

การเปรียบเทียบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับแบบแคสเคดที่มีแหล่งจ่ายส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลและไม่สมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันได

Comparison of Cascaded Seven Level Inverter with Balanced and with Unbalanced Source Power Transfer Using an Optimized Step-Waveform Harmonic Elimination Technique

ประสพโชค โห้ทองคำ*, ปิติกันต์ รักราชการ*, สิทธิพร เจียรนนทพิสุทธิ์**, วิจิตร กิณเรศ**

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม 235 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10163

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

**ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด ซึ่งใช้อินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์มาต่ออนุกรมกันจำนวน 3 เซลล์ใน 1 เฟส ใช้รูปแบบการสวิตช์แบบเทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกที่เหมาะสมแบบขั้นบันได โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบแหล่งจ่ายไฟดีซีที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลและไม่สมดุล ผลการทดลองแสดงในลักษณะรูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุต นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกันสำหรับกรณีแหล่งจ่ายดีซีส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ

Abstract

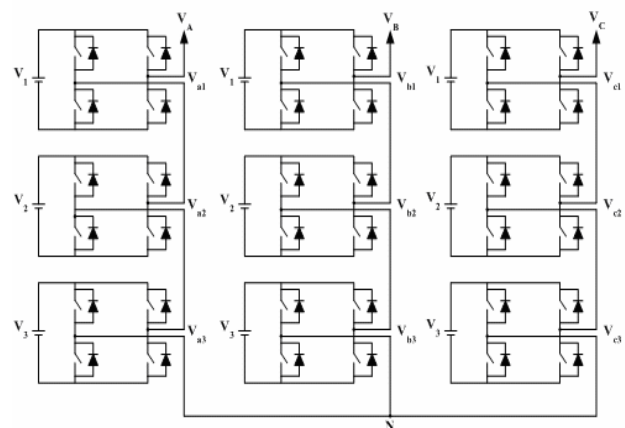
This paper presents cascaded seven level inverter using three H-bridge inverters connected in series in each phase. The switching pattern used in this paper is based on an optimized step-waveform harmonic elimination. The purpose of this paper is to compare the balanced and unbalanced dc-source power transfer. Experimental results are shown in the waveform and spectrum of the output voltages and currents. Moreover, the balanced and unbalanced dc-source power transfer are measured.

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่อาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับแรงดันทำให้สัญญาณแรงดันด้านเอาต์พุตมีลักษณะเข้าใกล้ไซน์มากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ การ

อนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวทำให้อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ นอกจากนี้การแบ่งย่อยแรงจ่ายไฟตรงยังทำให้เหมาะต่อการใช้งานกับแหล่งจ่ายประเภทพลังงานทดแทนเช่น เซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์พลังงาน หรือ แบตเตอรี่ เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดชนิดเอชบริดจ์ที่ใช้เทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้นบันไดในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดนี้ โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบกันกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงทำการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าแบบสมดุลและไม่สมดุล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์



รูปที่ 1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

2. อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 1 โดยการนำอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์

หนึ่งวงจร มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะอนุกรมกัน ซึ่งอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด (Cascaded Seven level Inverter) จะใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ (H-Bridge Inverter) จำนวน 3 วงจรมาต่อกันในแต่ละเฟส ดังนั้นขนาดของแรงดันเฟสจะเท่ากับผลรวมของแรงดันเอาต์พุตของแต่ละวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์รวมกัน ดังนั้นแรงดันในเฟส A, B และ C มีค่าเท่ากับ

$$V_{AN} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} \quad (1)$$

$$V_{BN} = V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} \quad (2)$$

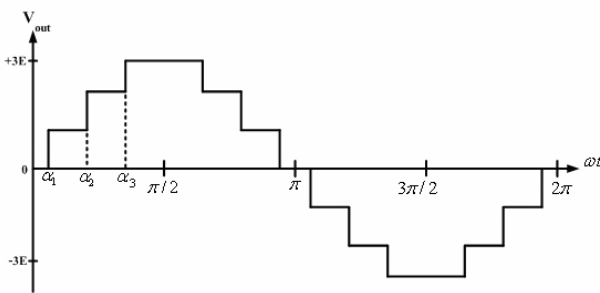
$$V_{CN} = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} \quad (3)$$

แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดจะทำการแยกจ่ายให้แก่อินเวอร์เตอร์ชนิดเอชบริดจ์ 1 วงจร จะใช้แหล่งจ่ายดีซี 1 แหล่งจ่าย เพื่อป้องกันการลัดวงจรและให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งจ่ายประเภทพลังงานทดแทน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์พลังงาน หรือแบตเตอรี่ เป็นต้น ได้

3. เทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกที่เหมาะสมแบบรูปคลื่นขั้น

บันได [2], [3], [6]

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นเป็นแบบสมมาตรคือ ดังนั้นสามารถทำการวิเคราะห์รูปคลื่นแบบฟูเรียร์ของฟังก์ชันคาบใด ๆ ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด

$$V_{out}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^s \cos(n\alpha_k) \right] \sin(n\omega t)$$

(4)

ที่ α_k คือ ค่าของมุมสวิทช์ภายใต้เงื่อนไข

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_s < \frac{\pi}{2}$$

จากสมการที่ (4) ขนาดของ $V_{out}(\omega t)$ คือ

$$h_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^s \cos(n\alpha_k) \quad (5)$$

s คือ จำนวนของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

n คือ ฮาร์มอนิกอันดับที่

E คือ ขนาดของแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

การควบคุมขนาดของความถี่มูลฐาน พิจารณาให้อยู่ในรูปของดัชนีมอดูเลชัน

$$M = \frac{h_1}{sE} \quad (6)$$

ที่ h_1 คือ ขนาดของความถี่มูลฐาน

s คือ จำนวนอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

E คือ ขนาดของแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์

จากสมการที่ (5) สามารถนำขนาดของ $V_{out}(\omega t)$ มาวิเคราะห์หามุมสวิทช์ เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์โดยนำวิธีนิวตัน-ราฟสันมาใช้ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

$$\alpha^j = [\alpha_1^j, \alpha_2^j, \alpha_3^j]^T \quad (7)$$

เมตริกซ์ของสมการ Nonlinear เป็น

$$F^j = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1^j) + \cos(\alpha_2^j) + \cos(\alpha_3^j) \\ \cos(5\alpha_1^j) + \cos(5\alpha_2^j) + \cos(5\alpha_3^j) \\ \cos(7\alpha_1^j) + \cos(7\alpha_2^j) + \cos(7\alpha_3^j) \end{bmatrix} \quad (8)$$

และ

$$\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^j = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha_1^j) & -\sin(\alpha_2^j) & -\sin(\alpha_3^j) \\ -5\sin(5\alpha_1^j) & -5\sin(5\alpha_2^j) & -5\sin(5\alpha_3^j) \\ -7\sin(7\alpha_1^j) & -7\sin(7\alpha_2^j) & -7\sin(7\alpha_3^j) \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมตริกซ์ของขนาดของฮาร์มอนิกส์เป็น

$$T = \begin{bmatrix} \frac{(3)(0.8)\pi}{4} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

จากสมการที่ (8) - (10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$F(\alpha) = T \quad (11)$$

โดยมีขั้นตอนการหาค่ามุม α ดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นของ α^j ที่ $j = 0$

$$\alpha^0 = [\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0]^T \quad (12)$$

2) คำนวณค่าของ

$$F(\alpha^0) = F^0 \quad (13)$$

3) ทำสมการที่ (11) ให้เป็นสมการเชิงเส้น

$$F^0 + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^0 d\alpha^0 = T \quad (14)$$

และ

$$d\alpha^0 = [d\alpha_1^0 \quad d\alpha_2^0 \quad d\alpha_3^0]^T \quad (15)$$

4) หาค่า $d\alpha^0$ จากสมการที่ (14)

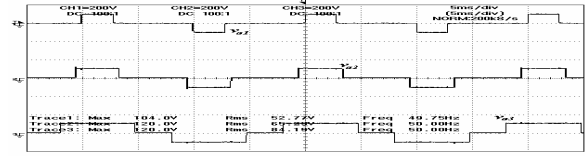
$$d\alpha^0 = INV \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^0 (T - F^0) \quad (16)$$

ที่ $INV \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^0$ เป็นอินเวอร์สของเมตริกซ์ $\left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right]^0$

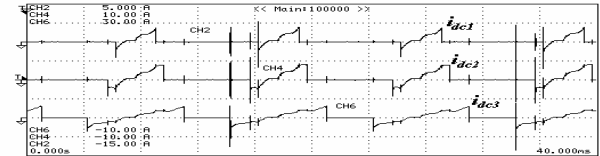
5) นำค่า $d\alpha^0$ ที่ได้จากสมการที่ (16) มาบวกกับค่า α^0 เริ่มต้น

$$\alpha^{j+1} = \alpha^j + d\alpha^j \quad (17)$$

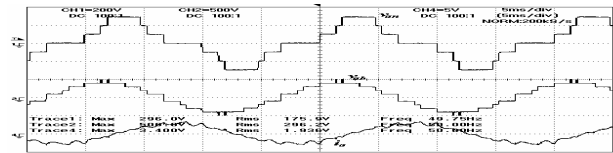
6) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 ใหม่จนกระทั่งค่าของ α ทำให้สมการที่ (11) เป็นจริง ซึ่งจะได้ค่ามุมสวิตช์ คือ $\alpha_1 = 29.2355^\circ$, $\alpha_2 = 54.4383^\circ$ และ $\alpha_3 = 64.4844^\circ$



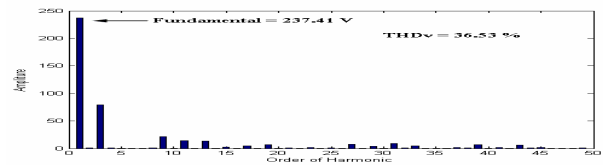
รูปที่ 3 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz, $M=0.8$ กรณีแหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล



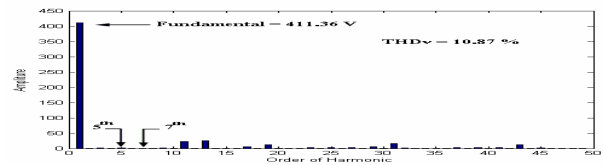
รูปที่ 4 รูปคลื่นกระแสที่แหล่งจ่ายส่งผ่านให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz, $M=0.8$ กรณีแหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล



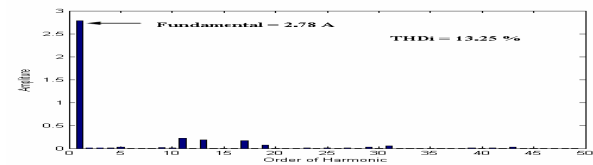
(ก) แรงดันเฟส, แรงดันและกระแสไลน์ทางด้านเอาต์พุต



(ข) สเปกตรัมแรงดันเฟสทางด้านเอาต์พุต



(ค) สเปกตรัมแรงดันไลน์ทางด้านเอาต์พุต

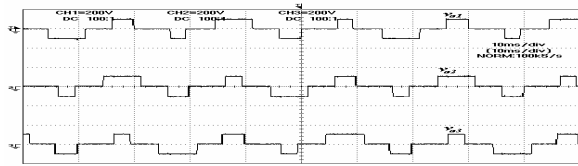


(ง) สเปกตรัมกระแสไลน์ทางด้านเอาต์พุต

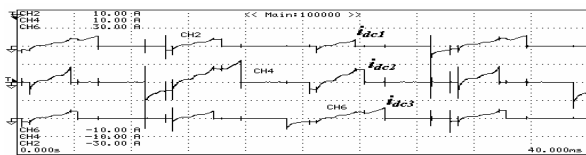
รูปที่ 5 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุต กรณีแหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล

4. ผลการทดลอง

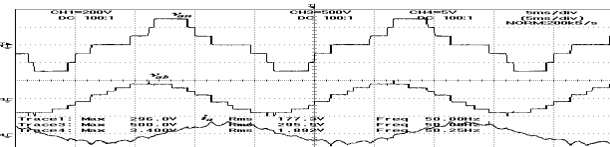
จากหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด และหลักการเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถนำมาทำการสร้างอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคดและทำการทดสอบกับโหลด $R=50\Omega$, $L=50\text{mH}$ อนุกรมกันแล้วต่อกันแบบวาย โดยทดสอบที่ค่าความถี่มูลฐานที่ 30 Hz, 50 Hz, และ 70 Hz แล้วทำการปรับค่าของดัชนีมอดูเลชันเป็น 0.6, 0.8 และ 1 เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 โดยในการทดลองได้ใช้เครื่อง PZ4000 Power Analyzer ของ Yokogawa เป็นเครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายส่งผ่านไปให้กับอินเวอร์เตอร์เจ็ดระดับชนิดแคสเคด แสดงค่าได้ดังตารางที่ 1 และ 2 หลังจากนั้นทำการวัดรูปคลื่นแรงดันและกระแส พร้อมสเปกตรัม ซึ่งจะแสดงเฉพาะที่ค่าความถี่ $f = 50$ Hz, ค่าดัชนีมอดูเลชัน (M) เท่ากับ 0.8 และค่ามุมสวิทช์ซึ่งเป็น $\alpha_1 = 29.2355^\circ$, $\alpha_2 = 54.4383^\circ$ และ $\alpha_3 = 64.4844^\circ$ แสดงได้ดังรูปที่ 3-8



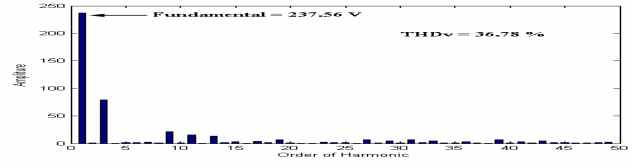
รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A ที่ $f = 50$ Hz, $M=0.8$ กรณีแหล่งจ่ายแบบสมดุลง



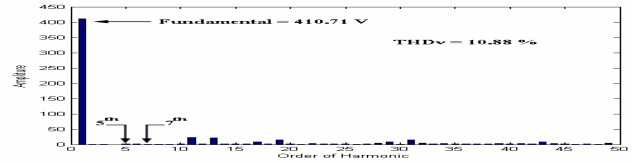
รูปที่ 7 รูปคลื่นกระแสของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส ที่ $f = 50$ Hz, $M=0.8$ กรณีแหล่งจ่ายแบบสมดุลง



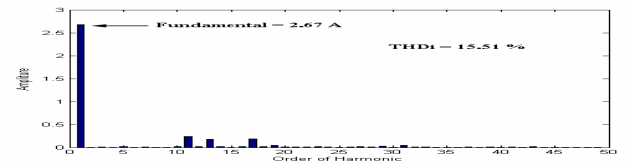
(ก) แรงดันเฟส, แรงดันและกระแสไลน์ทางด้านเอาต์พุต



(ข) สเปกตรัมแรงดันเฟสทางด้านเอาต์พุต



(ค) สเปกตรัมแรงดันไลน์ทางด้านเอาต์พุต



(ง) สเปกตรัมกระแสไลน์ทางด้านเอาต์พุต

รูปที่ 8 รูปคลื่นและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสเอาต์พุต กรณีแหล่งจ่ายแบบสมดุลง

5.สรุปผลการทดลอง

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นว่า ทั้งในกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่สมดุลง และกรณีของแหล่งจ่ายมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลงนั้น ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ มีลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกันมาก นั้นแสดงให้เห็นว่า ในการปรับปรุงรูปแบบการสวิทช์ใหม่ โดยใช้เทคนิคการหมุนพัลส์ (Pulse Rotation) ที่ทำให้ลักษณะแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์เหมือนกันในหนึ่งคาบเวลาการทำงาน โดยช่วงเวลาการทำงานในหนึ่งคาบจะยึดออกไปนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (% THD) ของรูปคลื่นแรงดันเฟส, แรงดันไลน์, และกระแสไลน์ และทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 1 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A กรณีแหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล

ดัชนีมือ ดูเลชั่น (M)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 40Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 50Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 70 Hz		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.6	4.44	15.7	20.1	5.7	16.6	22.7	6.8	23.1	31.8
0.8	20.3	25.8	40	13.9	19.2	25.9	14.48	18.36	25
1	35.1	52.7	66.6	26.3	51.1	63.4	16.6	28.1	31.1

ตารางที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์แต่ละเซลล์ในเฟส A กรณีแหล่งจ่ายแบบสมดุล

ดัชนีมือ ดูเลชั่น (M)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 40 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 50 Hz			ค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของ อินเวอร์เตอร์เอชบริดจ์ (Watt) ที่ 70 Hz		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.6	12	12.9	12.8	13.7	14.9	14.8	18.3	17.9	18.3
0.8	23.8	28.5	24.1	23	21.1	21.7	18.1	20.1	18.9
1	59	51.4	62.5	31.5	30.9	35.4	29.9	26.4	26.4

เอกสารอ้างอิง

[1] I. Takahashi A. Nabae and H. Akagi, "A new neutral-point clamped pwm inverter," IEEE Trans. Ind. Application, vol. IA-17, Sep-Oct. 1981, pp. 518-523

[2] S. Sirisukprasert, J.S. Lai and T.H. Liu, "Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converter," CPES. pp. 212-217.

[3] S. Sirisukprasert, J.S. Lai and T.H. Liu, "Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converter," IEEE Trans. On Ind. Electronics, vol. 49, No. 4, August 2002, pp. 875-881.

[4] Leon M. Tolbert, Fang Zheng Peng, Tim Cunnyingham and John N. Chiasson, "Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 49, no. 5, October 2002, pp. 1058-1064

[5] Leon M. Tolbert, Fang Zheng Peng, and Thomas G. Habetler, "Multilevel Converter for Large Electric Drives," IEEE Trans. On Ind. Applications, vol. 35, No.1, January/February 1999, pp. 36-44

[6] Leon M. Tolbert, John N. Chiasson, Zhong Du, Keith J. McKenzie, "Elimination of Harmonics in a Multilevel Converter With Nonequal DC Sources," IEEE Trans. On

Ind. Applications, vol. 41, No. 1, January/February 2005, pp. 75–82

[7] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, John N. Chiasson, “Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms,” IEEE Power Electronics Letters, vol. 3, No. 3, September 2005, pp. 92–95