บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18
18th Conference of Electrical Engineering Network 2026 (EENET 2026)

การควบคุมแหล่งจ่ายกระแสสลับชนิดหนึ่งเฟสโดยใช้วงจรแปลงหลายระดับแบบ NPC

A Single-Phase AC Current Control using Multi-Level N-Point Clamped Converter

สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์[1*] อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์[1] สายชล ชุดเจือจีน[1] ปณิธาน จักขุจันทร์ และ จิรพงษ์ จิตตะโคตร์[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ที่ 1 ถนน รังสิต - นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอธัญบุรี ปทุมธานี 12110
E-mail: suwat.ki@mail.rmutk.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมแหล่งจ่ายกระแสสลับชนิดหนึ่งเฟส โดยประยุกต์ใช้วงจรแปลงหลายระดับแบบ NPC (Neutral-Point-Clamped) เพื่อควบคุมระดับกระแสสลับในช่วง 0-3,000 แอมแปร์ โดยข้อดีของวงจรแปลงหลายระดับ ได้แก่ ค่าความเพี้ยนของสัญญาณต่ำ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าน้อย และกำลังสูญเสียในสวิตช์ต่ำงานวิจัยนี้จึงนำวงจรแปลงหลายระดับมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระแสสลับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยเลือกใช้โครงสร้างแบบ NPC ชนิด 3 ระดับ ซึ่งมีความซับซ้อนไม่สูง และนำมาต่อแบบวงจรเต็มบริดจ์ ทำให้สามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตได้ถึง 5 ระดับ การควบคุมกระแสแบบลูปปิดใช้ตัวควบคุม PI เพื่อรักษาค่ากระแสให้คงที่ และสามารถปรับความถี่ของสัญญาณกระแสได้ในช่วง 40-65 เฮิรตซ์

คำสำคัญ: แหล่งจ่ายกระแสสลับชนิดหนึ่งเฟส, วงจรแปลงหลายระดับ, การควบคุม PI

Abstract

This paper presents the control of a single-phase AC current source using a multilevel converter based on the Neutral-Point-Clamped (NPC) topology to regulate the AC current in the range of 0–3,000 A. The advantages of multilevel converters include low total harmonic distortion (THD), reduced electromagnetic interference (EMI), and lower switching losses. In this study, a three-level NPC topology is selected due to its relatively low complexity and is configured in a full-bridge structure, enabling the generation of a five-level output voltage. This configuration enhances the overall system performance. A closed-loop current control scheme is implemented using a proportional–integral (PI) controller to maintain a constant output current. The system also allows the operating frequency of the output current to be adjusted within the range of 40–65 Hz.

Keywords: ac current source, multi-level converter, PI controller

1. บทนำ

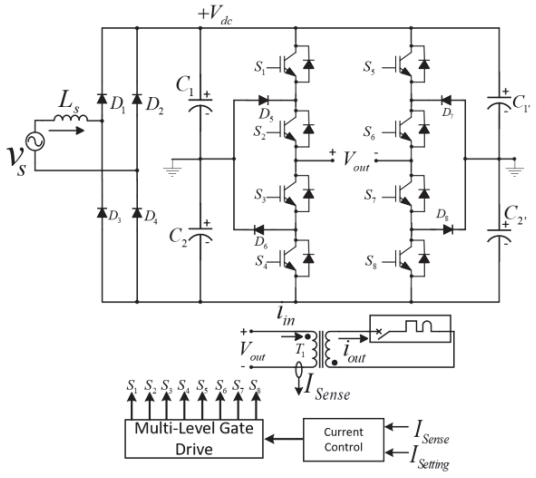
แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่ใช้เทคนิควงจรแปลงหลายระดับ (Multilevel Converter) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูง หลักการสำคัญคือการแบ่งระดับแรงดันออกเป็นหลายช่วงเพื่อนำมาสร้างแรงดันเอาต์พุต ส่งผลให้การทำงานของสวิตช์ประกอบด้วยทั้งช่วงความถี่สูงและความถี่ต่ำ ซึ่งช่วยลดค่าฮาร์โมนิก ลดความเพี้ยนของแรงดันเอาต์พุต (Low THD) และลดกำลังสูญเสียในอุปกรณ์สวิตช์ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของวงจรมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากต้องใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหลายชุด โครงสร้างของวงจรแปลงหลายระดับสามารถแบ่งได้เป็นหลายรูปแบบ เช่น NPC (Neutral-Point-Clamped) [1]–[3], FC (Flying-Capacitor) และ Cascaded Inverter โดยโครงสร้างแบบ NPC ใช้คาปาซิเตอร์แบ่งแรงดันร่วมกับไดโอดเพื่อรักษาสมดุลแรงดัน ขณะที่โครงสร้างแบบ FC มีวงจรเรียบง่ายกว่า แต่มีความซับซ้อนในการควบคุมสวิตช์ เนื่องจากต้องจัดการทั้งกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟ ทั้งสองโครงสร้างมีข้อจำกัดร่วมกันคือจำเป็นต้องใช้คาปาซิเตอร์ค่าความจุสูง นอกจากนี้ ค่า THD ของวงจรแปลงหลายระดับจะลดลงตามจำนวนระดับแรงดัน เช่น 2, 3 และ 5 ระดับ ซึ่งมีค่า THD อยู่ที่ประมาณ 5%, 3% และ 2% ตามลำดับ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วงจรแปลงหลายระดับแบบ 5 ระดับ ซึ่งมีค่า THD ต่ำและมีโครงสร้างสวิตช์ไม่ซับซ้อนเกินไป เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแหล่งจ่ายกระแสขนาด 3,000 แอมแปร์ สำหรับงานทดสอบกระแสสูง เช่น การทดสอบวัฏจักรความร้อน และการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์

2. ระบบที่นำเสนอ

2.1 ผังโครงสร้างวงจรที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างแบบ NPC โดยใช้แรงดันกระแสตรงที่แบ่งด้วยคาปาซิเตอร์เป็นสองระดับ เพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุต 3 ระดับ โดยมีระดับกึ่งกลางที่ 0 โวลต์ และใช้สวิตช์ 4 ตัว จากนั้นนำมาต่อแบบเต็มบริดจ์ (2 กิ่ง) เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตเป็น 5 ระดับ ทำให้สามารถสร้างสัญญาณได้ครบทั้งพัลส์บวกและลบที่ขนาดเต็มพิกัดของ

แรงดันเอาต์พุตดังกล่าวถูกนำไปขับหม้อแปลงกำลังทางด้านขดปฐมภูมิ เพื่อสร้างแรงดันกระแสสลับที่ขดทุติยภูมิ โดยควบคุมขนาดและรักษาระดับแรงดันให้คงที่ด้วยระบบควบคุมแบบลูปปิดดังรูปที่ 1 แสดงวงจรแปลงหลายระดับ NPC แบบ 3 ระดับ ที่ต่อวงจรแบบเต็มบริดจ์ 2 กิ่ง ทำให้การทำงานรองรับระดับการแปลงได้ถึง 5 ระดับ ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์จำนวน 8 ตัว คือสวิตช์ $S_1 - S_8$ โดยมีแหล่งจ่ายไฟตรง $+V_{dc}$ ที่ผ่านวงจรเรียงกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสสลับ V_s ผ่านไดโอด D_1, D_2 และ D_3, D_4 โดยมีการแบ่งแรงดันที่คู่ C_1, C_2 และ $C_{1'}$, $C_{2'}$ ตามลำดับ ส่วนชุดไดโอด D_5, D_6 และ D_7, D_8 ทำหน้าที่สร้างแรงดันตำแหน่งระดับกราวด์ให้กับสัญญาณแรงดันทางเอาต์พุต



รูปที่ 1 ผังโครงสร้างวงจรควบคุมกระแสสลับที่นำเสนอ

ตารางที่ 1 สถานะการทำงานควบคุมสวิตช์กำหนดระดับแรงดัน

S1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
S2	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
S3	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
S4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
S5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
S6	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
S7	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	ON
S8	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
Vout	+V/2	+V	+V/2	GND	-V/2	-V	-V/2
Voltage	Vc1-Gnd	Vc1-(-Vc2)	Gnd-(-Vc2)	Gnd-Gnd	(-Vc2)-Gnd	(-Vc2)-Vc1	Gnd-Vc1

2.2 หลักการทำงานภาคแปลงแรงดันหลายระดับ

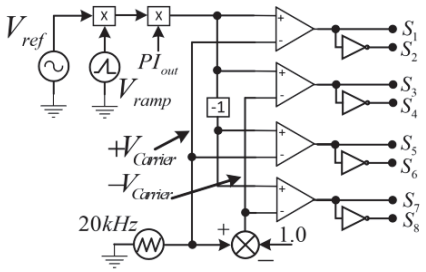
จากตารางที่ 1 แสดงสถานะของการควบคุมสวิตช์เพื่อกำเนิดแรงดันทางเอาต์พุตแบบหลายระดับ โดยในแต่ละกิ่งของชุดสวิตช์ที่มีจำนวน 4 สวิตช์ จะสามารถควบคุมให้เกิดระดับแรงดันได้ 3 ระดับ แต่เนื่องจากมีการต่อชุดสวิตช์ 2 กิ่ง แบบวงจรเต็มบริดจ์ ทำให้การควบคุมระดับแรงดันทำได้ที่ 5 ระดับ ได้แก่ $+V/2$, $+V$, GND, $-V/2$ และ $-V$ ซึ่งระดับแรงดันที่ได้มาจากการควบคุมการนำกระแสของสวิตช์เพื่อจ่ายแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง DC Link ที่ตัวเก็บประจุ ได้แก่ $V_{C1}-(-V_{C2})$, $V_{C1}-GND$, $GND-GND$, $(-V_{C2})-GND$ และ $(-V_{C2})-V_{C1}$ ตามลำดับ กำหนดเป็นสมการได้ว่า

$$V_o = \begin{cases} +Vdc & \rightarrow V_{C1}-(-V_{C2}) \\ +Vdc/2 & \rightarrow V_{C1}-Gnd \\ 0 & \rightarrow Gnd-Gnd \\ -Vdc/2 & \rightarrow (-V_{C2})-Gnd \\ -Vdc & \rightarrow (-V_{C2})-V_{C1} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ $S_i \in \{0,1\}$ จะได้สมการทั่วไปของวงจรแปลงหลายระดับที่นำเสนอแบบ 5 ซึ่งมีโครงสร้างระดับแรงดันของแต่ละกิ่งที่ 3 ระดับ ต่อแบบเต็มบริดจ์ จะได้ระดับแรงดันที่สามารถสร้างได้ที่ $2N-1=3(2)-1=5$ ระดับ แสดงเป็นสมการของแรงดันได้ว่า

$$Vo^{+} = \frac{Vdc}{2}(S_1+S_2) - \frac{Vdc}{2}(S_7+S_8) \quad (2)$$

$$Vo^{-} = -\frac{Vdc}{2}(S_5+S_6) - \frac{Vdc}{2}(S_3+S_4) \quad (3)$$



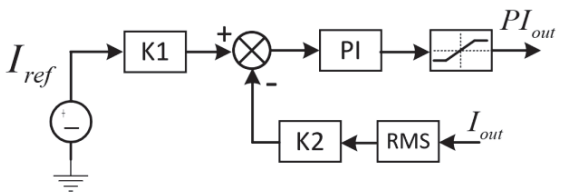
รูปที่ 2 ภาคกำเนิดสัญญาณขับเกตของวงจรแปลงหลายระดับ

ทั้งนี้การควบคุมสวิตช์ทั้ง 8 ตัว จะใช้สัญญาณขับเกตที่ได้จากส่วนควบคุมสร้างสัญญาณพัลส์ PWM โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิง V_{ref} กับสัญญาณพาหะ $+V_{Carrier}$ และ $-V_{Carrier}$ โดยชุดสวิตช์ของกิ่งแรก S_1, S_3 จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณ V_{ref} และ $+V_{Carrier}$ ซึ่ง $S_3 = \overline{S_1}$ ส่วนชุดสวิตช์ S_2, S_4 จะได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณ V_{ref} และ $-V_{Carrier}$ โดย $S_4 = \overline{S_3}$ ชุดสวิตช์ในกิ่งที่สอง ก็จะมีการสร้างในแบบเดียวกันจากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะ โดย S_5, S_7 เปรียบเทียบจาก $-V_{ref}$ และ $+V_{Carrier}$ โดย $S_7 = \overline{S_5}$ และชุดสวิตช์ S_6, S_8 ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณ $-V_{ref}$ และ $-V_{Carrier}$ ตามลำดับ โดยการสร้างสัญญาณขับเกตของวงจรแปลงหลายระดับแบบ 3 ระดับ 2 กิ่ง แสดงดังรูปที่ 2

2.3 การควบคุมค่ากระแสสลับ

ในการควบคุมค่ากระแสสลับทางเอาต์พุตขนาด 0-3,000 แอมแปร์ จะอาศัยหม้อแปลงกำลังที่มีอัตราส่วนรอบขดลวดของขดปฐมภูมิต่อขดทุติยภูมิอยู่ที่ 380/4 หรือประมาณ 95 ซึ่งค่านี้คือค่าสำหรับกำหนด

เกนขยายสัญญาณกระแสสลับทางเอาต์พุตที่ขดทุติยภูมิ โดยการควบคุมค่ากระแสให้คงที่สามารถควบคุมค่ากระแสสลับจากทางด้านขดปฐมภูมิได้ โดยใช้ค่าอัตราขยายตามอัตราส่วนรอบขดลวด ซึ่งการป้อนกลับสัญญาณเพื่อควบคุมค่ากระแสสลับจะใช้การป้อนกลับค่ากระแสของขดปฐมภูมิ โดยจากรูปที่ 1 ได้แสดงการใช้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงหลายระดับมาต่อเข้าขดปฐมภูมิโดยตรง ซึ่งไม่ผ่านวงจรกรอง เนื่องจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงมีคุณสมบัติเป็นวงจรความถี่ต่ำผ่าน ดังนั้นจึงสามารถต่อตรงโดยไม่ผ่านวงจรกรองได้ โดยการควบคุมค่ากระแสให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3 จะใช้การป้อนกลับสัญญาณกระแสขดปฐมภูมิมาแปลงสัญญาณเป็นค่าประสิทธิผลแล้วปรับค่าเกนที่ K_2 (เกนลดทอนสัญญาณป้อนกลับค่า $28.571m$) เพื่อมาเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสสลับอ้างอิง I_{ref} ที่ผ่านตัวปรับค่าเกน K_1 (เกนลดทอนสัญญาณอ้างอิงค่า $28.571m$) แบบค่าประสิทธิผลเช่นเดียวกัน จากนั้นได้สัญญาณความคลาดเคลื่อน *error* ส่งเข้าตัวควบคุม PI เพื่อคำนวณควบคุมซึ่งมีย่านขีดจำกัดไม่เกิน 1.0 ได้สัญญาณควบคุม PI_{out} เพื่อส่งไปควบคุมค่าเกนขยายของ V_{ref} ที่แสดงในรูปที่ 2 โดยค่า I_{ref} แบบค่าประสิทธิผล rms และคำนวณค่าแบบเชิงหน่วย Per-Unit ทั้งกระแสอ้างอิงและค่ากระแสสลับป้อนกลับ



รูปที่ 3 ภาคการควบคุมค่ากระแสสลับโดยตัวควบคุม PI

2.4 การวิเคราะห์ระบบ

การวิเคราะห์ของระบบที่นำเสนอจะเริ่มจากการกำหนดวงจรสมมูลของหม้อแปลงกำลัง ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กำหนดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงกำลัง

Parameters	Value
Phase	Single phase
Frequency	50 Hz
Maximum KVA	12 KVA
Vpri/Vsec	380/4 V(rms)
Ipri/Isec	31.578/3,000 A(rms)
Turn ratio	95
Magnetizing Inductance	10mH

โดยจากตารางค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง สามารถวิเคราะห์ค่าวงจรสมมูลของหม้อแปลงคือ $R_{L\max} = 4/3000 = 1.33m\Omega$ ค่าโหลดสะท้อนกลับฝั่งปฐมภูมิ $Z'_L = a^2 R_L = 95^2(1.33m\Omega) = 12.0\Omega$ โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{series} = 0.192 + j0.289$ จะได้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของโหลดคือ $Z_{load} = 12.192 + j0.289$ และ $Z_m = j3.14$ โดยค่าอิมพีแดนซ์รวมของหม้อแปลงคือ $Z_{tr} = Z_m // Z_{load}$ ดังนั้น จะได้ว่า $Z = 0.73 + j2.52\,\Omega$ ซึ่งขนาดของอิมพีแดนซ์คือ $|z| = \sqrt{0.73^2 + 2.52^2} = 2.62\Omega$ ค่ากระแสทางปฐมภูมิสูงสุดอยู่ที่ 31.6 แอมแปร์ จะได้ค่า $V_{primary} = 10.96V$

โดยค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กของวงจรสมมูลของหม้อแปลงมีค่า $10mH$ สามารถวิเคราะห์หาค่าความถี่ต่ำผ่านได้จากสมการดังนี้

$$f_c = \frac{R_{eff}}{(2\pi L_m)} = \frac{12.192}{2\pi(0.01)} = 194Hz \quad (4)$$

ดังนั้น ด้วยค่าความถี่ต่ำผ่านที่คำนวณได้ จึงทำให้สามารถนำหม้อแปลงต่อเข้ากับภาคเอาต์พุตของวงจรแปลงหลายระดับได้โดยตรง ไม่ต้องต่อวงจรกรองเพิ่มเติม

จากค่ากระแสสูงสุดทางขดปฐมภูมิที่ 50 แอมแปร์ เพื่อกำหนดค่าต่าง ๆ ที่ต้องคำนวณของวงจรแปลงหลายระดับจะได้ว่า ค่าแรงดัน $V_{rms\max} = I|z| = 50(2.62) = 131V_{rms}$ และสำหรับวงจรแปลง 3 ระดับ NPC จะได้ค่าดัชนีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ได้ว่า $V_{phase,peak} = mVdc/2 = 185\cdot 2/(220\sqrt{2}) = 0.60$ ซึ่งค่ากระแสกระเพื่อมจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ คือ $\Delta I = Vdc/(4Lf_s)$ แทนค่าต่าง ๆ จะได้ว่า $\Delta I = 622/(4\cdot 0.008\cdot 20k) = 0.97A$

ทั้งนี้จากวงจรสมมูลของหม้อแปลงที่นำมาต่อเป็นโหลดของวงจรแปลง สามารถวิเคราะห์ได้ว่า $G_{(s)} = I_{(s)}/V_{(s)} = 1/(L_s + R)$ ซึ่งก็คือ $G_{(s)} = 1/(0.008s + 0.73)$ โดยมีค่าคงที่เวลาจะได้ $\tau = L/R$ คือ $0.008/0.73 = 10.96mS$ ส่วนค่าแบนด์วิดท์ของด้านโหลดที่ได้คือ $f_{plant} = 1/(2\pi\tau) = 14.5Hz$ ทั้งนี้ค่าแบนด์วิดท์ของการควบคุมกระแสโดยปกติคือ $f_c = f_{sw}/10$ ดังนั้นจะได้ค่า f_c คือ $2kHz$

สำหรับการวิเคราะห์ค่าเกนของตัวควบคุม PI จะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้โดยสมการผลตอบสนองทั่วไปของ PI คือ

$$G_{(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

โดยค่า $K_p = L\omega_c$ และ $K_i = R\omega_c$ โดยกำหนดค่าแบนด์วิดท์ของตัวควบคุมให้มีค่าความถี่เดียวกับค่าความถี่ของสัญญาณทางเอาต์พุต คือ $50Hz$ เพื่อไม่ให้ตัวควบคุมปรับค่าที่เร็วเกินไป ดังนั้น $\omega_c = 2\pi f_c = 314$ จะสามารถหาค่า K_p ได้ว่า $K_p = 0.008(314) = 2.51$ และค่า K_i จะได้ว่า $K_i = 0.73(314) = 229$ ซึ่งจะได้ค่าเวลา T_i อยู่ที่ $4.366mS$ ซึ่งหากใช้การควบคุมแบบดิจิทัลที่มีความถี่สวิตชิ่งที่ $20kHz$ ซึ่งมีค่า $T_s = 50uS$ จะได้ค่าการคำนวณตัวควบคุม PI แบบไม่ต่อเนื่องคือ

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e_k - e_{k-1}) + K_i T_s e_k \quad (6)$$

โดย $K_i T_s = 229\times 50u = 11.45m$ และ T_i คือ $4.366mS$ จะได้ว่า

$$u(k) = u(k-1) + 4.366m(e_k - e_{k-1}) + 11.45me_k \quad (7)$$

3. ผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

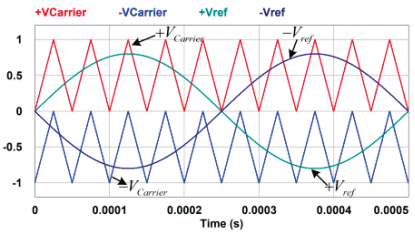
จากระบบที่นำเสนอในรูปที่ 1 หลักการของการควบคุมค่ากระแสสลับตามหัวข้อ 2.3 และการวิเคราะห์ระบบในหัวข้อ 2.4 สามารถกำหนดเป็นคุณสมบัติต่างๆของระบบที่นำเสนอได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ระบบที่นำเสนอ

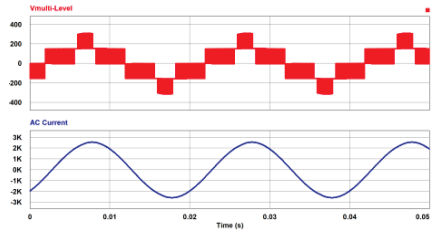
Parameters	Value
Vdc	311.128 V
N-level	5
Voltage Output rms	0-200 Vrms
Max AC Current (Pri.)	50A rms
Switching Freq.	20kHz
Kp	2.51
1/Ki	4.366mS
Max AC Output Current (Sec.)	0.0-3,000.0 Arms
C1,C2	1,000uF/400V

โดยหลักการสร้างสัญญาณขับเกตจากการเปรียบเทียบสัญญาณของการควบคุม $+V_{ref}, -V_{ref}, +V_{Carrier}, -V_{Carrier}$ เพื่อกำเนิดสัญญาณขับเกต $S_1 - S_8$ แสดงดังรูปที่ 4 โดยความถี่ของสัญญาณพาหะอยู่ที่ $20kHz$ ในรูปที่ 5 เป็นการควบคุมค่ากระแสสลับทางขดทุติยภูมิที่ 1,800 แอมแปร์ โดยใช้ค่าโหลด $100u\Omega$ โดยหลักการควบคุมค่ากระแสที่นำเสนอ จะใช้การป้อนกลับที่ขดปฐมภูมิซึ่งมีอัตราส่วนอยู่ที่ 95 โดยค่ากระแสขณะทำการวัดค่าของทางขดทุติยภูมิได้ค่ากระแสที่ 1,799.86 แอมแปร์ และทางขดปฐมภูมิได้ค่า 18.95 ได้ค่าอัตราส่วนคือ 94.98 ซึ่งการควบคุมให้ได้ค่าที่แม่นยำต้องกำหนดค่าอัตราส่วนนี้ในการคำนวณ โดยรูปคลื่นกระแสที่ได้มีค่า THD_i ที่ 0.06 ซึ่งต่ำกว่าค่า THD_i ของวงจรแบบ 2 ระดับที่ค่า 0.85

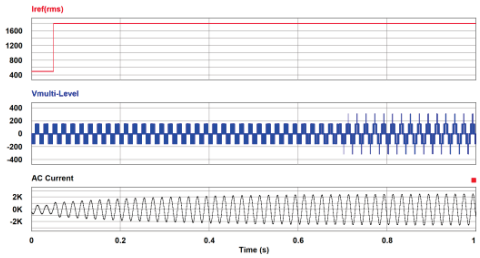
เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบควบคุม งานวิจัยนี้ได้พิจารณาพฤติกรรมของระบบทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว โดยทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วครู่ (Transient Response) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือสัญญาณอ้างอิงอย่างฉับพลัน ซึ่งพิจารณาผ่านพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ค่าการเกิน (Overshoot) ไม่เกิน 1.0% และเวลาในการตอบสนองเริ่มต้น (Rise Time) ที่ 350 มิลลิวินาที และระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) ที่ 500 มิลลิวินาที แสดงดังรูปที่ 6 เป็นการแสดงการควบคุมค่ากระแสสลับแบบขั้นจาก 500 แอมแปร์ เป็น 1,800 แอมแปร์ ที่มีระยะเวลาการไต่ระดับที่ประมาณ 500 มิลลิวินาที



รูปที่ 4 ส่วนการเปรียบเทียบสัญญาณพาหะกับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 5 รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันวงจรแปลงหลายระดับและการควบคุมค่าสัญญาณกระแสสลับด้านทุติภูมิที่ 1,800 แอมแปร์



รูปที่ 6 การควบคุมค่ากระแสสลับแบบขั้นที่ 500 เป็น 1,800 แอมแปร์

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวงจรแปลงหลายระดับที่ประยุกต์ใช้เพื่อขับกระแสสลับทางเอาต์พุตที่พิกัดสูงสุด 3,000 แอมแปร์ โดยมีระดับแรงดันที่สร้างได้ 5 ระดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสร้างแหล่งจ่ายกระแสสลับแบบเดิมที่ใช้ 2 ระดับแรงดัน จากผลจำลองได้ค่า THD_i ที่ 0.06 ที่การขับกระแส 1,800 แอมแปร์ แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้ การควบคุมแบบลูปปิดก็สามารถควบคุมค่ากระแสสลับให้คงที่ได้จากการทดสอบที่ค่าโหลด $100u\Omega$ โดยขั้นต่อไปของงานวิจัยจะสร้างฮาร์ดแวร์จริงโดยใช้การควบคุมทางดิจิทัลเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] H. Rehman, S. Islam, K. Higashikawa, A. Iqbal, L. Ben Brahim, and S. M. Muyeen,"A Novel Multilevel Inverter and its Study in PV System for Power Fluctuation Compensation Using DC Superconducting Cable," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 13, no. 5, pp. 5554–5562, Oct. 2025.

[2] Y. Sravan Kumar, T. Murali Krishna, and G. Yesuratnam, "Single-phase five level modified neutral point clamped grid connected inverter topology with front-end chopper control of DC-link capacitor voltages," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 15, no. 4, pp. 2287–2295, Dec. 2024. doi: 10.11591/ijpeds.v15.i4.pp2287-2295.