

Curso IEE-443

Sistemas Eléctricos de Potencia

Capítulo 11: Estabilidad Transitoria

Dr. Jaime Peralta Rodríguez
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Agosto 2016



Contenido

- Estabilidad Transitoria
- Criterio de Áreas Iguales
- Estabilidad Transitoria Sistemas Multimáquinas
- Estabilidad Transitoria en DigSilent

Introducción

- Estabilidad de SEP es la capacidad del sistema (generadores) para transitar de un estado estacionario a otro luego de una perturbación sin perder sincronismo
- Existen tres tipos de estabilidad:
 - Estado estacionario
 - Dinámica
 - Transitoria
- Estabilidad en estado estacionario dice relación con perturbaciones lentas o graduales
 - El objetivo es mantener el voltaje, transferencias y diferencia angular dentro de límites definidos
 - El estado estacionario se estudia mediante flujos de potencia

Introducción

- La estabilidad dinámica involucra perturbaciones pequeñas y de mayor duración
 - Se manifiesta a través de pequeñas oscilaciones de potencia
 - Existen oscilaciones inter-máquinas (dentro de una planta), locales e inter-área
 - También se puede manifestar en el voltaje y podría conducir al colapso de tensión

- La estabilidad transitoria, foco de este capítulo, involucra perturbaciones grandes:
 - Salida de generadores
 - Fallas
 - Salidas de líneas
 - Pérdida de cargas, etc.

Estabilidad Transitoria (ET)

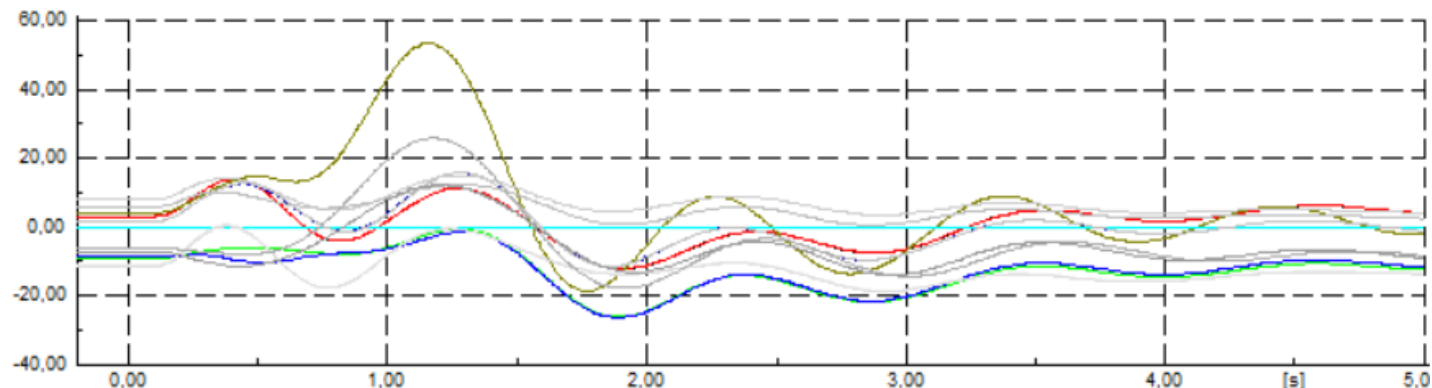
- La estabilidad dice relación con la estabilidad angular de los generadores
- Luego de una falla, los generadores sufren desviaciones transitorias de la frecuencia (velocidad) y ángulos de potencia
- El objetivo de la ET es estudiar si los generadores vuelven a alcanzar la frecuencia nominal (50Hz) con los nuevos ángulos luego de un falla
- También son de interés los flujos de potencia en líneas y los voltaje en los nodos del sistema
- Dado el gran tamaño de los sistema eléctricos (muchos generadores) la ET se estudia mediante el uso de programas computacionales (DigSilent)

Estabilidad Transitoria (ET)

- Para una perturbación específica, el programa resuelve paso a paso y alternativamente las ecuaciones algebraicas y las ecuaciones diferencial no lineales
- La ecuaciones algebraicas representan la red eléctrica, Y_{bus}
- Las ecuaciones diferenciales representan los generadores síncronos y sus sistemas de control
- Se analizan tres estados:
 - ☐ Pre-falla
 - ☐ Falla
 - ☐ Post-falla
- El programa entrega los voltajes, frecuencia, potencia, ángulos de los generadores y buses en función del tiempo
- La inicialización (pre-falla) proviene de la solución del flujo de potencia en régimen permanente

Estabilidad Transitoria (ET)

- En la mayoría de los casos la estabilidad se determina en la primera oscilación del ángulo de los generadores luego de una falla
- Luego del primer ciclo, que generalmente dura 1 segundo, la potencia mecánica y el voltaje interno del generador se asume constante
- Sin embargo, en un sistema grande existen múltiples oscilaciones que duran varios segundos, por lo cual el modelo de generador mas detallado, excitatriz, turbina y regulador de velocidad son importantes



Ecuación Oscilatoria (Swing Equation)

- Considere un generador síncrono y su turbina. La ecuación de movimiento del rotor esta determinada por la segunda ley de Newton:

$$J\alpha_m(t) = T_m(t) - T_e(t) = T_a(t)$$

- Donde:

- J:** Momento de inercia total (kg m²)
- α_m :** Aceleración angular del rotor (rad/s²)
- T_m :** Torque mecánico suministrado por la turbina menos las pérdidas mecánicas (Nm)
- T_e :** Torque eléctrico, equivalente a la potencia eléctrica 3ph total más las pérdidas eléctricas (Nm)
- T_a :** Torque neto de aceleración (Nm)

Ecuación Oscilatoria

- Además, la **aceleración angular** esta dada por:

$$\alpha_m(t) = \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2}$$

$$\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

- Donde:

ω_m : Velocidad angular de rotor (rad/s)

θ_m : Posición angular del rotor, o ángulo (rad)

Ecuación Oscilatoria

- Si $T_m = T_e \rightarrow T_a = \alpha_m = 0$, velocidad constante, llamada velocidad síncrona (50Hz)
- Si $T_m > T_e \rightarrow T_a = \alpha_m$ es positiva la velocidad del rotor aumenta
- Si $T_m < T_e \rightarrow T_a = \alpha_m$ es negativa la velocidad del rotor disminuye
- Por convención, el ángulo del rotor se mide respecto de una referencia rotatoria en lugar de una estacionaria (fija). Así, se define:

$$\theta_m(t) = \omega_{msyn}t + \delta_m(t)$$

- Donde:

ω_{msyn} : Velocidad angular síncrona del rotor (rad/s)

δ_m : Posición angular del rotor con respecto a una referencia rotatoria (rad)

Ecuación Oscilatoria

- De este modo, podemos reescribir la ecuación oscilatoria:

$$J \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = J \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = T_m(t) - T_e(t) = T_a(t)$$

- A veces puede ser conveniente trabajar en potencias en lugar de torques y con valores en pu.
- Así multiplicamos por $\omega_m(t)$ y dividimos por S_{rated} (potencia nominal del generador):

$$\begin{aligned} \frac{J \omega_m(t)}{S_{\text{rated}}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} &= \frac{\omega_m(t) T_m(t) - \omega_m(t) T_e(t)}{S_{\text{rated}}} \\ &= \frac{p_m(t) - p_e(t)}{S_{\text{rated}}} = p_{mp.u.}(t) - p_{ep.u.}(t) = p_{ap.u.}(t) \end{aligned}$$

$p_{mp.u.}$: Potencia mecánica (pu)

$p_{ep.u.}$: Potencia eléctrica (pu)

Ecuación Oscilatoria

- Finalmente, es conveniente trabajar con valores normalizados de la constante de inercia, denominada H (pu-s):

$$H = \frac{\text{stored kinetic energy at synchronous speed}}{\text{generator voltampere rating}}$$
$$= \frac{\frac{1}{2} J \omega_{msyn}^2}{S_{rated}} \quad \text{joules/VA or per unit-seconds}$$

$$2H \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}^2} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = p_{mp.u.}(t) - p_{ep.u.}(t) = p_{ap.u.}(t)$$

$$\omega_{p.u.}(t) = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}}$$

$$\frac{2H}{\omega_{msyn}} \omega_{p.u.}(t) \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = p_{mp.u.}(t) - p_{ep.u.}(t) = p_{ap.u.}(t)$$

Ecuación Oscilatoria

- Para un generador síncrono con P polos, la aceleración angular eléctrica, la velocidad angular y el ángulo de la potencia son:

$$\alpha(t) = \frac{P}{2} \alpha_m(t)$$

$$\omega(t) = \frac{P}{2} \omega_m(t)$$

$$\delta(t) = \frac{P}{2} \delta_m(t) \quad \omega_{\text{syn}} = \frac{P}{2} \omega_{m\text{syn}}$$

- La frecuencia (velocidad) en pu es:

$$\omega_{\text{p.u.}}(t) = \frac{\omega(t)}{\omega_{\text{syn}}} = \frac{\frac{2}{P} \omega(t)}{\frac{2}{P} \omega_{\text{syn}}} = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{m\text{syn}}}$$

$$\frac{2H}{\omega_{\text{syn}}} \omega_{\text{p.u.}}(t) \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} = p_{m\text{p.u.}}(t) - p_{e\text{p.u.}}(t) = p_{a\text{p.u.}}(t)$$

Ecuación Oscilatoria

- En algunos casos se agrega el factor de amortiguamiento del torque D , cuyo valor es proporcional a la variación de velocidad. D es ya sea igual a cero o a un valor pequeño entre 0-2:

$$\begin{aligned} 2H/\omega_{\text{syn}} \omega_{\text{p.u.}}(t) (d^2\delta(t)/(dt^2)) \\ = p_{m\text{p.u.}}(t) - p_{e\text{p.u.}}(t) - D/\omega_{\text{syn}} (d\delta(t)/(dt)) \\ = p_{a\text{p.u.}}(t) \end{aligned}$$

- La ecuación anterior es conocida como la ecuación oscilatoria del generador síncrono y define la dinámica del rotor en estudios de estabilidad transitoria
- Esta ecuación es no lineal pues $p_{e\text{p.u.}}$ es una función no lineal de δ y $\omega_{\text{p.u.}}(t)$, pero como la variación de $\omega_{\text{p.u.}}(t)$ es pequeña se puede asumir igual a 1.0

Ecuación Oscilatoria

- La ecuación oscilatoria es una ecuación diferencial de segundo orden, pero se puede escribir como dos ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_{\text{syn}} \quad \theta_m(t) = \omega_{\text{msyn}}t + \delta_m(t)$$

$$\frac{2H}{\omega_{\text{syn}}} \omega_{\text{p.u.}}(t) \frac{d\omega(t)}{dt} = p_{\text{mp.u.}}(t) - p_{\text{ep.u.}}(t) - D/\omega_{\text{syn}} \frac{d\delta(t)}{dt} = p_{\text{ap.u.}}(t)$$

Ecuación Oscilatoria

- Ejemplo 1: Un generador hidráulico 3ph 60Hz, 500MVA, 15kV y 32 polos, posee una constante de inercia $H=2$ pu-s y $D=0$.
 - a) Determine ω_{syn} y ω_{msyn}
 - b) Escriba la ecuación oscilatoria para el generador
- La unidad esta operando inicialmente con $p_{mp.u}=p_{ep.u}=1,0$ y $\delta=10^\circ$, cuando ocurre una falla 3ph a tierra en los terminales de generador haciendo $p_{ep.u}$ caer a cero ($t \geq 0$).
 - c) Determine el ángulo de la potencia a los 3 ciclos de inicio de la falla. Asumir $p_{mp.u}$ permanece constante a 1.0pu, también asumir $\omega_{p.u}=1.0$ en la ecuación oscilatoria.

Ecuación Oscilatoria

- Generador hidráulico 3ph 60Hz, 500MVA, 15kV y 32 polos, posee una constante de inercia $H=2$ pu-s y $D=0$.
 - a) Determine ω_{syn} y ω_{msyn}

$$\omega_{\text{syn}} = 2\pi 60 = 377 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{\text{msyn}} = \frac{2}{P} \omega_{\text{syn}} = \left(\frac{2}{32} \right) 377 = 23.56 \text{ rad/s}$$

- b) Escriba la ecuación oscilatoria para el generador

$$\frac{4}{2\pi 60} \omega_{\text{p.u.}}(t) \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} = p_{m\text{p.u.}}(t) - p_{e\text{p.u.}}(t)$$

Ecuación Oscilatoria

- La unidad esta operando inicialmente con $p_{mp.u} = p_{ep.u} = 1.0$ y $\delta = 10^\circ$, cuando ocurre una falla 3ph a tierra en los terminales de generador haciendo $p_{ep.u}$ caer a cero ($t \geq 0$).
 - c) Determine el ángulo de la potencia a los 3 ciclos de inicio de la falla. Asumir $p_{mp.u}$ permanece constante a 1.0pu, también asumir $\omega_{p.u} = 1.0$ en la ecuación oscilatoria.

$$\delta(0) = 10^\circ = 0.1745 \text{ radian}$$

$$\frac{d\delta(0)}{dt} = 0$$

Al momento de la falla $p_{ep.u} = 0$ y $p_{mp.u} = 1$ y $\omega_{p.u} = 1.0$:

$$\left(\frac{4}{2\pi 60} \right) \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = 1.0 \quad t \geq 0$$

Ecuación Oscilatoria

- c) Integrando dos veces y usando las condiciones iniciales:

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \left(\frac{2\pi 60}{4}\right)t + 0$$

$$\delta(t) = \left(\frac{2\pi 60}{8}\right)t^2 + 0.1745$$

- Reemplazando a los 3 ciclos (0.05sec.):

$$t = 3 \text{ cycles} = \frac{3 \text{ cycles}}{60 \text{ cycles/second}} = 0.05 \text{ second}$$

$$\begin{aligned}\delta(0.05) &= \left(\frac{2\pi 60}{8}\right)(0.05)^2 + 0.1745 \\ &= 0.2923 \text{ radian} = 16.75^\circ\end{aligned}$$

Ecuación Oscilatoria

- Ejemplo 2: Una planta tiene dos generadores 3ph a 60Hz con las siguientes potencias nominales:
 - Planta 1: 500MVA, 15kV, FP 0.85, 32 polos, $H_1=2.0\text{pu-s}$, $D_1=0$
 - Planta 2: 300MVA, 15kV, FP 0.90, 16 polos, $H_2=2.5\text{pu-s}$, $D_2=0$
- a) Escriba la ecuación oscilatoria para cada unidad en base 100MVA
- b) Si las dos unidades oscilan juntas, eso es, $\delta_1(t) = \delta_2(t)$, combine las dos ecuaciones oscilatoria en una sola.
- a) Se debe convertir a la nueva base a los dos lados de la ecuación

$$H_{\text{new}} = H_{\text{old}} \frac{S_{\text{old}}}{S_{\text{new}}} \quad \text{per unit}$$

$$H_{1\text{new}} = H_{1\text{old}} \frac{S_{\text{old}}}{S_{\text{new}}} = (2.0) \left(\frac{500}{100} \right) = 10 \quad \text{p.u.-s}$$

$$H_{2\text{new}} = (2.5) \left(\frac{300}{100} \right) = 7.5 \quad \text{p.u.-s}$$

Ecuación Oscilatoria

- Ejemplo 2: cont.
- a) Las ecuaciones oscilatorias en la base del sistema (100MVA) son:

$$\begin{aligned}\frac{2H_{1\text{new}}}{\omega_{\text{syn}}} \omega_{1\text{p.u.}}(t) \frac{d^2\delta_1(t)}{dt^2} &= \frac{20.0}{2\pi 60} \omega_{1\text{p.u.}}(t) \frac{d^2\delta_1(t)}{dt^2} \\ &= p_{m1\text{p.u.}}(t) - p_{e1\text{p.u.}}(t) \\ \frac{2H_{2\text{new}}}{\omega_{\text{syn}}} \omega_{2\text{p.u.}}(t) \frac{d^2\delta_2(t)}{dt^2} &= \frac{15.0}{2\pi 60} \omega_{2\text{p.u.}}(t) \frac{d^2\delta_2(t)}{dt^2} = p_{m2\text{p.u.}}(t) - p_{e2\text{p.u.}}(t)\end{aligned}$$

- b) Como los dos generadores oscilan juntos se tiene:

$$\begin{aligned}\delta(t) &= \delta_1(t) = \delta_2(t) \\ \omega_{\text{p.u.}}(t) &= \omega_{1\text{p.u.}}(t) = \omega_{2\text{p.u.}}(t) \\ p_{m\text{p.u.}}(t) &= p_{m1\text{p.u.}}(t) + p_{m2\text{p.u.}}(t) \\ p_{e\text{p.u.}}(t) &= p_{e1\text{p.u.}}(t) + p_{e2\text{p.u.}}(t)\end{aligned}$$

Ecuación Oscilatoria

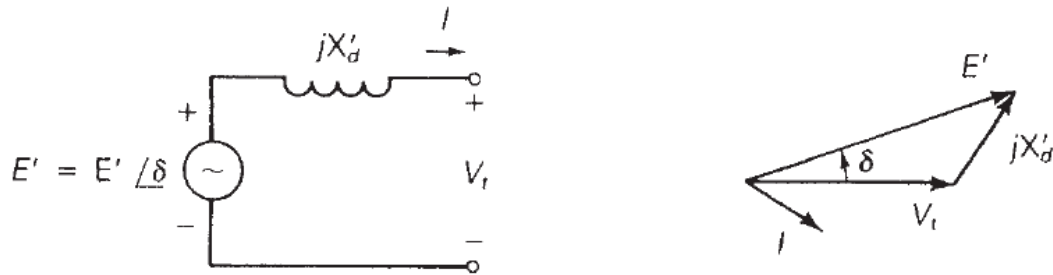
- Ejemplo 2: cont.
- b) Sumando las dos ecuaciones de la parte a) se tiene:

$$\frac{2(H_{1\text{new}} + H_{2\text{new}})}{\omega_{\text{syn}}} \omega_{\text{p.u.}}(t) \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = \frac{35.0}{2\pi 60} \omega_{\text{p.u.}}(t) \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = p_{mp.u.}(t) - p_{ep.u.}(t)$$

- En estudios de estabilidad transitoria a gran escala con muchos generadores, es posible reducir el tiempo computacional combinando maquinas que oscilan juntan.
- Estas maquinas son denominadas maquinas coherentes y generalmente están conectados al mismo bus o eléctricamente cerca
- Por lo general, esto es válido cuando las centrales están lejanas a los nodos de las perturbaciones en estudio

Modelo Simplificado del Generador

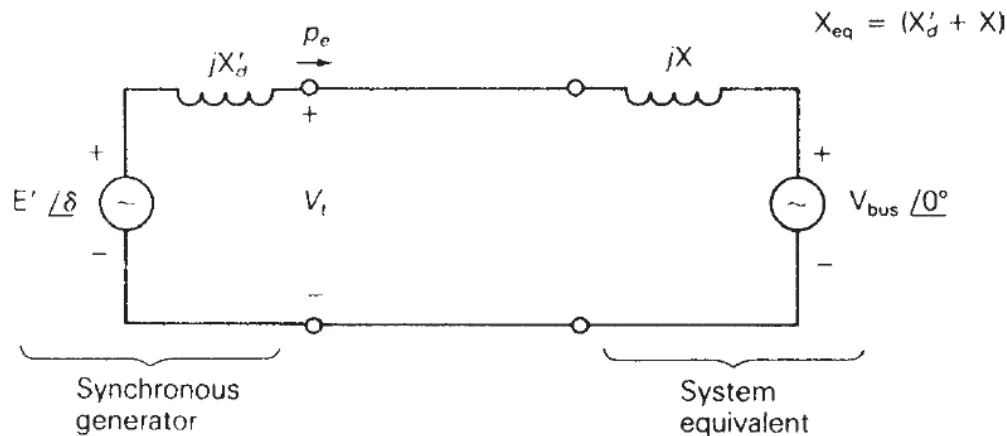
- La siguiente figura muestra el modelo simplificado del generador (modelo clásico):



- Este modelo incluye una fuente de tensión interna E' y una reactancia transitoria X'_d en serie, y se basa en los siguientes supuestos:
 - ☐ Generador operando en condiciones balanceadas (secuencia positiva)
 - ☐ La excitación del generador es constante (tensión E' es cte.)
 - ☐ Las pérdidas del generador, saturación, prominencia del rotor son despreciadas
- Estos supuestos y modelo simplifican el estudio de estabilidad transitoria en sistemas grandes manteniendo una precisión adecuada

Modelo Simplificado del Generador

- Supongamos que un generador es conectado a una fuente infinita modelado como un equivalente Thevenin cuya fuente ideal V_{bus} mantiene un voltaje, fase y frecuencia constante, y reactancia X :

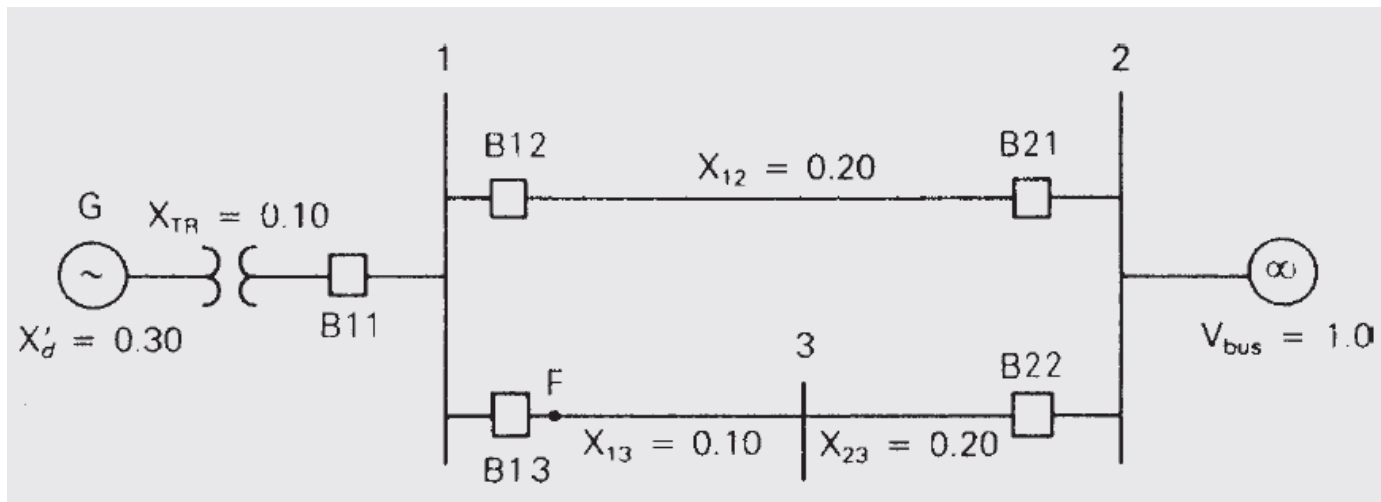


- El ángulo de la fuente δ es el ángulo del rotor respecto al bus infinito
- Si la reactancia total es $X_{eq} = X'_d + X$, la potencia activa entregada por el generador es:

$$p_e = \frac{E' V_{bus}}{X_{eq}} \sin \delta$$

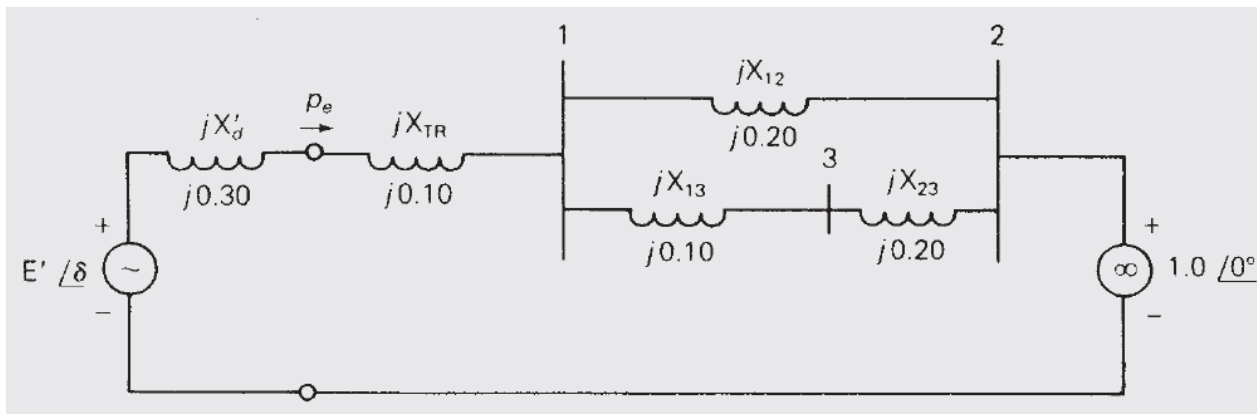
Modelo Simplificado del Generador

- Ejemplo 3: La siguiente figura muestra un generador 3ph 60Hz conectado a través de un transformador y línea a un bus infinito (valores de reactancia en pu). Si el bus infinito recibe 1.0pu potencia activa a FP 0.95 inductivo, Determine:
 - a) El voltaje interno E' del generador
 - b) La potencia eléctrica entregada por el generador en función de ángulo δ



Modelo Simplificado del Generador

- Ejemplo 3:
- a) El voltaje interno E' del generador



$$\begin{aligned}
 X_{eq} &= X'_d + X_{TR} + X_{12} \parallel (X_{13} + X_{23}) \\
 &= 0.30 + 0.10 + 0.20 \parallel (0.10 + 0.20) \\
 &= 0.520 \text{ per unit}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{P}{V_{bus}(p.f.)} \angle -\cos^{-1}(p.f.) = \frac{(1.0)}{(1.0)(0.95)} \angle -\cos^{-1} 0.95 \\
 &= 1.05263 \angle -18.195^\circ \text{ per unit}
 \end{aligned}$$

Modelo Simplificado del Generador

- Ejemplo 3:
- a) El voltaje interno E' del generador

$$\begin{aligned} E' &= E' / \delta = V_{\text{bus}} + jX_{\text{eq}} I \\ &= 1.0 / 0^\circ + (j0.520)(1.05263 / -18.195^\circ) \\ &= 1.0 / 0^\circ + 0.54737 / 71.805^\circ \\ &= 1.1709 + j0.5200 \\ &= 1.2812 / 23.946^\circ \quad \text{per unit} \end{aligned}$$

- b) La potencia eléctrica entregada por el generador en función de ángulo δ

$$p_e = \frac{(1.2812)(1.0)}{0.520} \sin \delta = 2.4638 \sin \delta \quad \text{per unit}$$

- Reemplazando $\delta = 23.946^\circ \rightarrow p_e = 1.0 \text{ pu}$

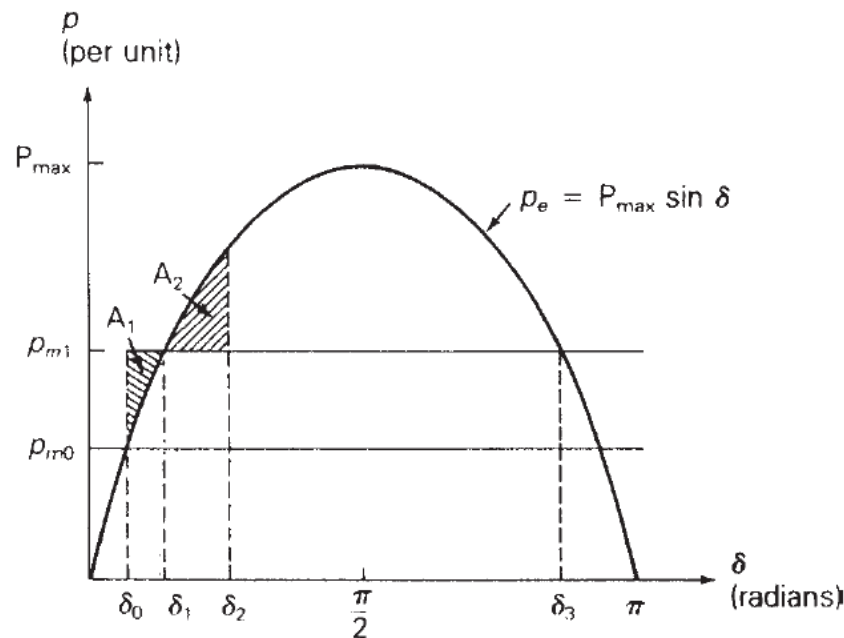


Contenido

- Estabilidad Transitoria
- **Criterio de Áreas Iguales**
- Estabilidad Transitoria Sistemas Multimáquinas
- Estabilidad Transitoria en DigSilent

Criterio de Áreas Iguales

- Considerar un generador síncrono conectado a un bus infinito a través de una reactancia
- La grafica de la potencia eléctrica (p_e) y mecánica (p_m) en función del ángulo δ es una función sinusoidal:



- Inicialmente el generador opera en el estado estacionario $p_e = p_m = p_{m0}$ y $\delta = \delta_0$

Criterio de Áreas Iguales

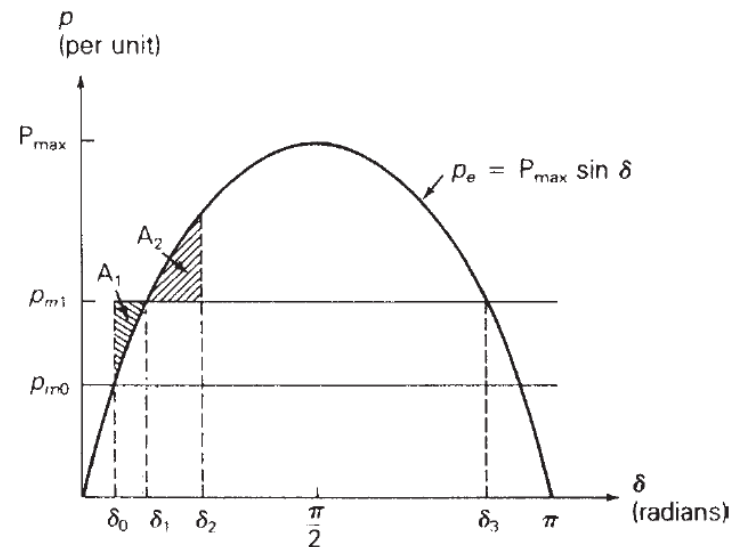
- Si en $t=0$ ocurre un cambio en la potencia de p_{m0} a p_{m1} , debido a la inercia del generador, la posición del rotor no puede cambiar instantáneamente, por lo tanto:

$$\delta_m(0^+) = \delta_m(0^-)$$

$$\delta(0^+) = \delta(0^-) = \delta_0$$

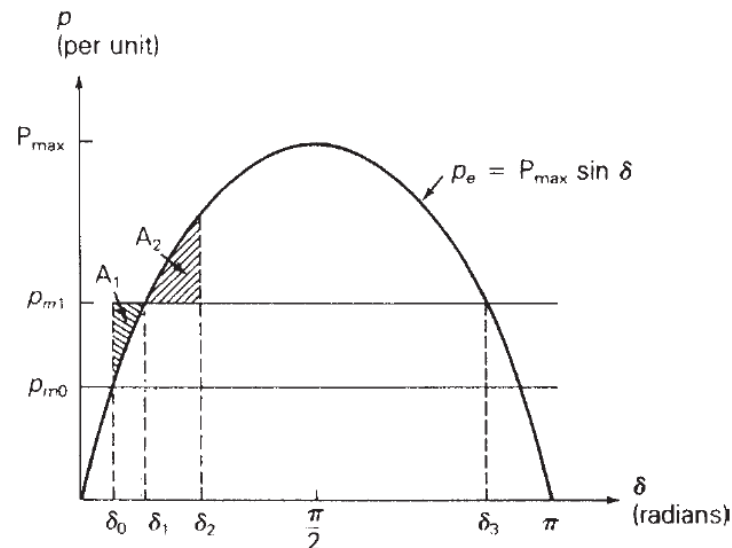
$$p_e(0^+) = p_e(0^-)$$

- Dado que $p_m(0^+) = p_{m1} > p_e(0^+)$
- $p_a(0^+)$ y $(d^2\delta)/(dt^2)(0^+)$ son positivos
- Por lo tanto, el rotor acelera y el ángulo δ aumenta. Cuando $\delta = \delta_1$, $p_e = p_{m1}$
- y $(d^2\delta)/(dt^2) = 0$



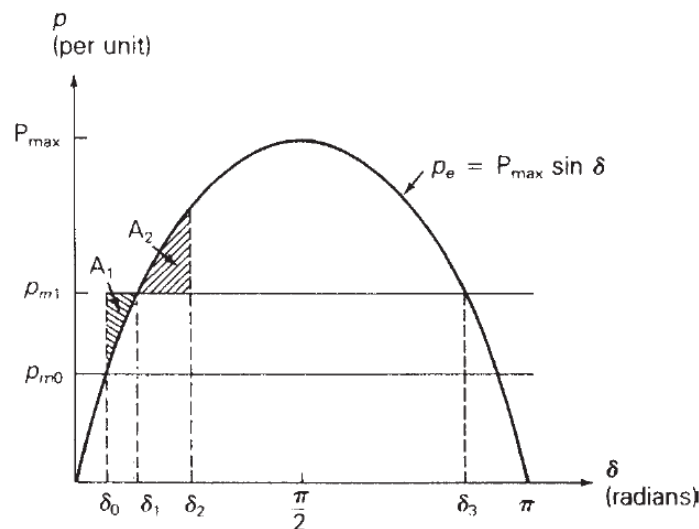
Criterio de Áreas Iguales

- Sin embargo, como $d\delta/dt$ aun es positivo y δ continua aumentando superando su nuevo valor de estado estacionario
- Cuando δ es mayor que δ_1 , p_m es menor que p_e y p_a es negativo, por lo que el rotor desacelera hasta alcanzar el valor máximo δ_2 y luego vuelve a δ_1
- Si no existiere amortiguamiento δ continuaría oscilando alrededor de δ_1 , sin embargo, el amortiguamiento D y las perdidas (roce) harán que el valor final se establezca en δ_1
- Si δ excediera δ_3 , el rotor volvería a acelerar causando la perdida de estabilidad



Criterio de Áreas Iguales

- Una forma de determinar la estabilidad y el ángulo máximo es resolviendo las ecuaciones diferenciales a través de integración numérica
- Sin embargo, existe un método de cálculo directo de estabilidad para un generador conectado a un bus infinito o dos generadores, denominado el **“método o criterio de áreas iguales (CAI)”**
- Cuando $p_m > p_e$ se genera el área de aceleración A_1 , cuando $p_e > p_m$ se genera el área de desaceleración A_2
- En ambos valores δ_0 y δ_2 se tiene que $d\delta/dt=0$
- El criterio establece que un sistema es estable cuando $A_1 = A_2$



Criterio de Áreas Iguales

- Para derivar el criterio, consideremos la ecuación oscilatoria para un generador conectado a un bus infinito con $\omega_{p.u.} = 1.0$

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = p_{mp.u.} - p_{ep.u.}$$

- Multiplicando por $d\delta/dt$ y usando:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = 2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right) \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right)$$

- Se tiene:

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right) \left(\frac{d\delta}{dt} \right) = \frac{H}{\omega_{syn}} \frac{d}{dt} \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = (p_{mp.u.} - p_{ep.u.}) \frac{d\delta}{dt}$$

Criterio de Áreas Iguales

- Multiplicando por dt e integrando entre δ_0 y δ_2 :

$$\frac{H}{\omega_{\text{syn}}} \int_{\delta_0}^{\delta} d \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} (p_{\text{mp.u.}} - p_{\text{ep.u.}}) d\delta$$

$$\frac{H}{\omega_{\text{syn}}} \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 \Big|_{\delta_0}^{\delta} = \int_{\delta_0}^{\delta} (p_{\text{mp.u.}} - p_{\text{ep.u.}}) d\delta$$

- Como $d\delta/dt=0$ en δ_0 y δ_2 , se tiene:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} (p_{\text{mp.u.}} - p_{\text{ep.u.}}) d\delta = 0$$

Criterio de Áreas Iguales

- Separando en las integrales de aceleración y desaceleración, se tiene:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{mp.u.} - p_{ep.u.}) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_{mp.u.} - p_{ep.u.}) d\delta = 0$$

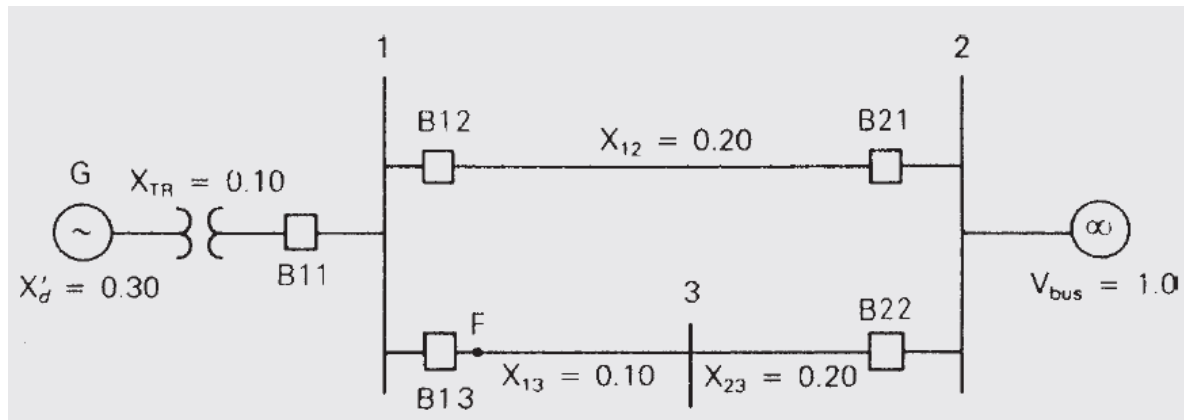
- O lo que es lo mismo

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} \underbrace{(p_{mp.u.} - p_{ep.u.}) d\delta}_{A_1} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} \underbrace{(p_{ep.u.} - p_{mp.u.}) d\delta}_{A_2}$$

- Cambios repentinos de la potencia mecánica generalmente no ocurren ya que las constantes de tiempo de turbinas y reguladores de velocidad son del orden de los segundos
- Por lo que cambios repentino como los descritos aquí ocurren con cambios en la potencia eléctrica como fallas o pérdida de generadores o cargas

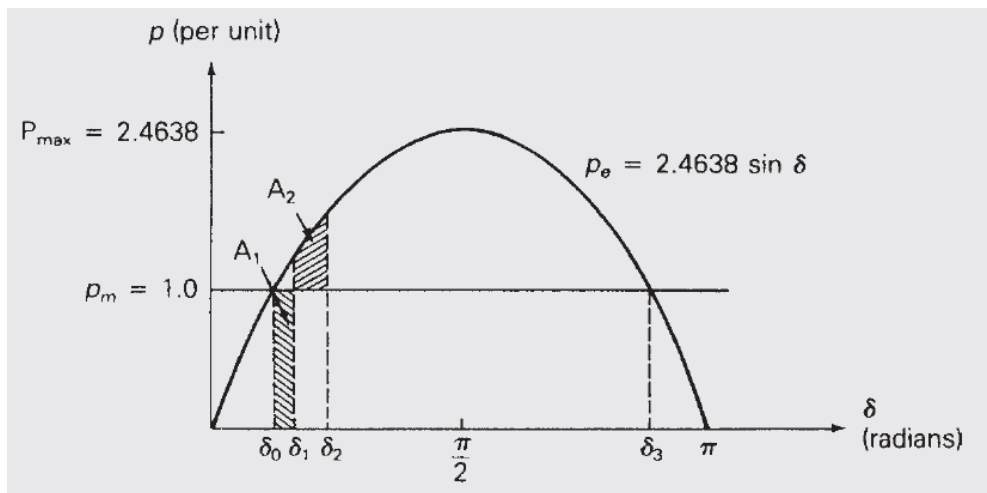
Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 4: Para el generador del ejemplo 3 y las mismas condiciones iniciales, una falla 3ph a tierra ocurre en el punto F. La falla se extingue 3 ciclos luego de inicio de la misma. Los interruptores siguen cerrado debido a una falla de los mismos.
- Determine si la estabilidad es mantenida y el ángulo máximo del rotor. Asumir $H = 3 \text{ pu-s}$, p_m constante y $\omega_{p.u} = 1.0$



Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 4: cont.
- La curva de potencia se muestra en la siguiente figura donde
- $\delta_0 = 23.95^\circ = 0.4179 \text{ rad.}$ y $p_m = 1.0$



- Durante la falla $p_e = 0$ para una falla 3ph en Bus 1, así:

$$\frac{2H}{\omega_{\text{syn}}} \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = p_{m \text{ p.u.}} \quad 0 \leq t \leq 0.05 \text{ s}$$

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 4: cont.
- Integrando dos veces y usando las condiciones iniciales, se tiene:

$$\delta(0) = \delta_0 \quad \frac{d\delta(0)}{dt} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{d\delta(t)}{dt} &= \frac{\omega_{\text{syn}} p_{\text{mp.u.}}}{2H} t + 0 \\ \delta(t) &= \frac{\omega_{\text{syn}} p_{\text{mp.u.}}}{4H} t^2 + \delta_0 \end{aligned}$$

- A los 3 ciclos = 0.05sec:

$$\begin{aligned} \delta_1 = \delta(0.05 \text{ s}) &= \frac{2\pi 60}{12} (0.05)^2 + 0.4179 \\ &= 0.4964 \text{ radian} = 28.44^\circ \end{aligned}$$

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 4: Cont.
- El área de aceleración A_1 es:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} p_m d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_1} 1.0 d\delta = (\delta_1 - \delta_0) = 0.4964 - 0.4179 = 0.0785$$

- Al despejar la falla en $t=0.05s$, p_e y δ aumentan hasta que el área de desaceleración A_2 iguala a A_1 :

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_{\max} \sin \delta - p_m) d\delta \\ &= \int_{0.4964}^{\delta_2} (2.4638 \sin \delta - 1.0) d\delta = A_1 = 0.0785 \end{aligned}$$

$$2.4638[\cos(0.4964) - \cos \delta_2] - (\delta_2 - 0.4964) = 0.0785$$

$$2.4638 \cos \delta_2 + \delta_2 = 2.5843$$

Criterio de Áreas Iguales

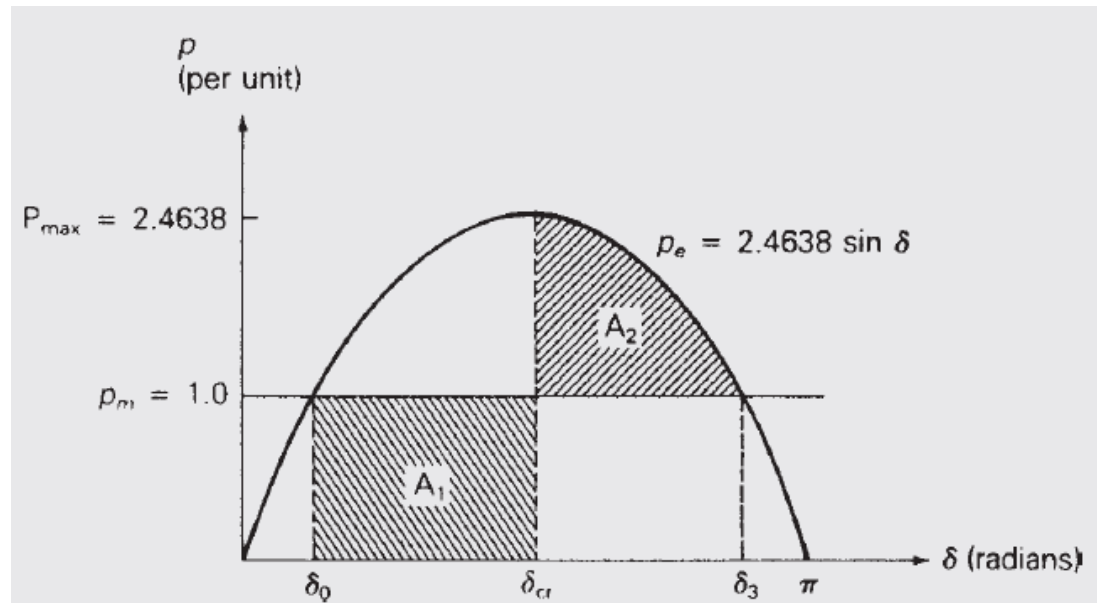
- Ejemplo 4: Cont.
- Resolviendo la ecuación mediante algún método iterativo, se tiene:

$$\delta_2 = 0.7003 \text{ radian} = 40.12^\circ$$

- El valor de δ_2 no excede $\delta_3=(180^\circ - \delta_0)=156.05^\circ$ por lo que la estabilidad es mantenida (sistema estable).
- Luego que la falla es despejada, tanto el ángulo δ como la potencia p_e vuelven a sus valores de régimen permanente iniciales $\delta_0=23.95^\circ$ y $p_e=1.0\text{pu}$
- Notar que si la duración de la falla aumenta, también aumenta el riesgo de pérdida de estabilidad
- El tiempo critico de despeje de falla (t_{cr}) se define como el máximo tiempo permitido antes que es sistema sea inestable

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 5: Asumiendo que la falla en el ejemplo anterior se prolonga por mas de 3 ciclos, determine el tiempo critico de despeje de falla:
- De acuerdo a la grafica, el tiempo crítico de despeje ocurre cuando $\delta = \delta_{cr}$ en donde $A_1 = A_2$



Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 5: Cont.
- Para obtener δ_{cr} resolvemos la ecuación $A_1 = A_2$:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} p_m d\delta = A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_3} (P_{\max} \sin \delta - p_m) d\delta$$
$$\int_{0.4179}^{\delta_{cr}} 1.0 d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{2.7236} (2.4638 \sin \delta - 1.0) d\delta$$

$$(\delta_{cr} - 0.4179) = 2.4638[\cos \delta_{cr} - \cos(2.7236)] - (2.7236 - \delta_{cr})$$

$$2.4638 \cos \delta_{cr} = +0.05402$$

$$\delta_{cr} = 1.5489 \text{ radians} = 88.74^\circ$$

$$\delta(t) = \frac{\omega_{\text{syn}} P_{mp.u.}}{4H} t^2 + \delta_0$$

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 5: Cont.
- Con δ_{cr} conocido, podemos obtener t_{cr} a partir de:

$$\delta(t) = \frac{\omega_{syn} P_{mp.u.}}{4H} t^2 + \delta_0$$

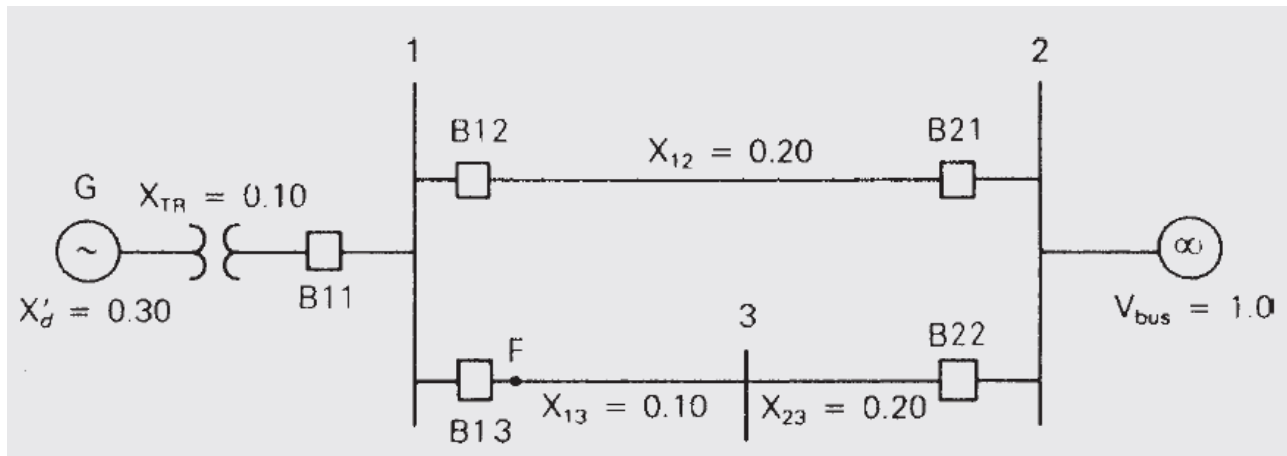
$$t = \sqrt{\frac{4H}{\omega_{syn} P_{mp.u.}} (\delta(t) - \delta_0)}$$

$$\begin{aligned} t_{cr} &= \sqrt{\frac{12}{(2\pi 60)(1.0)} (1.5489 - 0.4179)} \\ &= 0.1897 \text{ s} = 11.38 \text{ cycles} \end{aligned}$$

- Si $t < t_{cr}$ entonces la estabilidad se mantiene, en caso contrario, si la falla se prolonga por mas de 11.38 ciclos, el generador sale de sincronismo y se pierde la estabilidad

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: El mismo generador del ejemplo 4 opera en estado estacionario cuando ocurre una falla 3ph permanente en el bus 3. En este caso la falla hace **operar los interruptores B13 y B22 despejando la falla**. Para las mismas condiciones iniciales del ejemplo 4, determine el nuevo ángulo crítico de despeje δ_{cr} :

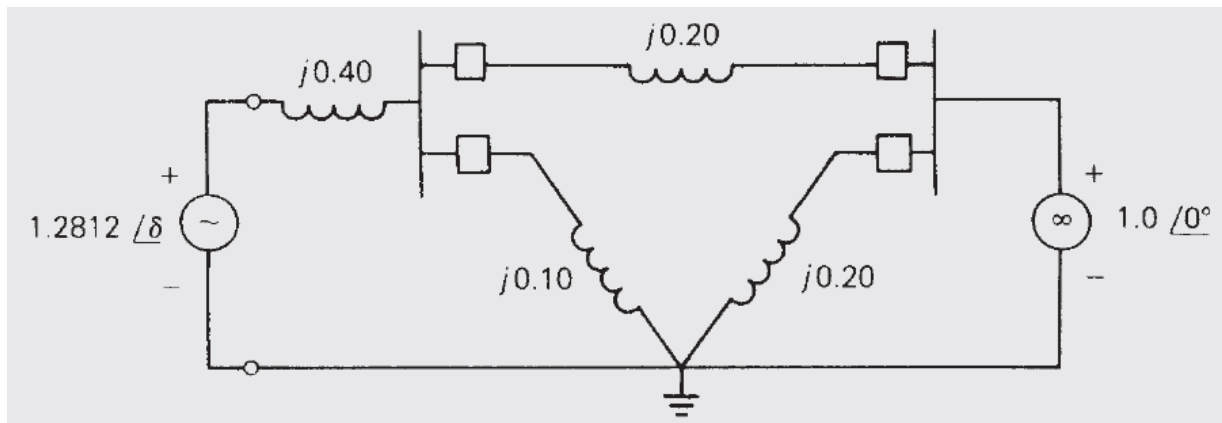


Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: Cont.
- En este caso es necesario determinar la ecuación de potencia para las tres condiciones: pre-falla (condición inicial), falla y post falla.
- El caso pre-falla (denominado p_{e1}) se determinó anteriormente y corresponde a la ecuación:

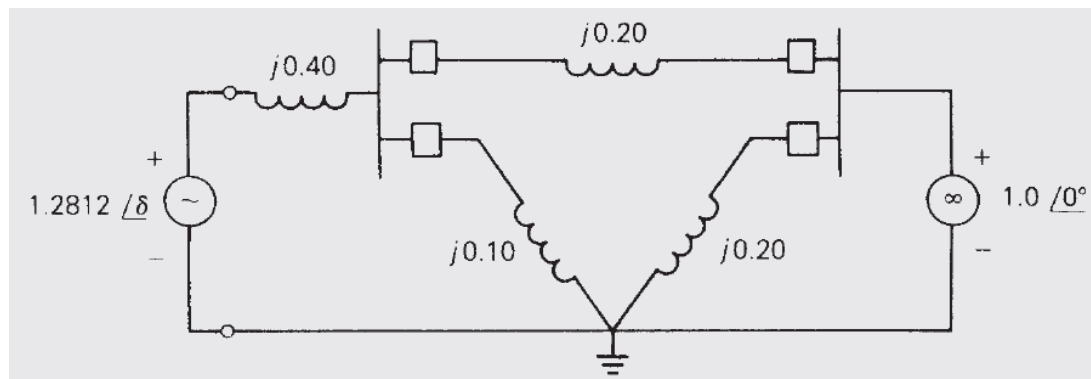
$$p_{e1} = 2.4638 \sin \delta$$

- Para el caso de falla se debe determinar el circuito equivalente de Thevenin:



Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: Cont.
- Para el caso de falla se debe determinar el **circuito equivalente de Thevenin visto de la fuente interna del generador en bus 1:**

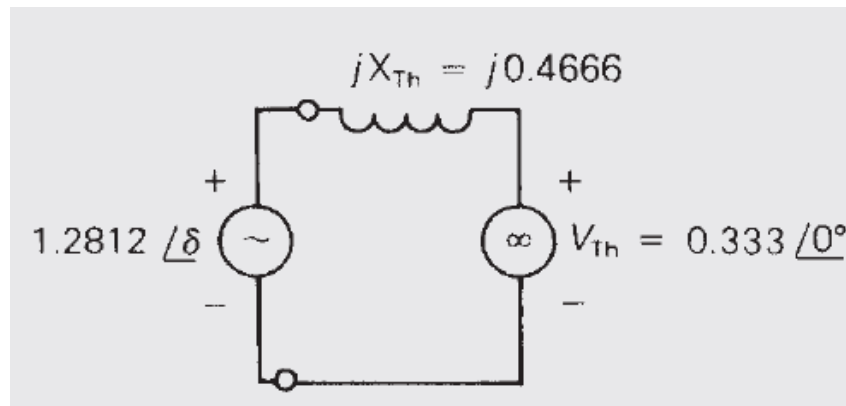


$$X_{Th} = 0.40 + 0.20 \parallel 0.10 = 0.46666 \text{ per unit}$$

$$\begin{aligned} V_{Th} &= 1.0 \angle 0^\circ \left[\frac{X_{13}}{X_{13} + X_{12}} \right] = 1.0 \angle 0^\circ \frac{0.10}{0.30} \\ &= 0.33333 \angle 0^\circ \text{ per unit} \end{aligned}$$

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: Cont.
- Para el caso de falla se debe determinar el circuito equivalente de Thevenin:

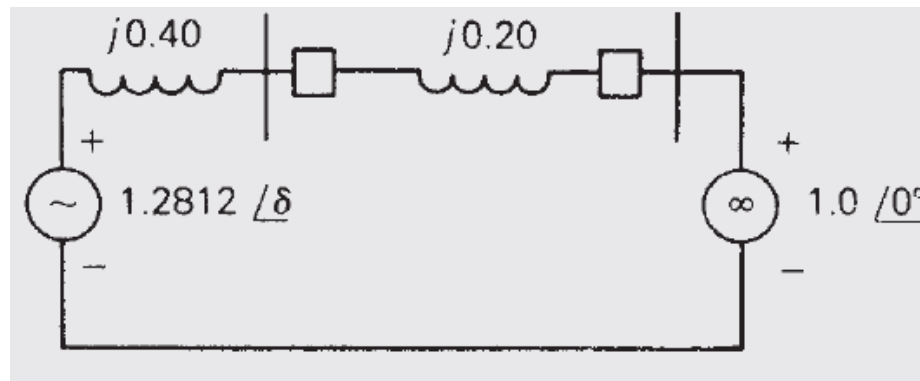


- Así, la ecuación de potencia durante la falla (p_{e2}) es:

$$p_{e2} = \frac{E'V_{Th}}{X_{Th}} \sin \delta = \frac{(1.2812)(0.3333)}{0.46666} \sin \delta = 0.9152 \sin \delta$$

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: Cont.
- Por último, determina el circuito equivalente de Thevenin para le caso post-falla cuando la línea se abre:

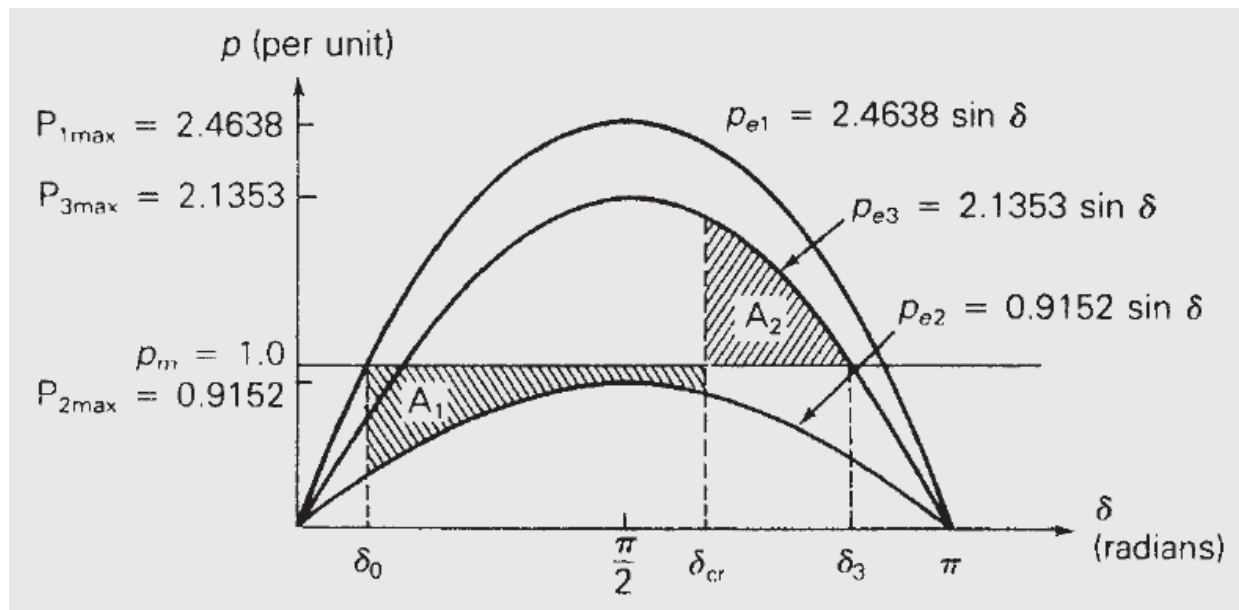


- Así, la ecuación de potencia post-falla (p_{e3}) es:

$$p_{e3} = \frac{(1.2812)(1.0)}{0.60} \sin \delta = 2.1353 \sin \delta$$

Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: Cont.
- Si graficamos las tres ecuaciones de potencia, se tiene:



Criterio de Áreas Iguales

- Ejemplo 6: Cont.
- Igualando las ecuaciones de las áreas A_1 y A_2 , se tiene:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (p_m - P_{2\max} \sin \delta) d\delta = A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_3} (P_{3\max} \sin \delta - p_m) d\delta$$
$$\int_{0.4179}^{\delta_{cr}} (1.0 - 0.9152 \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{2.6542} (2.1353 \sin \delta - 1.0) d\delta$$

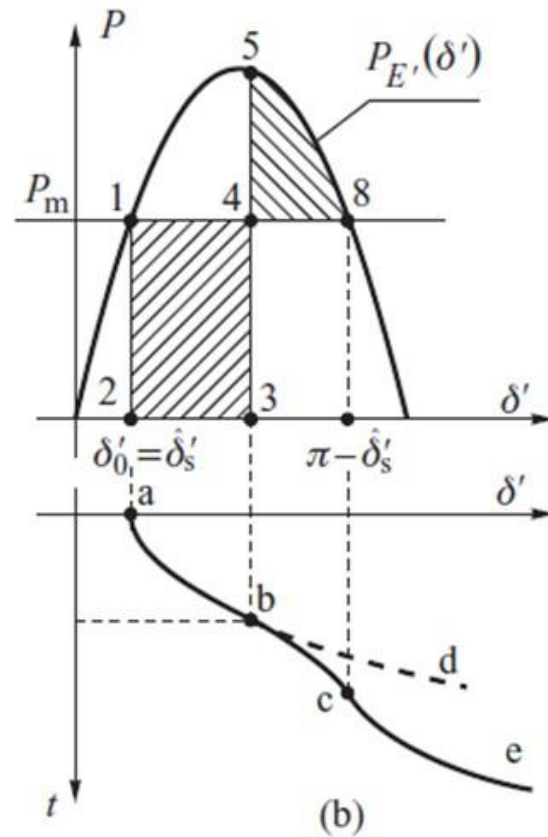
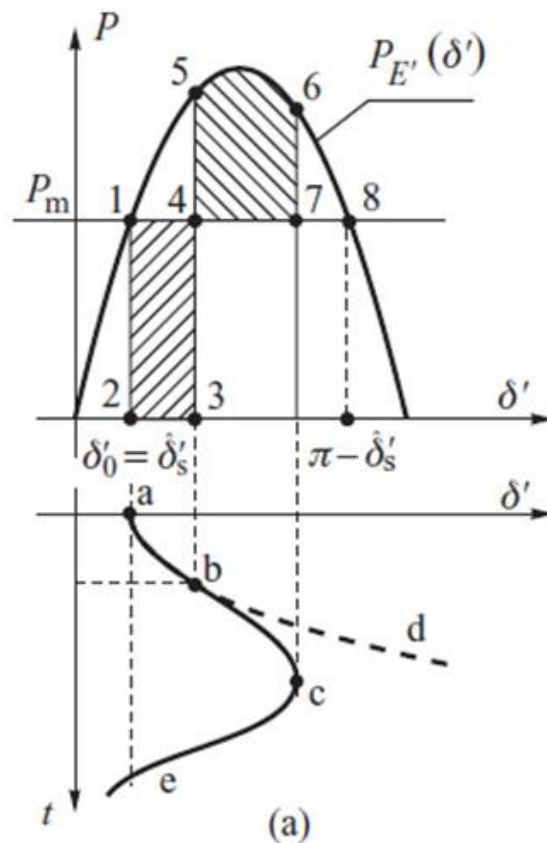
$$\begin{aligned} &(\delta_{cr} - 0.4179) + 0.9152(\cos \delta_{cr} - \cos 0.4179) \\ &= 2.1353(\cos \delta_{cr} - \cos 2.6542) - (2.6542 - \delta_{cr}) \\ &-1.2201 \cos \delta_{cr} = 0.4868 \\ &\delta_{cr} = 1.9812 \text{ radians} = 111.5^\circ \end{aligned}$$

- Si la falla se despeja antes de $\delta_{cr} = 111.5^\circ$, se mantiene la estabilidad

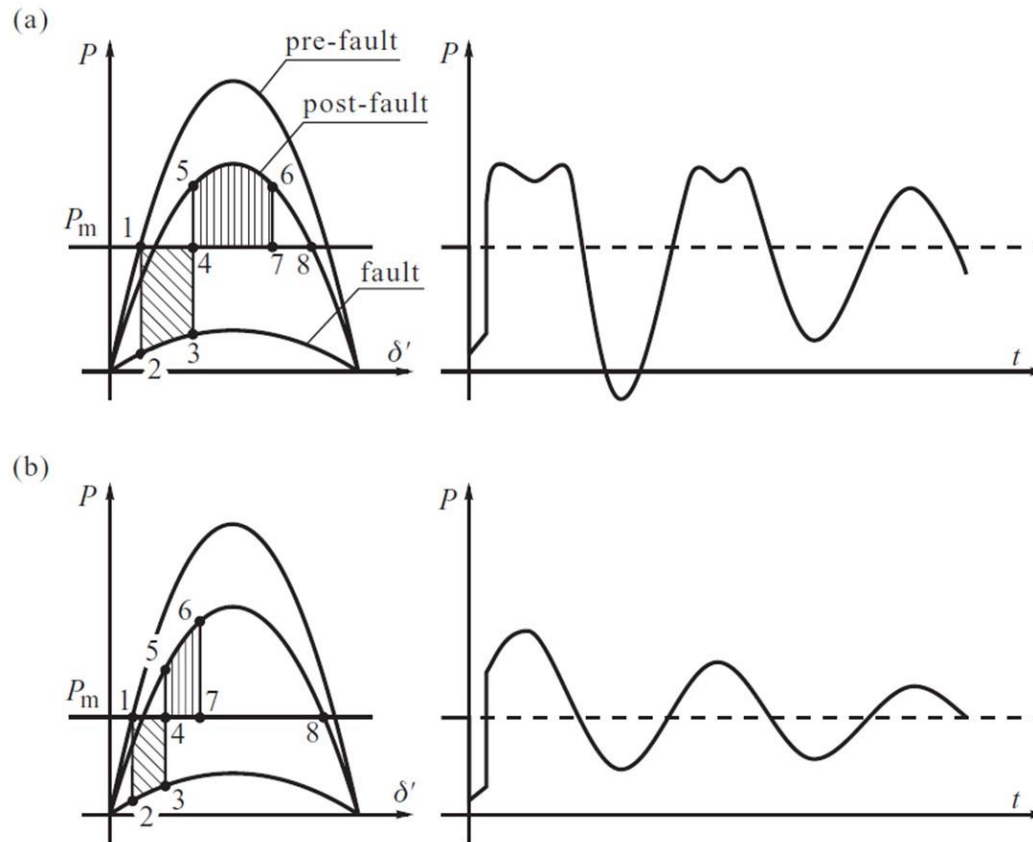
Estabilidad Angular (distintos TCA)

Flujo constante (modelo clásico optimista)

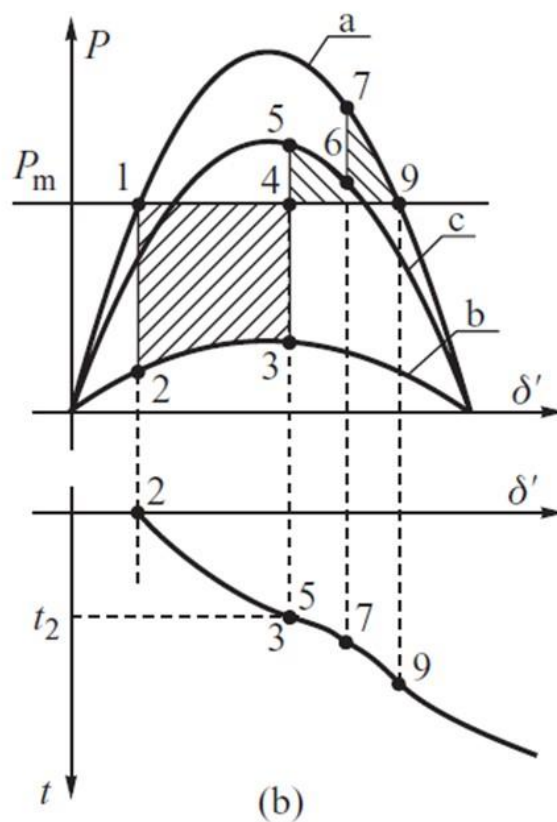
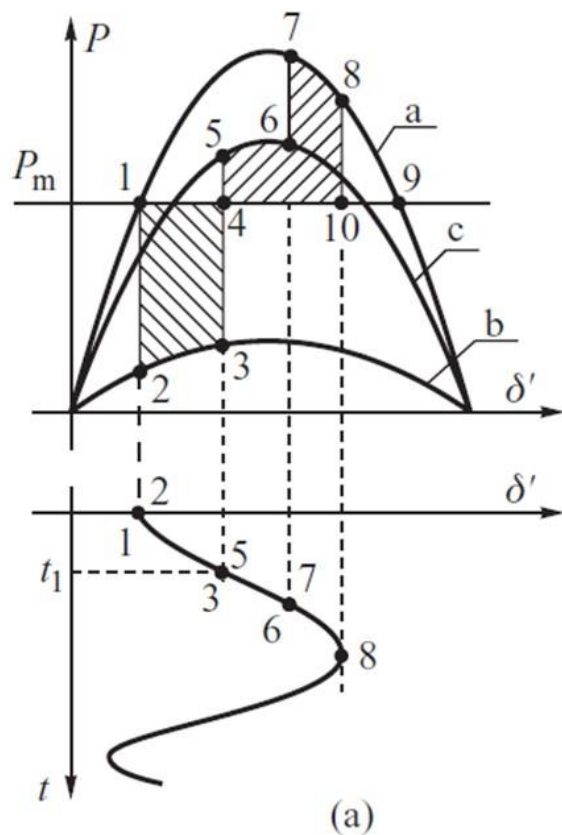
Flujo decae en caso real



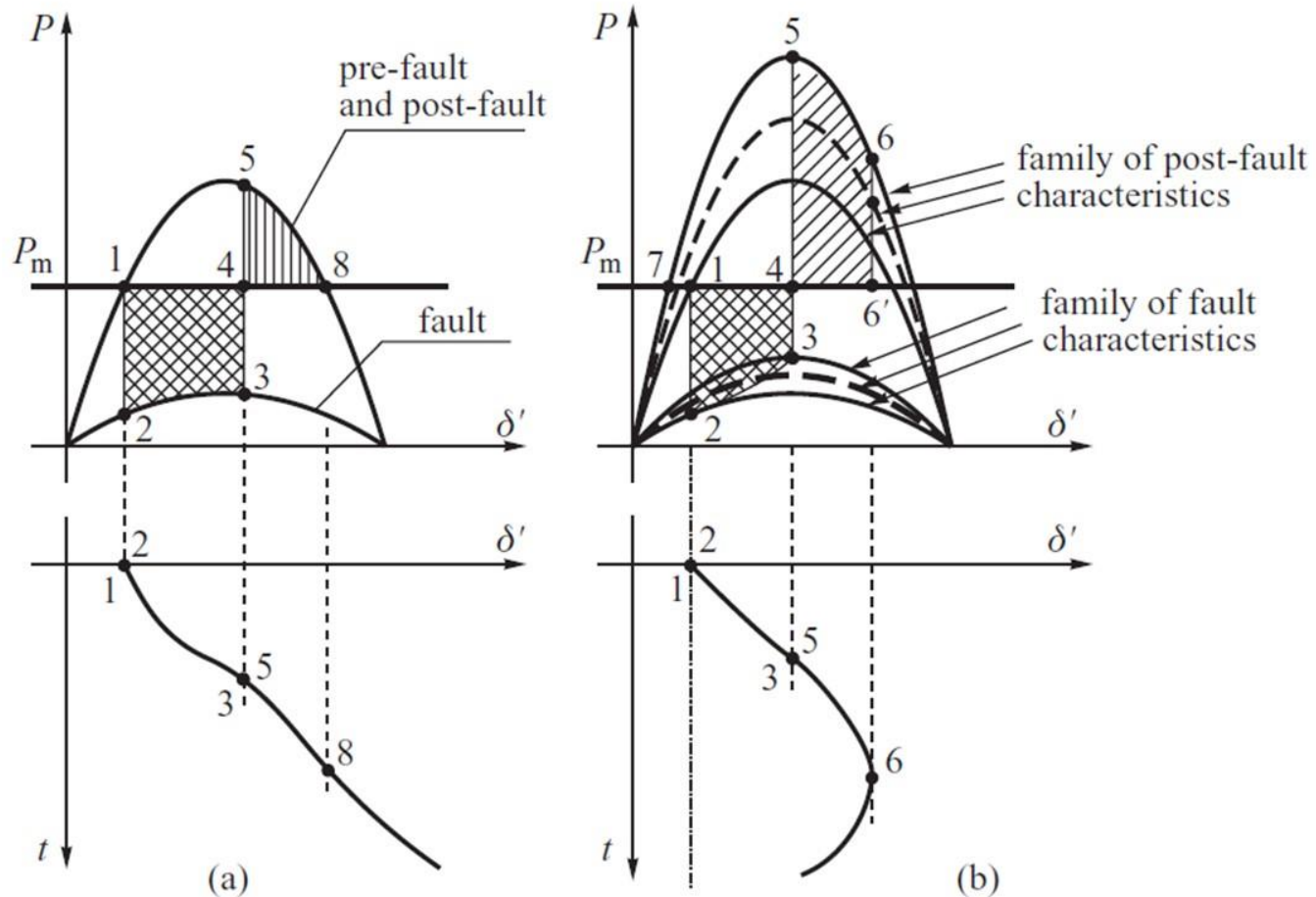
Estabilidad Angular (salida de línea sin reconexión)



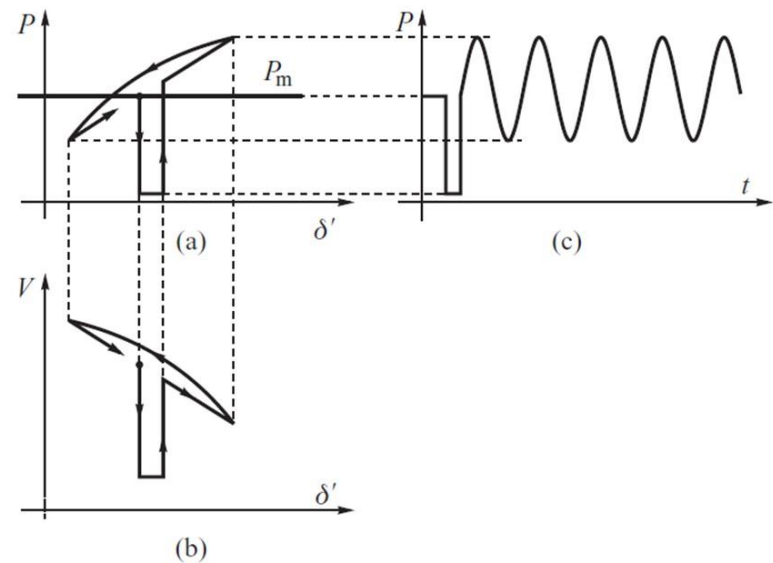
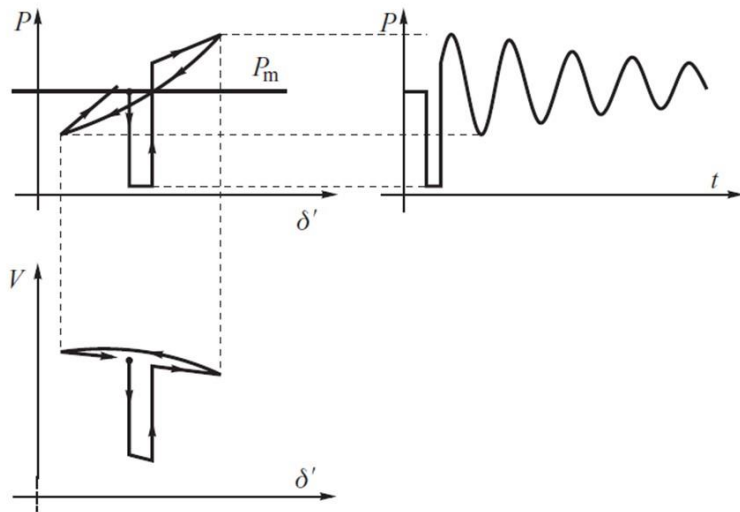
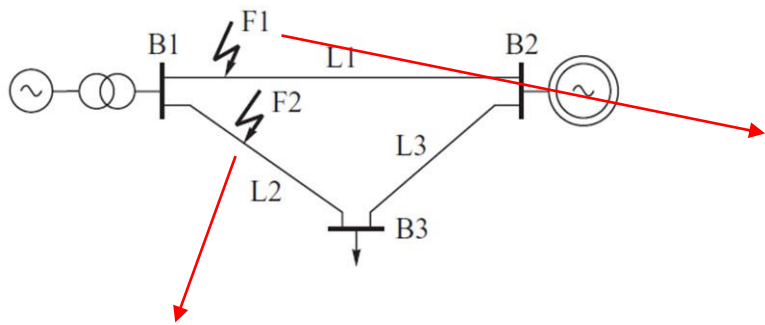
Estabilidad Angular – Con reconexión de línea



Estabilidad Angular - Efecto AVR



Estabilidad Angular - Efecto Impedancia de Líneas



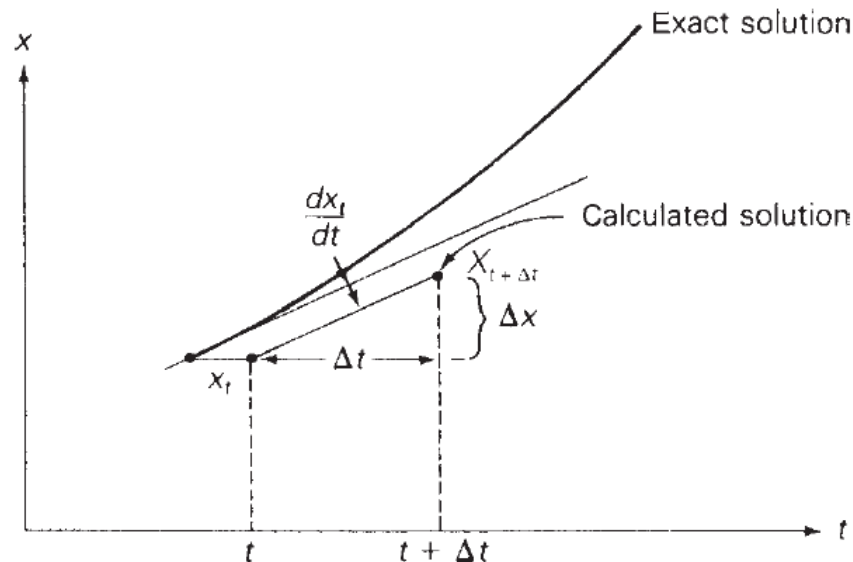
Integración Numérica de CAI

- Para una o dos maquinas se pueden utilizar el criterio de áreas iguales (CAI), pero para sistemas multi-maquinas se usa un método de solución con integración numérica

- Dada un ecuación diferencial de primer orden:

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

- Se puede utilizar el método de Euler ilustrado en esta gráfica:



Integración Numérica de CAI

- Dado un paso de integración Δt se calcula la pendiente al comienzo del intervalo de integración

$$\frac{dx_t}{dt} = f(x_t)$$

- El nuevo valor $x_{t+\Delta t}$ se calcula a partir del valor antiguo x_t agregando el incremento Δx :

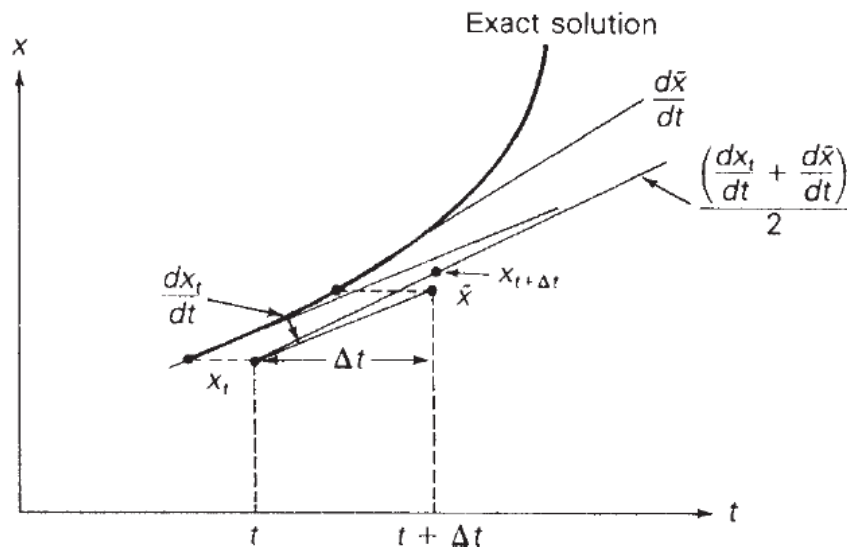
$$x_{t+\Delta t} = x_t + \Delta x = x_t + \left(\frac{dx_t}{dt} \right) \Delta t$$

- Como se muestra en la figura, el método Euler asume que la pendiente es constante en el intervalo Δt
- Una mejora a este método consiste en determinar la pendiente al comienzo y final del intervalo y luego tomar un promedio

Integración Numérica de CAI

- Primero se calcula la pendiente al comienzo del intervalo y se usa para calcular un valor preliminar $\tilde{x}$ dado por:

$$\tilde{x} = x_t + \left(\frac{dx_t}{dt} \right) \Delta t$$



- Luego, la nueva pendiente es calculada y luego el promedio de ambas:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = f(\tilde{x})$$
$$x_{t+\Delta t} = x_t + \frac{\left(\frac{dx_t}{dt} + \frac{d\tilde{x}}{dt} \right)}{2} \Delta t$$

Integración Numérica de CAI

- Aplicando el método de Euler para el calculo de la frecuencia ω y ángulo δ de un generador:

$$\frac{d\delta_t}{dt} = \omega_t - \omega_{\text{syn}}$$
$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{p_{\text{ap.u.}} \omega_{\text{syn}}}{2H\omega_{\text{p.u.}}}$$

- Se determina los valores preliminares de ω y δ :

$$\tilde{\delta} = \delta_t + \left(\frac{d\delta_t}{dt} \right) \Delta t$$
$$\tilde{\omega} = \omega_t + \left(\frac{d\omega_t}{dt} \right) \Delta t$$

- Luego de calcula la nueva pendiente :

$$\frac{d\tilde{\delta}}{dt} = \tilde{\omega} - \omega_{\text{syn}}$$
$$\frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \frac{\tilde{p}_{\text{ap.u.}} \omega_{\text{syn}}}{2H\tilde{\omega}_{\text{p.u.}}}$$

Integración Numérica de CAI

- Finalmente se calcula el promedio de las pendientes:

$$\delta_{t+\Delta t} = \delta_t + \frac{\left(\frac{d\delta_t}{dt} + \frac{d\tilde{\delta}}{dt}\right)}{2} \Delta t$$

$$\omega_{t+\Delta t} = \omega_t + \frac{\left(\frac{d\omega_t}{dt} + \frac{d\tilde{\omega}}{dt}\right)}{2} \Delta t$$

- El procedimiento comienza a $t=0$ con valores iniciales de ω_0 y δ_0 especificados y continua hasta un tiempo especificado $t=T$
- Este método se puede programar en Matlab

Integración Numérica de CAI

- Ejemplo 7: Verifique el resultado del tiempo crítico de despeje del ejemplo 6 usando integración numérica con el método Euler. Resuelva la ecuación oscilatoria para los siguientes casos:

Caso 1: Falla despejada a $\delta = 1.95 \text{ rad} = 112^\circ (< t_{cr})$

Caso 2: Falla despejada a $\delta = 2.09 \text{ rad} = 120^\circ (> t_{cr})$

Para los cálculos utilice un paso de integración $\Delta t = 0.01\text{s}$ y resuelva la ecuación de $t=0$ a $T=0.85\text{s}$

- Condiciones iniciales para $t=0$:

$$\delta_0 = 0.4179 \text{ rad}$$

$$\omega_0 = \omega_{syn} = 2\pi 60 \text{ rad/s}$$

- La ecuaciones de potencia son:

$$p_{ap.u.} = 1.0 - 0.9152 \sin \delta$$

$$p_{ap.u.} = 1.0 - 2.1353 \sin \delta$$

Integración Numérica de CAI

- Ejemplo 7: cont.
- Se resuelve mediante un algoritmo desarrollado en Matlab:

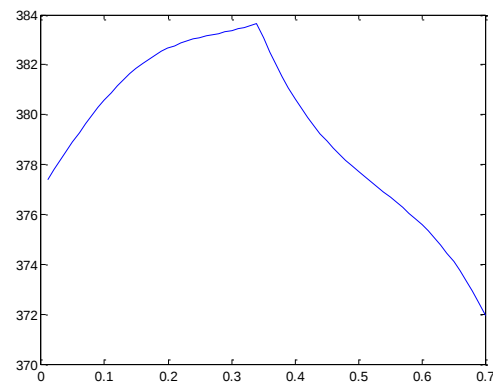
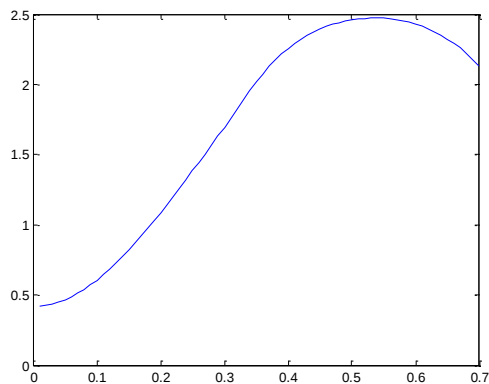
```

delta=0.01;
dltcrl=2.09 %1.95;
Pmax=0.9152;
T=0;
w=2*pi*60;
X1=0.4179; % angulo inicial d0
X2=w; % frecuencia inicial W0
for k=1:70
    if X1<dltcrl
        Pmax=0.9152;
    else
        Pmax=2.1353;
    end
    X3=X2-w;
    X4=1-Pmax*sin(X1);
    X5=X4*w*w/(6*X2);
    X6=X1+X3*delta;
    X7=X2+X5*delta;
    X8=X7-w;
    X9=1-Pmax*sin(X6);
    X10=X9*w*w/(6*X7);
    X1=X1+(X3+X8)*(delta/2);
    X2=X2+(X5+X10)*(delta/2);
    T=k*delta;
    t(k)=T;
    x1(k)=X1;
    x2(k)=X2;
end
t',x1',x2'
plot(t,x1)
    
```

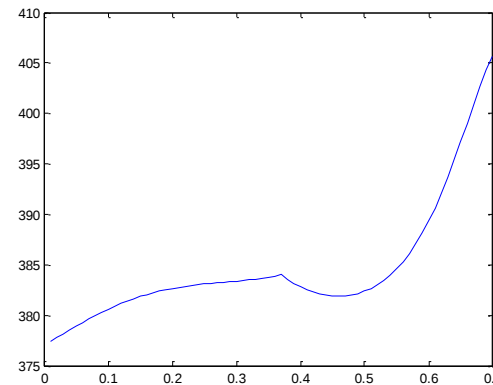
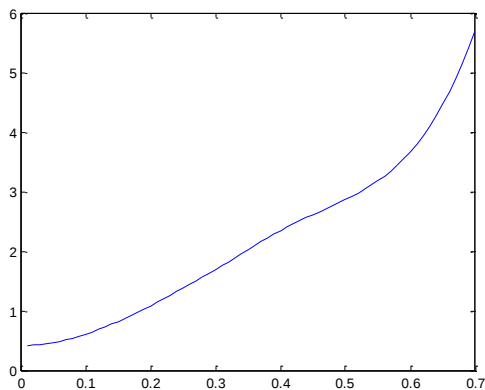
Case 1 Stable			Case 2 Unstable		
Time s	Delta rad	Omega rad/s	Time s	Delta rad	Omega rad/s
0.000	0.418	376.991	0.000	0.418	376.991
0.020	0.426	377.778	0.020	0.426	377.778
0.040	0.449	378.547	0.040	0.449	378.547
0.060	0.488	379.283	0.060	0.488	379.283
0.080	0.541	379.970	0.080	0.541	379.970
0.100	0.607	380.599	0.100	0.607	380.599
0.120	0.685	381.159	0.120	0.685	381.159
0.140	0.773	381.646	0.140	0.773	381.646
0.160	0.870	382.056	0.160	0.870	382.056
0.180	0.975	382.392	0.180	0.975	382.392
0.200	1.086	382.660	0.200	1.086	382.660
0.220	1.202	382.868	0.220	1.202	382.868
0.240	1.321	383.027	0.240	1.321	383.027
0.260	1.443	383.153	0.260	1.443	383.153
0.280	1.567	383.262	0.280	1.567	383.262
0.300	1.694	383.370	0.300	1.694	383.370
0.320	1.823	383.495	0.320	1.823	383.495
0.340	1.954	383.658	0.340	1.954	383.658
Fault Cleared			0.360	2.090	383.876
0.360	2.076	382.516	Fault Cleared		
0.380	2.176	381.510	0.380	2.217	382.915
0.400	2.257	380.638	0.400	2.327	382.138
0.420	2.322	379.886	0.420	2.424	381.546
0.440	2.373	379.237	0.440	2.511	381.135
0.460	2.413	378.674	0.460	2.591	380.902
0.480	2.441	378.176	0.480	2.668	380.844
0.500	2.460	377.726	0.500	2.746	380.969
0.520	2.471	377.307	0.520	2.828	381.288
0.540	2.473	376.900	0.540	2.919	381.824
0.560	2.467	376.488	0.560	3.022	382.609
0.580	2.453	376.056	0.580	3.145	383.686
0.600	2.429	375.583	0.600	3.292	385.111
0.620	2.396	375.053	0.620	3.472	386.949
0.640	2.351	374.446	0.640	3.693	389.265
0.660	2.294	373.740	0.660	3.965	392.099
0.680	2.221	372.917	0.680	4.300	395.426
0.700	2.130	371.960	0.700	4.704	399.079

Integración Numérica de CAI

- Ejemplo 7: cont.
- Caso 1: Estable



- Caso 2: Inestable



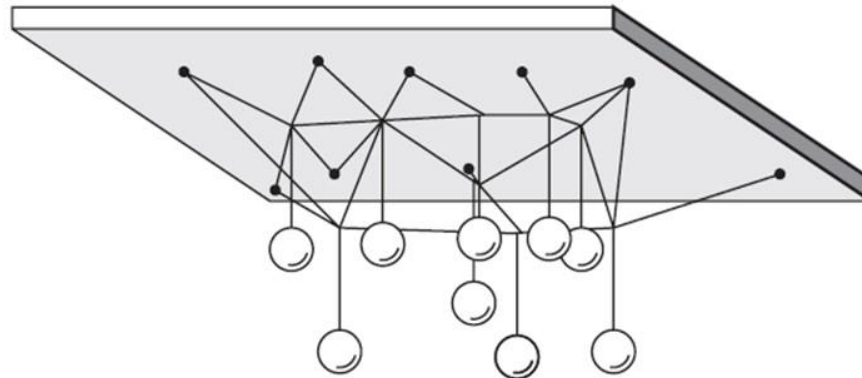


Contenido

- Estabilidad Transitoria
- Criterio de Áreas Iguales
- Estabilidad Transitoria Sistemas Multimáquinas
- Estabilidad Transitoria en DigSilent

Sistemas Multi-máquinas

- Simplificación de modelo de una maquina (bus infinito) solo útil en casos donde el resto del sistema no es afectado
- Pero esto no ocurre en sistemas interconectados grandes donde los generadores interactúan entre si
- Analogía a ejemplo de masas colgantes donde cada hilo equivale a una línea y el peso a la inercia de las maquinas
- El ángulo se representa por la distancia de la masa a la base
- El corte de un hilo podría conducir a un nuevo punto de equilibrio estable, o podría producir un efecto en cascada de corte de hilos y un colapso del sistema



Sistemas Multi-máquinas

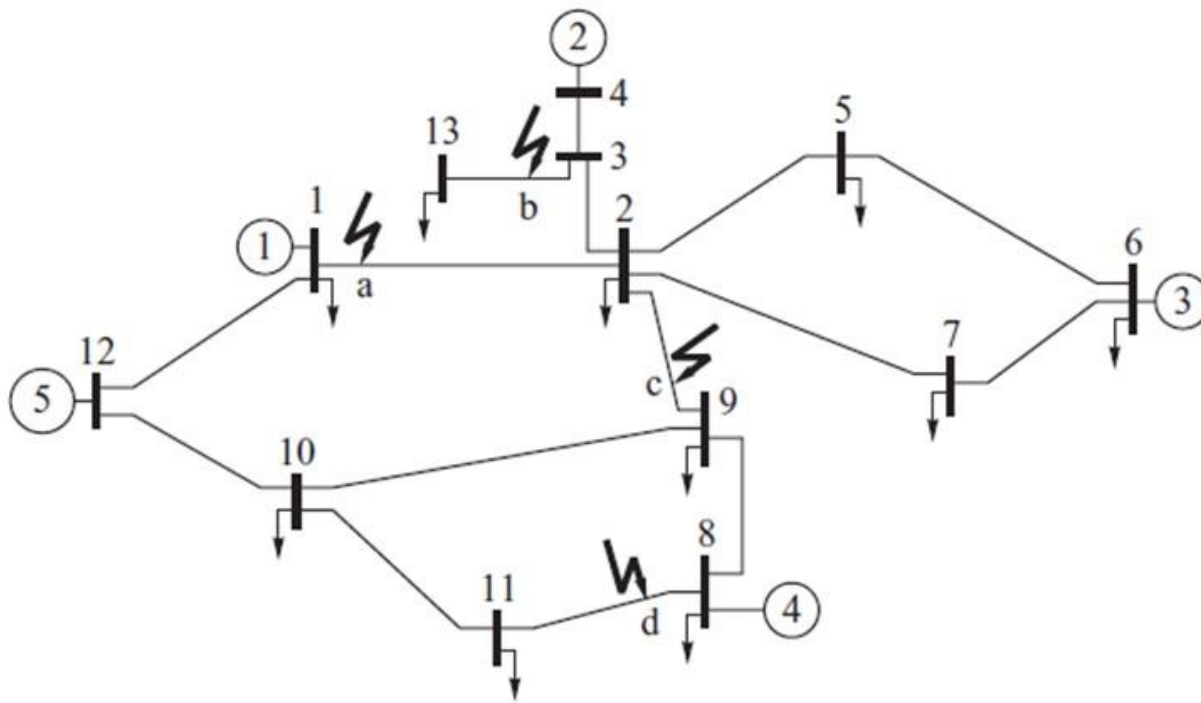
- En la práctica, una perturbación podría afectar un sistema eléctrico de 4 formas:
 - El generador cercano a la falla podría perder sincronismo al primer swing mientras los otros generadores sufren oscilaciones, pero se estabilizan en un nuevo punto de operación
 - El generador cercano a la falla pierde sincronismo luego de algunas oscilaciones, pero el resto del sistema se estabiliza en un nuevo punto de operación
 - El generador cercano a la falla es el primero en perder sincronismo pero es seguido por otros generadores en el sistema
 - El generador cercano a la falla oscila pero permanece estable mientras que otro(s) generador(s) en el sistema pierde(n) sincronismo

Sistemas Multi-máquinas

- De estos 4 casos, el primero es el que se puede representar con el modelo de un generador en un bus infinito
- Los otros casos aparecen por interacción del generadores cercano a la falla y el sistema
- En el ultimo caso los generadores lejanos podrían perder sincronismo debido a enlaces débiles con el sistema

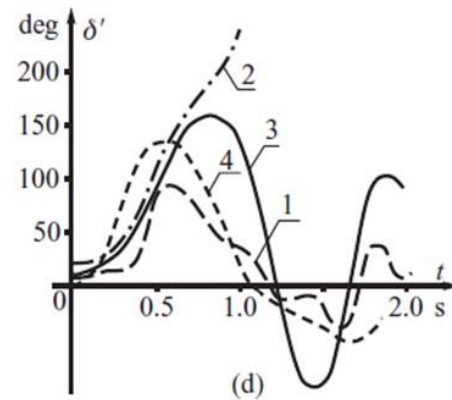
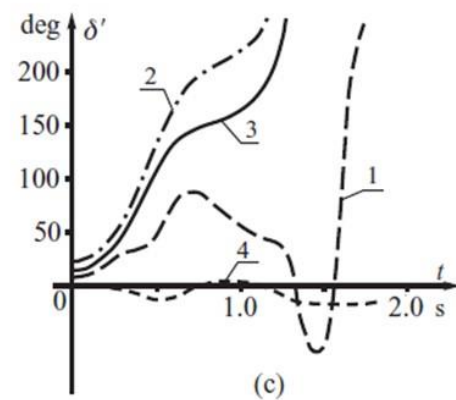
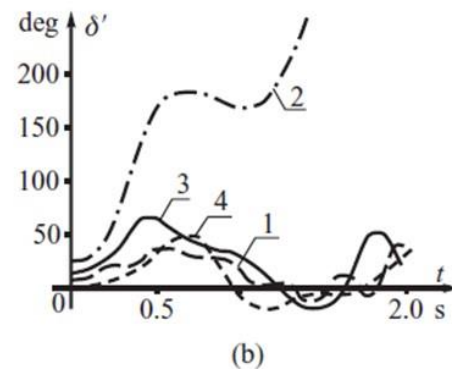
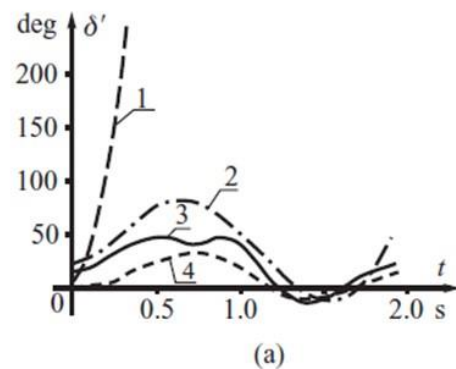
Sistemas Multi-máquinas

- Caso Ejemplo



Sistemas Multi-máquinas

■ Caso Ejemplo



Sistemas Multi-máquinas

- Solución Numérica de Estabilidad Transitoria
- Ecuaciones diferenciales para generador y sistemas de control

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V})$$

- Ecuaciones algebraicas para la solución de la red

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}$$

- Métodos de interface de sistema de ecuaciones: Partición o simultáneos
- Método de integración: implícito o explícito
- Solución ecuaciones algébricas: GS y NR

Sistemas Multi-máquinas

■ Método de Partición:

- Condiciones iniciales son conocidas y todas las derivadas son cero (estado estacionario)
- Luego de se resuelven las ecuaciones algebraicas y luego se resuelven las ecuaciones diferenciales

■ Método Simultaneo:

- Las ecuaciones se resuelven de forma simultánea aplicando regla trapezoidal de integración
- Se puede resolver usando Newton Raphson

Sistemas Multi-máquinas

- Método Simultaneo:
 - Linearización de ecuaciones diferenciales y algebraicas

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)]$$

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{n+1}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{V}_n)]$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{I}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1})$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = 0$$

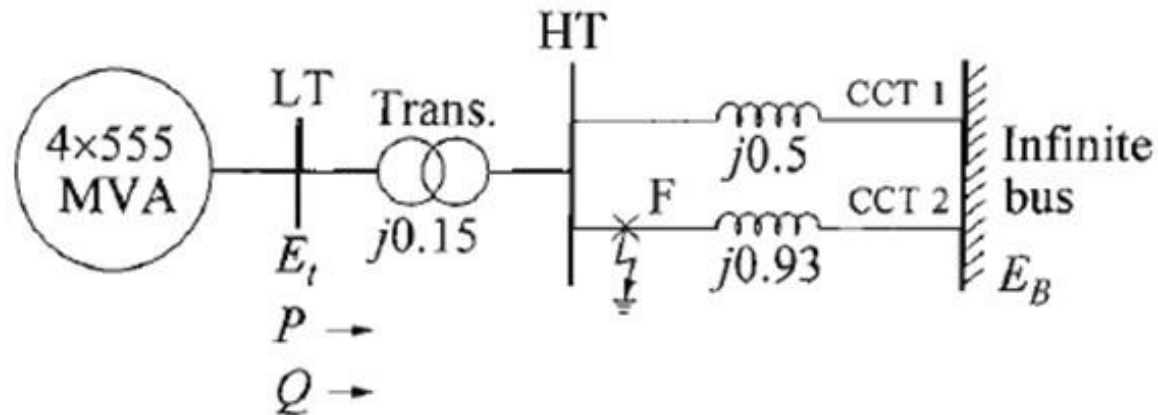
$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{V}_{n+1}) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \\ \mathbf{V}_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{V}_{n+1}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{V}_{n+1}^k \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{V}_{n+1}^k) \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{V}_{n+1}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{V}_{n+1}^k \end{bmatrix}$$

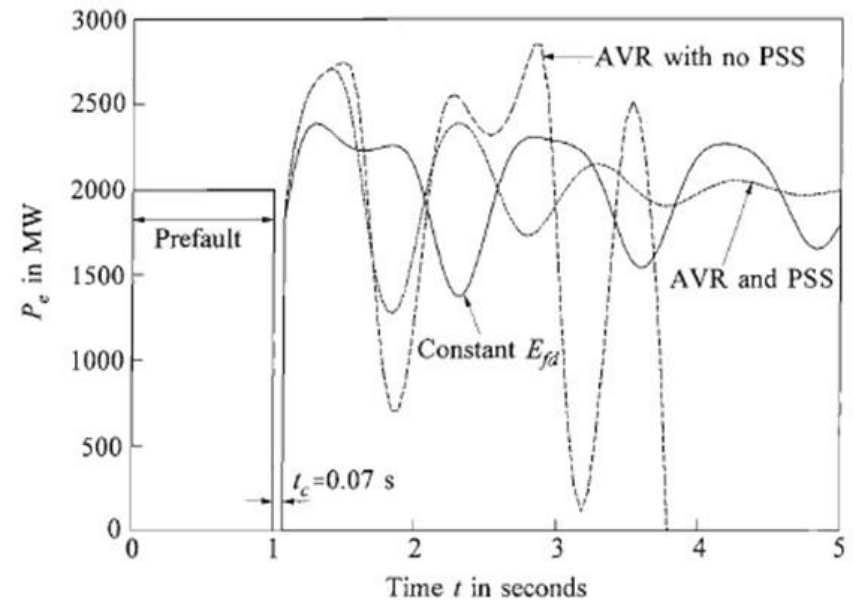
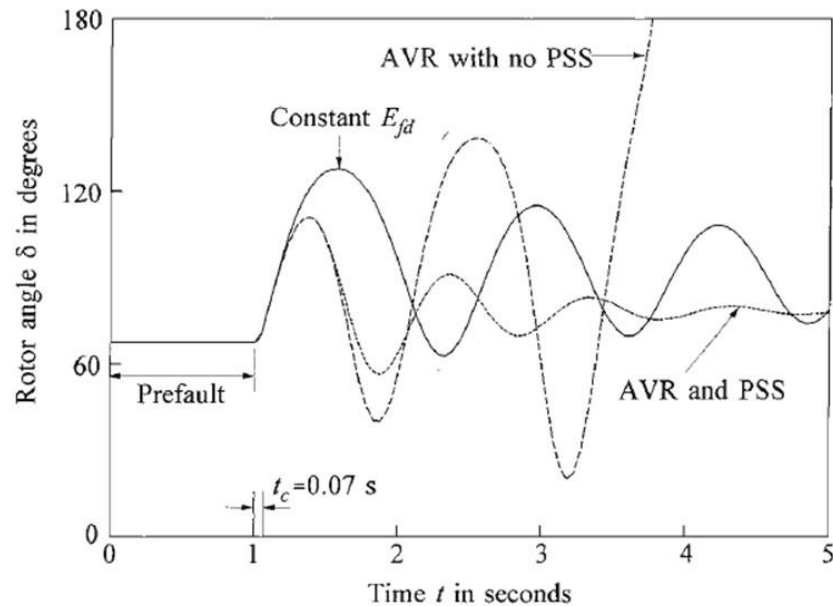
Sistemas Multi-máquinas

- Ejemplo simple

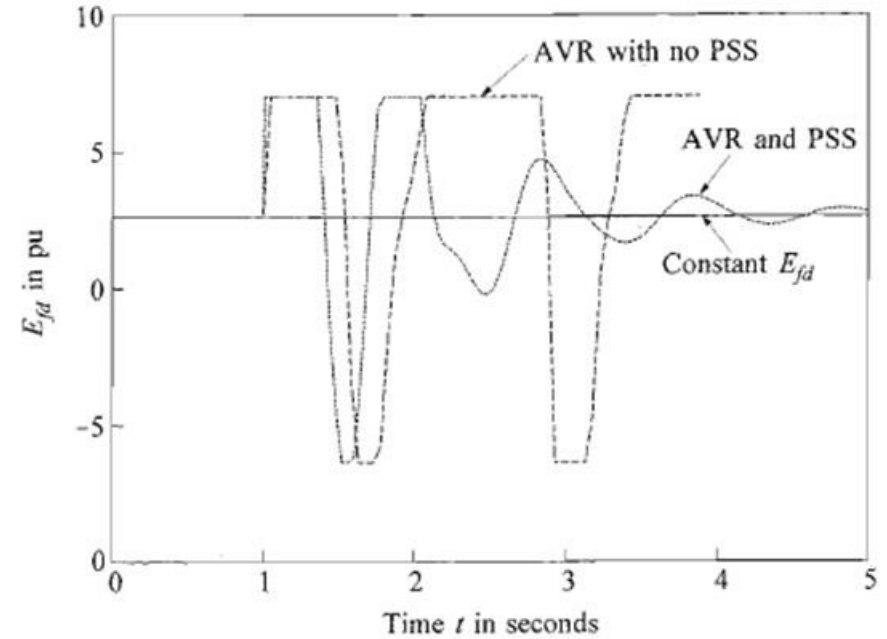
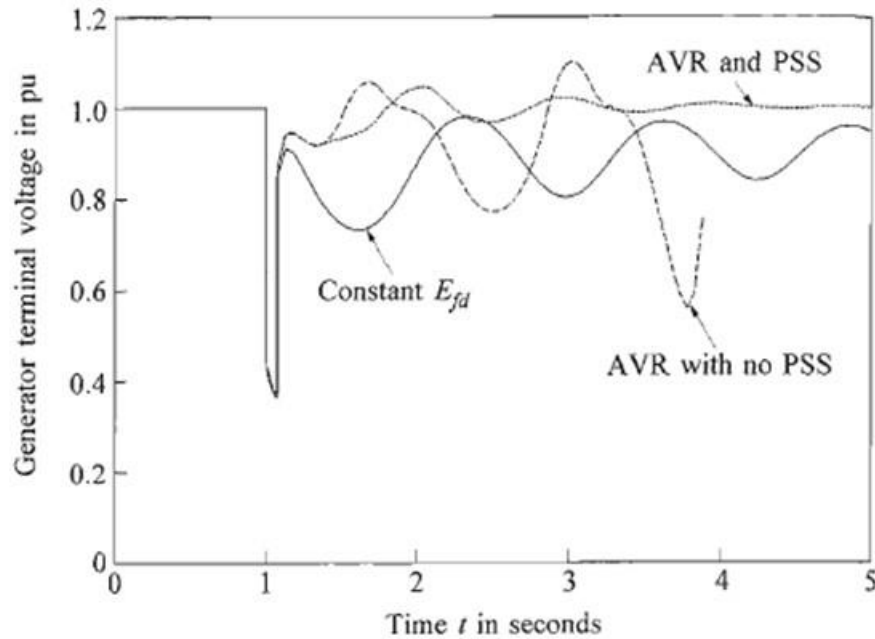


Network reactances in pu on 2220 MVA base

Sistemas Multi-máquinas



Sistemas Multi-máquinas





Contenido

- Estabilidad Transitoria
- Criterio de Áreas Iguales
- Estabilidad Transitoria Sistemas Multimáquinas
- Estabilidad Transitoria en DigSilent