



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



เรื่อง อิมพีแดนซ์อนุกรม (Series Impedance)

Transmission line Parameters

พารามิเตอร์ เป็น ชื่อเรียกค่าคงที่ชนิดหนึ่งในระบบ ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนด คุณสมบัติเฉพาะให้กับระบบด้วย พารามิเตอร์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีอยู่ 4 ด้วยกัน คือ

1. ความเหนี่ยวนำ (inductance : L)
2. ความต้านทาน (resistance : R)
3. ความจุไฟฟ้า (Capacitance : C)
4. ความนำไฟฟ้า (Conductance : G)

พารามิเตอร์ L และ R มีคุณสมบัติทำให้เกิดแรงดันตกเมื่อกระแสไหลผ่านสาย ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ จะต่อต้านต่อกัน โดยกระจายอยู่ตลอดสายทั้งเส้น อาจมองในรูปของอิมพีแดนซ์อันดับ Series impedance, $Z = R + jX$) ก็ได้ ส่วนพารามิเตอร์ C และ G นั้นเป็นตัวทำให้เกิดกระแสประจุ (Charging current) และกระแสรั่ว (leakage current) ข้ามสาย พารามิเตอร์ ทั้งสองจะต่อต้านกัน โดยกระจายอยู่ตลอดสายทั้งเส้นเช่นเดียวกัน อาจมองในรูปของแอดมิสแตนซ์ขนาน (Shunt admittance; $Y = G + jB$) ก็ได้

เนื่องจากตัวนำมีรูปทรงกระบอก ดังนั้นเส้นที่หน้าตัดของตัวนำ จึงแยกเป็น 2 ระบบใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ระบบมาตรฐานอเมริกัน (AWG: American wire gage)
2. ระบบ SI Units

ระบบ AWG จะนิยามวัดหน่วยความยาวเป็นฟุต (ft) และพื้นที่หน้าตัดเป็นเซอร์คิวลาร์มิล (Circular mil: (mil)

$$\begin{aligned} 1 \text{ cmil} &= \text{พ.ท.วงกลมที่มี diameter ยาว } 1 \text{ mil (ดังรูป)} \\ &= \frac{\pi D^2}{4} \\ &= \frac{\pi}{4} \times (1 \times 10^{-3})^2 = 0.7854 \times 10^{-6} \text{ (in)}^2 \end{aligned}$$

สรุป เมื่อเราทราบ พ.ท.ในหน่วย Cmil เมื่อเราต้องการจะทำให้เป็น พ.ท.ในหน่วย ตร.นิ้ว (in)² ก็ให้นำ 0.7854×10^{-6} มาคูณ



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



ใช้หน่วยวัดความยาวเป็นเมตร (m) และหน่วย พ.ท. เป็น ตร.ม. (m)² หรือ ตร.มม. (mm)²
โดยที่

$$1 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm} \text{ หรือ } 2.54 \text{ cm.}$$

* ดังนั้น เมื่อต้องการ พ.ท.หน้าตัดที่เปลี่ยนมาก cmil ไปเป็น mm² ก็ให้นำ 5.067×10^{-4}
มาคูณ พ.ท. cmil นั่นคือ

$$A \text{ (mm)}^2 = 5.067 \times 10^{-4} \text{ (cmil)}$$

หรือในทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการ พ.ท.ในหน่วย cmil เมื่อเราในหน่วย (mm)² ก็ให้นำ
1973.525 มาคูณ นั่นคือ

$$A \text{ (cmil)} = 1973.523 \times A \text{ (mm)}^2$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ mil} &= 0.02251 \text{ mm.} \\ &= 8.8622 \times 10^{-4} \text{ in} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ inch} &= 1128.388 \text{ mil} \\ &= 25.4 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ mm.} &= 44.4247 \text{ mil} \\ &= 0.03937 \end{aligned}$$

การเปลี่ยนหน่วยความยาว

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}$$

$$3 \text{ ft} = 1 \text{ หลา}$$

$$1760 \text{ หลา} = 1 \text{ mi}$$

$$1 \text{ mi} = 1609 \text{ m.}$$

$$1 \text{ km} = 1000 \text{ m.}$$

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm.}$$

$$1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm.}$$

* จำเป็นต้องรู้ เพราะเวลาเราคิดค่าพารามิเตอร์ออกมา พารามิเตอร์ของสายส่งต่อหน่วย
ความยาว



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



Inductance เนื่องจาก flux ภายใน

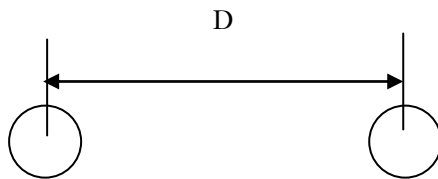
$$L_{int} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \quad \text{H/m} \quad \text{จำไปใช้}$$

Flux linkage ระหว่าง 2 จุด ภายนอกตัวนำ

$$L_{12} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D^2}{D_1} \quad \text{H/m}$$

$$L_{ext} = 0.7411 \log \frac{D^2}{D_1} \quad \text{mH/mi} \quad \dots\dots\dots \text{จำไปใช้}$$

Inductance of a single – phase Two – wire line



รูปแสดงการเกิดค่า inductance ใน Single phase two wire

$$\begin{aligned} \text{Total inductance; } L &= L_x + L_y \\ &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_x} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_y} \\ &= 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{D}{r_x} + \ln \frac{D}{r_y} \right) \\ &= 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{\sqrt{r_x \cdot r_y}} \right)^2 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า L เมื่อ $r_x \neq r_y$ คือ

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x \cdot r_y}} \quad \dots\dots\dots \text{นำไปใช้}$$

แต่ถ้า $r_x = r_y$ จะได้

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_x} \quad \dots\dots \text{H/m/loop} \dots\dots\dots \text{จำไปใช้}$$

อาจใช้ r_y ก็ได้เพราะ r_y ใช้ตัวไหนก็ได้



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



Inductance of composite conductor line

Composite conductor line หมายถึง ชุดของสายส่งที่ภายในประกอบด้วยตัวนำย่อย ตั้งแต่ 2 ตัวนำขึ้นไป (โดยแต่ละตัวนำย่อยจะเหมือน และเท่ากันทุกประการ) ทำหน้าที่แบ่งการจ่ายกระแสไฟฟ้า ของเฟสใด ๆ

หน่วยคือ H/m จำไปใช้

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \dots\dots\dots \text{จำไปใช้}$$

∴ ค่า L ที่จะเป็นค่าต่อ half loop (กลุ่มเดียว) ดังนั้น L ทั้งหมด คือ

$$L = L_x + L_y$$

โดยที่ GMD → (Geometric Mean Distance)

: ค่าเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตของระยะห่างกลุ่มสายตัวนำ

GMR → (Geometric Mean radius)

: ค่าเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ของระยะห่างของตัวนำย่อย ภายในกลุ่มมันเอง

ตัวอย่างที่ 1 สายส่ง 1 เฟส ประกอบด้วย กลุ่มตัวนำ x และ y ซึ่งเป็น Solid conductor ดังรูป
ตัวนำในกลุ่ม x แต่ละตัวมีรัศมี 0.25 cm. และในกลุ่ม y แต่ละตัวมีรัศมี 0.5 cm.
จงคำนวณหา inductance ทั้ง loop ในหน่วย H/m

GMD เมื่อคิดจากด้าน กลุ่ม x ไปด้าน กลุ่ม y
จะเท่ากับ GMD ที่คิดจากด้าน กลุ่ม y ไปด้าน
กลุ่ม x

$$\text{จากสูตร } L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD_x}{GMR_x}$$

และ $L_T = L_x + L_y$

Step 1 $GMD_x = GMD_y = \sqrt[6]{D_{ad}.D_{ae}.D_{bd}.D_{be}.D_{cd}.D_{ce}}$

$D_{ad} = D_{be} = 9 \text{ m.}$



ใบความรู้
วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



$$D_{ae} = D_{bd} = D_{ce} = \sqrt{6^2 + 9^2} = \sqrt{117} \text{ m}$$

$$D_{cd} = \sqrt{9^2 + 12^2} = 15 \text{ m.}$$

$$\therefore \text{GMD} = \sqrt[6]{9^2 \times 15 \times 117^3} = 10.743 \text{ m \#}$$

$$\begin{aligned} \text{Step 2 } \text{GMR}_x &= \sqrt[9]{D_{ad}.D_{ab}.D_{ac}.D_{bb}.D_{bc}.D_{ba}.D_{cc}.D_{ca}.D_{cb}} \\ &= \sqrt[9]{(0.7788 \times 0.25 \times 10)^{-2} \times 6^4 \times 12^2} = 0.481 \text{ m \#} \end{aligned}$$

$$\text{Step 3 } \therefore L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{10.743}{0.481} \right) = 6.212 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Step 4 } \text{GMR}_y &= \sqrt[4]{D_{dd}.D_{ed}.D_{ee}.D_{ed}} \\ &= \sqrt[4]{(0.7788 \times 0.5 \times 10^{-2})^2 \times 6^2} = 0.153 \text{ m } \neq \end{aligned}$$

$$\text{Step 5 } \therefore L_y = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{10.743}{0.153} \right) = 8.503 \times 10^{-7} \text{ H/m \#}$$

$$\begin{aligned} \text{Step 6 } L_T &= L_x + L_y = 6.212 \times 10^{-7} + 8.50 \times 10^{-7} \text{ H/m} \\ &= 14.715 \times 10^{-7} \text{ H/m} \end{aligned}$$

Step 7 แปลงหน่วยจาก H/m ไปเป็น H/mi

$$\begin{aligned} L_T &= 14.715 \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \left(\frac{1609 \text{ m}}{1 \text{ mi}} \right) \\ &= 2.37 \times 10^{-3} \text{ H/mi/loop} \end{aligned}$$



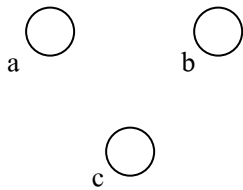
ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



Inductance of three phases lines

ในการหาค่า inductance ของสายส่ง 3 เฟส วงจรเดี่ยวแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีใหญ่ ๆ ตามลักษณะการวางสาย ดังนี้

1. กรณีที่ระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน (Equal phase spacing)
2. กรณีที่ระยะห่างระหว่างที่ไม่เท่ากัน (Unsymmetrical spacing)



$$\begin{aligned} \therefore \text{จะได้ } L_a &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_a} && \text{H/m/phase} \\ L_b &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_b} && \text{H/m/phase} \\ \text{และ } L_c &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_c} && \text{H/m/phase} \end{aligned}$$

สมการทั้ง 3 ข้าง ต้นอาจจะเขียนให้อยู่ในรูป GMD และ GMR และ ก็ได้ นั่นคือ

$$L_a = L_b = L_c = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad \text{H/m/phase}$$

โดย $GMD = \sqrt[3]{D \times D \times D} = D$

$$GMR = 0.7788 r_a = 0.7788 r_b = 0.7788 r_c = r$$

ตัวอย่างที่ 2 ตัวนำของสายส่ง 3 เฟส มีระยะห่างระหว่างเฟสเท่ากัน คือ 12 ft ใช้ตัวนำชนิด

Parakeet (ACSR) จงคำนวณหา inductance /phase ในหน่วย H/mi

กำหนดให้ GMR = 0.0306 ft → (จากตารางนะ แต่ข้อสอบไม่มีตาราง)

Step 3 แทนค่าในสูตร ; $L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \dots\dots\dots \text{H/m/phase}$

$$\begin{aligned} \therefore L_a &= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{12}{0.0306} && = 1.1973 \times 10^{-6} \frac{H}{m} \times \frac{1609m}{1m} \\ &&& = 1.922 \times 10^{-3} \text{ H/mi/phase} \end{aligned}$$



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



กรณีที่ 2 Unsymmetrical spacing

เนื่องจาก แต่ละเฟสมีระยะห่างไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดค่า Inductance ในแต่ละเฟส มีค่าน้อยไม่เท่ากัน ทำให้ระบบไฟฟ้าสามเฟส ไม่ดุลย์ (Unbalance)

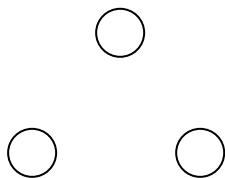
ใช้สูตร
$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \sqrt[3]{\frac{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}{r_a}} = \text{H/m/phase}$$

หรือ
$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} = \text{H/m/phase} \dots \dots \dots \text{จำไปใช้}$$

และ ในเฟส B และ C ก็หา inductance ได้จากสมการ * เช่นกัน

ทั้งนี้เพราะ $L_a = L_b = L_c \dots \dots \dots \text{H/m/phase}$

ตัวอย่างที่ 3 A Single circuit 3 phase, 60 Hz ดังรูป ใช้สาย ACSR: Chichibu ให้คำนวณหา inductive reactance ต่อเมตรต่อเฟส กำหนดให้ จากตาราง GMR = 0.0241 ft



Step ที่ 1

$$GMD = \sqrt[3]{6 \times 6 \times 10} = 7.114 \text{ m.}$$

Step ที่ 2

แปลงหน่วย GMD ให้เป็น ft เหมือนกับหน่วยของ GMR

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } GMD &= 7.114 \text{ m} \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) \left(\frac{1 \text{ ft}}{30 \text{ cm}} \right) \\ &= 23.713 \text{ ft} \end{aligned}$$

Step 3 แทนค่าในสูตร

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{23.813}{0.0241} \right) = 1.402 \times 10^{-6} \text{ H/m/phase}$$

Step 4 หาค่า inductive reactance ; $x_L = 2 \pi fL$

∴ x_L หาค่า inductive reactance ; $X_L = 2 \pi fL$

$$\begin{aligned} \therefore X_L &= 2 \pi \times 60 \times 1.402 \times 10^{-6} \\ &= 0.52857 \times 10^{-3} \Omega / \text{phase} \end{aligned}$$



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



สายส่งตัวนำควบ : Bundle Conductors

คือ การใช้กลุ่มสายตัวนำตั้งแต่ 2 ตัวนำขึ้นไปส่งเฟสแทนการใช้สายส่งตัวนำส่งเส้นขนาดใหญ่ ต่อเฟส ส่วนมากใช้กับงานส่งจ่ายที่มีระดับแรงดัน ตั้งแต่ 230 KV ขึ้นไป เชื่อว่า Extra – high Voltage : EHV การใช้สายส่งที่เป็น bundle นี้ จะมีเงื่อนไขอยู่ว่า

1. พื้นที่หน้าตัดของตัวนำทุกตัวในกลุ่มต้องเท่ากันเสมอ
2. ระยะระหว่างตัวนำภายในกลุ่ม (d) ต้องเท่ากัน (ระยะ Bundle spacing)

จากการเลือกใช้สายที่เป็น Bundle conductor จะมีผลทำให้ GMR ของระบบโตขึ้น ซึ่งค่า GMR bundle นี้ คำนวณหาได้ดังต่อไปนี้

Two – strand bundle

$$GMR^b = \sqrt[4]{GMR^2 \cdot (d)^2} = \sqrt{GMR \cdot d}$$

Three – strand bundle

$$GMR^b = \sqrt[9]{GMR^3 \cdot (d)^6} = \sqrt[3]{GMR \cdot (d)^2}$$

Four – strand bundle

$$GMR^b = 1.09 \sqrt[4]{GMR(d)^3}$$

หมายเหตุ : การคิดหา GMD จะใช้ระยะตรงจุดกลางกลุ่ม bundle conductors จะไม่คิดทุกตัว

ตัวอย่างที่ 4 จากรูปเป็น bundle – conductor line โดยแต่ละตัวนำใช้สาย ACSR, chichadee. เมื่อ $d = 45 \text{ cm}$. จงคำนวณหา (ระบบ Gon_2) กำหนดให้ $GMR = 0.0241 \text{ ft}$

a) Inductive reactance ในหน่วย $\Omega / \text{m/phase}$

b) Per unit reactance ถ้าสายส่งยาว 200 km.

โดยกำหนด Base 100 MVA, 500 KV

Sol. A)
$$GMR^b = \sqrt[9]{(0.0241)^3 \cdot (45 \text{ cm} \times \frac{1 \text{ ft}}{30 \text{ cm}})^6}$$
$$= 0.3785 \text{ ft} \quad \#$$

GMD แล้วแปลงหน่วยให้เป็น ft

$$GMD = \sqrt[3]{6 \times 6 \times 10} = 7.114 \text{ m} \times \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ ft}}{30 \text{ cm}} \right)$$

$$\therefore GMD = 23.713 \text{ ft}$$



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



$$L = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{23.713}{0.3758}\right) = 0.8273 \times 10^{-6} \text{ H/m/phase}$$

$$\begin{aligned} \text{หาค่า } X_L &= 2\pi \times 60 \times 0.8273 \times 10^{-6} && \text{H/m/phase} \\ &= 0.312 \times 10^{-3} \Omega/\text{m/phase} \end{aligned}$$

b) เนื่องจากสายส่งยาว 200 km

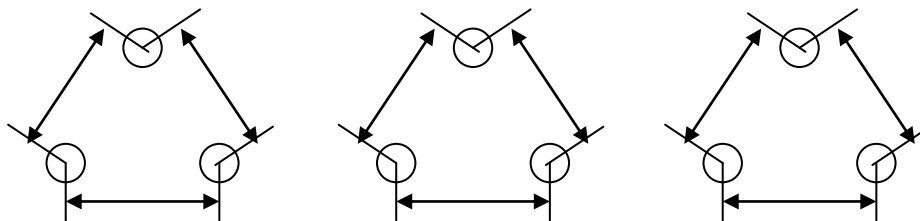
$$\begin{aligned} \therefore X_L \text{ ตลอดความยาวสายส่ง} &= 0.312 \times 10^{-3} \\ &= 62.4 \Omega/\text{phase} \end{aligned}$$

$$\text{ห1 Base } Z = \left(\frac{500 \times 10^3}{100 \times 10^6}\right)^2 = 2,500 \Omega$$

$$\therefore X \text{ p.u.} = \frac{62.4}{2,500} = 0.02496 \text{ p.u.}$$

Parallel circuit three phase line

ในที่นี้หมายถึงว่า เป็นวงจรสามเฟสที่วางขนาน กันไป บนเสาส่งต้นเดียวกัน ในบางครั้ง อาจเรียกว่า “double circuit” (วงจรคู่) ก็ได้ เมื่อเป็นเช่นนี้แก้ค่า GMD และ GMR จะต้องเปลี่ยนแปลงไปอย่างแน่นอน นั่นหมายถึงมันมีผลต่อค่า Inductance ของระบบด้วย

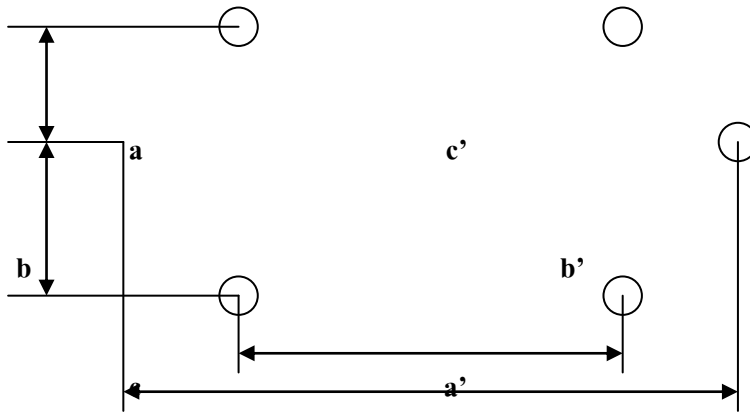


รูปแสดงลักษณะการวางสายตัวนำของสายส่ง
สามเฟส double circuit

เมื่อพิจารณารูปข้างบน จะเห็นว่า วงจรทั้งสองมีการวางสายแบบ Unsymmetrical Spacing ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ inductance ที่เกิดขึ้นในแต่ละสายมีค่าเท่ากันทุกสาย จึงต้องมีการสลับ หรือ Transposition สายทั้ง 2 วงจร ดังรูปข้างล่าง



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



รูปแสดงการ Transposition สาย ของวงจร 3 เฟส double circuit

เมื่อทำการสลับสายอย่างสมบูรณ์แล้ว จะทำให้ได้สูตรในการคำนวณหาค่า inductance ดังนี้

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{GMD_p}{GMR_p} \right) \dots\dots\dots \text{H/m/phase} \quad \text{จำไปใช้}$$

เมื่อ

GMD_p GMD ของ Parallel circuit

$$= \sqrt[3]{D_{ab}^p D_{bc}^p D_{ca}^p} \left. \begin{array}{l} \rightarrow \sqrt[4]{D_{ca} D_{ca} D_{ca} D_{ca}} \\ \rightarrow \sqrt[4]{D_{bc} D_{bc} D_{bc} D_{bc}} \\ \rightarrow \sqrt[4]{D_{ab} D_{ab} D_{ab} D_{ab}} \end{array} \right\} \text{** จำไปใช้}$$

$$GMR_p = \sqrt[3]{GMR_a GMR_b GMR_c} \left. \begin{array}{l} \rightarrow \sqrt[4]{(GMR)^2 D_{cc} D_{cc}} \\ \rightarrow \sqrt[4]{(GMR)^2 D_{bb} D_{bb}} \\ \rightarrow \sqrt[4]{(GMR)^2 D_{aa} D_{aa}} \end{array} \right\} \text{จำไปใช้}$$



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



ตัวอย่างที่ 5 A three double – circuit line ใช้สายตัวนำชนิด ACSR: Ostrich 300,000 (mil 26/7) ทำการวางระบบสายส่งตัวรูปจ้งคำนวณหา inductive reactance ในหน่วย $\Omega/\text{km}/\text{phase}$ ที่ความถี่ 60 Hz
รูปแสดงลักษณะ การวางสายตัวนำของสายส่งสามเฟสดังรูปด้านบน Double circuit ในตัวอย่างนี้

กำหนดให้ GMR ของสาย = 0.0229 ft

$$\begin{aligned} \text{เปลี่ยนหน่วย GMR} &= 0.0229 \text{ ft} \left(\frac{30\text{cm}}{1\text{ft}} \right) \cdot \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right) \\ &= 6.87 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{GMR} = \sqrt[3]{\text{GMR}_a \cdot \text{GMR}_b \cdot \text{GMR}_c}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \text{GMR}_a &= \sqrt[4]{(6.87 \times 10^{-3})^2 \cdot (\sqrt{6^2 + 5.5^2})^2} \\ &= 0.23646 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{GMR}_b &= \sqrt[4]{(6.87 \times 10^{-3})^2 \cdot (6.5)^2} \\ &= 0.21132 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$\text{GMR}_c = \sqrt[4]{(6.87 \times 10^{-3})^2 \cdot (\sqrt{6^2 + 5.5^2})^2}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{GMP}_p &= \sqrt[3]{0.23646 \times 0.21132 \times 0.23646} \\ &= 0.2277 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$\text{GMD}_p = \sqrt[3]{D^p_{ab} D^p_{bc} D^p_{ca}}$$

$$D^p_{ab} = \sqrt[4]{(\sqrt{0.5^2 + 3^2} \sqrt{3^2 + 6^2})^2} = D^p_{bc} = 4.15688 \text{ m.}$$

$$D^p_{ca} = \sqrt[4]{6 \times 5.5 \times 5.5 \times 6} = 5.74456 \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{GMD} &= \sqrt[3]{4.15688 \times 4.15688 \times 5.74456} \\ &= 4.6302 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{4.6302}{0.2277} \right) = 6.0246 \times 10^{-7} \text{ H/m/phase}$$



ใบความรู้ วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า



$$\begin{aligned}\text{และ } X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3.14 \times 60 \times 6.0246 \times 10^{-7} \\ &= 2.27 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}/\text{phase} \\ X_L &= 2.27 \times 10^{-4} \frac{\Omega}{m} \times \frac{1000 m.}{1 km.} \\ &= 0.227 \Omega/\text{km.}/\text{phase}\end{aligned}$$