

การวิเคราะห์อุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดึงของสายไฟชนิด ACSR ในระบบกำลังไฟฟ้า Temperature Analysis Effecting to Tension of ACSR Conductors in Power System

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์^{1*} และกรวิก เศรษฐกุล²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²บริษัทไทยนิปปอนรับเบอร์อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) แผนกวิศวกรรม

*anone_91@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองผลของอุณหภูมิที่อยู่ภายในสายส่งตัวนำชนิดสายอะลูมิเนียมแกนเหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 500kV วงจรคู่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และได้นำเสนอการคำนวณค่าของแรงดึงเนื่องจากอุณหภูมิสะสมที่อยู่ในสายตัวนำ โดยบทความนี้ได้พิจารณาระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดอย่างสมดุล และได้พิจารณาเฉพาะเฟส A ของวงจรที่ 1 เท่านั้น โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ค่าอุณหภูมิของสายตัวนำในขณะที่มีการจ่ายโหลดที่พิกัดจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่กระจายอยู่ในสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 70°C หรือ 343 K ซึ่งจะทำให้ระยะยืดตัวของสายตัวนำชนิดสายอะลูมิเนียมแกนเหล็กมีการยืดตัวเพิ่มขึ้น 3 mm และมีผลต่อแรงดึงภายในสายตัวนำเพิ่มขึ้น 0.2 N โดยผลการยืดตัวของสายตัวนำนี้จะส่งผลต่อโครงสร้างของสายตัวนำและอายุการใช้งานของสายตัวนำ อีกทั้งประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าจะลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าอุณหภูมิที่อยู่ภายในสายส่งทำให้เกิดค่าความสูญเสียในสายตัวนำเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: อุณหภูมิ แรงดึง สายตัวนำ ระบบไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This article presents the simulation of temperature of inner Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR) in 500kV double circuit power system by using finite element method. In addition, the tension calculation affect from the inner temperature of ACSR conductors are considered. This article focuses on the balance load system and analysis of only phase A of the first circuit. The simulation results shown that the temperature of ACSR with the rated load supply increased within the inner of conductors and highest temperature is 343 K which extended 3 millimeters. This can increase the tension of ACSR conductors 0.2 N. The extension reflected the structure of ACSR conductors and ACSR conductors' period. Furthermore, the efficiency of power transference can be reduced since the temperature inside influence the loss of ACSR conductors.

Keywords: temperature, tension, line conductors, power system

1. บทนำ

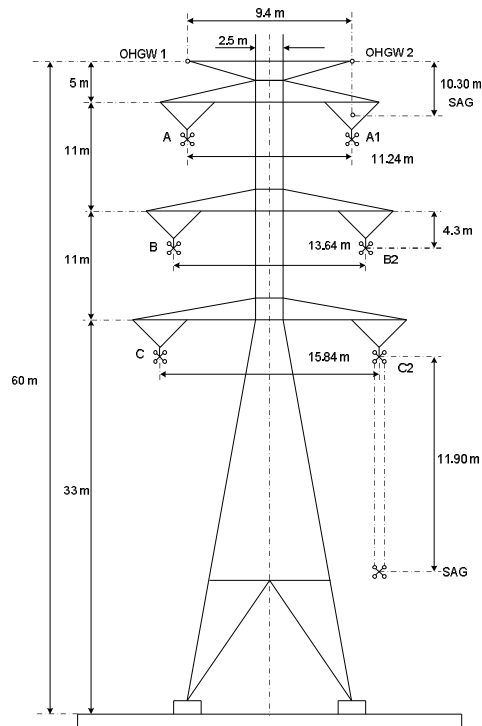
ระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 3 ระบบหลักคือ ระบบผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าและระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยทั้งสามระบบนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งานที่อยู่ปลายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับระบบกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นจะมีการส่งกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงสุดคือ 500kV โดยมีการส่งกำลังไฟฟ้าทั้งชนิดที่เป็นวงจรเดี่ยว และวงจรคู่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณโหลดที่ใช้ในการส่งจ่าย ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 500kV วงจรคู่ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้สำหรับการจำลองในบทความนี้นั้น เป็นระบบที่มีปริมาณของกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยที่ชนิดของตัวนำได้เลือกใช้สายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก ที่มีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าได้ดี และมีความแข็งแรงทนทานสูง เนื่องจากการส่งในระดับแรงดันสูงนั้น ระยะห่างระหว่างเสามีค่ามาก ทำให้สายส่งที่ใช้ต้องคำนึงถึงระยะหย่อนที่เหมาะสม การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันสูงนั้นจะทำให้ขนาดของสายตัวนำที่ใช้ในการส่งจ่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณกระแสที่ไหลในสายตัวนำ เมื่อกระแสมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในสายส่งตัวนำและรอบๆ สายส่งตัวนำ ดังนั้นบทความนี้จึงได้เล็งเห็นความสำคัญของคุณสมบัติที่เกิดขึ้นภายในสายส่งตัวนำอันเนื่องมาจากกระแสที่ไหลในสายส่ง โดยได้อาศัยการจำลองค่าอุณหภูมิที่อยู่ภายในสายส่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และได้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิและแรงดึงของสายส่งเพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อแรงดึงของสายตัวนำประเภทอะลูมิเนียมแกนเหล็ก ซึ่งจะเป็นผลต่อระยะหย่อนของสายตัวนำของระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 500kV วงจรคู่

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้สำหรับการจำลองผล

บทความนี้เป็นการจำลองผลของอุณหภูมิของสายส่งกำลังไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าของเสาส่งขนาดระดับแรงดันไฟฟ้า 500kV วงจรคู่ ที่มีการเดินสายไฟแบบ 4 บันเดิล (4 bundles) (Jerry C. Whitaker., 2007). แสดงได้ดังภาพที่ 1 โดยคุณสมบัติของสายตัวนำและสายดินเหนือศีรษะ (overhead ground wire) แสดงดังตารางที่ 1

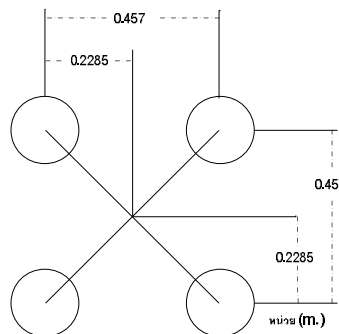
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสายตัวนำและสายดินเหนือศีรษะของระบบไฟฟ้ากำลังขนาด 500kV วงจรคู่

| สายตัวนำชนิด ACSR | |
|---|---------------------|
| ค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 20 องศา | 0.0215 Ω /km |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายตัวนำ | 0.0153 m |
| ระยะหย่อนของสายตัวนำ | 11.90 m |
| สายดินเหนือศีรษะ | |
| ค่าความต้านทานกระแสตรงที่อุณหภูมิ 20 องศา | 3.8445 Ω /km |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายดินเหนือศีรษะ | 0.0091 m |
| ระยะหย่อนของสายดินเหนือศีรษะ | 10.30 m |



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเสาส่งกำลังไฟฟ้าขนาดแรงดัน 500kV วงจรคู่ ชนิด 4 บันเดิล

บทความนี้มุ่งเน้นพิจารณาค่าอุณหภูมิที่บริเวณกลุ่มตัวนำของระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาดแรงดัน 500kV วงจรคู่ ชนิด 4 บันเดิล (พิทักษ์ ปิ่นอนงค์., 2545) ดังนั้นตำแหน่งที่พิจารณาได้เน้นพิจารณาที่ตำแหน่งกลุ่มตัวนำเท่านั้น แสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะการวางบันเดิลของสายส่งตัวนำในระบบส่งกำลังไฟฟ้าขนาดแรงดัน 500kV วงจรคู่ชนิด 4 บันเดิล

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิใน 2 มิติในสภาวะชั่วคราวและพารามิเตอร์สำหรับการจำลองผล

การศึกษาอุณหภูมิที่แพร่กระจายในสายส่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ (Matthew N.O. Sadiku., 2000). ได้ตั้งสมการที่ 1

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q + h(T_{ext} - T) \quad (1)$$

โดยที่ T_{ext} หมายถึง External Temperature (K)

| | |
|--------|--|
| T | หมายถึง Conductor Temperature (K) |
| k | หมายถึง Heat Conductivity (kg/m^3) |
| h | หมายถึง Heat Transfer Conductor ($\text{W/m}^2\text{K}$) |
| Q | หมายถึง Heat Source (W/m) |
| C | หมายถึง Heat Specific (K) |
| ρ | หมายถึง Mass Specific (kg/m) |

บทความนี้อาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติในการจำลองผล จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจัดสมการที่ (1) ซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น โดยการจำลองผลเลือกใช้เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อ ซึ่งมีฟังก์ชันของการประมาณภายในเอลิเมนต์ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ., 2547) เป็นดังสมการที่ 2

$$N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y) \quad (2)$$

โดยที่ i หมายถึง หมายเลขจุดโหนดที่ 1 2 และ 3

A หมายถึง พื้นที่ของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นสามเหลี่ยม

a_i, b_i, c_i หมายถึง ฟังก์ชันของตำแหน่งของจุดต่อที่มีการเรียงตำแหน่งแบบทวนเข็มนาฬิกา

จากสมการที่ 1 และ 2 จัดให้อยู่ในรูปของสมการเอลิเมนต์ของแต่ละส่วนจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3 – 8

$$[C] = \frac{\rho c A T}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K_c] = \frac{kT}{4A} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_2 + c_2 c_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & \\ \text{Symmetric} & & b_3 b_3 + c_3 c_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K_h] = \frac{hA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[Q_o] = \frac{QAT}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[Q_q] = \frac{q_s A}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[Q_h] = \frac{hT_\infty A}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

บทความนี้พิจารณาการกระจายอุณหภูมิแบบเชิงเส้นในสถานะชั่วคราว ทำให้ได้สมการในรูปแบบสมการเชิงเส้นเป็นดังสมการที่ 9 (Theodore L., 2011)

$$[C]\{\dot{T}\} + [[K_c] + [K_h]]\{T\} = \{Q_c\} + \{Q_o\} + \{Q_q\} + \{Q_h\} \quad (9)$$

- โดย $[K_c]$ หมายถึง เมตริกซ์การนำความร้อน (conduction matrix)
 $[K_h]$ หมายถึง เมตริกซ์การพาความร้อน (convection matrix)
 $\{T\}$ หมายถึง เวกเตอร์ของอุณหภูมิที่จุดต่อ (vector of nodal temperature)
 $\{Q_c\}$ หมายถึง โหลดเวกเตอร์การนำความร้อน (conduction load vector)
 $\{Q_o\}$ หมายถึง โหลดเวกเตอร์ความร้อนที่ผลิตเอง (heat generation load vector)
 $\{Q_q\}$ หมายถึง โหลดเวกเตอร์ความร้อนที่กำหนดให้ (specific heating load vector)
 $\{Q_h\}$ หมายถึง โหลดเวกเตอร์การพาความร้อน (convection load vector)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิในสถานะชั่วคราวรวมทั้งโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าจะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองผล

| พารามิเตอร์ | เหล็ก | อลูมิเนียม | อากาศ |
|-------------|--------------------|--------------------|--------|
| ρ | 7870 | 2700 | 1.1840 |
| C | 0.50×10^3 | 0.88×10^3 | 1.0035 |
| k | 80.2 | 237 | 0.026 |
| Q | 26564.8500 | 19727.0363 | 0 |
| h | 26.3 | 24.6 | 15 |
| T_{ext} | 20 C | 20 C | 20 C |
| R | 0.0215 | 0.0215 | - |

บทความนี้มีแหล่งกำเนิดความร้อน 2 แหล่งคือ แหล่งกำเนิดความร้อนที่มาจากกระแสที่ไหลในสายส่งสามารถคำนวณจากสมการที่ 10 และ แหล่งกำเนิดความร้อนที่มาจากสนามไฟฟ้ารอบๆ สายตัวนำสามารถคำนวณจากสมการที่ 11 (Bastos, J.P. Et al., 1990: 536).

$$Q = I^2 R_{dc} \quad (10)$$

$$Q = \frac{E^2}{\sigma} \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 จะเห็นว่า Q จะแปรผกผันกับ σ โดยที่ σ_{steel} มีค่า 1×10^7 S/m และ σ_{Al} มีค่าเป็น 3.5×10^7 S/m

4. การคำนวณหาค่าแรงดึงในสายส่ง

บทความนี้ได้ทำการคำนวณหาค่าแรงดึงในสายส่งโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและค่าแรงดึงในสายส่งตัวนำ โดยทำการเปรียบเทียบค่าแรงดึงของสายส่งที่ระยะความยาวสายส่งเป็น 1 เมตรเพื่อเป็นการพิจารณาถึงระยะของสายตัวนำที่ยืดตัวออกโดยทำการพิจารณาที่ตัวนำในเฟส A1 ทั้ง 4 บันเดิลเท่านั้น โดยสามารถคำนวณความสัมพันธ์ระยะของสายตัวนำที่ยืดตัวออกและอุณหภูมิของสายตัวนำแสดงได้ดังสมการที่ 12 (Yunus A. Gungel.,2006)

$$L = L_0 [1 + \alpha(T - 20)] \quad (12)$$

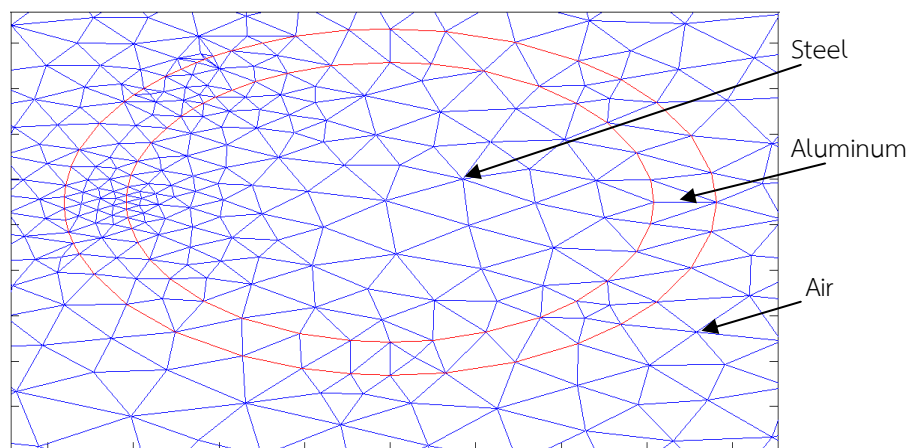
โดยที่ L หมายถึง ความยาวสาย (m)
 L_0 หมายถึง ความยาวสายเริ่มต้น ในบทความนี้กำหนดให้เป็น 1 เมตร
 α หมายถึง สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของสายไฟฟ้าที่แปรตามอุณหภูมิ
 และสามารถคำนวณหาค่าแรงดึงที่ทำให้สายส่งยืดออกเป็นระยะทาง L ได้ดังสมการที่ 13

$$T = \frac{L}{AE} \quad (13)$$

โดยที่ A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ (m^2)
 E หมายถึง โมดูลัสยืดหยุ่น มีค่าเป็น 2013269.129 (N/m^2)

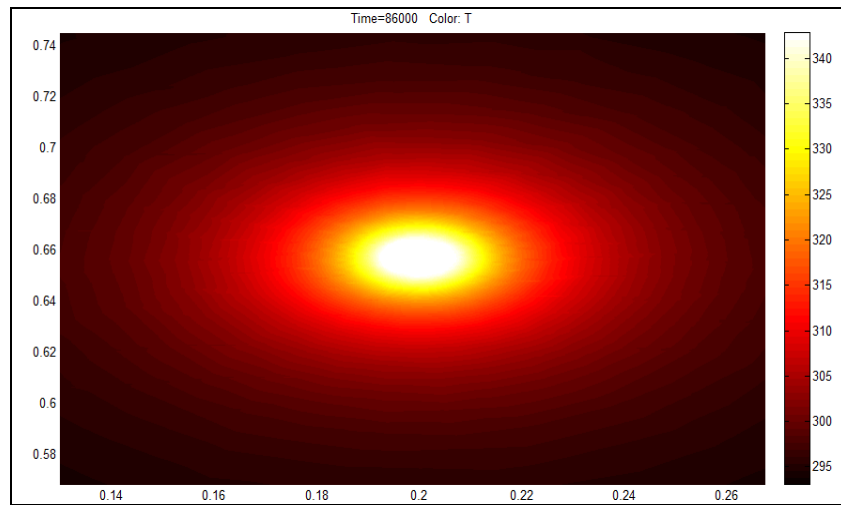
5. ผลการจำลอง

บทความนี้อาศัยกล่องเครื่องมือสำเร็จรูป MATLAB/PDETOOL ที่ใช้เทคนิคการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยพิจารณาระบบเป็น 2 มิติซึ่งได้กำหนดให้กริดและอีลิเมนต์สำหรับการจำลองผลแสดงได้ดังภาพที่ 3



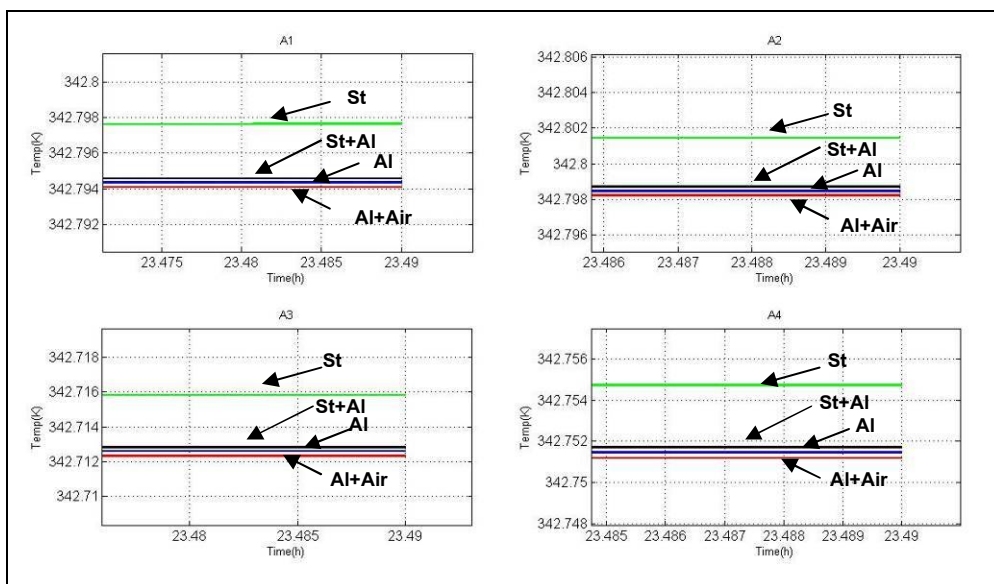
ภาพที่ 3 การสร้างกริดและอีลิเมนต์จากกล่องเครื่องมือสำเร็จรูป MATLAB/PDETOOL

จากภาพที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวนำที่ใช้เป็นตัวนำอะลูมิเนียมแกนเหล็กโดยที่ข้างในเป็นวัสดุที่ทำด้วยเหล็ก ส่วนชั้นถัดมาเป็นอะลูมิเนียม และนอกสุดคืออากาศ เมื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2 แล้วทำการจำลองผลจะได้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิรอบๆ สายส่งตัวนำเป็นดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การกระจายอุณหภูมิ (K) บริเวณรอบสายส่งตัวนำที่บริเวณเฟส A1

บทความนี้พิจารณาค่าของอุณหภูมิในวัสดุภายในของสายตัวนำชนิด ACSR ในสภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งจะพิจารณาชั้นของสายตัวนำดังนี้คือ 1. ชั้นแกนเหล็ก 2. ชั้นผิวระหว่างแกนเหล็กที่สัมผัสกับอะลูมิเนียม 3. ชั้นอะลูมิเนียม และ 4. ชั้นผิวของอะลูมิเนียมที่สัมผัสกับอากาศโดยรอบ สามารถแสดงค่าอุณหภูมิภายในสายตัวนำของเฟส A1 ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ค่าอุณหภูมิในระดับชั้นต่างๆ ภายในสายตัวนำชนิด ACSR ของเฟส A1

ผลการจำลองอุณหภูมิที่ได้นำไปคำนวณเพื่อหาค่าแรงดึงของสายตัวนำจะได้ค่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของสายตัวนำที่มีผลต่อระยะยึดและแรงดึงของสายตัวนำแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของสายตัวนำชนิด ACSR ของระบบกำลังไฟฟ้า 500kV วงจรคู่ เฟส A1

| ตัวนำ | อุณหภูมิ K | ระยะยึดตัว m | แรงดึง N |
|-------|--------------|----------------|------------|
| A1 | 342.7976 | 0.00597571 | 0.22106 |
| A2 | 342.8017 | 0.00597620 | 0.22108 |
| A3 | 342.7158 | 0.00597022 | 0.22085 |
| A4 | 342.7547 | 0.00597056 | 0.22087 |

ผลจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายในสายส่งตัวนำจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณสายส่งตัวนำและผลที่ตามมาคือเมื่อสายตัวนำร้อนจะมีการยึดตัวของสายตัวนำซึ่งจะทำให้ค่าแรงดึงที่บริเวณสายตัวนำนั้นเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่ออุณหภูมิของสายตัวนำมีค่าสูงสายจะมีการยึดตัวออกมากขึ้นและแรงดึงภายในสายตัวนำที่บริเวณนั้นก็มากตามไปด้วย ซึ่งค่าแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะส่งผลกระทบต่อทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงและประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าก็จะลดน้อยลงตามไปด้วย ทั้งนี้อุณหภูมิที่อยู่ภายนอกกรอบ ๆ สายตัวนำก็ยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้แรงดึงของสายมีการเปลี่ยนแปลง

6. สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองค่าของอุณหภูมิภายในสายตัวนำจะได้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 343 K หรือ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้สายส่งตัวนำมีการยึดตัวเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 6 มิลลิเมตรต่อความยาว 1 เมตรคิดเป็นค่าแรงดึงประมาณ 0.2 N โดยที่ค่าอุณหภูมิของสายส่งจะมีผลทำให้สายส่งมีการยึดตัวโดยเมื่ออุณหภูมิภายในสายส่งมีค่ามากขึ้นโดยที่อุณหภูมิภายนอกนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าแรงดึงที่ทำให้สายยึดตัวมีค่ามากขึ้นค่าแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทำให้โครงสร้างและประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าลดน้อยลง

7. เอกสารอ้างอิง

- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2547). ไฟไนท์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- พิทักษ์ ปิ่นอนงค์. (2545). การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Bastos, J.P., Sadoski, N., and Carlson, R. (1990). A modeling approach of a coupled problem between electrical current and its thermal effects. IEEE Transaction on Magnetic. 26(2): 536-538
- Jerry C. Whitaker. (2007). AC Power System Handbook. (3rd Edition). CRC Press: California.
- Matthew N.O. Sadiku. (2000). Numerical Techniques in Electromagnetics. CRC Press: Newyork.
- Theodore L. (2011). Heat Transfer Applications for The Practice Engineer. (4th Edition). John Wiley & Sons Inc. Canada
- Yunus A. Gungel. (2006). Heat and Mass Transfer A Practice Approach. (3rd Edition). Mc Graw Hill. Singapore.