ

ต้านทานอนุกรมเสมือนของตัวเก็บประจุ (ESR Loss) และการสูญเสียที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) ภายในของตัวเก็บประจุสูงจนทำให้วัสดุภายในตัวเก็บประจุเสื่อมสภาพและเกิดความร้อนสะสมภายในจนทำให้ค่าความจุไฟฟ้าและพิกัดกิโลวาร์ดลดลงในที่สุด



(ก)

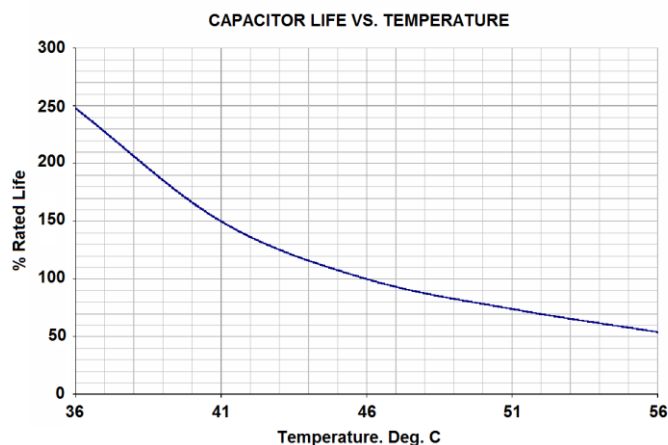


(ข)

รูปที่ 2.16 รูปคลื่นกระแสตัวเก็บประจุอันเป็นผลมาจากแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก

(ก) รูปคลื่นแรงดัน

(ข) รูปคลื่นกระแสของตัวเก็บประจุ

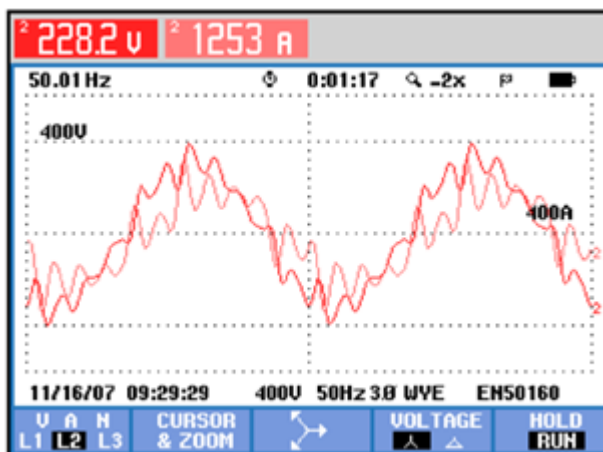


รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุกับอุณหภูมิขณะทำงาน

ในรูปที่ 2.17 จากกราฟจะเห็นได้ว่าอายุการใช้งานจะลดลงเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอ้างอิงที่ 46 องศาเซลเซียสและอายุการใช้งานจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการทำงานต่ำกว่า 46 องศาเซลเซียส

2.8.2 ค่าแรงดันขณะทำงานสูงเกินพิกัดของตัวเก็บประจุ

ความเสียหายจากกรณีนี้มีผลทั้งอายุการใช้งานที่สั้นลงดังแสดงในรูปที่ 2.20 หรือถ้าขนาดของแรงดันใช้งานสูงเกินพิกัดตัวเก็บประจุมากๆ ก็อาจเป็นสาเหตุให้ตัวเก็บประจุเสียหายอย่างรุนแรงได้ในทันที ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ โดยรูปคลื่นแรงดันและกระแสขณะเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าของระบบขณะเกิดเรโซแนนซ์

2.8.3 การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบที่มีฮาร์มอนิก

เกิดจากฮาร์มอนิกในการติดตั้งใช้งานตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องจักรที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นส่วนประกอบ เช่น อินเวอร์เตอร์ในระบบขับเคลื่อน หรืออุปกรณ์เพื่อการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนเป็นแหล่งกำเนิดหรือสาเหตุของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบแล้วจะทำให้แรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นที่ตัวเก็บประจุขณะทำงานสูงกว่าปกติหรืออาจเรียกว่าเกิดโอเวอร์โหลด (Over Load) ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงสะสมภายในซึ่งถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงมากเกินไปก็จะทำให้เกิดความดันสูงภายในโครงสร้างของตัวเก็บประจุอันเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดของตัวเก็บประจุได้

2.9 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำหนดขึ้นเพื่อกำหนดขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของระดับความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) และระดับความเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) ของอุปกรณ์ที่ใช้ใน

โรงงานอุตสาหกรรม โดยขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกในแต่ละลำดับจะแสดงในตารางที่ 2.5 และขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกของแรงดันจะแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิก [13]

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	อันดับฮาร์โมนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
22 , 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1	
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

ตารางที่ 2.6 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดัน [13]

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม ของแรงดัน (V_{THD} , %)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกของ แรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับที่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11, 12, 22 and 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

จากตารางที่ 2.6 และ 2.7 แสดงขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกที่ใช้ในประเทศไทย (อ้างอิงจากข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม) [13] ซึ่งจะระบุขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับเป็นปริมาณของกระแส โดยจะแสดงขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกตั้งแต่ลำดับที่ 2 ถึงลำดับที่ 19 ที่พิกัดแรงดันต่าง ๆ