

การวิเคราะห์แรงดันและกระแสในเปลือกโลหะของเคเบิลใต้ดินระบบไฟฟ้าแรงสูง โดยไม่จำกัดจำนวนสายป้อน และไม่จำกัดรูปแบบของการวางสาย

พันธุ์เทพ เลหาชัย*

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ถนนประชาชื่น หลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

บทคัดย่อ

ในการใช้งานสายเคเบิลใต้ดินสำหรับระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้น ผู้ออกแบบระบบมีความจำเป็นที่จะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสในเปลือกโลหะมีค่าสูงเกินไป แรงดันที่สูงอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์หรือต่อบุคลากรที่เกี่ยวข้อง กระแสที่สูงจะทำให้เกิดความร้อนในสายซึ่งจะมีผลต่อพิบัติกระแสของเคเบิล

บทความนี้แสดงการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำและกระแสหมุนวนบนเปลือกโลหะของเคเบิลแรงสูงที่ติดตั้งในดักแวงใต้ดินเพื่อให้ได้มาซึ่งโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบทั่วไป รวมถึงการวิเคราะห์การต่อเปลือกโลหะแบบครอสบอนด์ซึ่งเป็นแบบที่มักทำกันในกรณีที่เคเบิลมีความยาวค่อนข้างมากเพราะจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่ปลายสายตลอดถึงกระแสในเปลือกโลหะมีค่าต่ำหรือเป็นศูนย์ ผลของงานวิจัยนี้ ทำให้ได้สมการแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสไหลวนในรูปแบบเมทริกซ์และเป็นแบบทั่วไปซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์แรงดันและกระแสในเปลือกโลหะของเคเบิลใต้ดินระบบแรงสูงได้ โดยไม่จำกัดจำนวนวงจรของสายป้อน และไม่จำกัดรูปแบบของการวางสายว่าจะเป็นแบบแบน แบบสามเหลี่ยมหรือแบบอื่นใดก็ตาม นอกจากนี้ สายเคเบิลแต่ละเส้นไม่จำเป็นต้องมีรายละเอียดที่เหมือนกัน ตลอดถึงกระแสที่ไหลในตัวนำแกนซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแรงดันและกระแสในเปลือกโลหะก็ไม่จำเป็นที่จะต้องมีความถี่ที่สมดุลแต่อย่างใด

คำสำคัญ : เคเบิลใต้ดิน / เคเบิลไฟแรงสูง / เปลือกโลหะ / ครอสบอนด์ / สมการทั่วไป

* รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

Metal Sheath Voltages and Currents of High Voltage Cables with Arbitrary Number of Feeders and Arbitrary Cable Formation

Panthep Laohachai*

Dhurakijpundit University, Bangkok, Thailand

Abstract

Utilizing underground cable for transmission and distribution systems, the system designer has to be careful about induced voltage and current in metal sheath so that they are not beyond limits. Too high the induced voltage can be dangerous to equipment or related personnel. Too high the sheath current can produce heat in the cable which affects the current rating of cable.

In this paper, analysis of induced voltages and circulating currents in sheath of high voltage cables in underground duct bank are carried out so that generalized mathematical model can be obtained. Furthermore, analysis of crossbonding of metal sheath which is usually applied for long cable will be performed. Results of this research will be equations for induced voltages and circulating currents. These equations are in the form of matrices and are general equations such that induced voltages and currents in metal sheath of high voltage underground cables can be calculated regardless of number of feeders or cable formation (flat, trefoil, or other formation). Other than this, type of cables can be different. Currents in core conductors, which are the origin of voltages and currents in metal sheaths, can either be balance or unbalance.

Keywords : Underground cable / High-voltage cable / Metal sheath / Crossbond / General equation.

* Associate Professor, Department of Electrical Engineering.

1. บทนำ

การพัฒนาทางด้านระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้ากำลังมีแนวโน้มที่จะทำเป็นระบบใต้ดินมากขึ้น ถึงแม้ว่าสายส่งใต้ดินมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูง การบำรุงรักษาที่ยุ่ยยาก และปัญหาด้านเทคนิคต่างๆ แต่สายส่งใต้ดินก็มีข้อดีหลายประการ เช่น การไม่รบกวนทัศนียภาพของบ้านเมือง การขจัดปัญหาเรื่องเสาไฟล้มเนื่องจากอุบัติเหตุต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของไฟดับบริเวณกว้าง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากสายใต้ดินยังมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสายเหนือดิน

การคำนวณแรงดันและกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในชั้นเปลือกโลหะ(Metal Sheath) ของสายเคเบิลใต้ดินสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่ปรากฏในเอกสารโดยทั่วไป [1-8] จะเป็นสมการสำหรับเคเบิล 1 วงจร (สายเคเบิล 3 เส้น) และมักจะต้องระบุรูปแบบของการวางสาย (Cable Formation) ด้วย ในกรณีเคเบิล 2 วงจร, มาตรฐาน ANSI/IEEE [1] ได้แสดงสมการไว้แต่การใช้สมการต้องการจัดวางเคเบิลและมีข้อกำหนดตามที่ระบุเท่านั้น

บทความนี้เสนอการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับแรงดันเหนี่ยวนำบนเปลือกโลหะของเคเบิลใต้ดินแรงสูง และในกรณีที่มีการต่อเปลือกโลหะลงดินจะมีการหารูปแบบสมการของกระแสที่เกิดขึ้น การศึกษานี้เป็นแบบทั่วไป สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยไม่จำกัดจำนวนวงจรของสายบ่อน และใช้ได้ไม่ว่าเคเบิลจะถูกจัดวางในลักษณะแบบไหนก็ตาม นอกจากนี้การวิเคราะห์ยังได้ครอบคลุมถึงการต่อเปลือกโลหะแบบครอสบอนด์ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับสายใต้ดินแรงสูงที่มีความยาวค่อนข้างมากอีกด้วย และเช่นเดียวกันการศึกษาดังนี้จะเน้นให้ผลที่ได้เป็นสมการแบบทั่วไป สามารถนำไปใช้ได้โดยไม่จำกัด

2. การวิเคราะห์

2.1 ฟลักซ์เชื่อมโยงบนเปลือกโลหะ

ก) ฟลักซ์เชื่อมโยง (Flux Linkage) ต่อหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของเคเบิล C_k เนื่องจากกระแสของเคเบิล C_1, C_2, \dots, C_n มีค่าดังนี้

$$\lambda_{1k} = \int_{r_1}^{s_{1k}} \frac{\mu I_1}{2\pi} \frac{dx}{x} = \frac{\mu I_1}{2\pi} \ln \left[\frac{s_{1k}}{r_1} \right] \quad \text{Wb/m} \quad (1)$$

$$\lambda_{2k} = \frac{\mu I_2}{2\pi} \ln \left[\frac{s_{2k}}{r_2} \right] \quad \text{Wb/m} \quad (2)$$

$$\lambda_{nk} = \frac{\mu I_n}{2\pi} \ln \left[\frac{s_{nk}}{r_n} \right] \quad \text{Wb/m} \quad (3)$$

โดย I_i คือกระแสในเคเบิล i

s_{ik} คือระยะห่างระหว่างเคเบิล i กับเคเบิล k

r_i คือรัศมีของตัวนำในเคเบิล i

ข) ฟลักซ์เชื่อมโยงที่เปลือกโลหะเนื่องจากกระแสในแกนตัวนำของตัวเองมีค่าดังนี้

$$\lambda_{kk} = \int_{r_k}^{r_{sh}} \frac{\mu I_k}{2\pi} \frac{dx}{x} = \frac{\mu I_k}{2\pi} \ln \left[\frac{r_{sh}}{r_k} \right] \quad \text{Wb/m} \quad (4)$$

โดย r_k คือรัศมีของแกนตัวนำของเคเบิล C_k

r_{sh} คือรัศมีของเปลือกโลหะของเคเบิล C_k

ค) ฟลักซ์เชื่อมโยงรวมต่อหน่วยความยาวที่เปลือกโลหะของเคเบิล C_k เป็นดังนี้

$$\lambda_{Tk} = \lambda_{1k} + \lambda_{2k} + \dots + \lambda_{nk} + \lambda_{kk} = \frac{\mu}{2\pi} \left[I_1 \ln \frac{s_{1k}}{r_1} + I_2 \ln \frac{s_{2k}}{r_2} + \dots + I_n \ln \frac{s_{nk}}{r_n} + I_k \ln \frac{r_{sh}}{r_k} \right] \quad (5)$$

2.2 แรงดันบนเปลือกโลหะ

แรงดันบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวหาได้จากสมการ

$$E_k = \frac{d\lambda_{rk}}{dt} \tag{6}$$

แทน (5) ลงใน (6)

$$E_k = \frac{\mu}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[I_1 \ln \frac{S_{1k}}{r_1} + I_2 \ln \frac{S_{2k}}{r_2} + \dots + I_n \ln \frac{S_{nk}}{r_n} + I_k \ln \frac{S_{sh}}{r_k} \right] \tag{7}$$

ในสภาวะคงตัว แทนค่า d/dt ด้วย jω

$$E_k = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \left[I_1 \ln \frac{S_{1k}}{r_1} + I_2 \ln \frac{S_{2k}}{r_2} + \dots + I_n \ln \frac{S_{nk}}{r_n} + I_k \ln \frac{S_{sh}}{r_k} \right] \tag{8}$$

ให้ค่า k = 1, 2, 3, n จะได้

$$\begin{aligned} E_1 &= jf\mu \left[I_1 \ln \frac{r_{sh1}}{r_1} + I_2 \ln \frac{S_{12}}{r_2} + I_3 \ln \frac{S_{13}}{r_3} + \dots + I_n \ln \frac{S_{1n}}{r_n} \right] \\ E_2 &= jf\mu \left[I_1 \ln \frac{S_{21}}{r_1} + I_2 \ln \frac{r_{sh2}}{r_2} + I_3 \ln \frac{S_{23}}{r_3} + \dots + I_n \ln \frac{S_{2n}}{r_n} \right] \\ E_3 &= jf\mu \left[I_1 \ln \frac{S_{31}}{r_1} + I_2 \ln \frac{S_{32}}{r_2} + I_3 \ln \frac{r_{sh3}}{r_3} + \dots + I_n \ln \frac{S_{3n}}{r_n} \right] \\ &\dots\dots\dots \\ E_n &= jf\mu \left[I_1 \ln \frac{S_{n1}}{r_1} + I_2 \ln \frac{S_{n2}}{r_2} + I_3 \ln \frac{S_{n3}}{r_3} + \dots + I_n \ln \frac{r_{shn}}{r_n} \right] \end{aligned} \tag{9}$$

แรงดันเหนี่ยวนำบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวเขียนเป็นสมการแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = jf\mu \begin{bmatrix} \ln \frac{r_{sh1}}{r_1} & \ln \frac{S_{12}}{r_2} & \ln \frac{S_{13}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{1n}}{r_n} \\ \ln \frac{S_{21}}{r_1} & \ln \frac{r_{sh2}}{r_2} & \ln \frac{S_{23}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{2n}}{r_n} \\ \ln \frac{S_{31}}{r_1} & \ln \frac{S_{32}}{r_2} & \ln \frac{r_{sh3}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{3n}}{r_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln \frac{S_{n1}}{r_1} & \ln \frac{S_{n2}}{r_2} & \ln \frac{S_{n3}}{r_3} & \dots & \ln \frac{r_{shn}}{r_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \tag{10}$$

สมการที่ (10) เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์แบบทั่วไปสำหรับหาค่าแรงดันบนเปลือกโลหะของสายเคเบิล

จำนวน n เส้น โดย r คือรัศมีของแกนตัวนำของเคเบิล ; r_{sh} คือรัศมีของเปลือกโลหะของเคเบิล ; s_{ij} คือระยะห่างระหว่างเคเบิล i และ j

โปรดสังเกตว่า สมาชิก (i,i) ของเมทริกซ์บนเส้นทะแยงมุมมีค่า ln $\frac{r_{shi}}{r_i}$ ส่วนสมาชิก (i,j) ของเมทริกซ์นอกเส้นทะแยงมุมมีค่า ln $\frac{S_{ij}}{r_i}$

สมการที่ (10) เป็นสมการทั่วไปของแรงดันในเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวของสายเคเบิลที่มีหลายสายป้อนและรูปแบบการวางสายจะเป็นแบบไหนก็ได้

2.3 กระแสที่ไหลเมื่อเปลือกโลหะถูกต่อลงดินที่ต้นสายและปลายสาย

สมการที่ 10 สามารถเขียนได้เป็น

$$[E_s] = j[X_m][I_{core}] \tag{11-a}$$

โดยที่

$$[E_s] = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad [I_{core}] = \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ \vdots \\ I_{cn} \end{bmatrix}$$

$$[X_m] = j\mu \begin{bmatrix} \ln \frac{r_{sh1}}{r_1} & \ln \frac{S_{12}}{r_2} & \ln \frac{S_{13}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{1n}}{r_n} \\ \ln \frac{S_{21}}{r_1} & \ln \frac{r_{sh2}}{r_2} & \ln \frac{S_{23}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{2n}}{r_n} \\ \ln \frac{S_{31}}{r_1} & \ln \frac{S_{32}}{r_2} & \ln \frac{r_{sh3}}{r_3} & \dots & \ln \frac{S_{3n}}{r_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \ln \frac{S_{n1}}{r_1} & \ln \frac{S_{n2}}{r_2} & \ln \frac{r_{shn}}{r_n} & \dots & \ln \frac{S_{shn}}{r_n} \end{bmatrix} \tag{11-b}$$

เมื่อต่อเปลือกโลหะทั้งสองด้านลงดิน จะได้กระแสในเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาว [I_{sh}] ซึ่ง

$$[E_s] = \{ [R_{sh}] + j[X_m] \} [I_{sh}] \tag{12}$$

โดยเมทริกซ์ของกระแสและความต้านทานของเปลือกโลหะเป็นดังนี้

$$[I_{sh}] = \begin{bmatrix} I_{sh1} \\ I_{sh2} \\ \vdots \\ I_{shn} \end{bmatrix}$$

$$[R_{sh}] = \begin{bmatrix} R_{sh1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{sh2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_{sh3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{shn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

จาก (12)

$$[I_{sh}] = \{ [R_{sh}] + j[X_m] \}^{-1} [E_s] \quad (14)$$

แทนสมการที่ (11) ลงใน (14) ได้ค่ากระแสของเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวดังนี้

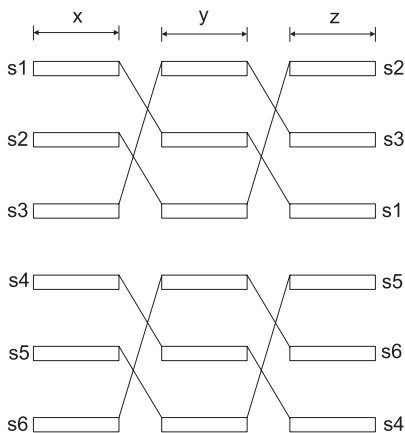
$$[I_{sh}] = j \{ [R_{sh}] + j[X_m] \}^{-1} [X_m] [I_{core}] \quad (15)$$

2.4 การต่อเปลือกโลหะแบบครอสบอนด์ (Cross Bond)

สายเคเบิลถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนย่อย (Minor Section) เรียก x, y, z

ในการต่อเปลือกโลหะแบบครอสบอนด์ ทั้ง 3 ส่วนย่อยจะถูกต่อไขว้กัน

ก) กรณี 2 วงจร : พิจารณาการครอสบอนด์ของเคเบิล 2 วงจร (6 สาย) ดังนี้



รูปที่ 1 การครอสบอนด์ของเคเบิล 2 วงจร

แรงดันเหนี่ยวนำบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาว $E_{s1}, E_{s2}, \dots, E_{s6}$ เป็นดังนี้

$$E_{s1} = E_{1x} + E_{2y} + E_{3z} \quad (16)$$

$$E_{s2} = E_{2x} + E_{3y} + E_{1z} \quad (17)$$

$$E_{s3} = E_{3x} + E_{1y} + E_{2z} \quad (18)$$

$$E_{s4} = E_{4x} + E_{5y} + E_{6z} \quad (19)$$

$$E_{s5} = E_{5x} + E_{6y} + E_{4z} \quad (20)$$

$$E_{s6} = E_{6x} + E_{4y} + E_{5z} \quad (21)$$

โดย $E_{1x}, E_{2x}, E_{3x}, \dots, E_{6x}$ คือแรงดันบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวในส่วนย่อย x

$E_{1y}, E_{2y}, E_{3y}, \dots, E_{6y}$ คือแรงดันบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวในส่วนย่อย y

$E_{1z}, E_{2z}, E_{3z}, \dots, E_{6z}$ คือแรงดันบนเปลือกโลหะต่อหน่วยความยาวในส่วนย่อย z

ให้ตัวประกอบเนื่องจากการครอสบอนด์สำหรับเคเบิล 1 วงจรมีค่าดังนี้

$$[W_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [W_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[W_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

จะได้ว่าตัวประกอบเนื่องจากการครอสบอนด์สำหรับเคเบิล 2 วงจรมีค่าดังนี้

$$[U_1] = \begin{bmatrix} W_1 & 0 \\ 0 & W_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[U_2] = \begin{bmatrix} W_2 & 0 \\ 0 & W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[U_3] = \begin{bmatrix} W_3 & 0 \\ 0 & W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

2.5 การต่อเปลือกโลหะแบบครอสบอนด์และการต่อลงดินที่ต้นทางกับที่ปลายทาง

เมื่อมีการต่อลงดิน กระแสที่ไหลหาได้โดยใช้สมการ (14) และ (32) ผลคือ

$$[I_{sh}] = j\{[R_{sh}] + j[X_m]\}^{-1} \times \{D_x[U_1] + D_y[U_2] + D_z[U_3]\}[X_m][I_{core}] \quad (36)$$

สมการข้างบนแสดงสมการทั่วไปของกระแสบนเปลือกโลหะของสายเคเบิลหลายเส้นที่มีการต่อครอสบอนด์ จะเห็นว่ากระแสค่านี้อาจมีความสัมพันธ์กับกระแสที่ไหลไปยังโหนดของเคเบิลแต่ละเส้น นอกจากนี้ขนาดและระยะห่างของเคเบิลตลอดถึงความยาวของส่วนย่อยก็มีผลต่อกระแสที่ไหลในเปลือกโลหะเช่นกัน

ตัวอย่าง

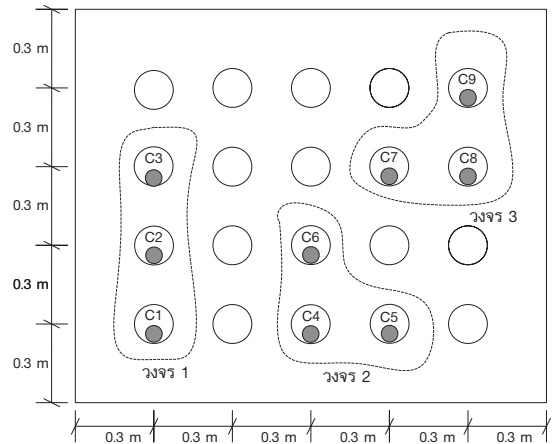
ในรูปข้างล่างเป็นเคเบิลแรงสูงในดักเบงค์ 3 วงจร

วงจรที่ 1 เป็นเคเบิลพิกัด 230 kV, 1000 sq.mm., XLPE ; รัศมีของแกนตัวนำ 20 mm รัศมีเฉลี่ยของชั้นเปลือกโลหะ 52 mm ความต้านทานของเปลือกโลหะ 0.0002 Ω/m ; กระแสในแกนตัวนำ 650, 620, 640 A

วงจรที่ 2 เป็นเคเบิลพิกัด 115 kV, 800 sq.mm., XLPE ; รัศมีของแกนตัวนำ 17.4 mm, รัศมีเฉลี่ยของชั้นเปลือกโลหะ 43.5 mm ความต้านทานของเปลือกโลหะ 0.00031 Ω/m ; กระแสในแกนตัวนำ 470, 480, 420 A

วงจรที่ 3 เป็นเคเบิลพิกัด 69 kV, 500 sq.mm., XLPE ; รัศมีของแกนตัวนำ 13.4 mm รัศมีเฉลี่ยของชั้นเปลือกโลหะ 36 mm ความต้านทานของเปลือกโลหะ 0.00031 Ω/m ; กระแสในแกนตัวนำ 270, 230, 250 A

เราจะคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนเปลือกโลหะของเคเบิลแต่ละเส้นเป็น V/m และกระแสที่ไหลในเปลือกโลหะของเคเบิลเมื่อมีการต่อลงดินที่ต้นสายและปลายสาย โดยเปลือกโลหะมีการต่อครอสบอนด์ที่ระยะ 250 m 300 m และ 350 m



รูปที่ 2 เคเบิล 3 วงจรในดักเบงค์

จากรูป วงจรที่ 1 มีเคเบิล C1, C2, C3 วงจรที่ 2 มีเคเบิล C4, C5, C6 วงจรที่ 3 มีเคเบิล C7, C8, C9

ค่าของกระแส, รัศมีของแกนตัวนำ, รัศมีเฉลี่ยของชั้นเปลือกโลหะ ของเคเบิล C1 - C9 เขียนเป็นเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$[I_{core}] = \begin{bmatrix} 650 + j0 \\ -310 - j537 \\ 320 + j554 \\ 470 + j0 \\ -240 - j416 \\ -210 + j364 \\ 270 + j0 \\ -115 - j199 \\ -125 + j217 \end{bmatrix}$$

$$[r_i] = \begin{bmatrix} 20 \\ 20 \\ 20 \\ 17.4 \\ 17.4 \\ 17.4 \\ 13.4 \\ 13.4 \\ 13.4 \end{bmatrix} ; [r_{shi}] = \begin{bmatrix} 52 \\ 52 \\ 52 \\ 43.5 \\ 43.5 \\ 43.5 \\ 36 \\ 36 \\ 36 \end{bmatrix}$$

ระยะระหว่างเคเบิลในรูปเมทริกซ์คือ

เมื่อมีการต่อลงดินและต่อครอสบอนด์ ค่ากระแส

หาจากสมการ (36) โดย

$$[S_{ij}] =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.3000 & 0.6000 & 0.6000 & 0.9000 & 0.6708 & 1.0817 & 1.3416 & 1.5000 \\ 0.3000 & 0 & 0.3000 & 0.6708 & 0.9487 & 0.6000 & 0.9487 & 1.2369 & 1.3416 \\ 0.6000 & 0.3000 & 0 & 0.8485 & 1.0817 & 0.6708 & 0.9000 & 1.2000 & 1.2369 \\ 0.6000 & 0.6708 & 0.8485 & 0 & 0.3000 & 0.3000 & 0.6708 & 0.8485 & 1.0817 \\ 0.9000 & 0.9487 & 1.0817 & 0.3000 & 0 & 0.4243 & 0.6000 & 0.6708 & 0.9487 \\ 0.6708 & 0.6000 & 0.6708 & 0.3000 & 0.4243 & 0 & 0.4243 & 0.6708 & 0.8485 \\ 1.0817 & 0.9487 & 0.9000 & 0.6708 & 0.6000 & 0.4243 & 0 & 0.3000 & 0.4243 \\ 1.3416 & 1.2369 & 1.2000 & 0.8485 & 0.6708 & 0.6708 & 0.3000 & 0 & 0.3000 \\ 1.5000 & 1.3416 & 1.2369 & 1.0817 & 0.9487 & 0.8485 & 0.4243 & 0.3000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[R_{ik}] = \begin{bmatrix} 0.1802 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1802 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1802 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2861 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2861 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2861 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2861 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2861 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2861 \end{bmatrix}$$

โดยใช้สมการ (11-b) ได้

$$[X_m] =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0600 & -0.2639 & -0.2203 & -0.2116 & -0.1861 & -0.2046 & -0.1581 & -0.1446 & -0.1376 \\ -0.2639 & 0.0600 & -0.2639 & -0.2046 & -0.1828 & -0.2116 & -0.1664 & -0.1497 & -0.1446 \\ -0.2203 & -0.2639 & 0.0600 & -0.1898 & -0.1745 & -0.2046 & -0.1697 & -0.1516 & -0.1497 \\ -0.2203 & -0.2133 & -0.1985 & 0.0576 & -0.2551 & -0.2551 & -0.1882 & -0.1734 & -0.1581 \\ -0.1948 & -0.1915 & -0.1833 & -0.2551 & 0.0576 & -0.2333 & -0.1952 & -0.1882 & -0.1664 \\ -0.2133 & -0.2203 & -0.2133 & -0.2551 & -0.2333 & 0.0576 & -0.2169 & -0.1882 & -0.1734 \\ -0.1833 & -0.1915 & -0.1948 & -0.2046 & -0.2116 & -0.2333 & 0.0621 & -0.2387 & -0.2169 \\ -0.1698 & -0.1749 & -0.1768 & -0.1898 & -0.2046 & -0.2046 & -0.2387 & 0.0621 & -0.2387 \\ -0.1628 & -0.1698 & -0.1749 & -0.1745 & -0.1828 & -0.1898 & -0.2169 & -0.2387 & 0.0621 \end{bmatrix} \times 10^{-3}$$

$$D_x = 250 \text{ m}; D_y = 300 \text{ m}; D_z = 350 \text{ m};$$

$$[U_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จากสมการ (11-a) ได้เวกเตอร์ของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนเปลือกโลหะเป็นเฟเซอร์และเป็นขนาดดังนี้

$$[E_s] = \begin{bmatrix} 0.0215 - j0.1706 \\ -0.1810 + j0.1232 \\ 0.1709 + j0.0946 \\ 0.0180 - j0.1172 \\ -0.1061 + j0.1036 \\ 0.1179 + j0.0934 \\ -0.0015 - j0.0776 \\ -0.0575 + j0.0385 \\ 0.0622 + j0.0344 \end{bmatrix} \text{ V/m}$$

$$[U_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[E_s] = \begin{bmatrix} 0.1720 \\ 0.2189 \\ 0.1954 \\ 0.1186 \\ 0.1483 \\ 0.1504 \\ 0.0776 \\ 0.0692 \\ 0.0711 \end{bmatrix} \text{ V/m}$$

$$[U_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการ (36) เฟเซอร์และขนาดของกระแสในเปลือกโลหะมีค่าดังนี้

$$[I_{sh}] = \begin{bmatrix} -0.6023 - 1.5223i \\ -0.7467 + 0.0294i \\ 0.7892 - 0.8674i \\ -0.4855 - 1.2049i \\ -0.5273 - 0.4509i \\ 0.0811 - 0.8554i \\ -0.1413 - 0.1475i \\ -0.1278 + 0.2510i \\ 0.1789 + 0.0409i \end{bmatrix} \times 100 \text{ A}$$

$$[I_{sh}] = \begin{bmatrix} 163.7075 \\ 74.7279 \\ 117.2697 \\ 129.9064 \\ 69.3762 \\ 85.9221 \\ 20.4253 \\ 28.1659 \\ 18.3463 \end{bmatrix} \text{ A}$$

3. สรุป

บทความนี้แสดงการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อให้ได้มาซึ่งโมเดลทางคณิตศาสตร์แบบทั่วไปของแรงดันและกระแสที่ไหลในเปลือกโลหะของสายเคเบิลแรงสูงในรูปแบบสมการแบบเมทริกซ์ ซึ่งมีลักษณะในการประยุกต์ดังนี้

- ไม่จำกัดจำนวนเคเบิลที่ใช้ หรือที่อยู่ใกล้กัน
- ขนาดของเคเบิลแต่ละเส้นไม่จำเป็นต้องเท่ากัน
- เคเบิลแต่ละเส้นอาจจัดวางแบบไหนก็ได้
- กระแสในแกนตัวนำแต่ละเส้นไม่จำเป็นต้องสมดุล

นอกจากนี้การวิเคราะห์ยังได้พิจารณาเปลือกโลหะที่มีการต่อแบบครอสบอนด์ซึ่งมีส่วนช่วยให้แรงดันเหนี่ยวนำและกระแสมีค่าลดลงอย่างมาก ถ้ามีการทำให้เหมาะสมอาจลดแรงดันเหนี่ยวนำที่ปลายสายและกระแสลงไปเป็นศูนย์ได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้กระแสในตัวนำแกนจะไม่

สมดุลหรือระยะห่างของการทำครอสบอนด์จะไม่เท่ากันทั้งสามช่วง โมเดลทางคณิตศาสตร์ก็ยังสามารถวิเคราะห์หาคำตอบได้ ดังแสดงในตัวอย่างที่ผ่านมา

ในตัวอย่างนี้ไม่ได้รวมค่าความต้านทานของหลักดิน ถ้าสิ่งนี้นำมาคำนวณด้วยจะทำให้ค่ากระแสของเปลือกโลหะลดลงไปอีกมาก

4. เอกสารอ้างอิง

1. ANSI/IEEE Standard 575-1988, "IEEE guide for the application of single-conductor cables and the calculation of induced voltages and currents in cable sheaths".
2. Hongzhong Ma, Jingang Song, Ping Ju, Ruiming Fang, 2008 "Research on compensation and protection of voltage in metal shield of 110kV power cable under three segments unsymmetrical state", *IEEE conference on conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, 2008*.
3. Chen, X., Wu, K., Chen, Y., Yan, L., 2007, "Sheath circulating current calculations and measurements of underground power cables", *Jicable Power Conference, France*.
4. I. Sarajcev, M. Majstrovic, I. Medic, 2000, "Calculation of losses in electric power cables as the base for cable temperature analysis", *Advanced computational methods in heat transfer*, WIT Press, Boston.
5. W.A.Thue, 1998, "Electrical power cable engineering", CRC Press.
6. P.L. Ostermann, 1992 "Underground transmission systems reference book", Electric power research institute.
7. H.L. Willis, 1977, "Electrical transmission and distribution reference book", ABB power company.
8. Brugg Kabel AG, 2006, "High voltage XLPE cable systems".

