บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

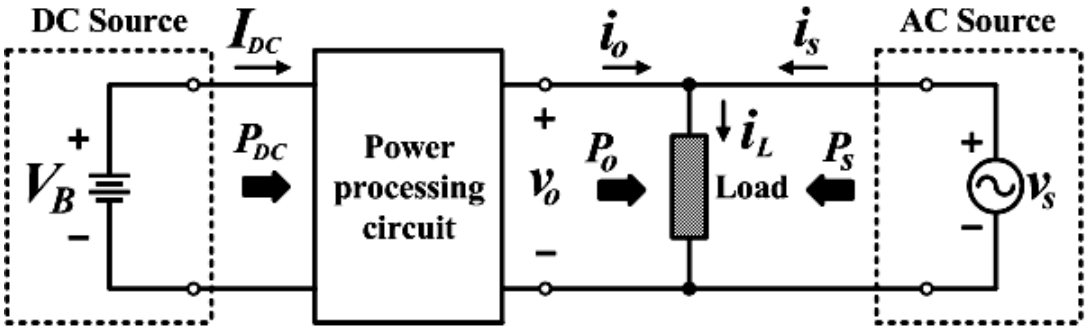
2.1 บทนำ

ในบทนี้จะเริ่มจากการนำเสนอแนวคิดในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายเอซีจากไลน์การไฟฟ้าและแหล่งจ่ายดีซีจากแบตเตอร์รี่โดยแสดงให้เห็นลักษณะของรูปคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ในระบบ ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างแหล่งจ่ายทั้งสองนี้พร้อมทั้งเข้าใจถึงหลักการและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ หลังจากนั้นจะกล่าวถึงวงจรและการทำงานของไทริสเตอร์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสในโหมดต่างๆ ทั้งที่ทำงานเป็นเร็กติฟายเออร์และทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ว่ามีลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสเป็นอย่างไร การไหลของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟอย่างไร ทิศทางของกระแสและขั้วของแรงดันเป็นอย่างไร เพื่อเป็นพื้นฐานในการที่จะนำคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยนี้ต่อไป

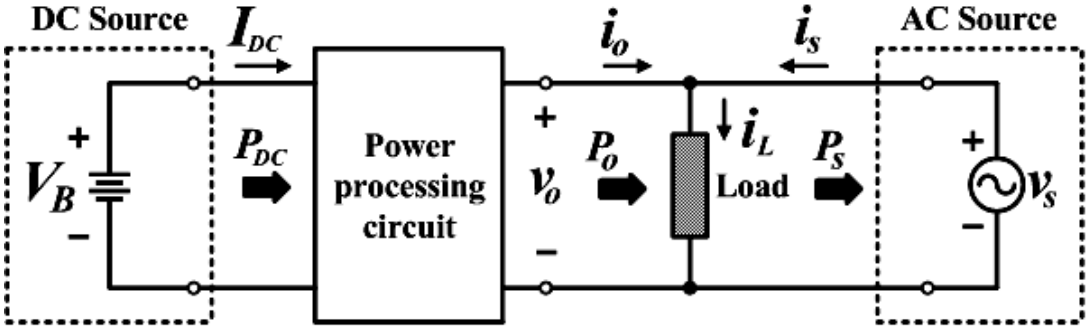
2.2 แนวคิดในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายเอซีและดีซี

ในการที่จะเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดทางด้านเอซีของแหล่งจ่ายเอซีและดีซีได้นั้นจะต้องมีวงจรที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้า (power processing circuit) ระหว่างสองแหล่งจ่ายดังกล่าว โดยสามารถแสดงแนวคิดได้ดังรูปที่ 2.1 กำลังไฟฟ้าสามารถไหลผ่านวงจรที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทางขึ้นอยู่กับการจัดการของวงจร ถ้าจัดการให้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีได้ก็คือวงจรทำหน้าที่เป็นเร็กติฟายเออร์ ในทางกลับกันถ้าวงจรนี้จัดการให้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซีได้ก็คือวงจรทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบวงจรที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้านี้ให้ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์เพื่อให้กำลังไฟฟ้าดีซีจากแบตเตอรี่สามารถไหลไปยังด้านเอซีเพื่อร่วมจ่ายโหลดพร้อมกับแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้าได้ โดยแนวคิดในรูปที่ 2.1 เป็นกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ ($P_O < P_L$) ดังนั้นโหลดจะดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลน์การไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริม ส่วนในรูปที่ 2.2 เป็นกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ ($P_O > P_L$) กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะถูกป้อนเข้าแหล่งจ่ายเอซีของไลน์การไฟฟ้า โดยที่ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายผ่านมาจากแหล่งจ่ายดีซี P_O จะสอดคล้องกับขั้วของแรงดัน v_o และทิศทางของกระแส i_o ในขณะที่ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด P_L จะสอดคล้องกับขั้วของแรงดัน v_s และทิศทางของกระแส i_L และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้า P_S

จะสอดคล้องกับขั้วของแรงดัน v_s และทิศทางของกระแส i_s ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าและลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสเหล่านี้สามารถได้ดังรูปที่ 2.3 สำหรับกรณี $P_O < P_L$ และรูปที่ 2.4 สำหรับกรณี $P_O > P_L$



รูปที่ 2.1 แนวคิดในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายเอซีและดีซีในกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้



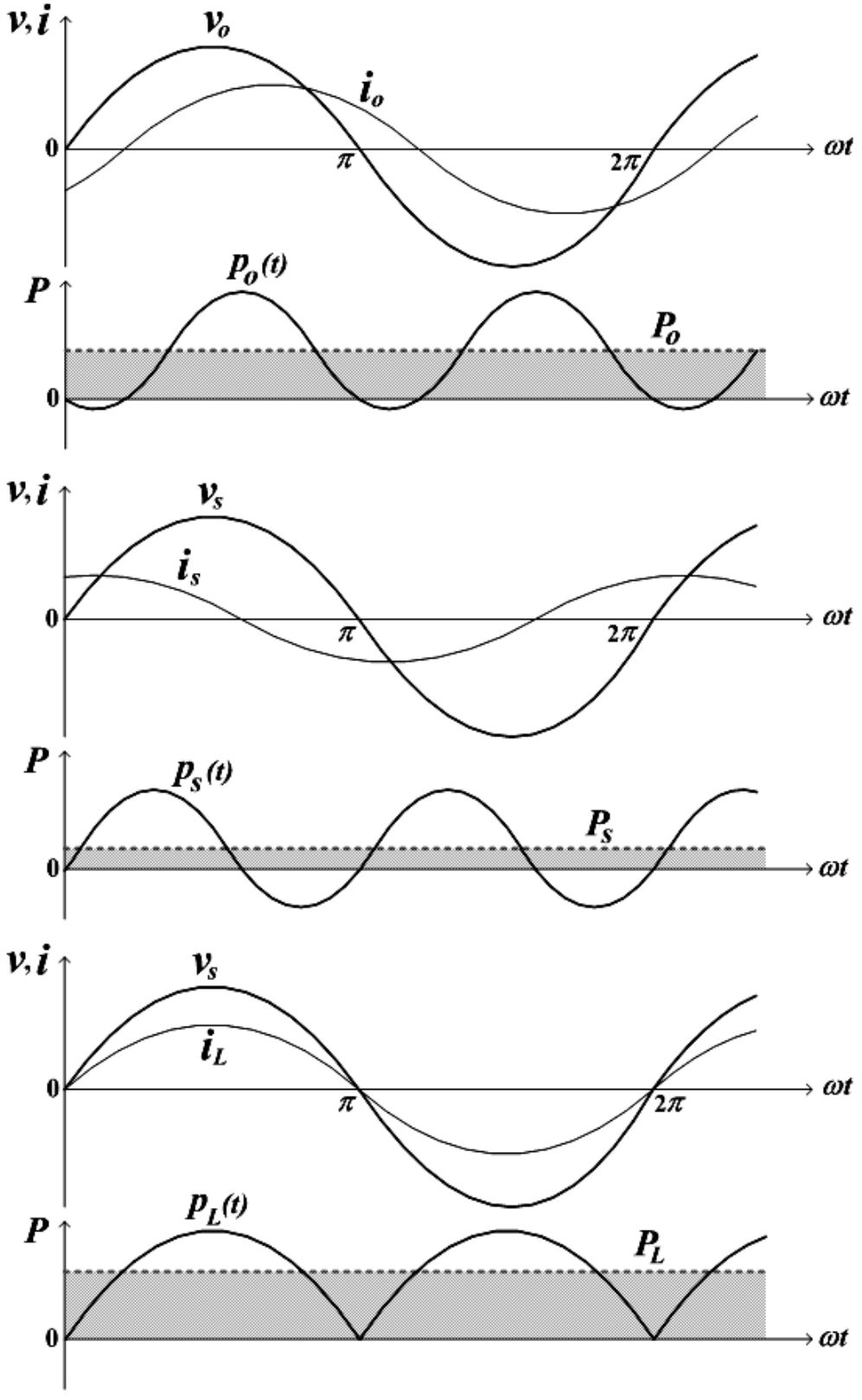
รูปที่ 2.2 แนวคิดในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายเอซีและดีซีในกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้

เมื่อแหล่งจ่ายดีซีและเอซีถูกเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดดังระบบในรูปที่ 2.1 และ 2.2 จะได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดมีค่าดังสมการ

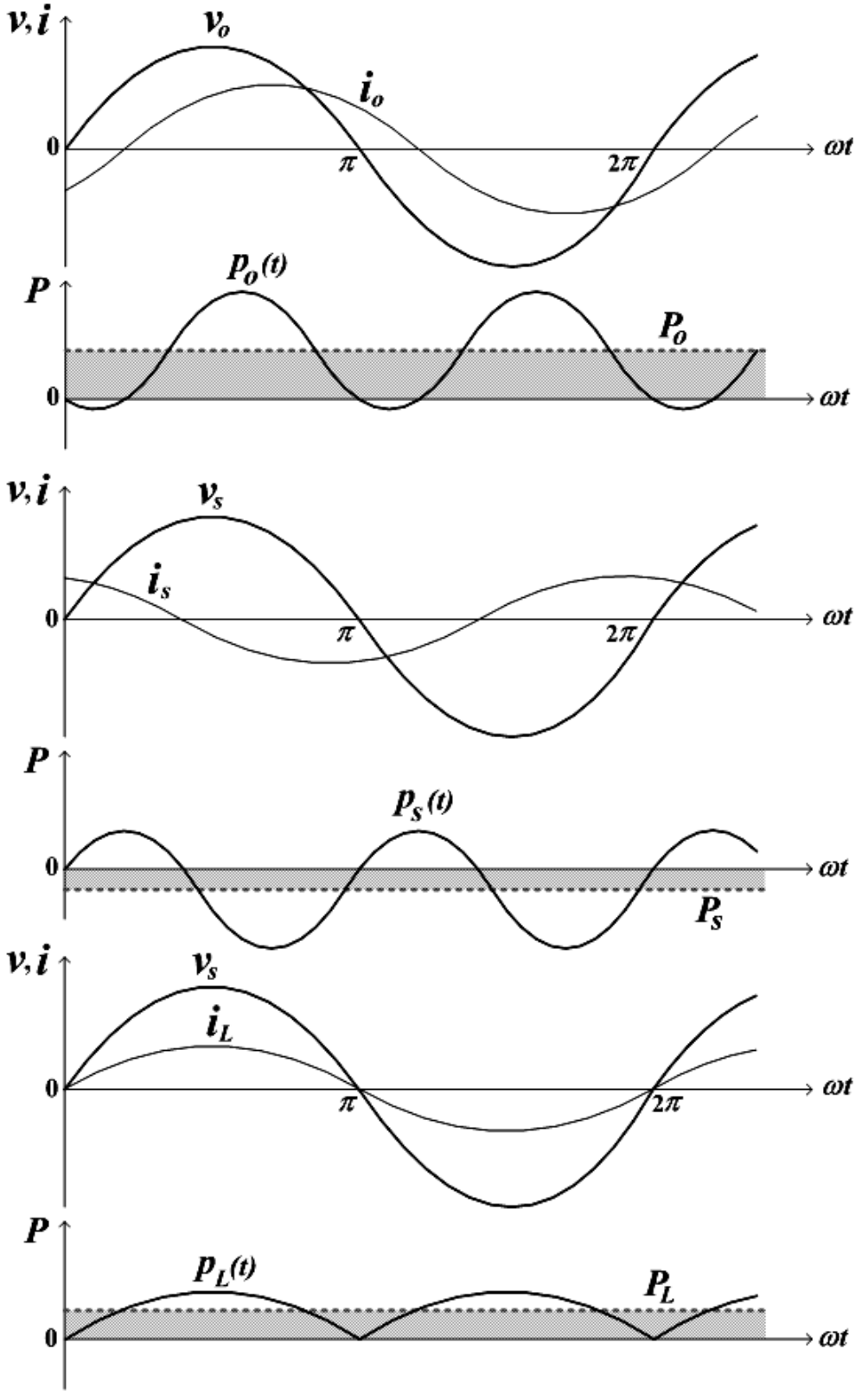
$$P_L = P_o + P_s \tag{2.1}$$

ถ้าไม่คิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร power processing จะได้ $P_o = P_{DC}$ และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดมีค่าดังสมการ

$$I_L = I_o + I_s \tag{2.2}$$



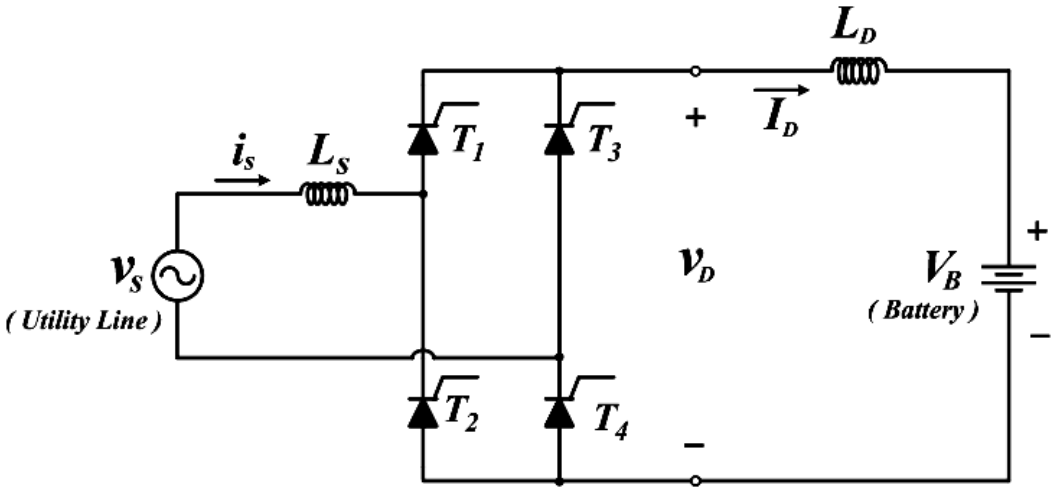
รูปที่ 2.3 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสพร้อมกำลังไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ $P_o < P_L$



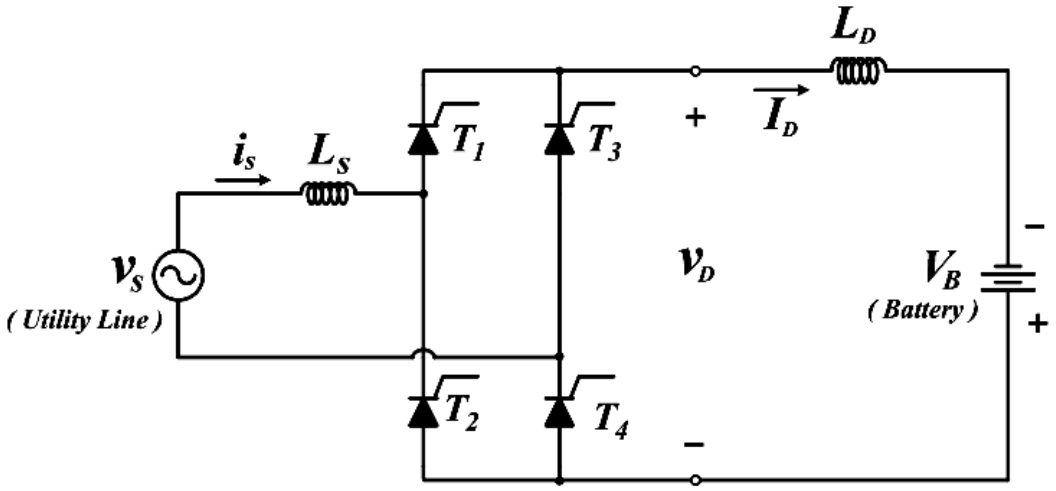
รูปที่ 2.4 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสพร้อมกำลังไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ $P_o > P_L$

2.3 โหมดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของคอนเวอร์เตอร์สามารถเป็นได้ทั้งเร็กติฟายเออร์และอินเวอร์เตอร์ขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวน (α) ที่ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้ วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสขณะต่อใช้งานเป็นกรณีเร็กติฟายเออร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 และขณะต่อใช้งานเป็นกรณีของอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยโครงสร้างของวงจรประกอบด้วยไทริสเตอร์ 4 ตัว T_1 ถึง T_4 ต่อแบบบริดจ์ วงจรกำลังทางด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_D ที่มีค่ามากกรองกระแสดีซี I_D ให้เรียบ ส่วนทางด้านเอซีของวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้าซึ่งสามารถแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย (L_S)



รูปที่ 2.5 วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสขณะต่อใช้งานเป็นเร็กติฟายเออร์



รูปที่ 2.6 วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟส ขณะต่อใช้งานเป็นอินเวอร์เตอร์

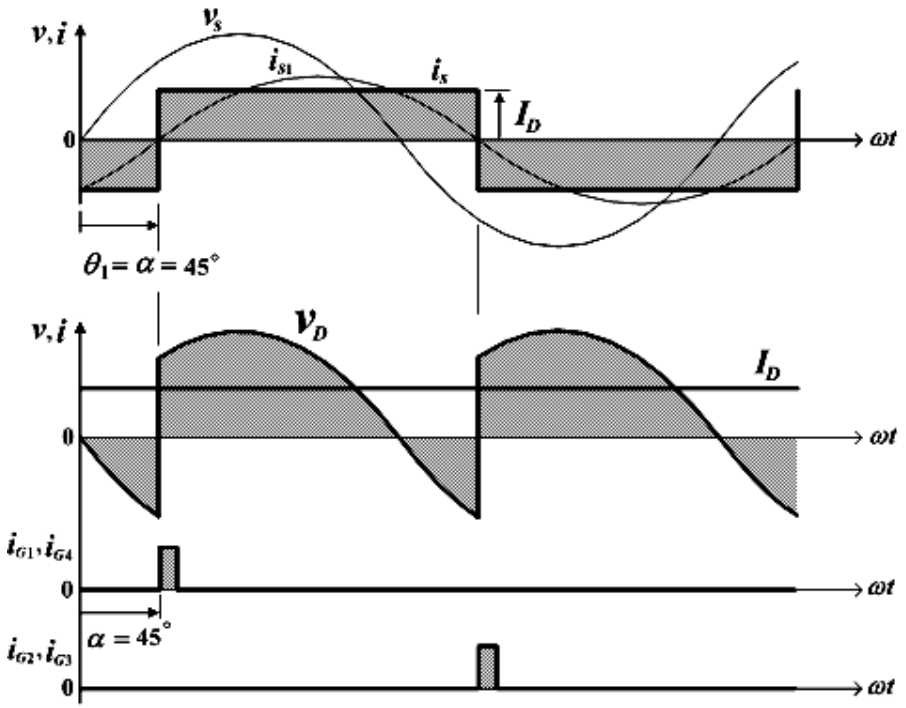
มุมจุดชนวน (α) ที่ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์สามารถปรับได้ในย่าน $0 - 360^{\circ}$ ซึ่งจะส่งผลทำให้มุมเลื่อนเฟส θ ของคลื่นกระแสด้านเอซี i_S ล้าหลังจากคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไลน์การไฟฟ้ามีค่าอยู่ในย่าน $0 - 360^{\circ}$ เช่นเดียวกัน ตลอดย่านของการปรับมุมชนวน α นี้สามารถแบ่งโหมดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ออกได้เป็น 4 โหมดดังต่อไปนี้

2.3.1 เร็กติฟายเออร์แบบไลน์คอมมิวเตท (โหมด I)

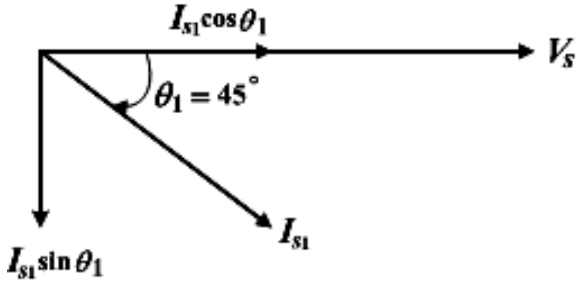
กรณีที่ไทริสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเร็กติฟายเออร์แบบไลน์คอมมิวเตทซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นกรณีที่ทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $0 - 90^{\circ}$ $(0 \leq \alpha \leq 90^{\circ})$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 45° สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ในวงจรได้ดังรูปที่ 2.7(ก) จะเห็นได้ว่าขณะที่ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทริสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขับเกทและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 ได้รับแรงดันไบแอสกลับจากแรงดันไลน์ค่าเท่ากับ v_S นั่นหมายความว่าไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 ถูกทำให้หยุดนำกระแสหรือคอมมิวเตทจากแรงดันไลน์การไฟฟ้า v_S จึงเรียกวิธีการทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า “ไลน์คอมมิวเตท” การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบหลักมูลของกระแสจากไลน์การไฟฟ้า i_{S1} ล้าหลังคลื่นแรงดัน v_S เป็นมุมเท่ากับ 45° สามารถแสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมและวงจรสมมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.7(ข) และ 2.7(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้แรงดันดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะมีค่าเป็นบวกและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชั่นของมุมจุดชนวน α ดังสมการ

$$\begin{aligned} V_D &= \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}V_S \sin\omega t d(\omega t) \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi}V_S \cos\alpha \\ &= 0.9V_S\cos\alpha \end{aligned} \tag{2.3}$$

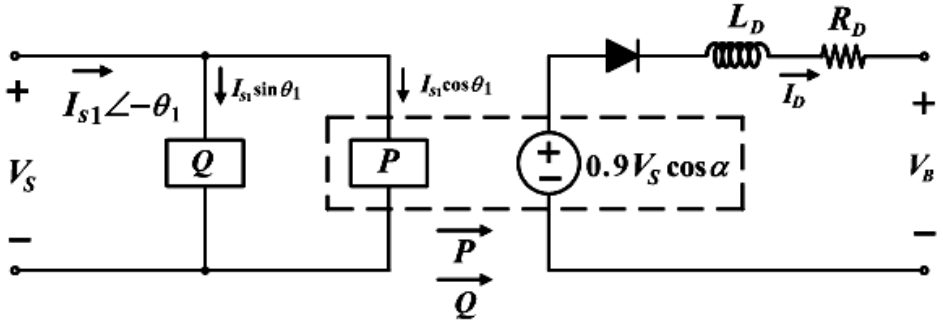
โดยที่ V_S คือค่า rms ของแรงดันแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้า



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสพร้อมสัญญาณควบคุมเกท



(ข) เฟเซอร์ไดอะแกรม



(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 2.7 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นเร็กติฟายเออร์ที่ $\alpha = 45^\circ$ (โหมด I)

สำหรับการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเร็กติฟายเออร์แบบไลน์คอมมิวเตทนี้จะมีกระแสดีซี I_D ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 มีค่าเป็นบวกและสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของกระแสนี้ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{V_D - V_B}{R_D} \\ &= \frac{1}{R_D}(0.9V_S \cos\alpha - V_B) \end{aligned} \tag{2.4}$$

กำลังไฟฟ้าดีซีที่ไหลไปชาร์จแบตเตอรี่ในวงจรสมมูลรูปที่ 2.7(ค) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v_D i_D dt$$

เนื่องจากกระแสดีซี i_D ถูกตัวเหนี่ยวนำ L_D ที่มีค่ามากกรองจนกระทั่งได้กระแสดีซีที่เรียบมีค่าคงที่เท่ากับ I_D ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าดีซีนี้มีค่าดังสมการ

$$\begin{aligned} P &= \left(\frac{1}{T}\int_0^T v_D dt\right) I_D \\ &= V_D I_D \\ &= 0.9V_S I_D \cos\alpha \end{aligned} \tag{2.5}$$

กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟที่ไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.7(ค) และมีค่าดังสมการ

$$P = V_S I_{S1} \cos\theta_1 \tag{2.6}$$

และกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟจะไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2.7(ค) มีค่าดังสมการ

$$Q = V_S I_{S1} \sin\theta_1 \tag{2.7}$$

โดยที่ I_{S1} คือค่า rms ของส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_s ซึ่งมีลักษณะคลื่นเป็นสแควร์ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) โดยคลื่นกระแสดังกล่าวนี้สามารถแสดงในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการ

$$i_s(\omega t) = \frac{4}{\pi} I_D \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2n-1} \right) \sin[(2n-1)(\omega t - \alpha)] \tag{2.8}$$

หรือ

$$\begin{aligned} i_s(\omega t) = {} & \sqrt{2} I_{S1} \sin(\omega t - \alpha) + \sqrt{2} I_{S3} \sin[3(\omega t - \alpha)] \\ & + \sqrt{2} I_{S5} \sin[5(\omega t - \alpha)] + \ldots \end{aligned} \tag{2.9}$$

แอมปลิจูดของส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_s นี้มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_{S1(\max)} = \frac{4}{\pi} I_D \tag{2.10}$$

ค่า rms ของส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_s นี้มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} I_{S1} &= \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_D \\ &= 0.9 I_D \end{aligned} \tag{2.11}$$

ค่า rms ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแส i_s นี้มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_{Sn} = \frac{I_{S1}}{n} \tag{2.12}$$

ค่า rms ของกระแส i_s มีค่าเท่ากับ I_D และมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} I_S &= \sqrt{I_{S1}^2 + I_{S3}^2 + I_{S5}^2 + \ldots + I_{S\infty}^2} \\ &= I_D \end{aligned} \tag{2.13}$$

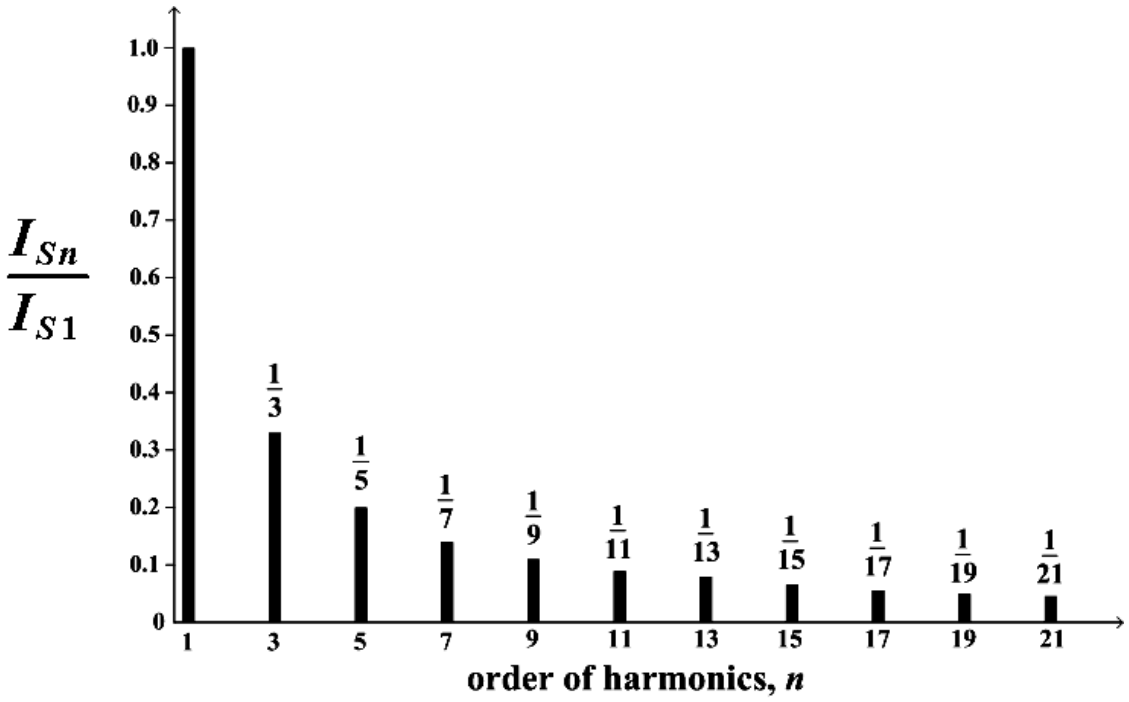
ค่าความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์โมนิกส์รวม (total harmonic distortion) ของกระแสเอซี i_s สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{THD_I} = \frac{\sqrt{I_S^2 - I_{S1}^2}}{I_{S1}} \tag{2.14}$$

เมื่อแทนค่า I_{S1} จากสมการ (2.11) และค่า I_S จากสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.14) จะได้ค่าความผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสเอซี i_s เท่ากับ

$$\begin{aligned} \mathrm{THD_I} &= \frac{\sqrt{I_D^2 - (0.9I_D)^2}}{0.9I_D} \\ &= \frac{I_D\sqrt{1-(0.9)^2}}{0.9I_D} \\ &= 0.4843 \end{aligned} \tag{2.15}$$

กระแสเอซี i_s ที่มีลักษณะคลื่นเป็นสแควร์สามารถแสดงส่วนประกอบมูลฐานและฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ในรูปแบบของสเปกตรัมได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมแสดงส่วนประกอบมูลฐานและฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ของกระแสเอซี i_s

เนื่องจากลักษณะคลื่นของกระแสจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้า i_S ไม่เป็นไซน์ ดังนั้นค่าเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ PF ทางด้านแหล่งจ่ายเอซีจึงสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$PF = DTF \times DPF \tag{2.16}$$

โดยที่ DTF คือค่า distortion factor ของกระแสจากแหล่งจ่ายเอซี i_S มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} DTF &= \frac{I_{S1}}{I_S} \\ &= \frac{0.9I_D}{I_D} \\ &= 0.9 \end{aligned} \tag{2.17}$$

และ DPF คือค่า displacement factor ของกระแสจากแหล่งจ่ายเอซี i_S มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} DPF &= \cos\theta_1 \\ &= \cos\alpha \end{aligned} \tag{2.18}$$

ดังนั้นค่าเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเอซีจึงมีค่าดังสมการ

$$PF = 0.9\cos\alpha \tag{2.19}$$

2.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตท (โหมด II)

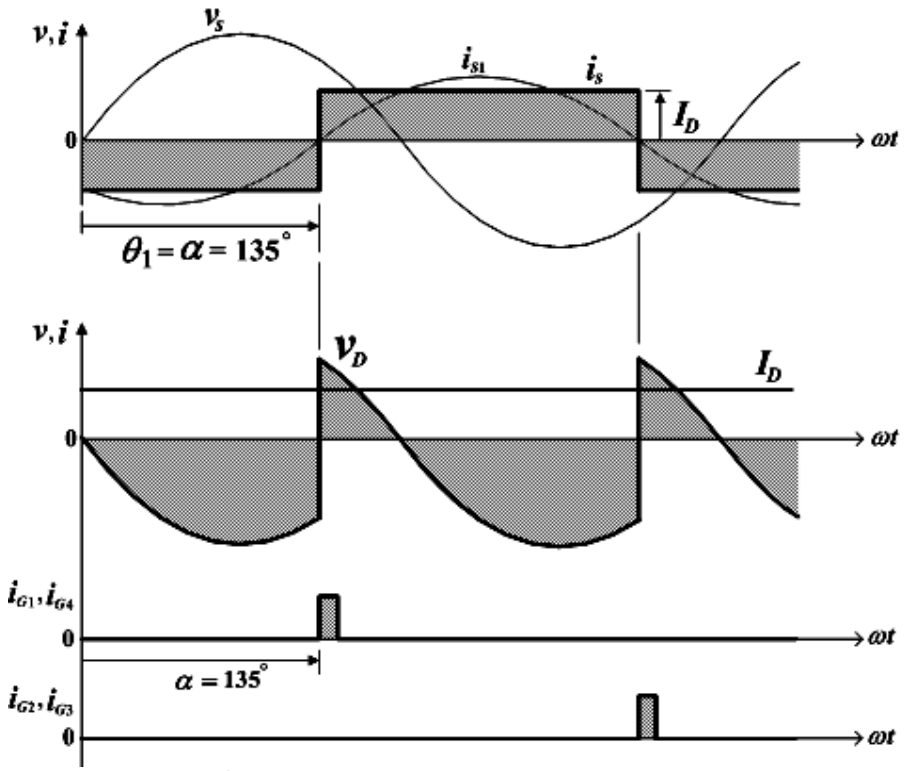
กรณีทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตทซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นกรณีที่ทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $90^\circ - 180^\circ$ $(90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ)$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 135° สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.9(ก) จะเห็นได้ว่าขณะที่ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทริสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขับเกทและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 ได้รับแรงดันไบแอสกลับเท่ากับ V_S นั่นหมายความว่าไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 คอมมิวเตทจากแรงดันไลน์การไฟฟ้า V_S จึงเรียกวิธีการทำให้ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า “ไลน์คอมมิวเตท” การทำงาน

ดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_{S1} ล้าหลังคลื่นแรงดัน v_S เป็นมุมเท่ากับ 135° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรสมมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.9(ข) และ 2.9(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้แรงดันดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 2.6 จะมีค่าเป็นลบและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชั่นของมุมจุดชนวน α ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (2.3) ส่วนกระแสดีซี I_D จะมีค่าเป็นบวกมีค่าดังสมการ

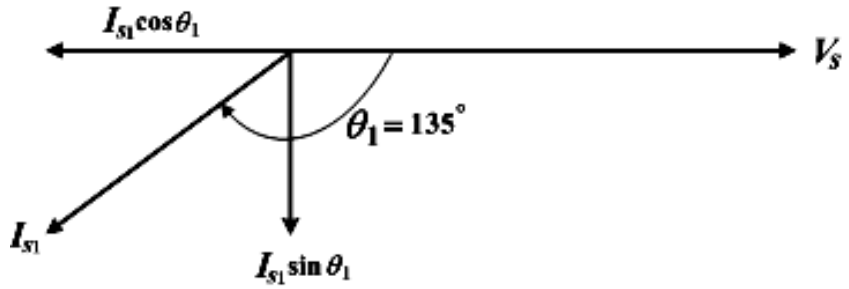
$$\begin{aligned} I_D &= \frac{V_D-(-V_B)}{R_D} \\ &= \frac{1}{R_D}(0.9V_S\cos\alpha+V_B) \end{aligned} \tag{2.20}$$

สำหรับกรณีที่ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตทนี้ กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟมีค่าดังสมการ (2.6) จะไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซีและกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟที่มีค่าดังสมการ (2.7) จะไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ สามารถแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในวงจรสมมูลรูปที่ 2.9(ค)

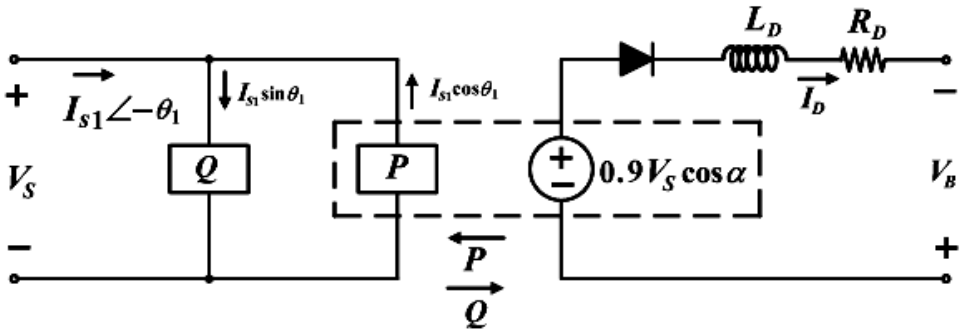
สำหรับคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ทำงานในลักษณะไลน์คอมมิวเตทในโหมด I (เร็กติฟายเออร์โหมด) และโหมด II (อินเวอร์เตอร์โหมด) สามารถแสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันดีซี V_D เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน α ได้ดังรูปที่ 2.10 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ P และกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟ Q เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน α ได้ดังรูปที่ 2.11 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่า distortion factor $:DTF$, displacement power factor $:DPF$ และเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ PF เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน α ได้ดังรูปที่ 2.12



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสพร้อมสัญญาณควบคุมเกท

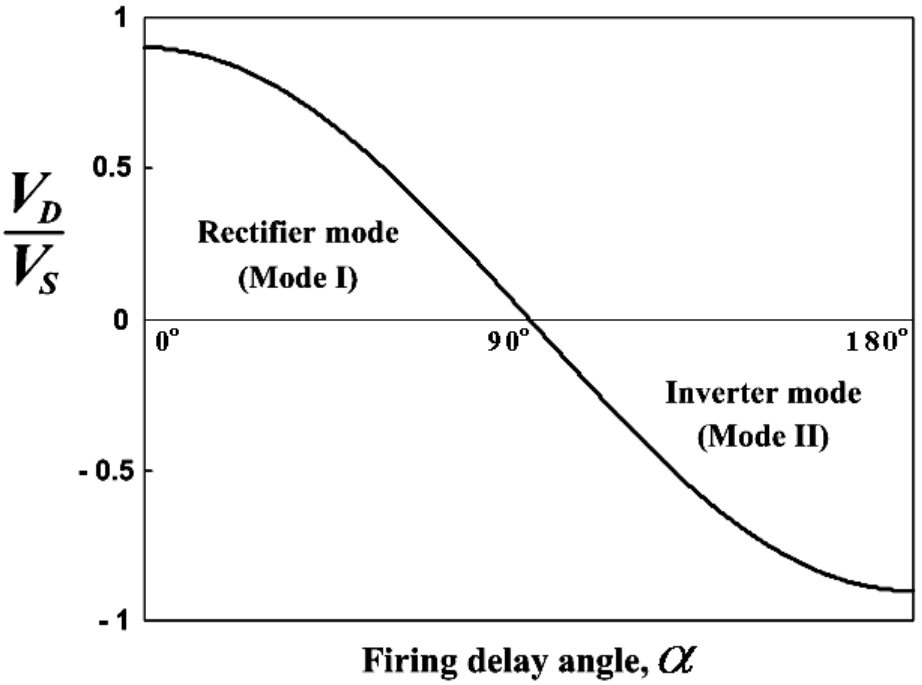


(ข) เฟเซอร์ไดอะแกรม

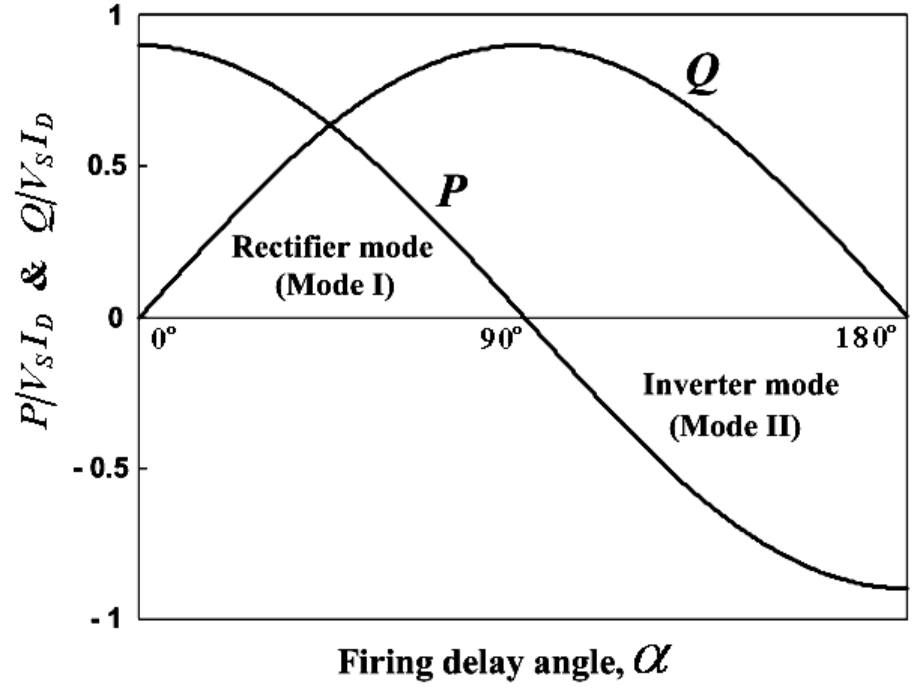


(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

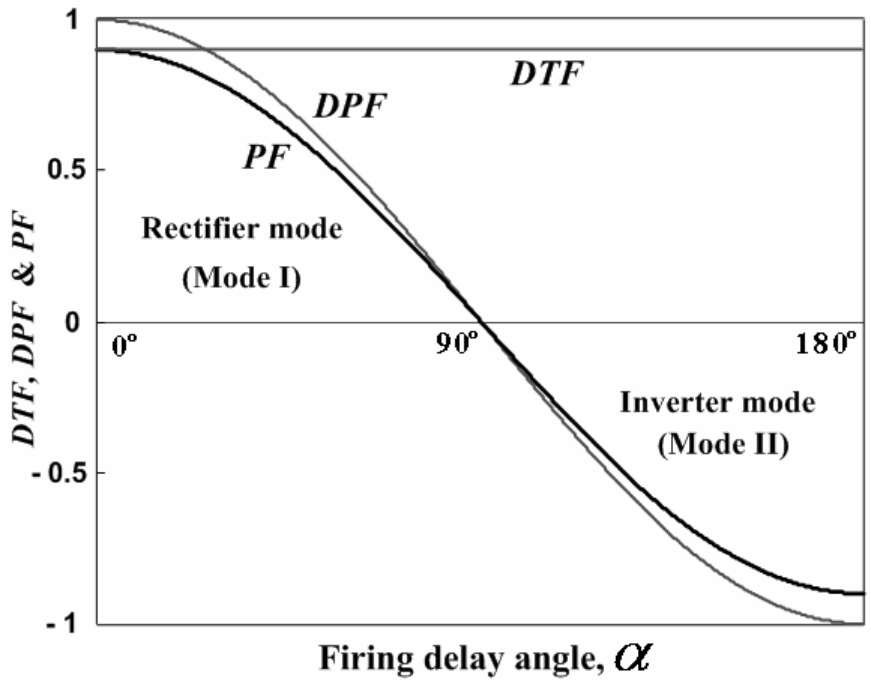
รูปที่ 2.9 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ $\alpha = 135^\circ$ (โหมด II)



รูปที่ 2.10 ค่า Normalized ของแรงดันดีซี V_D ขณะทำงานในลักษณะไลน์คอมมิวเตท



รูปที่ 2.11 ค่า Normalized ของกำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ P และกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟ Q ที่ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานในลักษณะไลน์คอมมิวเตท



รูปที่ 2.12 ค่า DTF, DPF และ PF ขณะทำงานในลักษณะไลน์คอมมิวเตท

2.3.3 อินเวอร์เตอร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ (โหมด III)

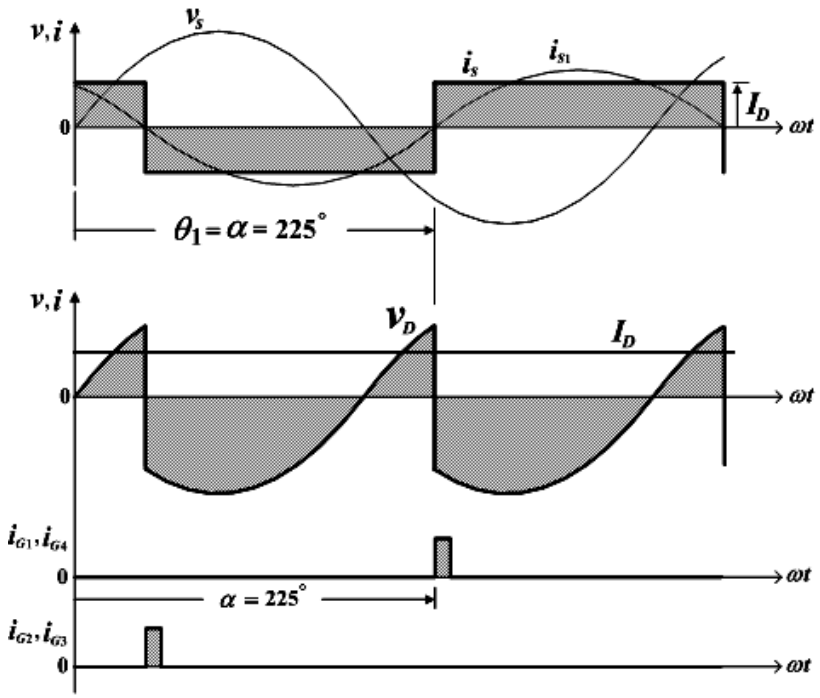
กรณีทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นกรณีที่ทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $180^\circ - 270^\circ$ $(180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ)$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 225° สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.13(ก) จะเห็นได้ว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดนี้ไม่สามารถใช้แรงดันจากเอซีไลน์ในการคอมมิวเตทได้ เนื่องจากขณะที่ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทริสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขับเกทและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทริส เตอร์ T_1 และ T_4 ยังคงได้รับแรงดันไบแอสตรงเท่ากับ v_S จึงไม่สามารถทำให้ไทริส เตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ ดังนั้นการทำงานในโหมดนี้จะต้องใช้วิธีการคอมมิวเตทแบบบังคับจึงจะสามารถทำให้ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_{S1} ล้าหลังคลื่นแรงดัน v_S เป็นมุมเท่ากับ 225° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรสมมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.13(ข) และ 2.13(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีการทำงานในโหมดนี้จะได้แรงดันด้านดีซี v_D ที่แสดงในรูปที่ 2.6 มีค่าเป็นลบและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชั่นของมุมจุดชนวน α ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (2.3) ส่วนกระแสดีซี I_D จะมีค่าเป็นบวกมีค่าดังสมการ

(2.20) กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟและรีแอ็คทีฟมีค่าดังสมการ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ จะไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซี สามารถแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในวงจรสมมูลรูปที่ 2.13(ค)

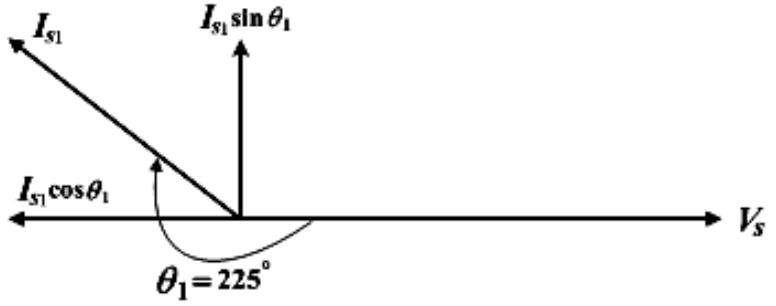
2.3.4 เร็กติฟายเออร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ (โหมด IV)

กรณีทำงานเป็นเร็กติฟายเออร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นกรณีที่ทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $270^\circ - 360^\circ$ $(270^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ)$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 315° สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.14(ก) จะเห็นได้ว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดนี้ไม่สามารถใช้แรงดันจากเอซีไลน์ในการคอมมิวเตทได้ เนื่องจากขณะที่ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทริสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขับเกทและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทริส เตอร์ T_1 และ T_4 ยังคงได้รับแรงดันไบแอสตรงเท่ากับ V_S จึงไม่สามารถทำให้ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ ดังนั้นการทำงานในโหมดนี้จะต้องใช้วิธีการคอมมิวเตทแบบบังคับจึงจะสามารถทำให้ไทริสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส $\boldsymbol{i_{S1}}$ ล้าหลังคลื่นแรงดัน V_S เป็นมุมเท่ากับ 315° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรสมมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.14(ข) และ 2.14(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้แรงดันดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะมีค่าเป็นลบและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชั่นของมุมจุดชนวน α ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (2.3) ส่วนกระแสดีซี I_D จะมีค่าเป็นบวกมีค่าดังสมการ (2.20) กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟและรีแอ็คทีฟมีค่าดังสมการ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ จะไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซี สามารถแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในวงจรสมมูลรูปที่ 2.14(ค)

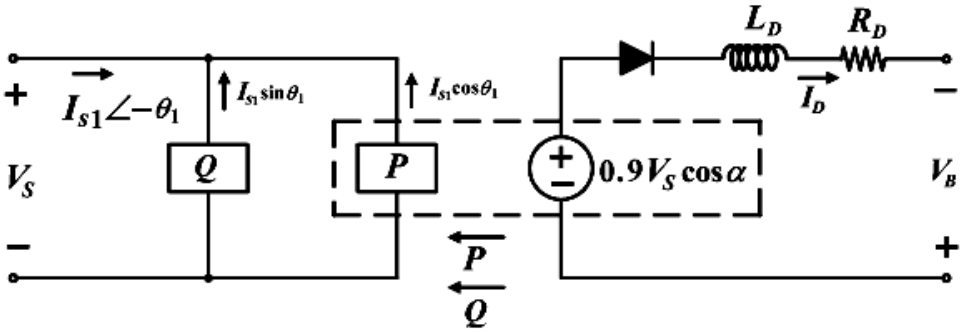
สำหรับคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ทำงานในลักษณะคอมมิวเตทแบบบังคับในโหมด III (อินเวอร์เตอร์โหมด) และโหมด IV (เร็กติฟายเออร์โหมด) สามารถแสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันดีซี V_D เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน α ได้ดังรูปที่ 2.15 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ P และกำลังไฟฟ้ารีแอ็คทีฟ Q เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน α ได้ดังรูปที่ 2.16 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่า distortion factor : DTF, displacement power factor : DPF และเพาเวอร์แฟ็คเตอร์ PF เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน α ได้ดังรูปที่ 2.17



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสพร้อมสัญญาณควบคุมเกท

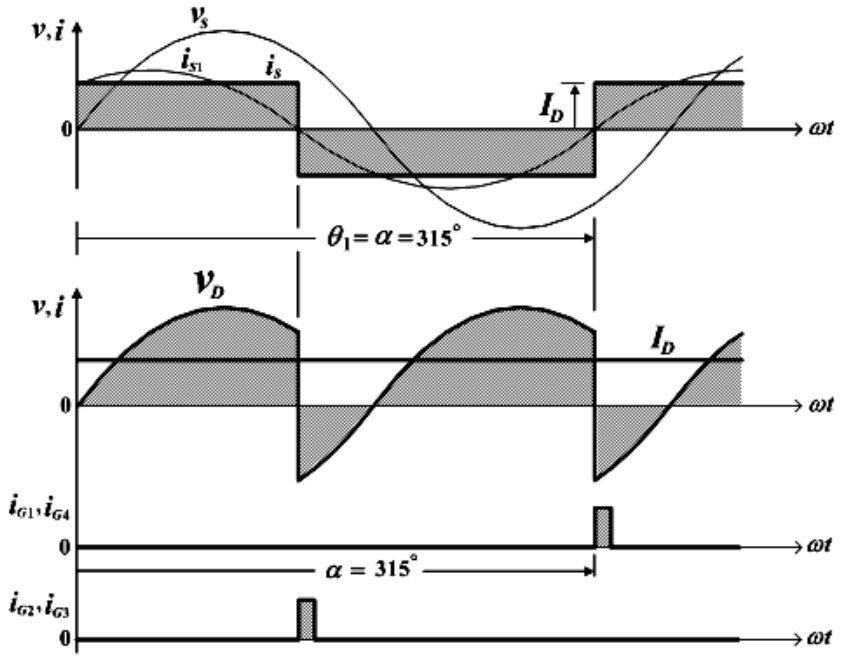


(ข) เฟเซอร์ไดอะแกรม

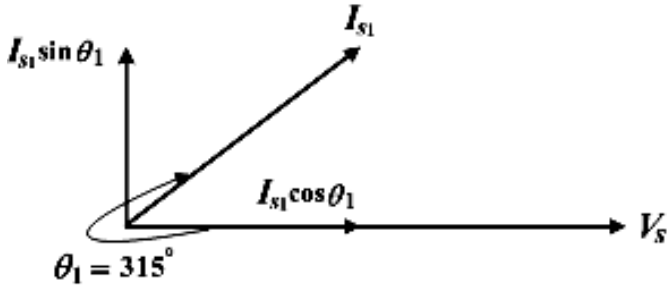


(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

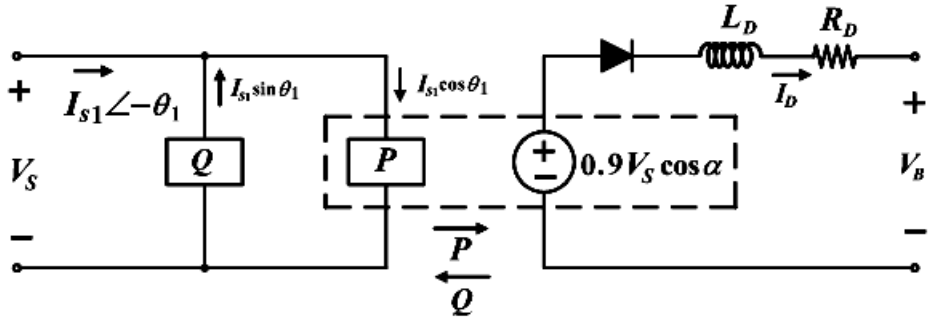
รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ $\alpha = 225^\circ$ (โหมด III)



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสพร้อมสัญญาณควบคุมเกท

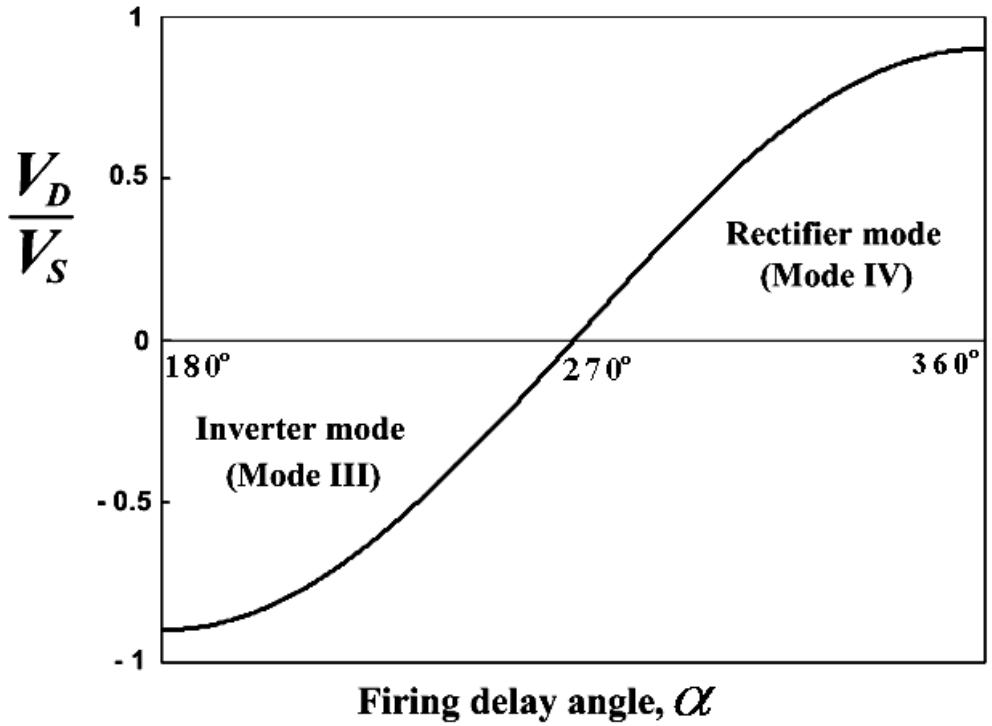


(ข) เฟเซอร์ไดอะแกรม

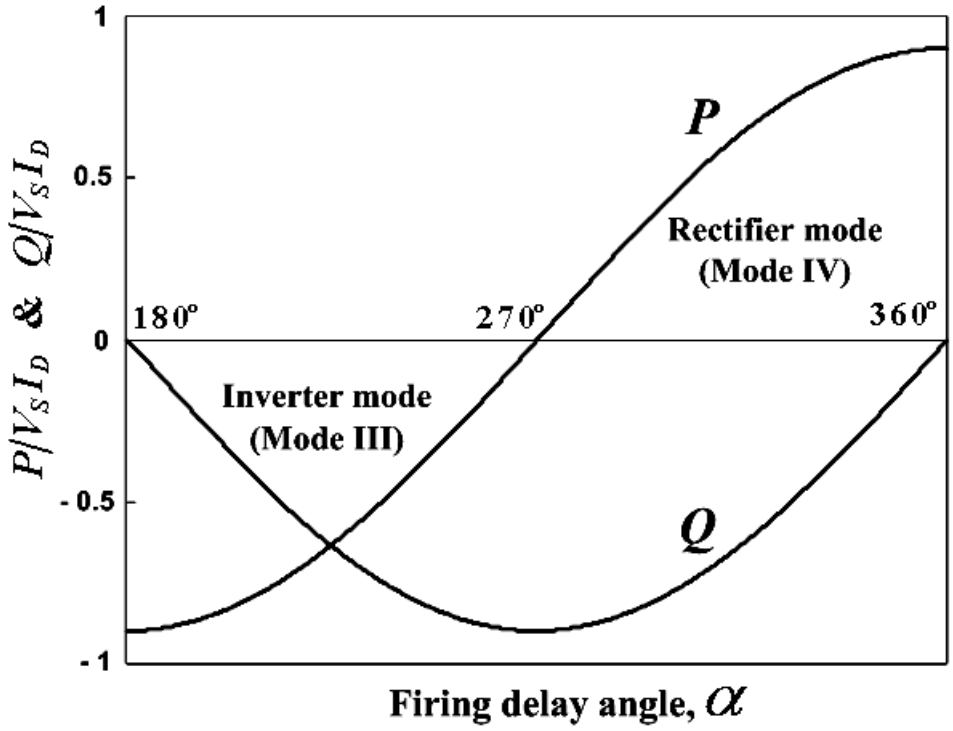


(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

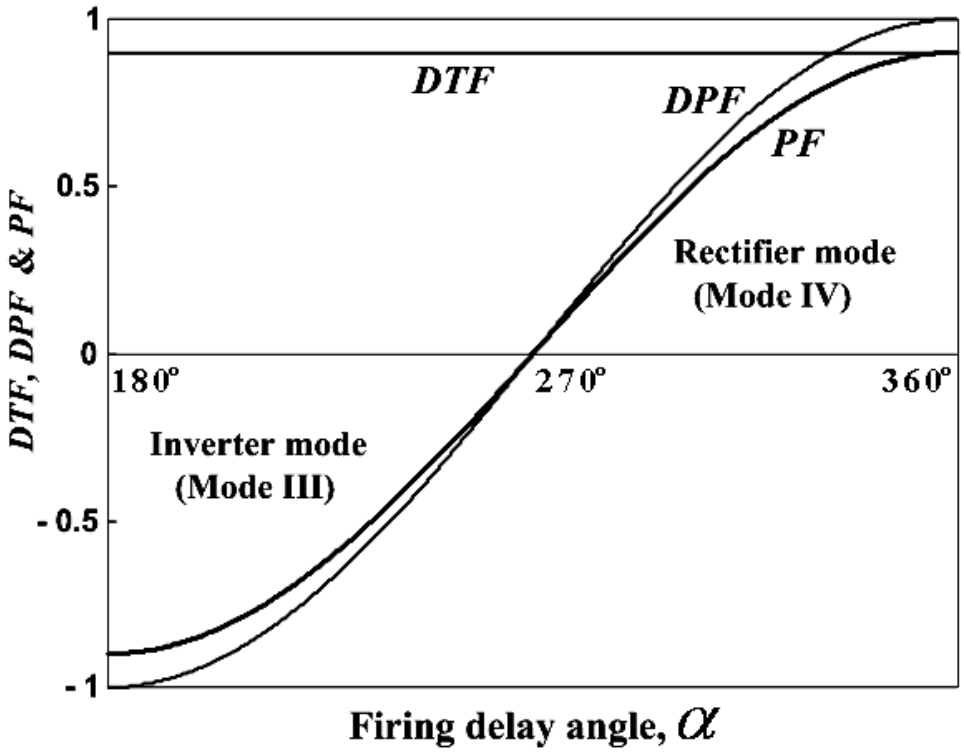
รูปที่ 2.14 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นเร็กติฟายเออร์ที่ $\alpha = 315^\circ$ (โหมด IV)



รูปที่ 2.15 ค่า Normalized ของแรงดันดีซี V_D ขณะทำงานที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ



รูปที่ 2.16 ค่า Normalized ของกำลังไฟฟ้า P และ Q ขณะทำงานที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ



รูปที่ 2.17 ค่า DTF, DPF และ PF ขณะทำงานที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ

2.4 สรุป

การที่จะเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดทางด้านเอซีของแหล่งจ่ายเอซีและดีซีได้นั้น วงจรที่ใช้ในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีไปยังด้านเอซีจะต้องออกแบบวงจรให้ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ โหลดจะดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลน์การไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริม ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะถูกป้อนเข้าแหล่งจ่ายเอซีของไลน์การไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไทริสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตท (โหมด II) เพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายดีซีให้สามารถร่วมจ่ายโหลดพร้อมกับแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้า