

การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

วิภูษณะ ฉายินทุ^{1*}

wiphusana.c@rmutsb.ac.th^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Received	: 24-Nov-2021
Revised	: 18-May-2022
Accepted	: 19-May-2022

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนานกัน ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สามารถหาได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนการใช้แบบจำลองผ่านระบบจริงบนคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบที่นำเสนอสามารถให้ผลการตอบสนองทางระบบควบคุมพลวัตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ขนานกัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม ในเรื่องของช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินน้อยกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.01 วินาที 1.04 วินาที และ 0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้วิธีการออกแบบที่นำเสนอในบทความนี้ยังเป็นวิธีการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบอื่นๆ ได้

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้า ตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสม อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

The Suitable PI Controller Design of the Parallel Synchronous Buck Converter Using the Genetic Algorithm

Wiphusana Chayinthu^{1*}
wiphusana.c@rmutsb.ac.th^{1*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Received	: 24-Nov-2021
Revised	: 18-May-2022
Accepted	: 19-May-2022

Abstract

This article offers the Suitable PI controller design of the parallel synchronous buck converter using the genetic algorithm. The mathematical model of the power electronics control system is proved from the generalized state-space averaging method, which is used as an objective function instead of using a physical model on a computer. The results show that the suggested design method can allow more control efficient responses of the DC output voltage of parallel synchronous buck converter than traditional methods. In terms of the rise times, settling times, and percent overshoot, which equal to 1.01 seconds, 1.04 seconds, and 0 percent, respectively. In addition, the suggested design methods in this article can use for application to other DC-to-DC converters.

Keywords: synchronous buck converter, suitable PI controller, genetic algorithm, mathematical model, generalized state-space averaging method

1. บทนำ

ในปัจจุบันวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายทางด้านวิศวกรรมหลากหลายแขนง ซึ่งมีหลายด้าน เช่น การระบุเอกลักษณ์ของกำลังงานสูญเสียมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้วิธีดาบูเชิงปรับตัว [1] และการออกแบบตัวควบคุมของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินโดยใช้วิธีดาบูเชิงปรับตัว [2] (Adaptive Tabu Search: ATS) การออกแบบวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม [3] และการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสต์ โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม [4] (Genetic Algorithm: GA) การจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่โดยใช้การเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค [5] และการหาขนาดและตำแหน่งของสถานีชาร์จที่เหมาะสมที่สุดสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอิน โดยใช้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค [6] (Particle Swarm Optimization: PSO) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมไอพีดีสำหรับพลังงานอินทิเกรตลำดับหนึ่งที่มีเวลาไร้ผลสนองโดยใช้การค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search: CS) [7] และการปรับปรุงขั้นตอนวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีปลาวาฬสำหรับการจัดสรรกำลังไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เหมาะสมที่สุดเมื่อภาระโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (Whale Optimization Algorithm: WOA) [8]

ในบทความนี้วิธีปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้จะเป็นอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม เพื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน (Parallel synchronous buck converter) ตัวควบคุมสำหรับวงจรนี้จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ตามที่ต้องการได้ ดังนั้น อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสม ซึ่งทำให้ได้ผลการตอบสนองทางพลวัตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ให้มีผลการตอบสนองทางระบบควบคุมที่ดีที่สุดเท่าที่ตัวควบคุมจะทำได้ โดยทั่วไปแล้วแผนภาพบล็อกไดอะแกรมอย่าง

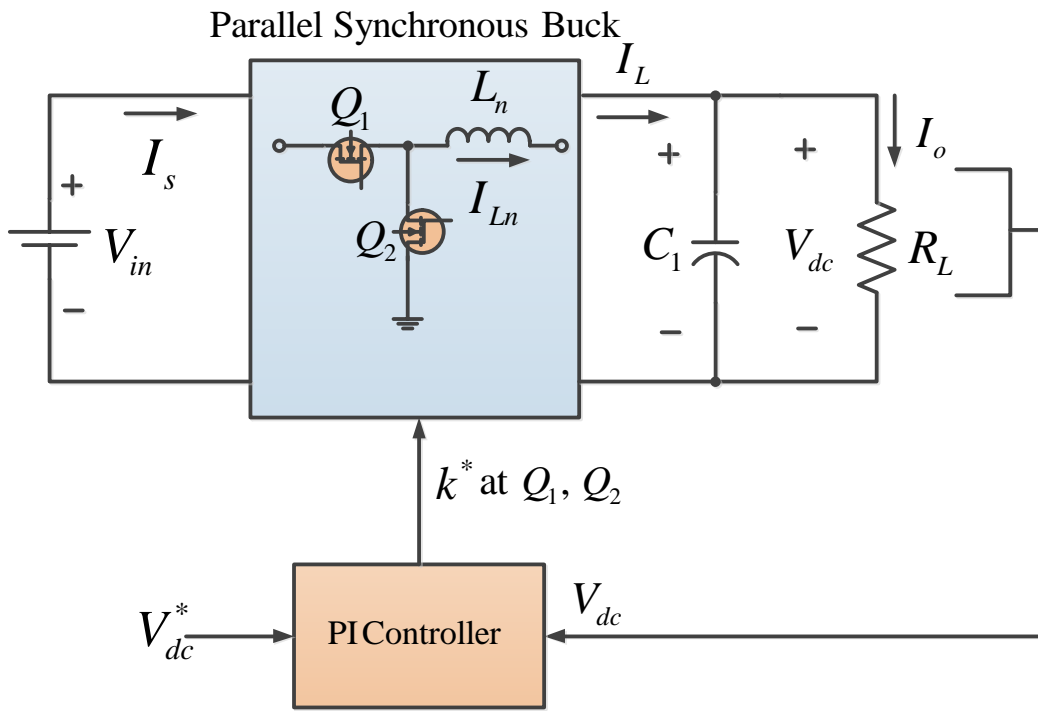
ง่ายจะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (Classical method) ด้วยเหตุผลนี้ การออกแบบตัวควบคุมพีไอจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือที่เรียกว่าแบบจำลองพลวัตของระบบ ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Method: GSSA) การหาด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่แปลงจากกระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC choppers converter) [9-10] เมื่อตัวควบคุมถูกออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนในการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะต้องสร้างแบบจำลองบนระบบบิเล็กทรอนิกส์กำลังผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากวงจรทางไฟฟ้าอย่างง่าย สำหรับใช้ปรับจูนตัวควบคุมจนกระทั่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้และต้องมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (Fitness value)

สำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ที่ใส่ตัวควบคุมไปนั้นมีปัญหาที่สำคัญคือ ตัวอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร ซึ่งเมื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำให้ได้แบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent model) เมื่อนำไปหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม จะหาสมการทางคณิตศาสตร์และใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ที่ค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลานาน ดังนั้น จึงต้องเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา โดยใช้วิธีเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตซ์ วิธีการนี้ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time-independent model) [11-12] ผลลัพธ์ที่ได้สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ง่ายขึ้นและใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์มีความรวดเร็วขึ้น และนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้

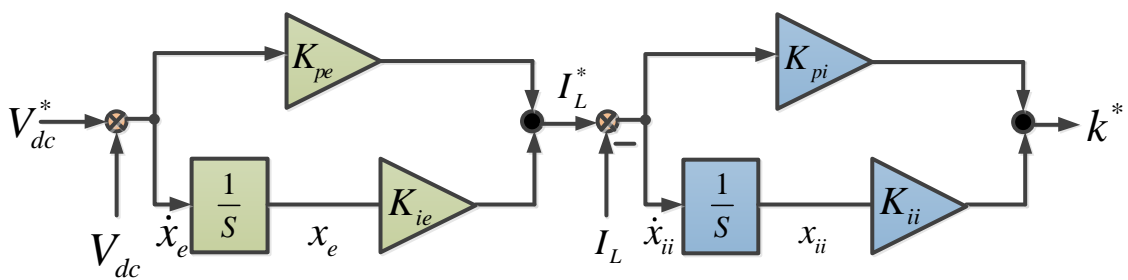
เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาแล้ว ก่อนที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อน โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เปรียบเทียบกับชุดบล็อกสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Simscape ในโปรแกรม MATLAB จากผลการเปรียบเทียบที่ได้ของทั้งสองจะให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะคงตัว (Steady state) ทำให้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ของ

อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้ ขั้นตอนต่อไปนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปออกแบบตัวควบคุมพีไอ โดยใช้กระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้และต้องมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุดก็จะนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย



รูปที่ 1 วงจรไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมพีไอ

วิธีดั้งเดิม ซึ่งพบว่า การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ให้ผลการตอบสนองของ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอน แรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ดีกว่าวิธีการ ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ในเรื่องการตอบสนองทาง

ระบบควบคุมคือ ให้ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise-time) เวลา เข้าที่ (Settling-time) ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกิน (Percent overshoot) น้อยกว่า ดังนั้น การออกแบบ ตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีข้อดีและ เป็นประโยชน์อย่างมาก สำหรับวิศวกรในการออกแบบ

ตัวควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูปที่สามารถรอกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ โดยที่ไม่ต้องมาปรับจูนที่ตัวควบคุม มากนัก

2. วงจรไฟฟ้าที่พิจารณา

วงจรไฟฟ้าที่พิจารณาคือเป็นวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน 4 วงจร แสดงได้ดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_{in} มีตัวเหนี่ยวนำในวงจรเป็น L_n ซึ่งกำหนดให้มีตัวเหนี่ยวนำ L_1, L_2, L_3 และ L_4 มีตัวเก็บประจุ C_1 โหลดตัวต้านทาน R_L และตัวควบคุมพีไอ ซึ่งภายในมีลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current control loop) และลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage control loop) มาต่อเรียงกัน (Cascade) เพื่อให้ประสิทธิภาพของการควบคุมดียิ่งขึ้น ซึ่งตัวแปรของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแทนด้วยค่า K_{pe}, K_{ie}, K_{pi} และ K_{ii} ตามลำดับ แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอที่นำลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าและลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า มาต่อเรียงกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบธรรมดา (Traditional buck converter) จะช่วยลดการเกิดกำลังงานสูญเสียที่อุปกรณ์สวิตซ์กำลังและมีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรแบบธรรมดา [13] การนำวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสมาขนานกันจะช่วยแบ่งและลดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์ไม่ทำให้มีค่ามากจนเกินไป ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความร้อนและความเสียหายที่ตัวอุปกรณ์ได้ [13] ดังนั้น ในบทความนี้จึงเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน มาออกแบบตัวควบคุม ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ในรูปที่ 1 สามารถทำได้โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเมื่อหาแบบจำลองที่อยู่ในรูปสมการเชิง

อนุพันธ์ (Differential equation) ได้จะนำมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม เพื่อใช้ในกระบวนการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบจำลองคณิตศาสตร์ของวงจรไฟฟ้าที่พิจารณาจะเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น (Linear time-independent model) โดยแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้งานกับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้ ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสถานะ (State variable) ได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_1(x, u)x + B_1(x, u)u \\ y &= C_1(x, u)x + D_1(x, u)u \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ

$$\dot{x} = [I_{L1} \ I_{L2} \ I_{L3} \ I_{L4} \ V_{dc} \ x_e \ x_{ii}]^T$$

$$u = [V_{dc}^*]$$

$$y = [V_{dc}]$$

$$A_1(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_1} & a_1(1,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_1} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_1} \\ \frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_2} & a_1(2,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_2} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_2} \\ \frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_3} & a_1(3,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_3} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_3} \\ \frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & -\frac{K_{pi}V_{in}}{L_4} & a_1(4,5) & \frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_4} & \frac{K_{ii}V_{in}}{L_4} \\ \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -K_{pe} & K_{ie} & 0 \end{bmatrix}_{7 \times 7}$$

$$a_1(1,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_1} - \frac{1}{L_1}, \quad a_1(2,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_2} - \frac{1}{L_2}$$

$$a_1(3,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_3} - \frac{1}{L_3}, \quad a_1(4,5) = -\frac{K_{pe}K_{pi}V_{in}}{L_4} - \frac{1}{L_4}$$

$$B_1(x, u) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{7 \times 1}$$

$$C_1(x, u) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]_{1 \times 7} \quad D_1(x, u) = [0]_{1 \times 1}$$

โดยที่ค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty cycle: k^*) ของตัวควบคุมพีไอกำหนดให้เป็น

$$k^* = -K_{pi}I_L - K_{pe}K_{pi}V_{dc} + K_{ie}K_{pi}x_e + K_{ii}x_i + K_{pe}K_{pi}V_{dc}^* \quad (2)$$

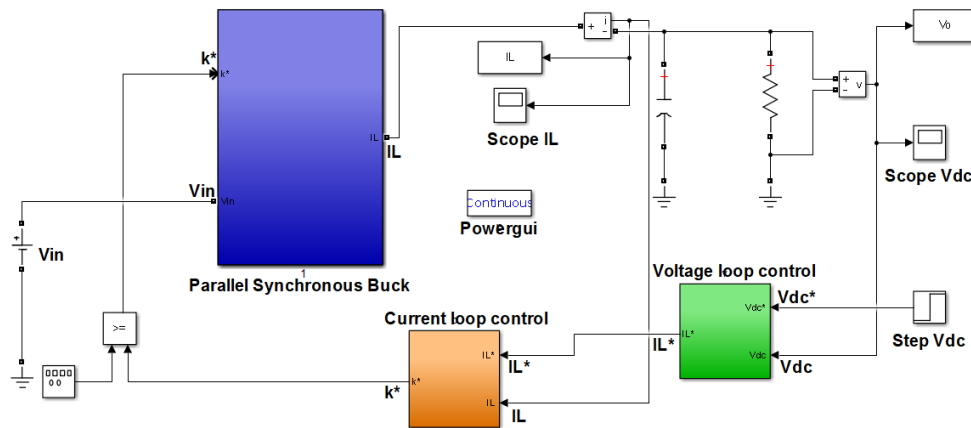
4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัส โดยในหัวข้อนี้ จะมีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม ตามทฤษฎี

ทางระบบควบคุม (Control theory) ซึ่งผลการตอบสนองของระบบจะพิจารณาในโดเมนของเวลา และมาเปรียบเทียบกับ การออกแบบตัวควบคุมด้วย อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

4.1 การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ลูป โดยจะมีลูบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูบการควบคุมกระแสไฟฟ้า สามารถออกแบบ โดยอ้างอิงมาจากบทความ [14] ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 บล็อกสำเร็จรูปโดยใช้ Simscape บนโปรแกรม MATLAB

4.1.1 ลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

ลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ กำหนดค่าเป็น K_{pe} และ K_{ie} ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} K_{pe} = \frac{2\zeta_e \omega_{ne} R_L C_1 - 1}{R_L} \\ K_{ie} = \omega_{ne}^2 C_1 \end{cases} \quad (3)$$

4.1.2 ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า

ลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ กำหนดค่าเป็น K_{pi} และ K_{ii} ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (4)

$$\begin{cases} K_{pi} = \frac{2\zeta_{ii} \omega_{ni} L_1}{V_{in}} \\ K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L_1}{V_{in}} \end{cases} \quad (4)$$

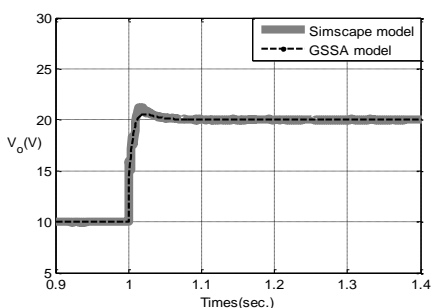
จากสมการที่ (3) และสมการที่ (4) สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอได้ โดยพิจารณาตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีดั้งเดิม

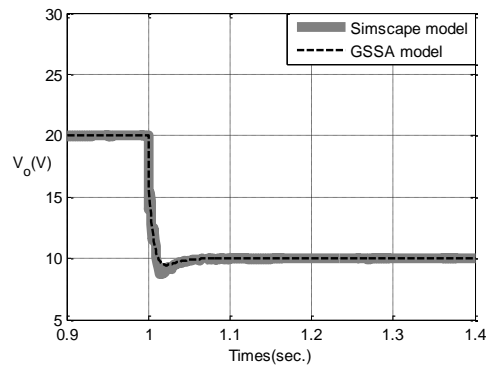
คำอธิบายของตัวแปร	ค่าที่ได้
แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย	$V_{in} = 30 \text{ V}$
ตัวเหนี่ยวนำในวงจร	$L_1 = 6 \text{ mH}$
ตัวเก็บประจุในวงจร	$C_1 = 1000 \mu\text{F}$
โหลดตัวต้านทานในวงจร	$R_L = 100 \Omega$

คำอธิบายของตัวแปร	ค่าที่ได้
อัตราส่วนความหน่วงของ ลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้าและ กระแสไฟฟ้า	$\zeta_e = \zeta_{ii} = 0.8$
ความถี่ธรรมชาติของ ลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า	$\omega_{nv} = 80 \text{ rad/s}$ $K_{pe} = 0.118$ $K_{ie} = 6.4$
ความถี่ธรรมชาติของ ลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า	$\omega_{ni} = 800 \text{ rad/s}$ $K_{pi} = 0.256$ $K_{ii} = 128$

จากตารางที่ 1 เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้ง 4 ค่า (K_{pe} , K_{ie} , K_{pi} , และ K_{ii}) มาได้แล้ว ต่อไปจะนำพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (1) ซึ่งตัวแบบจำลองที่ได้ต้องไปตรวจสอบความถูกต้อง ก่อนที่จะนำแบบจำลองดังกล่าวไปออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจะพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัต ซึ่งเปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (GSSA model) กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยระบบจริง (Simscape model) โดยอาศัยบล็อกสำเร็จรูปจากรูป Simscape บนโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 3 กำหนดให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าซิงโครนัส V_{dc}^* โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10 V เป็น 20 V และลดแรงดันไฟฟ้าจาก 20 V ปรึบเป็น 10 V ที่เวลา 1 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผลการตอบสนอง V_{dc} เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10 V เป็น 20 V

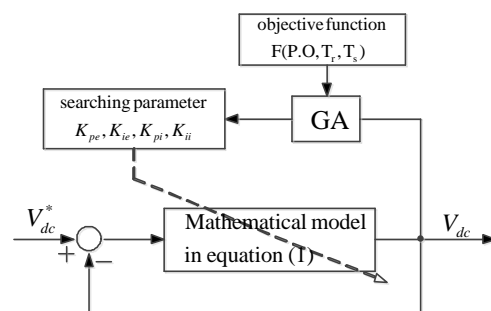


รูปที่ 5 ผลการตอบสนอง V_{dc} เมื่อลดแรงดันไฟฟ้าจาก 20 V ปรึบเป็น 10 V

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองทางพลวัตของ V_{dc} เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 10 V เป็น 20 V และลดแรงดันไฟฟ้าจาก 20 V ปรึบเป็น 10 V ให้ผลของการตอบสนองในโดเมนเวลา ทั้งสภาวะชั่วครู่ (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ที่สอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในบทความนี้มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้กับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมได้

4.2 การออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีที่สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอได้ โดยเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่ง อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมมีฟังก์ชันสำเร็จรูปที่สามารถเรียกใช้ได้เลยจากตัวโปรแกรม MATLAB ซึ่งง่ายต่อการออกแบบโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมมากนัก [15] สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมจะพิจารณาแผนภาพบล็อกไดอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระบวนการค้นหาด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

จากรูปที่ 6 เป็นกระบวนการค้นหาอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (1) มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (w) แสดงได้ดังสมการที่ (5)

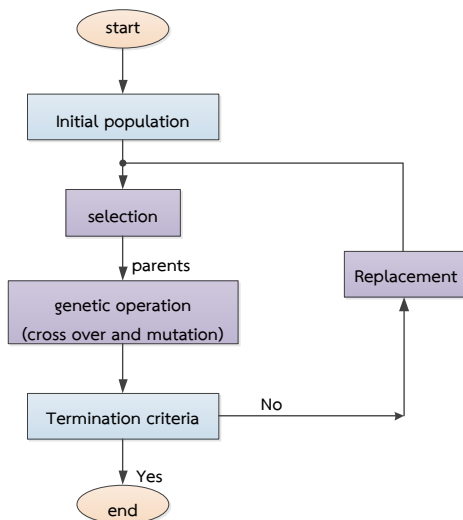
$$W = f(T_r, T_s, P.O.) = aT_r + bT_s + cP.O. \quad (5)$$

เมื่อ $P.O.$ = คือค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันฟุงเกิน (V_{dc})

T_r = คือค่าช่วงเวลาขึ้นของแรงดัน (V_{dc})

T_s = คือค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของแรงดัน (V_{dc})

ในบทความนี้กำหนดให้ค่า a, b และ c มีค่าเท่ากับ 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ กระบวนการค้นหาด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแสดงแผนผังการทำงาน (flow chart) ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างของตัวควบคุมพีไอ K_{pe} , K_{ie} , K_{pi} , และ K_{ii} ให้มีค่าเท่ากับ $[0.001 \ 1]$, $[1 \ 10]$, $[0.01 \ 2]$ และ $[20 \ 2000]$ ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2: กำหนดให้โครโมโซมประชากร

และการเข้ารหัสเป็นค่าจริง

ขั้นตอนที่ 3: กำหนดขนาดของโครโมโซมของประชากรเท่ากับ 50 โครโมโซม

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดค่าเริ่มต้นของประชากร โดยการสุ่มค่าจนได้ค่าที่อยู่ในช่วงขอบเขตการค้นหา

ขั้นตอนที่ 5: กำหนดจำนวนรุ่นสูงสุดของลูกหลานเท่ากับ 50 รุ่น

ขั้นตอนที่ 6: กำหนดให้กระบวนการคัดเลือกทางสายพันธุ์เป็นแบบการพันสุ่มแบบสม่ำเสมอ (stochastic uniform) การกลายพันธุ์แบบเกาส์เซียน (Gaussian mutation) และการครอสโอเวอร์แบบกระจัดกระจาย (scattered crossover)

5. ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

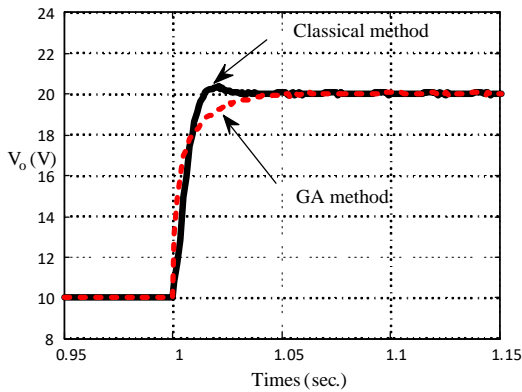
จากการออกแบบโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม และการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ได้ผลการค้นหาพารามิเตอร์ K_{pe} , K_{ie} , K_{pi} , และ K_{ii} ของตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีดั้งเดิมและอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

พารามิเตอร์ ของตัว ควบคุม	วิธีการออกแบบ	
	วิธีดั้งเดิม	อัลกอริทึมเชิง พันธุกรรม
K_{pv}	0.118	0.0644
K_{iv}	6.4	8.1945
K_{pi}	0.256	1.3616
K_{ii}	128	1013.8
w	3.0433	0.66

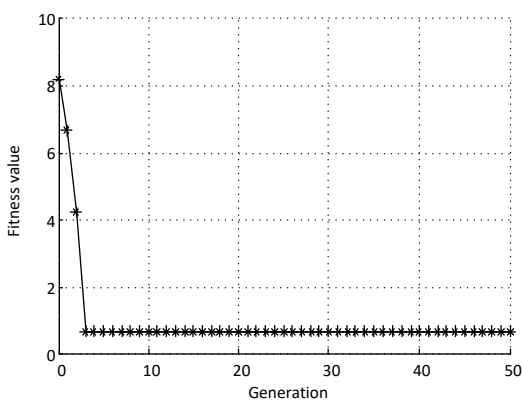
จากตารางที่ 1 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ทำให้ได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (w) ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม และวิธีดั้งเดิม จะจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนานกัน (V_{dc}) โดยให้มีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า V_{dc}^*

จาก 10 V เป็น 20 V ที่เวลา 1 วินาที ได้ผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 8 และผลการลู่เข้าหาค่าตอบของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (w) แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า V_{dc}

จากรูปที่ 8 พบว่าการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมให้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนานกัน (V_{dc}) ได้ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ซึ่งหมายถึงให้ช่วงเวลายกขึ้น (Rise-time) และเวลาเข้าที่ของแรงดัน (Settling-time) ที่เร็วกว่า และส่วนที่พุ่งเกินของแรงดัน (Percent Overshoot) น้อยกว่า แสดงการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 9 ผลลู่เข้าหาค่าตอบจากอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบช่วงเวลายกขึ้น และเวลาเข้าที่ของแรงดัน และส่วนที่พุ่งเกินของแรงดัน

ผลการตอบสนองในโดเมนเวลา	วิธีการออกแบบ	
	วิธีดั้งเดิม	อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม
T_r (sec.)	1.035	1.01
T_s (sec.)	1.064	1.04
$P.O.$ (%)	20.15	0

6. สรุปผล

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน โดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม ต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบเหมาะสม จากผลลัพธ์ของการออกแบบตัวควบคุมจะเห็นได้ว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีผลการตอบสนองทางพลวัตของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ขนานกัน ที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่น่าเสนอจึงเหมาะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม มีข้อดีและเป็นประโยชน์อย่างมาก สำหรับวิศวกรในการออกแบบตัวควบคุมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะออกแบบตัวควบคุมสำเร็จรูป ที่ไม่ต้องคอยมาปรับจูนที่ตัวควบคุม มากนัก

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Sasiya U, Kongpan A, Kongpol A. Power loss identification of three-phase induction motor using adaptive tabu search. 5th International Electrical Engineering Congress. March, 8-10, 2017, Pattaya, Thailand.

- [2] Apichai S, Kongpan A, Kongpol A. A controller design of more electric aircraft power systems using an adaptive tabu search algorithm. 5th International Electrical Engineering Congress. March, 8-10, 2017, Pattaya, Thailand.
- [3] Tosaporn N, Kongpan A, Kongpol A. Design of an active power filter using genetic algorithm technique. The 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases. February, 20-22, 2010, Cambridge, United Kingdom.
- [4] Wiphusana C. The optimal controller design of boost converter using a genetic algorithm. Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology. 2016;393-6. (in Thai).
- [5] Nonthanan P, Pracha K. Particle swarm optimization for energy management based on grid-connected photovoltaic - battery hybrid system. The 42nd Electrical Engineering Conference. 2019;53-6. (in Thai).
- [6] Kulsomsup Y, Yutthana K, Krischonme P, Nadarajah M. Optimal sizing and location of the charging station for plug-in electric vehicles using the particle swarm optimization technique. 6th International Electrical Engineering Congress. 2018;400-3.
- [7] Anuthita L, Sathapoom T, Danupon K. Optimization of I-PD controller for a FOLIPDT plant model using cuckoo search. The 42nd Electrical Engineering Conference. 2019;257-60. (in Thai).
- [8] Kasem N, Silawat R, Kittisak S. Modified whale optimization algorithm for optimal reactive power dispatch with considering load uncertainty. The 42nd Electrical Engineering Conference. 2019; 61-64. (in Thai).
- [9] Emadi A. Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging method. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2004;51(3):661-8.
- [10] Sarwar A, Shahid A, Hudaif A, Gupta U, Wahab M. Generalized state-space model for an n-phase interleaved buck-boost converter. 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics. October, 26-28, 2017, Mathura, India.
- [11] Azer P, Emadi, A. Generalized state space average model for multi-phase interleaved buck, boost and buck-boost DC-DC converters: transient, steady-state and switching dynamics. IEEE Access. 2020;77735–77745.
- [12] Wiphusana C, Kongpol A, Kongpan A. The dynamic model of electrical aircraft system feeding a buck-boost converter. 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON 2017), March, 8-10, 2017, Pattaya, Thailand.
- [13] Tsang K.M, Chan W.L. Cascade controller for DC/DC buck convertor. IEE Proc.- Electr. Power. 2005;152(4):827-31.
- [14] Suthep S. Analysis and design of paralleling synchronous buck for low voltage high current DC-DC converter. Master of Engineering in Electrical Engineering Thesis. King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. 2006. (in Thai)
- [15] Arthit S. Computational Intelligence. 1th ed. Suranaree University of Technology; 2009. (in Thai)