	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 7	หน่วยที่ 7
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	สอนครั้งที่ 11-12
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะสั้น	คาบรวม 6 คาบ
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะสั้น		จำนวนคาบ 6 คาบ

หัวข้อเรื่อง

1. สายส่งระยะสั้น
2. วิธีพีชคณิตเชิงซ้อน
3. วิธีเฟสเซอร์ไดอะแกรม
4. ประสิทธิภาพของสายส่งระยะสั้น
5. การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

สาระสำคัญ

พารามิเตอร์ของสายส่งประกอบไปด้วย R , L , C และ G ซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงของสายส่งไฟฟ้าก็จะได้ว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เปลี่ยนแปลงตามขนาดแรงดันไฟฟ้าและความยาวของสายไฟฟ้า ดังนั้นวิธีการหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสายส่งจึงแตกต่างกันออกไปตามความยาวหรือช่วงของสายส่งที่เราพิจารณา โดยบทนี้จะกล่าวถึงสายส่งระยะสั้น ซึ่งจะมีความยาวไม่เกิน 80 กม. หรือ 50 ไมล์

จุดประสงค์การเรียนรู้

จุดประสงค์ทั่วไป

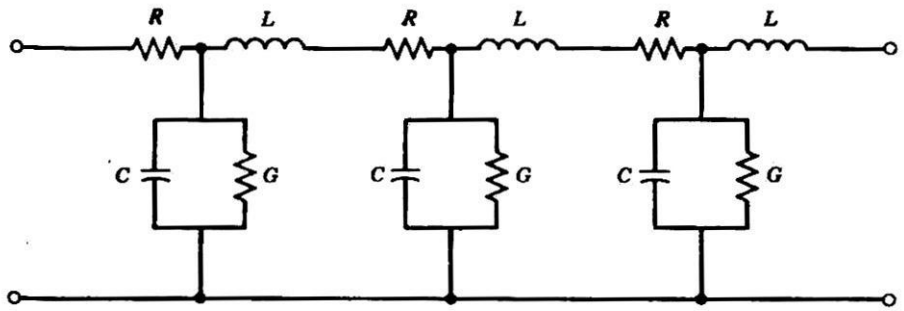
เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจเรื่อง สายส่งระยะสั้น การหาค่าต่าง ๆ แบบเฟสเซอร์ไดอะแกรม ประสิทธิภาพของสายส่ง และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อจบบทเรียนหน่วยนี้แล้ว ผู้เรียนสามารถ

1. อธิบายข้อจำกัดของสายส่งระยะสั้นได้
2. หาค่าต่าง ๆ ของสายส่งระยะสั้นได้

การหาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสายส่งทำได้โดยการพิจารณาวงจรเทียบเคียงเช่นเดียวกับการหาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเครื่องกลไฟฟ้าทั่วไป



รูปที่ 2

จากบทที่ 1 เราทราบว่าสายตัวนำมีค่าพารามิเตอร์ คือ R, L, C และ G ซึ่งนำมาเขียนวงจรเทียบเคียงของสายส่งได้ดังรูป 2–1 ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดแรงดันไฟฟ้าและความยาวของสาย ดังนั้นวิธีการหาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสายส่งจึงแตกต่างกันออกไปตามความยาวหรือช่วงของสายส่งที่เราพิจารณา

สายส่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามความยาว คือ

1. สายส่งระยะสั้น (short transmission line) มีความยาวไม่เกิน 80 ก.ม. (50 ไมล์)

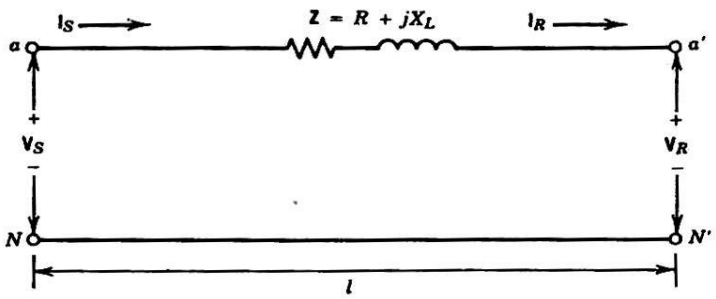
2. สายส่งระยะปานกลาง (medium transmission line) มีความยาวระหว่าง 80–240 ก.ม. (50–150 ไมล์)

3. สายส่งระยะยาว (long transmission line) มีความยาวมากกว่า 240 ก.ม.ขึ้นไป

2 สายส่งระยะสั้น

(Short Transmission Line)

เนื่องจากสายส่งระยะสั้นมีค่า C และ G ต่ำมาก ดังนั้น ถ้าไม่คิดค่า C และ G ค่าพารามิเตอร์ที่เหลือจึงได้แก่ค่า R และ L นำมาเขียนวงจรเทียบเคียงได้ดังรูป 2–2



รูปที่ 2

เมื่อ

R = ความต้านทานของสายส่งต่อเฟส

X_L = อินดักตีพ รีแอกแตนซ์ของสายส่งต่อเฟส

Z = อิมพีแดนซ์ของสายส่งต่อเฟส

V_S และ I_S = แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านต้นสาย (sending end) ต่อเฟส หรือแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เฟสด้านต้นสาย

V_R และ I_R = แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านปลายสาย (receiving end) ต่อเฟส หรือแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เฟสด้านปลายสาย

การหาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสายส่งระยะสั้นทำได้หลายวิธีด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 วิธี คือ วิธีพีชคณิตเชิงซ้อน และวิธีเฟสเซอร์ไดอะแกรม

1. วิธีพีชคณิตเชิงซ้อน

วิธีนี้ทำได้โดยนำทฤษฎีวงจรไฟฟ้ามาพิจารณารูป 2 ทำให้ได้

$$V_S = V_R + I_R Z$$

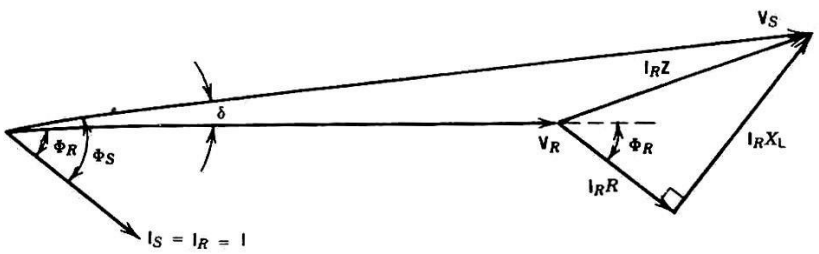
$$I_S = I_R = I$$

$$V_R = V_S - I_R Z$$

2. วิธีเฟสเซอร์ไดอะแกรม

วิธีนี้ทำได้โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเฟสเซอร์และกระแสไฟฟ้าเฟสเซอร์ด้านต้นสายและด้านปลายสาย โดยใช้แรงดันไฟฟ้า V_R เป็นค่าอ้างอิงในการเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรม

กรณีสายส่งระยะสั้นมีโหลดเป็นอินดักเตอร์ ค่า power factor ล้าหลัง เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังนี้

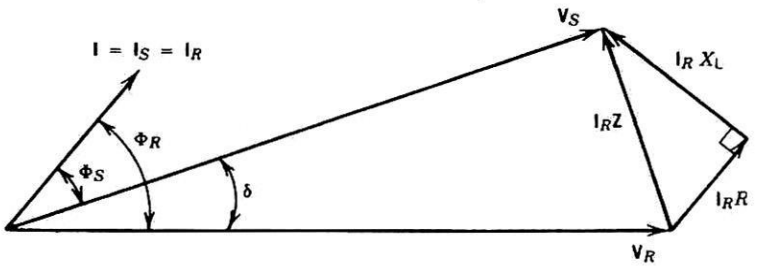


รูปที่ 2

เมื่อนำหลักการทางตรีโกณเมตริกมาพิจารณารูป 2–3

$$V_S = \sqrt{(V_R + IR\cos\varnothing_R + IX\sin\varnothing_R)^2 + (IX\cos\varnothing_R - IR\sin\varnothing_R)^2}$$

กรณีสายส่งระยะสั้นมีโหลดเป็นคาปาซิเตอร์ ค่า power factor นำหน้า เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังนี้

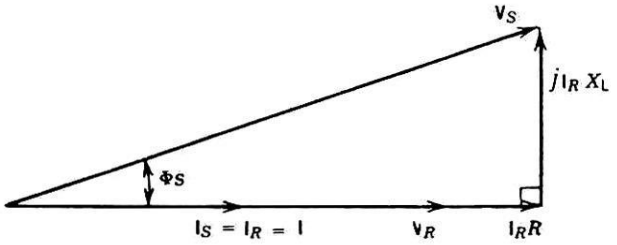


รูปที่ 2–4

เมื่อนำหลักการทางตรีโกณเมตริกมาพิจารณารูป 2–4

$$V_S = \sqrt{(V_R + IR\cos\varnothing_R + IX\sin\varnothing_R)^2 + (IX\cos\varnothing_R + IR\sin\varnothing_R)^2} \quad \text{..... (2–5)}$$

กรณีสายส่งระยะสั้นมีโหลดเป็นความต้านทาน power factor จะมีค่าเท่ากับ 1 (unity power factor) เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 2–5

เมื่อนำหลักการทางตรีโกณเมตริกมาพิจารณารูป 2–5

$$V_S = \sqrt{(V_R + IR)^2 + (IX)^2} \quad \text{..... (2–6)}$$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูป 2–3 จะพบว่า

$$\boxed{\delta = \varnothing_S - \varnothing_R} \qquad \text{..... (2–7)}$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณารูป 2–4

$$\boxed{\delta = \varnothing_R - \varnothing_S} \qquad \text{..... (2–8)}$$

เมื่อ $\varnothing_S$ = มุมต่างเฟสระหว่าง I_S กับ V_S

$\varnothing_R$ = มุมต่างเฟสระหว่าง I_R กับ V_R

δ = มุมของโหลด

หรือเมื่อนำหลักการทางตรีโกณเมตริกมาพิจารณารูป 2–3

$$\delta = \tan^{-1} \frac{IX \cos \varnothing_R - IR \sin \varnothing_R}{V_R + IR \cos \varnothing_R + IX \sin \varnothing_R} \qquad \text{..... (2–9)}$$

เมื่อนำหลักการทางตรีโกณเมตริกมาพิจารณารูป 2–4

$$\delta = \tan^{-1} \frac{IX \cos \varnothing_R + IR \sin \varnothing}{V_R + IR \cos \varnothing_R + IX \sin \varnothing_R} \qquad \text{..... (2–10)}$$

จัดสมการ 2–1 ถึง 2–3 ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–11)}$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–12)}$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \qquad \text{..... (2–13)}$$

2-1-1 ประสิทธิภาพของสายส่งระยะสั้น

ประสิทธิภาพของสายส่งระยะสั้นหาค่าได้ดังนี้คือ

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} \qquad \text{..... (2–14)}$$

$$\boxed{\eta = \frac{\sqrt{3}\ V_R I \cos \varnothing_R}{\sqrt{3}\ V_S I \cos \varnothing_S} = \frac{P_R}{P_S}} \qquad \text{..... (2–15)}$$

โดย

$$\boxed{P_L = P_S - P_R} \qquad \text{..... (2–16)}$$

เมื่อ

P_R = กำลังไฟฟ้าด้านปลายสายส่ง

P_S = กำลังไฟฟ้าด้านต้นสายส่ง

P_L = กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่ง

ถ้าต้องการหาค่าประสิทธิภาพของสายส่งระยะสั้นในรูปกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (loss) ทำได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{output + losses}} \qquad \text{..... (2–17)}$$

กรณีสายส่ง 1 เฟส

$$\eta = \frac{V_R I \cos \varnothing_R}{V_R I \cos \varnothing_R + 2I^2R} \qquad \text{..... (2–18)}$$

กรณีสายส่ง 3 เฟส

$$\eta = \frac{\sqrt{3}\, V_R I \cos \varnothing_R}{\sqrt{3}\, V_R I \cos \varnothing_R + 3I^2R} \qquad \text{..... (2–19)}$$

สมการ 2–14 ถึงสมการ 2–19 นำไปประยุกต์ใช้ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของสายส่งระยะปานกลางและสายส่งระยะยาวได้อีกด้วย รายละเอียดจะกล่าวในลำดับต่อไป

2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

(Voltage Regulation)

voltage regulation ของสายส่งระยะสั้นหาค่าได้ดังนี้

$$\text{voltage regulation} = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100 \qquad \text{..... (2–20)}$$

$$\text{voltage regulation} = \frac{|V_{R.NL}| - |V_{R.FL}|}{|V_{R.FL}|} \times 100 \qquad \text{..... (2–21)}$$

เมื่อ

$|V_S|$ = ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านต้นสายส่งต่อเฟส

$|V_{R.FL}|$ = ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายส่งต่อเฟสขณะจ่ายโหลดเต็มที่

จากสมการ 2–20 และสมการ 2–21 ทำให้ทราบว่า

$$\boxed{|V_S| = |V_{R.NL}|} \qquad \text{..... (2–22)}$$

$$\boxed{|V_R| = |V_{R.FL}|} \qquad \text{..... (2–23)}$$

ส่วนมากค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่กำหนดให้**ในตัวอย่างการคำนวณในตำราเล่มนี้จะสมมติว่าเกิดจากเครื่องกลไฟฟ้าที่ต่อขดลวดแบบ Y ทั้งนี้เพื่อตัดปัญหาที่เกี่ยวกับ phase shift ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า** ดังนั้น จึงเป็นนัยที่ผู้ศึกษาจะต้องทราบแม้ว่าโจทย์ไม่ได้ระบุไว้ก็ตาม

ตัวอย่างที่ 2

สายส่งระยะสั้น 3 เฟส ขนาด 60 Hz มีแรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายส่ง 23 kV อิมพีแดนซ์ร่วม 2.48 + j6.57 Ω/phase ด้านปลายสายส่งมีโหลดขนาด 9 MW ที่ power factor ล้าหลัง = 0.85 จงหาค่าต่อไปนี้

(a) แรงดันไฟฟ้าที่เฟสและแรงดันไฟฟ้าที่สายด้านต้นสายส่ง

(b) มุมของโหลด

(c) power factor ด้านต้นสายส่ง

วิธีทำ วิธีที่ 1 ใช้พีชคณิตเชิงซ้อน

(a) เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่เฟสด้านปลายสายส่งเป็นค่าอ้างอิง

$$V_R = \frac{V_{R(L\text{-}L)}}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{23 \times 10^3 \ \underline{/0^\circ}}{\sqrt{3}}$$

$$= 13{,}294.8 \ \underline{/0^\circ} \text{ V}$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าที่สายส่ง

$$I = \frac{9 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 23 \times 10^3 \times 0.85} \underline{/-31.8^\circ}$$

$$I = 266.1\underline{/-31.8^\circ} = 266.1\,(0.85 - j0.527)$$

$= 226.19 - j140.24$ A

$IZ = (226.19 - j140.24)\ (2.48 + j6.57)$

$= 266.1\ \underline{/-31.8^\circ} \times 7.02\ \underline{/69.32^\circ}$

$= 1868.95\ \underline{/37.52^\circ}$ V

หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เฟสด้านต้นสายส่งได้จากสมการ 2–1

$V_S = V_R + IZ$

$= 14{,}820\ \underline{/4.4^\circ}$ V

หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่สายด้านต้นสายส่ง

$V_{S(L\text{-}L)} = \sqrt{3}\ V_S$

$= 25{,}670$ V

(b) มุมของโหลด $\delta = 4.4^\circ$

(c) จากสมการ 2–7

$\varnothing_S = \varnothing_R + \delta$

$= 31.8^\circ + 4.4^\circ$

$= 36.2^\circ$

$\cos \varnothing_S = \cos 36.2^\circ$

$= .807$

วิธีที่ 2 ใช้เฟสเซอร์ไดอะแกรม

(a) จากสมการ 2–4

$$V_S = \sqrt{(V_R + IR\cos\varnothing_R + IX\sin\varnothing_R)^2 + (IX\cos\varnothing_R - IR\sin\varnothing_R)^2}$$

$IR\cos\varnothing_R = 266.1 \times 2.48 \times 0.85 = 560.9$

$IR\sin\varnothing_R = 266.1 \times 2.48 \times 0.527 = 347.8$

$IX\cos\varnothing_R = 266.1 \times 6.57 \times 0.85 = 1486.0$

$IX\sin\varnothing_R = 266.1 \times 6.57 \times 0.527 = 921.0$

$V_S = \sqrt{(13{,}294.8 + 560.9 + 921.0)^2 + (1486.0 - 347.8)^2}$

$= \sqrt{14{,}776.7^2 + 1138.2^2}$

$= 14{,}820$ V

$$V_{S(L-L)} = \sqrt{3}\, V_S$$
$$= 25{,}670 \text{ V}$$

(b) จากสมการ 2–9

$$\delta = \tan^{-1} \frac{1138.2}{14{,}776.7} = 4.4°$$

(c) $\varnothing_R = \cos^{-1} 0.85 = 31.8°$

$\varnothing_S = 31.8° + 4.4° = 36.2°$

$\cos 36.2° = 0.807$

ตัวอย่างที่ 2

จากตัวอย่าง 2–1 จงหา voltage regulation

วิธีทำ จากสมการ 2–20

$$\text{voltage regulation} = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100$$
$$= \frac{14{,}820 - 13{,}294.8}{13{,}294.8} \times 100$$
$$= 11.5\%$$

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 7	หน่วยที่ 7
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะสั้น	สอนครั้งที่ 11-12
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะสั้น		จำนวนคาบ 6 คาบ

กิจกรรมการเรียนการสอน

เตรียมความพร้อมก่อนสอน (10+10 นาที)

ผู้สอนจัดเตรียมหนังสือเอกสารประกอบการสอนและวัสดุปกรณ์เพื่อใช้ประกอบการสอนให้พร้อม ผู้สอนเรียกชื่อผู้เรียน และจดบันทึกลงในสมุดบันทึกเวลาเรียน

ขั้นสอนมีขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นนำเข้าสู่บทเรียน (5+5 นาที)

ครูตรวจแบบฝึกหัดเรื่อง การหาค่าคาปาซิแตนซ์ของสายตัวนำร่วม แล้วเฉลยแบบฝึกหัดให้นักศึกษาทราบเพื่อให้นักศึกษาเข้าใจ รวมทั้งแก้ไขข้อผิดให้ถูกต้องด้วย แล้วถามนักศึกษาถึงสาเหตุของการทำแบบฝึกหัดผิดว่าไม่เข้าใจส่วนใดของเนื้อหาครั้งที่ผ่านมา

2. ขั้นสอน (เวลา 140+140 นาที)

ครูอธิบายถึง ลักษณะของสายส่งระยะสั้น และการหาค่าต่าง ๆ เกี่ยวกับสายส่งระยะสั้น พร้อมยกตัวอย่างประกอบ แล้วนักศึกษาทำแบบฝึกในห้องเรียน

3. ขั้นสรุป (เวลา 10 นาที)

พารามิเตอร์ของสายส่งประกอบไปด้วย R , L , C และ G ซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงของสายส่งไฟฟ้าก็จะได้ว่าค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เปลี่ยนแปลงตามขนาดแรงดันไฟฟ้าและความยาวของสายไฟฟ้า ดังนั้นวิธีการหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในสายส่งจึงแตกต่างกันออกไปตามความยาวหรือช่วงของสายส่งที่เราพิจารณา โดยบทนี้จะกล่าวถึงสายส่งระยะสั้น ซึ่งจะมีความยาวไม่เกิน 80 กม. หรือ 50 ไมล์

4. ขั้นประเมินผล (15 นาที)

1. ประเมินผลจากการทำแบบฝึกในห้องเรียน
2. ประเมินผลจากการถามตอบ
3. ประเมินผลจากแบบฝึกหัด

สื่อการเรียนการสอน มีดังนี้

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

กิจกรรม/งานที่มอบหมาย มีดังนี้

แบบฝึกหัดเรื่องการหาค่าต่าง ๆ ในระบบสายส่งระยะสั้น

การวัดผลประเมินผล ปฏิบัติดังนี้

1. วัดผลจากการตรวจแบบฝึกปฏิบัติในห้องเรียน
2. วัดผลจากการตรวจแบบฝึกหัด

	ใบแบบฝึกหัด ที่ 7	หน่วยที่ 7
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	สอนครั้งที่ 11-12
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะสั้น	ใบความรู้ที่ 7
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะสั้น		จำนวนคาบ 6 คาบ

1. สายส่ง 3 เฟส ยาว 15 mile ขนาด 60 Hz มีแรงดันไฟฟ้าด้านปลายสายส่ง 34.5 kV, อิมพีแดนซ์รวม 3 + j4 Ω/phase, ที่ด้านปลายของสายส่งมีโหลดขนาด 10 MW ที่ power factor ล้าหลัง = 0.9 จงหาค่าต่อไปนี้
   (a) แรงดันไฟฟ้าที่เฟสและแรงดันไฟฟ้าที่สายด้านต้นสายส่ง
   (b) power factor ด้านต้นสายส่ง
   (c) มุมของโหลด
   (d) ประสิทธิภาพของสายส่ง
   (e) voltage regulation

2. จากข้อ (1) สมมติโหลดด้านปลายสายส่งมี power factor ล้าหลัง = 0.8

3. จากข้อ (1) สมมติโหลดด้านปลายสายส่งมี power factor นำหน้า = 0.8

4. สายส่ง 3 เฟส ยาว 40 mile ขนาด 50 Hz มีอิมพีแดนซ์ 0.6 + j0.95 Ω/mile/phase, แรงดันไฟฟ้าที่สายด้านปลายสายส่ง 69 kV, กระแสไฟฟ้าด้านปลายสายส่งขณะจ่ายโหลดเต็มที่มีค่า 300 $\angle -30^\circ$ A
   (a) จงหาค่า voltage regulation
   (b) จงหาค่าคงที่ของสายส่ง A, B, C, D
   (c) จงเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของ V_S, V_R และ I

5. จากข้อ (4) สมมติกระแสไฟฟ้าด้านปลายสายส่งขณะจ่ายโหลดเต็มที่เป็น 300 $\angle -45^\circ$ A

	แผนการจัดการเรียนรู้ ที่ 7	หน่วยที่ 7
	ชื่อวิชา การส่งและจ่ายไฟฟ้า 3104-1008	
	ชื่อหน่วย สายส่งระยะสั้น	สอนครั้งที่ 11-12
ชื่อเรื่อง สายส่งระยะสั้น		จำนวนคาบ 6 คาบ

บันทึกหลังการจัดการเรียนรู้

ผลการใช้แผนการจัดการเรียนรู้

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ผลการเรียนของผู้เรียน

.....

.....

.....

.....

.....

ผลการสอนของผู้สอน

.....

.....

.....

.....

.....

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

หัวหน้าแผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง รองผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาการศึกษา