

การศึกษาผลกระทบจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดรูปแบบ
Rectangular ซึ่งมีแท่งหลักดินแบบกระจายของสถานีไฟฟ้าแรงสูง
**EFFECTS OF OVERVOLTAGE ON RECTANGULAR GROUND GRID
SYSTEM OF HIGH VOLTAGE SUBSTATION WITH GROUND RODS
DISTRIBUTED IN MESH PATTERN**

กรุง ลือวัฒนา

อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, 96 ถ.ปรีดีพนมยงค์ ต.ประตูชัย อ.พระนครศรีอยุธยา
จ.พระนครศรีอยุธยา 13000, zaraburi@yahoo.com

Krung Luewattana

Lecturer, Electrical engineer sub-department, Faculty of Science and Technology,
Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, 96 Pridi Panomyong Rd.,
Phranakhon Si Ayutthaya district, Phranakhon Si Ayutthaya province 13000, Thailand,
zaraburi@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ Rectangular ซึ่งมีการวางแท่งหลักดินแบบกระจาย (mesh-distributed ground rods) โดยเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 ทั้งนี้ในระบบไฟฟ้ากำลัง เสถียรภาพของระบบการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความจำเป็นโดยเฉพาะสถานีไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะต้องมีการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งหากเกิดกระแสผิดพ่วงที่มีปริมาณสูงขึ้นภายในสถานีระบบกราวด์กริดที่ดีจะต้องสามารถถ่ายเทกระแสผิดพ่วงนั้นให้ไหลลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งหากไม่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อาจส่งผลก่อให้เกิดแรงดันเกินไหลย้อนกลับขึ้นสู่สถานีไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ภายในสถานี โดยในงานวิจัยได้ทำการจำลองระบบกราวด์กริดที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือ $9 \times 15 \text{ m}^2$, $18 \times 30 \text{ m}^2$ และ $27 \times 45 \text{ m}^2$ โดยแต่ละขนาดมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญเท่ากัน และมีตำแหน่งที่จ่ายกระแสผิดพ่วงลงบนระบบกราวด์กริดที่ตำแหน่งเดียวกัน เพื่อหาผลกระทบอันเนื่องมาจากกระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดที่ตำแหน่งต่างๆ ว่าจะส่งผลกระทบต่อระบบกราวด์กริดได้มากน้อยเพียงใด ทั้งนี้ได้ทำการ

คำนวณหาค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นทางด้านกราวด์ (ground potential rise) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาตั้งที่กล่าวมาทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบระบบกราวด์กริดที่มีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: ระบบกราวด์กริด, สถานีไฟฟ้าแรงสูง, กระแสผิดพลาด, แรงดันเกิน

ABSTRACT

This research aimed to study the effects of overvoltage that occurring on the rectangular ground grid system of high voltage substation, of which ground rods were distributed in mesh pattern according to the IEEE 80-2000 standard. Since the electrical power seriously needs stable transmission and distribution systems, especially for high voltage substations, which require great effectiveness from these systems. If there is any incident of high level of fault current within the voltage substation, the effective ground grids will transfer such fault current to the ground soil quickly; otherwise, this may cause reverse flow of overvoltage to the substation that may harm the equipment or people residing inside. Therefore, this research created rectangular ground grids of 3 different sizes, including $9 \times 15 \text{ m}^2$, $18 \times 30 \text{ m}^2$, and $27 \times 45 \text{ m}^2$, but all had the same important parameters and level of fault current which also injected to the same spots. This model was simulated to reveal the consequences of the incidences that fault current occurring on the ground grid system at different spots and to compare with the calculated ground potential rise (GPR). The knowledge from this study can be beneficial for the future design of effective ground grids for high voltage substations.

KEYWORDS: Ground grid system, High voltage substation, fault current, Overvoltage

1. บทนำ

ปัจจุบันหัวใจของการพัฒนาประเทศ พลังงานไฟฟ้าถือเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะระบบผลิตกำลังไฟฟ้า (generation) ระบบส่งกำลังไฟฟ้า (transmission) และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (distribution) โดยส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อระบบดังกล่าวคือสถานีไฟฟ้าแรงสูงอันเป็นที่ตั้งของบริภัณฑ์ไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงระบบกราวด์กริด ซึ่งทั้งนี้หากเกิดความผิดปกติขึ้นต่อสถานีไฟฟ้าแรงสูง เช่น ฟิวส์ หรืออุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าทำงานผิดพลาดจะก่อให้เกิดกระแสผิดพลาดปริมาณมหาศาลไหลเข้าสู่สถานีไฟฟ้าซึ่งระบบกราวด์กริดจะเป็นส่วนสุดท้ายที่จะนำกระแสผิดพลาดไหลผ่านและกระจายลงสู่ดินและถ้าหากระบบกราวด์กริดไม่ได้รับการออกแบบที่ดีจะส่งผลกระทบก่อให้เกิดแรงดันเกินย้อนกลับขึ้นสู่สถานีไฟฟ้า ดังนั้น

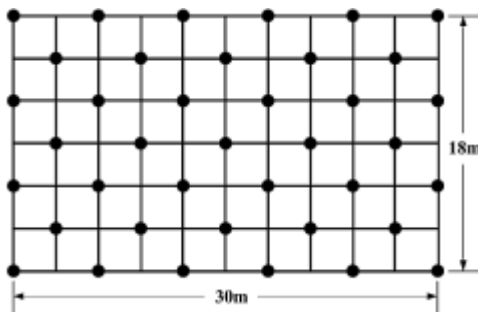
งานวิจัยนี้จึงเป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาผลกระทบจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นต่อระบบกราวด์กริดในรูปแบบ rectangular ซึ่งมีแท่งหลักดินแบบกระจายโดยผลจากการศึกษาจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบกราวด์กริดให้มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้ต่อไป โดยที่ผ่านมามีการศึกษารูปแบบระบบกราวด์กริดรูปแบบ rectangular ตามมาตรฐาน IEEE 80-1976 โดยออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างตัวนำกราวด์กริดเท่ากันได้อย่างเหมาะสม [1] จากนั้นได้มีการศึกษา Surge ที่ส่งผลกระทบต่อแท่งตัวนำหลักดิน โดยใช้โปรแกรมในการจำลอง impulse current ที่มีขนาดแตกต่างกัน เพื่อดูการส่งผ่านแรงดันเกิน (Overvoltage) ไปสู่ระบบกราวด์กริด [2] ต่อมาได้มีการวิเคราะห์ transient จากฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่างๆ บนระบบกราวด์กริด โดยวิธี finite element analysis โดยสมการ Maxwell's ซึ่งจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ [3] ถัดมาจึงได้มีการวิเคราะห์โมเดล ground rod ในดินเนื้อเดียว (uniform soil) ที่ transient ส่งผลกระทบเพื่อนำไปป้องกันฟ้าผ่าลงสู่ระบบ โดยมี impulse current ขนาดต่างกัน และเปรียบเทียบผลกับการคำนวณ ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น [4] หลังจากนั้นได้มีการวิเคราะห์แบบจำลองระบบกราวด์กริดโดยโปรแกรม Electromagnetic transients program (EMTP) ซึ่งวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าและ EMC ที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกิน [5] ต่อจากนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับความถี่ที่เกิดขึ้นในระบบกราวด์กริดซึ่งเกิดจาก transient โดยใช้ Fourier transform ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และกระแส [6] ต่อมาได้ศึกษาการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยให้มีค่า ground resistance, ground potential rise, step and touch voltages ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยมีขนาดตัวนำและแท่งหลักดินที่เล็กที่สุดซึ่งสามารถรับ fault ได้สูงสุดโดยใช้ ETAP [7] หลังจากนั้นได้มีการศึกษา step and touch voltages สำหรับเนื่อดินสองชั้นที่ต่างกัน เพื่อความปลอดภัยของระบบกราวด์กริด โดยวิธี Wenner method, Schlumberger method, General method, Driven rod (3-probe) method and Dipole-dipole method [8] ต่อมาจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับความถี่และช่วงเวลาการตอบสนองของระบบกราวด์กริดต่อกระแสฟ้าผ่าโดยใช้ Fast Furier Transformation (FFT) ในส่วนของสนามแม่เหล็ก และคำนวณโดยใช้ Maxell [9] จากนั้นจึงได้ศึกษาการออกแบบระบบกราวด์ กริดโดยใช้ ETAP ตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 โดยศึกษาการไหลของ fault เพื่อป้องกันอันตรายต่อมนุษย์โดยพิจารณารูปแบบระบบกราวด์กริด ค่าความต้านทานดิน และความต้านทานร่างกายมนุษย์ [10] หลังจากนั้นได้มีการศึกษามาตรฐานระบบกราวด์กริด โดยพิจารณาถึง grounding system และ neutral electrodes system โดยศึกษามาตรฐานกับ การปฏิบัติจริง ในการติดตั้งระบบกราวด์กริด เพื่อหาระยะห่างที่สั้นที่สุดแต่อยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน [11] หลังจากนั้นได้ศึกษาการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบกราวด์กริดโดยใช้โปรแกรม ETAP เพื่อนำผลมาใช้ออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าขนาด 750 kV [12] ต่อมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมออกแบบระบบกราวด์กริดโดยใช้งานร่วมกับ Visual studio ในชื่อ Ground grid designer เพื่อเปรียบเทียบระบบ

กราวด์กริดในรูปแบบ square shape, rectangular shape และ L-shape และนำผลไปพัฒนาโปรแกรมและเปรียบเทียบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 [13]

2. กรรมวิธีการวิจัย

2.1 รูปแบบระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ซึ่งมีแท่งหลักดินแบบกระจาย

ระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงเป็นหนึ่งในระบบที่มีความสำคัญในการป้องกันสถานีไฟฟ้าจากความเสียหายต่างๆ ที่เกิดจากธรรมชาติหรือความผิดพลาดอันเกิดจากกระแสผิดพลาดที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยอาจส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานรวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้ นอกเหนือไปจากนั้นระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงยังเป็นจุดศูนย์รวมการเชื่อมต่อของระบบกราวด์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น overhead ground wires, neutral conductors และ underground cable เป็นต้น [14] ในรูปที่ 1 เป็นการแสดงระบบกราวด์กริดแบบ rectangular พร้อมแท่งหลักดินแบบกระจายซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 [15] โดยเป็นระบบกราวด์กริดที่มีขนาด 18 m × 30 m มีแท่งหลักดินแบบกระจายที่ระบบกราวด์กริดจำนวน 39 แท่งดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบกริดกราวด์รูปแบบ rectangular พร้อมแท่งหลักดินแบบกระจาย

2.2 ความหมายและคำจำกัดความ

แรงดันดินที่เพิ่มสูงขึ้น (ground potential rise, GPR) คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้กับระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยเป็นการเทียบกับจุดต่อลงดินที่อ้างอิงของโลก โดยค่านี้จะเท่ากับผลคูณของกระแสกริดสูงสุดกับค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด [16] ดิวิชั่นแฟคเตอร์ของกระแสผิดพลาด (fault current division factor) คือปัจจัยที่แสดงถึงอัตราส่วนของการผกผันของความผิดพลาดในรูปแบบสมมาตรที่มีต่ออัตราส่วนของกระแสที่ไหลระหว่างระบบกราวด์กริดและดินที่อยู่ภายในบริเวณใกล้เคียง, กระแสกริดสูงสุด (maximum grid current) คือค่าผลคูณระหว่างปัจจัยการลดลงสำหรับช่วงเวลาทั้งหมดที่เกิดขึ้นของความผิดพลาดและกระแสกริด

แบบสมมาตร rms นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณได้โดยการคูณกันในระหว่างปัจจัยการลดลงสำหรับช่วงเวลาทั้งหมดของความผิดพลาดและกระแสไฟฟ้าผิดพลาดลำดับศูนย์, แรงดันเมฆ (mesh voltage) คือค่าแรงดันสัมผัสสูงสุดที่อยู่ภายในเมฆของระบบกราวด์กริดที่มีการต่อลงดิน, แรงดันช่วงก้าว (step voltage) คือค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าพื้นผิวที่เกิดขึ้นระหว่างเท้าของมนุษย์ที่เดินหรือยืนอยู่ในสถานะไฟฟ้าแรงสูงซึ่งอยู่ในระหว่างที่มีการเกิดกระแสไฟฟ้าผิดพลาดขึ้น โดยแรงดันช่วงก้าวจะสามารถทำการคำนวณที่ระยะ 1 เมตร ระหว่างเท้า, แรงดันสัมผัส (touch voltage) คือค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวดินซึ่งเพิ่มขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวที่ซึ่งบุคคลยืนอยู่และไปสัมผัสกับโครงสร้างที่ได้มีการต่อลงดินไว้

2.3 การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูง

ในการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงรูปแบบ rectangular ซึ่งมีแท่งหลักดินแบบกระจายเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 โดยในทุกกรณีศึกษาได้กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ กระแสผิดพลาดมีขนาด 25 kA, ความต้านดินมีค่า 10 Ω .m, ความยาวแท่งหลักดิน 3 m, ระยะห่างระหว่างตัวนำ 3 m, แท่งหลักดินมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 95 mm², ระบบกราวด์กริดฝังลึกใต้ผิวดิน 0.5 m, ดินเป็นดินชนิดเนื้อเดียว (unifrom soil), ระบบกราวด์กริดที่จะศึกษามีขนาด 9×15 m², 18×30 m² และ 27×45 m² จากนั้นค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดสถานีไฟฟ้าแรงสูงคือค่า ground potential rise (GPR) รวมถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญอื่นๆ สามารถทำการคำนวณได้ตามสมการที่ 1-11 โดยในลำดับแรกค่ากระแสกริดสูงสุดสามารถทำการคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และสามารถทำการคำนวณหา fault current division factor ได้โดยใช้สมการที่ 3 หลังจากนั้นสามารถทำการคำนวณหาค่า ground potential rise ได้โดยการคูณกันระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากริดสูงสุดกับค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดโดยแสดงให้เห็นในสมการที่ 4 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริดซึ่งหาได้โดยใช้ค่าจากสมการที่ 5

$$I_G = D_f \cdot I_g \quad (1)$$

$$I_G = D_f \cdot S_f \cdot 3I_o \quad (2)$$

$$S_f = \frac{I_g}{3 \cdot I_o} \quad (3)$$

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (4)$$

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (5)$$

ต่อจากนั้นจึงสามารถทำการคำนวณหาค่าแรงดันช่วงก้าวที่ยอมรับได้สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักตัว 50 kg และแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่สามารถยอมรับได้สำหรับมนุษย์ที่มีน้ำหนักตัว 50 kg ได้โดยใช้สมการ 6 และ 7 ทั้งนี้ค่าแรงดันเมซและแรงดันช่วงก้าวสามารถทำการคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 8 - 11 ตามลำดับ

$$E_{\text{step}50} = (1,000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

$$E_{\text{touch}50} = (1,000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

$$L_m = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (8)$$

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (9)$$

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_m} \quad (10)$$

$$E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (11)$$

ตัวแปรที่สำคัญของสมการที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดสามารถทำการอธิบายได้ดังต่อไปนี้

A = พื้นที่ระบบกราด์กริด (m²)

S_f = แฟกเตอร์แบ่งกระแสผิวดพรวง

I_g = กระแสลัดวงจรลงดิน ในกรณีการลัดวงจรแบบสมมาตร (A)

I₀ = กระแสผิวดพรวงลำดับศูนย์ (A)

I_G = กระแสกริดสูงสุดที่ไหลระหว่างกริดต่อลงดินกับดินโดยรอบซึ่งรวมกระแสตรงด้วย (A)

D_f = แฟกเตอร์ลดสำหรับคำนวณ I_G (s)

GPR = แรงดันดินที่เพิ่มสูงขึ้น (V)

R_g = ความต้านทานของระบบต่อลงดิน (Ω)

E_{Step50} = แรงดันช่วงก้าวสูงสุดที่ไม่เป็นอันตราย สำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม (V)

$E_{touch50}$ = แรงดันสัมผัสสูงสุดที่ไม่เป็นอันตราย สำหรับคนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม (V)

C_s = แฟกเตอร์ลดสำหรับวัสดุพื้นผิวบาง

ρ_s = ความต้านทานจำเพาะของหินกรวด ($\Omega.m$)

t_s = ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายโดยไม่เป็นอันตรายต่อการทำงานของหัวใจ (s)

E_m = แรงดันเมฆที่จุดกึ่งกลางของเมฆที่อยู่ในมุมกริด (V)

ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega.m$)

K_m = แฟกเตอร์ระยะห่าง สำหรับพิจารณาแรงดันเมฆ

K_i = แฟกเตอร์แก้ไข ผลของรูปร่างเรขาคณิตของกริด

L_m = $L_C + L_R$ สำหรับแรงดันเมฆ (m)

L_C = ความยาวทั้งหมดของตัวนำกริด (m)

L_R = ความยาวทั้งหมดของแท่งหลักดินแต่ละแท่งเสริมกริด (m)

L_r = ความยาวของแท่งหลักดินแต่ละแท่งที่เสริมกริด (m)

E_s = แรงดันช่วงก้าวระหว่างจุดมุมด้านนอกกริดกับจุดที่ห่างออกไป 1 เมตรแนวทแยงมุม (V)

K_s = แฟกเตอร์ระยะห่างสำหรับแรงดันช่วงก้าว

L_s = $L_C + L_R$ สำหรับแรงดันช่วงก้าว (m)

L_x = ความยาวสูงสุดของตัวนำกริดในทิศทาง x (m)

L_y = ความยาวสูงสุดของตัวนำกริดในทิศทาง y (m)

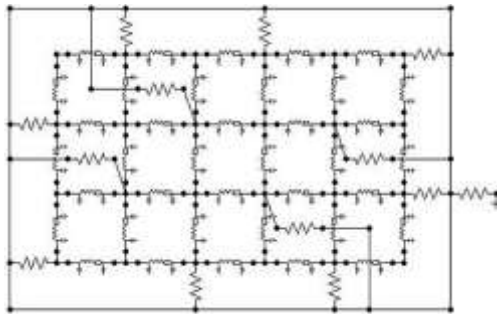
หลังจากนั้นผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการจะถูกใช้สำหรับการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูง [15] ซึ่งจากสมการสามารถคำนวณหาค่า Ground potential rise (GPR) ของระบบกราวด์กริดที่มีขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$, $18 \times 30 \text{ m}^2$ และ $27 \times 45 \text{ m}^2$ ได้เท่ากับ 8.543 kV, 4.128 kV และ 2.708 kV ตามลำดับต่อจากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมต่อไป

3 การจำลองระบบกราวด์กริด

3.1 ระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$ พร้อมแท่งหลักดินแบบกระจาย

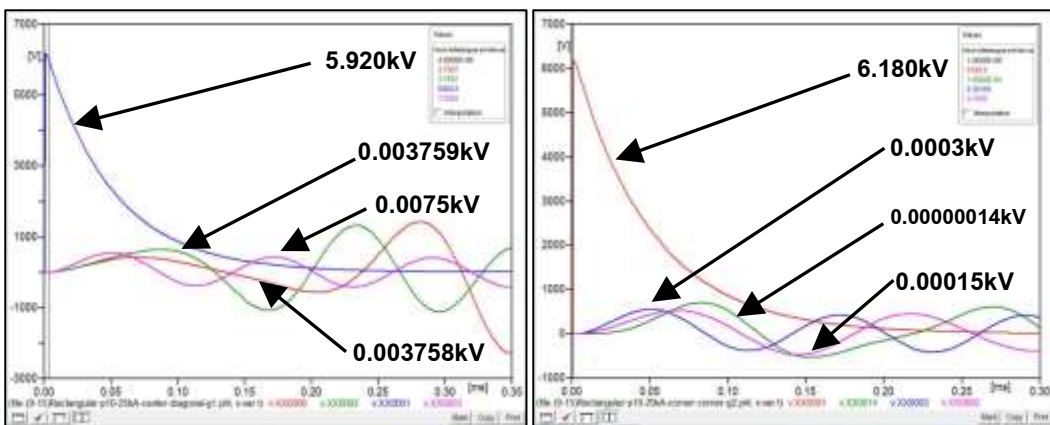
การจำลองจะเริ่มขั้นตอนโดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์และสามารถทำการคำนวณเพื่อออกแบบระบบกราวด์กริดได้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำไปใส่ลงในโปรแกรม

ATP / EMTP หลังจากนั้นกระบวนการในการจำลองจะเริ่มต้นขึ้น โดยจะสามารถแสดงแบบจำลองของระบบกราวด์กริดในกรณีศึกษาที่ 1 ได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบแรกในการจำลองระบบกราวด์กริดซึ่งมีขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$ โดยแบบจำลองจะประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ของสายกราวด์ พารามิเตอร์ของแท่งหลักดิน และพารามิเตอร์ค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงตามลำดับ



รูปที่ 2 ระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$ พร้อมตัวนำแท่งหลักดิน

ต่อจากนั้นการจำลองโดยโปรแกรมจะถูกทำการประมวลผลในกรณีที่กระแสผิดพ่วงซึ่งมีขนาด 25 kA ถูกจ่ายโดยตรงไปที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของระบบกราวด์กริด และที่ตำแหน่งมุมของระบบกราวด์กริด โดยจะแสดงผลของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดในแนวทแยงมุม และที่ตำแหน่งมุมของระบบกราวด์กริดจากทั้งสองกรณีการจ่ายกระแสผิดพ่วง ซึ่งจะสามารถแสดงตัวอย่างผลกระทบอันเนื่องมาจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้ดังในรูปที่ 3

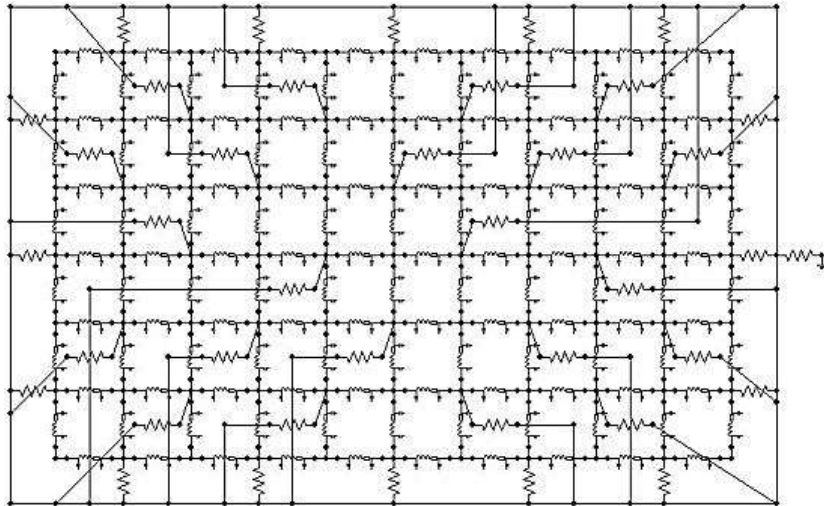


(a) จ่ายกระแสที่ศูนย์กลางและวัดแรงดันแนวทแยงมุม (b) จ่ายกระแสที่มุมและวัดแรงดันที่มุม

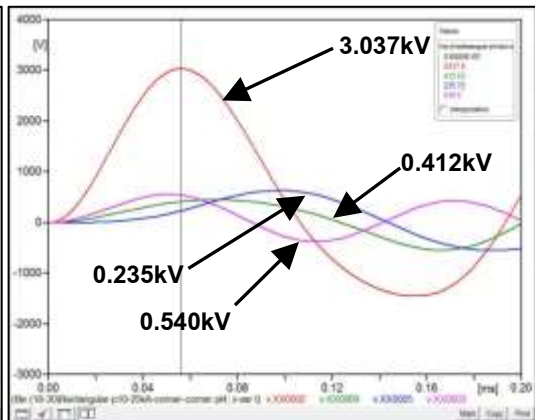
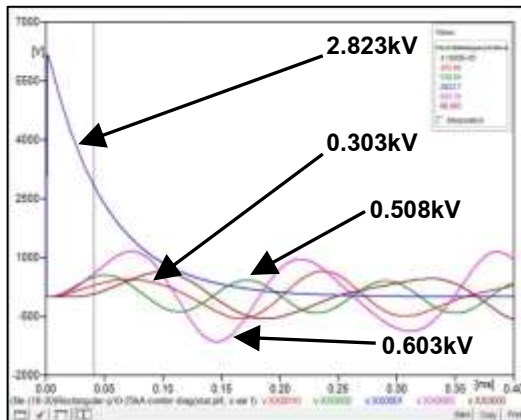
รูปที่ 3 แรงดันเกินเมื่อจ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าสู่ระบบกราวด์กริดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

3.2 ระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ขนาด 18x30 m² พร้อมแท่งหลักดินแบบกระจาย

การจำลองจะเหมือนในกรณีศึกษาที่ 1 จะแตกต่างกันในส่วนของคุณค่าระบบกราวด์กริดและจำนวนตัวนำแท่งหลักดิน โดยจะสามารถแสดงแบบจำลองของระบบกราวด์กริดในกรณีศึกษาที่ 2 ได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นรูปแบบที่สองในการจำลองระบบกราวด์กริดซึ่งมีขนาด 18x30 m² โดยสามารถแสดงตัวอย่างผลกระทบจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ขนาด 18x30 m² พร้อมตัวนำแท่งหลักดิน

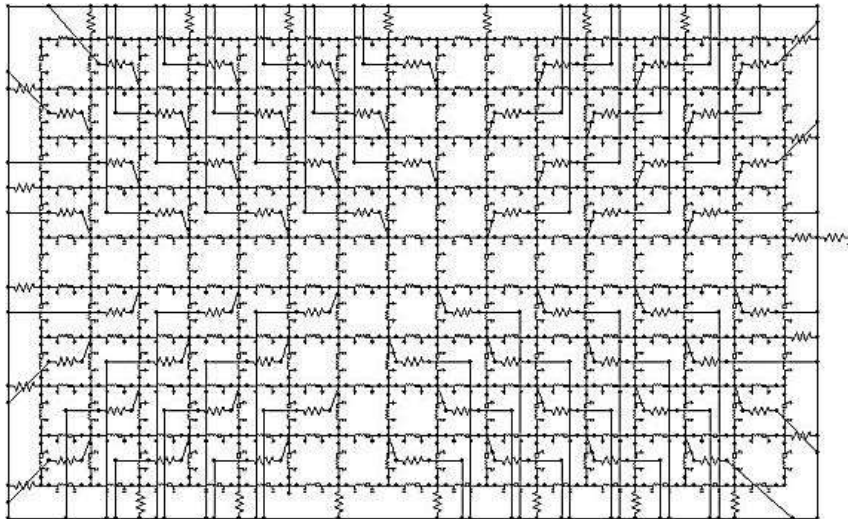


(a) จำยกระแสที่ศูนย์ก่กลางและวัดแรงดันแนวทแยงมุม (b) จำยกระแสที่มุมและวัดแรงดันที่มุม

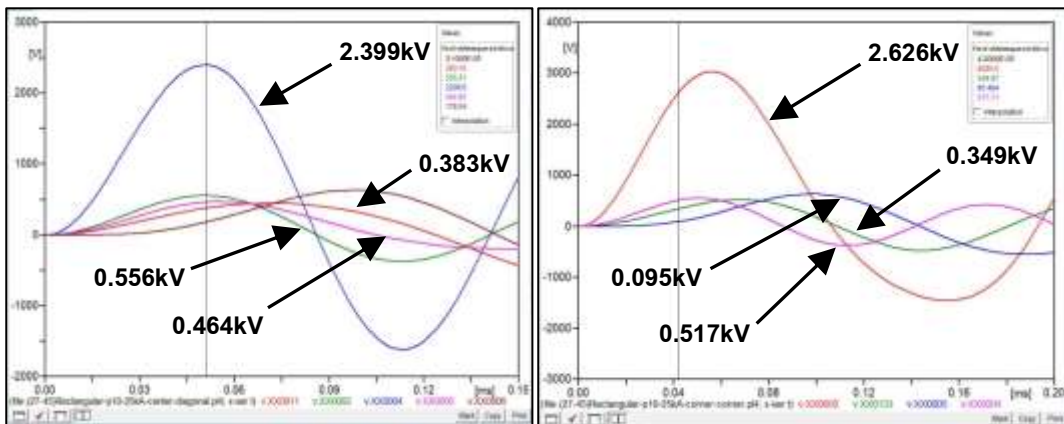
รูปที่ 5 แรงดันเกินเมื่อจำยกระแสผิตพร่องเข้าสู่ระบบกราวด์กริดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

3.3 ระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ขนาด 27x45 m² พร้อมแท่งหลักดินแบบกระจาย

การจำลองจะเหมือนในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 จะแตกต่างกันในส่วนของคุณาตรระบบกราวด์กริดและจำนวนตัวนำแท่งหลักดิน โดยจะสามารถแสดงแบบจำลองของระบบกราวด์กริดในกรณีศึกษาที่ 3 ได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นรูปแบบสุดท้ายในการจำลองระบบกราวด์กริดซึ่งมีขนาด 27x45 m² โดยสามารถแสดงตัวอย่างผลกระทบจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นได้ดังในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ระบบกราวด์กริดแบบ rectangular ขนาด 27x45 m² พร้อมตัวนำแท่งหลักดิน



(a) จ่ายกระแสที่ศูนย์กลางและวัดแรงดันแนวทแยงมุม (b) จ่ายกระแสที่มุมและวัดแรงดันที่มุม

รูปที่ 7 แรงดันเกินเมื่อจ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าสู่ระบบกราวด์กริดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

4. ผลการทดลองและการอภิปราย

จากการจำลองผลกระทบของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงทั้งสามกรณีศึกษาคือขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$, $18 \times 30 \text{ m}^2$ และ $27 \times 45 \text{ m}^2$ โดยการจ่ายกระแสผิดพระองค์ที่ตำแหน่งกลางระบบกราวด์กริด แล้วทำการวัดค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในแนวทแยงมุม หรือที่มุมระบบกราวด์กริด หรือการจ่ายกระแสผิดพระองค์ที่ตำแหน่งมุมระบบกราวด์กริด แล้วทำการวัดค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในแนวทแยงมุม หรือที่มุมระบบกราวด์กริด ซึ่งในทุกกรณีศึกษานั้นจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน โดยสามารถแสดงให้เห็นตัวอย่างผลกระทบจากแรงดันเกินดังในรูปที่ 3, 5 และ 7 มาแล้วตามลำดับ ต่อจากนั้นจึงได้นำผลการจำลองไปทำการสรุปและแสดงให้เห็นเป็นตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 1 แรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$ เมื่อจ่ายกระแสผิดพระองค์ศูนย์กลางและที่มุมของระบบ

แรงดันเกินเมื่อจ่ายกระแสผิดพระองค์ตำแหน่งศูนย์กลางและที่มุมระบบกราวด์กริดขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$					
แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในแนวทแยงมุม			แรงดันเกินที่เกิดขึ้นตำแหน่งมุม		
Node	จ่ายที่กลาง (kV)	จ่ายที่มุม (kV)	Node	จ่ายที่กลาง (kV)	จ่ายที่มุม (kV)
0006	0.0037587	6.1406	0001	0.55687	6.1809
0002	0.0037591	0.00075519	0014	0.44407	0.00000014
0001	5.9205	0.00037823	0003	0.55694	0.0003166
0003	0.0075084	0.001507	0002	0.37837	0.0001509

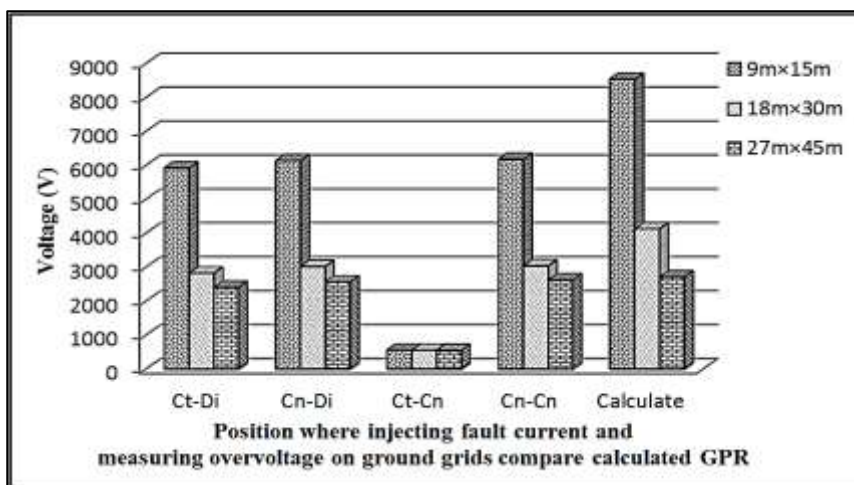
ตารางที่ 2 แรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาด $18 \times 30 \text{ m}^2$ เมื่อจ่ายกระแสผิดพระองค์ศูนย์กลางและที่มุมของระบบ

แรงดันเกินเมื่อจ่ายกระแสผิดพระองค์ตำแหน่งศูนย์กลางและที่มุมระบบกราวด์กริดขนาด $18 \times 30 \text{ m}^2$					
แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในแนวทแยงมุม			แรงดันเกินที่เกิดขึ้นตำแหน่งมุม		
Node	จ่ายที่กลาง (kV)	จ่ายที่มุม (kV)	Node	จ่ายที่กลาง (kV)	จ่ายที่มุม (kV)
0010	0.30348	3.0192	0002	0.37655	3.0378
0002	0.50885	0.51691	0069	0.55667	0.41263
0001	2.8237	0.51754	0005	0.16811	0.23572
0003	0.60318	0.51753	0003	0.55667	0.5405

ตารางที่ 3 แรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาด $27 \times 45 \text{ m}^2$ เมื่อจ่ายกระแสผิดพ่วงที่ศูนย์กลางและที่มุมของระบบ

แรงดันเกินเมื่อจ่ายกระแสผิดพ่วงที่ตำแหน่งศูนย์กลางและที่มุมระบบกราวด์กริดขนาด $27 \times 45 \text{ m}^2$					
แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในแนวทแยงมุม			แรงดันเกินที่เกิดขึ้นตำแหน่งมุม		
Node	จ่ายที่กลาง (kV)	จ่ายที่มุม (kV)	Node	จ่ายที่กลาง (kV)	จ่ายที่มุม (kV)
0011	0.38314	2.5683	0002	0.29729	2.6265
0002	0.55651	0.50845	0133	0.54529	0.34987
0004	2.3996	0.34749	0005	0.34145	0.09548
0005	0.46486	0.40233	0004	0.34638	0.51771

ต่อจากนั้นจากตารางที่ 1, 2 และ 3 สามารถนำไปแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ในแต่ละกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริด ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันในจุดที่จ่ายกระแสผิดพ่วงต่างกัน และวัดค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากกรณีศึกษาทั้งสามกรณีมาเปรียบเทียบผลกันรวมถึงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ Ct-Di คือ Center-Diagonal, Cn-Di คือ Corner-Diagonal, Ct-Cn คือ Center-Corner และ Cn-Cn คือ Corner-Corner โดย Ct หมายถึงศูนย์กลางระบบกราวด์กริด, Di หมายถึงแนวทแยงมุมระบบกราวด์กริด และ Cn หมายถึงมุมระบบกราวด์กริดตามลำดับ โดยจะสามารถแสดงผลกรณีศึกษาต่างๆ ได้ดังกราฟในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แรงดันเกินบนระบบกราวด์กริดซึ่งมีขนาดต่างกัน เปรียบเทียบกับการคำนวณ

จากการจำลองในกรณีศึกษาที่ 1 ระบบกราวด์กริดมีขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$ ผลกระทบความรุนแรงของแรงดันเกินจะมีค่าสูงสุดมากกว่าในทุกขนาดของระบบ โดยแรงดันเกินจะมีค่าสูงสุดเมื่อทำการจ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งมุมคือ 6.1804 kV โดยแสดงในรูปที่ 3(b) ซึ่งผลกระทบจากแรงดันเกินดังกล่าวมีสาเหตุมาจากรูปแบบของระบบซึ่งเป็นแบบ rectangular ที่มีความไม่สมมาตรบริเวณตำแหน่งมุมระบบ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุทำให้เมื่อเกิดกระแสผิดพ่วงขึ้นในระบบกระแสที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถกระจายผ่านระบบกราวด์กริดไหลลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็วทำให้แรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าในกรณีระบบที่มีขนาด $18 \times 30 \text{ m}^2$ คือ 50.84% และมีค่าสูงกว่าในระบบที่มีขนาด $27 \times 45 \text{ m}^2$ คือ 57.5% ณ ที่ตำแหน่งเดียวกัน ต่อจากนั้นจากการจำลองในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งระบบกราวด์กริดมีขนาด $18 \times 30 \text{ m}^2$ หรือคิดเป็นพื้นที่ระบบคือ 540 ตารางเมตร ผลกระทบจากแรงดันเกินจะมีค่าความรุนแรงน้อยกว่าในกรณีแรก โดยมีค่าอยู่ที่ 3.0378 kV ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5(b) ในกรณีที่จ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งมุม หรือมีค่าน้อยกว่าในกรณีศึกษาที่ 1 ประมาณ 50% ซึ่งเป็นระบบซึ่งมีขนาดเล็กกว่า โดยมีขนาดเพียง $9 \times 15 \text{ m}^2$ หรือคิดเป็นพื้นที่ของระบบคือ 135 ตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่าพื้นที่ระบบกราวด์กริดในกรณีศึกษาที่สองอยู่ 1 ใน 3 ไม่ว่าจะจ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าที่ตำแหน่งใดๆ ก็ตาม แต่ทั้งนี้เหตุผลที่สำคัญที่ทำให้ผลการจำลองเป็นในลักษณะเช่นนี้มาจากระบบกราวด์กริดในกรณีศึกษาที่ 2 มีขนาดใหญ่จึงทำให้กระแสผิดพ่วงสามารถไหลผ่านระบบ และกระจายลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้แรงดันเกินมีค่าลดลงกว่าในกรณีศึกษาที่ 1 ดังที่กล่าวมา สำหรับการจำลองในกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีสุดท้ายระบบกราวด์กริดจะมีขนาดใหญ่ที่สุดคือมีขนาด $27 \times 45 \text{ m}^2$ หรือมีพื้นที่คือ 1,215 ตารางเมตร โดยผลกระทบอันเกิดจากแรงดันเกินจะมีความรุนแรงต่ำสุดกว่าทั้งสองกรณีศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 2.6265 kV โดยแสดงดังรูปที่ 7(b) ในกรณีจ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งมุม และจากพื้นที่ของระบบในกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่กรณีศึกษาที่ 1 กว่า 8 เท่า ทั้งนี้ไม่ว่าจะจ่ายกระแสผิดพ่วงเข้าสู่ระบบ ณ ที่ตำแหน่งใดๆ ก็ตาม กระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นก็จะสามารถไหลผ่านระบบ และกระจายลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็วมากกว่าทั้งสองกรณีศึกษาดังนั้นจึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ค่าแรงดันเกินมีค่าต่ำสุดกว่าในทุกกรณีศึกษาที่กล่าวมา ทั้งนี้จากกราฟในรูปที่ 8 พบว่าผลจากการจำลองในทุกกรณีจะมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งในส่วนนี้เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้จำลองเป็นโปรแกรมทั่วไปสำหรับการศึกษาทางด้านวิศวกรรมที่มีข้อจำกัดซึ่งต่างจากโปรแกรมเฉพาะทาง ดังนั้นจึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองกับการคำนวณ นอกเหนือไปจากนั้นการจำลองในโปรแกรมเป็นไปเพื่อดูแนวโน้มผลกระทบที่เกิดขึ้นเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณ

5. สรุป

จากการจำลองทั้งสามกรณีศึกษาของระบบกราวด์กริดในรูปแบบ Rectangular ซึ่งมีแท่งหลักดินแบบกระจายคือมีขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$, $18 \times 30 \text{ m}^2$ และ $27 \times 45 \text{ m}^2$ ค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดเมื่อกระแสผิดพ่วงถูกจ่ายเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งมุม และในขณะเดียวกันจะมีค่าต่ำสุดเมื่อกระแสผิดพ่วงถูกจ่ายเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งศูนย์กลางระบบ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะสอดคล้องกันในทุกกรณีศึกษาหรือในทุกขนาดของระบบกราวด์กริดที่ทำการจำลอง นอกเหนือไปจากนั้นจากการจำลองพบว่าผลกระทบจากแรงดันเกินจะมีค่าสูงกว่าในทุกกรณี เมื่อจ่ายกระแสผิดพ่วงลงที่ตำแหน่งมุมของระบบที่มีขนาด $9 \times 15 \text{ m}^2$ ซึ่งเป็นระบบกราวด์กริดที่มีขนาดเล็กที่สุดดังรูปที่ 8 โดยสาเหตุมาจากระบบที่มีขนาดเล็กจึงทำให้กระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นไม่สามารถที่จะกระจายลงสู่ดินผ่านระบบได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งบริเวณจุดมุมของระบบเป็นจุดที่มีความไม่สมมาตรกันของตัวนำในระบบดังนั้นจึงทำให้เกิดการสะสมในรูปของกระแสผิดพ่วงปริมาณสูง จึงส่งผลกระทบทำให้เกิดเป็นแรงดันเกินปริมาณมหาศาลย้อนกลับขึ้นสู่ผิวดิน และอาจส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญภายในสถานีไฟฟ้าได้ และในทางตรงข้ามผลกระทบจากความรุนแรงของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในกรณีเดียวกันจะมีค่าต่ำสุดเมื่อระบบกราวด์กริดมีขนาด $27 \times 45 \text{ m}^2$ ซึ่งเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากระบบมีขนาดใหญ่ จึงทำให้กระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นสามารถกระจายลงสู่ดินผ่านตัวนำและแท่งหลักดินได้อย่างสะดวกโดยไม่ทำให้เกิดการสะสมของกระแสผิดพ่วง ดังนั้นความรุนแรงจากแรงดันเกินจึงมีค่าต่ำสุด และเช่นเดียวกันความรุนแรงจากแรงดันเกินจะมีค่าต่ำสุดเมื่อกระแสผิดพ่วงจ่ายเข้าสู่ตำแหน่งศูนย์กลางระบบ โดยมีค่าต่ำสุดกว่าในทุกกรณีศึกษาเมื่อระบบมีขนาด $27 \times 45 \text{ m}^2$ ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบมีขนาดใหญ่จึงทำให้กระแสผิดพ่วงที่เกิดขึ้นสามารถที่จะกระจายลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็วโดยผ่านตัวนำและแท่งหลักดินอีกทั้งบริเวณจุดศูนย์กลางของระบบเป็นจุดที่มีความสมมาตรดังนั้นการสะสมของกระแสผิดพ่วงจึงมีปริมาณน้อยกว่าในกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ทำให้ผลกระทบจากแรงดันเกินที่จะย้อนกลับขึ้นสู่ผิวดินจึงมีความรุนแรงน้อยที่สุด โดยที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นแนวโน้มของผลกระทบที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบกราวด์กริดให้มีความปลอดภัยและมีความเชื่อถือได้ต่อไป

References

- [1] Zukerman LG. Simplified analysis of rectangular grounding grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1979; PAS-98:1777-85.
- [2] Mazzetti C, Veca GM. Impulse behavior of ground electrodes. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1983; PAS-102:3148-56.

- [3] Meliopoulos AP, Moharam MG. Transient analysis of grounding systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1983;PAS-102:389-99.
- [4] Velazquez R, Mukhedkar D. Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1984;PAS-103:1314-22.
- [5] Menter FE, Grcev L. EMTP-based model for grounding system analysis. IEEE Transactions on Power Delivery 1994;9:1838-49.
- [6] Otero AF, Cidras J, Alamo JLD. Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique. IEEE transactions on power delivery 1999;14:873-8.
- [7] Prasad D, Sharma HC. Design of grounding system for high voltage substations. International Journal of Engineering and Advanced Technology 2013;2:61-5.
- [8] Nikolovski S, Knežević G, Baus Z. Assessment of step and touch voltages for different multilayer soil models of complex grounding grid. International Journal of Electrical and Computer Engineering 2016;6:1441-55.
- [9] Nikolovski SN, Baus Z, Knežević G. Frequency and time response of power plant grounding system exposed to lightning strike. International Journal of Electrical and Computer Engineering 2016;6:512-25.
- [10] Tabatabaei NM, Mortezaeei SR. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering 2010;2:45-9.
- [11] Vučković DD, Cvetković NN, Stojanović, MS. Study on a standard for grounding systems realization. Serbian Journal of Electrical Engineering 2012;9:393-401.
- [12] Aslam MU, Cheema MU, Cheema MB, Samran M. Design analysis and optimization of ground grid mesh of extra high voltage substation using an intelligent software. In The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering; 7-8 Nov. 2014; Semarang, Indonesia; 2014. p. 339-45.
- [13] Patel AB, Velani K. Digital application for grounding grid design calculations of substation. In International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies; 21-22 Apr. 2017; Vellore, India; 2017. p. 1-6.
- [14] Phayomhom A, Sirisumrannukul S, Kasirawat T. Safety design of ground grid in distribution substation: case study of metropolitan electricity authority's system. GMSARN International Journal 2010;4:67-74.

- [15] An American National Standard. IEEE guide for safety in AC substation grounding - ANSI/IEEE Std 80-2000. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2000.
- [16] Horkiet C, Katthisang T. Grounding. Bangkok: Charansanitwong Printing Ltd.; 2006. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



กรุง ลือวัฒนา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ทางด้านไฟฟ้ากำลัง E-mail: zaraburi@yahoo.com
สนใจงานวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบไฟฟ้ากำลัง และพลังงานทางเลือก

Article History:

Received: January 24, 2020

Revised: April 20, 2020

Accepted: April 27, 2020