

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงหนึ่งเฟสที่ปราศจากวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้า กระแสตรงที่ทดสอบกับภาระแบบพาสซีฟ

ประสพโชค โห้ทองคำ*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

* Corresponding Author: prasopchok.hot@rmutr.ac.th

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 23 กุมภาพันธ์ 2564
แก้ไข : 21 พฤศจิกายน 2565
ตอบรับ : 22 กุมภาพันธ์ 2566
DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.3

คำสำคัญ : เอซี-เอซี คอนเวอร์เตอร์
หนึ่งเฟส / เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์
หนึ่งเฟส / พีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์

บทความนี้นำเสนอวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเพียงขั้นตอนเดียวโดยตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ไม่มีส่วนเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าหนึ่งเฟสที่ความถี่และขนาดคงที่ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้านออกหนึ่งเฟสที่สามารถปรับได้ทั้งความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าด้านออกด้วยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ชวยดอล (SPWM) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทิศทางที่ใช้ในการตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า ซึ่งสามารถปรับอัตราการผลิตได้จาก 0-1.0 จากการทดสอบกับภาระแบบพาสซีฟด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยวัดรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้าและด้านออกของวงจรวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิก และค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion: THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้าและด้านออก ผลการจำลองที่ได้สอดคล้องกับผลการวัดเป็นอย่างดี

A Single-Phase Direct AC Conversion Circuit without DC Link Circuit Tested with Passive Loads

Prasopchok Hothongkham*

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Phutthamonthon,
Nakhon Pathom 73170

* Corresponding Author: prasopchok.hot@rmutr.ac.th

Assistance Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: February 23, 2021

Revised: November 21, 2022

Accepted: February 22, 2023

DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.3

Keywords :Single-Phase
AC-AC Converter / Single-
Phase Matrix Converter /
Sinusoidal PWM

This article presents a single-phase AC-AC matrix converter circuit, which directly converts a single-phase utility supply to the loads without a DC link circuit. Such a converter circuit converts fixed amplitude and fixed frequency single-phase AC input into variable amplitude and variable frequency single-phase AC output; both the amplitude and frequency can be adjusted in the form of the SPWM signals that are used to control the bi-directional switches. SPWM signals can be adjusted via the modulation indices from 0-1.0. These results were tested with passive loads via the use of MATLAB/Simulink program. The results were analyzed in terms of the voltage and current waveforms from both the input and output sides, the harmonic analysis and the total harmonic distortion (THD). Simulated results exhibited good agreement with the measured results.

1. บทนำ

การแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเพียงขั้นตอนเดียวเพื่อขจัดวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงหรือ DC Link ในวงจรการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเก่ามีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าถึง 2 ขั้นตอน คือ การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC to DC Conversion) แล้วทำการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC to AC Conversion) ซึ่งแตกต่างจากการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบใหม่ที่น่าสนใจ กล่าวคือเป็นการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพียงขั้นตอนเดียว หรือ AC to AC Conversion หรือสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ (AC-AC Matrix Converter) ซึ่งวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หรือการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเพียงขั้นตอนเดียว ได้รับการนำเสนอในครั้งแรกใน ค.ศ. 1976 โดย Gyugyi และ Pelly [1-2] ส่วนหลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส ถูกนำเสนอเป็นหลักการทางคณิตศาสตร์ โดย Venturini และ Alessina [3, 5] ส่วนวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดส่วน DC link ในวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสถูกนำเสนอโดย Ziogas [4-5, 7, 11]

หลักการของวงจร เอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Zuckerberger [6] Idris [8] และ Abdollah [16] แต่ไม่สามารถปรับค่าต่าง ๆ ทางด้านออก (Output) ของวงจรได้ Kumar [18] ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการทำงานของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสในรูปการทำงานในลักษณะของวงจรไฮโคลคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์โดยใช้เป็นตัวเปลี่ยนความถี่ (frequency changer) คือ สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ทางด้านออก (Output) ของวงจรได้ โดยได้ทำการจำลองและทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ผลการจำลองและการทดลองเป็นอย่างดี Raja [19] นำหลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปใช้ในการชดเชยค่าพลังงานไฟฟ้ารีแอคทีฟ (Reactive power) ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้เทคนิคสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบ sinusoidal pulse width modulation มาใช้ในการขับนำสวิตซ์ในวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส สามารถชดเชยค่า

พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถปรับปรุงคุณภาพพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยการลดค่าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ในบทความนี้เป็นการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Zargar [20] นำหลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นสามเฟสแล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสด้วยวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์แล้วนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัว dynamic voltage restorer (DVR) เพื่อแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่า DVR แบบเก่า Pittermann [21] นำเสนอหลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปใช้ในระบบการขับเคลื่อนที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อลดการอิมิตตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ซึ่งสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยแสดงการทำงานทั้งในทางคณิตศาสตร์และทางปฏิบัติพร้อมการควบคุมการทำงานของวงจรด้วย Takaoka [22] นำเสนอหลักการการนำวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปใช้ร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจุดแยกตรงกลาง (center tap) เพื่อใช้กับระบบพลังงานไฟฟ้าทดแทน เช่น โซลาร์เซลล์และกังหันลม เพื่อทำการลดขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ให้มีขนาดเล็กลงโดยระบบที่ใช้นำเสนอนี้สามารถทำให้เกิดการไหลของพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี รวมทั้งยังสามารถลดค่าการกระเพื่อมหรือริบเบิล (ripple) ของกระแสไฟฟ้าที่จะทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ถึง 85.1% ด้วย Buticchi [23] นำเสนอหลักการของวงจรกรองพลังงานไฟฟ้าแบบแอคทีฟหนึ่งเฟส (single-phase active power filter) ที่นำวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปประยุกต์ใช้เพื่อขจัดวงจรเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (DC Link) และนำหลักการของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่มีการชดเชยแรงดันไฟฟ้าที่เป็นศูนย์เพื่อให้วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่สามารถทำงานได้ตลอดเวลาและมีประสิทธิภาพ โดยในการใช้งานสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี Rivera [24] นำเสนอหลักการควบคุมแบบ predictive control strategy เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทิศทางของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบสามเฟส โดยหลักการควบคุมแบบนี้สามารถเลือกสถานะการสวิตซ์ได้ว่าจะให้สวิตซ์ทำงานช่วงไหนในแต่ละคาบเวลาด้วยการเลือกการ

สวิตช์จะเกิดช่วงไหนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดค่าความสูญเสีย เพื่อเพิ่มสมรรถภาพในการทำงานของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส ซึ่งผลการทดสอบให้ผลการตอบสนองทางพลวัต (dynamic) ได้เป็นอย่างดี Dalai [25] นำเสนอการจำลองการทำงานของการนำวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการทำงาน โดยส่วนประกอบของระบบยังเป็นการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองขั้นตอนอยู่ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ยังพบปัญหาเรื่องของสัญญาณยอดแหลม (spike) ที่รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับการทำงาน ของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส Nayak [26] นำเสนอหลักการของเครื่องให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ (Induction heating) ที่ใช้หลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมาใช้ในการลดค่าฮาร์มอนิกและค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Output) และเป็นการเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก (Output) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงานของวงจรซึ่งได้ผลเป็นอย่างดี Moghaddmi [27] นำเสนอหลักการของระบบการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าของอินดักทีฟสองทิศทาง หรือ IPT โดยใช้วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าขั้นตอนเดียวที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้มาเป็นชุดอุปกรณ์หลักในระบบการถ่ายโอน เพื่อทำการลดการให้วงจรไฟฟ้าที่ยุ่งยากซับซ้อน และมีการนำหลักการของ soft-switched มาใช้ในการทำงานด้วย ซึ่งจากผลการทดลองและการจำลองของระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การไหลของพลังงานสามารถทำได้อย่างสะดวกทั้งสองทิศทาง Pirincci และ Orhan [28] นำเสนอวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมาทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนความถี่ (frequency changer) ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ด้านออกของวงจรได้ที่ค่า 12.5Hz, 25Hz, 50Hz, 100Hz, และ 150Hz จากค่าความถี่แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (Input) 50Hz โดยใช้หลักการคอมมิวเตทของสวิตช์ด้วยตัววงจรทั้งหมดนำเสนอโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Guan [29] นำเสนอหลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าเป็นสามเฟสแล้วแปลงผันเป็นหนึ่งเฟสมาใช้งานกับ

ระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (wireless power transfer system : WPT) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและสมรรถนะในการทำงานของระบบ โดยระบบนี้จะประยุกต์ใช้ในการเชื่อมต่อจากยานพาหนะกับระบบไฟฟ้า และใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์ (SVPWM) นำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ โดยในบทความจะนำเสนอในรูปแบบของหลักการทางคณิตศาสตร์แสดงการไหลของพลังงานไฟฟ้าทั้งสองทิศทางที่สามารถควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าได้ แต่การทำงานทั้งหมดยังคงใช้การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงการทำงานของระบบ Boydak [30] นำหลักการของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์ คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปประยุกต์ใช้เป็นวงจร AC-DC rectifier และ AC-DC buck rectifier เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระ โดยพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากวงจร rectifier และ วงจร buck โดยที่ซึ่งวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสจะใช้สัญญาณควบคุมเป็นพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ชูชอยดอล (SPWM) โดยผลการทำงานของวงจรทั้งหมดจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงานของวงจรนี้ ซึ่งผลการจำลองที่ได้เป็นไปได้อย่างดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเป็นการนำวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย ซึ่งผลการทดสอบและการจำลองเป็นไปในทิศทางที่ดี ในงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีการทดสอบหรือทำการจำลองกับภาระแบบพาสซีฟ ซึ่งจะเป็นการทดสอบที่มีการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกและค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ที่มีผลต่อความสำคัญในการประยุกต์ใช้งานทั้งในงานทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง การถ่ายโอนกำลัง การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าหนึ่งเฟสและด้านต่าง ๆ รวมทั้งสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ที่สามารถใช้งานกับระบบเครื่องปรับอากาศที่ใช้ระบบอินเวอร์เตอร์อยู่ได้ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าถึงสองขั้นตอนและมีส่วนของวงจรเชื่อมโยงดีชิวอยู่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้คำนึงถึงปัญหาในหัวข้อดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดที่จะทำการวิจัยเพื่อมุ่งเน้นกับการทดสอบกับภาระแบบพาสซีฟ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นกับการนำไปใช้

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรงจะไม่มีการใช้วงจรส่วนเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (DC Link) ซึ่งจะมีข้อดี คือ มีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเพียงขั้นตอนเดียว โดยที่จะสามารถลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากวงจรแบบเดิมที่มีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้า 2 ขั้นตอน ที่มีการใช้งานอยู่อย่างแพร่หลายได้ โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกสามารถที่จะทำการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยการปรับอัตราการทำงานของมอดูเลตของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่สามารถปรับได้ คือ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 และสามารถปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ต่อกับภาระได้ที่ค่า 25Hz, 50Hz และ 100Hz โดยการปรับความถี่สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่ใช้ในวงจร ซึ่งเป็นสวิตช์แบบสองทิศทาง (Bi-directional switches) และสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้เป็นแบบ SPWM หรือ Sinusoidal PWM โดยการทดสอบกับภาระแบบพาสซีฟเพื่อพิจารณาค่าฮาร์มอนิกและค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้าและด้านออกที่ทุกค่าความถี่ด้านออกและทุกค่าอัตราการมอดูเลต เพื่อใช้ประกอบเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะใช้ในระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสที่สามารถทำการปรับความเร็วรอบและปรับค่าแรงบิดได้ในการทดสอบกับภาระ ซึ่งจะเป็นงานวิจัยในระดับขั้นต่อไป

2. วงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 1 โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (Input voltage) เท่ากับ

$$v_{in}(t) = V_{im} \sin \omega_i t \quad (1)$$

และมีค่าแรงดันไฟฟ้าด้านออก (Output voltage) เท่ากับ

$$v_{out}(t) = V_{om} \sin \omega_o t \quad (2)$$

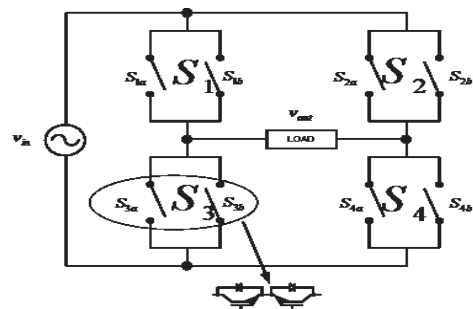
โดยค่าความถี่ด้านออก (Output frequency) ที่ใช้งาน (Fundamental frequency) มีค่าเท่ากับ

$$f_o = f_m - f_i \quad (3)$$

โดยที่ f_o เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานทางด้านออกของวงจร
 f_m เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานของการมอดูเลต
 f_i เป็นค่าความถี่ที่ใช้งานทางด้านเข้าของวงจรหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า

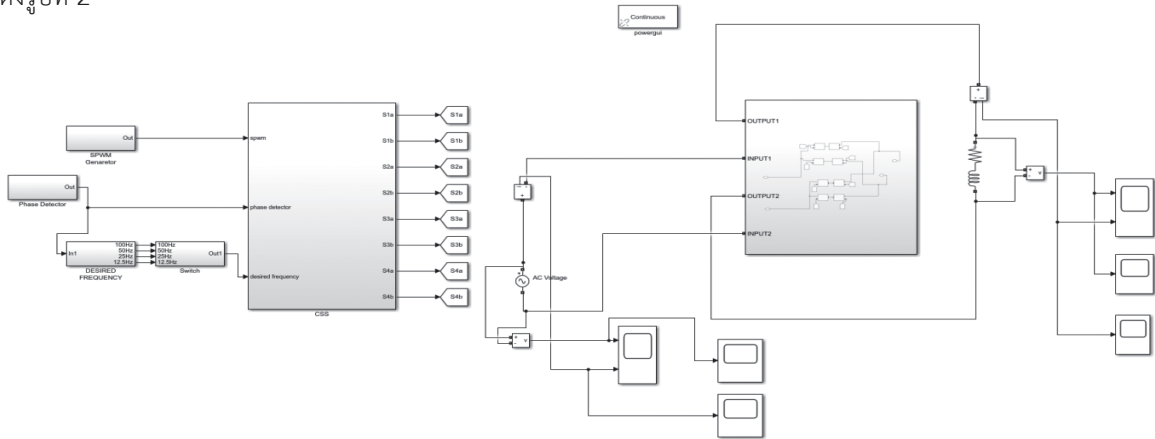
การทำงานของสวิตช์จะทำงานเพื่อตัดต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเข้าเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านออกที่สามารถปรับความถี่และอัตราการมอดูเลตได้ โดยมีการทำงานดังสมการที่ 4 ดังนี้

$$v_o(t) = \begin{cases} v_i(t) & S_1 \text{ \& } S_4 \text{ are ON} \\ -v_i(t) & S_2 \text{ \& } S_3 \text{ are ON} \\ 0 & S_1 \text{ \& } S_2 \text{ are ON} \\ 0 & S_3 \text{ \& } S_4 \text{ are ON} \end{cases} \quad (4)$$



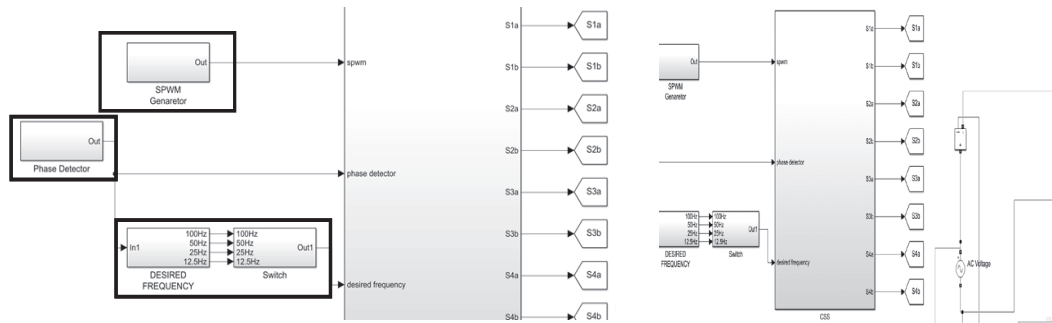
รูปที่ 1 วงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

จากวงจรในรูปที่ 1 สามารถนำมาสร้างวงจรที่ใช้ในการทดสอบกับภาระ โดยมีลักษณะของวงจรโดยรวมแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรโดยรวมทั้งหมดของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

จากรูปที่ 2 จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นวงจรสวิตช์กำลังและวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์ วงจรสวิตช์กำลังจะประกอบด้วยสวิตช์สองทิศทางจำนวน 4 ชุด แสดงได้ดังรูปที่ 1 ส่วนวงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์จะประกอบด้วย SPWM generator, Phase detector, Desired frequency และวงจรควบคุม CCS โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้



(ก) วงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทิศทาง

(ข) วงจรควบคุมส่วน CCS

รูปที่ 3 วงจรควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทิศทางในวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

1. SPWM Generator เป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพิตช์แบ็ลยูเอ็มแบบไซน์

(Sinusoidal PWM หรือ SPWM) ซึ่งใช้สัญญาณไซน์เป็นสัญญาณอ้างอิง (reference signal) และสัญญาณสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณพาหะ (carrier signal) นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อสร้างเป็นสัญญาณพัลส์ ส่วนในการปรับความถี่

และอัตราการมอดของสัญญาณพิตช์แบ็ลยูเอ็มสามารถทำได้ตามสมการที่ (5) และ (6) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการปรับความถี่ด้านออกได้ที่ค่า 25Hz, 50Hz, และ 100Hz และทำการปรับอัตราการมอดของสัญญาณ SPWM ได้ที่ค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{sine}} \quad (5)$$

$$m_a = \frac{V_{m,sine}}{V_{m,tri}} \quad (6)$$

โดย f_{tri} เป็นค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม
 f_{sine} เป็นค่าความถี่ของสัญญาณไซน์
 $V_{m,sine}$ เป็นค่าขนาดของสัญญาณไซน์
 $V_{m,tri}$ เป็นค่าขนาดของสัญญาณสามเหลี่ยม

2. Phase Detector ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณพัลส์ให้กับวงจรควบคุม CCS เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตซ์สองทิศทางในวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสต่อไป

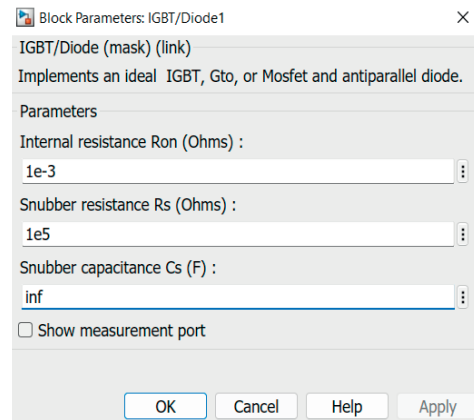
3. Desired Frequency ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีค่าความถี่ต่าง ๆ คือ 25Hz, 50Hz, และ 100Hz เพื่อใช้เป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมความถี่ต่าง ๆ ให้กับวงจรควบคุม CCS ต่อไป

4. วงจรควบคุม CCS เป็นวงจรที่สร้างสัญญาณพัลส์ PWM ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทิศทางในวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยจะได้รับสัญญาณ SPWM, Phase detector, และ Desired frequency แล้วนำมาทำการประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ SPWM ต่อไป โดยภายในส่วนวงจรนี้จะประกอบด้วยวงจรลอจิกต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นวงจรควบคุม CCS นี้ ซึ่งจะทำการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เพื่อไปขับนำสวิตซ์สองทิศทาง คือ $S_{1a}, S_{1b}, S_{2a}, S_{2b}, S_{3a}, S_{3b}, S_{4a}$, และ S_{4b}

3. การทดลองและผลการทดลอง

ในการจำลองวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้ทำการจำลองวงจรด้วยโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220Vrms, 50Hz เป็นด้านเข้า (Input) ให้กับวงจรพร้อมกันนั้นได้ทำการทดสอบกับภาระที่เป็นตัวต้านทานขนาด 1500 โอห์มอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 มิลลิเฮนรี่ ทำการทดสอบโดยการปรับอัตราการมอดของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์ชวยอดอล (SPWM) ที่ค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 และ

ปรับความถี่ด้านออก (Output frequency) ได้ที่ค่า 25Hz, 50Hz, และ 100Hz เพื่อทำการวัดรูปคลื่นที่จุดต่าง ๆ รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งด้านเข้าและกระแสด้านออกเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์หาสมรรถนะต่าง ๆ ของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส โดยในบทความนี้ใช้สวิตซ์ทิศทางเดียวกันเป็นสวิตซ์สองทิศทาง โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ของสวิตซ์ทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของสวิตซ์ที่ใช้ในการจำลอง

ในการวิเคราะห์สมรรถนะต่าง ๆ จะทำการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกโดยใช้สมการที่ (7)-(10) ในการวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งทางด้านเข้าและด้านออกของวงจรที่ทำการต่อกับภาระตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พร้อมกันนั้นทำการหาค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งด้านเข้าและด้านออกโดยใช้สมการที่ (11) และ (12) ในการคำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (8)$$

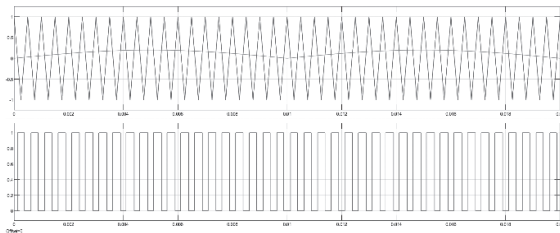
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (10)$$

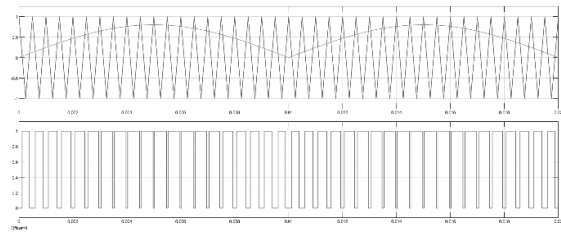
$$THD_v = \sqrt{\frac{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}{V_{1,rms}^2}} \quad (11)$$

$$THD_i = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} \quad (12)$$

ผลการทดสอบการทำงานของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสโดยทำการวัดรูปคลื่นที่จุดต่าง ๆ ดังนี้ คือ สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มแบบไซน์มูชอยดอล (SPWM) ที่อัตราการมอดูเลตเท่ากับ 0.2 และ 0.8 แสดงได้ดังรูปที่ 5



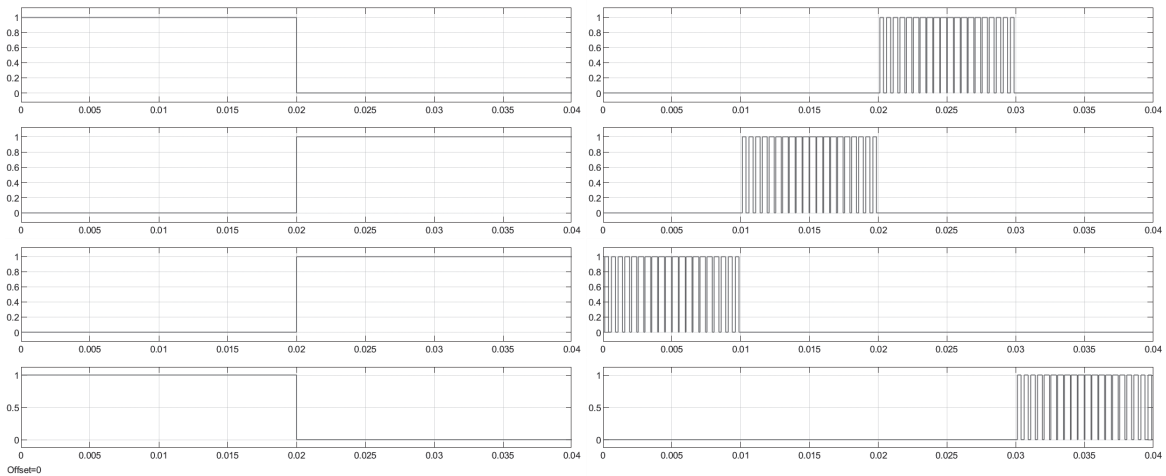
(ก) อัตราการมอดเท่ากับ 0.2



(ข) อัตราการมอดเท่ากับ 0.8

รูปที่ 5 สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มแบบ SPWM ที่อัตราการมอดต่าง ๆ

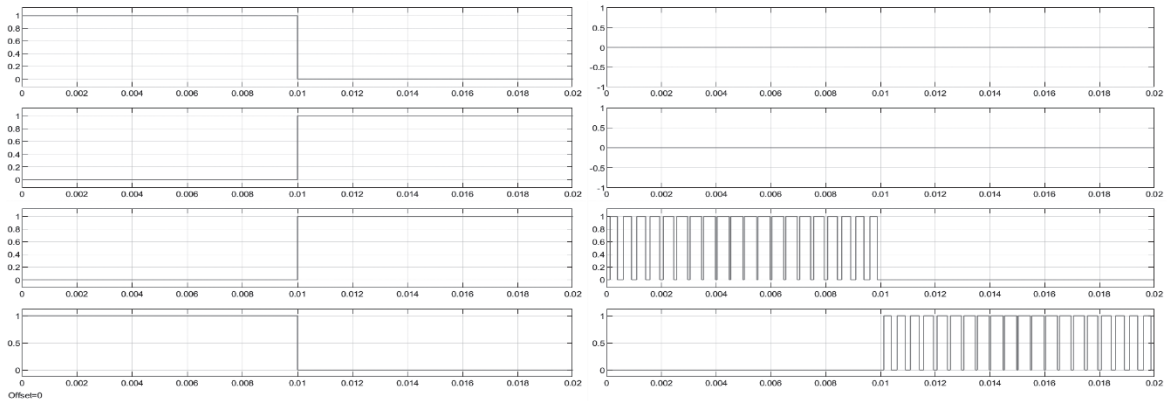
สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตซ์สองทิศทางจำนวน 4 ชุด ในวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 6



S1a, S1b, S2a, S2b

S3a, S3b, S4a, S4b

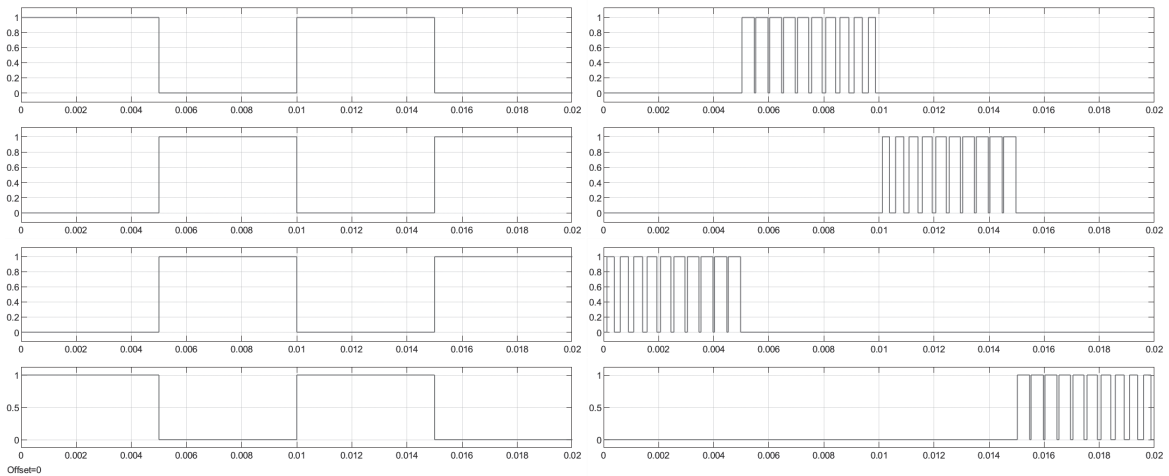
(ก) ความถี่ด้านออกเท่ากับ 25Hz



S1a, S1b, S2a, S2b

S3a, S3b, S4a, S4b

(ข) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 50Hz



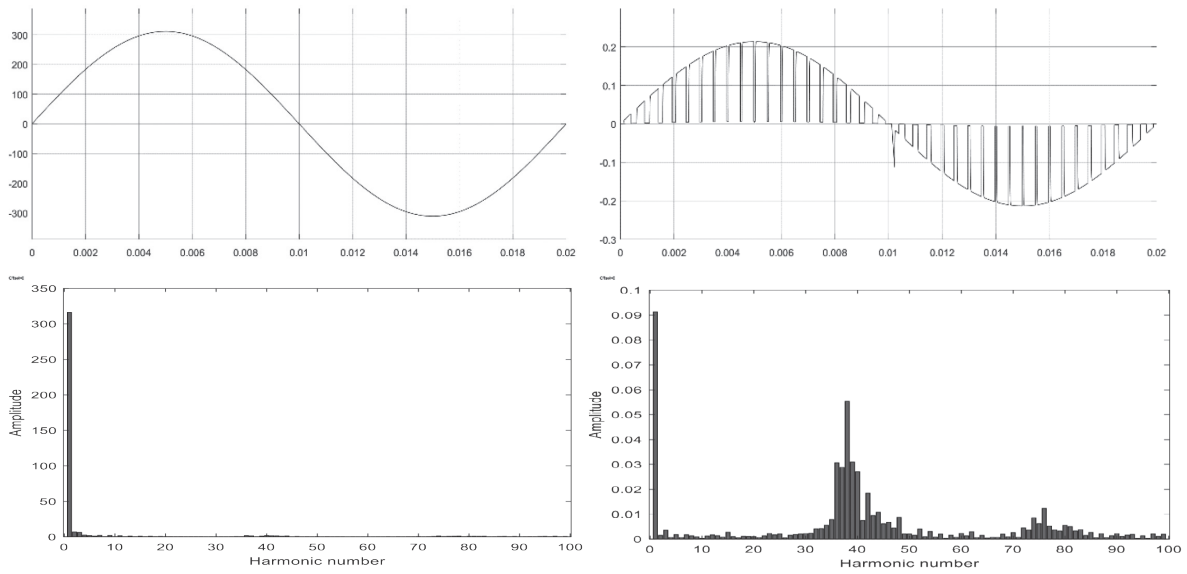
S1a, S1b, S2a, S2b

S3a, S3b, S4a, S4b

(ค) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 100Hz

รูปที่ 6 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทิศทางทั้ง 4 ชุด คือ S1a, S1b, S2a, S2b, S3a, S3b, S4a, และ S4b ที่อัตรา
การมอด 0.8 และที่ค่าความถี่ด้านนอกต่าง ๆ

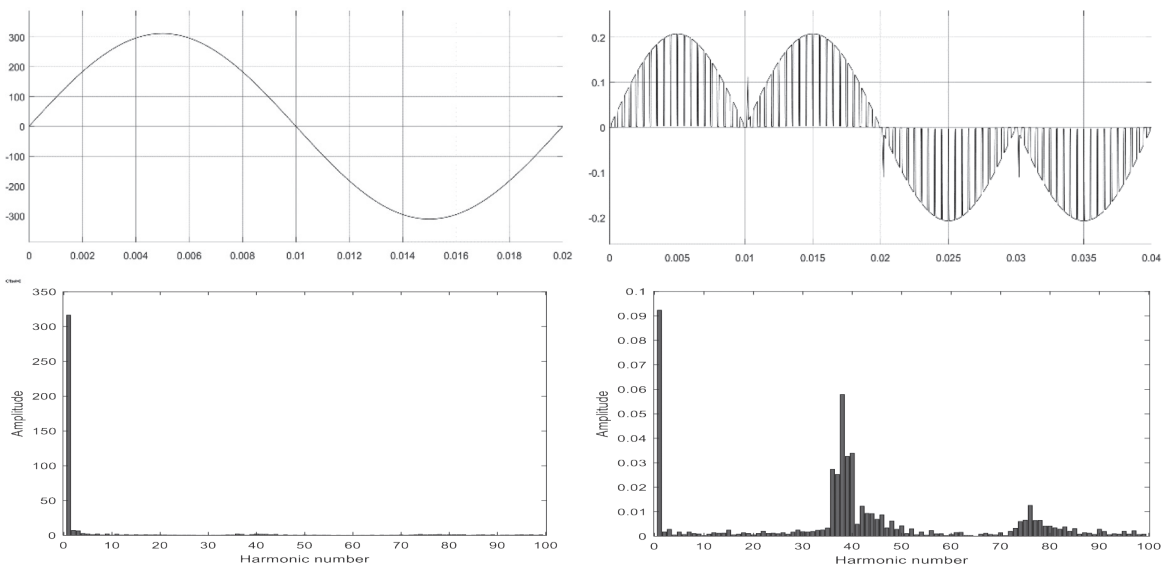
รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ทำการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกโดยทำการวัดและวิเคราะห์ทั้งทางด้านเข้าและด้านออกที่ค่าอัตราการใช้โหลดที่เท่ากับ 0.8 และที่ค่าความถี่ด้านนอกเท่ากับ 25Hz, 50Hz, และ 100Hz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8



แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า

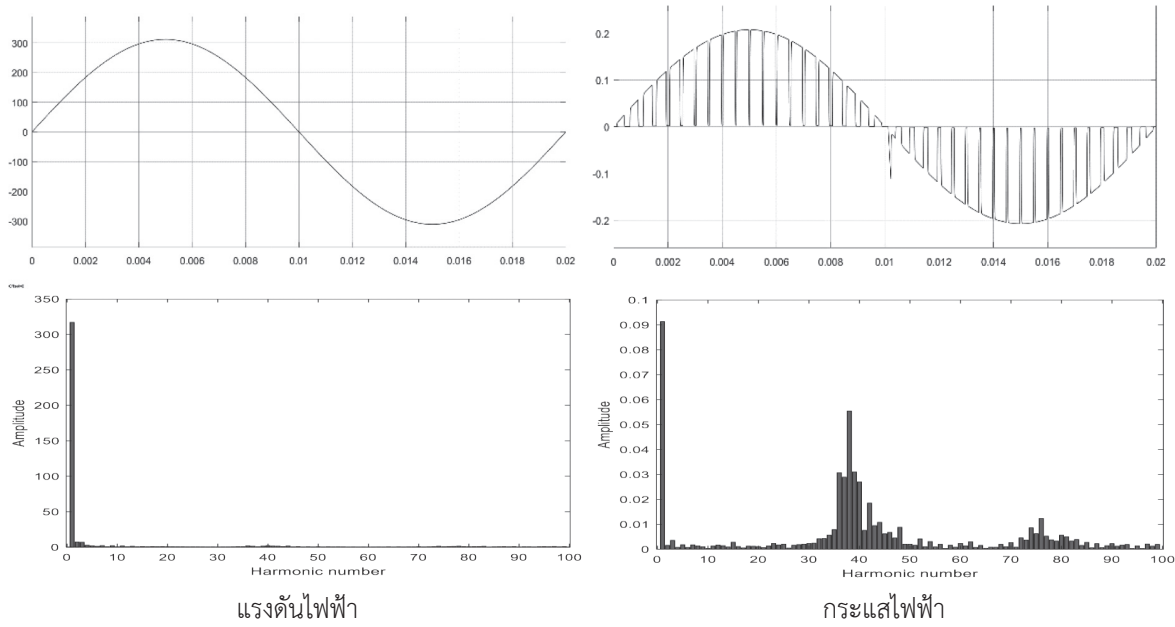
(ก) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 25Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้าเท่ากับ 3.43% และ 8.52%



แรงดันไฟฟ้า

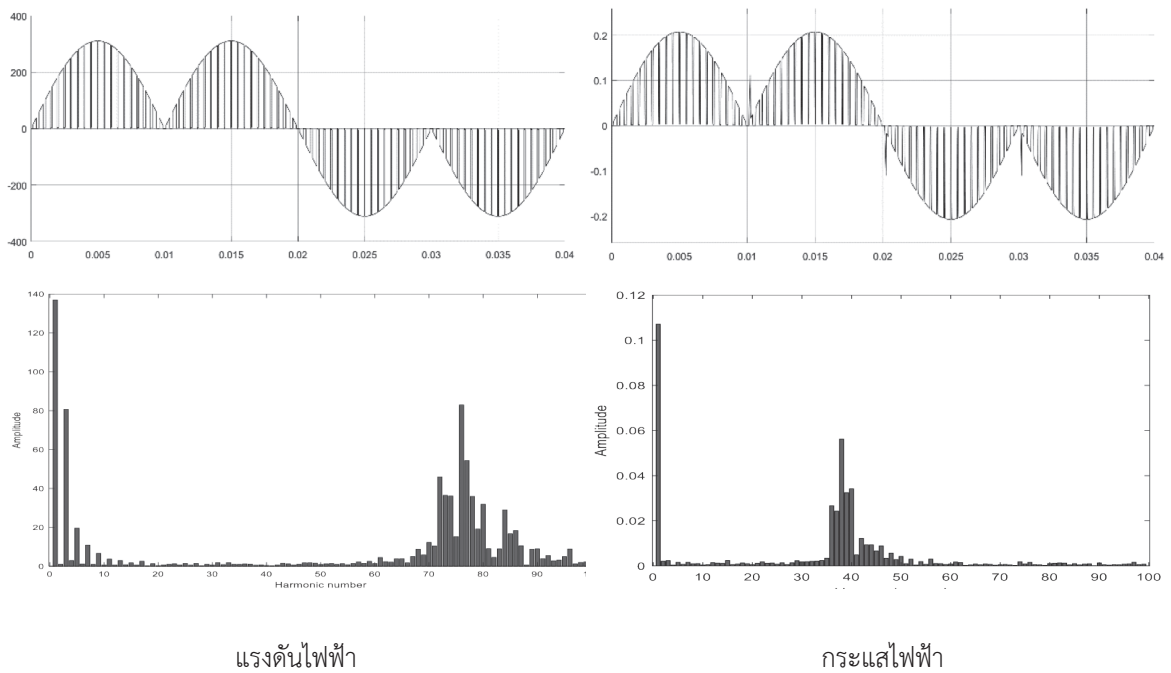
กระแสไฟฟ้า

(ข) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 50Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้าเท่ากับ 3.48% และ 8.57%

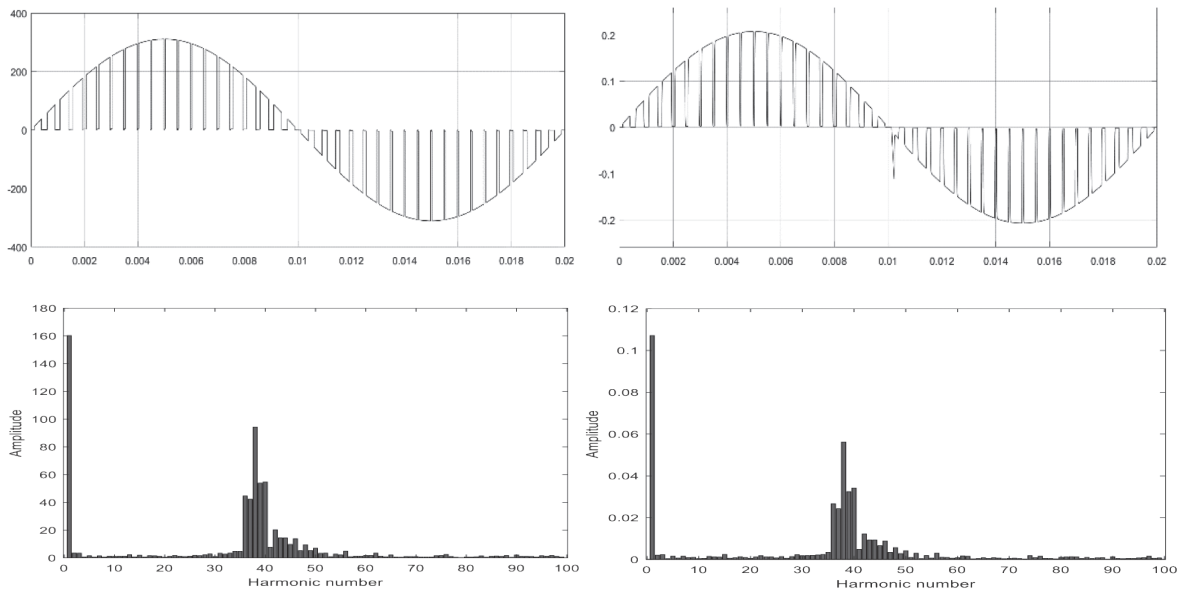


(ค) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 100Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้าเท่ากับ 3.55% และ 9.51%

รูปที่ 7 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเข้าที่ค่าอัตราการใช้โหลดเท่ากับ 0.8



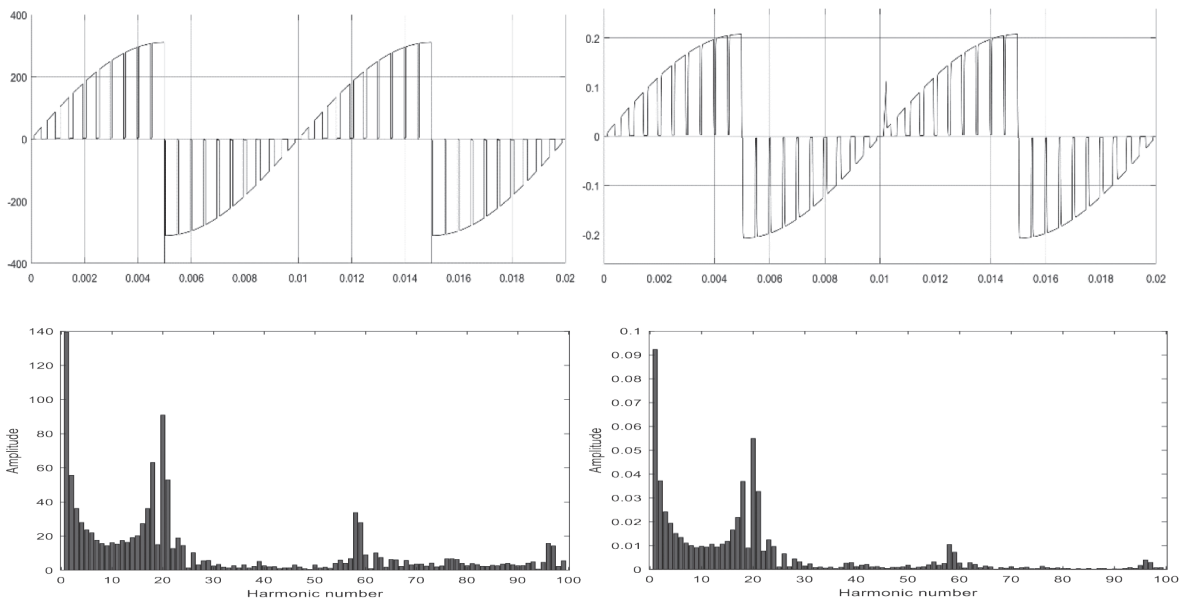
(ก) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 25Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกเท่ากับ 121% และ 111%



แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า

(ข) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 50Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านนอกเท่ากับ 89% และ 80%

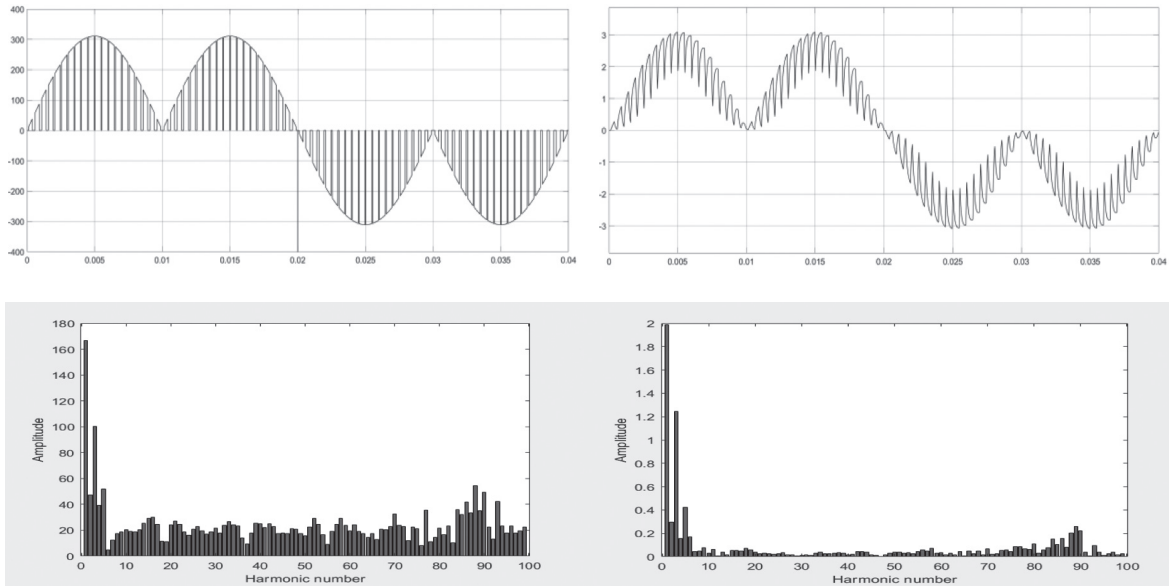


แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า

(ค) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 100Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านนอกเท่ากับ 126% และ 112%

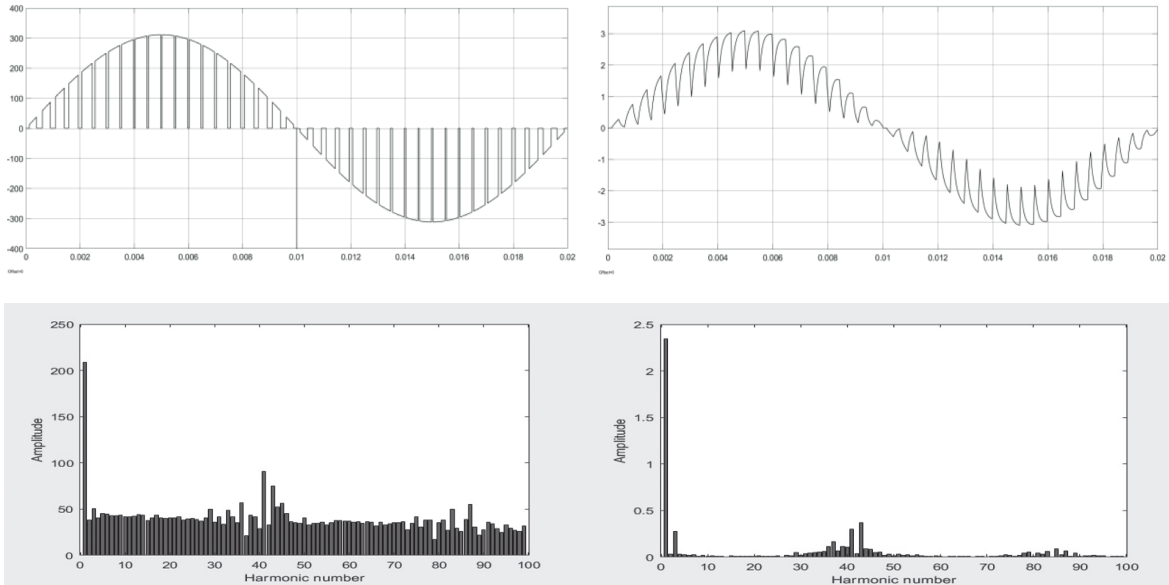
รูปที่ 8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านนอกที่ค่าอัตราการมอดดูเลตเท่ากับ 0.8 ที่ค่าภาระตัวต้านทานเท่ากับ 1,500 โอห์ม อนุกรมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี่



แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า

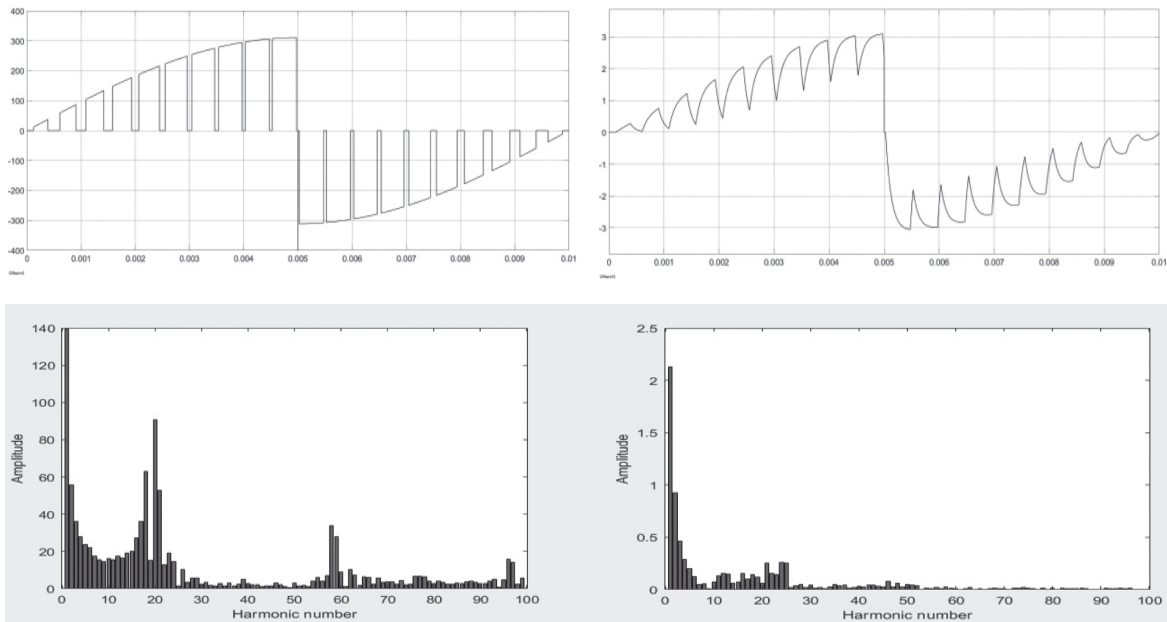
(ก) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 25Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านนอกเท่ากับ 156% และ 75.7%



แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า

(ข) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 50Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านนอกเท่ากับ 188% และ 28.8%



แรงดันไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า

(ค) ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 100Hz ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านนอกเท่ากับ 125% และ 60.5%

รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านนอกที่ค่าอัตราการมอดดูเลตเท่ากับ 0.8 ที่ค่าภาระตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม อนุกรมตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี่

จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าด้านนอก มีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อทำการทดสอบ ที่ปรับเปลี่ยนค่าตัวต้านทานให้น้อยลงประมาณ 10 เท่าของ ค่าตัวต้านทานค่าเดิมจากในรูปที่ 7 และผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 9 แต่ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าด้านนอกจะมี ค่าฮาร์มอนิกค่อนข้างมากเนื่องจากเกิดสัญญาณยอดแหลม (spike) ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านนอกเกิดขึ้นที่เกิดจากการ ที่ภาระตัวต้านทานมีค่าลดลง ซึ่งจะต้องมีการปรับแก้วงจร และระบบต่อไป

ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ทางด้านนอกของวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่ง เฟสที่ทดสอบกับภาระแบบพาสซีฟที่มีค่าตัวต้านทานเท่ากับ 1500 โอห์ม และค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ 10 มิลลิเฮนรี่ ที่ค่า ความถี่ด้านนอกเท่ากับ 25Hz, 50Hz, และ 100Hz ที่ค่าอัตรา การมอดดูเลตเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, และ 1.0 สามารถ แสดงค่าได้ดังตารางที่ 1 พบว่าที่ค่าความถี่ด้านนอกมีค่าสูง จะทำให้มีค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแส ไฟฟ้าด้านนอกที่สูงตามไปด้วย เนื่องจากรูปคลื่นมีความ ผิดเพี้ยนจากสัญญาณไซน์ไปค่อนข้างมาก

ตารางที่ 1 ค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านด้านนอกที่ค่าความถี่ด้านนอกและค่าอัตราการมอดดูเลตต่าง ๆ

ความถี่ด้านนอก (Hz)	อัตราการมอดดูเลต	Total Harmonic Distortion (THD) (%)	
		แรงดันไฟฟ้าด้านนอก	กระแสไฟฟ้าด้านนอก
25	0.2	121	112
	0.4	125	113
	0.6	122	113
	0.8	121	111
	1.0	110	108
50	0.2	88.5	82.3
	0.4	92.6	82.1
	0.6	90.3	82.2
	0.8	88.8	80.1
	1.0	74.2	63.6
100	0.2	123	112
	0.4	123	111
	0.6	120	115
	0.8	126	112
	1.0	128	117

4. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบวงจรเอซี-เอซี เมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายด้านเข้าหนึ่งเฟสขนาดแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยใช้สวิตช์สองทิศทาง (Bi-directional Switches) จำนวน 4 ชุด เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

เพื่อทำการทดสอบกับภาระแบบพาสซีฟ โดยทำการ ON-OFF ด้วยสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มแบบไซน์นูซอยดอล (SPWM) ที่ความถี่การสวิตซ์ 2kHz ที่ค่าความถี่ด้านนอก (Output) เท่ากับ 25Hz, 50Hz และ 100Hz โดยมีค่าอัตราการมอดดูเลตของสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มแบบไซน์นูซอยดอล (SPWM) เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 พบว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ด้านนอกได้ตามที่ออกแบบไว้ รวมทั้งทำการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกและค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งหมด (Total Harmonic Distortion :THD) ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเข้า และด้านออก พบว่าคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าฮาร์มอนิกปรากฏขึ้นชัดเจนอย่างมากในบริเวณรอบ ๆ ที่เป็นจำนวนเท่าของค่าความถี่สวิตซ์ของสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มแบบไซน์นูซอยดอล (SPWM) ส่วนด้านเข้า (Input) จะมีค่าฮาร์มอนิกปรากฏที่กระแสไฟฟ้าด้านเข้า (Input) ค่อนข้างชัดเจนที่ในบริเวณรอบ ๆ ที่เป็นจำนวนเท่าของค่าความถี่สวิตซ์ของสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มแบบไซน์นูซอยดอล (SPWM) เช่นเดียวกัน ผลการจำลองเบื้องต้นนี้ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสและด้านต่าง ๆ ต่อไป รวมทั้งนำมาเป็นหลักการในการสร้างเครื่องต้นแบบต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว) ร่วมกับโครงการวิจัยพื้นฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้มอบทุนวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ปี 2564 และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยแก่นักวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Gyugyi, L. and Pelly, B.R., 1976, Static Power Frequency Changers: Theory, Performance, and Application, John Wiley & Sons, New York, p. 495.

2. Pelly, B.R., 1971, Thyristor Phase-Controlled Converters and Cyclo-converters, New York, Wiley, p. 434.
3. Alesina, A. and Venturini, M., 1981, "Solid-State Power Conversion: A Fourier Analysis Approach to Generalize Transfer Synthesis," *IEEE Transactions on Circuit and Systems*, CAS-28 (4), pp. 319-330.
4. Ziogas, P.D., Khan, S.I. and Rashid, M.H., 1985, "Some Improve Forced Commutated Cyclo-converter Structures," *IEEE Transactions on Industry Application*, IA-21, pp. 1242-1253.
5. Alesina, A. and Venturini, M., 1989, "Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters," *IEEE Transaction on Power Electronics*, 4 (1), pp. 101-112.
6. Zuckerberger, A., Weinstock, D. and Alexandrovitz, A., 1997, "Single-phase Matrix Converter," *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 144 (4), pp. 235-240.
7. Ziogas, P.D., Khan, S.I. and Rashid, M.H., 1986, "Analysis and Design of Forced Commutated Cyclo-converter Structures with Improved Transfer Characteristics," *IEEE Transactions on Industry Application*, IE-33 (3).
8. Idris, Z., Hamzah, M.K. and Saidon, M.F., 2006, "Implementation of Single-Phase Matrix Converter as a Direct AC-AC Converter with Commutation Strategies," *IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference 2006 (IEEE PESC'06)*, 18-22 June 2006, Jeju, Korea, pp. 2240-2246.
9. Nguyen-Quang, N., Stone, D.A., Bingham, C.M. and Foster, M.P., 2006, "Single-Phase Matrix Converter for Radio Frequency Induction Heating," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006 (SPEEDAM 2006)*, 23-26 May 2006, Taormina, Italy, pp. S18-28-S18-32.
10. Ljusev, P. and Andersen, M.A.E., 2005, "Safe-commutation Principle for Direct Single-Phase AC-AC Converters for Use in Audio Power Amplification," *Proceeding on Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, 1 July 2005, Norwegian University Science, Trondheim, Norway, 6 p.
11. Ziogas, P.D., Khan, S.I. and Rashid, M.H., 1985, "Some Improve Forced Commutated Cyclo-converter Structures," *IEEE Transaction on Industry Applications*, IA-21 (5), pp. 1242-1253.
12. Hothongkham, V., 2002, Analysis and Design of Three-Phase AC-AC Matrix Converter, Master of Engineering Thesis, Electrical Engineering Program, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 220 p. (In Thai)
13. Tabone, M., Staines, C.S. and Cilia, J., 2004, "Low Cost Three-Phase to Single-Phase Matrix Converter," *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 8-10 December 2004, Hammamet, Tunisia, pp. 474-479.
14. Hosseini, S.H. and Babaei, E., 2001, "A New Generalized Direct Matrix Converter," *IEEE International Symposium of Industrial Electronics*, 12-16 June 2001, Pusan, Korea (South), Vol. 2, pp. 1071-1076.
15. Yang, X., Lei, H., Cao, Y. and Gong, Y., 2002, "Realization of Matrix Electric Power Conversion with Practicality," *Proceeding of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (PCC-Osaka 2002)*, 2-5 April 2002, pp. 1182-1187.
16. Khoei, A. and Yuvarajan, S., 1988, "Single-Phase AC-AC Converter Using Power MOSFET's," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 35 (3), pp. 442-443.
17. Khoei, A. and Yuvarajan, S., 1989, "Steady State Performance of a Single-Phase Induction Motor Fed by a Direct AC-AC Converter," *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual*

Meeting (IAS), 1-5 October 1989, San Diego, CA, USA

18. Kumar, A. and Thakura, P.R., 2014, "Hardware Development and Implementation of Single Phase Matrix Converter as a Cyclo-converter and as an Inverter," *2014 IEEE 6th India International conference on Power Electronics (IICPE)*, 8-10 December 2014, Kurukshetra, India.

19. Raja, M.K., Vijayakumar, K. and Kannan, S., 2014, "Matrix Converter Based Solar Photo Voltaic System for Reactive Power Compensation using Sinusoidal Pulse Width Modulation," *2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)*, 18-20 December 2014, Coimbatore, India.

20. Zargar, A. and Barakati, M.S., 2015, "A New Dynamic Voltage Restorer Structure Based on Three-Phase to Single-Phase AC/AC Matrix Converter," *The 20th Iranian Electrical Power Distribution Conference (EPDC2015)*, 28-29 April 2015, Zahedan, Iran

21. Pittermann, M., Drabek, P. and Bednar, B., 2015, "Single-Phase High-Voltage Matrix Converter for Traction Drive with Medium Frequency Transformer," *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015)*, 9-12 November 2015, Yokohama, Japan.

22. Takaoka, N. and Itoh, J., 2015, "Battery Energy Storage System with Isolated Single-phase Matrix Converter using Center-tapped Transformer for Power Decoupling Capability," *4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 22-25 November 2015, Palermo, Italy,

23. Buticchi, G., Barater, D., Cocari, C. and Franceschini, G., 2016, "Single-phase Series Active Power Filter with Transformer-coupled Matrix Converter," *IET Power Electronics*, 9 (6), pp. 1279-1289.

24. Rivera, M., Rojas, S., Wheeler, P. and Rodriguez, J., 2016, "A Predictive Control Strategy for a

Single-Phase AC-AC Converter," *7th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2016)*, 16-18 February 2016, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

25. Dalai, S.K. and Dash, D.K., 2017, "Analysis of Single-phase Matrix Converter with Regenerative Capabilities of Single-Phase induction Motor," *2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (Smart Techcon)*, 17-19 August 2017, Bangalore, India.

26. Nayak, B., Misra, B. and Mishra, R., 2017, "Performance Improvement of Single-Phase Matrix Converter using Band Pass Filter for Induction Heating," *2017 2nd International Conference on Communication Systems, Computing and IT Applications (CSCITA)*, 7-8 April 2017, Mumbai, India.

27. Moghaddami, M. and Sarwat, A.I., 2018, "Single-Phase Soft-Switched AC-AC Matrix Converter with Power Controller for Bidirectional Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54 (4).

28. Pirincci, N. and Orhan, A., 2019, "A New Approach for a Single-Phase Matrix Converter Operating as Frequency Changer," *The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, 25-27 September 2019, Elazig, Turkey.

29. Guan, L., Wang, Z., Lui, P. and Wu, J., 2019, "A Three-Phase to Single-Phase Matrix Converter for Bidirectional Wireless Power Transfer System," *IECON2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 14-17 October 2019, Lisbon, Portugal.

30. Boydak, M., Orhan, A. and Caliskan, A., 2020, "Using Buck-Boost Rectifier with Single-Phase Matrix Converter to Reduce Switch Count Operation," *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 14-16 April 2020, Antalya, Turkey.

