

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

The Sliding Mode Controller Design of Hydrogen-Powered Electric Bicycle Drive System

วุดินันท์ สุระขันต์¹ กองพัน อารีรักษ์² อภิชัย สุยะพันธ์³ และ จักรกริช ภักดีโต^{4*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

⁴ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author : jakkritpa@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์สำหรับควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไปยังโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบจักรยานไฟฟ้า เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าคงที่และผลตอบสนองที่ดี การออกแบบจะใช้วิธีการสุ่มค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน จากนั้นนำไปตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไปยังโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ถึงค่าพิกัด แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780 : 2020 ยิ่งไปกว่านั้น ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบยังมีความรวดเร็วสำหรับนำไปใช้กับชุดทดสอบจริงในอนาคต

คำสำคัญ: ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ จักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

Abstract

This paper presents the design of a sliding mode controller for a half-bridge bidirectional DC-DC converter which is used to control the power from a fuel cell stack feeding to a constant power load in an electric bike application. The aim is the output voltage regulation achieving a good dynamic response. The trial and error technique is used for design process. This controller is then evaluated via simulation results from MATLAB/SIMULINK. The simulation results demonstrate that the proposed sliding mode controller can effectively control the power from the fuel cell to until the constant power load reaches up the rated power. The output voltage regulation can achieve the ISO 21780: 2020 standard. Moreover, the system can provide the fast dynamic responses for the experiment in the future.

Keywords: sliding mode control, half bridge bidirectional DC/DC converter, hydrogen electric bike

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากไฮโดรเจน (H_2) ถือว่าเป็นพลังงานสะอาดอีกหนึ่งทางเลือกที่นำไปสร้างเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยผ่านการทำปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกับออกซิเจน (O_2) ผ่านแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่เรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) อีกทั้งกระบวนการสร้างพลังงานไฟฟ้าไม่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1-2]

ด้วยเหตุผลข้างต้น มีแนวโน้มว่าการขนส่งในอนาคตจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากในระบบยานยนต์ไฟฟ้า (EVs) อีกหนึ่งในยานพาหนะในปัจจุบันที่มีการพัฒนาให้ใช้พลังงานสะอาดคือ จักรยานไฟฟ้า (E-Bike) ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากใช้งานง่ายและสะดวก อย่างไรก็ตามการสร้างกำลังไฟฟ้าจากพลังงานไฮโดรเจนยังมีความไม่คงที่ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์เชื้อเพลิง [1-4] จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า บทความนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การออกแบบตัวควบคุมของเพื่อกำลังแรงดัน วงจรที่นำมาประยุกต์ คือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ วงจรดังกล่าวสามารถใช้งานได้ทั้งโหมดขับเคลื่อน (driving mode) และโหมดแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ (regenerative brake mode) [5-6] อย่างไรก็ตามบทความนี้จะมุ่งเน้นในโหมดขับเคลื่อนเนื่องจากเป็นโหมดขับเคลื่อนหลัก เพื่อให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไปยังโหลดให้มีการควบคุมให้ระดับแรงดันเอาต์พุตคงที่ ทั้งนี้ระบบควบคุมเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการประเมินสมรรถนะของระบบ เช่น การตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ การป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ การควบคุมทิศทางการจ่ายพลังงาน และการจัดการพลังงาน เป็นต้น บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode controller : SMC) สำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ที่รวดเร็วเหมาะสมสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น [6-8] สำหรับโหลดที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าในบทความนี้จะกำหนดให้เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลด

ดังกล่าวขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้า ณ ขณะนั้น การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีการกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) โดยอาศัยผลรวมแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ เนื่องจากการนำไปใช้งานมีความง่ายในทางปฏิบัติและการออกแบบที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป [6-8] สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะใช้วิธีการสุ่มค่า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าตัวควบคุมที่ถูกออกแบบสามารถควบคุมระบบจักรยานไฟฟ้าได้จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ผลการตอบสนองของระบบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไปยังโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นไปตามมาตรฐาน รวมทั้งมีสมรรถนะการควบคุมในส่วนของการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือส่วนบทนำ ส่วนที่ 2 คือการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 คือส่วนการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ส่วนที่ 4 คือการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม และส่วนที่ 5 สรุปผลและแนวทางสำหรับการทำวิจัยในอนาคต

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เซลล์เชื้อเพลิง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตีสเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และส่วนที่ 3 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งเปรียบเสมือนโหลดมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนสำหรับจักรยานไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
V_{FC}	16.2 V	แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงพิกัด 500 W [9]
L	0.72 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้	รายละเอียด
C_o	90 mF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์
V_o^{ref}	48 V	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิง
P_{CPL}	0 - 500 W	ระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบจักรยานไฟฟ้า

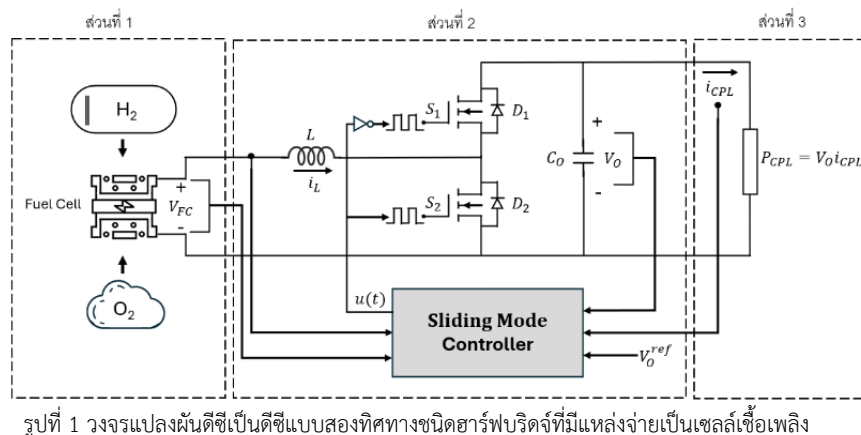
3. การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนนั้นจะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวตามรูปที่ 1 แบบจำลองแสดงได้ดังสมการที่ (1) เมื่อ V_{FC} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input voltage) ของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ i_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ P_{CPL} คือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และ $u(t)$ คือ สัญญาณพัลส์เบิเลียม (Pulse With Modulation : PWM) สำหรับควบคุมสวิตช์ [5-8]

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{V_{FC}}{L} + \frac{(u(t)-1)V_o}{L} \\ \dot{V}_o = \frac{-P_{CPL}}{CV_o} + \frac{(1-u(t))i_L}{C} \end{cases} \quad (1)$$

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ จำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (S) ซึ่งบทความนี้เลือกกำหนดให้เป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะที่อาศัยความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า สมการพื้นผิวการเลื่อนสามารถแสดงได้ในสมการที่ (2)

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (2)$$



เมื่อ a , b และ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม e_1 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้า e_2 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 คือ ค่าปริพันธ์ของผลรวมความคลาดเคลื่อนระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า สมการความสัมพันธ์ e_1 , e_2 และ e_3 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} e_1 = i_{ref} - i_L \\ e_2 = V_o^{ref} - V_o \\ e_3 = \int [e_1 + e_2] dt \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ $i_{ref} = K[V_o^{ref} - V_o]$ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ K คือค่าอัตราขยายความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า

สำหรับตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว ระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบของพื้นผิวการเคลื่อนตามสมการพื้นผิวการเคลื่อนที่กำหนด ซึ่งในอุดมคติความสัมพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนจะเท่ากับศูนย์ ($S = 0$) ในขณะที่ตัวควบคุมของระบบเคลื่อนที่บนระนาบและอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ($\dot{S} = 0$) ส่งผลให้ระบบเข้าสู่การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยจะทำให้มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนด และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ ดังนั้นการพิจารณาหาอนุพันธ์สมการพื้นผิวการเคลื่อนที่ได้จากสมการที่ (1) ร่วมกับสมการที่ (2) และสมการที่ (3) สามารถหาสมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนแสดงในสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} \dot{S} = & \frac{-aV_{in}}{L} - \frac{au(t)V_o}{L} + \frac{aV_o}{L} + \frac{bP_{CPL}}{CV_o} - \frac{bi_L}{C} + \frac{bu(t)i_L}{C} + \frac{aKP_{CPL}}{CV_o} \\ & - \frac{aKi_L}{C} + \frac{aKu(t)i_L}{C} + m[(K+1)[V_o^{ref} - V_o] - i_L] \end{aligned} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) สามารถนำไปจัดรูปเพื่อหาค่าสัญญาณการควบคุม (u_{eq}) ที่ได้จากการคำนวณในสมการดังกล่าว โดยจะกำหนดให้ $u(t) = u_{eq}$ เป็นสัญญาณการควบคุมที่จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณพาดเพื่อสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันตีสเป็นตีสแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ ภายใต้เงื่อนไขการพิจารณาว่า อนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ซึ่งจากสมการจะพบว่าพารามิเตอร์ a , b , m และ K เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ต้องมีการออกแบบ โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป อย่างไรก็ตามในสมการของตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนจำเป็นต้องมีการวัดค่าแรงดันอินพุตจากเซลล์เชื้อเพลิงที่มีความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะนำมาคำนวณหาค่าสัญญาณการควบคุมที่เหมาะสมสมการสำหรับการคำนวณ u_{eq} แสดงได้ดังสมการที่ (5)

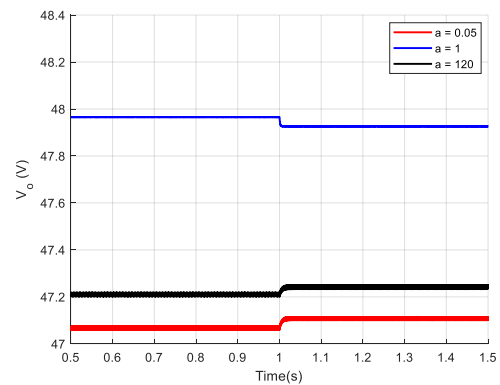
$$u_{eq} = \frac{i_L[V_o(bL+aKL)] - P_{CPL}[bL+aKL] + V_o[aCV_{in} - aCV_o - mLK[(K+1)[V_o^{ref} - V_o] - i_L]]}{V_o[-aCV_o + i_L(bL+aKL)]} \quad (5)$$

4. การตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม

จากการคำนวณ u_{eq} ในสมการที่ (5) สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนที่นำเสนอประกอบด้วยพารามิเตอร์ a , b , m และ K สำหรับการออกแบบในบทความนี้จะใช้วิธีสุ่มค่าและการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาจากการเพิ่มค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 100 W ไปเป็น 200 W และกำหนดแรงดันอ้างอิงไว้ที่ 48 V โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐาน ISO 21780 : 2020 สำหรับโวลเตจยานยนต์ ซึ่งกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ 0.5 % ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดในการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

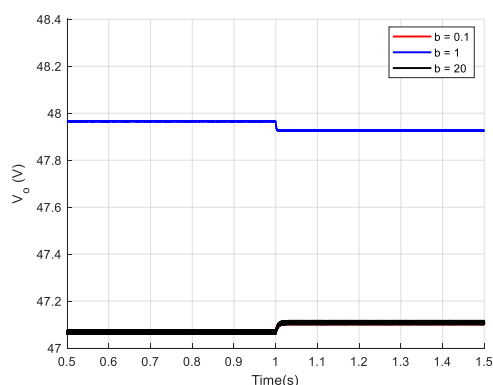
ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ a ให้มีค่าคือ 0.05, 1 และ 120 โดยให้ค่าพารามิเตอร์ $b = 1$, $m = 8000000$ และ $K = 155$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งผลลัพธ์จากรูปพบว่า เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ $a = 1$ จะทำให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามมาตรฐาน ส่วนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ $a = 0.05$ และ $a = 120$ ไม่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้อยู่ในมาตรฐานได้ ดังนั้นจึงกำหนด $a = 1$ เพื่อดำเนินการปรับพารามิเตอร์อื่นเป็นลำดับถัดไป



รูปที่ 2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

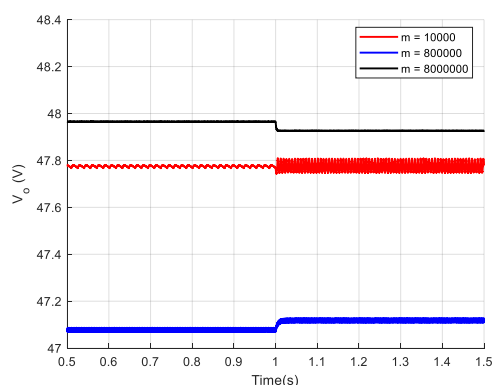
ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ b ให้มีค่าคือ 0.01, 1 และ 20 โดยให้ค่าพารามิเตอร์ $a = 1$, $m = 8000000$ และ $K = 155$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งผลลัพธ์จากรูปพบว่า เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ $b = 1$ จะทำให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามมาตรฐาน ส่วนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ $b = 0.1$ และ $b = 20$ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้มีค่าเท่ากันและอยู่ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งหมายความว่าไม่เหมาะสมสำหรับใช้ควบคุมระบบ ดังนั้นจึงเลือก $b = 1$ เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ที่เหลือเป็นลำดับถัดไป



รูปที่ 3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ m ให้มีค่าคือ 10000, 800000 และ 8000000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 1$, $b = 1$ และ $K = 155$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งผลลัพธ์จากรูปพบว่า เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ $m = 10000$ และ $m = 8000000$ จะทำให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามมาตรฐาน แต่ค่าพารามิเตอร์ $m = 10000$ มีค่าเข้าใกล้แรงดันที่อ้างอิงน้อยกว่าและเกิดความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวขึ้น ส่วนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ $m = 8000000$ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน เมื่อตรวจสอบจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ m น้อยลงไปจะยิ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเลือก $m = 8000000$

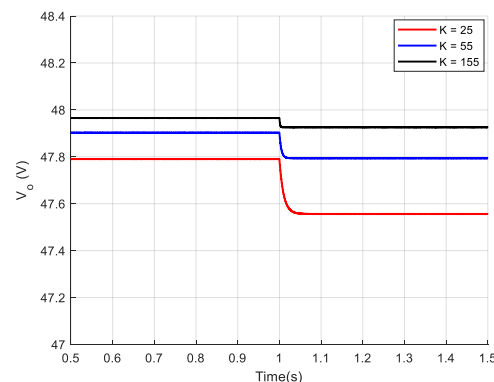


รูปที่ 4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ K ให้มีค่าคือ 25, 55 และ 155 โดยให้ค่าพารามิเตอร์ $a = 1$, $b = 1$ และ $m = 8000000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลลัพธ์จากรูปพบว่า เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ $K = 55$ และ $K = 155$ จะทำให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามมาตรฐาน แต่ค่าพารามิเตอร์ $K = 55$ มีค่าเข้าใกล้แรงดันที่อ้างอิงที่น้อยกว่าและผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่ช้ากว่า ส่วนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ $K = 25$ แรงดันไฟฟ้า

เอาต์พุตที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน เมื่อตรวจสอบจะพบว่าค่าการปรับค่าพารามิเตอร์ K น้อยลงไปจะยิ่งส่งผลต่อค่าแรงดันเอาต์พุตที่ลดลงและผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่ช้าลง ดังนั้นเลือก $K = 155$



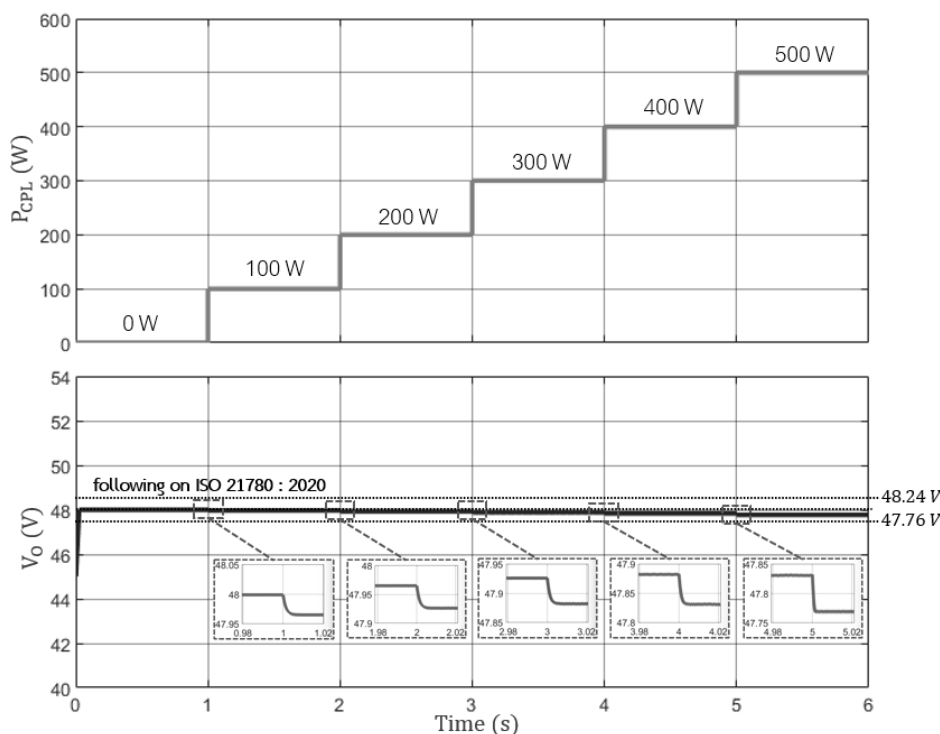
รูปที่ 5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

จากผลการออกแบบโดยการสุ่มค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบของจักรยานไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายเป็นเซลล์เชื้อเพลิง คือ $a = 1$, $b = 1$, $m = 8000000$ และ $K = 155$ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมไปตรวจสอบสมรรถนะกับระบบที่พิจารณาด้วยเงื่อนไขการเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าจาก 0 W ถึงที่กัก 500 W โดยผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงตามรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 พบว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าลดลงเป็นขั้นบันได แต่ยังคงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้นั้นให้อยู่ในมาตรฐาน ISO 21780:2020 ที่แรงดันอ้างอิง 48 V ทำให้ระบบอยู่ในช่วงผลตอบสนองที่ 47.76 V ถึง 48.24 V ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดคือ 0.5 % และพบว่าในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว ทำให้มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสำหรับระบบจักรยานไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายเป็นเซลล์เชื้อเพลิง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ดฟรีดจ์ในระบบจักรยานไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายเป็นเซลล์เชื้อเพลิง โดยการออกแบบใช้วิธีการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จากนั้นนำเสนอการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าตรงตามมาตรฐาน ISO 21780 : 2020 ทั้งนี้ระบบยังมีการตอบสนองเชิงพลวัตรวดเร็วในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง และควบคุมความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงได้ อย่างไรก็ตามการออกแบบยังใช้วิธีการสุ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และยังไม่มียุทธวิธีทั่วไปสำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าว เพื่อต่อยอดงานวิจัยในอนาคตการใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 6 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Faizan, S. Ali, and A. Ahmad, "An overview of Fuel Cell Based Distribution Generation Integration," 2019 IEEE Global Conference on Renewable Energy and Energy Efficiency (REnergy), India, 2019, pp. 1-6.
- [2] W. Surakan, M. Niyomthai, A. Suyapan, T. Narongrit and K. Areerak, "The Cascade PI Controller Design for Hydrogen Electric Bike Systems," in 2025 13th International Electrical Engineering Congress (IIECON), 2025, pp. 1-4.
- [3] R. Putala and V. Ferencey, "Hydrogen Fuel Cell System Modeling Approaches," 2025 Cybernetics & Informatics (K&I), 2025, pp. 1-7.
- [4] S. Njoya M., O. Tremblay and L.-A. Dessaint, "A Generic Fuel Cell Model for the Simulation of Fuel Cell Vehicles," 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Canada, 2009, pp. 1-8.
- [5] K. M. Kanthi and D. M. Abraham, "PWM-Based Sliding Mode Current Controller for Bidirectional DC-DC Converters in Electric Vehicles," in Proc. Int. Conf. on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), Kerala, India, Jan. 2020, pp. 1-6.
- [6] อภิชัย สุษะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, และ กองพันธ์ อารีรักษ์, "การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์," การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16, สุรินทร์, ประเทศไทย, 7-9 พ.ค. 2567. หน้า 166-170.
- [7] อภิชัย สุษะพันธ์, อภิรักษ์ ศรีชนะ, และ กองพันธ์ อารีรักษ์, "การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีแบบสองทิศทางชนิดฮาร์ฟบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 (EECON-47), อุตรธานี, ประเทศไทย, 13-15 พ.ย. 2567. หน้า 233-237.
- [8] สาธิต ชลสถิตจำเริญ, แบบจำลองคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่รวมพารามิเตอร์ของตัวควบคุม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2013.
- [9] Horizon Educational, "H-Series Fuel Cell Stacks," H-Series Brochure, pp. 4, [Online]. Available: <https://www.horizoneducational.com>, [Accessed: Sep. 29, 2024].