

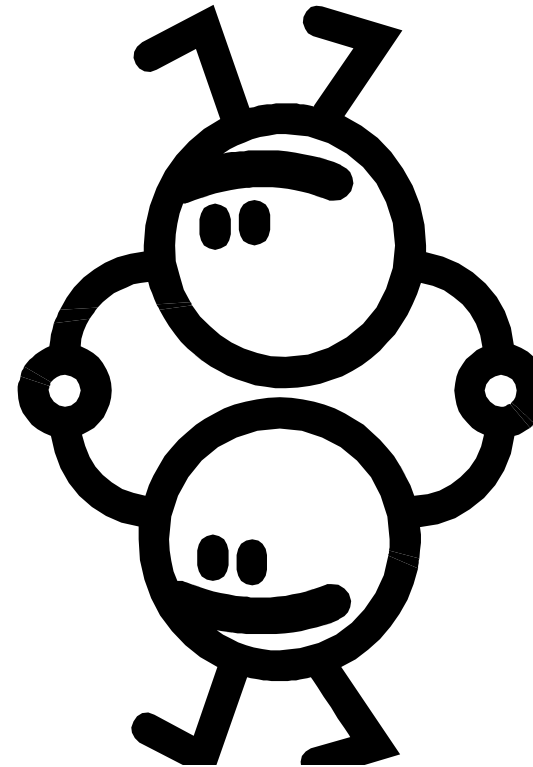
Estabilidad de sistemas de potencia

Por: César Chilet León

2016

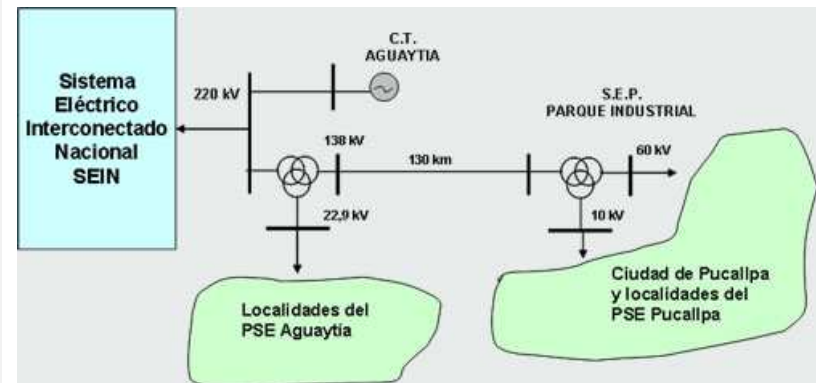
Estabilidad

- Capacidad de recuperar su estado de funcionamiento después de haber sido sometido a una perturbación.



Estabilidad en sistemas de potencia

- **Estabilidad de ángulo:** Es la capacidad del sistema de mantener a los generadores en sincronismo después de una perturbación.
- **Estabilidad de tensiones (colapso de tensión):** capacidad de mantener las tensiones en los nudos próximos al 1,0 p.u. tras una perturbación.



Tipos

La estabilidad de ángulo se clasifica en:

- Estabilidad de régimen permanente.
- Estabilidad transitoria.
- Estabilidad dinámica.



Estabilidad de régimen permanente

- **Estabilidad estática.**
- **Capacidad de recobrar el sincronismo tras perturbaciones relativamente pequeñas y graduales.**
- **Ejm. Potencia demandada por las cargas.**

Estabilidad transitoria (TS)

- Capacidad de recobrar el sincronismo tras una gran perturbación.
- Las máquinas síncronas experimentan desviaciones respecto a su valor de sincronismo (60 Hz), cambiando sus ángulos de potencia.
- Objetivo del Estudio TS: determinar si las máquinas recuperan el sincronismo.

Estudio de TS

- **Necesario:** cuando se planifica la instalación de nuevas unidades de generación o LT.
- **Se determina:**
 - Las características de los relés de protección.
 - Los tiempos críticos de actuación de los interruptores.
 - La capacidad de transporte de una LT.

Estabilidad transitoria

- Viene determinada por la evolución del ángulo de potencia.
- Condiciones:
 - Duración de la primera oscilación=1s.
 - Generadores operan a la **Ns**.
 - ***U*** y ***I*** son **AC** sinusoidales.
 - Potencia mecánica suministrada = constante.
 - ***I_{exc}*** = constante.
 - Carga constante

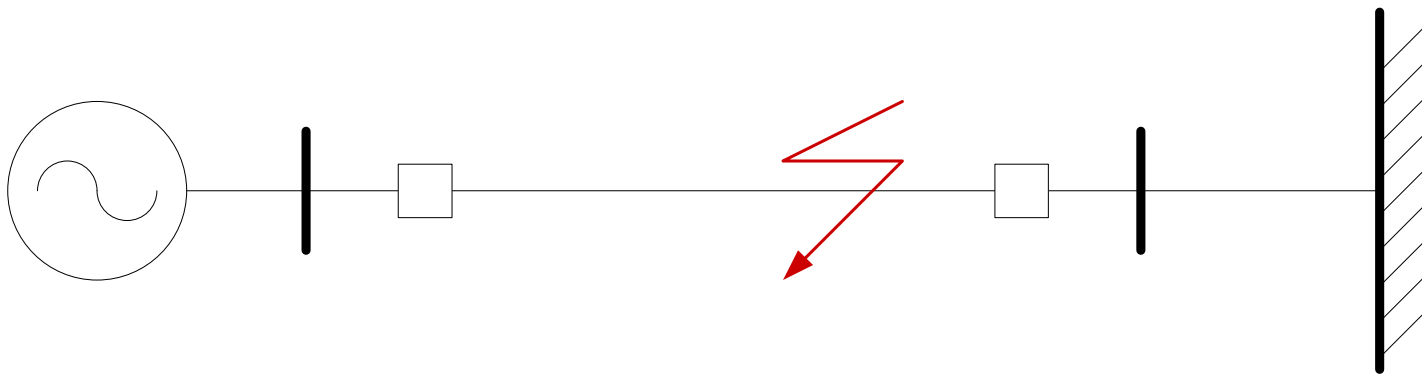
Estabilidad dinámica

- **Estudio de múltiples oscilaciones (varios segundos).**
- **Se requiere:**
 - **Modelo de los reguladores de las turbinas y de los sistemas de excitación.**
 - **Modelo más detallado de la máquina síncrona.**

Secuencia de eventos

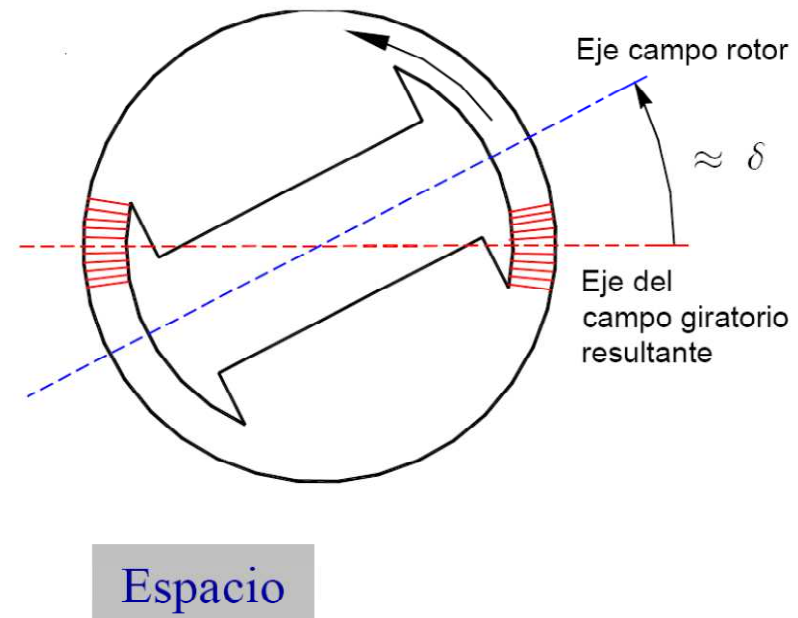
- **Fase 1:** Prefallo
- **Fase 2:** Fallo y desconexión de la línea.
- **Fase 3:** Post fallo.

¿Luego de una secuencia de eventos dada, recupera o nó el sistema la estabilidad?



Equilibrio dinámico del grupo T-G

- **Condición inicial:**
 $\delta = \text{fijo}$
- **En perturbación:** se presenta movimiento relativo $\Rightarrow \delta$ cambia (rotor se acelera o desacelera)
- Ecuación que describe movimiento relativo
(ecuación de oscilación)



Equilibrio dinámico del grupo T-G

Considerando:

- Que los rotores del grupo T-G forman un sólido rígido
- Despreciable:
 - Los pares debido al rozamiento y fricción de las partes mecánicas y al devando amortiguador.
 - Las pérdidas eléctricas.

La dinámica de este sistema viene descrita por la 2da Ley de Newton de la mecánica.

ESTABILIDAD TRANSITORIA

Introducción

- Para explicar el concepto y las expresiones aplicables en estabilidad transitoria se utilizará un ejemplo simple.

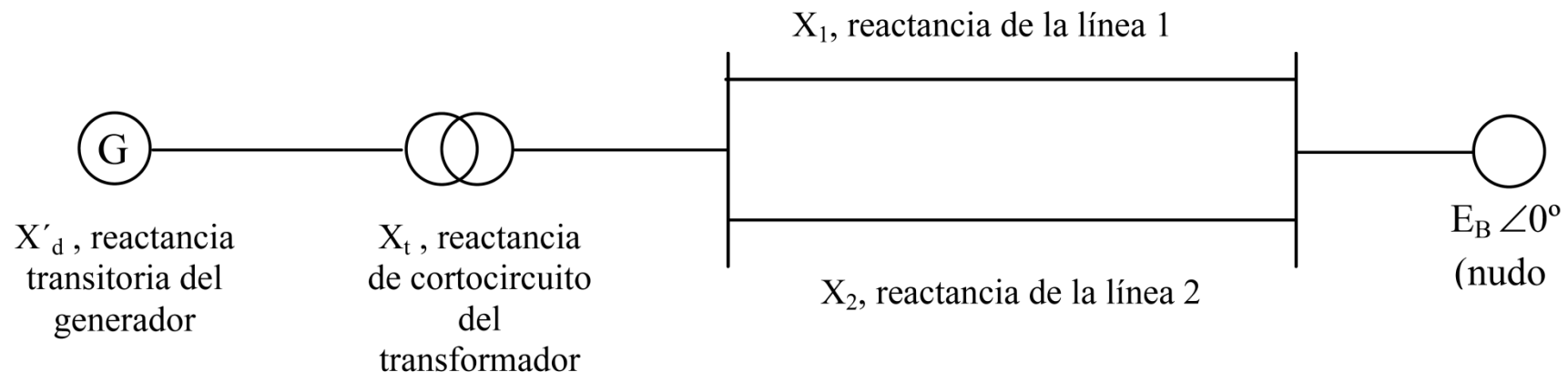
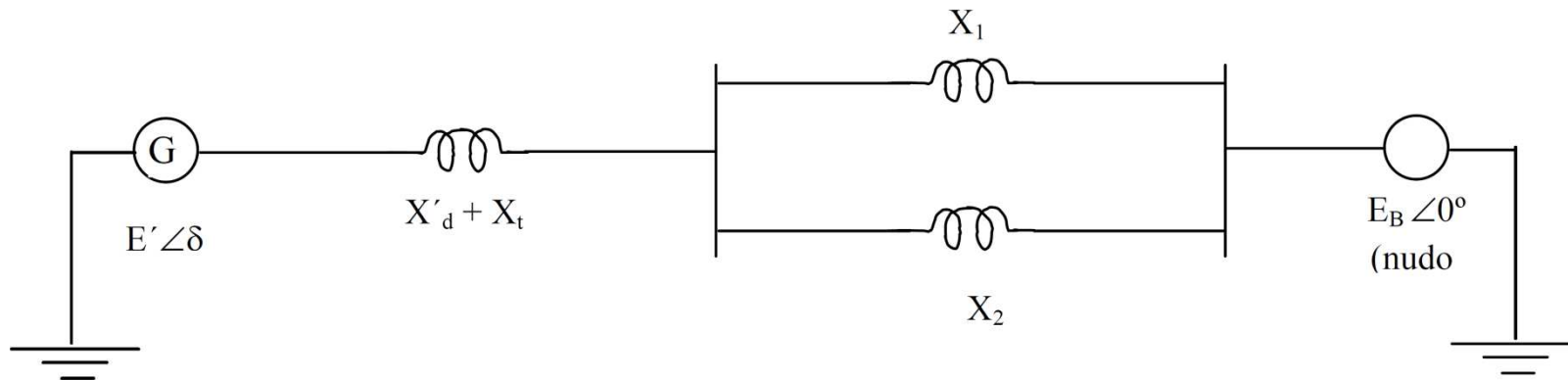


Diagrama unifilar Pre-falla en p.u.

- La tensión interna del generador durante el régimen transitorio será igual a la que existía antes de la perturbación y se denotará como E' .



Premisas

- Para facilitar el análisis se despreciarán:
 - las pérdidas en el sistema de transporte y generación,
 - el efecto de la saturación del circuito magnético del generador y el de los polos salientes.
 - Durante el tiempo que dura la perturbación la I_{exc} de la máquina es CTE, sin embargo, la N_{GEN} se desviará de su N_s y el ángulo δ variará siguiendo el modelo definido por la ecuación de oscilación del generador .

Pre-falla

- Se calcula la X_{eq} del circuito en el régimen previo a la perturbación (X_T), como:

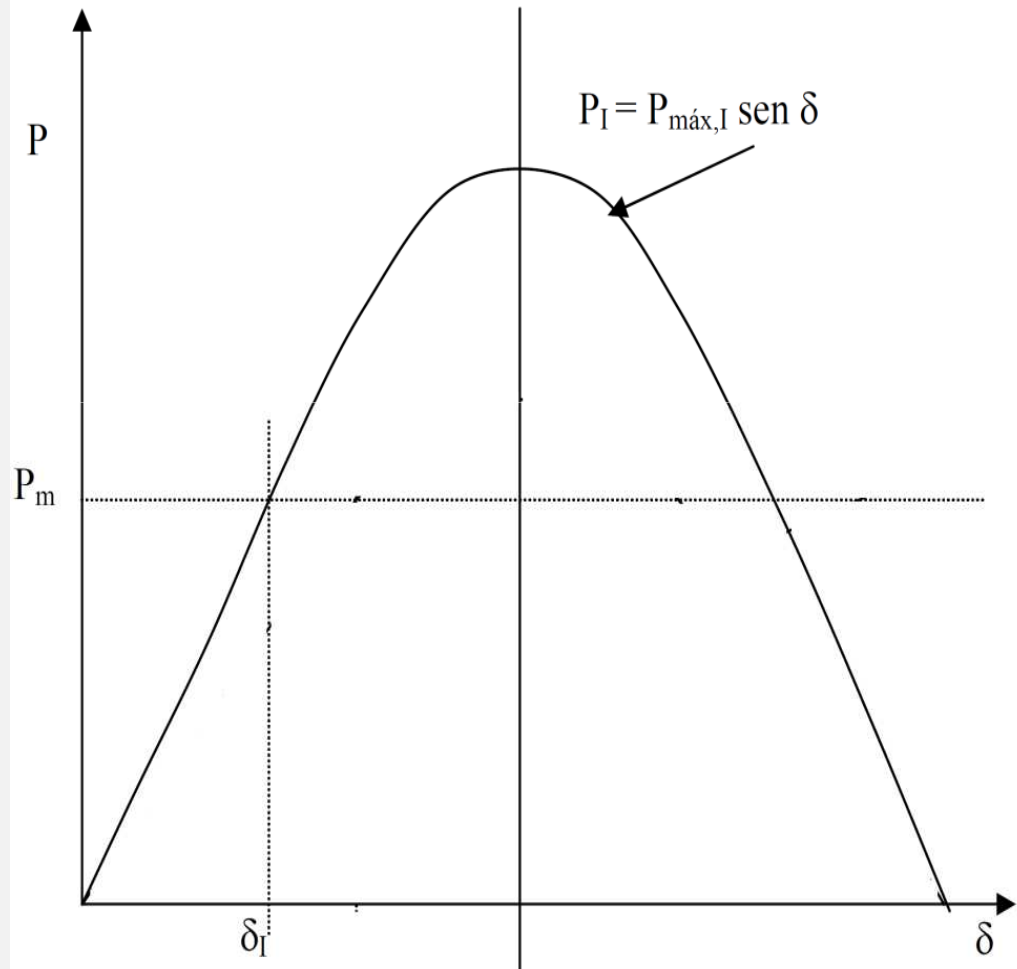
$$X_{T,I} = X'_d + X_t + \frac{X_1 X_2}{(X_1 + X_2)} \quad (2.1)$$

También se puede calcular P_I entregada por el generador previa a la perturbación, como:

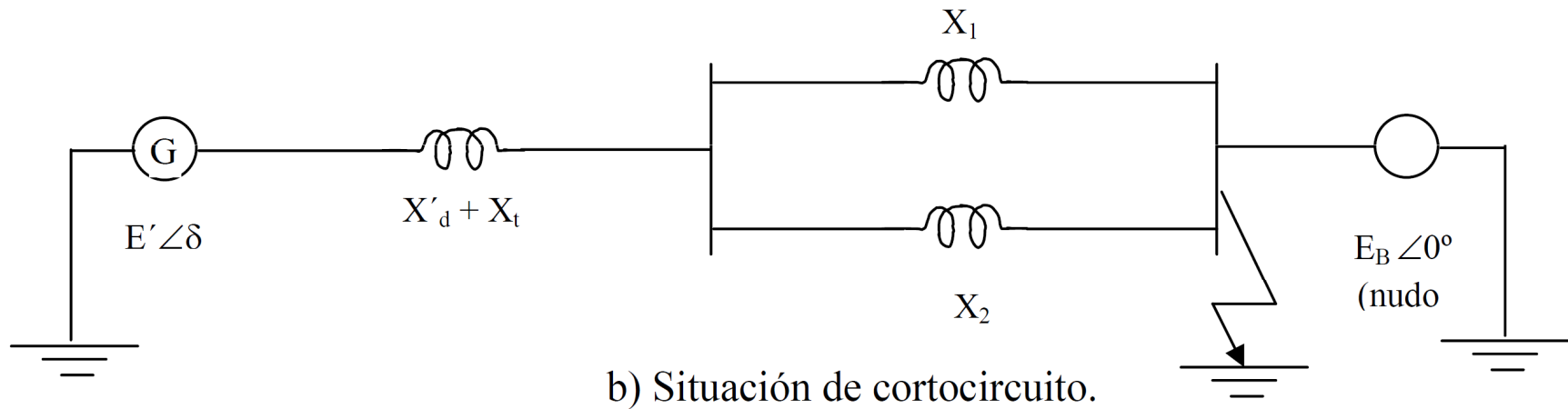
$$P_I = \frac{E' E_B}{X_{T,I}} \text{sen} \delta = P_{máx,I} \text{sen} \delta \quad (2.2)$$

Pre-falla

- El punto de funcionamiento de la máquina corresponderá a un ángulo δ determinado, tal que $P_I = P_m$.
- *Este ángulo es el δ_I*

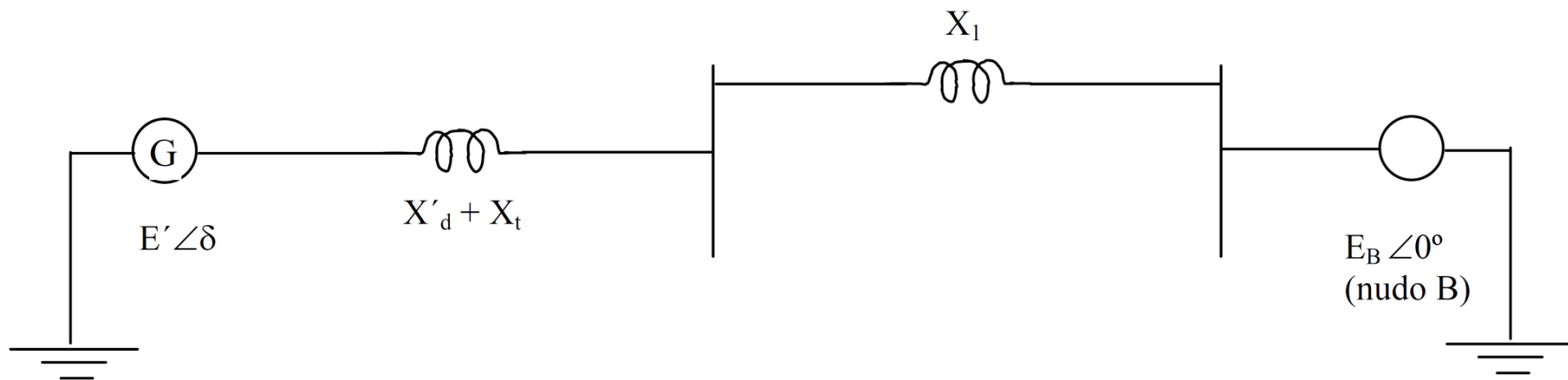


Ocurrencia de la falla



En falla

- Como consecuencia de un cortocircuito en el extremo de la LT2 las protecciones dan la orden a los interruptores automáticos de dejar abierta esta línea.



c) Situación posterior al defecto cuando se abre la línea en defecto,(situación II).

En falla

- La inductancia total equivalente una vez despejado el defecto tomará otro valor, lógicamente mayor:

$$X_{T,II} = X'_d + X_t + X_1 \quad (2.3)$$

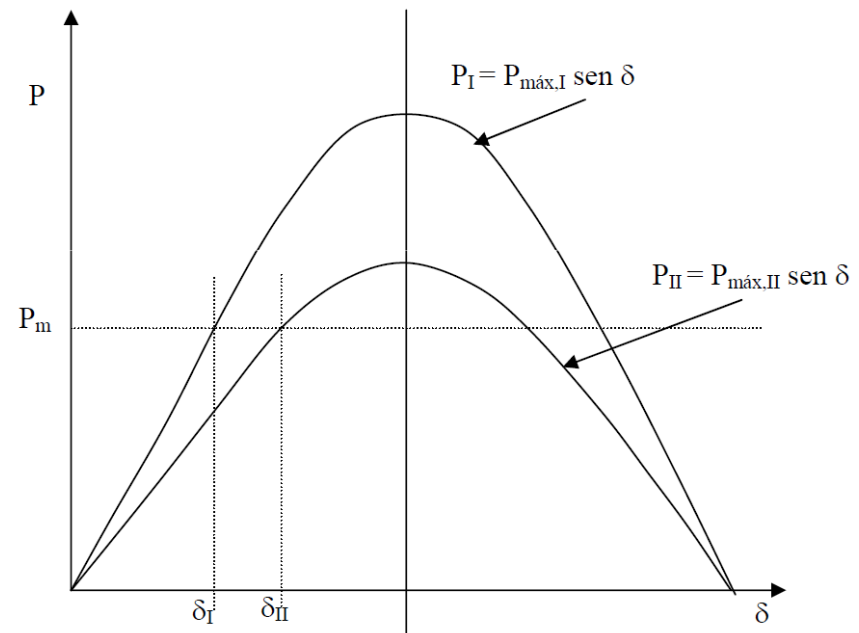
En falla

- Por tanto, en Falla (II), la máxima potencia eléctrica que podrá entregar el generador que será inferior seguirá la expresión siguiente:

$$P_{II} = \frac{E' E_B}{X_{T,II}} \text{sen} \delta = P_{m\acute{a}x,II} \text{sen} \delta \quad (2.4)$$

En falla

- Como la P_m de la turbina = CTE, el punto de funcionamiento de la máquina pasará, una vez transcurrido el transitorio y siempre que el sistema permanezca estable, a un ángulo mayor (δ_{II}).



Ecuación de oscilación

- Para conocer como varía el ángulo $\underline{\delta}$ durante este transitorio y comprobar si el sistema es o no estable, es necesario estudiar a la ecuación de oscilación de la máquina que se deduce a continuación.

Ecuación de oscilación

- Durante cualquier fenómeno transitorio el par de aceleración de la máquina en su conjunto (turbina más generador) es igual al par motor mecánico de la turbina menos el par electromagnético o de frenado (supónganse medidos ambos pares en unidades de N.m), es decir:

$$M_a = M_m - M_e \quad (2.5)$$

Ecuación de oscilación

- En régimen permanente $M_m = M_e$, es decir, el par de aceleración será nulo, y el rotor gira a una velocidad constante que es la velocidad de sincronismo.
- Si el par de aceleración es positivo la velocidad del rotor aumentará y si el par de aceleración es negativo disminuirá.

Ecuación de oscilación

- La variación de la velocidad de giro de la máquina dependerá de su momento de inercia, según la expresión siguiente:

$$M_a = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.6)$$

donde:

J Momento de inercia combinado de la máquina (generador y turbina) en kg.m².

ω_m velocidad angular mecánica del rotor, siendo su valor de sincronismo **ω_{0m}** .

Ecuación de oscilación

- La ecuación (2.5) se puede transformar en otra equivalente empleando la constante de inercia normalizada de la máquina, **H**, que se define como:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{0m}^2}{S_N} \quad (2.7)$$

donde:

H constante de inercia normalizada de la máquina en segundos.

ω_{0m} velocidad angular mecánica de sincronismo del rotor (rad/s)

S_N potencia trifásica nominal del generador (VA).

Constante de inercia normalizada (H)

- En la tabla siguiente se muestran valores típicos de la constante de inercia normalizada en función del tipo de máquina:

Tipo de grupo turbina- generador	H (segundos)
Grupo turbina-generador de 2 polos (3000 rpm)	2,5 a 6
Grupo turbina-generador de 4 polos (1500 rpm)	4 a 10
Hidrogenerador	2 a 4

Constantes de inercia normalizadas de la máquina, $H(s)$.

Ecuación de oscilación

- Las expresiones 2.6 y 2.7 anteriores se pueden combinar y transformar en las siguientes:

$$J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} S_N \Rightarrow$$
$$M_a = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} S_N \frac{d\omega_m}{dt} \Rightarrow$$
$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} \right) = \frac{M_a}{\omega_{0m}}$$

Ecuación de oscilación

- Si se define momentos y velocidades angulares en valores por unidad con las bases siguientes:

$$M_{base} = \frac{S_N}{\omega_0} \Rightarrow M_{a(pu)} = \frac{M_a}{M_{base}}$$
$$\omega_{pu} = \frac{\omega_m}{\omega_{0m}} = \frac{\frac{\omega}{p}}{\frac{\omega_0}{p}}$$

Ecuación de oscilación

- Se puede transformar la expresión anterior en la siguiente:

$$2H \frac{d}{dt} (\omega_{pu}) = M_{a(pu)} \quad (2.8)$$

donde:

- ω velocidad angular eléctrica del rotor en rad/s
- ω_0 velocidad angular eléctrica inicial del rotor en rad/s
- $\omega(pu)$ velocidad angular eléctrica del rotor en por unidad
- p número de pares de polos.

Ecuación de oscilación

- $\delta \rightarrow$ la posición angular del rotor en rad. eléctricos respecto de un eje de referencia y $\delta_0 \rightarrow$ es su posición en un tiempo $t = 0$, se tiene que:

$$\delta = (\omega - \omega_0)t + \delta_0 \Rightarrow$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$$

Ecuación de oscilación

Como por otra parte:

$$\omega = \omega_0 \cdot \omega_{pu} \Rightarrow$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega_0 \frac{d\omega_{pu}}{dt}$$

Por lo tanto:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0 \frac{d\omega_{pu}}{dt} \Rightarrow \frac{d\omega_{pu}}{dt} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

Sustituyendo esta última expresión en 2.8 se tiene que:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_{a(pu)} = M_{m(pu)} - M_{e(pu)} \quad (2.9)$$

- De no existir amortiguamiento el sistema seguiría oscilando continuamente.
- No obstante como para realizar el Estudio de estabilidad transitoria es suficiente con estudiar hasta la primera oscilación ($t < 1$ s).
- Se puede prescindir del efecto del amortiguamiento posterior.

- Durante la perturbación, la oscilación del ángulo δ , se superpone a la velocidad de sincronismo ω_0 .
- *No obstante, como la variación de la velocidad ($\Delta\omega = d\delta/dt$) es mucho más pequeña que la velocidad inicial ω_0 , se puede considerar que la velocidad permanece prácticamente constante e igual a ω_0 .*

- **En consecuencia, en valores por unidad, el momento mecánico y el electromagnético son prácticamente iguales a las potencias mecánica y eléctrica respectivamente (recuérdese que la potencia es igual al par multiplicado por la velocidad angular).**

Ecuación de oscilación de potencia

- Con tal simplificación se tiene que la ecuación de la oscilación se puede escribir finalmente como:

$$\frac{2H}{\omega_{m0}} \cdot \frac{d^2 \delta m(t)}{dt^2} = Pm_{(PU)}(t) - Pe_{(PU)}(t)$$

Para simplificar la notación se omite el subíndice p.u., con lo que queda

$$\frac{2H}{\omega_{m0}} \cdot \frac{d^2 \delta m(t)}{dt^2} = Pm(t) - Pe(t)$$

Esta es la ecuación fundamental que determina la dinámica del rotor en los estudios de estabilidad transitoria.

Observaciones

- Es una Ec. Diferencial de 2do orden no lineal.
- La no linealidad es debido a $Pe(t)$, que es una función no lineal de δ .
- En su desarrollo no se han tenido en cuenta:
 - el efecto de fricción mecánica,
 - los efectos del devanado amortiguador y
 - de la excitación, que en conjunto dan lugar a un par de amortiguamiento $\sim N$. De considerarse se incluiría en la ec. un término proporcional a $d\delta/dt$. Ignorarlo conduce a resultados conservadores.

Criterio de igualdad de áreas

Ecuación de oscilación

- La ecuación de oscilación de la máquina síncrona es:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e)$$

**Ecuación de oscilación
despreciando torque amortiguante**

Donde:

- **H** es la constante de inercia,
- **ω_0** la frecuencia de sincronismo,
- **P_m** la potencia mecánica entrante y
- **P_e** la potencia eléctrica saliente.

Ecuación diferencial que describe el movimiento relativo del eje del rotor respecto de los ejes del campo magnético resultante durante una perturbación.

Fundamento matemático

criterio de igualdad de áreas

Multiplicando a ambos miembros por $2d\delta/dt$

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0(P_m - P_e)}{H} \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \frac{\omega_0(P_m - P_e)}{H} \frac{d\delta}{dt}$$

Integrando en el tiempo se obtiene que:

$$\left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 = \frac{\omega_0}{H} \int (P_m - P_e) d\delta$$

Antes de que se produzca el transitorio o perturbación la variación del ángulo δ es nula, es decir:

$$\left[\frac{d\delta}{dt} \right]_{\delta=\delta_0} = 0$$

Criterio de igualdad de áreas

- Después de la perturbación el sistema será estable si el ángulo δ alcanza rápidamente (en menos de 1 segundo) un valor máximo (δ_m) para disminuir a continuación.
- En el instante en que el ángulo alcance su máximo valor la pendiente de la curva de variación del ángulo será nula, por tanto:

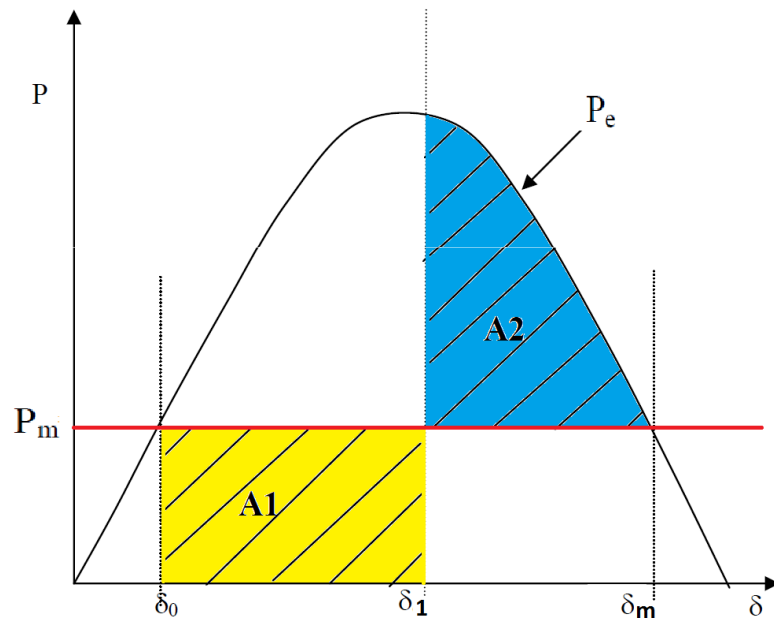
$$\left[\frac{d\delta}{dt} \right]_{\delta=\delta_m} = 0$$

Criterio de igualdad de áreas

- Por lo tanto la condición de estabilidad se puede definir como:

$$\left[\frac{d\delta}{dt} \right]^2 \bigg|_{\delta=\delta_0}^{\delta=\delta_m} = 0 = \frac{\omega_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta$$

Criterio de igualdad de áreas



- Es decir que para que el sistema sea estable el área de la curva $(P_m - P_e)$ representada en función del ángulo δ , debe ser cero:

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

Criterio de igualdad de áreas

- Si se separa el área positiva (**A1**) o de aceleración (cuando $P_m > P_e$), del área negativa (**A2**) o de deceleración (cuando $P_m < P_e$) se llega al criterio de igualdad de áreas:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta$$

Criterio de igualdad de áreas

- Es decir que la energía cinética ganada por el generador durante su aceleración (hasta llegar al ángulo δ_1) es igual a la energía cinética pérdida por el generador durante su frenado.

Criterio de igualdad de áreas

- El ángulo δ_1 representa el ángulo del rotor en el instante en que tras una perturbación se reconfigura el sistema, por ejemplo se abren interruptores para aislar la línea en defecto, con lo que la potencia activa entregada por el generador (P_e) *que generalmente ha sido* pequeña o incluso nula durante la perturbación o cortocircuito, pasa bruscamente a ser mayor que la mecánica y el generador empieza a frenarse.

Criterio de igualdad de áreas

- El mayor valor del ángulo δ_1 que satisface la condición de estabilidad se nomina ***ángulo crítico***, y el tiempo de actuación de las protecciones en caso de cortocircuito o el tiempo de re conexión de una línea en defecto que conduce a obtener dicho valor de ángulo se denomina ***tiempo crítico***.
- Si las protecciones tardan en actuar un tiempo superior al crítico el área de aceleración es tan grande que no es posible conseguir un área de deceleración igual a la de aceleración y el sistema se vuelve inestable.

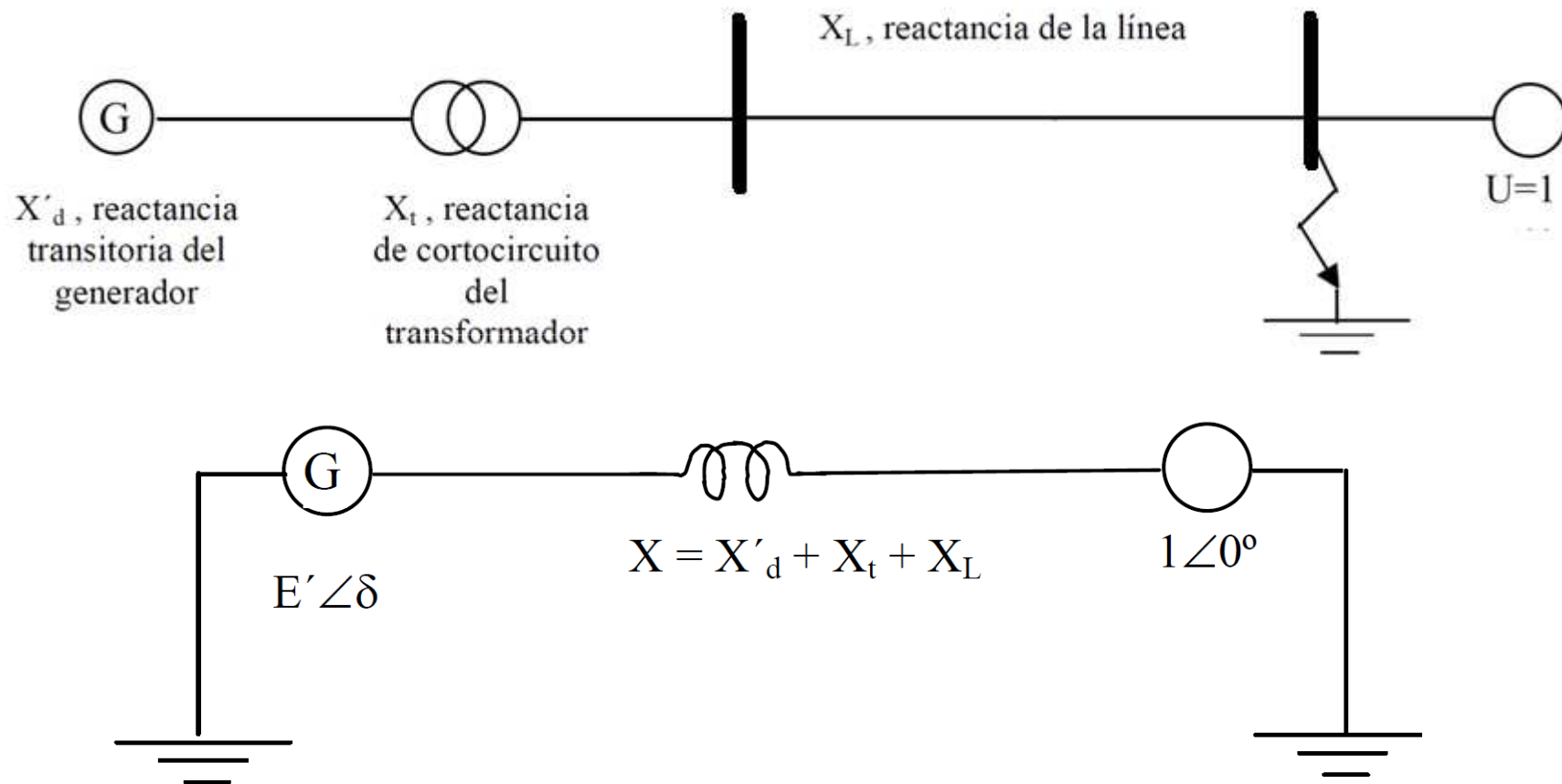
Ejemplo 1

- Un grupo generador de 60 Hz y $H = 5$ segundos, se conecta a través de un transformador de impedancia, $X_t = j0,1$ pu y de una línea de impedancia $X_L = j0,3$ a un nudo de potencia infinita de tensión $U = 1$ p.u. que consume una potencia activa de 0,8 pu con un factor de potencia 0,7 inductivo.
- La reactancia transitoria del generador es $X'_d = j 0,25$ pu.

Ejemplo 1

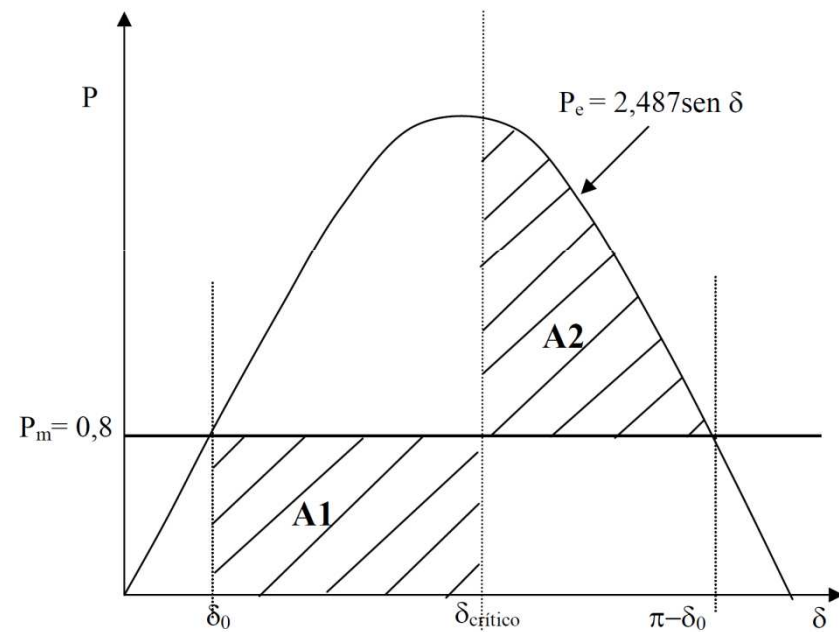
- En un instante determinado, $t=0$, se produce un cortocircuito trifásico a tierra debido a la caída de unas ramas de árbol sobre la línea. Las protecciones actúan de forma instantánea disparando la línea, de forma que el cortocircuito ha desaparecido cuando transcurrido el tiempo necesario para el reenganche o re conexión se vuelven a cerrar los interruptores que ponen en servicio la línea. Calcular el ángulo crítico del rotor y el tiempo crítico de re conexión que garantizan la estabilidad transitoria del sistema.

Ejemplo 1



Ejemplo 1

Se calcula en primer lugar la potencia activa (P) que en régimen permanente sería capaz de entregar el generador en función del ángulo del rotor, manteniendo la excitación constante.



Solución 1

La potencia activa entregada por el generador al nudo de potencia infinita en función del ángulo del rotor sigue la siguiente expresión:

$$P = \frac{E.U}{X} \text{sen} \delta$$

Teniendo en cuenta que:

$$U = 1 \text{ pu } \angle 0$$

$$X = X'_d + X_t + X_L = j 0,65$$

Solución 1

Se debe determinar la fuerza electromotriz interna de la máquina. Su valor permanecerá constante, ya que la excitación permanece constante. Para ello se parte del dato de la potencia activa y reactiva consumida por la carga en el nudo de potencia infinita.

$$P = 0,8 \text{ pu}$$

$$\text{Factor de potencia} = 0,7 \text{ inductivo} \Rightarrow Q = P \tan \phi = 0,8 \tan \arccos(0,7) = 0,816 \text{ pu}$$

Teniendo en cuenta la expresión de la potencia aparente compleja, y que **$U = 1 \text{ pu}$** :

$$\boxed{S = U \cdot I^*} \quad S = (P + jQ) = (0,8 + j 0,816) \text{ pu}$$

$$S = U \cdot I^* = I^* = 0,8 + j 0,816 \Rightarrow I = (0,8 - j 0,816) \text{ pu}$$

Solución 1

Por otra parte la fuerza electromotriz interna (E) de la máquina se calcula teniendo en cuenta el valor de la reactancia serie total.

$$\mathbf{E} = \mathbf{U} + j \mathbf{X.I} = 1 + j 0,65 (0,8 - j 0,816) = 1,53 + j 0,52.$$

Por lo tanto el módulo de la tensión interna del generador será:
 $E = 1,616$ pu. Sustituyendo todos los valores conocidos en la expresión de la potencia activa suministrada por el generador al nudo de potencia infinita se tiene:

$$P = (2,487 \text{ sen } \delta) \text{ pu}$$

Solución 1

A continuación se calcularán: el ángulo crítico (δ_c) del rotor y el tiempo crítico de reconexión.

Como paso previo se calcula el ángulo inicial del rotor antes de la falta:

$$P = (2,487 \text{ sen } \delta) \text{ pu} = 0,8 \text{ pu} \Rightarrow \delta_0 = 18,77^\circ = 0,328 \text{ radianes}$$

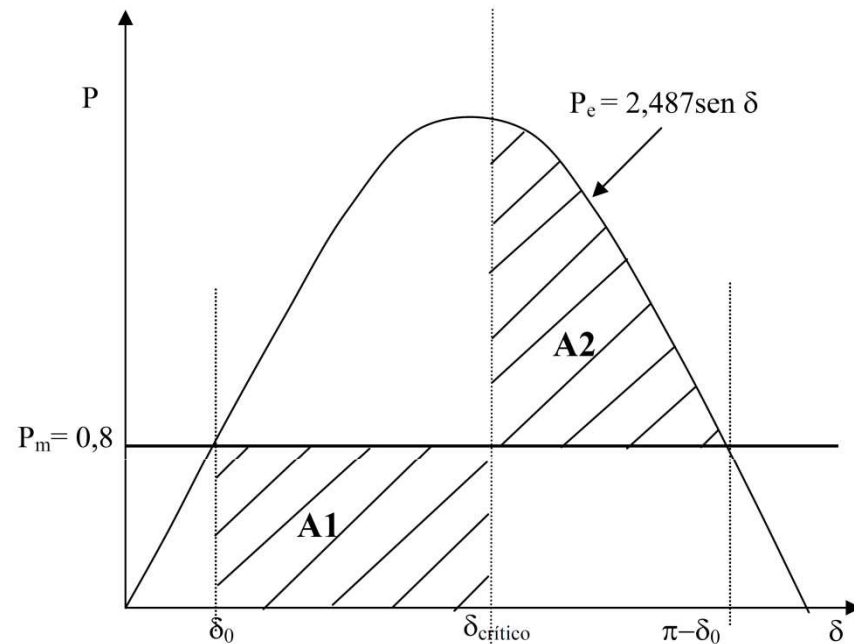
El ángulo crítico del rotor se calcula aplicando: el criterio de igualdad de áreas y teniendo en cuenta que durante la falla y hasta la reconexión de la línea la potencia generada es cero ya que el cortocircuito es trifásico y existe una única línea de transmisión cuya tensión es nula en el punto del cortocircuito.

Solución 1

La potencia mecánica permanece constante e igual a la potencia mecánica inicial de valor 0,8 pu.

Por tanto la igualdad de áreas según la expresión.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta$$



$$A1 = \text{Área de aceleración} = \int_{\delta_0}^{\delta_{crítico}} (P_m - P_e) d\delta = (0,8 - 0) \cdot (\delta_{crítico} - \delta_0) = 0,8 \cdot (\delta_{crítico} - \delta_0)$$

$$A2 = \text{Área de deceleración} = \int_{\delta_{crítico}}^{\pi - \delta_0} (P_e - P_m) d\delta = \int_{\delta_{crítico}}^{\pi - \delta_0} (2,487 \sin \delta - 0,8) d\delta$$

Solución 1

Igualando ambas áreas, integrando y sustituyendo se obtiene que:

$$0,8 (\delta_{\text{crítico}} - 0,328) = 2,487 [\cos (\delta_{\text{crítico}}) - \cos(\pi - 0,328)] + 0,8 [\delta_{\text{crítico}} - (\pi - 0,328)]$$

Si se resuelve la ecuación se obtiene que:

$$\delta_{\text{crítico}} = 1,718 \text{ radianes}$$

Se puede observar como para valores del ángulo mayores de $(\pi - \delta_0)$ ya no es posible integrar más área de deceleración (A2), ya que la potencia mecánica resulta mayor que la potencia eléctrica activa entregada por el generador.

Solución 1

Para calcular el tiempo crítico hay que considerar que cuando la línea está desconectada, la potencia eléctrica se reduce a cero y la potencia mecánica permanece constante (0,8 pu), por lo tanto la ecuación de la oscilación durante este tiempo será:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(t) - P_e(t)$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m,0}$$

Cuya solución se obtiene simplemente integrando:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} = P_{m,0} \cdot t + C$$

Solución 1

Como la derivada del ángulo del rotor es nula para $t=0$ (instante de inicio de la falta), se tiene que $C=0$. Integrando de nuevo se obtiene que:

$$\frac{2H}{\omega_0} \delta = P_{m,0} \cdot \frac{t^2}{2} + C'$$

Por otra parte para $t=0$, el ángulo del rotor tomará el valor δ_0 *por tanto*:

$$\delta = \frac{\omega_0}{4H} P_{m,0} t^2 + \delta_0$$

Solución 1

Como caso particular de la ecuación anterior, si se conoce el ángulo del rotor crítico, se puede calcular el tiempo crítico de reconexión que garantiza la estabilidad transitoria del sistema, es decir:

$$\delta_{crítico} = \frac{\omega_0}{4H} P_{m,0} t_{crítico}^2 + \delta_0$$

Despejando se obtiene:

$$t_{crítico} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{crítico} - \delta_0)}{\omega_0 P_{m,0}}}$$

Sustituyendo los valores conocidos se tiene que:

t crítico = 0,332 segundos.

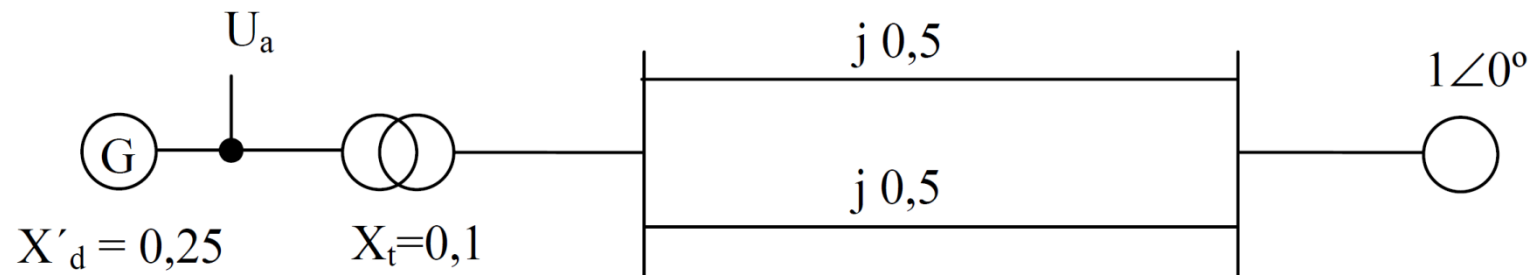
Solución 1

El tiempo crítico de reconexión engloba, contando desde el instante $t=0$ en que se produce el cortocircuito, tanto lo que tardan las protecciones en abrir la línea en defecto, como el tiempo que permanece abierta la línea hasta que al cerrar los interruptores se restablece de nuevo el servicio.

El reenganche de la línea se produce con éxito gracias a que en las líneas aéreas son muy frecuentes los defectos temporales (Por ejem: caída de una rama de árbol sobre la línea que se carboniza por la propia circulación de corriente).

Ejemplo 2

- El generador entrega una potencia activa de 1,0 pu a un nudo de potencia infinita $U_0=1\text{pu}$, con una tensión en terminales del generador $U_a = 1\text{pu}$.



Ejemplo 2

- Calcular en primer lugar la tensión interna del generador. En un instante $t=0$, se produce un cortocircuito trifásico en el punto medio de una de las dos líneas, y al cabo de un tiempo actúan las protecciones dejando fuera de servicio sólo la línea en defecto.

Ejemplo 2

- Calcular la potencia máxima que puede suministrar el generador tanto durante la falta como una vez despejada mediante la apertura de la línea en defecto.
- Calcular también el ángulo crítico de despeje, o ángulo máximo para el que los interruptores situados en los extremos de la línea en defecto pueden disparar con objeto de que se mantenga el sincronismo.

Factores que afectan a la estabilidad

Observación

- Una forma de mejorar la estabilidad transitoria es incrementando el límite de potencia a transmitir en condiciones normales de funcionamiento, (aumentar el límite de estabilidad estática.
- Entre los nudos 1 y 2 de un SEP, unidos mediante una LT de capacidad despreciable e inductancia, X , *la P_{max} que se puede transmitir es:*

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{U_1 U_2}{X}$$

Incremento de P_{max}

- 1. Incrementar las tensiones en los nudos (lo cual tiene otros condicionantes relacionados con el aislamiento y dimensiones de la línea),**
- 2. Reducir el valor de X .**
 - Construir una LT con conductores en haz,**
 - LT con varios circuitos,**
 - Construir LT en paralelo.**
 - Instalar capacitores serie.**

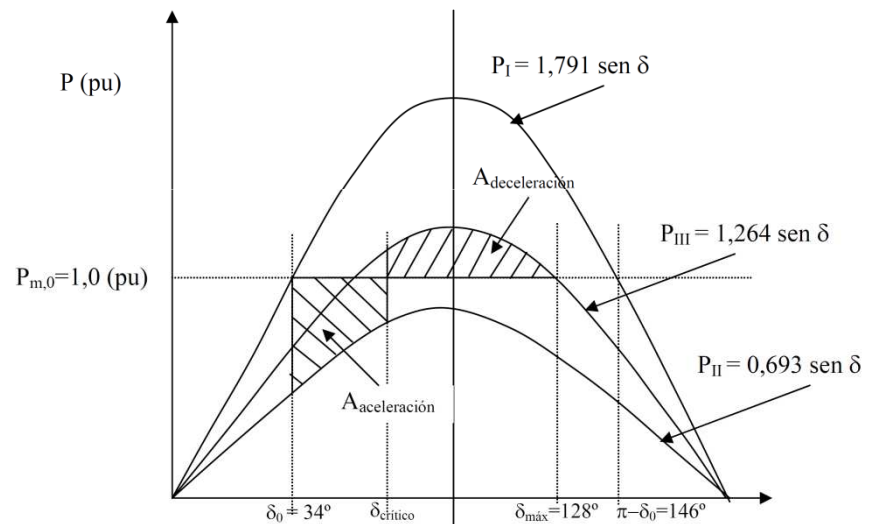
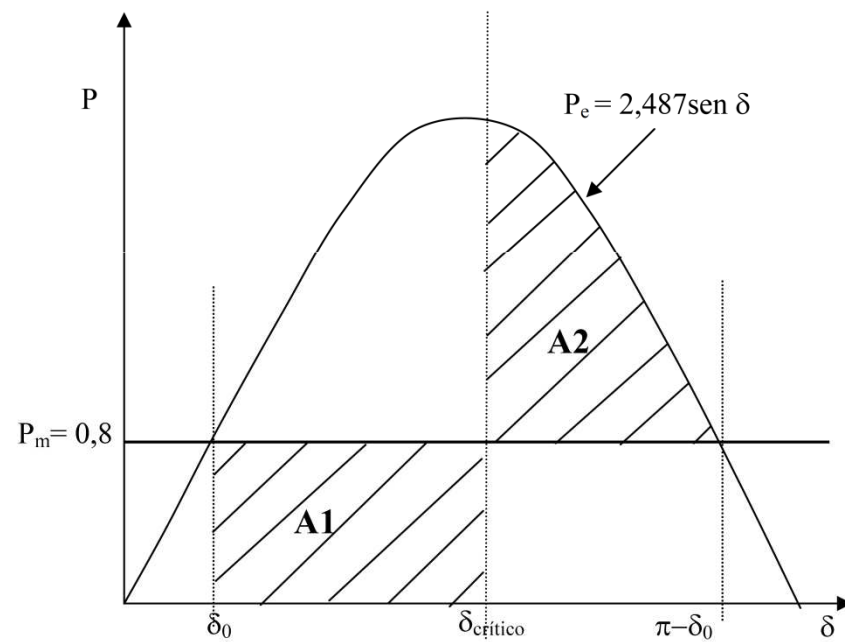
Factores que afectan a la estabilidad transitoria

- a) Actuación rápida de las protecciones y disminución del tiempo de reenganche de la línea en defecto.**
- b) Utilización de interruptores unipolares.**
- c) Utilización de sistemas de excitación o válvulas de admisión rápidas.**
- d) La carga en el momento de producirse la perturbación.**
- e) Las características del generador.**

Tiempo de protecciones

- **En caso de un cortocircuito la estabilidad transitoria mejorará cuanto más rápido actúen las protecciones que desconectan la línea en defecto. Hay que recordar que mientras que la línea está en cortocircuito la potencia eléctrica transmitida será nula o muy pequeña , y que el rotor se acelerará.**

Tiempo de protecciones



Tiempo de protecciones

- **La actuación de las protecciones en <100 ms se considera generalmente una actuación instantánea, aunque utilizando relés numéricos se pueden obtener tiempos de actuación (incluyendo también el tiempo de retardo y apertura del interruptor automático) menores (de 40 a 80 ms).**

Tiempo de protecciones

- **Cuando intervienen LT aéreas los cortocircuitos son generalmente de tipo temporal y a tierra.**
- **Esto significa que tras la apertura de la LT en defecto y transcurrido un breve tiempo (tiempo de reenganche) es posible volver a cerrar la LT ya que es muy posible que el defecto haya desaparecido y que la LT afectada se pueda poner nuevamente en servicio.**

Tiempo de protecciones

- **En efecto, en las LT aéreas el medio aislante es el aire que vuelve a recuperar sus propiedades dieléctricas cuando el arco que se originó durante el cortocircuito se extingue.**

Tiempo de protecciones

Situaciones frecuentes de este tipo resultan:

- **De la electrocución de pájaros que puentean conductores de fases distintas o una fase con elementos a tierra,**
- **De la caída de ramas de árbol sobre las líneas construidas con conductores desnudos**
- **Del efecto de las sobretensiones atmosféricas debidas a las caídas de rayos.**

Tiempo de protecciones

- En cualquier caso la aceleración del rotor será tanto menor cuanto más rápidamente se reenganche la línea afectada (mientras que la LT está abierta la P transmitida es nula y por tanto el rotor se acelera).
- En definitiva y suponiendo que el defecto se ha extinguido, cuanto más corto sea el ciclo de reenganche, mejores serán las condiciones de estabilidad transitoria.

Tiempo de protecciones

- **Por esta razón y sobre todo en MT, las líneas se explotan frecuentemente mediante un sistema con dos o más ciclos de reenganche:**
 - **1ro. rápido (≤ 300 ms) que permite en muchos casos reestablecer el servicio en la línea una vez que el defecto se ha quemado, y**
 - **2do e incluso un 3ro más lento, (con un t variable > 1 s) que permite realizar un 2do o 3er intento de cierre de los CB en caso de que el defecto hubiera persistido tras el 1er ciclo de reenganche.**

Tiempo de protecciones

- **Por el contrario, las líneas con cables aislados no se emplea la reconexión, ya que un defecto en un cable o en uno de sus accesorios es casi siempre un defecto permanente y el cierre posterior en defecto conduciría a su agravamiento sin ninguna posibilidad de restablecer el servicio.**

Uso de interruptores unipolares

- **Como la mayoría de defectos son monofásicos y a tierra, es posible el uso de CB automáticos unipolares que interrumpen sólo la fase en la que se ha producido el cortocircuito, manteniendo una cierta capacidad de transporte a través de las otras dos fases, incluso durante el cortocircuito.**

Uso de sistemas de excitación o válvulas de admisión rápidas

- Otra forma de mejorar la estabilidad transitoria consiste en aumentar rápidamente la I_{exc} (en <1 s), lo cual es posible con empleo de modernos sistemas de control.
- Por lo tanto en caso de una perturbación se aumenta la tensión interna del generador (E') *y también la potencia que se puede transmitir.*

Uso de sistemas de excitación o válvulas de admisión rápidas

- De forma parecida, es posible instalar en las turbinas válvulas de admisión rápidas (actúen < 1 s) se puede cerrar la entrada de agua o vapor a la turbina durante el CC, con el fin de disminuir la potencia mecánica (P_m) y *por tanto* la aceleración del rotor durante el tiempo que dura la perturbación.

Reducción de la carga

- **Cuanto menos carga tuviera el generador en el momento del CC, mejores serán las condiciones para garantizar la estabilidad transitoria.**

Características del generador

- **Cuanto mayor sea H , *más lentamente se producirá* el cambio en el ángulo del rotor, y se reducirá la energía cinética ganada por el generador (área de aceleración).**
- **Por otra parte cuanto menor sea la X'' del generador, mayor será la P_{MAX} que se puede transportar por el sistema, y por tanto menor el ángulo inicial del rotor.**

