

วงจรมอเตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

Seven-Level Cascaded Inverter

ประสพโชค ให่ทองคำ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

235 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10163

โทร. 0-2457-0068 ต่อ 122 โทรสาร. 0-2457-3982 E-mail: prasopchok_ho@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรมอเตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ซึ่งใช้วงจรมอเตอร์ชนิดเอชบริดจ์ 9 ชุดต่อกันแบบวายในระบบ 3 เฟส โดยในแต่ละเฟสใช้วงจรมอเตอร์ชนิดเอชบริดจ์ 3 ชุด ต่ออนุกรม วิธีการในการควบคุมสวิตช์เพื่อลดค่าฮาร์มอนิกสเตรนจ์ในวงจรมอเตอร์นี้ใช้สัญญาณพัลส์บลิวเอเอ็ม 3 แบบ คือ พัลส์บลิวเอเอ็มแบบไซน์ พัลส์บลิวเอเอ็มแบบสเปซเวกเตอร์ และพัลส์บลิวเอเอ็มแบบที่มีการกำจัดฮาร์มอนิกสเตรนจ์สาม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปลักษณ์แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีความใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ และมีค่าฮาร์มอนิกสเตรนจ์ต่ำกว่าแบบอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังได้นำอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดนี้มาทดสอบกับโหลดตัวต้านทานและมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรมอเตอร์ที่นำเสนอนี้ สามารถที่จะนำมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เป็นอย่างดี

Abstract

This paper presents the seven-level cascaded inverter using a total of 9 units of H-Bridge inverters connected in a three-phase wye configuration with 3 H-Bridge cells per phase connected in series. Three switching methods including Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) and Third Harmonic Rejection Pulse Width Modulation (THPWM) are used to drive power switches in the seven-level inverter in order to reduce harmonic contents of its output voltages. The experimental results show that the output waveforms of the proposed inverter are close to sinusoidal waveforms and have lower harmonic distortion than those of typical two-level inverter. Moreover, this cascaded inverter has

been tested for the driving of resistive load and also induction motor load. The obtained results verify that the purposed inverter can be used to drive an induction motor appropriately.

1. บทนำ

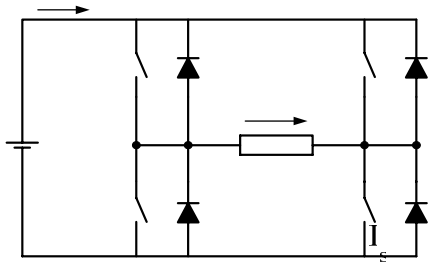
ในปัจจุบันงานทางด้านภาคอุตสาหกรรมได้มีความต้องการใช้งานการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่กำลังไฟฟ้าสูงในระดับเม็กกะวัตต์มากขึ้น ซึ่งวงจรมอเตอร์ 2 ระดับที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันไม่สามารถทำได้อีกทั้งวงจรมอเตอร์ 2 ระดับมีลักษณะแรงดันเอาต์พุตเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งทำให้มี ฮาร์มอนิกสเตรนจ์ เกิดขึ้นมาก

ดังนั้นในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรมอเตอร์แบบหลายระดับ ซึ่งให้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้น ตามจำนวนระดับของแรงดันที่เพิ่มขึ้นโดยในบทความนี้ได้นำเสนอวงจรมอเตอร์ 7 ระดับ ชนิดแคสเคด ที่นำวงจรมอเตอร์ 2 ระดับ แบบเอชบริดจ์ นำมาต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟสซึ่งใช้ทั้งหมด 3 วงจรมอเตอร์เอชบริดจ์ในแต่ละเฟสและใช้แหล่งจ่ายดีซีจ่ายให้กับวงจรมอเตอร์แบบเอชบริดจ์ 1 แหล่งจ่ายต่อ วงจรมอเตอร์

2. อินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ (H-Bridge Inverter)

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจรมอเตอร์ชนิดเอชบริดจ์

จำนวนระดับขั้นแรงดันที่น้อยที่สุดของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดใช้การแคสเคดด้วยอินเวอร์เตอร์แบบแยกอิสระแหล่งจ่ายดีซี มีแค่ 3 ระดับ นั่นคือ อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 1 เซลล์ ซึ่งอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์จะประกอบด้วย 4 สวิตช์หลักและ 4 ฟรีวิลลิ่งไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ 1 เซลล์

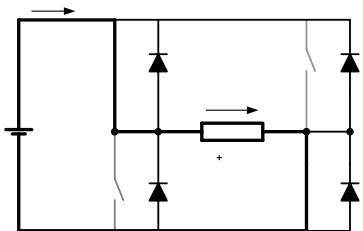
2.2 การทำงานของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์จะมีลักษณะการสวิตช์ดังแสดงในตารางที่ 1 สามารถวิเคราะห์แรงดันที่ตกคร่อมจุด A และจุด B ได้เป็น 3 ระดับด้วยกันคือ $+V$, $-V$ และระดับศูนย์ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ในรูปที่ 2 มีหลักการทำงานดังนี้คือ ถ้าสวิตช์ S_1 และ S_4 ทำงานพร้อมกัน แรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B, V_{AB} มีค่าเป็นบวก และทางเดินของกระแสคือ I_o ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) และถ้าสวิตช์ S_2 และ S_3 ทำงานพร้อมกันแรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B, V_{AB} มีค่าเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2(ค)

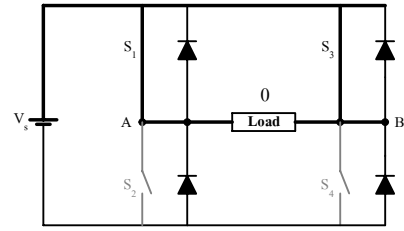
ตารางที่ 1 ลักษณะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

สวิตช์ที่นำกระแส	แรงดันเอาต์พุต V_{AB}
S_1, S_4	$+V_{AB}$
S_2, S_3	$-V_{AB}$
S_1, S_3 หรือ S_2, S_4	0

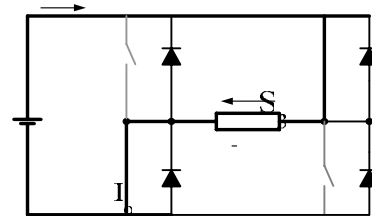
ในกรณีที่แรงดันตกคร่อมจุด A และจุด B, V_{AB} มีค่าเป็นศูนย์ สามารถเกิดได้ 2 กรณีคือ กรณีที่หนึ่ง สวิตช์ S_1 และ S_3 ทำงานพร้อมกัน ส่วน S_2 และ S_4 หยุดทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) กรณีที่สอง สวิตช์ S_2 และ S_4 ทำงานพร้อมกัน ส่วน S_1 และ S_3 หยุดทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2(ง)



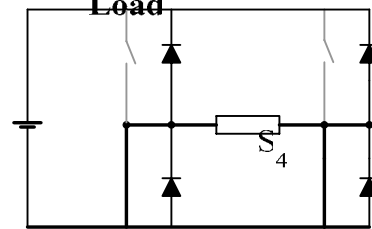
ก) สวิตช์ S_1 และ S_4 นำกระแส



ข) สวิตช์ S_1 และ S_3 นำกระแส



ค) สวิตช์ S_2 และ S_3 นำกระแส



ง) สวิตช์ S_2 และ S_4 นำกระแส

รูปที่ 2 ลักษณะการทำงานของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

2.3 องค์ประกอบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

2.3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว

จากการวิเคราะห์รูปคลื่นหลายระดับนั้น เกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรม ดังนั้นขนาดของแรงดันเฟสจะเท่ากับผลรวมของแรงดันเอาต์พุตของแต่ละเซลล์รวมกัน ซึ่งจำนวนระดับขั้นของแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

โดยที่ m คือ จำนวนระดับขั้นของแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด

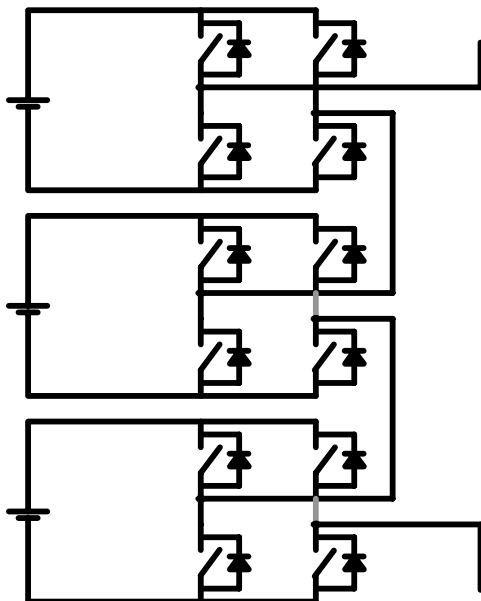
s คือ จำนวนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ถ้าต้องการรูปคลื่นแรงดันเฟส 7 ระดับ จะต้องใช้อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์จำนวน 3 เซลล์ ในรูปที่ 3 จะแสดง

โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว ซึ่งแรงดันเฟสเอาต์พุตก็คือ ผลรวมของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

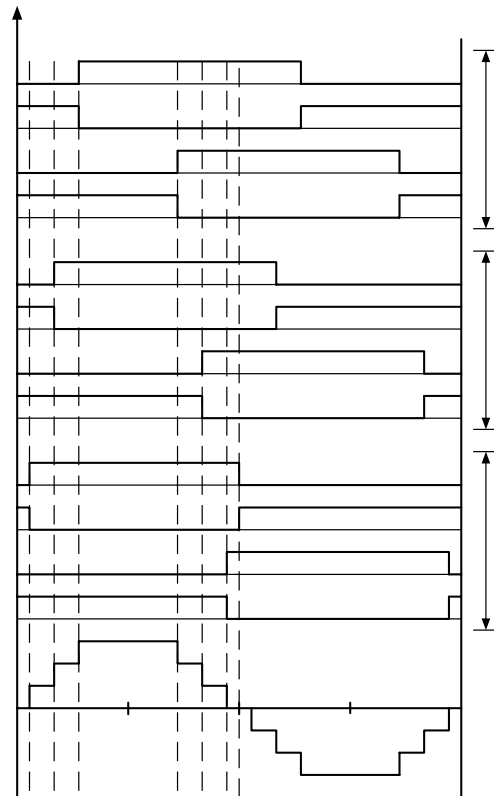
$$V_{AN} = V_{dc1} + V_{dc2} + V_{dc3} \quad (2)$$

เนื่องจากกำหนดให้ระดับแรงดันที่ศูนย์ คือจุดร่วมของเอาต์พุตอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจำนวนระดับของแรงดันเอาต์พุตคือ $2s + 1$ รูปที่ 4 แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคด 7 ระดับ และรูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์โดยกำหนดให้แรงดันไฟตรงแต่ละเซลล์ มีขนาดเท่ากัน $V_{dc1} = V_{dc2} = \dots = V_{dc(s-1)} = V_{dcs} = V_{dc}$



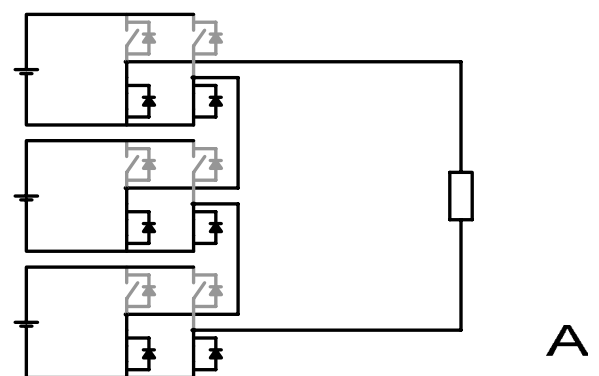
รูปที่ 3 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคด

รูปคลื่นเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดแคสเคด แสดงได้ดังในรูปที่ 4 มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ และรูปคลื่นเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เป็นลักษณะเป็นแบบควอเตอร์สมมาตร (Quarter-Symmetries) ทำให้ไม่มีส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์ความถี่เลซซี และสามารถลดค่าของ THD ได้ซึ่งรูปแบบการควบคุมการสวิตช์และหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

จากรูปที่ 4 สามารถแบ่งโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดได้เป็น 6 โหมดการทำงานด้วยกัน และสามารถอธิบายการทำงานของสวิตช์ได้ดังนี้

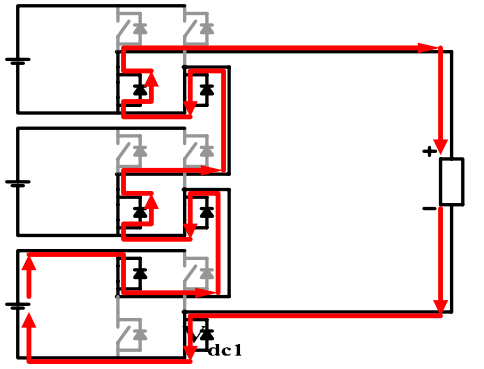


(ก) โหมด 0

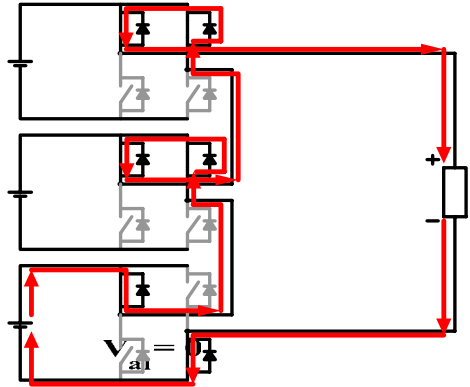
$S_{1,2}$

$S_{1,4}$

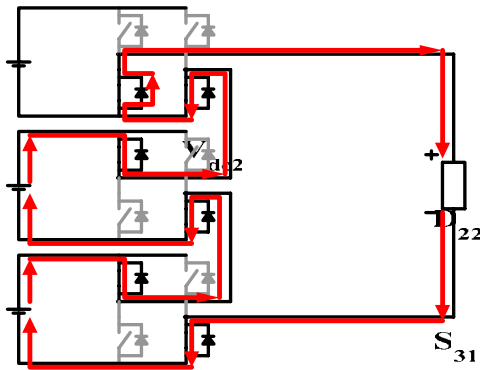
V_{a1}



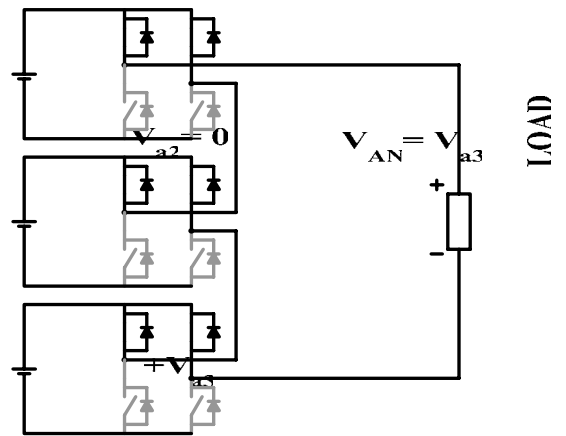
(ข) โหมด 1 D_{12}



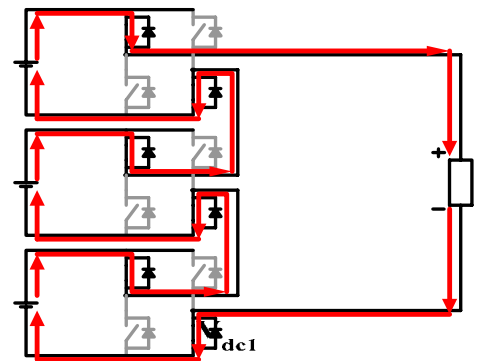
S_{14} (ฉ) โหมด 5



(ค) โหมด 2



(ช) โหมด 6



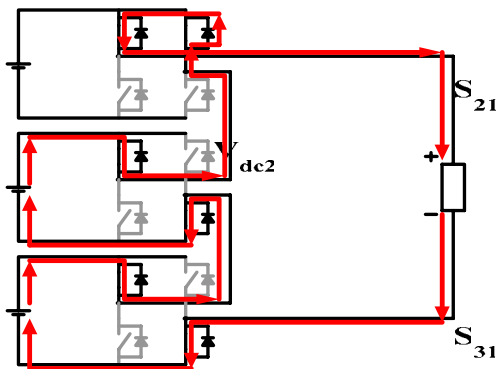
(ง) โหมด 3 D_{12}

รูปที่ 5 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ جهدระดับชนิดแคสเคด

Mode 0 (t_0-t_1) : ที่เวลา t_0 สวิตช์ S_{12} , S_{14} , S_{22} , S_{24} , S_{32} และ S_{34} ของอินเวอร์เตอร์นำกระแส ทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสที่จุด แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจึงเท่ากับศูนย์ $V_{AN} = 0$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_1

Mode 1 (t_1-t_2) : ที่เวลา t_1 จะมีสวิตช์ S_{12} , S_{14} , S_{22} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิตช์ S_{31} , S_{24} , ไดโอดของสวิตช์ S_{22} , S_{14} , ไดโอดของสวิตช์ S_{12} เข้าโหลดผ่านสวิตช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = +V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_2

Mode 2 (t_2-t_3) : ที่เวลา t_2 จะมีสวิตช์ S_{12} , S_{14} , S_{21} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิตช์ S_{31} , S_{24} , เข้าขั้วลบของ V_{dc2} , S_{21} , S_{14} , ไดโอดของสวิตช์ S_{12} เข้าโหลดผ่านสวิตช์ S_{34} กลับไปยัง



(จ) โหมด 4

V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = V_{a2} + V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_3

Mode 3 (t_3-t_4) : ที่เวลา t_3 จะมีสวิตช์ S_{11} , S_{14} , S_{21} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิตช์ S_{31} , S_{24} , เข้าขั้วลบของ V_{dc2} , S_{21} , S_{14} , เข้าขั้วลบของ V_{dc1} , S_{11} , เข้าโหลดผ่านสวิตช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_4

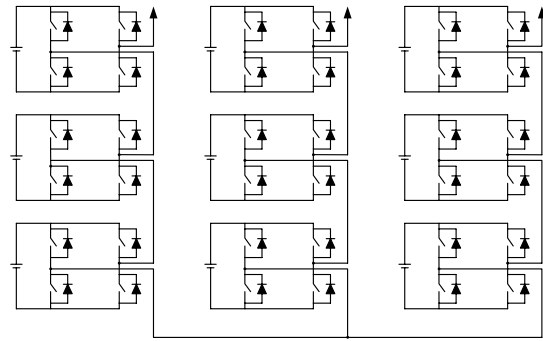
Mode 4 (t_4-t_5) : ที่เวลา t_4 จะมีสวิตช์ S_{11} , S_{13} , S_{21} , S_{24} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิตช์ S_{31} , S_{24} , เข้าขั้วลบของ V_{dc2} , S_{21} , S_{14} , ไดโอดของสวิตช์ S_{13} เข้าโหลดผ่านสวิตช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = V_{a2} + V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_5

Mode 5 (t_5-t_6) : ที่เวลา t_5 จะมีสวิตช์ S_{11} , S_{13} , S_{22} , S_{23} , S_{31} และ S_{34} นำกระแส ทำให้กระแสไหลจาก V_{dc3} ผ่านสวิตช์ S_{31} , ไดโอดของสวิตช์ S_{23} , สวิตช์ S_{21} , ไดโอดของสวิตช์ S_{13} , สวิตช์ S_{11} เข้าโหลดผ่านสวิตช์ S_{34} กลับไปยัง V_{dc3} สร้างแรงดันตกคร่อมโหลดเท่ากับ $V_{AN} = +V_{a3}$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_6

Mode 6 (t_6-t_7) : ที่เวลา t_6 สวิตช์ S_{11} , S_{13} , S_{21} , S_{23} , S_{31} และ S_{33} ของอินเวอร์เตอร์นำกระแส ทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสที่โหลด แรงดันที่ตกคร่อมโหลดจึงเท่ากับศูนย์ $V_{AN} = 0$ การทำงานของโหมดนี้จะสิ้นสุดที่เวลา t_7 ที่เวลานี้จะทำให้แรงดันเฟส V_{AN} ที่ตกคร่อมโหลดครบครึ่งไซเคิลบวก ส่วนในครึ่งไซเคิลลบ ก็จะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกันกับครึ่งไซเคิลบวก เพียงแต่ทิศทางของกระแสจะตรงข้ามกัน

2.3.2 โครงสร้างแคสเคดอินเวอร์เตอร์สามเฟส

สำหรับระบบสามเฟสเกิดจากการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว 3 ชุด ต่อกันในลักษณะเดลต้าหรือสตาร์ ดังในรูปที่ 6 เป็นโครงสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดสามเฟส ซึ่งเกิดจากอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเฟสเดียว มาต่อกันในลักษณะสตาร์



รูปที่ 6 อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

จากรูปที่ 6 คือแรงดันของเฟส A เกิดจากผลรวมของแรงดัน V_{a1} , V_{a2} และ V_{a3} เป็นเช่นเดียวกันในเฟส B และเฟส C เพียงแต่จะมีองศาทางไฟฟ้าต่างกันคือ 0, 120 และ 240 ในเฟส A, เฟส B และเฟส C ตามลำดับ ตามทฤษฎีของระบบสามเฟส พบว่าแรงดันไลน์อธิบายได้ด้วยสองแรงดันเฟส ยกตัวอย่างเช่น ความต่างศักย์ระหว่างเฟส A และเฟส B คือแรงดันไลน์ V_{AB} สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \quad (3)$$

โดยที่ V_{AB} คือ แรงดันไลน์

V_{AN} คือ แรงดันเฟส A เทียบกับจุด N

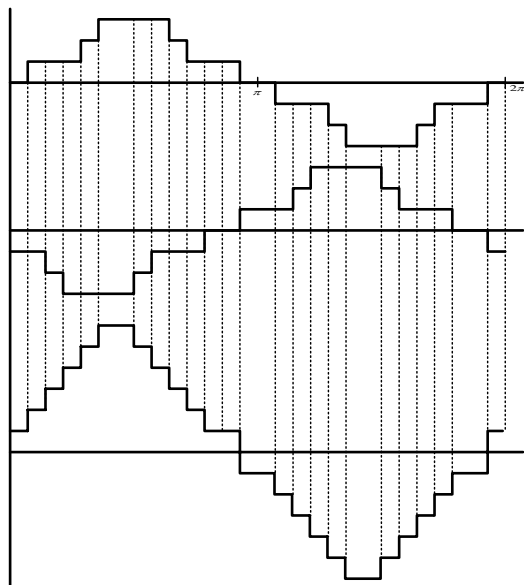
V_{BN} คือ แรงดันเฟส B เทียบกับจุด N

จากรูปที่ 7 แสดงแรงดันเอาต์พุตของเฟส A, V_{AN} แรงดันเอาต์พุตของเฟส B, V_{BN} และรูปคลื่นแรงดันไลน์ V_{AB} ของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด และจะพบว่าแรงดันเฟส B ล่าหลังแรงดันเฟส A อยู่ 120 องศา และแรงดันไลน์นำหน้าแรงดันเฟส A อยู่ 30 องศา ซึ่งได้ตรงตามทฤษฎีของระบบไฟฟ้าสามเฟส

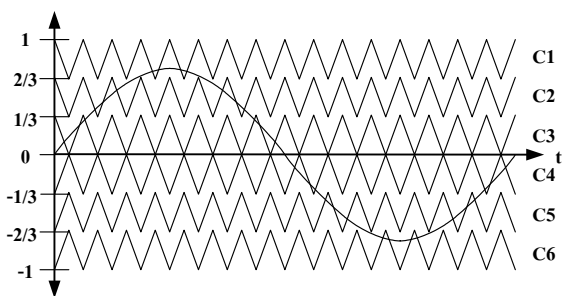
2.4 การมอดดูเลชันพีดับบลิวเอ็มแบบอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ในบทความนี้ใช้เทคนิคการมอดดูเลชันแบบอาศัยคลื่นพาหะ ซึ่งการมอดดูเลชันของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 7 ระดับ จะประกอบด้วย สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณของคลื่นพาหะสามเหลี่ยมอีก 6 สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 8 ประกอบด้วยคลื่นพาหะในซีกบวก 3 สัญญาณและ ซีกลบ 3

สัญญาณโดยกำหนดให้ค่ายอดสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นพาหะรวม มีค่า 1 และ -1 ตามลำดับเพื่อให้สะดวกในการกำหนดค่าดัชนีการมอด โดยคลื่นพาหะแต่ละคลื่นจะมีความสูงจากยอดถึงยอดเท่ากับ $1/3$ ซึ่งเทคนิคของคลื่นพาหะมีนั้นได้มีหลายนักวิจัยคิดค้นวิธีการมากมายเพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยเทคนิคที่ใช้ในบทความนี้ คือ เทคนิค Phase Opposition Disposition: POD จะมีลักษณะที่สัญญาณของคลื่นพาหะในซีกลบจะมีมุมต่างเฟสกับคลื่นพาหะในซีกบวกเท่ากับ 180 องศา ดังรูปที่ 8 โดยในบทความนี้ได้เลือกเทคนิคของคลื่นพาหะแบบ POD เพราะจะทำให้สัญญาณที่ดับลิวิเอมเอาท์พุทมีความสมมาตรทั้งด้านซีกบวกและซีกลบ



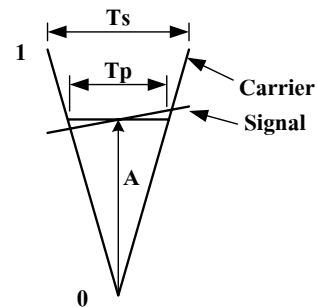
รูปที่ 7 แรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของแคสเคดอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ 3 เฟส



รูปที่ 8 เทคนิคการมอดดูเลชันแบบ POD

2.4.1 การสร้างสัญญาณพีดับลิวิเอมสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างพัลส์กับความสูงของสัญญาณอ้างอิงสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้นเนื่องจากความสูงของคลื่นพาหะจะขึ้นอยู่กับจำนวนระดับ ดังนั้นในการหาค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณเอาท์พุทจะอาศัยหลักการเดียวกับการหาความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับในสมการที่ 4 โดยจะพิจารณาให้ค่าความสูงจากยอดถึงยอดของคลื่นพาหะเป็นหนึ่งหน่วย ดังรูปที่ 9 และความสูงของสัญญาณที่ใช้ในการมอดดูเลชันมีจุดอ้างอิงที่ศูนย์ (ขอบล่างของคลื่นพาหะ) ดังนั้นค่าความกว้างของสัญญาณเอาท์พุทจะเป็นไปตามสมการที่ 4



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของสัญญาณอ้างอิงกับความกว้างพัลส์เอาท์พุทสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

$$\frac{T_p}{T_s} = A \quad ; 0 \leq A \leq 1 \quad (4)$$

ดังนั้นถ้าใช้เทคนิคการมอดดูเลชันแบบ SPWM, THPWM และ SVPWM ก็จะเป็นไปตามสมการที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

$$T_p = m \sin(\omega t) T_s \quad (5)$$

$$T_p = m \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{4} \sin(3\omega t) \right) T_s \quad (6) \quad \text{AN}$$

สำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับความสูงของคลื่นพาหะจะเท่ากับ $1/3$ ดังนั้นในการทำให้ความสูงของคลื่นพาหะมีค่าเป็นหนึ่งหน่วยจึงจะต้องคูณด้วย 3 ยกตัวอย่าง

การคำนวณเทคนิคการ มอดูเลชันแบบ SPWM จะเป็นดังสมการที่ 7

$$T_p = \begin{cases} 3\left(m\sin(\omega t) - \frac{2}{3}\right)T_s & ; \frac{2}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq 1 \\ 3\left(m\sin(\omega t) - \frac{1}{3}\right)T_s & ; \frac{1}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq \frac{2}{3} \\ 3(m\sin(\omega t))T_s & ; 0 \leq m\sin(\omega t) \leq \frac{1}{3} \\ 3\left(m\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\right)T_s & ; -\frac{1}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq 0 \\ 3\left(m\sin(\omega t) + \frac{2}{3}\right)T_s & ; -\frac{2}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq -\frac{1}{3} \\ 3(m\sin(\omega t) + 1)T_s & ; -1 \leq m\sin(\omega t) \leq -\frac{2}{3} \end{cases} \quad (7)$$

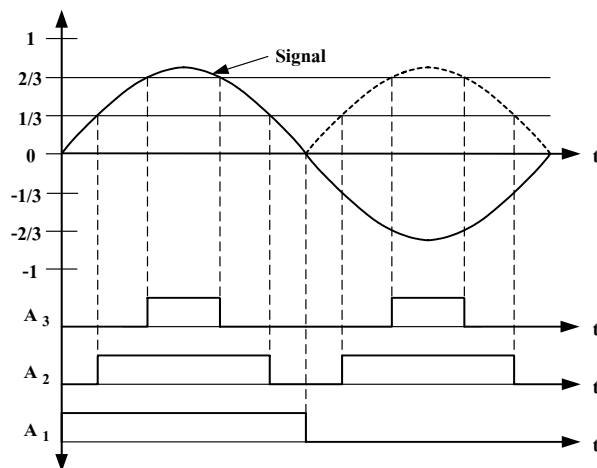
และเนื่องจากการสร้างสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทั่วไปมีตัวกำเนิดสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มเพียง 6 สัญญาณ ดังนั้นในการสร้างสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มทั้ง 36 สัญญาณสำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับจะต้องอาศัยวงจรภายนอกเพื่อผสมสัญญาณให้ได้สัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มทั้ง 36 สัญญาณตามที่ต้องการ โดยสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการผสมสัญญาณนั้นจะมาจากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงกับค่าคงที่ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับนี้จะต้องใช้สัญญาณนี้ 3 สัญญาณต่อเฟส สัญญาณดังกล่าวนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 8, 9 และ 10

$$A_1 = \begin{cases} = 1 & ; \text{Signal} \geq 0 \\ = 0 & ; \text{Signal} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$A_2 = \begin{cases} = 1 & ; |\text{Signal}| \geq \frac{1}{3} \\ = 0 & ; |\text{Signal}| < \frac{1}{3} \end{cases} \quad (9)$$

$$A_3 = \begin{cases} = 1 & ; |\text{Signal}| \geq \frac{2}{3} \\ = 0 & ; |\text{Signal}| < \frac{2}{3} \end{cases} \quad (10)$$

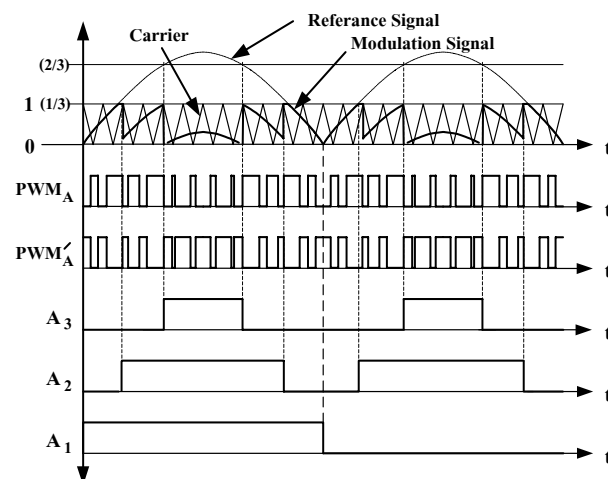
สัญญาณ A_1 , A_2 และ A_3 นั้นสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 10 ในกระบวนการเก็บข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงนั้นสามารถลดจำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บได้ เพราะสัญญาณทางด้านซีกบวกและลบสมมาตรกัน ดังนั้นจึงสามารถเก็บข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงเฉพาะซีกบวก สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มก็จะเป็ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 วิธีการสร้างสัญญาณ A_1 , A_2 และ A_3

$$T_p = \begin{cases} 3\left(m\sin(\omega t) - \frac{2}{3}\right)T_s & ; \frac{2}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq 1 \\ 3\left(m\sin(\omega t) - \frac{1}{3}\right)T_s & ; \frac{1}{3} \leq m\sin(\omega t) \leq \frac{2}{3} \\ 3(m\sin(\omega t))T_s & ; 0 \leq m\sin(\omega t) \leq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 เมื่อนำสร้างสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.7

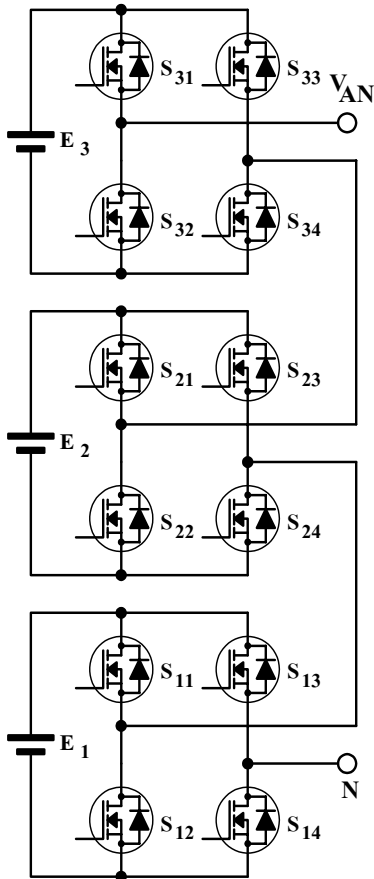


รูปที่ 11 การมอดูเลชันเทคนิค SPWM ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

เมื่อ PWM'_A คือ สัญญาณตรงข้ามของ PWM_A

ตารางที่ 2 กระบวนการผสมสัญญาณพีดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ

สวิตช์	กระบวนการ	ลักษณะสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม
S_{31}	$(PWM_A \cdot A_3) \cdot A_1$	
S_{32}	$(PWM'_A + \bar{A}_3) + \bar{A}_1$	
S_{33}	$(PWM_A \cdot A_3) \cdot \bar{A}_1$	
S_{34}	$(PWM'_A + \bar{A}_3) + A_1$	
S_{21}	$((PWM_A + A_3) \cdot A_2) \cdot A_1$	
S_{22}	$((PWM'_A \cdot \bar{A}_3) + \bar{A}_2) + \bar{A}_1$	
S_{23}	$((PWM_A + A_3) \cdot A_2) \cdot \bar{A}_1$	
S_{24}	$((PWM'_A \cdot \bar{A}_3) + \bar{A}_2) + A_1$	
S_{11}	$(PWM_A + A_2) \cdot A_1$	
S_{12}	$(PWM'_A \cdot \bar{A}_2) + \bar{A}_1$	
S_{13}	$(PWM_A + A_2) \cdot \bar{A}_1$	
S_{14}	$(PWM'_A \cdot \bar{A}_2) + A_1$	
สัญญาณแรงดันเฟสเอาต์พุต		



รูปที่ 12 ตำแหน่งสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับของเฟส A

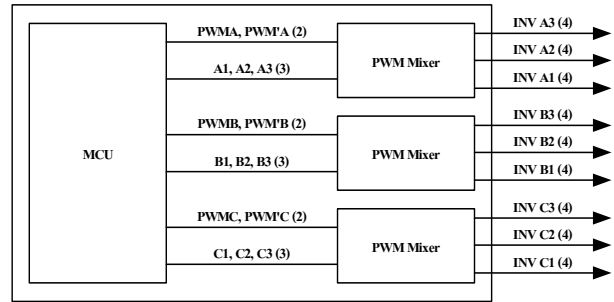
เมื่อสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจากรูปที่ 11 มาเข้ากระบวนการตามตารางที่ 2 จะได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มเอาท์พุทครบตามที่ต้องการโดยตำแหน่งของสวิตช์นั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 12

3.2.4 การออกแบบวงจรผสมสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม

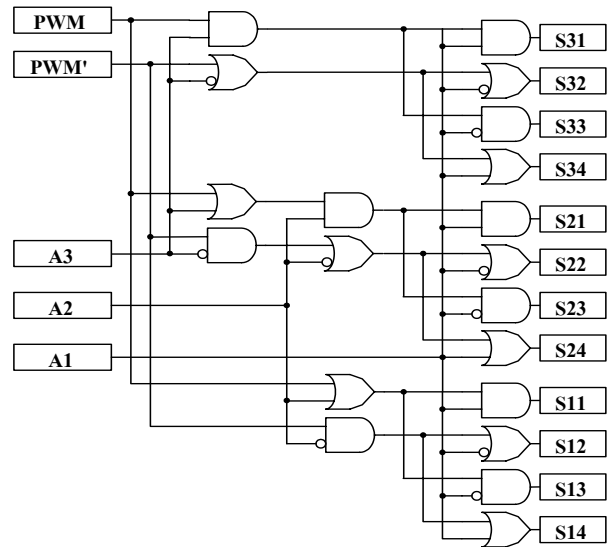
จากหลักการการสร้างสัญญาณที่ใช้ในบทความนี้ จะต้องอาศัยวงจรลอจิกเกตภายนอกในการผสมสัญญาณเพื่อให้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มทั้งหมด ซึ่งกระบวนการผสมสัญญาณนั้นจะเป็นไปตามตารางที่ 2 ซึ่งสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมทางลอจิกได้ดังรูปที่ 14

4. การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดได้ทำการทดลองในย่านความถี่ที่ 25, 50, 75 เฮิรตซ์ โดยทำการวัดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เอาท์พุทแต่ละเฟส และเอาท์พุทที่โหลดในแต่ละแบบของสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ซึ่ง



รูปที่ 13 ไดอะแกรมของวงจรควบคุม



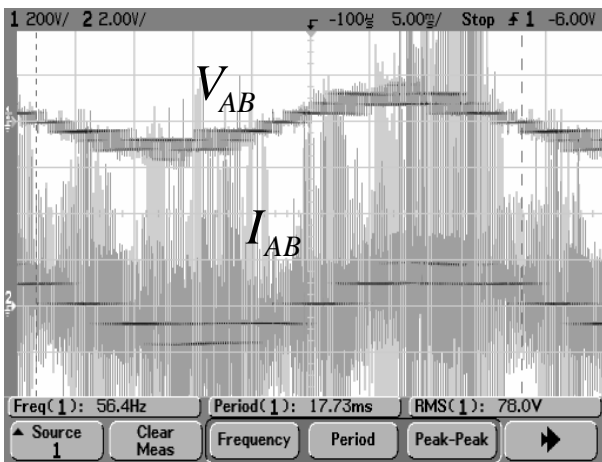
รูปที่ 14 วงจรผสมสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 1 เฟส

สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ได้นำมาทดลองมีทั้งหมด 3 แบบ คือ สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบฟังก์ชันการมอดดูเลทแบบไซน์ (SINUSOIDAL PWM; SPWM), สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบฟังก์ชันการมอดดูเลทแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Modulation PWM; SVPWM), สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบฟังก์ชันการมอดดูเลทแบบไซน์ร่วมกับฮาร์โมนิกส์ที่สาม (Third Harmonics Injection PWM; (PWM; THPWM)) ซึ่งในการทดลองได้ทดสอบกับโหลดที่เป็นตัวต้านทานและมอเตอร์แล้วทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแส โดยทำการทดลองดังนี้

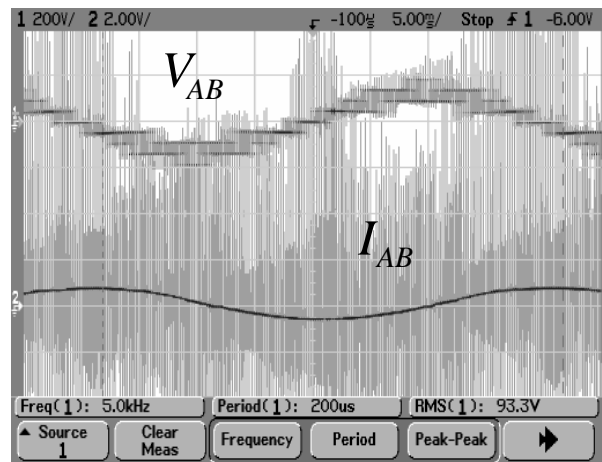
4.1 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานและโหลดมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มชนิด SPWM

4.1.1 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานที่ความถี่ 25 Hz, 50 Hz, และ 75 Hz

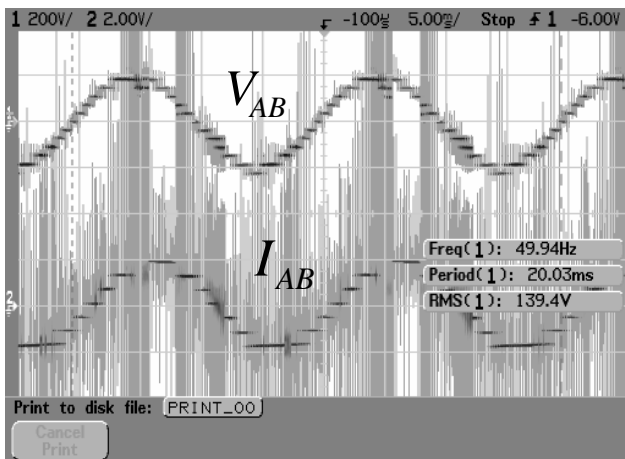
4.1.2 การทดสอบกับโหลดมอเตอร์ที่ความถี่ 25 Hz, 50 Hz, และ 75 Hz



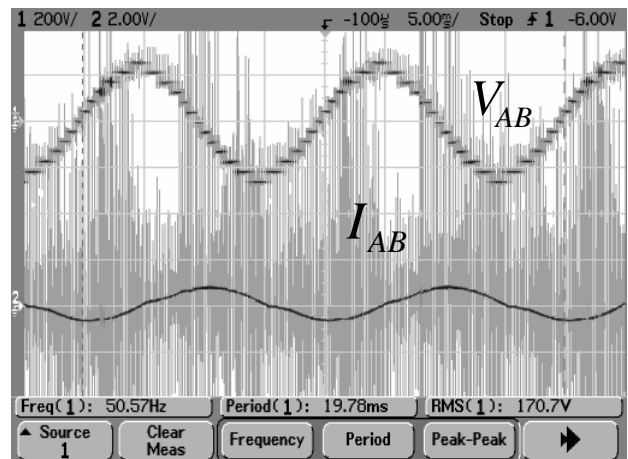
รูปที่ 15 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 25 Hz



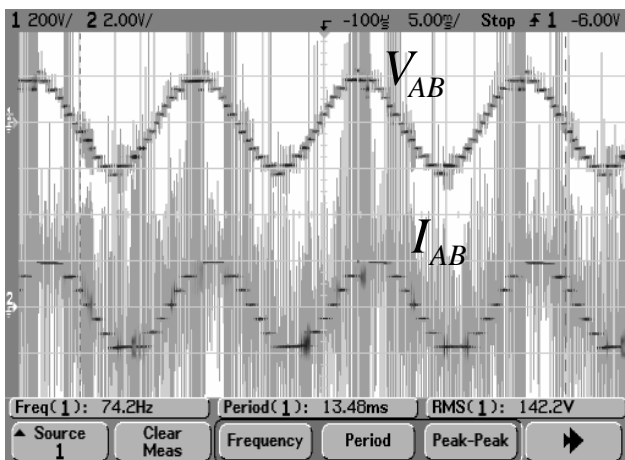
รูปที่ 18 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 25 Hz



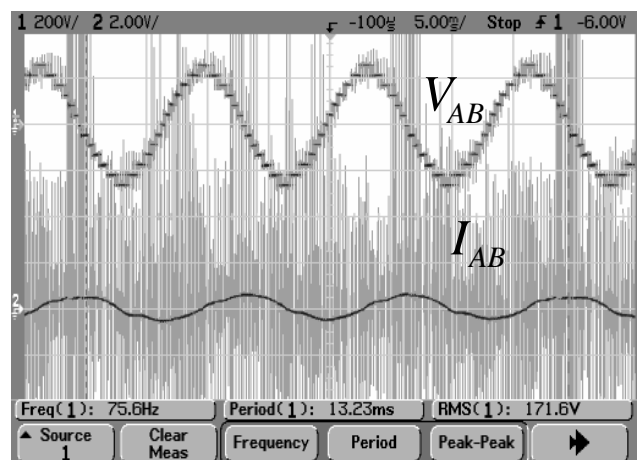
รูปที่ 16 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 19 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 50 Hz



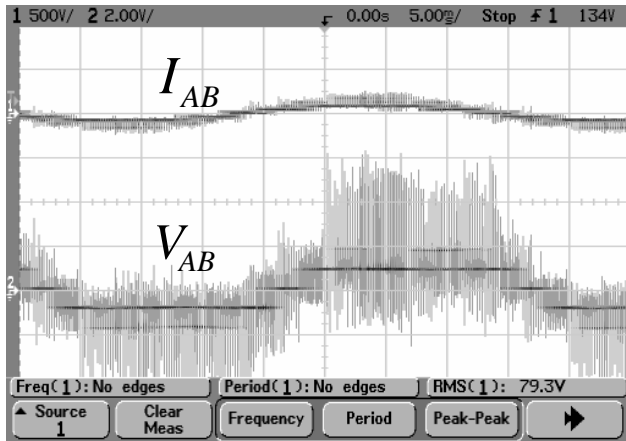
รูปที่ 17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz



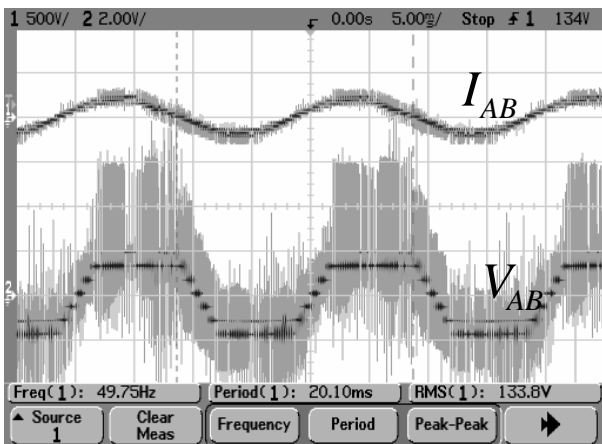
รูปที่ 20 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz

4. 2 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานและโหลดมอเตอร์โดยใช้สัญญาณพีดีบีเอ็มชนิด SVPWM

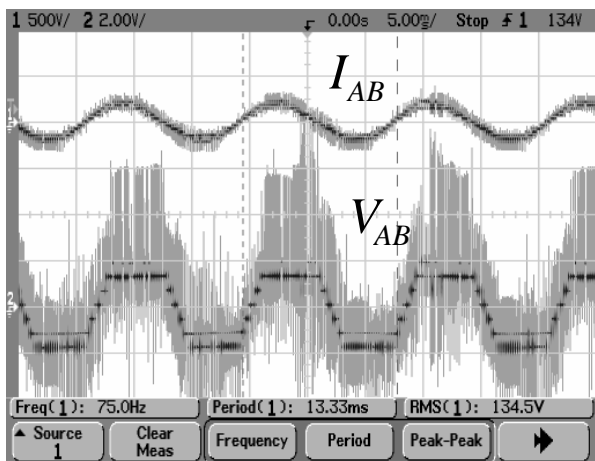
4. 2.1 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานที่ความถี่ 25 Hz, 50 Hz, และ 75 Hz



รูปที่ 21 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 25 Hz

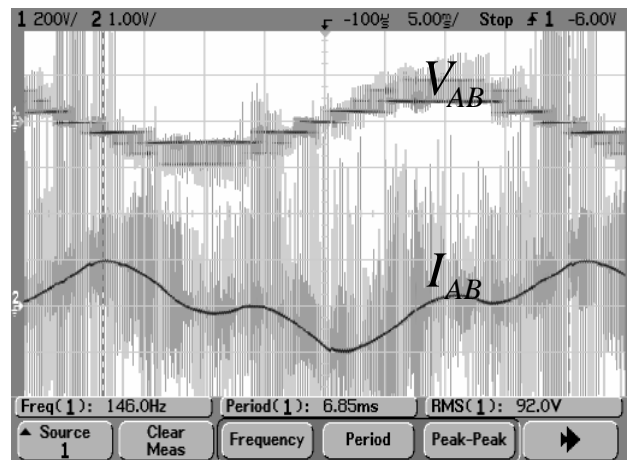


รูปที่ 22 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 50 Hz

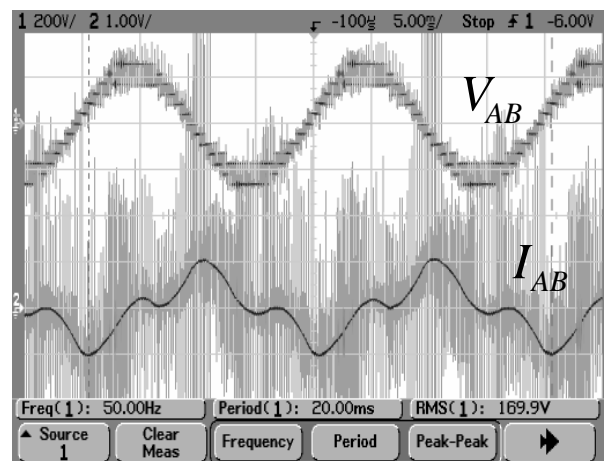


รูปที่ 23 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz

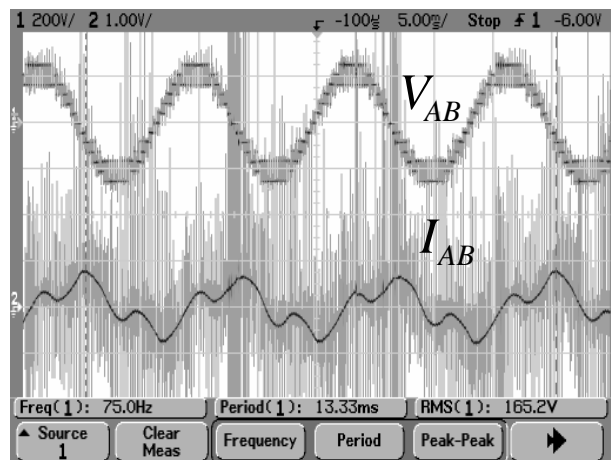
4.2.2 การทดสอบกับโหลดมอเตอร์ที่ความถี่ 25 Hz, 50 Hz, และ 75 Hz



รูปที่ 24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 25 Hz



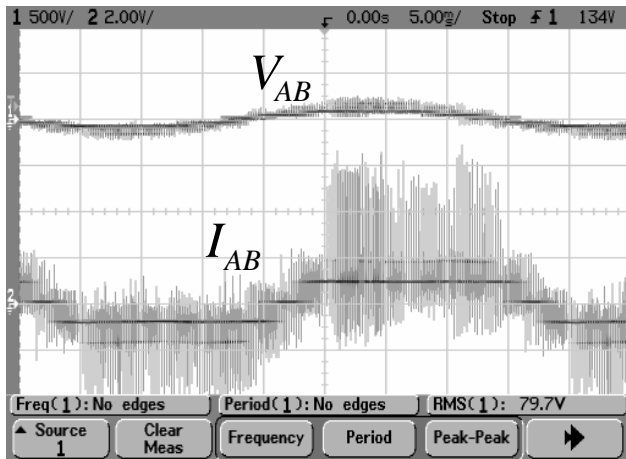
รูปที่ 25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 50 Hz



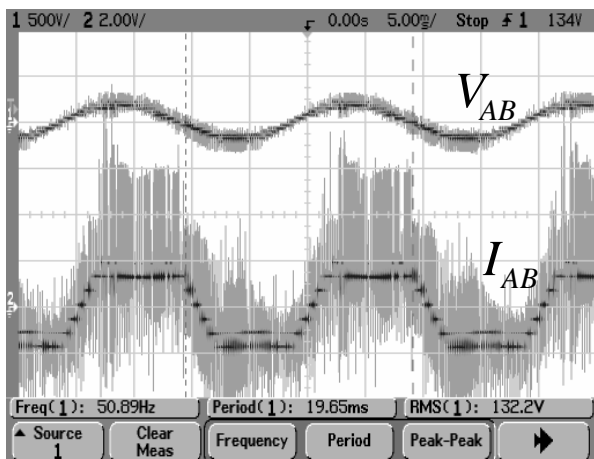
รูปที่ 26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz

4.3 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานและโหลดมอเตอร์
โดยใช้สัญญาณพัลส์บวริเอ็มชนิด THPWM

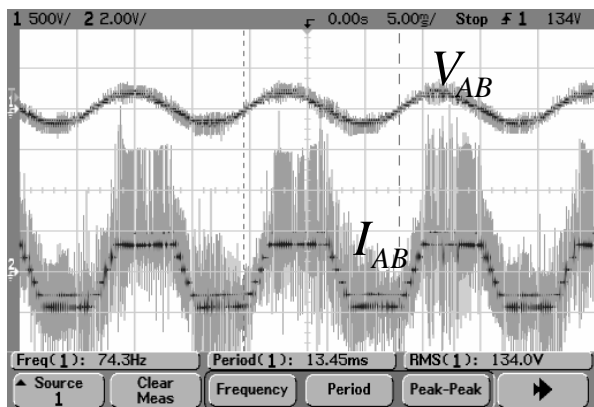
4.3.1 การทดสอบกับโหลดตัวต้านทานที่ความถี่ 25 Hz,
50 Hz, และ 75 Hz



รูปที่ 27 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz

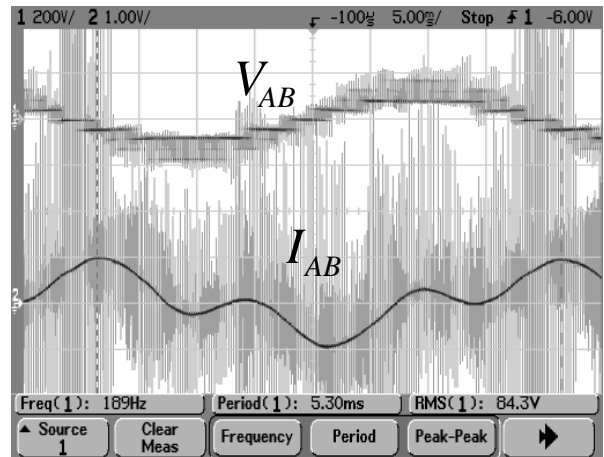


รูปที่ 28 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 50 Hz

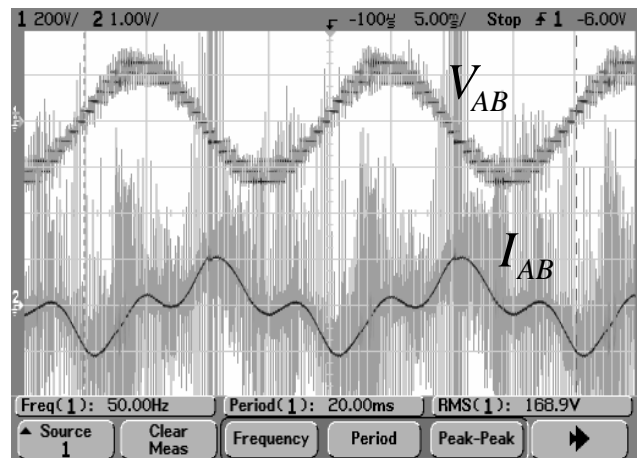


รูปที่ 29 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz

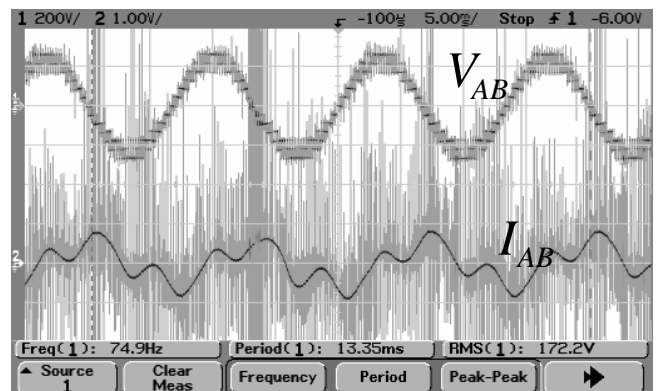
4.3.2 การทดสอบกับโหลดมอเตอร์ที่ความถี่ 25 Hz, 50
Hz, และ 75 Hz



รูปที่ 30 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 25 Hz



รูปที่ 31 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 32 รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่ความถี่ 75 Hz

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทำการทดลองได้ทำการวัดรูปคลื่นที่จุดต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ชนิดแคสเคดโดยการทดสอบที่ความถี่เอาต์พุต 25 Hz , 50 Hz และ 75 Hz โดยทำการทดสอบกับโหลดตัวต้านทานและมอเตอร์ ได้แสดงผลการทดลองในบทที่ 4 เรียบร้อยแล้ว ซึ่งรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับ ชนิดแคสเคดมีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากกว่ารูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับที่ใช้ในปัจจุบัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายฉัตรชัย เอ็มสะอาด นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในการออกแบบและสร้างวงจรต้นแบบ และขอขอบคุณ นายธนกร เตชะพรลภัส, นายนนทชัย ปานขาว, นายภูชิต บุญรอด และนายไมตรี ชื่นวารีนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม ที่ช่วยเหลือในการเก็บผลการทดลองต่างๆ

7. เอกสารอ้างอิง

1. D.Grahame Holmes and Thomas A Lipo, "Pulse With Modulation for Power Converter Principles and practice," Wiley interscience, 2003
2. Leon M. Tolbert and Thomas G. Habetler, "Novel Multilevel Inverter Carrier Based PWM Method," IEEE Transactins on Industry Applications, Vol.35, No.5, September/October 1999
3. Kazuki Iwaya and Isao Takahashi, "Novel Multilevel PWM Wave Control Method Using Series Connected Full Bridge Inverter," IEEE Conference, 2003
4. Brendan Peter McGrath and Donald Grahame Holmes, "Sinusoidal PWM of Multilevel Inverter in the Overmodulation Region," IEEE Conference, 2002
5. B.P.McGrath and D.G.Holems," A Comparison of Multicarrier PWM Strategies for Cascaded and Neutral Point Clamped Multilevel Inverter, "IEEE Conference, 2000

6. Leon M. Tolbert and Thomas G. Habetler, "Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Methods," IEEE IAS 1998 Annual Meeting, St.Louis, Missouri, October 10-15, 1998, pp. 1424-1431