



การออกแบบระบบกราวด์สายดินในสถานีไฟฟ้า โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Optimal Grounding Grid Design in Power System Substation by Multi-Objective Optimization NSGA-II

ประสงค์ เจริญวงศ์^{1*} กฤติเดช บัวใหญ่¹ และ กาณท์ เกิดชื่น¹

¹ หน่วยวิจัยนวัตกรรมพลังงานไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Prasong Charoenwong^{1*}, Krittidet Buayai¹ and Kaan Kerchuen¹

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhonratchasima, Thailand, 30000

*ผู้รับผิดชอบบทความ: prasong.ch@rmuti.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-8957-16881

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบกราวด์สายดินในสถานีไฟฟ้าโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งเป็นการหาค่าด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ครอบงำ ระบบกราวด์สายดินในสถานีไฟฟ้าจะต้องมีความปลอดภัยต่อชีวิตและอุปกรณ์ไฟฟ้า และมีราคาประหยัด ในฟังก์ชันเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสมจึงประกอบด้วยราคาของวัสดุ ค่าแรงในการติดตั้ง และเงื่อนไขของความปลอดภัย จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาได้อย่างดี ทำให้ระบบกราวด์สายดินสามารถออกแบบได้อย่างประหยัด และปลอดภัย นอกจากนี้ในบทความนี้ยังทำการทดสอบการออกแบบระบบกราวด์สายดินจากสถานีไฟฟ้าจริง เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมและวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค

คำสำคัญ กราวด์สายดิน การหาค่าที่เหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ กราวด์กริด

Abstract

This paper presents the design of the grounding system in the power station using a multi-objective optimization using NSGA-II. (NSGA: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) The Grounding systems in power stations must be safe and electrical equipment and must be economical. The objective function of finding the right value consists of the price of the material, installation wages and security conditions. In addition, the multi-objective optimization using NSGA-II is also adjusted in line with the acceleration time for the problem. The results showed that such an approach can solve the problem well. The grounding grid design in power system substation can be designed economically and safely. This article also tests the design of the grounding system of a real power station and compares the results with the most appropriate GA (Genetic Algorithm) and PSO. (Particle Swarm Optimization)

Keywords: Grounding System, Multi-Objective, NSGA-II, Ground Grid.

1. บทนำ

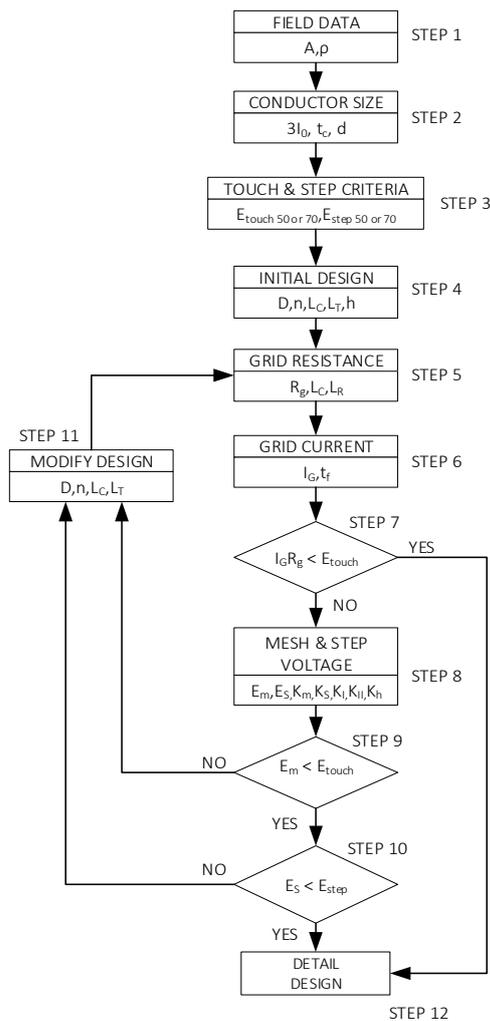
ระบบกราวด์สายดินในสถานีไฟฟ้ามีความจำเป็นต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า และช่วยป้องกันให้อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัย ในการก่อสร้างระบบกราวด์สายดินก็ต้องการต้นทุนต่ำในการก่อสร้างด้วยเช่นกัน ดังนั้นการพิจารณาออกแบบระบบกราวด์สายดินต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและความประหยัดด้วย

ในการออกแบบกราวด์สายดินนักวิจัยหลายท่านได้มีการแก้ปัญหา ด้วยวิธีการออกแบบระบบกราวด์ดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm Optimization: GA) [1] การแก้ปัญหาการออกแบบระบบกราวด์ดินของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO)[2] โดยวิธีการเหล่านี้ได้ให้ผลในการออกแบบที่มีความประหยัดและปลอดภัยต่อ

ชีวิตและทรัพย์สิน โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 [3] แต่วิธีการเหล่านี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบระบบ รากสายดินแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective) ทำให้การมองภาพรวมของปัญหาที่ซ่อนอยู่ใน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นไม่ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณ ได้ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความปลอดภัยจากแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) แรงดันสัมผัส (Touch Voltage) และมูลค่า การลงทุนในการก่อสร้าง ในช่วงคำตอบที่ดีที่สุดที่หลากหลาย คำตอบที่คำนวณได้

2. การออกแบบรากสายดิน

การออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าเป็นไปตาม มาตรฐาน IEEE std. 80-2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ใน ปัจจุบันมีขั้นตอนการออกแบบระบบรากดินมีทั้งหมด 12 ขั้นตอน [3],[4], การออกแบบกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้ามี่ ขั้นตอนดังแสดงตามรูปที่ 1 และรายละเอียดการออกแบบนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้า เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 [3]

ขั้นตอนที่ 1 สํารวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า คือ การหาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบกราวด์กริด ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณในขั้นตอนอื่นต่อไป เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่จะมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งโดยมากสามารถหาข้อมูลได้จากแบบก่อสร้างของสถานีไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ การหาขนาดสายตัวนำ จะใช้กระแสฟอลต์สูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นและใช้ช่วงเวลากการตัดกระแสที่เป็นช่วงเวลาสูงสุด

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_{step}) ที่มนุษย์ทนได้ เป็นขั้นตอนคำนวณเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบกราวด์กริดที่จะทำการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น โดยทำการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำรวมทั้งลักษณะรูปทรงของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบกราวด์กริด เพื่อใช้ค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดที่คำนวณได้ไปคำนวณในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด การออกแบบจะต้องพิจารณาถึงประเภทของฟอลต์ ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ Decrement factor และการขยายระบบในอนาคต

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (Ground Potential Rise, GPR)

ถ้า $GPR < E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $GPR > E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า โดยทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องคำนึงถึงลักษณะรูปร่างของกราวด์กริด หรือของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าเมช

ถ้า $E_m < E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 10

ถ้า $E_m > E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ถ้า $E_s < E_{step}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $E_s > E_{step}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 ปรับปรุงการออกแบบ เมื่อมาถึงขั้นตอนที่ 11 ได้แสดงว่าผู้ออกแบบยังออกแบบระบบต่อลงดินที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ลดระยะห่างของกราวด์กริด (Ground grid) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำ
2. เพิ่มแท่งหลักสายดิน (Ground rods) เพื่อเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำ
3. ลดกระแสฟอลต์ เพื่อเป็นการลดกระแสกริด
4. ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสฟอลต์ เพื่อให้มนุษย์ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น
5. ใช้วัสดุบุบฉนวนดินที่มีค่าความต้านจำเพาะมากขึ้นกว่าเดิม

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด กล่าวคือ การออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่า การออกแบบระบบกราวด์กริดที่ได้ดำเนินการมานั้นปลอดภัย จากนั้นจะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือกราวด์กริด การเชื่อมต่อตัวนำเข้าไปยังตู้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดินซึ่งต้องควบคุมไว้กับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.1 ค่าแนะนำทั่วไปของรอกสายดิน

การออกแบบระบบรอกสายดินของสถานีไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 สิ่งที่จะบ่งบอกถึงระบบรอกสายดินที่มีความเหมาะสมจะต้องประกอบไปด้วยสภาพของพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานของดินต่ำ ซึ่งจะทำให้การติดตั้งกราวด์กริดมีต้นทุนที่ต่ำลง ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้านั้นๆ ก็จะมีความปลอดภัยมากขึ้นด้วย ซึ่งการออกแบบระบบรอกสายดินของสถานีไฟฟ้าให้เกิดความปลอดภัยตามมาตรฐาน จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้ [2]

$$GPR \leq GPR_s \quad (1)$$

$$R_g \leq R_{gs} \quad (2)$$

$$E_s \leq E_{step70} \quad (3)$$

$$E_t \leq E_{touch70} \quad (4)$$

โดยที่

GPR คือ ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนรอกสายดิน เทียบกับจุดดินระยะไกล (remote earth)

R_g คือ ความต้านทานรอกสายดิน

E_s คือ แรงดันช่วงก้าว

E_{step70} คือ ขีดจำกัดแรงดันช่วงก้าวสำหรับคน น้ำหนัก 70 กิโลกรัมทนได้

E_t คือ แรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในช่องตาข่าย (Mesh)

$E_{touch70}$ คือ ขีดจำกัดแรงดันสัมผัสสำหรับคน น้ำหนัก 70 กิโลกรัมทนได้

ในการก่อสร้างระบบรอกสายดินจะต้องมีต้นทุนในการก่อสร้างที่ต่ำที่สุด ซึ่งต้นทุนต่างๆอาจประกอบด้วย [5], ต้นทุนตัวนำที่ใช้ทำรอกสายดิน, ต้นทุนในการติดตั้งรอกสายดิน, ต้นทุนในการขุด-ถม ร่องดินเพื่อวางรอกสายดิน, ต้นทุนในการเชื่อมด้วยความร้อนที่จุดตัดของรอกสายดิน, ต้นทุนวัสดุคลุมผิว, ต้นทุนในการติดตั้งวัสดุคลุมผิว ความสัมพันธ์ของต้นทุนที่ใช้ในการก่อสร้างระบบรอกสายดินดังสมการที่ (9)

2.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ [6]

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาเขตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อมๆ กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหา เรียกว่า เขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ เป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายวัตถุประสงค์ ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ และตัวแปรตัดสินใจ เขียนอยู่ในรูปทั่วไปดังสมการที่ (5)

$$\text{Min (or Max): } \{f_1(x), \dots, f_m(x)\} \quad (5)$$

โดยที่

x คือ เวกเตอร์การตัดสินใจ

$f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$

โดยทั่วไปรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายวัตถุประสงค์ มี 3 รูปแบบ ที่เป็นไปได้ ดังนี้

- 1) ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่าตอบที่น้อยที่สุด
- 2) ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่าตอบที่มากที่สุด
- 3) แบบขัดแย้งกัน คือบางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่าตอบที่น้อยที่สุด บางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่าตอบที่มากที่สุด

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบรอกสายดินในบทความนี้เป็นการหาค่าตอบที่น้อยที่สุด จากสมการที่ (6) ซึ่งการค้นหาคำตอบจะถูกกำหนดจากเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ ภายใต้ข้อจำกัดที่จะเป็นสิ่งที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตที่น้อยที่สุด

$$\text{Min : } f = \{f_1(x), \dots, f_m(x)\} \quad (6)$$

เงื่อนไข

$$g_i(x) \leq 0; i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$h_i(x) \leq 0; i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

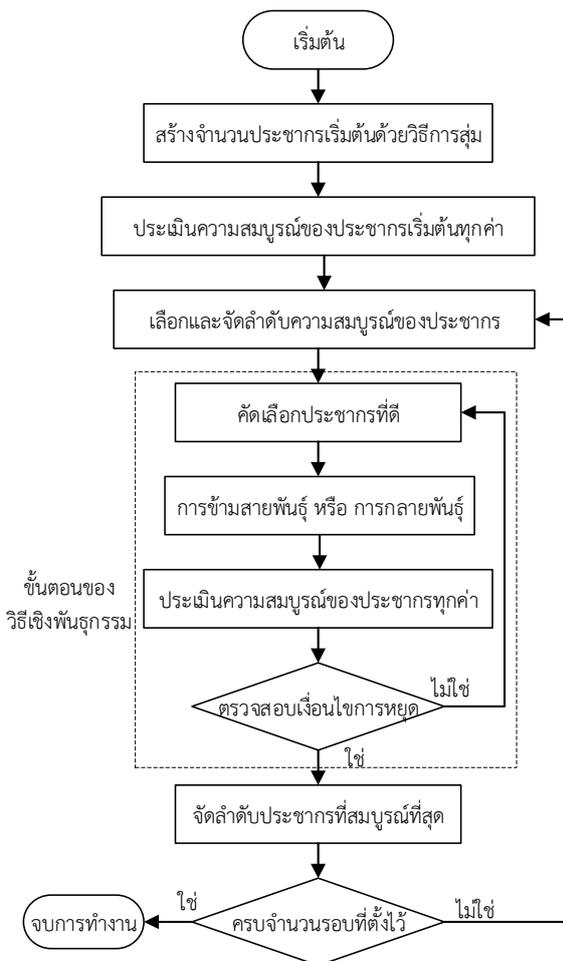
เมื่อ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบ

$f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i

$g_i(x)$ คือ เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ i

$h_i(x)$ คือ เงื่อนไขบังคับแบบสมการ i

วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) รายงานการใช้ครั้งแรกโดย K. Deb และคณะ [7], พวกเขาแสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริธึมนี้โดดเด่นด้วยวิธีการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำได้อย่างรวดเร็ว แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II ดังรูปที่ 2 [8], ส่วนขั้นตอนโดยละเอียดของ NSGA-II สำหรับรายละเอียดในเชิงลึกดูที่ [7]



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ [8]

3. การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลายฟังก์ชัน วัตถุประสงค์แก้ปัญหาการออกแบบระบบบรากสายดิน

ข้อมูลในการออกแบบระบบบรากดินในบทความนี้เป็นข้อมูลการออกแบบระบบบรากสายดินของสถานีไฟฟ้าย่อยอำเภอเกษตรสมบูรณ์ (ชั่วคราว) จังหวัดชัยภูมิ ขนาดพื้นที่กว้าง x ยาว เท่ากับ 33×36 เมตร ออกแบบที่ค่ากระแสลัดวงจร 8,000 แอมแปร์ ความต้านทานดิน $\rho = 50$ โอห์ม. เมตร ความต้านทานจำเพาะของวัสดุคลุมผิว $\rho_s = 3000$ โอห์ม.เมตร ช่วงเวลาที่เกิดการลัดวงจร $t_f = 0.5$ วินาที ช่วงข้อมูลของตัวแปร ($N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s$) ที่ใช้ในการพิจารณารวมถึงต้นทุนที่ใช้คำนวณในการออกแบบดังนี้

$$N_x, N_y \in [4, 20] \quad d_c, d_r \in [A_{\min}, 0.015](m)$$

$$h \in [0.2, 2.5](m) \quad N_r \in [5, 30]$$

$$L_r \in [5, 30](m) \quad h_s \in [0.01, 0.5](m)$$

A_{\min} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้นต่ำที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบบรากสายดิน

$$f_1(x) = \begin{pmatrix} (C_{1mat_dc} + C_{1inst} + C_{2exc} \cdot h \cdot e_{trch}) \\ + (C_{3mat_dr} + C_{3inst}) \cdot [N_r \cdot L_r] \\ + (C_{4mat_dr} + C_{4inst}) \cdot [N_x \cdot L_y \cdot h_s] \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$f_2(x) = E_{touch50} + E_t \quad (10)$$

$$Constrains : E_{touch50} - E_t \geq 0 \quad (11)$$

$$f_3(x) = E_{step50} + E_s \quad (12)$$

$$Constrains : E_{step50} - E_s \geq 0 \quad (13)$$

โดยที่

C_{1mat_dc}, C_{1inst} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุน ตัวนำ, การติดตั้งที่ใช้ทำตาข่ายบรากดิน

C_{2exc} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุนการขุด-ถมร่องวางตาข่ายบรากดิน

C_{3mat_dr}, C_{3inst} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุน ตัวนำ, การติดตั้งแท่งบรากดิน (แนวตั้ง)

C_{4mat}, C_{4inst} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุน วัสดุ, การติดตั้งวัสดุคลุมผิว

- d_c, d_r คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำที่ใช้ทำตาข่าย, แ่งรอกดิน (m)
- h คือ ความลึกของการขุดรอกดินว่างตาข่าย รอกดิน (m)
- e_{trch} คือ ความกว้างของการขุดรอกดินว่างตาข่าย รอกดิน ($1 m$)
- h_s คือ ความหนาของชั้นวัสดุคลุมผิว (m)
- N_x, N_y คือ จำนวนของช่องตาข่ายตามแนวแกน x, y
- L_x, L_y คือ ความยาวของช่องตาข่ายตามแนวแกน x, y
- N_r คือ จำนวนของแ่งรอกดิน
- L_r คือ ความยาวของแ่งรอกดิน (m)

ปัญหาการออกแบบระบบบรากสายดินโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Object: NSGA-II) มีวัตถุประสงค์หลักสามวัตถุประสงค์ ผลของการออกแบบพบว่าวัตถุประสงค์หลักทั้ง 3 วัตถุประสงค์ มีทิศทางที่ขัดแย้งกันกล่าวคือหากเลือกต้นทุนที่ต่ำจะทำให้ค่าความปลอดภัยลดลง ในขณะที่หากต้องการความปลอดภัยที่สูงก็จะทำให้ต้นทุนสูง ซึ่งเป็นลักษณะของการที่ต้องเลือกคือได้อย่างต้องเสียอย่าง (Trade-off) ดังนั้นวิธีการเลือกคำตอบที่ปะปนปะนอมจึงเป็นการดีของทั้งสามวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการที่ใช้เลือกคำตอบในการออกแบบครั้งนี้ใช้หลักการ ของ ฟัชชี่ลอจิก โดยการกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ให้กับคำตอบทุกค่าที่ได้ ดังสมการที่ (14) แล้วคัดเลือกคำตอบจากชุดคำตอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่ดีที่สุด

$$\mu_{ij} = \frac{\text{Max}(f_i) - x_{ij}}{\text{Max}(f_i) - \text{Min}(f_i)} \quad (14)$$

โดยที่

- μ_{ij} คือ ค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ของแต่ละชุดคำตอบที่ได้จากการออกแบบ
- i คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ $i = 1, 2, 3$
- j คือ ผลของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้จาก NSGA-II $j=1, 2, 3, \dots, N_{pop}$

ค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ของแต่ละชุดคำตอบของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากสมการที่ (9) มีค่าระหว่าง 0 - 1 ถ้าค่าความเป็นสมาชิก เท่ากับ 1 แสดงว่าเป็นชุดคำตอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่ดีที่สุด ถ้าค่าความเป็นสมาชิก เท่ากับ 0 แสดงว่าเป็นชุดคำตอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่แย่ที่สุด แล้วทำการแปลผลหาค่าคำตอบที่ต้องได้จากการออกแบบตามสมการที่ (15)

$$\text{normalize} = \left\{ \max \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{N_{pop}} \mu_{ij}}{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_{pop}} \mu_{ij}} \right\} \right\} \quad (15)$$

4. ผลการออกแบบระบบบรากสายดิน

ตารางที่ 1 ผลของการออกแบบระบบบรากสายดิน สถานีไฟฟ้าย่อยอำเภอเกษตรสมบูรณ์(ชั่วคราว) จังหวัดชัยภูมิ

Parameter	Solution		
	GA	PSO	NSGA-II
	$N_{pop}^I=50$	$SW^{II}=100$	$N_{pop}=50$
	$N_{gen}^{II}=200$	-	$N_{gen}=200$
N_x	8	9	9
N_y	9	10	5
d_c	0.0093	0.0067	0.0066
h	0.6719	1.257	0.4075
N_r	38	40	11
L_r	6	6	3
d_r	0.0065	0.0063	0.0060
h_s	0.14	0.13	0.1
Cost	631,711	594,641	528,389
E_{touch}	668.35	660.40	618.04
E_m	668.344	660.36	617.57
E_{step}	2,224.11	2192.35	2,022.89
E_s	368.035	217.70	578.90

^I N_{pop} คือ จำนวนประชากรที่ใช้ในการสุ่ม

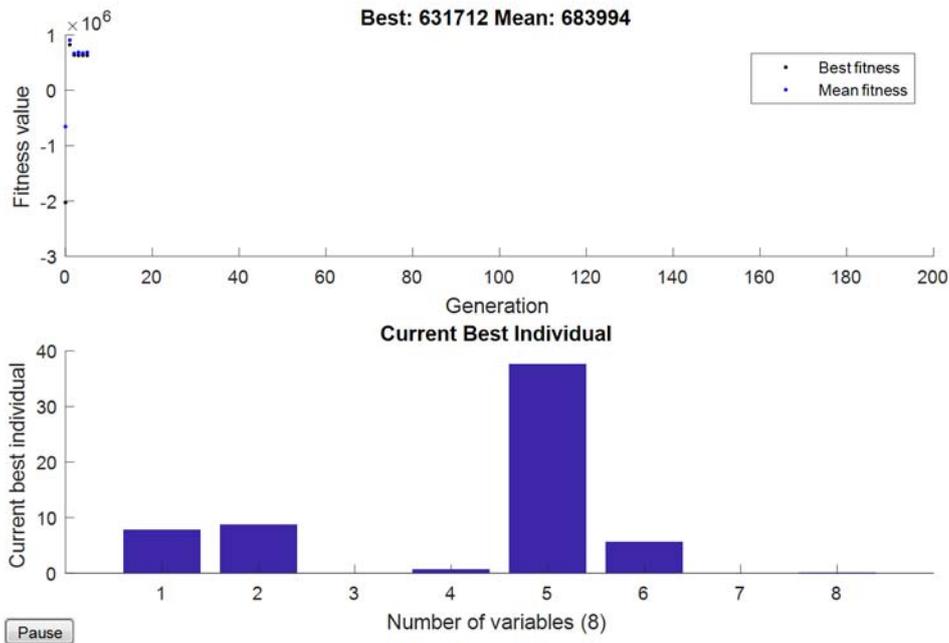
^{II} N_{gen} คือ ประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดจากการไขว้เปลี่ยน หรือการกลายพันธุ์

^{III} SW คือ Swarm Size

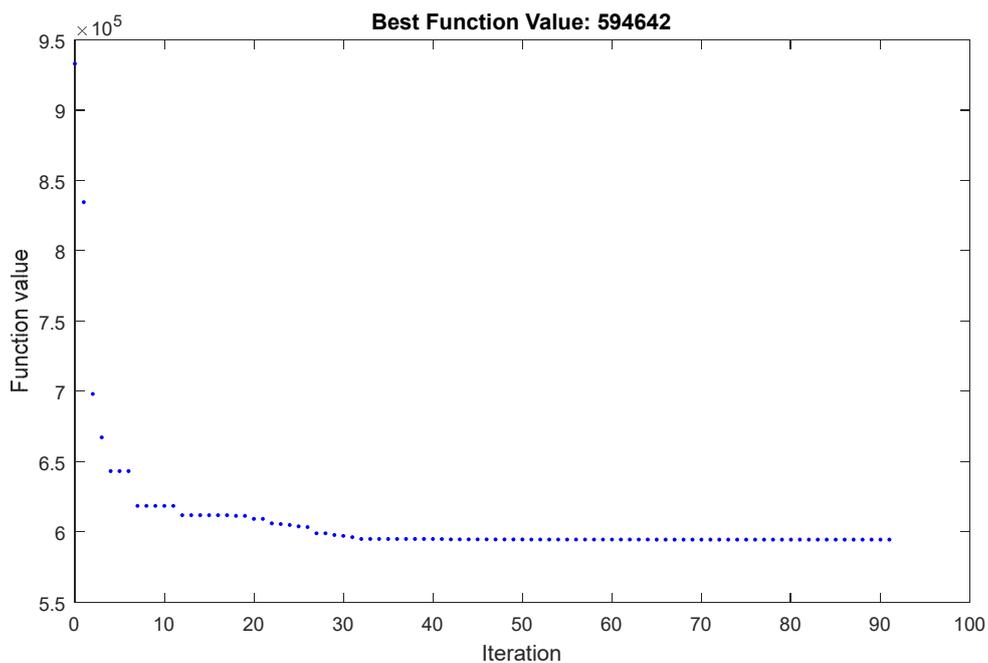
ผลของการออกแบบระบบบรากสายดินตามตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบบรากสายดินด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA), วิธีการหาค่าที่เหมาะสมฝูงอนุภาค (PSO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-II) โดยมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการคือได้ระบบบรากสายดินของสถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัยและต้นทุนในการก่อสร้างที่ราคาถูก จะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบ

ด้วย GA และ PSO จะได้ค่าความปลอดภัยที่ใกล้เคียงกัน คือ แรงดันสัมผัส (E_{touch}) เท่ากับ 668.35 และ 660.40 โวลต์ แรงดันช่วงก้าว (E_{step}) เท่ากับ 2,224.41 และ 2,192.35 โวลต์ ต้นทุนในการก่อสร้าง 631,711 และ 594,641 บาท ตามลำดับ วิธีการออกแบบด้วย NSGA-II ได้ต้นทุนในการก่อสร้าง 528,389 บาท แรงดันสัมผัส (E_{touch}) 618.04 โวลต์

แรงดันช่วงก้าว (E_{step}) 2,022.89 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบระบบบรากสายดินกับวิธี GA และ PSO แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบระบบบรากสายดิน มีความปลอดภัยทั้ง 3 วิธี และ NSGA-II ให้ต้นทุนในการก่อสร้างที่ถูกกว่า ทั้งนี้ผลของการออกแบบระบบบรากสายดินแสดงได้ดังรูปที่ 3-5

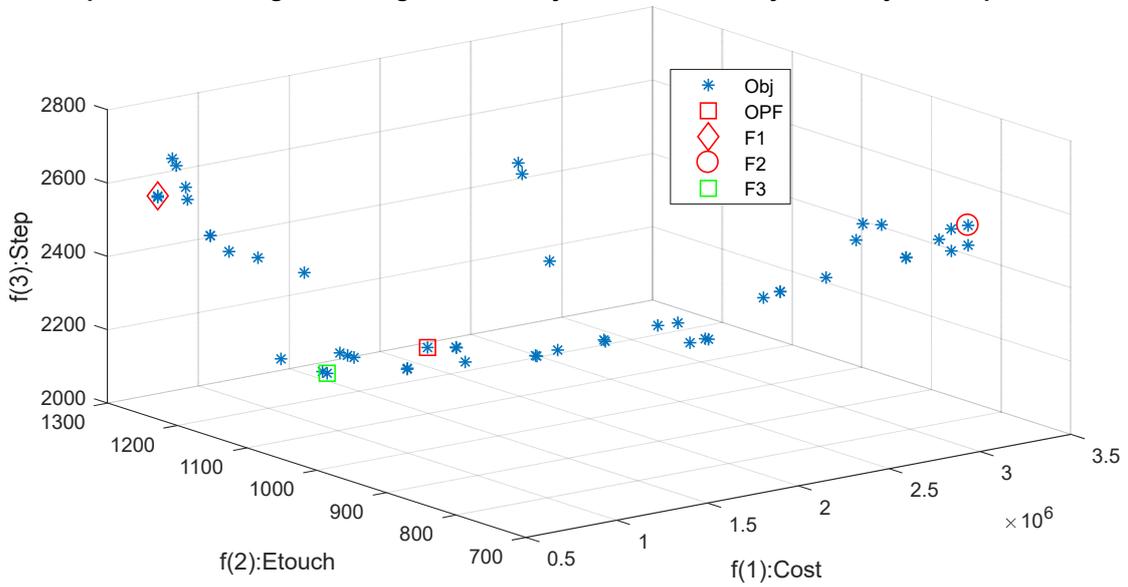


รูปที่ 3 ผลของการออกแบบระบบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)

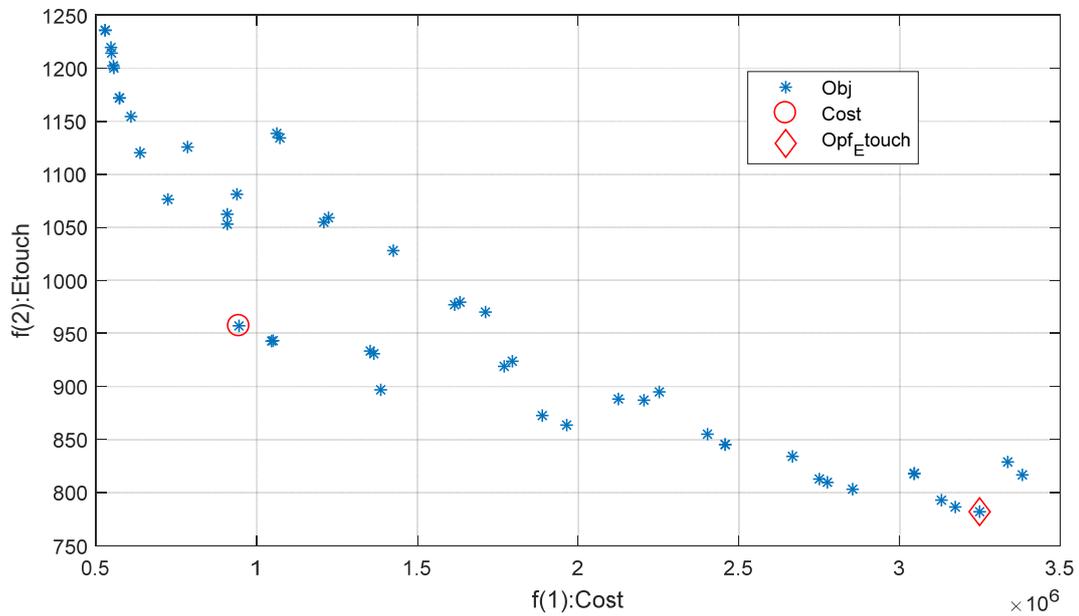


รูปที่ 4 ผลของการออกแบบระบบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (PSO)

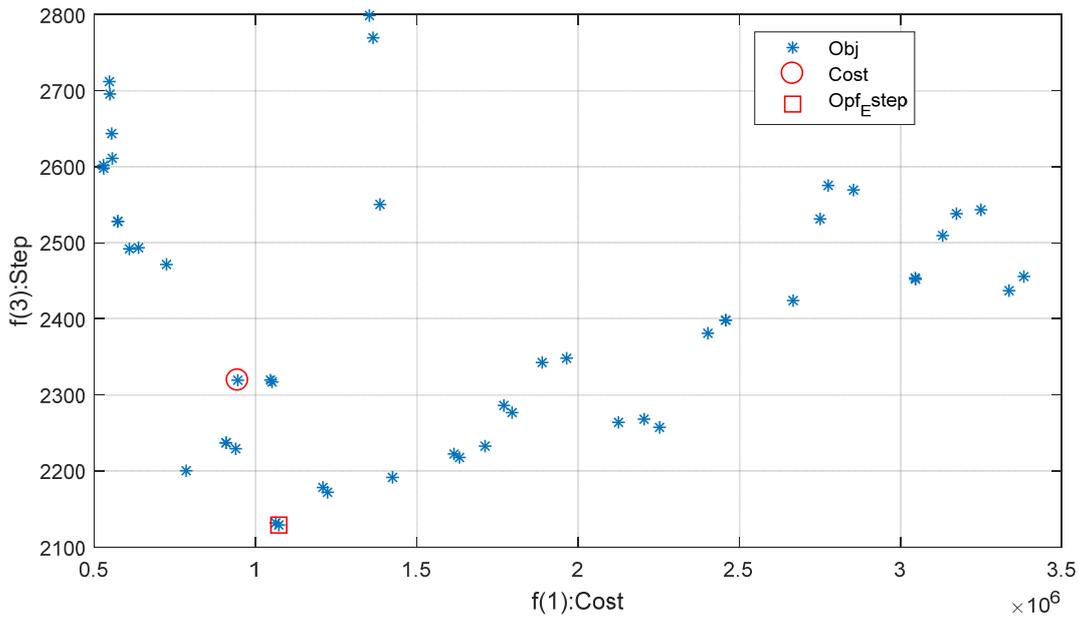
Optimal Grounding Grid Design in Power System Substation by Multi-Objective Optimization



รูปที่ 5 ผลของการออกแบบระบบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (NSGA-II)



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลของการออกแบบระบบบรากดินด้วย NSGA-II ระหว่างต้นทุนในการออกแบบ ความปลอดภัยด้านสัมผัส



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของการออกแบบระบบรากดินด้วย NSGA-II ระหว่างต้นทุนในการออกแบบ ความปลอดภัยดินช่วงก้าว

จากผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ตามรูปที่ 3 รูปบนเป็นผลของการออกแบบรากสายดิน แกน X คือจำนวนของการออกแบบ (Iteration) แกน Y คือค่าตอบของการออกแบบรากสายดินในแต่ละรอบการออกแบบ (Fitness Value) รูปล่างเป็นกราฟแห่งของค่าตอบที่ดีที่สุดของการออกแบบ แกน Y คือค่าช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษาทั้ง 8 ตัวแปร ($N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s$) แกน X ตัวแปรทั้ง 8 ตัว ($1 = N_x, 2 = N_y, 3 = d_c, 4 = h, 5 = N_r, 6 = L_r, 7 = d_r, 8 = h_s$)

รูปที่ 4 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (PSO) แกน X คือจำนวนของการออกแบบ (Iteration) แกน Y คือค่าตอบของการออกแบบรากสายดินในแต่ละรอบการออกแบบ (Fitness Value) จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าการออกแบบเข้าสู่ค่าตอบที่ดีที่สุด และค่า gbest จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 5 ครั้ง เริ่มต้นจาก 6.4×10^5 ครั้งที่สอง 6.2×10^5 และครั้งสุดท้ายที่ 5.9×10^5 ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 32

รูปที่ 5 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (NSGA-II) เป็นลักษณะกราฟ 3 แกน โดยที่ประกอบด้วยผลของการออกแบบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ ต้นทุนในการ

ออกแบบ (f(1) Cost) แรงดันสัมผัส (f(2) Etouch) แรงดันช่วงก้าว (f(3) Estep)

รูปที่ 6 และรูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (NSGA-II) ระหว่างต้นทุนในการออกแบบ ความปลอดภัยสัมผัส และความปลอดภัยจากแรงดันช่วงก้าว จะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการความปลอดภัยสูงสุดก็จะทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างนั้นสูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นลักษณะของการที่ต้องเลือกคือได้อย่างต้องเสียอย่าง (Trade-off) ดังนั้นวิธีการเลือกคำตอบที่ปะนีปะนอมจึงเป็นการดีของทั้งสามวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการที่ใช้เลือกคำตอบในการออกแบบดังกล่าวที่ (14) จุดที่เหมาะสมคือตำแหน่ง OPF แสดงตามรูปที่ 5 และค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 1

5. สรุป

จากการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์มาประยุกต์แก้ปัญหาการออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้า พบว่าวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาการออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดี และสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ในการประมาณราคาการก่อสร้างระบบรากสายดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่เกิดความปลอดภัยตามที่มาตรฐานกำหนด และมีต้นทุนในการก่อสร้างที่ประหยัด



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmed Z. Author, "Optimal Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm Technique," in World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic, and Communication Engineering, Vol:10, No:7, 2016
- [2] Lee and Shen, "Optimal Planning of Ground Grid Based on Particle Swam Algorithm," World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic, and Communication Engineering, Vol:3, No:12, 2009
- [3] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," in ANSI/IEEE Std. 80 (Revision of IEEE Std 80-1986), New York 2000.
- [4] พงศ์พันธ์ ปริยวงศ์, "หลักการระบบสายดินและการประยุกต์ใช้งาน," สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2556.Thai.
- [5] B.Alik, M.Teguar, and B.Mekhaldi, "Minimization of Grounding System Cost Using PSO, GAO, and HPSGAO Techniques," in IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 30, No. 6, 2015.
- [6] ภรณ์ยา อามฤตรัตน์, และพยุ่ง มีสัจ, "การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีด้านวิวัฒนาการ," วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศลาดกระบัง, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2555
- [7] K.Deb Author, "A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Trans., Evol. Comput. 6 (2) (2002) 182–197.
- [8] Y.Chang Author, "Multi-objective optimization for rapid and robust optimal oilfield development under geological uncertainty," <https://www.researchgate.net/publication/283129353>