

การออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจร เลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

The design of Power Factor Correction (PFC) Boost Converter Circuit and Phase-shift Full-bridge Inverter Circuit for Electric Vehicle Battery Charger

Chanthy Phok^{1*} จารุวัฒน์ มณีรัตนนาพร (Jaruwat Manerutanaporn)** ณัฐพงษ์ แก่นมาลี (Nattapong Keanmalee)***

ไพบรียา เฉยไสย (Pairaya Choeisai)**** กฤษ เฉยไสย (Krit Choeisai)*****

(Received: November 21, 2017; Revised: April 2, 2018; Accepted: April 7, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า วงจรที่นำเสนอใช้กับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบหนึ่งเฟสโดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยสองวงจรหลักคือ วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ทั้งสองวงจรมีการศึกษาการออกแบบโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมเมทแลปรวมทั้งทำการทดลองจริงที่กำลังไฟฟ้า 3.2 kW จากผลการจำลองและการทดลองแสดงให้เห็นว่า วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าขาเข้าให้เป็นคลื่นไซน์และอินเฟสกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าได้โดยใช้สวิทช์ซึ่งความถี่ 100 kHz ส่วนวงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์นั้นถูกควบคุมโดยการเลื่อนเฟสของสัญญาณเกตที่มีความถี่ 30 kHz และสามารถควบคุมแรงดันกระแสตรงขาออกได้ 0 – 380V โดยมีกระแส 9A

ABSTRACT

This paper proposes the design of power factor correction (PFC) boost converter circuit and phase-shift full-bridge (PSFB) inverter circuit for electric vehicle (EV) battery charger. The proposed circuit uses single-phase AC source that its structure includes two main circuits are PFC boost converter and PSFB inverter. The study of these circuits designed uses simulation by MATLAB application and actually experiment with the circuit power of 3.2 kW. From the simulation and experimental results illustrate that PFC boost converter part can control the input AC current source to be a sine wave and in-phase with input AC voltage source by using 100 kHz switching frequency. For PSFB inverter part controls by adjusting the phase-shift of gates signal by using 30 kHz switching frequency and it can control the output DC voltage from 0-380V with 9A current.

คำสำคัญ: บูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลัง การเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ เครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์พลังงานไฟฟ้า

Keywords: PFC boost converter, Phase-shift full-bridge inverter, EV battery charger.

¹ Correspondent author: pchanthy71@gmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัย ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***** รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



บทนำ

การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนั้นมีหลายโครงสร้างขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน และในส่วนของโครงสร้างวงจรเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันมีสองแบบคือ แบบสองทิศทางและแบบทิศทางเดียว โดยมีโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์ร่วมกัน ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงสร้างที่เป็นแบบทิศทางเดียว โดยทำการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างของวงจรคอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์กำลังสูงซึ่งแต่ละวงจรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1-2] คอนเวอร์เตอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงให้กับอินเวอร์เตอร์นั้นจะเป็นแบบชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PFC converter) ซึ่งมีหลายประเภทอาทิเช่น Buck PFC converter, buck-boost PFC converter และ PFC boost converter เป็นต้น ถึงแม้ว่าแต่ละวงจรที่ออกแบบมาจะมีความแตกต่างกันแต่วัตถุประสงค์โดยรวมคือการลดสัญญาณรบกวนหรือลดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่จะย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณไฟฟ้า (Harmonics distortion) ในระบบสายส่ง ดังนั้นการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ ควรที่จะทำให้สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าขาเข้ามีความเพี้ยนน้อยที่สุดและอินเฟส (in-phase) กับแรงดันขาเข้าจึงจะทำให้ระดับสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นน้อยและมีค่าตัวประกอบกำลังสูง

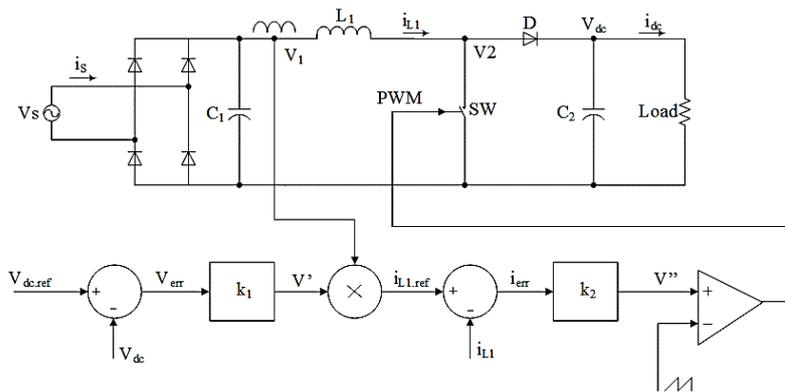
ในบทความนี้จะมีการศึกษาและออกแบบวงจรเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบหนึ่งเฟสที่มีกำลังไฟฟ้า 3.2 kW โดยมีภารกิจการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองจริง ซึ่งโครงสร้างของวงจรประกอบด้วยวงจรบูสต์คอนเวอร์ชันชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor correction 'PFC' boost converter) และวงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Phase-shift full-bridge inverter) การออกแบบวงจร PFC boost converter นั้นจะต้องสามารถทำให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าขาเข้าให้มีรูปคลื่นเหมือนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและต้องอินเฟส (in-phase) กัน เสมือนกับเป็นโหลดตัวต้านทานบริสุทธิ์ [3-4] ชนิดของ PFC boost converter นั้นสามารถแบ่งออกเป็นสามชนิด โดยแบ่งตามโหมดการทำงานคือ 1) โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode 'CCM') 2) โหมดการนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode 'DCM') และ 3) โหมดการนำกระแสแบบขอบเขต (Critical Conduction Mode 'CrCM') [3-7] โดยโหมดที่นิยมนำมาใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ CrCM กับ CCM ซึ่งโหมด CrCM ส่วนใหญ่จะใช้กับวงจรที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำ ส่วนโหมด CCM จะใช้กับวงจรที่มีกำลังไฟฟ้าปานกลางถึงสูง เหตุเนื่องจากการทำงานในโหมดนี้มีริบเปิล (ripple) กระแสขาเข้าต่ำทำให้สามารถลดทอนอุปกรณ์กรองสัญญาณรวมทั้งส่วนยอดของกระแส (peak current) มีค่าต่ำ ทำให้สามารถลดการสูญเสียของการนำกระแสเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีกำลังไฟฟ้าสูงๆ ได้ [3-4, 6, 8-11] ในส่วนของวิธีการควบคุม PFC boost converter นั้นมีหลายแบบเช่น การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) [12-14] ตัวควบคุมแบบพีไอแบบซ้ำ (Repetitive PI controller) [11, 13, 15] และตัวควบคุมแบบพลวัต (Dynamic evolution controller) [11, 16-18] อย่างไรก็ตามทุกประเภทของการควบคุมต้องทำงานในแบบสองลูป (loops) คือลูปแรงดัน (Voltage loops) กับลูปกระแสไฟฟ้า (Current loops) ไม่ว่าจะใช้อุปกรณ์ที่เป็นแบบอนาล็อก หรือดิจิทัลก็ตาม [19-20] โดยวัตถุประสงค์สำคัญของลูปกระแสคือการควบคุมรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าขาเข้าให้มีรูปคลื่นเหมือนรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าซึ่งเป็นรูปคลื่นไซน์ ส่วนลูปของแรงดันใช้เพื่อควบคุมแรงดันขาออกให้คงที่ตลอดการทำงาน

ในส่วนของอินเวอร์เตอร์นั้นบทความนี้ใช้วงจร Phase-shift full-bridge (PSFB) inverter ซึ่งใช้โหมดการสวิตช์โดย ปิด (ON) และเปิด (OFF) สวิตช์ สองตัวไปพร้อมกัน ส่วนเทคนิคการสับสวิตช์จะใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสแบบฟูลบริดจ์ (Phase-shift full-bridge 'PSFB' controller) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถสวิตช์ภายใต้กระแสที่สูงและนำไปประยุกต์ใช้กับกำลังไฟฟ้าที่สูงๆ ได้ [21-26] นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการทำงานได้หลายโหมดเช่น โหมดการ



วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PFC Boost converter)

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) ที่นำเสนอเป็นการทำงานในโหมด CCM ซึ่งเป็นการทำงานโดยที่กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องทำให้สามารถลดขนาดของตัวกรองกระแสได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับโหมดการทำงานอื่นๆ ภาพที่ 3 แสดงแผนผัง และหลักการ การทำงานของวงจร PFC boost converter กับตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) จากภาพแสดงให้เห็นว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสเดียว 220 V_{rms} ถูกป้อนเข้าให้กับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยผ่านวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบฟูลบริดจ์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมี C₁ เป็นตัวกรองกระแสเพื่อลดริปเปิลสวิตชิ่งของแรงดันกระแสตรงที่โหนด V₁ ส่วน L₁ เป็นตัวเหนี่ยวนำบัสที่ใช้สำหรับเก็บและถ่ายพลังงานไฟฟ้า ในการทำงานของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์นั้น SW เป็นตัวสวิตช์ขั้วที่มีหน้าที่ปิด-เปิดสวิตช์ตามการสั่งงานจากวงจรเก็ทไดรฟ์ ส่วน D เป็นไดโอดคูลสต์ และ C₂ เป็นตัวเก็บประจุของวงจรบูสต์ทำหน้าที่กรองกระแสไฟฟ้าขาออก พร้อมกับลดริปเปิลของแรงดันขาออก ในส่วนของวงจรควบคุมจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า (i_s) ให้เป็นรูปคลื่นไซน์และอินเฟส (In-phase) กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า (V_s) นอกจากนี้ยังทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออก (V_{dc}) ให้คงที่ 400V ต่อไปนี้จะเป็นการแสดงการคำนวณหาตัวแปรต่างๆ ของวงจร อาทิเช่น L₁, i_{L1,max}, i_{L1,min} และ C₂ ของโหมด CCM PFC boost converter ในภาพที่ 3 โดยใช้สมการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3 แผนผังของ PFC boost converter กับตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller)

ตัวเหนี่ยวนำบัส L₁ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่าต่ำสุดหรือสูงสุดสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (1) - (3) [3-4]

$$L_1 = \frac{1}{\%Ripple} \times \frac{(V_{ac,min})^2}{P_o} \times \left(1 - \frac{\sqrt{2}V_{ac,min}}{V_{dc}}\right) \times T \quad (1)$$

$$i_{L_1,max} = \frac{\sqrt{2}P_o}{V_{ac,min}} \times \left(1 + \frac{\%Ripple}{2}\right) \quad (2)$$

$$i_{L_1,min} = \frac{\sqrt{2}P_o}{V_{ac,min}} \times \left(1 - \frac{\%Ripple}{2}\right) \quad (3)$$

โดยให้

V_{ac,min} เป็นแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าต่ำที่สุด

V_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง

P_o เป็นกำลังไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์

%Ripple เป็นริปเปิลของกระแสตัวเหนี่ยวนำ กำหนดให้มีค่า 25 – 45% [3]



โดยให้

V_s เป็นแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าต่ำสุด

V_p เป็นค่าพีค (peak) ของแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าขาเข้า

V_i เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้อินเวอร์เตอร์ตรงจุด V_i

V_{L_1} เป็นแรงดันตกคร่อมของตัวเหนี่ยวนำ L_1

V_d เป็นแรงดันตกคร่อมของไดโอด

$i_{L_1,rms}$ เป็นกระแส rms ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1

$i_{s,rms}$ เป็นค่ากระแส rms ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ทุกสัญลักษณ์ของแรงดันทั้งหมดมีหน่วยเป็น (V) และสัญลักษณ์ของกระแสมีหน่วยเป็น (A)

ในส่วนของการควบคุมจะใช้ตัวควบคุมแบบ PI โดยใช้สัญญาณ PWM ที่มีความถี่ 100 kHz ซึ่งสมการของการควบคุมแบบ PFC boost converter แสดงในสมการ (13) – (18) จากสมการด้านบนให้ V^* เป็นตัวขยายแรงดันที่ได้จากการคูณระหว่าง ค่าความผิดพลาดของแรงดันกับตัวขยายของตัวควบคุม PI ส่วน V^* เป็นแรงดันที่ได้มาจากการคูณกระแสสำหรับนำมาเทียบกับแรงดันสัญญาณแบบฟันเลื่อย (saw-tooth) เพื่อสร้างสัญญาณ PWM นำไปควบคุมตัวนำสวิทช์ดังแสดงในภาพที่ 3 ส่วน k_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวขยายของตัวควบคุม PI ในการควบคุมรูปของแรงดัน และส่วน k_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์หรือตัวขยายของตัวควบคุม PI ที่ใช้ในการควบคุมรูปของกระแสไฟฟ้า

$$PWM = V^* - V_{Sawtooth} \quad (13)$$

$$V^* = i_{err} \times k_2 \quad (14)$$

$$i_{err} = i_{L,ref} - i_{L_1} \quad (15)$$

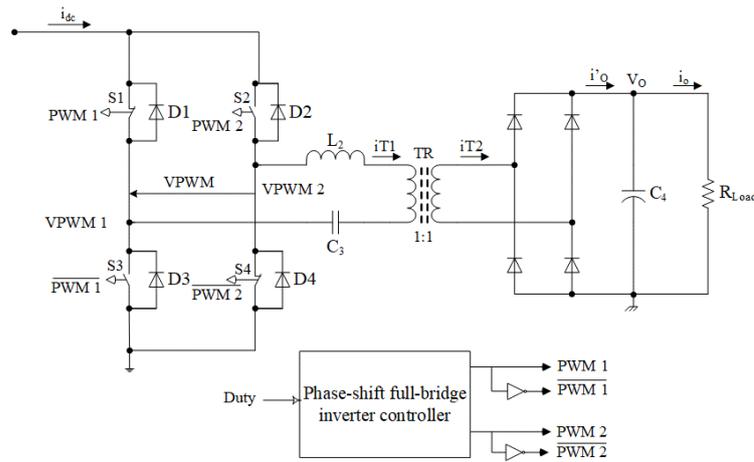
$$i_{L,ref} = V \times V_1 \quad (16)$$

$$V^* = V_{err} \times k_1 \quad (17)$$

$$V_{err} = V_{dc,ref} - V_{dc} \quad (18)$$

วงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Phase-shift full-bridge inverter)

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบฟูลบริดจ์ เป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าสูง ในการศึกษาจะใช้เทคนิคการเลื่อนเฟส Phase-shift full-bridge (PSFB) [21] เพื่อทำการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ภาพที่ 6 แสดงแผนผังของวงจร PWM อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น จากภาพ ในวงจรมีหม้อแปลงความถี่สูงแบบแยกโดด เพื่อแยกสัญญาณให้มีความปลอดภัยในการทำงาน ส่วนตัวควบคุมจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ PWM duty 50% ความถี่ 30 kHz สองชุด เพื่อสร้างสัญญาณ PWM 1 กับ PWM 2 มาทำการเลื่อนเฟสเพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่



ภาพที่ 6 แผนผังของวงจร PWM อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวแบบเต็มรูปคลื่น

การจำลองการทำงานของวงจร Phase-shift full-bridge inverter โดยใช้โปรแกรม MATLAB นั้นจะยึดแผนผังการทำงานดังภาพที่ 6 เป็นหลักซึ่งสามารถใช้สมการ(19) – (26) ในการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆได้ ในการนี้ ให้แรงดันด้านทุติยภูมิ (VT2) เท่ากับแรงดันด้านปฐมภูมิ (VT1) เนื่องจากใช้หม้อแปลงอัตราส่วน 1:1 และแรงดันกระแสตรงขาออก (Vo) เท่ากับ VT2 เนื่องจากในช่วงที่ไดโอด ON แรงดันตกคร่อมของไดโอดน้อยมาก(0.7V) เมื่อเทียบกับแรงดันขาออกซึ่งมีค่าสูง 300V – 380V ส่วนสัญญาณของ VPWM คือค่าความต่างศักย์ระหว่าง VPWM 1 กับ VPWM 2 โดยที่ VPWM1 และ VPWM 2 เป็นแรงดันไฟฟ้าของจุดเชื่อมต่อของ SW1 กับ SW3 และจุดเชื่อมต่อของ SW2 กับ SW4 เทียบกับกราวด์ ส่วน io เป็นกระแสไฟฟ้า(DC)ขาออกสำหรับนำไปชาร์จแบตเตอรี่ ส่วน i'o เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสซึ่งรับกระแสมาจากขดทุติยภูมิ

$$VPWM = PWM1 - PWM2 \quad (19)$$

$$VPWM = V_{L2} + VT1 + V_{C3} \quad (20)$$

โดยให้ $V_{C3} \cong 0V$ (21)

$$VT1 = VT2 \quad (22)$$

$$iT1 = \frac{1}{L2} \int V_{L2} dt \quad (23)$$

$$i'o = |iT1| \quad (24)$$

$$i_o = \frac{V_o}{R_L} \quad (25)$$

$$V_o = \int \frac{i'c3}{C4} dt \quad (26)$$

ตัวแปรต่างๆ ของการจำลอง และการทดลอง

ตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ในการจำลองการทำงานและการทดลองจริงแสดงในตารางที่ 1 การจำลองและการทดลองต้องทำการจำลองแบบแยกกันระหว่างวงจร PFC boost converter และ Phase-shift full-bridge inverter ส่วนการทดลองได้ทำการทดลองแบบแยกคนละส่วนก่อนนำไปทดลองรวมกัน



ตารางที่ 1 ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการจำลอง และการทดลองจริง

ชื่อของตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
กำลัง ไฟฟ้า	P_o	3.2	kW
แรงดันขาออกของ PFC boost converter	V_{dc}	400	V
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าต่ำสุด	$V_{ac.min}$	220	V
ตัวเหนี่ยวนำบูสต์ (1)	L_1	135	μH
ตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ อินเวอร์เตอร์	L_2	50	μH
ตัวเก็บประจุบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (4)	C_2	6600	μF
ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์	C_3	1	μF
ตัวเก็บประจุกรองกระแสขาออกของอินเวอร์เตอร์	C_4	470	μF
ความถี่แหล่งจ่ายไฟ	f_o	50	Hz
ความถี่สวิตช์ของวงจรบูสต์	f_{s1}	100	kHz
ความถี่สวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์	f_{s2}	30	kHz
หม้อแปลง	Tr	1:1	round
โหลดตัวต้านทาน	R_L	30 -100	Ω

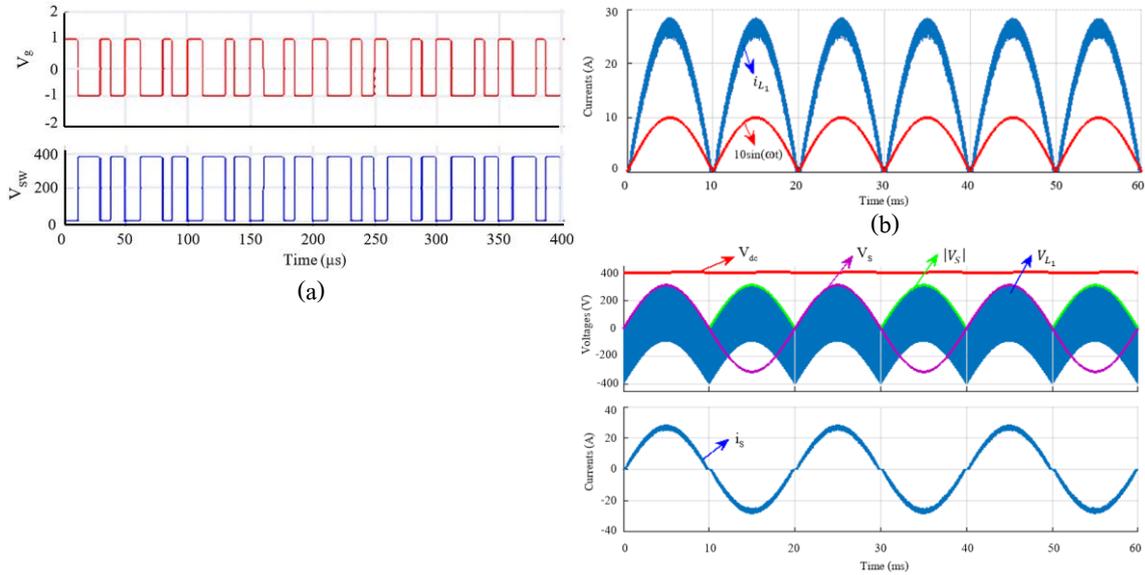
ผลการจำลอง

ผลการจำลองของวงจรเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนของ PFC boost converter และวงจร Phase-shift full-bridge inverter โดยมีรายละเอียดที่จะแสดงดังต่อไปนี้

ผลการจำลองวงจร PFC boost converter

ภาพที่ 7 แสดงผลการจำลองของ PFC boost converter ในส่วนของภาพที่ 7(a) เป็นการแสดงรูปคลื่นของสัญญาณ V_g กับ V_{sw} สัญญาณทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศาเนื่องจากในช่วงเวลา V_g ปิด (ON) ทำให้แรงดันตกคร่อมตัวสวิตช์ตกลงมาเป็น 0V และในช่วง V_g เปิด (OFF) ทำให้ตัวสวิตช์เปิดทำให้แรงดันตกคร่อมตัวสวิตช์เท่ากับแรงดัน V_{dc} โดยมีความถี่ 100 kHz ภาพที่ 7(b) เป็นการแสดงรูปคลื่น i_L และ $|\sin(\omega t)|$ เนื่องจาก i_L เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำบูสต์ L_1 ซึ่งจะมีเฉพาะช่วงที่เป็นบวก(+) เท่านั้นเนื่องจากสัญญาณได้ผ่านวงจรเรียงกระแสมาแล้ว แต่หากดูจากภาพที่ 7(c) จะเห็นได้ว่า i_s ซึ่งเป็นกระแสขาเข้าจะมีทั้งด้านบวก(+) และลบ(-) เนื่องจากเป็นสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่อยู่ก่อนวงจรเรียงกระแส และกระแสนี้ถูกควบคุมให้มีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์เหมือนกับแรงดันขาเข้าดังที่ได้แสดงไว้ นอกจากนี้ในภาพที่ 7(c) ได้แสดงสัญญาณของ V_{dc} , V_s , $|V_s|$, V_L ไว้ด้วย เมื่อดูรูปคลื่นของแรงดันขาออก V_{dc} จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแรงดันขาออกสามารถควบคุมแรงดันให้คงที่ 400V ได้ ส่วน $|V_s|$ ซึ่งเป็นแรงดันที่ผ่านการเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์มาแล้ว (แรงดันที่จุด V_1 ในภาพที่ 3) แรงดันนี้จะนำไปใช้เป็นส่วนอ้างอิงสำหรับควบคุมให้กระแสไฟฟ้าขาเข้าให้มีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์ เช่นกัน ในภาพที่ 7(c) แสดงการเปรียบเทียบรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า (V_s) กับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า (i_s) ซึ่งรูปคลื่นทั้งสองมีรูปคลื่นคล้ายกันและอินเฟสกัน จากรูปนี้แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมกระแสขาเข้าและแรงดันขาออกได้เป็นอย่างดี ส่วน

รูปคลื่น V_{L_1} จากภาพจะเป็นรูปคลื่นที่มีพื่นหนาเนื่องจากแรงดันนี้มีรีปเปลของสวิตซิ่ง 100 kHz แผลงอยู่และมีรูปคลื่นคล้ายคลึงกับ $|V_s|$



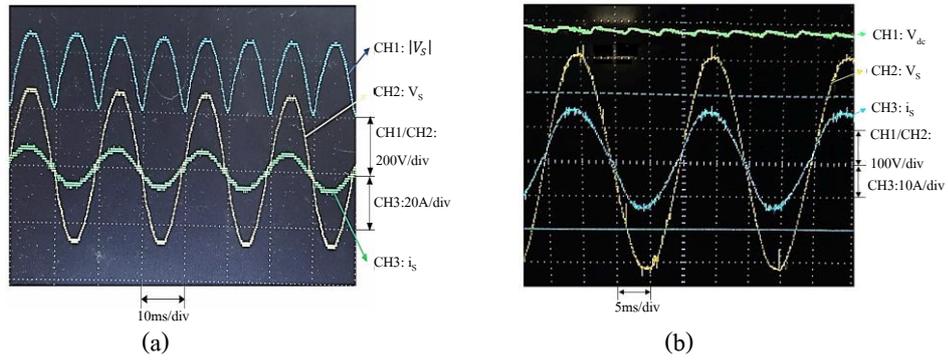
ภาพที่ 7 แสดงผลการจำลองของวงจร PFC boost converter

ผลการทดลองวงจร PFC boost converter

ภาพที่ 8 แสดงแผงวงจร PFC boost converter ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดลองจริงโดยมีกำลังไฟฟ้าประมาณ 3.2 kW ซึ่งจะนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป ภาพที่ 9 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองจริงของวงจร PFC boost converter จากภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่า รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าขาเข้า i_s มีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นซายน์และอินเฟสกับคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า V_s ส่วนรูปคลื่นของ V_{dc} นั้นจะเป็นแรงดันกระแสตรงและมีค่ารีปเปลประมาณ $\pm 5\%$ จากผลการทดลองจริงทำให้ทราบว่าวงจรที่ได้ออกแบบมาสามารถทำงานได้จริงและมีผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB



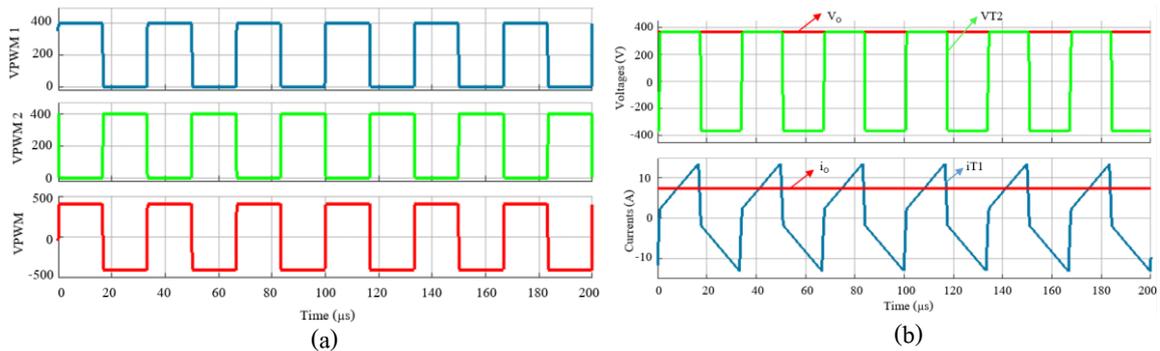
ภาพที่ 8 แผงวงจร PFC boost converter ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 9 แสดงกราฟการทดลองของวงจร PFC boost converter

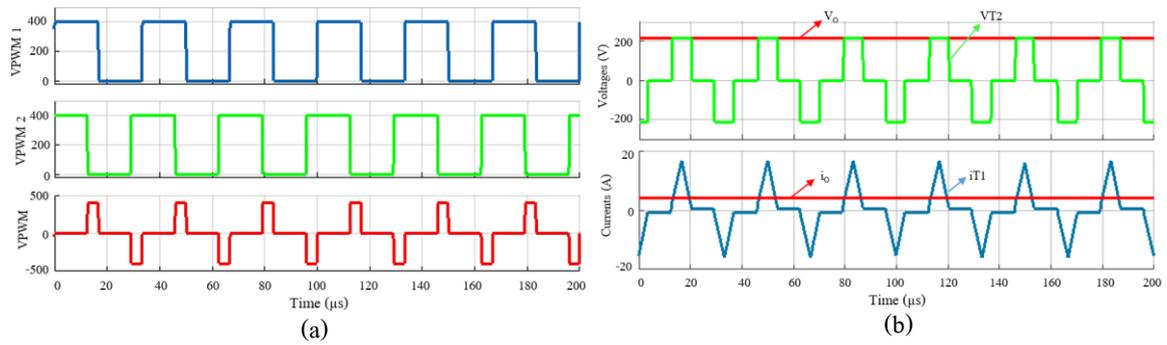
ผลการจำลองวงจร Phase-shift full-bridge inverter

ผลการจำลองการทำงานของวงจร Phase-shift full-bridge inverter แสดงในภาพที่ 10 และภาพที่ 11 จากผลการจำลองในภาพที่ 10(a) แสดงรูปคลื่นแรงดัน VPWM 1, VPWM 2 และ VPWM โดยที่แรงดันทั้งสองมีค่าเท่ากัน กล่าวคือ 0 – 400V ทำให้แรงดัน VPWM ซึ่งเป็นผลต่างของทั้ง VPWM 1 และ VPWM 2 มีค่าเป็น (- 400V) – (+ 400V) ซึ่งเป็นการทำงานของ full-bridge inverter ภาพดังกล่าวได้ทำการควบคุมความต่างเฟสให้เป็น 180° โดยให้ค่า duty cycle มีค่าคงที่ 50% ส่วนในภาพที่ 10(b) แสดงรูปคลื่น i_o , i_{T1} , V_{T2} และ V_o โดยมีโหลดตัวต้านทาน 50 Ω เชื่อมต่อกับแรงดันขาออก จากภาพจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกเท่ากับแรงดันสูงสุดของขดลวดขั้วขั้ว เนื่องจากแรงดัน V_{T2} ถูกเรียงกระแสโดยวงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ ส่วน i_{T1} เป็นรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขดลวดของหม้อแปลงแยกโดดกับตัวเหนี่ยวนำ L_2 ซึ่งเป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมเหตุเนื่องจากแรงดันสวิตช์ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยม ส่วนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขาออก i_o เป็นเส้นตรง เนื่องจากถูกเรียงกระแสด้วยวงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์พร้อมกับตัวเก็บประจุ C_4 (470 uF) เป็นตัวกรองกระแสไหลผ่านโหลดตัวต้านทาน (R_L)



ภาพที่ 10 สัญญาณ VPWM1, VPWM2, VPWM V_o V_{T2} , i_{T1} กับ i_o โดยเลื่อนเฟส 180°

ภาพที่ 11 แสดงสัญญาณผลการจำลองสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้โหลดตัวต้านทาน 50Ω โดยทำการเลื่อนเฟส 45 ° หากเปรียบเทียบภาพที่ 10(a) กับภาพที่ 10(b) จะเห็นได้ชัดว่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกมีค่าต่างกันเนื่องจากการเลื่อนเฟสทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกน้อยลง และหากเลื่อนเฟสระหว่างกันให้ห่างเพิ่มขึ้น (สูงสุด 180°) จะทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกจะเพิ่มขึ้น จากผลการจำลองนี้ทำให้สามารถควบคุมแรงดันขาออกได้โดยการควบคุมเฟส อนึ่งอินเวอร์เตอร์ในภาพที่ 10 และภาพที่ 11 ดังข้างต้นใช้สวิตช์ความถี่ 30 kHz



ภาพที่ 11 สัญญาณ VPWM1, VPWM2, VPWM, V_o , V_{T2} , i_{T1} กับ i_o โดยเลื่อนเฟส 45°

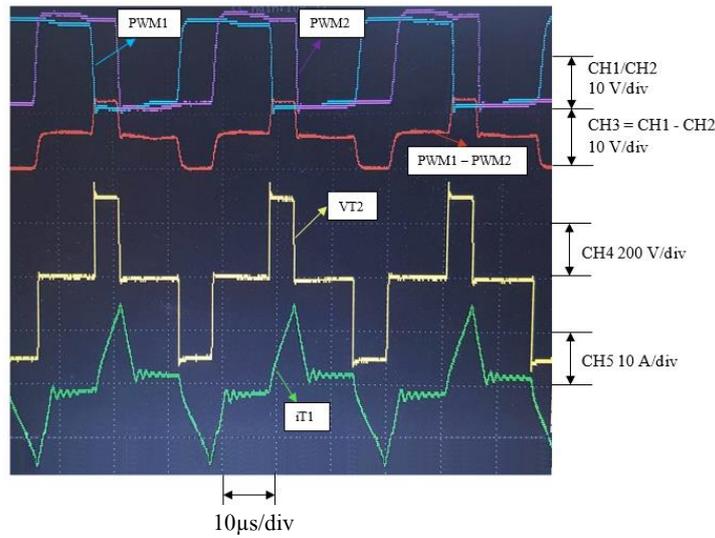
ผลการทดลองวงจร Phase-shift full-bridge inverter

ภาพที่ 12 แสดงแผงวงจร Phase-shift full-bridge inverter ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดลอง ส่วนภาพที่ 13 แสดงรูปคลื่นของผลการทดลองของวงจร ในภาพที่ 13 แสดงรูปคลื่นของ PWM 1 กับ PWM 2 แรงดัน V_{T2} และกระแสหม้อแปลง i_{T1} โดยมี การเลื่อนเฟสของอินเวอร์เตอร์ให้ต่างกัน 60° จากภาพแสดงให้เห็นว่า รูปคลื่นแรงดัน V_{T2} มีค่าเป็นทั้งบวก(+) และลบ(-) ซึ่งเป็นการทำงานของ full-bridge inverter

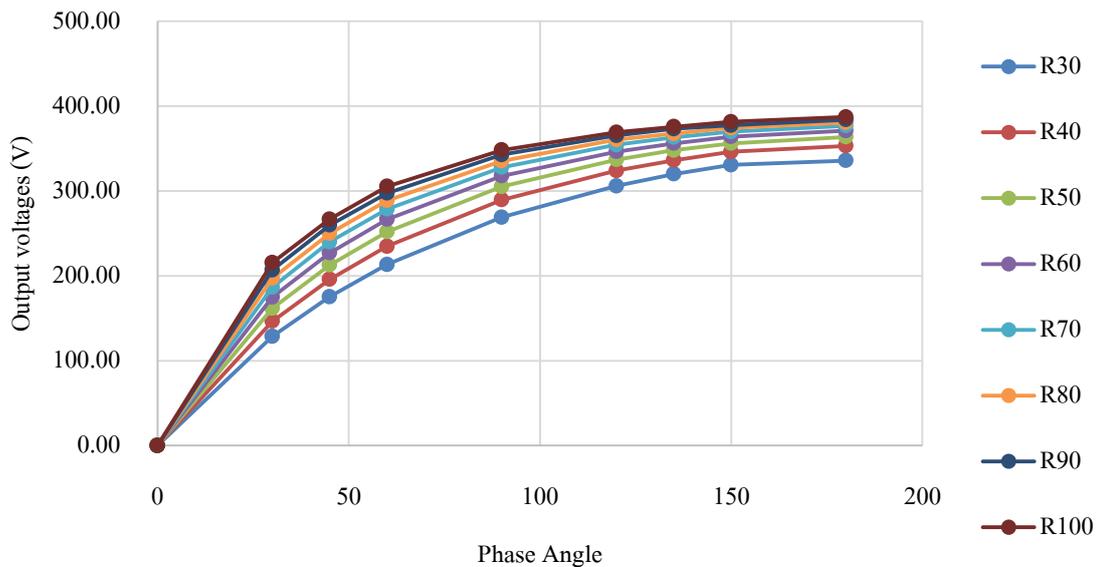


ภาพที่ 12 แผงวงจร Phase-shift full-bridge inverter ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดลอง

ส่วน i_{T1} เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมเนื่องจากแรงดัน V_{T2} รูปสี่เหลี่ยม แสดงให้เห็นว่าการทำงานและการควบคุมของการทดลองจริงคล้ายกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ข้างต้น ทั้งนี้ความถี่สวิตซ์ที่ใช้ในการทดลองจริงได้ใช้ความถี่เดียวกับการจำลองการทำงานด้วยความถี่ 30 kHz



ภาพที่ 13 รูปคลื่นการทดลองของวงจรอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยการเลื่อนเฟสและมีโหลดตัวต้านทานต่างกัน

ภาพที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยการเลื่อนเฟสและมีโหลดตัวต้านทานซึ่งมีค่าแตกต่างกัน จากภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเลื่อนเฟสจะทำให้แรงดันขาออกเปลี่ยนไปเป็นผลให้กระแสเปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกมีความเกี่ยวข้องกับโหลดด้วย กล่าวคือ หากโหลด R_L มีค่าต่ำจะทำให้แรงดันขาออกต่ำลงเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน L_2 ในวงจรมีมากขึ้นทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมมากขึ้นเป็นผลให้เหลือแรงดันขาออกไปที่โหลดน้อยลง ในทางกลับกันหากโหลดมีค่าความต้านทานสูงทำให้กระแสไหลต่ำลงและแรงดันที่ตกคร่อม L_2 จะลดลงเป็นผลให้เหลือแรงดันขาออกไปที่โหลดมากขึ้น นอกจากนี้ การควบคุมโดยเลื่อนเฟสนั้นในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวควบคุมที่ใช้ Micro controller ซึ่งมีราคาต่ำและใช้กันอย่าง

แพร่หลายในปัจจุบัน และจากภาพที่ 13 แสดงให้เห็นว่าถึงแม้โพลดจะเป็นตัวต้านทานแต่ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เลื่อนกับแรงดันขาออกนั้นไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์จะไม่เป็นเชิงเส้นก็สามารถแก้ไขได้ด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ซึ่งก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามความต้องการ

ข้อดีและข้อเสีย

จากการรวบรวมผลการจำลองและการทดลองจริงสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของวงจร

ข้อดี	ข้อเสีย
- กำลังไฟฟ้าสูง เนื่องจากใช้เทคนิคสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ความถี่สูง และกระแสไฟฟ้าสูง	- แรงดันไฟฟ้าขาออกสูง จะต้องมีระบบป้องกันในการนำไปใช้งาน
- ส่วนอินเวอร์เตอร์ใช้หม้อแปลงแยกโคจลัญญาณเพื่อเป็นความปลอดภัยในการใช้งาน	
- คอนเวอร์เตอร์ และอินเวอร์เตอร์ทำงานแบบอิสระทำให้ออกแบบได้ง่ายไม่ซับซ้อน	

สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สำหรับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า วงจรที่ออกแบบมีกำลังไฟฟ้า 3.2 kW โดยมีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และสร้างวงจรจริงขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงาน โครงสร้างของวงจรจะแยกออกเป็นสองส่วนคือ PFC boost converter และ Phase-shift full-bridge inverter

ส่วนของ PFC boost converter ใช้ความถี่สวิตชิ่ง 100 kHz ทั้งการจำลองการทำงานและการทดลองจริง จากผลการจำลองและการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่า จากการประเมินจากรูปคลื่นและค่าตัวแปรต่างๆที่วัดได้ของการจำลองการทำงานและการทดลองจริงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่วงจร PFC สามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าให้มีรูปคลื่นเป็นคลื่นชานันคล้ายกับรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า และรูปคลื่นทั้งสองอินเฟสกัน นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกให้มีค่าคงที่ 400V เพื่อนำไปเป็นแหล่งจ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ต่อไปได้

ในวงจรเลื่อนเฟสฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ใช้สวิตชิ่งความถี่ 30 kHz และควบคุมแรงดันขาออกโดยการเลื่อนเฟสของตัวสวิตช์ให้ต่างกัน จากผลการจำลองการทำงานและการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าทั้งค่าตัวแปรต่างๆและรูปคลื่นมีความคล้ายคลึงกัน วงจรนี้สามารถควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออกเพื่อนำไปชาร์จแบตเตอรี่ โดยมีแรงดันระหว่าง 0 – 380V และมีกระแส 9A ได้

จากผลการจำลองการทำงานและการทดลองจริงของวงจรเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่ออกแบบมานั้น ทำให้สามารถนำวงจรและเทคนิคการออกแบบนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องชาร์จแบตเตอรี่แบบชาร์จเร็วได้ด้วยการสร้างวงจรขึ้นมาหลายชุดและทำโครงสร้างให้เป็นแบบหลายเฟส (Multi-phase) หรือแบบรวมกันหลายชุดเพื่อเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นตามต้องการได้



เอกสารอ้างอิง

1. Report A. AN-1973 Benefits and Challenges of High-Frequency Regulators. 2013;(April): 1–7.
2. Pomilio JA, Spiazzi G, Buso S. 09 - IAS00_Spiazzi.pdf. 2000;0(C): 3–8.
3. Abdel-rahman S. PFC Boost Converter Design Guide. 2014;
4. Abdel-rahman S. CCM PFC Boost Converter Design. Infineon white Pap. 2013;(January):1–18.
5. Nussbaumer T, Raggl K, Kolar JW. Design guidelines for interleaved single-phase boost PFC circuits. IEEE Trans Ind Electron. 2009;56(7): 2559–2573.
6. Chen Y, Member S, Chen Y, Member S. Line Current Distortion Compensation for DCM / CRM Boost PFC Converters. 2016;31(3): 2026–2038.
7. Fei Zhang, Jianping Xu. A Novel PCCM Boost PFC Converter With Fast Dynamic Response. IEEE Trans Ind Electron [Internet]. 2011; 58(9):4207–16. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5661848/>
8. Factor SP, Mode CC. CCM-PFC Standalone Power Factor. 2010;(May): 1–24.
9. Shen M, Qian Z. A novel high-efficiency single-stage PFC converter with reduced voltage stress. IEEE Trans Ind Appl. 2002;38(2): 507–513.
10. De Gussemé K, Van de Sype DM, Van den Bossche APM, Melkebeek JA. Input-current distortion of CCM boost PFC converters operated in DCM. IEEE Trans Ind Electron. 2007;54(2): 858–865.
11. Cheng W, Song J, Li H, Guo Y. Time-varying compensation for peak current-controlled PFC boost converter. IEEE Trans Power Electron. 2015;30(6): 3431–3437.
12. Design and Simulation of Boost Converter for Power Factor Correction and THD Reduction. 2014;3(42): 8462–8466.
13. Hassan TK. A repetitive-PI Current Controller for Boost Single Phase PFC Converters. Energy Power Eng. 2011;3(2): 69–78.
14. Li S, Lee ATL, Tan S-C, Hui SY. Plug-and-Play Voltage Ripple Mitigator for DC Links in Hybrid AC-DC Power Grids With Local Bus-Voltage Control. IEEE Trans Ind Electron [Internet]. 2017;46(c):1–1. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7934064/>
15. Wang Y, Darwish A, Holliday D, Williams BW. Plug-In Repetitive Control Strategy for High-Order Wide-Output Range Impedance-Source Converters. IEEE Trans Power Electron. 2017;32(8): 6510–6522.
16. Mohanty PR, Panda AK. A nonlinear control scheme based on dynamic evolution path theory for improved dynamic performance of boost PFC converter working on nonlinear features. ISA Trans [Internet]. 2016; 65: 254–261. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0019057816301380>
17. Mohanty PR, Panda AK. Fixed-Frequency Sliding-Mode Control Scheme Based on Current Control Manifold for Improved Dynamic Performance of Boost PFC Converter. 2017;5(1): 576–586.
18. Rao VM, Jain AK, Reddy KK, Behal A. Experimental comparison of digital implementations of single-phase PFC controllers. IEEE Trans Ind Electron. 2008;55(1): 67–78.
19. Feng YT, Tsai GL, Tzou YY. Digital control of a single-stage single-switch flyback PFC ac/dc converter with fast dynamic response. PESC Rec - IEEE Annu Power Electron Spec Conf. 2001;2: 1251–1256.



20. Singh B, Singh S, Chandra A, Al-Haddad K. Comprehensive study of single-phase AC-DC power factor corrected converters with high-frequency isolation. *IEEE Trans Ind Informatics*. 2011;7(4): 540–556.
21. Texas Instruments Inc. Phase-Shifted Full Bridge DC/DC Power Converter Design Guide. 2014;(May 2014):56.
Available from: <http://www.ti.com/lit/ug/tidu248/tidu248.pdf>
22. Kinnares V, Hothongkham P. Circuit analysis and modeling of a phase-shifted pulsewidth modulation full-bridge-inverter-fed ozone generator with constant applied electrode voltage. *IEEE Trans Power Electron*. 2010;25(7): 1739–1752.
23. Ye Z, Jain PK, Sen PC. A full-bridge resonant inverter with modified phase-shift modulation for high-frequency AC power distribution systems. *IEEE Trans Ind Electron*. 2007;54(5): 2831–2845.
24. Mishima T, Sakamoto S, Ide C. ZVS Phase-Shift PWM-Controlled Single-Stage Boost Full-Bridge AC-AC Converter for High-Frequency Induction Heating Applications. *IEEE Trans Ind Electron*. 2017;64(3): 2054–2061.
25. Axelrod B, Berkovich Y, Ioinovici A. Switching Control Technique of Phase-Shift- Controlled Full-Bridge Converter to Improve Efficiency Under Light-Load and Standby. *Proc 2003 Int Symp Circuits Syst 2003 ISCAS '03*. 2003;3(4): 1001–1012.
26. Lai YS, Chen BY. New random PWM technique for a full-bridge DC/DC converter with harmonics intensity reduction and considering efficiency. *IEEE Trans Power Electron*. 2013;28(11): 5013–5023.