



เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง Power System Stability (Part 2)

เนื้อหา

- การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราวด้วยวิธี “Equal – Area Criterion”
 - กรณีเพิ่มค่า Power Input
 - กรณีฟอลต์ 3 เฟส
- การวิเคราะห์หาค่าเวลาวิกฤต (Critical Clearing Time)
- การแก้สมการการแกว่งด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Solution of Swing Equation)

2

การวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว ด้วยวิธี Equal – Area Criterion (พื้นที่เท่ากัน)

เสถียรภาพชั่วคราว เกิดจากการเปลี่ยนแปลง ;

- การเปลี่ยนแปลงโหลดขนาดใหญ่ทันทีทันใด
- การสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปอย่างกะทันหัน
- เกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ โดยเฉพาะฟอลต์ 3 เฟส

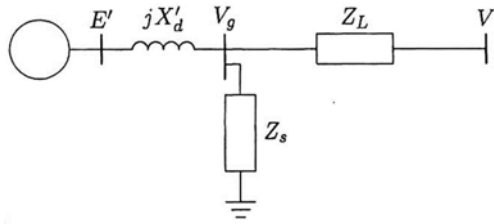
3

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Equal – Area Criterion

- สามารถใช้ทำนายในเรื่องเสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว
- เป็นการวิเคราะห์ด้วยรูปภาพ (Graphical) ซึ่งแสดงค่าพลังงานที่สะสมจากการหมุนในเครื่องจักร ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และหลังการเปลี่ยนแปลง
- ใช้วิเคราะห์ระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ตัวต่อบัสบนันต์ หรือ ระบบที่มีเครื่องจักร 2 ตัว

4

การวิเคราะห์ระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสอนันต์ ด้วยวิธี Equal – Area Criterion



กรณีไม่คิดผลการหน่วง สามารถเขียนสมการการแกว่งได้เป็น

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a$$

5

จาก $\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e)$

ทำการคูณด้วย $2d\delta/dt$ ทั้งสองข้าง ได้รูปสมการเป็น

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt}$$

เขียนใหม่ $\frac{d\delta}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt}$

$$d\delta \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d\delta$$

อินทิเกรตทั้ง 2 ข้าง

$$d\delta \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d\delta \rightarrow \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta$$

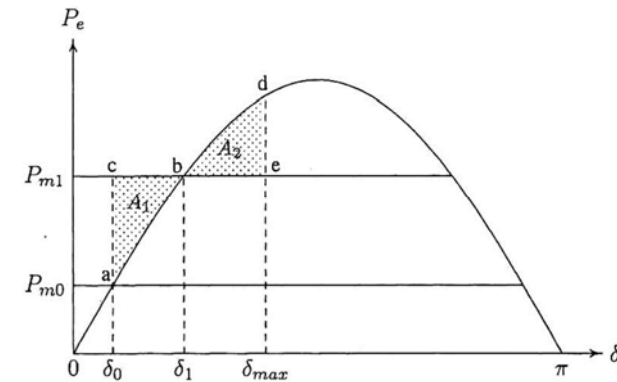
สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \leftarrow \Delta\omega$$

> ถ้าระบบมีเสถียรภาพ ภายหลังเกิดการเปลี่ยนแปลง ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงต้องเท่ากับ ศูนย์

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

7



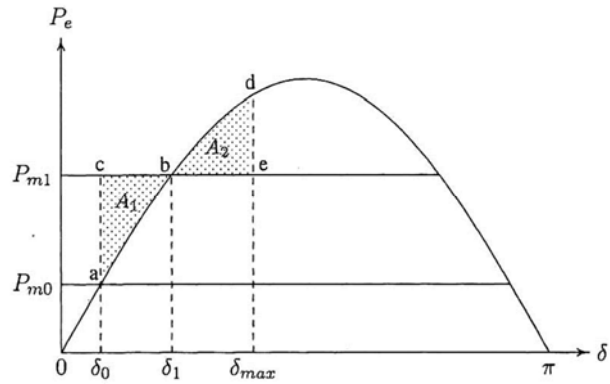
สถานะสมดุล

$\rightarrow P_{m0} = P_{e0}$

\rightarrow มุมกำลังมีค่าเท่ากับ δ_0

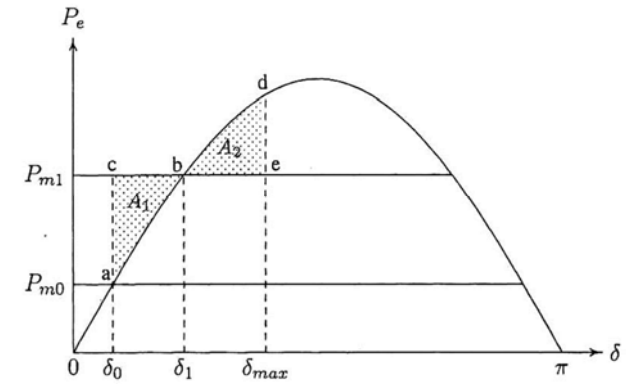
\rightarrow สถานะเริ่มต้นของการวิเคราะห์ (จุดตัด a)

8



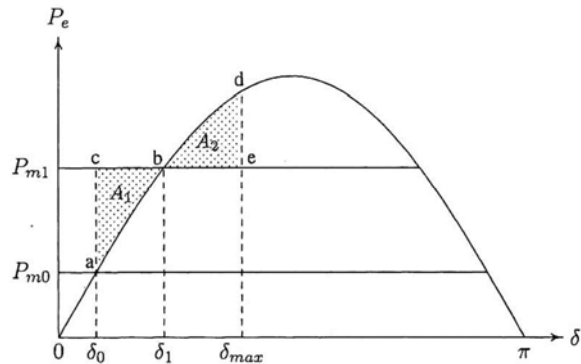
เพิ่มกำลังอินพุต

- P_{m0} เพิ่มมาเป็นค่า P_{m1} ($P_{m1} > P_{e0}$)
- ค่ากำลังอัตราเร่ง, P_a มีค่าเป็น บวก (+)
- มุมกำลังเปลี่ยนจาก $\delta_0 \rightarrow \delta_1$

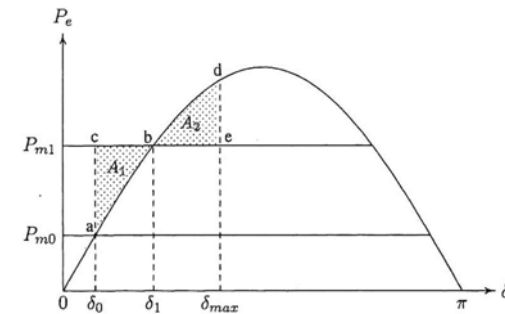


พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จากการเร่งแบบบวก เท่ากับ

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{พื้นที่ } abc = \text{พื้นที่ } A_1$$

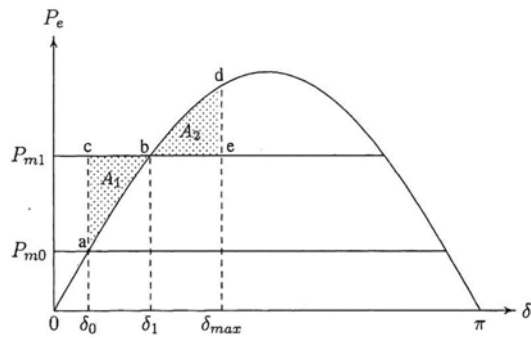


- เมื่อ $\delta = \delta_1$ จะทำให้ $P_e = P_{m1}$ (จุดตัด b)
- ที่จุด b ถึงแม้ $P_a = 0$, แต่โรเตอร์จะยังหมุนด้วยแรงเฉื่อย ส่งผลให้ δ และ P_e ยังเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ



- เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยแรงเฉื่อยต่อไป จะส่งผลให้ $P_m < P_e$
- ค่ากำลังอัตราเร่ง, P_a มีค่าเป็น ลบ (-)
- โรเตอร์จะกลับมาหมุนที่ความเร็วซิงโครนัสอีกครั้ง ที่ $\delta = \delta_{max}$
- พลังงานที่สะสมในโรเตอร์จากการเร่งแบบลบ เท่ากับ

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{พื้นที่ } bde = \text{พื้นที่ } A_2$$



➢ การที่โรเตอร์แกว่งไปจุด b และ มุมกำลัง δ_{max} พบว่า

$$|\text{area } A_1| = |\text{area } A_2|$$

➢ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **equal – area criterion**

➢ มุมโรเตอร์จะมีการแกว่งกลับไป - มาอยู่ระหว่างมุม δ_0 และ δ_{max} ด้วยความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) แล้วมาหยุดที่มุม δ_1

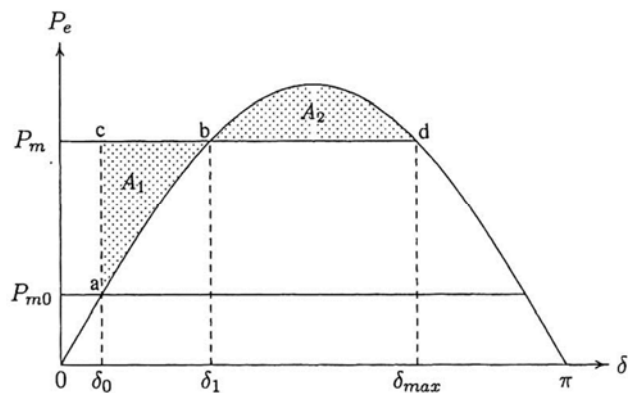
13

การประยุกต์วิธี Equal – Area Criterion ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีกำลังอินพุต (P_m) เพิ่มขึ้น

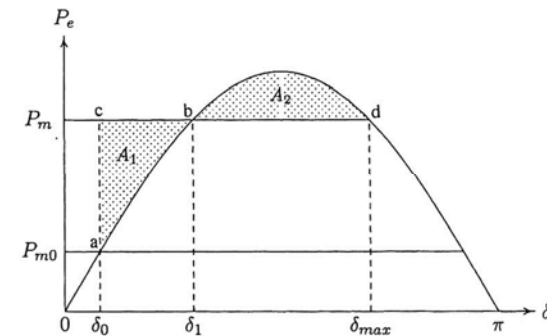
- ใช้หาความสามารถในการเพิ่มค่า P_m ว่าสามารถเพิ่มได้ถึงค่าไหน โดยที่ระบบไม่สูญเสียเสถียรภาพ
- ระบบจะมีเสถียรภาพ ก็ต่อเมื่อ เพิ่มค่า P_m แล้ว พื้นที่ของ A_2 ต้องไม่น้อยกว่าพื้นที่ของ A_1
- กรณี $A_2 < A_1$, โมเมนตัมความเร่งไม่สามารถแกว่งเข้าสู่จุดทำงานได้ ส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพได้

ขีดจำกัดของเสถียรภาพ $\rightarrow A_1 = A_2$

➢ ขีดจำกัดของเสถียรภาพ เกิดขึ้นเมื่อ δ_{max} ตัดกับกราฟ P_m (อยู่ระหว่างมุม 90° ถึง 180°)



15



ประยุกต์ใช้ equal – are criterion จะได้

$$P_m (\delta_1 - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_1} P_{max} \sin \delta d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} P_{max} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{max} - \delta_1)$$

16

➤ ได้ผลการอินทิเกรต เป็น

$$(\delta_{\max} - \delta_0) P_m = P_{\max} (\cos \delta_0 - \cos \delta_{\max})$$

แทนค่า $P_m = P_{\max} \sin \delta_{\max}$ จะได้

$$(\delta_{\max} - \delta_0) P_{\max} \sin \delta_{\max} = P_{\max} (\cos \delta_0 - \cos \delta_{\max})$$

$$(\delta_{\max} - \delta_0) \sin \delta_{\max} + \cos \delta_{\max} = \cos \delta_0 \quad (\text{สมการไม่เป็นเชิงเส้น})$$

Transient Stability Limit อยู่ที่

$$P_m = P_{\max} \sin \delta_1$$

เมื่อ

$$\delta_1 = \pi - \delta_{\max} \quad \leftarrow \text{หาให้ได้}^{17}$$

➤ หาค่าที่เหมาะสม โดยการแก้สมการ non - linear

$$(\delta_{\max} - \delta_0) \sin \delta_{\max} + \cos \delta_{\max} = \cos \delta_0$$

➤ เขียนฟังก์ชันของมุม δ_{\max} ได้เป็น

$$f(\delta_{\max}) = c$$

➤ ใช้วิธี Newton Raphson ในการแก้ปัญหา โดยกำหนดค่าเริ่มต้น

ให้อยู่ในช่วง $\pi/2 < \delta_{\max}^{(k)} < \pi$

วิธีการแก้ปัญหาคด้วยวิธี Newton - Raphson

$$\Delta \delta_{\max}^{(k)} = \frac{c - f(\delta_{\max}^{(k)})}{\left. \frac{df}{d\delta_{\max}} \right|_{\delta_{\max}^{(k)}}} \quad (\delta_{\max} - \delta_0) \sin \delta_{\max} + \cos \delta_{\max}$$

โดยที่ $\left. \frac{df}{d\delta_{\max}} \right|_{\delta_{\max}^{(k)}}$ หาจาก

$$\begin{aligned} \left. \frac{df}{d\delta_{\max}} \right|_{\delta_{\max}^{(k)}} &= \left. \frac{d[(\delta_{\max} - \delta_0) \sin \delta_{\max} + \cos \delta_{\max}]}{d\delta_{\max}} \right|_{\delta_{\max}^{(k)}} \\ &= (\delta_{\max}^{(k)} - \delta_0) \cos \delta_{\max}^{(k)} \end{aligned}$$

ทำการ iteration ในแต่ละครั้ง ได้เป็น

$$\delta_{\max}^{(k+1)} = \delta_{\max}^{(k)} + \Delta \delta_{\max}^{(k)}$$

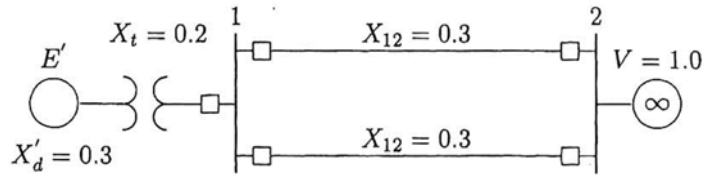
➤ ทำการคำนวณ จนกว่าค่าผลความแตกต่างจากการ iteration น้อยกว่า ค่าความผิดพลาดที่ต้องการ

$$|\delta_{\max}^{(k+1)} - \delta_{\max}^{(k)}| \leq \epsilon$$

จะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับระดับความถูกต้องที่ต้องการ

ตัวอย่างที่ 1

ระบบไฟฟ้าดังรูป มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 0.6 pu. ที่ค่า pf 0.8 lagging โดยที่ บัสอนันต์มีขนาด 1.0 pu.



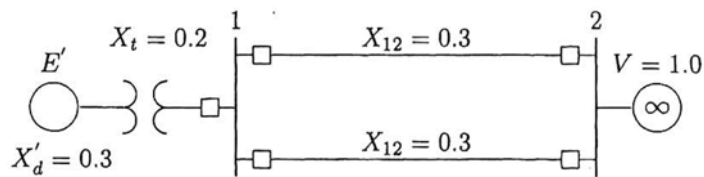
21

จงวิเคราะห์หา

1. ค่า P_m สูงสุด ที่สามารถเพิ่มได้ โดยที่ระบบไม่สูญเสียเสถียรภาพ
2. ในกรณีที่ค่า P_m เริ่มต้นเท่ากับ 0 จงหาค่า P_m ที่เพิ่มได้สูงสุด โดยระบบไม่เสถียรภาพ (สมมติให้แรงดันไฟฟ้าภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (E') คงที่ตลอด ตามค่าในกรณีที่ 1)

$(P_{m0} = 0)$

22



จากวงจร ในสภาวะเริ่มต้น พบว่า :

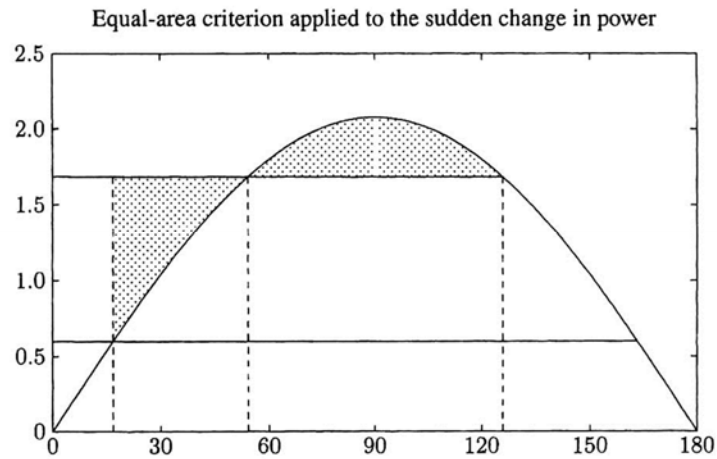
$X = 0.65$ และ $E' = 1.35$

23

กรณีที่ 1 : $P_0 = 0.6$, $E = 1.35$, $V = 1.0$, $X = 0.65$

Initial power	=	0.6000 p.u.
Initial power angle	=	16.791 degree
Sudden initial power	=	1.084 p.u.
Total power for critical stability	=	1.684 p.u.
Maximum angle swing	=	125.84 p.u.
New operating angle	=	54.160 degree

24

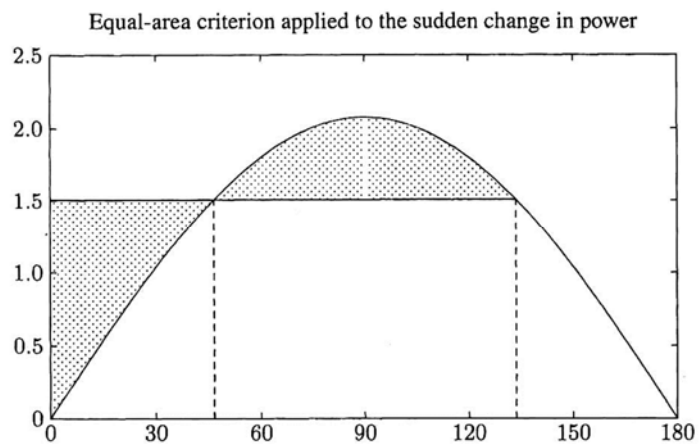


25

กรณีที่ 2 : $P_0=0.0$, $E = 1.35$, $V = 1.0$, $X = 0.65$

Initial power	=	0.0000 p.u.
Initial power angle	=	0.0000 degree
Sudden initial power	=	1.505 p.u.
Total power for critical stability	=	1.505 p.u.
Maximum angle swing	=	133.563 p.u.
New operating angle	=	46.437 degree

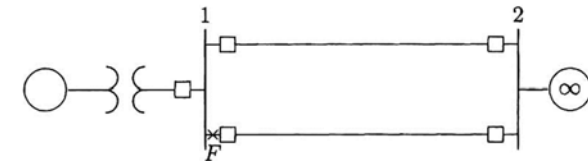
26



27

การประยุกต์วิธี Equal – Area Criterion ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีฟอลต์ 3 เฟส

กรณีที่ 1 : เกิดฟอลต์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



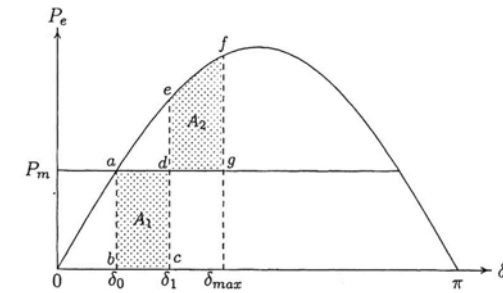
- กำหนดให้ :
- P_m มีค่าคงที่ตลอด
 - ในภาวะปกติ เครื่องจักรทำงานที่ภาวะคงที่ δ_0

28

กรณีที่ 1 : เกิดฟอลต์ที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- ไม่มีกำลังไฟฟ้าส่งผ่านไปที่ยังสื่อนั้น (ลงดินที่ขั้วด้านส่งหมด)
- ค่าความต้านทานสามารถตัดทิ้งได้
- P_e ลดลงมาที่ค่าศูนย์ (ลดลงมาแต่ที่แกน x ของกราฟ Power - Angle)
- P_m คงที่ $\rightarrow P_m > P_e$ ส่งผลให้เกิด P_a แบบบวก \rightarrow ความเร็วเพิ่มขึ้น \rightarrow พลังงานจลน์ถูกสะสม \rightarrow มุมกำลังเพิ่มขึ้น

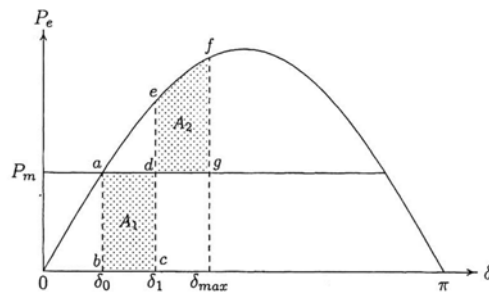
29



- ฟอลต์ถูกเคลียร์ที่มุม δ_1 ส่งผลให้ระบบทำงานที่จุด e
- การที่ $P_e > P_m$ ส่งผลให้ P_a เป็นค่าลบ (decelerating)
- พลังงานจลน์ที่สะสมไว้จะหมดไป ที่จุด f ของกราฟ

$$\text{พื้นที่ } A_1 = \text{พื้นที่ } A_2$$

30

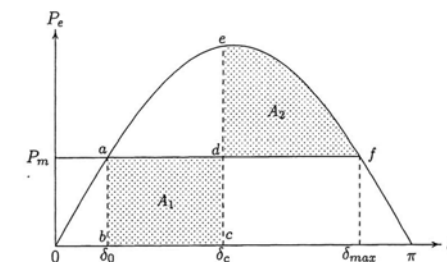


- ที่จุด f ค่า P_e ยังมีค่ามากกว่า P_m ส่งผลให้โรเตอร์ถูกหน่วง $\rightarrow P_e$ ลดลงตามเส้นกราฟ Power - Angle ผ่านจุด e และ a
- มุมกำลังจะแกว่งไปมารอบๆ มุม δ_0 ด้วยความถี่ธรรมชาติ
- หลังเคลียร์ฟอลต์แล้ว ถ้าระบบไม่สูญเสียเสถียรภาพ การทำงานจะกลับมาที่มุม δ_0

31

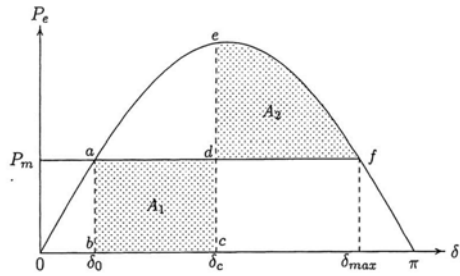
มุมเคลียร์ฟอลต์วิกฤต (Critical Clearing Angle)

- มุม δ_1 ที่เพิ่มขึ้น แล้วทำให้พื้นที่ A_2 เริ่มน้อยกว่าพื้นที่ A_1



- มุม δ_c คือ มุมที่ทำให้ $A_1 = A_2$ และ δ_{max} ตัดที่ส่วนโค้งของกราฟ (จุด f)

32



➢ ประยุกต์หลักการพื้นที่เท่ากัน พบว่า

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$P_m (\delta_c - \delta_0) = P_{max} (\cos \delta_c - \cos \delta_{max}) - P_m (\delta_{max} - \delta_c)$$

33

แก้สมการ เพื่อหามุมวิกฤตในการเคลียร์พอลต์ (δ_c) ได้เป็น

$$\cos \delta_c = \frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max}$$

❖ สามารถหา เวลาวิกฤตในการเคลียร์พอลต์ (critical clearing time, t_c) ได้จากการแก้สมการการแกว่ง (swing equation) โดยใช้รูปกราฟ

• วิเคราะห์ในขณะเกิดพอลต์ $\rightarrow P_e = 0$ สมการการแกว่ง มีค่าเป็น

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m \quad \rightarrow \quad \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_m$$

34

ทำการอินทิเกรตสมการ $\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_m$ จะได้

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} P_m \int_0^t dt = \frac{\pi f_0}{2H} P_m t$$

อินทิเกรตอีกครั้ง จะได้

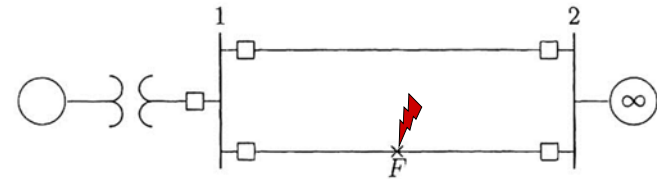
$$\delta = \frac{\pi f_0}{2H} P_m t^2 + \delta_0$$

เนื่องจาก δ_c คือ มุมวิกฤต จะได้เวลาวิกฤตในการเคลียร์พอลต์ เป็น

$$t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f_0 P_m}}$$

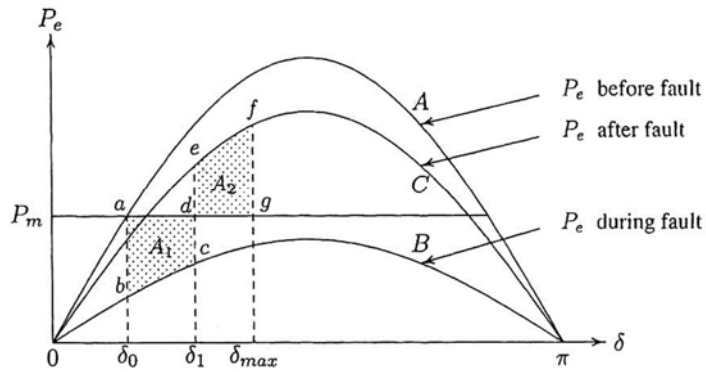
35

กรณีที่ 2 : เกิดพอลต์ที่ตำแหน่งอื่นๆ ในระบบ ที่ห่างจากขั้วส่ง (บัส 1)



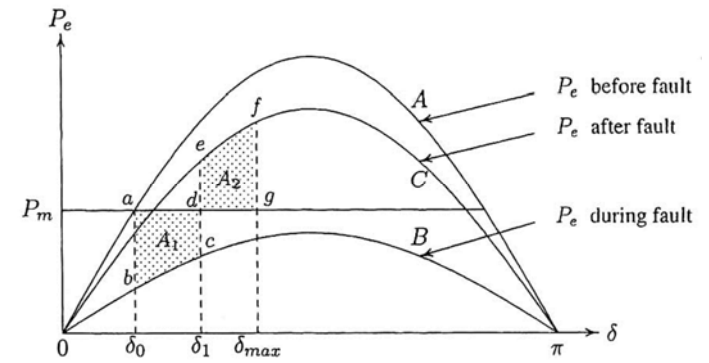
กำหนดให้ : - P_m มีค่าคงที่ตลอด
- ในภาวะปกติ เครื่องจักรทำงานที่ภาวะคงที่

36



- ค่ารีแอคแตนซ์ระหว่างบัส (X_{12}) ถูกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ขณะเกิดฟอลต์มีกำลังไฟฟ้าสามารถส่งผ่านไปอีกด้านได้ (กราฟ B)
- เมื่อเคลียร์ฟอลต์โดยการเปิด CB ที่ปลายสายทั้งสองด้าน (สายหายไป 1 เส้น) ส่งผลให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเป็นดังกราฟ C

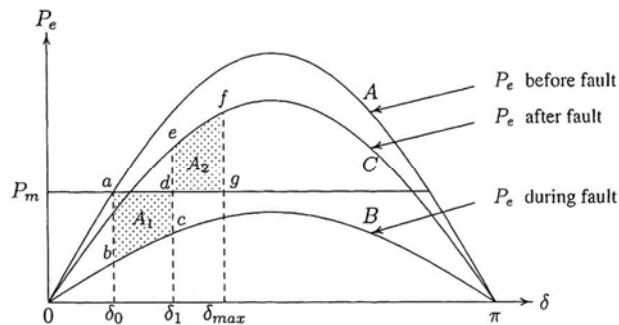
37



During Fault

- ขณะเกิดฟอลต์ 3 เฟส จุดทำงานจะเลื่อนไปจุด b ของกราฟ B
- ส่งผลให้ $P_m > P_e \rightarrow P_a (+)$ \rightarrow เกิดพลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์ \rightarrow มุมกำลัง δ เพิ่มขึ้น

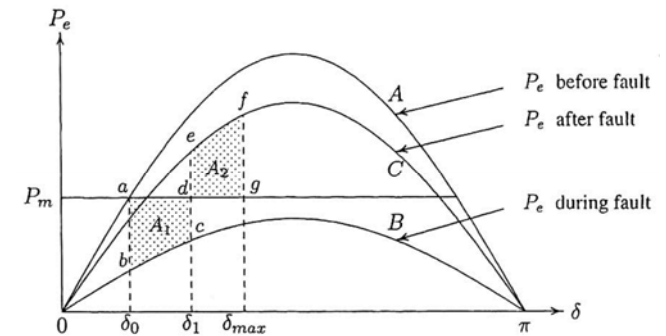
38



Fault Cleared

- เคลียร์ฟอลต์ที่มุม δ_1 โดยการตัดสายที่เกิดฟอลต์ออกไป \rightarrow จุดทำงานย้ายมาที่จุด e บนกราฟ C
- ส่งผลให้ $P_e > P_m \rightarrow P_a (-)$ \rightarrow พลังงานจลน์สะสมในโรเตอร์จะถูกใช้จนเท่ากับ 0 ที่จุด f \rightarrow มุมกำลัง เท่ากับ δ_{max} \rightarrow พื้นที่ $A_1 =$ พื้นที่ A_2

39

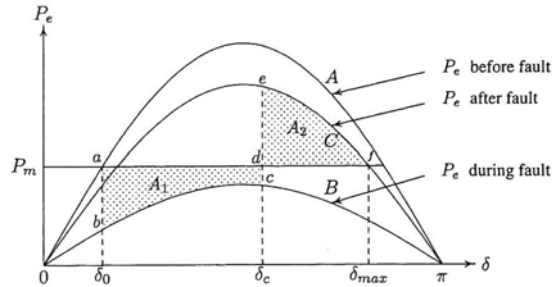


- จากจุด f $\rightarrow P_e$ ยังมากกว่า P_m \rightarrow โรเตอร์ยังคงหมุนต่อด้วยอัตราเร็วแบบหน่วง เพื่อให้ระบบกลับสู่จุดทำงานอีกครั้ง
- มุมโรเตอร์จะแกว่งกลับไป-มา อยู่รอบจุด e ที่ความถี่ธรรมชาติ
- จุดทำงานจุดใหม่ หลังจากเคลียร์ฟอลต์ จะเป็นจุดตัดของ P_m กับกราฟ C

40

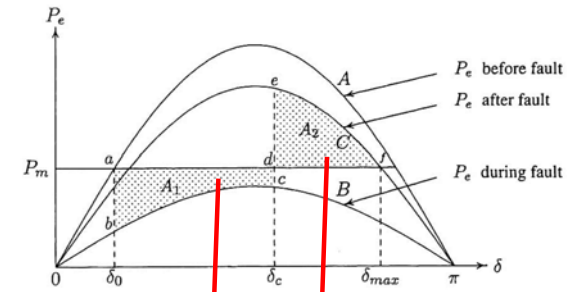
มุมเคลียร์ฟอลต์วิกฤต (Critical Clearing Angle)

- มุม δ_1 ที่เพิ่มขึ้น แล้วทำให้พื้นที่ A_2 เริ่มน้อยกว่าพื้นที่ A_1



- มุม δ_c คือ มุมที่ทำให้ $A_1 = A_2$ และ δ_{max} ตัดที่ส่วนโค้งของกราฟ (จุด f)

41



➢ ประยุกต์หลักการพื้นที่ที่เท่ากัน พบว่า

$$P_m (\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_{2max} \sin \delta d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} P_{max} \sin \delta d\delta - P_m (\delta_{max} - \delta_c)$$

จะได้

$$\cos \delta_c = \frac{P_m (\delta_{max} - \delta_0) + P_{3max} \cos \delta_{max} - P_{2max} \cos \delta_0}{P_{3max} - P_{2max}}$$

42

❖ หา เวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ (critical clearing time, t_c) ได้จากการแก้สมการการแกว่ง (swing equation) → เนื่องจากขณะเกิดฟอลต์ P_e ไม่เท่ากับ ศูนย์ → สมการการแกว่งไม่เป็นเชิงเส้น → ไม่สามารถวิเคราะห์เวลาวิกฤตได้จากกราฟ

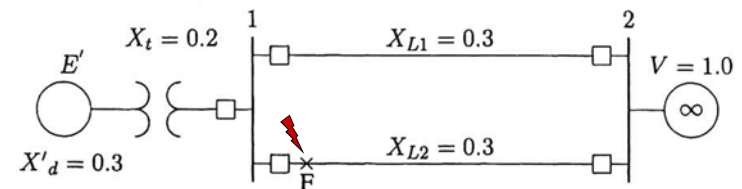


ต้องใช้กระบวนการเชิงตัวเลข (Numerical Solution) ในการวิเคราะห์

43

ตัวอย่างที่ 2

ระบบไฟฟ้า 60 Hz ลักษณะดังรูป โดยที่ค่ารีแอกแตนซ์เป็นค่า p.u. ที่ขึ้นกับค่าฐานของระบบ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่า $H = 5 \text{ MJ/MVA}$ และมีค่า $X'_d = 0.3 \text{ p.u.}$ จ่ายกำลังไฟฟ้า $P_e = 0.8 \text{ p.u.}$ และ $Q = 0.074 \text{ p.u.}$ และแรงดันที่บัสอนันต์มีค่าเท่ากับ $V = 1.0 \text{ p.u.}$

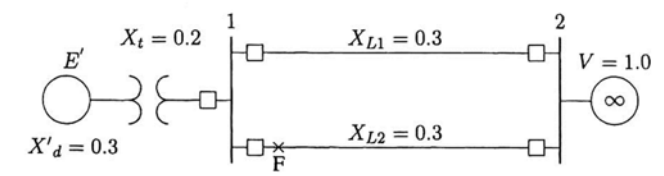


44

จงวิเคราะห์ในกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้ :

1. เกิดฟอลต์ 3 เฟสที่ จุด F ที่ปลายด้านส่งของสายส่ง ซึ่งภายหลังจากเคลียร์ฟอลต์แล้ว สายส่งทั้งสองยังคงอยู่กับระบบ **จงหา** มุมเคลียร์ฟอลต์วิกฤต และ เวลาเคลียร์ฟอลต์วิกฤต
2. เกิดฟอลต์ 3 เฟสที่จุดกึ่งกลางของสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง โดยหลังจากเคลียร์ฟอลต์แล้ว สายเส้นนั้นจะถูกถอดออกไปจากระบบ **จงหา** ค่ามุมเคลียร์ฟอลต์วิกฤต

สภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) ก่อนเกิดฟอลต์

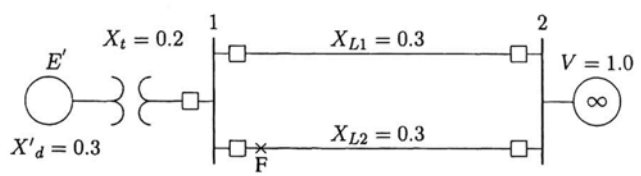


• กระแสที่ไหลไปที่บัสอนันต์ เท่ากับ

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{0.8 - j0.074}{1.0 \angle 0^\circ} = 0.8 - j0.074 \text{ p.u.}$$

• รีแอกแตนซ์ไอออนย้ายระหว่างแรงดันไฟฟ้าภายในกับบัสอนันต์ เท่ากับ

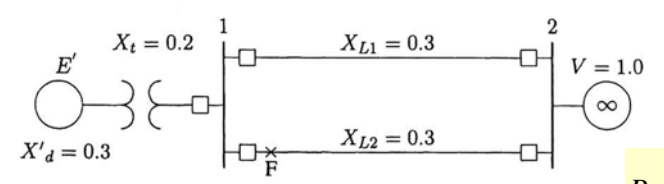
$$X_1 = X_d' + X_t + (X_{L1} // X_{L2}) = 0.3 + 0.2 + \frac{0.3}{2} = 0.65$$



แรงดันไฟฟ้าภายในชั่วคราว เท่ากับ

$$E' = V + jX_1 I = 1.0 + (j0.65)(0.8 - j0.074) = 1.17 \angle 26.387^\circ$$

กรณีที่ 1 : เกิดฟอลต์ที่จุด F และเคลียร์ฟอลต์โดยไม่มีการถอดสายส่ง



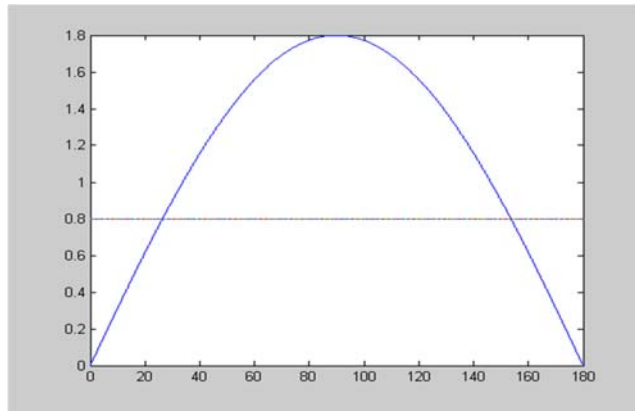
$$P_{\max} = \frac{|E'| |V|}{X_{12}}$$

• สมการ power - angle เกิดและหลังเกิดฟอลต์ เท่ากับ

$$P_m = P_{\max} \sin \delta = \frac{(1.17)(1.0)}{0.65} \sin \delta = 1.8 \sin \delta$$

• จุด(มุม)ทำงานเริ่มต้น เท่ากับ ($P_m = P_e = 0.8$)

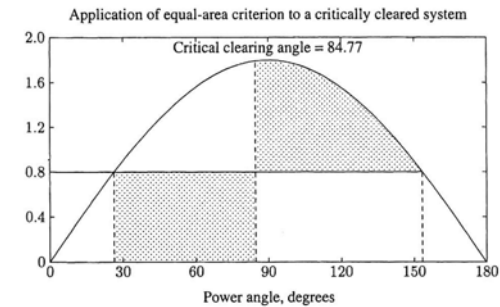
$$1.8 \sin \delta_0 = 0.8 \rightarrow \delta_0 = 26.388^\circ = 0.46055 \text{ rad}$$



จากกราฟที่ได้ สามารถหา δ_{\max} ได้จาก

$$\delta_{\max} = 180^\circ - \delta_0 = 153.612^\circ = 2.681 \text{ rad}$$

49



• ขณะเกิดฟอลต์ กำลังไฟฟ้าที่ส่งง่ายได้เท่ากับศูนย์ หามุมเคลียร์ฟอลต์วิกฤตได้จาก

$$\begin{aligned} \cos \delta_c &= \frac{P_m}{P_{\max}} (\delta_{\max} - \delta_0) + \cos \delta_{\max} = \frac{0.8}{1.8} (2.681 - 0.46055) + \cos 153.61^\circ \\ &= 0.09106 \end{aligned}$$

50

➤ มุมวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ เท่ากับ

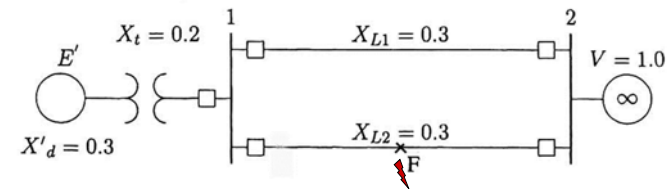
$$\delta_c = \cos^{-1}(0.09106) = 84.775^\circ = 1.48 \text{ rad}$$

➤ เวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ เท่ากับ

$$\begin{aligned} t_c &= \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f_0 P_m}} = \sqrt{\frac{(2)(5)(1.48 - 0.46055)}{(\pi)(60)(0.8)}} \\ &= 0.26 \text{ วินาที} \end{aligned}$$

51

กรณีที่ 2 : เกิดฟอลต์ที่จุดกึ่งกลางสาย แล้วเคลียร์ฟอลต์โดยการเปิดวงจร

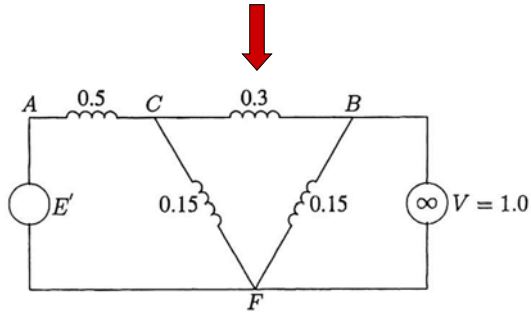
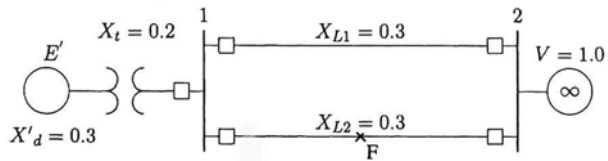


• สภาวะก่อนเกิดฟอลต์ พบว่า :

$$P_{1\max} = 1.8 \sin \delta \quad \text{โดยที่} \quad \delta_0 = 26.388^\circ = 0.46055 \text{ rad}$$

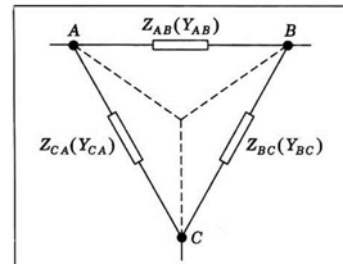
52

ขณะเกิดฟอลต์ที่กึ่งกลางสายส่ง



53

แปลงวงจรจาก Y → Δ

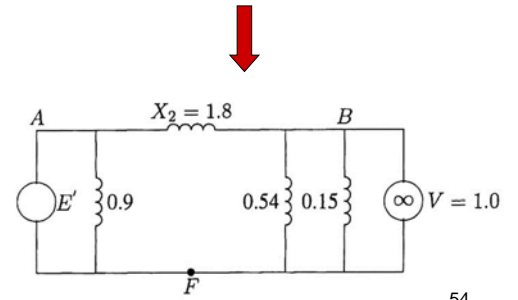
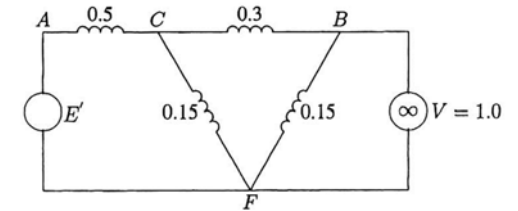


Y → Δ

$$Z_{AB} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_C}$$

$$Z_{BC} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_A}$$

$$Z_{CA} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_B}$$



54

จากการแปลง Y → Δ พบว่ารีแอกแตนซ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสอนันต์ เป็น

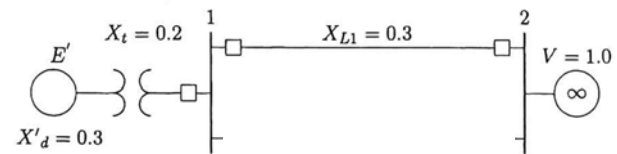
$$X_2 = \frac{(0.5)(0.3) + (0.5)(0.15) + (0.3)(0.15)}{0.15} = 1.8 \text{ p.u.}$$

➢ สามารถหากราฟ Power – Angle ระหว่างเกิดฟอลต์ ได้เป็น

$$P_{2\max} \sin \delta = \frac{|E'| |V|}{|X_2|} \sin \delta = \frac{(1.17)(1.0)}{(1.8)} \sin \delta = 0.65 \sin \delta$$

55

เคลียร์ฟอลต์โดยการเปิดวงจรที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง



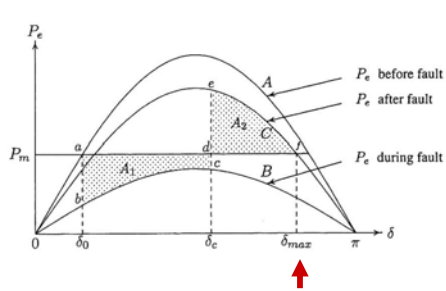
➢ รีแอกแตนซ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับบัสอนันต์ เท่ากับ

$$X_3 = X_d' + X_t + X_{L1} = 0.3 + 0.2 + 0.3 = 0.8 \text{ p.u.}$$

56

➢สามารถหาสมการ power – angle หลังเคลียร์ฟอลต์ได้เป็น

$$P_{3\max} \sin \delta = \frac{|E'| |V|}{|X_3|} \sin \delta = \frac{(1.17)(1.0)}{(0.8)} \sin \delta = 1.4625 \sin \delta$$



$$\delta_{\max} = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{P_m}{P_{3\max}} \right) = 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{0.8}{1.4625} \right) = 146.838^\circ = 2.5628 \text{ rad}$$

➢หามุมวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ออกจากระบบได้จาก

$$\cos \delta_c = \frac{P_m (\delta_{\max} - \delta_0) + P_{3\max} \cos \delta_{\max} - P_{2\max} \cos \delta_0}{P_{3\max} - P_{2\max}}$$

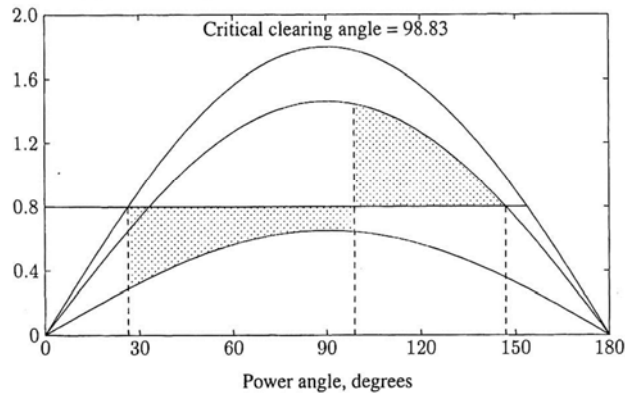
$$= \frac{0.8(2.5628 - 0.46055) + 1.4625 \cos 146.838^\circ - 0.65 \cos 26.388^\circ}{1.4625 - 0.65}$$

$$= -0.15356$$

➢มุมเคลียร์ฟอลต์วิกฤต (Critical Clearing Angle) เท่ากับ

$$\delta_c = \cos^{-1}(-0.15356) = 98.834^\circ$$

Application of equal-area criterion to a critically cleared system



Initial Power Angle	=	26.388
Maximum angle swing	=	146.838
Critical Clearing angle	=	98.834



END OF SECTION

การแก้สมการการแกว่ง โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

NUMERICAL SOLUTION OF THE SWING EQUATION

61

ทำไมถึงต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแก้สมการการแกว่ง??

- เนื่องจากสมการการแกว่ง มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \longrightarrow \quad \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{\max} \sin \delta$$

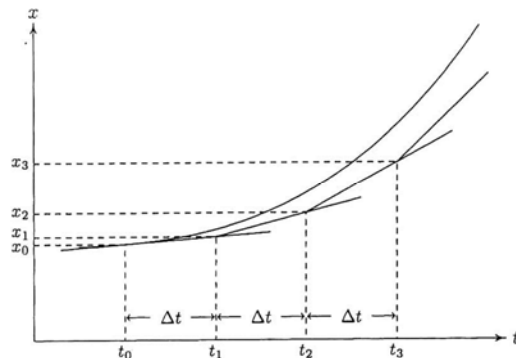
- ลักษณะสมการเป็นสมการ ODE (Ordinary Differential Equation)
- สามารถใช้วิธีเชิงตัวเลขแก้สมการ ODE โดยใช้วิธีต่างๆ ดังนี้

1. Euler's Method
2. Runge - Kutta

62

Euler's Method

- พิจารณาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง $\frac{dx}{dt} = f(x)$
- สามารถพิจารณาคำตอบได้จากกราฟ ดังต่อไปนี้



63

- สามารถประมาณลักษณะกราฟที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่า tangent ที่จุดต่างๆ
- กำหนดให้เวลาที่เพิ่มขึ้นทีละน้อย มีค่าเป็น Δt ทำให้ได้การเพิ่มขึ้นของค่า x เท่ากับ

$$\Delta x \approx \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0} \Delta t$$

← ความชันของกราฟที่จุด (t_0, x_0)

- ค่าของ x ที่ค่าเวลา $t_0 + \Delta t$ เท่ากับ

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0} \Delta t$$

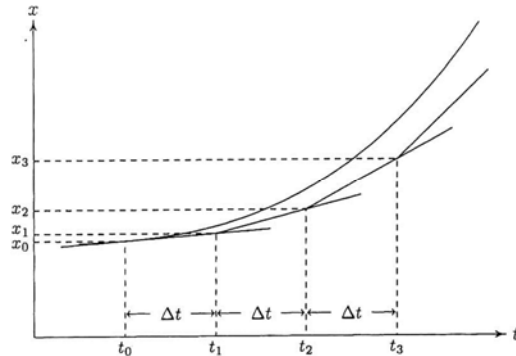
- รูปสมการเหมือนกรณีประยุกต์ใช้อนุกรมเทย์เลอร์ ในการกระจายค่า x รอบๆ จุด (t_0, x_0)

64

- สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึม สำหรับการคำนวณเพื่อหาค่า x ที่เวลาต่างๆ ได้เป็น

$$x_{i+1} = x_i + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_i} \Delta t$$

- สามารถหาคำตอบ $x(t)$ จากจุดเริ่มต้น (t_0, x_0) ไปจุดสุดท้าย (t_p, x_p)



65

- เพื่อความถูกต้องในการหาคำตอบให้มากขึ้น จะมีการเฉลี่ยค่าความชันของค่าเริ่ม และ ค่าที่อาจเกิดขึ้น (ค่าสุดท้าย) ในแต่ละขั้นการคำนวณ

- เรียกวิธีนี้ว่า “ **Modified Euler’s Method** ”

> ค่าสุดท้ายในแต่ละขั้นการคำนวณ $(t_1 = t_0 + \Delta t)$ สามารถทำนายได้จาก

$$x_1^p = x_0 + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0} \Delta t \quad \text{(predicate value)}$$

> หากความชันของค่าสุดท้ายในแต่ละขั้นการคำนวณ ได้เป็น

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_1^p} = f(t_1, x_1^p) \quad \text{(derivative of predicate value)}$$

66

- ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง จะทำให้การคำนวณถูกต้องมากขึ้น

$$x_1^c = x_0 + \left(\frac{\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_1^p}}{2} \right) \Delta t$$

- สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึม สำหรับการคำนวณเพื่อหาค่า x ที่เวลาต่างๆ ได้เป็น

$$x_{i+1}^c = x_i + \left(\frac{\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_i} + \left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t$$

67

ข้อเสียของวิธี Euler

1. มีความผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากการประมาณค่าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์
2. ต้องเลือกให้ค่า Δt ให้เหมาะสม ไม่จำเป็นว่าต้องเลือก Δt น้อยเสมอไป เพราะจะทำให้จำนวนรอบมาก และถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในแต่ละรอบ จะทำให้ค่าผิดพลาดเมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีค่ามาก

68

การประยุกต์ใช้ Euler's Method กับสมการอนุพันธ์อันดับสูง

- วิเคราะห์โดยใช้สมการและตัวแปรสถานะ (State Equation & State Variables)
- จำนวนตัวแปรสถานะ ขึ้นอยู่กับจำนวนอันดับ (order) ของสมการ
- ตัวอย่าง กรณีสมการอนุพันธ์อันดับสอง วิเคราะห์ได้เป็น

$$a_2 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = c$$

69

• จาก $a_2 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0x = c$

- ค่าเริ่มต้น x_0 และ $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{x_0}$ ที่ t_0 เขียนในรูปตัวแปรสถานะได้เป็น

$$x_1 = x \quad \text{และ} \quad x_2 = \frac{dx}{dt}$$

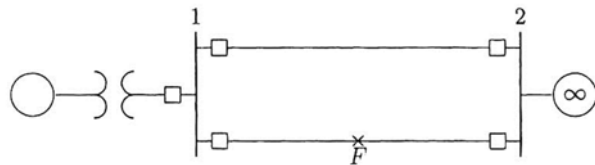
- เขียนสมการอันดับสอง ในรูปสมการสถานะอันดับ 1 ได้เป็น

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{c}{a_2} - \frac{a_0}{a_2}x_1 - \frac{a_1}{a_2}x_2$$

70

Numerical Solution of The Swing Equation



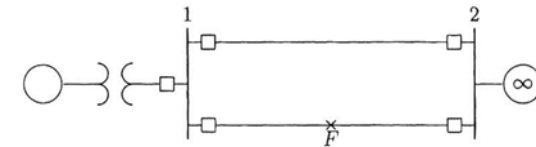
สภาวะคงที่ (เริ่มต้น)

• ค่า P_m คงที่ และ $P_m = P_e = P_{1\max} \sin \delta_0 = \frac{|E'| |V|}{X_1} \sin \delta_0$

• จะได้จุดทำงานที่มุม $\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{1\max}}$ รีแอกแตนซ์ถ่ายโอน ก่อนเกิดฟลต

• ความเร็วของโรเตอร์ คงที่ $\rightarrow \Delta\omega_0 = 0$

71



ขณะเกิดฟลต 3 เฟส ที่กึ่งกลางสายส่ง พบว่า ;

$$P_{2\max} = \frac{|E'| |V|}{X_2} \quad (X_2 \text{ มากขึ้น} \rightarrow \text{พลังงานไฟฟ้าส่งผ่านน้อยลง})$$

- สมการการแกว่งที่เกิดขึ้น มีค่าเป็น

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_{2\max} \sin \delta) = \frac{\pi f_0}{H} P_a$$

72

จากสมการการแกว่ง $\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_a$ (สมการอันดับ 2) หาตัวแปรสถานะ ได้เป็น

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad \text{และ} \quad \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\pi f_0}{H} P_a$$

• ประยุกต์ Modified Euler's Method

$$x_{i+1}^p = x_i + \frac{dx}{dt} \Big|_{x_i} \Delta t \quad \rightarrow \quad \delta_{i+1}^p = \delta_i + \frac{d\delta}{dt} \Big|_{\Delta\omega_i} \Delta t$$

(predicted value)

$$\Delta\omega_{i+1}^p = \Delta\omega_i + \frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\delta_i} \Delta t$$

73

$$\frac{dx}{dt} \Big|_{x_{i+1}^p} = f(t_{i+1}, x_{i+1}^p) \quad \rightarrow \quad \frac{d\delta}{dt} \Big|_{\Delta\omega_{i+1}^p} = \Delta\omega_{i+1}^p$$

(derivative predicate value)

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\delta_{i+1}^p} = \frac{\pi f_0}{H} P_a \Big|_{\delta_{i+1}^p}$$

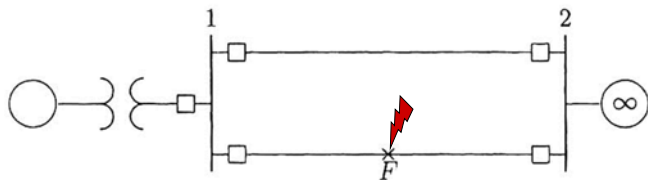
❖ สามารถหาคำตอบจากการคำนวณแต่ละครั้ง (ขั้น) ได้จาก

$$\delta_{i+1}^c = \delta_i + \left(\frac{\frac{d\delta}{dt} \Big|_{\Delta\omega_i} + \frac{d\delta}{dt} \Big|_{\Delta\omega_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t \quad \text{และ} \quad \Delta\omega_{i+1}^c = \Delta\omega_i + \left(\frac{\frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\Delta\omega_i} + \frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\delta_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t$$

74

ตัวอย่างที่ 3

จากตัวอย่างที่ 2 ในกรณีเกิด 3 เฟสฟอลต์ที่กึ่งกลางสาย แล้วทำการเคลียร์ฟอลต์โดยการเปิด CB ที่ปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่ง (ที่เกิดฟอลต์)



75

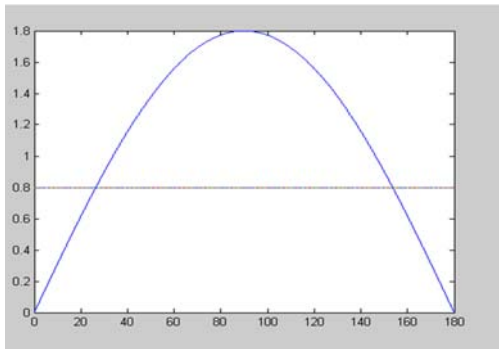
จงวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 : วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จากรูปคลื่นที่ได้จากสมการการแกว่ง เมื่อกำหนดให้มีการเคลียร์ฟอลต์ในเวลา 0.3 วินาที (กำหนดให้ $\Delta t = 0.01$ และวิเคราะห์โดยใช้เวลาทั้งหมด 1 นาที)

กรณีที่ 2 : วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จากรูปคลื่นที่ได้จากสมการการแกว่ง เมื่อกำหนดให้มีการเคลียร์ฟอลต์ในเวลา 0.5 วินาที

76

สภาวะคงที่ก่อนเกิดฟอลต์



จากตัวอย่างที่ 2 พบว่า ;

$$P_{1\max} \sin \delta = 1.8 \sin \delta$$

$$\begin{aligned} \delta_0 &= 26.388^\circ \\ &= 0.46055 \text{ rad} \end{aligned}$$

$$\Delta\omega_0 = 0$$

77

เมื่อเกิดฟอลต์ที่กึ่งกลางสาย

• สมการ Power – Angle มีค่าเป็น $P_{2\max} \sin \delta = 0.65 \sin \delta$

• สมการกำลังไฟฟ้าอัตราเร่ง เท่ากับ

$$P_a = 0.8 - 0.65 \sin \delta$$

• เขียนสมการการแกว่ง ได้เป็น

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_a = \frac{\pi f_0}{H} (0.8 - 0.65 \sin \delta)$$

78

• ประยุกต์ใช้ Modified Euler's method ในการวิเคราะห์ ($\Delta t = 0.01$)

STEP 1 ;

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_0} = \Delta\omega = 0$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_0} &= \frac{\pi f_0}{H} P_a \Big|_{\delta_0} = \frac{\pi f_0}{H} (0.8 - 0.65 \sin \delta_0) \\ &= \frac{\pi(60)}{5} (0.8 - 0.65 \sin 26.388^\circ) \\ &= 19.2684 \text{ rad/s}^2 \end{aligned}$$

79

STEP 1 ($t_1 = 0.01$) ;

• หาค่า predicted value ได้เป็น

$$\begin{aligned} \delta_{i+1}^p &= \delta_i + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_i} \Delta t \longrightarrow \delta_1^p = \delta_0 + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_0} \Delta t \\ &= 0.46055 + (0)(0.01) \\ &= 0.46055 \text{ rad} = 26.388^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{i+1}^p &= \Delta\omega_i + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_i} \Delta t \longrightarrow \Delta\omega_1^p = \Delta\omega_0 + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_0} \Delta t \\ &= 0 + (19.2684)(0.01) \\ &= 0.1927 \text{ rad/sec} \end{aligned}$$

80

STEP 1 ($t_1 = 0.01$) ;

• หาความชันของค่าสุดท้ายในการคำนวณ step ที่ 1 ได้เป็น ;

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_{i+1}^p} = \Delta\omega_{i+1}^p \quad \rightarrow \quad \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_1^p} = \Delta\omega_1^p = 0.1927 \text{ rad/sec}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_{i+1}^p} &= \frac{\pi f_0}{H} P_a \bigg|_{\delta_{i+1}^p} \quad \rightarrow \quad \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_1^p} = \frac{\pi f_0}{H} (0.8 - 0.65 \sin \delta) \bigg|_{\delta_1^p} \\ &= \frac{\pi(60)}{5} (0.8 - 0.65 \sin 26.388^\circ) \\ &= 19.2684 \text{ rad/s}^2 \end{aligned}$$

81

STEP 1 ($t_1 = 0.01$) ;

• ค่าตอบของการคำนวณครั้งที่ 1 มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \delta_{i+1}^c &= \delta_i + \left(\frac{\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_i} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t \quad \rightarrow \quad \delta_1^c = \delta_0 + \left(\frac{\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_0} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_1^p}}{2} \right) \Delta t \\ &= 0.46055 + \left(\frac{0 + 0.1927}{2} \right) (0.01) \\ &= 0.4615 \text{ rad} \\ &= 26.4430^\circ \end{aligned}$$

82

$$\Delta\omega_{i+1}^c = \Delta\omega_i + \left(\frac{\left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\Delta\omega_i} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_1^c &= \Delta\omega_0 + \left(\frac{\left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\Delta\omega_0} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_1^p}}{2} \right) \Delta t \\ &= 0.0 + \left(\frac{19.2684 + 19.2684}{2} \right) (0.01) \\ &= 0.1927 \text{ rad/sec} \end{aligned}$$

83

STEP 2 ;

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_1} = \Delta\omega_1 = 0.19268$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_1} &= \frac{\pi f_0}{H} P_a \bigg|_{\delta_1} = \frac{\pi f_0}{H} (0.8 - 0.65 \sin \delta_1) \\ &= \frac{\pi(60)}{5} (0.8 - 0.65 \sin 26.4430^\circ) \\ &= 19.2473 \text{ rad/s}^2 \end{aligned}$$

84

STEP 2 ($t_2 = 0.02$) ;

• หาค่า predicted value ได้เป็น

$$\delta_{i+1}^p = \delta_i + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_i} \Delta t \rightarrow \delta_2^p = \delta_1 + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_1} \Delta t$$

$$= 0.4615 + (0.19268)(0.01)$$

$$= 0.46344 \text{ rad} = 26.5531^\circ$$

$$\Delta\omega_{i+1}^p = \Delta\omega_i + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_i} \Delta t \rightarrow \Delta\omega_2^p = \Delta\omega_1 + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_1} \Delta t$$

$$= (0.1927) + (19.2473)(0.01)$$

$$= 0.38516 \text{ rad/sec}$$

85

STEP 2 ($t_2 = 0.02$) ;

• หาคความชันของค่าสุดท้ายในการคำนวณ step ที่ 1 ได้เป็น ;

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_{i+1}^p} = \Delta\omega_{i+1}^p \rightarrow \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_2^p} = \Delta\omega_2^p = 0.38516 \text{ rad/sec}$$

$$\left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_{i+1}^p} = \frac{\pi f_0}{H} P_a \left|_{\delta_{i+1}^p} \rightarrow \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_2^p} = \frac{\pi f_0}{H} (0.8 - 0.65 \sin \delta) \left|_{\delta_2^p}$$

$$= \frac{\pi(60)}{5} (0.8 - 0.65 \sin 26.5531^\circ)$$

$$= 19.205 \text{ rad/s}^2$$

86

STEP 2 ($t_2 = 0.02$) ;

• คำตอบของการคำนวณครั้งที่ 2 มีค่าเป็น

$$\delta_{i+1}^c = \delta_i + \left(\frac{\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_i} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t \rightarrow \delta_2^c = \delta_1 + \left(\frac{\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_1} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{\Delta\omega_2^p}}{2} \right) \Delta t$$

$$= 0.4615 + \left(\frac{0.19268 + 0.38516}{2} \right) (0.01)$$

$$= 0.46441 \text{ rad}$$

87

$$\Delta\omega_{i+1}^c = \Delta\omega_i + \left(\frac{\left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\Delta\delta_i} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_{i+1}^p}}{2} \right) \Delta t$$

$$\Delta\omega_1^c = \Delta\omega_1 + \left(\frac{\left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\Delta\delta_1} + \left. \frac{d\Delta\omega}{dt} \right|_{\delta_2^p}}{2} \right) \Delta t$$

$$= 0.19268 + \left(\frac{19.2473 + 19.205}{2} \right) (0.01)$$

$$= 0.38495 \text{ rad/sec}$$

88

เมื่อฟอลต์ถูกเคลียร์

• สมการ Power – Angle มีค่าเป็น $P_{3\max} \sin \delta = 1.4625 \sin \delta$

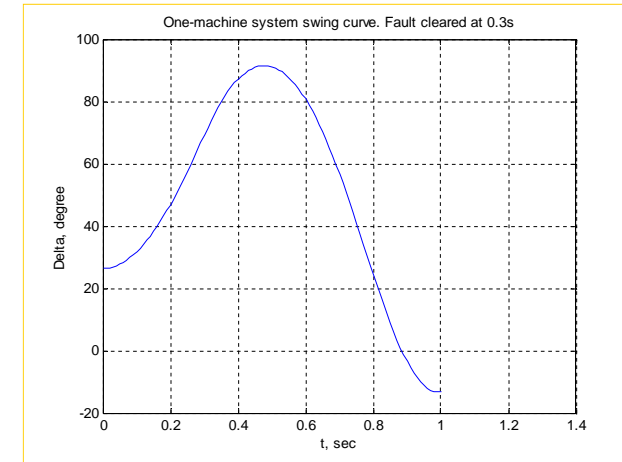
• สมการกำลังไฟฟ้าอัตราเร่ง เท่ากับ

$$P_a = 0.8 - 1.4625 \sin \delta$$

• เขียนสมการการแกว่ง ได้เป็น

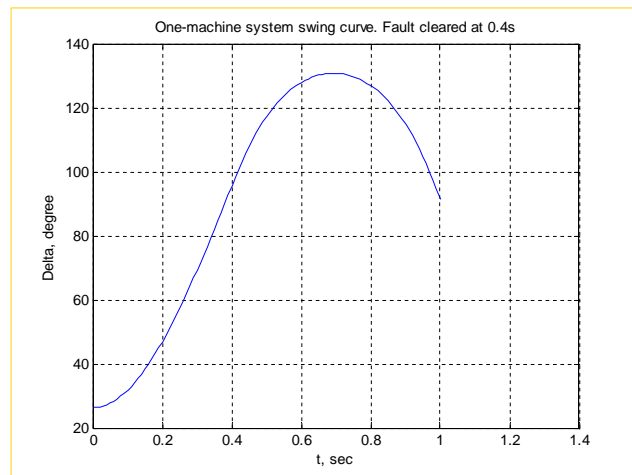
$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} P_a = \frac{\pi f_0}{H} (0.8 - 1.4625 \sin \delta)$$

89



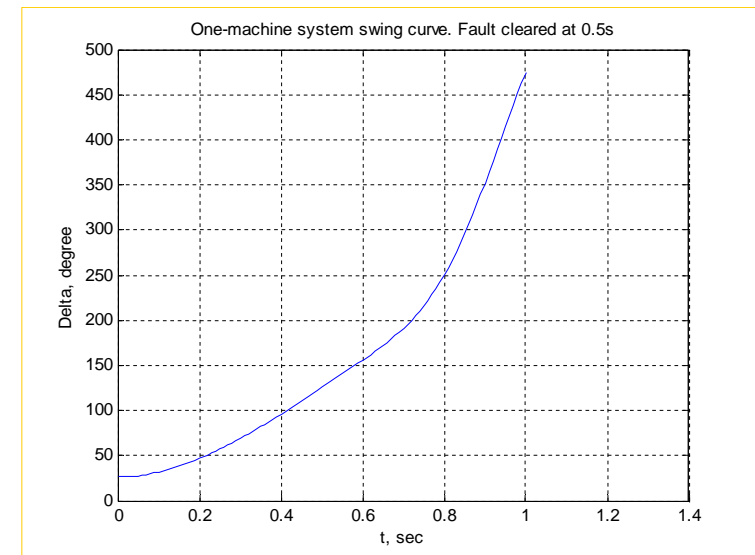
$t_c = 0.3$ วินาที

90



$t_c = 0.4$ วินาที

91



$t_c = 0.5$ วินาที

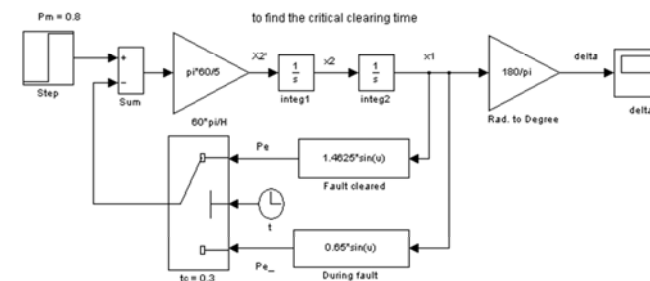
92

เมื่อทำการเคลียร์ฟอลต์ที่เวลาต่างๆกัน พบว่า ;

- เวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ (Critical Clearing Time) โดยที่ระบบไม่สูญเสียเสถียรภาพ คือ ที่เวลา 0.4 วินาที
- อุปกรณ์ป้องกันต้องทำงานเพื่อเปิดวงจรช้าที่สุด เป็นเวลาไม่เกิน 0.4 วินาที

93

• สามารถใช้โปรแกรม *SIMULINK* ใน MatLab ในการวิเคราะห์ได้



94

การวิเคราะห์ในกรณีระบบมีเครื่องจักรหลายตัว

• หลักการวิเคราะห์คล้ายกับกรณีมีเครื่องจักร 1 ตัว ต่อกับบัสอนันต์ แต่เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ จะมีการสมมติค่าต่างๆ ให้ง่ายขึ้น ดังนี้ ;

1. เครื่องจักรแต่ละตัวมีค่าแรงดันไฟฟ้าภายในคงที่ และไม่คิดผลของความเป็น Salient
2. ไม่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าขาเข้า (No Governor's action)
3. โหลดที่ต่อกับบัสต่างๆ ถือว่าคงที่ และถูกแปลงออกมาเป็นค่าแอดมิตแตนซ์สมมูลลงกราวนด์

95

4. ไม่คิดกำลังไฟฟ้าหน่วง (Damping Powers)
5. มุมกำลังของเครื่องจักรแต่ละตัว คิดจากมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าภายในเครื่องจักรตัวนั้นๆ
6. เครื่องจักรหลายตัวที่ต่อขนานกันในแต่ละบัส (สถานี) จะถือว่าการแกว่งเกิดขึ้นพร้อมๆกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **“โคฮีเรนท์ (Coherent)”** สามารถเขียนเป็นเครื่องจักรสมมูลตัวเดียวได้

- การสมมติค่าต่างๆ ให้ง่ายขึ้นนี้ เรียกว่า **“Classical Stability Model”**
- การวิเคราะห์จะอยู่ในรูปเมตริก ต้องใช้เครื่องคำนวณในกรณีที่ระบบมีขนาดใหญ่

96

ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว กรณีเครื่องจักรหลายตัว

- วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow) เพื่อหาค่าแรงดันบัสและมุมเฟส ในภาวะคงที่เริ่มต้น ซึ่งสามารถหากระแสได้เป็น

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{(P_i + jQ_i)^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad [i = 1, 2, \dots, m]$$

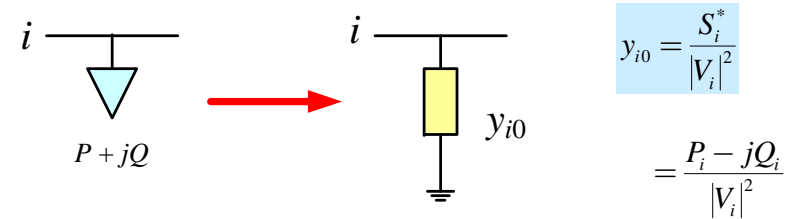
- เมื่อ m คือ จำนวนเครื่องจักร
 V_i คือ แรงดันบัส ของเครื่องจักร i
 P_i, Q_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าจินตภาพของเครื่องจักร i

97

- เมื่อไม่คิดความต้านทานอาร์เมเจอร์ แรงดันไฟฟ้าภายในเครื่องจักรแต่ละตัว เท่ากับ

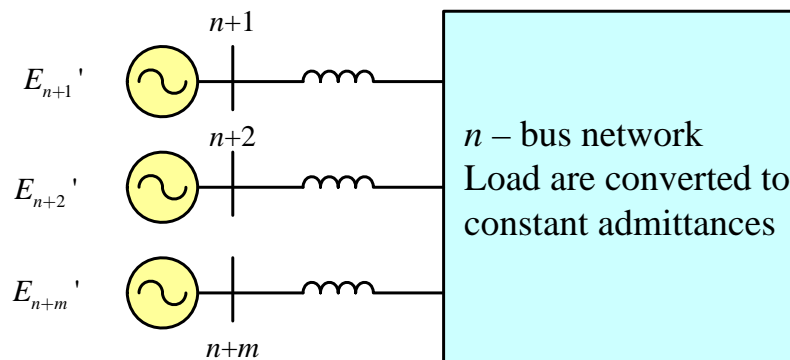
$$E_i' = V_i + jX_d' I_i$$

- โหลดที่ต่ออยู่กับแต่ละบัสบัส เขียนในรูปแอดมิแตนซ์ต่อลงดิน



98

สามารถเขียนวงจรข่ายสมมูลของระบบ ที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และวงจรข่ายสมมูลที่มีค่าโหลดทุกตัวเป็นแอดมิแตนซ์ ดังรูป



99

สมการ โหนดแรงดันของวงจรข่าย เขียนในรูปเมทริกได้เป็น

$$\begin{matrix} \text{load bus} \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ \hline I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Y_{1(n+1)} & \cdots & Y_{1(n+m)} \\ Y_{2(n+1)} & \cdots & Y_{2(n+m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n(n+1)} & \cdots & Y_{n(n+m)} \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} Y_{(n+1)1} & \cdots & Y_{(n+1)n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+m)1} & \cdots & Y_{(n+m)n} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+m)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ \hline E'_{n+1} \\ \vdots \\ E'_{n+m} \end{bmatrix}$$

gen bus

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$$

100

- พิจารณาที่ Load Bus (บัส 1 ถึง n) พบว่าไม่มีกระแสเข้าหรือออก $\rightarrow I = 0$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E'_m \end{bmatrix}$$

- สามารถตัดบัสทิ้ง ด้วยวิธี korn เพื่อลดขนาดของเมตริกแอดมิตแตนซ์ ได้

- จากสมการ โนด พบว่า :

$$0 = Y_{nm} V_n + Y_{nm} E'_m \rightarrow V_n = -Y_{nm}^{-1} Y_{nm} E'_m$$

$$I_m = Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E'_m$$

101

- เขียนสมการกระแสที่ไหลจากเครื่องจักร ได้เป็น

$$I_m = [Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nm}^{-1} Y_{nm}] E'_m = Y_{bus}^{red} E'_m$$

- เมตริกแอดมิตแตนซ์ที่ถูกลดรูป จะหาได้จาก

$$Y_{bus}^{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nm}^{-1} Y_{nm}$$

102

- กำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว มีค่าเท่ากับ

$$S_{ei}^* = E_i^* I_i$$

หรือ $P_{ei} = \Re [E_i^* I_i]$

- เมื่อ $I_i = \sum_{j=1}^m E'_j Y_{ij}$ จะได้

$$P_{ei} = \Re \left[E_i^* \sum_{j=1}^m E'_j Y_{ij} \right] = \Re \left[\sum_{j=1}^m E_i^* E'_j Y_{ij} \right]$$

103

- กำหนดปริมาณต่างๆ ในรูปเชิงขั้ว ได้แก่ $E'_i = |E'_i| \angle \delta_i$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$$

- เขียนสมการกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เป็น

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

- ในภาวะคงที่ ก่อนเกิดฟลด์ ค่ากำลังทางกล (P_m) จะเท่ากับ กำลังทางไฟฟ้า (P_e) จะได้

$$P_{mi} = \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

104

Multi - machines Transient Stability

- วิเคราะห์เสถียรภาพกรณี 3 เฟส ฟอลต์
- สมมติบัสที่เกิดฟอลต์ คือ บัส $k \rightarrow V_k = 0$
- เมตริกแอดมิตแตนซ์ (ก่อนเกิดฟอลต์) สามารถตัดบัสที่ขนาดเมตริกแอดมิตแตนซ์ขณะเกิดฟอลต์จะเล็กลงกว่าก่อนเกิดฟอลต์

$|Y_{ij}|_f \leftarrow$ Reduced by korn reduction
- แรงดันไฟฟ้าภายในเครื่องจักรแต่ละตัว สมมติให้ค่าคงที่ (เหมือนช่วงก่อนเกิดฟอลต์)

105

- ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจักรจะเปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากเมตริกแอดมิตแตนซ์มีการเปลี่ยนแปลง

$$P_{ei}^f = \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}|_f \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

- สมการการแกว่ง ของเครื่องจักร i มีค่าเป็น

$$\frac{H_i}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}|_f \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

- ในกรณีที่เครื่องจักรมีค่าพิกัด MVA ไม่ตรงกับค่าฐาน ต้องทำการปรับจาก

$$H_i = \frac{S_{Gi}}{S_B} H_{Gi}$$

106

- สามารถเขียนตัวแปรสถานะ เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องจักรแต่ละตัวได้เป็น

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_i \quad [i = 1, \dots, m]$$

$$\frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \frac{\pi f_0}{H_i} (P_m - P_e^f)$$

107

- ภายหลังจากที่ทำการเคลียร์ฟอลต์ออกไป เมตริกแอดมิตแตนซ์จะถูกคำนวณใหม่อีกครั้ง เนื่องจากวงจรข่ายมีการเปลี่ยนแปลง

$$|Y_{ij}|_{pf}$$

- ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องจักรจะเปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากเมตริกแอดมิตแตนซ์มีการเปลี่ยนแปลง

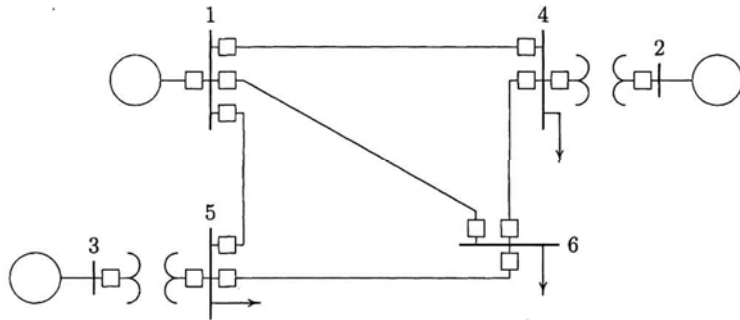
$$P_{ei}^{pf} = \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}|_{pf} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

- สมการการแกว่ง และ ตัวแปรสถานะก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

108

ตัวอย่างที่ 4

ระบบไฟฟ้าดังรูป กำหนดให้บัส 1 เป็นบัส อ้างอิง (Slack Bus) โดยค่าฐานของระบบ เท่ากับ 100 MVA



109

พารามิเตอร์ต่างๆ

LOAD DATA		
Bus No.	Load	
	MW	Mvar
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	100	70
5	90	30
6	160	110

GENERATION SCHEDULE				
Bus No.	Voltage Mag.	Generation, MW	Mvar Limits	
			Min.	Max.
1	1.06			
2	1.04	150	0	140
3	1.03	100	0	90

LINE DATA				
Bus No.	Bus No.	R, PU	X, PU	$\frac{1}{2}B,$
				PU
1	4	0.035	0.225	0.0065
1	5	0.025	0.105	0.0045
1	6	0.040	0.215	0.0055
2	4	0.000	0.035	0.0000
3	5	0.000	0.042	0.0000
4	6	0.028	0.125	0.0035
5	6	0.026	0.175	0.0300

MACHINE DATA			
Gen.	R_a	X'_d	H
1	0	0.20	20
2	0	0.15	4
3	0	0.25	5

110

กำหนดให้ เกิดฟอลต์ 3 เฟส ที่สายส่ง 5-6 บริเวณใกล้กับบัส 6 ซึ่งทำการเคลียร์ฟอลต์ออกไปโดยเปิดวงจรที่ปลายทั้ง 2 ด้านของสายส่ง

จงวิเคราะห์เสถียรภาพชั่วคราว (Transient Stability) ที่เกิดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว ในกรณีดังต่อไปนี้

1. ฟอลต์ถูกเคลียร์ที่เวลา 0.4 วินาที
2. ฟอลต์ถูกเคลียร์ที่เวลา 0.5 วินาที
3. หาเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์

111

สภาวะคงที่ ก่อนเกิดฟอลต์

1. คำนวณหาการไหลของกำลังไฟฟ้า จากวิธี Newton - Raphson

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method
Maximum Power Mismatch = 1.80187e-007
No. of Iterations = 4

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.060	0.000	0.000	0.000	105.287	107.335	0.000
2	1.040	1.470	0.000	0.000	150.000	99.771	0.000
3	1.030	0.800	0.000	0.000	100.000	35.670	0.000
4	1.008	-1.401	100.000	70.000	0.000	0.000	0.000
5	1.016	-1.499	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
6	0.941	-5.607	160.000	110.000	0.000	0.000	0.000
Total			350.000	210.000	355.287	242.776	0.000

112

2. หามatricแอดมิตแตนซ์ [Y] ก่อนเกิดฟอลต์

$Y_{bf} =$

```
0.3517 - 2.8875i  0.2542 + 1.1491i  0.1925 + 0.9856i
0.2542 + 1.1491i  0.5435 - 2.8639i  0.1847 + 0.6904i
0.1925 + 0.9856i  0.1847 + 0.6904i  0.2617 - 2.2835i
```

3. หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในเครื่องจักรแต่ละตัวได้

G(i)	E'(i)	d0(i)	Pm(i)
1	1.2781	8.9421	1.0529
2	1.2035	11.8260	1.5000
3	1.1427	13.0644	1.0000

ขณะเกิดฟอลต์ที่บัส 6

1. หามatricแอดมิตแตนซ์ [Y] ขณะเกิดฟอลต์

$Y_{df} =$

```
0.1913 - 3.5849i  0.0605 + 0.3644i  0.0523 + 0.4821i
0.0605 + 0.3644i  0.3105 - 3.7467i  0.0173 + 0.1243i
0.0523 + 0.4821i  0.0173 + 0.1243i  0.1427 - 2.6463i
```

2. เกิดสมการการแกว่ง และสามารถใช้ตัวแปรสถานะมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรแต่ละตัวได้

ขณะเกิดฟอลต์โดยเปิดวงจรสายส่ง 5-6

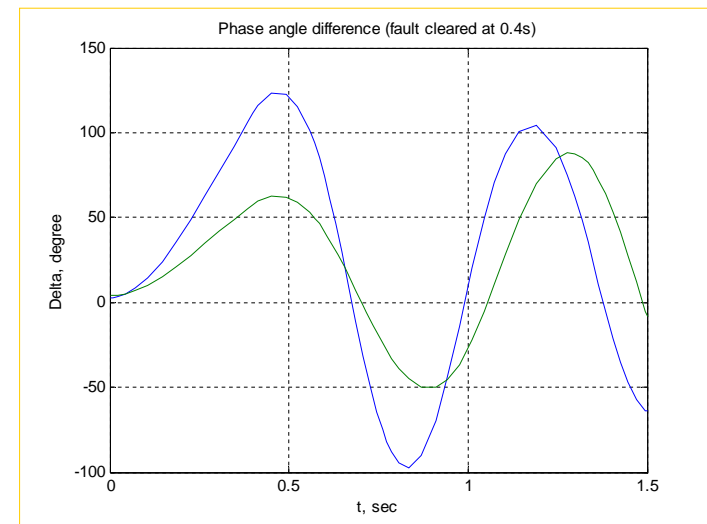
1. หามatricแอดมิตแตนซ์ [Y] ภายหลังเคลียร์ฟอลต์

$Y_{af} =$

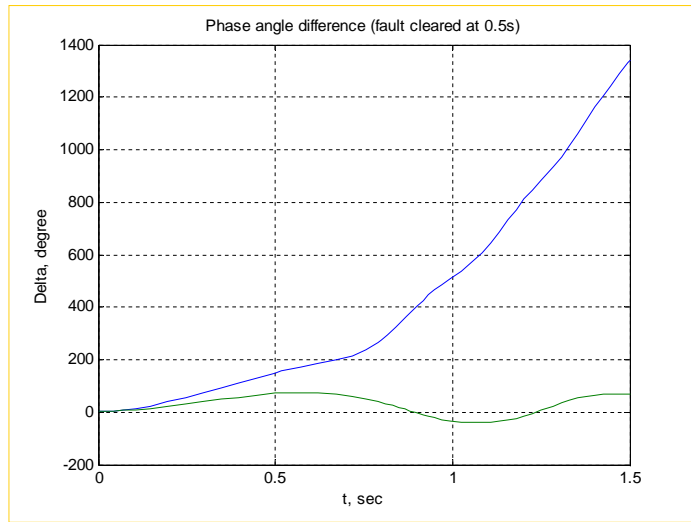
```
0.3392 - 2.8879i  0.2622 + 1.1127i  0.1637 + 1.0251i
0.2622 + 1.1127i  0.6020 - 2.7813i  0.1267 + 0.5401i
0.1637 + 1.0251i  0.1267 + 0.5401i  0.2859 - 2.0544i
```

2. สมการการแกว่ง และสามารถใช้ตัวแปรสถานะจะเปลี่ยนแปลงจากตอนที่เกิดฟอลต์ สามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรแต่ละตัวได้

1. กรณิเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 0.4 วินาที (วิเคราะห์เป็นเวลา 1.5 วินาที)

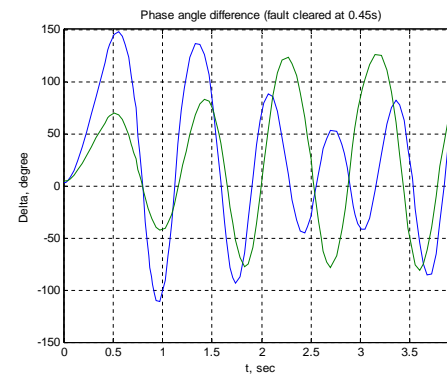


2. กรณีเคลียร์ฟอลต์ที่เวลา 0.5 วินาที (วิเคราะห์เป็นเวลา 1.5 วินาที)

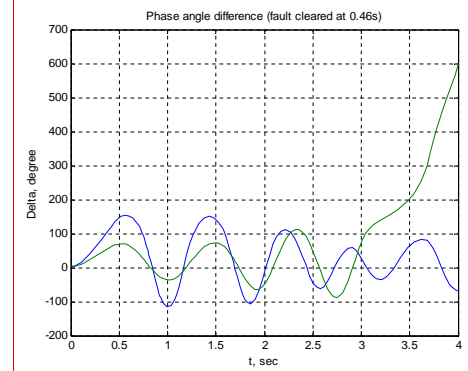


117

3. หาเวลาวิกฤตในการเคลียร์ฟอลต์ โดยปรับค่าเวลาที่ใช้เคลียร์ฟอลต์ไปเรื่อยๆ ระหว่าง 0.4 ถึง 0.5 วินาที



เวลา 0.45 วินาที (เวลาวิกฤต)



เวลา 0.46 วินาที

118

END OF SECTION

119