

ดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางสำหรับการประยุกต์ใช้ กับมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าในโหมดคืนพลังงาน

Bi-Directional DC-DC Boost Converter for Electric Bike Applications in Regenerative Mode

รุ่งวิชัยยศ

สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

Rungwicha Chaiyot

Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University

Rungwicha.c@ubru.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากแบตเตอรี่มีความจุไฟฟ้าที่จำกัด และรถที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ จึงมีระยะทางสูงสุดที่วิ่งได้ขึ้นกับขนาดประจุแบตเตอรี่เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวงจรดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่สามารถจ่ายพลังงานคืนกลับไปชาร์จแบตเตอรี่ได้ โดยแบ่งการทำงานออกเป็นสองโหมด คือ การทำงานในโหมดการขับเคลื่อน และการทำงานในโหมดส่งกำลังไฟฟ้ากลับหรือโหมดคืนพลังงาน โดยในข้อกำหนดของงานวิจัยเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์จำนวน 1 ก้อน เพื่อให้รวมมีน้ำหนักเบาแล้วบูสแรงดันเอาต์พุตเป็น 48 โวลต์ ด้วยวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางไปจ่ายให้กับวงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 48 โวลต์ การวิจัยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการทำงานระบบทั้งหมด ผลการวิจัยพบว่า ค่าระลอกกระแสมีค่าไม่เกิน 1 แอมป์ ค่าระลอกแรงดันมีค่าไม่เกิน 1 โวลต์ และค่าดีวี่ไซเคิลมีค่า 75% ตามที่ได้ออกแบบไว้และระบบที่นำเสนอสามารถทำงานได้ทั้งสองโหมด สำหรับการทดสอบการทำงานในโหมดคืนพลังงานสามารถคืนพลังงานได้สูงสุด 35 กิโลวัตต์

คำสำคัญ: ดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง, บูสคอนเวอร์เตอร์, รีเจนเนอเรทีฟเบรก

Received : April 25, 2022

Revised : June 7, 2022

Accepted : June 8, 2022

Abstract

The battery's capacity is limited due to its size and the vehicle runs on battery power, the maximum range is limited solely by the amount of the battery charge. This research therefore presents a bi-directional DC-to-DC boost converter circuit that can supply energy back to the battery. The operation can be divided into two modes. The first mode is drive mode and The second mode is power return mode or regenerative mode. In the requirements of the research, a 12 volt battery was selected to make the car lighter. The voltage of a single cell battery is boosted to 48 volts for use by an H-bridge inverter to drive a permanent magnet DC motor. The entire system is simulated in this study using the Matlab/Simulink tool. The ripple current is less than 1 amp, the ripple voltage is less than 1 Volt, and the duty cycle is 75 percent as specified, according to the simulation results. The proposed system can operation in both modes, especially in regenerative mode, the maximum regenerative power is 35 kilowatts.

Keywords: Bi-Directional DC-DC Converter, Boost Converter, Regenerative braking

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันทรัพยากรเชื้อเพลิงมีอยู่อย่างจำกัด และถูกใช้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมทุกภาคส่วนทั้งอุตสาหกรรม การผลิต อุตสาหกรรมการขนส่ง เป็นต้น น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีราคาสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อรายได้ของผู้ประกอบอาชีพขนส่งเป็นอย่างมาก รวมถึงเจ้าของธุรกิจขนส่ง และทั้งประชาชนที่ใช้ยานพาหนะในการเดินทางไปตามสถานที่ต่าง ๆ จึงมีงานวิจัย เพื่อนำพลังงานจากไฟฟ้ามาใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ ซึ่งมีข้อดีคือ ยานยนต์ไฟฟ้าไม่ปล่อยมลพิษสู่อากาศ ลดการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วยลดสภาวะโลกร้อน และลดมลภาวะทางเสียงตามท้องถนน ปัจจุบันจึงเริ่มมีการหันมาใช้ พานะขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ามากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น จักรยานไฟฟ้า สถานีเตอร์ไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้า ฯ โดยมีผู้ประกอบการนำเข้า อะไหล่ชิ้นส่วนโมดูลควบคุม เพื่อมาประกอบเป็นพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า ทางผู้วิจัยจึงได้นำระบบขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปลงถ่านควบคุมด้วยวงจร เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ ร่วมกับวงจรดิซิจูติชคอนเวอร์เตอร์ แบบสองทิศทาง เพื่อให้มอเตอร์สามารถจ่ายพลังงานคืนกลับ ไปยังแบตเตอรี่ได้ขณะทำการเบรก (Regenerative Braking) เพื่อให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ไกลขึ้น

เพื่อลดการเกิดมลพิษทางอากาศและการใช้เชื้อเพลิง ยานยนต์ไฟฟ้าจึงได้รับการผลักดันมากขึ้นจากนักวิจัยในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก งานวิจัยของ Kasan Hamasuk และคณะ ซึ่งได้ออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบคืนพลังงานย้อนกลับ ไปชาร์จ แบตเตอรี่ขณะทำงานในโหมดคืนพลังงาน และจ่ายพลังงาน ไปยังมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เมื่อทำงานในโหมดขับเคลื่อน ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ออกแบบให้สามารถรักษาระดับแรงดันที่คิซิปัสด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ สามเฟสควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดธีมอดูเลชั่น เมื่อทำการทดสอบการทำงานทั้งระบบสามารถคืนพลังงาน ไปยัง แบตเตอรี่ และจ่ายพลังงาน ไปยังมอเตอร์ รวมไปถึงควบคุมแรงดันที่คิซิปัสได้ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดก็ตาม [1]

Mizanur Rahman และคณะ ทำการออกแบบวงจรประสิทธิภาพสูงให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงาน ให้กับยานยนต์ไฟฟ้า ด้วยวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ และวงจรเอช-บริดจ์ ดิซิจูติชคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง แบ่งออกเป็นด้าน แรงดันต่ำและด้านแรงดันสูง เชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลง การทำงานในโหมดขับเคลื่อนพลังงานจากแบตเตอรี่จ่ายไปยังดิซิมอเตอร์ วงจรคอนเวอร์เตอร์ด้านมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์ ตรงกันข้ามการทำงานในโหมดคืนพลังงาน พลังงานจากมอเตอร์ จ่ายกลับไปยังแบตเตอรี่ หรือมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์ในขณะนั้น วงจรคอนเวอร์เตอร์ด้านแบตเตอรี่ทำหน้าที่ เป็นเรกติไฟเออร์ การทำงานทั้งสองโหมดมีการควบคุมแรงดันทั้งสองด้านด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ จากการออกแบบการทำงาน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink คอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่า เมื่อเทียบกับวงจรคอน-เวอร์เตอร์ทั่วไป [2]

Remon Das และคณะ ทำการออกแบบวงจรประสิทธิภาพสูง ให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงาน ให้กับยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวงจร เอช-บริดจ์ ดิซิจูติชคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง แบ่งออกเป็นด้านแรงดันต่ำ และด้านแรงดันสูง เชื่อมต่อกันผ่านหม้อแปลง มีการทำงานในโหมดขับเคลื่อนพลังงานจากแบตเตอรี่ จ่ายไปยังดิซิจูติชคอนเวอร์เตอร์ [3] และบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองสวิตช์ ประกอบด้วย ไอจีบีที ช่วยลด Turn on loss ของมอสเฟส และมอสเฟส ช่วยลด Turn of loss ของไอจีบีที ทำให้งานวงจร ที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรทั่วไป การทำงานทั้งสองโหมดมีการควบคุมแรงดันทั้งสองด้านด้วยตัวควบคุม แบบพีไอ พีโอดี และแบบไม่มีตัวควบคุม พบว่า การควบคุมแบบพีไอ ให้แรงดันที่ต้องการได้สูงกว่าการควบคุมแบบพีโอดี และแบบไม่มีตัวควบคุมตามลำดับ มีออกแบบการจำลองการทำงานทั้งระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink [4]

Young-Joo Lee และคณะ ทำการรวมเอชทูติช และดิซิจูติชคอนเวอร์เตอร์แบบจ่ายพลังงานได้สองทิศทาง สำหรับยานยนต์ ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) ที่ประหยัดเชื้อเพลิง และลดมลภาวะได้ดีกว่ายานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด เนื่องจากสามารถวิ่งด้วย พลังงานไฟฟ้าได้นานกว่า เพราะมีแบตเตอรี่แพคที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่า นอกจากนี้แบตเตอรี่แพค ยังสามารถชาร์จกลับไปยังได้รับไฟฟ้าภายในบ้านได้ การทำงานแบ่งเป็น 3 โหมดคือ โหมดที่ 1 Non-Inverting Buck-Boost Mode เพื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ โหมดที่ 2 Boost Mode จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังบัสแรงดันสูงของ PHEV โหมดที่ 3 Buck Mode จ่ายพลังงานไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงของ PHEV คืนกลับไปยังแบตเตอรี่ งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลอง และสร้างต้นแบบสำหรับการทดสอบและควบคุมด้วยตัวประมวลผลดิจิทัล TI8 DSP 320F2812 [5]

งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการทำงานของวงจรดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง จากงานวิจัยของ Kasan Hamasuk และคณะ รวมถึงงานวิจัยของ Mizanur Rahman และคณะ มาทำการวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยดังกล่าว ด้วยการออกแบบวงจรใหม่ที่ระดับแรงดัน 48 โวลต์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วย เอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ ที่มีระบบควบคุมแรงดันที่ดีซีบัสด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ สามารถทำงานในโหมดการเบรกแบบคืนพลังงานไปยังแบตเตอรี่ ส่งผลให้ยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ระยะทางไกลขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น จักรยานไฟฟ้า สกู๊ตเตอร์ไฟฟ้า หรือมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า เป็นต้น

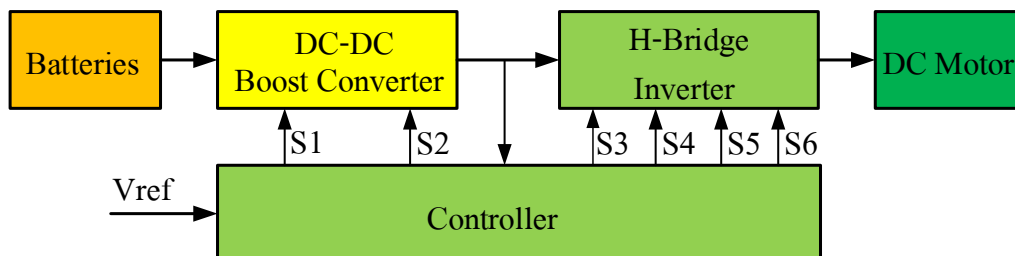
2. ขอบเขตงานวิจัย

- 2.1 เพื่อออกแบบวงจรดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางให้มีขนาดแรงดันที่เหมาะสมกับขนาดของดีซีมอเตอร์ที่มีขนาด 48 โวลต์
- 2.2 เพื่อออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าที่สามารถทำงานในโหมดคืนพลังงานได้
- 2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ และสร้างมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าที่สามารถทำงานในโหมดคืนพลังงาน และสามารถวิ่งได้ระยะทางไกลขึ้น

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 โครงสร้างระบบควบคุม

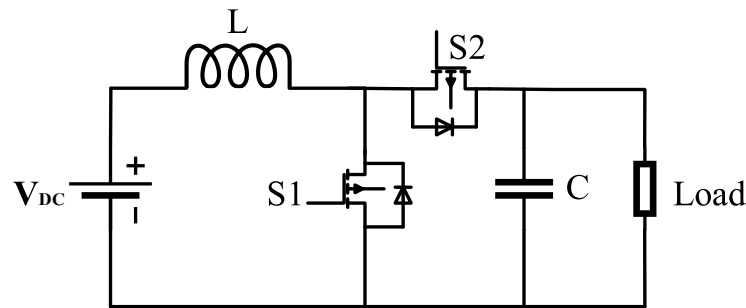
โครงสร้างระบบควบคุมทั้งหมดแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย แบตเตอรี่ วงจรดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง วงจร เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และระบบควบคุม



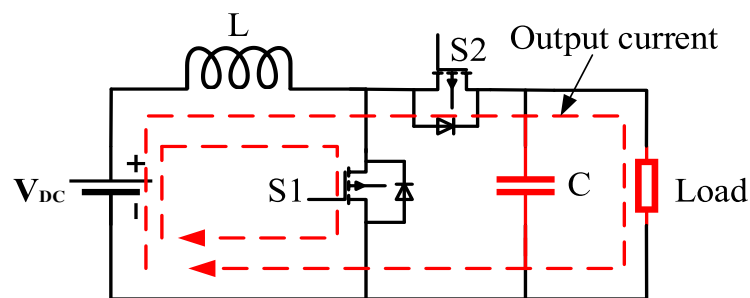
รูปที่ 1 ระบบควบคุมดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

3.2 วงจรดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

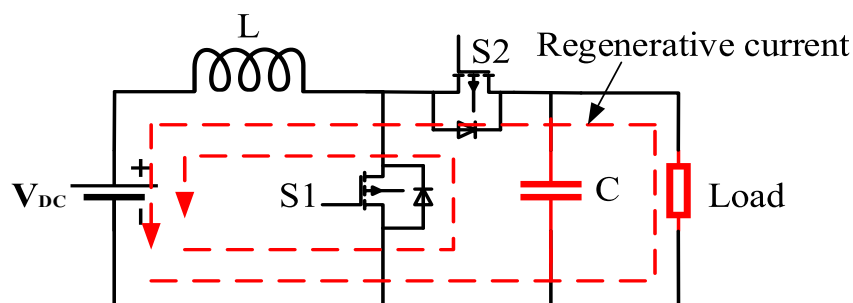
วงจรดีซีทูดีซีบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2 มีหลักการทำงานดังนี้คือ พลังงานไฟฟ้าไหลจากแบตเตอรี่ไปยังโหลด เมื่อสวิตช์ S1 ทำงาน และสวิตช์ S2 ไม่ทำงาน วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ เมื่อสวิตช์ S2 ทำงาน และสวิตช์ S1 ไม่ทำงาน วงจรทำหน้าที่เป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ พลังงานไฟฟ้าไหลจากโหลดมายังแบตเตอรี่ แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 [1],[2],[3]



รูปที่ 2 วงจรดีซีบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบสองทิสทาง



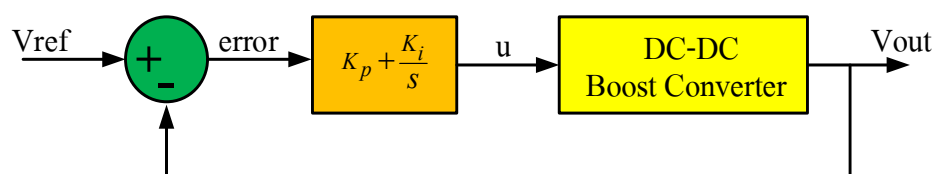
รูปที่ 3 กระแสไฟฟ้าในวงจรเมื่อสวิตช์ S1 ทำงาน และสวิตช์ S2 ไม่ทำงาน



รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าในวงจร เมื่อสวิตช์ S2 ทำงาน และสวิตช์ S1 ไม่ทำงาน

3.3 ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค

รถไฟฟ้าที่มีการใช้งานวงจรดีซีบูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับภาคอินเวอร์เตอร์ สำหรับงานขับเคลื่อนมอเตอร์นั้น ต้องได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ ดังนั้นการควบคุมแรงดันเอาต์พุตจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อให้ระบบควบคุมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงใช้ระบบควบคุมแบบวงปิดด้วยตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ค เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุม ฟีดแบ็ค สำหรับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

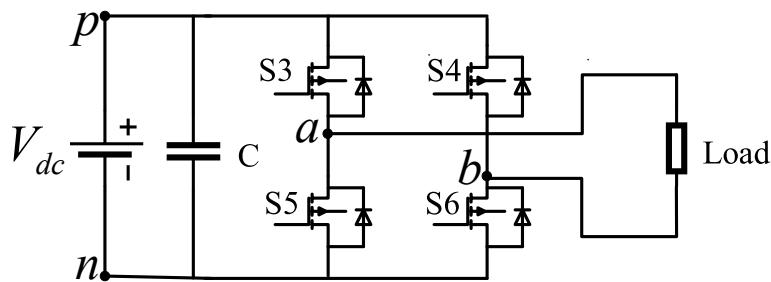
การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอ สำหรับวงจรสคอนเวอร์เตอร์ใช้วิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบดั้งเดิม ด้วยวิธี Ziegler-Nichols (ZN) เนื่องจากไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ทำให้การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์มีความสะดวกในการปรับค่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน k_p และตัวควบคุมแบบอินทิกรัล k_i โดยเริ่มต้นให้กำหนดค่าคงที่ของการอินทิกรัล k_i ให้เป็น 0 กำหนดค่า k_p ให้มีค่าต่ำไว้ก่อน จากนั้นจึงเพิ่มค่าขึ้นไปทีละน้อย จนกระทั่งเอาต์พุตมีแอมพลิจูดไม่คงที่มีค่าสูงสุด k_u และมีคาบสัญญาณคงที่ T_u หาค่า k_p และ k_i ได้ ดังสมการที่ (1) และ (2) [6]

$$k_p = 0.45 \times k_u \quad (1)$$

$$k_i = \frac{1.2 \times k_p}{T_u} \quad (2)$$

3.4 เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์

การทำงานของ เอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ จากรูปที่ 6 วงจรประกอบด้วย มอสเฟตในวงจรทั้งหมด 4 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดปิด และจะทำงานสลับกันเป็นคู่โดยที่ S3 จะทำการสวิตช์ เพื่อนำกระแสไฟฟ้าพร้อมกับ S6 ขณะที่ S4 และ S5 ไม่ทำงาน และ S4 จะทำการสวิตช์ เพื่อนำกระแสไฟฟ้าพร้อมกับ S5 ขณะที่ S3 และ S6 ไม่ทำงาน มีการควบคุมสวิตช์ทั้งสี่ตัวด้วยสัญญาณพัลส์วิดธีมอดูเลชั่นแบบไบโพล่า (Bipolar Pulse Width Modulation) [7],[8]



รูปที่ 6 วงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์

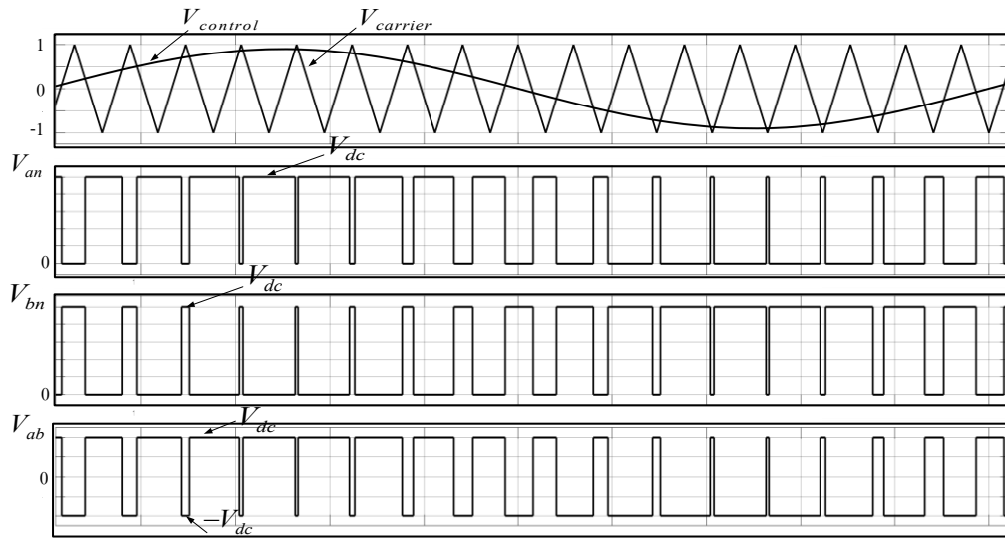
การมอดูเลตสัญญาณแบบไบโพล่าสำหรับเอช-บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ เพื่อให้สวิตช์แต่ละคู่คือ คู่สวิตช์ S3 และ S6 และคู่สวิตช์ S4 และ S5 ทำงานเปิดปิดพร้อม ๆ กันโดยที่ผลจากการการมอดูเลตสัญญาณแบบไบโพล่าจะให้แรงดันเอาต์พุตมีสองขั้วคือ ขั้วบวก และขั้วลบ ไม่มีแรงดันเอาต์พุตเป็น 0 เพราะไม่มีสถานะที่ทำให้แรงดันเป็นศูนย์ หลักการของการมอดูเลตสัญญาณพัลส์วิดธีมอดูเลชั่นแบบไบโพล่า คือ เมื่อต้องการแรงดันเอาต์พุตรูปไซน์เป็น $V_{control}$ และมีความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) f_1 ให้นำ $V_{control}$ มาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม $V_{carrier}$ มีความถี่การสวิตช์ (Switching - Frequency) f_s จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ เมื่อ $V_{control} > V_{carrier}$ แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นบวก เมื่อ $V_{control} < V_{carrier}$ ดังแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็นลบ ดังสมการที่ 3

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{dc} \quad \text{เมื่อ} \quad V_{control} > V_{carrier} \\ V_{out} &= -V_{dc} \quad \text{เมื่อ} \quad V_{control} < V_{carrier} \end{aligned} \quad (3)$$

นิยาม	ค่าดัชนีการมอดูเลต	$m_i = \frac{V_{control}}{V_{triangle}}$	(4)
-------	--------------------	--	-----

อัตราส่วนการมอดูเลตความถี่	$m_f = \frac{f_s}{f_1}$	(5)
----------------------------	-------------------------	-----

เมื่อค่า m_i คือ แอมพลิจูดสูงสุดของแรงดันเอาต์พุตหารด้วยแอมพลิจูดสูงสุดของรูปคลื่นพาห์รูปสามเหลี่ยม และ m_f คือ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์รูปสามเหลี่ยมหารด้วยความถี่ของสัญญาณควบคุมรูปไซน์



รูปที่ 7 การมอดูเลตสัญญาณพัลส์วิดธีมอดูเลชันแบบไบโพลาร์ และแรงดันเอาต์พุต

รูปที่ 7 แสดงผลการมอดูเลตสัญญาณแบบไบโพลาร์เมื่อดัชนีการมอดูเลต (m_i) เท่ากับ 0.8 และความถี่การมอดูเลต (m_f) เท่ากับ 15 จากรูปจะเห็นว่าแรงดัน V_{an} มีค่าตรงกันข้ามกับ V_{bn} เสมอ และไม่มีจุดที่แรงดันมีค่าเป็น 0 โวลต์ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต $V_{out} = V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$ ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตมี 2 ขั้ว การเลือกอัตราส่วนการมอดูเลตความถี่ (m_f) ให้เลือกเป็นเลขคู่ จะทำให้ได้จำนวนรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเป็นเลขคู่ และสมมาตรกับจุด 0 วิธีนี้ทำให้แรงดันเอาต์พุตไม่เกิดฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่ [9]

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การออกแบบพารามิเตอร์วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

สำหรับการออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ งานวิจัยนี้ใช้สวิตช์ควบคุมเป็นมอสเฟตทำหน้าที่ตัดต่อวงจร ไดโอดทำหน้าที่นำกระแส เมื่อสวิตช์ตัดวงจร ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองแรงดันเอาต์พุตให้เรียบขึ้น ส่วนตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่สะสมพลังงานและจ่ายพลังงานในช่วงที่สวิตช์ต่อและตัดวงจรตามลำดับ โดยการออกแบบการคำนวณนั้นใช้โหมดกระแสต่อเนื่อง กำหนดความถี่การสวิตช์ (f_s) 10 kHz สำหรับนำไปใช้กับมอสเฟตกำลัง กำหนดค่าระลอกกระแสออก (ΔI_L) 1 แอมป์ กำหนดค่าระลอกแรงดันออก (ΔV_o) 1 โวลต์ เป็นค่าการออกแบบไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของกระแส และแรงดันเอาต์พุต ค่าตัวดีไซเคิล (D) ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าตัวเก็บประจุ (C) คำนวณค่าได้ตามสมการที่ (6)-(8) ตามลำดับ โดยออกแบบตามขนาดดีซีมอเตอร์ 48 โวลต์ 1,000 วัตต์ ดังแสดงรายการคำนวณ และออกแบบตามตารางที่ 1

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (6)$$

$$L = \frac{V_i \times D}{\Delta I_L \times f_s} \quad (7)$$

$$C = \frac{I_o \times D}{\Delta V_o \times f_s} \quad (8)$$

ตารางที่ 1 ค่าจากการออกแบบของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

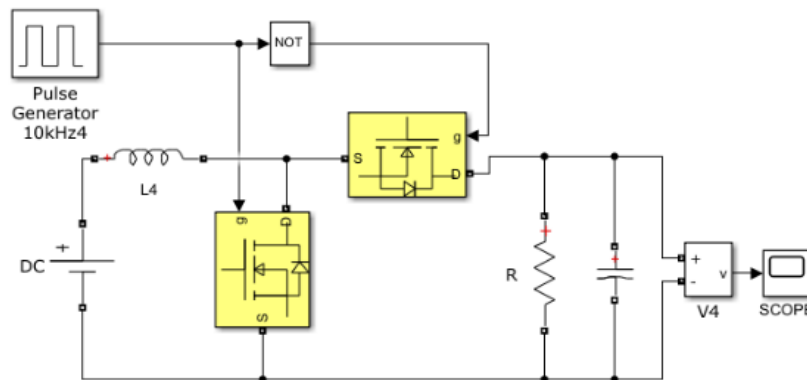
พารามิเตอร์	แรงดันอินพุต 12 โวลต์ (V_i)
	แรงดันเอาต์พุต 48 โวลต์ (V_o)
ดีวตี้ไซเคิล (D)	0.75
ความถี่การสวิตช์ (f_s)	10 kHz
ความเหนี่ยวนำ (L)	0.9 mH
คาปาซิเตอร์ (C)	2,000 μF
กำหนดค่าระลอกกระแสออก (ΔI_L)	1 แอมป์
กำหนดค่าระลอกแรงดันออก (ΔV_o)	1 โวลต์

4.2 การจำลองระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

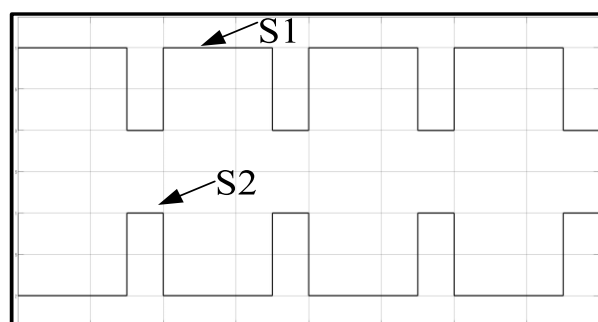
การจำลองวงจรวงจรดีซีทูดีซีบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง ประกอบด้วยบล็อกกำเนิดสัญญาณพัลส์, ดีซี โวลเตจ-ซอร์ส, ความเหนี่ยวนำ, ความต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ลอจิกเกตนอต และสโคป ดังรูปที่ 8

4.2.1 วงจรดีซีทูดีซีบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง

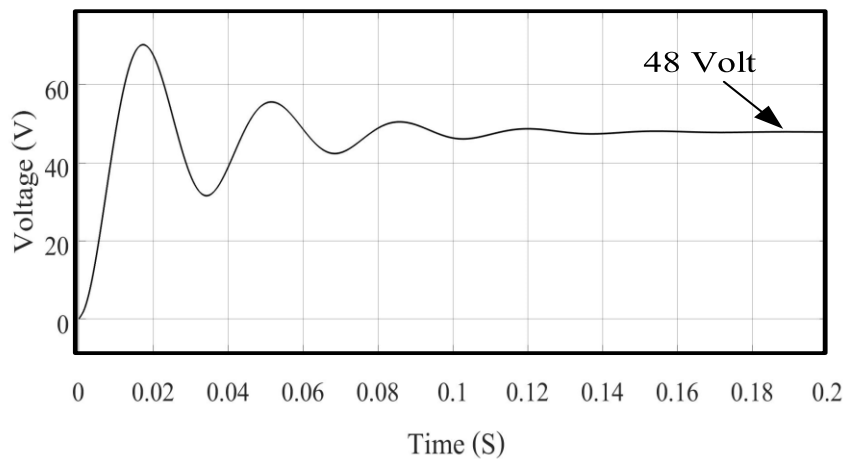
เมื่อได้ออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรดีซีทูดีซีบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางแล้วเสร็จดังในตารางที่ 1 ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 8 สัญญาณขั้วเกต S1 สัญญาณขั้วเกต S2 และแรงดันเอาต์พุต ตามที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 9 ดังนี้ ค่าดีวตี้ไซเคิลสัญญาณขั้วเกต S1 75% ค่าดีวตี้ไซเคิลสัญญาณขั้วเกต S2 25% และรูปที่ 10 แสดงแรงดันเอาต์พุต 48 โวลต์ ที่สภาวะสมดุล ตามลำดับ



รูปที่ 8 วงจรดีซีทูดีซีบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง



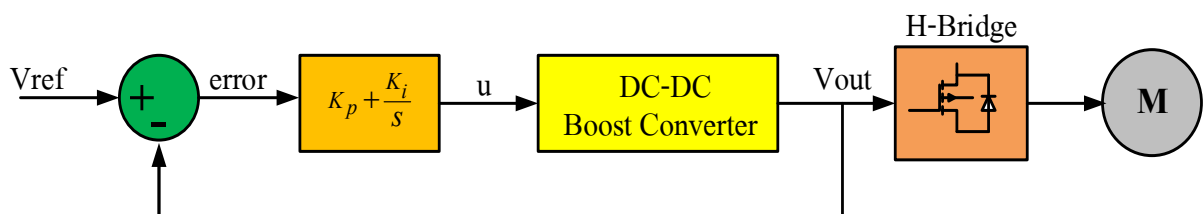
รูปที่ 9 ค่าดีวตี้ไซเคิลสัญญาณขั้วเกต S1 75 % และ S2 25%



รูปที่ 10 แรงดันเอาต์พุต 48 โวลต์

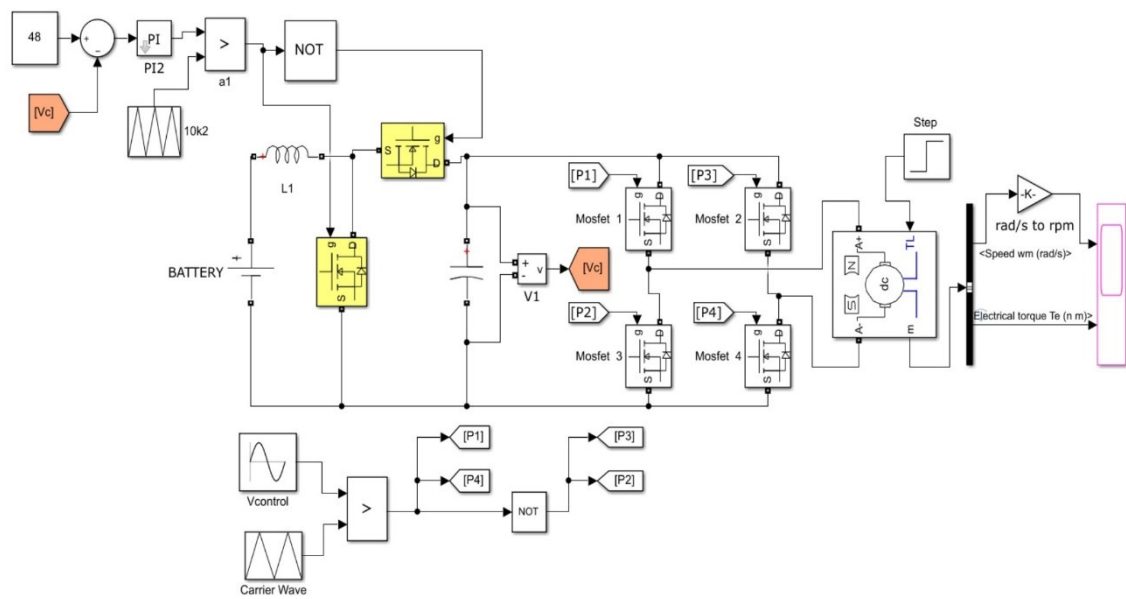
4.2.2 ระบบควบคุมวงจรถิษฐ์ชิพสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางสำหรับงานขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

วงจรถิษฐ์ชิพสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ วัตถุประสงค์เพื่อให้แรงดันควบคุมที่ชิปส์มีผลตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดและสภาวะชั่วคราว วงจรเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟีดแบ็คลิวเอ็มแบบไบโพลาร์มอดูล์ชั่นทั้งหมด เป็นระบบรวมดังรูปที่ 11 และจำลองระบบรวมด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ดังรูปที่ 12 ในงานวิจัยนี้ได้ค่า k_u และ T_u สำหรับการหาค่าพีไอด้วยวิธี Ziegler-Nichols (ZN) จากแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์ เมื่อทำงานแบบวงรอบเปิด ได้ค่า k_p เท่ากับ 0.003 และค่า k_i เท่ากับ 0.03 สำหรับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ 48 โวลต์ ในกรณีที่ k_p และ k_i เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงขึ้น ผลตอบสนองระบบจะมีโอเวอร์ชูตสูงขึ้น และเกิดการแกว่งมากขึ้น



รูปที่ 11 ระบบควบคุมทั้งหมดของวงจรถิษฐ์ชิพสคอนเวอร์เตอร์สำหรับงานขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

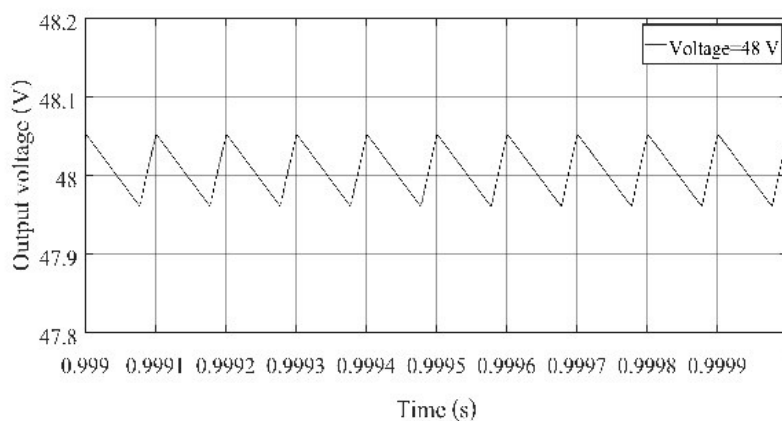
การจำลองการทำงานทั้งระบบ ดังรูปที่ 12 ประกอบด้วย ภาควิชาการควบคุมแบบพีไอ โดยทำการวัดแรงดันเอาต์พุตของ วงจรวจจรถิษฐ์ชิพสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง 48 โวลต์ เพื่อควบคุมการทำงานของ สวิตช์ของวงจรวจจรถิษฐ์ชิพสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง ให้มีแรงดันเอาต์พุตคงที่ ภาควจจระช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการมอดูเลตสัญญาณแบบไบโพลาร์



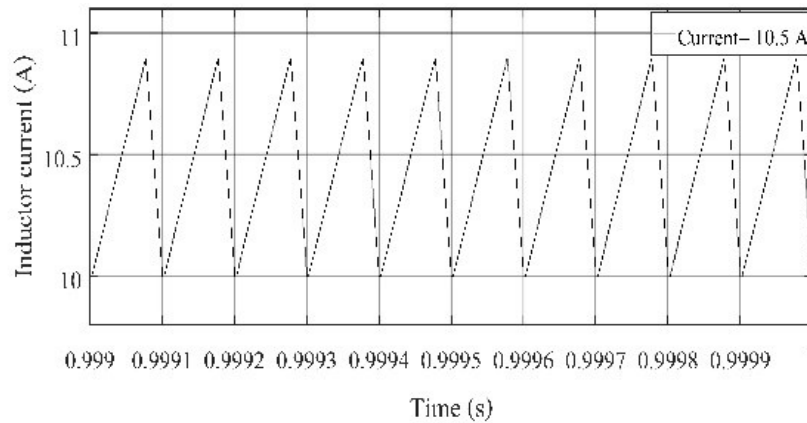
รูปที่ 12 การจำลองระบบวงจรอนุสคอนเวอร์เตอร์สำหรับงานขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

5. ผลการวิจัย

จากการออกแบบวงจรดีซิจิบูสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง และการออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบพีไอถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานขับเคลื่อนมอเตอร์ สำหรับรถไฟฟ้าได้รับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 13-14 แสดงค่า ΔV_o เมื่อทำงานที่แรงดันเอาต์พุต 48 โวลต์ มีค่า $\Delta V_o \pm 0.5$ จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่เกิน 1 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้รูปที่ 14 แสดงค่า Δi_L เมื่อทำงานที่แรงดันเอาต์พุต 48 โวลต์ มีค่า $\Delta i_L \pm 0.5$ จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่เกิน 1 แอมป์ ตามที่ได้ออกแบบไว้เช่นเดียวกัน

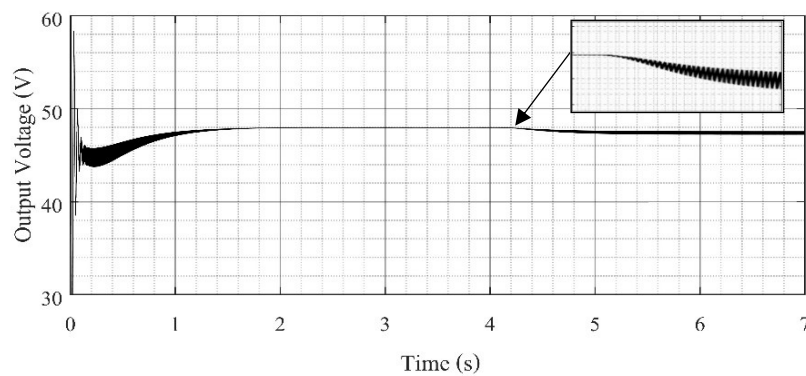


รูปที่ 13 ค่าระลอกของแรงดันเอาต์พุต 48 V

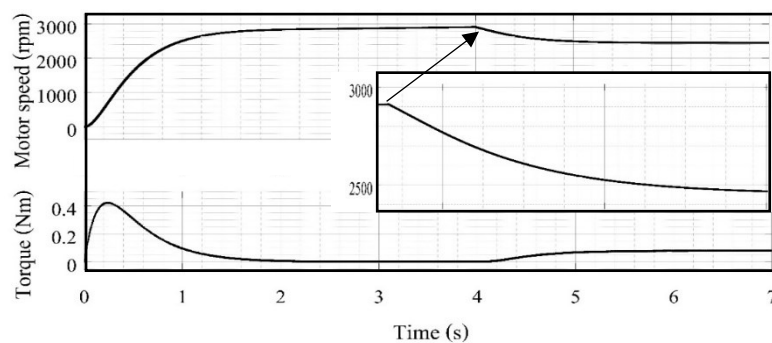


รูปที่ 14 ค่าระลอกของกระแสเอาต์พุต 10.5 A

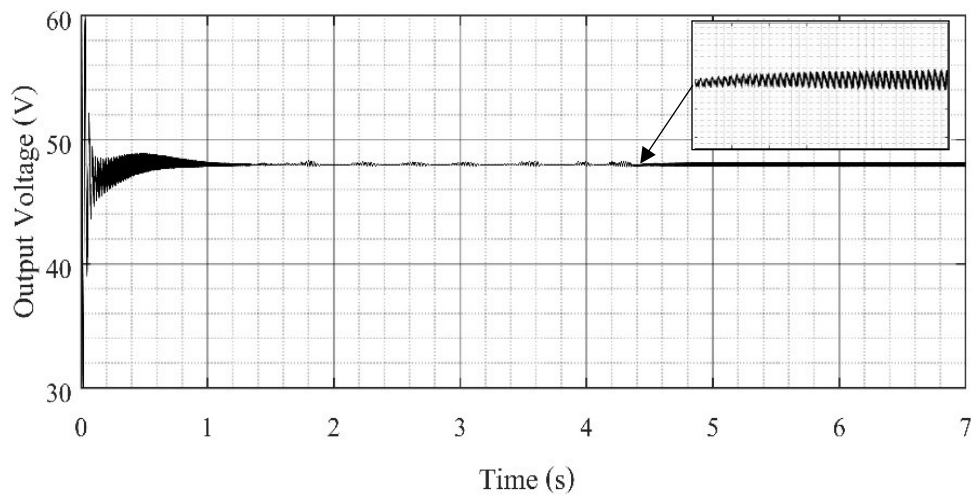
แรงดันเอาต์พุตที่ดีซีบัสเมื่อทดสอบป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ขนาด 48 โวลต์ เปรียบเทียบระหว่างไม่มีตัวควบคุมฟิโอดีซีบัส และมีตัวควบคุมฟิโอดีซีบัส พิจารณารูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีตัวควบคุมแบบฟิโอดีซีบัส แรงดันเอาต์พุตปรับตัวเข้าสู่จุดเซตพอยท์ภายในเวลา 1.8s เมื่อทดสอบจ่ายโหลด 0.08 นิวตัน ที่เวลา 4s แรงดันที่ดีซีบัสมีค่าตกลงมาที่ 47.5 โวลต์ รูปที่ 16 แสดงกราฟของความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์พบว่า ความเร็วมอเตอร์ลดลงต่ำกว่า 2500 รอบต่อนาที ขณะเพิ่มโหลด เมื่อมีการควบคุมฟิโอดีซีบัสกับแรงดันเอาต์พุตพบว่า แรงดันเอาต์พุตสามารถปรับตัวเข้าสู่จุดเซตพอยท์ ภายในเวลา 1s และเมื่อทดสอบจ่ายโหลด 0.08 นิวตัน ที่เวลา 4s แรงดันที่ดีซีบัส มีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 17 สำหรับรูปที่ 18 แสดงกราฟของความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์พบว่า ความเร็วมอเตอร์ลดลงมาที่ 2500 รอบต่อนาที ขณะเพิ่มโหลด



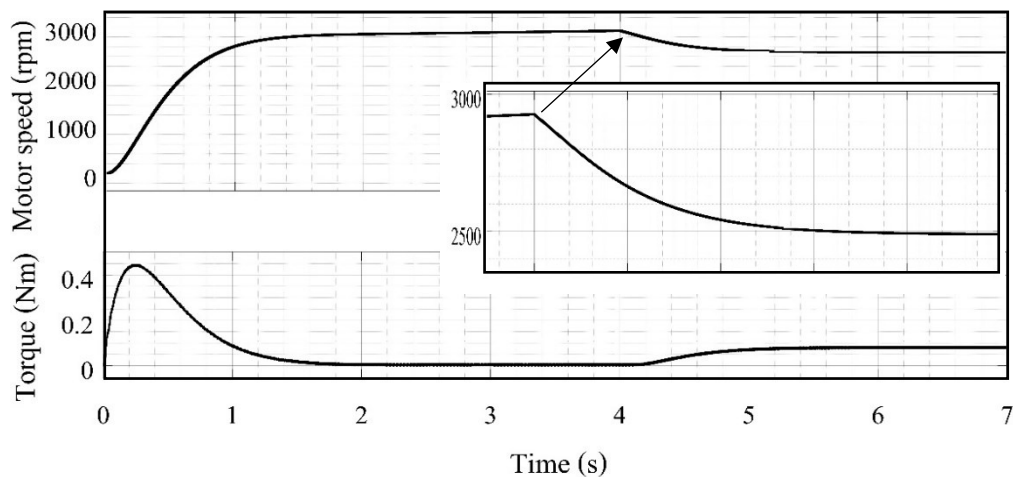
รูปที่ 15 แรงดันเอาต์พุตที่ดีซีบัส 48 โวลต์ ไม่มีมีตัวควบคุมฟิโอดีซีบัส



รูปที่ 16 กราฟของความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ ไม่มีมีตัวควบคุมฟิโอดีซีบัส

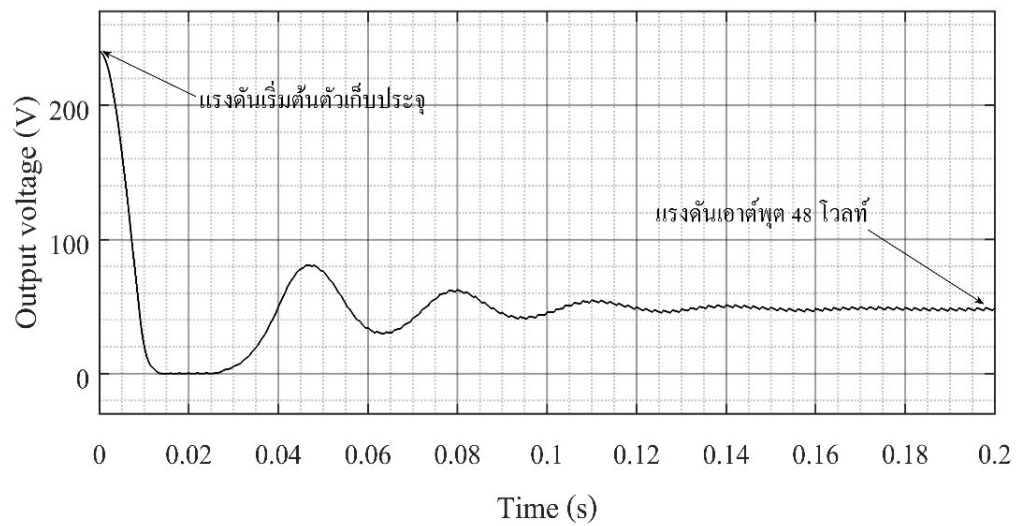


รูปที่ 17 แรงดันเอาต์พุตที่คิซิปัส 48 โวลต์ มีตัวควบคุมพีไอ

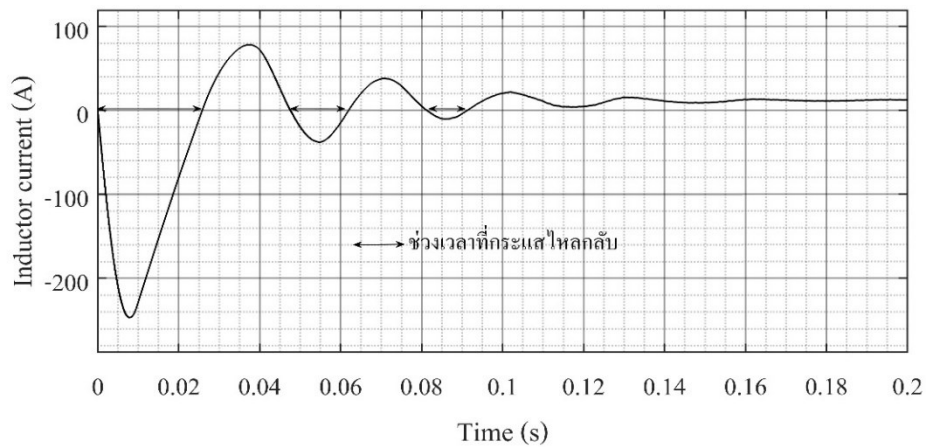


รูปที่ 18 กราฟของความเร็วกับแรงบิดของมอเตอร์ มีตัวควบคุมพีไอ

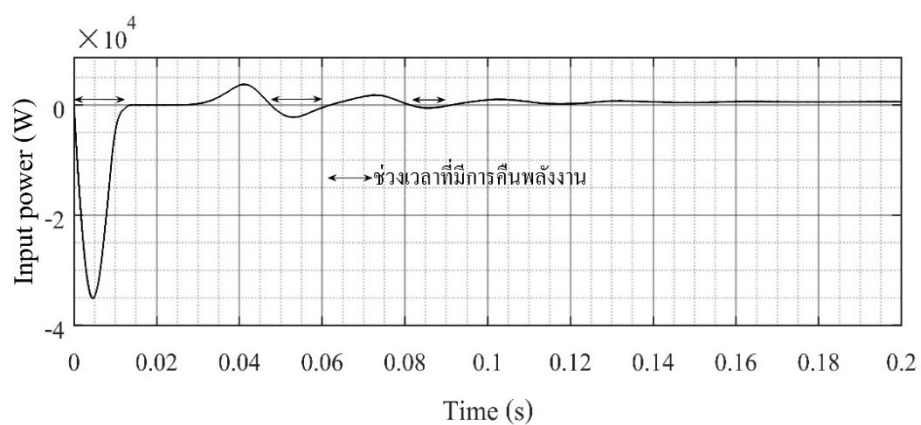
การเบรกแบบคืนพลังงานเกิดขึ้นเมื่อขับรถลงทางลาดชันและมีการเบรก การทดสอบการทำงานในโหมดคืนพลังงานทำได้โดยการกำหนดแรงดันเริ่มต้นที่ตัวเก็บประจุให้มีค่ามากกว่าแรงดันที่จุดเซทพอยต์ โดยกำหนดแรงดันเริ่มต้นไว้ที่ 240 โวลต์ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตให้กลับเข้าสู่ค่าเซทพอยต์ได้ ภายในเวลา 0.2s ที่แรงดันเอาต์พุต 48 โวลต์ ดังรูปที่ 19 สำหรับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่าน มีค่าเป็นบวกและมีค่าเป็นลบสลับกันภายในเวลา 1 วินาที โดยกระแสที่มีค่าเป็นบวก คือ กระแสที่ไหลจากแบตเตอรี่ไปยังมอเตอร์ ส่วนกระแสที่เป็นลบ คือ กระแสที่ไหลจากมอเตอร์มายังแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 20 สำหรับกำลังไฟฟ้า มีช่วงเวลาที่ เป็นบวกและมีค่าเป็นลบสลับกันภายในเวลา 1 วินาที เช่นเดียวกันกับกระแสไฟฟ้า ซึ่งช่วงเวลาที่กำลังไฟฟ้าเป็นลบ คือ ช่วงที่มีการคืนพลังงานกลับไปยังแบตเตอรี่ มีค่าสูงสุดถึง 35 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 21 ซึ่งจะเห็นว่าในโหมดคืนพลังงานนี้ กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสามารถไหลย้อนกลับไปยังแบตเตอรี่ได้



รูปที่ 19 แรงดันเอาต์พุตที่ติดตั้งเมื่อทดสอบในโหมดการคืนพลังงาน



รูปที่ 20 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำเมื่อทดสอบในโหมดการคืนพลังงาน



รูปที่ 21 พลังงานทดสอบในโหมดการคืนพลังงาน

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรดิจิทัลดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่สามารถทำงานในโหมดขับเคลื่อนและทำงานในโหมดคืนพลังงาน เพื่อประยุกต์ใช้กับการขับเคลื่อนรถมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า และมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์ ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 48 โวลต์ ด้วยวงจรดิจิทัลดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่สามารถจ่ายพลังงานไปยังมอเตอร์ เมื่อทำงานในโหมดขับเคลื่อน และจ่ายพลังงานกลับไปยังแบตเตอรี่ เมื่อทำงานในโหมดคืนพลังงานเป็นข้อดี ทำให้มีพลังงานไฟฟ้าใช้นานขึ้น มีระบบควบคุมแรงดันที่ซับซ้อนด้วยตัวควบคุมแบบพีโอสามารถควบคุมแรงดันได้ที่ 48 โวลต์ สอดคล้องกับค่าตัวชี้วัด 75% ตามที่ออกแบบไว้ในตารางที่ 1 และจากการออกแบบค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ไม่เกิน 1 โวลต์ และค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 1 แอมป์ ผลการจำลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ จากการเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตที่ซับซ้อนระหว่างไม่มีตัวควบคุมพีโอกับมีตัวควบคุมแบบพีโอพบว่า แบบที่มีการควบคุมแบบพีโอจะเกิดโอเวอร์ชhoot และเข้าสู่เซตพอยท์ได้เร็วกว่าโดยใช้เวลา 1 วินาที ขณะที่ไม่มีตัวควบคุมพีโอ จะไม่เกิดโอเวอร์ชhoot และใช้เวลาเข้าสู่เซตพอยท์ 1.8 วินาที ซ้ำกว่าแบบแรกถึง 0.8 วินาที นอกจากนี้ เมื่อทำการป้อนโหลดที่เวลาเท่ากัน การควบคุมแบบพีโอสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า 48 โวลต์ ที่ซับซ้อนเอาไว้ได้ ขณะที่ไม่มีตัวควบคุมพีโอ แรงดันที่ซับซ้อนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกันพบว่า ระบบที่มีการควบคุมแบบพีโอสามารถรักษาความเร็วได้ดีกว่า เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเท่ากัน ซึ่งเป็นข้อดีของการนำระบบควบคุมแบบพีโอเข้ามาใช้รักษาระดับแรงดันที่ซับซ้อนให้คงที่ แม้มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดก็ตาม การทดสอบในโหมดคืนพลังงานพบว่าแรงดันของคาปาซิเตอร์ลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ภายในเวลา 0.02 วินาที และเข้าสู่จุดเซตพอยท์ภายในเวลา 0.2 วินาที ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำลดลงจนติดลบอย่างรวดเร็วสูงสุด 240 แอมป์ ภายในเวลา 0.02 วินาที ซึ่งเป็นช่วงกระแสไหลกลับเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ และยังมีส่วนที่กระแสไหลกลับอีกเล็กน้อยจนถึงเวลา 0.1 วินาที และเข้าสู่จุดเซตพอยท์ภายในเวลา 0.2 วินาที จากผลของแรงดันไฟฟ้าที่ซับซ้อน และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายกลับไปยังแบตเตอรี่เมื่อทดสอบในโหมดคืนพลังงาน จากการออกแบบ การคำนวณ และการจำลองระบบที่นำเสนอ แสดงให้เห็นว่าสามารถนำวิธีดังกล่าวไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสร้างชุดทดสอบการทำงานจริงได้เป็นอย่างดี

7. ข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอการคำนวณการออกแบบวงจรดิจิทัลดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางที่สามารถทำงานในโหมดขับเคลื่อนและทำงานในโหมดคืนพลังงาน เพื่อประยุกต์ใช้กับการขับเคลื่อนรถมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าด้วยการจำลองการทำงานทั้งระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink การควบคุมวงจรดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบพีโอได้ถูกประเมินผลการทำงาน แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ จึงควรมีการพัฒนาต่อยอดด้านการเพิ่มระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วย เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรดิจิทัลดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ และควรทดสอบผลกระทบจากโหลดของมอเตอร์ที่มีต่อระบบการเบรกแบบคืนพลังงานด้วย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hemasuk, K & Po-Ngam, S. (2017). The Simplified Regenerative Boost Converter for Electric Vehicle Applications. International Electrical Engineering Congress (iEECON) (1-4). Pattaya, Thailand.
- [2] Rahman, M. M., Uddin, M. N. & Islam, M. K.. (2015). Integration of Bi-Directional DC-DC Converter and Highly Efficient Boost Converter for Electric Vehicles Applications. IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems(687-691). Sydney, NSW, Australia.
- [3] Li, X., Zhang, W., Li, H., Xie, R. & D. Xu, D. (2011). Design and Control of Bi-Directional DC/DC Converter for 30kW Fuel Cell Power System. 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia(1024-1030). Jeju, Korea (South).

- [4] Das, R. & UddinChowdhury, M. A. (2015). PI Controlled Bi-directional DC-DC Converter (BDDDC) and Highly Efficient Boost Converter for Electric Vehicles. 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)(1-5). Dhaka, Bangladesh.
- [5] Lee, Y., Khaligh, A. & Emadi, A. (2009) .Advanced Integrated Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 58(8): 3970-3980.
- [6] Mehta, S., Mittal, H. & Venkatesan, N. (2014) .Design and Implementation of Intelligent Controller Based Boost Converter for Electric Vehicle Applications. IEEE Student Conference on Research and Development(1-6). Penang, Malaysia.
- [7] Anuja, N., & Harshal, S. (2014). Unipolar and Bipolar PWM Inverter. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 1(7): 237-243.
- [8] Azmi, S. A., Shukor, A. A. & Rahim, S. R. A. (2018) .Performance Evaluation of Single-Phase H-Bridge Inverter Using Selective Harmonic Elimination and Sinusoidal PWM Techniques. IEEE 7th International Conference on Power and Energy (PECon)(67-72). Kuala Lumpur, Malaysia.
- [9] Zhou, L.(2005). Evaluation and DSP Based Implementation of PWM Approaches for Single-Phase DC-AC Converters. (The degree of Master of Science, The florida state university famu-fsu college of engineering).