

บทที่ 3

ผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อผู้ปฏิบัติงาน ขณะทำงานโดยไม่ปิดระบบการจ่ายไฟ

3.1 กล่าวนำ

ในการซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าในปัจจุบันของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยมากจะกระทำในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน หรือไม่ได้ดับไฟนั่นเอง เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าจะไม่เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟในขณะนั้นๆ ดังนั้นความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติในการซ่อมบำรุงหน้างานบริเวณสายส่งไฟแรงสูงที่กำลังมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น จึงเป็นสิ่งที่ถูกคำนึงถึงในระดับต้นๆ เช่นกัน การใช้เครื่องมือต่างๆ การตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ทำงาน และวิธีการปฏิบัติงานหน้างานจะถูกประเมินค่า เพื่อให้เกิดความมั่นใจถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยกระบวนการของการประเมินค่านั้น จะคำนึงถึงการนำไปใช้ได้จริง ความสะดวกของเครื่องมือ ความง่ายของวิธีการปฏิบัติงาน และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อการป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้านั่นเอง ตัวอย่างเช่น ผู้ปฏิบัติงานควรใช้ FRP Hot Stick , เชือก หรือบันได ที่เป็นฉนวนในจากเสาส่งไฟฟ้าที่ส่งไฟฟ้าก่อนที่ปฏิบัติการนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ สิ่งแรกที่ต้องมั่นใจคือ การใช้ FRP Hot Stick, เชือก และบันไดนั้น ต้องไม่ส่งผลให้เกิดการเพี้ยนของค่ากระแสไฟ ที่ทำให้เกิดการไหลของไฟฟ้าผ่านผู้ปฏิบัติงาน ที่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ระบบสายส่งไฟฟ้า และความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศได้ ดังนั้น ในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงานโดยการหาค่า Electric field จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งเช่นกัน งานวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธี Charge Simulation Method สำหรับการคำนวณค่า Electric field และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะการซ่อมบำรุงหน้างาน ของสายไฟ 230 กิโลโวลต์ ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงโรงไฟฟ้าบางปะกง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อใช้บันไดและ FRP Hot Stick ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ซึ่งผ่านการทดสอบด้วย อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบใช้ทำงานกับระบบไฟฟ้าแรงสูงสำหรับการทำงานโดยไม่ปิดระบบการจ่ายไฟ ซึ่งจะพิจารณาในหลากหลายกรณี รวมทั้งลักษณะทิศทางของบันได และความเสียหายของ Suspensions Insulator ปริมาณกระแสไฟที่นำมาคิด จะรวมถึงความทนทานต่อกระแสไฟ และค่ากระแสที่ไหลสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้จริงมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ จะเห็นถึงความสอดคล้องกันได้อย่างดี

3.1 วิธีการที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า

Electric field บริเวณใกล้เสาส่ง, ฉนวน หรือวัตถุอื่นใด ล้วนมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ. ภายใน Span สามารถประมาณเป็นแบบ 2 มิติได้ อย่างไรก็ดี การประมาณแบบ 2 มิตินี้ อาจ

ผิดพลาดได้ในอัตราสูง เช่น บัณฑิต หรือ ร่างกายของผู้ปฏิบัติงานอยู่ใกล้กัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณแบบ 3 มิติเป็นเกณฑ์ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ บริเวณที่เราสนใจจะหาค่ากระแสไฟฟ้าต้องเป็นบริเวณภายนอกสื่อไฟฟ้า หรือเสาส่ง โดยจะไม่จำกัดพื้นที่บริเวณนี้ ก็สามารถมีค่าได้มากมายไม่รู้จบ ด้วยเหตุนี้ การใช้ Domain-type method เช่น Finite Difference หรือ Finite Element Method จะเป็นวิธีการที่ยาก ดังนั้นจะใช้ Charge Simulation Method (CSM) ในการคำนวณแทน

การคำนวณแบบ CSM จะมีหลายขั้นตอน เริ่มแรก Simulation Charge, q_i ใช้แทนค่าขั้วไฟฟ้าซึ่งรวมถึงขั้วที่ลอยอยู่ด้วย ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณหาตัวเอง จุดจับตัวจะอยู่บนบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้านั้นเอง ดังนั้นจะพิจารณาขั้วที่มีพลังงานมีแรงดันไฟฟ้าเป็น V ซึ่งต่อลงพื้นดิน และอีกขั้วที่ลอยอยู่มีแรงดัน ϕ ซึ่งไม่ทราบค่า. ให้ n_1 แทนขั้วที่มีพลังงาน ส่วน n_2 แทนอีกขั้วที่ลอยอยู่, m_1 แทนจุดจับตัว(matching point) อยู่บนขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงาน ส่วน m_2 แทนจุดจับตัวอยู่บนอีกขั้วที่ลอยอยู่ ดังนั้นจะได้ $n_c = n_1 + n_2$ และ $m_b = m_1 + m_2$ (ส่วนมากจะกำหนดให้ $n_1 = m_1$ และ $n_2 = m_2$). ตัวอย่างเช่น ที่จุดจับตัว i บนขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงาน

$$V = \sum_{l=1}^{n_1} P_{il} q_l + \sum_{l=n_1+1}^{n_c} P_{il} q_l = \sum_{l=1}^{n_c} P_{il} q_l, \quad i = 1, \dots, m_1 \quad (3.1)$$

เมื่อ p_{il} แทนสัมประสิทธิ์ความดันไฟฟ้า (potential coefficients). ในทำนองเดียวกัน จุด i บนขั้วไฟฟ้าที่มีลอยอยู่

$$\phi = \sum_{l=1}^{n_1} P_{il} q_l + \sum_{l=n_1+1}^{n_c} P_{il} q_l = \sum_{l=1}^{n_c} P_{il} q_l, \quad i = m_1+1, \dots, m_b \quad (3.2)$$

$$\sum_{l=n_1+1}^{n_c} q_l = 0 \text{ or } q_{n_c} = - \sum_{l=n_1+1}^{n_c-1} q_l \quad (3.3)$$

แทนค่าสมการที่ 3 ใน สมการที่ 1 และ 2 จะได้

$$\sum_{l=1}^{n_1} P_{il} q_l + \sum_{l=n_1+1}^{n_c-1} (p_{il} - p_{in_c}) q_l = V, \quad i = 1, \dots, m_1 \quad (3.4)$$

$$\sum_{l=1}^{n_1} P_{il} q_l + \sum_{l=n_1+1}^{n_c-1} (p_{il} - p_{in_c}) q_l = \phi, \quad i = m_1+1, \dots, m_b \quad (3.5)$$

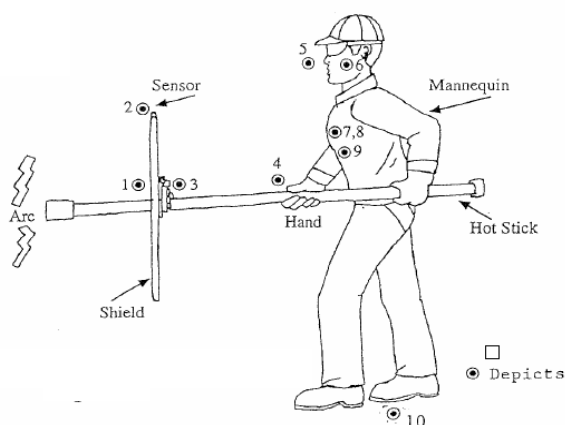
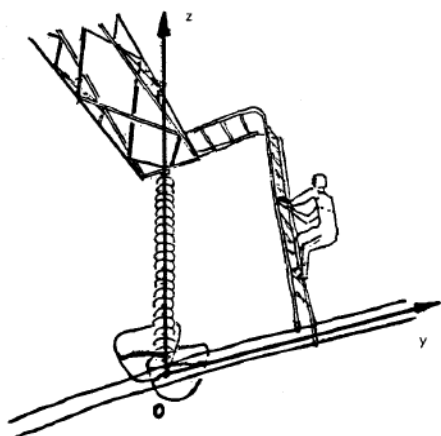
จัดให้เหมาะสมโดยจัดเอาขั้วไฟฟ้าที่ปรากฏลบออกเป็นคู่ๆในสมการที่ 5 จะได้

$$\sum_{l=n_1+1}^{n_1} (p_{il} - p_{i+1,l}) q_l + \sum_{l=n_1+1}^{n_c-1} (p_{il} - p_{in_c} - p_{i+1,n_c}) q_l = 0, \dots \quad (3.6)$$

$$i = m_1+1, \dots, m_b - 1$$

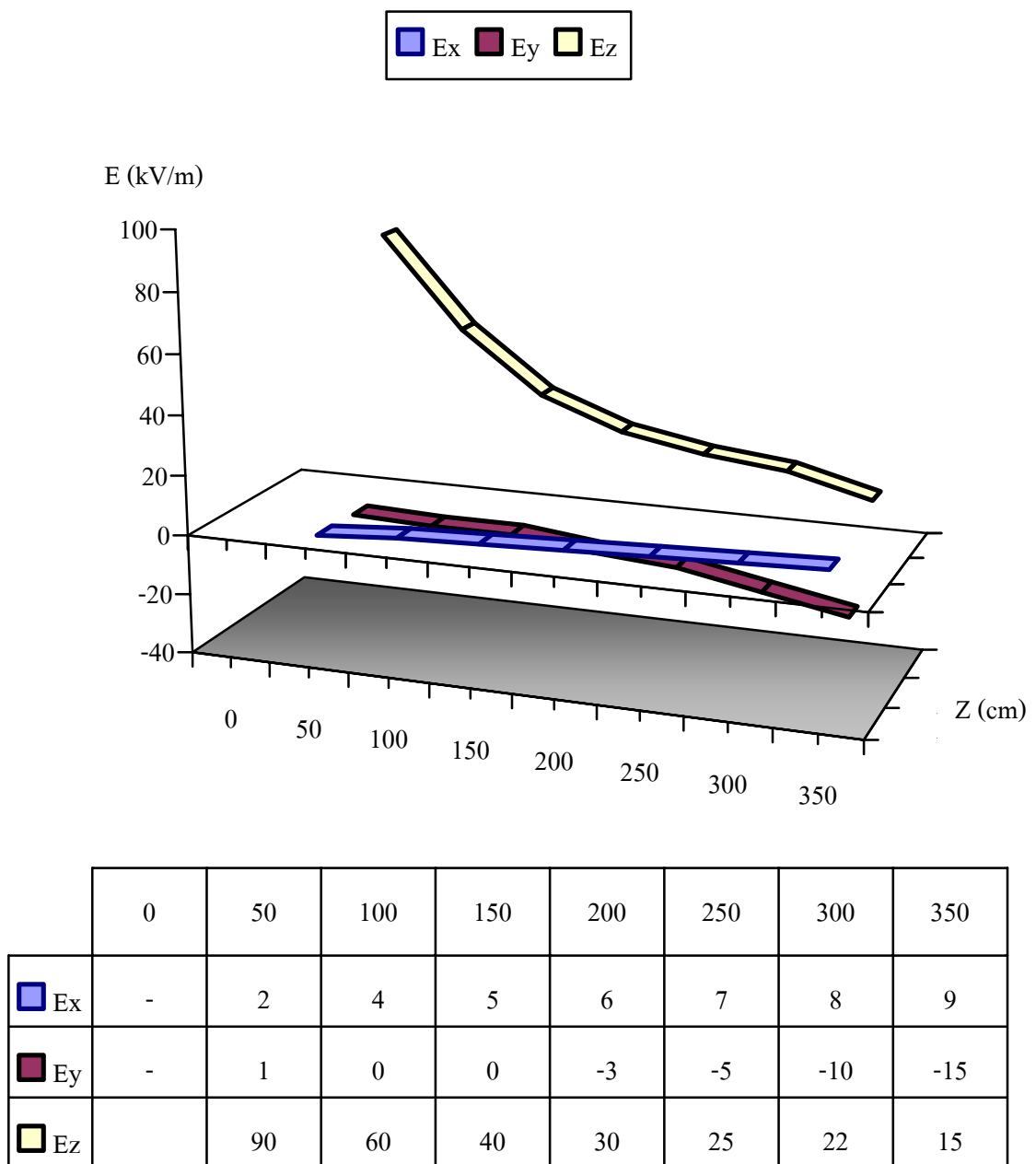
สมการที่ (4) กับ (6) จะถูกใช้ร่วมกันในการคำนวณค่า Simulating Charge $q_{i,l} = 1, \dots, m_i - 1$ เมื่อคำนวณได้ค่าประจุ จะสามารถหาค่าความหนาแน่นต่อกระแสไฟฟ้า ณ จุดใดๆบนบริเวณที่เราสนใจได้ รูปร่างที่แตกต่างกันของ Simulating Charge สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางเรขาคณิตได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้ เส้นตรง, วงรี, วงแหวน, สี่เหลี่ยมผืนผ้า. สำหรับกรณีของ Insulator String กับจำนวนทั้งหมดของ Floating electrodes ซึ่งแทนด้วย NX , NC แทน Simulation charges และ MB แทน Matching Points จะได้สมการออกมาในทำนองเดียวกัน ดังนั้นจำนวนสมการทั้งหมดเป็น $MB - NX$ และ จำนวน Unknown charges ทั้งหมดเป็น $NC - NX$ (โดยส่วนมากจะกำหนดให้ $MB = NC$ เพื่อความสะดวก)

CSM ที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถประยุกต์เข้ากับตัวอย่าง Suspension Insulator String ของสายไฟ 220 kV ที่แสดงในรูปที่ 17 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบันไดที่เป็นฉนวน จาก cross-arm ไปยังสายไฟ และช่วยในการซ่อมบำรุงหน้างานของผู้ปฏิบัติงาน รูปที่ 17 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบ 3 ส่วนของ electric field strength (ความหนาแน่นต่อกระแสไฟฟ้า) กับ Insulator String จะเห็นได้ว่าตำแหน่งในแนวตั้งของบันไดจะมีทิศทางเดียวกับส่วนประกอบหลักของ field (คือส่วน Z) ใกล้กับสายไฟเหนี่ยวนำ ค่า Z อาจมีค่าเกินกว่า 100 kV/m ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นมีค่าต่ำมาก ซึ่งมีความสำคัญต่อการประมาณค่า flashover บนพื้นผิวของบันได



รูปที่ 3.1 Insulating ladder for live line maintenance

Profile of field strength component E_x , E_y and E_z along insulator length



รูปที่ 3.2 Profiles of field strength components E_x , E_y and E_z

3.2 การคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน

เมื่อร่างการแทน Electric field (E) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายจะเป็น

$$\vec{J} = j2\pi f \tau_0 \vec{E} \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$

f = ความถี่

ϵ_0 = Dielectric

E = electric field strengths บนร่างกาย

ค่า E สามารถคำนวณโดยใช้ CSM ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น กระแสไฟฟ้า I ที่ผ่านบนพื้นที่ผิว S ของร่างกายจะเป็น

$$I = j2\pi f \oint \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

แต่จากทฤษฎีของ Gauss บนพื้นผิวปิด $\epsilon_0 \vec{E}$ จะเท่ากับประจุที่เนบอยู่บนพื้นผิวทั้งหมด $\sum_{l=1}^{nc} ql$

ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I = j2\pi f \sum_{l=1}^{nc} ql \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

เมื่อ $ql, l = 1$ เป็น n_c และใช้ในการหา

สมการ (9) จะถูกนำมาใช้เมื่อ.....ได้มาจากขั้นตอนแรกของ CSM

ถ้าผู้ปฏิบัติงานได้สวมใส่เสื้อผ้าที่ป้องกันการนำไฟฟ้าเราสามารถแบ่งร่างกายของผู้ปฏิบัติงานเป็น 2 ส่วน โดยให้ n_1 แทนส่วนบน และ n_2 แทนส่วนล่างของร่างกายดังนั้นกระแสไฟฟ้าหนึ่งยวนำไหลผ่านตัวของผู้ปฏิบัติงานคิดเป็น

$$I_v = \frac{1}{2} j2\pi f \left(\sum_{l=1}^{n_1} ql - \sum_{l=1}^{n_2} ql \right) \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

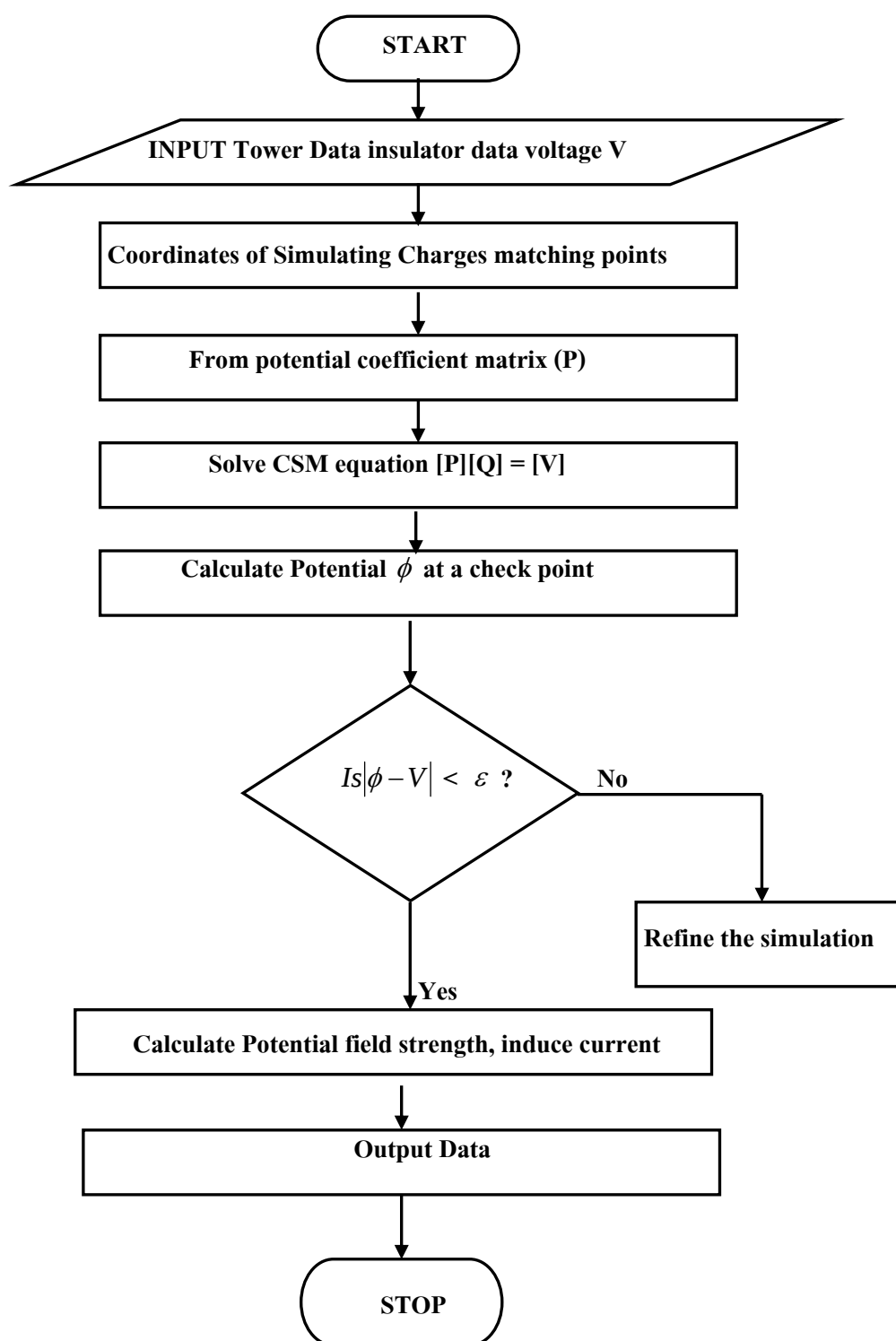
เมื่อไม่มีการเชื่อมของกระแสไฟฟ้าถึง Worker ร่างการจะเปรียบเสมือน floating electrode

$$\sum_{l=1}^{m_1} ql + \sum_{l=1}^{n_2} ql = 0 \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

แทนค่าในสมการที่ 10 จะได้

$$I_v = j2\pi f \sum_{l=1}^{nc} ql \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

ในการทำนองเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่ผ่านพื้นที่อื่นของร่างกาย เช่น คอ หรือ ขา สามารถคำนวณได้ดังสมการข้างต้นแผนภาพสำหรับคำนวณหากระแสเหนี่ยวนำ I แสดงในรูปที่ 43 สำหรับตัวอย่างการคำนวณ แสดงถึงลักษณะของ I กับตำแหน่งบนบันได ฅ. ความยาวต่างๆ เมื่อผู้ปฏิบัติงานเกาะอยู่บนบันได ข้อยกเว้นกระแสไฟฟ้าจะเป็นค่าสูงสุดในตำแหน่งที่ใกล้กับตัวนำกระแสไฟฟ้า (ดังรูปที่ 17) และจะลดลงเมื่อเข้าไปใกล้ Cross-arm Tower



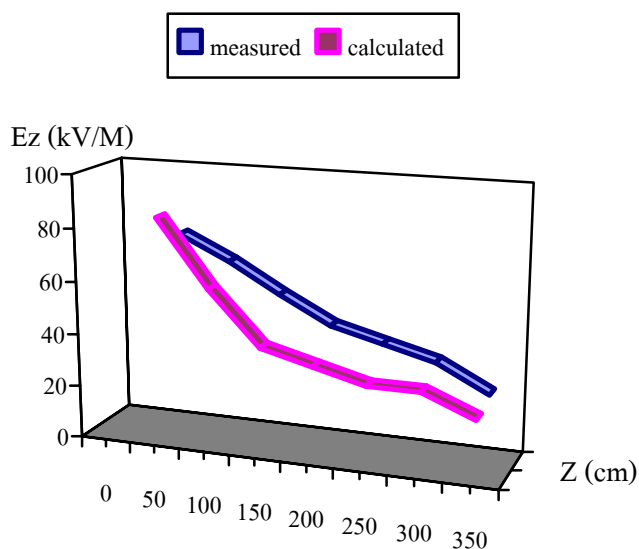
3.3 การวัดค่า

เพื่อยืนยันถึงเหตุผลต่างๆ วิธีการคำนวณหา Electric Field และกระแสเหนี่ยวนำ การวัดค่าจะกระทำบนสายไฟขนาด 230 kV ที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงโรงไฟฟ้าพลังความร้อนบางปะกง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นแบบเปลือย Field strength ถูกวัดโดยใช้ทรงกลมขนาดเล็ก เชื่อมผ่าน Optical Fiber ถึง meter (ดังรูปที่ 3.3). Probe จะถูกเก็บไว้ภายใน Plastic String ในบริเวณใกล้ Insulator String ที่ซึ่งมักเป็นตำแหน่งของผู้ปฏิบัติงานอยู่ ซึ่ง Probe จะถูกวัดค่าได้หลายรูปแบบ



รูปที่ 3.3 Field probe

Profile of field strength



	0	50	100	150	200	250	300	350
measured	-	75	66	55	45	40	35	25
calculated	-	85	60	40	35	30	30	22

รูปที่ 3.4 Profile of field strength E_z versus location of worker.

จากกราฟรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า ข้อมูลที่วัดได้กับผลที่คำนวณได้นั้นไปในทิศทางเดียวกัน ความเป็นไปได้ของการเพิ่มขึ้นของ Field เนื่องจาก บันไดแบบ Epoxy Fiberglass tube สามารถ ประเมินได้จากการวัดค่าจาก Insulator string เมื่อมี และ ไม่มีบันได โดยค่าที่วัดได้ที่มีค่าใกล้เคียง กับค่าที่คำนวณได้นั้น ชี้ให้เห็นว่า บันไดไม่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าของ Floating Electrodes (Insulator caps) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า Electric field ไม่มีนัยสำคัญที่รบกวนบันได เนื่องจากค่า Electric field ที่วัดได้โดยรอบ โดยใช้ CSM โดยไม่มีบันได จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ ได้ เมื่อมีบันได ผลที่ได้จากขั้นตอนการพิสูจน์นี้ หนึ่งอย่างที่บอกได้คือ สามารถบอกได้อย่างหนึ่ง ว่า สามารถ ใช้ CSM เพื่อหาค่าที่ถูกต้องของ E ที่จำเป็นต่อการคำนวณค่ากระแสเหนี่ยวนำ สุดท้าย เมื่อวัดกระแสเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า โดยการใช้ไมโครมิเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆของบันได เปรียบเทียบค่าวัดได้กับค่าที่คำนวณได้ จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในบริเวณใกล้เคียงกับ Line conductors กระแสเหนี่ยวนำ I ในรูป μA จะมีค่าประมาณ Ambient (unperturbed) Electric Field ในรูป kV/m

$$I = k E_z \text{ เมื่อ } k=2.7\sim 3.7 \dots\dots\dots(3.13)$$

ค่าที่ได้จะเป็นค่าที่ต่ำและให้กระแสไฟในช่วง $100\sim 200 \mu A$ บนตำแหน่งบันได เมื่อร่างกาย สัมผัสกับสายไฟ 230 KV กระแสไฟที่วัดได้ที่เอว จะเพิ่มขึ้นถึง $845 \mu A$ และเปรียบเทียบได้เป็น อย่างดีกับค่าที่คำนวณได้ คือ $880 \mu A$ และกระแสที่ไหลผ่านขามีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.37 mA

3.4 ผลของ Damaged Insulators

งานในการซ่อมบำรุงหน้างานบริเวณสายไฟแรงสูงที่กำลังมีกระแสไฟฟ้าผ่านนั้น บ่อยครั้งที่ทำงานบน String ที่มี Insulators ที่เสีย (Damaged Insulators) อยู่ด้วย ซึ่งทำให้เกิด คำถามที่ว่า Insulators ที่เสียนี้ ส่งผลต่อความปลอดภัยของการทำงานหรือไม่ เพื่อตอบคำถามนี้ จึง มีการทำการทดสอบความเพิ่มขึ้นของ field เนื่องจาก Damaged Insulators โดยพบว่าเมื่อเจอ Damaged Insulators 6-15 ตัว จาก Insulators ทั้งหมด 21 ตัว จะเห็นว่า Damaged Insulators มีผล ต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าของ electric field บนบันไดห่าง จาก string 2 เมตร ไม่มีนัยสำคัญอันเนื่องมาจาก Damaged Insulators

ตารางที่ 2 Effect of damaged insulators on E_z along the ladder.

String Condition	E_z (kV/m)	
	Top of Ladder	Bottom of Ladder
21 healthy insulators	16.0	96.5
bottom 6 healthy	12.4	104
top 6 healthy	20.5	8701

ดังนั้นจะเห็นว่า CSM มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณค่า fields และกระแสเหนี่ยวนำ แม้ในกรณีที่ Insulators หลายตัวใน string เสีย

3.5 การพิจารณาถึงความปลอดภัย

ตัวเลขที่ได้มาจากการคำนวณนั้น อยู่ในขอบเขตความปลอดภัยที่ยอมรับได้ ของการซ่อมบำรุงหน้างานบริเวณสายไฟแรงสูงที่กำลังมีกระแสไฟฟ้าผ่าน ดังเช่นที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ชิ้นส่วนในแนวตั้งของบันไดเป็นวัตถุที่มีค่า Electric field สูง ตลอดทั้งความยาวบันได เมื่อเทียบได้กับแกน Z ของ field. นี่อาจทำให้เกิด Flashover บริเวณพื้นผิวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวันที่มีความชื้นสูง และอาจกล่าวได้ว่า FRP Hot Stick และ บันไดที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน (Insulating ladder) อาจจะไม่เป็นที่น่าพอใจนัก เมื่อเจอสภาพอากาศที่มีความชื้นสูง

จากค่ากระแสเหนี่ยวนำที่คำนวณได้นั้น ชี้ให้เห็นว่า การป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ของเสื้อผ้า หรือการสวมใส่ชุดที่ป้องกันการเป็นสื่อทางไฟฟ้า นั้นมีความจำเป็นและจะช่วยลดอันตรายรวมถึงความบาดเจ็บในกรณีที่เกิดการ Flashover ผ่านตัวผู้ปฏิบัติงานได้



รูปที่ 3.5 Line Man Harness ที่ใช้กับงาน 500 kV. Bare Hand ของ กฟผ.

3.6 สรุปผลกระทบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่กำลังที่มีต่อผู้ปฏิบัติงานโดยไม่ ปีระบบการจ่ายไฟ

งานวิจัยในส่วนนี้ได้กล่าวถึงวิธีการประมาณค่า Electric fields และ กระแสเหนี่ยวนำ (induced currents) ซึ่งจำเป็นต้องทำการหาค่าและประเมินถึงอุปกรณ์เครื่องมือ รวมถึงขั้นตอนการปฏิบัติของการซ่อมบำรุงหน่วยงานบริเวณสายไฟแรงสูงที่กำลังมีกระแสไฟฟ้าผ่าน. CSM สามารถนำมาใช้สำหรับการคำนวณหา field รวมไปถึงกรณีที่มี floating electrodes. ผลการคำนวณค่า Field ที่ได้ตลอดบันทึกและในขณะใช้งาน FRP Hot Stick ซ่อมบำรุงอุปกรณ์หรือเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยไม่ดับไฟ นั้นมีประสิทธิภาพในความแม่นยำ แม้ใน string จะมี damaged insulators อยู่ในจำนวนที่มากก็ตาม โดยค่าความแม่นยำได้จากการเปรียบกับค่าที่ได้จากวิธีการวัดข้อมูลนั่นเอง. ผลที่ได้จากการใช้ Yield Probe ขนาดเล็ก สามารถระบุได้ถึงสภาพที่อาจจะไม่ปลอดภัย ต่อการซ่อมบำรุงหน่วยงาน บริเวณสายไฟแรงสูงที่กำลังมีกระแสไฟฟ้าผ่าน และจากการใช้ตัวตรวจสอบ FRP Hot Stick