	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	สอนครั้งที่ 15-16
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	คาบรวม 6 คาบ
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

หัวข้อเรื่อง

1. สายส่งระยะยาว
2. วงจรเทียบเคียงสายส่งระยะยาว

สาระสำคัญ

สายส่งระยะยาว มีความยาวมากกว่า 240 กม. ขึ้นไป หรือ มากกว่า 150 ไมล์ เนื่องจากสายส่งระยะยาวมีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งระยะปานกลาง ทำให้ค่า C และ G ของสายส่งมีค่ามาก วิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาว คือพิจารณาจาก V และ I จากส่วนย่อยตลอดความยาวของสายส่ง ลักษณะเช่นนี้ฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณสายส่งจึงถูกพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลต่อสมการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาวด้วย หรืออาจใช้วงจรเทียบเคียง T หรือแบบ π เหมือนสายส่งระยะปานกลางก็ได้แต่ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าคงที่ A, B , C และ D ของสายส่งระยะปานกลางกับสายส่งระยะยาวมีค่าไม่เท่ากัน

จุดประสงค์การเรียนรู้

จุดประสงค์ทั่วไป

เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจเรื่อง สายส่งระยะยาว การคำนวณหาค่าต่าง ๆ แบบพีชคณิต และการคำนวณหาค่าต่าง ๆ แบบ T และแบบ π

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

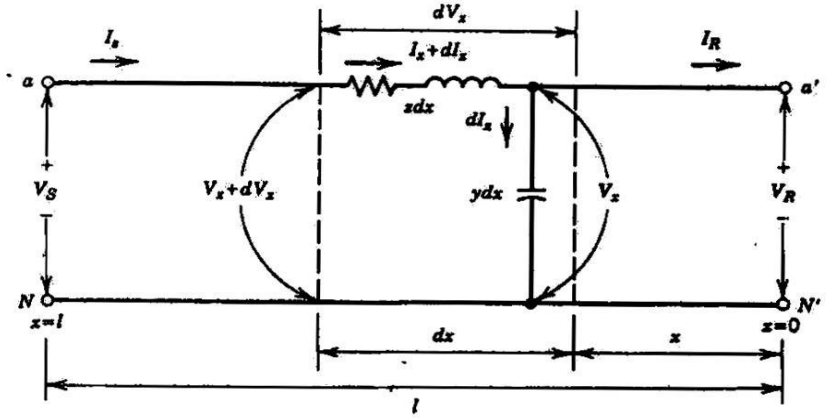
เมื่อจบบทเรียนหน่วยนี้แล้ว ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายลักษณะของสายส่งระยะยาวได้
2. หาค่าต่าง ๆ ในสายส่งระยะยาวแบบพีชคณิต
3. หาค่าต่าง ๆ ในสายส่งระยะยาวโดยวิธีแบบ T และ π

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	สอนครั้งที่ 15-16
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	ใบความรู้ที่ 9
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

สายส่งระยะยาว

เนื่องจากสายส่งระยะยาวมีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งระยะปานกลาง ทำให้ค่า C และ G ของสายส่งมีค่ามาก วิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่า Y และ I ของสายส่งระยะยาว คือ พิจารณา V และ I จากส่วนย่อยตลอดความยาวของสายส่ง ลักษณะเช่นนี้ฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณสายส่งจึงถูกพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลต่อสมการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาวด้วย



รูปที่ 2-8

รูป 2-8 แสดงให้เห็นวงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะยาวประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

dx = ส่วนย่อยของสายส่งใช้พิจารณา

V_x และ I_x = แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านปลายของ dx

z และ y = อิมพีแดนซ์และแอดมิทแตนซ์ต่อหน่วยความยาว

zdx และ ydx = อิมพีแดนซ์และแอดมิทแตนซ์ที่ประกอบอยู่ในส่วนของ dx

V_x+dV_x และ I_x+dI_x = แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางด้านต้นของ dx

จากการกำหนดค่าดังกล่าวข้างต้น ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในส่วนย่อยที่พิจารณาเป็นดังนี้คือ

$$dV_x = (V_x + dV_x) - V_x = dV_x$$

$$= (I_x + dI_x)\, z\, dx$$

$$dV_x = I_x z\, dx \qquad \text{..... (2-61)}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$dI_x = V_x y\, dx \qquad \text{..... (2–62)}$$

$$\frac{dV_x}{dx} = zI_x \qquad \text{..... (2–63)}$$

และ

$$\frac{dI_x}{dx} = yV_x \qquad \text{..... (2–64)}$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ 2–63 และสมการ 2–64

$$\frac{d^2V_x}{dx^2} = z\frac{dI_x}{dx} \qquad \text{..... (2–65)}$$

$$\frac{d^2I_x}{dx^2} = y\frac{dV_x}{dx} \qquad \text{..... (2–66)}$$

แทนค่า $\frac{dI_x}{dx}$ และ $\frac{dV_x}{dx}$ จากสมการ 2–63 และสมการ 2–64 ลงในสมการ 2–65 และสมการ 2–56

$$\frac{d^2V_x}{dx^2} = yzV_x \qquad \text{..... (2–67)}$$

และ

$$\frac{d^2I}{dx^2} = yzI_x \qquad \text{..... (2–68)}$$

เมื่อ $x = 0$ จะมีค่า $V_x = V_R$ และ $I_x = I_R$ ดังนั้นเราจึงแก้สมการ 2–67 และสมการ 2–68 ซึ่งเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลอันดับสองได้ดังนี้

$$V(x) = \underbrace{(\cosh \sqrt{yz}\, x)}_{A} V_R + \underbrace{\left(\sqrt{\frac{z}{y}} \sinh \sqrt{yz}\, x\right)}_{B} I_R \quad \text{..... (2-69)}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$I(x) = \underbrace{\left(\sqrt{\frac{y}{z}} \sinh \sqrt{yz}\, x\right)}_{C} V_R + \underbrace{(\cosh \sqrt{yz}\, x)}_{D} I_R \quad \text{..... (2-70)}$$

สมการ 2-69 และสมการ 2-70 นำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V(x) = (\cosh \gamma x)\, V_R + (Z_c \sinh \gamma x)\, I_R \quad \text{..... (2-71)}$$

$$I(x) = (Y_c \sinh \gamma x)\, V_R + (\cosh \gamma x)\, I_R \quad \text{..... (2-72)}$$

$Z_c = \sqrt{z/y}$ = อิมพีแดนซ์กำหนดคุณลักษณะ (characteristic impedance) ต่อหน่วยความยาว

$Y_c = \sqrt{y/z}$ = แอดมิทแทนซ์กำหนดคุณลักษณ์ (characteristic admittance) ต่อหน่วยความยาว

สำหรับค่า γ เป็นค่าที่เกิดจากรูปคลื่นแม่เหล็กในสายส่ง ซึ่งทำให้ขนาดและมุมของ V และ I มีการเปลี่ยนแปลง เราเรียกค่า γ นี้ว่า **ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (propagation constant)** มีค่าเป็น

$$\boxed{\gamma = \sqrt{yz} = \alpha + j\beta} \quad \text{..... (2-73)}$$

โดย

α = ค่าคงที่ลดจำนวน (attenuation constant ; ซึ่งหมายถึง V และ I ที่ลดจำนวนตามทิศทางการเคลื่อนที่ในสายส่ง มีหน่วยเป็นเนเปอร์ (nepers) ต่อหน่วยความยาว

β = ค่าคงที่เชิงมุม (phase constant ; ซึ่งหมายถึงมุมระหว่าง V กับ V หรือ V กับ I ที่เกิดขึ้นขณะรูปคลื่นแม่เหล็กไม่มีผลต่อมุมดังกล่าว) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อหน่วยความยาว

เมื่อ x เป็นความยาวของสายส่งทั้งหมดหรือ $x = 1$ ทำให้สมการ 2-71 และสมการ 2-72 มีค่าเป็น

$$V_S = (\cosh \gamma l)\, V_R + (Z_c \sinh \gamma l)\, I_R \qquad \text{..... (2–74)}$$

$$I_S = (Y_c \sinh \gamma l)\, V_R + (\cosh \gamma l)\, I_R \qquad \text{..... (2–75)}$$

จัดสมการ 2–74 และสมการ 2–75 ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ Y_c \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–76)}$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ Y_c \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–77)}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & -Z_c \sinh \gamma l \\ -Y_c \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–78)}$$

จากสมการ 2–78

$$V_R = (\cosh \gamma l)\, V_S - (Z_c \sinh \gamma l)\, I_S \qquad \text{..... (2–79)}$$

$$I_R = -(Y_c \sinh \gamma l)\, V_S + (\cosh \gamma l)\, I_S \qquad \text{..... (2–80)}$$

สมการ 2–76 ที่อยู่ในเทอมของค่าคงที่ของสายส่ง A, B, C, D มีค่าดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–81)}$$

และ

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad \text{..... (2-82)}$$

เมื่อพิจารณาสมการ 2-76 และสมการ 2-81 ทำให้ทราบว่า

$$A = \cosh \gamma l \quad \text{..... (2-83)}$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l \quad \text{..... (2-84)}$$

$$C = Y_c \sinh \gamma l \quad \text{..... (2-85)}$$

$$D = A = \cosh \gamma l \quad \text{..... (2-86)}$$

โดย

$$\sin \gamma l = \frac{1}{2} (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) \quad \text{..... (2-87)}$$

$$\cosh \gamma l = \frac{1}{2} (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) \quad \text{..... (2-88)}$$

ไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน (hyperbolic function) ในสมการทั้งหมดหาค่าได้ดังนี้

วิธีที่ 1

$$\sinh \gamma l = \sinh (\alpha l + j\beta l)$$

$$\sinh \gamma l = \sinh \alpha l \cos \beta l + j \cosh \alpha l \sin \beta l \quad \text{..... (2-89)}$$

$$\cosh \gamma l = \cosh (\alpha l + j\beta l)$$

$$\cosh \gamma l = \cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l \quad \text{..... (2-90)}$$

วิธีที่ 2

$$\sinh \gamma l = \sinh(\alpha l + j\beta l) = \frac{1}{2}\left(e^{\alpha l} e^{j\beta l} - e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}\right)$$

$$\boxed{\sinh \gamma l = \frac{1}{2}\left(e^{\alpha l} \angle \beta l - e^{-\alpha l} \angle -\beta l\right)} \quad \text{..... (2–91)}$$

$$\cosh \gamma l = \cosh(\alpha l + j\beta l) = \frac{1}{2}\left(e^{\alpha l} e^{j\beta l} + e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}\right)$$

$$\boxed{\cosh \gamma l = \frac{1}{2}\left(e^{\alpha l} \angle \beta l + e^{-\alpha l} \angle -\beta l\right)} \quad \text{..... (2–92)}$$

จำไว้ว่า

มุม βl ในสมการ 2–91 และสมการ 2–92 เป็นมุมเรเดียน ดังนั้น จึงต้องเปลี่ยนมุมดังกล่าวให้เป็นมุมองศาเสียก่อน เช่น

$$\angle \beta l = \angle .3202 \text{ rad} = \angle \frac{180^\circ \times .3202}{3.14} = 18.5^\circ$$

ตัวอย่างที่ 5

สายส่ง 3 เฟส ยาว 150 mile ขนาด 60 Hz ต่อกับโหลดขนาด 50 MVA. 138 kV ที่ power factor ล้าหลัง = 0.85 มีค่า R = 0.1858 Ω/mile, L = 2.6 mH/mile และ C = 0.012 μF/mile จงหาค่าต่อไปนี้

(a) ค่าคงที่ A, B, C และ D ของสายส่ง
(b) แรงดันไฟฟ้าที่สายด้านต้นสายส่ง
(c) กระแสไฟฟ้าที่สายด้านต้นสายส่ง
(d) power factor ด้านต้นสายส่ง
(e) กำลังไฟฟ้าด้านต้นสายส่ง
(f) กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่ง
(g) ประสิทธิภาพของสายส่ง
(h) voltage regulation

วิธีทำ

$$z = 0.1858 + j2\pi \times 60 \times 2.6 \times 10^{-3}$$

$$= 0.1858 + j0.9802 = 0.9977 \angle 79.27^\circ \ \Omega/\text{mile}$$

$$y = j2\pi \times 60 \times 0.012 \times 10^{-6}$$

$$= 4.5239 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \ \text{S/mile}$$

propagation constant ของสายส่ง

$$\gamma = \sqrt{yz}$$

$$= \sqrt{(4.5239 \times 10^{-6} \angle 90^\circ)\ (0.9977 \angle 79.27^\circ)}$$

$$= \sqrt{4.5135 \times 10^{-6}}\ \angle \tfrac{1}{2}(90^\circ + 79.27^\circ)$$

$$= 0.002144 \angle 84.63^\circ$$

$$= 0.0002006 + j0.0021346$$

$$\gamma l = \alpha l + j\beta l$$

$$= (0.0002006 + j0.0021346)\ 150$$

$$= 0.0301 + j0.3202$$

characteristic impedance ของสายส่ง

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{0.9977 \angle 79.27^\circ}{4.5239 \times 10^{-6} \angle 90^\circ}}$$

$$= \sqrt{\frac{(0.9977 \times 10^6)}{4.5239}}\ \angle \tfrac{1}{2}(79.27^\circ - 90^\circ)$$

$$= 469.62 \angle -5.37^\circ\ \Omega$$

หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เฟสด้านปลายสายส่ง

$$V_R = \frac{138\ kV}{\sqrt{3}} = 79{,}674.34\ V$$

เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่เฟสด้านปลายสายส่งเป็นค่าอ้างอิง

$$V_R = 79{,}674.34 \angle 0^\circ\ V$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าด้านปลายสายส่ง

$$I_R = \frac{50 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3}$$

$$= 209.18\ A$$

$$= 209.18 \angle -31.8^\circ\ A$$

(a) จากสมการ 2–83 ถึงสมการ 2–86 และสมการ 2–91 ถึงสมการ 2–92

$$A = \cosh \gamma l$$

$$= \cosh(\alpha + j\beta)\, l$$

$$= \tfrac{1}{2}(e^{\alpha l} e^{j\beta l} + e^{-\alpha l} e^{-j\beta l})$$

$$= \tfrac{1}{2}(e^{\alpha l} \angle \beta l + e^{-\alpha l} \angle -\beta l)$$

$$A = \frac{1}{2}\left(e^{0.0301}\, e^{j0.3202} + e^{-0.0301}\, e^{-j0.3202}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(e^{0.0301}\ \underline{/18.35^\circ} + e^{-0.0301}\ \underline{/-18.35^\circ}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(1.0306\ \underline{/18.35^\circ} + 0.9703\ \underline{/-18.35^\circ}\right)$$

$$= 0.9496 + j0.0095 = 0.9497\ \underline{/0.57^\circ}$$

$$B = Z_c \sinh\gamma l = Z_c \sinh(\alpha + j\beta)\, l$$

$$= Z_c\left[\frac{1}{2}\left(e^{\alpha l}\, e^{j\beta l} - e^{-\alpha l}\, e^{-j\beta l}\right)\right]$$

$$= \frac{1}{2} Z_c\left[e^{\alpha l}\ \underline{/\beta l} - e^{-\alpha l}\ \underline{/-\beta l}\right]$$

$$= \frac{1}{2}\left(469.62\ \underline{/5.37^\circ}\right)\left[e^{0.0301}\, e^{j0.3202} - e^{-0.0301}\, e^{-j0.3202}\right]$$

$$= 234.81\ \underline{/-5.37^\circ}\left[1.0306\ \underline{/18.35^\circ} - 0.9703\ \underline{/-18.35^\circ}\right]$$

$$= \left(234.81\ \underline{/-5.37^\circ}\right)(0.0572 + j0.6300)$$

$$= \left(234.81\ \underline{/-5.37^\circ}\right)\left(0.6326\ \underline{/84.81^\circ}\right)$$

$$= 148.54\ \underline{/79.4^\circ}\ \Omega$$

$$C = Y_c \sinh\gamma l$$

$$= \frac{1}{Z_c}\sinh\gamma l$$

$$= \frac{1}{469.62\ \underline{/-5.37^\circ}} \times 0.3163\ \underline{/84.81^\circ}$$

$$= 0.00067\ \underline{/90.18^\circ}\ S$$

$$D = A = \cosh\gamma l = 0.9497\ \underline{/0.57^\circ}$$

(b) จากสมการ 2–81

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.9497\ \underline{/0.57^\circ} & 148.54\ \underline{/79.44^\circ} \\ 0.00067\ \underline{/90.18^\circ} & 0.9497\ \underline{/0.57^\circ} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 79{,}674.34\ \underline{/0^\circ} \\ 209.18\ \underline{/-31.8^\circ} \end{bmatrix}$$

$$V_S = \left(0.9497\ \underline{/0.57^\circ}\right)\left(79{,}674.34\ \underline{/0^\circ}\right) + \left(148.54\ \underline{/79.44^\circ}\right)\left(209.18\ \underline{/-31.8^\circ}\right)$$

$$= 99,470.05 \angle 13.79^\circ \text{ V}$$

$$V_{S(L\text{-}L)} = \sqrt{3} \times 99,470.05$$

$$= 172,287.18 \text{ V}$$

(c) $$I_S = (0.0067 \angle 90.18^\circ)(79,674.34 \angle 0^\circ) + (0.9497 \angle 0.57^\circ)(209.18 \angle -31.8^\circ)$$

$$= 176.8084 \angle -16.3^\circ \text{ A}$$

(d) $$\varnothing_S = 13.79^\circ + 16.3^\circ = 30.09^\circ$$

$$\cos \varnothing_S = 0.8653$$

(e) หาค่ากำลังไฟฟ้าด้านต้นสายส่ง (P_S)

$$P_S = \sqrt{3}\, V_{S(L\text{-}L)}\, I_S \cos \varnothing_S$$

$$= \sqrt{3} \times 172,287.18 \times 176.8084 \times 0.8653$$

$$= 45,654.46 \text{ kW}$$

(f) หาค่ากำลังไฟฟ้าด้านปลายสายส่ง (P_R)

$$P_R = \sqrt{3}\, V_{R(L\text{-}L)}\, I_R \cos \varnothing_R$$

$$= \sqrt{3} \times 138 \times 10^3 \times 209.18 \times 0.85$$

$$= 42,499 \text{ kW}$$

หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง (P_L) ได้จากสมการ 2–16

$$P_L = P_S - P_R = 3155.46 \text{ kW}$$

(g) จากสมการ 2–15

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100$$

$$= \frac{42,499}{45,654.46} \times 100 = 93.1\%$$

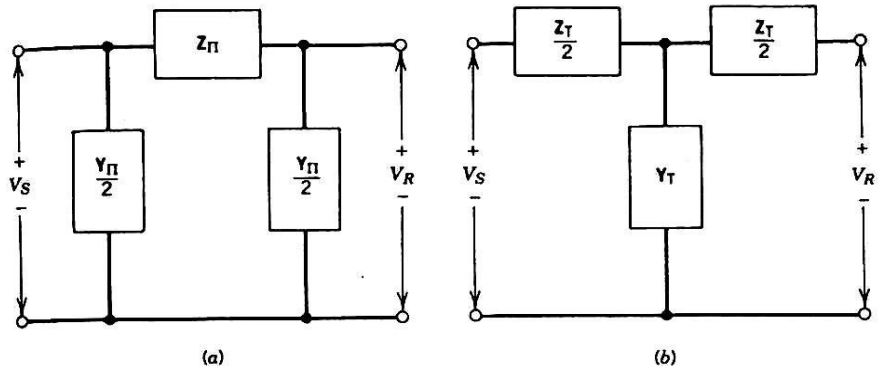
(h) จากสมการ 2–20

$$\text{voltage regulation} = \frac{99,470.04 - 79,674.34}{79,674.34} \times 100$$

$$= 24.9\ \%$$

วงจรเทียบเคียงของสายส่งระยะยาว
(Equivalent Circuit of Long Transmission Line)

การวิเคราะห์สายส่งระยะยาวอาจใช้วงจรเทียบเคียงรูป π และวงจรเทียบเคียงรูป T (รูป 2-9) ได้เช่นเดียวกับสายส่งระยะปานกลาง แต่ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าคงที่ A, B, C และ D ของสายส่งระยะปานกลางกับสายส่งระยะยาวมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 9

เมื่อทราบค่าคงที่ A, B, C และ D ของสายส่งระยะยาวก็จะได้สมการหาค่า Z และ Y ในวงจรเทียบเคียงรูป π และวงจรเทียบเคียงรูป T ของสายส่งระยะยาวดังนี้คือ

กรณีวงจรเทียบเคียงรูป π

$$Z_\pi = B \qquad \text{..... (2-93)}$$

หรือ

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{A-1}{B} \qquad \text{..... (2-94)}$$

กรณีวงจรเทียบเคียงรูป T

$$\frac{Z_T}{2} = \frac{A-1}{C} \qquad \text{..... (2-95)}$$

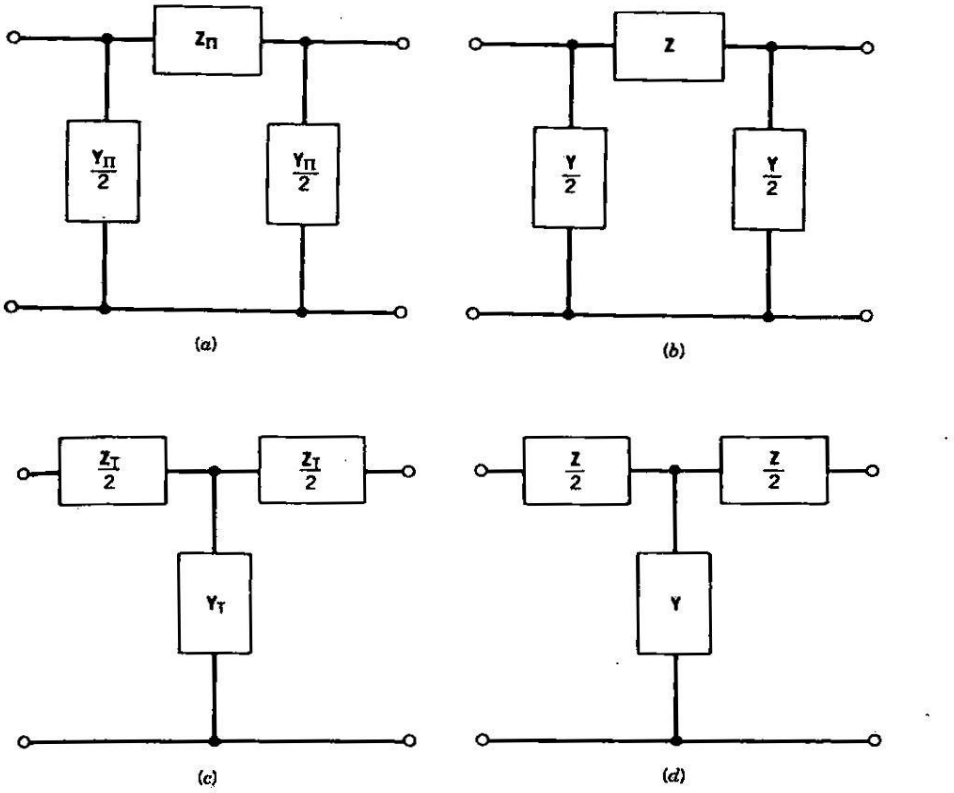
$$Y_T = C \qquad \text{..... (2-96)}$$

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	สอนครั้งที่ 15-16
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	ใบความรู้ที่ 9
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

ตัวอย่างที่ 6

จากตัวอย่าง 2–5 จงเขียนวงจรเทียบเคียงรูป π และ T ของสายส่งระยะยาวกับวงจรเทียบเคียงรูป π และ T ของสายส่งระยะปานกลาง

วิธีทำ เขียนวงจรเทียบเคียงรูป π ของสายส่งระยะยาวได้ดังรูป 2–10 a และเขียนวงจรเทียบเคียงรูป π ของสายส่งระยะปานกลางได้ดังรูป 2–10 b



รูปที่ 2–10

จากรูป 2–10 a และสมการ 2–93, สมการ 2–94

$$Z_\pi = B = 148.54 \angle 79.44^\circ \ \Omega$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{A - 1}{B}$$

$$= \frac{0.9497 \angle 0.57^\circ - 1}{148.54 \angle 79.44^\circ}$$

$$= 0.000345 \angle 89.89^\circ \ S$$

จากรูป 2–10 b

$$Z = 150 \times 0.9977 \angle 79.27^\circ = 149.655 \angle 79.27^\circ \ \Omega$$

$$\frac{1}{2}Y = \frac{1}{2}\left[150\left(4.5239 \times 10^{-6} \angle 90^\circ\right)\right]$$

$$= 0.000339 \angle 90^\circ \ S$$

เขียนวงจรเทียบเคียงรูป T ของสายส่งระยะยาวได้ดังรูป 2–10 c และเขียนวงจรเทียบเคียงรูป T ของสายส่งระยะปานกลางได้ดังรูป 2–10 d เมื่อนำสมการ 2–95, สมการ 2–96 มาร่วมพิจารณา

$$\frac{Z_T}{2} = \frac{A - 1}{C}$$

$$= \frac{0.9497 \angle 0.57^\circ - 1}{0.00067 \angle 90.18^\circ}$$

$$= 76.57 \angle 79.15^\circ \ \Omega$$

$$Y_T = C = 0.00067 \angle 90.18^\circ \ S$$

จากรูป 2–10 d

$$\frac{1}{2}Z = \frac{1}{2}\left(149.655 \angle 79.27^\circ\right) = 74.83 \angle 79.27^\circ \ \Omega$$

$$Y = 0.000678 \angle 90^\circ \ S$$

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	สอนครั้งที่ 15-16
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

กิจกรรมการเรียนการสอน

เตรียมความพร้อมก่อนสอน (10 นาที)

ผู้สอนจัดเตรียมหนังสือเอกสารประกอบการสอนและวัสดุปกรณ์เพื่อใช้ประกอบการสอนให้พร้อม ผู้สอนเรียกชื่อผู้เรียน และจดบันทึกลงในสมุดบันทึกเวลาเรียน

ขั้นสอนมีขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นนำเข้าสู่บทเรียน (5+5 นาที)

ครูตรวจแบบฝึกหัดเรื่อง สายส่งระยะปานกลาง แล้วเฉลยแบบฝึกหัดให้นักศึกษาทราบ เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจ รวมทั้งแก้ไขข้อผิดให้ถูกต้องด้วย แล้วถามนักศึกษาถึงสาเหตุของการทำแบบฝึกหัดผิดว่าไม่เข้าใจส่วนใดของเนื้อหาครั้งที่ผ่านมา

2. ขั้นสอน (เวลา 140+140 นาที)

ครูอธิบายถึง ลักษณะของสายส่งระยะยาวการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของสายส่งระยะยาวโดยใช้ระบบพีชคณิต และการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในสายส่งระยะยาวโดยใช้วงจรเทียบเคียงแบบ T แบบ π พร้อมยกตัวอย่างประกอบ แล้วให้นักศึกษาทำแบบฝึกในห้องเรียน

3. ขั้นสรุป (เวลา 10+10 นาที)

สายส่งระยะยาว มีความยาวมากกว่า 240 กม. ขึ้นไป หรือ มากกว่า 150 ไมล์ เนื่องจากสายส่งระยะยาวมีขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าสายส่งระยะปานกลาง ทำให้ค่า C และ G ของสายส่งมีค่ามาก วิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาว คือพิจารณาจาก V และ I จากส่วนย่อยตลอดความยาวของสายส่ง ลักษณะเช่นนี้ฟลักแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณสายส่งจึงถูกพิจารณาให้เป็นรูปคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลต่อสมการหาค่า V และ I ของสายส่งระยะยาวด้วย หรืออาจใช้วงจรเทียบเคียง T หรือแบบ π เหมือนสายส่งระยะปานกลางก็ได้แต่ต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าคงที่ A, B, C และ D ของสายส่งระยะปานกลางกับสายส่งระยะยาวมีค่าไม่เท่ากัน

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	สอนครั้งที่ 15-16
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

4. ขั้นประเมินผล (15 นาที)
    1. ประเมินผลจากการทำแบบฝึกในห้องเรียน
    2. ประเมินผลจากการถามตอบ
    3. ประเมินผลจากแบบฝึกหัด

สื่อการเรียนการสอน มีดังนี้

1. ใบความรู้
2. แผ่นภาพสายส่งระยะยาว
3. แบบฝึกปฏิบัติ
4. แบบทดสอบ

กิจกรรม/งานที่มอบหมาย มีดังนี้

แบบฝึกหัดเรื่องการหาค่าต่าง ๆ ในระบบสายส่งระยะยาว

การวัดผลประเมินผล ปฏิบัติดังนี้

1. วัดผลจากการตรวจแบบฝึกปฏิบัติในห้องเรียน
2. วัดผลจากการตรวจแบบฝึกหัด

	ใบแบบฝึกหัด ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	สอนครั้งที่ 15-16
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	ใบความรู้ที่ 9
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

7. สายส่ง 3 เฟส, 60 Hz มีแรงดันไฟฟ้าด้านต้นสายส่ง 39 kV, แรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายส่ง 34.5 kV ถ้าอิมพีแดนซ์ของสายส่งต่อเฟสเป็น 18 + j15 Ω จงหาค่ากำลังไฟฟ้าด้านปลายของสายส่ง
8. จากตัวอย่าง 2–3 สมมติเปลี่ยนโหลดเป็น 60 MW ที่ power factor ล้าหลัง = 0.9
9. จากตัวอย่าง 2–4 สมมติเปลี่ยนโหลดเป็น 60 MW ที่ power factor ล้าหลัง = 0.85
10. จากตัวอย่าง 2–5 และ 2–6 สมมติความยาวของสายส่งเป็น 200 mile

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 9	หน่วยที่ 9
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะยาว	สอนครั้งที่ 15-16
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะยาว		จำนวนคาบ 6 คาบ

บันทึกหลังการจัดการเรียนรู้

ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ผลการเรียนของผู้เรียน

.....

.....

.....

.....

.....

ผลการสอนของผู้สอน

.....

.....

.....

.....

.....

(.....) (.....)

หัวหน้าแผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง

รองผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาการศึกษา