

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของฮาร์มอนิกโดยจะได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับฮาร์มอนิกซึ่งได้นำเสนอเป็นหัวข้อต่าง ๆ ของฮาร์มอนิก เช่น นิยามของฮาร์มอนิก อนุกรมฟูรีเยร์ ประเภทของฮาร์มอนิก ผลกระทบของฮาร์มอนิก และ แนวทางในการแก้ไขปัญหา เป็นต้น เพื่อใช้ในการศึกษา และสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดจากผลกระทบของฮาร์มอนิก และสำหรับในโครงการนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์เพื่อใช้ในการทดลองค่าฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ได้

2.1 นิยามของฮาร์มอนิก [1]

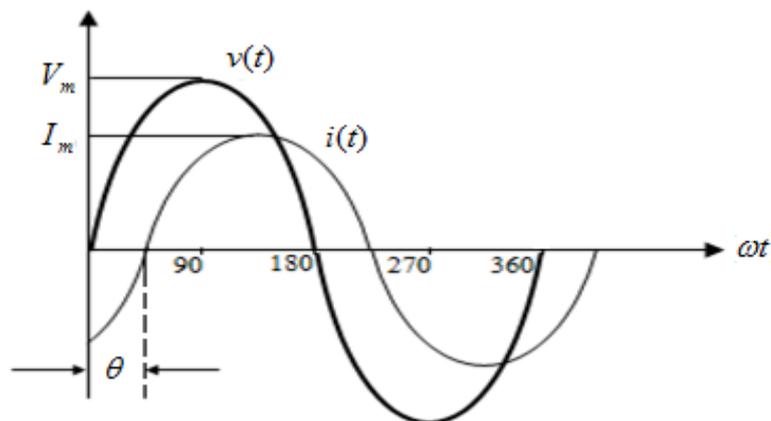
ไฟฟ้ากระแสสลับที่เราใช้งานกันอยู่ทุกวันนี้ โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่นของแรงดันและกระแสเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal wave) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 คลื่นของแรงดันและกระแสในภาพที่ 2.1 นี้เราสามารถเขียนเป็นสมการแสดงขนาดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

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

หรือ $v(t) = V_m \sin(2\pi f t)$ (2.1)

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

หรือ $i(t) = I_m \sin(2\pi f t - \theta)$ (2.2)



ภาพที่ 2.1 คลื่นของแรงดันและกระแสแบบรูปไซน์

- $v(t)$ = ขนาดของแรงดันในเวลา t ใด ๆ
 V_m = ขนาดสูงสุดหรือค่ายอดของแรงดัน
 $i(t)$ = ขนาดของกระแส ณ เวลา t ใด ๆ
 I_m = ขนาดสูงสุดหรือค่ายอดของกระแส
 f = ความถี่ของแรงดันและกระแส
 θ = ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน
 t = เวลา

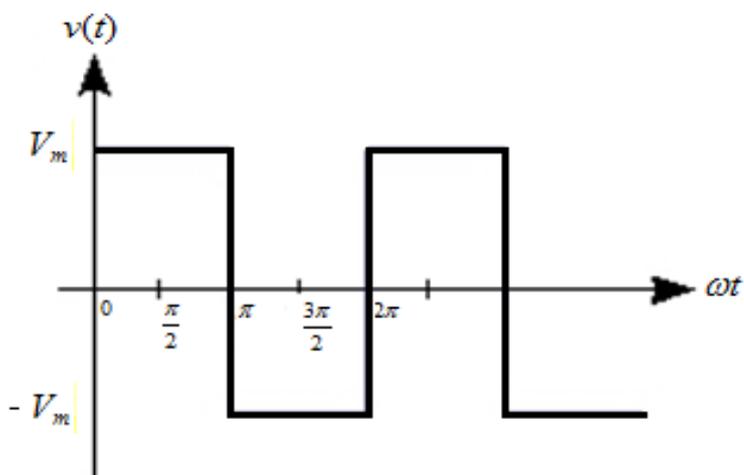
สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่จำเป็นต้องเป็นรูปไซน์ เช่น อาจเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ดังแสดงในภาพที่ 2.2

คลื่นของแรงดันภาพที่ 2.2 นี้ เราสามารถเขียนเป็นอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$v(t) = \frac{4}{\pi} V_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega t) \quad (2.3)$$

หรือ

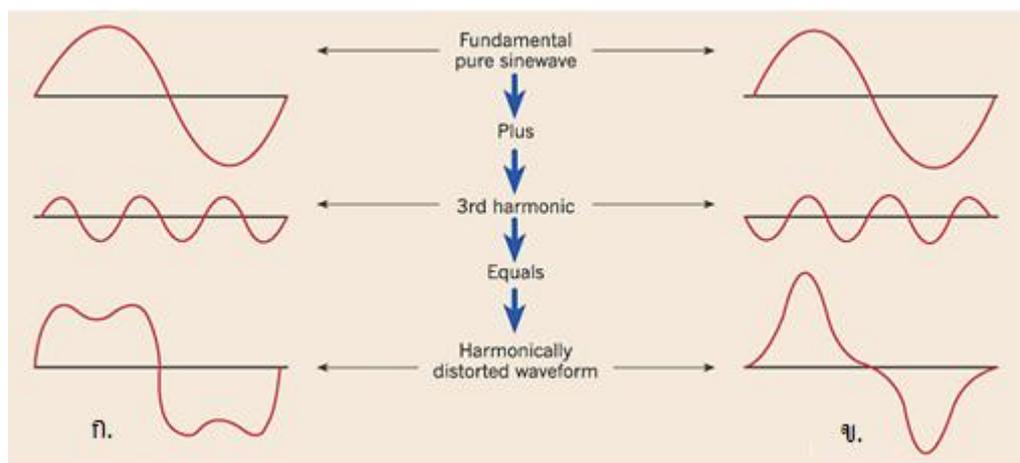
$$v(t) = \frac{4}{\pi} V_m \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{9} \sin(9\omega t) + \dots \right]$$



ภาพที่ 2.2 คลื่นของแรงดันแบบสี่เหลี่ยม

จากภาพที่ 2.2 และสมการที่ (2.3) นี้ จะพบว่าแรงดันที่มีรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะประกอบไปด้วยรูปคลื่นแบบไซน์ ที่มีขนาดและความถี่ต่าง ๆ จำนวนมากมาย

เพื่อแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างกัน เมื่อนำมารวมกันจะเกิดรูปคลื่นแบบต่าง ๆ ได้ เราสามารถแสดงเป็นตัวอย่างได้



ภาพที่ 2.3 คลื่นแบบไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน 3 เท่า

ก. รูปคลื่นแบบยอดแบน

ข. รูปคลื่นแบบยอดแหลม

ในภาพที่ 2.3 ก. นี้เป็นรูปคลื่นแบบยอดแบนเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุด ที่มีความถี่ต่างกัน 3 เท่ารวมกัน คือ

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) \quad (2.4)$$

ส่วนในภาพที่ 2.3 ข. เป็นรูปคลื่นแบบยอดแหลมเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุด ที่มีความถี่ต่างกัน 3 เท่าเหมือนภาพที่ 2.3 ก. มารวมกันแต่มีมุมเฟสต่างจากภาพที่ 2.3 ก. คือ

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) - V_3 \sin(3\omega t) \quad (2.5)$$

จากรูปคลื่นต่าง ๆ ที่กล่าวมาเราสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่ารูปคลื่นเหล่านั้นจะมีรูปร่างเป็นอย่างไร เช่นแบบไซน์ แบบสี่เหลี่ยม แบบยอดแบน หรือแบบยอดแหลม ต่างเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่าง ๆ จำนวนมากมารวมกัน

รูปคลื่น $V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ (2.1) หรือ $\frac{4}{\pi} V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ (2.3) หรือ $V_1 \sin(\omega t)$ ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) เราเรียกเป็นรูปคลื่นความถี่หลักมูล (fundamental wave) ส่วนรูปคลื่นอื่น ๆ ที่มีความถี่ต่างไปจากรูปคลื่นความถี่หลักมูลเป็นจำนวน n เท่า โดยที่ $n = 2, 3, 4, \dots$ เช่น $\frac{4}{\pi} V_m \frac{1}{3} \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ (2.3) หรือ $V_3 \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) ที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่หลักมูล เราเรียกเป็นรูปคลื่นฮาร์มอนิก โดยมีลำดับฮาร์มอนิกเป็น 3

ดังนั้นฮาร์มอนิกก็คือขนาดของแรงดันและกระแสที่มีความถี่ต่างไปจากความถี่หลักมูล ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแรงดัน หรือกระแสดังกล่าว สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ความถี่หลักมูลคือ 50 Hz ความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิก หรือกระแสฮาร์มอนิกซึ่งเป็น 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz ...

2.2 อนุกรมฟูเรียร์

การที่จะอธิบายว่ารูปคลื่นใด ๆ มีฮาร์มอนิกลำดับที่เท่าใดปนอยู่บ้าง และฮาร์มอนิกแต่ละลำดับนั้นมีปริมาณหรือขนาดมากน้อยแค่ไหน เราสามารถอธิบายได้ โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right]$$

$v(t)$ = ฟังก์ชันของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ

a_0 = ค่าเฉลี่ยของ $v(t)$

n = เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ (ลำดับของฮาร์มอนิก)

a_n และ b_n = สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

T = คาบเวลาของรูปคลื่น

เราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n \cos(n(2\pi ft - \phi_n))]$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} f &= \text{ความถี่} \\ C_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \phi_n &= \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \end{aligned}$$

2.3 ประเภทของฮาร์มอนิก

สามารถแบ่งฮาร์มอนิกออกเป็น 5 ประเภท คือ

2.3.1 ฮาร์มอนิก (Harmonics)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency)

2.3.2 อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic)

อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic) หมายถึง ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ที่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล ส่วนมากพบได้ในกระแสของโหลดประเภทเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) เนื่องจากในระหว่างการหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบเวลาของสัญญาณไม่เท่ากันทุกคาบ กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz จะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่ กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เท่ากับ 20 มิลลิวินาที

2.3.3 ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonics)

ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonics) หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยการแปลงผันทางไฟฟ้า แปลงจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง หรือ แปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (AC to DC or DC to AC) โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไคโอด SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส โดยลำดับของฮาร์มอนิกคุณลักษณะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7)

$$n = k \cdot q \pm 1 \quad (2.6)$$

เมื่อ

n = ลำดับของฮาร์โมนิกคุณลักษณะ

k = เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ (1, 2, 3...)

q = จำนวนพัลส์ (Pulse Number) ของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าต่อคาบ

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2.7)$$

เมื่อ

I_n = กระแสฮาร์โมนิกอันดับ n

I_1 = กระแสที่ความถี่หลักมูล (Fundamental)

n = ลำดับของฮาร์โมนิก

2.3.4 ฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non-characteristic Harmonics)

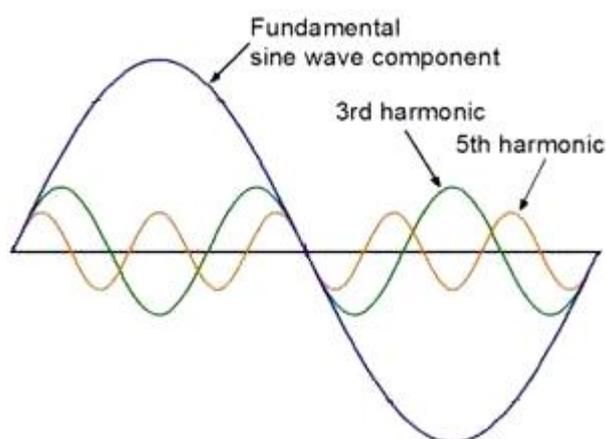
ฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Non-characteristic Harmonics) หมายถึง ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างขึ้น โดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าโดยลำดับของฮาร์โมนิกที่ไม่เป็นไปตามสมการ เช่น เครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีฮาร์โมนิกคุณลักษณะที่มีอันดับ 11, 13, 23, 25, 35 ดังนั้นถ้ามี ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5, 7, 17, 19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกเหล่านี้ ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

2.3.5 ฮาร์โมนิกลำดับที่สามหารลงตัว (Triple Harmonics)

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

2.4 ส่วนประกอบฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก (Harmonics) คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใด ๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยนั้นใช้ความถี่ 50 Hz ดังนั้นฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่ 150 Hz และฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 คลื่นส่วนประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 และอันดับที่ 5

2.4.1 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current)

กระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current) คือ ฮาร์มอนิกที่อยู่ ในรูปแบบของกระแสในระบบไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีน้อยทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในปัจจุบันในตลาดอุตสาหกรรมนั้น อุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ขยายตัวอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

2.4.2 แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonics Voltage)

แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonics Voltage) คือ เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านค่ารีแอกแตนซ์ของระบบรีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของค่าปาดเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (PF) หรือแรงดันให้ดีขึ้น ทำให้เกิดความ

ผิดเพี้ยนของรูปแรงดันอันเนื่องมาจากค่ารีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Harmonics Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

$$V_n = I_n \cdot Z_n \quad ; \quad \text{เมื่อ } n = 1, 3, 5, 7 \dots \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$V_n = \text{แรงดันฮาร์โมนิก}$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์โมนิกในระบบ}$$

กรณีในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกในระบบจำหน่ายคาปาซิเตอร์ไม่ได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิก แต่จากการต่อคาปาซิเตอร์เข้ากับระบบนั้นอาจจะมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอกแตนซ์ของระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายฮาร์โมนิก ถ้าเรโซแนนซ์ขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน หรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่าน ระหว่างรีแอกแตนซ์ของระบบ และรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์โมนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน (Distortion Factor) มีค่ามาก

2.4.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonics Distortion, THD)

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonics Distortion, THD) คือ อัตราส่วนระหว่างรากที่สองของผลบวกกำลังสอง ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิก (Harmonics component) กับค่า RMS ของส่วนประกอบของความถี่มูลหลัก (Fundamental component) เทียบเป็นร้อยละซึ่งจะแสดงสมการค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดันดังสมการที่ (2.9) และแสดงสมการค่าความเพี้ยนของ ฮาร์โมนิกรวมของกระแสดังสมการที่ (2.10)

$$THD (Voltage) = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + \dots}{V_1^2}} \quad (2.9)$$

$$THD (Current) = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots}{I_1^2}} \quad (2.10)$$

2.4.4 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor, QF)

ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor, QF) คือ อัตราส่วนของแรงดันตกคร่อมที่ X_L หรือ X_C ต่อแรงดันตกคร่อม R เรียกว่า Voltage Magnification ถ้าวงจร เรโซแนนซ์ที่รวมของ L และ C ที่ต่ออนุกรมกับ R จะมีค่า QF ดังสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.12)

$$QF = \frac{\omega L}{R} \quad (2.11)$$

เมื่อ

ωL = อินดักทีฟรีแอกแตนซ์

R = ความต้านทาน

$$QF = \frac{\omega_0}{PB} \quad (2.12)$$

เมื่อ

ω_0 = ความถี่กึ่งกลาง

PB = Pass Band

โดยค่า QF จะบ่งบอกให้ทราบถึงความกว้างของช่วงความถี่ที่จะยอมให้ผ่าน ถ้า QF มากตัวกรองที่ออกแบบนั้นจะทำการกรองแถบความถี่ให้ผ่านไปได้ในช่วงที่แคบมากขึ้น นั่นคือจะผ่านแถบความถี่ไปได้น้อยลง มีความชัน หรือ Sharpness มากขึ้น เมื่อเทียบกับความถี่กึ่งกลางทฤษฎีองค์ประกอบที่สมมาตร (Symmetrical Component)

2.4.5 ตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor, DPF)

ตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor, DPF) คือค่าโคไซน์ของมุมต่างเฟสระหว่างรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่ความถี่มูลฐาน นั่นคือ การนิยามจากค่าของฟังก์ชันโคไซน์, $\cos \theta$ ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยนั่นเองดังสมการที่ (2.13)

$$DPF = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.13)$$

2.4.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor, PF)

ตัวประกอบกำลัง (Power Factor, PF) คือ อัตราส่วนของกำลังจริง (W หรือ kW) ต่อ กำลังงานปรากฏ (VA หรือ kVA) อย่างไรก็ตาม รูปคลื่นของแรงดัน และกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) มุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแส ก็ได้

กรณีรูปคลื่นของแรงดันและกระแสอินพุตไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ได้จากสมการที่ (2.14)

$$PF = \frac{P_{Total}}{S_{Total}} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2 + V_3 I_3 + \dots + V_n I_n \cos \theta_n}{V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 + \dots + V_n I_n} \quad (2.14)$$

กรณีรูปคลื่นของกระแสอินพุตไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อย่างเดียว แรงดันมีความผิดเพี้ยนน้อย จะหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) ได้จากสมการที่ (2.15)

$$PF = \frac{V_S I_1}{V_S I_S} \cos \theta_1 = \frac{I_1}{I_S} \cos \theta_1 = DF \times DPF \quad (2.15)$$

เมื่อ

I_I = กระแส RMS ที่ความถี่หลักมูล

I_S = กระแส RMS ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

V_S = แรงดัน RMS ที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง

$\cos \theta_1$ = ค่าโคไซน์ของมุมระหว่างรูปคลื่นความถี่หลักมูลของ กระแสอินพุตและแรงดันอินพุต

2.4.7 ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน (Distortion Factor, DF)

DF (Distortion), HF (Harmonics Factor) และ THD (Total Harmonics Distortion) สามคำนี้มีความหมายใกล้เคียงกัน โดยที่ DF , HF และ THD มีการให้คำนิยามไว้ในมาตรฐาน IEEE 519-1992 ต่างก็ใช้ระบุปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล หรือเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมด ทั้งนี้แล้วแต่มาตรฐาน ต่าง ๆ จะกำหนดนิยามไว้

จาก IEEE 519-1992 ได้

$$DF_V = HF_V = THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2.16)$$

$$DF_I = HF_I = THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (2.17)$$

DF_V = ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน

DF_I = ค่าตัวประกอบความเพี้ยนของกระแส

HF_V = ค่าตัวประกอบฮาร์มอนิกของแรงดัน

HF_I = ค่าตัวประกอบฮาร์มอนิกของกระแส

2.5 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติ การไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่าง ๆ ของผู้ใช้ไฟ แต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางราย มีโหลดประเภท

ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกนั้น จะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเองและระบบไฟฟ้าข้างเคียง ผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพี้ยนไป จากรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ ด้วย ผลของกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง อาจไปรบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่น ๆ และอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้นเรามีความจำเป็นที่จะต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้น

2.6 ขนาดและการลำดับการเกิดของฮาร์มอนิก

ขนาดและลำดับของฮาร์มอนิกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ระดับพลังงานของระบบ ระบบอยู่ในสถานะโชนเนสหรือไม่ ที่ระดับพลังงานสูงสุดอาจทำให้เกิดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ได้ ฮาร์มอนิกเหล่านี้อาจเกิดจากอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียวที่สามารถเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิก ขณะกำลังใช้งานได้ปกติ ตัวอย่าง เช่น เต้าหลอมสามารถสร้างแรงดันฮาร์มอนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างช่วง 8%, 6% และ 2.5% ของแรงดันมูลฐานในขณะเริ่มการหลอมและหยุดหลอม

ลำดับการของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจาก Pulse-converter นั้นมีความสัมพันธ์กับจำนวนพัลส์ การวิเคราะห์คลื่นของกระแสจากแหล่งจ่ายโดยการใช้ฟูเรียร์ จะแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบและลำดับของ ฮาร์มอนิก ตามสมการที่ (2.16)

$$b = kp \pm 1 \quad (2.18)$$

k = Integer from Fourier analysis

p = Converter pulse number

ดังนั้นคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ จะสร้างฮาร์มอนิกที่ไม่สามารถหารด้วยสามได้ลงตัว ลำดับฮาร์มอนิกจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำดับที่สูงขึ้นตามจำนวนพัลส์ที่เพิ่มขึ้น

โหลดแบบ Non-linear สามารถสร้าง “triple” ซึ่งเป็นค่าทวีคูณของฮาร์มอนิกที่ 3 (ฮาร์มอนิกที่ 3, 6, 9...) ที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือ มันจะรวมกันในสายนิวตรอน ทำให้ขนาดของกระแสในสายนิวตรอนเพิ่มขึ้น

เตาหลอมโลหะเป็นอุปกรณ์ที่สร้าง triple ในขณะที่โหลดไม่สมดุล ซึ่งจะเกิดขึ้นในขณะที่เกิดการอาร์คที่อิเล็กโตรดส่งผลให้ฮาร์โมนิกเลขคี่มีขนาดเพิ่มขึ้นใน ขณะที่เกิดการอาร์ค เตาหลอมโลหะเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งมีขนาดเป็น 20% ของสัญญาณมูลฐาน

2.7 ผลกระทบของฮาร์โมนิก

ปัญหาอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกอาจพิจารณาได้เป็นสองประเด็น นั่นคือ ประเด็นแรกมีฮาร์โมนิกเกิดขึ้นในระบบไม่ตรงกับความเร็วเรโซแนนซ์ของระบบ สำหรับปัญหาฮาร์โมนิกประเด็นที่สองเป็นปัญหาใหญ่ที่จะกล่าวถึงวิธีแก้ไขในภายหลัง ส่วนประเด็นแรก แม้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายมากนัก แต่ก็ควรพิจารณาไว้ในรายละเอียด เพื่อให้เข้าใจในปัญหาที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้เพราะอุปกรณ์บางอย่างในระบบอาจจะเสียหาย หรือ ทำงานผิดพลาดเนื่องจากฮาร์โมนิกได้ ถ้าไม่เข้าใจความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์โมนิกจะไปสร้างปัญหาได้อย่างไร ก็อาจทำให้แก้ไขไม่ตรงกับเป้าหมาย สิ้นเปลืองทุนในการเปลี่ยนแปลงหรือซื้ออุปกรณ์โดยไม่จำเป็น

ในระบบที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ที่ฮาร์โมนิกความถี่สูง ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์จะมีค่าลดลง ทำให้มีกระแสฮาร์โมนิกไหลเข้าตัวคาปาซิเตอร์มากขึ้น ซึ่งทำให้ตัวคาปาซิเตอร์ร้อนจนระเบิดได้ นอกจากนี้ แต่ละความถี่อาจทำให้ระบบเกิดเรโซแนนซ์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้ง เรโซแนนซ์แบบอนุกรม และเรโซแนนซ์แบบขนาน ฮาร์โมนิกจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบดังต่อไปนี้

2.7.1 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อการเกิดเรโซแนนซ์

เรโซแนนซ์ (Resonance) คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่ง ผ่านวงจรไฟฟ้าได้ดีที่สุด หรือน้อยที่สุด (วงจรอนุกรมสัญญาณจะผ่านได้ดีที่สุด วงจรขนานจะผ่านได้ต่ำสุด) ปรากฏการณ์นี้สำคัญมากในทางสื่อสาร ในวงจรสวิตช์สายส่ง ระบบควบคุม เป็นต้น คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์ แฟกเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไปและส่งผลให้ คาปาซิเตอร์เสียหายได้ เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ ดังนี้

เรโซแนนซ์ขนาน คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับผ่านวงจรไฟฟ้าได้ น้อยที่สุด ผลของเรโซแนนซ์ขนาน จะทำให้เกิดค่าของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่าย ฮาร์โมนิกที่มีความถี่ เรโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของการเรโซแนนซ์แบบขนาน คือ การเพิ่มแรงดันฮาร์โมนิกและเกิดกระแสไหลในแต่ละสาขา วงจรเรโซแนนซ์มีค่าสูง แสดงการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่จุด Point of Common Coupling (PCC) ซึ่งสามารถแยกประเภทของการเกิดเรโซแนนซ์ได้ดังนี้

ก. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกกับคาปาซิเตอร์ที่บัสบาร์เดียวกัน ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ขนานหาได้จากสมการที่ (2.19) และ สมการที่ (2.20)

ข. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของระบบกับตัวกรองฮาร์มอนิก

ค. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของระบบกับคาปาซิเตอร์ของระบบ

ง. เรโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักเตอร์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์

$$f_p = f \frac{S_s}{S_c} \quad (2.19)$$

เมื่อ

f = ความถี่หลักมูล

f_p = ความถี่เรโซแนนซ์ขนาน

S_s = พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย

S_c = พิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_n)C_n}} \quad (2.20)$$

เมื่อ

L_s = อินดักเตอร์ของระบบ

L_n = อินดักเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ n

C_n = คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ n

ในกรณีที่จะตรวจสอบว่าเกิดเรโซแนนซ์ขนานหรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกในโหลดที่ต่ออยู่ในระบบแต่ละจุดและแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสบาร์แล้วทำการวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้น

เรโซแนนซ์อนุกรม คือ การเกิดปรากฏการณ์ของสัญญาณไฟสลับความถี่หนึ่งผ่านวงจรไฟฟ้า ได้ดีที่สุด เมื่อความถี่สูงมาก ๆ อาจทำให้โหลดถูกตัดออกจากระบบได้ เช่นเดียวกับเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ ซึ่งเกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์หาได้จากสมการที่ (2.21)

$$f_s = f_s \cdot \sqrt{\left(\frac{S_t}{S_c + Z_t}\right) - (S_1^2 - S_c^2)} \quad (2.21)$$

เมื่อ

f_s = ความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

S_t = พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า

Z_t = เปรอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

S_1 = พิกัดของโหลดความต้านทาน

S_c = พิกัดของคาปาซิเตอร์

ผลที่เกิดขึ้นจากรีโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสจะมีค่าสูง แรงดันฮาร์โมนิกจะมีค่าน้อยที่คาปาซิเตอร์ของตัวกรองฮาร์โมนิกเนื่องจากอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ ดังนั้นเรโซแนนซ์อนุกรมต้องคำนึงถึงกระแสเป็นส่วนมาก โดยมีผลดีกว่าแบบเรโซแนนซ์ขนาน ในส่วนของแรงดันฮาร์โมนิกมีค่าน้อยกว่า ในการพิจารณาฮาร์โมนิกจะพิจารณาเรโซแนนซ์อนุกรม

2.7.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้า มีค่าลดลง ระบบสายส่ง กระแสฮาร์โมนิกจะสร้างผลกระทบเนื่องจากกระแส 2 อย่าง คือ เพิ่มความสูญเสียของสายส่งจากการเพิ่มขึ้นของค่า *RMS* ของรูปคลื่นกระแส และเกิดแรงดันฮาร์โมนิกที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ในวงจร ดังนั้นระบบที่อ่อนแอจะเกิดผลกระทบกระเทือนของแรงดันมาก และมีระดับการพอสต์ต่ำส่วนระบบที่แข็งแรงจะมีความหมายที่ตรงข้ามกันแรงดันของฮาร์โมนิกก็จะทำให้เกิดความเครียดของฉนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสัดส่วนของค่ายอดของรูปคลื่น จะทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลง และฮาร์โมนิกยังมีผลกระทบต่อระดับการเกิดโคโรนาด้วย และหม้อแปลงไฟฟ้า ผลกระทบต่อหม้อแปลงมีดังนี้

ก. กระแสฮาร์โมนิก ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และ กำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) เพิ่มขึ้น

ข. แรงดันฮาร์โมนิก ทำให้กำลังสูญเสียกระแสวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น และความเครียดของฉนวนโดยถ้าแหล่งจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลงกำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.22)

$$P_{Core} = (k_1 f + k_2 f^2) \times V^2 \quad (2.22)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 P_{Core} &= \text{กำลังสูญเสียแกนเหล็ก} \\
 k_1 f &= \text{กำลังสูญเสียฮีสเตอร์รีซิส} \\
 k_2 f &= \text{กำลังสูญเสียกระแสนวนในแกนเหล็ก} \\
 V &= \text{แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย}
 \end{aligned}$$

ค. ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์มอนิก) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับสายคาปาซิเตอร์ (Line capacitor) จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งเกิดขึ้นกับความถี่โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกสูงจึงทำให้เกิดความร้อนแก่ หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิกต่ำ ๆ อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิก ต่อหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

2.7.3 ผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวนไฟฟ้า

ผลของแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า อาจทำให้ค่ายอดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากระดับแรงดันปกติ ซึ่งเป็นผลให้ความเครียดของฉนวนเพิ่มขึ้นสูง และผลของความร้อนนี้จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนที่ใช้ในระบบดังกล่าวลดลง

2.7.4 ผลกระทบที่ทำให้การทำงานของโรงจักรผิดพลาด

สวิทช์เกียร์ ผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกอาจทำให้ความชันของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า ในจุดที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ (Zero Crossing) นั้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรทำได้ยากขึ้น

เซอร์กิตเบรกเกอร์ กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น อาจจะมีผลทำให้ขดลวดที่ทำหน้าที่ ควบคุมการตัดต่อของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ในขณะที่ดวงจรรยาออกไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ให้ทำงานที่ความถี่หลักมูล ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถทำการดับอาร์คที่เกิดขึ้นได้และในที่สุด ก็จะเป็นผลให้เกิดความเสียหายขึ้นที่เซอร์กิตเบรกเกอร์

ฟิวส์ กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ฟิวส์ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุคุณสมบัติของการทำงานของฟิวส์ (Time Current Characteristic) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

รีเลย์ในระบบป้องกัน กระแสฮาร์มอนิกอาจทำให้หม้อแปลงกระแสที่ใช้ร่วมกับ ดิสแตนท์รีเลย์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการอิ่มตัวได้ ซึ่งจะทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดไป จากที่ทำการตั้งค่าไว้ที่ความถี่หลักมูล และอีกตัวอย่างหนึ่งก็คือใน กรณีการใช้ดิฟเฟอเรนเชียลรีเลย์ ในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลของ Inrush Current อาจจะทำให้รีเลย์ทำการปลดดวงจรรยาออกใน

ขณะที่เริ่มจ่ายพลังงานให้กับ หม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจาก Inrush Current จะทำให้เกิดผลต่างระหว่าง กระแสทางด้านเข้า และทางด้านออกของหม้อแปลงมีค่าสูง

2.7.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องวัดไฟฟ้า

ก่อนการใช้จะต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสสลับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่หลัก มูด ดังนั้น ถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบฮาร์มอนิก ค่าที่วัดได้จะผิดพลาด หรือกรณีเกิดเรโซแนนซ์ใน ระบบไฟฟ้า มีผลทำให้แรงดันฮาร์มอนิกค่าสูงในวงจร ทำให้มิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) เช่น มิเตอร์วัดค่า - ชั่วโมง ทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์มอนิก โดยทั่วไปการเพี้ยนของ ฮาร์มอนิกมากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

2.7.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า

ปัญหาของฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ เช่น

ก. ฮาร์มอนิกจะมีผลต่อแรงดันยอด (Peak Voltage) ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพ ของโทรทัศน์เปลี่ยนไป

ข. หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดเมอร์คิวไรด์ การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมี บัล ลาสต์บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย ซึ่งอาจเกิดเรโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของ บัลลัสต์ และวงจรเกิด ความร้อนสูงจนเกิดความเสียหายได้

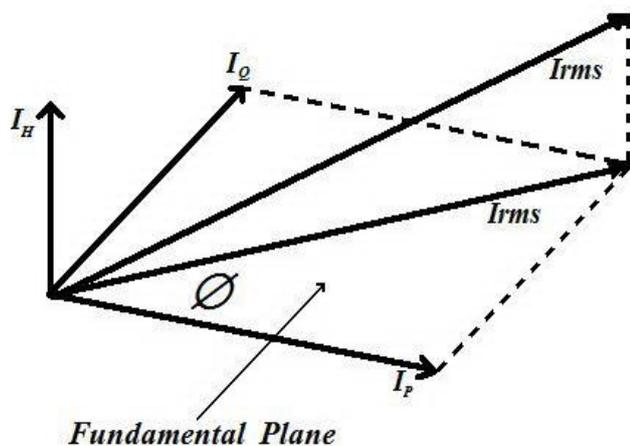
ค. คอมพิวเตอร์ จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิกอย่างมากทุกบริษัทที่มีขีดจำกัดฮาร์มอนิก ค่าหนึ่งทีเครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบแต่ละบริษัทถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกมาก กว่าขีดจำกัด จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหาย

2.7.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ (Low Level Noise) เช่น ในระบบโทรศัพท์ อาจก่อให้เกิดความรำคาญ ฮาร์มอนิกขณะเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติ หรือ มีเสียง รบกวน แต่สัญญาณรบกวนระดับสูง (High Level Noise) ฮาร์มอนิกทำให้คุณภาพลดลง และอาจ เกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือระบบสื่อสารถึงระดับใช้การไม่ได้

2.7.8 ผลกระทบต่อค่า Power Factor (PF)

ค่า Power Factor (PF) คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานจริง ซึ่งจะลดลง วิเคราะห์ได้จากเฟส เซอร์ไดอะแกรมดังภาพที่ 2.5 ซึ่งค่า DPF หาได้จากสมการที่ (2.23) ค่า HPF หาได้จากสมการที่ (2.24) และค่า PF หาได้จากสมการที่ (2.25)



ภาพที่ 2.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่ใช้ในการหาค่า Power Factor

$$DPF = \frac{I_P}{I_{rms}} \quad (2.23)$$

$$HPF = \frac{I_{rms}}{I_{rms}} \quad (2.24)$$

$$PF = \frac{I_P}{I_{rms}} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} I_P &= \text{กระแสไฟฟ้า RMS ของโหลดความร้อน} \\ \hat{I}_P + \hat{I}_Q &= \text{กระแสไฟฟ้า RMS ของโหลดเหนี่ยวนำและโหลดต้านทาน} \\ \hat{I}_P + \hat{I}_Q + \hat{I}_H &= \text{กระแสไฟฟ้า RMS ของโหลดจากผลของการใช้แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกกร่วม} \\ &\quad \text{กับโหลดเหนี่ยวนำและโหลดต้านทาน} \end{aligned}$$

การแก้ DPF ต้องลด I_Q เพื่อให้ I_{rms} มีค่าเท่ากับ I_P โดยการใช้ Capacitor Bank หรือ Active Filter

การแก้ HPF ต้องลด I_H เพื่อให้ I_{rms} มีค่าเท่ากับ I_{rms} โดยการ Active Filter หรือ เทคนิคการปรับรูปคลื่นกระแส

2.8 แนวทางในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

เมื่อระบบไฟฟ้ามีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) เป็นปริมาณมาก โหลดเหล่านี้จะให้กำเนิดฮาร์มอนิกขึ้น ทำการลดปริมาณฮาร์มอนิกโดยการลดขนาดของแรงดันและขนาดของกระแสที่ความถี่หนึ่งๆ หรือ ที่หลายๆ ความถี่ที่ไม่ต้องการ การลดปริมาณฮาร์มอนิกมีหลายวิธี แต่ละวิธีจะมีความยุ่งยากและราคาที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงได้พยายามคิดค้นหาวิธีต่างๆ ในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านในระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

2.8.1 ฮาร์มอนิกในระดับต่ำ จะไม่ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆ เนื่องจากมีฮาร์มอนิกในระบบไม่มากจึงไม่เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า

2.8.2 ฮาร์มอนิกในระดับปานกลาง มีฮาร์มอนิกมากขึ้น แต่ไม่ทำให้เกิดปัญหารุนแรงต่อระบบอุปกรณ์ไฟฟ้า แต่การติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงเพาเวอร์แฟกเตอร์ อาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าเกิดที่ความถี่ฮาร์มอนิกนั้น เปรียบเสมือนการขยายฮาร์มอนิกให้มีระดับรุนแรงขึ้นจนถึงคาปาซิเตอร์เสียหาย เกิดกำลังสูญเสีย และเกิดการสั้นสะเทือนในหม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป การแก้ไขทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดหรือติดตั้งคาปาซิเตอร์ หรือโดยการติดตั้งคิรจูนนิ่งฟิลเตอร์แบงก์ เพื่อป้องกันการเกิด เรโซแนนซ์ที่มีผลในการลดฮาร์มอนิกบางส่วนด้วย

ก. เปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ หรือเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์ การที่ระบบไฟฟ้ามีปัญหาฮาร์มอนิกนั้น ส่วนใหญ่เนื่องจากระดับฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์ใกล้เคียงระดับของฮาร์มอนิกที่ผลิตออกมา เช่น 3, 5, 7 เป็นต้น ถ้าเปลี่ยนตำแหน่งคาปาซิเตอร์ให้ไกลจาก หม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ จะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรทำให้ระดับฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้นลดลง อย่างไรก็ตามการลด หรือการเพิ่มขนาดคาปาซิเตอร์ทำให้ค่าระดับ ฮาร์มอนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่ม หรือลดลงตามด้วย

ข. การทำเฟสมัลติพลิเคชัน (Phase Multiplication) ถ้าคอนเวอร์เตอร์มีจำนวนเฟสหรือจำนวนพัลส์มาก ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเป็นอันดับสูงและมีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรใช้ คอนเวอร์เตอร์พัลส์มาก ๆ หรือนำคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์จำนวนหลาย ๆ ชุดมาต่อกัน โดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีมุมต่างกัน 15 องศา เดลต้า-เดลต้า หรือ เดลต้า-สตาร์

2.8.3 ฮาร์มอนิกในระดับรุนแรง ทำให้เกิดปัญหารุนแรงต่อระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า การป้องกันทำได้โดยการติดตั้งคิรจูนนิ่งฟิลเตอร์แบงก์ หรือ Active filter

ก. ตัวกรองฮาร์มอนิก หรือฟิลเตอร์ เมื่อเกิดปัญหาฮาร์มอนิกมากแสดงว่าการเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างคาปาซิเตอร์กับแหล่งเกิดฮาร์มอนิกทำให้เกิดโหลดสถานะโหลดเกิน (Over Load) ทั้งกระแส และแรงดันที่ตัวคาปาซิเตอร์ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การใส่ฟิลเตอร์ (Filters) โดยการนำตัวเหนี่ยวนำ (Inductors) หรือรีแอคเตอร์ (Reactor) มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อปรับความถี่เรโซแนนซ์โดยฟิลเตอร์จะแบ่งออกเป็นสองชนิด คือวงจรรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันระบบหรือ จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filters) เพื่อไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบโดยปรับค่าเรโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ตรงกับกระแสฮาร์มอนิกที่มีในระบบ และวงจรรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์ หรือ ดิจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filters) โดยจะปรับรีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่มีความถี่ต่ำกว่าระดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีในระบบปกติ

ข. ดิจูนฟิลเตอร์ (Detune Filter) คือการนำรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ การออกแบบจะให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของฟิลเตอร์มีค่าลดลงค่าหนึ่ง โดยการปรับค่ารีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์ อนุกรมกับค่าคาปาซิเตอร์ที่มีความถี่ใดค่าหนึ่ง โดยจะให้ความถี่ดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีอยู่ในระบบ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ ที่อาจเกิดขึ้น และป้องกันไม่ให้คาปาซิเตอร์ได้รับความเสียหายเนื่องจากปัญหาฮาร์มอนิก ดังกล่าว ดังเช่น การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก เรโซแนนซ์ลำดับที่ 5 โดยทั่วไปจะใช้ฟิลเตอร์ที่มี ค่ารีแอคแตนซ์ 6-7% ของค่าคาปาซิเตอร์ คือ $X_L = 0.06X_C$ ที่ความถี่จูน 204 Hz ซึ่งจากคุณสมบัติของดิจูนฟิลเตอร์ ความถี่ที่จูนจะไม่ให้ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ ทำให้ฟิลเตอร์ ชนิดนี้ไม่สามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ผลมากนักกล่าวคือจะลดกระแสฮาร์มอนิกได้เพียง 10-30% เท่านั้นในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากง่ายต่อออกแบบและมีราคาถูกกว่าฟิลเตอร์ชนิดอื่น ๆ

ค. จูนฟิลเตอร์ (Tune Filter) คือการนำรีแอคเตอร์มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ มาทำเป็นฟิลเตอร์ เช่นเดียวกับดิจูนฟิลเตอร์ แต่การออกแบบจะให้ค่ารีแอคแตนซ์ กับคาปาซิเตอร์เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกัน ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดออกไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวฟิลเตอร์ชนิดนี้มี ค่าน้อยที่สุด คุณสมบัติของฟิลเตอร์ชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งโดยทั่วไปสามารถที่จะกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ถึง 70-90 % การจูนนิยมนำค่าต่ำกว่า 3-10% ของความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดออกไป เพื่อเป็นการป้องกันความถี่จูนที่อาจมีการเลื่อนออกไป เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิลเตอร์ หรือค่าพารามิเตอร์ของระบบอาจเปลี่ยนแปลงไป และป้องกันไม่ให้ตัวคาปาซิเตอร์ มีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านมากเกินไป

ง. เปรียบเทียบวงจรกรองแบบจูนและดีจูน

วงจรกรองแบบจูน

- จูนไปหาฮาร์มอนิกในระบบเพื่อกรองออก
- กรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบได้เกือบทั้งหมด
- ต้องการการวิเคราะห์และการออกแบบที่ซับซ้อน
- ไม่มีความยืดหยุ่นหากฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนแปลง
- ถ้าระบบมีโหลดเพิ่มจะต้องทำการออกแบบใหม่
- ราคาสูงเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ขนาดใหญ่และแม่นยำ

วงจรกรองแบบดีจูน

- จูนหนีฮาร์มอนิกทุกค่าในระบบเพื่อป้องกันเรโซแนนซ์
- กรองกระแสฮาร์มอนิกได้บางส่วน
- วงจรมาตรฐานสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าทั่วไป
- มีผลกระทบไม่มากนักหากฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นหรือมีการเปลี่ยนแปลง
- ถ้าโหลดในระบบเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มวงจรกรองได้โดยไม่ต้องรีเซ็ตของเก้ออก
- ราคาไม่สูงเพราะไม่ต้องกรองฮาร์มอนิกโดยตรง

จ. โดยใช้เทคนิคการชดเชยของสนามแม่เหล็ก จะเป็นการใช้หม้อแปลงกระแส (Current Transformer) เป็นตัวตรวจจับ (Detect) กระแสรวมในระบบแล้วนำมาผ่านวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน และวงจรกรองความถี่ (Frequency Filter) เพื่อทำการแยกสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดออกไป จากนั้นผ่านวงจรขยายแรงดัน (Amplifier) เพื่อควบคุมระดับแรงดันให้เหมาะสม แล้วส่งสัญญาณนี้เข้าสู่ขดลวดชุดที่ 3 (Tertiary) ของหม้อแปลง ซึ่งขดลวดนี้จะเป็นตัวผลิตเส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศทางหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกลดทอนลงได้

2.9 วิธีการป้องกันฮาร์มอนิก

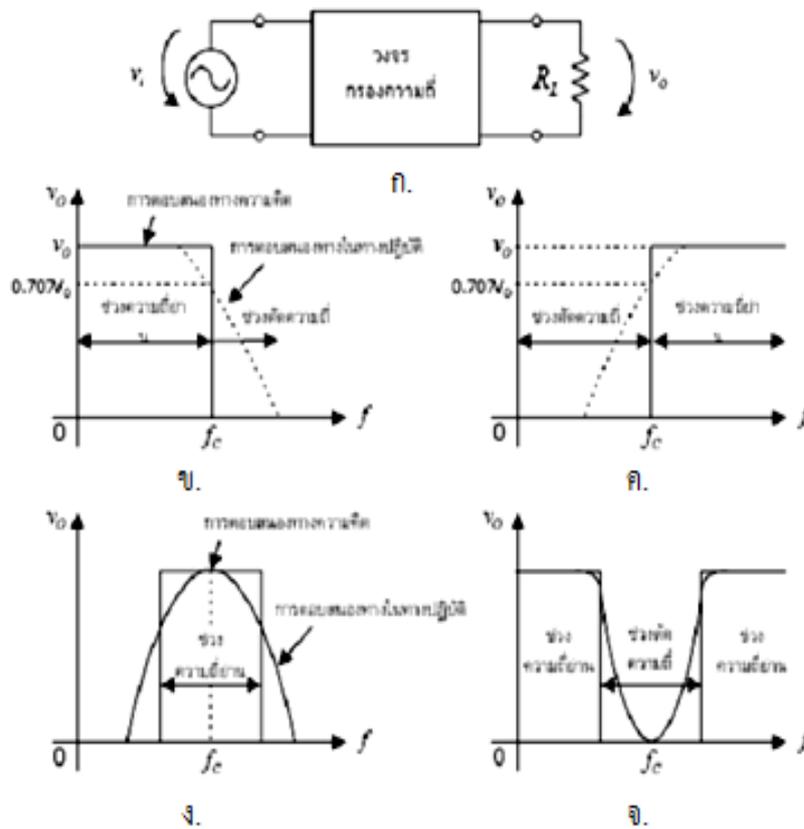
มี 2 แบบด้วยกันคือ

- การป้องกันฮาร์มอนิกที่มีผลต่อคาปาซิเตอร์ ที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้คาปาซิเตอร์เสี่ยงต่อความเสียหายจากการระเบิดได้
- ป้องกันระบบไฟฟ้าไม่ให้ฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานน้อยลง เนื่องจากฮาร์มอนิกคร่อมอยู่กระแสสูงสุดทำให้สายไฟ และ หม้อแปลงไหม้ได้ ทั้ง ๆ ที่กระแสหลักมูลไม่มากนัก

2.10 ตัวกรองฮาร์มอนิก

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าซึ่งเกิดจากผู้ใช้ไฟฟ้าใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะต้องถูกจำกัดให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดกับระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น ๆ วิธีการที่ง่ายที่สุดที่จะกำจัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่จะยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า คือ การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกที่ไหลเป็นตัวสร้างกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยผู้ใช้ไฟฟ้าเอง หรือ การไฟฟ้าฯ เป็นผู้ดำเนินการติดตั้ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

แบบพาสซีฟ (Passive Filters) และแบบแอคทีฟ (Active Filters) วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่สามารถทำหน้าที่เลือกความถี่ที่ต้องการหรือตัดความถี่ที่ไม่ต้องการออกก็ได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในวงจรกรองความถี่ ถ้าเป็นแบบพาสซีฟจะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ส่วนในวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ จะใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุมารวมกับอุปกรณ์ที่สามารถทำการขยายสัญญาณวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟดังแสดงในภาพที่ 2.6 ก.



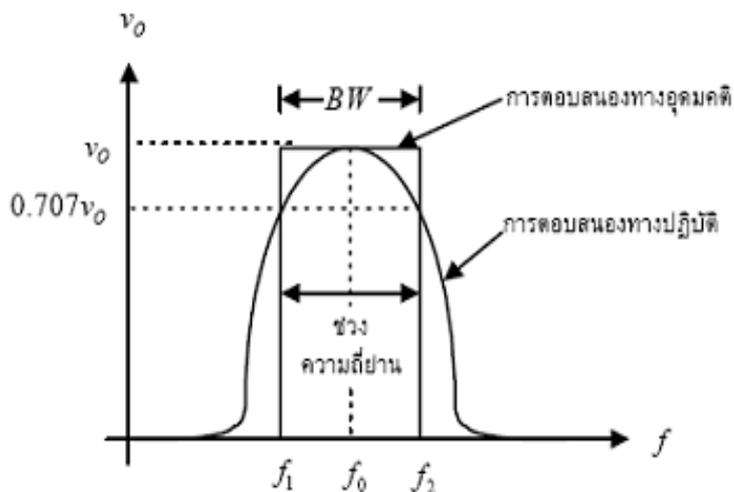
ภาพที่ 2.6 วงจรกรองความถี่และการทำงานของวงจรกรองความถี่

- ก. วงจรทดสอบวงจรกรองความถี่
- ข. การทำงานของวงจร *LPF*
- ค. การทำงานของวงจร *HPF*
- ง. การทำงานของวงจร *BPF*
- จ. การทำงานของวงจร *BEF*

2.10.1 วงจรกรองแถบความถี่

วงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, *BPF*) หรือ *BPF* เป็นวงจรที่กรองเอาเฉพาะความถี่ช่วงที่ต้องการออกมาเท่านั้น ดังนั้นการตอบสนองความถี่ของวงจร *BPF* นี้จะเป็น ดังภาพที่

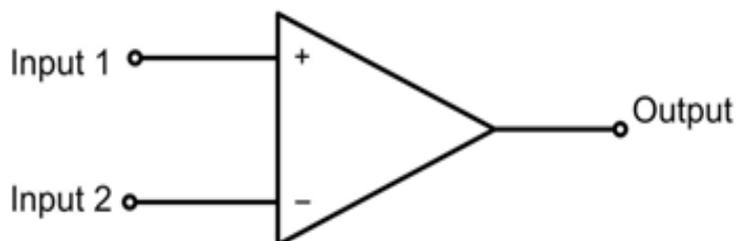
2.7



ภาพที่ 2.7 การตอบสนองวงจรรองแถบความถี่

2.11 ออปแอมป์ [2]

ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายสูง (ขณะทำงานที่ลูปปิด) และควบคุมการทำงานได้จากองค์ประกอบภายนอก



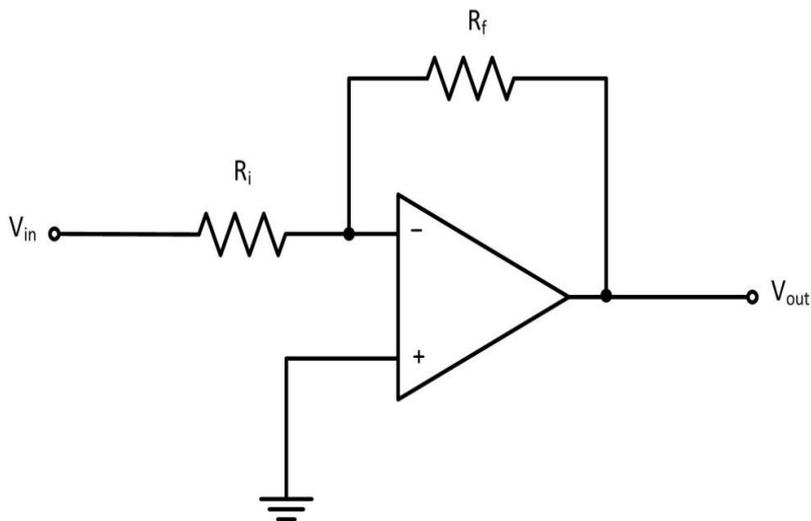
ภาพที่ 2.8 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

ภาพที่ 2.8 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์ (ไม่ได้แสดงส่วนของการไบอัส dc) ซึ่งประกอบด้วยขั้วอินพุต 2 ขั้ว (บวกและลบ) และขั้วเอาต์พุต 1 ขั้ว สัญญาณอินพุตแต่ละขั้วจะมีผลต่อสัญญาณเอาต์พุต

ออปแอมป์นำมาประกอบเป็นวงจรได้หลายประเภท โดยจะกล่าวถึงการนำออปแอมป์ไปใช้ในวงจรบางประเภท ได้แก่ วงจรขยายกลับเฟส วงจรขยายรวมสัญญาณ

2.11.1 วงจรขยายกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรรขยายซึ่งมีอัตราขยายคงที่ และได้รับความนิยมมากแบบหนึ่งคือ วงจรรขยายกลับเฟส ดังภาพที่ 2.8



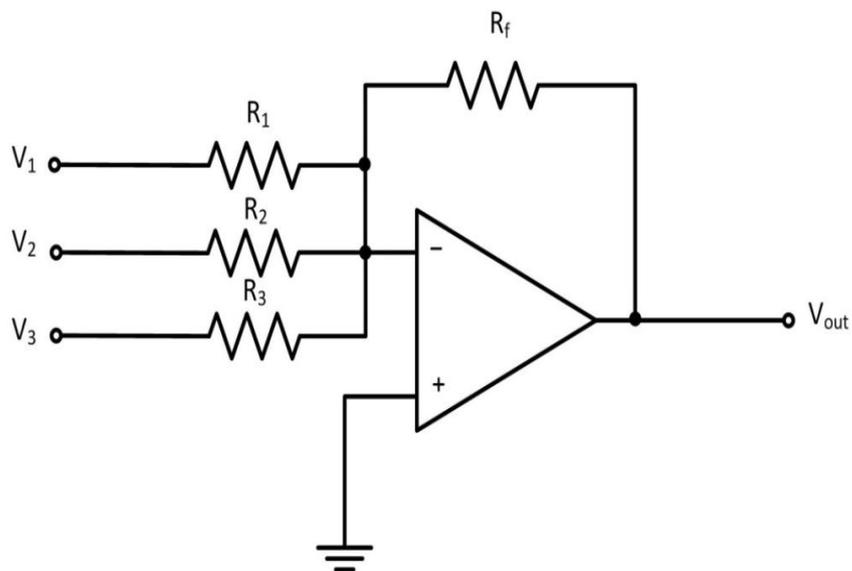
ภาพที่ 2.9 วงจรรขยายกลับเฟส

หาค่า V_{out} ได้โดยการคูณ V_{in} ด้วยอัตราส่วนของความต้านทานป้อนกลับ R_f ต่อความต้านทานอินพุต R_i ดังสมการ เครื่องหมายลบในสมการแสดงว่าสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุต มีมุมต่างกัน 180 องศา

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{in} \quad (2.26)$$

2.11.2 วงจรรขยายรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

วงจรรขยายรวมสัญญาณ คือ วงจรรขยายที่ให้ค่า V_{out} เท่ากับผลรวมของอัตราขยายสัญญาณอินพุตแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วงจรขยายรวมสัญญาณ

วงจรรวมสัญญาณในภาพที่ 2.10 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากผลรวมของอัตราขยายสัญญาณอินพุตทั้งสาม ดังนี้

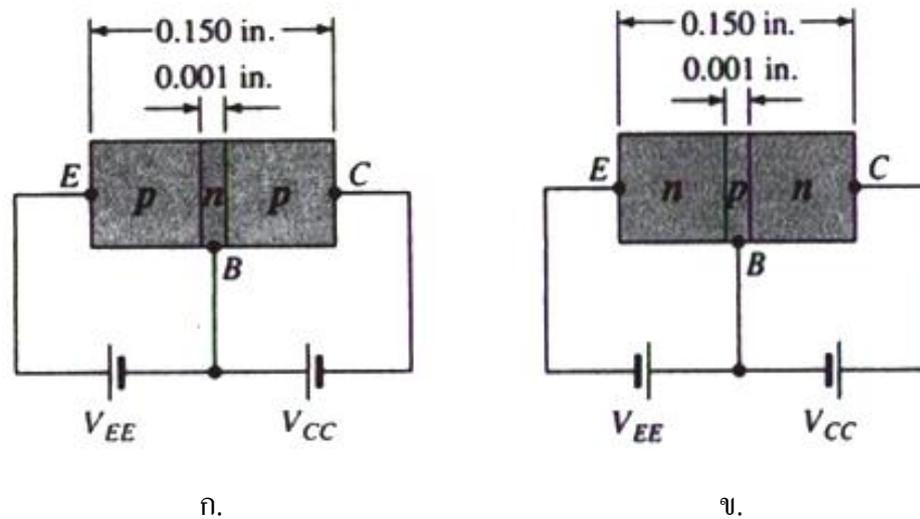
$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right) \quad (2.27)$$

2.12 ทรานซิสเตอร์



ภาพที่ 2.11 ทรานซิสเตอร์ชนิดต่าง ๆ

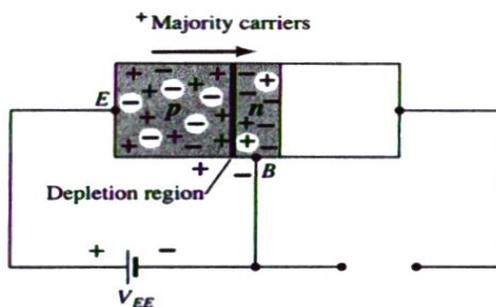
ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบสามชั้น ซึ่งมีสองโครงสร้าง คือ แบบแรกเป็นโครงสร้างที่มี สาร n สองชั้น และสาร p ชั้นเดียว เรียกว่า เป็นทรานซิสเตอร์แบบเอ็นพีเอ็น (npn transistor) ส่วนอีกแบบหนึ่งเป็นโครงสร้างที่มีสาร p สองชั้น และมีสาร n ชั้นเดียว เรียกว่า เป็นทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพี (pnp transistor) ทั้งสองแบบถูกแสดงในภาพที่ 2.12 โดยมีการไบอัสแบบไฟตรง



ภาพที่ 2.12 ทรานซิสเตอร์แบบ ก. พีเอ็นพี ข. เอ็นพีเอ็น

2.12.1 การทำงานของทรานซิสเตอร์

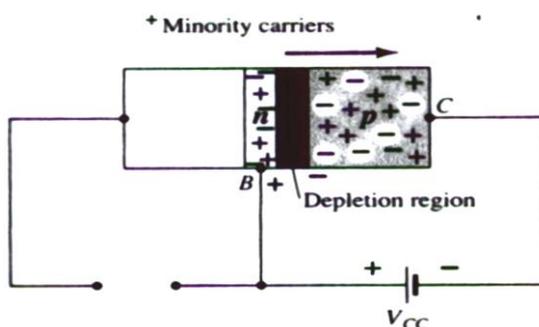
การทำงานพื้นฐานของทรานซิสเตอร์จะถูกอธิบายโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบ pnp ตามภาพที่ 2.12 ก. ส่วนการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ npn จะคล้ายกันกับแบบ pnp ถ้ายึดหลักว่า อิเล็กตรอนและโฮลถูกสลับกัน ในภาพที่ 2.13 ทรานซิสเตอร์แบบ pnp ได้ถูกวาดอีกครั้งโดยไม่มี การไบอัสระหว่าง ขา เบสและขาคอลเล็กเตอร์ จะสังเกตว่ามันจะคล้ายกันกับกรณีของไดโอดที่ถูก ไบแอสแบบฟอเวิร์ด ย่านดีพลีชัน ได้ถูกกลดลงเนื่องจาก ไบแอสที่ใส่เข้ามา ซึ่งทำให้เกิดการไหลของ พาหะจาก สาร p ไปยังสาร n



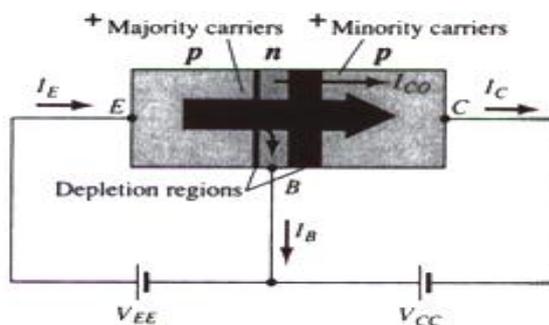
ภาพที่ 2.13 รอยต่อของทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพีซึ่งได้รับการไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด

ต่อไปให้ย้ายการไบแอสขาเบสและอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์แบบ pnp ออก จากภาพที่ 2.12 ก. ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ซึ่งการไหลของพาหะส่วนมากมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลแค่เพียงพาหะที่เรียกว่าเป็น minority-carrier ดังแสดงในภาพที่ 2.14

ในภาพที่ 2.15 การไบแอสที่เป็นไปได้ทั้งสองได้ถูกกระทำกับทรานซิสเตอร์แบบ pnp ซึ่ง จะเห็นว่าเกิดการไหลของพาหะที่เป็น majority-carrier และ minority-carrier สังเกตได้ที่ความ กว้างของย่านดิวลิชั่น



ภาพที่ 2.14 รอยต่อของทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพีที่ถูกไบแอสแบบรีเวิร์ส



ภาพที่ 2.15 การไหลของพาหะ majority และ minority ในทรานซิสเตอร์แบบพีเอ็นพี

โดยการใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟกับทรานซิสเตอร์ภาพที่ 2.13 ให้มองเหมือนกับว่ามันเป็นโนดเดียว เราจะได้

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.28)$$

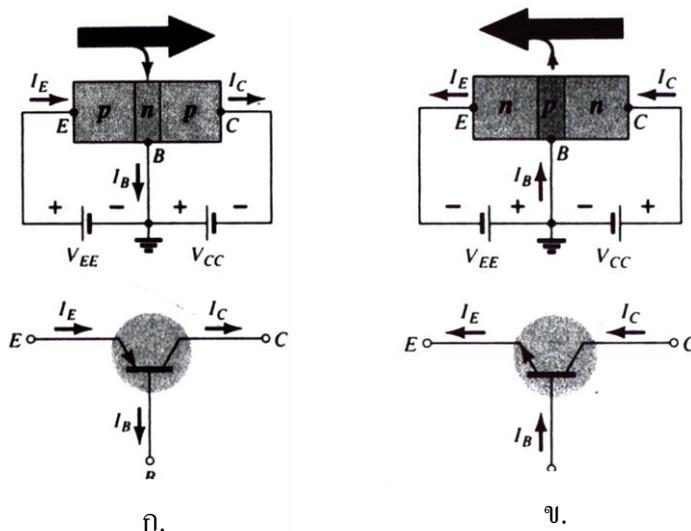
กระแสคอลเล็กเตอร์จะประกอบด้วยสองส่วน คือส่วนที่เป็นพาหะ majority และ minority ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ส่วนของกระแส minority ถูกเรียกว่าเป็นกระแส leakage และใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ I_{C0} ดังนั้นกระแสคอลเล็กเตอร์รวมจะมีสมการเป็นดังในสมการที่ (2.29)

$$I_C = I_{C_{majority}} + I_{C_{minority}} \quad (2.29)$$

ภาพที่ 2.15 การไบแอสที่เป็นไปได้ทั้งสองได้ถูกกระทำกับทรานซิสเตอร์แบบ pnp ซึ่งจะเห็นว่าเกิดการไหลของพาหะที่เป็น majority- และ minority-carrier สังเกตได้ที่ความกว้างของย่านดีพลีชัน

2.12.2 การต่อแบบเบสร่วม

เครื่องหมายและสัญลักษณ์ซึ่งใช้ร่วมกันส่วนมากในหนังสือและคู่มือในปัจจุบัน ถูกแสดงในภาพที่ 2.15 สำหรับการต่อแบบ เบสร่วม คำที่ใช้เรียกการต่อแบบเบสร่วมนี้ได้มาจากการที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ถูกต่อร่วมกันทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุต



ภาพที่ 2.16 เครื่องหมายและสัญลักษณ์ที่ใช้กับการต่อแบบเบสร่วม

ก. ทรานซิสเตอร์ แบบ pnp

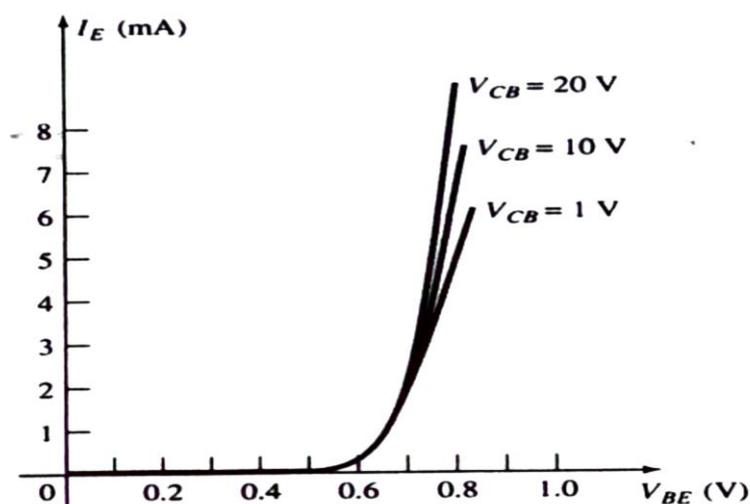
ข. ทรานซิสเตอร์แบบ npn

ในการที่จะอธิบายพฤติกรรมของอุปกรณ์ที่มีลักษณะสามขั้ว ดังเช่น วงจรขยายที่ต่อแบบเบสร่วมในวงจรที่ 2.16 อย่างสมบูรณ์นั้น ต้องใช้คุณลักษณะสองอย่าง นั่นคือ คุณลักษณะตรงการขับ หรือพารามิเตอร์ด้านอินพุต และอีกคุณลักษณะทางด้านเอาต์พุต คุณลักษณะส่วนทางด้านอินพุตที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.17 จะเป็นความสัมพันธ์ขอบ กระแสอินพุต I_E กับแรงดันอินพุต V_{BE} สำหรับที่ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{CB} หลาย ๆ ระดับ

ในส่วนของเอาต์พุตจะเป็นความสัมพันธ์ของกระแสเอาต์พุต I_C กับแรงดันเอาต์พุต V_{CB} ที่กระแสอินพุต I_E หลาย ๆ ระดับ โดยความสัมพันธ์ทางด้านเอาต์พุตนี้จะแสดงไว้ในภาพที่ 2.18 คุณลักษณะทางด้านเอาต์พุตหรือทางด้านคอลเล็กเตอร์ สามารถแบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ได้ 3 ย่าน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.18 นั่นคือ ย่านแอกทีฟ (active) คัทออฟ (cutoff) และอิ่มตัว (saturation) ย่านแอกทีฟเป็นย่านที่ถูกใช้สำหรับการขยายแบบเชิงเส้น (linear amplifiers) ในย่านแอกทีฟนี้ รอยต่อคอลเล็กเตอร์กับเบส จะถูกไบแอสแบบรีเวิร์ส ขณะที่รอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์จะถูกไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด จากภาพที่ 2.18 กราฟจะชี้ให้เห็นว่า ในย่านแอกทีฟกระแสอิมิตเตอร์ I_E จะมีค่าเท่ากับกระแสคอลเล็กเตอร์ I_C โดยประมาณ

$$I_E \cong I_C \quad (2.30)$$

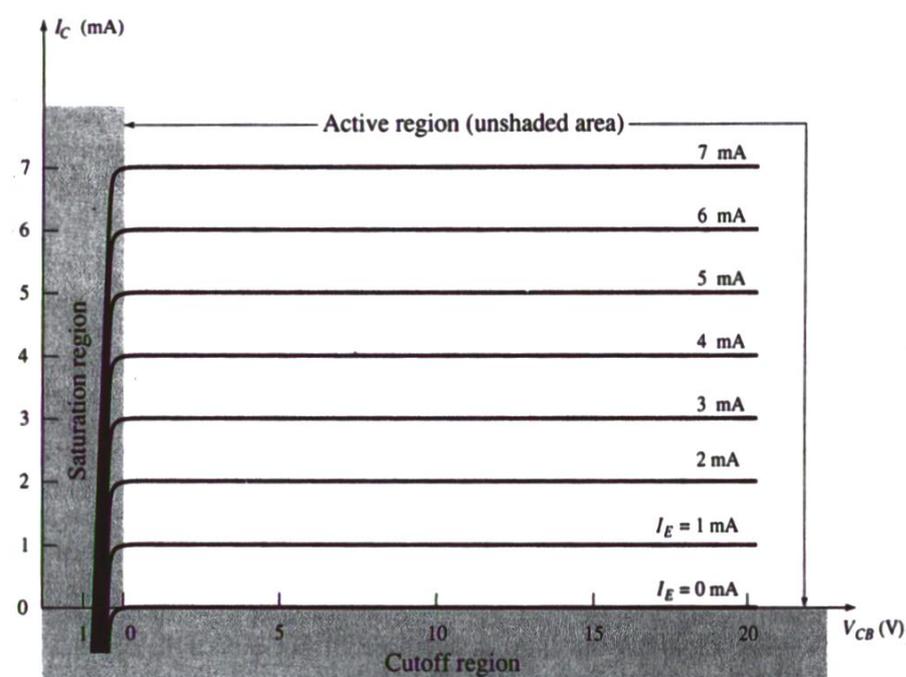
พิจารณาย่านคัทออฟในภาพที่ 2.18 ย่านคัทออฟถูกนิยามให้เป็นย่านที่กระแสคอลเล็กเตอร์ I_C มีค่าเป็นศูนย์ โดยในย่านนี้รอยต่อคอลเล็กเตอร์เบส และรอยต่อเบสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะถูกไบแอสแบบรีเวิร์ส ทั้งคู่



ภาพที่ 2.17 คุณลักษณะจุดอินพุตสำหรับตัวขยายแบบทรานซิสเตอร์ชนิดิกอนที่ต่อแบบเบสร่วม

สำหรับย่านอิมิตัวถูกนิยามว่าเป็นย่านที่อยู่ทางด้านซ้ายของแนว V_{CB} มีค่าเท่ากับศูนย์ ในย่านอิมิตัวนี้รอยต่อคอลเล็กเตอร์เบส และรอยต่อเบสอิมิตเตอร์จะถูกไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด

พิจารณาคูณลักษณะทางด้านอินพุทของภาพที่ 2.17 แสดงว่าในกรณีที่ค่าแรงดันคอลเล็กเตอร์ V_{CB} ในขณะที่แรงดันเบสกับอิมิตเตอร์ V_{BE} มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์จะมีลักษณะคล้ายกับคุณลักษณะไดโอด ในความเป็นจริงแล้ว V_{CB} มีผลกับคุณลักษณะเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาว่าเส้นกราฟ V_{CB} เพียงเส้นเดียวสามารถใช้แทนค่าต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.19 ก. และถ้าเรานำวิธี piecewise-linear ก็จะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.19 ข. และถ้าไม่พิจารณาความชันของกราฟก็จะได้ความสัมพันธ์ดังในภาพที่ 2.19 ค.

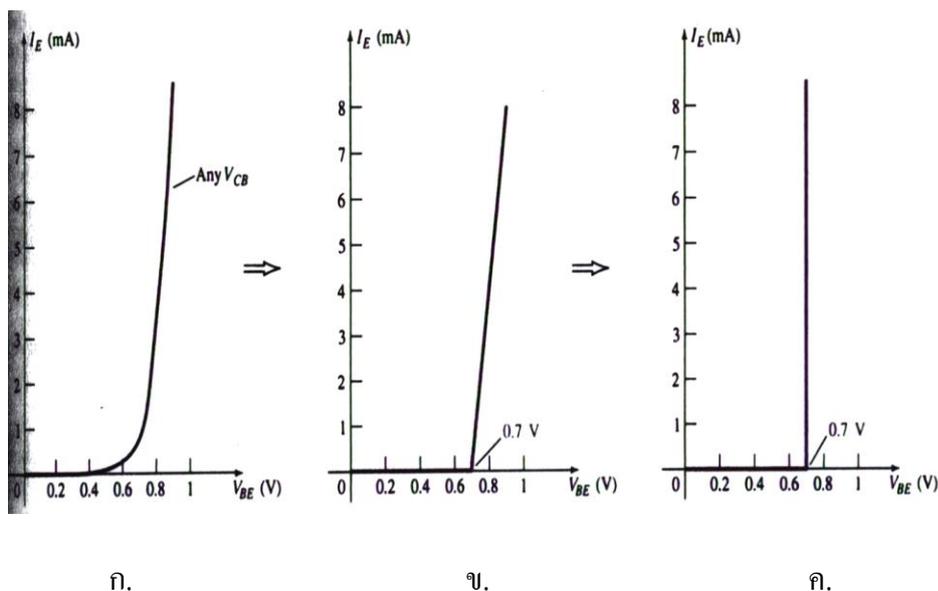


ภาพที่ 2.18 คุณลักษณะด้านเอาต์พุทสำหรับตัวขยายแบบทรานซิสเตอร์ต่อแบบเบสร่วม

ในโหมดไฟตรง ระดับของ I_C และ I_E ที่เกิดจากพาหะที่เป็น majority มีความสัมพันธ์กันด้วยปริมาณที่เรียกเป็น alpha และนิยามให้เป็นไปตามสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.31)$$

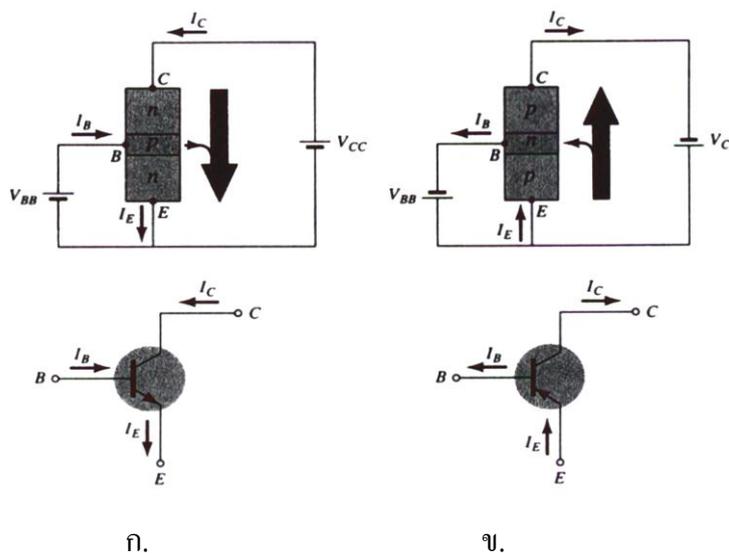
โดยที่ I_C และ I_E คือระดับกระแสที่จุดการทำงาน



ภาพที่ 2.19 แบบจำลองเทียบเคียงที่ถูกลำเอียงมาใช้แทน ขาเบส-อิมิตเตอร์ ของตัวขยายในย่านไฟตรง

2.12.3 การต่อแบบอิมิตอร์ร่วม

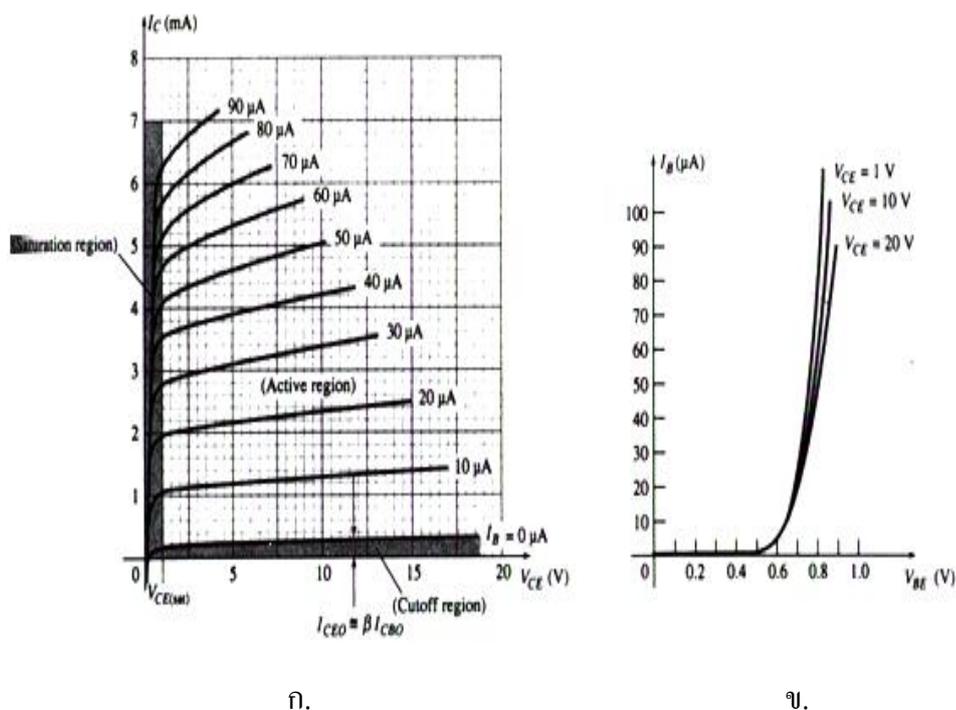
การต่อแบบนี้เป็นการต่อที่พบบ่อยมากที่สุด ภาพที่ 2.20 เป็นการต่อแบบอิมิตอร์ร่วมของทรานซิสเตอร์แบบ npn และ pnp คล้ายกับการต่อแบบเบสร่วม เราจะใช้คุณลักษณะทางอินพุตและเอาต์พุตในการศึกษาพฤติกรรมของการต่อแบบอิมิตอร์ร่วม ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.20 เครื่องหมายและสัญลักษณ์ซึ่งใช้สำหรับการต่อแบบอิมิตอร์ร่วม

- ก. ทรานซิสเตอร์แบบ npn
- ข. ทรานซิสเตอร์แบบ pnp

จะสังเกตเห็นได้ว่าในภาพที่ 2.20 ขนาดของ I_B มีหน่วยเป็นไมโครแอมป์ ซึ่งเทียบกับ I_C ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิแอมป์ พิจารณาว่าเส้น I_B ไม่ได้เป็นเส้นแนวอนเหมือนกับ I_E ในการต่อแบบเบสร่วม ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าแรงดันคอลเล็กเตอร์กับอิมิตอร์ V_{CE} จะมีอิทธิพลกับขนาดของ I_C



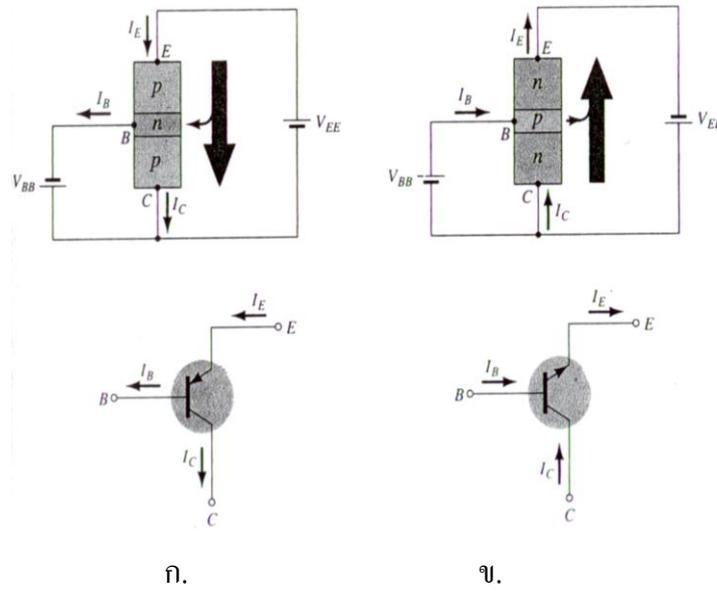
ภาพที่ 2.21 คุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ซิลิกอนในการต่ออิมิตอร์ร่วม

ก. คุณลักษณะของคอลเล็กเตอร์

ข. คุณลักษณะของเบส

2.12.4 การต่อแบบคอลเล็กเตอร์ร่วม

การต่อแบบคอลเล็กเตอร์ร่วมเป็นการต่อแบบที่ 3 และเป็นการต่อทรานซิสเตอร์แบบสุดท้ายที่จะกล่าวถึง โดยที่เครื่องหมายและสัญลักษณ์ของการต่อแบบนี้แสดงดังในภาพที่ 2.22 ส่วนมากในการต่อทรานซิสเตอร์แบบนี้จะมีจุดประสงค์สำหรับการแมชชิงอิมพีแดนซ์ เนื่องจากมันมีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตมีค่าสูงและมีอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตต่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับการต่อทรานซิสเตอร์สองแบบแรก (แบบเบสร่วม และแบบอิมิตอร์ร่วม)



ภาพที่ 2.22 เครื่องหมายและสัญลักษณ์ซึ่งใช้กับการต่อแบบคอลเล็กเตอร์ร่วม

ก. ทรานซิสเตอร์แบบ pnp

ข. ทรานซิสเตอร์แบบ npn