

CORPORACIÓN “CENACE”

CURSO DE POSGRADO:

**“OPERACIÓN DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

MODULO III

ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN
INSTITUTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Quito, Ecuador, julio del 2001.



MODULO III

ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

Autor: Ing. María del C. Gimenez
Co-Autor: Dr.-Ing. Eduardo Orduña

INSTITUTO DE ENERGIA ELECTRICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN



CURSO DE POSGRADO: “OPERACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA”

MODULO III: “ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA”

INSTITUTO DE ENERGIA ELECTRICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN

INDICE DE CONTENIDO

TEMA 1 : ESTABILIDAD ESTATICA

- 1.- Introducción: Problemas de dinámica de redes y estabilidad.
- 2.- Fundamento de Máquinas Eléctricas.
- 3.- La Máquina Síncrona en Estado Estacionario
- 4.- Motor asincrónico en estado estacionario
- 5.- Ecuación Diferencial de Movimiento de la Máquina Síncrona.
- 6.- Influencia de la regulación de tensión sobre la estabilidad estática.
- 7.- Límite de Estabilidad Estática Natural y Artificial
- 8.- Estabilidad Estática en un sistema de dos máquinas
- 9.- Estabilidad Estática en los Sistemas Multimáquinas

TEMA 2: ESTABILIDAD DINAMICA

- 1.- Teorema de la constancia de los enlaces de flujo magnético
- 2.- Concepto de Estabilidad Transitoria
- 3.- Magnitudes permanentes, transitorias y subtransitorias de la máquina síncrona.
- 4.- Angulo de Transmisión durante el Estado Estacionario y durante el Fenómeno Transitorio.
Característica Potencia-Angulo
- 5.- Método de las Areas Iguales. Potencia Acelerante.
- 7.- Método de cálculo para el Problema de Estabilidad Transitoria
- 8.- Integración numérica de la ecuación diferencial de movimiento, aplicación en el cálculo del Tiempo Crítico de despeje
- 9.- Influencia de las Pérdidas de Potencia Activa. Consideración de $R \neq 0$
- 10.- Relación entre la Potencia de transmisión máxima y el tiempo máximo admisible de duración del cortocircuito.
- 11.- Influencia de la ubicación de la falla
- 12.- Impacto de diferentes tipos de cortocircuitos sobre la estabilidad transitoria
- 13.- Simulación de la respuesta dinámica del sistema
- 14.- Método directo de análisis de la estabilidad transitoria
- 15.- Métodos de mejoramiento de la estabilidad transitoria



TEMA 1: ESTABILIDAD ESTATICA

1.- Introducción: Problemas de dinámica de redes y estabilidad.

Los sistemas de suministro de energía eléctrica deben satisfacer la demanda de los consumidores en todo instante en forma confiable y respetando las restricciones relativas a la constancia de tensión y frecuencia.

El primer requisito fundamental derivado de la exigencia de satisfacer la demanda en forma confiable es el de mantener la operación en paralelo de generadores con una capacidad de generación suficiente. Si un generador pierde su sincronismo, pueden ocurrir fluctuaciones importantes de corrientes y tensiones que pueden provocar la salida de servicio de otros componentes del sistema por actuación de las protecciones.

El segundo requisito importante es el de mantener la integridad del sistema, es decir, de mantener las vinculaciones entre las centrales de generación y los centros de consumo.

Los sistemas eléctricos están permanentemente expuestos a maniobras y fallas que ponen en riesgo el cumplimiento de ambos requisitos descriptos. Debido a la presencia de dispositivos con capacidad para almacenar energía, cuando en un sistema eléctrico de potencia se produce una perturbación, ocurren procesos transitorios, es decir procesos en los cuales las variables que caracterizan el estado de funcionamiento del sistema sufren variaciones en el tiempo. Por lo tanto, cuando se está planificando un sistema eléctrico o probando la seguridad de uno existente es necesario analizar su comportamiento transitorio derivado de la ocurrencia de alguna perturbación, bien sea programada (entrada en servicio de una unidad generadora, conexión de un nuevo consumidor, etc.) o fortuita (cortocircuito en algún componente del sistema, pérdida de un generador, etc.).

Si la perturbación no involucra cambios en las Potencias, las máquinas vuelven a su estado de funcionamiento original. Si en cambio se producen variaciones de potencia, tales como modificaciones de la carga o de la generación, se alcanzará, después del transitorio, un nuevo estado de operación. En cualquiera de los dos casos se requiere que todas las máquinas del sistema permanezcan en sincronismo, es decir funcionando en paralelo y a la misma velocidad.

Se dice que un sistema es estable, si los procesos oscilatorios que se producen como consecuencia de las perturbaciones son amortiguados conduciendo a un nuevo estado estacionario.

Si se observa un sistema de suministro de energía eléctrica con gran cantidad de bloques generadores, líneas de transmisión, cargas, transformadores, etc. y se considera la complejidad de los procesos transitorios siguientes a una perturbación, se comprende la dificultad que puede presentar un estudio del comportamiento dinámico del sistema. Sin embargo debido a las diferentes constantes de tiempo involucradas, en general es posible separar el problema en partes, concentrándose en cada caso en los factores que realmente afectan a la porción de tiempo que se desea investigar.

La condición de estabilidad de un sistema está siempre relacionada con la topología, con el estado de funcionamiento previo a la perturbación y con la perturbación propiamente dicha, así, si las oscilaciones de potencia a través de una línea de vinculación de dos grupos generadores son muy grandes, puede ocurrir que la línea sea separada del sistema por actuación de las protecciones, quedando los dos grupos de máquinas desvinculados entre sí, este problema se denomina usualmente estabilidad en la transmisión e involucra esencialmente a la estabilidad de las máquinas generadoras.

De la combinación de la perturbación y las magnitudes que intervienen en el transitorio que se origina surge una clasificación de los fenómenos en:

- a- **Electromagnéticos**
- b- **Electromecánicos**

- a- Los fenómenos **Electromagnéticos** están circunscriptos a la red de transmisión. Durante su ocurrencia no se modifican los enlaces de flujo por lo tanto no involucran a las máquinas. Son



- originados, principalmente, por descargas atmosféricas y tienen una duración del orden del milisegundo. Son fenómenos muy rápidos y de muy alta frecuencia, del orden de los MHz.
- b- Los **Electromecánicos** se originan por perturbaciones en el equilibrio de las potencias, por ejemplo frente la ocurrencia de cortocircuitos o por desconexiones de carga y/o generación. Tienen una duración que va desde el milisegundo hasta algunos segundos e involucran cambios importantes en las tensiones y flujos de las máquinas generadoras, por lo tanto es necesario para su análisis representar a todos los componentes del sistema a través de ecuaciones diferenciales. Para el análisis de los fenómenos **Electromecánicos** solo es necesario representar a las máquinas sincrónicas a través de ecuaciones diferenciales.

Estudios Típicos

- 1- **Estabilidad Estática:** un sistema de suministro de energía eléctrica es estable si, frente a un cambio lento y paulatino en la Potencia mecánica o en la Carga permanece inmutable o adopta sin oscilar un nuevo estado de funcionamiento. Para llevar a cabo estudios de este tipo basta con realizar la modelación linealizada de la máquina sincrónica.
- 2- **Estabilidad Transitoria o de Corto Alcance:** cuando se realiza un estudio de este tipo no se puede dar una respuesta en forma absoluta ya que la conclusión depende tanto del estado de funcionamiento prefalla como de la perturbación y de las maniobras estabilizantes que se practique sobre el sistema para el despeje de la falla y vuelta a la topología inicial.
Durante este periodo (corto, aproximadamente 1 segundo) existe un intercambio de Potencia entre las máquinas pero la Potencia que recibe el sistema es constante.
No se debe olvidar que para todo sistema siempre es posible encontrar una perturbación lo suficientemente severa, aunque eventualmente poco probable, capaz de provocar la pérdida de estabilidad transitoria, por ello, es de suma importancia seleccionar cuidadosamente la perturbación a analizar cuando se diseña un sistema.
Durante el estado transitorio, se producen cambios en la tensión en terminales, en el ángulo de carga y en la frecuencia de las máquinas sincrónicas y puede ocurrir también, dependiendo de la perturbación que los origine, que se produzcan o no cambios en las impedancias vistas desde los terminales de las máquinas en dirección a los puntos de suministro.
El estudio de estabilidad transitoria involucra, en general, la solución de grandes sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales de cuya resolución se obtiene la evolución en función del tiempo de las variables que caracterizan el estado de funcionamiento transitorio. Entre las variables que se analizan para determinar la estabilidad de un sistema, se encuentra el ángulo de carga o ángulo de los rotores de las máquinas sincrónicas del sistema, " δ ", medido respecto de un sistema tomado como referencia y que se mantiene girando a velocidad sincrónica. Si la diferencia de ángulo entre los rotores de cualquier máquina y el sistema de referencia se incrementa indefinidamente o la oscilación no se amortigua en el tiempo, se dice que el sistema es incapaz de alcanzar un nuevo estado de funcionamiento aceptable y por lo tanto es Inestable.
- 3- **Estabilidad de Mediano Alcance:** este estudio se realiza entre el segundo y los 40 segundos, periodo en el cual ya interviene la regulación de Potencia Mecánica.
En toda expresión de potencia aparece un ángulo denominado delta " δ " que tiene que ver con el estado de carga de la máquina, cuando se pide mas potencia, se pide mas de lo que en estado de funcionamiento normal se está entregando, por lo tanto para compensar tal desbalance de potencia se modifica la energía de reserva de las masas rotantes disminuyendo la velocidad y por lo tanto la frecuencia; de esa manera se produce la orden para restaurar la frecuencia a través de la actuación de los reguladores de frecuencia-potencia.
- 4- **Estabilidad de Largo Alcance:** tiene una duración de 20 a 30 minutos y tiene en cuenta la modificación del estado inicial, lo que implica en la mayoría de los casos, la necesidad de modificar el estado de funcionamiento de manera de alcanzar uno nuevo, no oscilatorio y estable.

2.- Fundamento de Máquinas Eléctricas.



Si se coloca un alambre en el campo uniforme, por ejemplo en el campo uniforme de un imán permanente, como se muestra en la Figura.1a, existirá una fuerza sobre el conductor en cuanto este se cierre y fluya corriente por él. Esta fuerza es básica para la operación de motores eléctricos y se denomina fuerza motora o motriz. Si bien el campo no es uniforme en los bordes (por efecto de la distorsión), si la sección transversal del polo es grande en comparación con el espaciamiento del entrehierro, los efectos de esta deformación son despreciables.

Tal como se ve en la Figura.1b, la corriente hacia adentro del alambre produce un campo magnético en sentido horario, reforzando de esta manera el campo del imán sobre el alambre y debilitándolo abajo como se ve en la Figura.1c. Suponiendo que las líneas de campo son como bandas de goma que se estiran puede concluirse que la fuerza sobre el alambre es hacia abajo.

La fuerza "**F**" sobre un alambre por el cual circula una corriente y que se encuentra en presencia de un campo magnético está dada por:

$$F [N] = ILB$$

Si de la expresión anterior se despeja "**B**"

$$B [N/A.m] = F / (IL)$$

donde

L = longitud del alambre en el campo magnético [m]

I = corriente en el alambre [A]

A "**B**" se lo define como fuerza por momento de corriente y se lo denomina densidad de flujo magnético, sus unidades son: Newton sobre Ampere por metro [N/A.m], Weber por metro cuadrado [Wb/m²] o bien Tesla [T].



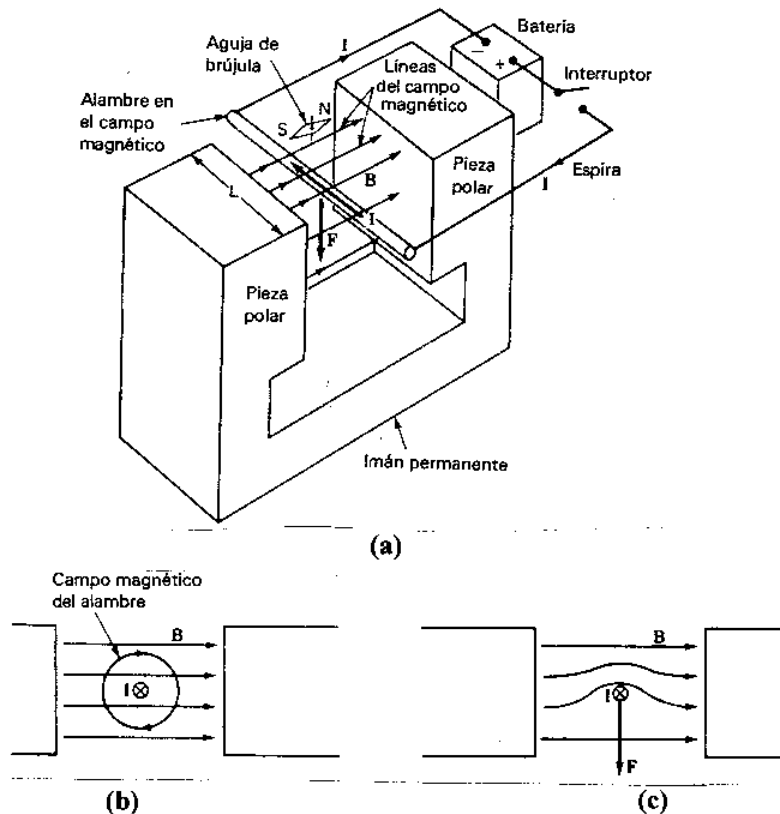


Figura.1

Observando la Figura N°1a, se ve que cuando se cierra el interruptor y fluye una corriente por la espira, existe una fuerza (en este caso hacia abajo) que actúa sobre el alambre en el campo magnético originado entre polos. Esta es la interacción básica entre el campo y la corriente para la operación de motores eléctricos nótese que la aguja de la brújula indica la dirección del campo magnético.

En las Figuras se ve que "I", "B" y "F" son mutuamente perpendiculares, cuando "I" no es perpendicular a "B" la fuerza "F" resultante es función de un ángulo denominado ϕ . Véase la Figura.2.

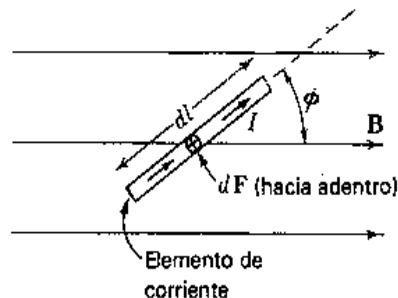


Figura.2

En general para cualquier elemento infinitesimal, dl , portador de corriente, la fuerza viene dada por:

$$dF = BI \, dl \, \sin \phi$$

que es lo mismo a:

$$\mathbf{F} = I (\mathbf{L} \times \mathbf{B})$$

"Ecuación Básica de los Motores"

Principio Generador Motor

Examinemos el segmento AB de un conductor rectilíneo que se mueve cortando en ángulo recto las líneas de inducción magnética de un campo uniforme de inducción magnética "B".



La Figura.3 muestra al conductor **AB**, que se desplaza en dirección a la fuerza "**F**" por barras metálicas conectadas entre sí por la resistencia "**r**".
El conductor **AB**, los trozos de barras y la resistencia forman un circuito conductor cerrado.

Cuando el conductor se desplaza una distancia "**b**" a velocidad constante "**v**", el flujo magnético concatenado por este circuito aumenta debido al incremento de la superficie limitada por el circuito (contorno).

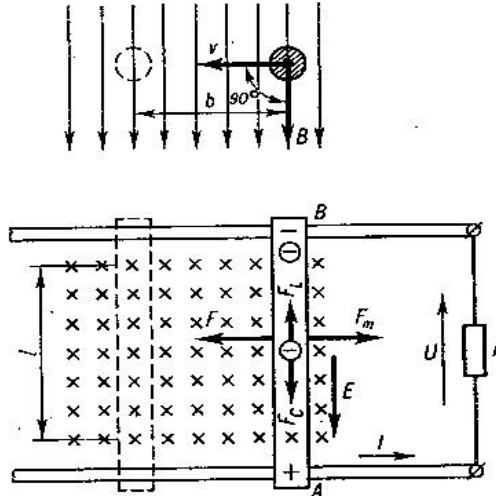


Figura.3

El incremento de flujo magnético es: $Df = B.DS = B.b.l$

Donde "**l**" es la longitud de la parte del conductor **AB** que se encuentra en el campo magnético.

El valor absoluto de la f.e.m en el circuito es:

$$E = Df / Dt = B.b.l / Dt \quad (2.1)$$

"**Dt**" es el tiempo durante el cual el conductor **AB** se desplaza la distancia "**b**"; por lo tanto, "**b/Dt**" es una velocidad denominada por "**v**" que es la velocidad del movimiento del conductor; por eso

$$E = Bvl \quad (2.2)$$

Si el conductor se desplaza formando un ángulo menor de 90° con la dirección de la inducción magnética del campo, Figura.4, el incremento del flujo magnético en el tiempo "**Δt**" a la velocidad "**v**" será:

$$Df = B b l \sin \alpha \quad (2.3)$$

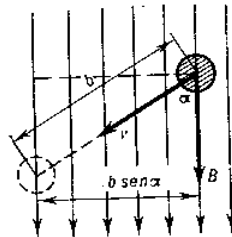


Figura.4

y la f.e.m en el circuito (espira) será:

$$E = Bvl \sin \alpha \quad \text{"Expresión General de la Ley de Faraday"} \quad (2.4)$$

La expresión (2.4), caracteriza la inducción de una f.e.m. no solo en un circuito (espira) cerrado, sino también en cualquier trozo de conductor que corta un campo magnético.



Cuando $\alpha = 90^\circ$ se obtiene el valor máximo de la f.e.m. y cuando $\alpha = 0^\circ$ la f.e.m. inducida es nula.

Fuerza de Lorentz: El campo magnético actúa sobre las partículas cargadas solo en el conductor AB, que se mueve en el campo magnético. En otras partes del circuito conductor (barras y resistencia) este no actúa, ya que ellas se encuentran fuera del campo y son fijas. Teniendo en cuenta esto, analicemos al conductor AB no conectado a las partes restantes del circuito.

Los electrones libres de la sustancia del conductor AB, que se encuentran en el campo magnético, realizan un movimiento complejo, ya que simultáneamente se desplazan con respecto al conductor (desplazamiento interior, por ejemplo térmico) y junto con el conductor a la velocidad " v " bajo la acción de la fuerza externa " F ", aplicada al conductor.

En este caso interesa solamente la componente de la velocidad total de los electrones que está vinculada al movimiento del conductor.

La fuerza electromagnética que actúa sobre cada electrón (F_1 es la fuerza de Lorentz), de acuerdo con la regla de la mano izquierda, está dirigida a lo largo del conductor, y su valor se determina por la expresión:

$$F_1 = B \cdot e \cdot v \quad (2.5)$$

Acumulándose en un extremo del conductor, los electrones originan una carga negativa excesiva, mientras que en el otro extremo se forma una carga positiva de igual magnitud.

La división de las cargas en el conductor da lugar a la aparición de un campo eléctrico y a la interacción de las partículas separadas. Las fuerzas del campo eléctrico " F_c " (*Fuerzas de Coulomb*) son fuerzas de atracción de las partículas, por eso ellas están dirigidas en sentido contrario a las fuerzas electromagnéticas F_1 , que en este caso son exteriores.

Si el conductor se mueve con velocidad constante, las fuerzas electromagnéticas no cambian, mientras que las fuerzas del campo eléctrico aumenta a medida que se acumulan las cargas en los extremos del conductor.

La separación de las cargas se interrumpe cuando las fuerzas eléctrica y electromagnética se igualan, lo que denota la existencia entre los extremos del conductor de una diferencia de potencial o una tensión eléctrica estable.

La acción del campo magnético sobre los electrones libres del conductor durante su movimiento es la causa de la aparición de la fuerza electromotriz, llamada f.e.m. de inducción electromagnética.

Transformación Mutua de la Energía Mecánica y Eléctrica.

La acción electromecánica del campo magnético y la inducción electromagnética se emplean para transformar la energía mecánica en eléctrica y viceversa.

Los dispositivos a través de los cuales se realizan estas transformaciones se llaman máquinas eléctricas. La máquina para convertir la energía mecánica en eléctrica se llama Generador y la máquina que transforma la energía eléctrica en mecánica se llama Motor.

Principio de Transformación de energía mecánica en eléctrica:

El conductor AB de la Figura.3 se mueve a una velocidad constante gracias a la energía mecánica de un motor primario cualquiera, o sea, de una fuente de energía mecánica.

La potencia mecánica del movimiento del conductor es:

$$P_{mec} = F \cdot v \quad (2.6)$$

Donde " F ", es la fuerza que actúa sobre el conductor y es ejercida por el motor primario y " v " es la velocidad del movimiento.

Gracias a la inducción electromagnética en el conductor actúa una f.e.m. y hay corrientes, que se encuentran relacionadas a través de la siguiente expresión:



$$I = E / (r_0 + r) \quad (2.7)$$

Donde " r_0 " es la resistencia del conductor **AB** (resistencia interna de la fuente de energía eléctrica); " r " es la resistencia de la parte externa del circuito, incluida la resistencia del receptor y parte de las barras que entran en el circuito.

En este caso, el conductor **AB** es la fuente de f.e.m, cuya potencia eléctrica es:

$$P = E I \quad (2.8)$$

A menudo la magnitud "**P**" es denominada *Potencia Electromagnética*.

Al aparecer la corriente en el conductor **AB** surge una *Fuerza Electromagnética* "**F_m**" que actúa en dirección perpendicular a la de la corriente. Aplicando la regla de la mano derecha se puede comprobar que la fuerza electromagnética "**F_m**" tiene un sentido contrario al de la fuerza.

Por lo tanto, en este caso la fuerza exterior "**F es motora**", mientras que la '**F_m es frenante**'.

Cuando la velocidad "**v**" es constante (movimiento estacionario) las fuerzas motora y frenante son iguales, así:

$$F = F_m = BIl \quad (2.9)$$

Sustituyendo la expresión de la fuerza en la fórmula (2.6) se obtiene:

$$P_{mec} = Fv = Bvl I \quad (2.10)$$

dado que: $Bvl = E \quad (2.11)$

entonces:

$$P_{mec} = EI = P \quad (2.12)$$

Por consiguiente la potencia mecánica del motor primario es igual a la potencia eléctrica de la fuente.

La expresión (2.12) demuestra que al moverse el conductor en un campo magnético en dirección de la fuerza mecánica tiene lugar la transformación total de la energía mecánica en eléctrica.

La tensión en los extremos del conductor **U_{AB}** es simultáneamente la tensión de la parte exterior del circuito. Esta tensión es menor que la f.e.m. debido a la caída de tensión en la resistencia del conductor. Así:

$$U_{AB} = E - Ir_0 = Ir \quad (2.13)$$



Principio de Transformación de Energía Eléctrica en Energía Mecánica:

El proceso de transformación inverso al demostrado anteriormente se puede realizar analizando el mismo conductor anterior AB y modificando levemente el circuito eléctrico que lo compone Figura.5.

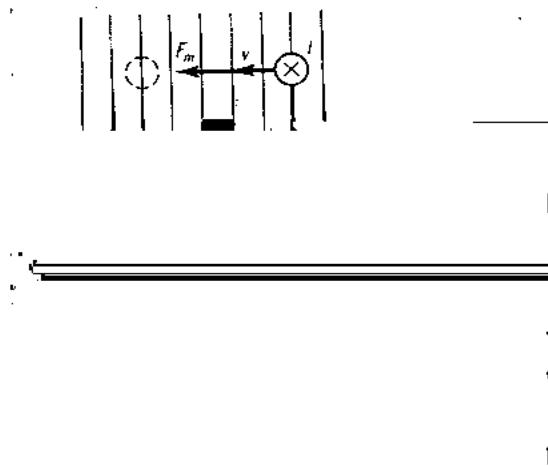


Figura.5

En lugar del receptor de energía eléctrica se conecta al circuito una fuente de f.e.m. "E₀".

Si en los extremos del conductor AB se suministra y se mantiene una tensión U_{AB} mayor que su f.e.m. "E", la corriente en el conductor cambia el sentido de acuerdo con la expresión (2.13).

Este estado se logra en el circuito gracias a la existencia de la f.e.m. "E₀" de la fuente de energía eléctrica.

Considerando positivo el sentido de la corriente en la Figura.5, su magnitud la hallamos según la segunda Ley de Kirchoff:

$$U_{AB} - E = I r_0 \quad (2.14)$$

En este caso la f.e.m. de inducción en el conductor AB está dirigida contra la corriente y es una fuerza **contra electromotriz**.

El sentido contrario de la f.e.m y de la corriente es un síntoma de consumo de energía eléctrica por el dispositivo dado y por su transformación en otro tipo de energía.

En efecto, al cambiar el sentido de la corriente cambia también el sentido de la fuerza electromagnética "F_m", esta toma ahora el sentido de la velocidad del movimiento del conductor. La "F_m" se hace motora. Contraria resulta ahora la fuerza mecánica (por ejemplo la fuerza de rozamiento).

Para este circuito eléctrico el balance de potencias es el siguiente:

El conductor AB es un receptor de energía eléctrica y su potencia eléctrica es:

$$P = U_{AB} I \quad (2.15)$$

Puesto que:

$$U_{AB} = E + I r_0 \quad (2.16)$$

entonces:

$$P = EI + I^2 r_0 \quad (2.17)$$



que teniendo en cuenta la expresión (2.11), la expresión (2.17) se transforma en:

$$P = BvI + I^2 r_o = F_m v + I^2 r_o \quad (2.18)$$

El primer sumando de esta expresión es la potencia mecánica del conductor móvil. y el segundo, la potencia de pérdida en el mismo conductor de acuerdo a la Ley de Joule.

Debido a que la energía mecánica surge por acción de las fuerzas del campo magnético, puede tenerse la impresión de que el conductor se mueve gracias a la energía del campo magnético pero, en realidad, la energía eléctrica de la fuente se transforma en energía mecánica, lo que se confirma por medio de la ecuación (2.18). En este proceso, el campo magnético solo es un intermediario al transformarse la energía. Esta observación se extiende también a la transformación inversa de la energía, es decir de mecánica a eléctrica.

3.- La Máquina Sincrónica en Estado Estacionario

La máquina sincrónica que opera como un generador de corriente alterna impulsada por una turbina para convertir la energía mecánica en energía eléctrica es la principal fuente de generación de potencia eléctrica en el mundo. Cuando opera como motor, la máquina convierte la energía eléctrica en mecánica.

Los devanados de las máquinas sincrónicas polifásicas constituyen un grupo de circuitos eléctricos acoplados inductivamente, algunos de los cuales se encuentran en rotación relativa con respecto a otros, por lo que las inductancias mutuas son variables. Las ecuaciones desarrolladas para los enlaces de flujo de los diversos devanados son aplicables tanto para el análisis del estado de funcionamiento estacionario como para el transitorio.

Por simplicidad, solo se consideran los circuitos magnéticos lineales sin considerar la saturación, lo cual, permite referirse por separado al flujo y a los enlaces de flujo producidos por una componente de la fuerza magnetomotriz (Fmm), aunque en realidad en cualquier máquina eléctrica solo se presenta el flujo físico total debido a la Fmm resultante de todas las fuentes magnetizantes.

Las máquinas sincrónicas se encuentran fundamentalmente constituidas por dos estructuras ferromagnéticas principales:

- a- El **estator** o **armadura** que como su nombre lo indica carece de movimiento. Es esencialmente un cilindro hueco con ranuras dispuestas longitudinalmente en las cuales se encuentran alojadas las bobinas del devanado de armadura; estos devanados llevan la corriente suministrada a la carga en el caso de una máquina actuando como generador o la corriente recibida desde una fuente de corriente alterna en el caso de funcionamiento como motor.
- b- El **rotor** es la parte de la máquina que se encuentra montada sobre un eje y que rota dentro del hueco del cilindro del estator. El devanado sobre el rotor se denomina devanado de campo y es alimentado por corriente continua.

La Fmm de muy alta intensidad producida por la corriente del arrollamiento de campo se combina con la Fmm producida por las corrientes de los devanados de armadura, el flujo resultante en los espacios de aire que hay entre el rotor y el estator, entrehierro, genera tensiones en las bobinas de los devanados de la armadura y produce el par electromagnético entre estator y rotor.

El devanado de campo es alimentado con corriente continua a través de un excitador, que bien puede ser un generador montado sobre el mismo eje o una fuente de corriente continua separada conectada a los devanados de campo por medio de escobillas sobre anillos rozantes. Generalmente los grandes generadores de corriente alterna tienen excitadores que consisten en una fuente de corriente alterna con rectificadores de estado sólido.

Si la máquina es un generador, el eje es impulsado por una fuente de energía mecánica, que por lo general es una turbina de vapor o hidráulica. El par electromagnético desarrollado en el generador cuando entrega potencia se opone al par de la fuente de energía mecánica. La diferencia entre esos dos pares se debe a las pérdidas en el núcleo de acero y la fricción.



En un motor el par electromagnético que se desarrolla en la máquina, despreciando las pérdidas por fricción y en el núcleo, se convierte en el momento de giro del eje que impulsa la carga mecánica.

En la Figura.6, se muestra un generador trifásico muy elemental. El devanado de campo (bobina f) da lugar a los polos señalados como Norte y Sur.

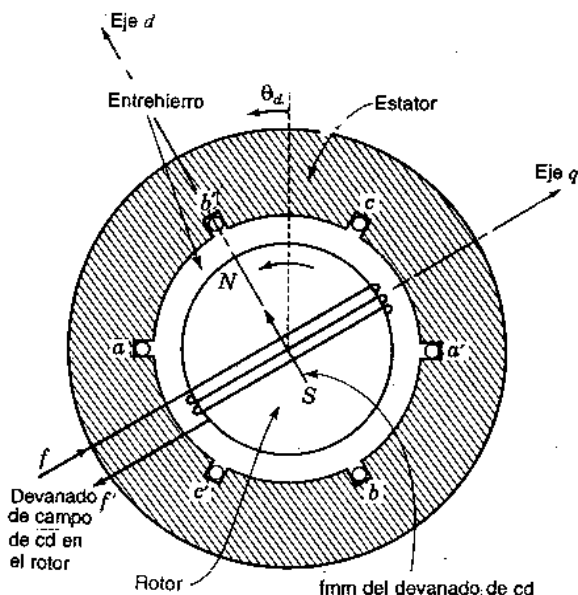


Figura.6

El eje de los polos de campo se llama eje directo o eje " d " y a 90° de este se encuentra el eje en cuadratura o simplemente eje " q ".

Como se ve en la Figura.6 la dirección positiva a lo largo del eje " d " adelanta 90° a la dirección positiva a lo largo del eje " q ", en sentido antihorario. En el esquema se muestra una máquina de rotor cilíndrico.

En las máquinas reales, los devanados tienen un gran número de vueltas distribuidas en las ranuras alrededor de la circunferencia del rotor; el intenso campo magnético enlaza las bobinas del estator para inducir una tensión en los devanados de la armadura en la medida que el eje es impulsado por la fuente de energía mecánica.

Los lados opuestos de una bobina que casi es rectangular, están en las ranuras a y a' separadas 180 grados. Bobinas similares están en las ranuras $b - b'$ y $c - c'$. Los lados de las bobinas en las ranuras a, b y c están separados 120° entre sí.

En la Figura.7 se muestra un generador sincrónico de polos salientes con cuatro polos es decir dos pares de polos. Aunque no se puede apreciar en la figura, generalmente, las máquinas de polos salientes tienen devanados amortiguadores que consisten en barras de cobre cortocircuitadas. El propósito del arrollamiento amortiguador es el de reducir las oscilaciones mecánicas del rotor hasta la velocidad sincrónica, que es determinada por el número de polos de la máquina y la frecuencia del sistema de alimentación al que está conectada.



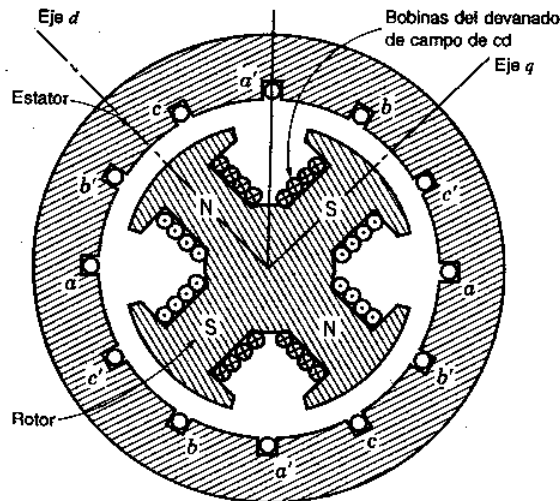


Figura.7

En una máquina de dos polos, se genera un ciclo de voltaje por cada revolución del rotor, en una de cuatro polos se generan dos ciclos por revolución, como el número de ciclos por cada revolución es igual al número de pares de polos, la frecuencia está dada por:

$$f = (P/2) \cdot (n / 60) \quad (3.1)$$

Donde "n" es la velocidad del eje dada en revoluciones por minuto, la velocidad de la máquina viene dada por la expresión:

$$ns = f/Np \quad (3.2)$$

Donde "ns" es la velocidad sincrónica de la máquina, "Np" es el número de pares de polos y "f" es la frecuencia de la red.

Por lo general, los turbogeneradores que queman combustibles fósiles son máquinas de dos polos mientras que los hidrogeneradores son máquinas más lentas con varios pares de polo.

Debido a que un ciclo de tensión (360° grados de la onda de tensión) se genera cada vez que un par de polos pasa una bobina, es necesario distinguir entre los grados eléctricos usados para expresar la tensión y la corriente y los grados mecánicos empleados para describir la posición del rotor, en una máquina de dos polos, los grados eléctricos y los mecánicos coinciden.

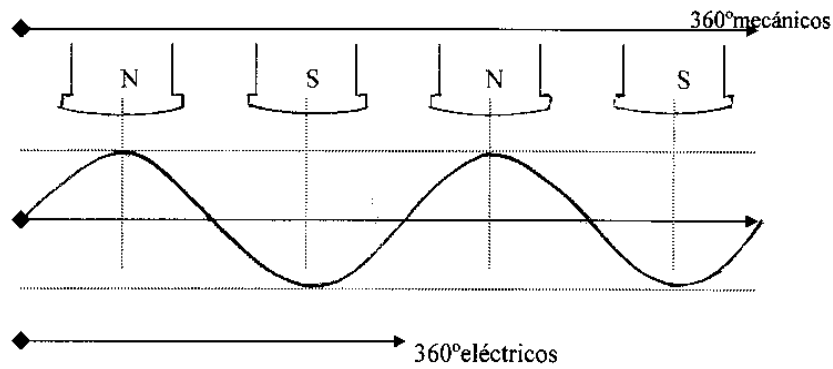
La expresión que relaciona los grados eléctricos con los mecánicos es:

$$qe = Np \cdot qm \quad (3.3)$$

Cuando la máquina está en vacío por el bobinado estatórico circulan corrientes, supóngase una máquina de 2 polos (Np=1). Si se alimenta el estator con una corriente trifásica alterna, se origina en el entrehierro una Fmm que gira a la misma velocidad que la rueda polar. Cuando la máquina es de 4 polos (Np=2) los grados eléctricos $qe = 2 \cdot qm$ (Ver Figura.8)



Máquina de CUATRO POLOS



Máquina de DOS POLOS

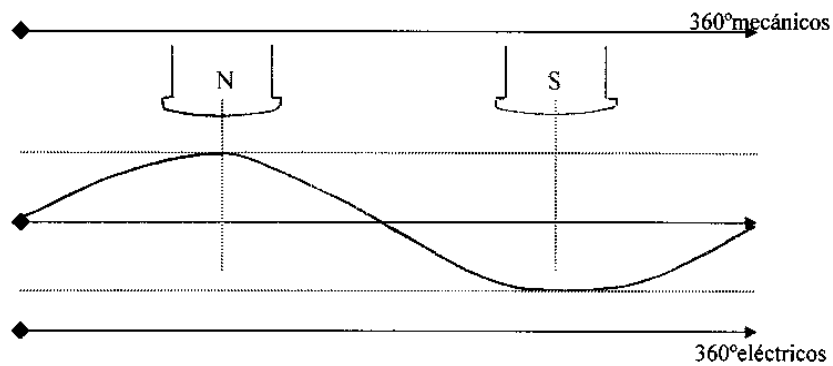


Figura.8

Circuito Equivalente de una Máquina Sincrónica

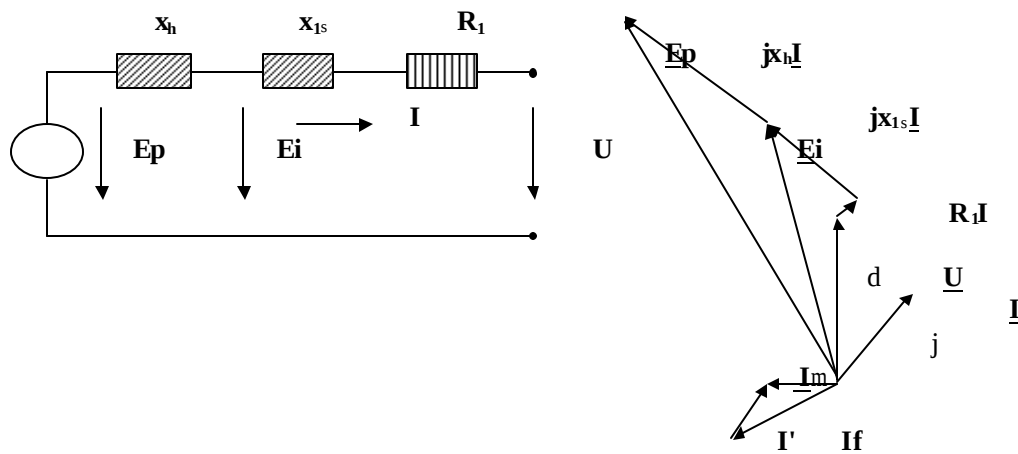


Figura.9

donde:

- $x_h =$ reactancia principal del estator



- x_{1s} = reactancia de dispersión
- R_1 = resistencia estatórica.
- E_p = Tensión de excitación o Tensión de la Rueda Polar
- E_i = verdadera fuerza electromotriz generada en la máquina necesaria para atender las caídas en la carga y en las reactancias de dispersión.
- I_m = corriente de magnetización resultado de la I de excitación de los polos (I_f) y de la corriente de carga, debido a esta se genera la inducción que origina E_i .

La suma de la reactancia principal del estator y la reactancia de dispersión se denomina reactancia sincrónica, así:

$$x_d = x_h + x_{1s}$$

El ángulo formado entre la tensión de la rueda Polar (E_p) y la tensión de carga se denomina ángulo de carga o de par y se lo designa con la letra ' δ ' (delta), verdaderamente el ángulo de carga es el desfase entre las tensiones E_i y E_p , pero como el ángulo entre U y E_i es muy pequeño, se lo desprecia.

El ángulo de par ' δ ' es función de la carga, para cargas puramente inductivas o capacitivas, el ángulo es cero pero el valor de la Tensión de Excitación es muy distinto, obsérvese los diagramas fasoriales de las Figura.10a y 10b en los cuales se han graficado las dos situaciones de carga mencionadas.

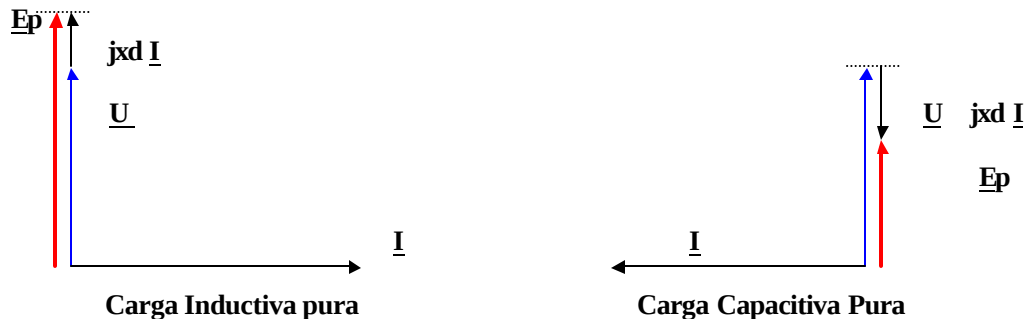


Figura.10a

Figura.10b

La Figura.10a muestra el caso de carga inductiva pura. La corriente inductiva debilita el campo inducido en el rotor por lo tanto debo colocar una excitación importante dicho efecto se puede apreciar rápidamente observando el valor de la tensión de excitación E_p . En contrapartida observando la Figura.10b se observa que cuando la carga es capacitiva pura es necesaria una tensión mucho menor para obtener como resultado la misma tensión U del caso anterior.

Cuando el generador debe alimentar una carga puramente inductiva se dice se encuentra en operación **sobreexcitada** y cuando la carga es capacitiva pura la operación es **subexcitada**.

Cupla Electromagnética en la Máquina Sincrónica

Siendo la Potencia eléctrica que entrega la máquina:

$$P = \text{Re} \{ 3 \underline{U} \underline{I}^* \} \quad (3.4)$$

Reemplazando en la ecuación anterior el valor de $\underline{U}$ obtenido del circuito equivalente



$$\underline{U} = \underline{E_p} - R_1 \underline{I} - j x_d \underline{I} \quad (3.5)$$

se tiene:

$$P = 3 \operatorname{Re} \{ \underline{E_p} \underline{I}^* \} - 3 \operatorname{Re} \{ R_1 \underline{I} \underline{I}^* \} - 3 \operatorname{Re} \{ j x_d \underline{I} \underline{I}^* \}$$

$$P = 3 \operatorname{Re} \{ \underline{E_p} \underline{I}^* \} - 3 R_1 I^2 = P_d - P_p$$

donde:

$$3 \operatorname{Re} \{ \underline{E_p} \underline{I}^* \} = \text{Potencia en el campo giratorio}$$

$$3 R_1 I^2 = \text{Pérdidas en el estator}$$

de (3.5) y considerando que R_1 es muy pequeña

$$\underline{I} = j (\underline{U}/x_d) - j (\underline{E_p}/x_d)$$

$$P_d = 3 \operatorname{Re} \{ \underline{E_p} (-j (\underline{U}/x_d) + \underline{E_p}^*/x_d) \}$$

con:

$$\underline{E_p} = E_p e^{j\delta}$$

$$P_d = 3 \{ (U E_p)/x_d \} \sin \delta$$

recordando que Cupla es Potencia eléctrica dividida en velocidad angular, la Cupla eléctrica es:

$$C_e = P_d / \omega_{mec} = p \cdot P_d / \omega$$

$$C_e = [3 \cdot p \cdot U \cdot E_p / (\omega x_d)] \sin \delta$$

En la Figura.11 se ha graficado la expresión de Cupla Eléctrica en función del ángulo delta.

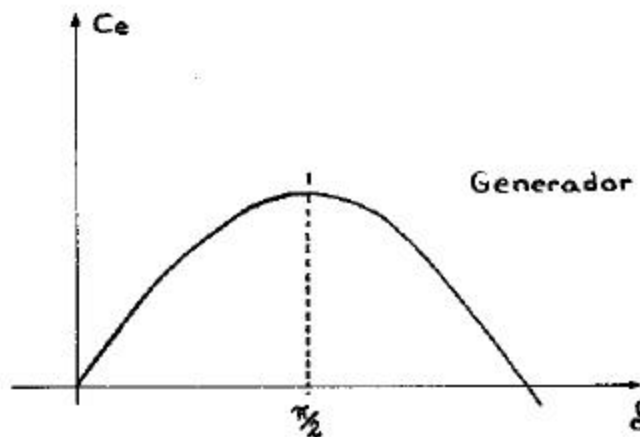


Figura.11



Estados de operación de la máquina Sincrónica.

Operación Aislada: Cualquier cambio en la excitación de la máquina incide directamente en la tensión en bornes ya que la tensión está definida directamente por la máquina.

Operación Interconectada: En este caso la tensión está impuesta por la red y cualquier cambio en la excitación no afecta la tensión en bornes. La tensión y la frecuencia de la red están definidas directamente por el conjunto de las máquinas generadoras presentes.

Conexión a una Red Rígida: Se define como Red Rígida a una red muy potente en comparación con la máquina, en este caso tanto la frecuencia como la tensión en módulo y fase son constantes.

Cuando la máquina se encuentra conectada a una red rígida la tensión de la red, es decir $\underline{U}$, es constante, si en la ecuación de tensiones se despeja la corriente, la ecuación queda:

$$\underline{I} = j(\underline{U}/x_d) - j(\underline{E}_p/x_d) e^{j\delta}$$

Donde " $\underline{E}_p$ " y " δ " son parámetros y " $\underline{U}$ " es una constante.

La Figura.12 representa el diagrama de corrientes de la máquina sincrónica, en el se analizará como incide en las variables del problema la variación de los estados de operación

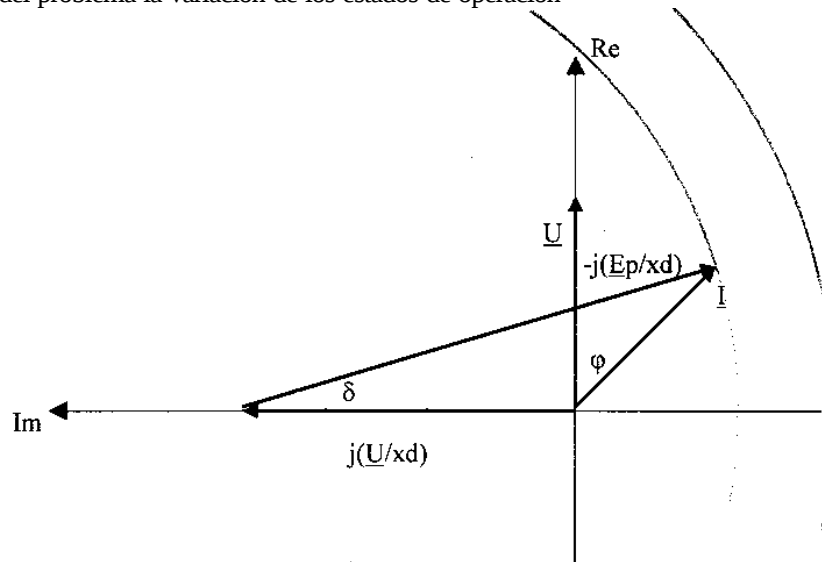


Figura.12

a- Cambio en la Cupla a Corriente de Excitación Constante: Supóngase que se produce un cambio en la cupla mecánica manteniendo constante la excitación y suponiendo que el cambio es tan paulatino y lento que la velocidad sincrónica permanece constante, así, un aumento de cupla con $(\underline{E}_p/x_d)$ constante (corriente de excitación constante), produce un aumento en la Potencia activa y un aumento del ángulo delta. Traducido a corriente, ese aumento de la potencia activa debe verse como un incremento en el módulo de la componente activa de la corriente, para que ello suceda la corriente de carga debe deslizarse sobre una circulo de radio igual a $(\underline{E}_p/x_d) = \text{cte}$, de esa manera aumenta el ángulo delta, hasta una posición tal que $\delta = 90^\circ$ y la componente activa de la corriente es máxima. Figura.12



b- Aumento en la Excitación manteniendo constante la Cupla: Ahora supóngase tener el caso en que se produce un aumento de la excitación a cupla mecánica constante. Si la cupla mecánica es constante, la Potencia de carga también debe serlo y por lo tanto la componente activa de la corriente debe mantenerse constante. Como el cambio es en la excitación de la máquina, la componente (E_p/x_d) no es constante y se modifica deslizándose sobre una recta que define $\underline{U}=\text{cte}$ e $\underline{I}=\text{cte}$. Figura.13.

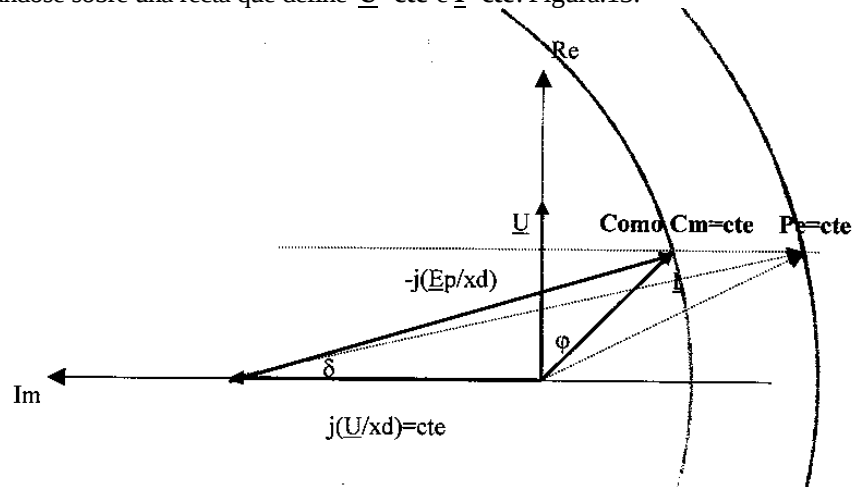


Figura.13

4. Motor asincrónico en estado estacionario

Un motor asincrónico está físicamente constituido, al igual que un generador, por dos partes que se encuentran en movimiento relativo una respecto de la otra., definiendo los siguientes parámetros:

- f_1 = frecuencia de la alimentación del estator.
- p = número de pares de polos
- f_2 = frecuencia de la tensión inducida en el rotor

Al alimentar al estator con un sistema trifásico de corrientes, se induce un campo. Este campo estático gira con velocidad sincrónica ya que está absolutamente impuesta por la red. La velocidad sincrónica del campo estático es:

$$w = (2 p \cdot f_1)/p$$

Un motor no puede nunca alcanzar la velocidad sincrónica porque si esto ocurre no hay movimiento relativo y por lo tanto no hay inducción, sin inducción no hay corriente, y sin corrientes no hay cupla, por lo tanto "no habría motor".

Se define como deslizamiento "s" a la relación existente entre la velocidad del motor (velocidad angular mecánica de giro del eje del rotor) y la velocidad angular sincrónica del campo rotante del estator y la velocidad del rotor:

$$dq/dt$$

El deslizamiento es:

$$s = [w - (dq / dt)] / w$$



En el rotor también hay un sistema trifásico de corrientes inducidas cuya frecuencia es f_2 , así:

$$f_2 = s f_1$$

En el arranque ambas frecuencias son iguales.

La velocidad del campo rotante originado por las corrientes del rotor, respecto del rotor:

$$(2 p \cdot f_2)/p = (2 p \cdot s f_1)/p = s w$$

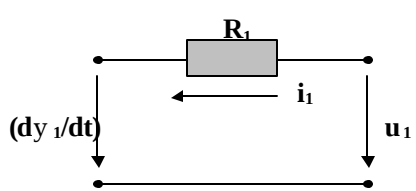
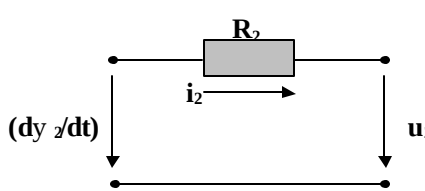
La velocidad angular del rotor es:

$$(dq/dt) = w (1-s)$$

Así la velocidad del campo rotante del rotor respecto del estator es:

$$s w + w (1-s) = w$$

El comportamiento de un motor asíncrono es análogo al de un transformador, así se habla de rotor y estator como en el transformador se habla de primario y secundario (primario = estator; secundario = rotor). Representando los circuitos equivalentes rotórico y estatórico y analizando a cada uno por separado se tiene:

ESTATOR	ROTOR
	
$u_1 = R_1 \cdot i_1 + (dy_1/dt)$	$u_2 = -R_2 \cdot i_2 + (dy_2/dt)$
$y_1 = N_1 \cdot f_{max} \cdot \text{sen}(wt + a)$	$y_2 = N_2 \cdot f_{max} \cdot \text{sen}(wt + a - q)$
$e_1 = (dy_1/dt)$	$e_2 = (dy_2/dt)$
$e_1 = N_1 \cdot f_{max} \cdot w \cdot \cos(wt + a)$	$e_2 = N_2 \cdot (w - dq/dt) \cdot f_{max} \cdot w \cdot \cos(wt + a - q)$
$e_1 = \text{Re} \{ N_1 \cdot f_{max} \cdot w \cdot e^{jw t} \cdot e^{ja} \}$	$(w - dq/dt) = s \cdot w$
$e_1 = \text{magnitud que varía en forma senoidal con frecuencia } \omega$	$\int (w - dq/dt) dt = s \cdot w \cdot t$
	$e_2 = \text{Re} \{ N_2 \cdot f_{max} \cdot s \cdot w \cdot e^{j(w t - q)} \cdot e^{ja} \}$
$\underline{E}_1 \cdot e^{jw t} \cdot \sqrt{2} \quad \underline{E}_1 = (N_1 \cdot f_{max} \cdot w \cdot e^{ja}) / \sqrt{2}$	$\underline{E}_2 \cdot e^{jsw t} \cdot \sqrt{2} \quad \underline{E}_2 = (N_2 \cdot f_{max} \cdot s \cdot w \cdot e^{ja}) / \sqrt{2}$

La relación de tensiones Estatórica y Rotórica es función del deslizamiento y viene dada por:

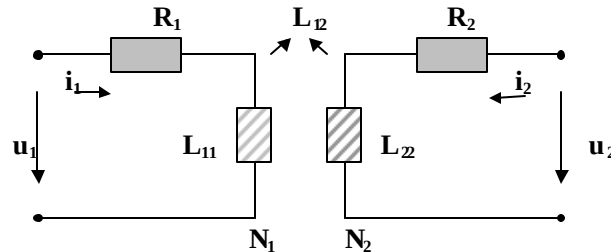
$$(\underline{E}_1/\underline{E}_2) = (N_1/N_2) \cdot (1/s)$$



Cuando el circuito del Rotor está abierto, es decir con el rotor en reposo ($s=1$) es equivalente al transformador en vacío

$$\underline{E}_2 = (N_2/N_1) \cdot \underline{E}_1$$

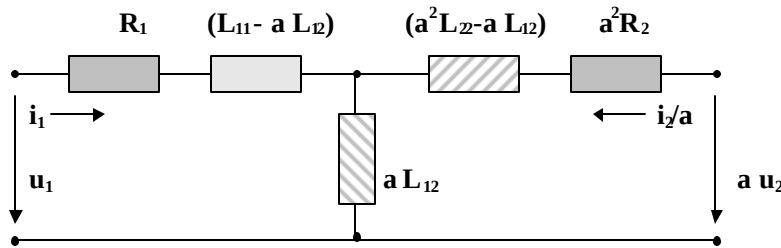
Considerando las inductancias propias y mutual de los arrollamientos del motor asincrónico el circuito equivalente puede ser representado de la siguiente manera:



Definiendo:

$$a = (N_1/N_2)$$

El circuito equivalente queda:



Rotor visto desde el Estator: $\underline{E}_2 e^{j\omega t} = (R_2 + j s \omega L_2 s) \underline{I}_2 e^{j\omega t}$

Multiplicando a ambos miembros por a al cuadrado y dividiendo en " a " se obtiene la tensión del Rotor referida al estator:

$$a \underline{E}_2 e^{j\omega t} = (a^2 R_2 + j s a^2 \omega L_2 s) (\underline{I}_2/a) e^{j\omega t}$$

recordando que:

$$(E_1/E_2) = (N_1/N_2) (1/s) = a/s \quad \text{p} \quad a E_2 = s E_1$$

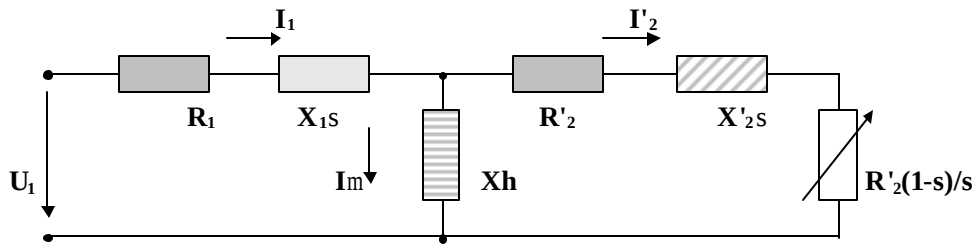
$$s \underline{E}_1 e^{j\omega t} = (R'_2 + j s X'_2 s) (\underline{I}_2 e^{j\omega t})$$

Pasando la " s " al segundo miembro y sumando a la expresión $[R'_2 \cdot (1-s)/s]$ se obtiene:

$$\underline{E}_1 e^{j\omega t} = (R'_2 + j X'_2 s + R'_2 \cdot (1-s)/s) (\underline{I}_2 e^{j\omega t})$$

Esta última expresión corresponde al siguiente circuito equivalente:





donde:

X_1s y X'_2s = Reactancias de dispersión
 X_h = Reactancia de magnetización

haciendo: $X_1 = X_1s + X_h$
 $X'_2 = X'_2s + X_h$

Se define el coeficiente de dispersión que representa el acoplamiento de las corrientes como:

$$s = 1 - (X_h^2 / (X_1 \cdot X'_2))$$

Escribiendo la expresión de la corriente I_1 se obtiene:

$$I_1 = \left[\frac{R'_2 + j X'_2 s}{R'_2(R_1 + j X_1) + j X'_2 (R_1 + j s X_1) s} \right] \cdot U_1$$

Ecuación que representa una circunferencia cuyos parámetros son:

$$Y_M = \left[\frac{-j (X_1/2) (1+s)}{(R_1^2 + s X_1^2)} \right] \cdot U_1 \quad X_M = \left[\frac{(R_1)}{(R_1^2 + s X_1^2)} \right] \cdot U_1 \quad r_M = \left[\frac{(X_1/2) (1-s)}{(R_1^2 + s X_1^2)} \right] \cdot U_1$$

Graficando se obtiene la Figura.14

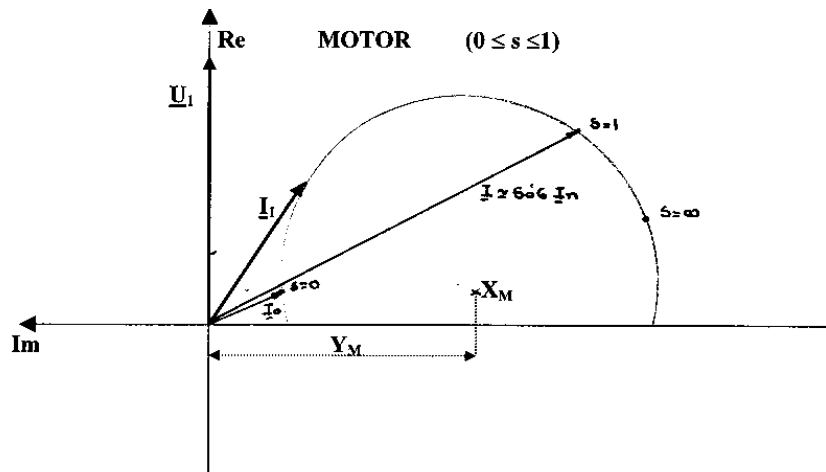


Figura.14

Para $s=0$ (vacío)

$$I_{10} = [U_1 / (R_1 + j X_1)]$$



Para $s=1$ (cortocircuito) $I_k = \left[\frac{(R'_2 + j X'_2) \underline{U}_1}{R'_2(R_1 + j X_1) + j X'_2(R_1 + j s X_1)} \right]$

Para $s \neq 1$ $I_s = \left[\frac{\underline{U}_1}{R_1 + j s X_1} \right]$

Momento de Rotación del Motor Asíncrono (Cupla)

Sea la Potencia eléctrica:

$$P = \operatorname{Re} \{ 3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \} = \operatorname{Re} \{ 3 (R_1 + j X_1 s) \cdot \underline{I}_1 \underline{I}_1^* + j 3 X_h (\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) \underline{I}_1^* \}$$

$$3 \cdot \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1 \cos \phi = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 - \operatorname{Re} \{ j 3 X_h \underline{I}'_2 \underline{I}_1^* \}$$

Potencia que el motor toma de la red Pérdidas en el Estator Potencia en el Entrehierro "Pd"

La Potencia que el motor toma de la red está dividida en Pérdidas en el Rotor y Potencia en el entrehierro. La potencia en el entrehierro "Pd" es la potencia disponible en el entrehierro y sirve para mover la carga. Recordando la expresión de la corriente $\underline{I}_1$:

$$\underline{I}_1 = \left[\frac{R'_2 + j X'_2 s}{R'_2(R_1 + j X_1) + j X'_2(R_1 + j s X_1)} \right] \cdot \underline{U}_1$$

Haciendo $R_1=0$

$$\underline{I}_1 = \left[\frac{R'_2 + j X'_2 s}{X_1(j R'_2 - s X'_2 s)} \right] \cdot \underline{U}_1$$

Del circuito equivalente:

$$\underline{I}'_2 = \left[\frac{j X_h s \underline{I}_1}{(R'_2 + j X'_2 s)} \right] = \left[\frac{j X_h s \underline{U}_1}{X_1(j R'_2 - s X'_2 s)} \right]$$

$$\underline{I}_1^* = \left[\frac{(R'_2 - j X'_2 s) \cdot (j R'_2 - s X'_2 s)}{X_1 \cdot (-j R'_2 - s X'_2 s) \cdot (j R'_2 - s X'_2 s)} \right] \cdot \underline{U}_1$$

Reemplazando las últimas dos expresiones en la fórmula de potencia en el entrehierro queda:

$$P_d = \frac{(3 X_h^2 U_1^2 R'_2 s)}{[X_1^2 (R'^2_2 + (s X'_2 s)^2)]}$$

Quedando la cupla electromagnética en el entrehierro:

$$C_e = P_d / (2\pi n_s)$$

Y la potencia mecánica en el eje:



$$P_{mec} = C_e 2 p n s (1-s) = P_d (1-s)$$

Reemplazando en la expresión de la cupla electromagnética la velocidad angular $[w=2p.ns=(2p.f_1)/p]$ y la Potencia en el entrehierro, se obtiene:

$$P_d = \frac{3p \cdot X_h^2 \cdot R_2' s}{2p \cdot f_1 \cdot X_1^2 \cdot [R_2'^2 + (s X_2')^2]} U_1^2$$

Graficando la Cupla electromagnética en el entrehierro en función de la velocidad "ns" se obtiene la Figura.15 en la cual se ve que para distintos valores de tensión se obtienen distintas curvas. La curva de línea llena corresponde a la tensión nominal y la punteada a tensiones menores. La curva gruesa que corta a la cupla en los puntos $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ y $\mathbf{z}$ representa a la característica de carga.

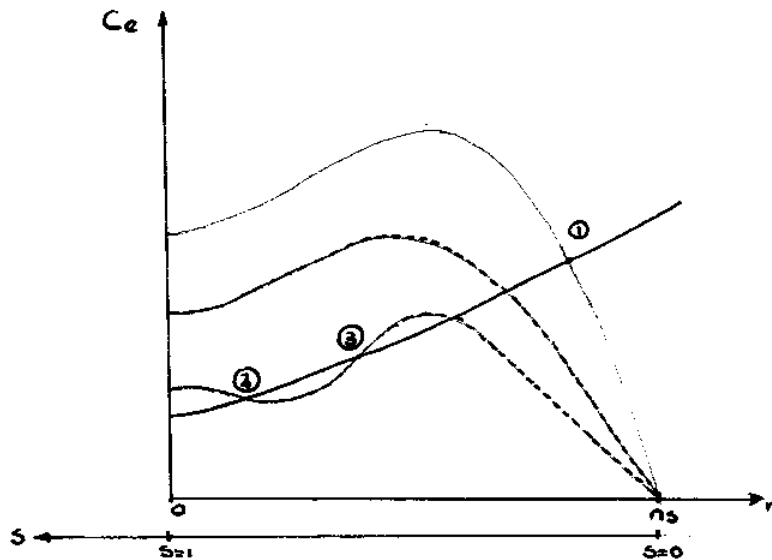


Figura.15

Como se puede ver cuando la tensión cae la característica de cupla de carga puede cortar a la característica de cupla electromagnética en más de un punto y puede suceder que haya puntos tales como el $\rightarrow$ en el cual un aumento de velocidad implica un aumento de cupla, lo cual lleva a un nuevo aumento de velocidad con el consiguiente incremento en la cupla, y es así como el motor se acelera.

Una forma sencilla de evaluar el estado de funcionamiento de un sistema a través de la observación de esta curva es analizar el valor de la derivada en el punto de funcionamiento, así: **"Cuando la derivada de la cupla electromagnética respecto de la velocidad evaluada en el punto de funcionamiento es menor que la derivada de la cupla de carga, entonces existe equilibrio estable, sino, se dice que el punto de funcionamiento es inestable"**.

5.- Ecuación Diferencial de Movimiento de la Máquina Síncrona.

El comportamiento de las máquinas síncronas de un sistema se describe a través de la ecuación de oscilación (5.1), que es una ecuación diferencial de segundo orden, no lineal con coeficientes constantes.

$$(2H_i/w_N) (d^2 \delta_i / dt^2) + (K_{di}/w_N) (d\delta_i / dt) + P_{ei}(\delta_1, \dots, \delta_i, \delta_n) = P_{mi}$$

Cuando en un sistema hay presentes "n" máquinas, por cada máquina existe una ecuación igual a la anterior, se tienen entonces "n ecuaciones" de este tipo acopladas entre sí.



Un sistema tal como este no puede ser resuelto en forma cerrada, por lo que es necesario recurrir a procedimientos numéricos y analizar en cada caso las simplificaciones que pueden realizarse.

En el caso de pequeñas perturbaciones originadas a partir de un estado de funcionamiento estacionario normal, la ecuación de oscilación puede ser linealizada en las cercanías del punto de operación prefalla.

En este punto se tratará fundamentalmente el problema denominado de estabilidad estática, consistente en la determinación de la potencia límite máxima que una máquina puede entregar sin perder el sincronismo en el caso de que en el sistema se produzcan aumentos de carga en forma lenta y en pequeños pasos " ΔP ". En general se considera que la corriente de campo se modifica en cada paso (para cada escalón de aumento) de manera tal de mantener constantes las condiciones normales de operación de las máquinas, usualmente se mantiene constante la tensión en los terminales de la máquina.

Considerando pequeñas desviaciones Δd respecto al estado de funcionamiento inicial, se pueden reemplazar las funciones " $P_e(d)$ " de la ecuación (5.1) por los dos primeros términos del desarrollo de Taylor:

$$P_e(d) \approx P_e(d_0) + \left. \frac{dP_e(d)}{dd} \right|_{d=d_0} \cdot \Delta d \quad (5.1)$$

obteniendo así un sistema de ecuaciones diferenciales lineales del tipo:

$$(2H/\omega_N) \frac{d\Delta d}{dt} + (K_d/\omega_N) \Delta d + \left. \frac{dP_e(d)}{dd} \right|_{d=d_0} \cdot \Delta d = 0 \quad (5.2)$$

donde se ha simplificado considerando que para un tiempo " t_0 " la Potencia mecánica es igual a la Potencia Eléctrica,

$$P_e(d_0) = P_{mi} \quad \text{y} \quad \left(\frac{d\Delta d}{dt} + \Delta d \frac{d(d_0 - d_0)}{dt} \right) = \Delta d$$

El sistema de ecuaciones diferenciales (5.2) es lineal y puede ser resuelto en forma analítica, utilizando la transformación de Laplace por ejemplo.

Estabilidad Estática.

Se considera una máquina sincrónica que alimenta una barra de tensión rígida ($V = \text{cte}$) a través de una red Figura.16.

En primera instancia se adopta el modelo de tensión constante detrás de la reactancia sincrónica " x_d " de la máquina. Esta reactancia se considera incluida en la red.



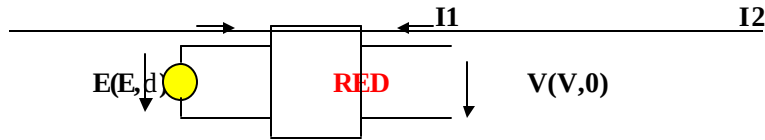


Figura.16

Las corrientes y tensiones se relacionan en la red a través de la expresión:

$$[I] = [Y] \cdot [V] \quad (5.3)$$

Donde $[I]$ es la matriz de las corrientes, $[V]$ es la matriz de las tensiones e $[Y]$ es la matriz de admitancia nodal del sistema formada por admitancias propias y mutual de la forma:

$$\begin{aligned} Y_{ii} &= Y_{ii} \cdot e^{j q_{ii}} = G_{ii} + j B_{ii} \\ Y_{ij} &= Y_{ij} \cdot e^{j q_{ij}} = G_{ij} + j B_{ij} \end{aligned} \quad (5.4)$$

La potencia entregada por la máquina "uno" del sistema vale:

$$P_{e1} = \text{Re}\{E_1 \cdot I_1^*\}$$

reemplazando los valores de E e I y trabajando en la expresión queda, que la potencia eléctrica entregada por una máquina sincrónica es:

$$P_{e1} = E^2 \cdot Y_{11} \cdot \cos q_{11} + E \cdot V \cdot Y_{12} \cdot \cos(q_{12} - \delta)$$

en el caso de una red puramente reactiva $q_{11} = q_{12} = 90^\circ$ y se tiene la expresión

$$P_{e1} = E \cdot V \cdot Y_{12} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (5.5)$$

Criterio de Estabilidad Estática

Se considera una máquina sincrónica conectada a una red infinita. La máquina se modela a través de una tensión constante detrás de la reactancia sincrónica.

En estado estacionario (estado de funcionamiento prefalla) la máquina se encuentra suministrando en un estado de operación caracterizado por " P_o " y " δ_o ".

Supóngase que se produce una pequeña perturbación que incrementa el ángulo de par en " $\Delta \delta$ " y la potencia entregada por la máquina en " ΔP ". Para los nuevos valores de " P " y " δ " vale la relación dada por la expresión (5.5)

$$P = P_o + \Delta P = P_m \text{sen}(\delta_o + \Delta \delta)$$

$$P = P_m \cdot \text{sen}(\delta_o) \cdot \cos(\Delta \delta) + P_m \cdot \cos(\delta_o) \cdot \text{sen}(\Delta \delta)$$

como $\Delta \delta$ es pequeño:
$$\begin{cases} \cos(\Delta \delta) = 1 \\ \text{sen}(\Delta \delta) = \Delta \delta \end{cases}$$

entonces:

$$P = P_m \cdot \text{sen}(\delta_o) + P_m \cdot \cos(\delta_o) \cdot \Delta \delta$$

El primer término de la expresión es la potencia " P_o " y:

$$P_s = P_m \cos(\delta_o) = \frac{P}{\sin \delta} \quad \text{"Coeficiente de Potencia Sincronizante"}$$



Para que la máquina permanezca estable en estado estacionario es necesario que:

$$P_s = \frac{P}{\sin \delta} > 0 \quad (5.6)$$

Es decir que la zona de funcionamiento estable bajo las hipótesis consideradas es la delimitada por la condición $0 < \delta < \pi/2$. De aquí que se considere como límite de estabilidad estático a la potencia transmitida para $\delta = \pi/2$

6.- Influencia de la regulación de tensión sobre la estabilidad estática.

Mediante el control de excitación se puede elevar el límite de estabilidad estático o la potencia máxima a transmitir. Se mostrará este efecto a través del análisis de los siguientes ejemplos.

Ejemplo.1

Sea el sistema de la Figura.17, con su correspondiente diagrama fasorial. Se supone que el factor de potencia es 1(unos), $x_1=x_2=1$ p.u. y $V=1$ p.u.

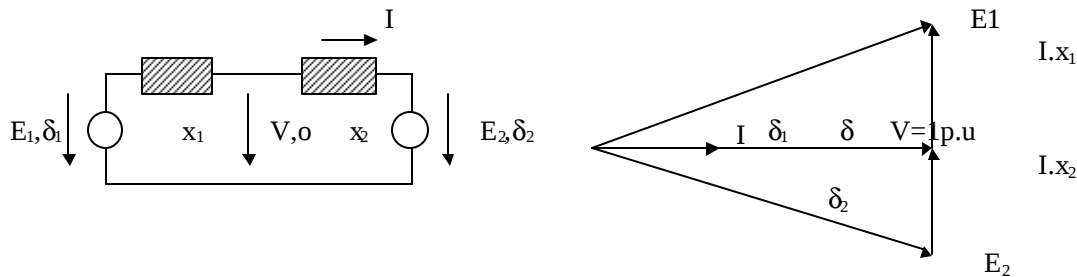


Figura.17

La Ecuación (5.5) para este sistema es:

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{(x_1 + x_2)} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (6.1)$$

"P" tiene su máximo cuando $(\delta_1 - \delta_2) = 90^\circ$.

Si se supone que E_1 y E_2 son controladas mediante reguladores ideales con el objetivo de mantener $V = 1$ p.u., se tiene:

$$E_1 = V + jI \cdot x_1 = 1 + jI = \sqrt{1 + I^2} \cdot e^{j\delta/2}$$

$$E_2 = V + jI \cdot x_2 = 1 - jI = \sqrt{1 + I^2} \cdot e^{-j\delta/2}$$

Sumando:

$$E_1 + E_2 = 2 = 2 \cdot \sqrt{1 + I^2} \cdot \cos(\delta/2) \Rightarrow \sqrt{1 + I^2} = 1/\cos(\delta/2)$$

Multiplicando:

$$E_1 \cdot E_2 = (1 + I^2)$$

Reemplazando en la expresión de Potencia (6.1) se tiene:

$$P = \frac{\sin(\delta)}{2 \cos^2(\delta/2)} = \frac{2 \sin(\delta/2) \cdot \cos(\delta/2)}{2 \cos^2(\delta/2)} = \tan(\delta/2)$$



Graficando esta última expresión junto a la curva de la ecuación (5.5) que corresponde al caso sin regulación de excitación se obtiene la Figura.18, en la cual se puede ver que en este caso no existe límite de estabilidad ya que en toda la curva la derivada de la potencia respecto del ángulo delta es positiva y por lo tanto es posible la transmisión de potencia mas allá de los 90°.

Este caso es ideal y no puede llevarse a la práctica pues requiere de la actuación instantánea del regulador y del efecto instantáneo de la acción del regulador sobre la excitación.

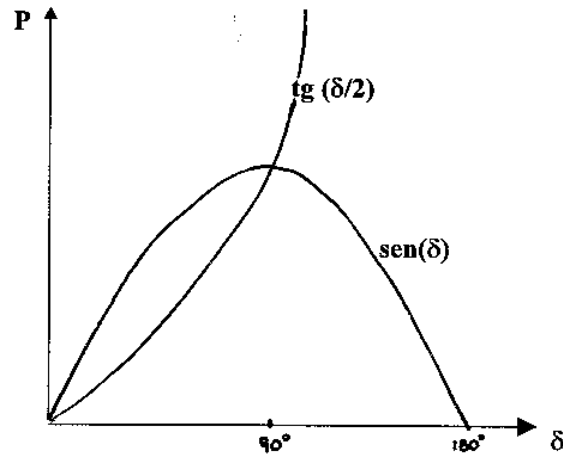


Figura.18

Ejemplo.2

Se considera el caso mas realista de controlar de modo de obtener $E_2=1p.u.$ dejando variar el factor de potencia.

En estas condiciones, se obtiene el diagrama fasorial de la Figura.19a

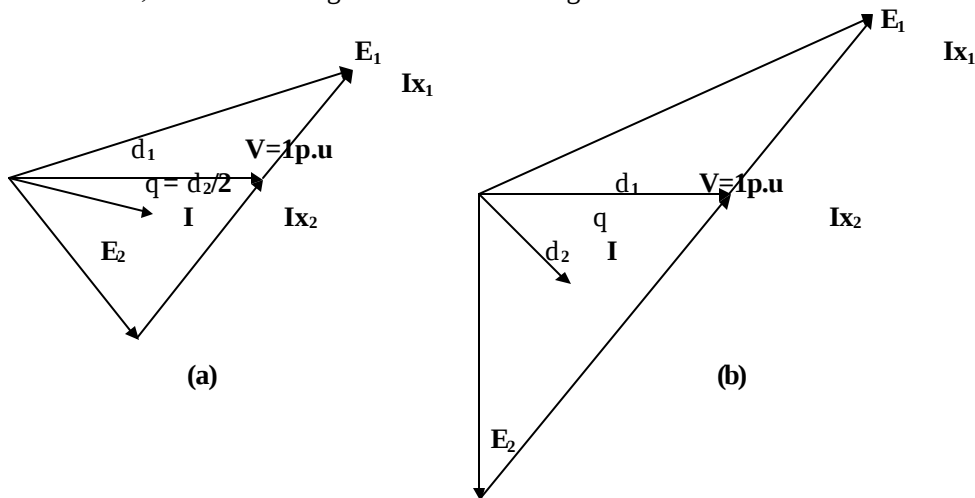


Figura.19

$$P = E_2.E_1. \text{sen} (d_2) = \text{sen} (d_2)$$

El valor máximo de "P" se obtendrá para $d_2=90^\circ$, situación que corresponde al diagrama fasorial de la Figura.19b.

$$E_1 = 2 + j1 \quad P \quad E_1 = 2.235 \text{ p.u.} ; \quad q = -45^\circ$$

$$d_1 = 26.6^\circ \quad P \quad d = d_1 + d_2 = 116.6^\circ$$



Se puede observar que en este caso la potencia máxima transmisible está limitada, pero el ángulo delta puede superar los 90° sin que aparezcan problemas de estabilidad estática en el sistema, El único inconveniente es que para realizar esta transmisión es necesaria una Tensión de Excitación de 2.235 p.u.

La Figura.20 muestra la característica Potencia-Angulo para este caso:

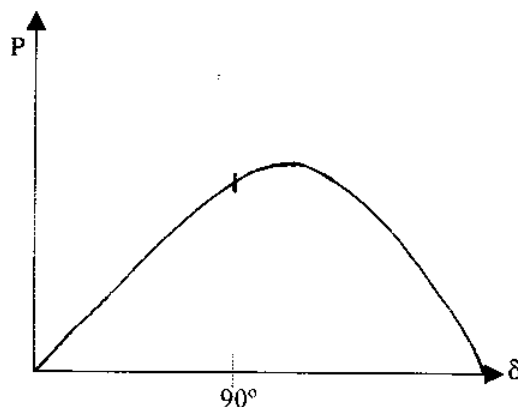


Figura.20

7.-Límite de Estabilidad Estática Natural y Artificial

Para una configuración dada y una topología específica del sistema, se define límite de estabilidad estática al máximo flujo de potencia alrededor de un punto de operación particular que garantiza el sincronismo del sistema cuando su potencia se aumenta gradualmente.

Sea el siguiente sistema de transmisión:

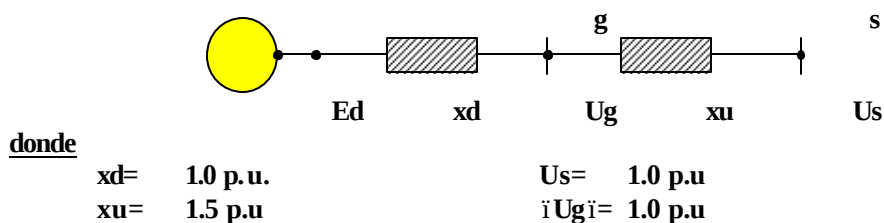


Figura.21

Aplicando la expresión (6.1), la Potencia Eléctrica para este sistema es:

$$P = \frac{E_d \cdot U_s}{(x_d + x_u)} \sin(\delta)$$

El ángulo (δ) es el desfase entre la tensión de la rueda Polar " E_d " y la tensión en el punto de suministro " U_s ". El valor máximo de la potencia eléctrica se presenta cuando $\delta = 90^\circ$ y se denomina **Potencia de Estabilidad Estática Natural**, así:

$$P^N_{\text{máx}} = \frac{E_d \cdot U_s}{(x_d + x_u)}$$



Cuando el ángulo que se hace igual a 90° no es el de desfase entre la Tensión de la Rueda Polar (E_d) y la Tensión en el punto de suministro (U_s), sino el ángulo d_{gs} , es decir el desfase entre la tensión en el Punto de suministro (U_s) y la Tensión en bornes del generador (U_g), la Tensión de la Rueda Polar toma un valor diferente y δ_{gs} adquiere un valor distinto de 90° . La Potencia eléctrica calculada de esta forma se denomina Potencia Límite Artificial Estática y tiene la siguiente expresión:

$$P^{\text{Amax}} = \frac{E_d \cdot U_s}{(x_d + x_u)} \sin(d_{gs})$$

El valor de potencia calculado para la estabilidad artificial es mayor que el de estabilidad natural.

- En presencia de un regulador lento, con una zona muerta muy grande cualquier perturbación, compromete considerablemente la estabilidad estática del sistema.
- Un regulador rápido con una zona muerta moderada favorece el penduleo y por lo tanto hay posibilidades de que el sistema no pierda la estabilidad estática.
- Un regulador electrónico sin zona muerta Garantiza la estabilidad estática

Conclusión:

Cuando un sistema se encuentra trabajando en el límite de estabilidad estática artificial, es mucho menos seguro y su respuesta ante una pequeña perturbación es fundamentalmente función del sistema de regulación que posea.

8.- Estabilidad Estática en un sistema de dos máquinas

Se analizará el caso de dos máquinas alimentado una carga representada por una impedancia constante Z_L , tal como se indica en la Figura.22

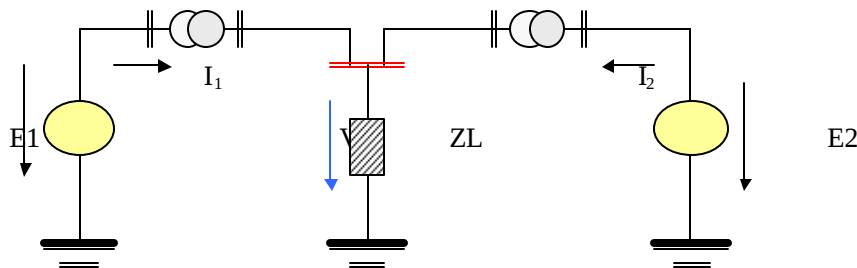


Figura.22

Con la finalidad de simplificar el análisis se desprecia el término correspondiente a la potencia de amortiguamiento en la ecuación de oscilación. Para cada máquina se plantea la ecuación de oscilación linealizada, según se vio previamente, así:

$$\text{máquina (1)} \quad (2H_1/w_N) \cdot Dd_1 + (\partial P_1 / \partial d_1) \cdot Dd_1 + (\partial P_1 / \partial d_2) \cdot Dd_2 = 0$$

$$\text{máquina (2)} \quad (2H_2/w_N) \cdot Dd_2 + (\partial P_2 / \partial d_1) \cdot Dd_1 + (\partial P_2 / \partial d_2) \cdot Dd_2 = 0$$

Las potencias entregadas por cada una de las máquinas se determinan mediante la ecuación:

$$P_{e1} = \operatorname{Re}\{E_1 \cdot I_1^*\}$$

que desarrollada para cada máquina es:

:

$$P_1 = E_1^2 \cdot Y_{11} \cdot \cos(q_{11}) + E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \cos(q_{12} - d_1 + d_2)$$



$$P_2 = E_2^2 \cdot Y_{22} \cdot \cos(q_{22}) + E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \cos(q_{12} - d_2 + d_1)$$

Despreciando las pérdidas y las impedancias transversales se obtiene para el circuito de la Figura.22 el siguiente circuito equivalente con su correspondiente diagrama fasorial:

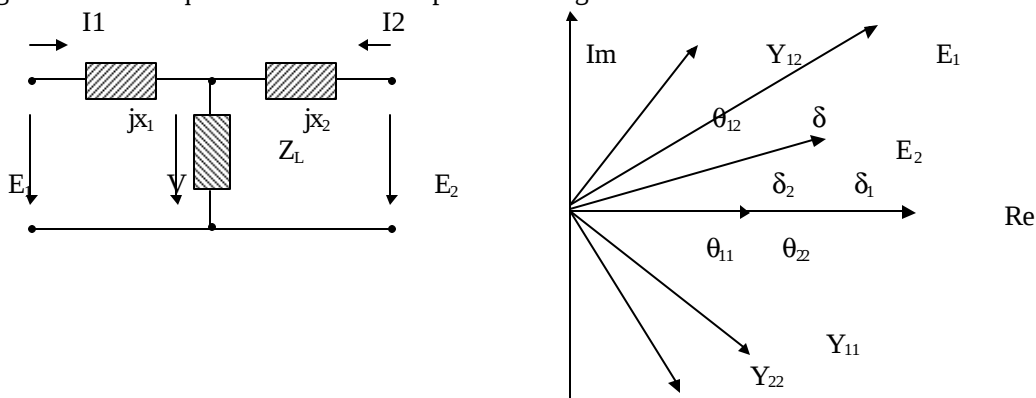


Figura.23

Llamando: $d = d_1 - d_2$

$$\angle P_1 / \angle d_1 = -\angle P_1 / \angle d_2 = \angle P_1 / \angle d = E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \sin(q_{12} - d) = A1$$

$$\angle P_2 / \angle d_1 = -\angle P_2 / \angle d_2 = \angle P_2 / \angle d = -E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \sin(q_{12} + d) = -A2$$

Reemplazando en las ecuaciones de oscilación queda:

$$\begin{aligned} \text{máquina (1)} \quad (2H_1/w_N) \cdot D d_1 + A1 \cdot D d_1 - A1 \cdot D d_2 &= 0 \\ \text{máquina (2)} \quad (2H_2/w_N) \cdot D d_2 - A2 \cdot D d_1 + A2 \cdot D d_2 &= 0 \end{aligned} \quad (8.1)$$

"Sistema de Ecuaciones Diferenciales a Resolver"

Aplicando la Transformada de Laplace: $Fi(s) = L [D d i(t)]$

$$L [D d i(t)] = s^2 \cdot Fi(s) - s \cdot D d i(0) - D d i(0)$$

Reemplazando en (8.1) y considerando que $D d i(0) = 0$ ya que el ángulo nunca varía a saltos

$$\text{máquina (1)} \quad [s^2 + (A1 \cdot w_N) / 2H_1] \cdot F_1(s) - [(A1 \cdot w_N) / 2H_1] \cdot F_2(s) = s \cdot D d_1(0)$$

$$\text{máquina (1)} \quad [s^2 + (A2 \cdot w_N) / 2H_2] \cdot F_2(s) - [(A2 \cdot w_N) / 2H_2] \cdot F_1(s) = s \cdot D d_2(0)$$

Resolviendo este sistema se obtiene:

$$Fi(s) = [D d i(0) \cdot s^2 + D1 \cdot D d_2(0) + D2 \cdot D d_1(0)] / [s \cdot (s^2 + D1 + D2)]$$

donde:

$$Di = (Ai \cdot w_N) / 2 Hi$$

El Polinomio del denominador tiene tres raíces

$$\begin{aligned} s1 &= 0 \\ s2 &= +\sqrt{-D1 - D2} \\ s3 &= -\sqrt{-D1 - D2} \end{aligned}$$



Si $(D1 + D2) < 0$ las raíces $s2$ y $s3$ son reales y la oscilación es exponencialmente creciente, es decir que el sistema es inestable.

Si $(D1 + D2) > 0$ las raíces $s2$ y $s3$ son imaginarias puras, lo que indicaría que se trata de una oscilación no amortiguada. Así:

$$\begin{aligned} D1 + D2 &= (A1 \cdot w_N) / 2H_1 + (A2 \cdot w_N) / 2H_2 \\ &= (w_N / 2H_1) \cdot [(\partial P_1 / \partial \delta) - (H_1 / H_2) \cdot (\partial P_2 / \partial \delta)] \end{aligned}$$

En resumen, el Sistema será estable si:

$$(\partial P_1 / \partial \delta) > (H_1 / H_2) (\partial P_2 / \partial \delta)$$

"Condición de Estabilidad Estática de un Sistema de Dos Máquinas"

En la Figura.24 se señalan las regiones de estabilidad e inestabilidad del sistema dado como ejemplo. Evidentemente en este sistema, habrá estabilidad si $(\partial P_1 / \partial \delta) > 0$ y $(\partial P_2 / \partial \delta) < 0$ y no la habrá en las situaciones inversas.

Para cada caso en particular la estabilidad depende de las relaciones entre las derivadas de las potencias respecto de delta y de las relaciones entre las constantes de inercia de las máquinas.

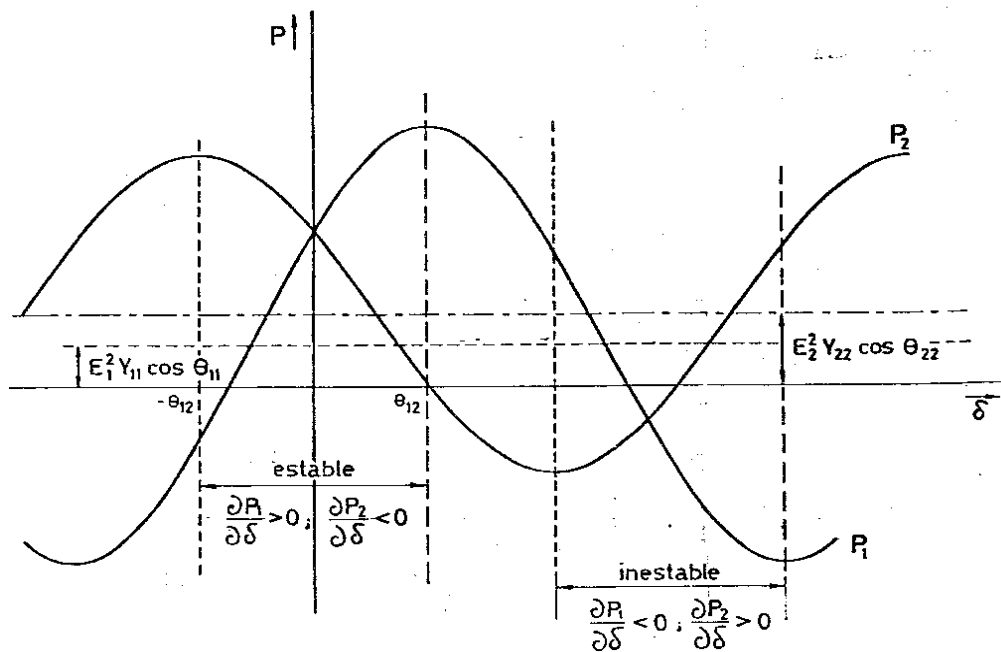


Figura.24



9.- Estabilidad Estática en los Sistemas Multimáquinas.

La potencia entregada por la máquina "i" en un sistema de n-máquinas es:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_j E_i \cdot E_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_{ij} - \delta_j) \\ P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_j E_i \cdot E_j \cdot [B_{ij} \sin(\delta_{ij}) + G_{ij} \cos(\delta_{ij})] \end{array} \right.$$

Para una pequeña variación en el ángulo de carga de un par de máquinas del sistema, se tiene:

$$D P_{ei} = \sum_j E_i \cdot E_j \cdot [B_{ij} \cos(\delta_{ij}) - G_{ij} \sin(\delta_{ij})] D \delta_{ij}$$

como:

$$\delta_{ij} = \delta_{ij0} + D \delta_{ij}$$

entonces:

$$\begin{aligned} \sin(\delta_{ij}) &= \sin(\delta_{ij0}) \cos(\Delta \delta_{ij}) + \cos(\delta_{ij0}) \sin(\Delta \delta_{ij}) \approx \sin(\delta_{ij0}) + \Delta \delta_{ij} \cos(\delta_{ij0}) \\ \cos(\delta_{ij}) &\approx \cos(\delta_{ij0}) - \Delta \delta_{ij} \sin(\delta_{ij0}) \end{aligned}$$

Para una condición inicial dada, la variación de potencia tiene la expresión:

$$D P_{ei} = \sum_j P_{sij} D \delta_{ij}$$

donde:

$$P_{sij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_{ij}} \bigg|_{\delta_{ij0}} = E_i \cdot E_j [B_{ij} \cos(\delta_{ij0}) - G_{ij} \sin(\delta_{ij0})]$$

" P_{sij} " es el cambio en la potencia entregada por cada máquina "i" debido a un cambio en el ángulo entre las máquinas "i" y "j" cuando los otros ángulos permanecen constantes.

" P_{sij} " representa una extensión al caso multimáquina de la "**Potencia Sincronizante**" definida anteriormente al analizar la máquina conectada a una barra infinita de Potencia.

Reemplazando la potencia eléctrica en las ecuaciones de oscilación de la "n" máquinas del sistema se obtiene un sistema de "n" ecuaciones diferenciales dependientes entre sí.



TEMA 2: ESTABILIDAD TRANSITORIA

1.- Teorema de la constancia de los enlaces de flujo magnético

Sea el circuito de la Figura.1, el cual, en cada una de sus ramas tiene una resistencia y una fuente de fem de valores finitos.

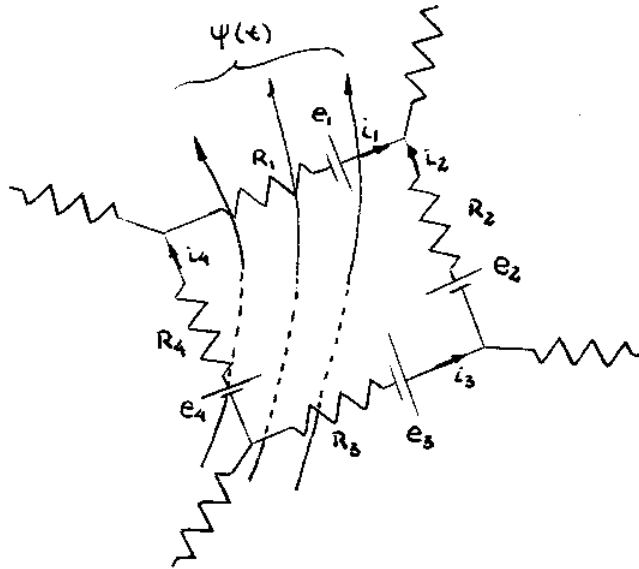


Figura.1

donde:

$$\frac{d}{dt} R_i i_i(t) + \frac{d}{dt} y(t) = \frac{d}{dt} e_i(t)$$

Integrando respecto del tiempo entre 0 (cero) y Δt

$$\int_0^{\Delta t} R_i i_i(t) dt + \Delta y = \int_0^{\Delta t} e_i(t) dt$$

Si: $\Delta t \rightarrow 0$; $R_i \int_0^{\Delta t} i_i(t) dt \rightarrow 0$ y $\int_0^{\Delta t} e_i(t) dt \rightarrow 0$ entonces Δy también tiende a cero.

"Los enlaces de flujo magnético de cualquier circuito cerrado que tenga valores finitos de resistencias y de fem no pueden cambiar instantáneamente".

En el caso especial en que las resistencias y las fems sean ceros, la derivada del flujo respecto del tiempo ($d\psi/dt$) también será cero, lo que implica que el flujo " $\psi = \text{cte}$ ".

"Los enlaces de flujo de cualquier circuito cerrado que no tenga ni resistencias ni fems permanecen constantes".

En realidad todo circuito tiene alguna resistencia y por lo tanto los enlaces de flujo del circuito cambian de acuerdo a:

$$\frac{d}{dt} y(t) = \frac{d}{dt} [e_i(t) - R_i i_i(t)]$$

Este Teorema es útil cuando:



- Cambian la auto-inductancia de un circuito por efecto de movimiento relativo entre sus partes.
- Cambian la inductancia mutua entre los dos circuitos por movimiento relativo entre ellos.

Si estos cambios ocurren en un tiempo que es corto comparado con la constante de tiempo del circuito entonces los enlaces de flujo se mantienen sustancialmente constantes durante el cambio. Este hecho puede ser usado para calcular las corrientes después del cambio en función de las corrientes antes del cambio.

Ejemplo: Relé Electromagnético Figura.2

Se aparta bruscamente la armadura del electroimán. Se la mantiene separada un tiempo y luego se la lleva nuevamente a la posición inicial (en contacto con el electroimán).

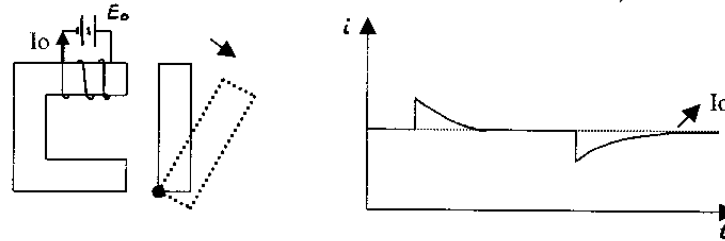


Figura.2

En la posición inicial existe una corriente de estado estacionario (I_0), al apartar la patita, la corriente aumenta para mantener constante el flujo, pero inmediatamente después comienza a decaer por efecto de las resistencias. Cuando se cierra el relé sucede exactamente lo contrario ya que al aumentar la resistencia magnética y el flujo la corriente disminuye bruscamente nuevamente con el propósito de mantener el flujo constante.

2.- Concepto de Estabilidad Transitoria

Por Estabilidad se entiende la habilidad del sistema para regresar en un tiempo finito al estado de equilibrio o trabajo sincrónico entre sus máquinas, desarrollando fuerzas recuperadoras entre sus elementos capaces de controlar o someter las fuerzas perturbadoras desarrolladas por perturbaciones o fallas.

La Estabilidad Transitoria es la habilidad del sistema para recobrar su estado de funcionamiento de equilibrio, igual al anterior o uno nuevo derivado de una nueva configuración originada cuando suceden el sistema cambios fuertes y repentinos.

El concepto de Estabilidad e Inestabilidad no pueden tomarse con carácter absoluto para el sistema ya que puede presentarse un estado cuasi-estable, el cual puede ocurrir cuando en un sistema, algunas máquinas trabajan en sincronismo, mientras que otras alcanzan la inestabilidad.

Los estudios de Estabilidad Transitoria determinan el comportamiento en el tiempo de todo el sistema y su periodo de análisis cubre entonces el lapso de tiempo que se inicia con la perturbación y se extiende hasta cuando el sistema recupera un nuevo punto de operación seguro o hasta que se tiene la certeza que su rompimiento sincrónico es seguro e insuperable.

La clasificación de los fenómenos en función del periodo de tiempo que abarca el análisis es fundamental porque de esa manera se realiza la adecuada modelación dinámica del sistema.

De esta manera el periodo transitorio puede clasificarse en tres subperiodos, a saber:

Periodo Inicial: Este cubre los primeros ciclos o milisegundos después de producirse la falla. En este periodo actúan las protecciones para despejar la falla (apertura y recierre de interruptores), pero el comportamiento de los generadores no está controlado, pues la acción de los reguladores de velocidad y tensión no se ha iniciado aún, debido a los retardos introducidos por las constantes de tiempo que gobiernan el trabajo de estos aparatos.



Periodo Intermedio: En el cual los reguladores de tensión y de velocidad actúan y su influencia se hace presente en el control y manejo del proceso transitorio.

Periodo final: El efecto de la falla puede extenderse por algunos minutos. Durante este periodo se pueden ejecutar políticas de control tales como permitir la salida de alguna o algunas líneas o generadores, o desconectar algunos consumidores.

Los dos primeros periodos son los mas críticos para el sistema.

Resumen de pautas generales para realizar estudios de Estabilidad Transitoria

1. Los cambios de estado se reflejan mediante modificaciones del esquema unifilar del sistema eléctrico (nuevos valores de impedancias propias y mutuas, nuevos valores de fem de los generadores, etc).
2. Las potencias eléctricas entregadas por los generadores se calculan a partir de las impedancias y fem del esquema unifilar del sistema eléctrico. A una modificación de este le corresponde una inmediata modificación de la potencia eléctrica.
3. Para calcular la variación del ángulo delta "no se considera" la influencia de la componente aperiódica de la corriente de estator. En casos excepcionales (cortocircuitos trifásicos y de dos fases a tierra) puede considerarse esta influencia disminuyendo el momento mecánico de la turbina en un 10 o 15 % del momento nominal.

3.- Magnitudes permanentes, transitorias y subtransitorias de la máquina sincrónica.

Como ya se ha visto, la máquina consiste en varios circuitos acoplados inductivamente que se mueven unos respecto de los otros. Debido al movimiento, las inductancias propias y mutuas varían periódicamente con la posición del rotor. La siguiente discusión se basa fundamentalmente en la máquina trifásica de polos salientes, sin considerar la saturación ni las pérdidas en el hierro. Se supone además que el circuito rotórico se encuentra cerrado pero no excitado.

- **Reactancia Sincrónica de eje directo " x_d "**: Se supone que se alimenta el estator con un sistema de secuencia positiva, que por lo tanto producirá un campo rotante con velocidad sincrónica. Simultáneamente se hace girar el rotor con velocidad sincrónica, de modo que el campo rotante del estator es estacionario respecto del otro que gira a la misma velocidad que él.
En estas condiciones, el flujo será máximo cuando se enfrenta el máximo de la Fmm del estator con el polo del rotor, condición en que se tiene el camino de máxima permeancia.
En estas condiciones, el flujo concatenado por fase del bobinado de armadura por unidad de corriente de armadura define la inductancia sincrónica de eje directo " **L_d** ". La reactancia sincrónica de eje directo vale " **$x_d = \omega \cdot L_d$** ".
- **Reactancia Sincrónica en cuadratura " x_q "**: En las mismas condiciones del caso anterior, pero enfrentando el máximo de la onda de Fmm con el espacio interpolar, se obtiene el camino de máxima reluctancia y se obtiene el valor mínimo de Inductancia. Esta es la inductancia " **L_q** " o inductancia del eje en cuadratura. La reactancia sincrónica del eje en cuadratura vale " **$x_q = \omega \cdot L_q$** ".
En las máquinas de rotor cilíndrico " $x_q = x_d$ "
- **Reactancia Transitoria de eje directo " x'_d "**: Con la máquina en las mismas condiciones anteriores, se supone ahora la aplicación **subita** de alimentación al estator. En los casos anteriores se suponía el estado estacionario, por lo tanto, el flujo que trataba de establecerse por la aplicación de corriente en el estator era opuesto por las corrientes inducidas en el arrollamiento de campo. Inicialmente el flujo solo se puede establecer por caminos de dispersión de baja permeancia. Por esta razón el flujo es pequeño y por lo tanto también lo es la Inductancia transitoria de eje directo " **L'_d** ".
La reactancia transitoria de eje directo vale: " **$x'_d = \omega \cdot L'_d < x_d$** ".
- **Reactancia Subtransitoria de eje directo " x''_d "**: Considerando también la aplicación súbita de alimentación al estator, se tiene en cuenta la presencia del arrollamiento de amortiguamiento. En estos arrollamientos se inducirán corrientes que se oponen al establecimiento del flujo, que de este modo es



obligado a caminos de muy baja permeancia. Este efecto se presenta también en máquinas sin arrollamientos de amortiguamiento, debido a corrientes inducidas en el hierro del núcleo del rotor. La Inductancia Subtransitoria " L'' " resulta aún menor que la reactancia transitoria. La reactancia subtransitoria vale: " $x'' = w \cdot L''$ ".

Las corrientes en los arrollamientos amortiguadores decrecen rápidamente, pasando de la condición subtransitoria a la transitoria.

- **Reactancia transitoria y subtransitoria en cuadratura $x'q$, $x''q$:** Se aplica súbitamente el sistema de corrientes al arrollamiento estático y se considera que el máximo de la onda fundamental de la Fmm coincide con el espacio interpolar. En estas condiciones, como en el eje en cuadratura no existe bobinado de excitación, los caminos para el flujo son los mismos que para el caso analizado de la reactancia sincrónica en cuadratura xq , de modo que resulta $x'q = xq$.

En caso de existir arrollamientos amortiguadores, el flujo es obligado a recorrer caminos de menor permeancia, siendo $x''q < x'q$. Usualmente $x''q$ es levemente mayor que $x''d$

Corrientes y reactancias subtransitorias "no ejercen" gran influencia en los fenómenos transitorios .

Valores característicos de las constantes de tiempo transitoria y subtransitoria

Constante de Tiempo de Eje Directo	Bobinado Primario	Bobinado Secundario	Valor Característico
$T'_{do} = (L_{ff} / R_f)$	Rotor	Estator en vacío	$T'_{do} = 4,74 \text{ s}$
$T'_d = (x'_d / x_d) T'_{do}$	Rotor	Estator cortocircuitado	$T'_d = 0.82 \text{ s}$
T''_{do}	Bobinado de Amortiguamiento	Estator en vacío	$T''_{do} = 0.039 \text{ s}$
$T''_d = (x''_d / x'_d) T''_{do}$	Bobinado de Amortiguamiento	Estator cortocircuitado	$T''_d = 0.028 \text{ s}$

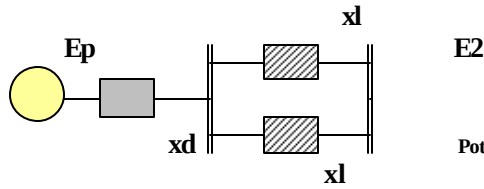
Constante de tiempo de eje en cuadratura	Bobinado primario	Bobinado Secundario	Valor característico
T''_{qo}	Bobinado de Amortiguamiento	Estator en Vacío	$T''_{qo} = 0.511 \text{ s}$
T''_q	Bobinado de Amortiguamiento	Estator cortocircuitado	$T''_q = 0.066 \text{ s}$

4.- Angulo de Transmisión durante el Estado Estacionario y durante el Fenómeno Transitorio. Característica Potencia-Angulo



Cuando se discutió el tema de la estabilidad de estado permanente se presentó la expresión que representa la potencia eléctrica que entrega la máquina síncrona, aplicándola un sistema de una única máquina conectada a una barra de potencia infinita a través de una doble tema (Figura.3), se tiene:

$$P_e = \frac{E_p U_2}{[x_d + (x_l/2)]} \text{sen } (d)$$



cuyo diagrama unifilar equivalente es:

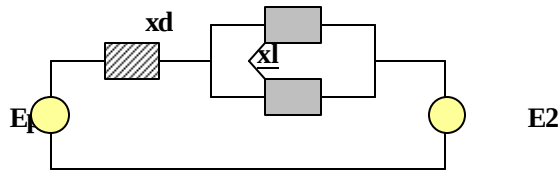


Figura.3

La expresión anterior representa la potencia eléctrica que entrega la máquina síncrona en estado de funcionamiento estacionario. Gráficamente se puede encontrar el punto de funcionamiento como la intersección de la curva de Potencia eléctrica y la curva que representa la Potencia Mecánica Constante (línea recta horizontal). Así:

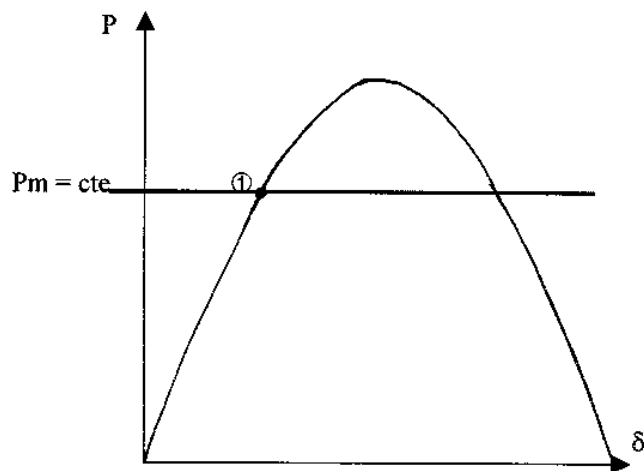


Figura.4

En la Figura.4 el punto ① representa el punto de funcionamiento prefalla de la máquina, caracterizado por $P_e = P_m$ y ángulo de carga " δ_0 ".

Cuando en el sistema se produce una perturbación importante, como por ejemplo la pérdida de una de las dos líneas de transmisión, la reactancia de acoplamiento se modifica, no solo porque se modifica la topología del sistema, sino también porque la reactancia que hay que considerar de la máquina ya no es la misma. Es decir, en el estado prefalla la reactancia de acoplamiento es la suma de la reactancia síncrona " x_d " de la máquina mas la reactancia del sistema de transmisión (x_l); durante el transitorio la reactancia de acoplamiento se calcula como la suma de la reactancia transitoria de la máquina síncrona " x_d' " mas la reactancia del sistema de transmisión en falla (x_l').



$$\left. \begin{array}{l} \text{prefalla:} \quad x_{acop} = x_d + x_l/2 \\ \text{en falla:} \quad x'_{acop} = x'_d + x_l \end{array} \right\} \text{ con: } x'_d < x_d$$

Analizando en diagrama fasorial de la Figura.5, para ambos estados:

$$\cos j = \frac{A}{x_d \cdot I} = \frac{B}{x'_d \cdot I} \quad (a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{sen } d = (A/E_p) \\ \text{sen } d' = (B/E'_p) \end{array} \right\} \frac{\text{sen } d}{\text{sen } d'} = \frac{(A \cdot E'_p)}{(B \cdot E_p)} = (A/B) \cdot (E'_p/E_p) \quad (b)$$

de (a): $A/B = (x_d/x'_d)$

$$\left. \begin{array}{l} \text{reemplazando en (b):} \quad \frac{\text{sen } d}{\text{sen } d'} = \frac{x_d \cdot E'_p}{x'_d \cdot E_p} \end{array} \right\} (E_p/x_d) \cdot \text{sen } d = (E'_p/x'_d) \cdot \text{sen } d'$$

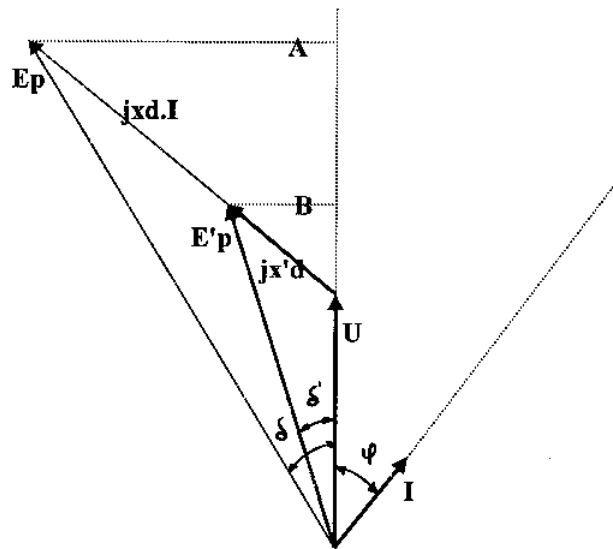


Figura.5

La igualdad de la última expresión indica que es equivalente calcular la potencia eléctrica que entrega la máquina empleando la reactancia sincrónica y la tensión de la rueda Polar de estado permanente (x_d, E_p) que calcularla empleando la reactancia transitoria y la tensión de la Rueda Polar de Estado Transitorio (x'_d, E'_p), siempre y cuando se realice el cambio de escala correspondiente para el ángulo delta.

En la Figura.6 se muestran las dos características de carga obtenidas aplicando los distintos datos. El punto $\mathbf{x}$, obtenido como intersección de la característica de potencia mecánica con las dos curvas, corresponde a un mismo valor de potencia eléctrica y es el punto de funcionamiento calculado en ambos casos.



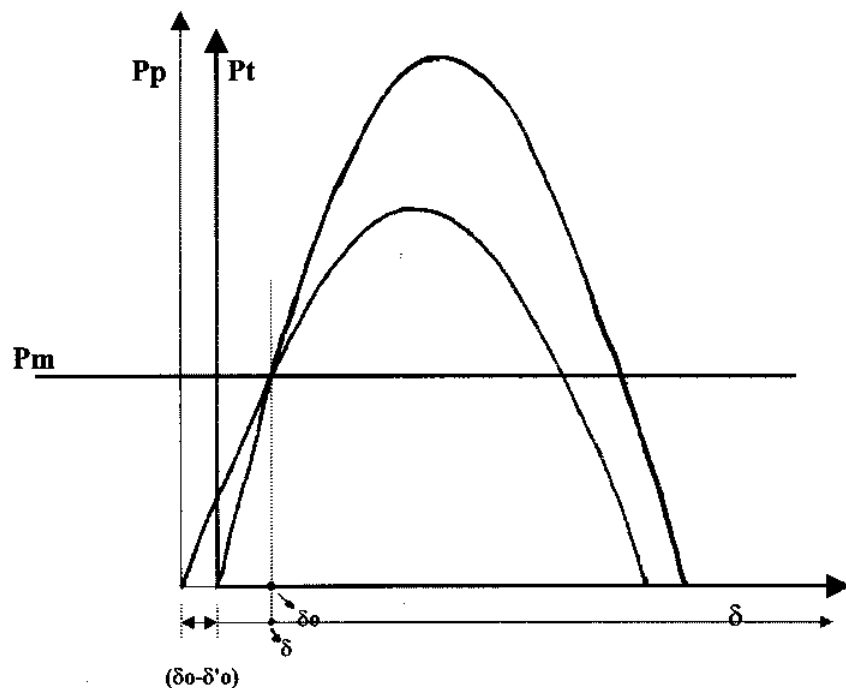


Figura.6

Esta propiedad es de gran utilidad porque permite calcular la Potencia eléctrica del estado de funcionamiento prefalla con los valores de Tensión de la Rueda Polar y Reactancia de estado transitorio, y por lo tanto identificar en la característica potencia ángulo el punto de funcionamiento de estado estacionario y relacionarlo con los puntos de funcionamiento del estado transitorio. Al tener todos los estados de funcionamiento del sistema representados en un mismo sistema de ejes coordenados es posible compararlos y aplicar un método de cálculo muy sencillo e interesante que se denomina **Método de las Areas Iguales**.

5.- **Método de las Areas Iguales. Potencia Acelerante.**

Para realizar el análisis de estabilidad transitoria, se considerará el caso sencillo de una máquina conectada a una red rígida a través de una doble tema.

El modelo dinámico más simple se basa en las siguientes hipótesis:

- La potencia mecánica de la máquina de impulso permanece constante durante el transitorio.
- Se desprecia el amortiguamiento.
- La máquina sincrónica se representa a través de una tensión constante detrás de una reactancia transitoria.
- El ángulo mecánico del rotor coincide con el ángulo de fase de la tensión detrás de la reactancia transitoria.

Si se supone una perturbación que acelera el rotor de la máquina, el ángulo de carga del rotor se incrementará. Si esto ocurre indefinidamente habrá pérdida de sincronismo. Si en cambio, alcanza un máximo y luego decrece, se producirá un movimiento oscilatorio de amplitud constante (en la realidad la amplitud es decreciente debido al amortiguamiento). En estas condiciones, el modelo clásico supone que la estabilidad se decide en la primera oscilación del ángulo delta, es decir en un tiempo menor a un segundo.



Ya se vio que las ecuaciones que caracterizan el movimiento de las máquinas son no lineales y en este caso, tratándose de perturbaciones grandes no es posible la linealización. Por este motivo es necesario recurrir a métodos numéricos para su solución.

El Método de las Areas Iguales consiste en un procedimiento muy sencillo solamente aplicable a sistemas de una sola máquina modelada a través de modelo clásico descrito anteriormente, pero que a los fines didácticos, permite esclarecer los conceptos tales como:

- ✓ Desplazamiento de la posición del rotor en el tiempo sobre su curva de potencia.
- ✓ Variación de la Potencia Acelerante.
- ✓ Desviación de la velocidad angular en el tiempo.
- ✓ Desviación del ángulo del rotor en el tiempo.

La ecuación de oscilación de una máquina sincrónica conectada a una barra infinita es:

$$P_e - P_m = P_a = (2H/\omega_N) \cdot (d^2\delta/dt^2)$$

Despejando $(d^2\delta/dt^2)$, multiplicando ambos miembros por $2(d\delta/dt)$ y trabajando se llega a:

$$d \left[(d\delta/dt)^2 \right] = [(\omega_N \cdot P_a) / H] \cdot d\delta$$

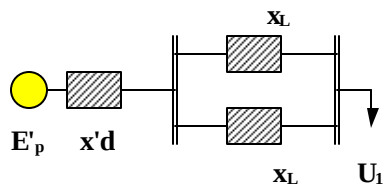
Integrando entre δ_0 y δ :

$$\begin{aligned} (d\delta/dt)^2 &= (\omega_N/H) \int_{\delta_0}^{\delta} P_a \cdot d\delta \\ (\omega_N/H) (d^2\delta/dt^2) &= [P_m - P_e(\delta)] \end{aligned}$$

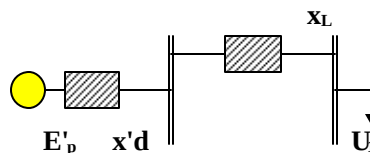
El primer miembro de la ecuación anterior vale cero ya que, tanto la derivada del ángulo delta para la posición inicial (δ_0) como la derivada del ángulo máximo ($\delta=90^\circ$) son cero. Por lo tanto la condición de estabilidad es:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} [P_m - P_e(\delta)] d\delta = 0 \quad (5.1)$$

Sea el sistema de la Figura.7a, en el cual se muestra un sistema eléctrico formado por una máquina sincrónica que alimenta una red rígida a través de un sistema de transmisión formado por una doble terna.



$$P_e = \frac{E'_p \cdot U_1}{[x'_d + (x_L/2)]} \sin(\delta)$$



$$P'_e = \frac{E'_p \cdot U_1}{[x'_d + x_L]} \sin(\delta)$$

Figura.7a

Figura.7b

El sistema originariamente se encuentra operando en un estado definido por: " $P_m = P_e(\delta_0)$ ".

En forma repentina se produce la desconexión de una de sus líneas pasando entonces, a la configuración mostrada en la Figura.7b.

Después de un cierto tiempo, coincidente con el ángulo δ_{ma} se procede a la reconexión de la línea perdida y por lo tanto se retorna a la topología inicial.



En la Figura.8 se han representado las dos expresiones de potencia en función del ángulo para los dos estados de funcionamiento analizados en el sistema de la Figura.7

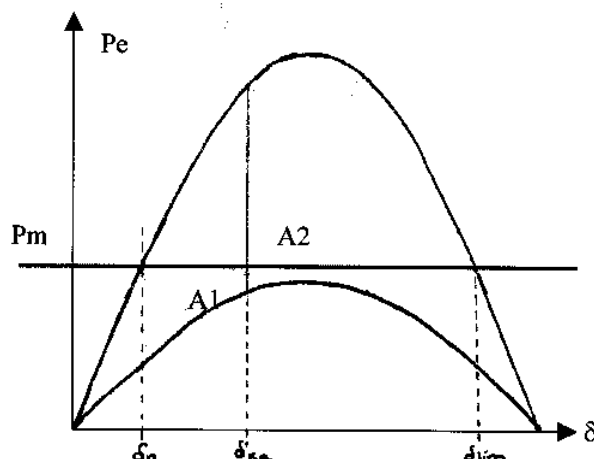


Figura.8

Observando la Figura.8 se puede ver que la integral de la ecuación (5.1) representa el área entre la potencia mecánica "**Pm**" y la curva de potencia eléctrica "**Pe(d)**" y se la puede descomponer en dos partes coincidentes con lo sucedido en el sistema. Así:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{ca}} [P_m - P'e(d)] d\delta + \int_{\delta_{ca}}^{\delta_{lim}} [P_m - P'e(d)] d\delta = 0 \quad (5.2)$$

donde: δ_{ca} es el ángulo de carga para el cual la falla es despejada y el sistema para a funcionar sobre la característica inicial

δ_{lim} es el ángulo que define la máxima área de frenado disponible en el sistema

El primer término de la ecuación (5.2) equivale al **área A1** y corresponde a la condición de **aceleración positiva**. El segundo término, **área A2**, corresponde a **aceleración negativa** o área de frenado.

Si el valor absoluto del A2 es menor que el de A1, el ángulo δ crecerá indefinidamente y por lo tanto no habrá estabilidad.

La condición de estabilidad es entonces:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{ca}} [P_m - P'e(d)] d\delta \geq \int_{\delta_{ca}}^{\delta_{lim}} [P_m - P'e(d)] d\delta = A_2 \text{máx}$$

Claramente se ve que disminuyendo el tiempo de despeje (coincidente con δ_{ca}) se disminuye el área A1 o área acelerante, aumentándose de esta manera la posibilidad de Estabilidad.

6.- Determinación del ángulo y tiempo crítico de despeje de la falla

Cuando se realiza el diseño del sistema de protecciones de un sistema eléctrico es necesario conocer cual es el máximo tiempo que se puede esperar antes de eliminar la falla. El ángulo coincidente con ese tiempo se denomina **ángulo crítico** (δ_{cc}), y realmente es crítico, ya que si la medida de corrección no se toma antes de que el sistema lo haya alcanzado, con seguridad el área de frenado disponible será insuficiente y por lo tanto la Inestabilidad estará asegurada.



Ya que el ángulo crítico es aquel que hace " $A1 = A2$ ", para calcularlo se debe plantear la ecuación (5.2) donde la incógnita es d_{cr} que en este caso se llama d_{cc} . Así:

$$\frac{d}{d d_{cc}} [P_m - P'_e(d)] \frac{d}{d d_{cc}} + \frac{d}{d d_{lim}} [P_m - P_e(d)] \frac{d}{d d_{cc}} = 0$$

Trabajando sobre esta expresión se despeja y calcula " d_{cc} "

7.- Método de cálculo para el Problema de Estabilidad Transitoria

Pasos a seguir en la aplicación del método::

1. Analizar el estado de funcionamiento prefalla, para ello:

- Dibujar el diagrama unifilar equivalente y calcular la reactancia de acoplamiento.
- Encontrar la expresión de la Potencia Eléctrica hallar la Potencia máxima para el estado

2. Analizar el estado de funcionamiento durante la falla, para ello:

- Dibujar el diagrama unifilar equivalente y calcular la reactancia de acoplamiento.
- Encontrar la expresión de la Potencia Eléctrica y hallar la Potencia máxima para el estado

3. Analizar el estado de funcionamiento posfalla, para ello:

- Dibujar el diagrama unifilar equivalente y calcular la reactancia de acoplamiento.
- Encontrar la expresión de la Potencia Eléctrica y hallar la Potencia máxima para el estado

4. Graficar las tres características Potencia-ángulo: en un mismo sistema de ejes coordenados y marcar los ángulos para: estado prefalla (d_o); ángulo de apertura (d_{ia}), ángulo crítico de despeje de la falla (d_{cc}) y ángulo límite (d_{lim}).

5. Plantear las integrales que permiten evaluar las distintas áreas acelerante y de frenado

6. Realizar los cálculos necesario para calcular las incógnitas del problema.

8.- Integración numérica de la ecuación diferencial de movimiento, aplicación en el cálculo del Tiempo Crítico de despeje

Siguiendo los pasos enumerados en el punto anterior se calculan las expresiones de potencia para los distintos estados de funcionamiento:

estado prefalla: $P^1_e = [(E'_p \cdot U_1) / x^1_{acop}] \sin(d)$

estado de falla: $P^2_e = [(E'_p \cdot U_1) / x^2_{acop}] \sin(d)$

estado posfalla: $P^3_e = [(E'_p \cdot U_1) / x^3_{acop}] \sin(d)$



Graficando:

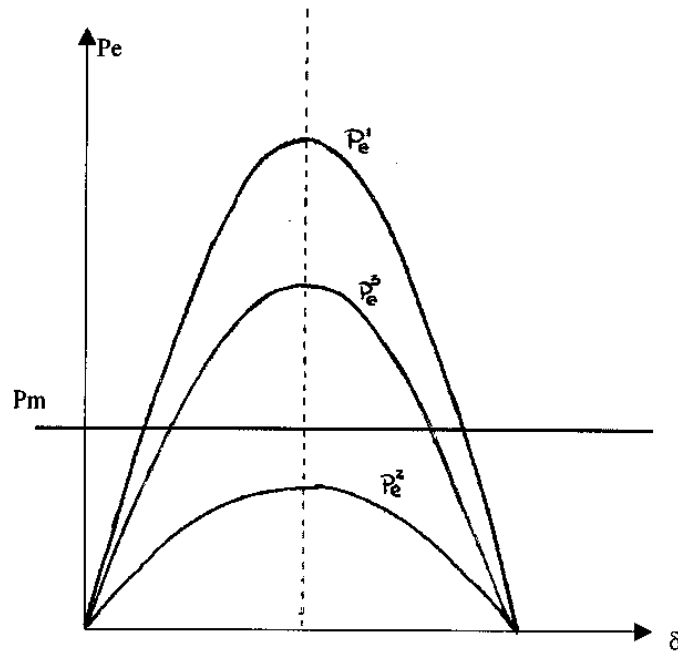


Figura.9

El tiempo crítico para el despeje es aquel para el cual se presenta el delta crítico, por lo tanto se debe plantear la ecuación de igualdad de áreas acelerante y de frenado y calcular "d_{cc}"

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} [P_m - P'_e(d)] d\delta + \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{lim}} [P_m - P_e(d)] d\delta = 0 \rightarrow "d_{cc}"$$

Para traducir el ángulo encontrado a tiempo es necesario aplicar un método de Integración numérica, a continuación se presenta un método muy sencillo que permite calcular T_{crítico} y seleccionar el sistema de interruptores mas adecuado para el sistema.

Método Paso a Paso

Hasta el presente, el método más práctico de análisis de la estabilidad transitoria disponible es la simulación en el dominio del tiempo en el cual las ecuaciones diferenciales no lineales se resuelven utilizando técnicas de integración numérica paso por paso (Métodos de Euler, Euler modificado, Runge-Kutta de segundo y cuarto orden, etc...).

Se define para cada intervalo de integración un:

$$Dd(n) = Dd(n-1) + Pa(n-1) \cdot (Dt^2/M) \quad (8.1)$$

donde:

$$M = 2H/w$$

Dt = intervalo de integración (se adopta)

Pa = Potencia acelerante = P_m - P_e

Primer Paso:

$$\begin{aligned} t = 0^- & \quad Pa = 0 \text{ (aún no se ha producido la falla)} \\ t = 0^+ & \quad Pa = P_m - P_e^2 \end{aligned}$$



d_o

Como en este primer paso el salto de potencia acelerante es tan brusco, con el propósito de mejorar la convergencia se toma como " P_a " del intervalo solamente la mitad de la calculada, así:

$$P_a(\text{del intervalo 1}) = P_{a1} = P_a/2$$

reemplazando en la (8.1)

$$D d1 = D d_o + P_{a1} \cdot (Dt^2/M)$$

$$D d1 = P_{a1} \cdot Dt^2/M$$

así:

$$d1 = d_o + D d1$$

Segundo Paso en adelante:

$$P_a = P_m - P^2_e(d) \Big|_{d1}$$

Repitiendo el mismo procedimiento del primer paso pero, tomando como potencia acelerante la calculada

$$D d2 = D d1 + P_a \cdot (Dt^2/M)$$

así:

$$d2 = d1 + D d2$$

Este procedimiento se repite tantas veces como sea necesario hasta encontrar el ángulo crítico calculado por el método de las Areas Iguales.

El tiempo crítico será entonces $(n \cdot Dt)$ si el delta crítico se encontró durante el *enésimo* paso.

Ejemplo.1

Sea el sistema de la Figura.10 y supóngase que en el punto "F" se produce una falla trifásica balanceada.

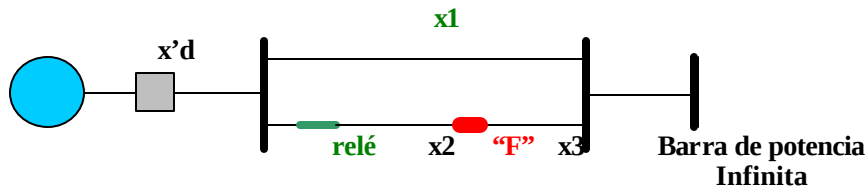


Figura.10

Los datos son:

$x1 = 0.4$ [p.u.]
 $x2 = 0.2$ [p.u.]
 $x3 = 0.2$ [p.u.]
 $E = 1.0$ [p.u.]

$E'_p = 1.2$ [p.u.]
 $P_m = 1.5$ [p.u.]
 $x'd = 0.2$ [p.u.]
 $H = 3$ segundos

Determinar:

- a)- Si la falla no es removida, ¿Puede el generador mantener la estabilidad del sistema?.



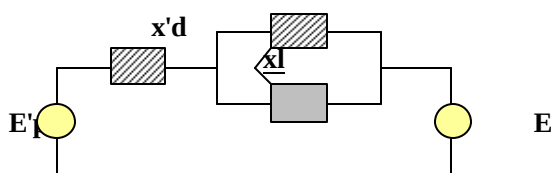
b)- Hallar el ángulo crítico de apertura dcc.

c)- Hallar el tiempo crítico de apertura.

Para resolver este ejemplo por el método de las áreas iguales se seguirán los pasos enunciados en el punto 7.-;

1.- Análisis del estado de funcionamiento prefalla

Diagrama Unifilar Equivalente:



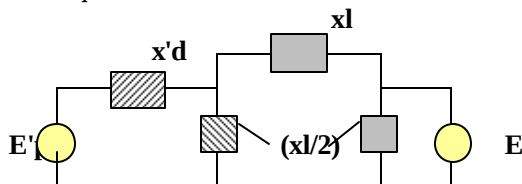
$$x^o_{acop} = x'd + (x_l/2) = 0.2 + (0.4/2) = 0.4$$

$$P^o_e = \frac{E'_p \cdot E}{x^o_{acop}} \sin(d) = \frac{(1,2 \cdot 1,0)}{0.4} \sin(d) = 3 \sin(d)$$

$$P^o_{max} = 3$$

2.- Análisis del estado de funcionamiento en falla

Diagrama Unifilar Equivalente:



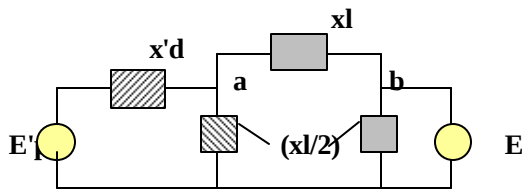
Para encontrar la reactancia de acoplamiento es necesario trabajar sobre el sistema realizando transformaciones estrella-triángulo. Las expresiones empleadas en las transformaciones son:

$$Z_a = (Z_{ab} \cdot Z_{ac}) / (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc})$$

$$Z_{ab} = Z_a + Z_b + (Z_a \cdot Z_b) / Z_c$$

En este problema para calcular la reactancia de acoplamiento, es necesario transformar el triángulo **a-b-c** en una estrella, luego sumar en la pata "a" de la estrella la reactancia transitoria del generador y volverla a transformar en un triángulo. La única reactancia que interesa calcular en ese triángulo es la pata **xab** que es la **reactancia de acoplamiento**. Así:





Transformando en triángulo a-b-c en una estrella a-b-c:

$$x_{a1} = [x_l \cdot (x_l/2)] / [x_l + (x_l/2) + (x_l/2)] = (0.4 \cdot 0.2) / (0.4 + 0.2 + 0.2) = 0.1$$

$$x_b = x_{a1} = 0.1$$

$$x_c = [(x_l/2) \cdot (x_l/2)] / [x_l + (x_l/2) + (x_l/2)] = (0.2 \cdot 0.2) / (0.4 + 0.2 + 0.2) = 0.05$$

Sumando a la pata "a" de la estrella la reactancia sincrónica del generador :

$$x_a = x_{a1} + x'd = 0.1 + 0.2 = 0.3$$

Se puede calcular la reactancia de acoplamiento como:

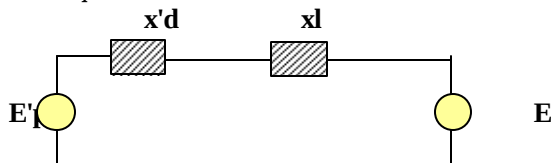
$$x_{acop}^f = x_a + x_b + (x_a \cdot x_b) / x_c = 0.3 + 0.1 + (0.3 \cdot 0.1) / 0.05 = 1.0$$

$$P_e^f = \frac{E'_p \cdot E}{x_{acop}^f} \sin(d) = \frac{(1.2 \cdot 1.0)}{1.0} \sin(d) = 1.2 \sin(d)$$

$P_{max}^f = 1.2$ (compararla con la anterior)!!!!!!
--

3.- Análisis del estado de funcionamiento posfalla (la falla ha sido eliminada)

Diagrama Unifilar Equivalente:



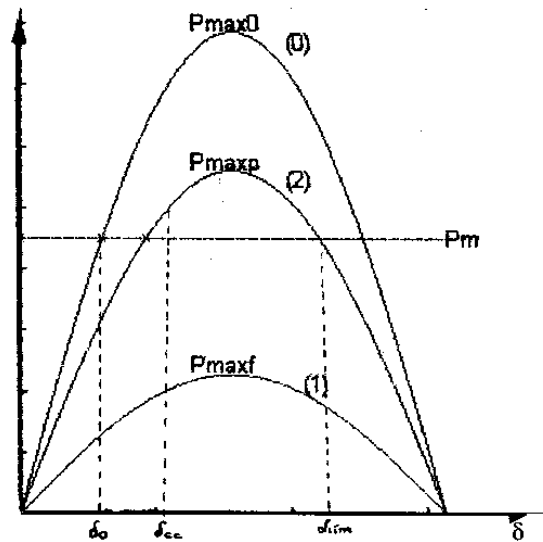
$$x_{acop}^{pf} = x'd + (x_l) = 0.2 + 0.4 = 0.6$$

$$P_e^{pf} = \frac{E'_p \cdot E}{x_{acop}^{pf}} \sin(d) = \frac{(1.2 \cdot 1.0)}{0.6} \sin(d) = 2 \sin(d)$$

$P_{max}^{pf} = 2$



4. Gráfica de las características Potencia-Angulo



a) Si la falla no es removida, Puede el generador mantener la estabilidad del sistema?

Observando la última gráfica y los valores de potencia eléctrica máxima obtenidos se puede asegurar que, si la falla no es removida el sistema no puede mantenerse estable ya que la Potencia máxima que el generador puede entregar durante la falla es menor que la Potencia Mecánica.

$$P_{mecánica} = 1.5 \text{ p.u.} > P_{f\text{máx}} = 1.2$$

"Sistema Inestable"

b) Hallar el ángulo crítico de perturbación δ_{cc}

Según se definió anteriormente, el ángulo crítico de apertura es el ángulo que corresponde al tiempo máximo que se puede esperar para proceder a la remoción de la falla de manera tal de asegurar la Estabilidad del Sistema. Es por lo tanto, el ángulo que hace que el área acelerante sea igual al área de frenado ($A_1 = A_2$). Para encontrar δ_{cc} se plantea la ecuación:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} [P_m - P^f_e(d)] dd + \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{lim}} [P_m - P^f_e(d)] dd = 0$$

que en este caso queda:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} [1.5 - 1.2 \sin(d)] dd + \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{lim}} [1.5 - 2 \sin(d)] dd = 0$$

Los ángulo δ_0 se pueden calcular como la intersección de la característica de potencia eléctrica con la de potencia mecánica, así:

$$P^e = P_m \quad 3 \sin(d) = 1.5 \quad \delta_0 = 30^\circ = 0.5235^r$$



El ángulo δ_{lim} se calcula como la intersección de la curva de potencia eléctrica de posfalla y la característica de potencia mecánica.

$$P^f_e = P_m \quad 2 \sin(d) = 1.5 \quad d_p = 48.59^\circ = 0.8480^r$$

$$d_{lim} = 180^\circ - d_p = 134.41^\circ = 2.2935^r$$

Aplicando en la integral y resolviendo se encuentra que:

$$d_{cc} = 68.52^\circ = 1.1959^r$$

Asegura la estabilidad del sistema ya que hace que

$$A1 = A2 = 0.4087$$

c) Calcule el tiempo crítico

Para ello aplicar el método de integración numérica explicado en el apartado 8.

$$M = 2.H/\omega$$

$$\omega = 2 \pi f = 2 \cdot 180 \cdot 50 = 18000$$

$$\left. \begin{array}{l} M = 0.00033 \\ \text{Tomando un } Dt = 0.05 \text{ seg} \end{array} \right\} Dt^2/M = 7.57$$

Primer Paso:

$$\begin{array}{l} t = 0^- \\ t = 0^+ \end{array} \quad \begin{array}{l} P_a = 0 \text{ (aún no se ha producido la falla)} \\ P_a = P_m - P^f_e \end{array}$$

$$P^f_e \Big|_{d_0} = 1.2 \sin(30^\circ) = 0.6$$

$$P_a = 1.5 - 0.6 = 0.9$$

Como en este primer paso el salto de potencia acelerante es tan brusco, con el propósito de mejorar la convergencia se toma como " P_a " del intervalo solamente la mitad de la calculada, así:

$$P_a(\text{del intervalo 1}) = P_{a1} = P_a/2 = 0.9/2 = 0.45$$

$$Dd1 = Dd_0 + P_{a1} \cdot (Dt^2/M)$$

$$Dd1 = P_{a1} \cdot Dt^2/M = 3.4065$$

así:

$$d1 = d_0 + Dd1 = 30^\circ + 3.4065^\circ \Rightarrow d1 = 33.4065^\circ \text{ (en } t = 0.05 \text{ seg)}$$

Segundo Paso en adelante:

$$P_a = P_m - P^f_e(d) \Big|_{d1}$$

$$P^f_e(d) \Big|_{d1 = 33.4065} = 1.2 \sin(33.4065) = 0.6606$$



$$P_a = 1.5 - 0.6606 = 0.8394$$

Repetiendo el mismo procedimiento del primer paso pero, tomando como potencia acelerante la calculada

$$Dd2 = Dd1 + P_a \cdot (Dt^2/M)$$

$$Dd2 = 3.4065 + 0.8394 \cdot (7.57)$$

$$Dd2 = 9.7607$$

asi:

$$d2 = d1 + Dd2$$

$$d2 = 33.4065 + 9.7607 \Rightarrow d2 = 43.1672^\circ \text{ (en } t = 0.1 \text{ seg)}$$

Repetiendo este procedimiento se tiene que para $t = 0.20 \text{ seg}$, corresponde un ángulo $d = 76.61^\circ$, interpolando linealmente entre los valores encontrados en las dos últimas iteraciones se tiene que para el $d_{cc} = 68.52^\circ$ calculado corresponde un tiempo $t_{critico} = 0.178 \text{ seg}$.

9.- Influencia de las Pérdidas de Potencia Activa. Consideración de $R \neq 0$

La expresión de la potencia eléctrica que se ha presentado hasta ahora no involucra las resistencias presentes en el sistema de transmisión. Se verá como influye en la condición de estabilidad su consideración.

La expresión de potencia eléctrica completa en la cual está considerada la resistencia tiene la forma:

$$P_e = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin(q_{11}) + \frac{E' \cdot U_s}{Z_{12}} \sin(q_{12} - d_{12}) \quad (9.1)$$

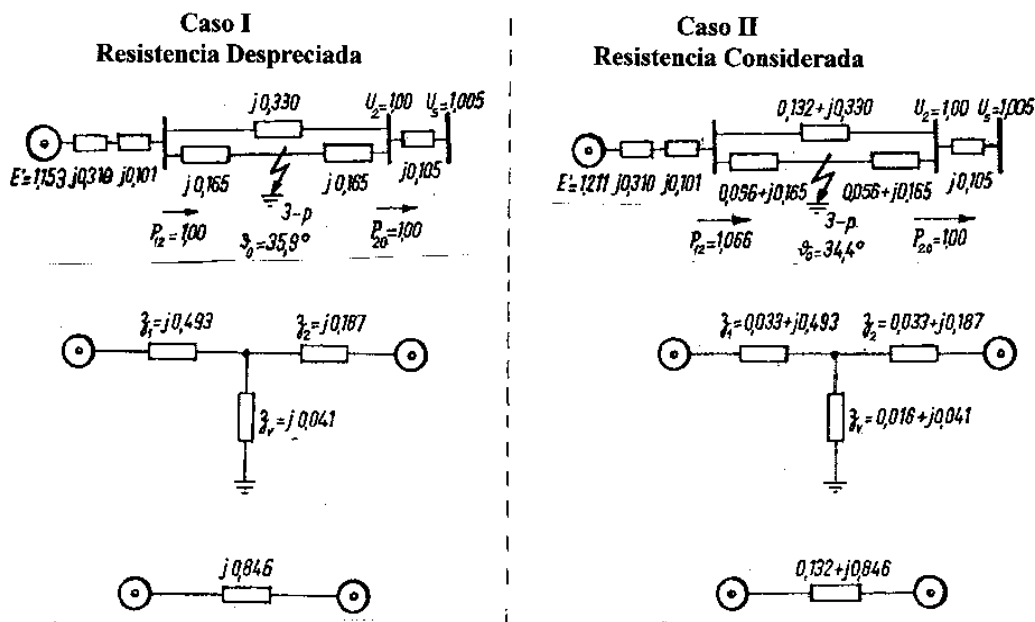


Figura.11a

Figura.11b

Las Figuras.11a y 11b muestran un mismo sistema eléctrico, en la Figura.11a se ha despreciado la resistencia de las líneas de transmisión y en la 11b se la ha incluido.

Como se puede apreciar en la Figura.11b para abastecer la demanda $P_{20} = 1 \text{ p.u.}$ la consideración de resistencias en el sistema conduce a un aumento en la potencia P_{12} que debe entregar el generador de un valor de 1 p.u. (sin resistencias) a un valor 1,066 p.u. (con resistencias), lo que implica mayor corriente y por lo tanto mayor tensión de la rueda polar de la máquina.



Al calcular, a través de la ecuación (9.1) los valores de potencia entregada por la máquina en cada caso se tiene:

$$P_e(\text{caso I}) = 0.395 \sin(\delta); \quad \delta_{cc} = 63^\circ; \quad T_{\text{crítico}} = 0.17 \text{ segundos}$$

$$P_e(\text{caso II}) = 0.263 + 1.423 \sin(\delta - 8.8^\circ); \quad \delta_{cc} = 93.5^\circ; \quad T_{\text{crítico}} = 0.31 \text{ segundos}$$

Claramente se ve que al considerar la presencia de las resistencias se mejora la estabilidad del sistema. Si se observa la Figura.12a y 12b, se ve que ese aumento de la estabilidad se manifiesta con un considerable aumento en la altura de la curva del estado posfalla, lo que permite contar con un área de frenado mayor.

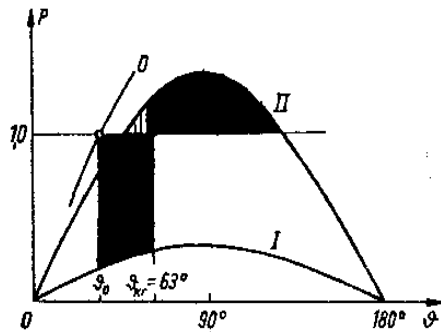


Figura.12a

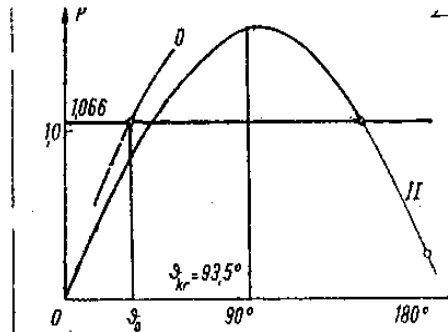


Figura.12b

10.- Relación entre la Potencia de transmisión máxima y el tiempo máximo admisible de duración del cortocircuito.

Considérese el sistema eléctrico de la Figura.13. En el se muestra un sistema eléctrico constituido por una máquina síncrona conectada a una red rígida a través de una doble tema.

En la Figura.13a la máquina esta abasteciendo una carga $P_o = 0.5 \text{ p.u.}$ y en la Figura.13b abastece una carga $P_o = 1.2 \text{ p.u.}$

Supóngase que para ambos estados de funcionamiento se produce un cortocircuito trifásico en bornes del generador.



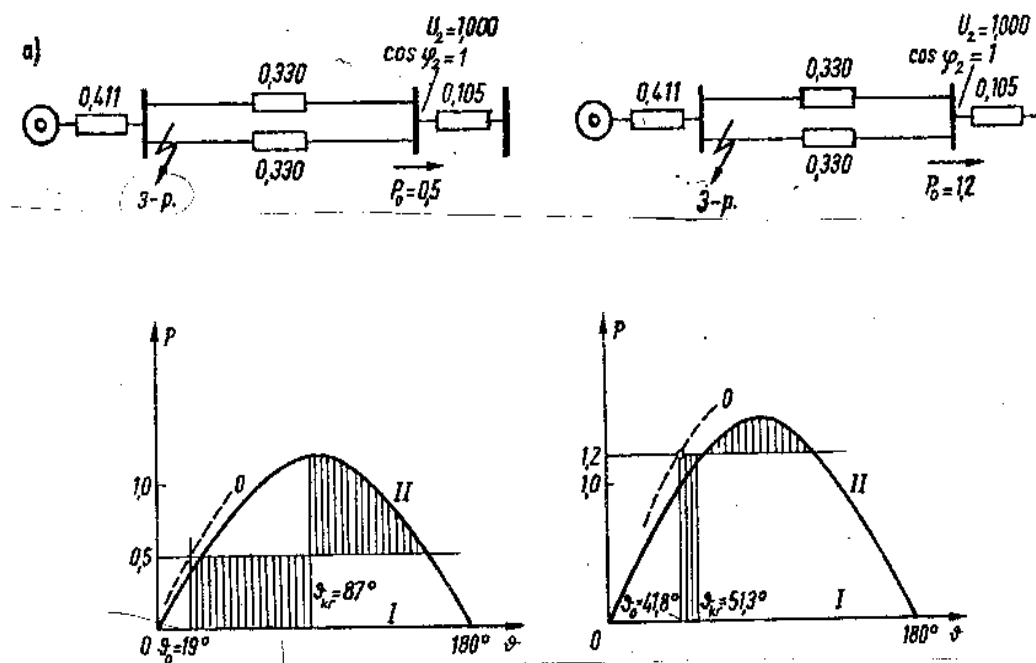


Figura.13a

Figura.13b

Las líneas de punto indican la característica de funcionamiento del estado estacionario, la línea llena indica la característica del estado posfalla y la característica del estado de falla coincide con el eje "delta" ya que, como la falla es en bornes, mientras está presente el cortocircuito, la tensión y la Potencia eléctrica son cero. En la Figura.13 se aprecia claramente que cuanto mayor es la potencia generada menor es el área de frenado disponible, por lo tanto peor es el comportamiento dinámico del sistema.

11.- Influencia de la ubicación de la falla

La severidad de las fallas tiende a disminuir a medida que aumenta la distancia entre la falla y los generadores.

El aumento de la distancia entre falla y generador, significa un incremento en la admitancia de acoplamiento, los que usualmente beneficia la estabilidad, permitiendo mayores tiempos para las maniobras de despeje.

Así, cuando la falla tiene lugar en bornes del generador, se presenta la situación más desfavorable desde el punto de vista de la Estabilidad del sistema.

Tal como se ve en la Figura.13a y 13b durante la falla en bornes la potencia generada es cero y por lo tanto cabe la posibilidad de definir el mayor área acelerante. Sin embargo si la falla ocurre en algún punto del sistema de transmisión, mientras esta se encuentra presente se define una característica de funcionamiento, que sin dudas, definirá un área menor que en el caso anterior y por lo tanto dará más tiempo para llevar a cabo las acciones correctivas.

La Figura.14 muestra las tres características de funcionamiento del sistema que se ha tomado como ejemplo el cual se ve afectado por un cortocircuito en una de las líneas que forman la doble tema.

La curva más alta corresponde a la Potencia eléctrica del estado prefalla, la más baja a la Potencia eléctrica del estado de falla y la intermedia corresponde a la Potencia eléctrica cuando en el sistema se ha eliminado la línea fallada y la transmisión de potencia se realiza a través de una sola línea. Obsérvese, que la característica de falla en este caso, no coincide con el eje horizontal, tal es el caso de un cortocircuito en bornes.



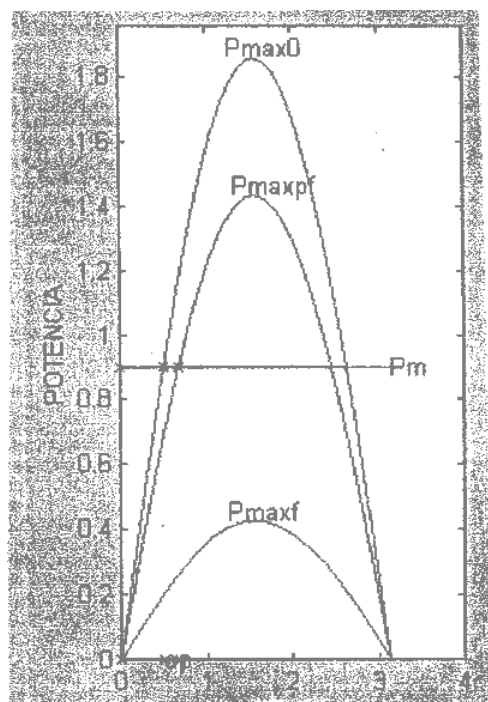


Figura.14

12.- Impacto de diferentes tipos de cortocircuitos sobre la estabilidad transitoria

Existe un gran número de perturbaciones que se pueden presentar y causar problemas de inestabilidad en los sistemas eléctricos. A su vez, el sistema puede encontrarse en diferentes estados estacionarios de operación antes de que se presente la perturbación. Tanto la perturbación como el estado de operación prefalla tienen importante influencia sobre la posibilidad de operación estable luego de superada la falla.

Las fallas más comunes que afectan un sistema eléctrico se clasifican en:

1. Cortocircuitos trifásicos.
2. Cortocircuitos bifásicos con contacto a tierra.
3. Cortocircuitos bifásicos sin contacto a tierra.
4. Contacto monofásico a tierra.

La probabilidad de ocurrencia de estos tipos de falla crece en el orden mencionado en tanto que la severidad disminuye en el mismo sentido.

Por ejemplo una estadística del sistema Eléctrico de Gran Bretaña, registra para un período de observación de seis años para líneas aéreas de transmisión de una terna de 400kV la siguiente distribución de fallas:

▪ Cortocircuitos trifásicos.	0.52%
▪ Cortocircuitos bifásicos con contacto a tierra.	5.90%
▪ Cortocircuitos bifásicos sin contacto a tierra.	22.46%
▪ Contacto monofásico a tierra.	71.12%

Naturalmente los valores dependen de cada sistema, pero la distribución mostrada ilustra cualitativamente la gran diferencia existente entre las probabilidades de los distintos tipos de fallas, mostrando además que, en general, la falla trifásica es un evento poco probable.

13.- Simulación de la respuesta dinámica del sistema

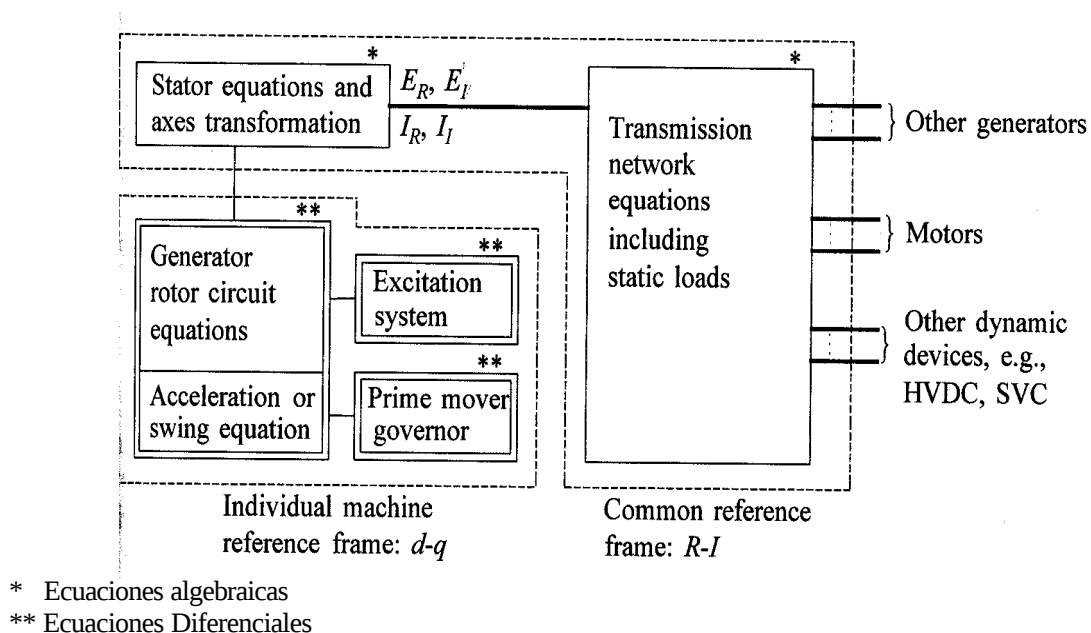
El análisis de la estabilidad transitoria de sistemas de potencia incluye el cálculo de su respuesta dinámica no-lineal a grandes perturbaciones, usualmente una falla en la red de transmisión, seguida de la separación



del elemento fallado por el relé de protección en la figura 15 se describe la estructura general del modelo de sistema de potencia aplicable al análisis de la estabilidad transitoria. El mismo modelo puede utilizarse para el análisis de la estabilidad estática; sin embargo en los estudios de estabilidad dinámica tiene que ser resuelto un conjunto de ecuaciones no lineales. Además aparecen en el modelo grandes discontinuidades debidas a las fallas y maniobras en la red, y pequeñas discontinuidades debidas a los límites e las variables. Son de interés aquí, las tensiones de barras, flujos de potencia, y performance del sistema de protección, además de la información básica referida a la estabilidad del sistema.

Como puede verse en la figura 15, la representación general del sistema de potencia incluye modelos para los siguientes componentes individuales:

- Generadores sincrónicos, con los sistemas de excitación asociados y las máquinas de impulso
- Red interconectada de transmisión incluyendo las cargas estáticas
- Cargas motóricas sincrónicas y de inducción
- Otros dispositivos tales como HVDC y SVCs



Estructura del sistema de potencia completo para estudios de estabilidad transitoria

Figura. 15

El modelo usado para cada componente debe ser apropiado para los análisis de estabilidad, y las ecuaciones del sistema deben estar organizadas en una forma adecuada para la aplicación de métodos numéricos.

El modelo completo del sistema consiste de un conjunto grande de ecuaciones diferenciales ordinarias y grandes ecuaciones algebraicas raras. Luego, el análisis de la estabilidad transitoria es por lo tanto un problema algebraico de valor inicial diferencial.

14.- Método directo de análisis de la estabilidad transitoria

Los métodos directos determinan la estabilidad sin resolver explícitamente el sistema de ecuaciones diferenciales. Este método ha recibido considerable atención a partir de los trabajos publicados por Magnusson y Aylett quienes utilizaron la energía transitoria para la evaluación de la estabilidad transitoria. Los métodos basados en la energía son un caso especial del segundo método de Lyapunov más general, o método directo, siendo la función de energía una posible función de Lyapunov.

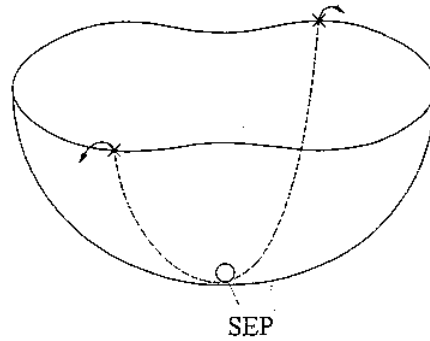
A continuación se describe los conceptos básicos en los cuales se basan los métodos directos

Descripción del método de la función de energía transitoria



Analogía de la bolilla rodante

El método de la energía transitoria se puede describir considerando una bolilla rodante en el interior de la superficie de una cáscara como se describe en la figura 16. El área dentro de la cáscara representa la región de estabilidad, y el área fuera es la región de inestabilidad. El borde de la cáscara es irregular en aspecto de tal forma que puntos diferentes del borde tienen diferentes alturas.



Una bolilla rodando en la superficie interior de una cáscara

Figura. 16

Inicialmente la bolilla descansa en el fondo de la cáscara, y su estado se refiere como *punto de equilibrio estable* (SEP). Cuando se inyecta una cantidad de energía cinética a la bolilla, causando su movimiento en alguna dirección en particular, la bolilla rueda dentro de la superficie de la cáscara a lo largo de un camino determinado por la dirección del impulso inicial. El punto donde la bolilla parará está determinado por la cantidad de energía cinética inyectada inicialmente. Si la bolilla convierte toda su energía cinética en energía potencial antes de alcanzar el borde, luego rodará hacia atrás hasta alcanzar un punto de equilibrio nuevamente. Sin embargo, si la energía cinética inyectada es lo suficientemente grande para causar que la bolilla salga por sobre el borde, luego la bolilla entrará en una región de inestabilidad y no retornará a un punto de equilibrio estable. La superficie interior representa la *superficie de energía potencial*, y el borde de la cáscara representa la *superficie límite de energía potencial* (PEBS).

Se requieren dos cantidades para determinar si la bolilla entrará en la región de inestabilidad: (a) la energía cinética inicial y (b) la altura del borde en el punto de cruce. La ubicación del punto de cruce depende de la dirección del impulso inicial.

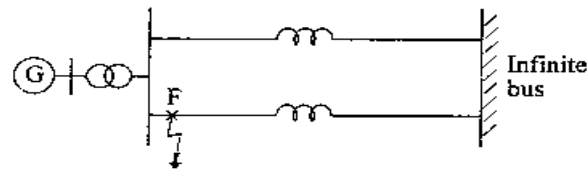
Aplicación a sistemas de potencia

La base de aplicación del método TEF para el análisis de estabilidad de sistemas de potencia es conceptualmente similar al aplicado a una bolilla rodante. Inicialmente el sistema está operando en un punto de equilibrio estable. Si ocurre una falla, el equilibrio es perturbado y las máquinas sincrónicas se aceleran. El sistema de potencia gana energía cinética y potencial durante el período posfalla y el sistema se mueve de la posición SEP. Luego de que la falla es despejada, la energía cinética se convierte en energía potencial de la misma forma que la bolilla rueda en la superficie de energía potencial. Para evitar la inestabilidad, el sistema debe ser capaz de absorber la energía cinética en un tiempo donde las fuerzas en los generadores tiendan a llevarlos nuevamente a sus posiciones de equilibrio. Esto depende de la capacidad de absorción de energía potencial del sistema luego de la perturbación. Para una determinada configuración pos-perturbación de la red, hay un máximo o una cantidad crítica de energía transitoria que el sistema puede absorber. Consecuentemente, la evaluación de la estabilidad transitoria requiere

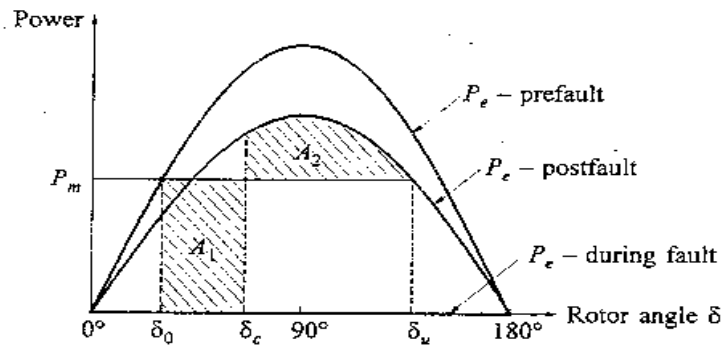
- Funciones que describan adecuadamente la energía transitoria responsable de la separación de una o más máquinas sincrónicas del resto del sistema
- Una estimación de la energía crítica requerida por las máquinas para perder el sincronismo



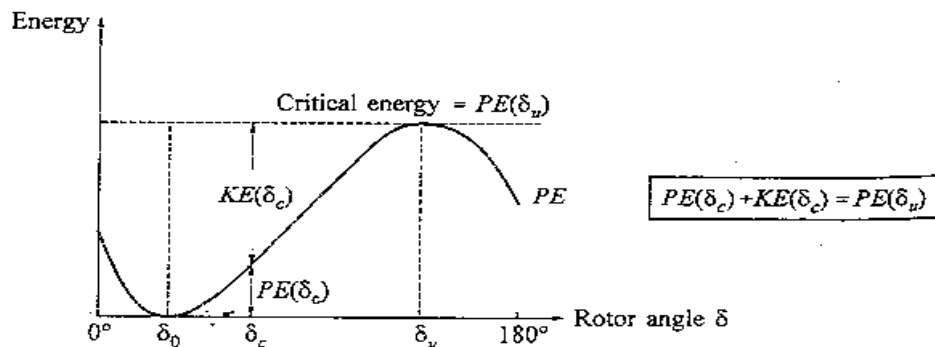
Para un sistema de dos máquinas la energía crítica es única, y el método TEF es equivalente al método de las áreas iguales. Esto se ilustra en la figura 17, donde se muestran dos dibujos , ambos teniendo el ángulo del rotor δ como ordenada.



(a) System configuration



(b) Power-angle relationships



(c) Energy-angle relationships

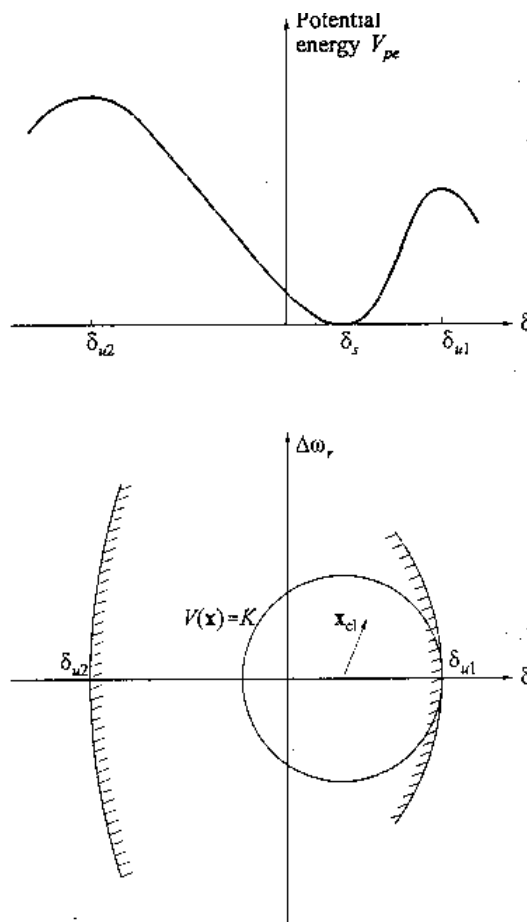
Ilustración de la equivalencia del método de la energía transitoria y el criterio de las áreas iguales

Figura. 16

El dibujo superior ilustra el criterio de las áreas iguales en el que el ángulo de despeje crítico δ_c se establece por medio de la igualdad de las áreas A_1 y A_2 . El dibujo inferior ilustra el método de la energía transitoria la cual puede ser usada para especificar el ángulo de despeje crítico en términos de energía potencial y energía cinética. La energía cinética ganada durante el período de existencia de la falla se suma a la energía potencial al correspondiente ángulo del rotor, y la suma se compara con la energía potencial crítica para determinar la estabilidad.

Dada una perturbación, hay un punto de equilibrio estable para el sistema posfalla. Se puede definir una región de atracción para tal SEP posfalla como se muestra en la figura 17. Cualquier trayectoria del sistema posfalla con el estado del sistema en el momento del despeje de la falla (X_{cl}) dentro de la región de atracción convergirá eventualmente al SEP, y el sistema será estable. Por otro lado, si X_{cl} queda fuera de la región de atracción, el sistema posfalla no convergirá a un punto de equilibrio estable, y el sistema será inestable.





Región de estabilidad y su aproximación local

Figura. 17

El estado del sistema en el momento de despeje de la falla (X_{cl}) se puede describir por el valor de la función de energía evaluada en X_{cl} , es decir, $V(X_{cl})$. Por lo tanto, el método directo resuelve el problema de estabilidad comparando $V(X_{cl})$ con la energía crítica V_{cr} . El sistema es estable si $V(X_{cl})$ es menor que V_{cr} y la cantidad $V_{cr} - V(X_{cl})$ es una buena medida de la estabilidad relativa del sistema. Esta cantidad se define como el *margen de energía transitoria*.

La cantidad $V(X_{cl})$ mide la cantidad de energía transitoria inyectada en el sistema por la falla mientras que la energía crítica mide la robustez del sistema posfalla. Más precisamente, la energía crítica mide la capacidad de absorción de energía del sistema posfalla.

En referencia a la figura 17, si el rotor oscila dentro del rango δ_{u1} a δ_{u2} , el sistema permanecerá estable transitoriamente. Si el rotor oscila fuera de este rango, el sistema se volverá, inestable. Por lo tanto los dos puntos δ_{u1} y δ_{u2} en la curva de energía potencial forman una frontera para todas las trayectorias estable de ángulo de rotor. Esta frontera se denomina la superficie frontera de energía potencial (PEBS) y los puntos en tal frontera son picos locales de energía potencial.

La frontera de la región de estabilidad se aproxima usualmente en forma local por una superficie de energía constante $\{X|V(X) = K\}$ como se muestra en la figura 17, donde K representa la energía crítica V_{cr} del sistema posfalla.



15.- Métodos de mejoramiento de la estabilidad transitoria

Los métodos empleados normalmente para mejorar la estabilidad transitoria intenta lograr uno o más de los siguientes efectos:

- a) Reducción de las influencias perturbantes minimizando la severidad de la falla y su duración
- b) Incrementando las fuerzas de sincronizantes de restauración
- c) Reducción del torque de aceleración a través del control de la potencia mecánica de la máquina de impulso
- d) Reducción del torque acelerante aplicando cargas artificiales

A continuación se describen sucintamente algunos de los métodos para satisfacer tales objetivos.

Despeje de la falla de alta velocidad

La cantidad de energía cinética ganada por los generadores durante la falla es directamente proporcional a la duración de la falla; mientras más rápido sea despejada la falla menor perturbación causa al sistema.

Actualmente se utiliza para ello interruptores de dos ciclos conjuntamente con relés de alta velocidad y comunicación, localizados donde es importante un rápido despeje de la falla.

En circunstancias especiales se puede requerir despejes de la falla aún más rápidos y aquí hay que aplicar técnicas especiales de protección como por ej. relés de onda viajera.

Reducción de la reactancia del sistema de transmisión

Las reactancias series inductivas de las redes son los principales determinantes de los límites de estabilidad. La reducción de las reactancias de diversos elementos de la red de transmisión mejora la estabilidad transitoria incrementando la transferencia de potencia sincronizante posfalla. Obviamente, el camino más directo para realizar esto es reducir las reactancias de los circuitos de transmisión los cuales están determinadas por la tensión nominal, configuración de líneas y conductores y el número de circuitos en paralelo. Los siguientes son métodos adicionales de reducción de las reactancias de la red:

- a) Uso de transformadores con reactancias de dispersión de bajo valor
- b) Compensación con capacitores serie de líneas de transmisión

Típicamente, las reactancias de dispersión tienen un valor dentro del rango 0.1 a 0.15 pu. El mínimo valor aceptable que puede tener un transformador debe ser consultado con el fabricante.

El capacitor serie directamente compensa las reactancia serie de la línea y, con ello, la capacidad de transmisión de potencia puede ser significativamente aumentada; esto se traduce inmediatamente en un mejoramiento de la estabilidad transitoria, dependiendo de los medios provistos para el by-pass del capacitor durante la falla y su re-inserción luego del despeje de la misma. La velocidad de re-inserción es un factor importante para mantener la estabilidad transitoria. Un problema con los capacitores series es la posibilidad de resonancia sub-sicrónica con los turbos generadores cercanos; este aspecto debe ser cuidadosamente analizado y se deben tomar medidas preventivas apropiadas.

Compensación shunt regulada

La utilización de compensación shunt capaz de mantener las tensiones en puntos determinados del sistema puede mejorar la estabilidad del sistema incrementando el flujo de potencia sincronizante entre generadores interconectados. Condesadores sincrónicos o los SVCs se pueden usar para tal propósito. Estos son generadores y/o absorbentes estáticos conectados shunt cuyas salidas se varían de tal forma para controlar parámetros específicos del sistema de potencia. El término estático se utiliza para indicar que los SVCs, a diferencia de los compensadores sincrónicos, no tienen componentes principales rotantes o en movimiento.



Frenado dinámico

El frenado dinámico utiliza el concepto de aplicar una carga eléctrica artificial durante una perturbación transitoria para incrementar la salida de potencia activa de los generadores y de esa forma reducir la aceleración del rotor.

Una forma de frenado dinámico incluye la conexión de resistores shunt durante aproximadamente 0.5 s luego de la falla para reducir la potencia de aceleración de los generadores cercanos y reducir la energía cinética ganada durante la falla. Hasta ahora los resistores de frenado han sido aplicados solamente en centrales hidráulicas alejadas de los centros de consumo. Las unidades hidráulicas, en comparación con las unidades térmicas, son mas robustas y por lo tanto pueden soportar mejor los shocks provocados por la conexión de los resistores sin efectos adversos en las unidades. Si se van a aplicar resistores de frenado en unidades térmicas, debe analizarse cuidadosamente el efecto en la vida útil del árbol por fatiga.

Conexión de reactores

Los reactores shunt cerca de los generadores son un medio simple y conveniente de mejorar la estabilidad transitoria. El reactor permanece normalmente conectado a la red. La carga reactiva resultante incrementa la tensión interna del generador, y esto es beneficioso para la estabilidad. Luego de una falla, la desconexión de del reactor mejora aún más la estabilidad.

Operación independiente de los polos de los interruptores

Esto se refiere al uso de mecanismos independientes para cada fase del interruptor, de tal forma que las tres fases son abiertas y cerradas en forma independiente una de otra. Como resultado, la falla de un polo no será restricción para la operación de los otros dos polos.

La operación independiente de cada polo puede ser ventajoso en lugares donde el criterio de diseño del sistema incluye una falla trifásica compuesta con una falla de apertura de interruptor. Es extremadamente dificultoso mantener la estabilidad del sistema para una falla trifásica con los tres polos de un interruptor primario fallando al abrir. Con interruptores con polos independientes es muy poco probable la falla de apertura de los tres polos en forma simultánea. El uso de sistemas duplicados de relés, de bobinas de disparo del interruptor y de mecanismos de operación prácticamente garantizan que al menos dos polos abrirán. Esto reduciría una falla trifásica a una falla monofásica y así los efectos de la falla.

Apertura y recierre monofásico

Esta modalidad utiliza mecanismos de operación separados en cada fase; en el caso de fallas monofásicas, el relé está ajustado para disparar solamente la fase fallada, seguido de un recierre rápido dentro de los 0.5 a 1.5 s. Para fallas multi-fases se disparan las tres fases.

Durante el período en que la fase está abierta la potencia es transferida por las otras dos fases sanas. Dado que la mayoría de las fallas en líneas de transmisión son monofásicas, la apertura y recierre de la fase fallada resulta en un mejoramiento de la estabilidad transitoria en comparación con la apertura y recierre trifásico.

Este mecanismo es particularmente atractivo en situaciones donde una sola línea importante conecta dos sistemas o donde conecta una central con el resto del sistema. Puede utilizarse en sistema con líneas múltiples para mejorar la seguridad del sistema contra múltiples contingencias. Existen tres problemas potenciales relacionados con este automatismo:

- Extinción del arco secundario
- Efectos de fatiga del eje de los turbo-generadores
- Efectos térmicos en los generadores cercanos debidos a las corrientes de secuencia negativa

Apertura y cierre rápido de válvulas en turbinas de vapor



Es una técnica aplicable a unidades térmicas para la asistencia en mantener la estabilidad transitoria de sistemas de potencia. Incluye la apertura y cierre rápido de la válvula de vapor en una manera predeterminada para reducir la potencia acelerante del generador que sigue luego de la detección de una falla severa del sistema de transmisión.

A pesar del que el principio de esta técnica, como una medida de estabilidad, fue reconocida en los años 30, no ha sido sin embargo aplicado ampliamente por diversas razones. Algunas de ellas tienen que ver con los posibles efectos adversos en la turbina y sistema de suministro de energía.

Desde mediados de los 60, las empresas han probado que esta técnica podría ser un método efectivo de mejoramiento de la estabilidad del sistema en algunas situaciones. Han sido publicados un número grande de papers técnicos describiendo los conceptos básicos y los efectos.

Desconexión automática de generación(DAG)

La desconexión selectiva de unidades de generación ante contingencias severas en el sistema de transmisión ha sido utilizada como un método de mejora de la estabilidad durante muchos años. La desconexión de generación en un lugar apropiado del sistema reduce la potencia transferida sobre los vínculos críticos de transmisión. Dado que las unidades de generación pueden ser desconectadas rápidamente, esto es un eficiente medio de mejorar la estabilidad transitoria.

Históricamente, la práctica de desconexión de generación a sido confinada a centrales hidráulicas; tales centrales están normalmente alejadas de los centros de consumo y existe poco riesgo de daños de las unidades debido a la desconexión espontánea. Desde los 70' esta práctica ha sido gradualmente extendida a unidades térmicas de carbón y combustible, y unidades nucleares, como medida para resolver problemas serios de estabilidad.

El esquema utilizado para la detección de las condiciones que requieren la desconexión de unidades es a menudo una extensión de los circuitos de disparo de las protecciones de línea local y remota (ver capítulo dedicado a los sistemas DAG). Si la línea fallada es reconectada en minutos, las unidades desconectadas se pueden poner en servicio nuevamente en forma rápida. Las unidades desconectadas pasan normalmente por un ciclo de puesta fuera de servicio y de puesta en marcha; de esta forma es posible que no se disponga de la potencia máxima por varias horas. Una práctica común utilizada en unidades térmicas es que, luego de su desconexión, continúan rotando suministrando a servicios auxiliares. Esto permite a las unidades ser resincronizadas al sistema y recuperar su potencia máxima en alrededor de 15 a 30 minutos.

Evidentemente, la desconexión de unidades resulta en cambios repentinos de la carga mecánica y eléctrica, con el impacto asociado en el generador, máquina de impulso, y el sistema de suministro de energía. A pesar de que las unidades térmicas y sus controles están diseñados para resistir tales shocks hay posibilidad de que los controles no funcionen correctamente, y por lo tanto no están diseñadas normalmente para la desconexión completa de su carga, lo cual podría resultar en más tareas de mantenimiento y disponibilidad reducida.

Los efectos más importantes a tener en cuenta en turbo-generadores son:

- a) La sobre-velocidad resultante de la desconexión del generador
- b) Estrés térmico causado por los cambios rápidos de la carga
- c) Alto niveles de torque del eje como resultado de sucesivas perturbaciones

Desconexión en islas y desconexión de carga

La desconexión en islas se puede usar para prevenir que contingencias importantes en una parte del sistema se propague al resto del sistema provocando una severa caída del mismo. La perturbación inicial puede ser la pérdida de una línea importante de transmisión que transporta una gran cantidad de potencia o la pérdida de una cantidad importante de generación.



La pérdida gradual de la estabilidad puede ser detectada por medio del monitoreo de una o más de las siguientes magnitudes del sistema: cambios repentinos de los flujos de potencia en circuitos de transmisión específicos, cambios en los ángulos de las tensiones, cambios en las potencias, y circuitos auxiliares de los interruptores de potencia. Ante esta situación, se inicia la separación en islas del sistema abriendo líneas antes que se produzca un efecto de salida en cascada. En algunos casos puede ser necesario desconectar determinadas cargas para balancear la generación con la misma. Un ejemplo de dispositivo de protección utilizado para la separación controlada en islas es el relé $\Delta P/\Delta \theta$. Este relé monitorea cambios repentinos en el flujo (ΔP) en las líneas y cambios en el ángulo de fase ($\Delta \theta$) de la tensión de la barra. El elemento $\Delta \theta$ supervisa al elemento ΔP . El ajuste del relé se elige de tal forma que los vínculos se desconectan para fallas en el área del extremo vecino que producen alguna inestabilidad en la propia área. Para algunas condiciones del sistema, la desconexión puede acompañarse con la desconexión de carga para asegurar condiciones satisfactorias del sistema luego de la separación.

Sistemas de excitación de alta velocidad

Mediante un rápido incremento temporario de la excitación del generador puede lograrse una mejor importante en la estabilidad transitoria. El incremento en la tensión de campo del generador durante una perturbación transitoria tiene el efecto de incrementar la tensión interna de la máquina y esto a su vez incrementa la potencia de sincronización.

Durante la perturbación transitoria que sigue a una falla del sistema de transmisión y al despeje de la falla aislando el elemento fallado, la tensión en los terminales del generador es baja. El regulador automático de tensión responde a esta condición incrementando la tensión de campo y esto acarrea un beneficio para la estabilidad. La efectividad de este tipo de control depende de la capacidad del sistema de excitación de incrementar rápidamente la tensión de campo al mayor valor posible. En este aspecto son más efectivos los sistemas de excitación de respuesta inicial elevada con tensiones techo o umbrales elevadas. Las tensiones techo están limitadas, sin embargo, por las consideraciones de aislación del rotor. Para unidades térmicas, estas están en alrededor de 2.5 a 3. veces la tensión nominal de campo.

La respuesta rápida de la excitación para las variaciones requeridas de tensión para mejorar la estabilidad transitoria conduce a menudo a degradar el amortiguamiento de los modos de oscilación de la central local. Un control de excitación suplementario, comúnmente referido como Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS), brindan un medio conveniente para amortiguar las oscilaciones que permite el sistema de excitación de respuesta elevada a ser usado. El uso de sistemas de excitación de respuesta inicial elevada suplementados con PSS es por lejos el método más efectivo y económico de mejoramiento la estabilidad general del sistema

