

หลักการของไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับระบบการต่อใช้งานร่วมกันของแหล่งจ่ายดีซีเข้ากับไลน์การไฟฟ้า

The Principle of a Single-Phase Thyristor Inverter for Utility Interactive DC-Source System

ยงยุทธ นาราชฎูร์ และ วิภาวัลย์ นาคทรัพย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการของไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับระบบการต่อใช้งานร่วมกันของแหล่งจ่ายดีซีเข้ากับไลน์การไฟฟ้าโดยใช้ไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเป็นวงจรเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายดีซี 84 V เข้ากับแหล่งจ่ายเอซี 100 V เป็นกรณีศึกษาของบทความนี้ ไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมให้ทำงานในโหมดไลน์คอมมิวเตชันซึ่งมีช่วงการควบคุมของมุมจุดชนวนจาก 90° ถึง 180° การทำงานของวงจรจะถูกจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice ได้รับคลื่นแรงดันและกระแสต่าง ๆ ในวงจร จากนั้นคลื่นแรงดันและกระแสเหล่านี้จะถูกวิเคราะห์โดยใช้ FFT ซึ่งสามารถนำไปสู่การคำนวณกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ (P_o) กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีการไฟฟ้า (P_s) และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด (P_L) ในที่สุด การทำงานของระบบที่นำเสนอได้ถูกยืนยันความถูกต้องด้วยผลจากการจำลองแบบ ซึ่งนำเสนอไว้อย่างละเอียดในบทความนี้

Abstract

This paper presents the principle of a single-phase thyristor inverter for a utility interactive dc-source system. A single-phase thyristor inverter, that connects the 84 V dc-source with the 100 V ac-source is studied. The thyristor inverter is operated as a line-commutated mode, which has a control range of firing angle from 90° to 180° . The operation of this circuit is simulated by using PSpice, when the voltage and current waveforms are obtained. The waveforms are analyzed by FFT leading to the calculation of inverter power (P_o), ac

source power (P_s) and load power (P_L). The operation of the proposed system is verified by its suitable simulation results, which are presented in detail in this paper.

1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าที่จ่ายพลังงานจากไลน์การไฟฟ้าโดยทั่วไปใช้ไฟฟ้าเอซีทั้งระบบ 1-เฟส และ 3-เฟส ดังนั้นโหลดของระบบไฟฟ้าจึงเป็นโหลดเอซี แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่นบางแหล่งได้ไฟฟ้าดีซี เช่นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจมากในยุคปัจจุบัน [2-4] เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันได้มาจากน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งนับวันราคายิ่งสูงขึ้นเรื่อย ๆ นอกจากนี้ยังมีพลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้โดยใช้แบตเตอรี่ก็อยู่ในรูปของไฟฟ้าดีซีเช่นเดียวกัน ปัญหาจึงอยู่ที่ว่าเมื่อต้องการใช้ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีร่วมจ่ายโหลดเอซีตัวเดียวกันและเวลาเดียวกันกับแหล่งจ่ายเอซีจากไลน์การไฟฟ้านั้นจะมีวิธีการอย่างไร ใช้อุปกรณ์อะไร สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเชื่อมต่อเพื่อจ่ายโหลดร่วมกันนี้ได้

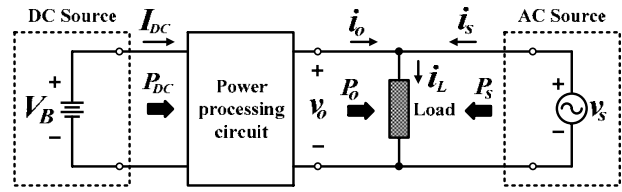
พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของไฟฟ้าดีซีเมื่อต้องจ่ายโหลดร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเอซีจากไลน์การไฟฟ้าจะต้องมีอุปกรณ์และเทคนิคในการเชื่อมต่อที่เหมาะสม [1] โดยในบทความนี้ได้นำเสนอ 1-เฟสไทรสเตอร์คอนเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตชันที่ควบคุมให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้สำหรับการเชื่อมต่อนี้ [5] ซึ่งสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดีซีเพื่อร่วมจ่ายโหลดเอซีพร้อมกันกับแหล่งจ่ายเอซีจากไลน์การไฟฟ้าได้โดยการควบคุมมุม

จุดชนวนในย่าน $90^\circ \sim 180^\circ$ โดยที่กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีจะมีค่าต่ำสุดเมื่อปรับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ในอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 90° และกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีนี้นี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับเพิ่มมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเมื่อปรับเพิ่มมุมจุดชนวนนี้ให้มีค่าเท่ากับ 180° ในการร่วมกันจ่ายโหลดของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะควบคุมให้ลำดับความสำคัญในการจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีก่อน นั่นหมายความว่าถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้พอดีก็ไม่จำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลนการไฟฟ้า หรือถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ ในกรณีนี้โหลดจะดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลนการไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริมโดยอัตโนมัติ แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะถูกป้อนเข้าแหล่งจ่ายเอซีของไลนการไฟฟ้าหรือสามารถขายคืนพลังงานไฟฟ้าส่วนส่วนที่เหลือใช้นี้ให้กับการไฟฟ้าได้ ระบบที่นำเสนอในบทความนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการจัดการพลังงานไฟฟ้าในระบบที่ใหญ่ขึ้นในอุตสาหกรรมได้กล่าวคือสามารถนำระบบดังกล่าวนี้ไปช่วยจ่ายโหลดในช่วงพีคโหลด (ช่วงเวลาที่การไฟฟ้าคิดค่าพลังงานไฟฟ้าแพงกว่า) โดยในช่วงออฟโหลด (ช่วงเวลาที่การไฟฟ้าคิดค่าพลังงานไฟฟ้าถูกกว่า) ก็เก็บพลังงานไว้ก่อนโดยใช้แบตเตอรี่เพื่อนำมาใช้ในช่วงพีคโหลด

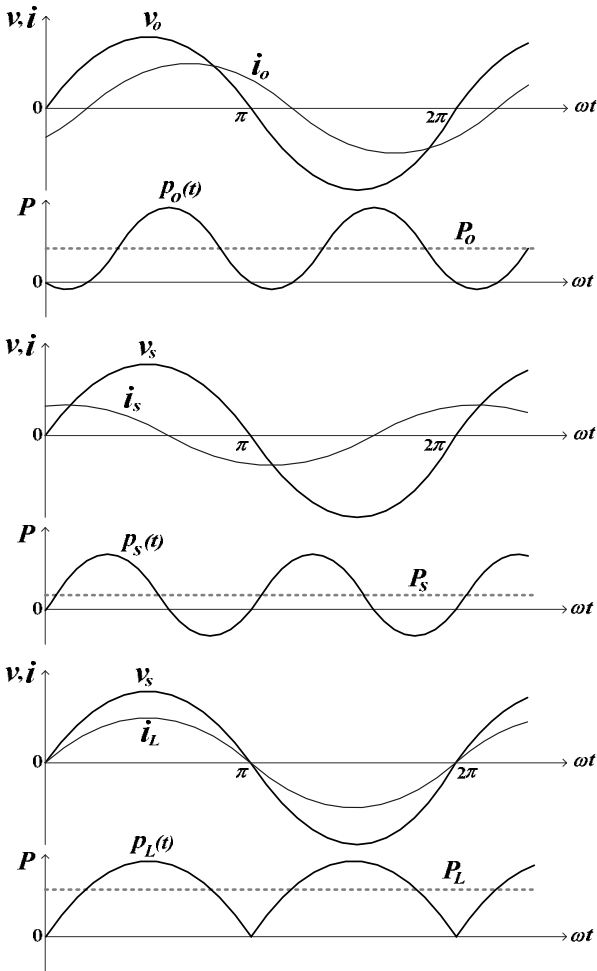
2. แนวคิดในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายเอซีและดีซี

ในการที่จะเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดทางด้านเอซีของแหล่งจ่ายเอซีและดีซีได้นั้นจะต้องมีวงจรที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้า (power processing circuit) ระหว่างสองแหล่งจ่ายดังกล่าว โดยสามารถแสดงแนวคิดได้ดังรูปที่ 1 กำลังไฟฟ้าสามารถไหลผ่านวงจรที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทางขึ้นอยู่กับการจัดการของวงจร ถ้าจัดการให้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีได้

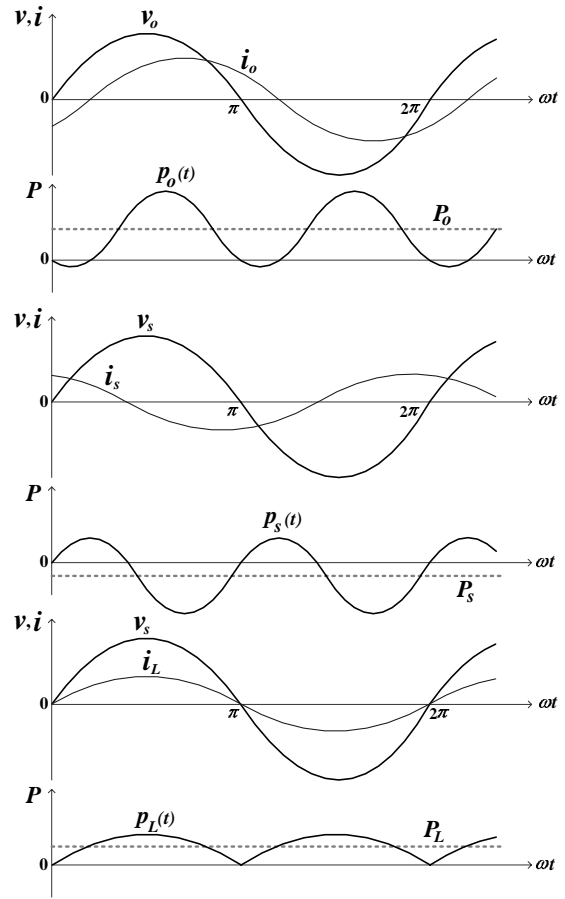
ก็คือวงจรทำหน้าที่เป็นเรกติฟายเออร์ ในทางกลับกันถ้าวงจรนี้จัดการให้กำลังไฟฟ้าสามารถไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซีได้ก็คือวงจรทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ สำหรับบทความนี้จะทำการออกแบบวงจรที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้านี้ให้ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์เพื่อให้กำลังไฟฟ้าดีซีจากแบตเตอรี่สามารถไหลไปยังด้านเอซีเพื่อร่วมจ่ายโหลดพร้อมกับแหล่งจ่ายเอซีไลนการไฟฟ้าได้ แนวคิดในรูปที่ 1 นี้ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ ($P_O < P_L$) โหลดจะดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลนการไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริม แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ ($P_O > P_L$) กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะถูกป้อนเข้าแหล่งจ่ายเอซีของไลนการไฟฟ้า โดยที่ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายผ่านมาจากแหล่งจ่ายดีซี P_O จะสอดคล้องกับขั้วของแรงดัน V_O และทิศทางของกระแส i_O ในขณะที่ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด P_L จะสอดคล้องกับขั้วของแรงดัน V_S และทิศทางของกระแส i_L และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลนการไฟฟ้า P_S จะสอดคล้องกับขั้วของแรงดัน V_S และทิศทางของกระแส i_S ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าและลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสเหล่านี้สามารถได้ดังรูปที่ 2 สำหรับกรณี $P_O < P_L$ และรูปที่ 3 สำหรับกรณี $P_O > P_L$



รูปที่ 1 แนวคิดในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายเอซีและดีซี



รูปที่ 2 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสพร้อมกำลังไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ในกรณี $P_o < P_L$



รูปที่ 3 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสพร้อมกำลังไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ในกรณี $P_o > P_L$

เมื่อแหล่งจ่ายดีซีและเอชี่ถูกเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดดังระบบในรูปที่ 1 จะได้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดมีค่าดังสมการ

$$P_L = P_o + P_s \quad (1)$$

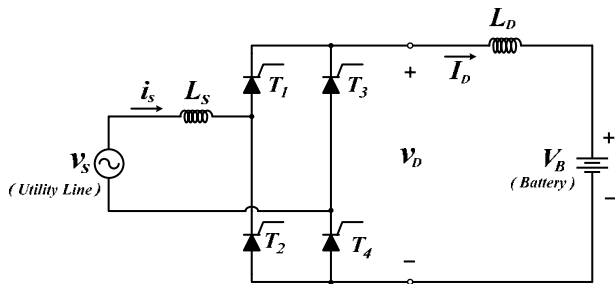
ถ้าไม่คิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจร power processing จะได้ $P_o = P_{DC}$ และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดมีค่าดังสมการ

$$I_L = I_o + I_s \quad (2)$$

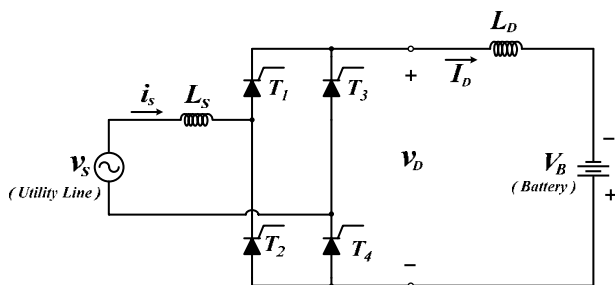
3. การทำงานของคอนเวอร์เตอร์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้าสามารถทำงานได้ทั้งเป็นเรกติฟายเออร์หรืออินเวอร์เตอร์ ขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวน (α) ที่ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์นี้ วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสขณะต่อใช้งานเป็นกรณีเรกติฟายเออร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และขณะต่อใช้งานเป็นกรณีของอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดัง

รูปที่ 5 โดยโครงสร้างของวงจรประกอบด้วยไทรสเตอร์ 4 ตัว T_1 ถึง T_4 วงจรกำลังทางด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ใช้ตัวเหนี่ยวนำ L_D ที่มีค่ามากกว่ากระแสดีซี I_D ให้เรียบ ส่วนทางด้านเอซีของวงจรต่ออยู่กับแหล่งจ่ายเอซีไลเนอร์การไฟฟ้าซึ่งสามารถแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย มุมจุดชนวน (α) ที่ควบคุมการ



รูปที่ 4 คอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสขณะเป็นเรกติฟายเออร์



รูปที่ 5 คอนเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสขณะเป็นอินเวอร์เตอร์

ทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์สามารถปรับได้ในย่าน $0 \sim 360^\circ$ ซึ่งจะส่งผลทำให้มุมเลื่อนเฟส θ ของคลื่นกระแสด้านเอซี i_s ล้าหลังจากคลื่นแรงดันของแหล่งจ่ายไลเนอร์การไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในย่าน $0 \sim 360^\circ$ เช่นเดียวกัน ตลอดย่านของการปรับมุมชนวน α นี้สามารถแบ่งโหมดการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ออกได้เป็น 4 โหมดดังต่อไปนี้

3.1 เรกติฟายเออร์แบบไลเนอร์คอมมิวเตท (โหมด 1)

กรณีที่ไทรสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นเรกติฟายเออร์แบบไลเนอร์คอมมิวเตทซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 4 เป็นกรณีที่ทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $0 \sim 90^\circ$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 45° สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ได้ดังรูปที่

6(ก) จะเห็นได้ว่าขณะที่ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทรสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขับเกตและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 ได้รับแรงดันไบแอสกลับเท่ากับ V_s นั้นหมายความว่าไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 คอมมิวเตทจากแรงดันไลเนอร์การไฟฟ้า V_s จึงเรียกรวมการทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า “ไลเนอร์คอมมิวเตท” การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_{s1} ล้าหลังคลื่นแรงดัน V_s เป็นมุมเท่ากับ 45° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรสมมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6(ข) และ 6(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้แรงดันดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 4 จะมีค่าเป็นบวกและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวน α ดังสมการ

$$\begin{aligned} V_D &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha \\ &= 0.9 V_s \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่ V_s คือค่า rms ของแรงดันแหล่งจ่ายเอซีไลเนอร์การไฟฟ้า สำหรับการดำเนินงานของคอนเวอร์เตอร์เป็นเรกติฟายเออร์แบบไลเนอร์คอมมิวเตทจะมีกระแสดีซี I_D ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 เป็นบวกมีค่าเฉลี่ยที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{V_D - V_B}{R_D} \\ &= \frac{1}{R_D} (0.9 V_s \cos \alpha - V_B) \end{aligned} \quad (4)$$

กำลังไฟฟ้าดีซีที่ไหลไปชาร์จแบตเตอรี่ในวงจรรูปที่ 6(ค) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = V_D I_D = 0.9 V_s I_D \cos \alpha \quad (5)$$

กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟที่ไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 6(ค) และมีค่าดังสมการ

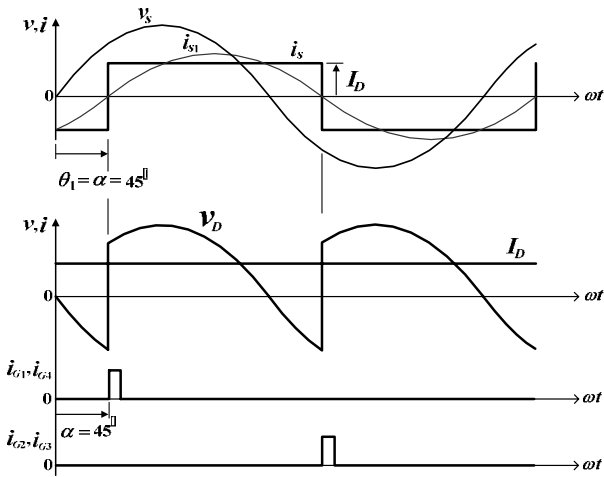
$$P = V_s I_{s1} \cos \theta \quad (6)$$

และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 6(ค) มีค่าดังสมการ

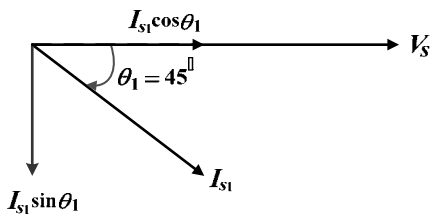
$$Q = V_S I_{S1} \sin \theta_1 \quad (7)$$

โดยที่ I_{S1} คือค่า rms ของส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_s ซึ่งมีลักษณะคลื่นเป็นสแควร์ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) โดยคลื่นกระแสดังกล่าวนี้สามารถแสดงในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังสมการ

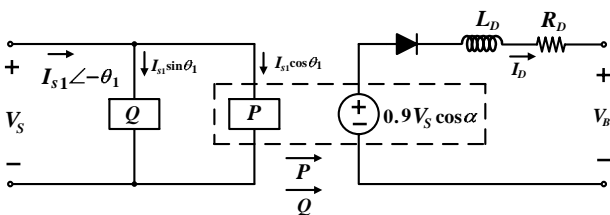
$$i_s = \frac{4}{\pi} I_D \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2n-1} \right) \sin[(2n-1)(\omega t - \alpha)] \quad (8)$$



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสพร้อมสัญลักษณ์ควบคุมเกท



(ข) เฟเซอร์ไดอะแกรม



(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 6 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นเรกติฟายเออร์ที่ $\alpha = 45^\circ$ (โหมด I)

ค่า rms ของส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_s นี้มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_{S1} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_D = 0.9 I_D \quad (9)$$

ค่า rms ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของกระแส i_s นี้มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_{Sn} = \frac{I_{S1}}{n} \quad (10)$$

ค่า rms ของกระแส i_s มีค่าเท่ากับ I_D และมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$I_S = \sqrt{I_{S1}^2 + I_{S3}^2 + I_{S5}^2 + \dots + I_{S\infty}^2} = I_D \quad (11)$$

เนื่องจากลักษณะคลื่นของกระแสจากแหล่งจ่ายเอซี i_s ไม่เป็นไซน์ ดังนั้นค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF) ทางด้านแหล่งจ่ายเอซีจึงสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$PF = DTF \times DPF \quad (12)$$

โดยที่ DTF คือค่า distortion factor ของกระแสจากแหล่งจ่ายเอซี i_s มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$DTF = \frac{I_{S1}}{I_S} = \frac{0.9 I_D}{I_D} = 0.9 \quad (13)$$

และ DPF คือค่า distortion factor ของกระแสจากแหล่งจ่ายเอซี i_s มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$DPF = \cos \theta_1 = \cos \alpha \quad (14)$$

ดังนั้นค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายเอซีจึงมีค่าดังสมการ

$$PF = 0.9 \cos \alpha \quad (15)$$

3.2 อินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตท (โหมด II)

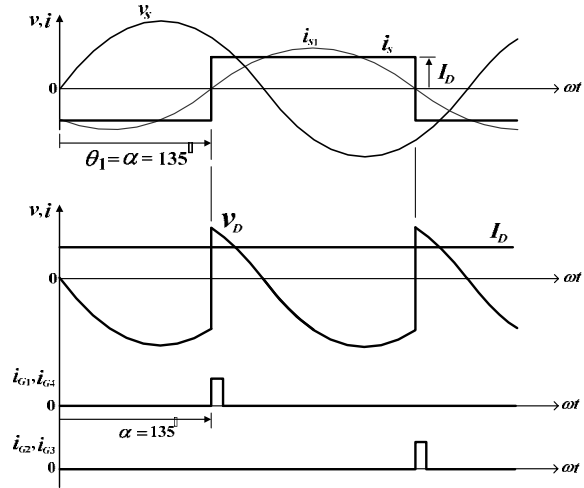
ในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตทซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 5 โดยทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $90^\circ \sim 180^\circ$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 135° สามารถแสดงลักษณะของคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 7(ก) จะเห็นว่าขณะที่ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทรสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขับเกตและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 ได้รับแรงดันไบแอสกลับเท่ากับ V_S นั้นหมายความว่าไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 คอมมิวเตทจากแรงดันไลน์การไฟฟ้า V_S จึงเรียกรวีกวิธีการทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า “ไลน์คอมมิวเตท” การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_{s1} ล้าหลังคลื่นแรงดัน V_S เป็นมุมเท่ากับ 135° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรสมมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 7(ข) และ 7(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้แรงดันดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 5 จะมีค่าเป็นลบและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวน α ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (3) ส่วนกระแสดีซี I_D จะมีค่าเป็นบวกมีค่าดังสมการ

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{V_D - (-V_B)}{R_D} \\ &= \frac{1}{R_D} (0.9 V_S \cos \alpha + V_B) \end{aligned} \quad (16)$$

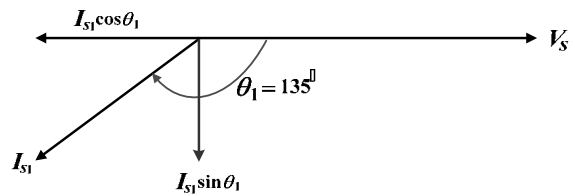
สำหรับกรณีที่ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตทนี้ กำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟที่มีค่าดังสมการ (6) จะไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซีและกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟที่มีค่าดังสมการ (7) จะไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีของคอนเวอร์เตอร์ สามารถแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในวงจรสมมูลรูปที่ 7(ค)

สำหรับคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ทำงานในลักษณะไลน์คอมมิวเตทในโหมด I (โหมดเรกติฟายเออร์) และโหมด II (โหมดอินเวอร์เตอร์) สามารถแสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลง

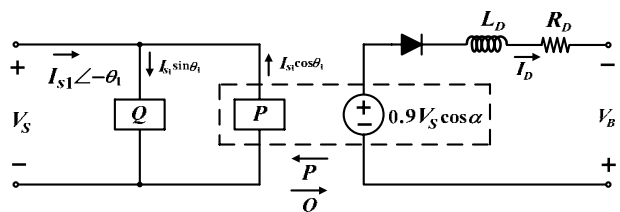
ของค่ากำลังไฟฟ้าแอ็คทีฟ (P) และกำลังไฟฟารีแอ็คทีฟ (Q) เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน (α) ได้ดังรูปที่ 8 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่า distortion factor (DTF), displacement power factor (DPF) และเพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF) เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน (α) ได้ดังรูปที่ 9



(ก) คลื่นแรงดันและกระแสพร้อมสัญญาณควบคุมเกต

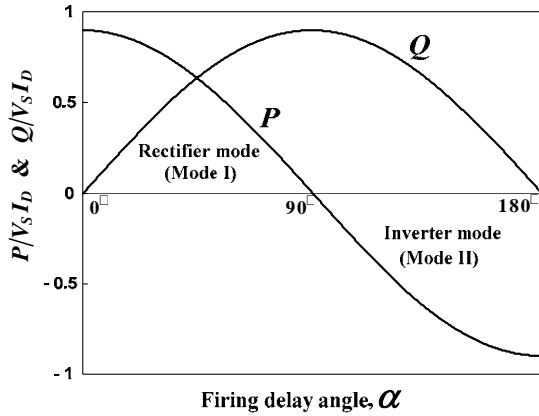


(ข) เฟเซอร์ไดอะแกรม

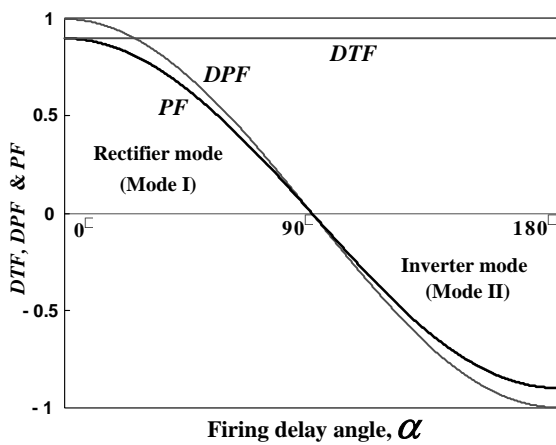


(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 7 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ $\alpha = 135^\circ$ (โหมด II)



รูปที่ 8 ค่า Normalized ของกำลังไฟฟ้า P และ Q ขณะทำงานในลักษณะไล่นคอมมิวเตท



รูปที่ 9 ค่า DTF , DPF และ PF ขณะทำงานในลักษณะไล่นคอมมิวเตท

3.3 อินเวอร์เตอร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ (โหมด III)

กรณีทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 5 เป็นกรณีที่ทำให้การปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $180^\circ \sim 270^\circ$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 225° สามารถแสดงคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 10(ก) จะเห็นได้ว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดนี้ไม่สามารถใช้แรงดันจากเอซีไลน์ในการคอมมิวเตทได้ เนื่องจากขณะที่ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทรสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขั้วเกทและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 ยังคงได้รับแรงดันไบแอสตรงเท่ากับ V_s จึงไม่

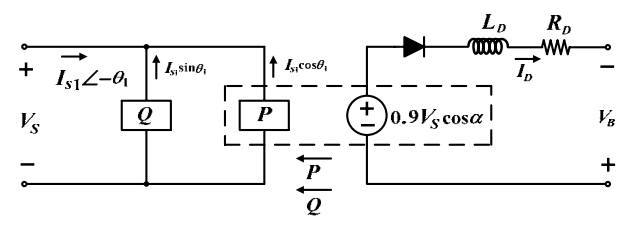
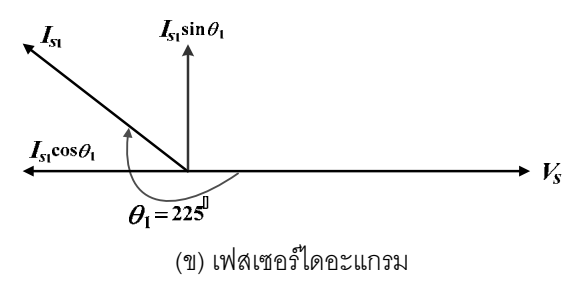
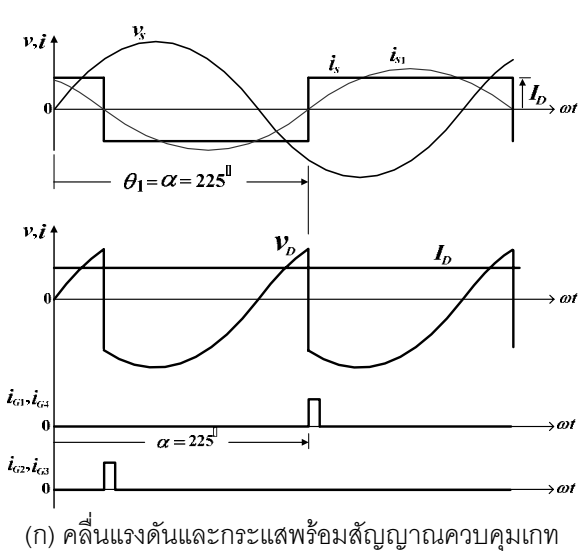
สามารถทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ ดังนั้นการทำงานในโหมดนี้จะต้องใช้วิธีการคอมมิวเตทแบบบังคับจึงจะสามารถทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_{s1} ถ้าหลังคลื่นแรงดัน V_s เป็นมุมเท่ากับ 225° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรมูลเพื่อแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 10(ข) และ 10(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีการทำงานในโหมดนี้จะได้แรงดันด้านดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 5 มีค่าเป็นลบและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวน α ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (3) ส่วนกระแสดีซี I_D จะมีค่าเป็นบวกมีค่าดังสมการ (16) กำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟมีค่าดังสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ จะไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซีสามารถแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในวงจรมูลรูปที่ 10(ค)

3.4 เรกติฟายเออร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ (โหมด IV)

กรณีทำงานเป็นเรกติฟายเออร์ที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรกำลังแสดงในรูปที่ 4 เป็นกรณีที่ทำการปรับมุมจุดชนวน α และมุมเลื่อนเฟสของกระแส θ ในย่าน $270^\circ \sim 360^\circ$ ตัวอย่างที่มุมจุดชนวนและมุมเลื่อนเฟสของกระแสเท่ากับ 315° สามารถแสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 11(ก) จะเห็นได้ว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ในโหมดนี้ไม่สามารถใช้แรงดันจากเอซีไลน์ในการคอมมิวเตทได้ เนื่องจากขณะที่ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 กำลังนำกระแส เมื่อไทรสเตอร์ T_2 และ T_3 ได้รับสัญญาณขั้วเกทและเริ่มนำกระแส ส่งผลทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 ยังคงได้รับแรงดันไบแอสตรงเท่ากับ V_s จึงไม่สามารถทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ ดังนั้นการทำงานในโหมดนี้จะต้องใช้วิธีการคอมมิวเตทแบบบังคับจึงจะสามารถทำให้ไทรสเตอร์ T_1 และ T_4 หยุดนำกระแสได้ การทำงานดังกล่าวทำให้ส่วนประกอบมูลฐานของกระแส i_{s1} ถ้าหลังคลื่นแรงดัน V_s เป็นมุมเท่ากับ 315° สามารถแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมและวงจรมูลเพื่อแสดงทิศทางการ

ไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 11(ข) และ 11(ค) ตามลำดับ สำหรับกรณีนี้แรงดันดีซี V_D ที่แสดงในรูปที่ 4 จะมีค่าเป็นบวกและมีค่าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันของมุมจุดชนวน α ดังแสดงไว้แล้วในสมการ (3) ส่วนกระแสดีซี I_D จะมีค่าเป็นบวกมีค่าดังสมการ (2.20) กำลังไฟฟ้าแอคทีฟไหลจากด้านเอซีไปยังด้านดีซีมีค่าดังสมการ (6) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟไหลจากด้านดีซีไปยังด้านเอซีมีค่าดังสมการ (7) สามารถแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ในวงจรสมมูลรูปที่ 11(ค)

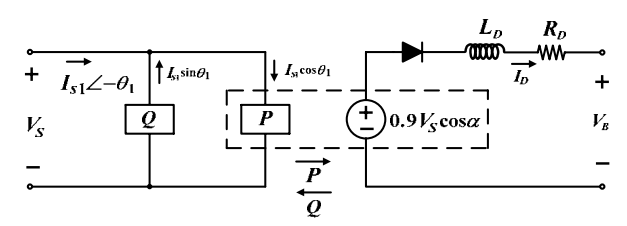
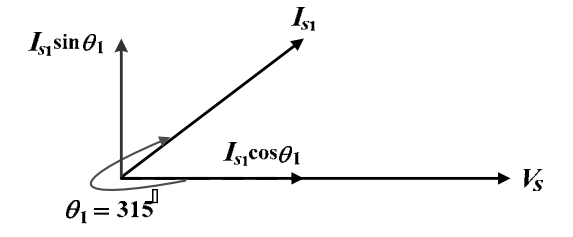
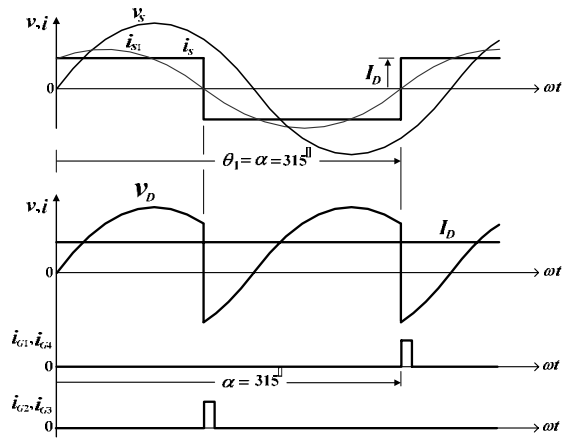
สำหรับคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ทำงานในลักษณะคอมมิวเตทแบบบังคับในโหมด III (โหมดอินเวอร์เตอร์) และโหมด IV (โหมดเรกติฟายเออร์) สามารถแสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าแอคทีฟ (P) และกำลังไฟฟารีแอคทีฟ (Q) เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน (α) ได้ดังรูปที่ 12 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่า distortion factor (DTF), displacement power factor (DPF) และเพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF) เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมจุดชนวน (α) ได้ดังรูปที่ 13



(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซีและดีซีของคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 10 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ $\alpha = 225^\circ$ (โหมด III)

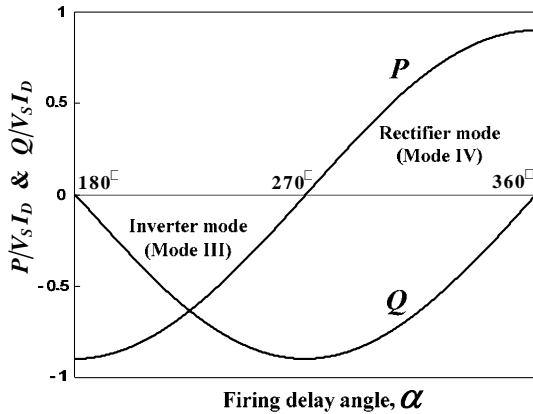
ในบทความที่น่าเสนอนี้จะเลือกใช้ทรินสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์แบบไลน์คอมมิวเตท (โหมด II) เพื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายดีซีให้สามารถร่วมจ่ายโหลดพร้อมกับแหล่งจ่ายเอซีไลเนกร์ไฟฟ้า



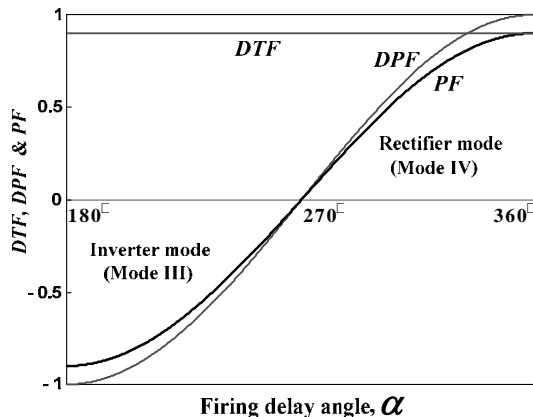
(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรม

(ค) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านเอซี และดีซีของคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 11 คอนเวอร์เตอร์ขณะทำงานเป็นเรกติไฟเออร์ที่ $\alpha = 315^\circ$ (โหมด IV)



รูปที่ 12 ค่า Normalized ของกำลังไฟฟ้า P และ Q ขณะทำงานที่มีการคอมมิวเตทแบบบังคับ

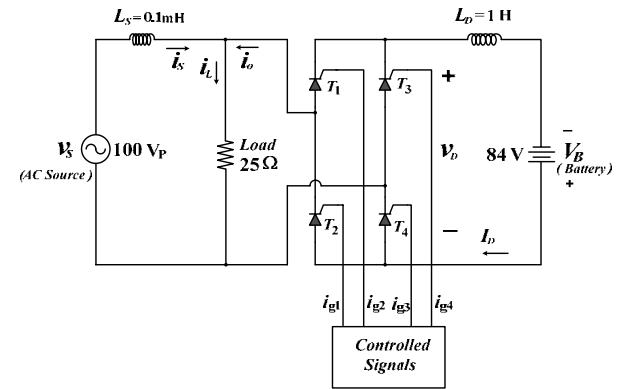


รูปที่ 13 ค่า DTF , DPF และ PF ขณะทำงานในลักษณะไล่นคอมมิวเตท

4. ผลการจำลองแบบ

เพื่อยืนยันความถูกต้องของหลักการที่นำเสนอของระบบในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดระหว่างแหล่งจ่ายดีซีและแหล่งจ่ายเอซีจากไลนการไฟฟ้าโดยใช้ไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส จะใช้วิธีการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอโดยใช้โปรแกรม PSPICE เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการในการควบคุม เพื่อพิจารณาลักษณะของรูปคลื่นตามจุดต่างๆ ในวงจรพร้อมทั้งวิเคราะห์คลื่นเหล่านี้โดยใช้การวิเคราะห์ FFT ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งนำไปสู่การได้มาซึ่งคุณลักษณะ

ของการทำงานในการจ่ายโหลดของระบบที่นำเสนอร่วมกับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า



รูปที่ 14 ไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับต่อใช้งานร่วมกันของแหล่งจ่ายดีซีเข้ากับแหล่งจ่ายเอซีที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

วงจรที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำเสนอในบทความนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 โดยที่แหล่งจ่ายดีซีประกอบด้วยแบตเตอรี่ 12 โวลท์ทั้งหมด 7 ลูกต่อในลักษณะอนุกรมได้ขนาดแรงดัน $V_B = 84 \text{ V}$ แล้วใช้ $L_D = 1 \text{ H}$ กรองกระแสดีซี I_D ให้เรียบป้อนเป็นอินพุตให้กับวงจรไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ทั้ง 4 ตัวโดยสัญญาณขับเกต ig_1, ig_2, ig_3, ig_4 เพื่อควบคุมมุมจุดชนวนในย่าน $90^\circ \sim 180^\circ$ ส่วนด้านแหล่งจ่ายเอซีไลนการไฟฟ้าจะใช้แรงดันเท่ากับ 100 V_p ร่วมกันจ่ายโหลดตัวต้านทาน 25Ω

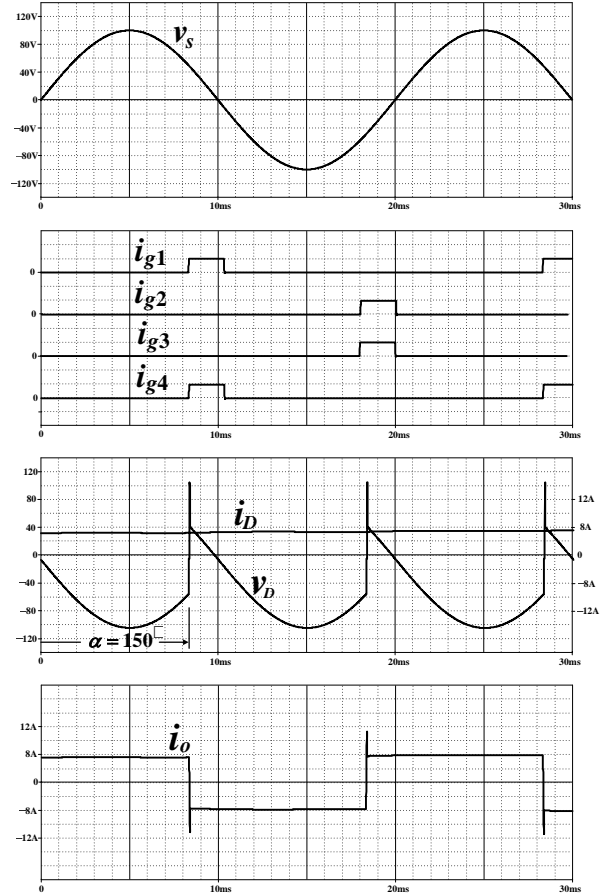
ในกรณีที่มุมจุดชนวน $\alpha = 150^\circ$ สามารถแสดงลักษณะสัญญาณควบคุมและลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสด้านดีซี v_D, i_D กระแสด้านเอซี i_o ที่ได้รับดังรูปที่ 15 โดยสัญญาณควบคุมเกตที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไทรสเตอร์ทั้ง 4 ตัว ig_1, ig_2, ig_3, ig_4 จะต้องทำการออกแบบสัญญาณดังกล่าวเหล่านี้ให้ซิงโครไนซ์กับคลื่นแรงดันเอซี 50 Hz ของการไฟฟ้า v_s ทั้งนี้เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องสอดคล้องกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีที่ใช้สำหรับการหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์ด้วย (การคอมมิวเตทจากเอซีไลนการไฟฟ้า) ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับ

การควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว สำหรับการทำงานที่มุมจุดชนวน $\alpha = 150^\circ$ นี้จะได้แรงดันเฉลี่ยด้านดีซีของอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_D &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos\alpha \\ &= 0.9 \times \frac{100}{\sqrt{2}} \cos(150^\circ) \\ &= -55.1 \text{ V} \end{aligned}$$

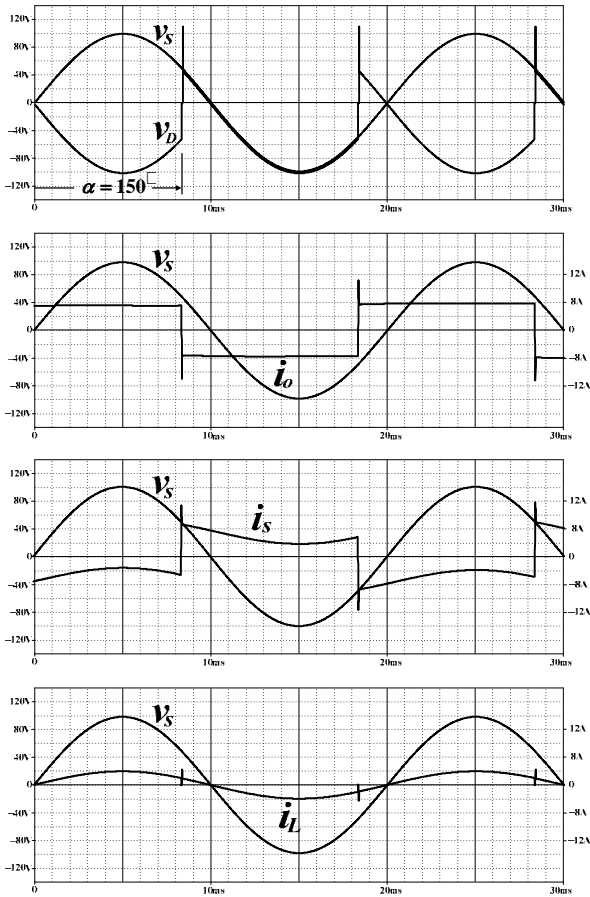
เพื่อพิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าทางด้านเอซีทั้งหมด 3 ค่าของระบบในการเชื่อมต่อเพื่อร่วมกันจ่ายโหลดระหว่างแหล่งจ่ายดีซีและแหล่งจ่ายเอซีซึ่งได้แก่กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ (P_o) กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้า (P_s) และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด (P_L) ซึ่งสามารถพิจารณาจากลักษณะคลื่นของแรงดันและกระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้างกล่าว โดยในรูปที่ 16 แสดงลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอซี v_s , i_o , i_s และ i_L ในกรณีที่มีมุมจุดชนวน $\alpha = 150^\circ$ ซึ่งการวัดกระแสที่ได้แสดงไว้ในรูปนี้สอดคล้องกับทิศทางการอ้างอิงที่กำหนดในวงจรรูปที่ 14 และจะได้รับความสัมพันธ์ของกระแสทั้งสามค่าดังนี้

$$i_L = i_o + i_s$$

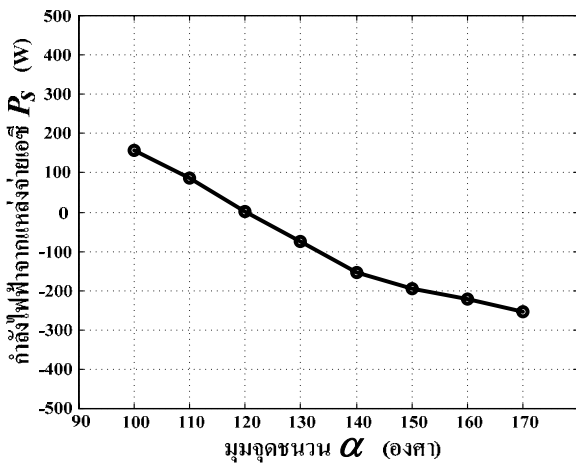


รูปที่ 15 ลักษณะคลื่น v_D , i_D , v_s , i_o พร้อมทั้งสัญญาณขับเกตของไทรสเตอร์ทั้ง 4 ตัว จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE ในกรณี $\alpha = 150^\circ$

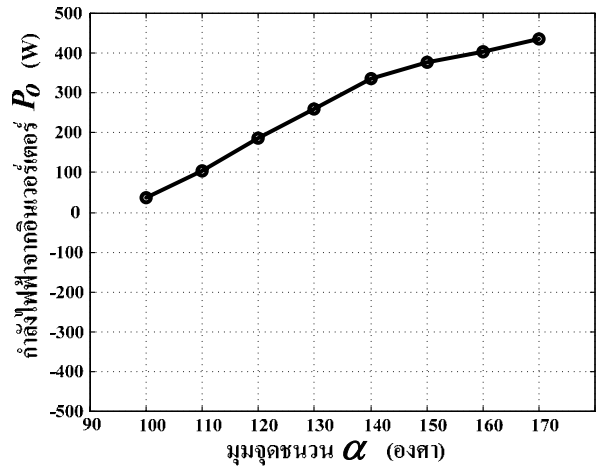
จากการวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าจากคลื่นแรงดันและกระแสขณะร่วมกันจ่ายโหลดระหว่างไทรสเตอร์อินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้าสามารถนำค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสามค่าคือ กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไลน์การไฟฟ้า (P_s) กำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ (P_o) และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด (P_L) มาพล็อตกราฟเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมจุดชนวน (α) ในย่าน $100^\circ \sim 170^\circ$ ได้ดังรูปที่ 17, 18 และ 19 ตามลำดับ



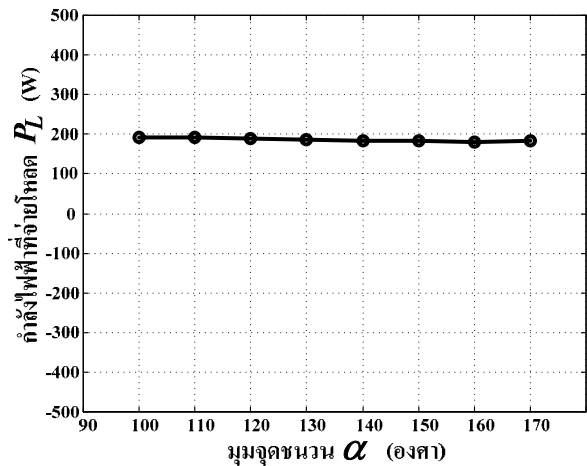
รูปที่ 16 ลักษณะคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอซี v_s , i_o , i_s และ i_L จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE ในกรณีที่มีมุมจุดชนวน $\alpha = 150^\circ$



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซี (P_s) ขณะที่มุมจุดชนวน (α) เปลี่ยนแปลงในย่าน $100^\circ \sim 170^\circ$



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ (P_o) ขณะที่มุมจุดชนวน (α) เปลี่ยนแปลงในย่าน $100^\circ \sim 170^\circ$



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด (P_L) ขณะที่มุมจุดชนวน (α) เปลี่ยนแปลงในย่าน $100^\circ \sim 170^\circ$

จากกราฟแสดงคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีไอน์กรไฟฟ้า (P_s) ในรูปที่ 17 จะพบว่าเมื่อมุมจุดชนวนมีค่ามากขึ้นจะทำให้กำลังไฟฟ้างดกล่าว่ามีค่าเป็นลบ แสดงว่ากำลังไฟฟ้าถูกป้อนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีส่วนกราฟแสดงคุณลักษณะของกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ (P_o) ในรูปที่ 18 พบว่าเมื่อมุมจุดชนวนมีค่ามากขึ้นจะทำให้

กำลังไฟฟ้างอกออกมาจากอินเวอร์เตอร์มีค่ามากขึ้นและส่วนที่เกินจากที่โหลดใช้ไปก็จะป้อนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซี

5. สรุป

ระบบการต่อใช้งานร่วมกันของแหล่งจ่ายดีซีกับแหล่งจ่ายเอซีไลเนอร์ไฟฟ้าโดยใช้ทรานส์เตอร์อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่นำเสนอนี้ในบทความนี้เมื่อใช้โปรแกรม PSpice ในการจำลองแบบการทำงานของวงจรและนำผลที่ได้จากการจำลองแบบมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาคุณลักษณะการทำงานของวงจรสามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) ทรานส์เตอร์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบไลเนอร์คอมมิวเตทที่สามารถใช้งานในการเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายดีซีและแหล่งจ่ายเอซี 50 Hz เพื่อร่วมกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้นั้นจะต้องทำการควบคุมให้ทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์โดยการควบคุมมุมจุดชนวนของทรานส์เตอร์ให้อยู่ในย่าน $90^\circ \sim 180^\circ$

(2) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีและถ่ายโอนไปยังด้านเอซีของอินเวอร์เตอร์จะมีค่าต่ำสุดเมื่อปรับมุมจุดชนวนของทรานส์เตอร์ในอินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 90° และกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับเพิ่มมุมจุดชนวนของทรานส์เตอร์จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเมื่อปรับเพิ่มมุมจุดชนวนนี้ให้มีค่าเท่ากับ 180°

(3) ในการร่วมกันจ่ายโหลดของระบบที่นำเสนอนี้จะให้ลำดับความสำคัญในการจ่ายโหลดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีก่อน นั่นหมายความว่าถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้พอดีก็ไม่จำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลเนอร์ไฟฟ้าหรือถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการมากกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ ในกรณีนี้โหลดจะดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเอซีของไลเนอร์ไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริม แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าดีซีสามารถจ่ายได้ กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะถูกป้อนเข้าสู่แหล่งจ่ายเอซีของไลเนอร์ไฟฟ้าหรือสามารถขายคืนพลังงานไฟฟ้าส่วนส่วนที่เหลือนี้ให้กับการไฟฟ้าได้

(4) รูปคลื่นกระแสที่จ่ายมาจากอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นคลื่นสแควร์ส่งผลทำให้รูปคลื่นกระแสจากแหล่งจ่ายเอซีไลเนอร์ไฟฟ้ามีลักษณะไม่เป็นไซน์ ดังนั้นในการวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากคลื่นกระแสเหล่านี้จะต้องสามารถแยกองค์ประกอบหลักมูลและฮาร์โมนิกส์ให้ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ FFT ในการหาค่าองค์ประกอบคลื่น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยสยาม ประจำปี 2549

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ยงยุทธ นาราษฎร์ และ วิริยะ พิเชษฐจำเริญ “พีดับบลิวเอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสควบคุมด้วยเทคนิคไซเคิลเต็มสำหรับแหล่งจ่าย 50-Hz เพื่อใช้งานร่วมกับไลเนอร์ไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (EECON-26), 2546, หน้า 782-787
- [2] K. Hirachi, J. Yoshitsugu, L. Gamage, Y. Nishida and M. Nakaoka, “Improved Control Implementation of Single-Phase Current-Fed PWM Inverter for Photovoltaic Power Generation,” Transaction of IEE Japan, 1998, pp. 63-68.
- [3] S. Nonaka, K. Kesamaru and K. Yamasaki, “Utility Interactive Photovoltaic System with PWM Current Source Inverter,” Transaction of IEE Japan, Vol. 112-B, No. 5, pp. 439-447.
- [4] A. K. S. Bhat and S. D. Dewan, “Resonant Inverter for Photovoltaic Array to Utility Interface”, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-24, No. 4, July 1988.
- [5] Daniel W. Hart, Introduction to Power Electronics, Prentice Hall, 1997.