

การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว

The cascade PI controller design of a boost converter using an adaptive Tabu search algorithm

วิภุษณะ ฉายินทุ^{1*}

Wiphusana Chayinthu^{1*}

Received: 15 October 2020 ; Revised: 26 October 2020 ; Accepted: 10 November 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว แบบจำลองทางพลวัตของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถหาได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนการใช้แบบจำลองที่ผ่านคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้ผลการตอบสนองของแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมในเรื่องของช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ที่เร็วกว่า และส่วนที่ฟุ้งเกินน้อยกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44 วินาที 2 วินาที และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการออกแบบที่นำเสนอในบทความนี้ยังเป็นวิธีการที่มีความสะดวกและมีความยืดหยุ่นสำหรับวิศวกรรมไฟฟ้าในการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน ตามูเชิงปรับตัว วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

Abstract

This paper presents the cascade PI controllers design for a boost converter using an adaptive tabu search algorithm. The dynamic model of the power electronic system derived from the generalized state-space averaging method is used as an objective function instead of the model from software packages. intensive time-domain simulation results show that the offered methods can provide a better response to the output voltage of the boost converter than the conventional method. In terms of the faster rise-time and settling time and lesser percent overshoot, which were 1.44 seconds, 2 seconds, and 0 percent, respectively. Also, this approach is useful and flexible for electrical engineering to design a controller of power electronic systems with good performances.

Keywords: Boost Converter, Cascade PI Controller, Adaptive Tabu Search, Generalized State-Space Averaging method

¹ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 ติดต่อ: E-mail, wiphusana.c@rmutsb.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-979-6999

¹ Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

* Corresponding author: Wiphusana Chayinthu.

บทนำ

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายทางด้านวิศวกรรมหลายด้านเช่น การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว (Puangdownreong, *et al.*, 2012 ; Sujitjorn *et al.*, 2006 ; Puangdownreong *et al.*, 2005 ; Kulworawanichpong *et al.*, 2005 ; Kulworawanichpong, *et al.*, 2004 ; Udomsak, *et al.*, 2017) (Adaptive Tabu Search: ATS) การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ควบคุมได้ในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว (Suyapan, *et al.*, 2017) การออกแบบวงจรกรองกำลังไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Narongrit, *et al.*, 2010) (Genetic Algorithm: GA) การจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่โดยใช้การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (นันทนันท์ พลพันธ์ และประชา คำภักดี, 2562) (Particle Swarm Optimization: PSO) และการประยุกต์การค้นหาแบบแก๊ง (Gang Search: GS) เพื่อออกแบบตัวควบคุม PI แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับตัวควบคุมค่าแรงดันอัตโนมัติ (เดชา พวงดาวเรือง, 2557)

ในบทความนี้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้จะถูกเรียกว่าอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวสำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Boost converter) ตัวควบคุมของวงจรดังกล่าวทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่ ดังนั้น อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันซึ่งทำให้ได้ผลการตอบสนองทางด้านแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยโครงสร้างภายในของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันประกอบไปด้วยรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าและรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยปกติแล้วบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายจะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (Conventional method) ด้วยเหตุนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Method: GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (Emadi, 2004 ; Salem *et al.*, 2014 ; Sarwar *et al.*, 2017 ; Azer & Emadi, 2020 ; Pakdeeto *et al.*, 2017) (DC to DC Converter) นอกจากนี้เมื่อตัวควบคุมถูกออกแบบผ่านอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว กระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจำเป็นต้องจำลองบนระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ปรับจูนตัวควบคุมจนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันที่มีตัวควบคุมนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญก็คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ซึ่งเมื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำให้ได้แบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (Time-varying model) ซึ่งถ้านำแบบจำลองไปใช้กับอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่นานและการหาแบบจำลองค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจึงต้องนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาวิเคราะห์โดยผ่านวิธีเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดผลของสวิทช์ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Chonsatidjamroen *et al.*, 2012 ; Chayinthu *et al.*, 2017 ; Chanpittayagit *et al.*, 2017) (Time-invariant model) เป็นผลให้เวลาในการจำลองสถานการณ์มีความไวมากขึ้น และเหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมและการใช้งานกับอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB จากผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบทั้งสองที่ได้ให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ทำให้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวได้ ลำดับต่อไปนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้าสู่กระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้นำไปเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ซึ่งพบว่า การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการออกแบบดั้งเดิมในเรื่องของช่วงเวลารูปร่างขึ้น (Rise-time) เวลาเข้าที่ (Settling-time) เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกิน (Percent Overshoot) น้อยกว่า ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับวิศวกรในการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูปที่วิศวกรสามารถกรอกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้แสดงได้ดัง Figure 1 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_{dc} , ตัวเหนี่ยวนำ L_c , ตัวเก็บประจุ C_c , โหลดตัวต้านทาน R_c และตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันซึ่งภายในมีรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นรูปด้านใน (Inner loop) และรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปด้านนอก (Outer loop) (Tsang & Chan, 2005 ; Rabiaa *et al.*, 2018 ; Moutaki *et al.*, 2018) ซึ่ง

แทนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยค่า $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ตามลำดับ แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ใน Figure 2

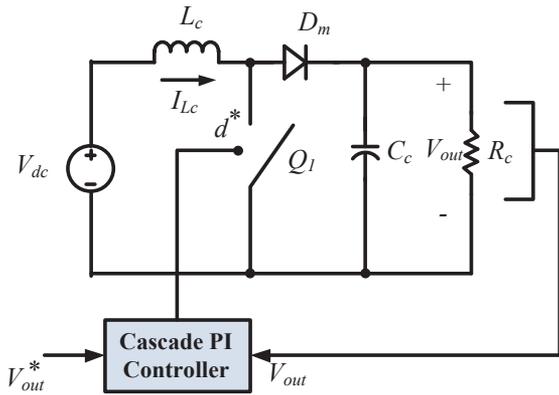


Figure 1 The considered system

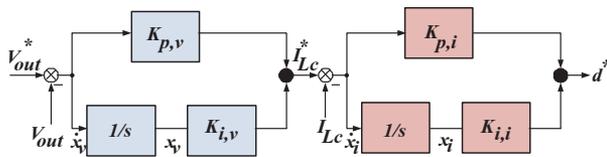


Figure 2 The schematic of the cascade PI controllers

จาก Figure 1 และ Figure 2 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขึ้นอยู่กับค่าของวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: d^*) ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้า ค่า d^* สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$d^* = \frac{K_{p,i}L_c - K_{p,v}K_{p,i}V_{out} + K_{i,v}K_{p,i}X_v}{K_{i,i}X_i - K_{p,v}K_{p,i}V_{out}^*} \quad (1)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบใน Figure 1 สามารถวิเคราะห์หาโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปซึ่งเมื่อหาแบบจำลองได้แล้วจะนำมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว เพื่อใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model) ดังนั้นจึงต้องทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้น (Linear model) โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง เพื่อให้แบบจำลองที่ได้เปรียบเสมือนได้แบบจำลองที่เป็นค่าคงที่ ซึ่งง่าย

ต่อการใช้กับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \dot{\delta x} &= A(x_0, u_0)\delta x + B(x_0, u_0)\delta u \\ \delta y &= C(x_0, u_0)\delta x + D(x_0, u_0)\delta u \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ

$$\delta x = [\delta I_{Lc} \quad \delta V_{out} \quad \delta x_v \quad \delta x_i]^T, \delta u = [\delta V_{dc} \quad \delta V_{out}^*]^T, \delta y = [\delta I_{Lc} \quad \delta V_{out}]^T$$

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} & a(1,2) & \frac{K_{i,v}K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} & \frac{K_{i,i}V_{out,0}}{L_c} \\ a(2,1) & \frac{K_{p,v}K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} & \frac{1}{R_c C_c} & -\frac{K_{i,v}K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{p,v} & K_{i,v} & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

$$a(1,2) = \frac{1}{L_c} - \frac{K_{p,i}I_{Lc,0}}{L_c} - \frac{2K_{p,v}K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} + \frac{K_{i,v}K_{p,i}x_{v,0}}{L_c} + \frac{K_{i,i}x_{i,0}}{L_c} + \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out}^*}{L_c}$$

$$a(2,1) = \frac{1}{C_c} + \frac{2K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} + \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out,0}}{C_c} - \frac{K_{i,v}K_{p,i}x_{v,0}}{C_c} - \frac{K_{i,i}x_{i,0}}{C_c} - \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out}^*}{C_c}$$

$$B(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} & \frac{K_{p,v}K_{p,i}V_{out,0}}{L_c} \\ 0 & -\frac{K_{p,v}K_{p,i}I_{Lc,0}}{C_c} \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{p,v} \end{bmatrix}_{4 \times 2}$$

$$C(x_0, u_0) = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]_{1 \times 4} \quad D(x_0, u_0) = [0 \quad 0]_{1 \times 2}$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) สังเกตได้ว่าแบบจำลองมีค่า $I_{Lc,0}$, $V_{out,0}$, $X_{v,0}$ และ $X_{i,0}$ ประกอบอยู่ในสมการซึ่งค่าที่กล่าวมาเรียกว่าการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state operation) การคำนวณหาทั้ง 4 ค่านี้สามารถหาได้จาก

$$V_{out,0} = V_{out}^* \quad (3)$$

$$I_{Lc,0} = \frac{V_{out,0}}{R_c(1-d)} \quad (4)$$

$$x_{v,0} = \frac{I_{Lc,0}}{K_{i,v}} \quad (5)$$

$$x_{i,0} = \frac{d}{K_{i,i}} \quad (6)$$

โดยที่ $d = \frac{V_{out} - V_{dc}}{V_{out}}$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน

การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จะใช้การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมตามทฤษฎีทางระบบควบคุมซึ่งพิจารณาผลการตอบสนองในโดเมนเวลา และวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว เมื่อได้ผลของการออกแบบตัวควบคุมจากระบวนการทั้งสอง นำมาเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่อยู่บนพื้นฐานทางระบบควบคุม

1. การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมทางระบบควบคุม แสดงได้ใน Figure 3 โดยค่า $K_{p,v}$ และ $K_{i,v}$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในลูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่เป็นวงรอบปิดแสดงได้ดังสมการที่ (7)

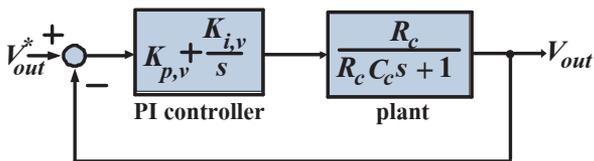


Figure 3 The block diagram of voltage loop control

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{out}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{p,v}s + K_{i,v}}{C_c}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{p,v}R_c + 1}{R_c C_c}\right)s + \left(\frac{K_{i,v}}{C_c}\right)} \tag{7}$$

เมื่อได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแล้ว ต้องนำมาเปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบสมการอันดับสองมาตรฐาน ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (8)

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

ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมในลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จาก นำสมการที่ (7) เทียบกับสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\begin{cases} K_{p,v} = \frac{2\zeta_v \omega_{n,v} R_c C_c - 1}{R_c} \\ K_{i,v} = \omega_{n,v}^2 C_c \end{cases} \tag{9}$$

1.2 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมทางระบบควบคุมเช่นเดียวกับลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า แสดงได้ใน Figure 4 โดยค่า $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในลูปกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่เป็นวงรอบปิดแสดงได้ดังสมการที่ (10)

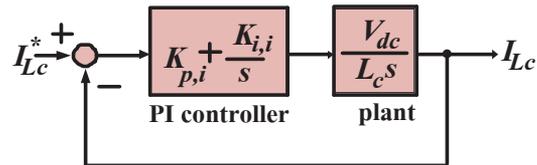


Figure 4 The block diagram of current loop control

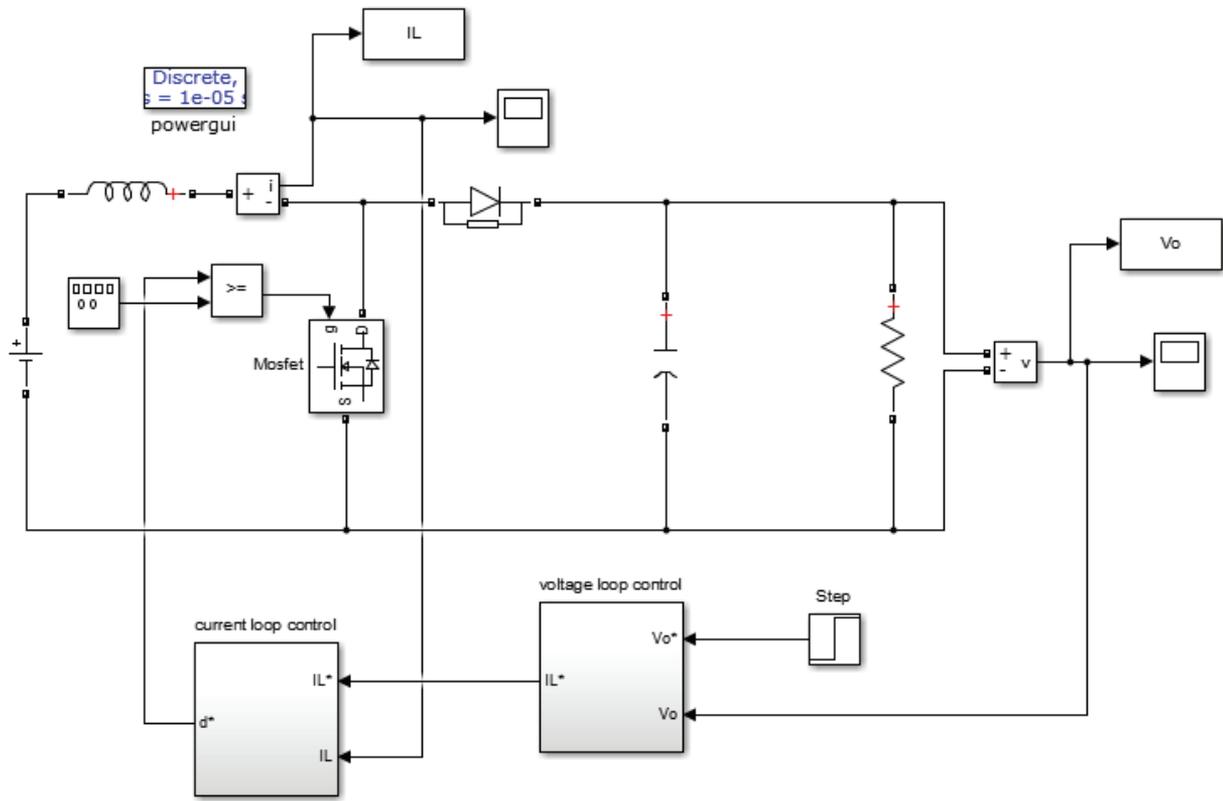


Figure 5 The exact topology model in the SimPowerSystem™ of MATLAB

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{out}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{p,i}s + K_{i,i}}{L_c}\right)V_{dc}}{s^2 + \left(\frac{K_{p,i}V_{dc}}{L_c}\right)s + \left(\frac{K_{i,i}V_{dc}}{L_c}\right)} \quad (10)$$

ดังนั้น ตัวควบคุมลูประแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากนการนำสมการที่ (10) เทียบกับสมการที่ (8) จะได้ว่า

$$\begin{cases} K_{p,i} = \frac{2\zeta_i \omega_{n,i} L_c}{V_{dc}} \\ K_{i,i} = \frac{\omega_{n,i}^2 L_c}{V_{dc}} \end{cases} \quad (11)$$

ในบทความนี้ตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของลูประแสไฟฟ้าและลูประแสไฟฟ้าที่ถูกออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอาศัยสมการที่ (9) และสมการที่ (11) โดยกำหนดให้ $V_{dc} = 24V$, $\omega_{nv} = 80 \text{ rad/s}$, $\omega_{ni} = 800 \text{ rad/s}$, $\zeta_v = 0.8$, $\zeta_i = 0.8$, $L_c = 15mH$, $C_c = 1000\mu F$, และ $R_c = 50\Omega$ ดังนั้น ผลการออกแบบตัวควบคุมที่ได้จากวิธีดั้งเดิมคือ $K_{p,v} = 0.108$, $K_{i,v} = 6.4$, $K_{p,i} = 0.8$, และ $K_{i,i} = 400$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันทั้ง 4 ค่า คือ $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ขั้นตอนต่อไปนำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่านี้ไปใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) ซึ่งต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนที่จะนำแบบจำลองไปออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว ผลการจำลองสถานการณ์จะพิจารณาเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของการจำลองสถานการณ์ด้วยระบบจริง (exact topology model) ผ่านบล็อกสำเร็จรูป SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดัง Figure 5 เทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้น (GSSA model) โดยเงื่อนไขของการตรวจสอบความถูกต้องจะกำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{out}^* จาก 200 V เป็น 220 V ที่เวลา 1.5 วินาที แสดงได้ดัง Figure 6

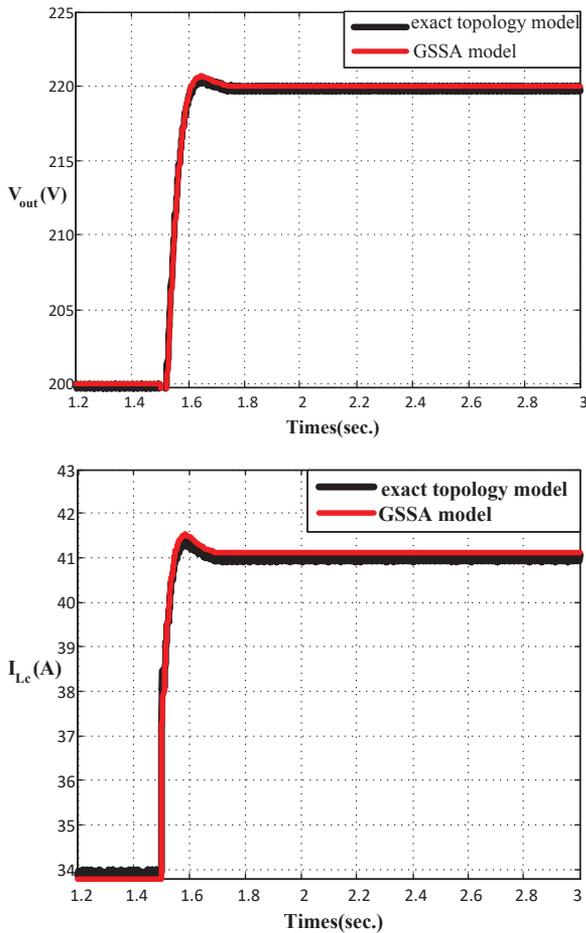


Figure 6 Response of V_{out} and I_{Lc}

จาก Figure 6 ผลการตอบสนองทางพลวัตของ V_{out} และ I_{Lc} ของทั้งสองแบบจำลองมีการตอบสนองในโดเมนเวลา ทั้งสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ที่สอดคล้องกันซึ่งหมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่นำเสนอในบทความนี้มีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถนำไปใช้ร่วมกับอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวได้

2. การออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวนั้น อันดับแรกต้องมีความรู้ความเข้าใจหลักการ ทำงานของอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว เพื่อให้สามารถ ออกแบบตัวควบคุมและได้ผลการตอบสนองทางพลวัตตาม ที่ต้องการ ซึ่งรายละเอียดของอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวและการออกแบบตัวควบคุม มีดังต่อไปนี้

2.1 อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว

อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวถูกประยุกต์และพัฒนา มาจากอัลกอริทึมแบบตามู โดยมีการเพิ่มเติมอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาคำตอบเดิมได้ (Back-tracking) และส่วนที่ 2 การปรับลดค่ารัศมีของคำตอบในวงรอบนั้นๆ (Adaptive

radius) (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) ซึ่งกระบวนการใช้อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดค่าเริ่มต้นของรายการตามู (Tabu list: TL) และจำนวนรอบของการค้นหา (Count) ให้เท่ากับ 0

ขั้นตอนที่ 2: สุ่มค่าโดยการเลือกคำตอบเริ่มต้น S_0 จากพื้นที่การค้นหา (Search space) ซึ่งค่า S_0 ถูกตั้งไว้เป็นค่าต่ำสุดที่สุดของคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local minimum) และกำหนดให้ S_0 เท่ากับค่าที่ดีที่สุดที่สุดของการค้นหาคำตอบรอบข้าง (Best neighbor) แสดงได้ใน Figure 7

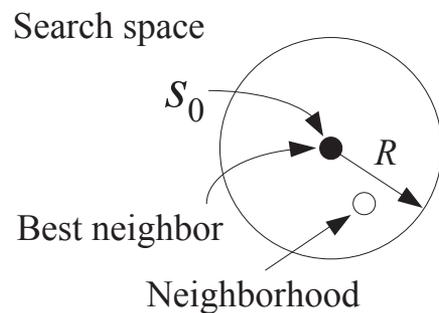


Figure 7 Random S_0 in search space

ขั้นตอนที่ 3: ทำการสุ่มเลือกคำตอบใหม่ N คำตอบ (Neighborhood) โดยทำการเดินรอบๆ คำตอบ S_0 ภายในพื้นที่ค้นหา กำหนดให้ $S_1(r)$ เป็นเซตของคำตอบที่ประกอบไปด้วย คำตอบใหม่ทั้งหมด N คำตอบ

ขั้นตอนที่ 4: ประเมินค่าของคำตอบที่อยู่ภายในเซต คำตอบ $S_1(r)$ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุด กำหนดให้คำตอบนั้นเป็นคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด (Best neighbor 1) แสดงได้ใน Figure 8

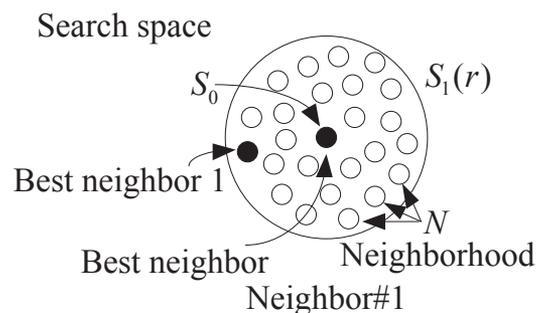


Figure 8 Neighborhood around S_0

ขั้นตอนที่ 5: ตรวจสอบเงื่อนไขว่า ถ้า Best neighbor 1 < Best neighbor จากนั้นเก็บค่าของ Best neighbor ไว้ในรายการตาม และกำหนดให้ค่าของ Best neighbor = Best neighbor 1 แสดงได้ดัง Figure 9 และตั้งค่า $S_0 = \text{Best neighbor}$ แสดงได้ดัง Figure 10 ส่วนค่า Best neighbor 1 ให้เก็บไว้ในรายการของตาม

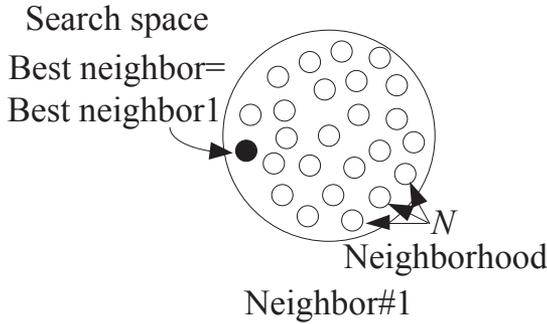


Figure 9 Assign a new Best neighbor

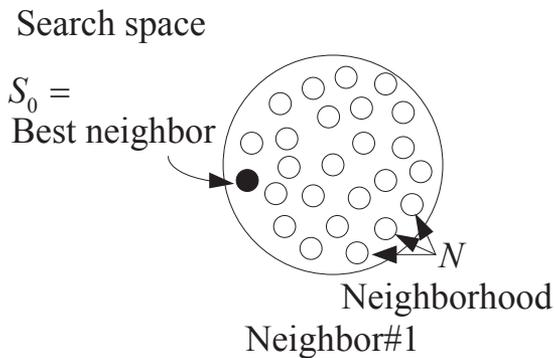


Figure 10 Assign a new S_0

ขั้นตอนที่ 6: ประเมินเกณฑ์การยุติการค้นหา (Termination criteria: TC) และเกณฑ์ปรารถนา (Aspiration criteria: AC) ถ้าจำนวนรอบการค้นหา (Count) \geq จำนวนรอบการค้นหาสูงที่สุด (Max Count) ให้หยุดกระบวนการค้นหา ค่าตอบที่ได้จะเป็นค่าตอบที่ดีที่สุดที่ได้ค้นหา ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นไปตามข้างต้น ให้กลับไปขั้นตอนที่ 2 และเริ่มกระบวนการค้นหาอีกครั้งจนกว่าเกณฑ์ที่พอใจ แสดงได้ดัง Figure 11

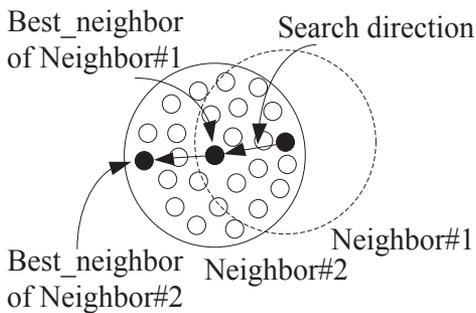


Figure 11 Searching process in the next iteration

สำหรับกระบวนการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาค่าตอบเดิมได้ช่วยให้ระบบสามารถกลับไปในพื้นที่การค้นหาค่าตอบก่อนหน้านั้นได้ ซึ่งค่าตอบอยู่ในรายการตาม ค่าตอบที่ดีกว่าจะถูกเลือกจากพื้นที่ค่าตอบที่ถูกย้อนรอยนี้และค่าตอบปัจจุบันที่มีอยู่ แสดงใน Figure 12 รายละเอียดของการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาค่าตอบเดิม เริ่มจากการกำหนดค่าตอบใหม่ ให้เป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหาพื้นที่ในการค้นหาใหม่ก็จะเกิดขึ้นด้วย นั่นคือการค้นหาโอกาสที่จะหลุดออกจากค่าตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local optimum) ค่าตอบใหม่ที่ถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นนี้ไม่จำเป็นต้องเป็นค่าตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่ปัจจุบัน กระบวนการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาค่าตอบเดิมสามารถเพิ่มลงไปในช่วงขั้นตอนที่ 5 ทำให้ประสิทธิภาพของการค้นหาดียิ่งขึ้น

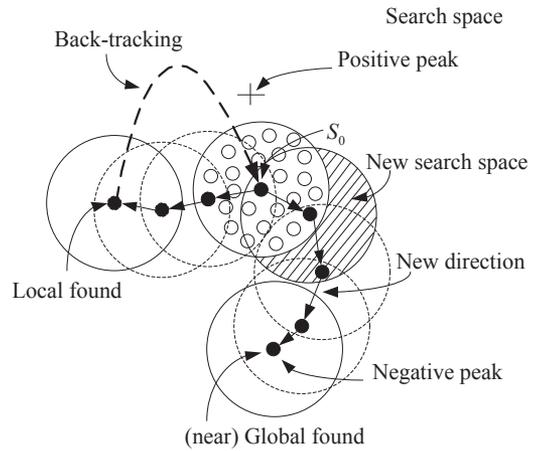


Figure 12 Back-tracking in ATS algorithm

กระบวนการปรับลดค่ารัศมีของการค้นหาค่าตอบตามที่แสดงใน Figure 13 โดยหลักการของกระบวนการนี้สามารถที่จะลดพื้นที่การค้นหาในระหว่างกระบวนการได้ กลไกการปรับลดรัศมีได้มีการพัฒนาเพื่อให้ปรับรัศมี (R) โดยใช้ค่าการประเมินเป็นองค์ประกอบในการปรับค่ารัศมี กล่าวคือเมื่อค่าตอบปัจจุบันให้ค่าการประเมินที่ดีขึ้น รัศมีการค้นหาจะลดลงตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (12) กระบวนการปรับลดค่ารัศมีของการค้นหาค่าตอบสามารถเพิ่มลงไปในช่วงขั้นตอนที่ 6 ทำให้ประสิทธิภาพของการค้นหาดียิ่งขึ้น

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \tag{12}$$

เมื่อ DF เป็นตัวประกอบการลดค่าของรัศมี (decreasing factor)

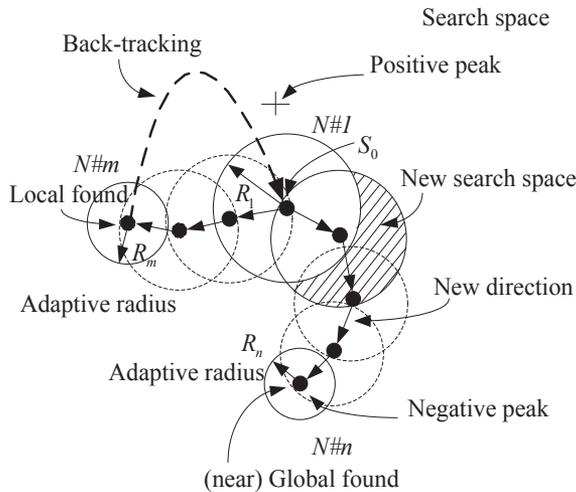


Figure 13 ATS algorithm with adaptive search radius

2.2 การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แสดงโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมได้ดัง Figure 14

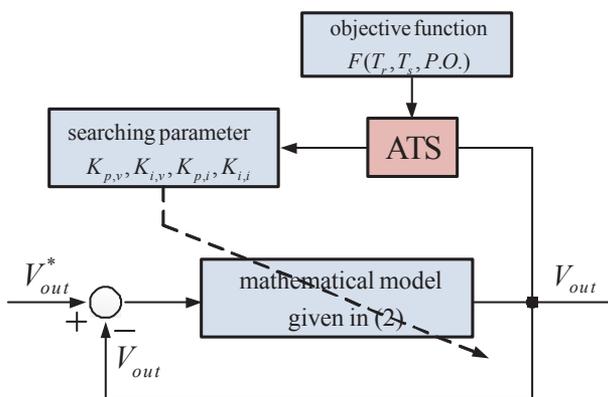


Figure 14 ATS methods for cascade PI controllers

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมใน Figure 14 เป็นกระบวนการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว สำหรับค้นหาพารามิเตอร์ $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ซึ่งมีตัวชี้วัดของระบบด้วยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W พิจารณาได้ดังสมการที่ (13)

$$W = F(T_r, T_s, P.O.) = \sigma T_r + \alpha T_s + \gamma P.O. \quad (13)$$

และ

$$\sigma + \alpha + \gamma \quad (14)$$

เมื่อ

$P.O.$ = คือ ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้า V_{out} ฟุงเกิน

T_r = คือ ค่าเวลาขาขึ้นของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

T_s = คือ ค่าเวลาเข้าที่ของแรงดันไฟฟ้า V_{out}

ในบทความนี้ค่าของ σ , α และ γ ถูกตั้งค่าเป็น 0.34, 0.33 และ 0.33 ตามลำดับ วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว จะพยายามค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ดีที่สุดจะเท่าที่ทำได้ จนกว่าจะมี ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ W น้อยที่สุดนั่นคือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากกระบวนการค้นหาคำตอบให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (V_{out}) แสดงได้ดัง Figure 14 ขั้นตอนของการค้นหาพารามิเตอร์ตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว มีวิธีการดังนี้:

ขั้นที่ 1: กำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์เป็น $K_{p,v}$, $K_{i,v}$, $K_{p,i}$ และ $K_{i,i}$ ให้มีค่าเท่ากับ [0.02 1], [1 20], [0.01 2] และ [100 2000] ตามลำดับ

ขั้นที่ 2: กำหนดให้ค่าเริ่มต้นสำหรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยการสุ่มค่าภายในพื้นที่การค้นหาตามที่กำหนดไว้ในขั้นที่ 1

ขั้นที่ 3: กำหนดให้ค่ารัศมีการค้นหาคำตอบ $R = 4$ และตัวประกอบการลดค่าของรัศมี $DF = 1.3$

ขั้นที่ 4: กำหนดเงื่อนไขของการปรับลดค่ารัศมีการค้นหาคำตอบและการเดินย้อนรอยกลับไปหาพื้นที่การค้นหาคำตอบเดิม

ขั้นที่ 5: กำหนดให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W ซึ่งหาได้จากสมการที่ (13) และสามารถคำนวณได้จากผลการตอบสนองแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดในสมการที่ (2)

ขั้นที่ 6: กำหนดค่าสูงสุดของจำนวนรอบการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Max count) ในบทความนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 รอบ

ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใน Figure 1 ตัว

ควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันที่ได้จากการออกแบบโดยใช้ อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว และการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม จะถูกจำลองสถานการณ์บนบล็อกสำเร็จรูป Sim Power System™ ในโปรแกรม MATLAB ที่แสดงไว้ดัง Figure 5 โดย จุดมุ่งหมายของอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว คือสามารถลดค่า ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W เพื่อให้บรรลุผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่ดีที่สุด ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบของ พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบจากวิธีดั้งเดิมและ อัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว แสดงได้ดัง Table 1

Table 1 The comparison between ATS and conventional methods

Controller parameters	Design method	
	ATS algorithm	Conventional method
$K_{p,v}$	0.0825	0.108
$K_{i,v}$	3.8345	6.4
$K_{p,i}$	0.3873	0.8
$K_{i,i}$	564.5035	400
W	0.8574	1.2183

จาก Table 1 จะสังเกตได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว ทำให้ได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W ดังนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการค้นหาจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัว และวิธีดั้งเดิม มาจำลองสถานการณ์ เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{out} โดยกำหนดให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า V_{out}^* ของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า จาก 200 V เป็น 220 V ที่เวลา 1.5 วินาที ได้ผลการตอบสนองทางพลวัต แสดงได้ดัง Figure 15 และผลการลู่เข้าหาค่าตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด W แสดงได้ดัง Figure 16

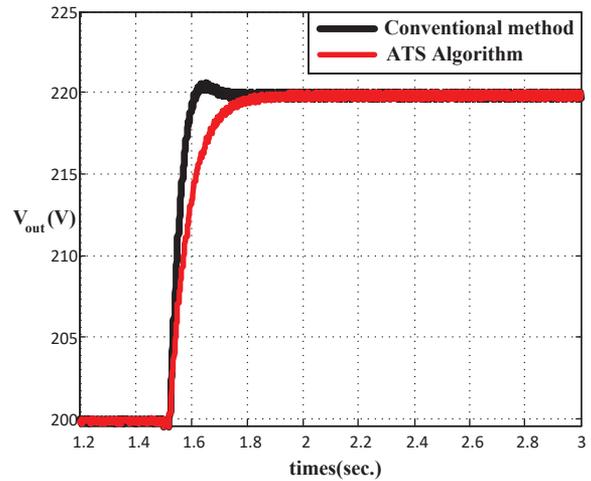


Figure 15 The comparison results of V_{out}

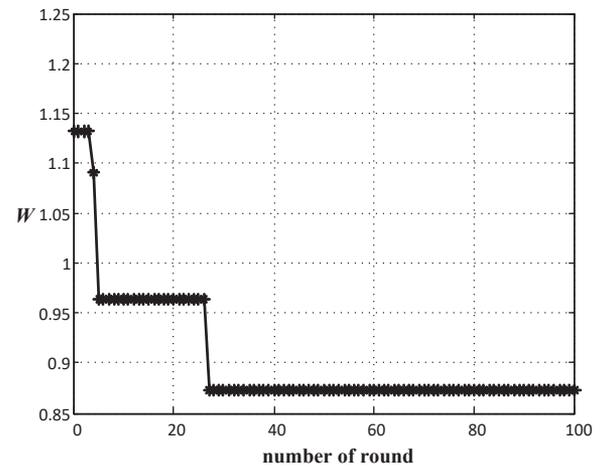


Figure 16 The convergence of W value from ATS algorithm

จาก Figure 15 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันด้วยอัลกอริทึมตามูเชิงปรับตัวให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{out} ได้ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ทั้งในสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ซึ่งบ่งบอกในเรื่องของช่วงเวลาขาขึ้น (Rise-time) เวลาเข้าที่ (Settling-time) ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกิน (Percent Overshoot) น้อยกว่า แสดงการเปรียบเทียบได้ดัง Table 2

Table 2 The comparison of rise-time (t_r), settling-time (t_s), and percent overshoot ($P.O.$) between ATS and conventional methods

Time-domain responses	Design method	
	ATS algorithm	Conventional method
t_r (sec.)	1.44	1.56
t_s (sec.)	1.85	2.23
$P.O.$ (%)	0	3.015

สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกันของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมตามบูเซิงปรับตัว ซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอที่ต่อเรียงกัน จากการออกแบบตัวควบคุมพบว่า การออกแบบด้วยอัลกอริทึมตามบูเซิงปรับตัวมีผลการตอบสนองทางพลวัตของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งตัวควบคุมที่ออกแบบโดยใช้อัลกอริทึมตามบูเซิงปรับตัวช่วยให้ช่วงเวลาขาขึ้นกับเวลาเข้าที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินน้อยกว่า ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอจึงเหมาะสมสำหรับมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด เทคนิคการออกแบบที่นำเสนอเป็นประโยชน์อย่างมากต่อวิศวกรสำหรับออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูปที่ให้วิศวกรสามารถกรอกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

เดชา พวงดาวเรือง. (2557). การประยุกต์การค้นหาแบบแก๊งเพื่อออกแบบตัวควบคุม PI แบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับตัวควบคุมค่าแรงดันอัตโนมัติ. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37)*, จังหวัดขอนแก่น, 801-804.

นนทพันธ์ พลพันธ์ และประชา คำภักดี. (2562). เทคนิคการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคสำหรับการจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 (EECON-42)*, จังหวัดนครราชสีมา.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). *ปัญญาเชิงคำนวณ* (พิมพ์ครั้งที่ 1). สำนักวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Azer, P., & Emadi, A. (2020). 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*, 77735-77745.

Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). Modeling of AC-DC Power System Feeding a Controlled Buck-Boost Converter. *Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2014)*, Nakhon Ratchasima.

Chayinthu, W., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). The Dynamic Model of Electrical Aircraft System Feeding a Buck-Boost Converter. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya, 61-64.

Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., & Areerak K-L. (2012). The Optimal Cascade PI Controller Design of buck converters. *The 9th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012)*, Phetchaburi.

EL Moutaki, S., Abouloifa A., & Lachkar, I. (2018). Double loop nonlinear PI-Controller Strategy of the Boost Inverter. *Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE 2018)*, Casablanca.

Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 51(3), 661-668.

Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., & Sujitjorn S. (2004). *Harmonic Identification for Active Power Filters Via Adaptive Tabu Search Method*, LNCS (Lecture Notes in Computer Science), Springer-Verlag Heidelberg 2004, 3215, 687-694.

Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., Pao-la-or, P., Puangdownreong, D., & Sujitjorn S. (2005). Dynamic parameter identification of induction motors using intelligent search techniques. *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck.

- Narongrit, T., Areerak, K-L., & Areerak, K-N. (2010). Design of an Active Power Filter using Genetic Algorithm Technique. *The 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED'10)*, Cambridge, 20-22.
- Pakdeeto, J., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). Large-signal model of DC micro-grid systems feeding a constant power load. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Areerak, K-L., Kulworawanichpong, T., & Sujitjorn S. (2005). Application of adaptive tabu search to system identification. *IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S. & Totarong, P. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. *In Proceedings IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT02)*, 915-920.
- Rabaa, O., Mouna, B., Lassaad, S., Aymen, F. & Aicha, A. (2018). Cascade Control Loop of DC-DC Boost Converter Using PI Controller. *International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT 2018)*, Rabat.
- Salem, M., Jusoh, A., Rumzi, N., Idris, N., & Alhamrouni, I. (2014). Modeling and Simulation of Generalized State-Space Averaging for Series resonant converter. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2014)*, Perth.
- Sarwar, A., Shahid, A., Hudaif, A., Gupta, U., & Wahab, M. (2017). Generalized State-Space Model for an n-phase Interleaved Buck-Boost Converter. *4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON 2017)*, Mathura.
- Sujitjorn, S., Kulworawanichpong, T., Puangdownreong, D., & Areerak, K-N. (2006). Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design, *Book Chapters in Integrated Intelligent Systems for Engineering Design (ed. X. F. Zha and R. J. Howlett)*, IOS Press.
- Suyapan, A., Areerak, K-N., & Areerak, K-L. (2017). A Controller Design of More Electric Aircraft Power Systems Using an Adaptive Tabu Search Algorithm. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya.
- Tsang, K.M., & Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck converter. *IEE Proc.- Electr. Power*, 152(4), 827-831.
- Udomsak, S., Areerak, K-L., Areerak, T., & Areerak, K-N. (2017). Power Loss Identification of Three-phase Induction Motor Using Adaptive Tabu Search. *5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017)*, Pattaya.