



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

**การระบุเอกลักษณ์ระบบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ
บริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ที่มีการควบคุมต่อขนานกันด้วยวิธีการ
ทางปัญญาประดิษฐ์**

**Identification for stability analysis of three-phase bridge rectifier feeding the parallel
controlled buck converters by artificial intelligence techniques**

จักรกริช ภักดีโต¹ รัฐพล โพธิ์สังข์² อลิสา ถนอมเมือง² กองพัน อารีรักษ์^{2*} กองพล อารีรักษ์²

¹ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Jakkrit Pakdeeto¹ Ratapon Phosung² Alisa Thanommuang² Kongpan Areerak^{2*} Kongpol Areerak²

¹ Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB Bangkok 10800

² School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

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

วันที่รับบทความ 29 มีนาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 30 กรกฎาคม 2565; วันที่ตอบรับบทความ 20 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรม บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จำนวน 3 วิธี ได้แก่ วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค และวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว มาประยุกต์ใช้เพื่อระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ที่ถูกต้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่ง ส่งผลกระทบบ่อยอย่างมีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อทราบถึงจุด การทำงานของระบบที่เกิดการขาดเสถียร อย่างไรก็ตามไม่เพียงแต่พฤติกรรมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่านั้นแต่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบก็ ยังส่งผลกระทบต่อจุดเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดได้โดยตรง ดังนั้นบทความนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลการตอบสนองของระบบได้อย่างถูกต้อง หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดเดาจุดเกิดการขาดเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่าน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการ ทดสอบด้วยชุดทดสอบ

คำสำคัญ

การระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ

Abstract

Artificial intelligent techniques are very popular in engineering works. This paper presents three techniques as follows: genetic algorithm, particle swarm optimization and adaptive tabu search to identify the accurate parameters in the mathematical model of AC-DC power system feeding the parallel controlled buck converters. The controlled power

converters behave as the constant power loads in which they can significantly degrade the system stability. Hence, the stability analysis is necessary to predict the unstable point of the system. However, it is not only the behaviors of the controlled power converters but the parameters of the system also affect the system stability. Some parameters cannot be measured by the instrument directly. Therefore, the artificial intelligent techniques will be used to search the parameter values that correctly represent the system response. After these parameters are achieved, the dynamic model with accurate parameters will be used for the stability analysis by the eigenvalue theorem via the mathematical model. The stability analysis verification will be confirmed by the simulation and experimental results.

Keywords

model identification; artificial intelligent; mathematical model; stability analysis

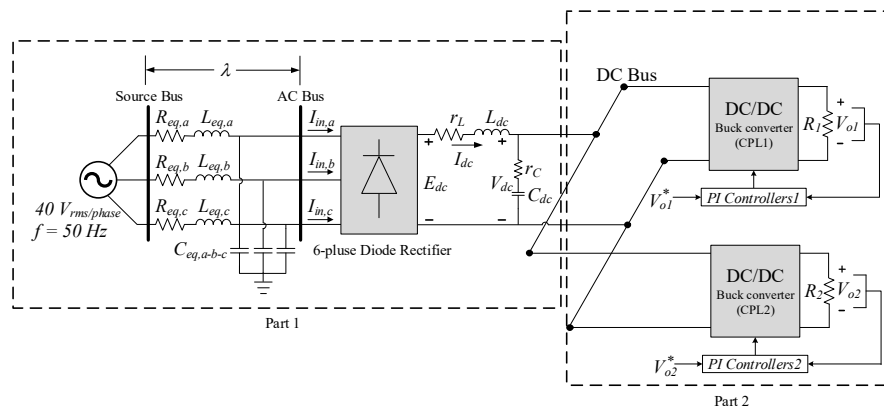
1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังได้ถูกนำมาใช้กับระบบต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน ระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก และระบบรางไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไปโหลดของระบบดังกล่าวมักจะใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมซึ่งจะเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ จากงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่า โหลดวงจรแปลงผันดังกล่าวมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว [1-2] ซึ่งจะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ สามารถลดทอนค่าความต้านทานของวงจรกรองได้ ส่งผลให้เกิดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรกรอง หรือกล่าวได้ว่าจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการขาดเสถียรภาพ [3-4] การศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงมีความสำคัญ เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบ ณ จุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยทั่วไปการวิเคราะห์เสถียรภาพจะถูกจำแนกออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น ทฤษฎีบทค่าเจาะจง [5-11] และเกณฑ์ของมิตเติลบุรค์ [12] เป็นต้น แต่วิธีดังกล่าวจะมีข้อจำกัดคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความถูกต้องในช่วงการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานแคบๆเท่านั้น นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น วิธีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์รณาสเปซ [10] และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ [13] เป็นต้น แต่วิธีนี้จะมี

ข้อจำกัดคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความยุ่งยาก หรือไม่สามารวิเคราะห์เสถียรภาพได้หากระบบมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นในบทความนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและสามารถพิจารณาแนวโน้มการขาดเสถียรภาพได้อย่างชัดเจน แต่ถึงอย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากที่สุด ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่สามารถวัดค่าได้อย่างง่าย เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ เป็นต้น และอีกกลุ่มหนึ่งคือค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดค่าได้จากเครื่องมือวัด เช่น ค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัทช์ที่มีการควบคุมต่อเนื่องกันโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งมีอยู่หลากหลายวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm, GA) [14] วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization, PSO) [15] วิธีการค้นหาแบบตาบูกิปรับเปลี่ยน (adaptive tabu search, ATS) [11,16-18] อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียม [19] วิธีการค้นหาค่าตอบแบบอาณานิคมมด [20] เป็นต้น สำหรับในบทความนี้ได้เลือกใช้วิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS มาพิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาที่ได้จากวิธีดีคิว [5,7] เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

[15], [17] การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้ จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดสอบจริง ซึ่งจะต้องแสดงให้เห็นว่ากระบวนการระบุเอกลักษณ์ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้ในจุดปฏิบัติงานเดียวกัน รวมทั้งมีความถูกต้องแม่นยำ แม้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการทั้ง 3 จะมีค่าที่แตกต่างกัน

บทความนี้ประกอบด้วย 7 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 ได้กล่าวถึงระบบที่จะใช้ในการพิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงและชุดทดสอบ สำหรับหลักการค้นหาของวิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS จะได้รับการอธิบายไว้ในส่วนที่ 4 ลำดับถัดมาส่วนที่ 5 เป็นการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ในส่วนที่ 6 ยังได้ดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์โดยอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ร่วมกับผลจากชุดทดสอบจริง ในลำดับสุดท้าย ส่วนที่ 7 เป็นการสรุปและอภิปรายข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่า สามารถพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล สายส่งกำลังทางฝั่งเอซี (R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) และวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณดีซี (r_c, C_{dc}, r_L, L_{dc}) โดยค่าพารามิเตอร์ในสายส่งและวงจรกรองดังกล่าวจะทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดได้ยากในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง [4], [21] ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำส่วนที่ 1 ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเข้าสู่กระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะได้รับคำแนะนำในหัวข้อถัดไป สำหรับในส่วนที่ 2 เป็นวงจรทางฝั่งโหลดจะประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยค่าพารามิเตอร์ใน

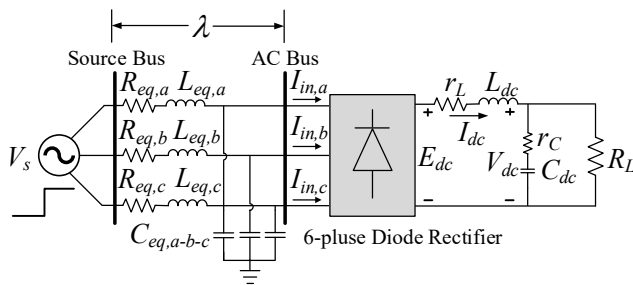
วงจรแปลงผันแบบบัคค์และตัวควบคุมจะไม่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพ [22] ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะนำระบบไฟฟ้าในส่วนที่ 2 มาใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ แต่อย่างไรก็ตาม โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์เมื่อมีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง [1-4] ดังนั้นในหัวข้อที่ 6 จะได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นลำดับถัดไป

3. ระบบที่ใช้พิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์

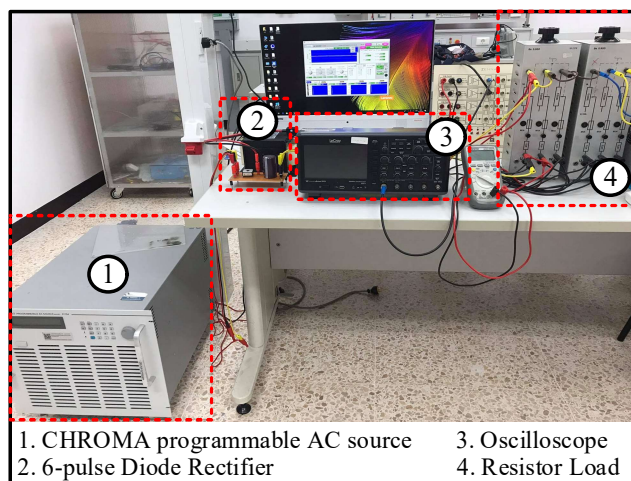
จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายในรูปที่ 1 (ส่วนที่ 1) จะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า R_{eq} L_{eq} r_L L_{dc} r_c และ C_{dc} ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ในวงจรทางฝั่ง

โหลดจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพแต่อย่างใด ดังนั้นระบบที่ใช้สำหรับการพิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์ในบทความนี้จะนำตัวต้านทาน (R_L) มาเป็นโหลดของวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายแทนวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2 และสามารถแสดงชุดทดสอบจริงของระบบดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3

พิจารณาจากรูปที่ 2 และ 3 สามารถแบ่งการค้นหาวางออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่ 1 จะเป็นการค้นหาค่า r_L และ L_{dc} โดยอาศัยการวัดค่าจากชุดทดสอบจริงด้วยเครื่องมือวัด LCR METER ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.0002 mH และ 0.5280 Ω ตามลำดับ ในส่วนที่ 2 จะดำเนินการค้นหาค่า R_{eq} L_{eq} r_C และ C_{dc} โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนออย่างละเอียดในหัวข้อที่ 5 ต่อไป สำหรับค่า C_{eq} ในทางปฏิบัติถือว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาค่าในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 nF



รูปที่ 2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 3 ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2

4. วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอหลักการค้นหาของวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะประกอบด้วย วิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS โดยจะสรุปเป็นขั้นตอนเพื่ออธิบายหลักการค้นหาไว้พอสังเขปเท่านั้น

4.1 วิธี GA

วิธี GA เป็นอัลกอริทึมที่อาศัยแนวคิดการวิวัฒนาการทางสายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตเพื่อความอยู่รอดในระบบชีววิทยามาทำการจำลองอยู่บนคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการกระบวนการค้นหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้ [14]

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนรอบของการค้นหา (Generation) และจำนวนรุ่นประชากรสูงสุดของการค้นหา (Generation_{max})

ขั้นที่ 2 สร้างประชากรเริ่มต้นจำนวน m โครโมโซม และกำหนดให้ C_i เป็นโครโมโซมตัวที่ 1 ถึง m

ขั้นที่ 3 ประเมินค่าความเหมาะสมของ C_i ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ε) แล้วส่งค่ากลับให้ระบบการค้นหาแบบ GA

ขั้นที่ 4 ทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้กับรุ่นประชากรถัดไป

ขั้นที่ 5 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากขั้นที่ 4 มาเข้ากระบวนการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ เพื่อให้ได้ประชากรลูกหลานที่ดีขึ้น พร้อมทั้งประเมินค่าความเหมาะสมด้วย ε

ขั้นที่ 6 แทนที่ประชากรรุ่นเดิมด้วยประชากรลูกหลาน

ขั้นที่ 7 ถ้า Generation > Generation_{max} ให้หยุดการค้นหา โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดจะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปขั้นที่ 4 ใหม่

4.2 วิธี PSO

วิธี PSO เป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากรโดยมีอนุภาคย่อย ๆ จำนวน n อนุภาค รวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปในปริภูมิการค้นหา เพื่อค้นหาคำตอบที่ต้องการ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ และข้อมูลการค้นหาจากอนุภาคที่พบคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่ม สำหรับขั้นตอนการค้นหาสามารถสรุปได้ดังนี้ [15]

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนรอบของการค้นหา (Count) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($\text{Count}_{\max}$)

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง ($\vec{P}_j$) และเวกเตอร์ความเร็ว ($\vec{V}_j$) ของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง n

ขั้นที่ 3 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคด้วย ε ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี **กรณีที่ 1** ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค หรือค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง ($gbest$) จะกำหนดให้ $gbest = f(\vec{P}_j)$ และ $\vec{P}_{gbest} = \vec{P}_j$ **กรณีที่ 2** ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน ($pbest$) ที่เคยพบมาก่อน จะกำหนดให้ $pbest = f(\vec{P}_j)$ และ $\vec{P}_{pbest,j} = \vec{P}_j$

ขั้นที่ 4 ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ (1)

$$\vec{V}_j(\text{new}) = \vec{V}_j(\text{old}) + \rho_p (\vec{P}_{pbest,j} - \vec{P}_j(\text{old})) + \rho_g (\vec{P}_{gbest,j} - \vec{P}_j(\text{old})) \quad (1)$$

โดยที่ C_p คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบเชิงปริมาตร C_g คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบทางสังคม ρ_p คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบเชิงปริมาตร และ ρ_g คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบทางสังคม

ขั้นที่ 5 ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบการค้นหาต่อไปโดยใช้สมการที่ (2)

$$\vec{P}_i(\text{new}) = \vec{P}_i(\text{old}) + \vec{V}_i(\text{new}) \quad (2)$$

ขั้นที่ 6 ถ้า $\text{Count} > \text{Count}_{\max}$ ให้หยุดการค้นหา โดยคำตอบที่ดีที่สุดแบบ $gbest$ จะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปขั้นที่ 3 ใหม่

4.3 วิธี ATS

วิธี ATS เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบอด โดยทำการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี เพื่อแก้ปัญหาการติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบ

เฉพาะถิ่นและเพิ่มสมรรถนะในการค้นหา [11,16] ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา ($radius$) จำนวนรอบของการค้นหา (Round) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($\text{Round}_{\max}$)

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าตอบเริ่มต้น (S_0) ภายใต้พื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

ขั้นที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบรอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ

ขั้นที่ 4 ทำการประเมินคำตอบของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ ด้วย ε โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดภายใน $S(R)$

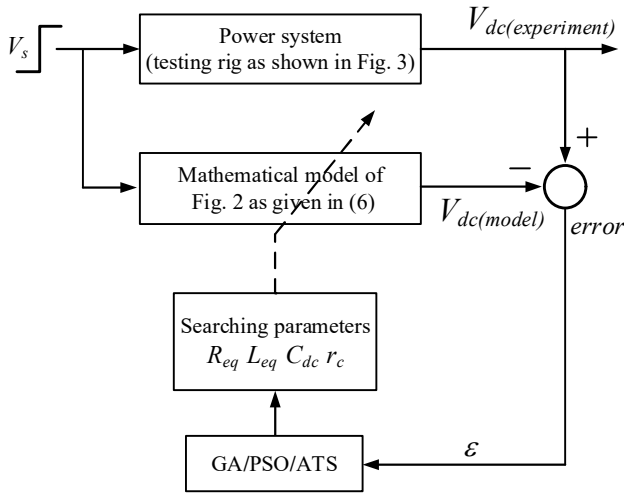
ขั้นที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ จะกำหนดให้ $S_0 = S_1$

ขั้นที่ 6 ถ้า $\text{Round} < \text{Round}_{\max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ คำตอบที่ดีที่สุดไมเช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 หลังจากนั้นกลไกการเดินย้อนรอยจะถูกใช้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น พร้อมทั้งดำเนินการปรับลดค่า $radius$ ลงเรื่อย ๆ ด้วยอัตราการปรับลดรัศมี DF ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) ซึ่งจะเรียกกลไกนี้ว่า “กลไกการปรับลดค่ารัศมี”

$$radius_{\text{new}} = \frac{radius_{\text{old}}}{DF} \quad (3)$$

5. การระบุเอกลักษณ์ของวิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางประดิษฐ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2 จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบจริง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และอัลกอริทึมการค้นหาด้วยวิธี GA, PSO และ ATS ดังแสดงได้ในโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาค่าพารามิเตอร์

พิจารณาจากรูปที่ 4 สามารถแสดงขั้นตอนในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของระบบได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ทำงานการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_s) ทั้งหมด 2 ย่านการทำงานคือ V_s เปลี่ยนแปลงจาก 30 V_{rms} เป็น 40 V_{rms} และจาก 45 V_{rms} เป็น 55 V_{rms}

ขั้นที่ 2 นำผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตดีซีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ($V_{dc(model)}$) มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตดีซีของชุดทดสอบ ($V_{dc(experiment)}$) เพื่อคำนวณหาความผิดพลาดแบบอาร์เอ็มเอสของแต่ละข้อมูล (W_x) ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$W_x = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n_d}} \quad (4)$$

โดยที่ $error = |V_{dc(experiment)} - V_{dc(model)}|$, n_d คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด และ x มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 2 เพื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมของระบบค่า W_1 และ W_2 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากข้อมูลชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ บทความนี้จะใช้ค่าวัตถุประสงค์ (ε) ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณค่า ε ได้จากการนำค่า W_1 และ W_2 มาหาค่าเฉลี่ยตามจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการค้นหา (β) ซึ่งมีทั้งหมด 2 ชุด ดังแสดงได้ในสมการที่ (5)

$$\varepsilon = \sum_{x=1}^{\beta} \frac{W_x}{\beta} \quad (5)$$

ขั้นที่ 3 นำค่า ε ส่งให้อัลกอริทึมการค้นหา GA PSO และ ATS ทำการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} จนกระทั่งได้ค่า ε ที่น้อยที่สุด โดยจะกำหนดให้ขอบเขตการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} มีค่าเท่ากับ [0.01 Ω , 0.1 Ω] [100 μH , 300 μH] [800 μF , 1500 μF] และ [0.1 Ω , 4 Ω] ตามลำดับ

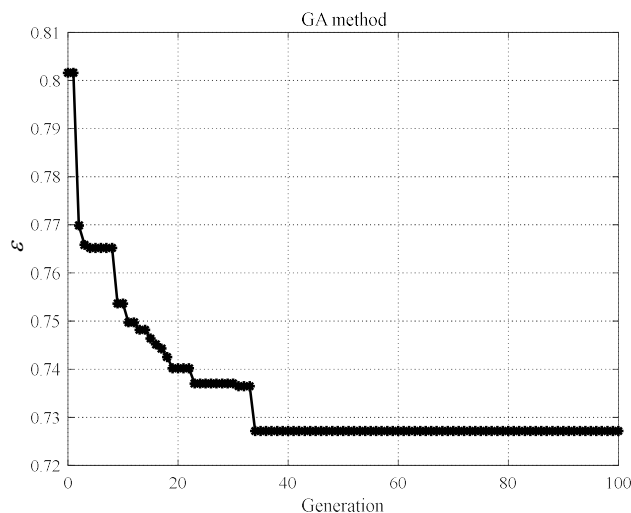
จากการระบุเอกลักษณ์ข้างต้น จำเป็นต้องอาศัยผลตอบสนอง $V_{dc(model)}$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้คำนวณหา ε ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาอันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ในวงจร [5-11,15,17] ซึ่งจะทำให้การประมวลผลเกิดความล่าช้า ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำวิธีดีคิว [5], [7] มาใช้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงได้ในสมการที่ (6)

การใช้อัลกอริทึม GA PSO และ ATS ในการค้นหาค่า R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} ในบทความนี้จะดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ 5 ครั้ง ครั้งละ 100 รอบ การพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เพียง 1 ชุดคำตอบผ่านเงื่อนไขค่า ε น้อยที่สุดของแต่ละวิธี โดยกำหนดให้ขอบเขตการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} อยู่ในช่วง [0.01, 0.1], [1 $\times 10^{-4}$, 3 $\times 10^{-4}$], [0.1, 4] และ [8 $\times 10^{-4}$, 15 $\times 10^{-4}$] ตามลำดับ สำหรับขอบเขตดังกล่าวได้มาจากการทดลองสุ่มหาคำตอบ ซึ่งคำตอบที่ได้ต้องไม่ชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างที่กำหนดไว้ หากคำตอบที่ได้ชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่าง จะต้องกำหนดขอบเขตของคำตอบใหม่ ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในบทความนี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้ผลการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีแสดงได้ดังรูปที่ 5 ถึง 7

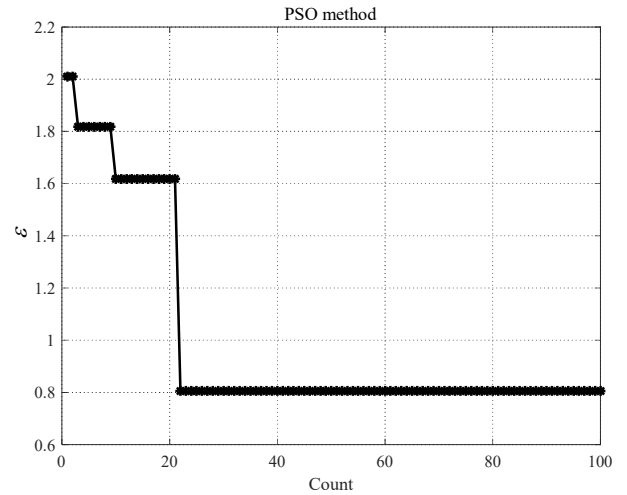
$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} \\
 \quad - \left(\frac{R_L - r_c}{R_L L_{dc}} \right) V_{dc} \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{R_L C_{dc}} V_{dc}
 \end{cases} \quad (6)$$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากวิธี GA, PSO และ ATS

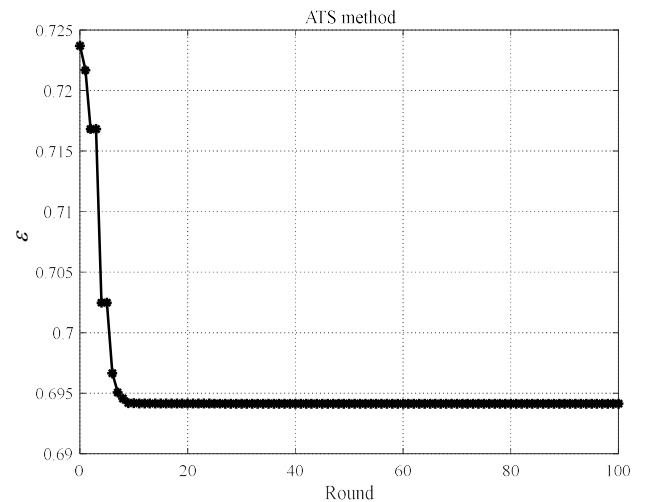
วิธี	ค่าพารามิเตอร์					เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	R_{eq} (Ω)	L_{eq} (μ H)	C_{dc} (μ F)	r_c (Ω)	ε	
GA	0.0324	143.59	1258.02	0.5871	0.7271	181.1548
PSO	0.0665	149.91	1220.73	0.5912	0.8058	521.6432
ATS	0.0765	121.37	1276.31	0.5530	0.6941	439.2930



รูปที่ 5 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธี GA

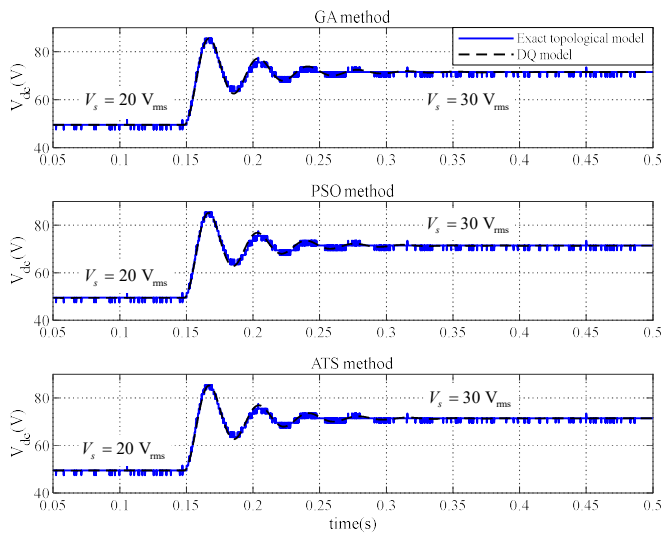


รูปที่ 6 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธี PSO

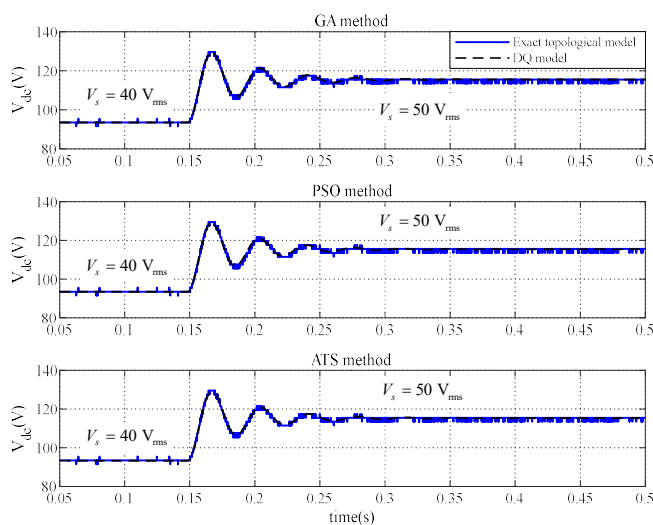


รูปที่ 7 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธี ATS

จากผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 พบว่า พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาทั้ง 3 วิธี มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย สำหรับวิธีการค้นหาแบบ GA จะใช้เวลาในการค้นหาน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการค้นหาแบบ ATS จะให้ค่า ε น้อยที่สุด ในขณะที่วิธีการค้นหาแบบ PSO จะใช้เวลาในการค้นหานานที่สุดอีกทั้งยังมีค่า ε มากที่สุด สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาในบทความนี้จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดสอบจริงซึ่งเป็นระดับแรงดันที่ไม่ได้ใช้สำหรับการค้นหา โดยกำหนดให้ V_s เปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่ขึ้นไจาก 20 V_{rms} เป็น 30 V_{rms} และ V_s เปลี่ยนแปลงจาก 40 V_{rms} เป็น 50 V_{rms} ดังแสดงได้ในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการระบุค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_s จาก 20 V_{rms} ไปเป็น 30 V_{rms}



รูปที่ 9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการระบุค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_s จาก 40 V_{rms} ไปเป็น 50 V_{rms}

จากรูปที่ 8 และ 9 จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนอง V_{dc} ที่ได้จากแบบจำลองและผลตอบสนอง V_{dc} จากชุดทดสอบจริงมีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงถือได้ว่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยอัลกอริทึม GA PSO และ ATS เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อถัดไป

6. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุดจะอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6,8-9,11,23] โดยแบบจำลองดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (7) [6,24]

พิจารณาจากสมการที่ 7 พบว่าเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง [6,24] แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{14 \times 14} \delta \mathbf{x}_{14 \times 1} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{14 \times 3} \delta \mathbf{u}_{3 \times 1} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{3 \times 14} \delta \mathbf{x}_{14 \times 1} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{3 \times 3} \delta \mathbf{u}_{3 \times 1} \end{cases} \quad (8)$$

โดยที่ เมทริกซ์ $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ และ $\mathbf{D}$ คือเมทริกซ์จาโคเบียนแบบจำลองในสมการที่ (8) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ใน [6] การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถคำนวณหาค่าเจาะจงของระบบที่จุดการทำงานต่างๆได้จากสมการที่ (9)

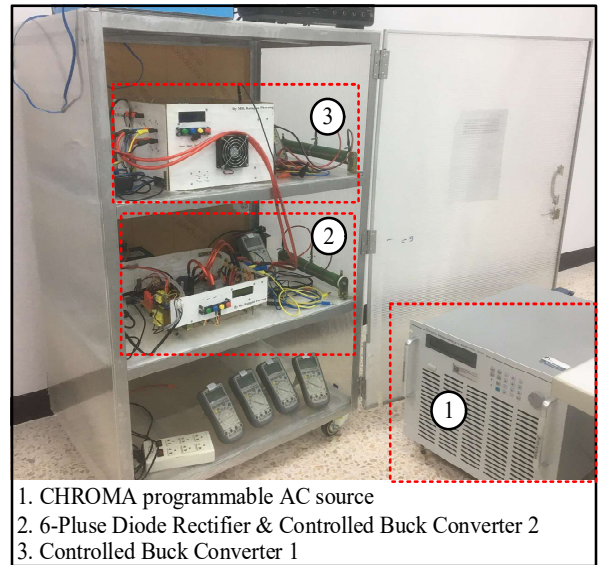
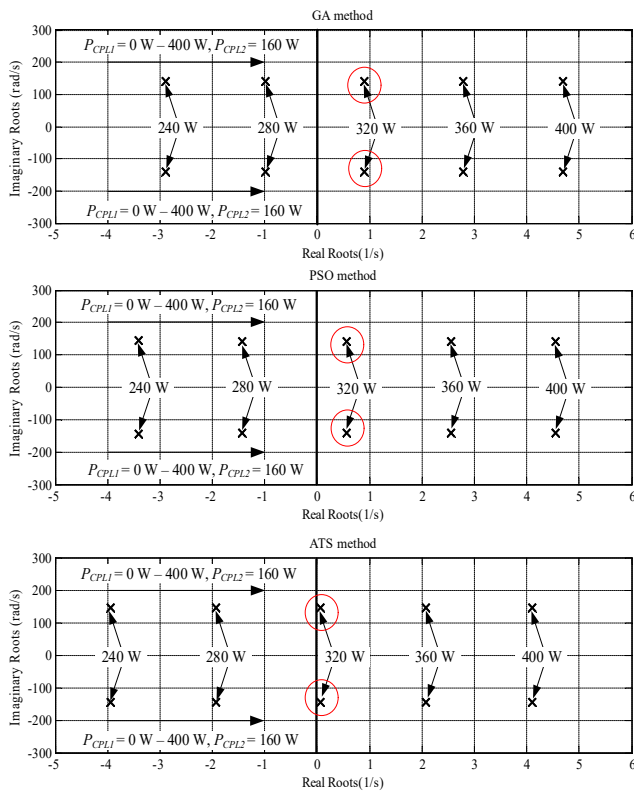
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) สามารถหาค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ทั้งหมด 14 ค่า โดยที่ค่าพารามิเตอร์ในเมทริกซ์ $\mathbf{A}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ได้มาจากการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้จะพิจารณาค่าเจาะจงที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเท่านั้นซึ่งเป็นค่าเจาะจงที่อยู่ใกล้แกน $j\omega$ มากที่สุดหรือคู่โพลเด่น (dominant poles) มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงได้ดังในรูปที่ 10 โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับผลจากชุดทดสอบในรูปที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 12

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1}^2 - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\
+ \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2}^2 - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{i1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2}^2 \\
+ \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{v2} - \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
\dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{1}{L_1} V_{o1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{1}{L_2} V_{o2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v,2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
\end{cases} \quad (7)$$

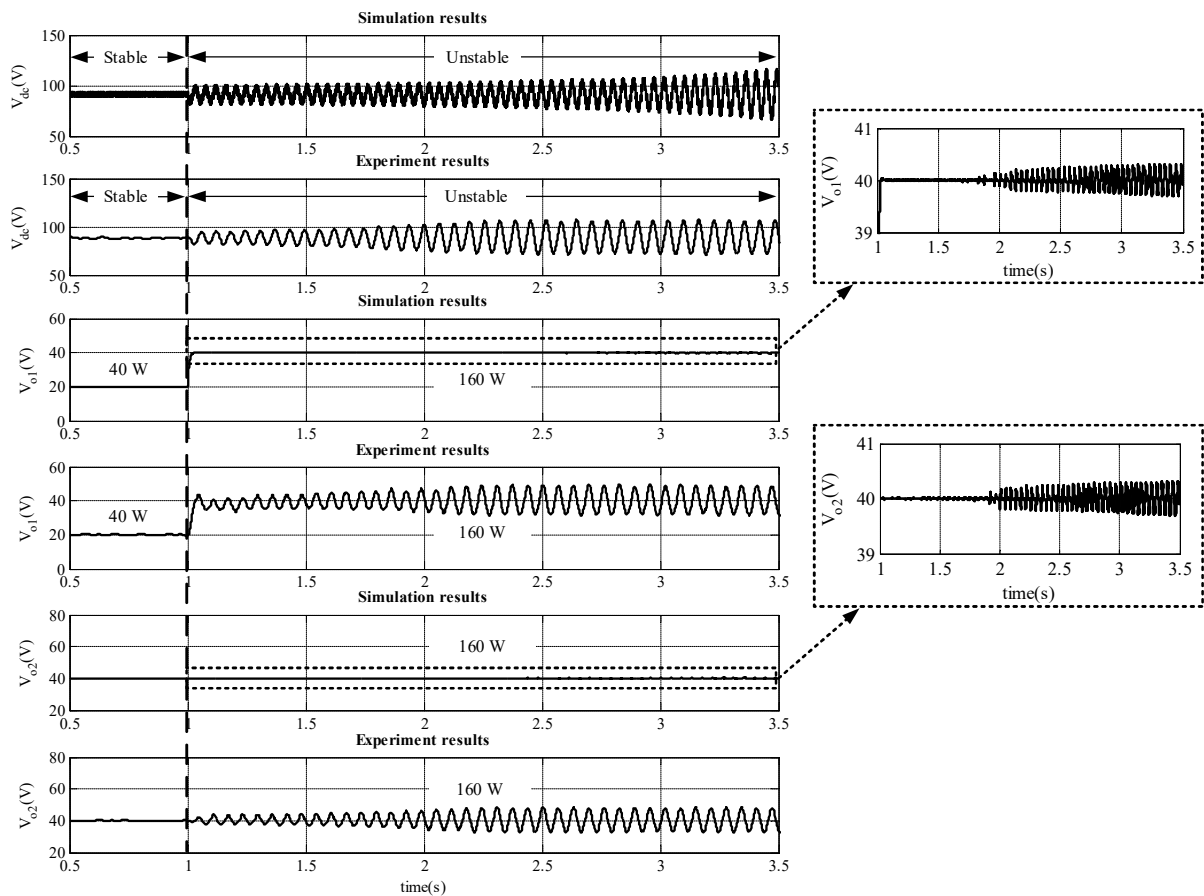
จากรูปที่ 10 และ 12 เมื่อกำหนดให้โพลตรงจลแปลงผันแบบบัคค์ซุดที่ 2 ($P_{CPL,2}$) มีค่าคงที่เท่ากับ 160 W (40 V) จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มโพลตรงจลแปลงผันแบบบัคค์ซุดที่ 1 ($P_{CPL,1}$) ให้มีค่าเท่ากับ 160 W (40 V) ผลรวมของโพลตรงจลแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ซุด ($P_{CPL,1} + P_{CPL,2}$) จะมีค่าเท่ากับ 320 W ซึ่งทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยสามารถดูได้จากคู่โพลเด่นของระบบที่เคลื่อนจากขอบเขตการมีเสถียรภาพ (stable region) ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส (s-plane) มายังขอบเขตการขาดเสถียรภาพ (unstable

region) ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส (คู่โพลในวงกลมสีแดง) นอกจากนี้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

รูปที่ 10 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 12 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พิจารณาจากรูปที่ 12 สังเกตได้ว่าเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุด มีการเปลี่ยนแปลงจาก 200 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 1 วินาที แรงดัน V_{dc} จะมีการสั่นไกวเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงดัน V_{o1} และ V_{o2} เกิดการสั่นไกวด้วยเช่นเดียวกัน จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึม GA, PSO และ ATS สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง ณ จุดปฏิบัติงานเดียวกัน ถึงแม้ว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึมการค้นหาทั้ง 3 จะมีค่าที่แตกต่างกัน

7. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกัน การระบุเอกลักษณ์ในบทความนี้อาศัยอัลกอริทึมการค้นหา GA, PSO และ ATS เพื่อระบุค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบ โดยอัลกอริทึมการค้นหาทั้ง 3 วิธีมีกลไกการค้นหาที่ต่างกัน สำหรับอัลกอริทึม GA มีกลไกในการสร้างกลุ่มประชากรโดยอาศัยการถ่ายทอดพันธุกรรมจากกลุ่มประชากรต้นแบบในรุ่นแรกสู่รุ่นถัดไป ในขณะที่อัลกอริทึม PSO มีกลไกการปรับค่าความเร่งและตำแหน่งเพื่อให้ได้ค่าอนุภาคใหม่ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่าอนุภาคใหม่ที่ได้จะแตกต่างไปจากค่าอนุภาคเก่าเสมอ ส่วนอัลกอริทึม ATS มีกลไกในการสุ่มคำตอบเริ่มต้นและทำการปรับลดรัศมีการค้นหาเพื่อให้กลุ่มคำตอบแคบลงในแต่ละรอบการค้นหา นอกจากนั้นยังมีกลไกการเดินย้อนรอยเพื่อแก้ไขปัญหาการติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) จากผลการตรวจสอบความถูกต้องที่อาศัยการเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดสอบจริง จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณทั้ง 2 มีลักษณะที่สอดคล้องและคล้ายคลึงกันอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงถือได้ว่าวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ทั้ง 3 วิธีสามารถระบุค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงพบว่าสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึม GA, PSO และ ATS จะมีค่าที่

แตกต่างกัน โดยอัลกอริทึม ATS จะให้ค่า ε น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม GA และ PSO

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI) กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (NSRF) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Grigore V, Hatonen J, Kyyra J, Suntio T. Dynamics of a buck converter with a constant power load. *Proceeding of IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Fukuoka, Japan; 1998. p. 72–78.
- [2] Jusoh AB. The instability effect of constant power loads. *Proceedings of National Power and Energy Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia; 2004. p. 175–179.
- [3] Emadi A, Khaligh A, Rivetta CH, Williamson GA. Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. 55(4): 1112–1125.
- [4] Rahimi AM, Emadi A. An analytical investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2009. 58(6): 2689–2702.
- [5] Areerak K-N, Wu T, Bozhko SV, Asher GM. Thomas DWP. Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2011. 47(7): 2574–2589.
- [6] Sopapirm T, Areerak K-N, Areerak K-L. Stability analysis of AC distribution system with six-pulse

- diode rectifier and multi- converter power electronic loads. *International Review of Electrical Engineering*. 2011. 6(7): 2919–2928.
- [7] Areerak K- N, Bozhko SV, Asher GM, Delillo L, Thomas DWP. Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. 48(1): 329–347.
- [8] Areerak K- N, Sopapirm T, Bozhko S, Hill CI, Suyapan A, Areerak KL. Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC– DC power systems feeding constant power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. 33(10): 8927–8935.
- [9] Pakdeeto J, Areerak K- N, Bozhko S, Areerak K- L. Stabilization of DC microgrid systems using the loop- cancellation technique. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. 9(3): 2652–2663.
- [10] Suyapan A, Areerak K- N, Bozhko S, Yeoh SS, Areerak K- L. Adaptive stabilization of a permanent magnet synchronous generator-based DC electrical power system in more electric aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021. 7(4): 2965–2975.
- [11] Phosung R, Areerak K- N, Sopapirm T, Areerak K- L. 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.
- [12] Riccobono A, Santi E. Comprehensive review of stability criteria for DC Power distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. 50(5): 3525–3535.
- [13] Griffo A, Wang J. Large signal stability analysis of more electric aircraft power system with constant power loads. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. 48(1): 477–489.
- [14] Narongrit T, Areerak K- L, Areerak K- N. Design of an active power filter using genetic algorithm technique. *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases*. University of Cambridge, UK; 2010. p. 46–50.
- [15] Chonsatidjamroen S, Areerak K- N, Areerak K- L. The optimal cascade PI controller design of buck converters. *Proceeding of International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. Phetchaburi, Thailand; 2012. p. 1-4.
- [16] Puansdownreong D, Areerak K- N, Srikaew A, Sujitjorn S, Totarong P. System identification via adaptive Tabu search. *Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology*. Bangkok, Thailand; 2002. p. 915-920.
- [17] 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 and Technology*. 2017. 12(3): 1146–1155.
- [18] Udomsuk S, Areerak K- N, Areerak T, Areerak K- L. Power loss identification of three - phase induction motor using adaptive tabu search. *Proceeding of International Electrical Engineering Congress*. Pattaya, Thailand; 2017. p. 337–340.
- [19] Shen L, Li J, Wu Y, Tang Z, Wang Y. Optimization of artificial bee colony algorithm based load balancing in smart grid cloud. *Proceeding of IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia*. Chengdu, China; 2019. p. 1131–1134.

- [20] Lirui G, Limin H, Liguoz Z, Liguoz L, Jie H. Reactive power optimization for distribution systems based on dual population ant colony optimization. *Proceeding of Chinese Control Conference*. Kunming, China; 2008. p. 89–93.
- [21] Cespedes M, Xing L, Sun J. Constant-power loads system stabilization by passive damping. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2011. 26(7): 1832–1836.
- [22] Pakdeeto J, Thanommuang A, Chaicharoenudomrung K, Areerak K-N, Areerak K-L. The effect of parameter variations of system stability for AC-DC power system feeding controlled buck converter. *International Conference on Power, Energy and Innovations*. Nakhon Ratchasima, Thailand; 2021. p. 61–64.
- [23] Sopapirm T, Areerak K- N, Areerak K- L. The identification of AC-DC power system parameter using an adaptive tabu search technique. *International Review of Electrical Engineering*. 2012. 7(4): 4655–4662.
- [24] Sopapirm T, Areerak K- N, Areerak K- L. The averaging model of a six- pulse diode rectifier feeding paralleled buck converters. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2012. 6(1): 58–65.