



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็มอย่างเหมาะสมด้วยเทคนิคการค้นหาแบบตามูเซิงปรับตัวได้

Mathematical model derivation and Optimal Controller design for PWM rectifier by using the adaptive Tabu search technique

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง¹ จักรกริช ภัคดีโต^{2*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

² ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

Koson Chaicharoenudomrung¹ Jakkrit Pakdeeto^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB Bangkok 10800

² Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB Bangkok 10800

* Corresponding author.

E-mail: jakkritpa@kmutnb.ac.th; Telephone: 0 2555 2000 ext. 3338

วันที่รับบทความ -21 พฤษภาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 6 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ 1 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ของวงจร แบบจำลองดังกล่าวมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากในการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพหรือออกแบบระบบควบคุม บทความนี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาโดยอาศัยวิธีดีคิว แบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งอาศัยการค้นหาแบบตามูเซิงปรับตัวได้ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SimPowerSystem® นอกจากนี้ยังมีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อยืนยันผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากวิธีการค้นหาที่นำเสนอในบทความนี้ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเซิงปรับตัวได้ให้สมรรถนะที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบตัวควบคุม วงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม การค้นหาแบบตามูเซิงปรับตัวได้

Abstract

Generally, the mathematical model of power converters is time-varying due to the switching action. This model is very complex for the system stability analysis and controller design. In this paper, the time invariant model derivation will be presented by using the DQ method. The proposed model is suitable for the controller design via the artificial intelligences in which the adaptive Tabu search will be applied. To confirm the model, the MATLAB/SimPowerSystem® is used for the model validation. In addition, the hardware-in-loop simulation is used to ensure that the output voltage from the PWM rectifier can be regulated by using the PI controller in which the coefficient values of this controller are identified by the proposed method. The simulation results show that the proposed PI controller design can provide the better responses compared with the conventional design in both transient and steady-state.

Keywords

mathematical model, controller design, PWM rectifier, adaptive Tabu search

1. คำนำ

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซี (AC/DC converter) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) ถูกนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีหลายประเภทในปัจจุบัน เช่น ระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่อาศัยแหล่งพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าทดแทน รถยนต์พลังงานไฟฟ้า ระบบขนส่งแบบรางที่ใช้พลังงานไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินหรือเรือดำน้ำ เป็นต้น [1-3] วงจรเรียงกระแสแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือชนิดที่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตและอีกชนิดหนึ่งคือไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ [4] วงจรเรียงกระแสที่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้มีทั้งแบบที่ใช้สวิตช์ของวงจรเป็นไธริสเตอร์ซึ่งถูกเรียกว่าวงจรเรียงกระแสที่สามารถควบคุมได้ (controlled rectifier) [5] และแบบใช้สวิตช์ของวงจรเป็นไอจีบีทีที่ถูกเรียกว่าวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM rectifier) [6] วงจรเรียงกระแสที่มีการใช้สวิตช์แบบไอจีบีที (IGBT) เป็นที่นิยมเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย [6, 7] เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบสองทิศทางสำหรับระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีแหล่งพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าทดแทนเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าหลัก วงจรแปลงผันสำหรับระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน เป็นต้น การใช้งานวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็มจำเป็นต้องมีตัวควบคุมเพื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตมีค่าคงที่ การออกแบบตัวควบคุมสามารถทำได้ 2 แนวทางดังนี้ แนวทางที่ 1 อาศัยหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุม [8] และแนวทางที่ 2 อาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) [9] สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีโอทีที่มีสมรรถนะผลการตอบสนองที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังสามารถกำหนด

ขอบเขตของสัญญาณควบคุมสวิตช์ให้มีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน ทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัวเมื่อนำไปสร้างชุดทดสอบจริงในอนาคต จากงานวิจัยในอดีต [9] พบว่าวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสผ่านวงจรเรียงกระแสที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุต เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัค-บูสต์ที่มีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการดังกล่าว อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้นำเสนอแนวทางออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็มซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยการออกแบบตัวควบคุมจะดำเนินผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพิสูจน์ขึ้นใหม่ พร้อมทั้งยังได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น

ระบบไฟฟ้าที่มีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ [10] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ได้นำเสนอวิธีการกำจัดผลของสวิตช์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา งานวิจัยในอดีต [6,9,11,12] พบว่าวิธีที่ดีมีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสบทความนี้จึงได้นำวิธีที่ดีมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time invariant model) ทำให้มีความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรม [12] เช่น การออกแบบตัวควบคุม การหาผลตอบสนองของระบบในสถานะต่าง ๆ หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ เป็นต้น การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองมีความถูกต้อง ในบทความนี้การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นจะอาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองทั้งในสถานะชั่วครู่และสถานะอยู่ตัวระหว่างแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นและการจำลองสถานการณ์

ด้วยแบบจำลองแม่นยำตรง (exact topological model) บนโปรแกรม MATLAB ผ่านบล็อก SimPowerSystem® นอกจากนี้อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็มคือการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวซึ่งในบทความนี้จะอาศัยตัวควบคุมพีโอ ขั้นตอนของการออกแบบตัวควบคุมจำเป็นต้องอาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบเพื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมซึ่งถูกเรียกว่าการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม (conventional design) [8] อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ [9,13,14] ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง งานวิจัย [15] พบว่าแนวทางการค้นหาด้วยวิธีตามูเชิงปรับตัวได้ (adaptive Tabu search, ATS) มีสมรรถนะในการค้นหาที่ดีเนื่องจากถูกพัฒนาจากวิธีตามูแบบดั้งเดิมทำให้สามารถเดินย้อนรอยและหลุดจากคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น (best local solution) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (best global solution) อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาปรับลดตรรกะเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างอย่างรวดเร็ว ดังนั้นบทความนี้จะนำวิธีการค้นหาดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีโอของวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็มผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องที่ได้จากการแปลงดีคิว

บทความนี้ประกอบด้วย 5 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกเป็นบทนำซึ่งได้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ส่วนที่ 2 เป็นการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดีคิว ส่วนที่ 3 เป็นการออกแบบตัวควบคุมพีโอสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็มโดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวได้ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น ส่วนที่ 4 เป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุม และส่วนที่ 5 เป็นส่วนสรุปของบทความ

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วย ระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 220V 50Hz, วงจรสมมูลสายส่ง และ

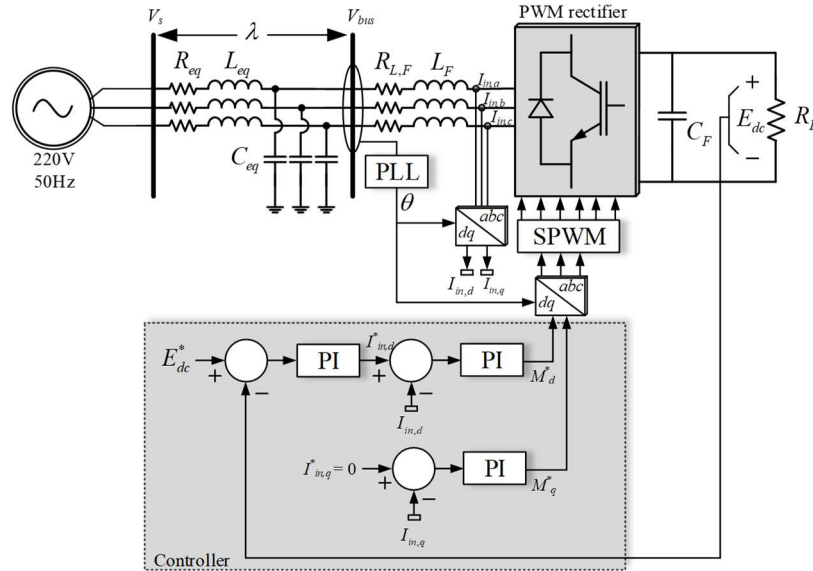
วงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็มที่มีตัวควบคุมพีโอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางฝั่งเอาต์พุต ซึ่งวงจรแปลงผันดังกล่าวจะใช้เทคนิคการควบคุมสวิตช์ด้วยวิธีเอสพื้ดเบิลยูเอ็ม (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) [4] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 ประกอบด้วยส่วนที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยในบทความนี้จะพิจารณาระบบไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวเป็นแบบสมดุล การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะอาศัยวิธีดีคิวเนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นจะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวได้ รายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3

2.1 วิธีดีคิว

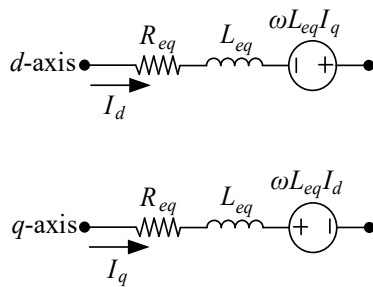
วิธีดีคิวหรือการแปลงของปาร์ค [16] เป็นการแปลงปริมาณจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดีคิว ซึ่งปริมาณที่ถูกแปลงให้อยู่บนแกนดีคิวพบว่าไม่ปรากฏพจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้หลังจากการประยุกต์ใช้วิธีดีคิวจึงเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา สมการที่ใช้ในการแปลงปริมาณต่าง ๆ จากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้ไปอยู่บนแกนดีคิวแสดงได้ดังสมการที่ (1) โดยที่ f_a , f_b , f_c คือปริมาณต่าง ๆ บนระบบไฟฟ้าสามเฟส เช่น กระแสหรือแรงดัน เป็นต้น และ f_{dqo} คือปริมาณของฟังก์ชันที่ถูกแปลงจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดีคิว บทความนี้จะกำหนดให้ค่า $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$ ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์สำหรับการแปลงแบบอนุรักษ์กำลังไฟฟ้า (power conserving) [17]

$$f_{dqo} = k \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

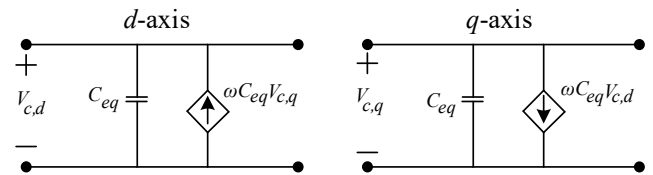
การประยุกต์ใช้วิธีดีคิสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 ในขั้นแรกจะดำเนินการพิจารณาแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ หลังจากนั้นทำการแปลงปริมาณแรงดันตกคร่อมดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคิด้วยสมการที่ (1) และเมื่อประยุกต์ใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าจะทำให้ได้วงจรสมมูลของตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 [1] โดยที่ค่า $\omega = 2\pi f$ สามารถคำนวณได้จากความถี่ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 2 วงจรสมมูลต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำบนแกนดีและแกนคิว

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณากระแสในตัวเก็บประจุพบว่าสามารถประยุกต์ใช้วิธีดีคิกับสมการดังกล่าวได้ หลังจากทำการแปลงสมการกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุให้อยู่บนแกนดีคิพร้อมกับการประยุกต์ใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าจะทำให้

ได้วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุบนแกนดีคิ [18] ดังรูปที่ 3 ลำดับถัดมาพิจารณาส่วนที่เป็นสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิลยูเอ็มจากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 (กรณีที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุมพีโอ) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันทางฝั่งอินพุตและเอาต์พุตพบว่ามีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการสวิตช์แสดงได้ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ



รูปที่ 3 วงจรสมมูลเก็บประจุบนแกนดีและแกนคิว

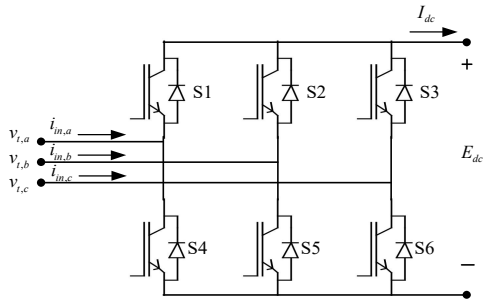
$$I_{in,abc} = \hat{M}_k I_{dc} \quad (2)$$

$$E_{dc} = \hat{M}_k^T V_{t,k} \quad (3)$$

โดยที่

$$\hat{M}_k = \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi_t) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi_t) \end{bmatrix}$$

เป็นฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็ม
 M คือค่าดัชนีมอดูเลต (modulation index) มีค่าระหว่าง
 $0 - 1$, $k = a, b, c$ และ ϕ_i คือ มุมเฟสทางฝั่งอินพุตของสวิตช์



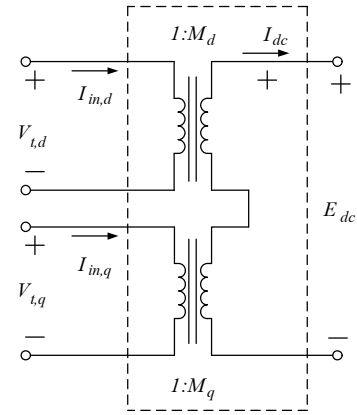
รูปที่ 4 สวิตช์ของวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็ม

พิจารณาจากฟังก์ชันการสวิตช์ $\hat{M}_k$ สามารถประยุกต์ใช้
 วิธีตีคิวกับฟังก์ชันการสวิตช์ดังกล่าวซึ่งจะทำให้ได้สมการ
 ฟังก์ชันการสวิตช์บนแกนดีและแกนคิวแสดงได้ดังสมการที่ (4)
 หลังจากนั้นทำการประยุกต์ใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าจะได้วงจร
 สมมูลบนแกนตีคิวกของสวิตช์แสดงดังรูปที่ 5

$$M_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{M}{2} \begin{bmatrix} \cos(\phi_i - \phi) \\ \sin(\phi_i - \phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

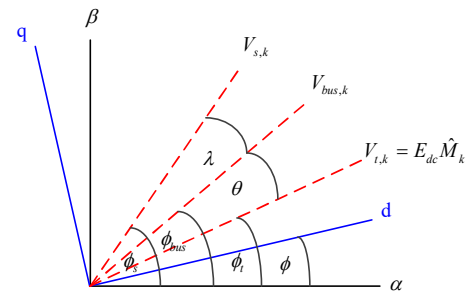
เมื่อ ϕ คือ มุมของแกนหมุนตีคิวก

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้วิธีตีคิวกับฟังก์ชันการ
 สวิตช์ของวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็มจะทำให้ได้วงจร
 สมมูลสวิตช์ไอจีบีทีบนแกนตีคิวกที่มีลักษณะเป็นหม้อแปลง
 ไฟฟ้ากระแสตรงในอุดมคติ [18] เมื่อทำการพิจารณาที่
 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสามารถแสดงเวกเตอร์การ
 แปลงตีคิวกได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะทำให้ได้สมการ $V_{s,d}$ และ $V_{s,q}$
 แสดงดังสมการที่ (5) [6]



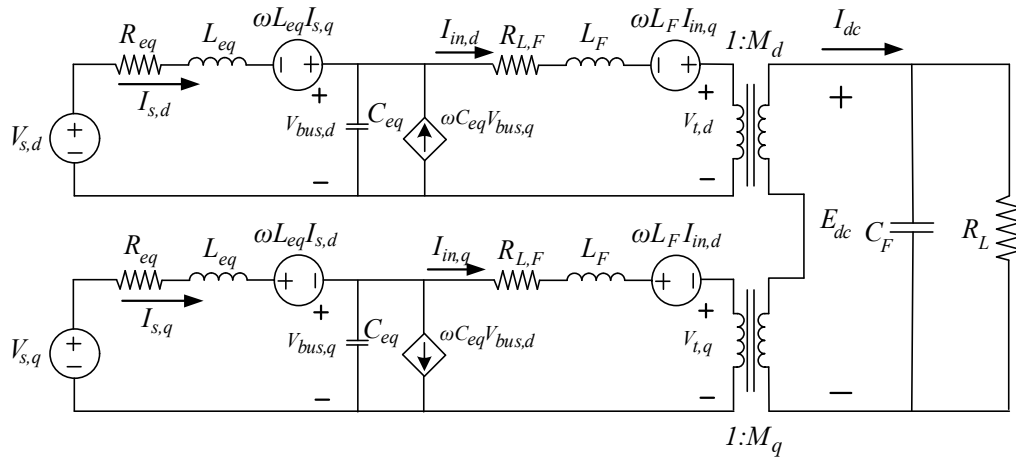
รูปที่ 5 วงจรสมมูลสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรเรียงกระแสแบบพื้ดเบิลยูเอ็มบนแกนตีคิวก

$$\begin{bmatrix} V_{s,d} \\ V_{s,q} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda + \phi_{bus} - \phi) \\ V_m \sin(\lambda + \phi_{bus} - \phi) \end{bmatrix} \quad (5)$$



รูปที่ 6 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงตีคิวก

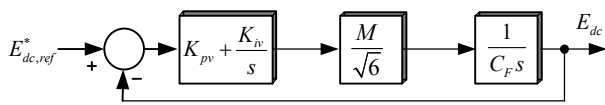
จากสมการที่ (4) และ (5) พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้วิธีตีคิวกจะ
 ทำให้พจน์ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาถูกกำจัด ส่งผลให้การวิเคราะห์
 วงจรด้วยกฎพื้นฐานทางไฟฟ้าจะทำให้ได้แบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา หลังจากนั้นทำการประยุกต์ใช้
 วิธีตีคิวกกับส่วนประกอบต่าง ๆ จะทำให้ได้วงจรสมมูลของ
 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา (ในกรณีที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุม)
 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



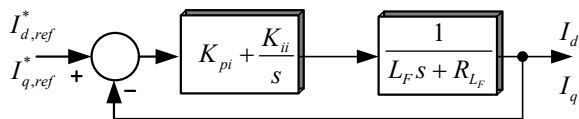
รูปที่ 7 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว (กรณีที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุม)

2.2 ตัวควบคุมพีไอสำหรับสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม

ตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 ใช้ตัวควบคุมพีไอ เมื่อทำการคำนวณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงและค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ส่งไปยังตัวควบคุมลูปแรงดันและลูปกระแส ตัวควบคุมจะทำการปรับค่าสัญญาณควบคุมสวิตช์ของวงจรจนทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์นั้นหมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตมีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดันและลูปกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ [13]



รูปที่ 8 ลูปแรงดันของตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 9 ลูปกระแสของตัวควบคุมพีไอ

พิจารณาในรูปที่ 8 และ 9 สามารถหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดลูปแรงดันและลูปกระแสของตัวควบคุมพีไอได้ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

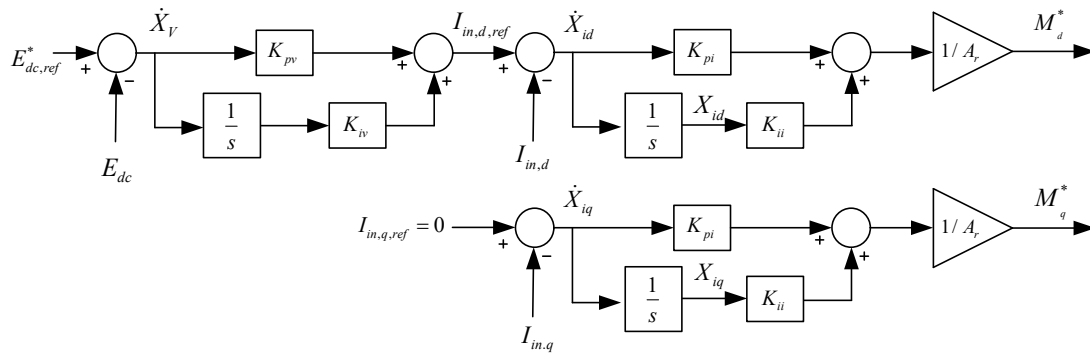
$$\frac{E_{dc}}{E_{dc,ref}^*} = \frac{M(K_{pv}s + K_{iv})}{\sqrt{6}C_F s^2 + MK_{pv}s + MK_{iv}} \quad (6)$$

$$\frac{I_d}{I_{d,ref}^*} = \frac{I_q}{I_{q,ref}^*} = \frac{K_{pi}s + K_{ii}}{L_F s^2 + (K_{pi} + R_{L_F})s + K_{ii}} \quad (7)$$

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูปแรงดันและลูปกระแสจะถูกนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมด้วยการเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุม K_p และ K_i ของลูปแรงดันและลูปกระแส การเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะดำเนินการเทียบกับสมการระบบมาตรฐานอันดับสองแสดงได้ดังสมการที่ (8) โดยที่ค่า ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติ และ ζ คืออัตราการหน่วง ค่าทั้งสองนี้สัมพันธ์กับสมรรถนะผลการตอบสนองของระบบควบคุม [8] สามารถหาค่า K_p และ K_i ของลูปแรงดันและลูปกระแสได้ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{2\sqrt{6}\zeta_v\omega_{nv}C_F}{M} \\ K_{iv} = \frac{\sqrt{6}\omega_{nv}^2C_F}{M} \end{cases} \quad (9)$$



รูปที่ 10 ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

$$\begin{cases} K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{ni} L_F - R_{L_F} \\ K_{ii} = L_F \omega_{ni}^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} M_d^* = \frac{1}{A_r} \begin{pmatrix} E_{dc}^* K_{pv} K_{pi} - E_{dc} K_{pv} K_{pi} + X_v K_{iv} K_{pi} \\ -I_{in,d} K_{pi} + X_{id} K_{ii} \end{pmatrix} \\ M_q^* = \frac{1}{A_r} (-I_{in,q} K_{pi} + X_{iq} K_{ii}) \end{cases} \quad (11)$$

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การประยุกต์ใช้วิธีดีคิวและการออกแบบตัวควบคุมพีไอในหัวข้อย่อยที่ผ่านมาทำให้เข้าใจถึงการแปลงดีคิวกับระบบไฟฟ้าสามเฟสและการออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีแบบดั้งเดิม สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงไว้แล้วในรูปที่ 1 พิจารณาตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบฟีดแบ็คเบิกลูเอม บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมพีไอของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยกำหนดให้ค่า $I_{in,q,ref}$ มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor, p.f.) มีค่าเท่ากับหนึ่ง [7]

พิจารณาจากรูปที่ 10 พบว่าเป็นตัวควบคุมพีไอประกอบด้วยลูควบคุมแรงดันและลูควบคุมกระแสต่อกันแบบคาสเคด [19] โดยลูตัวควบคุมแรงดันเป็นลูที่อยู่ด้านนอกและลูตัวควบคุมกระแสเป็นลูด้านใน พิจารณาจากรูปที่ 10 สามารถคำนวณหาค่า M_d^* และ M_q^* ได้ดังสมการที่ (11) โดยที่ A_r หมายถึงค่ายอดถึงยอดของแรงดันพาหะสำหรับสร้างสัญญาณฟีดแบ็คเบิกลูเอม

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการประยุกต์ใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าทั้งกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) กับวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิวในรูปที่ 7 หลังจากทำการวิเคราะห์ห้วงจรจะปรากฏพจน์ M_d และ M_q ที่ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงในอุดมคติ ซึ่งจะต้องทำการแทนค่า $M_d = M_d^*$ และ $M_q = M_q^*$ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (12)

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีตามเชิงปรับตัวได้ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง บทความนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก SimPowerSystem® บนโปรแกรม MATLAB ผลตอบสนองจากการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อกดังกล่าวจะถูกเรียกว่าแบบจำลองแม่นยำ (exact topological model)

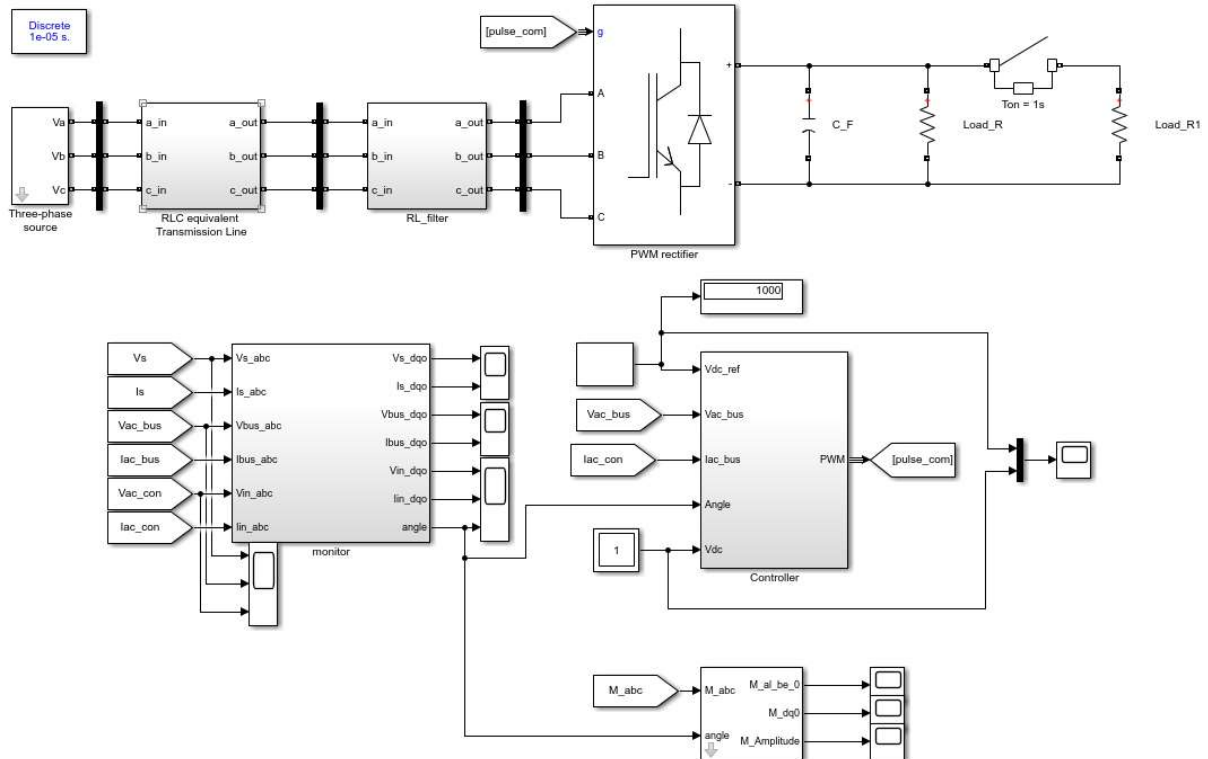
$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{s,d} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,d} + \omega I_{s,q} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{s,d} \\
 \dot{I}_{s,q} &= -\omega I_{s,d} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{s,q} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{s,q} \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{s,d} + \omega V_{bus,q} - \frac{1}{C_{eq}} I_{in,d} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{s,q} - \omega V_{bus,d} - \frac{1}{C_{eq}} I_{in,q} \\
 \dot{I}_{in,d} &= \frac{1}{L_F} V_{bus,d} - \frac{R_{LF}}{L_F} I_{in,d} + \omega I_{in,q} - \frac{K_{pv} K_{pi} E_{dc}^* E_{dc}}{A_r L_F} + \frac{K_{pv} K_{pi} E_{dc} E_{dc}}{A_r L_F} \\
 &\quad - \frac{K_{iv} K_{pi} E_{dc} X_v}{A_r L_F} + \frac{K_{pi} I_{in,d} E_{dc}}{A_r L_F} - \frac{K_{ii} E_{dc} X_{id}}{A_r L_F} \\
 \dot{I}_{in,q} &= \frac{1}{L_F} V_{bus,q} - \omega I_{in,d} - \frac{R_{LF}}{L_F} I_{in,q} + \frac{K_{pi} I_{in,q} E_{dc}}{A_r L_F} - \frac{K_{ii} E_{dc} X_{iq}}{A_r L_F} \\
 \dot{E}_{dc} &= \frac{K_{pv} K_{pi} E_{dc}^* I_{in,d}}{A_r C_F} - \frac{K_{pv} K_{pi} E_{dc} I_{in,d}}{A_r C_F} + \frac{K_{iv} K_{pi} I_{in,d} X_v}{A_r C_F} - \frac{K_{pi} I_{in,d} I_{in,d}}{A_r C_F} \\
 &\quad + \frac{K_{ii} I_{in,d} X_{id}}{A_r C_F} - \frac{K_{pi} I_{in,q} I_{in,q}}{A_r C_F} + \frac{K_{ii} I_{in,q} X_{iq}}{A_r C_F} - \frac{E_{dc}}{R_L C_F} \\
 \dot{X}_{id} &= K_{pv} E_{dc}^* - K_{pv} E_{dc} + K_{iv} X_v - I_{in,d} \\
 \dot{X}_{iq} &= -I_{in,q} \\
 \dot{X}_v &= E_{dc}^* - E_{dc}
 \end{aligned} \quad (12)$$

นำไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีพิกัด

กำลังไฟฟ้า 40kW และระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1000V
ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 1

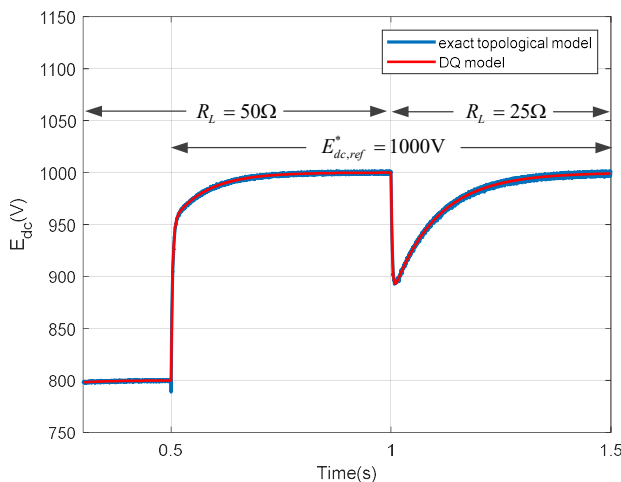
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์	คำอธิบาย
V_s	220 V _{rms} /Ø	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
R_{eq}	1 µΩ	ตัวต้านทานวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	22 µH	ตัวเหนี่ยวนำวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	22 nF	ตัวเก็บประจุวงจรสมมูลสายส่ง
R_{LF}	10 µΩ	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
L_F	2 mH	ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
C_F	500 µF	ตัวเก็บประจุวงจรกรอง
R_L	50 Ω	โหลดตัวต้านทาน
K_{pv}	0.26	สัมประสิทธิ์ K_p ลูปแรงดัน
K_{iv}	4.41	สัมประสิทธิ์ K_i ลูปแรงดัน
K_{pi}	5.4	สัมประสิทธิ์ K_p ลูปกระแส
K_{ii}	4500	สัมประสิทธิ์ K_i ลูปกระแส



รูปที่ 11 การจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก SimPowerSystem®

การต่อบล็อก SimPowerSystem® ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจากรูปที่ 1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นโดยกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 800V จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงเป็น 1000V ที่เวลา 0.5 วินาที โดยกำหนดให้ช่วงเวลาดังกล่าวมีโหลดค่าความต้านทาน 50Ω หลังจากนั้นที่เวลา 1 วินาทีทำการปิดวงจรเบรกเกอร์ในรูปที่ 11 ส่งผลให้ตัวต้านทานอีก 50Ω ถูกขนานเข้าไปในส่วน of โหลด ผลที่ได้คือเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานจาก 50Ω เป็น 25Ω ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 12



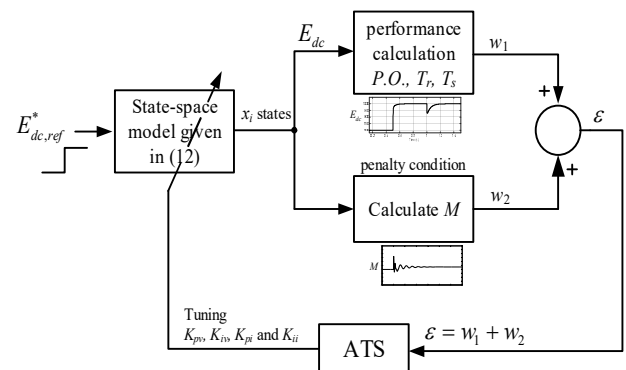
รูปที่ 12 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากรูปที่ 12 พบว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับหาผลการตอบสนองที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของระบบ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้ นอกจากนี้หากนำค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตที่ถูกควบคุมและค่าความต้านทานมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตทางด้านโหลดจากสูตร $P = V^2/R$ พบว่าในกรณีที่ค่าความต้านทานมีค่าเป็น 25Ω และแรงดันตกคร่อม 1000V จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 40kW ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้างี้ได้ถูกกำหนดเป็นพิกัดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีสมรรถนะของผลการตอบสนองที่ดีขึ้น บทความนี้จะ

ประยุกต์ใช้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้ซึ่งจะได้นำเสนอรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3. การค้นหาตัวควบคุมด้วยวิธีตาบู่เชิงปรับตัวได้

วิธีตาบู่เชิงปรับตัวได้ถูกพัฒนามาจากวิธีตาบู่ดั้งเดิมโดยการเพิ่มอัลกอริทึมในการย้อนรอยและการปรับลดรัศมีการค้นหา [15] การพัฒนาดังกล่าวถูกยืนยันด้วยผลทางคณิตศาสตร์ว่าสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้างได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งคำตอบของการค้นหาจะไม่ติดกับดักคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น [15] ในทางปฏิบัติอัลกอริทึมการย้อนรอยและการปรับลดรัศมีการค้นหาจะถูกประเมินในกรอบของการค้นหา ซึ่งสามารถประเมินได้จากค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดจากสุ่มคำตอบในรัศมีการค้นหา หลังจากนั้นจึงเลือกใช้คำตอบที่ทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดซึ่งถือว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในรอบนั้น และคำตอบดังกล่าวจะเป็นจุดศูนย์กลางเริ่มต้นของรัศมีการค้นหาในรอบถัดไป ยิ่งไปกว่านั้นการปรับลดรัศมีการค้นหาจะช่วยให้อัลกอริทึมการค้นหาได้รวดเร็วขึ้น [15] ดังนั้นในบทความนี้จะได้อาศัยวิธีการค้นหาดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสแบบฟีดแบ็คเพื่อบริหารจัดการให้ตัวควบคุมเหมาะสมที่สุดขั้นตอนการค้นหาด้วยวิธีตาบู่แบบปรับตัวได้สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัย [9,13,20] บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวิธีตาบู่เชิงปรับตัวได้ที่ประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การค้นหาสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีตาบู่เชิงปรับตัวได้

การทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัวได้เริ่มจากการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงแบบขั้นบันได ซึ่งจะทำให้ผลการตอบสนองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบฟีดแบ็คเบิยูเอ็มเกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นทำการคำนวณค่าสมรรถนะของระบบควบคุมเพื่อให้ได้ค่า w_1 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13)

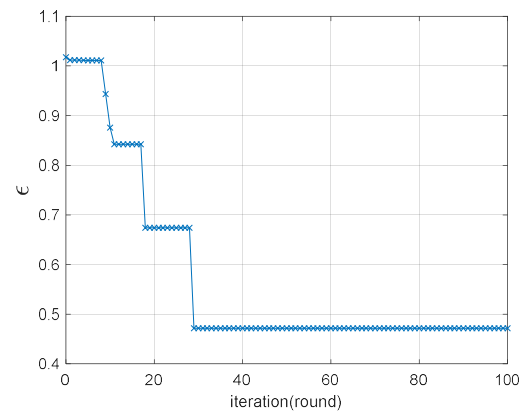
$$w_1 = \alpha \cdot (P.O.) + \beta \cdot (T_r) + \gamma \cdot (T_s) \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) ตัวแปร $P.O.$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการพุ่งเกิน (overshoot percentage) ตัวแปร T_r คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาขาขึ้น (rise time) และตัวแปร T_s คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (settling time) การคำนวณหาค่า w_1 จากสมการที่ (13) สามารถกำหนดค่าตัวประกอบการคูณ (α , β และ γ) ซึ่งโดยทั่วไป $\alpha + \beta + \gamma$ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 อย่างไรก็ตามในบทความนี้กำหนดให้ค่า $\alpha = \beta = \gamma = 0.3333$ หมายถึงการค้นหาให้ความสำคัญกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากอัตราการพุ่งเกิน ระยะเวลาขาขึ้นและระยะเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเท่ากัน นอกจากนี้ในการค้นหาตัวควบคุมยังได้เพิ่มกรณีการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเพื่อสร้างชุดทดสอบจริงในอนาคต ซึ่งจะดำเนินการคำนวณค่า M_d^* และ M_q^* โดยที่ค่าดังกล่าวสามารถคำนวณแปลงกลับเป็นค่าดัชนีมอดูเลต (M) ของสัญญาณควบคุมทั้งนี้ย่านการทำงานของค่า M จะต้องมีค่าระหว่าง $0 \leq M \leq 1$ เท่านั้น หากค่าสัญญาณควบคุมอยู่นอกช่วงการทำงานดังที่กล่าวมานี้จะกำหนดให้ $w_2 = 100$ (penalty condition ในรูปที่ 13) [9] นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมที่ได้จากการค้นหารอบนั้น ๆ จะมีค่าความผิดพลาดมากจนไม่สามารถเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่หาก M อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จะกำหนดให้ค่า $w_2 = 0$ ทั้งนี้การหาค่าความผิดพลาดรวม (ε) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$\varepsilon = w_1 + w_2 \quad (14)$$

หลักการที่ใช้ในการค้นหาตัวควบคุมนี้จะทำให้ได้ตัวควบคุมเหมาะสมที่สุดสำหรับวงจรเรียงกระแสแบบฟีดแบ็คเบิยูเอ็มที่ให้ผลการตอบสนองอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการอิมิตัวของค่าดัชนีมอดูเลต

การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวิธีการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัวได้ที่เหมาะสมสามารถทำได้จากการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ในการค้นหาจนกว่าจะได้ค่าที่ดีที่สุด [9, 15] ซึ่งบทความนี้กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นการค้นหาด้วยอัลกอริทึมดังกล่าวมีค่าเป็นดังนี้คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 30 ตัว, จำนวนคำตอบรอบข้างมีค่าเท่ากับ 40 ตัว, รัศมีมีค่าเท่ากับ 50 และตัวปรับคุณลดรัศมีเท่ากับ 1.05 ผลการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 14 ซึ่งทำการวนรอบเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจำนวน 100 รอบ



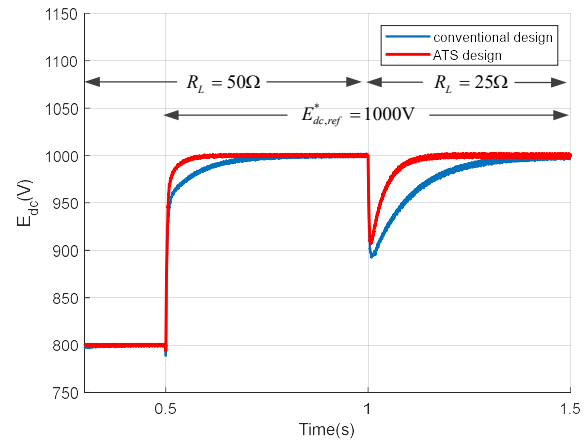
รูปที่ 14 ผลการลู่เข้าของคำตอบที่ดีที่สุดด้วยการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัวได้

ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมฟีดแบ็คด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัวได้ในรูปที่ 14 พบว่าค่าความผิดพลาดมีการลู่เข้าสู่ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.472% ค่าดังกล่าวมีค่าน้อยและสามารถยอมรับได้ ผลจากการค้นหาด้วยวิธีดังกล่าวทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมฟีดแบ็คแสดงได้ดังตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมฟีดแบ็คจากตารางดังกล่าวแสดงทั้งค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีการค้นหาที่ได้นำเสนอในบทความนี้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของสมรรถนะตัวควบคุมจึงได้ทำการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยบล็อก SimPowerSystem® ผลการจำลอง

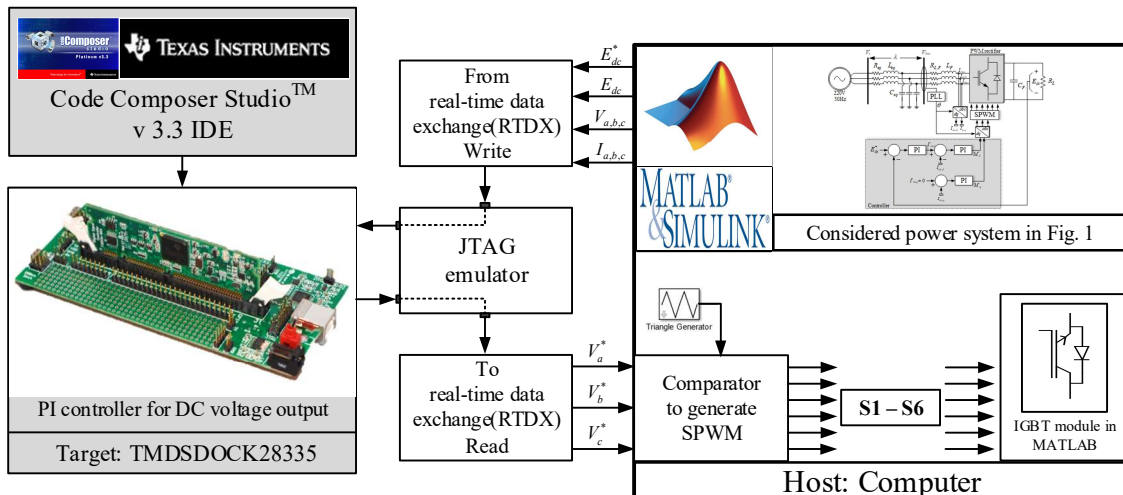
สถานการณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15 ทั้งนี้กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใช้ค่าเดียวกันกับหัวข้อย่อยที่ 2.3 (การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์) ยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีตามเชิงปรับตัวได้

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอ	วิธีดั้งเดิม	วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวได้
K_{pv}	0.26	0.3043
K_{iv}	4.41	13.23
K_{pi}	5.4	8.5569
K_{ii}	4500	4468.3



รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวได้



รูปที่ 16 แผนภาพการเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB

การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมพีไอที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีการที่นำเสนอจะดำเนินการจำลองสถานการณ์ด้วยการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงที่ 800V จากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 1000V ที่เวลา 0.5 วินาที และที่เวลา 1 วินาทีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 50Ω เป็น 25Ω ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวได้มีสมรรถนะผลการตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

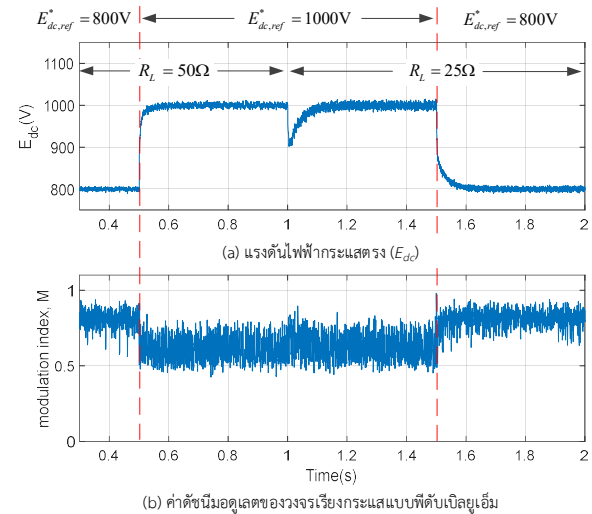
4. การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมกับการออกแบบตัวควบคุมทั้งวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวได้ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์จากการค้นหาด้วยวิธีที่นำเสนอให้สมรรถนะที่ดีกว่าทั้งเวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่ อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการค้นหาสามารถนำไปสร้างชุดทดสอบจริงได้ในอนาคตจึงได้ทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in loop, HIL) [21] ซึ่งเป็นการนำเอาบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ TMDSDOCK28335 มาทำการเขียนโปรแกรมการควบคุมลงในบอร์ดดังกล่าว ทั้งนี้อุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จะอยู่ภายในบล็อก SimPowerSystem® บนโปรแกรม MATLAB สัญญาณควบคุมที่เกิดขึ้นในการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปจะเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจริงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การเชื่อมต่ออุปกรณ์บอร์ด TMDSDOCK28335 และโปรแกรม MATLAB สำหรับจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 16

พิจารณารูปที่ 16 สังเกตได้ว่าคอมพิวเตอร์หลัก (host) และบอร์ด TMDSDOCK28335 เชื่อมต่อกันด้วย JTAG (joint test action group) ผ่านทางพอร์ต USB การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างกันมีลักษณะแบบเวลาจริง (real-time data exchange, RTDX) กระบวนการทำงานเริ่มต้นจากรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิง (E_{dc}^*) ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (E_{dc}) แรงดันสามเฟสสมมูลที่แหล่งจ่าย ($V_{a,b,c}$) และค่ากระแสสามเฟสที่ไหลผ่านสายส่ง ($I_{a,b,c}$) ซึ่งค่าดังกล่าวตรวจวัดได้จากระบบที่พิจารณาในบล็อก SimPowerSystem® จากนั้นค่าดังกล่าวจะถูกส่งไปยังบล็อก From Real-time data exchange (RTDX) Write บล็อกดังกล่าวทำหน้าที่เขียนข้อมูลที่ได้รับจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและส่งต่อไปประมวลผลด้วยตัวควบคุมที่ถูกเขียนขึ้นด้วยชุดคำสั่งภาษาซีบนโปรแกรม CCstudio v3.3 หลังจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลครบ 1 รอบการทำงานจะได้ค่าสัญญาณควบคุมเฟส a, b และ c ซึ่งจะถูกส่งออกจากบอร์ด TMDSDOCK28335 ผ่านบล็อกที่ชื่อว่า To Real-time data exchange (RTDX) Read บล็อกดังกล่าวทำหน้าที่รับข้อมูลสัญญาณควบคุมที่มีการโปรแกรมตัวควบคุมแล้วในบอร์ด TMDSDOCK28335 ส่งผ่านไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะที่อยู่ในบล็อก SimPowerSystem® ผ่านทางพอร์ต USB เพื่อให้ได้สัญญาณเอสพีดับเบิลยูเอ็มไปควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรเรียงกระแสแบบฟีดแบ็กเบิกลูเอ็ม การควบคุมดังกล่าวจะมีการประมวลผลด้วยบอร์ด TMDSDOCK28335 ตลอดเวลา ซึ่งผลของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปนี้สามารถยืนยันได้ว่าเมื่อนำระบบไฟฟ้าที่พิจารณาไปสร้างชุดทดสอบจริง ระบบจะไม่เกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากโปรแกรมการควบคุมทำให้ลดความเสี่ยงที่อุปกรณ์ของระบบเกิดการเสียหาย การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำหนดให้คาบเวลาสุ่มในการรับ-ส่งข้อมูลมีค่าเท่ากับ $30\mu s$ ซึ่งคาบเวลาสุ่มดังกล่าวพิจารณาจากคาบเวลาจริงของโปรแกรมตัวควบคุม ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของระบบจะใช้ค่าเดียวกันกับผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 15 แต่กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีโอเป็นค่าที่ได้จากการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวได้ ผลการจำลองแบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปจากรูปที่ 17 กำหนดให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงมีค่า 800V ที่เวลา 0.5 วินาที ทำการเปลี่ยนระดับแรงดันอ้างอิงเป็น 1000V และที่เวลา 1 วินาทีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดความต้านทานจาก 50Ω เป็น 25Ω ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตมีการตอบสนองที่รวดเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 17(a) ซึ่งสามารถยืนยันสมรรถนะของตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการค้นหาตามูเชิงปรับตัวได้ การจำลองสถานการณ์ที่ถูกเพิ่มเข้ามาอีกกรณีหนึ่งคือที่เวลา 1.5 วินาที ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงกลับมาที่ 800V โดยโหลดตัวต้านทานขณะนั้นยังคงมีค่าเท่ากับ 25Ω ผลที่ได้พบว่าระบบยังคงสามารถทำงานได้อย่างปกติและสังเกตได้ว่าค่าดัชนีมอดูเลตสำหรับควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ทำให้ยืนยันได้ว่าการควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีจะไม่พบปัญหาค่าดัชนีมอดูเลตเกิดการอิ่มตัวแสดงได้ดังรูปที่ 17(b) ดังนั้นการ

ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้กับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิ้ลยูเอ็มทำให้ได้ผลการตอบสนองของระบบที่มีสมรรถนะดีทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิ้ลยูเอ็มเพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการแปลงดีคิวเนื่องจากเหมาะกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล ในขั้นแรกการออกแบบตัวควบคุมจะดำเนินการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้น การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก SimPowerSystem® บนโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทความนี้มีความถูกต้องทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้

สำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้เป็นเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ในการออกแบบตัวควบคุมผ่านแบบจำลอง โดยทำการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมจนกว่าจะได้ค่าที่ทำให้สมรรถนะของระบบดีที่สุด ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากค้นหาด้วยวิธีตาบู่เชิงปรับตัวได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม เมื่อพิจารณาจากผลการตอบสนองพบว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบพีดับเบิ้ลยูเอ็มที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอซึ่งได้จากการค้นหาด้วยวิธีตาบู่เชิงปรับตัวได้มีความรวดเร็วและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ไวกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม การค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ยังสามารถกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ค่าดัชนีมอดูเลตต่องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 นอกจากนั้นบทความนี้ยังได้นำเสนอผล

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อยืนยันผลการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสามารถยืนยันผลการควบคุมได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Anand S, Fernandes BG, Guerrero J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*.2013;28(4):(1900-1913).
- [2] Boroyevich D, Cvetkovic' I, Dong D, Burgos R, Wang F, Lee F. Future electronic power distribution systems a contemplative view. In: *Proceeding of 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*. 2010 May 20-22; Romania. Brasov; 2010.
- [3] Emadi A, Ehsani M, Miller JM. *Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles*. CRC Press; 2003.
- [4] Rashid MH. *Power Electronics Handbook*. San Diego, CA: Academic Press; 2001.
- [5] Chaijarunudomrung K, Areerak K-N, Areerak K-L. Modeling of three- phase controlled rectifier using a DQ method. *Proceeding of 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering*. 2010 19-20 June; China. Beijing; 2010.
- [6] Areerak K, Bozhko SV, Asher GM, Thomas DWP. DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads. *Proceeding of 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2008.

- [7] Pakdeeto J, Areerak K-N, Areerak K-L. Large-signal model of DC micro- grid systems feeding a constant power load. *Proceeding of the 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON2017)*. 2017 8- 10 March; Thailand. Pattaya; 2017: p. 21-24.
- [8] Nise NS. *Control Systems Engineering*. Hoboken: Wiley; 2011.
- [9] Pakdeeto J, Chanpittayagit R, Areerak K- N, Areerak K-L. The optimal controller design of buck-boost converter by using adaptive Tabu search algorithm based on state-space averaging model. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2017;12(3): 1146-1155.
- [10] Mahdavi J, Emaadi A, Bellar MD, Ehsani M. Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1997; 44(8):767-770.
- [11] Emadi A. Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized State-space averaging method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004;51(5):992-1000.
- [12] Pakdeeto J, Areerak K-N, Areerak K-L. Modelling and stability analysis of AC-DC power systems feeding a speed controlled DC motor. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2018;13(4): 1566-1577.
- [13] Suyapan, A, Areerak K-N, Areerak K-P. A controller design of more electric aircraft power systems using an adaptive Tabu search algorithm. *Proceeding of International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2017 8-10 March; Thailand. Pattaya; 2017.
- [14] Puangdownreong D, Nawikavatan A, Thammarat C. Optimal design of I-PD controller for DC motor speed control system by cuckoo search. *Procedia Computer Science*. 2016;86:83-86.
- [15] Puangdownreong D, Areerak K- N, Srikaew A, Sujitjorn S, Totarong P. System identification via Adaptive Tabu Search. *Proceeding of 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology (IEEE ICIT '02)*. 2002 11- 14 Dec; Thailand. Bangkok;2002.
- [16] O'Rourke CJ, Qasim MM, Overlin MR, Kirtley JL. A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019;34(4): 2070-2083.
- [17] Kundur P, Balu NJ, Lauby MG. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill; 1994
- [18] Bacha S, Munteanu I, Bratcu AI. *Power Electronics Converters Modeling and Control: With Case Studies*. In Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. London: Springer; 2014.
- [19] Tsang KM, Chan WL, Cascade controller for DC/DC buck convertor. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2005;152(4):827-831.
- [20] Chaijarunudomrung K, Areerak K-N, Areerak K-L, Srikaew A. The controller design of three-phase controlled rectifier using an adaptive tabu search algorithm. *Proceeding of The 8 th Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011*. 2011 17-19 May; Thailand. Khon Kaen: 2011.
- [21] Narongrit, T, Areerak K-P, Areerak K-N. A New design approach of fuzzy controller for shunt active power filter. *Electric Power Components and Systems*. 2015;43(6):685-694.