

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Electric Field Effects to Environment around 500 kV High Voltage Transmission Line Using Finite Element Method

สุกัญญา ทัพสรี ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ อนันต์ อุ่นศิริไย่ กิตติ อัครกิจมงคล และ เพ็ญ เป่าละออ

Sukunya Tupsri, Thanatchai Kulworawanichpong, Anant Oonsivilai, Kitti Attakitmongkol and Padej Pao-la-or

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

โทรศัพท์ 0-4422-4407 โทรสาร 0-4422-4601

E-mail: padej@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สอง โดยได้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณนั้นรวมถึงบุคลากรที่ทำงานบริเวณพื้นด้านล่าง โดยได้พิจารณาสายส่งขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดียวและวงจรคู่ ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในประเทศไทย การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ ที่ระบบเป็น time harmonic พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากผลลัพท์ที่ได้จากการจำลอง ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดียวและวงจรคู่ ในระดับความสูง 1 m จากพื้นดินที่บุคลากรทำงานอยู่ จะมีค่าไม่เกินระดับของสนามไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ ICNIRP

Abstract

This paper presents a mathematical model of electric fields in transmission system which performs in second-order partial differential equation by analyzing the electric field distribution around high voltage transmission line. It effects to environment and workman on the ground when consider

single and double circuit 500 kV transmission line, which is the highest voltage in Thailand. The computer simulation is applied using finite element method that is developed by MATLAB program. The problem is considered to two dimensions, which is the time harmonic system with the graphical performance of electric field occurred. The simulation result of electric field that is from 500 kV HV transmission line both single and double circuit at high 1 m from ground that working human, the level of electric field which effects to human not over ICNIRP standard.

1. บทนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT) เป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในประเทศไทย ณ ขณะนี้ ส่งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์ ด้วยสายส่งวงจรคู่แล้วส่งต่อด้วยสายส่งวงจรเดียวจนถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก จังหวัดกรุงเทพฯ โดยผลของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของสายส่งซึ่งโดยปกติแล้วค่อนข้างจะคงที่ ดังนั้นกรณีพิจารณาสายส่งขนาด 500 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงมาก จึงเป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งในปริมาณที่สูง ซึ่ง

อาจเป็นอันตรายต่อบุคลากรที่ทำงานอยู่ด้านล่างได้ จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่ผู้ศึกษาได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาใช้ เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา เนื่องจากสามารถหาผลเฉลยได้แม้กระทั่งปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น และปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นการพิจารณาผลของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่พิจารณาระบบมีเพียงความถี่เดียว (time harmonic) และลักษณะของสายส่งที่รูปร่างมีความโค้งมน โดยขั้นตอนการแบ่งให้เป็นเอลิเมนต์ที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทำได้ค่อนข้างยาก จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการดำเนินการ

งานวิจัยสนามไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่ นั้น จะมุ่งเน้นไปที่การชี้วัดสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากสายส่งไฟฟ้า [1-3] หรืออาจมีบางงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมแต่เลือกใช้วิธีพื้นฐานในการคำนวณ [4-5] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทยทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ ที่อาจเป็นอันตรายต่อบุคลากรที่ทำงานอยู่ในระดับพื้นดินข้างล่าง โดยได้อ้างอิงมาตรฐานของ International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ซึ่งเป็นผู้กำหนดระดับของสนามไฟฟ้าที่ปลอดภัยต่อมนุษย์ การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติที่ระบบเป็น time harmonic พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

2. แบบจำลองสนามไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า (E) ที่กระจายตัวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการ

คลื่น (wave equation) ดังแสดงด้วยสมการที่ (1) [6-7] โดยมีรากฐานมาจากกฎของฟาราเดย์

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ซึ่ง ε คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (constant dielectric), μ คือค่าความซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability) และ σ คือสภาพนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity)

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาระบบเป็น time harmonic โดยสามารถแทน $\mathbf{E}$ อยู่ในรูปแบบเชิงซ้อน (complex form), $\mathbf{E} = E e^{j\omega t}$ [8] ดังนั้น

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = j\omega \mathbf{E} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{E}$$

ซึ่ง ω คือความถี่เชิงมุม สมการที่ (1) จึงกลายเป็น

$$\nabla^2 E - j\omega \sigma \mu E + \omega^2 \varepsilon \mu E = 0$$

เมื่อพิจารณาปัญหาเป็นแบบ 2 มิติในระนาบ (x,y) จึงได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial y} \right) - (j\omega \sigma - \omega^2 \varepsilon) E = 0 \quad (2)$$

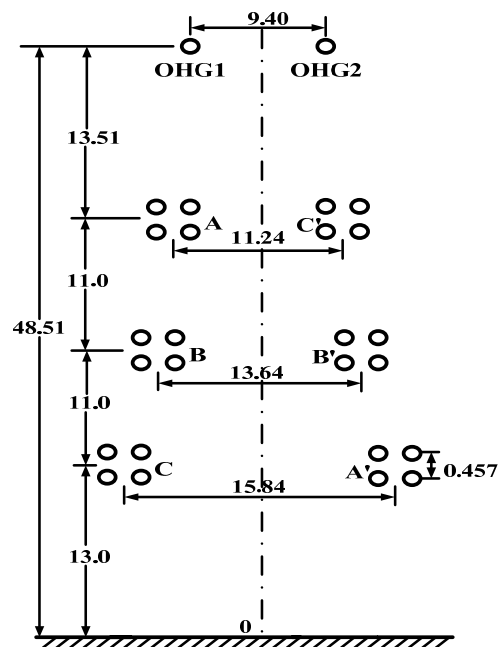
การหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) อันดับที่สองที่ปรากฏในสมการที่ (2) มีความยากและซับซ้อนอย่างมากในการแก้ปัญหา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการแก้สมการอนุพันธ์ย่อย [9]

3. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

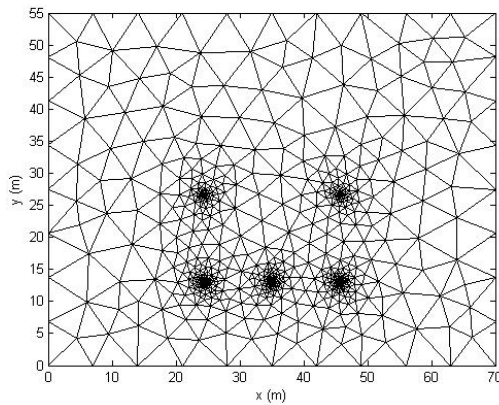
3.1 เอลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาระบบส่งจ่ายของ EGAT ได้แก่ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยว (single circuit) และวงจรคู่ (double circuit) โดยทั้งสองวงจรเป็นแบบสายควบชนิด 4 เส้น ซึ่งสามารถแสดงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าพร้อมมิติทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ที่พิจารณาได้ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยได้พิจารณาความสูงของสายส่งทั้งวงจรเดี่ยว

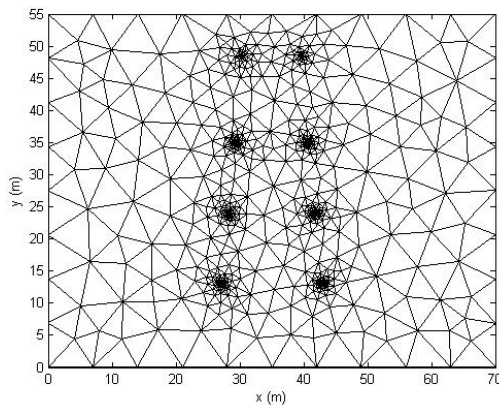
A schematic diagram of a transmission tower. The tower is represented by a vertical dashed line with a central vertical axis. The top of the tower is labeled 'OHG1' on the left and 'OHG2' on the right. Below the top, there are two sets of insulators, each labeled 'A' on the left and 'C'' on the right. Further down, there are two more sets of insulators, each labeled 'B' on the left and 'B'' on the right. At the bottom of the tower, there are two sets of insulators, each labeled 'C' on the left and 'A'' on the right. The tower is shown with a cross-section, indicating its width and the position of the insulators.



พื้นที่ศึกษาที่ใช้ในการจำลองผลค่าสนามไฟฟ้าด้วยการใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ จะครอบคลุมตั้งแต่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงข้างบนมาจนถึงระดับพื้นดินข้างล่าง ดังแสดงด้วยรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นการแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ด้วยรูปสามเหลี่ยมแบบเชิงเส้น (linear triangular elements) ตลอดพื้นที่หน้าตัดที่ศึกษา เมื่อพิจารณาาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรเดียวและวงจรคู่ ตามลำดับ



รูปที่ 3 อิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษาในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
วงจรเคียว



รูปที่ 4 อิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษาในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
วงจรคู่

3.2 การคำนวณงานทางไฟฟ้าในอิลิเมนต์

การสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนต์ได้ประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (weighted residual method) ของกาเลอร์คิน (Galerkin) ซึ่งวิธีนี้ฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function) จะมีค่าเท่ากับฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) [11-12] โดยสนามไฟฟ้าที่พิกัดใดๆ สามารถแสดงได้เป็น

$$E(x, y) = E_i N_i + E_j N_j + E_k N_k \quad (3)$$

ซึ่ง N_n , $n = i, j, k$ คือฟังก์ชันรูปร่างของอิลิเมนต์ และ E_n , $n = i, j, k$ คือค่าสนามไฟฟ้าของแต่ละจุดต่อ (i, j, k) ในแต่ละอิลิเมนต์ โดย

$$N_n = \frac{a_n + b_n x + c_n y}{2\Delta_e}$$

ซึ่ง Δ_e คือพื้นที่ของอิลิเมนต์สามเหลี่ยม และ

$$a_i = x_j y_k - x_k y_j, \quad b_i = y_j - y_k, \quad c_i = x_k - x_j$$

$$a_j = x_k y_i - x_i y_k, \quad b_j = y_k - y_i, \quad c_j = x_i - x_k$$

$$a_k = x_i y_j - x_j y_i, \quad b_k = y_i - y_j, \quad c_k = x_j - x_i$$

วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์คิน สามารถดำเนินการได้โดยตรงจากสมการที่ (2) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ย่อยที่กล่าวไว้ในข้างต้น แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์ (Ω) และกำหนดผลลัพธ์ที่ได้ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_{\Omega} N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial E}{\partial y} \right) \right) d\Omega - \int_{\Omega} N_n (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) E d\Omega = 0$$

โดยเมื่อดำเนินการอินทิเกรตสมบูรณ์แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[M + K]\{E\} = 0 \quad (4)$$

โดยที่

$$M = (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) \int_{\Omega} N_n N_m d\Omega$$

$$= \frac{(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon) \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

และ

$$K = \frac{1}{\mu} \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial N_m}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial N_m}{\partial y} \right) d\Omega$$

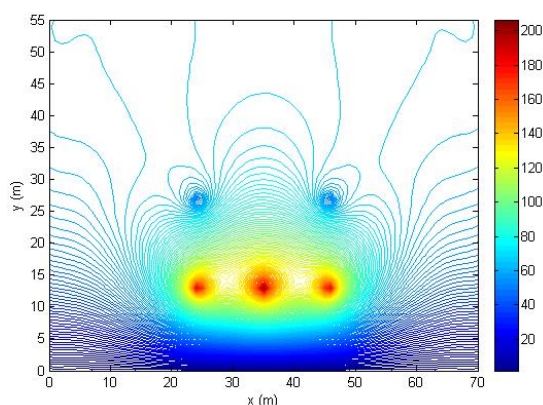
$$= \frac{1}{4\mu\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i b_i + c_i c_i & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_j b_j + c_j c_j & b_j b_j + c_j c_j & b_j b_k + c_j c_k \\ b_k b_k + c_k c_k & b_k b_k + c_k c_k & b_k b_k + c_k c_k \end{bmatrix}$$

3.3 เงื่อนไขขอบเขตและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

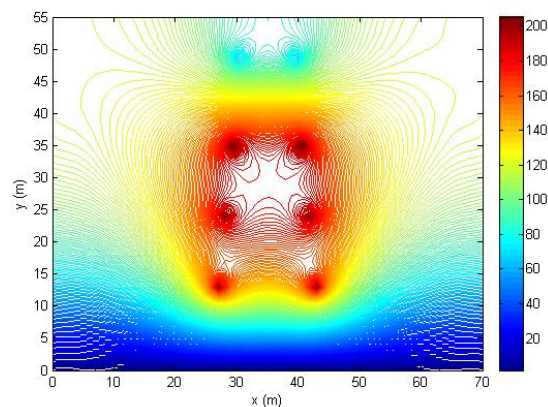
เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของค่าสนามไฟฟ้า บริเวณพื้นดินและสายดินเหนือศีรษะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น ศูนย์ ส่วนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตตรงวงรอบด้านนอกของสายส่งตัวนำทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ได้ประยุกต์ใช้งานวิจัยของ [4] และ [10] มาใช้ในการกำหนด ในการจำลอง ผลได้กำหนดให้ระบบมีความถี่ 50 Hz และสมมติให้สายส่งทั้งสองวงจรเป็นสายเปลือย (bare wire) ทำจากอะลูมิเนียม แกนเหล็ก (Aluminum Conductor Steel Reinforced: ACSR) ซึ่งมี สภาพนำทางไฟฟ้า (σ) = 0.8×10^7 S/m ความซาบซึมสัมพัทธ์ทางแม่เหล็ก (μ_r) = 300 โดยความซาบซึมทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m และค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) = 3.5 โดยไดอิเล็กทริกของอากาศ (ϵ_0) = 8.854×10^{-12} F/m [13]

4. ผลการจำลองและอภิปรายผล

การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้ MATLAB ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า พร้อมแสดงผลทางกราฟิกของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยการพล็อตเส้นโครงร่าง (contour) ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวตลอดพื้นที่หน้าตัดที่ศึกษา เมื่อพิจารณาในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรเดี่ยวและวงจรคู่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (kV/m) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรเดี่ยว

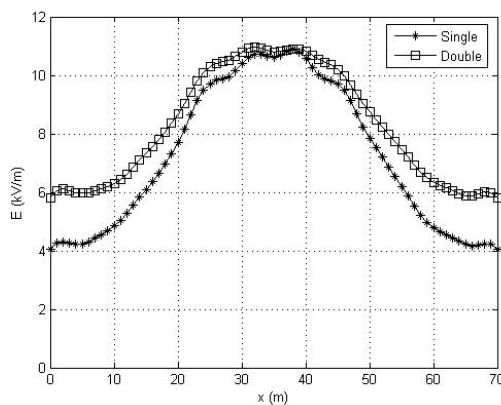


รูปที่ 6 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (kV/m) ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าวงจรคู่

จากรูปการคอนทัวร์ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ที่ปรากฏจะสังเกตเห็นว่า เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวออกไปทางด้านซ้ายและขวาด้านละ 35 m จากตำแหน่งบริเวณกลางแนวสายส่งไฟฟ้า (บริเวณกึ่งกลางรูป) การกระจายตัวจะมีความสมดุลตลอดทั้งพื้นที่ศึกษา โดยกรณีที่พิจารณาสายส่งวงจรคู่ ค่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่กระจายตัวตลอดสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่พิจารณาสายส่งวงจรเดี่ยว และเมื่อพิจารณาเฉพาะเจาะจงที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m ($y = 1$ m) ซึ่งเป็นบริเวณที่บุคลากรทำงานอยู่ จะได้ผลลัพธ์ค่าสนามไฟฟ้าทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่แสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปที่ 7 จะสังเกตเห็นว่า กราฟสนามไฟฟ้าทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งปกติ (normal curve) โดยจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งบริเวณกลางแนวสายส่งไฟฟ้า เพราะที่ตำแหน่งนี้จะมี การเสริมกันของสนามไฟฟ้ามากที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไปจากแนวสายส่งทั้งซ้ายและขวา

ตารางที่ 1 เป็นผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าตลอดระยะทาง x เมื่อพิจารณาสายส่งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ที่ความสูงจากระดับพื้นดิน 1 m ที่บุคลากรทำงานอยู่ โดยค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดระยะทาง x ของสายส่งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่เมื่อพิจารณาความสูงของสายส่งที่ตำแหน่งตัก ท้องช้างจะมีค่าเท่ากับ 7.19 kV/m และ 8.23 kV/m ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับของสนามไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อบุคลากรที่ทำงานอยู่ด้านล่าง ที่ถูกกำหนดโดย International

Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) [14] โดย ICNIRP ได้กำหนดระดับของสนามไฟฟ้าที่ปลอดภัยต่อมนุษย์ในสถานประกอบการที่อยู่ตลอดชั่วโมงการทำงานให้มีค่าสนามไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 kV/m และตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าที่ความสูงระดับต่างๆ เมื่อพิจารณาสายส่งแรงดันเดียวและสายส่งแรงดันคู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาที่ความสูงจากพื้นดินในระดับเดียวกันสายส่งแรงดันคู่จะมีปริมาณสนามไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งแรงดันเดียว ทั้งนี้เพราะสายส่งแรงดันคู่มีปริมาณตัวนำมากกว่าสายส่งแรงดันเดียว



รูปที่ 7 ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m) ที่ความสูง 1 m

5. สรุป

บทความนี้ได้ศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณนั้น รวมถึงบุคลากรที่ทำงานอยู่ด้านล่าง โดยได้พิจารณาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทั้งแรงดันเดียวและแรงดันคู่ ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทย การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV ทั้งแรงดันเดียวและแรงดันคู่ในระดับความสูง 1 m ที่บุคลากรทำงานอยู่ตลอดชั่วโมงการทำงาน จะมีค่าไม่เกินระดับของสนามไฟฟ้าที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งถูกกำหนดโดยมาตรฐานของ ICNIRP และเมื่อ

พิจารณาค่าสนามไฟฟ้าที่ความสูงจากพื้นดินในระดับต่างๆ สายส่งแรงดันคู่จะมีปริมาณสนามไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งแรงดันเดียว

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความสูง 1 m

x (m)	Single (kV/m)	Double (kV/m)	x (m)	Single (kV/m)	Double (kV/m)
1	4.07	5.82	36	10.60	10.80
2	4.28	6.07	37	10.69	10.82
3	4.31	6.11	38	10.82	10.87
4	4.26	6.06	39	10.88	10.91
5	4.21	6.00	40	10.80	10.89
6	4.23	5.97	41	10.58	10.82
7	4.31	6.00	42	10.27	10.68
8	4.43	6.05	43	10.01	10.55
9	4.55	6.11	44	9.88	10.45
10	4.69	6.18	45	9.81	10.36
11	4.85	6.28	46	9.70	10.20
12	5.05	6.43	47	9.48	9.97
13	5.29	6.63	48	9.13	9.68
14	5.56	6.87	49	8.69	9.35
15	5.84	7.12	50	8.23	9.03
16	6.10	7.35	51	7.85	8.74
17	6.36	7.57	52	7.52	8.49
18	6.65	7.81	53	7.20	8.24
19	6.96	8.07	54	6.87	7.99
20	7.32	8.36	55	6.53	7.72
21	7.72	8.67	56	6.20	7.46
22	8.17	9.03	57	5.86	7.19
23	8.67	9.42	58	5.53	6.93
24	9.13	9.79	59	5.23	6.69
25	9.50	10.10	60	4.98	6.50
26	9.72	10.30	61	4.79	6.35
27	9.83	10.41	62	4.65	6.24
28	9.87	10.46	63	4.55	6.15
29	9.96	10.51	64	4.44	6.06
30	10.16	10.65	65	4.32	5.96
31	10.41	10.81	66	4.22	5.89
32	10.61	10.92	67	4.17	5.88
33	10.71	10.97	68	4.18	5.93
34	10.71	10.94	69	4.23	6.00
35	10.64	10.86	70	4.22	6.00
Average				7.19	8.23

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของสนามไฟฟ้าที่ความสูงระดับต่างๆ

y (m)	Single (kV/m)	Double (kV/m)	y (m)	Single (kV/m)	Double (kV/m)
1	7.19	8.23	30	66.53	142.66
5	35.85	41.23	35	66.49	144.75
10	71.37	82.15	40	66.50	131.71
15	88.70	112.57	45	66.51	118.04
20	79.28	127.57	50	66.51	108.58
25	69.69	139.69	55	66.53	108.32

เอกสารอ้างอิง

[1] D.W. Deno and J.M. Silva, "Transmission Line Electric Field Shielding by Objects," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, pp.269-280, 1987.

[2] Y. Amano and Y. Sunaga, "Study on Reduction in Electric Field, Charged Voltage, Ion Current and Ion Density Under HVDC Transmission Lines by Parallel Shield Wires," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp.1351-1359, 1989.

[3] L. Carbonini, "A Shielded Multi-Wire Transmission Line for Susceptibility Measurements with Horizontally Polarized Electric Field," Proceedings of the Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility, IEEE, pp.33-38, 1992.

[4] Electric Power Research Institute, Transmission-Line Reference Book 345 kV and Above, Fred Weidner & Son Printers, Inc., USA, 1975.

[5] R. Maruthi, K. Karunakara, M.K. Kumari, K.M. Srinivasa, and Channakeshava, "Computation and Measurement of AC Electric and Magnetic Field Lateral Profiles and Longitudinal Contours under Transmission Lines," Proceedings of the International Conference on Energy Management and Power Delivery, IEEE, pp.209-214, 1995.

[6] M.V.K. Chari and S.J. Salon, Numerical Methods in Electromagnetism, Academic Press, USA, 2000.

[7] M. Weiner, Electromagnetic Analysis Using Transmission Line Variables, World Scientific Publishing, Singapore, 2001.

[8] C. Christopoulos, The Transmission-Line Modeling Method: TLM, IEEE Press, USA, 1995.

[9] P. Pao-la-or, T. Kulworawanichpong, S. Sujitjorn and S. Peaiyoung, "Distributions of Flux and Electromagnetic Force in Induction Motors: A Finite Element Approach," WSEAS Transactions on Systems, Vol. 5, No. 3, pp.617-624, 2006.

[10] P. Pin-anong, The Electromagnetic Field Effects Analysis which Interfere to Environment near the Overhead Transmission Lines and Case Study of Effects Reduction, M. Eng. Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2002.

[11] T.W. Preston, A.B.J. Reece and P.S. Sangha, "Induction Motor Analysis by Time-Stepping Techniques," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, No. 1, pp.471-474, 1988.

[12] B.T. Kim, B.I. Kwon and S.C. Park, "Reduction of Electromagnetic Force Harmonics in Asynchronous Traction Motor by Adapting the Rotor Slot Number," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp.3742-3744, 1999.

[13] Jr.W.H. Hayt and J.A. Buck, Engineering Electromagnetics (7th edition), McGraw-Hill, Singapore, 2006.

[14] International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," Health Phys., Vol. 74, No. 4, pp.494-522, 1998.