

อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบหลายระดับแรงดัน

Single Phase Multilevel Inverter

จีระพงศ์ ศรีวิชัย

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

133 หมู่ 3 ถ.พังโคน-วาริชภูมิ ต.พังโคน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160 E-mail: geerapongs@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์หลายระดับแรงดัน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสัญญาณรูปคลื่นแรงดันขาออกเจ็ดระดับหนึ่งเฟสทดสอบการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink เปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นที่พิกัดโหลดความต้านทาน 2kW เพื่อศึกษาการควบคุมการสวิตชิงที่ความถี่ 50Hz และ 16kHz จากผลการทดสอบกรณีควบคุมการสวิตชิงความถี่ 50 Hz ที่พิกัดสูงสุดพบว่าค่า THD_v 12.93% และ THD_i 13.34% ส่วนกรณีควบคุมการสวิตชิงความถี่ 16kHz ที่พิกัดสูงสุดพบว่าค่า THD_v 40.03% และ THD_i 31.54% และผลการเปรียบเทียบเป็นไปตามผลที่ได้จากการจำลองซึ่งถือว่ายอมรับได้

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ การควบคุมสวิตชิง

Abstract

This paper proposes a single-phase multi-level inverter controlled by a microcontroller providing the signal voltage waveform output of seven level. The model simulation program is given using Matlab/Simulink program to compare with the built prototype at rated load impedance 2 kW and the switching frequency of 50 Hz and 16 kHz. Test results case control the switching frequency 50 Hz at the results showed that the highest rating THD_v 12.93% and THD_i 13.34%. In case of controlling switching frequency 16kHz at rated found that THD_v 40.03% and THD_i 31.54% and the results

compare is based on results from simulation., Which is considered acceptable.

Keywords: multi-level inverter , switching control

1. คำนำ

อินเวอร์เตอร์นับได้ว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีบทบาทสำคัญและมีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟกระแสตรงไปเป็นไฟกระแสสลับ ตัวอย่างที่นำไปใช้งานดังเช่น แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และการสร้างไฟกระแสสลับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น อินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับแรงดัน [1] เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มีข้อได้เปรียบในด้านการประยุกต์ใช้งานประเภทกำลังไฟฟ้าสูงและสามารถเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนได้อย่างเหมาะสมอีกทั้งยังให้แรงดันขาออกที่มีคุณภาพสูง บทความวิจัยนี้นำเสนอการสร้างและทดสอบอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคดใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสัญญาณรูปคลื่นแรงดันขาออก

2. องค์ประกอบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

การวิเคราะห์รูปคลื่นหลายระดับนั้นเกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แต่ละเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรม ดังนั้นขนาดของแรงดันจะเท่ากับผลรวมของแรงดันขาออกของแต่ละเซลล์มารวมกัน ซึ่งจำนวนระดับขั้นของ

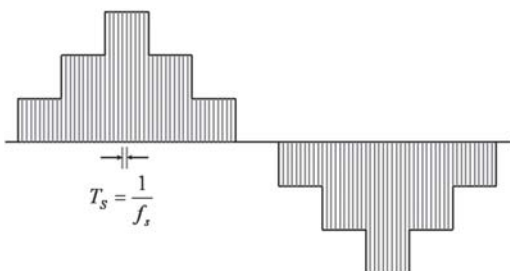
แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) นั่นคือ

$$m = 2S + 1 \quad (1)$$

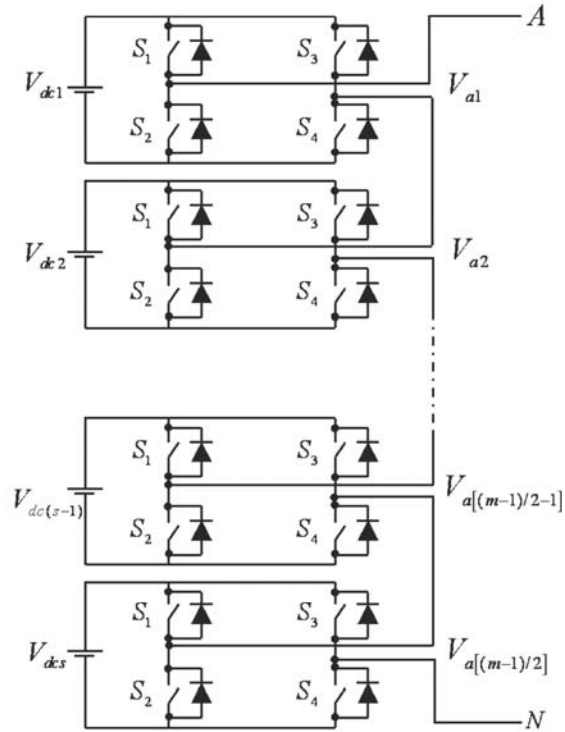
เมื่อ m คือ จำนวนระดับขั้นของแรงดันเฟสขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสแคด และ S คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงในรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสแคดเฟสเดียวที่ m ระดับ ซึ่งแรงดันขาออก [2,3] คือ ผลรวมของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์แต่ละเซลล์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{AN} = V_{dc1} + V_{dc2} + \dots + V_{dc(s-1)} + V_{dcs} \quad (2)$$

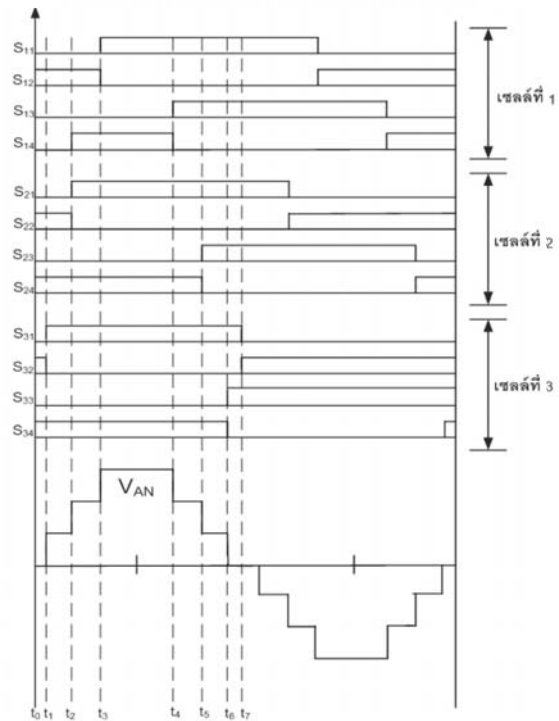
เนื่องจากกำหนดให้ระดับแรงดันที่ศูนย์ คือจุดรวมขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจำนวนระดับของแรงดันขาออก คือ $2S + 1$ รูปที่ 2 แสดงรูปคลื่นแรงดันของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสแคด และรูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์แต่ละเซลล์โดยกำหนดให้แรงดันไฟตรงแต่ละเซลล์มีขนาดเท่ากัน รูปคลื่นขาออกมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และรูปคลื่นขาออกของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์แต่ละเซลล์เป็นลักษณะควอดเรอร์สมมาตร(quarter-symmetries)สามารถลดค่าของ THD ได้ด้วยการหมุนของสวิทช์ ซึ่งรูปแบบการควบคุมการสวิทช์และหลักการทางาน สามารถพิจารณาได้จากตารางแสดงสภาวะการสวิทช์ในหนึ่งคาบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ในแต่ละเซลล์และรูปที่ 3 แสดงการควบคุมสวิทช์ซึ่งด้วยความถี่สูงในหนึ่งคาบเวลา



รูปที่ 3 รูปแบบการสวิทช์อินเวอร์เตอร์ 7ระดับชนิดแคสแคดที่มีการสวิทช์ด้วยความถี่สูง



รูปที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสแคด



รูปที่ 2 รูปแบบการสวิทช์อินเวอร์เตอร์ 7ระดับชนิดแคสแคด

3. การสร้างอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคด

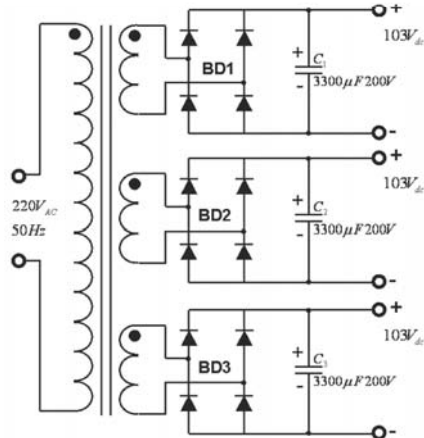
บทความวิจัยนี้แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคดได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคด

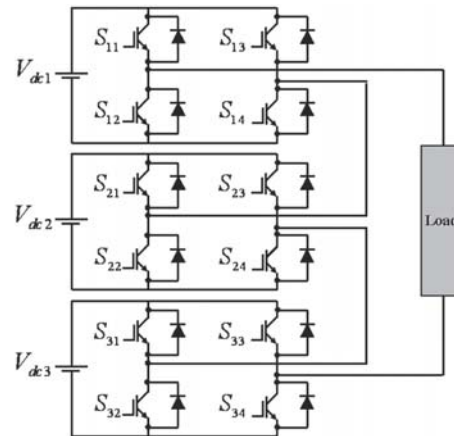
ไดอะแกรมการทำงานที่นำเสนอในรูปที่ 4 ประกอบไปด้วย

3.1 แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ ใช้หม้อแปลงกำลังเป็นแหล่งจ่ายที่ผลิตแรงดันไฟสลับขาเข้า 220V และแรงดันไฟสลับขาออกจำนวน 3 ชุด ชุดละ 73V เรียงกระแสตรงด้วยไดโอดกำลังแบบบริดจ์และกรองแรงดันให้เรียบด้วยตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรง 103 V จำนวน 3 ชุดแสดงได้ดังรูปวงจรที่ 5



รูปที่ 5 แหล่งจ่ายกำลังอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคด

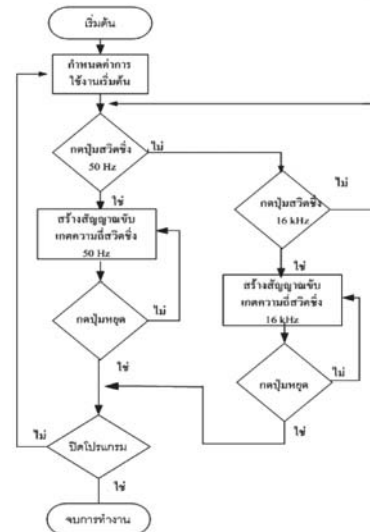
3.2 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ รูปคลื่นแรงดันขาออก เกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์ฟลูบริดจ์แต่ละเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรม ซึ่งขนาดแรงดันขาออกจะเท่ากับผลรวมแรงดันขาออกของแต่ละเซลล์มารวมกัน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรกำลังอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคด

จากการคำนวณวงจรกำลังมีค่ากระแสสูงสุด 10A แรงดันตกคร่อมสวิตช์พิจารณาจากค่าขดแรงดันที่โหลดไม่เกิน 600V จึงเลือกใช้สวิตช์กำลัง IGBT เบอร์ HGTP12N60A4 จำนวน 12 ตัวทนกระแสได้ 12A แรงดันตกคร่อมสวิตช์ 600V และความถี่การสวิตช์สูงสุดไม่เกิน 30kHz

3.3 การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เลือกใช้เบอร์ dsPIC30F4011 และแผนผังการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมการควบคุมพิจารณาจากรูปแบบการสวิตช์ดังรูปที่ 2 และสามารถแสดงเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นได้ดังรูปที่ 8

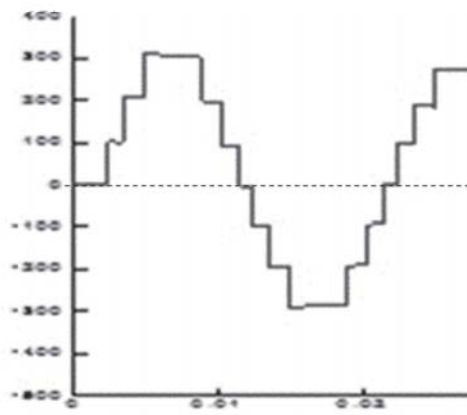


รูปที่ 8 อินเวอร์เตอร์ 7ระดับชนิดแคสเคดที่สร้างขึ้น

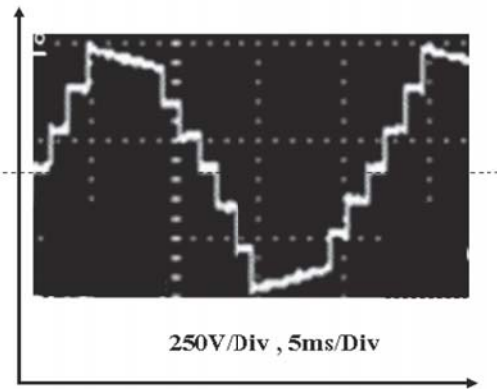
4.ผลการทดสอบ

ทดสอบจำลองบนโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อนำผลการจำลองเปรียบเทียบกับเครื่องที่สร้างขึ้น ควบคุมด้วยเทคนิคการสวิตช์แบบEqual-pulse PWM ที่ความถี่สวิตช์ 50Hz และ 16 kHz เพื่อศึกษาคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันขาออกซึ่งนำไปสู่การตัดสินใจว่าการสวิตช์รูปแบบใดเหมาะสมกับการประยุกต์หรือพัฒนาต่อไปได้ ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

4.1 เปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองกับเครื่องที่สร้างขึ้น ที่ความถี่สวิตช์ 50Hz ใช้โหลดความต้านทานพิกัด 2kW แสดงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12

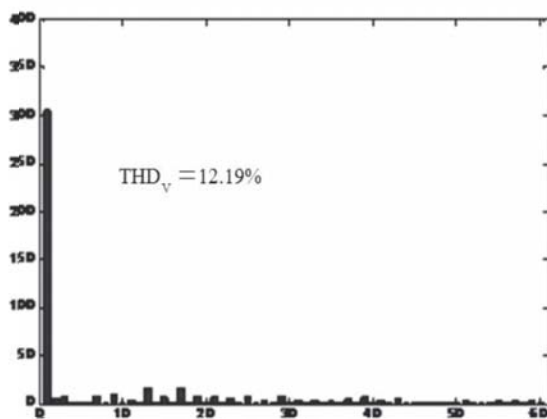


(a) การจำลอง

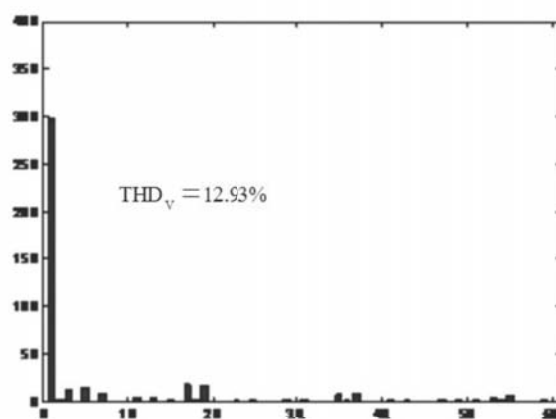


(b) ทดสอบจากเครื่องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 9 เปรียบเทียบแรงดันขาออกที่ความถี่สวิตช์ 50Hz พิกัดโหลด 2kW

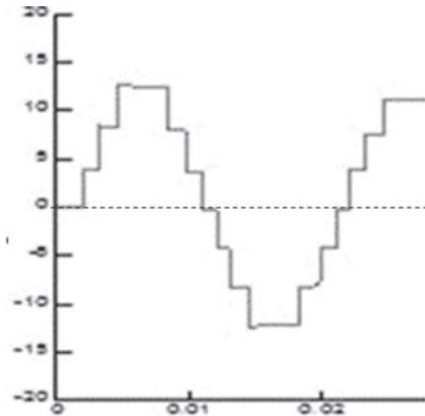


(a) สเปกตรัมแรงดันจากการจำลอง

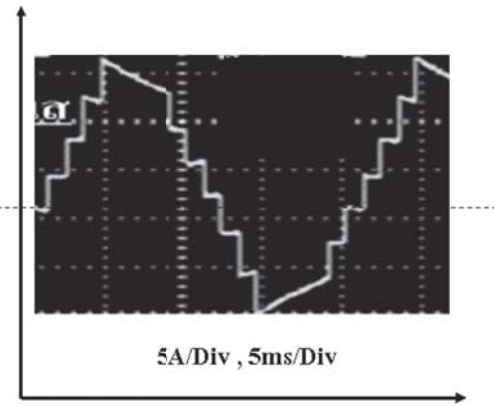


(b) สเปกตรัมแรงดันจากเครื่องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 10 เปรียบเทียบสเปกตรัมแรงดันที่ความถี่สวิตช์ 50Hz พิกัดโหลด 2kW

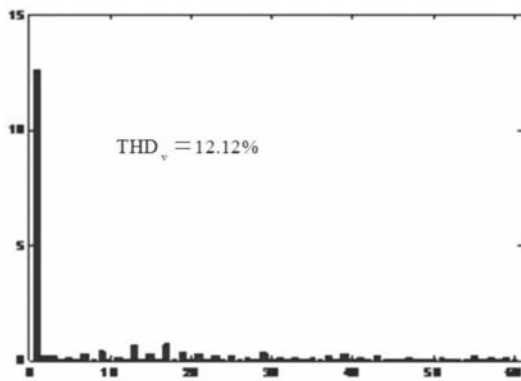


(a) การจำลอง

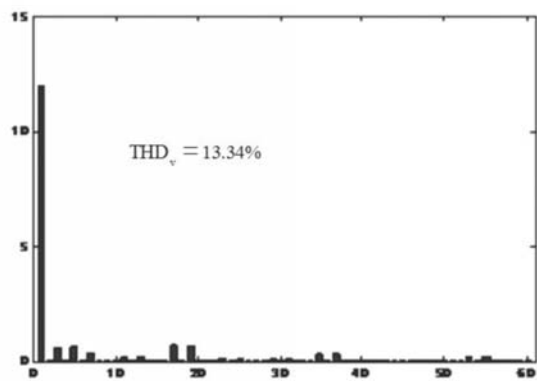


(b) ทดสอบจากเครื่องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 11 เปรียบเทียบแรงดันขาออกที่ความถี่สวิตช์ 50Hz พิกัดโหลด 2kW



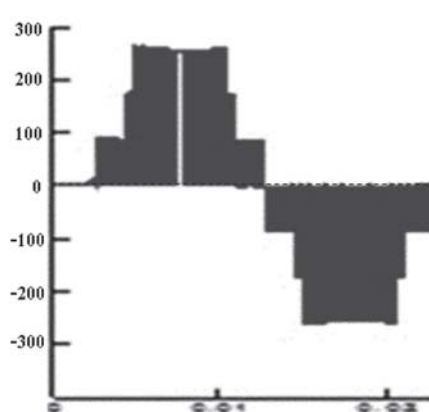
(a) สเปกตรัมกระแสจากการจำลอง



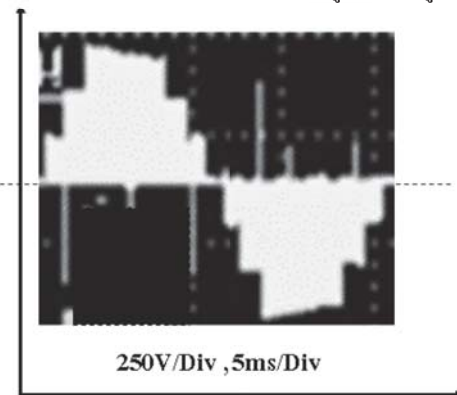
(b) สเปกตรัมกระแสจากเครื่องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 12 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่ความถี่สวิตช์ 50Hz พิกัดโหลด 2kW

4.2 เปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับเครื่องที่สร้างขึ้นที่ความถี่สวิตช์ 16kHz พิกัดโหลด 2kW แสดงผลลัพธ์ดังรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 17

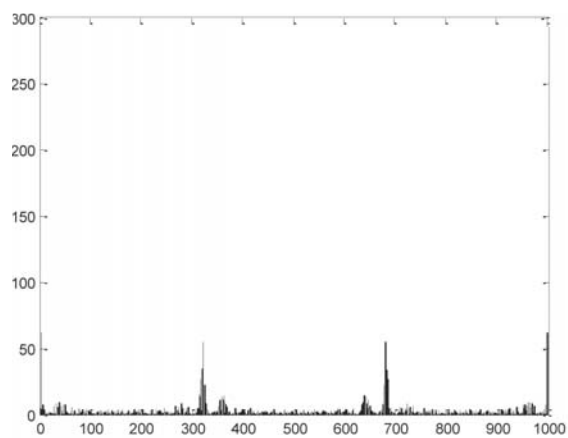


(a) การจำลอง

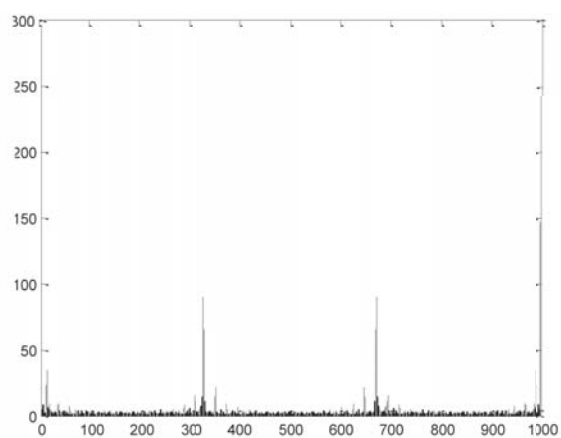


(b) ทดสอบจากเครื่องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 13 เปรียบเทียบแรงดันขาออกที่ความถี่สวิตช์ 16kHz พิกัดโหลด 2kW

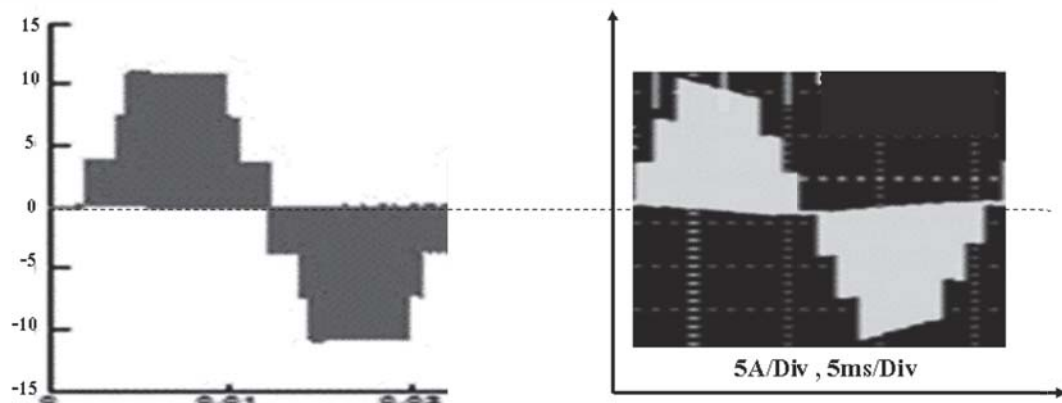


(a) สเปกตรัมแรงดันจากการจำลอง

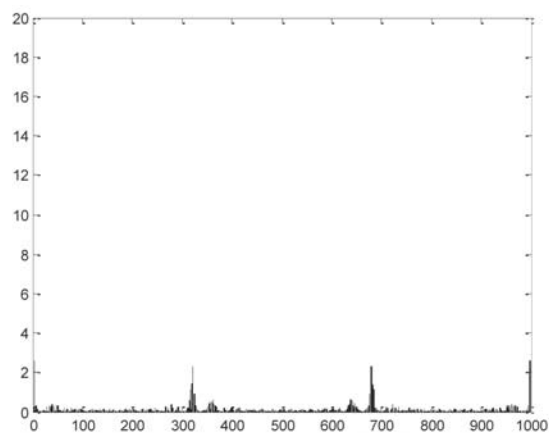


(b) สเปกตรัมแรงดันจากเครื่องที่สร้างขึ้น

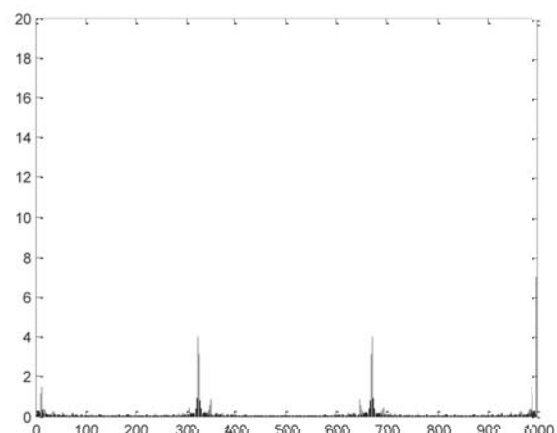
รูปที่ 14 เปรียบเทียบสเปกตรัมแรงดันที่ความถี่สวิตช์ 16kHz พิกัดโหลด 2kW



รูปที่ 15 เปรียบเทียบกระแสที่ความถี่สวิตช์ 16kHz พิกัดโหลด 2kW



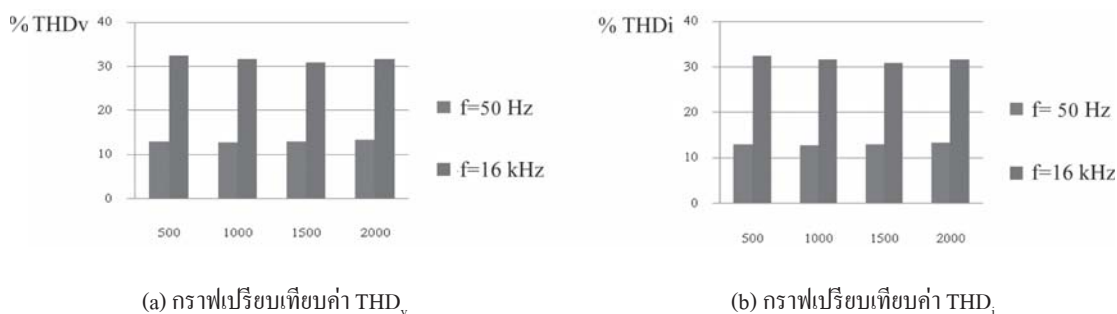
(a) สเปกตรัมการจำลอง



(b) สเปกตรัมจากเครื่องที่สร้างขึ้น

รูปที่ 16 เปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสที่ความถี่สวิตช์ 16kHz พิกัดโหลด 2kW

4.3 จากข้อมูลผลการทดสอบข้างต้นสามารถนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบค่า THD_v และ THD_i สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 17



(a) กราฟเปรียบเทียบค่า THD_v

(b) กราฟเปรียบเทียบค่า THD_i

รูปที่ 17 เปรียบเทียบ THD_v และ THD_i จากผลทดสอบการสวิตซ์ 2 ความถี่

ผลการทดสอบซึ่งนำข้อมูลมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบค่า THD_v และ THD_i ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 17 ที่ความถี่สวิตซ์ 50 Hz และ 16 kHz จะมีโหลดที่กักกำลัง 0.5 kW ถึง 2 kW ดังนั้นจะเห็นว่าจากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าขณะที่ใช้เทคนิค Equal-pulse PWM ที่ความถี่สูงนั้นจะทำให้เนื้อหาของแรงดันลดลงจึงทำให้แรงดันมูลฐาน (fundamental) ลดลงสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 13 จากผลการจำลองและทดสอบ

จึงเมื่อนำมาคิดเป็น % ในสมการ $THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} v_n^2}}{V_1} \times 100$

ซึ่งแรงดันมูลฐานเป็นตัวหารดังในกรณีความถี่ 16 kHz องค์ประกอบมูลฐาน (fundamental) ต่ำกว่าความถี่ของ 50 Hz จึงอาจส่งผลให้ %THD ของกรณีความถี่สวิตซ์ 16 kHz สูงกว่า 50 Hz

5. สรุปผล

บทความวิจัยนี้นำเสนอการสร้างอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคดใช้เทคนิค Equal-pulse PWM ที่ความถี่สวิตซ์แตกต่างกัน 2 ความถี่ นั่นคือ 50 Hz และ 16 kHz ทดสอบกับโหลดที่กักกำลัง 0.5 kW ถึง 2 kW เพื่อศึกษาคุณภาพของแรงดันขาออกของเครื่องที่สร้างขึ้นจากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเปรียบเทียบความถี่สวิตซ์ 2 ความถี่โดยกรณีการสวิตซ์ที่มีความถี่สูง (16 kHz) ทำให้เนื้อหาของแรงดันลดลงจึงทำให้แรงดัน

มูลฐาน (fundamental) ลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้คุณภาพของแรงดันขาออกต่ำลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, "Multilevel Power Converters" in *Power Electronics Handbook*, 2nd Ed. Elsevier, 2007.
- [2] S. Sirisukprasert, *The Modeling and Control of a Cascaded-Multilevel Converter-Based STATCOM*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [3] S. Khomfoi and C. Aimsaard, "A 5-Level Cascaded Hybrid Multilevel Inverter for Interfacing with Renewable Energy Resources," ECTI-CON, 6-9 May 2009.

ประวัติผู้เขียนบทความ

อาจารย์จิระพงศ์ ศรีวิชัย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร