

การประเมินและวิธีการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวมากสำหรับวงจรเดียวในระบบแรงดันปานกลาง

Evaluation and solutions for induced voltage on the sheath of long underground cables in single-circuit medium voltage systems

บัณฑิต ฤทธิทอง,^{1*}

Bundit Rittong,^{1*}

Received: 3 September 2024 ; Revised: 2 October 2024 ; Accepted: 6 November 2024

บทคัดย่อ

รูปแบบการวางเคเบิลใต้ดินมีผลต่อการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสายต้องจำกัดค่าไม่เกิน 65 V ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน บทความนี้ นำเสนอการประเมินแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินสำหรับวงจรเดียวในระบบแรงดันปานกลาง 2 รูปแบบ คือ การวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมและวางสายแบบในแนวเดียวกัน โดยที่เปลือกของสายต่อลงดินแบบทั้งสองปลาย ผลการศึกษาพบว่า แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นของแบบรูปสามเหลี่ยมมีค่าน้อยและปลอดภัยกว่าแบบในแนวเดียวกัน และแนวทางปฏิบัติในการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐาน คือ การบาลานซ์โหลดในแต่ละสายป้อนให้มีค่าใกล้เคียงกันโดยคำนึงถึงระยะสายที่ใช้ต้องสั้นที่สุด และการติดตั้งสายดินขนานไปกับสายเฟสพร้อมตัวจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำ

คำสำคัญ: แรงดันเหนี่ยวนำ, เคเบิลใต้ดิน, วงจรเดียว

Abstract

The layout of underground cables affects the induced voltage at the sheath of the cable, which must be limited to no more than 65 V according to the electrical installation standards for Thailand to ensure safety for the operators. This paper presents the evaluation of the induced voltage at the sheath of underground cables for a single-circuit in a medium-voltage system in two formations: trefoil and flat formation with the sheath of the cable grounded at both ends. The results of the study found that the induced voltage of the trefoil formation is less and safer than the flat formation, and the practice of solving the problem of induced voltage exceeding the standard is to balance the load in each feeder to have a similar value, taking into account the shortest cable length, and install the ground wire parallel to the phase wire with a sheath voltage limiter.

Keywords: Induced voltage, underground cable, single-circuit

¹ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล-วิศวกรรมระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 60 หมู่ 3 ถนนสายเอเชีย ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

¹ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

* Corresponding author: Bundit Rittong, Email: bundit.r@rmutsb.ac.th

บทนำ

การพัฒนาาระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยในเขตเมืองใหญ่ และพื้นที่เศรษฐกิจสำคัญที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ทางกรไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ได้แก่ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้ดำเนินโครงการเปลี่ยนระบบไฟฟ้าจากสายอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดินอย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ ปรับปรุงภูมิทัศน์ เพิ่มความปลอดภัย ความมั่นคง ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า และรองรับการใช้โหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต อีกทั้งการนำสายไฟฟ้าลงใต้ดินนั้นช่วยลดอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากสายไฟฟ้าที่ตกหล่นหรือชำรุดจากเสาไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ในสถานประกอบขนาดใหญ่ที่อยู่ในเขตเมืองเศรษฐกิจที่ใช้โหลดขนาดใหญ่และมีสถานีไฟฟ้าเป็นของตนเองส่วนใหญ่จะดำเนินการเปลี่ยนระบบไฟฟ้าจากสายอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดินมากขึ้น รูปแบบการจัดวางสายมีความสำคัญในประเด็นเรื่องแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสาย ซึ่งค่าแรงดันเหนี่ยวนำนี้ต้องไม่เกิน 65 V ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน การจัดวางสายสามารถจัดได้ 2 รูปแบบ คือ การวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม (Trefoil formation) และการวางสายแบบในแนวเดียวกัน (Flat formation) ซึ่งแต่ละรูปแบบส่งผลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสายต่างกัน และที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินต้องมีการต่อลงดินเพื่อให้สนามไฟฟ้าจากตัวนำกระจายไปยังสายต่อลงดินอย่างสม่ำเสมอ ป้องกันการเกิดเบรคดาวน์ที่ฉนวนของสาย อีกทั้ง รูปแบบการต่อลงดินนี้มีความสำคัญในการแก้ปัญหาของแรงดันเหนี่ยวนำ โดยรูปแบบการต่อลงดินของเคเบิลใต้ดิน สามารถทำได้ 5 วิธี คือ 1) การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point bonding) 2) การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-ends bonding) 3) การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point bonding) 4) การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points bonding) และ 5) การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-bonding) (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548; สายงานวิศวกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2560)

การประยุกต์ใช้งานการต่อลงดินแต่ละรูปแบบสำหรับประเทศไทยนั้น แบ่งออกเป็นตามระดับแรงดัน โดยระบบ 69/115 kV การต่อลงดินทำได้ 3 วิธี คือ การต่อลงดินข้างเดียว ใช้สำหรับเคเบิลใต้ดินระยะทางไม่เกิน 500 m การต่อลงดินแบบกึ่งกลางใช้ในระยะทางที่มากกว่า 500 m แต่ไม่เกิน 1,000 m และการต่อลงดินแบบไขว้ใช้ในระยะทางที่มากกว่า 1,000 m สำหรับในระบบ 22-33 kV การต่อลงดินทำได้ 3 วิธี คือ การต่อลงดินข้างเดียว การต่อลงดินทั้งสองปลาย ซึ่งระยะทางของ

สายต้องไม่เกิน 500 m และในกรณีที่มีความยาวของสายมากกว่า 500 m จะต้องใช้การต่อลงดินแบบหลายจุด (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548; สายงานวิศวกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2560)

วิธีการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสำหรับการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม และแบบในแนวเดียวกันของวงจรเดียว และวงจรคู่ขนานโดย (Shaban *et al.*, 2014) โดยทำการศึกษาเพิ่มเติมในการไขว้สลับสายของวงจรเดียวด้วยการต่อลงดินแบบไขว้ใน (Shaban *et al.*, 2015) และได้ขยายผลการศึกษาไปยังวงจรคู่การต่อลงดินแบบข้างเดียวและแบบหลายจุดใน (Shaban *et al.*, 2015) และ (Guevara *et al.*, 2024) นำเสนอการศึกษาในวงจรเดียวด้วยการต่อลงดิน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบไขว้ แบบผสมระหว่างไขว้รวมกับการต่อลงดินข้างเดียว และระหว่างไขว้รวมกับการต่อลงดินแบบกึ่งกลาง ตามลำดับ

การใช้โปรแกรมมาช่วยในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดย (Gouramanis *et al.*, 2011) ใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Alternative transients program-electromagnetic transients program) ศึกษาวงจรเดียวการต่อลงดินแบบทั้งสองปลายสาย และแบบไขว้ ในขณะที่ (Guevara *et al.*, 2023) ใช้ ATP ในกรณีไขว้สลับสายของวงจรเดียวด้วยการต่อลงดินแบบไขว้ และขยายผลเป็นวงจรคู่ใน (Guevara *et al.*, 2023) สำหรับการใช้ MATLAB (Matrix laboratory) ในวงจรคู่การต่อลงดินแบบไขว้แนะนำเสนอโดย (Guevara Asorza *et al.*, 2024) และ (Papadopoulos *et al.*, 2024) ใช้ ATP/EMTP และ CDEGS (Current distribution, electromagnetic fields, grounding and soil structure analysis) ในวงจรเดียวด้วยการต่อลงดินแบบข้างเดียวและแบบไขว้

ทั้งนี้ การติดตั้งเคเบิลใต้ดินในบางกรณีมีความจำเป็นต้องใช้สายที่มีความยาวมาก ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำของสายสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดย (Lee *et al.*, 2012; Maneepeth *et al.*, 2021) นำเสนอการติดตั้งสายดิน (Parallel ground continuity conductor, PGCC) ขนานไปกับสายเฟสพร้อมตัวจำกัดแรงดัน (Sheath voltage limiter, SVL) เพื่อจำกัดแรงดันไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน

บทความนี้ นำเสนอการประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำของเคเบิลใต้ดินวงจรเดียวจากการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม และแบบในแนวเดียวกันด้วยการต่อลงดินแบบทั้งสองปลายในระบบไฟฟ้าของสถานประกอบการขนาดใหญ่ที่ดำเนินการปรับปรุงจากสายอากาศเป็นระบบเคเบิลใต้ดิน พร้อมข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางปฏิบัติในกรณีที่ค่าแรงดันเหนี่ยวนำเกิน

มาตรฐาน เพื่อใช้เป็นแนวทางที่ทำให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน

ทฤษฎีการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและวิธีการต่อลงดินของเคเบิลใต้ดิน

1. การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

การวางเคเบิลใต้ดินเป็นแบบรูปสามเหลี่ยมจะรวมถึงการวางสายแบบชิดกันหรือวางสายแบบมีระยะห่าง แสดงได้ดัง Figure 1 โดยที่ S คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำ (mm) สามารถคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกตัวนำ ได้ดังสมการที่ (1) (Comittee, I. C., 2014)

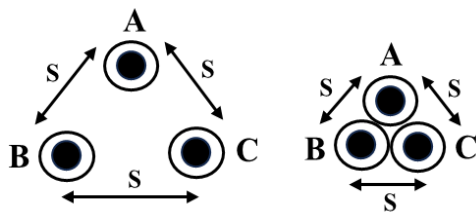


Figure 1 Trefoil formation

$$\begin{aligned} E_a &= j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \\ E_b &= j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \\ E_c &= j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \\ I_a &= aI_b, I_c = a^2 I_b : a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}, I_b = I_o (1 + j0) \end{aligned} \quad (1)$$

สำหรับการวางเคเบิลใต้ดินแบบในแนวเดียวกัน แสดงได้ดัง Figure 2 ซึ่งจะรวมถึงการวางสายทั้งในแนวนอนหรือแนวตั้ง สามารถคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกตัวนำ ได้ดังสมการที่ (2) (Comittee, I. C., 2014)

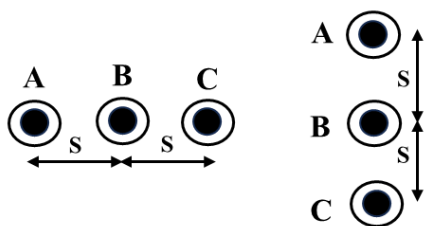


Figure 2 Flat formation

$$\begin{aligned} E_a &= j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \text{ V/m} \\ E_b &= j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m} \\ E_c &= j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \text{ V/m} \\ I_a &= aI_b, I_c = a^2 I_b : a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}, I_b = I_o (1 + j0) \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ I_o คือ ขนาดกระแสโหลด (A), E_a, E_b, E_c คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสายเฟส A, B, C (V/m) และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Sheath ของสาย (mm)

2. การต่อลงดินของเคเบิลใต้ดิน

วิธีการต่อลงดินที่เปลือกตัวนำของเคเบิลใต้ดินในระดับแรงดันปานกลางสำหรับประเทศไทย สามารถทำได้ 3 วิธี คือ การต่อลงดินข้างเดียว แสดงได้ดัง Figure 3

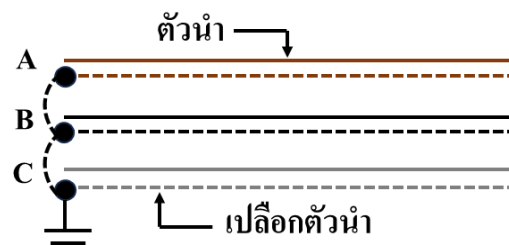


Figure 3 Single-point bonding

วิธีการนี้มีความเสี่ยงที่อาจทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเกินมาตรฐาน (ต้องไม่เกิน 65 V) เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนตามความยาวของสายที่ติดตั้ง ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน วิธีการนี้ทางไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายไม่แนะนำให้ใช้งาน ดังนั้น วิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำนี้ คือ การต่อลงดินทั้งสองปลาย แสดงได้ดัง Figure 4 วิธีการนี้ช่วยจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ แต่มีข้อเสียในเรื่องของการเกิดกระแสไหลวนที่เปลือกตัวนำตลอดเวลา ทำให้เกิดความร้อน และเกิดการสูญเสียของสายขึ้นส่งผลทำให้การนำกระแสของสายลดลง แต่เพื่อความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน วิธีการนี้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายได้เลือกนำมาใช้งานสำหรับประเทศไทย และวิธีสุดท้ายเป็นการต่อลงดินแบบหลายจุด แสดงได้ดัง Figure 5 รูปแบบนี้เหมาะสมกับการติดตั้งเคเบิลใต้ดินที่ต้องการต่อสายเพื่อให้มีความยาว แต่วิธีการนี้มีความเสี่ยงจากการต่อสายที่ไม่ดีได้

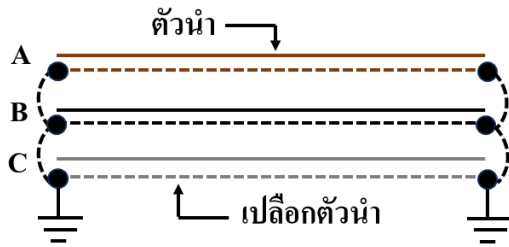


Figure 4 Both-ends bonding

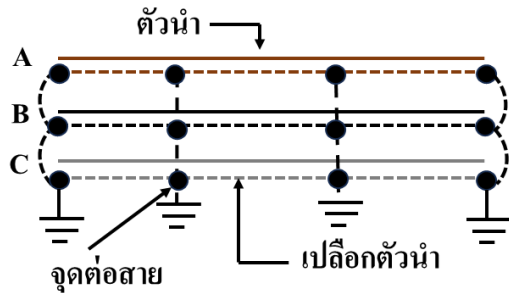


Figure 5 Multi-points bonding

วิธีการต่อลงดินแบบทั้งสองปลายที่ถูกเลือกใช้ในประเทศไทยนั้นมีข้อกำหนดในการติดตั้งสายต้องมีระยะทางไม่เกิน 500 m ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า ทั้งนี้ การติดตั้งสายในบางโครงการอาจมีระยะทางที่เกินกว่า 500 m ซึ่งส่งผลอาจทำให้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐาน ในการแก้ปัญหา นี้ คือ การติดตั้งสาย PGCC พร้อมติดตั้ง SVL เพื่อจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำ แสดงได้ดัง Figure 6 (Comittee, I. C., 2014) การคำนวณขนาดสาย PGCC ได้ดังสมการที่ (3) (International Electrotechnical Commission, 2011)

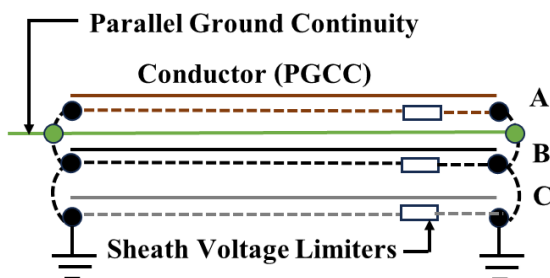


Figure 6 Both-end bonding with SVL

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} ; k = 226 \quad (3)$$

เมื่อ S คือ ขนาดสาย PGCC (mm^2), I คือ ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสที่บัสแรงดันปานกลาง (A), t คือ เวลาที่ใช้ในการตัดกระแสลัดวงจร (Sec) และ k แฟกเตอร์ของสายที่ใช้ตัวนำเป็นทองแดง

กรณีศึกษาระบบเคเบิลใต้ดิน

ระบบเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการศึกษา เขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียว แสดงได้ดัง Figure 7 สถานีไฟฟ้ามีรูปแบบการจ่ายไฟเป็นระบบ 69/24 kV มีหม้อแปลง ขนาด 50 MVA จำนวน 2 เครื่อง หม้อแปลงแต่ละเครื่องจ่ายสายป้อนเคเบิลใต้ดิน จำนวน 6 สายป้อน (Feeder) เป็นแบบลูป (Loop) มีหลักการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบ N-1 คือ การจ่ายแบบเป็นลูปกรณีที่สายป้อนใดสายป้อนหนึ่ง หรือหม้อแปลง (Transformer, TR) ของสถานีไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดการชำรุดเสียหาย สถานีไฟฟ้าก็ยังจะสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดตามอาคารได้

ในสภาวะระบบไฟฟ้าปกติหม้อแปลงเครื่องที่ 1 (TR1) และหม้อแปลงเครื่องที่ 2 (TR2) ของสถานีไฟฟ้าแบ่งกันจ่ายโหลดให้กับหม้อแปลงตามอาคารในแต่ละลูป แสดงได้ดัง Table 1 เห็นได้ว่า ลูป1 ที่รับไฟมาจาก TR1 มีความยาวของสายป้อนมากที่สุด และลูป4 สายมีความยาวน้อยสุด ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในสภาวะระบบไฟฟ้าฉุกเฉิน TR (Total) คือ การจ่ายไฟโดยใช้หม้อแปลงเครื่องเดียว ลูป1 มีความยาวสายของสายป้อนมากที่สุด และลูป4 มีความยาวสายน้อยสุด ในขณะที่ โหลดรวมในแต่ละลูปเมื่อรวมขนาดหม้อแปลงของแต่ละอาคาร ลูป5 มากสุด และลูป6 น้อยสุด ทั้งนี้เห็นได้ว่า สายป้อนและโหลดในแต่ละลูปยังไม่ได้ทำการบาลานซ์โหลด

บทความนี้ ดำเนินการประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำของเคเบิลใต้ดินวงจรเดียว โดยใช้ขนาดกระแสโหลด แสดงได้ดัง Table 1 และในแต่ละลูปใช้สายขนาด 240 mm^2 ฉนวนเป็นชนิด Cross-linked polyethylene (XLPE) มีเส้นผ่านศูนย์กลางรวม (Overall diameter, D) เท่ากับ 42.2 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง Sheath (d) เท่ากับ 2.1 mm ซึ่งเป็นข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากผู้ผลิตสาย โดยการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม S มีค่าเท่ากับ 42.2 mm แสดงได้ดัง Figure 8 และการวางสายแบบในแนวเดียวกันกำหนดระยะห่างระหว่างสายเฟสเท่ากับ D ของเคเบิลใต้ดิน ดังนั้น S มีค่าเท่ากับ 84.4 mm แสดงได้ดัง Figure 9 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดโดย (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548)

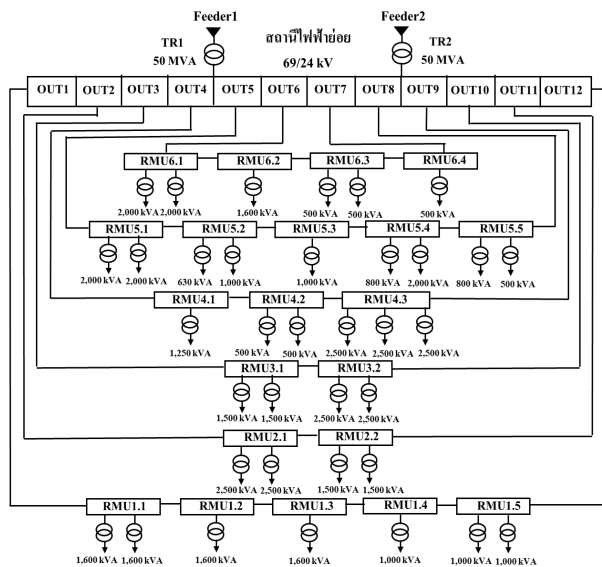


Figure 7 Underground cable system used in the study

Table 1 Cable length and load usage for each loop of underground cable system

TR	Loop	Cable length (m)	Load (kVA)	Current (A)
TR1	1	370	6,400	154
	2	247	5,000	120
	3	205	3,000	72
	4	10	2,250	54
	5	170	6,630	159
	6	109	4,000	96
TR2	1	298	3,000	72
	2	247	3,000	72
	3	105	5,000	120
	4	20	7,500	180
	5	176	4,100	99
	6	61	3,100	75
TR (Total)	1	668	9,400	226
	2	494	8,000	192
	3	310	8,000	192
	4	30	9,750	235
	5	346	10,730	258
	6	170	7,100	171

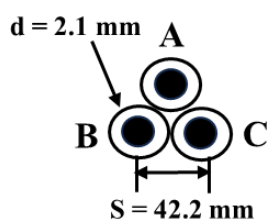


Figure 8 Trefoil formation single-circuit underground cable used in the study

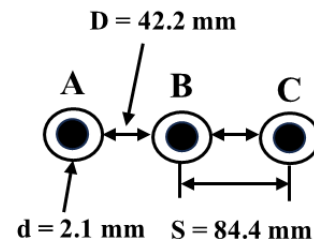


Figure 9 Flat formation single-circuit underground cable used in the study

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลที่ได้จากการประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม เมื่อคิดที่โหลด 100% และ 80% ของหม้อแปลง ตามลำดับ แสดงได้ดัง Figure 10 และ Figure 11 เห็นได้ว่า ในสภาวะระบบไฟฟ้าปกติ สายบ่อนทั้ง 6 ลูป ค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่เกิน 65 V อยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานมีความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน

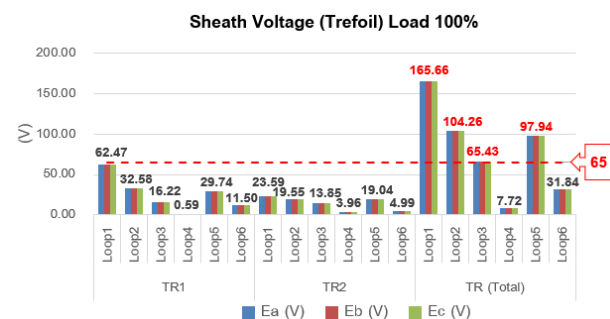


Figure 10 Trefoil formation sheath voltage at load 100%

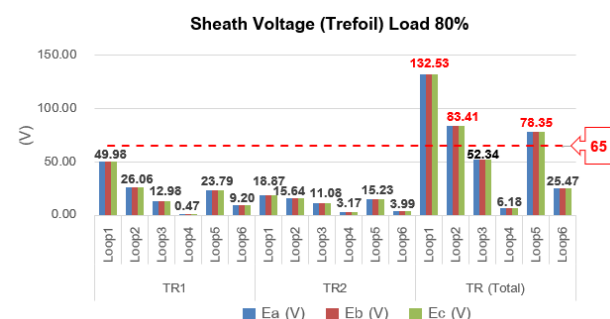


Figure 11 Trefoil formation sheath voltage at load 80%

ในขณะที่ เมื่อระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะฉุกเฉินที่โหลด 100% สายบ่อนลูป 1, 2, 3, และ 5 ที่โหลด 80% สายบ่อนลูป 1, 2, และ 5 ตามลำดับ แรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐาน ทั้งนี้ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า สาเหตุที่ทำให้แรงดันเกินเป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ สายบ่อนมีการใช้โหลดที่สูงและมีความยาวมาก

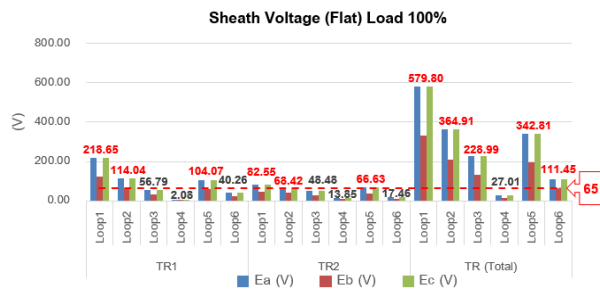


Figure 12 Flat formation sheath voltage at load 100%

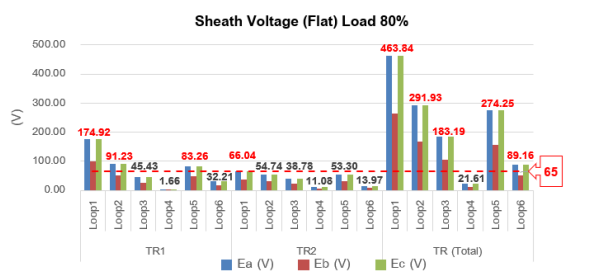


Figure 13 Flat formation sheath voltage at load 80%

สำหรับการวางเคเบิลใต้ดินแบบในแนวเดียวกัน เมื่อคิดที่โหลด 100% และ 80% ของหม้อแปลง ตามลำดับ แสดงได้ดัง Figure 12 และ Figure 13 เห็นได้ว่า ทั้งในสภาวะระบบไฟฟ้าปกติและฉุกเฉิน แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสูงกว่าแบบรูปสามเหลี่ยมมากและเกินกว่ามาตรฐานในหลายๆ สายป้อน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ นำเสนอการประเมินแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินแบบวงจรเดียวจากการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมและวางแบบในแนวเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่า แบบรูปสามเหลี่ยมแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยและปลอดภัยกว่าแบบในแนวเดียวกัน สำหรับในการศึกษานี้ เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ การวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมค่าแรงดันเหนี่ยวนำอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน ในขณะที่ เมื่อเกิดสภาวะฉุกเฉินในระบบไฟฟ้าค่าแรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐานยังไม่ปลอดภัย แม้ว่าสภาวะนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากในทางปฏิบัติ แต่เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับบุคคลที่เข้าไปปฏิบัติงานในทุกสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางปฏิบัติในการแก้ปัญหาสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ทำการบาลานซ์โหลดในแต่ละป้อนให้มีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้โหลดที่สูงในบางสายป้อนโดยคำนึงถึงระยะสายที่ใช้ต้องสั้นที่สุด

2) ติดตั้งสาย PGCC ขนานไปกับสายเฟสพร้อม SVL เพื่อจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำ ทั้งนี้กรณีศึกษาที่ ขนาดสาย PGCC จะเท่ากับ 35 mm² เมื่อคำนวณตามสมการที่ 3 ที่ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสที่บัส 24 kV เท่ากับ 7.1365 kA และเวลาการตัดกระแสลัดวงจรที่ 0.5 Sec ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2548). ระบบเคเบิลใต้ดิน. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- สายงานวิศวกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2560). คู่มือการออกแบบเคเบิลใต้ดิน. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- Gouramanis, K., Kaloudas, C. G., Papadopoulos, T. A., Papagiannis, G. K., & Stasinou, K. (2011, June 19-23). *Sheath voltage calculations in long medium voltage power cables* [Paper presentation]. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway. <https://doi.org/10.1109/ptc.2011.6019234>
- Guevara, J. E., Colqui, J. S., Bautista, J. P., & Pissolato Filho, J. (2023). Analysis of induced voltages on the sheath of single-circuit underground power lines-Part I: Without phases transposition. In *2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/C359124.2023.10324831>
- Guevara, J. E., Colqui, J. S. L., Bautista, J. P., & Filho, J. P. (2023, October 17-20). *Analysis of induced voltages on the sheath of double-circuit underground power lines - Part I: Without phases transposition* [Paper presentation]. 2023 IEEE XXX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Lima, Peru. <https://doi.org/10.1109/intercon59652.2023.10326027>
- Guevara, J. E., Ruiz, W. G. F., Colqui, J. S. L., & Pissolato Filho, J. (2024). Evaluation of mixed systems for sheath bonding of single-circuit underground power lines. In *SoutheastCon 2024* (pp. 486–491). IEEE.
- Guevara Asorza, J. E., Colqui, J. S. L., Kurokawa, S., & Pissolato Filho, J. (2024). Analysis of increased induced voltages on the sheath of double-circuit underground transmission lines guaranteeing ampacity.

- Energies*, 17(7), 1637. <https://doi.org/10.3390/en17071637>
- International Electrotechnical Commission. (2011). *Low-voltage electrical installations – Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors* (IEC 60364-5-54:2011).
- Lee, J.-B., & Jung, C.-K. (2012). Technical review on parallel ground continuity conductor of underground cable systems. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2(3), 250–256. <https://doi.org/10.5370/jicee.2012.2.3.250>
- Maneepeth, P., Thararak, P., Jirapong, P., & Karaaom, C. (2021, May 12-14). *Mitigation of induced currents and overvoltages in metallic sheath of 115 kV underground cable using sheath voltage limiter and parallel ground continuity conductor* [Paper presentation]. 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand. <https://doi.org/10.1109/ieecon51072.2021.9440357>
- Papadopoulos, T. A., Charalambous, C. A., & Chrysoschos, A. I. (2024). Important insights into steady-state calculations of voltages and currents in complex sheath bonding configurations of single-core cables. *Electric Power Systems Research*, 235, 110859. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110859>
- Shaban, M., Salam, Md. A., Ang, S. P., & Voon, W. (2014, March 31-April 3). *Calculation of sheath voltage of underground cables using various configurations* [Paper presentation]. 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, Denmark. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.1074>
- Shaban, M., Salam, Md. A., Ang, S. P., Norfauzi, Md., Wen, F., & Voon, W. (2015, November 1-4). *Calculation of induced sheath voltage for transposed and untransposed cable conductors* [Paper presentation]. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, China. <https://doi.org/10.1109/tencon.2015.7372833>
- Shaban, M., Salam, Md. A., Ang, S. P., Poulouse, M. M., & Voon, W. (2015, November 1-4). *Induced sheath voltage in double circuit* [Paper presentation]. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, China. <https://doi.org/10.1109/tencon.2015.7373111>