

การออกแบบและควบคุมวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลีฟบูสคอนเวอร์เตอร์ สำหรับอัดประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า

Design and Control of Interleaved PFC Boost Converter for Electric Vehicle Charger

ณัฐดนัย ไตรสุธา¹ และ มณฑล นาวงษ์^{2*}

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ¹natdanai_tr@mail.mutt.ac.th

²monthon.n@en.mutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและควบคุมวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลีฟบูสคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้สำหรับอัดประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 3.7 kW แรงดันไฟฟ้าด้านออก 400V แบบเฟสเดียวที่มีการควบคุมการทำงานของวงจรอินเตอร์ลีฟบูสคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าตัวประกอบกำลังทางด้านเข้ามีค่าเข้าใกล้ 1 และวงจรสามารถลดการกระชากกระแสไฟฟ้าด้านเข้าด้วย ผลการทดสอบการจำลองการทำงานของวงจร กระแสไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าเป็นไซน์และมีค่า PF ใกล้เคียง 1 และเมื่อทดสอบเปลี่ยนโหลดจาก 100% เป็นโหลด 50% ผลการทดสอบพบว่าวงจรยังสามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ดี และนำเสนอวงจรการลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า (Inrush Current) ที่ทางด้านเข้าแบบใช้ NTC และแบบใช้ SCR ซึ่งสามารถลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้าที่ทางด้านเข้าได้มากกว่า 50% ของวงจรแบบเดิม

คำสำคัญ: วงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลีฟบูสคอนเวอร์เตอร์ การอัดประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า วงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

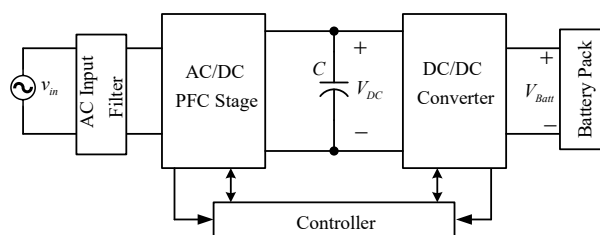
Abstract

This paper presents the design and control of a bridgeless interleaved boost converter for electric vehicle charging applications. The proposed converter is rated at 3.7 kW with a single-phase output voltage of 400 V. The control strategy is implemented to achieve a near-unity input power factor while minimizing input current ripple. Simulation results demonstrate that the input current waveform is sinusoidal with a power factor approaching unity. Furthermore, when the load is varied from 100% to 50%, the output voltage remains well regulated. Additionally, inrush current mitigation techniques employing both an NTC thermistor and an SCR-based approach are presented. The proposed methods achieve more than a 50% reduction in inrush current compared with conventional designs.

Keywords: Interleaved PFC Boost Converter, Electric Vehicle Charger, Power Factor Correction (PFC)

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมายานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาครัฐ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล อย่างไรก็ตาม การเติบโตของการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นต้องมีโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบอัดประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Charger) ที่มีประสิทธิภาพ เชื่อถือได้ และมีคุณภาพพลังงานไฟฟ้าที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับการอัดประจุในยานยนต์ไฟฟ้าตามรูปที่ 1 ประกอบด้วยวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction (PFC)) [1] ซึ่งมีหน้าที่ลดฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าด้านขาเข้าและปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้เป็นไปตามข้อกำหนด เช่น มาตรฐาน IEC 61000-3-2 โครงสร้างวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลีฟบูสคอนเวอร์เตอร์ (Interleaved PFC Boost Converter) [2] ได้รับความสนใจและเป็นอีกหนึ่งวงจรจากวงจรเอชทูตีซีคอนเวอร์เตอร์สำหรับการอัดประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า โดยเป็นวงจรอัดประจุไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าระดับปานกลางถึงสูง เนื่องจากสามารถลดการกระชากกระแสไฟฟ้าด้านเข้า เพื่อช่วยลดความร้อนสะสมในอุปกรณ์สวิตช์ และเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดยรวมของระบบ



รูปที่ 1 การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับการอัดประจุในยานยนต์ไฟฟ้า

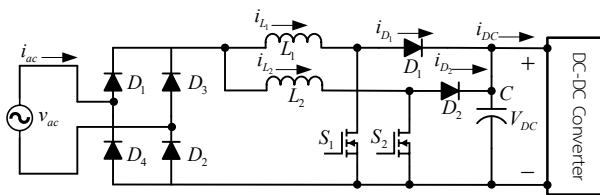
การควบคุมของวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลีฟบูสคอนเวอร์เตอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าด้านออก และการตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาถึงสภาวะการทำงานที่หลากหลายในการ

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

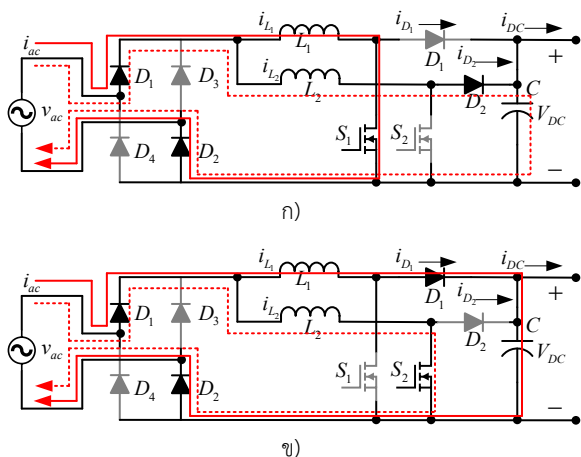
ใช้งานจริง เช่น การอัดประจุไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่มีแรงดันไฟฟ้าผันผวน หรือการทำงานร่วมกับระบบพลังงานทดแทน ดังนั้นบทความนำเสนอการออกแบบและควบคุมวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลิฟัสคอนเวอร์เตอร์พิกัดกำลังไฟฟ้า 3.7kW แบบเฟสเดียวที่มีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังทางด้านการเข้าให้มีค่าเข้าใกล้ 1 และวงจรการลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า (Inrush Current) [3] ที่ทางด้านเข้า โดยมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านการออก 400V สำหรับใช้งานกับระบบอัดประจุไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า

2. การออกแบบวงจรเอชทูซีคอนเวอร์เตอร์

วงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลิฟัสคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifiers) และวงจร PFC Boost Converter (Power Factor Correction Boost Converter) ซึ่งเป็นวงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) ที่ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านการออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านการเข้า โดยปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังทางด้านการเข้าให้มีค่าเข้าใกล้ 1 มีวงจรการทำงานดังรูปที่ 2

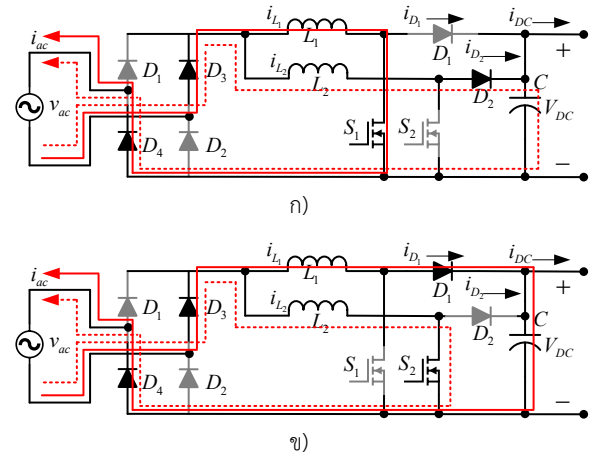


รูปที่ 2 วงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลิฟัสคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 การทำงานของวงจรครึ่งไซเคิลบวก ก) เมื่อสวิตช์ S_1 ปิด S_2 เปิด ข) เมื่อสวิตช์ S_1 เปิด S_2 ปิด

การทำงานวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเตอร์ลิฟัสคอนเวอร์เตอร์มีการทำงานโดยแบ่งออกเป็นการทำงานในครึ่งไซเคิลบวกตามรูปที่ 3 และการทำงานครึ่งไซเคิลลบตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทำงานของวงจรครึ่งไซเคิลลบ ก) เมื่อสวิตช์ S_1 ปิด S_2 เปิด ข) เมื่อสวิตช์ S_1 เปิด S_2 ปิด

2.1 ออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า

การออกแบบวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านการเข้าที่ความถี่ $f = 50\text{Hz}$ มีค่าดังนี้

$$V_{in} = V_{\max} \sin(\omega t) = \sqrt{2} \times 230 \sin(\omega t) \quad (1)$$

กระแสไฟฟ้าทางด้านการเข้าที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 3.7 kW ดังนี้

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in} \cos \phi} = \frac{3700\text{W}}{230 \times 1} = 16\text{A} \quad (2)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าทางด้านการเข้าสูงสุดคือ

$$I_{in,\max} = \sqrt{2} I_{in} = \sqrt{2} \times 16 = 22.6\text{A} \quad (3)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} V_{in}^2 \cos^2 \theta d\theta} \\ &= V_{in} \sqrt{-\frac{1}{2} (230) \sqrt{-\frac{1}{2}}} \\ &= -162.6\text{V} \end{aligned} \quad (4)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดสูงสุด

$$V_{D,\max} = V_{in} \sqrt{2} = (230) \sqrt{2} = -325.3\text{V} \quad (5)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด

$$I_{D,rms} = I_{in} \sqrt{\frac{1}{2}} = (16\text{A}) \sqrt{\frac{1}{2}} = 11.3\text{A} \quad (6)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดสูงสุด

$$I_{D,\max} = I_{in} \sqrt{2} = (16\text{A}) \sqrt{2} = 22.6\text{A} \quad (7)$$

2.2 ออกแบบวงจรสุคอนเวอเตอร์

วงจรสุคอนเวอเตอร์มีการกำหนดแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกเพื่อหาค่าตัวใช้เคิล (D_{max})

$$D_{max} = \frac{V_{DC} - \sqrt{2}V_{in,min}}{V_{DC}} = \frac{400 - \sqrt{2}(200)}{400} = 0.3 \quad (8)$$

ค่าระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \frac{P_o}{V_{DC}} \times 20\% = \frac{3700}{400} \times 0.2 = 1.85A \quad (9)$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้งาน

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{DC} * D}{f_s \Delta I_L} = \frac{400 * 0.3}{4000 * 1.85} = 1.62mH \quad (10)$$

ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ

$\Delta V_{DC} = 1\%$ ดังนั้น

$$\Delta V_C = \frac{1 * 400}{100} = 4V \quad (11)$$

ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้งาน

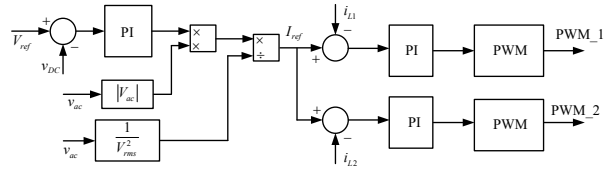
$$C \geq \frac{P_o}{4\pi f (V_{DC}) \Delta V_C} \geq 3,680\mu F \quad (13)$$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเวอร์ตีสฟคอนเวอเตอร์

ค่าพารามิเตอร์	พิกัด
แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า	$V_{in} = 230V, 50Hz$
แรงดันไฟฟ้าด้านออก	$V_{DC} = 400V$
กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	$P_{in} = 3,700W$
ค่าระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ	$\Delta I_L = 20\%$
ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ	$\Delta V_{DC} = 1\%$
ความถี่ที่ใช้ของวงจร	$f_s = 40kHz$
ค่าตัวเหนี่ยวนำ	$L_1 = L_2 = 1.62mH$
ค่าตัวเก็บประจุ	$C = 3680\mu F$

3. การออกแบบการควบคุมของวงจร

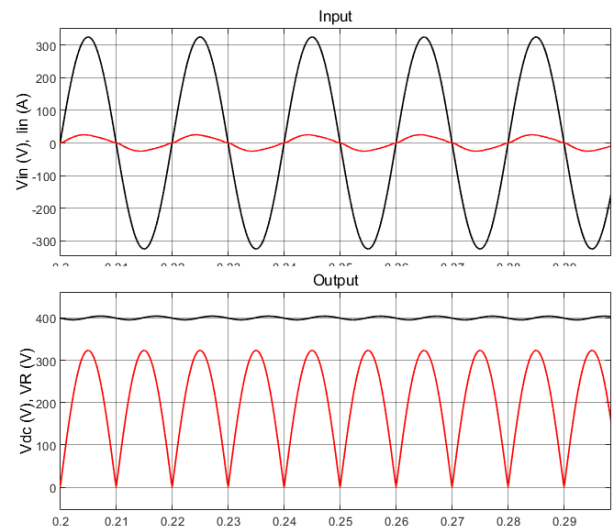
การควบคุมการทำงานของวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเวอร์ตีสฟคอนเวอเตอร์ เป็นการควบคุมแบบสองวงรอบ วงรอบแรกเป็นการควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Control Loop) และวงรอบที่สองเป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Control Loop) ตามรูปที่ 5 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรตามตารางที่ 1 วงรอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง โดยใช้การควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) วงรอบการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นการใช้กระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (I_{ref}) และใช้การควบคุมแบบพีไอเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่มีเฟสต่างกัน 180° สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์



รูปที่ 5 ไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของวงจร

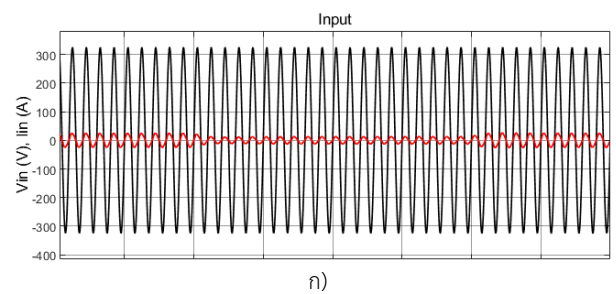
4. ผลการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเวอร์ตีสฟคอนเวอเตอร์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าขนาด 3.7 kW แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทางด้านออกมีค่า 400V พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าที่ทางด้านเข้าตามรูปที่ 6 มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียง 1

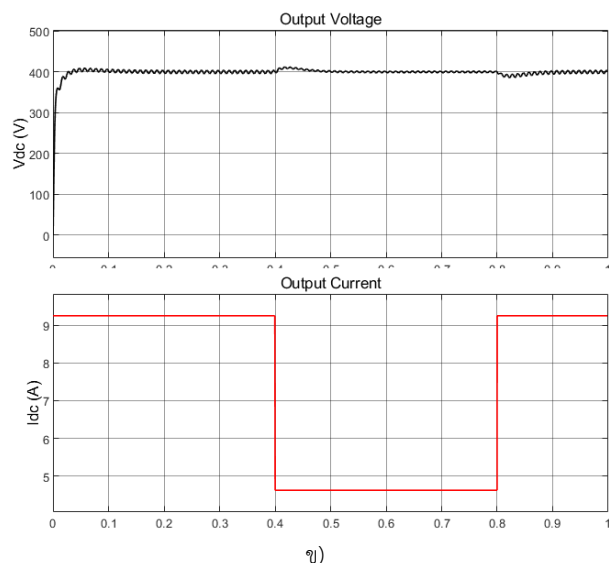


รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (V_{in}) และกระแสไฟฟ้าด้านเข้า (I_{in}) และแรงดันไฟฟ้า (V_o) และแรงดันไฟฟ้าด้านออก (V_{DC})

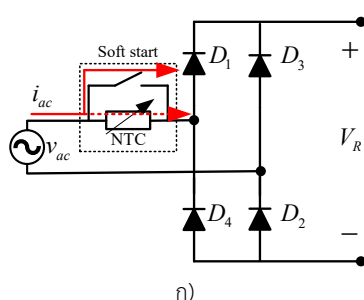
เมื่อมีการทดสอบวงจรการทำงานโดยการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าด้านออก (I_{DC}) จาก 9.25A เป็น 4.625A ที่เวลา 0.4s และจาก 4.625A เป็น 9.25A ที่เวลา 0.8s ผลการทดลองเป็นว่าวงจรยังคงรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านออกได้ดังรูปที่ 7



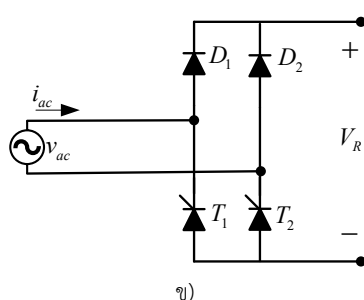
ก)



รูปที่ 7 ก) แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (V_m) และกระแสไฟฟ้าด้านเข้า (I_{in}) ข) แรงดันไฟฟ้า (V_o) และแรงดันไฟฟ้าด้านออก (V_{DC}) เมื่อมีการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าด้านออก (I_{DC})



ก)

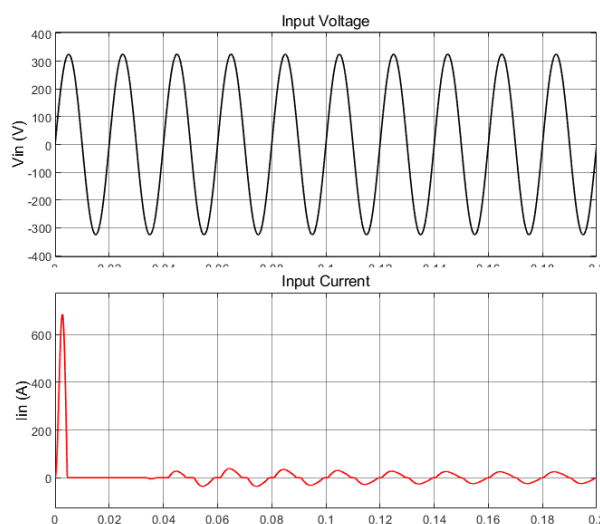


ข)

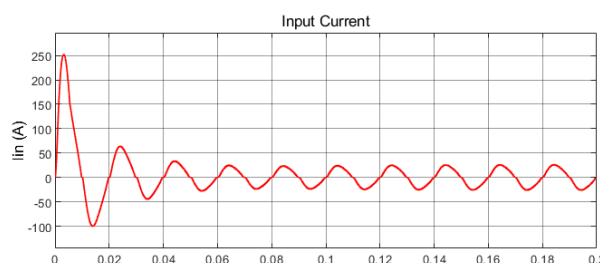
รูปที่ 8 วงจรการทำงานเพื่อลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า ก) แบบใช้ NTC และสวิตช์ ข) แบบใช้ SCR

การทดสอบการลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า (Inrush Current) เป็นการลดขนาดของกระแสไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นของการทำงานโดยการเพิ่มตัว NTC ให้ทำงานในช่วงแรกเพื่อลดกระแสไฟฟ้าด้านเข้าและสวิตช์ในช่วงเวลาการทำงานปกติเพื่อลดความสูญเสีย การทำงานของวงจรตามรูปที่ 8 ก) การทำงานในรูปที่ 9 เมื่อไม่มีการต่อวงจรเพื่อลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า เห็นได้ว่า

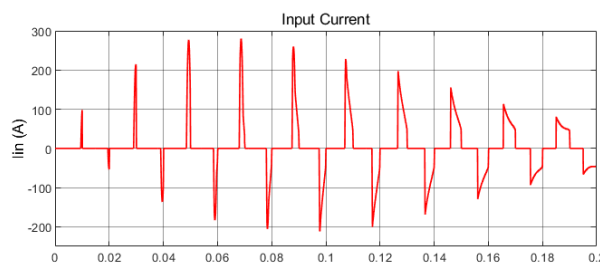
กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นสูงสุดที่ 700A และเมื่อมีการต่อวงจรเพื่อลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้าแบบใช้ NTC และสวิตช์ตามรูปที่ 10 ซึ่งสามารถลดกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นสูงสุดเป็น 250A และวงจรการทำงานเพื่อลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้าแบบใช้ SCR ตามรูปที่ 8 ข) โดยมีหลักการทำงานเป็นการควบคุมมุมการทำงานของ SCR เพื่อให้กระแสไฟฟ้าตามมุมที่กำหนด ส่งผลให้ลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้าได้ตามรูปที่ 11 เมื่อเทียบกับวงจรที่ไม่มีการต่อวงจรเพื่อลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า



รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าเมื่อไม่มีการต่อวงจรลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้า



รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าเมื่อมีการต่อวงจรลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้าแบบใช้ NTC และสวิตช์



รูปที่ 11 กระแสไฟฟ้าด้านเข้าเมื่อมีการต่อวงจรลดกระแสไฟฟ้าพุ่งเข้าแบบใช้ SCR

5. สรุป

การออกแบบวงจรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบบริดจ์อินเวอร์สลิฟตคอนเวอร์เตอร์สำหรับอัดประจุในยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากมีคุณสมบัติด้านประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการควบคุมที่ดี อย่างไรก็ตามมีประเด็นและหัวข้อที่พัฒนาต่อเพิ่มเติม เช่น การนำเสนอวงจรที่ลดการใช้งานของอุปกรณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นประเด็นที่งานวิจัยนี้มุ่งเน้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Bao, L. Fan and Z. Miao, "Modeling and Analysis of Single-phase Boost Converter with Power Factor Correction Control," *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*, Tempe, AZ, USA, 2021, pp. 1-6.
- [2] D. S. Gautam, F. Musavi, M. Edington, W. Eberle and W. G. Dunford, "An Automotive Onboard 3.3-kW Battery Charger for PHEV Application," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 8, pp. 3466-3474, Oct. 2012.
- [3] Cédric Reymond , " An Active Inrush Current Limiter Based on SCR Phase Shift Control for EV Charging Systems," *Journal of Energy and Power Engineering* 10 (2016), pp. 247-257, April. 2016.