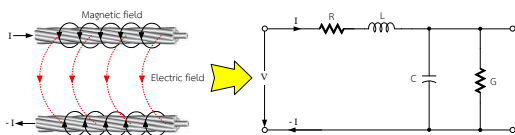


หน่วยที่ 4 พารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Unit 4 Line Parameters



วงจรเทียบเคียงแสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของสายส่งกำลังไฟฟ้า

1

4.1 ความนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Conductance ; G)

ค่าพารามิเตอร์ G เกิดจากการรั่วซึม (Leakage current) ข้ามสายโดยผ่านฉนวนลวกฉนวน ซึ่งตามปกติฉนวนลวกฉนวนจะมีความต้านทานสูงมากจนกระแสไหลผ่านไม่ได้ และในทางปฏิบัติมักจะทิ้งผลของพารามิเตอร์ตัวนี้ เพราะค่า G มีค่าเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งกระแสรั่ว $I_r = VG$ จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งการคิดคำนวณเกี่ยวกับวงจรเทียบเคียงโดยประมาณจึงไม่นำค่าความนำไฟฟ้ามาคิด

4.2 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Resistance ; R)

$$R_{dc,T} = \frac{\rho_r \ell}{A}$$

2

$$R_{dc,T} = \frac{\rho_r \ell}{A}$$

ρ_r คือ ความต้านทานจำเพาะของสายตัวนำที่อุณหภูมิ T มีหน่วยเป็น $\Omega \cdot m$

ρ ของอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 20° C มีค่า $2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

ρ ของทองแดงที่อุณหภูมิ 20° C มีค่า $1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

ℓ คือ ความยาวของสายตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของสายตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

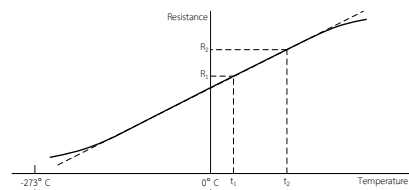
“ตัวประกอบสกินเอฟเฟกต์ (Skin effect factor)”

$$\text{Skin effect factor} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}}$$

3

ผลการตีเกลียวของสาย ถ้าสายตัวนำตีเกลียว 3 เส้นย่อย (Strand) จากสมการ 4.1 จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอีก 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าตีเกลียวมากกว่า 3 เส้น จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของจำนวนสายที่ตีเกลียว

ผลกระทบของอุณหภูมิ (Effect of temperature) จากทฤษฎีวงจรไฟฟ้าทำให้เราทราบว่าเมื่อสายตัวนำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความต้านทานของสายตัวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้น หลักการดังกล่าวนำมาใช้กับสายส่ง (สายตัวนำ) ซึ่งใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับได้เช่นกัน



ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

4

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{t_2 + T}{t_1 + T}$$

เมื่อ R_1 และ R_2 คือ ความต้านทานของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิ t_1 และ t_2 ตามลำดับ
T คือ Temperature constant ของวัสดุตัวนำ

ตารางแสดงค่าจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำสายตัวนำ

Material	% Conductivity	$P_{20}^{\circ}C$ Resistivity at 20° C		T (Temperature constant °C)
		$\Omega \cdot m \times 10^{-8}$	$\Omega \cdot cm/ft$	
Copper :				
Annealed	100%	1.72	10.37	234.5
Hard-drawn	97.3%	1.77	10.66	241.5
Aluminum :				
Hard-drawn	61%	2.83	17.00	228.1
Brass	20-27%	6.4-8.4	38-51	480
Iron	17.2%	10	60	180
Silver	108%	1.59	9.6	243
Sodium	40%	4.3	26	207
Steel	2-14%	12-88	72-530	180-980

5

ตัวอย่างที่ 4.1 สายอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 20° C มีขนาดสาย $2.82 \times 10^{-4} m^2$ จงหาค่า R_{dc} ของสายในหน่วย $\Omega /mile$

วิธีทำ

ตัวอย่างที่ 4.2 จากตัวอย่างที่ 4.1 ถ้าโรงงานผู้ผลิตกำหนดค่าที่แท้จริงของสายตีเกลียวดังกล่าวเป็น $R_{dc} = 0.1626 \Omega /mile$ และ $R_{ac} = 0.1669 \Omega /mile$ ที่อุณหภูมิ 20° C จงหาเปอร์เซ็นต์ผลกระทบของสายตีเกลียวที่มีต่อ R_{dc} ที่ได้จากสมการ 4-1 และหาค่า Skin effect factor

วิธีทำ

ตัวอย่างที่ 4.3 จากตัวอย่างที่ 4.2 ถ้าสายตัวนำดังกล่าวเป็นสายอลูมิเนียมรีดแข็งที่มีความนำจำเพาะ 60 % จงหาค่า R_{ac} ที่อุณหภูมิ 75° C

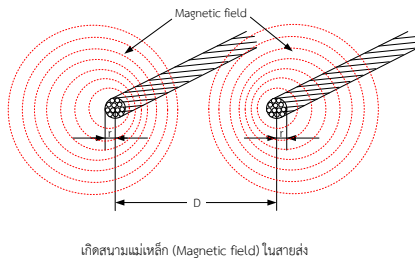
วิธีทำ

ตัวอย่างที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบ R_{ac} ที่อุณหภูมิ 75° C กับ R_{dc} ที่อุณหภูมิ 20° C ซึ่งหาได้จากสมการ 4.1 อยากทราบว่าความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นกี่เปอร์เซ็นต์

วิธีทำ

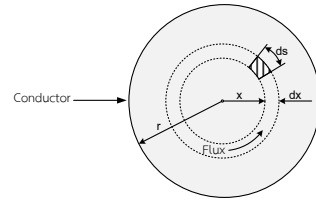
6

4.3 ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Inductance ; L)



7

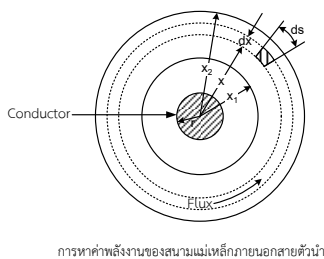
4.3.1 ความเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กภายในสายตัวนำ (Inductance component due to internal flux ; L_{int})



การหาค่าพลังงานของสนามแม่เหล็กภายในสายตัวนำ

8

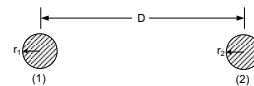
4.3.2 ความเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ (Inductance component due to external flux ; L_{ext})



การหาค่าพลังงานของสนามแม่เหล็กภายนอกสายตัวนำ

9

4.3.3 ความเหนี่ยวนำของสายส่ง 1 เฟส (Inductance of single phase)



$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{\text{GMR}} \right) \text{ [H/m]}$$

$$L_1 = 0.7411 \log \left(\frac{D}{\text{GMR}} \right) \text{ [mH/mile]}$$

$$L = L_1 + L_2 = 4 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{\text{GMR}} \right) \text{ [H/m]}$$

$$L = 1.482 \log \left(\frac{D}{\text{GMR}} \right) \text{ [mH/mile]}$$

$$\text{GMR} = r e^{-1/4} = 0.7788r$$

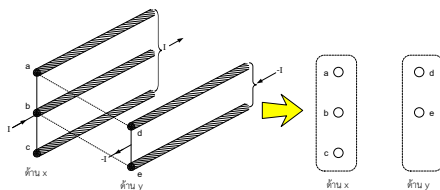
10

ตัวอย่างที่ 4.5 จากรูป 4.6 จงหาค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ของสายตัวนำในหน่วยของ Ω/m และ Ω/mile เมื่อสายตัวนำวางห่างกัน 25 ft ระบุปริมิตีความถี่ 50 Hz และ $\text{GMR} = 0.0198 \text{ ft}$

วิธีทำ

4.3.4 ความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกลุ่ม (Inductance of composite conductor)

กรณีแทนสายตัวนำแต่ละเส้นของสายส่ง 1 เฟส ด้วยสายส่งย่อยตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไป เพื่อช่วยในการรับกระแสไฟฟ้าของสายส่งย่อยดังกล่าว เราเรียกสายส่งย่อยเหล่านี้ว่าสายตัวนำกลุ่ม



11

$$D_m = \sqrt[3]{(D_{ad}D_{de})(D_{od}D_{be})(D_{cd}D_{ce})}$$

$$D_{ax} = \sqrt[3]{(D_{aa}D_{ab}D_{ac})(D_{ba}D_{bb}D_{bc})(D_{ca}D_{cb}D_{cc})}$$

$$D_{sy} = \sqrt[3]{(D_{dd}D_{de})(D_{ee}D_{ed})}$$

$$L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_m}{D_{ax}} \right) \text{ [H/m]}$$

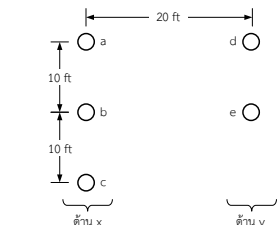
$$L_x = 0.7411 \log \left(\frac{D_m}{D_{ax}} \right) \text{ [mH/mile]}$$

$$L_y = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_m}{D_{sy}} \right) \text{ [H/m]}$$

$$L_y = 0.7411 \log \left(\frac{D_m}{D_{sy}} \right) \text{ [mH/mile]}$$

12

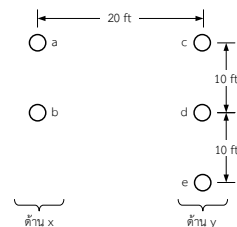
ตัวอย่างที่ 4.6 จากรูป ถัดกระแสนไฟฟ้าไหลเข้าสู่กลุ่มของสายตัวนำทางด้าน x และไหลย้อนกลับทางกลุ่มตัวนำด้าน y จงหาค่าอินดักแตนซ์ของสายตัวนำทั้งหมดในหน่วยของ mH/mile โดยกำหนดให้กลุ่มตัวนำทางด้าน x และด้าน y มีค่า GMR = 0.00446 ft และ 0.00814 ft ตามลำดับ



วิธีทำ

13

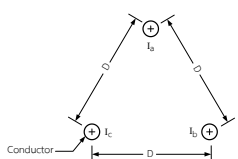
ตัวอย่างที่ 4.7 จากรูป จงหาค่าอินดักแตนซ์ของสายตัวนำทั้งหมดในหน่วยของ mH/mile โดยกำหนดให้กลุ่มตัวนำทางด้าน x และด้าน y มีค่า GMR = 0.00814 ft และ 0.00446 ft ตามลำดับ



วิธีทำ

14

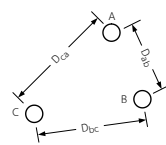
4.3.5 ความเหนี่ยวนำของสายส่ง 3 เฟส ที่มีระยะห่างเท่ากัน (Three phase inductance of Delta spacing)



$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{\text{GMR}} \right) \quad [\text{H/m}]$$

15

4.3.6 ความเหนี่ยวนำของสายส่ง 3 เฟส ที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน (Three phase inductance of Asymmetrical spacing)

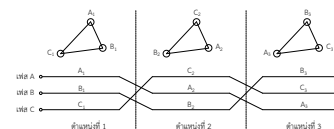


$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_m}{\text{GMR}} \right) \quad [\text{H/m}]$$

$$L = 0.7411 \log \left(\frac{D_m}{\text{GMR}} \right) \quad [\text{mH/mile}]$$

$$L = 0.4605 \log \left(\frac{D_m}{\text{GMR}} \right) \quad [\text{mH/km}]$$

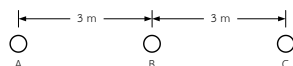
$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$$



การสลับสาย 3 เฟส เป็นขั้ว (Transpose lines)

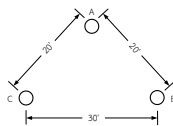
16

ตัวอย่างที่ 4.8 จากรูป ถ้าสายตัวนำแต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 m จงหาค่าความเหนี่ยวนำต่อเฟสในหน่วยของ H/m



วิธีทำ

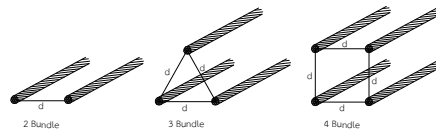
ตัวอย่างที่ 4.9 จากรูป ถ้า GMR ของสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่า 0.0356 ft จงหาค่าอินดักติฟรีแอกแตนซ์ในหน่วยของ $\Omega/\text{phase/mile}$ ขณะมีความถี่ 50 Hz



วิธีทำ

17

4.3.7 ความเหนี่ยวนำของการจัดวางสายส่งแบบตัวนำรวม (Bundle conductor)



แบบ 2 Bundle (2 Sub-conductor)

$$D_{bl} = \sqrt{\text{GMR} \times d}$$

แบบ 3 Bundle (3 Sub-conductor)

$$D_{bl} = \sqrt[3]{\text{GMR} \times d^2}$$

แบบ 4 Bundle (4 Sub-conductor)

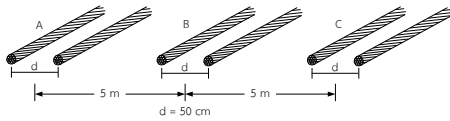
$$D_{bl} = 1.09 \sqrt[4]{\text{GMR} \times d^3}$$

ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการนี้ของสายตัวนำรวมเป็นค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ย (L_g) หาได้จาก

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_m}{D_{bl}} \right) \quad [\text{H/m}]$$

18

ตัวอย่างที่ 4.10 จากรูป กำหนดให้มีการวางสายตัวนำรวม 3 เฟส ตัวนำที่ใช้เป็นสาย ACSR ขนาด 1,113 kcmil มีค่า GMR = 0.0435 ft จงหาค่าอินดัคทีฟรีแอกแตนซ์ในหน่วยของ $\Omega/\text{phase}/\text{mile}$ ที่ความถี่ 50 Hz

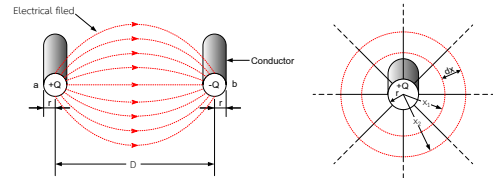


วิธีทำ

19

4.4 ความจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Capacitance ; C)

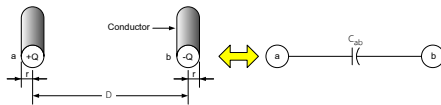
การไหลของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนตัวนำที่วางขนานกันตลอดระยะทาง จึงมีสนามไฟฟ้า (Electrical field) ระหว่างสายตัวนำที่วางขนานกันโดยมีอากาศเป็นไดอิเล็กทริก จึงเปรียบเสมือนเป็นตัวเก็บประจุ (C) โดยมีสายตัวนำเป็นเพลตเก็บประจุ



สนามไฟฟ้า (Electrical field) ระหว่างสายตัวนำที่วางขนานกัน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบสายตัวนำ

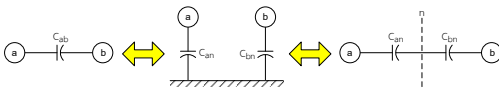
20

4.4.1 แรงดันไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าในระบบ 1 เฟส



การวางสายตัวนำขนาดเท่ากันวางขนานกัน ในระบบ 1 เฟส

4.4.2 ค่าความจุไฟฟ้าจากสายถึงนิวทรัล (Capacitance line to neutral)



ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างสายถึงนิวทรัล

21

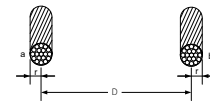
$$C_n = C_{an} = C_{bn} = 2C_{ab}$$

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln(D/r)} \quad [\text{F}/\text{m}]$$

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{0.0388}{\log(D/r)} \quad [\mu\text{F}/\text{mile}]$$

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{0.0241}{\log(D/r)} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

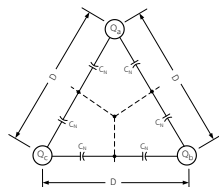
ตัวอย่างที่ 4.11 จากรูปที่ 4.21 ถ้าระยะ $D = 20$ ft และสายตัวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.563 inch จงหาค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของสายตัวนำในหน่วย Ω/km ถ้าระบบมีความถี่ 50 Hz



วิธีทำ

22

4.4.3 ค่าความจุไฟฟ้าของสายส่ง 3 เฟส ที่มีระยะห่างเท่ากัน (Three phase capacitance of Delta spacing)



กำลังไฟฟ้าต้านกลับ (Reactive power ; Q)
หรือเรียกว่า Charging kVar หรือ Line charging

$$\text{Charging kVar} = \sqrt{3} V_L I_{\text{chg}} \quad [\text{kVar}]$$

$$C_{an} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln(D/r)} \quad [\text{F}/\text{m}]$$

$$C_{an} = \frac{0.0388}{\log(D/r)} \quad [\mu\text{F}/\text{mile}]$$

$$C_{an} = \frac{0.0241}{\log(D/r)} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

กระแสลัดประจุ (Charging current)

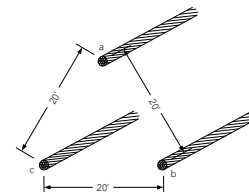
$$\text{ระบบ 1 เฟส} \quad I_{\text{chg}} = (2\pi f)(C_{ab})(V_{ab})$$

$$\text{ระบบ 3 เฟส} \quad I_{\text{chg}} = (2\pi f)(C_{an})(V_{an})$$

23

ตัวอย่างที่ 4.12 สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส 115 kV 50 Hz ใช้สาย ACSR มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.883 inch วางตัวนำมีระยะห่างเท่ากันดังรูปที่ 4.23 ถ้าสายส่งกำลังมีความยาว 100 mile จงคำนวณหา

- ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างสายกับนิวทรัล
- คาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ระหว่างสายกับนิวทรัล
- กระแสชาร์จ
- Charging kVar



วิธีทำ

24

4.4.4 ค่าความจุไฟฟ้าของสายส่ง 3 เฟส ที่มีระยะห่างไม่เท่ากัน (Three phase capacitance of Asymmetrical spacing)

$$C_n = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln(D_m / r)} \quad [\text{F/m}]$$

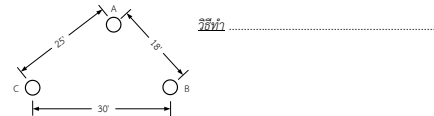
$$C_n = \frac{0.0388}{\log(D_m / r)} \quad [\mu\text{F}/\text{mile}]$$

$$C_n = \frac{0.0241}{\log(D_m / r)} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$$

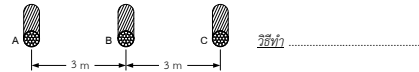
25

ตัวอย่างที่ 4.13 สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในรูปที่ 4.24 มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 0.883 inch จงหาค่าความจุไฟฟ้าจากสายถึงนิวทรัล ในหน่วยของ F/m



ตัวอย่างที่ 4.14 สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ในรูปที่ 4.25 มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 0.883 inch จงหาค่า

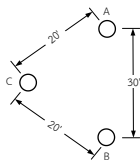
- ก) ค่าปาดิแทนซ์ต่อเฟสของสายตัวนำที่ยาว 1 m
ข) ค่าปาดิทิฟฟิแอกแตนซ์ต่อความยาวสาย 10 mile ที่ความถี่ 50 Hz



26

ตัวอย่างที่ 4.15 สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส วงจรเดี่ยว ระดับแรงดัน 230 kV 50 Hz ระยะทางยาว 240 km วางตัวนำแบบไม่สมดุล ให้สายตัวนำอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.108 inch จงหาค่าต่างๆ ดังนี้

- ก) ค่าปาดิแทนซ์ต่อเฟสของสายตัวนำตลอดความยาวสายส่ง
ข) ค่าปาดิทิฟฟิแอกแตนซ์ต่อความยาวสายส่ง
ค) กระแสชาร์จ
ง) Charging kVar



วิธีทำ

27

4.4.5 ความจุไฟฟ้าของการจัดวางสายส่งแบบตัวนำรวม (Bundle conductor)

การหาค่าความจุไฟฟ้าและค่าปาดิทิฟฟิแอกแตนซ์ของสายแบบตัวนำรวมนั้น จะมีวิธีการคล้ายกับการหาค่าความเหนี่ยวนำ นั่นคือต้องเริ่มจากการหา D_m และค่า D_{bc} ที่ใช้ในการหาค่า C จะกำหนดให้เป็น D_{bc}

แบบ 2 Bundle (2 Sub-conductor) $D_{bc} = \sqrt{r \times d}$

แบบ 3 Bundle (3 Sub-conductor) $D_{bc} = \sqrt[3]{r \times d^2}$

แบบ 4 Bundle (4 Sub-conductor) $D_{bc} = 1.09 \sqrt[4]{r \times d^3}$

$$C_n = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln(D_m / D_{bc})} \quad [\text{F/m}]$$

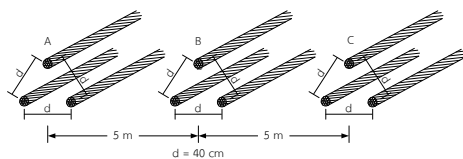
$$C_n = \frac{0.0388}{\log(D_m / D_{bc})} \quad [\mu\text{F}/\text{mile}]$$

$$C_n = \frac{0.0241}{\log(D_m / D_{bc})} \quad [\mu\text{F}/\text{km}]$$

28

ตัวอย่างที่ 4.16 สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส 500 kV 50 Hz กำหนดให้มีการวางสายตัวนำรวม 3 ตัวนำ ใช้เป็นสาย ACSR ขนาด 1,272 kcmil มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.382 inch จงหาค่าต่างๆ ดังนี้

- ก) ความจุไฟฟ้าต่อเฟส
ข) ค่าปาดิทิฟฟิแอกแตนซ์ต่อเฟส
ค) ค่าปาดิทิฟฟิแอกแตนซ์ต่อเฟส



วิธีทำ

29