

การลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทางด้วย ขั้นตอนวิธีมีมติก

Miscoordination Reduction of Directional Overcurrent Relay by Memetic Algorithm

วิวัฒน์ ทิพจอร์* อานุสรณ์ ยอดใจเพชร สมนึก หม่อโป๊ะกู๋ เฉลิมวุฒิ แก้วตา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

Wiwat Tippachon* Anusorn Yodjaiphet Somnuek Morpoku Chalermwut Keawta

Department of Electrical Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

*Corresponding author: Email: wiwat@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดลำดับความสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีมีมติกซึ่งเป็นการผสมรวมกันระหว่างวิธีเชิงพันธุกรรมและชัฟเฟิลฟรอกลิปปิง บทความนี้ยังได้นำเสนอสมการวัตถุประสงค์ใหม่แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับเพื่อลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรองเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่จุดใกล้และจุดไกล วิธีการที่นำเสนอถูกนำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้า 3 บัส และ 6 บัส ผลการทดสอบพบว่าในระบบ 3 บัสเวลาการประสานสัมพันธ์ลดลง และในระบบไฟฟ้า 6 บัสพบว่าสมการวัตถุประสงค์ที่นำเสนอสามารถลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์เมื่อกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดไกลจาก 8 จุดเหลือ 2 จุด และพบว่าในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีมีมติกมีประสิทธิภาพและหาค่าผลเฉลยได้ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมและชัฟเฟิลฟรอกลิปปิง

คำสำคัญ: การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง การหาค่าเหมาะสมที่สุด ขั้นตอนวิธีมีมติก ขั้นตอนวิธีชัฟเฟิลฟรอกลิปปิง ลูกผสม

ABSTRACT

This paper presents coordination of directional overcurrent relays by optimization technic using memetic algorithm, combined with genetic algorithm and shuffled frog leaping algorithm. In addition, this paper proposes a new unconstrained objective equation to reduce miscoordination of main and backup relays, considered near and far-end faults. The proposed method is implemented in two different test cases, three and six bus network. The results show that, in the case of the 3 bus system, the discrimination times are decreased. And in the case of the 6-bus system, the proposed objective equation can reduce miscoordination, at the far-end fault, from 8 points to 2 points. It is found that the effectiveness and superiority of the memetic algorithms compared with the performance of genetic and shuffled frog leaping algorithm.

Keyword: Relay coordination, directional overcurrent relay, optimization, memetic algorithm, shuffled frog leaping algorithm, hybrid.

1. บทนำ

อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังมีหน้าที่สำคัญคือ ตรวจสอบความผิดปกติในระบบไฟฟ้าและแยกส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบเพื่อให้กระทบกับระบบโดยรวมน้อยที่สุด รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน เป็นรีเลย์ใช้งานง่าย ราคาไม่แพงจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการป้องกันสถานี ระบบจำหน่าย และระบบส่งกำลังไฟฟ้า รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทางนั้นเป็นรีเลย์ที่ตอบสนองต่อทิศทางการไหลกระแสลัดวงจรที่แตกต่างกัน [1]

การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางในระบบไฟฟ้าคือการปรับตั้งเวลาการทำงาน (TSM) และปรับตั้งกระแสเริ่มต้น(PS) ของรีเลย์แต่ละตัวให้ทำงานประสานกันเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น รีเลย์ที่ถูกกำหนดให้เป็นรีเลย์หลักต้องทำงานก่อนแต่หากรีเลย์หลักไม่ทำงานในช่วงเวลาที่กำหนด รีเลย์สำรองต้องทำหน้าที่แทน ในระบบไฟฟ้ารีเลย์แต่ละตัวถูกกำหนดให้ทำหน้าที่ทั้งรีเลย์หลักและรีเลย์สำรองซึ่งต้องทำงานประสานกับรีเลย์ที่อยู่ข้างเคียง ดังนั้นในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่การตั้งค่าให้รีเลย์ทั้งหมดให้ประสานสัมพันธ์กันอย่างถูกต้องจึงมีความซับซ้อนมาก[2]

ที่ผ่านมาการแก้ปัญหาการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งคำนวณหาค่าผลรวมที่น้อยที่สุดของเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางทั้งหมดในระบบ โดยพิจารณาจุดลัดวงจรเพียงจุดเดียว [2][3][4] และต่อมาได้มีผู้นำเสนอการประสานสัมพันธ์รีเลย์โดยพิจารณาการลัดวงจรสองจุดคือจุดใกล้กับรีเลย์(Close-in fault) และจุดไกล(Far-bus fault) [5] แต่งานวิจัยดังกล่าวใช้สมการวัดผลกระทบแบบมีเงื่อนไขบังคับ(Constrain) ซึ่งมีข้อเสียหลายอย่างเช่น หากเงื่อนไขบังคับไม่สมบูรณ์ทำให้หาผลเฉลยไม่ได้[6] และหากประชากรเริ่มต้นไม่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขบังคับจะถูกคัดออกทำให้ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือพัฒนาให้เป็นประชากรรุ่นใหม่ที่ดีขึ้น

การประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยไม่มีเงื่อนไขบังคับได้ถูกนำเสนอใน

[7][8] แต่ยังมีปัญหาการเลือกผลเฉลยที่ไม่ได้ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมที่สุด ต่อมาได้นำเสนอการปรับปรุงสมการวัดผลกระทบเพื่อให้เลือกได้ถูกต้องมากขึ้น โดยทำให้ค่าความเหมาะสมมีค่ามากเมื่อความแตกต่างเวลาการในการประสานสัมพันธ์เป็นค่าลบ[9] อย่างไรก็ตามสมการวัดผลกระทบดังกล่าวพิจารณาจุดกระแสลัดวงจรที่จุดใกล้เพียงจุดเดียว ซึ่งทำให้รีเลย์มีการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดเมื่อเกิดลัดวงจรที่จุดไกล

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อแก้ปัญหาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางนั้นมีผู้นำเสนอการใช้ขั้นตอนวิธี(algorithms) หลายแบบเช่น การใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น(Linear Programing)[10][11] โปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming)[9] การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [12][13] ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม(Genetic Algorithm) [9][14] การค้นหาสิ่งมีชีวิตชีวภาพ (Symbiotic Organism Search)[15] วิธีการค้นหาความบรรสาน(Harmony Search)[16]

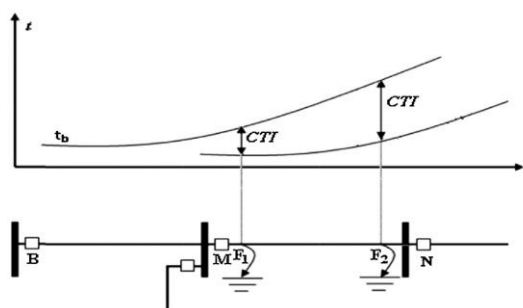
บทความนี้นำเสนอ สมการวัดผลกระทบใหม่แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ ในการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจุดลัดวงจรจุดใกล้ และจุดไกล เพื่อลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นทั้งสองกรณี โดยใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีพันธุกรรม และวิธีซัพเฟลพรอกลิปิงหรือเรียกว่าวิธีมีมติก[17]ซึ่งนำข้อดีของวิธีการซัพเฟลพรอกลิปิงที่มีความสามารถในการค้นหาเฉพาะที่ได้ดีเสริมเข้ากับวิธีพันธุกรรมที่ง่ายและรวดเร็วเพื่อหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการ

2.1 การประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง

รูปที่ 1 แสดงการประสานสัมพันธ์กันระหว่างรีเลย์กระแสเกิน โดยกำหนดให้รีเลย์ที่จุด M เป็นรีเลย์หลักและรีเลย์ที่จุด B เป็นรีเลย์สำรอง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นรีเลย์

หลักต้องทำงานก่อน ในกรณีที่รีเลย์หลักไม่ทำงานในเวลาที่กำหนด รีเลย์สำรองต้องทำหน้าที่แทน การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแต่ละตัวนั้นต้องปรับตั้งสามตัวแปร คือการเลือกเส้นโค้งของรีเลย์(Char) ปรับตั้งค่าตัวคูณเวลา (TSM) และค่ากระแสเริ่มต้น (PS) ช่วงระยะห่างเวลาที่กำหนดเรียกว่าเวลาในการประสานสัมพันธ์(CTI)



รูปที่ 1 การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกิน[18]

สมการวัดอุปกรณ์แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ[9] ซึ่งได้แก้ไขข้อผิดพลาดของแบบมีเงื่อนไขบังคับโดยรวมเงื่อนไขบังคับเข้าไปในสมการวัดอุปกรณ์ดังแสดงในสมการที่ (1) คือ

$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^N (t_i)^2 + \alpha_2 \sum_{j=1}^M (\Delta t_{mbj} - \beta_1 (\Delta t_{mbj} - |\Delta t_{mbj}|))^2 \quad (1)$$

เมื่อ t_i คือเวลาการทำงานของรีเลย์ตัวที่ i

$\Delta t_{mbj} = t_{bj} - t_{mj} - CTI$ คือช่วงเวลาของการประสานงานระหว่างรีเลย์

t_{mj} และ t_{bj} คือเวลาทำงานของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรองเมื่อเกิดลัดวงจรกรณี F_1 ที่จุด j

α_1 , α_2 และ β_1 คือค่าคงที่ถ่วงน้ำหนัก

N คือ จำนวนรีเลย์

M คือจำนวนคู่ของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง

เวลาในการทำงานของรีเลย์หาได้จากสมการที่ (2)

$$t = TMS \left(\frac{K}{(I_{SC} / I_P)^\alpha - 1} + L \right) \quad (2)$$

เมื่อ I_{SC} คือค่ากระแสลัดวงจร I_P คือค่ากระแสเริ่มต้นของรีเลย์ K, α, L เป็นค่าเฉพาะของรีเลย์แต่ละลักษณะดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของรีเลย์กระแสเกิน [6]

No.	type	standard	K factor	α factor	L factor
1	Short Time	AREVA	0.05	0.04	0
2	Standard	IEC	0.14	0.02	0
3	Very	IEC	13.5	1	0
4	Extremely	IEC	80	2	0
5	Long Time	IEC	120	1	0
6	Moderately	ANSI/IEEE	0.0515	0.02	0.114
7	Very	ANSI/IEEE	19.61	2	0.491
8	Extremely	ANSI/IEEE	28.2	2	0.1217

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) แล้วพบว่าเป็นการพิจารณาจุดลัดวงจรที่จุด F_1 เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ การประสานสัมพันธ์ที่มีการพิจารณาจุดลัดวงจรทั้งสองจุด สมการวัดอุปกรณ์ใหม่ที่เหมาะสมคือการเพิ่มเทอมที่สามเข้าไปในการพิจารณาจุดลัดวงจรที่จุด F_2 แสดงดังสมการที่ (3)

$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^N (t_i)^2 + \alpha_2 \sum_{j=1}^M (\Delta t_{mbj|F_1} - \beta_1 (\Delta t_{mbj|F_1} - |\Delta t_{mbj|F_1}|))^2 + \alpha_2 \sum_{j=1}^M (\Delta t_{mbj|F_2} - \beta_2 (\Delta t_{mbj|F_2} - |\Delta t_{mbj|F_2}|))^2 \quad (3)$$

เมื่อ $\Delta t_{mbj|F_1} = t_{bj|F_1} - t_{mj|F_1} - CTI$ คือช่วงเวลาของการประสานงานระหว่างรีเลย์หลักและสำรองกรณี F_1 ที่จุด j และ $\Delta t_{mbj|F_2} = t_{bj|F_2} - t_{mj|F_2} - CTI$ คือช่วงเวลาของการประสานงานระหว่างรีเลย์หลักและสำรองกรณี F_2 ที่จุด j

จากสมการที่ (3) เทอมที่หนึ่งเป็นผลรวมเวลาของรีเลย์ทั้งหมด เทอมที่สองและสามเป็นการใช้การประสานสัมพันธ์ระหว่างรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง กรณี $\Delta t_{mbj|F_1}$ และ $\Delta t_{mbj|F_2}$ มีค่าเป็นบวกคือการประสานสัมพันธ์ถูกต้องเทอมที่สองและสามมีค่าเท่ากับ $\Delta t_{mbj|F_1}$ และ

$\Delta t_{mbj|F_2|}$ แต่หากมีค่าเป็นลบผลลัพธ์ของเทอมที่สองมีค่าเป็น $(1+2\beta_1)(\Delta t_{mbj|F_1|})$ และเทอมที่สามมีค่าเป็น $(1+2\beta_2)(\Delta t_{mbj|F_2|})$ ดังนั้นหากค่าคงที่ β_1 และ β_2 เป็นบวกทำให้ผลของสมการวัตถุประสงค์มีค่าสูง ซึ่งทำให้ไม่ถูกเลือกในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

2.2 การใช้มีติดกอัลกอริทึมในการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง

ในการศึกษาครั้งนี้เสนอวิธีการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง โดยใช้เทคนิคซัพเฟิลพรอกลิปบิง(SFL) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาค่าเหมาะที่สุด (Local Search) ของเจเนติกอัลกอริทึม(GA)[19] หรือเรียกว่า มีติดกอัลกอริทึม(MA)[17] โดยมีลำดับขั้นตอนแสดงในรูปที่ 2

แผนผังการทำงานของ MA ในรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นสร้างประชากรด้วยการสุ่ม โดยกำหนดให้แต่ละโครโมโซมประกอบด้วยค่าปรับตั้งรีเลย์ทั้งหมด โดยการปรับตั้งรีเลย์แต่ละตัว (R_i) ประกอบด้วยสามตัวแปรคือ ตัวคูณเวลา(TMS) กระแสเริ่มต้น(PS) และลักษณะของเส้นเค็งการทำงาน(Char) ค่าเริ่มต้นจากตัวแปรทั้งสามหาได้จากสมการที่ (4)

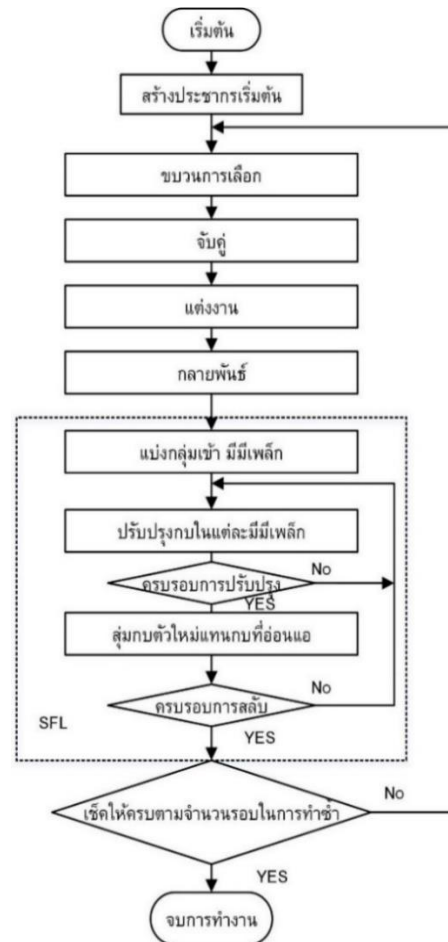
$$p = rand() * (p_{hi} - p_{lo}) + p_{lo} \quad (4)$$

เมื่อ p_{hi} และ p_{lo} คือค่าสูงสุดต่ำสุดของตัวแปรตามลำดับ $rand()$ คือการสุ่มตัวเลขแบบยูนิฟอร์มช่วง (0,1)

ตัวแปรลักษณะของเส้นเค็งการทำงานเป็นแบบไม่ต่อเนื่องคือเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม ดังนั้นใช้การสุ่มตัวเลขที่มีทศนิยมและปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม โครงสร้างโครโมโซมในบทความนี้แสดงในรูปที่ 3

R1			R...			R.n		
TMS1	PS1	Char1	TMS...	PS...	Char...	TMS.n	PS.n	Char.n

รูปที่ 3 รูปแบบโครโมโซมของ GA



รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของวิธี MA

ขั้นตอนที่ 2 การเลือก(Selection) เป็นกระบวนการเลือกโครโมโซมเพื่ออยู่รอดและสร้างลูกหลานรุ่นต่อไป การเลือกทำได้โดยกำหนดจำนวนที่อยู่รอด (N_{keep}) ค่าความเหมาะสม จากสมการวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก และคัดเลือกประชากรต้นแบบจากโครโมโซมที่ค่าความเหมาะสมดีที่สุดจำนวนเท่ากับ N_{keep}

ขั้นตอนที่ 3 การจับคู่ (Pairing) ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกพ่อและแม่เพื่อจับคู่แต่งงาน ทำได้โดยสร้างความน่าจะเป็นของโครโมโซมแต่ละตัวโดยใช้ค่าความเหมาะสม และสุ่มเพื่อเลือกโครโมโซมที่โชคดีมาแต่งงานกันด้วยวิธีปั่นล้อรูเล็ต(spining the roulette wheel)[19] โดยพ่อแม่หนึ่งคู่จะสร้างลูกออกมา 2 โครโมโซม ดังสมการที่ (5) และ (6)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

$$Rd = [R_{d1}, R_{d2}, R_{d3}, R_{d4}, \dots, R_{dN \text{ var}}] \quad (5)$$

$$Rm = [R_{m1}, R_{m2}, R_{m3}, R_{m4}, \dots, R_{mN \text{ var}}] \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 4 แต่งงาน คือการสลับสายพันธุ์(Crossover) ยีนข้ามระหว่างพ่อและแม่ในการศึกษาครั้งนี้ทำการสลับสายพันธุ์แบบจุดเดียว ทำได้โดยสุ่มจุด μ ขึ้นมาเพื่อเป็นจุดแลกเปลี่ยนยีนระหว่างพ่อและแม่ และปรับเปลี่ยนยีนที่เป็นจุดแลกเปลี่ยน ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$Roff1 = [R_{m1}, R_{m2} \dots R_{\mu1} \dots, R_{dn}] \quad (7)$$

$$Roff2 = [R_{d1}, R_{d2} \dots R_{\mu2} \dots, R_{dn}] \quad (8)$$

เมื่อ

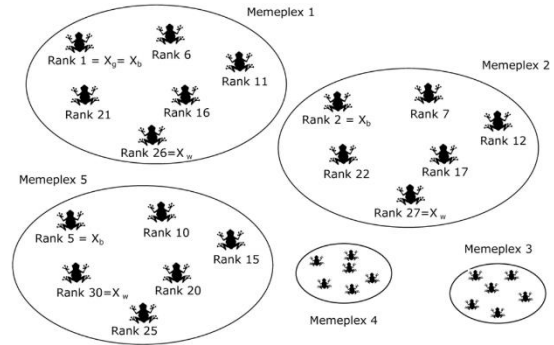
$$R_{\mu1} = R_{m\mu} - \chi[R_{m\mu} - R_{d\mu}]$$

$$R_{\mu2} = R_{m\mu} + \chi[R_{m\mu} - R_{d\mu}]$$

$$\chi \text{ คือค่าสุ่มช่วงระหว่าง } (0,1)$$

ขั้นตอนที่ 5 การกลายพันธุ์(Mutation) เป็นขั้นตอนปรับเปลี่ยนโครโมโซมที่มีอยู่เดิม เพื่อช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการเวียนซ้ำอยู่กับค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการคือสุ่มตำแหน่งที่ต้องการการกลายพันธุ์ขึ้นมาภายใต้ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ และเปลี่ยนแปลงค่าในบางส่วนของโครโมโซมของกลุ่มประชากรเพื่อให้สมาชิกของกลุ่มประชากรมีความหลากหลายมากขึ้นโดยใช้สมการที่ (4)

ขั้นตอนที่ 6 เริ่มกระบวนการชฟเฟิลฟรอกลิปิงอัลกอริทึม(SFL) โดยกำหนดให้ประชากรเป็นประชากรกบคำนวณค่าความเหมาะสมหรือความแข็งแรงของกบแต่ละตัว ผ่านสมการวัตถุประสงค์ จากนั้นแบ่งกลุ่มโดยเรียกแทนกลุ่มนั้นว่า มีมิเพล็กซ์(Memplex) ในการแบ่งกลุ่มจัดให้กบที่มีค่าความเหมาะสมหรือความแข็งแรงสูงสุดเป็นลำดับที่หนึ่ง กบตัวที่สองจัดให้อยู่ในมิมิเพล็กซ์ที่สองเรียงลำดับดังรูปที่ 4 ในแต่ละมิมิเพล็กซ์ กบตัวใดมีค่าความเหมาะสมมากที่สุดแทนเป็น X_b และกบตัวใดมีค่าความเหมาะสมน้อยที่สุด แทนเป็น X_w ส่วน X_g คือกบที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดของกบทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 การแพร่กระจายของกบในมิมิเพล็กซ์ของ SFL[20]

ขั้นตอนที่ 7 การปรับปรุงกบ ค่าความเหมาะสมของกบตัวที่มีค่าความเหมาะสมน้อยที่สุดเดิม X_w^{old} ให้มีค่าความเหมาะสมมากขึ้นตามสมการที่ (9)

$$X_w^{new} = X_w^{old} + D_i \quad (9)$$

เมื่อ

$$D_i = rand() * (X_b - X_w^{old})$$

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบการปรับปรุงตามรอบที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 9 หากปรับปรุงแล้วค่าความเหมาะสมไม่ดีเท่า X_g ให้กำจัดออกและสุ่มตัวใหม่เข้ามาแทนที่ ทำจนครบทุกมิมิเพล็กซ์

ขั้นตอนที่ 10 สลับกบอีกครั้งโดยนำกบทุกมิมิเพล็กซ์มาเรียงลำดับใหม่ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 ตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้ประชากรกบที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 11 การตรวจสอบเงื่อนไขหยุดการทำงาน โดยกำหนดรอบการทำงาน ซึ่งหากยังไม่ถึงรอบที่กำหนดให้วนรอบซ้ำในขั้นตอนที่ 2

3. การทดสอบและผล

การทดสอบวิธีการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบ่งเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ 1 ระบบทดสอบสามบัส[18] และกรณีที่ 2 ระบบทดสอบหกบัส[15] โดยเปรียบเทียบการแบบเดิมหรือสมการที่ (1) และสมการที่นำเสนอหรือสมการที่ (3) ด้วยมีค่าคงที่ $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 2$, $\beta_1 = 1000, \beta_2 = 100$ และแสดงเปรียบเทียบผลที่ได้จาก MA GA และ SFLแบบดั้งเดิม ซึ่งกำหนดให้โดยให้อัตราส่วน CT สำหรับรีเลย์ทุกตัวเท่ากับ 500:1, CTI

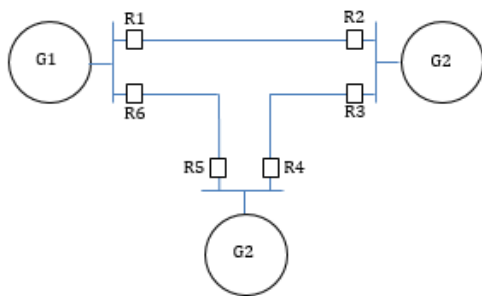
เท่ากับ 0.2 วินาที, TSM มีค่าตั้งแต่ 0.025 ถึง 1.2 และ PS มีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.875 เส้นโค้งของรีเลย์เลือกได้ 8 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ GA SFL และ HGASFL ที่ใช้ในการทดสอบ

Parameters	GA	SFL	MA
Population size	100	100	100
Generations	3000	3000	3000
Crossover rate	0.8	-	0.8
Mutation rate	0.05	-	0.05
Memeplex Size	-	20	20
Number of Memeplexes	-	5	5

3.1 กรณีที่ 1 ระบบทดสอบ 3 บัส

ระบบทดสอบ 3 บัสแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วยบัสเชื่อมต่อ 3 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง สายส่ง 3 เส้น และรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง 6 ตัว



รูปที่ 5 โครงข่ายระบบ 3 บัส[18]

ตารางที่ 3 แสดงค่า TSM PS และ Char ที่ได้จากการใช้ MA ในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 1 และสมการที่ 3 ตารางที่ 4 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ทั้งหมด ตารางที่ 5 การประสานสัมพันธ์ของจุดลัดวงจรทั้งสองจุด คือ จุดใกล้(F1) และ จุดไกล(F2)

ตารางที่ 3 ผล TSM, PS และ Char กรณีที่ 1

รีเลย์	สมการที่ 1			สมการที่ 3		
	TSM	PS	Char	TSM	PS	Char
1	0.093	0.783	4	0.844	0.162	3
2	0.028	0.668	4	0.655	0.152	3
3	0.236	0.347	4	0.794	0.154	1
4	0.156	0.527	4	0.500	0.151	6
5	0.181	0.287	4	0.458	0.127	3
6	0.113	0.573	4	0.633	0.151	6
เฉลี่ย	0.135	0.531	-	0.647	0.149	-

ตารางที่ 4 ผลเวลาการทำงานของรีเลย์ กรณีที่ 1

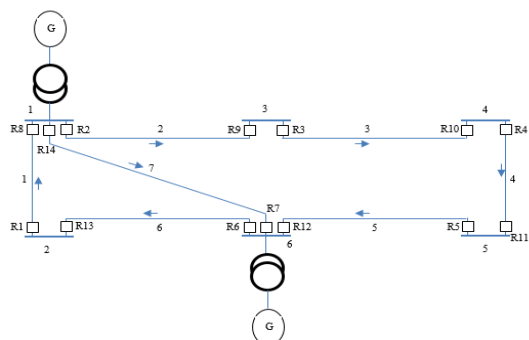
รีเลย์	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
1	0.038	0.216	0.171	0.410
2	0.027	0.143	0.224	0.517
3	0.054	0.174	0.246	0.295
4	0.057	0.192	0.370	0.429
5	0.021	0.158	0.105	0.300
6	0.025	0.207	0.437	0.559
เฉลี่ย	0.037	0.182	0.259	0.418

ตารางที่ 5 เวลาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ กรณีที่ 1

Discrimination times	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
$\Delta t_{1,5}$	0.001	1.708	0.000	0.558
$\Delta t_{6,2}$	0.000	4.743	0.015	0.015
$\Delta t_{3,1}$	0.002	1.132	0.001	0.563
$\Delta t_{4,6}$	0.002	3.298	0.007	0.260
$\Delta t_{5,3}$	0.000	16.214	0.002	0.313
$\Delta t_{6,2}$	0.000	0.097	0.011	0.189
เฉลี่ย	0.001	4.532	0.006	0.316

3.2 กรณีที่ 2 ระบบทดสอบ 6 บัส

ระบบทดสอบ 6 บัส ประกอบไปด้วยบัสเชื่อมต่อ 3 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง สายส่ง 7 เส้น หม้อแปลง 2 ตัวและรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง 14 ตัว



รูปที่ 6 โครงข่ายระบบ 6 บัส [15]

ตารางที่ 6 แสดงค่า TSM PS และChar ที่ได้จากการใช้ MA ในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 1 และสมการที่ 3 ตารางที่ 7 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ ตารางที่ 8 แสดงเวลาการประสานสัมพันธ์ของจุดลัดวงจร ตารางที่ 9 และตารางที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาการทำงานเวลาประสานสัมพันธ์ และจำนวนจุดที่มีการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาด ของกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 ตามลำดับ รูปที่ 7 แสดงการใส่ค่าคำตอบซึ่งเปรียบเทียบทั้งสามอัลกอริทึม คือ GA SFL และ MA

ตารางที่ 6 ผล TSM, PS และ Char กรณีที่ 2

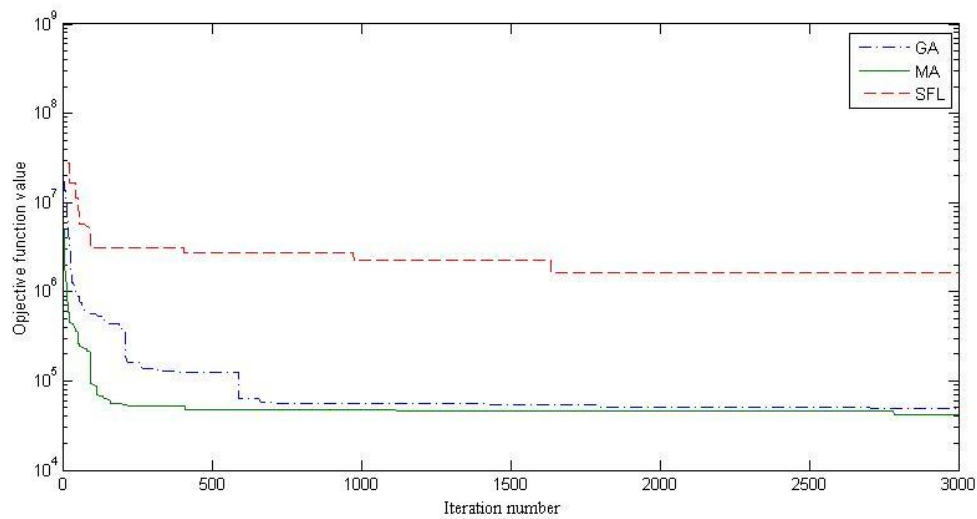
รีเลย์	สมการที่ 1			สมการที่ 3		
	TSM	PS	Char	TSM	PS	Char
1	0.540	0.142	4	0.069	0.625	4
2	1.035	0.405	4	0.587	0.300	3
3	0.069	0.794	4	1.173	0.253	4
4	0.099	0.371	4	0.541	0.309	1
5	0.081	0.138	4	0.064	0.609	1
6	0.372	0.473	4	0.348	0.527	4
7	0.763	0.226	4	0.501	0.114	6
8	0.245	0.549	4	0.132	0.785	4
9	0.038	0.197	4	0.047	0.643	1
10	0.029	0.698	4	0.426	0.382	1
11	0.449	0.426	4	0.995	0.107	7
12	0.557	0.621	4	0.122	0.359	5
13	0.090	0.361	4	0.094	0.487	4
14	0.920	0.218	4	0.911	0.107	6
เฉลี่ย	0.378	0.401	-	0.429	0.401	-

ตารางที่ 7 ผลเวลาการทำงานของรีเลย์ กรณีที่ 2

รีเลย์	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
1	0.030	0.301	0.076	0.859
2	0.116	0.272	0.225	0.350
3	0.071	0.285	0.123	0.472
4	0.089	0.226	0.264	0.328
5	0.026	0.258	0.061	0.530
6	0.068	0.226	0.079	0.263
7	0.045	0.304	0.345	0.431
8	0.061	0.233	0.067	0.260
9	0.021	0.251	0.044	0.587
10	0.043	0.218	0.194	0.280
11	0.123	0.240	0.493	0.497
12	0.146	0.320	0.499	0.749
13	0.038	0.339	0.072	0.665
14	0.050	0.341	0.619	0.771
เฉลี่ย	0.066	0.272	0.226	0.503

ตารางที่ 8 เวลาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ กรณีที่ 2

Discrimination times	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
$\Delta t_{2,1}$	0.004	1.040	0.496	10.000
$\Delta t_{4,1}$	0.079	-	0.133	0.000
$\Delta t_{3,2}$	0.007	0.593	0.031	0.052
$\Delta t_{4,3}$	0.003	0.369	0.019	0.693
$\Delta t_{5,4}$	0.006	2.558	0.070	0.072
$\Delta t_{6,5}$	0.013	-	0.445	-
$\Delta t_{7,5}$	0.042	-	0.242	0.156
$\Delta t_{1,6}$	0.002	1.971	0.000	1.871
$\Delta t_{2,7}$	0.002	1.012	0.009	0.000
$\Delta t_{8,7}$	0.060	-	0.167	36.297
$\Delta t_{13,8}$	0.002	1.723	0.000	1.974
$\Delta t_{8,9}$	0.015	-	0.772	-
$\Delta t_{14,9}$	0.031	-	0.414	0.262
$\Delta t_{9,10}$	0.006	67.579	0.039	0.064
$\Delta t_{10,11}$	0.002	0.762	0.103	0.048
$\Delta t_{11,12}$	0.002	0.198	0.061	0.380
$\Delta t_{7,13}$	0.127	-	0.186	0.100
$\Delta t_{12,13}$	0.014	1.106	0.009	2.809
$\Delta t_{6,14}$	0.091	-	0.497	4.486
$\Delta t_{12,14}$	0.009	0.878	0.076	0.001
เฉลี่ย	0.026	6.649	0.189	3.293



รูป 7 การลู่เข้าหาคำตอบของทั้งสามอัลกอริทึม

ตารางที่ 9 ผลการประสานสัมพันธ์รีเลย์กรณีที่ 1
เปรียบเทียบระหว่าง GA SFL และ MA

		GA	SFL	MA
สมการที่ 1	เวลาทำงาน F1	0.038	0.076	0.037
	เวลาทำงาน F2	0.186	0.379	0.182
	Δt F1	0.006	0.218	0.001
	Δt F2	3.809	8.717	4.532
	จุดผิดพลาด F1	0	0	0
	จุดผิดพลาด F2	0	0	0
สมการที่ 3	เวลาทำงาน F1	0.564	0.501	0.259
	เวลาทำงาน F2	0.742	0.895	0.418
	Δt F1	0.025	0.335	0.006
	Δt F2	0.446	1.899	0.316
	จุดผิดพลาด F1	0	0	0
	จุดผิดพลาด F2	0	0	0

ตารางที่ 10 ผลการประสานสัมพันธ์รีเลย์กรณีที่ 2
เปรียบเทียบระหว่าง GA SFL และ MA

		GA	SFL	MA
สมการที่ 1	เวลาทำงาน F1	0.069	0.544	0.066
	เวลาทำงาน F2	0.284	1.524	0.272
	Δt F1	0.038	0.945	0.026
	Δt F2	1.187	11.512	6.649
	จุดผิดพลาด F1	0	0	0
	จุดผิดพลาด F2	8	8	8
สมการที่ 3	เวลาทำงาน F1	0.318	0.942	0.226
	เวลาทำงาน F2	0.649	2.112	0.503
	Δt F1	0.288	0.964	0.188
	Δt F2	5.220	4.119	3.293
	จุดผิดพลาด F1	0	2	0
	จุดผิดพลาด F2	2	5	2

4. วิเคราะห์ผล

จากผลการทดสอบในกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าสามบัส ในตารางที่ 3 4 และ 5 พบว่าผลที่ได้จากสมการวัดอุปกรณ์ที่นำเสนอและสมการเดิมสามารถจัดลำดับการทำงานของรีเลย์ได้ทั้งสองสมการ แต่สมการที่นำเสนอได้ค่าเฉลี่ยเวลาการประสานสัมพันธ์ ที่จุดลัดวงจรที่ F2 ต่ำกว่า

ในกรณีที่ 2 เป็นระบบไฟฟ้าหกบัส มีรีเลย์ที่ต้องจัดลำดับความสัมพันธ์ 12 ตัวนั้น จากตารางที่ 6, 7 แสดง

ให้เห็นว่าสมการที่ 3 มีค่าเฉลี่ย TSM PS และเวลาการทำงานสูงกว่าแต่ จากตารางที่ 8 พบว่า สมการเดิมการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดที่ F2 ถึง 8 จุด แต่สมการที่นำเสนอสามารถลดลงเหลือ 2 จุด และค่าเฉลี่ยเวลาการประสานสัมพันธ์ต่ำกว่า เนื่องจากสมการที่ 1 เน้นการประสานสัมพันธ์ในจุด F1 เพียงจุดเดียว ส่วนสมการที่ 3 พิจารณาการประสานสัมพันธ์ทั้งสองจุด

รูปที่ 7 แสดงค่าจากการคำนวณได้จากสมการวัดอุปกรณ์ซึ่งเป็นเวลารวมและผลต่างของเวลาที่คูณกับ

ค่าคงที่ถ่วงน้ำหนักต่าง ๆ ในแต่ละรอบการคำนวณ เปรียบเทียบกันระหว่างวิธี MA GA และ SFL ซึ่งวิธี MA สามารถรู้ค่าคำตอบได้ดีกว่า SFL และ GA เนื่องเป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีเข้าด้วยกัน จากตารางที่ 9 และ 10 เห็นได้ชัดว่าเมื่อใช้สมการที่นำเสนอวิธี MA สามารถลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดที่ F2 ได้เท่ากับ GA แต่ได้เวลาการประสานสัมพันธ์ที่ F2 ดีกว่าทั้งสองวิธี

จากผลการทดลองพบว่า ค่าคงที่ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ มีผลต่อการจัดลำดับเวลาการทำงานของรีเลย์ โดยค่า α_1 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของเวลาการทำงานของรีเลย์แต่ละตัว α_2 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของผลต่างเวลาการทำงานของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง β_1 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของความถูกต้องในการจัดลำดับเวลาของกรณี F1 และ β_2 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของความถูกต้องในการจัดลำดับเวลาของกรณี F2 ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่าไหนต่ำผลก็คือการเน้นให้เทอมนั้นมีความสำคัญมากกว่า ค่าที่เลือกใช้ในบทความนี้ได้มาจากการลองผิดลองถูก(Trial and error)

การใช้วิธี MA ที่มีการผสมผสานระหว่าง GA และ SFL เพื่อปรับปรุงการค้นหาเฉพาะที่ ทำให้การคำนวณของวิธี MA ในแต่ละรอบสูงกว่าวิธีทั้งสอง แต่ด้วยความเร็วของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันทำให้การคำนวณต่างกันเล็กน้อยในวินาที ซึ่งไม่มีความสำคัญเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ทำให้ลดเวลาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ลงได้

5.สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการใช้วิธีที่มีดีกัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อประสานการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง ได้ทำการทดสอบในระบบกำลังไฟฟ้า 3 บัส และ 6 บัส โดยได้นำเสนอสมการวัดอุปสรรคใหม่แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับที่พิจารณาจุดลัดวงจรสองจุดคือจุดใกล้และจุดไกลจากตำแหน่งติดตั้งรีเลย์ จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธีเจเนติกอัลกอริทึมและซัพเฟิลฟรอกลิปปีง พบว่าวิธีที่มีดีกัลกอริทึมมีการรู้ค่าคำตอบที่ดีกว่า และสมการ

วัดอุปสรรคใหม่ที่น่าสนใจนั้นสามารถลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดได้ดีกว่าสมการเดิม

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาทุกคนที่มีส่วนช่วยให้การทำงานประสบความสำเร็จด้วยดี

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Horak, "Directional overcurrent relaying (67) concepts," in 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2006, pp.164-176.
- [2] P. P. Bedekar and S. R. Bhide, "Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA- NLP Approach," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 26, no. 1, pp. 109-119, 2011.
- [3] A. S. Noghabi, J. Sadeh and H. R. Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 24, no. 4, pp. 1857 – 1863, 2009.
- [4] P. P. Bedekar and S. R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm," Expert Syst. Appl., vol. 38, no. 9, pp. 11286-11292, 2011.
- [5] R. Thangaraj, M. Pant and K. Deep, "Optimal coordination of over- current relays using modified differential evolution algorithms," Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 23, no, 5, pp. 820-829, Aug. 2010.

- [6] R. M. Chabanloo, H. A. Abyaneh, S. S. H. Kamangar and F. Razavi, "Optimal combined overcurrent and distance relays coordination incorporating intelligent overcurrent relays characteristic selection," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no 3, pp. 1381-1392, 2011.
- [7] C. W. So, K. K. Li, K. T. Lai and K. Y. Fun, "Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination," in *6th International Conference on Developments in Power Systems Protection.*, Nottingham, UK, 1997, pp. 66–69.
- [8] C.W. So and K.K. Li, "Overcurrent relay coordination by evolutionary programming," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 83–90, 2000.
- [9] F. Razavi, H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadia and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 713–720, 2008.
- [10] B. Chattopadhyay, M. S. Sachdev and T. S. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 165 – 173, 1996.
- [11] A. S. Noghabi, H. R. Mashhadi and Javad Sadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 3, pp. 1348–1354, 2010.
- [12] H. H. Zeineldin, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 11, pp. 988–995, 2006.
- [13] Z. Moravej, M. Jazaeri and M. Gholamzadeh, "Optimal coordination of distance and overcurrent relays in series compensated systems based on MAPSO," *Energy Convers. Manage.*, vol. 56, pp. 140–151, Apr. 2012.
- [14] M. Ezzeddine and R. Kaczmarek, "A novel method for optimal coordination of directional overcurrent relays considering their available discrete settings and several operation characteristics," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp. 1475–1481, 2011.
- [15] D. Saha, A. Datta and P. Das, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in power systems using Symbiotic Organism Search Optimisation technique," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 11, pp. 2681–2688, 2016.
- [16] V. N. Rajput and K. S. Pandya, "Coordination of directional overcurrent relays in the interconnected power systems using effective tuning of harmony search algorithm," *Sustainable Computing: Informatics and Syst.*, vol. 15, pp. 1–15, Sep. 2017.
- [17] S. Chompuming, P. Itthipong, and P. Pongcharoen, "The application of shuffled frog-leaping technique to improve the performance of a memetic algorithm," (in Thai), in *National Operations Research*

Conference 2007, Bangkok., 2007, pp. 162-174.

- [18] Z. Moraveja, F. Adelniaa and F. Abbasi, “ Optimal coordination of directional overcurrent relays using NSGA- II,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 228-236. Feb. 2015.
- [19] R. L. Haupt and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, NY : Wiley, 2004.
- [20] D.Mora-Melia, P. L. Iglesias-Rey, F. J. Martínez-Solano and P.Muñoz-Velasco, “The efficiency of setting parameters in a modified shuffled frog leaping algorithm applied to optimizing water distribution networks,” *Water.*, vol 8, no. 5, pp. 1-14, Apr. 2016.