

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 บทนำ

เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงได้ถูกสร้างจากการสวิตช์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ลักษณะต่างๆ โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด คือ ฮัลฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์และฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงโดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงทำหน้าที่แปลงไฟกระแสสลับความถี่สูงที่มีขนาดแรงดันสูงให้มีขนาดแรงดันต่ำความถี่สูง หลังจากนั้นนำไปผ่านวงจรเรกติฟาย์แบบต่างๆ โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิด คือ ฮัลฟบริดจ์เรกติฟายเออร์และฟูลบริดจ์เรกติฟายเออร์ เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงในการใช้เชื่อมอาร์คขึ้นงานโลหะ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสและการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟสที่มีการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นแบบ 2 ระดับ

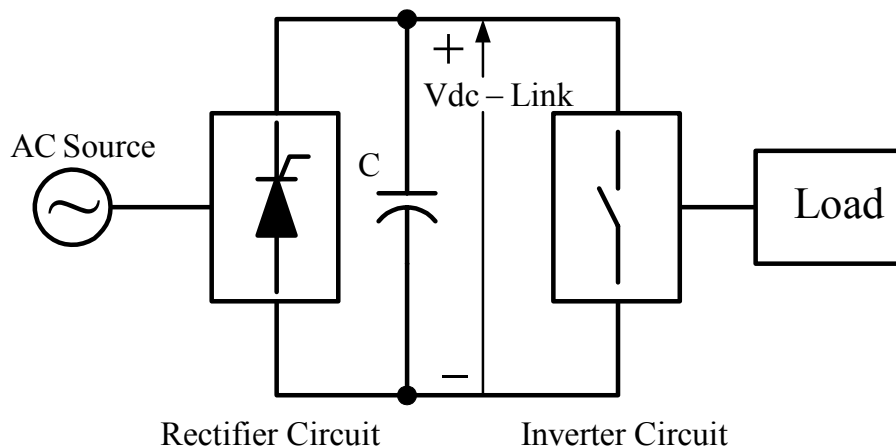
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูงจะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงกระแสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางด้านเอาต์พุตตามค่ากระแสที่ตั้งไว้สำหรับเชื่อมอาร์คโลหะขึ้นงาน โดยทั่วไประบบอินเวอร์เตอร์สามารถจำแนกตามชนิดของการทำงานได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน(Voltage-Source Inverter, VSI) และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current – Source Inverter, CSI) โดยอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 แบบนี้จะให้คุณสมบัติ และลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่แตกต่างกัน และเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้

2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน(Voltage-Source Inverter, VSI)

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะมีวงจรเรกติฟายเออร์(Rectifier Circuit) หรือวงจรเรียงกระแสไฟสลับเป็นไฟตรงทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรงป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) โดยมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองแรงดันไฟตรงที่มีริปเปิ้ลหรือการกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงให้มีค่าน้อย โดยถ้าหากขนาดของตัวเก็บประจุมีค่ามากแรงดันไฟตรง (DC-Link) จะมีค่าคงที่ไม่มีการกระเพื่อมเป็นผลทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นกับโหลด(Load) โดยทั่วไปแล้วอินเวอร์เตอร์แบบนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งมีข้อดีคือ สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถปรับความถี่ในย่านที่กว้างได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้กับโหลดหลายๆ อย่างที่ทำงานพร้อมกันได้ ส่วนข้อเสียคือ จะมีปัญหาในเรื่อง

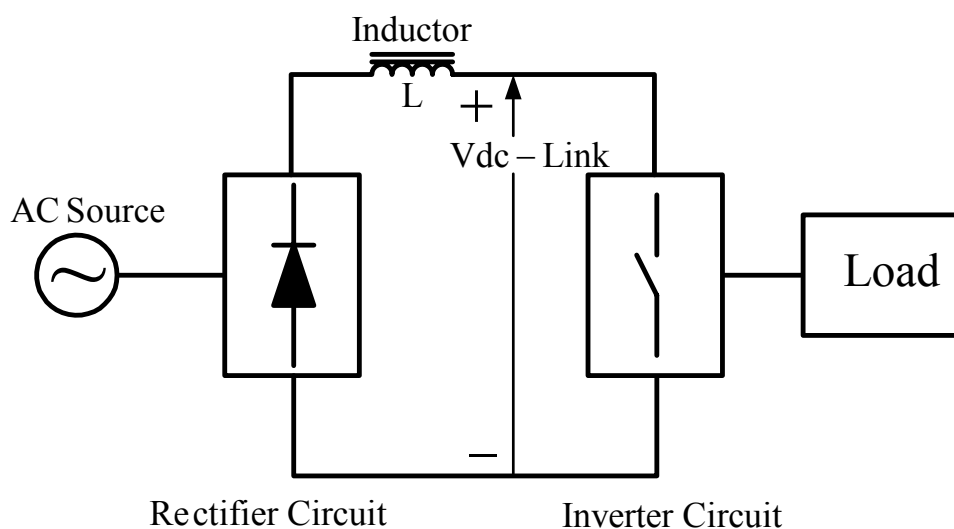
ของการลัดวงจรระหว่างกิ่งของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะต้องมีวงจรประวิงเวลา (Dead Time) เพื่อป้องกันการลัดวงจรดังกล่าว



รูปที่ 2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน(VSI)

2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส(Current-Source Inverter, CSI)

อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสแสดงในรูปที่ 2.2 จะมีวงจรเรกติฟายเออร์(Rectifier Circuit) หรือวงจรเรียงกระแสไฟสลับเป็นไฟตรงทำหน้าที่แปลงไฟสลับเป็นไฟตรงป้อนให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) โดยมีตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ขนาดใหญ่ต่ออนุกรมอยู่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสให้คงที่เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง แต่แรงดันจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหลด



รูปที่ 2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส(CSI)

โดยรูปคลื่นกระแสเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีรูปร่างขึ้นอยู่กับรูปแบบของการควบคุมชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยลักษณะของแรงดันด้านเอาต์พุตจะมีรูปร่างเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากกว่าอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน นอกจากนี้แรงดันทางด้านเอาต์พุตยังเกิดสไปค์เนื่องจากการคอมมิวเตตอีกด้วย อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสมีข้อดีคือ ใช้กับวงจรที่ต้องการกำลังงานมากๆ มีเสถียรภาพสูงและไม่มีการลัดวงจรระหว่างกิ่งของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในวงจรอินเวอร์เตอร์และสามารถทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) ในการนำกำลังไฟฟ้ากลับคืนเข้าสู่ระบบ สำหรับข้อเสียของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้คือ ช่วงการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ปรับได้น้อยและไม่สามารถนำไปใช้งานที่สภาวะไร้อโหลดได้ นอกจากนี้ขนาดตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ในแรงดันดีซีเชื่อมโยงจะมีขนาดใหญ่ ทำให้อินเวอร์เตอร์แบบนี้มีน้ำหนักมากและมีราคาแพง การใช้งานของอินเวอร์เตอร์แบบนี้เหมาะกับโหลดที่มีพิคคปานกลางจนถึงพิคคสูงและใช้ได้กับโหลดเพียงโหลดเดียว ไม่เหมาะในการนำไปใช้กับโหลดหลายๆ โหลด

2.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบมีการสวิตช์ 2 ระดับ

โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบสวิตช์ 2 ระดับ สามารถแบ่งการทำงานเป็นโหมดทั้งหมดได้ 4 โหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.3(a-d) โดยการทำงานแต่ละโหมดสามารถอธิบายรายละเอียดการทำงานได้ดังนี้

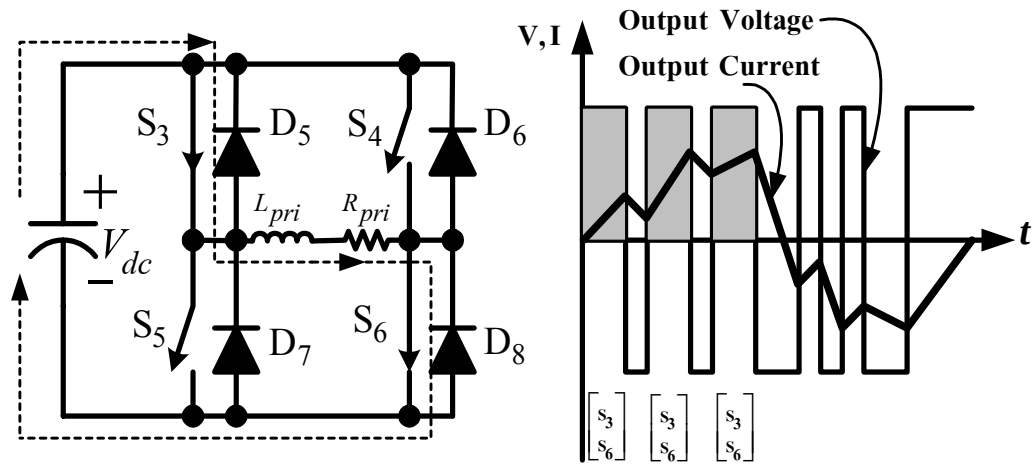
โหมดการทำงานที่ 1 (I+, V+) รูปที่ 2.3 (a) ในโหมดนี้สวิตช์ S_3 และ S_6 ทำงานทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดขดลวดป้อนของหม้อแปลงความถี่สูง (L_I) มีค่าเป็นบวก และกระแสไหลในทิศทางเดียวกับแรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ซึ่งทิศทางการไหลของกระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันดีซีเชื่อมโยง (V_{dc}) ผ่านสวิตช์ S_3 และ S_6

โหมดการทำงานที่ 2 (I+, V-) รูปที่ 2.3 (b) ในโหมดนี้สวิตช์ S_4 และ S_5 ทำงานทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดขดลวดป้อนของหม้อแปลงความถี่สูง (L_I) มีค่าเป็นลบ พลังงานยังคงค้างอยู่ในโหลดตัวเหนี่ยวนำ (L_I) ทำให้กระแสวิกขั้วไหลในทิศทางเดิมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของแรงดันในขณะที่ทำงานอยู่ในโหมด 2 อย่างทันทีทันใดได้ นั่นคือยังมีค่าเป็นบวก โดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_I) จะไหลผ่านไดโอด D_7 และไดโอด D_6

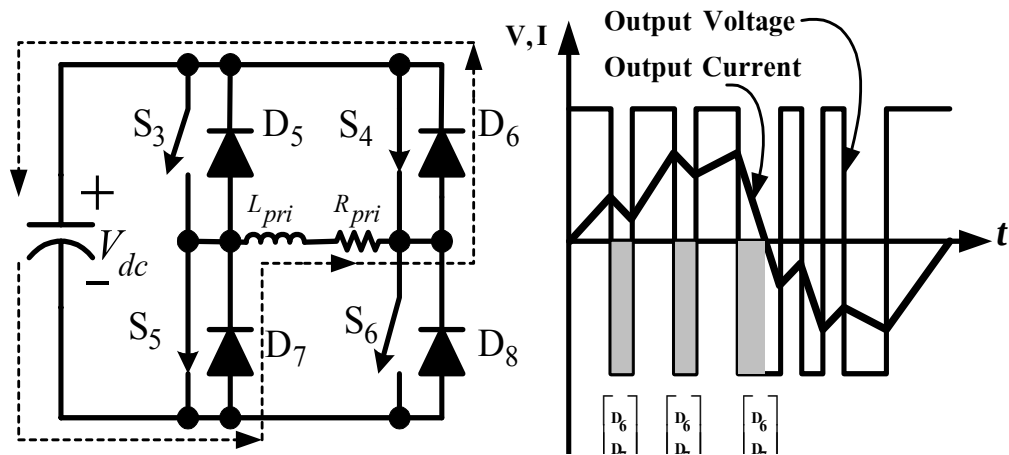
โหมดการทำงานที่ 3 (I-, V-) รูปที่ 2.3 (c) ในโหมดนี้สวิตช์ S_4 และ S_5 ทำงานต่อเนื่องมาจากโหมดที่ 2 แรงดันตกคร่อมโหลดขดลวดป้อนของหม้อแปลงความถี่สูง (L_I) มีค่าเป็นลบ ซึ่งกระแสสามารถตามทิศทางของแรงดันได้ นั่นคือมีทิศทางการไหลเป็นลบ โดยที่กระแสได้ไหลผ่านสวิตช์ S_4 และ S_5

โหมดการทำงานที่ 4 (I-, V+) รูปที่ 2.3 (d) ในโหมดนี้สวิตช์ S_3 และ S_6 ทำงานทำให้แรงดันตกคร่อมโหลดขดลวดป้อนของหม้อแปลงความถี่สูง (L_I) มีค่าเป็นบวก พลังงาน

พลังงานยังคงค้างอยู่ในโหลดตัวเหนี่ยวนำ (L_I) ทำให้กระแสยังคงไหลในทิศทางเดิมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของแรงดันในขณะทำงานอยู่ในโหมด 4 อย่างทันทีทันใดได้ นั่นคือยังมีค่าเป็นลบโดยกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_I) จะไหลผ่านไดโอด D_8 และไดโอด D_5

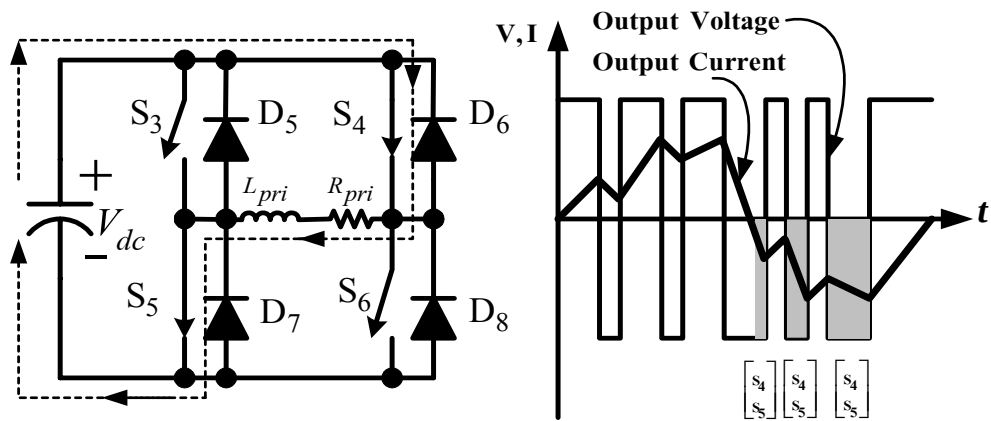


(a) โหมดการทำงานที่ 1 กระแสเป็นบวก แรงดันเป็นบวก($I+$, $V+$)

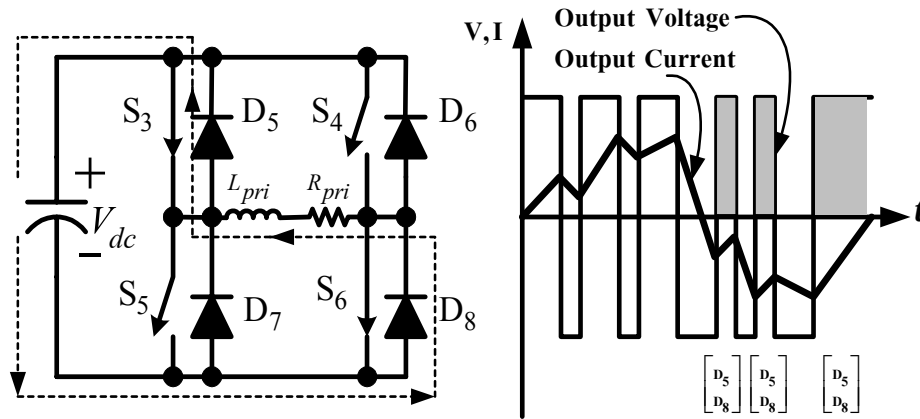


(b) โหมดการทำงานที่ 2 กระแสเป็นบวก แรงดันเป็นลบ($I+$, $V-$)

รูปที่ 2.3 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบ 2 ระดับ



(c) โหมดการทำงานที่ 3 กระแสเป็นลบ แรงดันเป็นลบ(I-, V-)



(d) โหมดการทำงานที่ 4 กระแสเป็นลบ แรงดันเป็นบวก(I-, V+)

รูปที่ 2.3 (ต่อ)

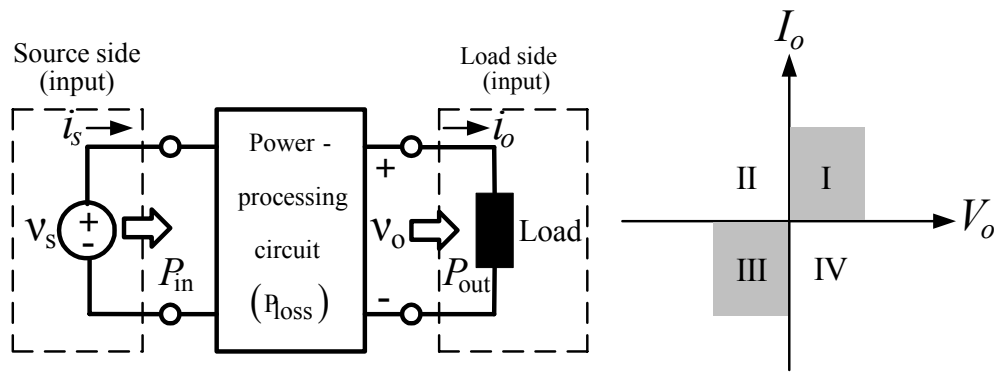
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์[6]

ทฤษฎีบทนี้จะพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าต่างๆ และฮาร์โมนิกส์จากการใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำให้รูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุตเป็นไซน์และไม่เป็นไซน์

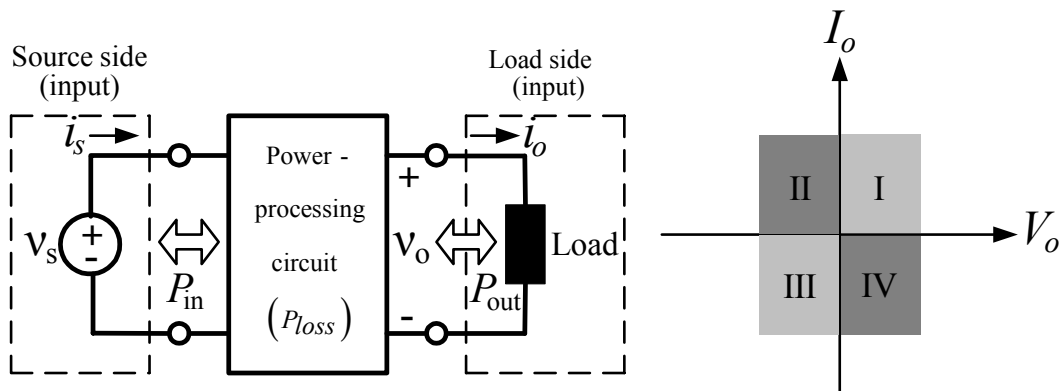
2.4.1 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าปรากฏ

2.4.1.1 การไหลของกำลังไฟฟ้า

พิจารณาจากรูปที่ 2.4 (a) แสดงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟไปสู่โหลดในทิศทางเดียว และรูปที่ 2.4 (b) แสดงถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟไปสู่โหลด และจากโหลดไหลย้อนกลับไปหาแหล่งจ่าย ซึ่งเป็นการไหลของกำลังไฟฟ้าในสองทิศทาง



(a) การไหลของกำลังไฟฟ้าจากทางด้านอินพุตไปทางด้านเอาต์พุตในทิศทางเดียว



(b) การไหลของกำลังไฟฟ้าจากทางด้านอินพุตไปทางด้านเอาต์พุตในสองทิศทาง

รูปที่ 2.4 การไหลของกำลังไฟฟ้าในทิศทางเดียวและสองทิศทาง

ประสิทธิภาพของวงจรในรูปที่ 2.4 คำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (2.2)$$

ถ้าวงจรกำลังประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งในทางอุดมคติไม่ว่าจะทำงานในสถานะ “on” หรือ “off” ก็จะไม่มีความสูญเสียเกิดขึ้นในส่วนของตัวอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร เช่น ตัวคาปาซิเตอร์

ตัวเหนี่ยวนำ และตัวหม้อแปลง ดังนั้นประสิทธิภาพทั้งหมดของวงจรที่ทำงานส่งผ่านกำลังก็จะมีค่าเต็ม 100 %

2.4.1.2 ค่าเฉลี่ยและค่าอาร์เอ็มเอส

เมื่อพิจารณาสัญญาณแรงดัน $v(t)$ ที่เวลา 1 คาบของรูปคลื่น (T) จะหาค่าแรงดันเฉลี่ยได้จากสมการที่ (2.3)

$$V_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2.3)$$

และค่าอาร์เอ็มเอส (rms) หาได้จากสมการที่ (2.4)

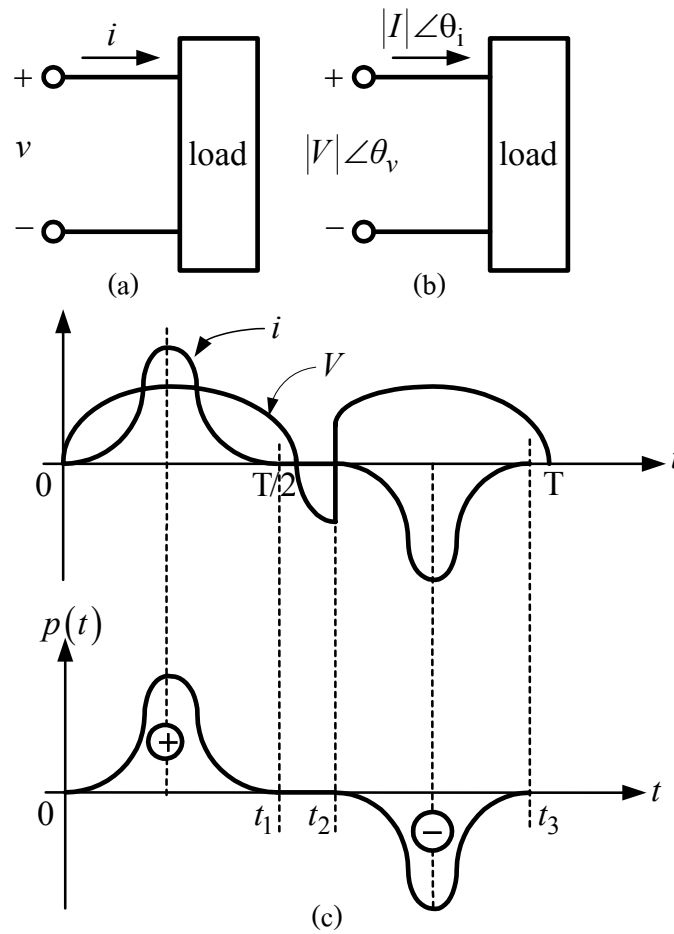
$$V_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2.4)$$

2.4.1.3 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ ($p(t)$) ที่ส่งไปให้โหลดนั้นคำนวณได้จากผลคูณของแรงดันชั่วขณะกับกระแสชั่วขณะที่ไหลผ่านโหลด ดังสมการที่ (2.5)

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.5)$$

รูปคลื่นแรงดันและกระแสในรูปที่ 2.5 (c) ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นมาเป็นค่าบวก ค่าศูนย์ และค่าลบ ที่เวลา $0 \leq t \leq t_1$, $t_1 \leq t \leq t_2$ และ $t_2 \leq t \leq t_3$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 (a) วงจรไฟฟ้าในเชิงเวลา

(b) วงจรไฟฟ้าในเชิงเฟสเซอร์

(c) รูปคลื่นแรงดัน , กระแส และกำลังที่เกิดขึ้น

2.4.1.4 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

ถ้ารูปคลื่นแรงดันและกระแสมีคาบเวลาซ้ำๆ กัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้า จะหาได้จากสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.6)$$

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) v(t) dt \quad (2.7)$$

2.4.1.5 กำลังไฟฟ้าปรากฏ

ขนาดของเฟสเซอร์ $|I_s|$ และ $|V_s|$ แทนด้วยค่าสูงสุดของกระแสและแรงดัน

แหล่งจ่ายตามลำดับ และ q_i กับ q_v แทนมุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันตามลำดับ ถ้าให้อิมพีแดนซ์ทั้งหมดหาได้จากสมการที่ (2.8)

$$Z = R + jX = |Z|e^{j\theta} \quad (2.8)$$

เมื่อ X คือรีแอกแตนซ์ทั้งหมดของวงจร กรณีวงจรที่มีตัวคาปาซิเตอร์จะเท่ากับ $-1/\omega C$ และกรณีวงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับ ωL ดังนั้นกำลังไฟฟ้าอินพุตเชิงซ้อนหาได้จากสมการที่ (2.9), (2.10) และ (2.11)

$$P_T = \frac{VI^*}{2} = \frac{|V||I|}{2} e^{j(\theta_v - \theta_i)} \quad (2.9)$$

$$P_T = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} e^{j\theta} \quad (2.10)$$

$$P_T = Se^{j\theta} \quad (2.11)$$

เมื่อ I^* คือ คอนจูเกตเชิงซ้อนของกระแส (I) โดยพารามิเตอร์ S คือกำลังไฟฟ้าปรากฏ

θ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง $(i(t))$ และ $(v(t))$ หรือที่เรียกว่ามุมตัวประกอบกำลัง

โดยปกติกำลังไฟฟ้าทั้งหมด P_T แสดงอยู่ในเทอมของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพดังสมการที่ (2.12)

$$P_T = P + jQ \quad (2.12)$$

ส่วนของจำนวนจริง, P คือกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่งหาจากสมการที่ (2.13)

$$P = S \cos \phi$$

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \phi \quad (2.13)$$

และส่วนของจำนวนจินตภาพ, Q คือกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่งหาจากสมการที่ (2.14)

$$Q = S \sin \phi \quad (2.14)$$

$$Q = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \sin \phi \quad (2.15)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าปรากฏจะมีค่าแสดงดังสมการที่ (2.16)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.16)$$

2.4.2 รูปคลื่นไซน์

2.4.2.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย

จากรูปที่ 2.6 (a) เมื่อวงจรไฟฟ้าพิจารณาเป็นแบบเชิงเส้น กระแสชั่วขณะที่จ่ายออกมาจากแหล่งจากและแรงดันแหล่งจ่ายจะมีสมการดังสมการที่ (2.17) และ (2.18)

$$i_s(t) = I_s \sin(\omega t - \theta_i) \quad (2.17)$$

$$v_s(t) = V_s \sin(\omega t - \theta_v) \quad (2.18)$$

เมื่อ q_i และ q_v คือมุมต่างเฟสของกระแสและแรงดันตามลำดับ

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ ($p(t)$) หาได้จากสมการที่ (2.19)

$$\begin{aligned} p(t) &= i_s v_s \\ p(t) &= I_s V_s \sin(\omega t - q_i) \sin(\omega t - q_v) \end{aligned} \quad (2.19)$$

รูปคลื่นของกระแส ($i_s(t)$) แรงดัน ($v_s(t)$) และกำลังไฟฟ้า ($p(t)$) แสดงดังรูปที่ 2.6 (b) กำลังไฟฟ้าอินพุตเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20)

$$\begin{aligned} P_{\text{ave}} &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\ P_{\text{ave}} &= \frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) v_s(t) dt \end{aligned} \quad (2.20)$$

แทนกระแส (i_s) และแรงดัน (v_s) จากสมการที่ (2.17) และ (2.18) และใช้หลักสามเหลี่ยมตรีโกณ

$$\cos(q_1 \pm \theta_2) = \cos q_1 \cos \theta_2 \mp \sin q_1 \sin \theta_2$$

$$\sin(q_1 \pm \theta_2) = \sin q_1 \cos \theta_2 \pm \cos q_1 \sin \theta_2$$

กำลังไฟฟ้าชั่วขณะอาจจะแสดงดังสมการที่ (2.21)

$$p(t) = \frac{I_s V_s}{2} [\cos(\theta_v - \theta_i) - \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)] \quad (2.21)$$

แทนสมการที่ (2.21) ในสมการที่ (2.20) จะได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยดังสมการที่ (2.22)

$$P_{\text{ave}} = \frac{I_s V_s}{2} [\cos(\theta_v - \theta_i)] \quad (2.22)$$

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในเทอมของค่าอาร์เอ็มเอส (rms) หาได้จากสมการที่ (2.23)

$$P_{\text{ave}} = I_{s,\text{rms}} V_{s,\text{rms}} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (2.23)$$

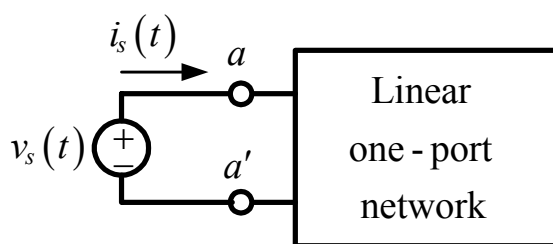
2.4.2.2 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ ดังสมการที่ (2.24)

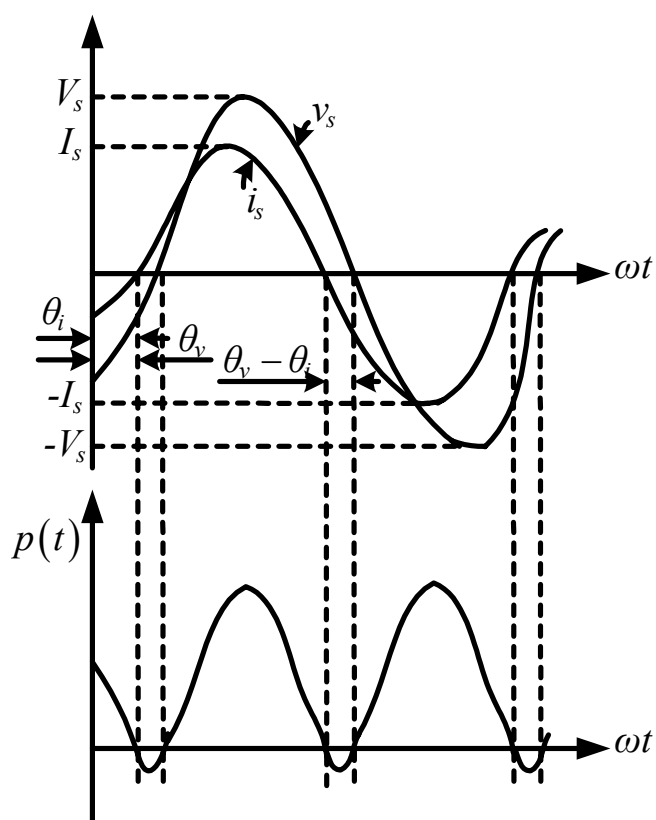
$$\text{Power factor} = \frac{\text{Real power (average)}}{\text{Apparent power}} \quad (2.24)$$

สำหรับรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่เป็นไซน์ จะทำให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังดังสมการที่ (2.25)

$$\begin{aligned} \text{Power factor} &= \frac{I_{s,\text{rms}} V_{s,\text{rms}} \cos \theta}{I_{s,\text{rms}} V_{s,\text{rms}}} \\ &= \cos \theta \end{aligned} \quad (2.25)$$



(a)



(b)

รูปที่ 2.6 (a) วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้น 1 พอร์ต

(b) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ต่างเฟสกัน

2.4.3 รูปคลื่นที่ไม่เป็นไซน์

รูปคลื่นที่ไม่เป็นไซน์เกิดจากองค์ประกอบของฮาร์มอนิกส์เข้ามาปะปนกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นการคำนวณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ (Fourier) ที่คิดค้นโดยโจเซฟในปี ค.ศ. 1822 ในการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

2.4.3.1 การวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์(Fourier Analysis)

ทฤษฎีฟูรีเยร์ที่ใช้วิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณในสภาวะทรงตัวในฟังก์ชันของเวลา $f(t)$ สามารถแสดงในรูปของค่าคงที่ F_0 และฟังก์ชันของไซน์และโคไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ ดังในสมการที่ (2.26)

$$f(t) = F_0 + f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t)$$

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n_w t + b_n \sin n_w t) \quad (2.26)$$

สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากการอินทิเกรตทั้ง 2 ข้างของสมการที่ (2.26) จากค่า 0 ถึง T จะได้ดังสมการที่ (2.27)

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) จะเห็นได้ว่าค่า F_0 แทนค่าเฉลี่ยของไฟตรงในฟังก์ชันของเวลา ($f(t)$) ในทำนองเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n และ b_n จะหาได้ดังสมการที่ (2.28) และ (2.29)

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n_w t dt \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2.28)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n_w t dt \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2.29)$$

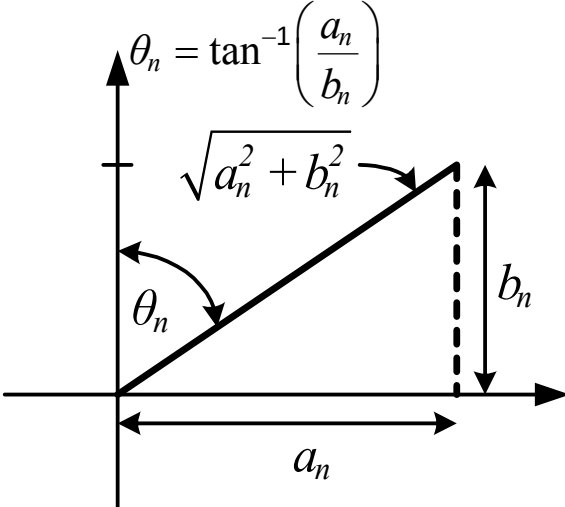
สมการที่ (2.28) และ (2.29) จะมีองค์ประกอบของเชิงความถี่ในเทอมของ $f(t)$ และรูปคลื่นที่ไม่เป็นไซน์ซึ่งมีความถี่เป็น w และมีคาบเวลาซ้ำๆ กัน ($T = 2\pi / w$) ดังนั้นจากการพิจารณาสามเหลี่ยมของตรีโกณในรูปที่ (2.7) ทำให้ได้สมการรูปคลื่นสัญญาณในฟังก์ชันของเวลาตามสมการที่ (2.30)

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin(n_w t + \theta_n) \quad (2.30)$$

เมื่อ F_n คือ ค่าสูงสุดของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n โดยหาได้จากสมการที่ (2.31)

θ_n คือ มุมต่างเฟสของฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n โดยหาได้จากสมการที่ (2.32)

$$F_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.31)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (2.32)$$


รูปที่ 2.7 สามเหลี่ยมตรีโกณที่ใช้พิจารณาสมการ (2.30)

ส่วนมากสัมประสิทธิ์ของ F_0 , a_n และ b_n ในเชิงความถี่เมื่อพิจารณาที่เวลา $T = 2\pi$ จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.33) , (2.34) และ (2.35)

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \quad (2.33)$$

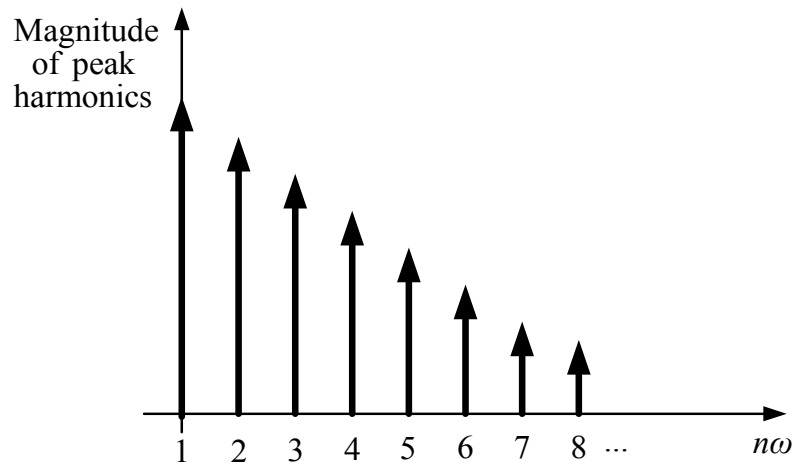
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2.34)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (2.35)$$

ถ้ารูปคลื่นสัญญาณสมมาตรกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ a_n และ b_n สามารถหาได้ง่ายขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังส่วนใหญ่จะมีรูปคลื่นสัญญาณที่สมมาตรกันแบบคี่ ซึ่งจะพบมากกว่ารูปคลื่นสัญญาณที่สมมาตรกันแบบคู่ และ แถบสเปกตรัมความถี่ในฟังก์ชันของเวลาแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยจะแสดงขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับต่างๆ เทียบกับเวลา

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการฟูเรียร์เมื่อรูปคลื่นสัญญาณสมมาตรกัน

Odd symmetry $f(t) = -f(-t)$	$a_n = 0 \text{ (for all } n \text{)}$	$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt$
Even symmetry $f(t) = f(-t)$	$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt$	$b_n = 0 \text{ (for all } n \text{)}$
Half-wave symmetry $f(t) = -f(t + T/2)$	$a_n = \begin{cases} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt & n \text{ odd} \\ 0 & n \text{ even} \end{cases}$	$b_n = \begin{cases} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt & n \text{ odd} \\ 0 & n \text{ even} \end{cases}$
Odd and half-wave symmetry $f(t) = -f(t + T/2)$ $f(t) = -f(-t)$	$a_n = 0 \text{ (for all } n \text{)}$	$b_n = \begin{cases} \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \sin n\omega t dt & n \text{ odd} \\ 0 & n \text{ even} \end{cases}$
Even and half-wave symmetry $f(t) = -f(t + T/2)$ $f(t) = f(-t)$	$a_n = \begin{cases} \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \cos n\omega t dt & n \text{ odd} \\ 0 & n \text{ even} \end{cases}$	$b_n = 0 \text{ (for all } n \text{)}$



รูปที่ 2.8 แถบสเปกตรัมความถี่ในฟังก์ชันของเวลา

2.4.3.2 ฮาร์โมนิกส์ของกระแสในไลน์

สมการของกระแสและแรงดันที่จ่ายออกมาจากแหล่งกำเนิดจะมีองค์ประกอบไฟตรงรวมอยู่ด้วยและองค์ประกอบมูลฐานกับองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ปะปนมาด้วย สัญญาณด้วย ดังสมการที่ (2.36)

$$i_s(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{ni})$$

$$i_s(t) = I_{dc} + I_{s1} \sin(\omega t + \theta_{1i}) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{ni}) \quad (2.36)$$

และ

$$v_s(t) = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{nv})$$

$$v_s(t) = V_{dc} + V_{s1} \sin(\omega t + \theta_{1i}) + \sum_{n=2}^{\infty} V_{sn} \sin(n\omega t + \theta_{ni}) \quad (2.37)$$

องค์ประกอบของกระแสมูลฐานและแรงดันหาได้จากสมการที่ (2.38) และสมการที่ (2.39) ตามลำดับ

$$i_{s1}(t) = I_{s1} \sin(\omega t + \theta_{1i}) \quad (2.38)$$

$$v_{s1}(t) = V_{s1} \sin(\omega t + \theta_{1v}) \quad (2.39)$$

เมื่อ I_{s1} และ V_{s1} คือค่าสูงสุดขององค์ประกอบกระแสและแรงดันมูลฐานตามลำดับ

ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแส $i_s(t)$ และ $v_s(t)$ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.40 และ (2.41)

$$I_{s,\text{rms}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) dt$$

$$I_{s,\text{rms}}^2 = I_{\text{dc}}^2 + \left(\frac{I_{s1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{s2}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{sn}}{\sqrt{2}}\right)^2$$

$$I_{s,\text{rms}}^2 = I_{\text{dc}}^2 + I_{s1,\text{rms}}^2 + I_{s2,\text{rms}}^2 + \dots + I_{sn,\text{rms}}^2 \quad n = 1, 2, \dots, \infty \quad (2.40)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$V_{s,\text{rms}}^2 = V_{\text{dc}}^2 + \left(\frac{V_{s1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{V_{s2}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{V_{sn}}{\sqrt{2}}\right)^2$$

$$V_{s,\text{rms}}^2 = V_{\text{dc}}^2 + V_{s1,\text{rms}}^2 + V_{s2,\text{rms}}^2 + \dots + V_{sn,\text{rms}}^2 \quad n = 1, 2, \dots, \infty \quad (2.41)$$

และกำลังไฟฟ้าชั่วขณะหาได้จาก

$$p(t) = i_s(t) v_s(t)$$

$$\begin{aligned} p(t) = & I_{\text{dc}} V_{\text{dc}} + I_{\text{dc}} \sum_{n=1}^{\infty} V_{sn} \sin(n\omega t - q_{nv}) + V_{\text{dc}} \sum_{n=1}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t - q_{ni}) \\ & + \left(\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn} \sin(n\omega t - \theta_{ni}) \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} V_{sn} \sin(n\omega t - \theta_{nv}) \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ลำดับที่มากกว่าองค์ประกอบมูลฐานสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.43)

$$P_{ave} = I_{dc}V_{dc} + I_{s1,rms}V_{s1,rms}\cos(\theta_{v1} - \theta_{i1}) + I_{s2,rms}V_{s2,rms}\cos(\theta_{v2} - \theta_{i2}) + \dots$$

$$P_{ave} = I_{dc}V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms}V_{sn,rms}\cos q_n \quad (2.43)$$

เมื่อ $q_n = \theta_{vn} - \theta_{in}$ ($n = 1, 2, \dots, \infty$) แทนมุมต่างเฟสของแรงดันฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ n กับกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ n

2.4.3.3 ความผิดเพี้ยนรวมทั้งหมดของฮาร์โมนิกส์

รูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดันที่มีความผิดเพี้ยนทำให้รูปคลื่นกระแสและรูปคลื่นแรงดันไม่เป็นสัญญาณไซน์ ซึ่งคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันผิดเพี้ยนได้จากกระแสและแรงดันจริงที่เกิดขึ้นทั้งหมดลบด้วยกระแสและแรงดันจริงที่เกิดขึ้นที่ความถี่มูลฐาน ดังสมการที่ (2.44) และ (2.45)

$$i_{s,dist} = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{n=2}^{\infty} i_{sn}(t) \quad (2.44)$$

$$v_{s,dist} = v_s(t) - v_{s1}(t) = \sum_{n=2}^{\infty} v_{sn}(t) \quad (2.45)$$

ค่าดัชนีที่ใช้วัดค่าความผิดเพี้ยนรวมทั้งหมดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น คือ (THD) ซึ่งแทนอัตราส่วนของค่าความผิดเพี้ยนของกระแสหรือแรงดันอาร์เอ็มเอส (rms) ต่อค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ขององค์ประกอบกระแสหรือแรงดันมูลฐาน ดังสมการที่ (2.46) , (2.47) และ (2.48) , (2.49) ตามลำดับ โดยในสมการดังกล่าวจะไม่มีค่าองค์ประกอบไฟตรงรวมอยู่

$$THD_i = \frac{I_{dis,rms}}{I_{s1,rms}} = \frac{\sqrt{I_{s2,rms}^2 + I_{s3,rms}^2 + I_{s4,rms}^2 + \dots}}{I_{s1,rms}} \quad (2.46)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{I_{s2,rms}}{I_{s1,rms}}\right)^2 + \left(\frac{I_{s3,rms}}{I_{s1,rms}}\right)^2 + \dots} \quad (2.47)$$

$$THD_v = \frac{V_{dis,rms}}{V_{s1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{s2,rms}^2 + V_{s3,rms}^2 + V_{s4,rms}^2 + \dots}}{V_{s1,rms}} \quad (2.48)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{V_{s2,rms}}{V_{s1,rms}}\right)^2 + \left(\frac{V_{s3,rms}}{V_{s1,rms}}\right)^2 + \dots} \quad (2.49)$$

ในเทอมอาร์เอ็มเอส(rms) ของรูปคลื่นในสมการที่ (2.46) , (2.47) , (2.48) และ (2.49) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในสมการที่ (2.50) และ (2.51) ได้ดังนี้

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{s,rms}}{I_{s1,rms}}\right)^2 - 1} \quad (2.50)$$

$$THD_v = \sqrt{\left(\frac{V_{s,rms}}{V_{s1,rms}}\right)^2 - 1} \quad (2.51)$$

2.4.3.4 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

สมการที่ใช้คำนวณหาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับรูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยน จะหาค่าได้ยุ่งยากกว่ารูปคลื่นที่เป็นไซน์ เมื่อนำสมการที่ (2.24) มาพิจารณากับสมการที่ (2.36) , (2.37) และ (2.43) จะเขียนสมการหาค่าตัวประกอบกำลัง(pf) ได้ดังสมการที่ (2.52)

$$pf = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms} V_{sn,rms} \cos q_n}{I_{s,rms} V_{s,rms}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms} V_{sn,rms} \cos q_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn,rms}^2 V_{sn,rms}^2 \sum_{n=1}^{\infty} V_{sn,rms}^2}} \quad (2.52)$$

เมื่อพิจารณาให้แรงดันสายไม่มีค่าความผิดเพี้ยน แต่กระแสสาย ($i_s(t)$) มีความผิดเพี้ยน ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังจะเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.53)

$$pf = \frac{I_{s1,rms}}{I_{s,rms}} \cos q_1 \quad (2.53)$$

เมื่อ q_1 แทนมุมต่างเฟสระหว่างแรงดัน, $v_s(t)$ และองค์ประกอบของกระแสมูลฐาน, $i_s(t)$

ดังนั้นสมการแรงดันชั่วขณะใดๆ ในการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.54) และกระแสชั่วขณะใดๆ ที่สายก็必将มีความผิดเพี้ยนดังสมการที่ (2.55)

$$v_s(t) = V_s \sin \omega t \quad (2.54)$$

$$i_s(t) = \text{distorted (nonsinusoidal)} \quad (2.55)$$

กระแสที่ในเทอมของอนุกรมฟูเรียร์ แสดงดังสมการที่ (2.56)

$$i_s(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + I_2 \sin(2\omega t + \theta_2) + \dots + I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2.56)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{\text{ave}} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_s i_s dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (V_s \sin \omega t) (I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + I_2 \sin(2\omega t + \theta_2) + \dots + I_n \sin(n\omega t + \theta_n)) dt \\ &= \frac{1}{T} \left[\int_0^T V_s I_1 \sin \omega t \sin(\omega t + \theta_1) dt \right] \\ &= \frac{V_s I_1}{2} \cos \theta_1 \\ P_{\text{ave}} &= V_{s,\text{rms}} I_{s1,\text{rms}} \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (2.57)$$

และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะหาได้จากสมการที่ (2.58)

$$\text{Power factor} = \frac{I_{s1,\text{rms}} V_{s,\text{rms}} \cos \theta_1}{I_{s,\text{rms}} V_{s,\text{rms}}} = \frac{I_{s1,\text{rms}}}{I_{s,\text{rms}}} \cos \theta_1 \quad (2.58)$$

จากสมการที่ (2.58) ในเทอมของ $I_{s1,\text{rms}} / I_{s,\text{rms}}$ คือตัวที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสในสาย และเรียกชื่อเทอมนี้ว่าแฟกเตอร์ความผิดเพี้ยนของตัวประกอบกำลัง (k_{dist}) และในเทอมของ $\cos \theta_1$ คือตัวที่ทำให้เกิดมุมเคลื่อนที่แตกต่างระหว่างแรงดันสายและองค์ประกอบ

ของกระแสมูลฐาน ซึ่งเรียกว่าแฟกเตอร์ของมุมเคลื่อนที่ของตัวประกอบกำลัง (k_{disp}) ซึ่งตัวประกอบกำลังไฟฟ้านี้ก็คือผลคูณของแฟกเตอร์ความผิดเพี้ยนของตัวประกอบกำลังกับแฟกเตอร์ของมุมเคลื่อนที่ของตัวประกอบกำลัง ดังแสดงในสมการที่ (2.59)

$$\text{pf} = k_{\text{dist}} k_{\text{disp}} \quad (2.59)$$

เมื่อ

$$k_{\text{disp}} = \cos \theta_1 \quad (2.60)$$

$$k_{\text{dist}} = I_{s1,\text{rms}} / I_{s,\text{rms}} \quad (2.61)$$

ในเทอมของ k_{dist} นั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกระแสฮาร์โมนิกส์ผิดเพี้ยนรวมทั้งหมดได้ดังสมการที่ (2.62)

$$\text{THD}_i = \sqrt{\frac{1}{k_{\text{dist}}^2} - 1} \quad (2.62)$$

2.5 สรุป

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส และการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบมีการสวิตช์ 2 ระดับ โดยอธิบายการทำงานและยกตัวอย่างรูปคลื่นของการสวิตช์ในแต่ละสภาวะการทำงาน โดยในบทนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของกำลังไฟฟ้าต่างๆ และฮาร์โมนิกส์ โดยมีรูปคลื่นตัวอย่างและสมการอธิบายประกอบในเนื้อหาแต่ละส่วน