



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดีซี

The sliding mode controller design for buck converter fed by AC-DC power systems

สุรบัดินทร์ แดงดอน¹ กองพัน อารีรักษ์^{1*} อภิชัย สุยะพันธ์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10140

Surabadin Daengdon¹ Kongpan Areerak^{1*} Apichai Suyapan²

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

* Corresponding author

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

วันที่รับบทความ 6 ธันวาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 กุมภาพันธ์ 2568; วันที่ตอบรับบทความ 5 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่บางครั้งอาจทำให้สมรรถนะของระบบไม่เป็นไปตามที่ต้องการเนื่องจากตัวควบคุมพีไออาจให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ช้า เกิดการกวัดแกว่งของสัญญาณได้ง่าย อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการรบกวนอีกด้วย ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเป็นตัวควบคุมที่มีความคงทน อีกทั้งยังให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่รวดเร็ว โดยการออกแบบจะอาศัยวิธีการสุ่มค่าและจะเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนกับตัวควบคุมพีไอด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่าน SimPowerSystemTM บนโปรแกรม MATLAB และผลจากการทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนให้สมรรถนะการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ที่รวดเร็วกว่า รวมถึงยังไม่ปรากฏการพุ่งต่ำและการพุ่งเกินอีกด้วย

คำสำคัญ

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมพีไอ วงจรแปลงผันแบบบัก ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี

Abstract

The proportional-integral (PI) controllers are widely used in many applications. However, the system performance is occasionally undesired. The slowly dynamic response, the signal oscillation, and the vulnerability to disturbances can occur when the PI controller is applied. Therefore, this article presents the sliding mode controller (SMC) design for buck converter fed by AC-DC power systems. The SMC is considered because of its merit including the rapid dynamic response and robustness. The design process is based on a trial and error method. The intensive time-domain simulation using SimPowerSystemTM on MATLAB and the experimental rig built in the laboratory are used for the controller performance comparison between the SMC and PI controllers. The results show that the SMC can provide the system responses better than the PI controller in terms of rise time, settling time, undershoot, and overshoot.

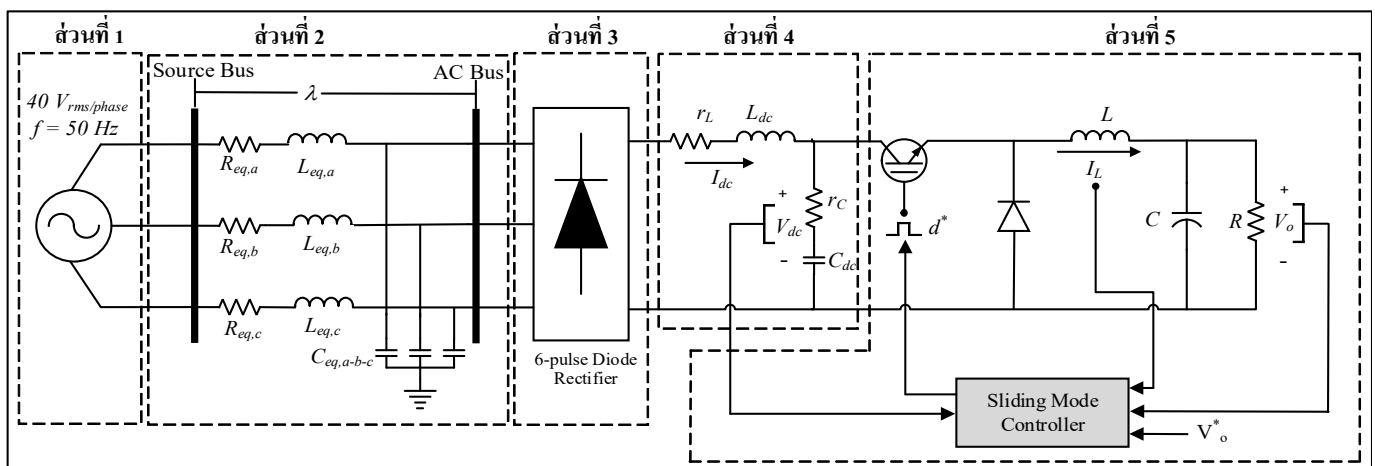
Keywords

sliding mode controller, PI controller, Buck converter, AC-DC power system

1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม (controlled power converter) ทั้งวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี เอซีเป็นดีซี และเอซีเป็นเอซี ได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ระบบควบคุมความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicles : EVs) ระบบขับเคลื่อนของรถไฟไฟฟ้า (electric railway) ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (more electric aircraft : MEA) และระบบแปลงผันกำลังสำหรับพลังงานทดแทน (renewable energy) เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมนิยมใช้ตัวควบคุมพื้นฐาน เช่น ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) [1-5] ที่มีข้อดีคือสามารถออกแบบได้ง่ายแม้ระบบจะมีความซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้อีกด้วย [5-6] อย่างไรก็ตามผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ของตัวควบคุมพีไอในบางครั้งยังปรากฏการพุ่งเกิน (overshoot) ที่สูง อีกทั้งยังมีช่วงเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาเข้าที่ (settling time) ที่นานอีกด้วย [7-8] ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาตัวควบคุมต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยตัวควบคุมที่น่าสนใจคือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีความคงทน

(robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบและสิ่งรบกวนภายนอก (disturbance) อีกทั้งยังมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว และปรากฏการพุ่งเกินที่ต่ำ ถึงแม้ว่าในบางครั้งอาจปรากฏการสั่น (chattering) ของสัญญาณ แต่สามารถออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์นี้ได้ [9-19] ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยจากงานวิจัยในอดีต พบว่าวงจรแปลงผันแบบบักส่วนใหญ่จะมีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ ในขณะที่แหล่งจ่ายที่พิจารณาในบทความนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่คงที่ โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับโหลดของระบบ ทำให้ต้องมีการนำเอาแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดังกล่าวมาพิจารณาร่วมในการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของงานวิจัยในบทความนี้ การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) สำหรับใช้ในการควบคุม ซึ่งบทความนี้ได้กำหนดให้สมการพื้นผิวการเลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ (linear combinations of the states) เนื่องจากสามารถพิจารณา



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักได้ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [20-23] อย่างไรก็ตามตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นบทความนี้จึงออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการสุ่มค่า (trial and error) และเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมพีโอจึงได้ดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมดังกล่าวทั้งสองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีผลการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ดีและรวดเร็ว โดยไม่พบการพุ่งเกินและพุ่งต่ำ (undershoot) อีกทั้งยังมีเวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่ที่น้อยกว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใช้ตัวควบคุมพีโอ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีโอ

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 บทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยอาศัยวิธีการสุ่มค่าและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของระบบเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมพีโอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ 5 เป็นสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล ส่วนที่ 2 สายส่งกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสไปยังวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรเรียง

กระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 4 วงจรกรองสัญญาณดีซี (DC-Link filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากส่วนที่ 3 ให้เรียบและคงที่มากขึ้น และส่วนที่ 5 วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
f	50 Hz	ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
L_{eq}	142.45 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.0956 Ω	ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า
L_{dc}	40.78 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_L	0.2 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc}	1,051.55 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
r_C	0.28 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
L	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก
C	1,000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัก
R	10 Ω	โหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

3. การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนดังบล็อกสีเทาของรูปที่ 1 โดยการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนนั้นจำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน ซึ่งในบทความนี้ได้กำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้น

ของตัวแปรสถานะดังแสดงในสมการที่ (1) เนื่องจากสามารถนำมาพิจารณาพร้อมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักได้ [20-23]

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (1)$$

เมื่อ e_1 เป็นค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า e_2 เป็นค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 เป็นค่าปริพันธ์ของผลรวม e_1 และ e_2 ดังแสดงในสมการที่ (2) สมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$e_1 = I_L^* - I_L \quad (2)$$

เมื่อ I_L^* คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงคำนวณได้จาก $K(V_o^* - V_o)$ และ I_L คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก

$$e_2 = V_o^* - V_o \quad (3)$$

เมื่อ V_o^* คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกอ้างอิง และ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก

$$e_3 = \int (e_1 + e_2) dt \quad (4)$$

ดำเนินการแทนสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (1) จะได้สมการพื้นผิวการเลื่อนแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$S = [-a-b] \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} - aK(V_o) + m[(K+1)(V_o^* - V_o) - I_L] \quad (5)$$

เมื่อระบบมีการควบคุมและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (steady state) ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักจะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง นั่นคือ ระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบของพื้นผิวการเลื่อนตามสมการพื้นผิวการเลื่อนซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนเท่ากับศูนย์

($S = 0$) และอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนเท่ากับศูนย์ ($\dot{S} = 0$) [20-23] ดังนั้นเมื่อหาอนุพันธ์ของสมการที่ (5) จะได้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนแสดงได้ดังสมการที่ (6) ดังนี้

$$[-a-b] \begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} - aK(\dot{V}_o) + m[(K+1)(V_o^* - V_o) - I_L] = 0 \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะพบว่า มีตัวแปร $\dot{I}_L$ และ $\dot{V}_o$ ปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวคือ ตัวแปรสถานะในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (7) [20-23] โดยที่ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (input) ของวงจรแปลงผันแบบบักที่ได้มาจากแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองสัญญาณดีซี ซึ่งจะมีค่าไม่คงที่และขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก และ $u(t)$ คือ สัญญาณการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (pulse width modulation : PWM) ที่จะได้มาจากตัวควบคุม

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (7)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักในสมการที่ (7) เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร หากนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนดังกล่าว บทความนี้จึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method GSSA method) และอาศัยการประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time invariant model) [24-28] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (8)$$

โดยที่ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ (6) ร่วมกับสมการที่ (8) และกำหนดให้ $u_{eq} = d$ จะได้สมการของตัวควบคุมใหม่สำหรับการควบคุมระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (9) ดังนี้

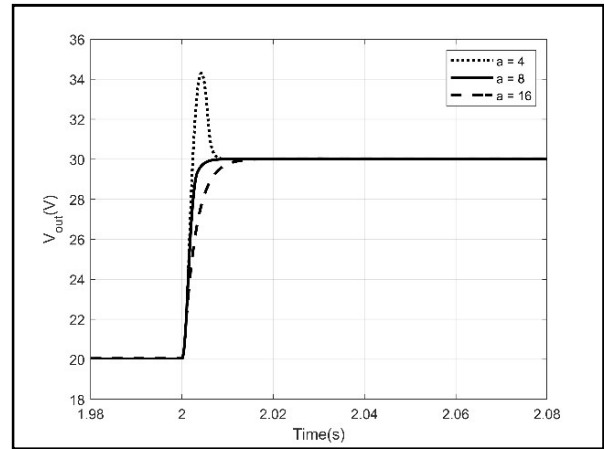
$$u_{eq} = \frac{V_o}{V_{dc}} \alpha - \frac{I_L}{V_{dc}} \beta + \frac{V_o^*}{V_{dc}} \gamma \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \alpha &= \frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \\ \beta &= \frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \\ \gamma &= \frac{mRLC(K+1)}{aRC} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (9) จะพบว่า R , L และ C เป็นค่าพารามิเตอร์ของระบบ V_{dc} , I_L และ V_o เป็นสัญญาณที่ต้องมีการวัด ในขณะที่พารามิเตอร์ a , b , m และ K เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใหม่ที่ต้องการจะปรับค่าได้โดยไม่ต้องได้รับการออกแบบ แต่เนื่องจากยังไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบพารามิเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นในบทความนี้จะออกแบบด้วยวิธีการสุ่มค่าดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

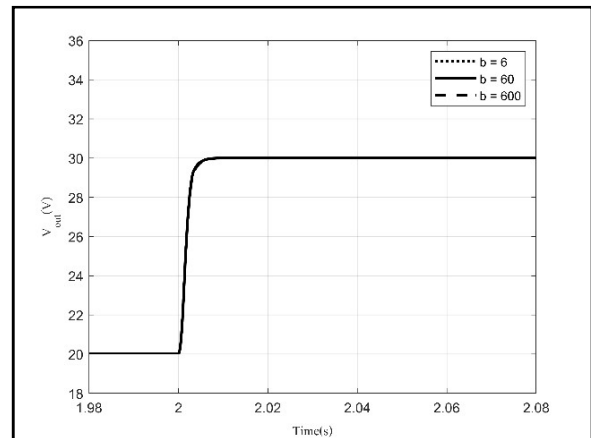
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ a เป็น 4, 8 และ 16 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $b=60$, $m=6000$ และ $K=4000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า หากพารามิเตอร์ a มีค่าน้อยจนเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการพุ่งเกิน ในขณะที่ค่า a ที่มากเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ช้า



รูปที่ 2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

3.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ b เป็น 6, 60 และ 600 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a=8$, $m=6000$ และ $K=4000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ b ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการตอบสนองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

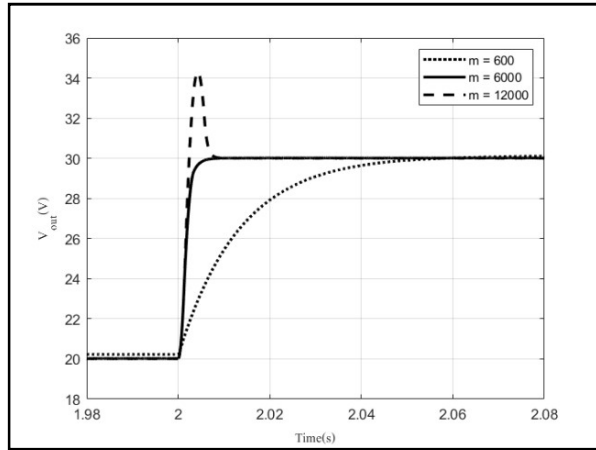


รูปที่ 3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

3.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m เป็น 600, 6000 และ 12000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a=8$, $b=60$ และ $K=4000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4 จากรูปจะพบว่า ถ้าพารามิเตอร์ m มีค่าน้อยจนเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนอง

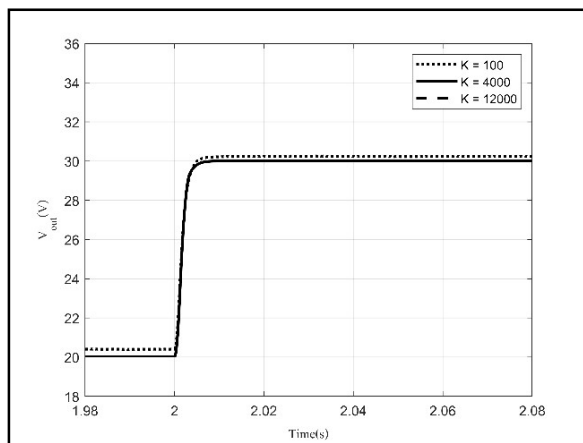
ของระบบเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว อีกทั้งยังส่งผลให้เวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่ของระบบเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ในขณะที่ค่า m ที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการพุ่งเกินของระบบ



รูปที่ 4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K เป็น 100, 4000 และ 12000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 8$, $b = 60$ และ $m = 6000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า หากพารามิเตอร์ K มีค่าน้อยจนเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว



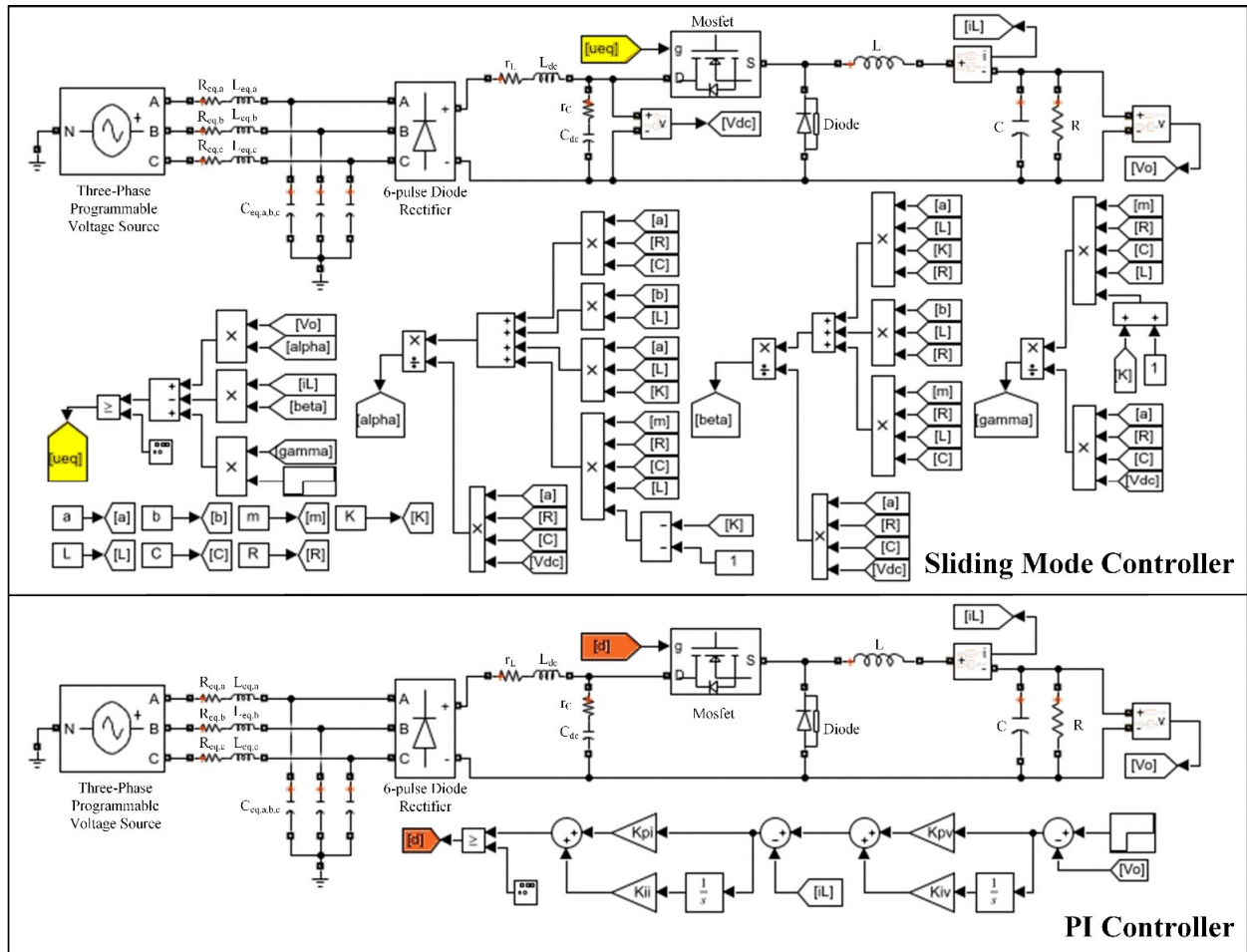
รูปที่ 5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

ดังนั้นจากการออกแบบและตรวจสอบสมรรถนะของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อน

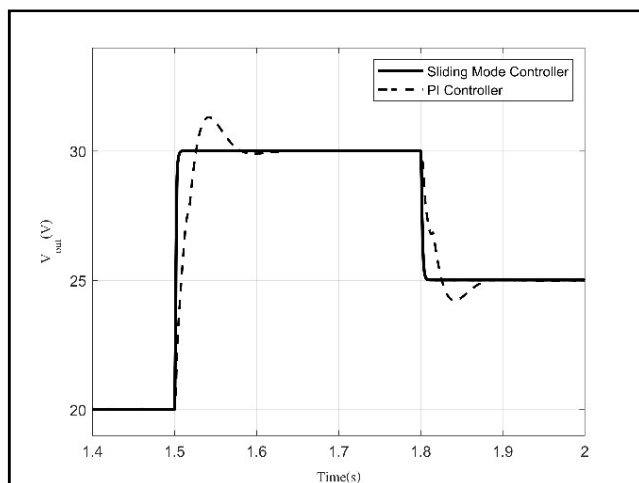
ดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปข้างต้นจะพบว่า หากค่าของพารามิเตอร์ a , m และ K มากเกินไปหรือน้อยเกินไปอาจส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมของระบบไม่ดี ในขณะที่พารามิเตอร์ b จะไม่ส่งผลต่อระบบ ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้ บทความนี้จึงเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา คือ $a = 8$, $b = 60$, $m = 6000$ และ $K = 4000$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดังที่จะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

4. การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมระหว่างตัวควบคุมโหมตการเลื่อนที่นำเสนอและตัวควบคุมพื้นฐานและเป็นที่นิยมอย่างตัวควบคุมพีไอ โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสามารถออกแบบได้ด้วยวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (closed-loop transfer function) และเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้พอสังเขปในภาคผนวก ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ คือ $K_{pv} = 0.1513$, $K_{iv} = 15.7914$, $K_{pi} = 1.4102$, และ $K_{ii} = 632.9130$ โดยลำดับแรกจะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่อาศัย SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 6 และผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของระบบที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมโหมตการเลื่อนจะมีช่วงเวลาขาขึ้น และเวลาเข้าที่ที่น้อยกว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใช้ตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งตัวควบคุมโหมตการเลื่อนยังไม่ปรากฏการพุ่งเกินอีกด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมตการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์สมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ และช่วงเวลาขาลง ได้เท่ากับ 100%, 92.3%, 99.3%, 100% และ 80% ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 6 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่พิจารณาบนโปรแกรม SIMULINK/MATLAB

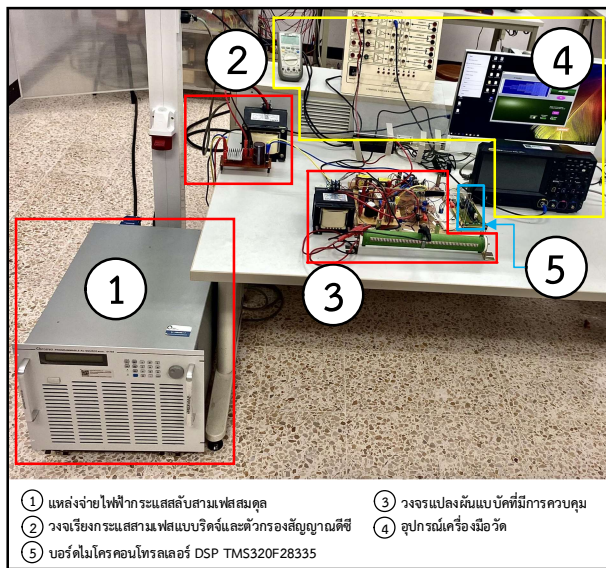


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

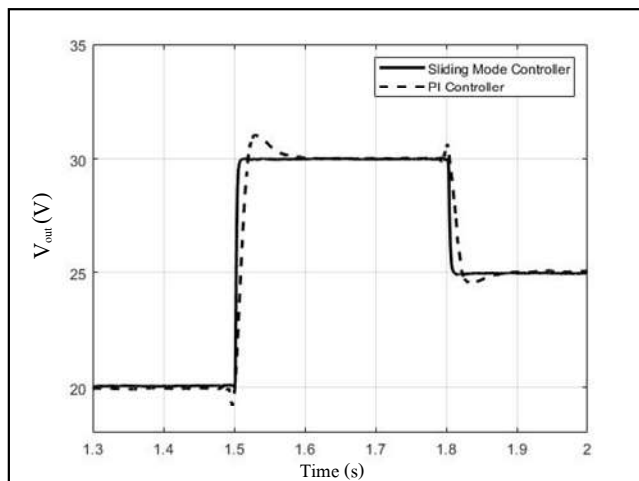
ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ตัวควบคุม โหมดการ- เลื่อน	ตัวควบคุมพีไอ	เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะ ที่ดีกว่า
เปอร์เซ็นต์ การพุ่งเกิน	0% 4.3%	100%
ช่วงเวลาขาขึ้น วินาที	0.001 0.013 วินาที	92.3%
ช่วงเวลาเข้าที่ วินาที	0.008 1.23 วินาที	99.3%
เปอร์เซ็นต์ การพุ่งต่ำ	0% 2.68%	100%
ช่วงเวลาขาลง วินาที	0.001 0.005 วินาที	80%

นอกจากการเปรียบเทียบและยืนยันผลผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แล้ว บทความนี้ยังได้นำเสนอผลจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการอีกด้วย โดยชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนและตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP TMS320F28335 โดยผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนและตัวควบคุมพีไอของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาผ่านชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมผ่านชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 9 จะพบว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน จะใช้เวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่น้อยกว่าเมื่อระบบมีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังไม่ปรากฏการพุ่งเกินอีกด้วย ในขณะที่ผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอ จะปรากฏทั้งการพุ่งต่ำและการพุ่งเกิน โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์สมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ และช่วงเวลาลงจะเท่ากับ 100%, 83.3%, 99.4%, 100% และ 75% ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอทั้งในแง่ของเวลาขาขึ้น เวลาเข้าที่ การพุ่งต่ำและการพุ่งเกิน และผลที่ได้จากชุดทดสอบเป็นการยืนยันได้อีกว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมจากชุดทดสอบ

	ตัวควบคุม โหมดการ- เลื่อน	ตัวควบคุมพีไอ	เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะ ที่ดีกว่า
เปอร์เซ็นต์ การพุ่งเกิน	0%	3.87%	100%
ช่วงเวลาขาขึ้น วินาที	0.001	0.006	83.3%
ช่วงเวลาเข้าที่ วินาที	0.007	1.13	99.4%
เปอร์เซ็นต์ การพุ่งต่ำ	0%	1.36%	100%
ช่วงเวลาลง วินาที	0.001	0.004	75%

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี โดยวงจรแปลงผันแบบบักมีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าที่ไม่คงที่ ทำให้ต้องพิจารณาแรงดันไฟฟ้า

ดังกล่าวในการออกแบบและสร้างตัวควบคุมด้วย ซึ่งเป็นจุดเด่นของบทความนี้ เนื่องจากในอดีตวงจรแปลงผันแบบบักจะมีแหล่งจ่ายที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลือนบทความนี้ได้อาศัยวิธีการสุ่มค่า พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างการใช้ตัวควบคุมโหมดการเลือนกับตัวควบคุมพีโอผ่านการจำลองสถานการณ์ และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลที่ได้จากชุดทดสอบมีความสอดคล้องกัน โดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการใช้ตัวควบคุมโหมดการเลือนจะมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีและรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีโอ ทั้งในแง่ของช่วงเวลาขึ้นช่วงเวลาเข้าที่ การพุ่งต่ำ และการพุ่งเกิน แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลือนที่นำเสนอโดยใช้วิธีการสุ่มค่าประกอบกับยังไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจะเป็นการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence : AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลือน เพื่อให้มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุดและสามารถให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งอำนวยความสะดวกด้านสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำวิจัย

ภาคผนวก

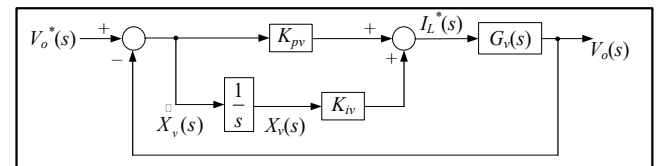
ตัวควบคุมพีโอที่ใช้ในบทความนี้เป็นตัวควบคุมพีโอแบบต่อเรียง (cascade PI controller) โดยมีรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นรูปภายในและรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปภายนอก ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม โดยเป็นวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดและเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองดังสมการที่ (10) เนื่องจากมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย และไม่ซับซ้อน [28]

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

โดยมีรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 ส่วน ซึ่งอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

1) ส่วนการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออก

แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักแสดงได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งจากรูปจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ ได้ดังสมการที่ (11)



รูปที่ 10 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออก

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{sRC + 1} \quad (11)$$

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ดังสมการที่ (12) ดังนี้

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{pi}}{C} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R + 1}{RC} \right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C} \right)} \quad (12)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_v(s)$ ในสมการที่ (12) กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (10) ดังนั้น จะได้พารามิเตอร์สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกดังแสดงในสมการที่ (13) และสมการที่ (14)

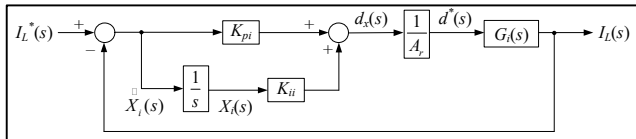
$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{R} \quad (13)$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C \quad (14)$$

โดยที่ ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของลูปแรงดันไฟฟ้า, ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ของลูปแรงดันไฟฟ้า

2) ส่วนการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักแสดงได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งจากรูปจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ ได้ดังสมการที่ (15)



รูปที่ 11 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

$$G_i(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{dc}}{sL} \quad (15)$$

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดของลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (16)

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{A_r L} \right) V_{dc}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi} V_{dc}}{A_r L} \right) s + \left(\frac{K_{ii} V_{dc}}{A_r L} \right)} \quad (16)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_i(s)$ ในสมการที่ (16) กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (10) ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์สำหรับการ

ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำดังสมการที่ (17) และสมการที่ (18) ดังนี้

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{dc}} \quad (17)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{dc}} \quad (18)$$

โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสไฟฟ้า, ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูปกระแสไฟฟ้า และ A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

ดังนั้นสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในส่วนของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะดำเนินการออกแบบผ่านสมการที่ (13) และสมการที่ (14) ในขณะที่ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะดำเนินการออกแบบผ่านสมการที่ (17) และสมการที่ (18) เมื่อกำหนดให้ $\zeta_v = 1$, $\zeta_i = 0.7$, $\omega_{nv} = 40\pi$ rad/s และ $\omega_{ni} = 200\pi$ rad/s และ $A_r = 10$ ซึ่งค่าดังกล่าวจะสามารถออกแบบได้จากค่าเวลาขาขึ้น (T_r) เท่ากับ 0.032 วินาที และค่าเวลาเข้าที่ (T_s) เท่ากับ 0.016 วินาที และกำหนดให้ ω_{ni} มีค่าเท่ากับ 5 เท่าของค่า ω_{nv} ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sridhar HS, Devaiah KS. Modelling and analysis of Voltage Mode control (VMC) of Buck Converter using P, PI, PID Controller. In: *2024 International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES)*. Tumakuru, India; 2024. p. 1-5.
- [2] Gaurav K, Upadhyaya S, Ashutosh, Joshi D. Enhanced gain double - output boost/buck DC-DC converter. In: *2024 15th International Conference on Computing Communication and*

- Networking Technologies (ICCCNT)*. Kamand, India; 2024. p. 1-6.
- [3] Yegon P, Singh M. Comparison of control strategies PI, FOPID, and ANFIS controllers in EV system for microgrid interactive system. In: *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India; 2024. p. 274-279.
- [4] Wang S, Juan L, Zhang L, Li S. Cascade sliding mode control based on extended state observer method for a DC-DC buck converter. In: *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*. Shanghai, China; 2021. p. 2366-2371.
- [5] Vishnu K, Nema RK, Ojha A. Boost converter with fuzzy logic, PI controller and sliding mode control for a variable source input. In: *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*. Keonjhar, India; 2020. p. 1-5.
- [6] Tarik MN, Biswas SP, Mondal S, Nahin NI, Paul AK, Haque SS. A robust PI-Lag compensator for DC-DC buck converter fed DC motor drives. In: *2023 6th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*. Khulna, Bangladesh; 2023. p. 1-6.
- [7] Lin L, Zhu Z, Liu Y, Li Z, Wang L, Ma F, et al. Dual natural switching surface control for multilevel noninverting Buck-Boost converter with pulsed power loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2024;71(9): 10444-10454.
- [8] Zehra S, Kansara AP. A combination of the SMC controller with the PI controller for brushless DC motor speed control. In: *2024 International Conference on Electrical Electronics and Computing Technologies (ICEECT)*. Greater Noida, India; 2024. p. 1-5.
- [9] Singh AP, Ahmad AU, Sahay K. Sliding mode control for dc microgrid powered by solar PV, fuel cell and energy storage system with pulsating loads. In: *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India; 2024. p. 583-588.
- [10] Gao H, Chen X, Ge L, Ma X. Regenerative braking energy recovery based on modified sliding mode control for DC/DC converter of high-speed railways system. In: *2024 5th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI)*. Shenzhen, China; 2024. p. 231-235.
- [11] Hosseini A, Hosseinnataj S, Adabi J. Bidirectional diso DC-DC converter based on fixed-frequency sliding mode control strategy. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic Republic of; 2024. p. 1-5.
- [12] Azimi M, Asadi M, Zakipour A. Second-order sliding mode control for DC-DC buck converter with input voltage ripple elimination. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic Republic of; 2024. p. 1-5.
- [13] Mhamdi I, Abbes M. Sliding mode control of a buck-boost converter connecting photovoltaic systems to microgrids. In: *2024 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*. Hammamet, Tunisia; 2024. p. 1-5.
- [14] Liu X, Hou S, Fang M. A Simple seamless switching strategy for four-switch buck-boost converter. In: *2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia)*. Chengdu, China; 2024. p. 2711-2715.
- [15] Prakash AC, Bajpai SS, Mohan V, SK K. A modular multilevel derived converter with a robust and dynamic sliding mode control for electric vehicles. In: *2024 IEEE 4th International Conference on VLSI Systems, Architecture,*

- Technology and Applications (VLSI SATA)*. Bangalore, India; 2024. p. 1-6.
- [16] Ning W, Li L, Cao Y. Research on buck converter with improved approach rate compound sliding mode control based on PSO. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p.1064-1069.
- [17] Azimi M, Asadi M, Zakipour A. Second-order sliding mode control for DC-DC buck converter with input voltage ripple elimination. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic of Republic; 2024: p.1-5.
- [18] Lesniewski P, Jaskuła M. Sliding mode control for perturbed nonlinear systems with state and control signal constraints. *Energies*. 2023;16(14): p.1-12.
- [19] Setthawong N, Areerak K, Santiprapan P, Panpean C, Areerak K. gain tuning technique based on sliding mode control for shunt active power filter. In: *2022 International Electrical Engineering Congress (IEEECON)*. Khon Kaen, Thailand; 2022. p. 1-4.
- [20] Mao T, Li L, Cao Y. Sliding mode control of synchronous Buck converter based on variable speed reaching law. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p. 1058-1063.
- [21] Ning W, Li L, Cao Y. Research on buck converter with improved approach rate compound sliding mode control based on PSO. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p. 1064-1069.
- [22] อภิชัย สุขะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, กองพันธ์ อารีรักษ์. การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์. ใน: *การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 16 (ECTI-CARD)*. สุรินทร์, ประเทศไทย; 2567, หน้า 166-170
- [23] Mouslim S, Jenkal S, Imodane B, Ajaamoum M, Oubella M. Simulation and analyses of Buck converter using SMC with two control techniques. In: *2022 International Conference on Microelectronics (ICM)*. Casablanca, Morocco; 2022. p. 185-188.
- [24] Pakdeeto J, Thanommuang A, Areerak K, Areerak K. Pole placement technique optimized gains by adaptive Tabu search for instability mitigation of AC-DC power system feeding a controlled buck converter. *IEEE Access*. 2024;12: 107704-107718.
- [25] Phosung R, Areerak K, Sopapirm T, Areerak K. Design and optimization of instability mitigation for ac-dc feeder systems with constant power loads using artificial intelligence techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022;37(5): 5385-5397.
- [26] Gowda MC, Savitha PB. Average current control of buck-boost converter. In: *2022 IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*. Prayagraj, India; 2022. p. 1-5.
- [27] Azer P, Emadi A. Generalized state space average model for multi-phase interleaved buck, boost and Buck-Boost DC-DC converters: transient, steady-state and switching dynamics. *IEEE Access*. 2020;8: 77735-77745.
- [28] Pakdeeto J, Thanommuang A, Chaicharoenu-domrung K, Areerak K, Areerak K. The effect of parameter variations of system stability for AC-DC power system feeding controlled buck converter. In: *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. Nakhon Ratchasima, Thailand; 2021. p. 61-64.