

การออกแบบระบบต่อลงดินโดยใช้เทคนิคการออกแบบตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้โปรแกรม MATLAB

จิรพันธ์ บั้นประไพ¹ และ สมชาติ จิรวิภากร²

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

รับเมื่อ 21 ธันวาคม 2547 ตอรับเมื่อ 27 พฤษภาคม 2548

บทคัดย่อ

จากการศึกษาวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินแบบต่างๆ ไปตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1] ซึ่งเป็นวิธีออกแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น เมื่อพิจารณาตามหลักเศรษฐศาสตร์ พบว่าการออกแบบที่ได้นั้นใช้จำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม ทำให้ระบบต่อลงดินที่ปลอดภัยดังกล่าวใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่มากเกินไปจนความจำเป็น ส่งผลต่อต้นทุนการสร้างที่สูงตามไปด้วย แม้ว่าผู้ออกแบบจะทราบปัญหาดี และพยายามลดปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการลองลดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัย แล้วทำการคำนวณออกแบบใหม่ เพื่อที่จะได้ระบบต่อลงดินที่ประหยัดและปลอดภัย แต่การออกแบบยังคงทำในลักษณะลองผิดลองถูกทำซ้ำหลายครั้ง จึงทำให้การออกแบบยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นบทความนี้นำเสนอโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวถูกสร้างขึ้นและพัฒนามาโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรมการออกแบบนี้สามารถเลือกวิธีการออกแบบแบบต่างๆ ไป (conventional design method) และยังสามารถเลือกวิธีการออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม (optimal design method) [2] ได้ เพื่อประหยัดตัวนำไฟฟ้า

บทความนี้แสดงวิธีการใช้งานโปรแกรม แสดงผลลัพธ์การออกแบบทั้งสองวิธี จากนั้นนำผลลัพธ์การออกแบบที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าวิธีการออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสามารถลดปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าได้มากถึงร้อยละ 11.83 อีกทั้งยังลดเวลาการออกแบบจากวิธีเดิมลงอย่างมาก และโปรแกรมสามารถพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล (hard copy) ได้ นอกจากนี้บทความนี้ยังได้นำเสนอทฤษฎี วิธีการออกแบบ รวมทั้งพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความปลอดภัย โดยจะพิจารณาจากเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์ทนได้ รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าทั้งสอง เช่น ขนาดและจำนวนตัวนำไฟฟ้า รูปร่างของตะแกรง กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ตะแกรง ค่าความต้านทานดิน และอื่นๆ โดยโปรแกรมนี้สามารถจำลองการออกแบบเพื่อทดลองปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ เพื่อการเรียนรู้และศึกษาว่าปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนนั้นส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (mesh voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (step voltage) ในทิศทางอย่างไร

คำสำคัญ : Optimal Grounding Design / Grounding / Substation Design / Substation Grounding

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

Optimal Grounding System Design Technique for Substation by Using MATLAB Program

Jirapan Panprapai¹ and Somchat Jiriwibhakorn²

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10250

Received 21 December 2004 ; accepted 27 May 2005

Abstract

When using economical principle to consider widely accepted the conventional method based on the requirement of IEEE Std.80-2000 [1], many disadvantages have been found namely the designed grounding system use too many conductors. This directly affects the cost of construction, which is very high. Although the designer recognizes this problem and try to reduce conductors in order to get the optimal design by decreasing factors influence safety and recalculating in order to get the most valuable and safe grounding system design, however, the design is trial and error and it is a numerical analysis method. Therefore, designing is complicated and complex. As a result, this article presents an effective grounding system design program for substation. This program was created and developed by MATLAB program. Using this program you can choose conventional design method or optimal design method [2] to reduce the number of conductors and ensure the safety of substation.

This article also presents the instruction and results of such program for both two methods. Afterward the comparison of two results will be presented, which found that the optimal design method was able to reduce conductors for up to 11.83%. In addition, it reduces designing time much more than the original method and the program is able to print out the hard copy as well. In addition to article, theory and methods of safety design and effecting factors of grounding system design are studied. Maximum touch & step voltage criteria are discussed. The program can vary value of various factors for study that how effect to these voltages and program is simply designed for using, can interface with designer by GUI, and produces results of design and using a little time for design which is the advantages of this program.

Keywords : Optimal Grounding Design / Grounding / Substation Design / Substation Grounding

¹ Graduate Student, Department of Electrical Engineering.

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering.

1. บทนำ

ความปลอดภัยของการออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1] ถูกใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบต่อลงดินกันอย่างแพร่หลายนั้น มีหลักเกณฑ์พิจารณาความปลอดภัยจากเกณฑ์แรงดันไฟฟ้า 2 ประเภท คือ เกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (touch voltage criteria) และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (step voltage criteria) โดยถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าแตะแกรงและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวจากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าทั้งสองถือว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบได้นั้นปลอดภัย (safe) ในทางกลับกัน ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าแตะแกรงและค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวจากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าทั้งสอง จะถือว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบนั้นไม่ปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องกลับไปปรับเปลี่ยนปริมาณของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบของระบบต่อลงดิน เช่น เพิ่มจำนวนตัวนำไฟฟ้าในแนวระนาบและแนวตั้งให้มากขึ้น แล้วเริ่มกระบวนการการคำนวณและเปรียบเทียบใหม่อีกครั้งหนึ่ง ตัวแปรหนึ่งที่พบย่อยๆ ว่าผู้ออกแบบมักจะปรับให้มีค่ามากขึ้น นั่นคือปริมาณหรือจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าทั้งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งและตัวนำไฟฟ้าแนวราบ แต่การเพิ่มจำนวนตัวนำไฟฟ้าให้มากขึ้นได้ พบว่าระบบต่อลงดินที่ออกแบบนั้นจะยิ่งมีความปลอดภัยมากขึ้น แต่ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาผลจากการเพิ่มปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าตามหลักเศรษฐศาสตร์ด้วยการออกแบบระบบต่อลงดินที่ให้ผลที่ปลอดภัยนั้น มีการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าในปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็นหรือไม่ เพราะระบบต่อลงดินที่ติดตั้งนั้นควรจะมีความปลอดภัย ในขณะที่เดียวกันก็ควรจะมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำที่สุดด้วย ซึ่งบ่อยครั้งพบว่าผู้ออกแบบจะต้องทำการคำนวณออกแบบในลักษณะลองผิดลองถูก (trial and error) หลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ปลอดภัยและใช้ปริมาณแท่งตัวนำไฟฟ้าที่พอเหมาะด้วย จากแนวคิดและปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อต้องการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการออกแบบ ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอในด้านการสร้างโปรแกรมการออกแบบเพื่อให้สามารถออกแบบระบบต่อลงดินด้วยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ (optimal grounding system design) [2] นอกจากการออกแบบโดยวิธีต่างๆ ไป [1] เพื่อให้การออกแบบนั้นมีทิศทางที่ถูกต้องและสอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการการออกแบบ ซึ่งจะต้องพิจารณาการออกแบบให้ครอบคลุมตามหลักวิศวกรรม หลักเศรษฐศาสตร์ และระยะเวลาการออกแบบ โดยต้องลดลงจากเดิมที่คำนวณและออกแบบในลักษณะลองผิดลองถูกอีกด้วย

2. ทฤษฎีและหลักการออกแบบระบบการต่อลงดิน

ทฤษฎีและหลักการซึ่งถูกนำมาใช้ประยุกต์ในการสร้างโปรแกรมการออกแบบระบบการต่อลงดินจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1] และเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม [2] ดังต่อไปนี้

2.1 หลักการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1]

การออกแบบระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะพิจารณาที่ความปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าเป็นหลัก โดยตัวแปรบ่งชี้ว่าการออกแบบระบบต่อลงดินนั้นมีมาตรฐาน และมีความปลอดภัยอย่างไรนั้น จะพิจารณาจากเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัสและเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (touch and step voltage criteria: E_{touch} , E_{step}) [1] ซึ่งคำนวณได้จากสูตรคำนวณตามมาตรฐานของการออกแบบ และนำค่าของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองมาใช้เป็นเกณฑ์ความปลอดภัย เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าแตะแกรง (mesh voltage: E_{m}) และ

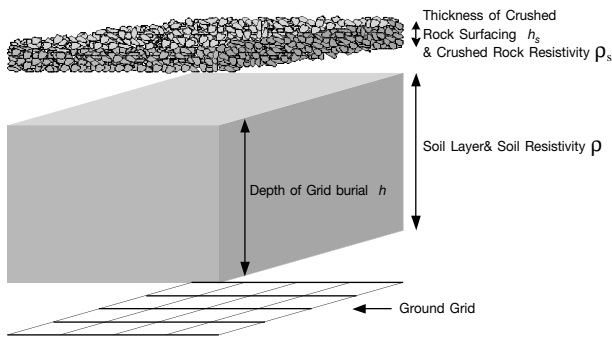
ค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (step voltage: E_s) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าทั้งสอง (E_m , E_s) จะเป็นค่าที่คำนวณได้จากการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยแรงดันไฟฟ้าทั้งสองจะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบต่อลงดินว่ามีจำนวนและขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้า รูปร่างของตะแกรงต่อลงดิน และความถี่ของช่องตะแกรงเป็นอย่างไร ซึ่งการออกแบบระบบต่อลงดินที่ตื้นนั้นจะต้องมีค่าความต้านทานของตะแกรงต่อลงดินที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติ (fault Current) นั้นสามารถกระจายลงดินได้ดี และยังสามารถลดแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ได้อีกด้วย ซึ่งค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุดของระบบต่อลงดินจะแปรผกผันกับจำนวนพื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่นำมาใช้ทำระบบต่อลงดิน นอกจากนั้นการลดค่าความต้านทานจำเพาะของดินก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้การไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติสามารถกระจายลงสู่ดินได้ดีขึ้น ซึ่งวิธีการทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินลดลง [9] นั้นอยู่นอกขอบเขตของบทความนี้

ในความเป็นจริงตามธรรมชาติเมื่อพิจารณาดินลึกลงไปในแนวตั้งจะพบว่า ดินจะมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความลึก เพราะดินมาจากองค์ประกอบที่มีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่และความลึก ดังนั้นจึงพิจารณาดินให้มีลักษณะเป็นชั้นดิน โดยแยกชั้นตามค่าความต้านทาน ซึ่งจะพบว่าเมื่อแยกชั้นดินตามค่าความต้านทานแล้ว จะเกิดชั้นดินเป็นจำนวนมาก จึงพิจารณาดินลักษณะนี้ว่าเป็นแบบจำลองดินหลายชั้น (multi-layer soil model) กล่าวคือ พิจารณาดินตั้งแต่ดินชั้นที่ 1 (ρ_1) จนถึงดินชั้นที่ n (ρ_n) มาคำนวณออกแบบ ซึ่งการออกแบบโดยพิจารณาดินในลักษณะดังกล่าวค่อนข้างสร้างความยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบจริง เพราะต้องคำนวณโดยวิธี Numerical Method มาร่วมด้วย ดังนั้นเพื่อความง่ายและเหมาะกับการใช้ในการออกแบบจริงในทางปฏิบัติ จึงพิจารณาดินแค่เพียงชั้นเดียว คือ พิจารณาดินที่มีค่าความต้านทานหลายๆ ค่าให้เป็นเพียงค่าๆ เดียว โดยการใช้มิเตอร์วัดและเฉลี่ยค่าความต้านทาน [1] ซึ่งเรียกดินลักษณะดังกล่าวว่า ดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอ (uniform soil) แล้วนำมาคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ก็ยังเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณา [1] จะพบว่าเป็นการพิจารณาดินเพียงชั้นเดียว คือ ชั้นดินที่มีการกระจายค่าความต้านทานสม่ำเสมอที่มีค่าความต้านทานจำเพาะเป็น ρ และปูด้วยวัสดุโรยผิวดิน (crushed rock layer) ที่มีค่าความต้านทานเป็น ρ_g เพื่อต้องการให้เกณฑ์แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์ทนได้นั้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยลักษณะของตะแกรงต่อลงดินและชั้นดินแสดงดังรูปที่ 1

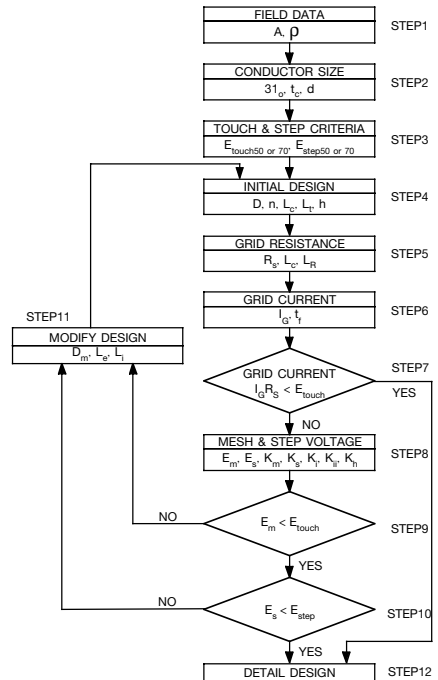
ขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1]

ลำดับขั้นตอนการออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1] ซึ่งแสดงตามแผนภูมิ ดังรูปที่ 2 [1] มีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1** สำรวจพื้นที่เพื่อให้ได้ข้อมูลมาเพื่อใช้ในการคำนวณในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป
- ขั้นตอนที่ 2** คำนวณหาขนาดตัวนำไฟฟ้าสำหรับนำมาทำระบบต่อลงดิน
- ขั้นตอนที่ 3** คำนวณหาเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) และเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_{step}) สูงสุดที่มนุษย์ทนได้
- ขั้นตอนที่ 4** การออกแบบเบื้องต้น (initial design)
- ขั้นตอนที่ 5** คำนวณหาค่าความต้านทานตะแกรงต่อลงดิน (resistance of grounding system: R_g)
- ขั้นตอนที่ 6** คำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ตะแกรงสูงสุด (maximum grid current: I_g)



รูปที่ 1 ชั้นดินและค่าความต้านทาน [1]



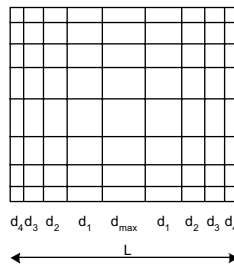
รูปที่ 2 แผนภูมิการออกแบบ [1]

- ขั้นตอนที่ 7** คำนวณหาค่า ground potential rise (GPR) ถ้ามีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) ในขั้นตอนที่ 3 ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 12
- ขั้นตอนที่ 8** คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องพิจารณาถึงลักษณะรูปร่างของตะแกรงหรือของพื้นที่
- ขั้นตอนที่ 9** เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรง (E_m) ที่ได้คำนวณในขั้นตอนที่ 8 กับค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) ในขั้นตอนที่ 3 โดยถ้า $E_m < E_{touch}$ ให้ทำในขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวไม่เป็นจริงให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 11
- ขั้นตอนที่ 10** เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ที่ได้คำนวณในขั้นตอนที่ 8 กับค่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวในขั้นตอนที่ 3 โดยถ้า $E_s < E_{step}$ ให้ทำในขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวไม่เป็นจริงให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 11
- ขั้นตอนที่ 11** ปรับปรุงการออกแบบ เช่น เพิ่มปริมาณตัวนำไฟฟ้าที่ใช้ในระบบให้มากขึ้น ลดระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าหรือช่องตะแกรงให้น้อยลงเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดิน (gradient voltage) หรืออาจจะเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวดิ่ง (ground rod) ก็ได้ จากนั้นก็กลับไปสู่ขั้นตอนที่ 1 ใหม่เพื่อเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบหาความปลอดภัยอีกครั้ง
- ขั้นตอนที่ 12** ออกแบบในรายละเอียด กล่าวคือ การออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่าการออกแบบระบบต่อลงดินที่ได้กระทำมานั้นปลอดภัย จากนั้นจะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือตะแกรงต่อลงดิน การต่อเชื่อมสายดินเข้าไปยังตู้ควบคุมไฟฟ้าหรือลานไกวไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดิน ซึ่งจะต้องทำควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.2 หลักการออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

จากการพิจารณาการค้นคว้าวิจัยของ [2] พบว่าเป็นการศึกษาแบบจำลองดินสองชั้น (double layer soil model) โดยแยกพิจารณาเป็นดินชั้นบน (upper-layer soil) และดินชั้นล่าง (bottom-layer soil) ดังนั้นถ้าต้องการนำผลการค้นคว้าวิจัยของ [2] มาประยุกต์ใช้ให้เป็นแบบจำลองดินชั้นเดียวนั้นสามารถทำได้โดยการพิจารณาสมการ $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ โดยสมการนี้เป็นสมการเฉพาะสำหรับดินชั้นบนและดินชั้นล่าง จากนั้นกำหนดให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นล่าง (ρ_2) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (ρ_1) เพราะไม่พิจารณาดินแยกชั้นกัน ดังนั้นค่าความต้านทานจำเพาะของดินจึงมีเพียงค่าเดียว ทำให้ K มีค่าเป็นศูนย์ **ดังนั้นจึงพิจารณาที่ K มีค่าเป็นศูนย์** พิจารณากราฟรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ของ [2]

การออกแบบมีหลักการตรงที่ลดการใช้จำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าลงจากวิธีการเดิม [1] แล้วใช้เทคนิคการจัดระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าหรือระยะช่องตะแกรงให้มีระยะที่แตกต่างกันไป [3] ดังรูปที่ 3 โดยที่ศักยภาพไฟฟ้าที่กระจายบนผิวดินนั้นยังมีค่าที่เท่ากัน ซึ่งต่างจากหลักการเดิม [1] ที่จะกำหนดให้ช่องตะแกรงมีระยะที่เท่ากันหมด โดย Sverak [7] เป็นคนแรกที่เสนอแนวคิดการจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบที่ไม่เท่ากัน Dawalibi และ Mukhedkar [4-6] เคยถกเถียงในเรื่องการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบของตะแกรงต่อลงดินที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3 การจัดตะแกรงต่อลงดินแบบ Exponent Regularity [2]

ก่อนการออกแบบจะต้องกำหนดและพิจารณาการจัดวางแท่งตัวนำไฟฟ้าของตะแกรงต่อลงดินในแนวราบ และจำนวนของแท่งตัวนำไฟฟ้า การจัดวางแท่งตัวนำไฟฟ้าจะใช้หลักการจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวราบที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเรียกว่า Unequal Span Arrangement [3] ซึ่งเป็นการจัดแท่งตัวนำไฟฟ้าเป็นแบบ Exponent Regularity คือ เป็นการจัดตะแกรงให้ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำมีค่าลดลงเรื่อยๆ จากตำแหน่งศูนย์กลางตะแกรงมายังขอบของตะแกรง ดังรูปที่ 3 โดยที่ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตะแกรงต่อลงดิน (d_{max}) ซึ่งเป็นระยะห่างมากที่สุดนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (1) ถ้าจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าเป็นจำนวนคู่ และจากสมการที่ (2) ถ้าจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้าเป็นจำนวนคี่ ถัดจากช่องตะแกรงตรงกลางมาทางด้านซ้ายและทางด้านขวา จะกำหนดให้เป็นระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ (d_n) จนสุดความยาวของพื้นที่ที่ใช้สร้างระบบต่อลงดิน (L) ดังรูปที่ 3 โดยระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ (d_n) หาได้จากสมการที่ (3)

เมื่อ N เป็นจำนวนคู่

$$d_{\max} = \frac{L(1-C)}{1+C - 2C^{(N/2+1)}} \quad (1)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนคี่

$$d_{\max} = \frac{L(1-C)}{2(1 - C^{(N-1)/2})} \quad (2)$$

เมื่อแท่งตัวนำไฟฟ้าได้จัดในรูปแบบของ Exponent Regularity ดังนั้นระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จากจุดศูนย์กลางของตะแกรง คือ

$$d_n = d_{\max} C^n \quad (3)$$

เมื่อ C คือ อัตราส่วนการบีบ (The Compression Ratio)

สำหรับพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่าระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตะแกรงต่อลงดิน (d_{\max}) และระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ (d_n) ที่คำนวณได้จากความยาวด้านด้านหนึ่งสามารถนำค่าที่ได้ไปจัดระยะห่างแท่งตัวนำไฟฟ้าสำหรับด้านอีกด้านหนึ่งได้ด้วย แต่พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะต้องคำนวณหาอัตราส่วนการบีบระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งศูนย์กลางของตะแกรงต่อลงดิน (d_{\max}) และระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ (d_n) แยกจากกัน เนื่องจากความยาวด้านนั้นมีค่าไม่เท่ากัน

การคำนวณหาอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสม

ในการออกแบบระบบต่อลงดินสังเกตเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณหรือการวัดแรงดันไฟฟ้าภายหลังการออกแบบช่วงก้าวจะมีค่าต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสเสมอ ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินจะพิจารณาเพียงค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มากที่สุดเท่านั้น ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสอยู่ในย่านที่ปลอดภัยแล้ว แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวก็จะอยู่ในย่านที่ปลอดภัยด้วยเช่นกัน

การคำนวณหาอัตราส่วนการบีบที่เหมาะสม (Optimum Compression Ratio: OCR) ถูกนิยามจาก [2-7] คือ อัตราส่วนการบีบ (C) ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่เดียวกันค่าความต้านทานดินจะมีค่าที่ต่ำที่สุดด้วย แต่ค่าของแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวบางทีอาจจะยังไม่ใช่ค่าที่ต่ำที่สุด แต่ก็เข้าใกล้ค่าที่ต่ำที่สุด ซึ่งอย่างไรก็ตามก็ยังคงอยู่ในย่านที่ปลอดภัย [2]

โดย OCR มีความสัมพันธ์กับความหนาของดินชั้นบน (h) และ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflective Coefficient: K) [2] ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{OCR} = a_0 + a_1 \exp(0.0001 h) + a_2 \exp(bh) \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } b = 0.3503 - 9.6311 \exp(-0.03666L)$$

$$\begin{cases} a_0 = a_{01} + a_{02}K + a_{03}K^2 \\ a_1 = a_{11} + a_{12}K + a_{13}K^2 \\ a_2 = a_{21} + a_{22}K \end{cases}$$

ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแทนสมการ (4) จะสัมพันธ์กับความยาวด้านที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการ (4)

Coefficients	L 100 m	100 m < L 175 m	175 m < L 250 m	L > 250 m
a_{01}	0.44	0.38	-0.51	0.32
a_{02}	-77.43	-50.65	-33.81	-15.41
a_{03}	15.63	13.88	18.49	13.42
a_{11}	0.033	0.19	1.15	0.38
a_{12}	76.9	50.21	32.82	15.16
a_{13}	-15.56	-13.83	-18.44	-13.38
a_{21}	-1.167	-0.037	-0.029	-0.022
a_{22}	0.50	0.41	0.34	0.26

ตามสมการที่ (1)-(4) ถ้าผู้ออกแบบทราบความยาวด้านของพื้นที่ที่ใช้สร้างระบบต่อลงดิน และพิจารณาชั้นดินเป็นแบบจำลองดินสองชั้น จากนั้นหาค่า OCR ตามสมการที่ (4) และจัดวางแท่งตัวนำไฟฟ้าตามสมการที่ (1)-(3) จะได้ระบบต่อลงดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยที่ประหยัดตัวนำไฟฟ้าและปลอดภัย [2] แต่ถ้าผู้ออกแบบพิจารณาดินเป็นแบบดินชั้นเดียวค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้จะมีค่าดังนี้ คือ $a_0 = a_{01}$, $a_1 = a_{11}$ และ $a_2 = a_{21}$ เนื่องจากพิจารณาค่า K ให้เป็นศูนย์

3. โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน

ข้อมูลจำเพาะ คุณสมบัติของโปรแกรม และความสามารถของโปรแกรมมีดังนี้

3.1 คุณสมบัติของโปรแกรม

3.1.1 ความต้องการของระบบ

โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินนี้เป็นโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Window 9x หรือ Window XP ซึ่งทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติอย่างน้อยดังนี้

- Pentium, Pentium Pro, Pentium II-IV, Intel Xeon, AMD Athlon หรือ Athlon XP
- Microsoft Windows 98, Windows ME, Windows NT 4.0, Windows 2000 หรือ Windows XP
- 128 MB Ram minimum, 256 MB RAM recommended
- Hard disk 256 MB minimum
- 8 bit graphics adapter and display (for 256 simultaneous colors)

3.1.2 ข้อดีของโปรแกรม MATLAB

1. มีฟังก์ชันคณิตศาสตร์ให้เลือกใช้ในการคำนวณมากมาย และยังสามารถสร้างฟังก์ชันขึ้นมาใช้งานได้
2. อัลกอริทึม (algorithm) พัฒนาได้ง่าย สามารถแก้ไขปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้ง่าย และรวดเร็วกว่าโปรแกรมภาษาอื่นๆ เช่น C, Fortran หรือ Basic เป็นต้น
3. มีโครงสร้างแบบจำลอง (simulink) ซึ่งเป็น package ที่สามารถนำไปสร้างบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้ทดสอบและประเมินผลระบบ Dynamic ต่างๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง
4. ด้านกราฟิก MATLAB สามารถแสดงภาพหรือกราฟ ตั้งแต่สองมิติที่เป็น Rectangular, Polar, Stair และ Bar รวมทั้งภาพสามมิติในรูปแบบพื้นผิว (surface) และระดับสูงต่ำ (contour) ตลอดจนสามารถนำภาพมาต่อกันและเก็บไว้เพื่อที่จะสร้างภาพเคลื่อนไหวได้อีกด้วย
5. ประยุกต์ใช้ในการสร้างรูปแบบ Graphical User Interface (GUI) [10] เพื่อผู้ออกแบบสามารถพัฒนาโปรแกรมให้ปฏิสัมพันธ์กันได้ระหว่างผู้ใช้โปรแกรมกับเครื่องคอมพิวเตอร์

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมการออกแบบ

ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมจะใช้ข้อมูลต่างๆ ไปสำหรับการออกแบบระบบต่อลงดิน [1] เช่น ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาด ค่าความต้านทานดิน ค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้โรยผิวดิน ค่าความลึกของตะแกรงที่ฝังดิน ลักษณะพื้นที่ที่ใช้สร้างสถานีไฟฟ้า และอื่นๆ

3.3 ความสามารถการออกแบบของโปรแกรม

- โปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดินสามารถออกแบบพื้นที่ที่มีลักษณะต่างๆ กันได้ 4 ประเภท คือ พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นที่รูปตัวแอล และพื้นที่รูปตัวที
- แบบจำลองดินที่มีค่าความต้านทานดินสม่ำเสมอ คือ ดินชั้นเดียว
- คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร แบบ Single Line to Ground Fault และสามารถกำหนดตำแหน่งลัดวงจรได้ เช่น บัสไฟฟ้าแรงดันสูง หรือ บัสไฟฟ้าแรงดันต่ำ ของหม้อแปลงไฟฟ้า
- เลือกโหมดวิธีการออกแบบได้ 2 วิธี
 1. วิธีการออกแบบแบบทั่วไป
 2. วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินให้เหมาะสม
- เรียกดูค่าจำเพาะของวัสดุนำไฟฟ้า (material constants) [1] เพื่อใช้ในการคำนวณได้
- จำลองการออกแบบได้
- พิมพ์ผลลัพธ์และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูลได้
- มีคำสั่ง Help แนะนำการใช้งานบนแถบเครื่องมือ

4. การออกแบบและการใช้งานโปรแกรม

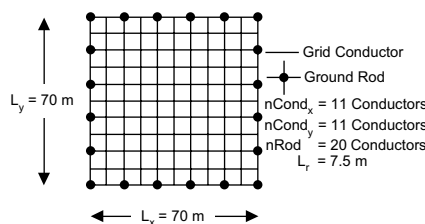
ต่อจากนี้เป็นการทดสอบโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบในด้านการใช้ปริมาณตัวนำไฟฟ้าระหว่างวิธีการออกแบบแบบทั่วไปตามมาตรฐาน [1] และวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมของแท่งตัวนำไฟฟ้า [2] นอกจากนี้ยังแสดงวิธีการใช้โปรแกรม ซึ่งข้อมูลการออกแบบระบบต่อลงดินจะอ้างอิงตามภาคผนวกของมาตรฐาน [1] มีดังนี้

Fault duration, t_f	= 0.5	sec.
Positive sequence equivalent system impedance, Z_1 (115 kV side)	= 4.00 + j10.0	Ω
Zero sequence equivalent system impedance, Z_0 (115 kV side)	= 10.0 + j40.0	Ω
Current division factor, S_f	= 0.6	
Line-to-line voltage at worst-fault location	= 115,000	V
Soil resistivity, ρ	= 400	$\Omega.m$
Crushed rock resistivity (wet), ρ_s	= 2500	$\Omega.m$
Thickness of crushed rock surfacing, h_s	= 0.102	m (4 in)
Depth of grid burial, h	= 0.5	m
Transformer impedance, (Z_1 and Z_0) ; (13 kV) ($Z = 9\%$ at 15 MVA, 115/13kV)	= 0.034 + j1.014	Ω
Grid Conductor	Copper-clad steel wire 30%	
Grid Shape	Square grid	

4.1 การออกแบบระบบต่อลงดินตามมาตรฐาน IEEE Std.80-2000 [1]

การออกแบบระบบต่อลงดินนั้นนอกจากจะใช้ข้อมูลข้างต้นแล้ว ในระบบต่อลงดินยังมีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งยาว 7.5 เมตร จำนวน 20 แท่ง เชื่อมต่อกับระบบต่อลงดินดังรูปที่ 4

จากข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง และอิมพีแดนซ์ที่บัส 115 kV เมื่อแปลงค่าอิมพีแดนซ์มายังด้านบัส 13 kV จะได้ $Z_0 = 0.034+j1.014 \Omega$, $Z_1 = Z_2 = 0.085+j1.142 \Omega$ [1]



รูปที่ 4 ลักษณะของตะแกรงที่ใช้ออกแบบระบบต่อลงดิน [1]

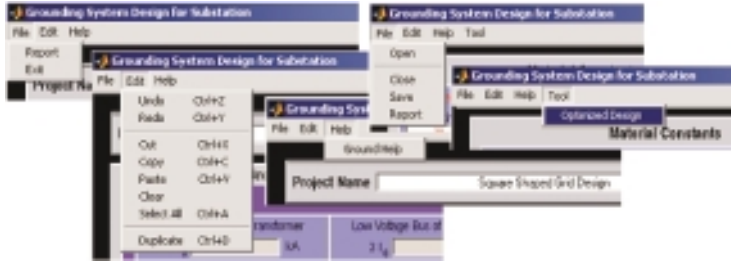
เมื่อเปิดโปรแกรมจะพบวินโดว์แรกดังรูปที่ 5 เมื่อคลิกเมาส์ ปุ่ม **START PROGRAM** โปรแกรมจะแสดงวินโดว์ที่ 2 ดังรูปที่ 7 โดยวินโดว์นี้มีหน้าที่หลักๆ 3 ส่วนคือ คำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรแบบ Single Line to Ground Fault รับค่าจากการป้อนข้อมูลเบื้องต้นของสถานีไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณในขั้นตอนต่อไป และแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ ได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่า K และ ค่า C_s ซึ่งการคำนวณกระแสลัดวงจรสามารถเลือกโหมดได้ 2 แบบ คือ user specified ใช้เมื่อมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรอยู่แล้ว และ short circuit study ใช้เมื่อต้องการให้โปรแกรมทำการคำนวณกระแสไฟฟ้าลัดวงจรให้ โดยจะต้องป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าบัส และค่าอิมพีแดนซ์ของสถานีไฟฟ้าให้กับโปรแกรม และกำหนดจุดที่ผิดปกติ (fault) ซึ่งการออกแบบนี้จะให้โปรแกรมทำการคำนวณให้ โดยคลิกที่ **Short Circuit Study** จากนั้นป้อนค่าต่างๆ และกำหนดจุดที่ผิดปกติ ดังรูปที่ 7 คลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate SLG Fault Current** จะแสดงค่าการคำนวณออกมา จากนั้นป้อนข้อมูลเบื้องต้น และคำนวณ ค่า K และ ค่า C_s คลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate K and Cs** จะแสดงค่าการคำนวณออกมา ดังรูปที่ 7 จากนั้นให้คลิกเมาส์ ปุ่ม **Next >>** หลังจากคลิกปุ่ม Next จะปรากฏวินโดว์ที่ 3 ดังรูปที่ 8 โดยวินโดว์นี้มีหน้าที่หลักๆ 4 ส่วนคือ ส่วนการคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนการรับค่าจากการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับตะแกรงตอลงดินเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว แรงดันไฟฟ้าตะแกรง รวมทั้งแรงดันไฟฟ้าโลหะสู่โลหะ ส่วนของการคำนวณราคาแท่งตัวนำไฟฟ้ารวม และส่วนการแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณ

การคำนวณหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้าสามารถเลือกการคำนวณได้ 2 วิธี คือ material constants study เมื่อเลือกใช้โหมดนี้จะค่อนข้างสะดวกเพราะโปรแกรมจะมีค่าจำเพาะของวัสดุตามมาตรฐาน [1] เก็บค่าเอาไว้ซึ่งสามารถเรียกค่าต่างๆ มาเพื่อใช้ในการคำนวณได้ทันที ทั้งนี้ที่เลือกประเภทของแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ Popup Menu การคำนวณหาแท่งตัวนำไฟฟ้าโดยโหมดนี้จะคำนวณค่อนข้างละเอียด และอีกวิธีคือ user specified เป็นการคำนวณหาแท่งตัวนำไฟฟ้าหายๆ ผลลัพธ์การคำนวณจากทั้งสองวิธีจำเป็นต้องเทียบหาขนาดของแท่งตัวนำไฟฟ้ามาตรฐานจากผู้ผลิต



คลิกเมาส์
ปุ่ม **START PROGRAM**
เพื่อเข้าสู่วินโดว์
การคำนวณออกแบบ

รูปที่ 5 วินโดว์แรกของโปรแกรมการออกแบบระบบต่อลงดิน



รูปที่ 6 แถบเครื่องมือและตัวเลือกการใช้งานของโปรแกรม

ส่วนการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงกาว แรงดันไฟฟ้าตะแกรง และแรงดันไฟฟ้าโลหะสูงโลหะต่ำ จำเป็นที่จะต้องป้อนข้อมูลเกี่ยวกับตะแกรงทั้งหมด เช่น รูปร่างตะแกรง ความยาวและจำนวนแท่งตัวนำไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าหรือระยะช่องตะแกรง การป้อนค่าตรงส่วนนี้จะมีปุ่ม Grid Help ไว้สำหรับแนะนำการป้อนค่าสำหรับตะแกรงรูปแบบต่างๆ คือ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปตัวแอล (L-Shape) และรูปตัวที (T-Shape) ดังรูปที่ 9

สำหรับป้อนชื่อโครงการ

ถ้ารู้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร X/R Ratio ป้อนที่นี่

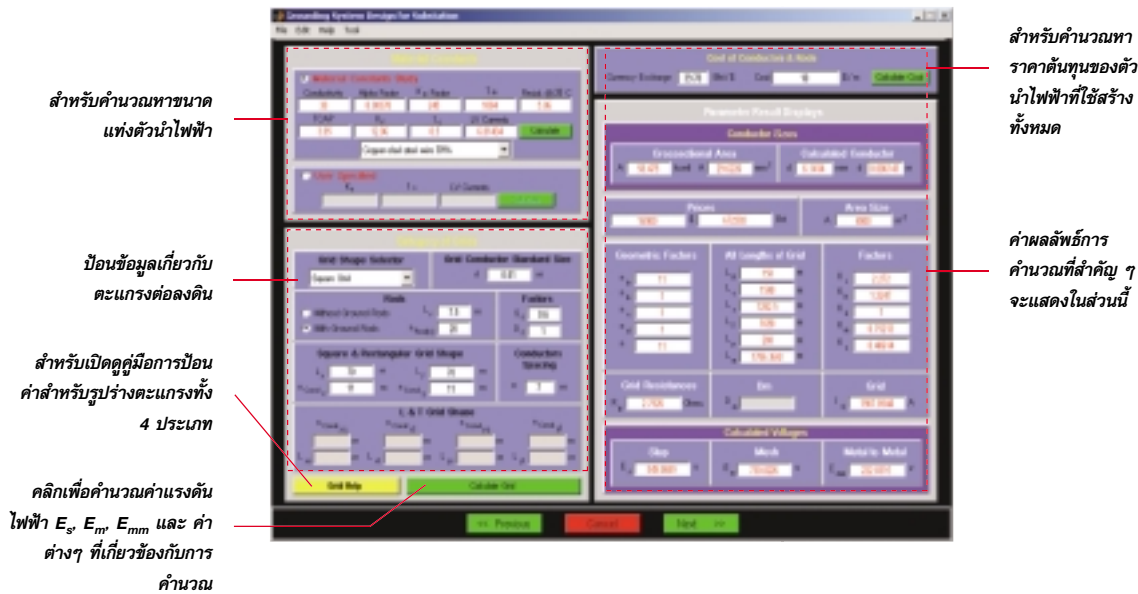
สำหรับให้โปรแกรมคำนวณกระแสลัดวงจรแบบ SLG Fault

สำหรับลบค่าตัวเลขที่ป้อนในช่องแรงดันไฟฟ้าบัส และค่าอิมพีแดนซ์

สำหรับป้อนข้อมูลการออกแบบเบื้องต้น และคำนวณค่า K และ C_s

แสดงค่าผลลัพธ์การคำนวณ

รูปที่ 7 วินโดว์สำหรับการคำนวณและป้อนค่าเบื้องต้น

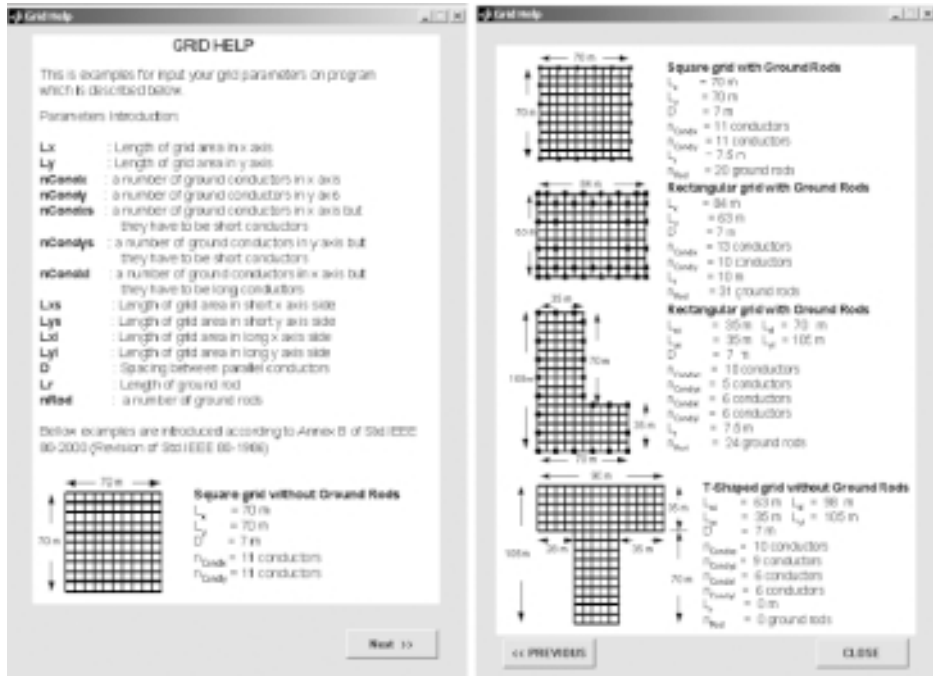


รูปที่ 8 วินโดว์สำหรับคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ หลังการออกแบบ

เมื่อป้อนค่าต่างๆ ครบหมดแล้ว ให้คลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate Grid** ค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจากการคำนวณ จะแสดงออกมาในส่วนของ Parameter Result Displays ดังรูปที่ 8 จากนั้นให้คลิกเมาส์ ปุ่ม **Next >>** เพื่อดูผลลัพธ์การออกแบบพบว่า โปรแกรมแสดงผลการออกแบบระบบต่อลงดินว่าปลอดภัย (Safe) ตามรูปที่ 10 โดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าตะแกรงที่คำนวณได้ (730.0026 V) มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าสัมผัส (840.5479 V) และแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่คำนวณได้ (549.0689 V) มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (2696.0971 V) ซึ่งเป็นไปตาม [1] ทั้งนี้ถ้าเกิดการณีการออกแบบมีผลลัพธ์ที่ไม่ปลอดภัยโปรแกรมจะเตือนเป็นข้อความ และให้ผู้ออกแบบกลับไปแก้ไขค่าบางตัว เช่น เพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดหรือจำนวนของแท่งตัวนำไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้า หรืออาจเพิ่มแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวตั้งเข้าไปในระบบต่อลงดินก็ได้

4.2 การออกแบบด้วยเทคนิคออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม [2]

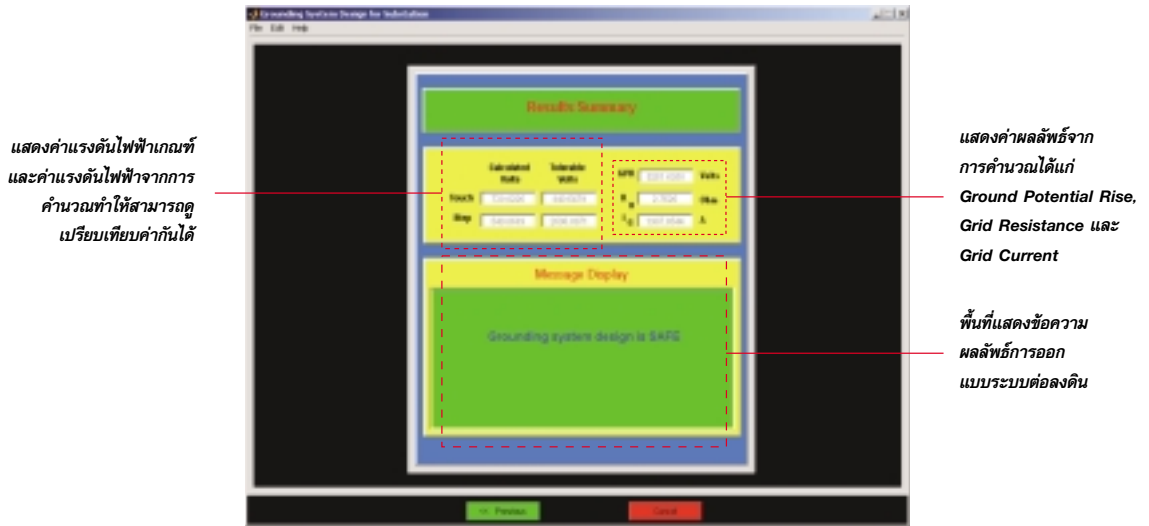
การทดสอบโปรแกรมในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบโดยใช้โหมดการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม เพื่อทดสอบดูว่าโปรแกรมสามารถออกแบบ และให้ผลลัพธ์การใช้ปริมาณของตัวนำไฟฟ้าได้น้อยลงเพียงใด โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการออกแบบแบบต่างๆ ไปดังตัวอย่างที่ผ่านมา โดยข้อมูลจะยังคงใช้เหมือนเดิม [1]



รูปที่ 9 วินโดว์แนะนำการป้อนค่าให้ถูกต้อง

การออกแบบเริ่มต้นโดยกำหนดให้ตะแกรงต่อลงดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหมือนดังตัวอย่างที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.1 แต่ตะแกรงถูกออกแบบให้มีแท่งตัวนำไฟฟ้าแนวราบจำนวน 10 แท่ง มีแท่งตัวนำไฟฟ้าในแนวตั้งยาว 7.5 เมตร จำนวน 12 แท่ง ดังรูปที่ 12 เนื่องจากความยาวด้านในแนวแกน x และแนวแกน y มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงพิจารณาแนวแกน x เพียงด้านเดียวก็ได้ แล้วนำผลที่ได้ไปออกแบบในแนวแกน y

หลังจากที่กำหนดลักษณะของตะแกรงแล้ว ให้เปิดโปรแกรมการออกแบบ แล้วทำการป้อนค่าดังรูปที่ 7 ผลลัพธ์การออกแบบเป็นดังรูปที่ 7 จากนั้นคลิกเมาส์ ปุ่ม **Next >>** จะพบวินโดว์ที่ 3 ของโปรแกรมถูกเปิดขึ้น ดังรูปที่ 8 ให้คลิกที่ Tool บนแถบเครื่องมือ ดังรูปที่ 6 เลือกคลิกหัวข้อ Optimized Design จะปรากฏวินโดว์ Optimal Grounding System Design ดังรูปที่ 11 จากนั้นคลิกที่ Popup Menu เพื่อเลือกความยาวด้านโดยเลือก $L \leq 100$ m ทันทีที่เลือก ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไว้ใช้สำหรับคำนวณดังตารางที่ 1 จะถูกแสดงบนวินโดว์ จากนั้นเลือก even คลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate OCR** จะได้ค่าผลลัพธ์ของ OCR, b, และ d_{max} แสดงออกมา

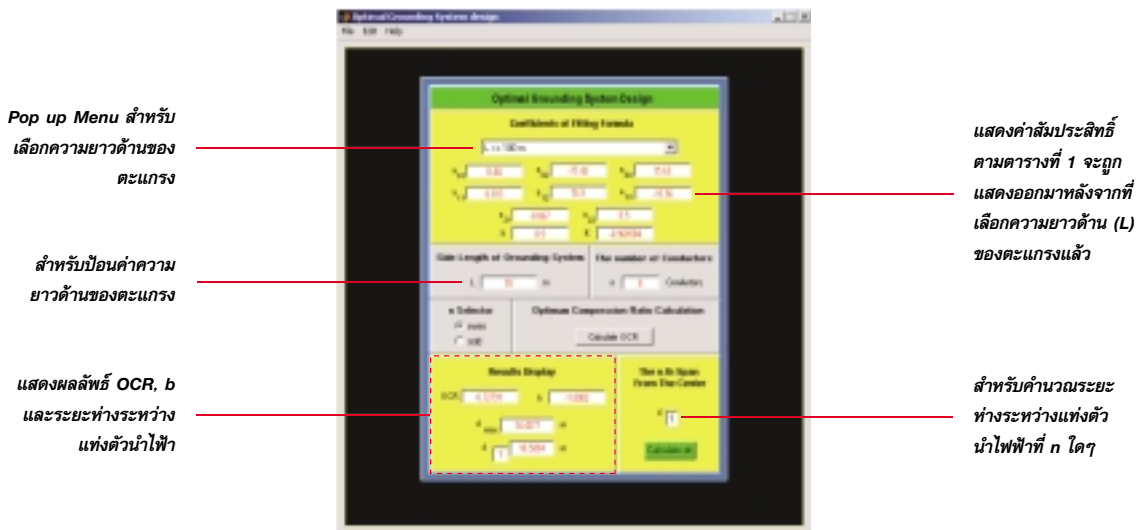


แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเกณฑ์
และค่าแรงดันไฟฟ้าจากการ
คำนวณทำให้สามารถดู
เปรียบเทียบค่ากันได้

แสดงค่าผลลัพธ์จาก
การคำนวณได้แก่
Ground Potential Rise,
Grid Resistance และ
Grid Current

พื้นที่แสดงข้อความ
ผลลัพธ์การออก
แบบระบบต่อลงดิน

รูปที่ 10 วินโดว์แสดงผลพร้อมออกแบบโดยวิธีออกแบบระบบต่อลงดินแบบทั่วๆ ไป



Pop up Menu สำหรับ
เลือกความยาวด้านของ
ตะแกรง

สำหรับป้อนค่าความ
ยาวด้านของตะแกรง

แสดงผล OCR, b
และระยะห่างระหว่าง
แท่งตัวนำไฟฟ้า

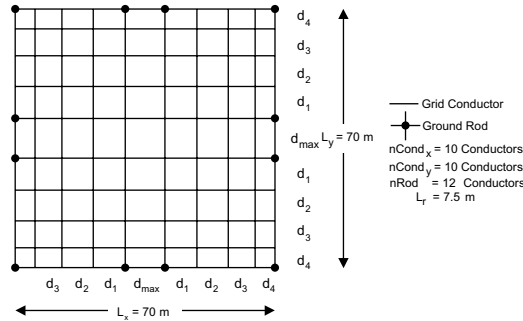
แสดงค่าสัมประสิทธิ์
ตามตารางที่ 1 จะถูก
แสดงออกมาหลังจากที่
เลือกความยาวด้าน (L)
ของตะแกรงแล้ว

สำหรับคำนวณระยะ
ห่างระหว่างแท่งตัว
นำไฟฟ้าที่ n ใดๆ

รูปที่ 11 วินโดว์ออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

ส่วนระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ (d_n) ให้ป้อนค่า n ที่ละค่าโดยเริ่มจาก 1 แล้วคลิกเมาส์ ปุ่ม **Calculate dn** ซึ่งค่าต่างๆ ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 2 นำค่าที่ได้จากตารางที่ 2 มาออกแบบระยะห่างช่องตะแกรงตามรูปที่ 12 จากนั้นลองตรวจสอบว่าตะแกรงที่ได้ออกแบบมานั้นปลอดภัย (Safe) หรือไม่ โดยการป้อนค่าระยะห่างระหว่างช่องตะแกรง (D) ที่วินโดว์ที่ 3 ซึ่งได้จากการหาค่าเฉลี่ยของ d_{max} และ d_n รวมกันตลอดความยาวด้าน (L) และค่าต่างๆ ตามที่ได้กล่าวอธิบายมาแล้ว ดังรูปที่ 13 จากนั้นคลิกเมาส์ ปุ่ม **Next >>** จะปรากฏวินโดว์แสดงผลพร้อมดังรูปที่ 14 ผลการออกแบบสรุปว่าปลอดภัย (Safe) ต่อจากนั้นก็สามารออกแบบใน

รายละเอียดต่อไปได้ตามแผนภูมิรูปที่ 2 นอกจากนั้นถ้าต้องการพิมพ์ผลลัพธ์ และค่าที่ใช้ในการออกแบบเก็บเป็นข้อมูล ให้เลือก File ที่แถบเครื่องมือ แล้วคลิกคำสั่ง Print จะได้รายงานการออกแบบดังรูปที่ 15



รูปที่ 12 ลักษณะตะแกรงที่ถูกออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

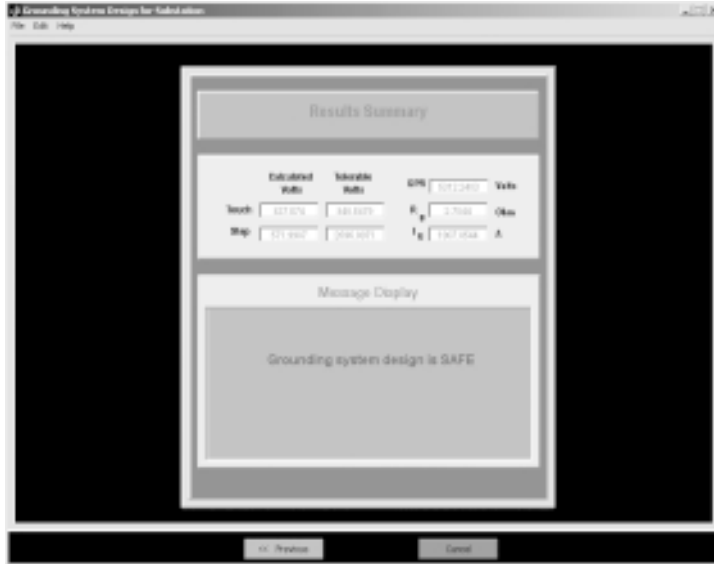
ตารางที่ 2 ค่าผลลัพธ์โดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

Calculated Optimal Design Parameters				
d_{max}	d_1	d_2	d_3	d_4
14.4377	10.5094	7.6499	5.5685	4.0534
OCR = 0.72791			b = -1.0902	

ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบเพื่อดูผลลัพธ์ด้านความปลอดภัย



รูปที่ 13 วินโดว์ที่ 3 หลังจากป้อนค่าตัวแปรที่ได้จากวิธีการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม



รูปที่ 14 วินโดว์แสดงผลการออกแบบโดยเทคนิคการใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

**Grounding System Design Report
IEEE Std. 80-2000**

Project Name : Square Shaped Grid Design

Soil Resistivity : 400
 Surface Resistivity : 2500
 Symmetrical Fault Current
 in Substation for Conductor Sizing : 6.814
 Conductor Calculated Sizing : 58.475 kcmil
 : 29.6226 mm²

Optimal Design Method

Number of Ground Rod : 12 m
 Length of Ground Rod : 7.5 m
 Total Length of Ground Rod : 90 m
 Total Length of Grid Conductor : 1400 m
 Total Length of Ground Conductor : 1490 m
 Maximum Grid Current : 1907.8544 A
 Conductor Price : 592722

R _g	GPR	Touch Potential		Step Potential	
		Calculated	Tolerable	Calculated	Tolerable
Ohms	Volts	Volts	Volts	Volts	Volts
2.7844	5312.2483	837.574	840.5479	571.9987	2696.0971

รูปที่ 15 รายงานการออกแบบเมื่อถูกพิมพ์ออกมาจากโปรแกรม

5. สรุปผลการทดลองการออกแบบ

เมื่อนำโปรแกรมการออกแบบที่ถูกสร้างขึ้นและพัฒนามาน MATLAB นำมาใช้ในการออกแบบระบบต่อลงดิน พบว่าเมื่อออกแบบโดยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสม โปรแกรมสามารถออกแบบระบบต่อลงดินที่มั่นใจได้ในความปลอดภัยตาม [1] และ [2] และยังสามารถลดปริมาณตัวนำไฟฟ้าโดยรวมลงได้ตามวัตถุประสงค์ กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบจากทั้งสองวิธีโดยใช้โปรแกรมออกแบบดังกล่าว พบว่าวิธีออกแบบระบบต่อลงดินแบบต่างๆไปใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร หรือพื้นที่หน้าตัด 29.623 ตารางมิลลิเมตร (58.475 kcmil) ยาวทั้งหมด 1,690 เมตร ในขณะที่การออกแบบโดยวิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมนั้น พบว่าใช้แท่งตัวนำไฟฟ้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร หรือพื้นที่หน้าตัด 29.623 ตารางมิลลิเมตร (58.475 kcmil) ยาวทั้งหมดเพียง 1,490 เมตร ซึ่งเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับพบว่า วิธีการออกแบบระบบต่อลงดินที่เหมาะสมสามารถลดปริมาณของแท่งตัวนำไฟฟ้าลงไปถึงร้อยละ 11.83 ทำให้ได้ระบบต่อลงดินที่ประหยัดวัสดุนำไฟฟ้าสำหรับระบบต่อลงดิน ประหยัดงบประมาณการก่อสร้างและการออกแบบ อีกทั้งโปรแกรมยังช่วยลดเวลาการออกแบบและใช้งานง่าย ทำให้ระบบต่อลงดินที่ได้สามารถมั่นใจได้ในความปลอดภัยต่อบุคคลที่อยู่ในพื้นที่สถานีไฟฟ้าตาม [1] ทั้งนี้โปรแกรมห้ดังกล่าว สามารถนำมาพัฒนาเพื่อใช้สำหรับออกแบบระบบต่อลงดินที่พิจารณาดินสองชั้นต่อไปได้ นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างผลการออกแบบด้วยโปรแกรม EPRI TR-100622 ที่น่าสนใจเมื่อพิจารณาตะแกรงที่มีระยะห่างระหว่างแท่งตัวนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีกราฟแรงดันไฟฟ้าพื้นผิว (surface voltage profile) ในแต่ละตำแหน่งของตะแกรง และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดงในภาคผนวก B.6 ของ [1] ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

1. "Guide for Safety in AC Substation Grounding" ANSI/IEEE Std.80/2000
2. Weimin SUN, Qi SU, Jinliang HE and others, "Optimal Design Analysis of Grounding Grids for Substations Built in Nonuniform Soil," *IEEE Journal* 2000, ISBN: 0-7803-6338-8
3. L. Huang, X. Chen, and H. Yan, 1995, "Study of Unequally Spaced Grounding Grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, April 1995, pp. 716-722.
4. F. Dawalibi and D. Mukhedkar, 1995, "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part I: Analytical Study," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 94, No. 2, Mar. 1995, pp. 252-261.
5. F. Dawalibi and D. Mukhedkar, 1995, "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part II: Comparison between Theoretical and Experimental Results," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 94, No. 2, Mar. 1995, pp. 262-266.

6. F. Dawalibi and D. Mukhedkar, 1995, "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part III: Study of Grounding Grids Performance and New Electrode Configuration", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 94, No. 2, Mar. 1995, pp. 267-272.
7. J. G. Sverak, 1976, "Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Techniques," *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 95, No. 1, Jan. 1976, pp. 362-374.
8. W. M. Sun, J. L. He, and R. Zeng, 2000, "Influence of Seasonal Factors on the Safety of Grounding Systems for Substations and Power Plants," *Journal of CESS (in Chinese)*, Vol. 20, No. 1, Feb. 2000, pp. 15-18.
9. F. P. Dawalibi, J. Ma, J. He, and Q. Meng, 1999 "A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Region", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, July 1999.
10. Chapman, Stephen J., 2002, *MATLAB Programming for Engineers*, 2nd ed, BROOKS/COLE, 2002.

