

Capítulo 2

Estabilidad en Sistemas de Potencia

2.1 Conceptos Básicos y Definiciones

La *estabilidad de un sistema de potencia* puede ser ampliamente definida como aquella propiedad de un sistema de potencia que permite a este mantenerse en un estado de operación equilibrado bajo condiciones normales y recuperar un estado aceptable de equilibrio luego de ser sujeto a una perturbación.

La inestabilidad en un sistema de potencia puede ser manifestada en muchas diferentes formas dependiendo de la configuración y modo de operación. Tradicionalmente el problema de estabilidad ha sido el mantenimiento de la operación sincronizada. Desde que los sistemas de potencia confiaron en las máquinas sincrónicas para la generación de electricidad, una condición necesaria para operación satisfactoria es que todas las máquinas sincrónicas mantenga el sincronismo, o más coloquialmente “*en paso*” (*in step*) o en sincronismo. Este aspecto de la estabilidad es influenciado por la dinámica de los ángulos de los rotores y las relaciones potencia ángulo.

La inestabilidad también puede ser encontrada sin la pérdida de sincronismo. Por ejemplo un sistema consistente de un generador síncrono alimentando una carga de motor de inducción a través de una línea de transmisión puede transformarse inestable por el colapso del voltaje de la carga. Mantener el sincronismo no es una cuestión en éste caso; en cambio, la preocupación es la estabilidad y el control de voltaje.

En la evaluación de la estabilidad el interés es el comportamiento del sistema cuando es sujeto a una *perturbación (disturbance)* transitoria. La perturbación puede ser pequeña o grande. Las perturbaciones pequeñas en la forma de cambios de carga tienen lugar continuamente, y el sistema se ajusta por si mismo a las condiciones cambiantes. El sistema debe ser capaz de operar satisfactoriamente bajo esas condiciones y satisfacer satisfactoriamente el máximo valor de la carga. Este además debe ser capaz de sobrevivir a numerosas perturbaciones de una naturaleza severa, tales como cortocircuitos en una línea de transmisión, pérdida de un generador de gran tamaño o carga, o la pérdida de una línea de interconexión entre dos subestaciones. La respuesta del sistema a una perturbación involucra mucho del equipamiento. Por ejemplo un cortocircuito en un elemento crítico, seguido por su aislamiento o despeje por los relés de protección causará variaciones en la potencia transferida, velocidad del rotor de la máquina, y voltajes de barra; las variaciones de voltaje actuarán tanto el regulador del voltaje del generador como el del sistema de transmisión; las variaciones de velocidad actuará el gobernador del *pri-motor*: los cambios en la carga de las líneas de interconexión actuarán los controles de generación; los cambios en voltaje y frecuencia afectarán las cargas en el sistema en variados grados dependiendo de sus características individuales. Además, los dispositivos empleados para proteger los equipos individuales pueden responder a variaciones en las variables del sistema, y entonces afecta el comportamiento del sistema. En algunas situaciones dadas, sin embargo, las respuestas de solo una limitada cantidad de equipos pueden ser significantes. Por lo tanto, algunas suposiciones son usualmente hechas para simplificar el problema y enfocarse en los factores que influyen el específico tipo del problema de estabilidad. La comprensión de los problemas de estabilidad es grandemente facilitada por la clasificación de la estabilidad en varias categorías.

2.2 Estabilidad de Angulo Rotorico

La estabilidad de ángulo del rotor, es la habilidad de las máquinas sincrónicas interconectadas en un sistema de potencia de mantener el sincronismo. El problema de estabilidad envuelve el estudio de las oscilaciones electromecánicas inherentes en los sistemas de potencia. Un factor fundamental en este problema es la manera en que las salidas de las máquinas sincrónicas varían con sus rotores oscilando. Una breve discusión de las características de la maquina sincrónica es de mucha ayuda como un primer paso en el desarrollo de los conceptos básicos relacionados.

2.2.1. Características de la Máquina Sincrónica

Una máquina sincrónica posee dos elementos esenciales: la armadura (*armature*) y el campo (*field*). Normalmente el campo esta en el rotor y la armadura esta en el estator. El devanado de campo es excitado por corriente continua. Cuando el rotor es impulsado (*driven*) por una promotor (*prime-mover*) el campo magnético rotatorio del devanado de campo induce voltajes alternos en los devanados trifásicos del estator. La frecuencia de las cantidades eléctricas del estator es entonces sincronizado con la velocidad mecánica del rotor: de aquí la designación de “maquina sincrónica”.

Cuando dos o mas máquinas sincrónicas están interconectadas, los voltajes y corrientes del estator de todas las maquinas deben poseer la misma frecuencia y la velocidad del rotor de cada maquina esta sincronizada con esta frecuencia. Entonces, los rotores de todas las maquinas interconectadas deben estar en sincronismo.

El arreglo físico (distribución especial) del devanado de armadura en el estator es tal que las corrientes alternantes, variantes en el tiempo, fluyendo en el devanado trifásico produce un campo magnético rotativo que, bajo operación de régimen permanente gira a la misma velocidad que el rotor.

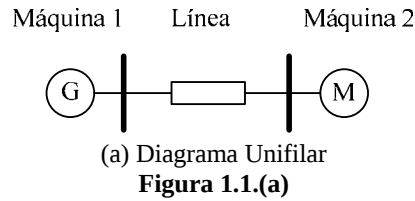
El campo del estator y el rotor reacciona el uno con el otro y un torque electromagnético resulta de la tendencia de los dos campos de alinearse entre ellos. En un generador, este torque electromagnético opuesto a la rotación del rotor, de modo que el torque electromecánico debe ser aplicado por el promotor para mantener la rotación. El torque eléctrico (o potencia) de salida del generador es cambiado solo por el cambio del torque mecánico de entrada por el promotor. El efecto de incrementar el torque mecánico de entrada es para avanzar el rotor a una nueva posición relativa a campo magnético resolverte del campo y el estator. De modo inverso, una reducción del torque mecánico o potencia de entrada, retardará la posición del rotor. Bajo condiciones de operación de régimen perramente el campo del rotor y el campo giratorio del estator poseen la misma velocidad. Sin embargo, existe una separación angular entre ellos dependiendo del torque eléctrico (o potencia) de salida del generador.

En un motor sincrónico, los roles de los torques eléctricos y mecánicos son intercambiados comparados con los del generador. El torque electromagnético favorece la rotación mientras que la carga mecánica se opone a la rotación. El efecto de incrementar la carga mecánica es retardar la posición del rotor respecto al campo magnético giratorio del estator.

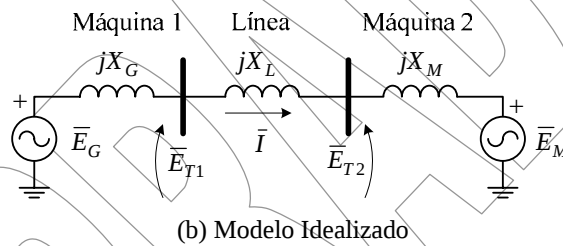
En la discusión anterior, los términos *torque* y *potencia* han sido usados intercambiamente. Esto es practica común en la literatura de estabilidad de sistemas de potencia, debido a que la velocidad promedio rotacional de las maquinas es constante aunque pueden haber pequeñas excursiones por encima y debajo de la velocidad sincrónica. Los valores en por unidad de torque y potencia son, de hecho, muy parecidos.

2.2.2. Relación de Potencia-Angulo

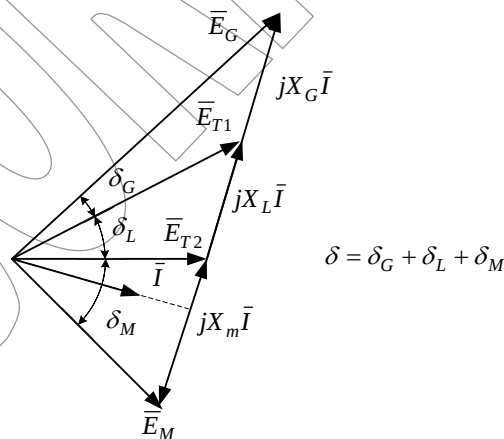
Una característica muy importante que posee una conexión con la estabilidad de sistemas de potencia es la relación entre el intercambio de potencia y posiciones angulares de los rotores de las máquinas sincrónicas. Esta relación es altamente no lineal. Para ilustrar esto considere un sistema simple como el mostrado en la Figura 1.1(a)



Este consiste de dos máquinas conectadas por una línea de transmisión que posee una reactancia inductiva X_L con resistencia y capacitancia despreciable. Asíumase que la máquina 1 representa un generador alimentando potencia a un motor sincrónico representado por la máquina 2. La potencia transferida desde el generador al motor es una función de la separación angular (δ) entre los rotores de las dos máquinas. Esta separación angular es debido a tres componentes: ángulo interno del generador δ_G (ángulo por el cual el rotor del generador adelanta el campo giratorio del estator); la diferencia angular entre los voltajes terminales del generador y el motor (ángulo por el cual el campo del estator del generador adelanta al del motor); y el ángulo interno del motor (ángulo por el cual el rotor atrasa el campo magnético giratorio del estator). La Figura 1.1(b) muestra un modelo del sistema que puede ser empleado para determinar la relación entre la potencia y el ángulo. Un simple modelo consistente de un voltaje interno detrás de una reactancia efectiva es empleado para representar cada una de las máquinas. El valor de la reactancia de la máquina usada depende del propósito del estudio. Para análisis de comportamiento en régimen permanente, este es apropiado el uso de la reactancia sincrónica, con el voltaje interno igual al voltaje de excitación.



Un diagrama fasorial identificando las relaciones entre los voltajes del motor y el generador es mostrado en la Figura 1.1(c).



La potencia transferida desde el generador al motor (P) viene dado por:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (1.1)$$

donde:

$$X_T = X_G + X_L + X_M$$

La correspondiente relación potencia ángulo es dibujado en la Figura 1.1(d).

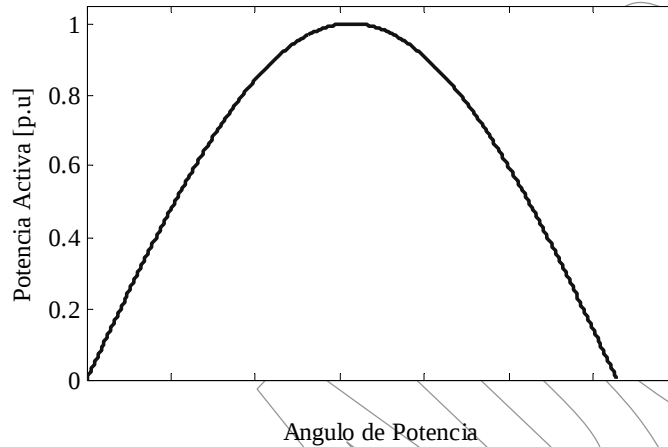


Figura 1.1(d). Característica Potencia-Ángulo

Con el uso de algunos modelos idealizados para la representación de las máquinas sincrónicas, la potencia varía como un seno del ángulo: una relación altamente no lineal. Con modelos más precisos de la máquina incluyendo los efectos de los reguladores de voltaje, la variación de la potencia con el ángulo puede desviarse significativamente de la relación sinusoidal; sin embargo, la forma general debe ser similar. Cuando el ángulo es cero, ninguna potencia es transferida. Como el ángulo de potencia es incrementado, la potencia transferida se incrementa hasta llegar a un máximo. Luego de cierto ángulo, normalmente 90°, otro aumento del ángulo resulta en una disminución de la potencia transferida. Este es entonces una máxima potencia de régimen permanente que puede ser transmitido entre las dos máquinas. La magnitud de la máxima potencia es directamente proporcional a los voltajes internos de las máquinas e inversamente proporcional a la reactancia entre los voltajes, la cual incluye la reactancia de la línea de transmisión que conecta las máquinas y las reactancias de las máquinas.

Cuando hay más de dos máquinas, sus relativos desplazamientos angulares afectan el intercambio de potencia de manera similar. Sin embargo, valores limitante de potencia transferida y separación angular son una compleja función de la distribución de la generación y la carga. Una separación angular de 90° entre dos máquinas cualquiera (el valor limitante nominal para un sistema de dos máquinas) en sí mismo no posee un significado particular.

2.3 Fenómeno de Estabilidad

La estabilidad es una condición de equilibrio entre fuerzas opuestas. El mecanismo por el cual máquinas sincrónicas interconectadas mantienen el sincronismo las unas con otras es a través de fuerzas restauradoras, las cuales actúan siempre que estas son fuerzas tendentes a acelerar o desacelerar una o mas maquinas con respecto a otras maquinas. Bajo condiciones de régimen permanente, existe equilibrio ente el torque mecánico de entrada y el torque eléctrico de salida de cada máquina, y la velocidad se mantiene constante. Si el sistema es perturbado este equilibrio es trastornado, resultando en la aceleración o desaceleración de los rotores de las

maquinas de acuerdo con las leyes de movimiento de un cuerpo rotante. Si un generador temporalmente gira mas rápido que otro, la posición angular de ese roto relativo a aquella de las maquinas mas lentas avanzará. La diferencia angular resultante transfiere parte de la carga de la maquina mas lenta a la maquinas mas rápida, dependiendo de las relaciones de potencia-ángulo. Eso tiende a reducir la diferencia de velocidad y de ahí la separación angular. Las relaciones de potencia-ángulo, como se ha discutido, son altamente no lineales. Mas allá de ciertos limites, un incremento en la separación angular es acompañado de un decremento en la transferencia de potencia; esto incrementa la separación angular mas y encamina hacia la inestabilidad. Para una situación dada, la estabilidad del sistema depende sobre si o no las desviaciones de las posiciones angulares de los rotores resulten en suficiente torque de restablecimiento.

Cuando una maquina sincrónica pierde el sincronismo o “sale fuera de paso” (*falls out the step*) con el resto del sistema, su rotor gira a una velocidad mas alta o baja que la requerida para generar voltaje a la frecuencia del sistema. El deslizamiento (*slip*) entre campo rotatorio estatorico (correspondiente a frecuencia del sistema) y el campo del rotor resulta en grandes fluctuaciones de la potencia de salida de la maquina, esto causa que el sistema de protección aislé a la maquina inestable del sistema.

La pérdida de sincronismo puede ocurrir entre una maquina y el resto del sistema o entre grupo de maquinas. En el ultimo caso el sincronismo puede ser mantenido entre cada grupo luego de su separación de los unos a los otros.

La operación sincronizada de maquinas sincrónicas interconectadas es lo mismo, al análogo de algunos carros corriendo alrededor de un circuito circular los cuales están unidos entre si por una cadena o banda de goma. Los carros representan los rotores de las maquinas sincrónicas, las bandas de goma son análogas a las líneas de transmisión. Cuando todos los carros corren juntos, las bandas de goma se mantienen intactas. Si una fuerza aplicada a uno de los carros causá que este cambie de velocidad, las bandas de goma conectada este a los otros carros se estira, haciendo que este tienda a disminuir la velocidad del carro mas rápido, tendiendo a agrupar la velocidad. Una reacción en cadena resulta hasta que todos los carros corran a la misma velocidad. Si la fuerza impuesta a una es las bandas de goma excede su fortaleza, esta se romperá y uno o más carros saldrán de la vía del grupo.

Con sistemas eléctricos de potencia, el cambio en el torque eléctrico de una maquina sincrónica (ΔT_e) luego de una perturbación puede ser resuelto en dos componentes:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (1.2)$$

donde:

$T_s \Delta \delta$ es la componente de cambio de torque en fase con la perturbación del ángulo rotorico $\Delta \delta$ y es referida la componente de *torque sincronizante*, T_s es el coeficiente del torque sincronizante.

$T_D \Delta \omega$ es la componente del torque en fase con la desviación de velocidad $\Delta \omega$ y es referido como la componente de torque de amortiguamiento; T_D es el coeficiente de torque de amortiguamiento.

La estabilidad de un sistema depende en la existencia de ambas componentes de torque para cada una de las maquinas sincrónicas. La carencia de suficiente torque sincronizante resulta en la inestabilidad a través de un *flujo aperiódico* en el ángulo del rotor. Por otra parte, la carencia de suficiente torque de amortiguamiento resulta en una *inestabilidad oscilatoria*.

Por conveniencia en el análisis y por la ganancia de idea en la utilidad de la naturaleza de problemas de estabilidad, es usual caracterizar el fenómeno de estabilidad de ángulo rotórico en términos de los siguientes dos categorías:

- (a) *Estabilidad de pequeña señal* (pequeñas perturbaciones) es la habilidad del sistema de mantener el sincronismo bajo pequeñas perturbaciones. Tales perturbaciones ocurren continuamente en el sistema debido a las pequeñas variaciones en la carga y generación. Estas perturbaciones son consideradas suficientemente pequeñas para la linealización del sistema de ecuaciones siendo permisibles para propósitos de análisis. La inestabilidad que puede resultar en de dos de las siguientes formas: (i) un continuo aumento del ángulo rotórico debido a la carencia de suficiente

torque sincronizante (ii) oscilaciones del rotor debido a incremento en la amplitud debido a la carencia de suficiente torque de amortiguamiento. La naturaleza de la respuesta del sistema a pequeñas perturbaciones depende de un número de factores incluyendo la condición operativa inicial, la fortaleza del sistema de transmisión, y el tipo de controles de excitación del generador empleados. Para un generador conectado radialmente a un gran sistema de potencia, en la ausencia de reguladores automáticos de voltaje (por ejemplo con voltaje constante de campo) la inestabilidad de debido a la carencia de suficiente torque sincronizante. Esto resulta en inestabilidad a través de un modo no oscilatorio, como es mostrado en la figura 1.2(a). Con reguladores de voltaje continuamente actuantes, el problema de estabilidad de pequeñas perturbaciones es uno de asegurar suficiente amortiguamiento de las oscilaciones del sistema. La inestabilidad normalmente esta a través de oscilaciones de amplitud creciente.

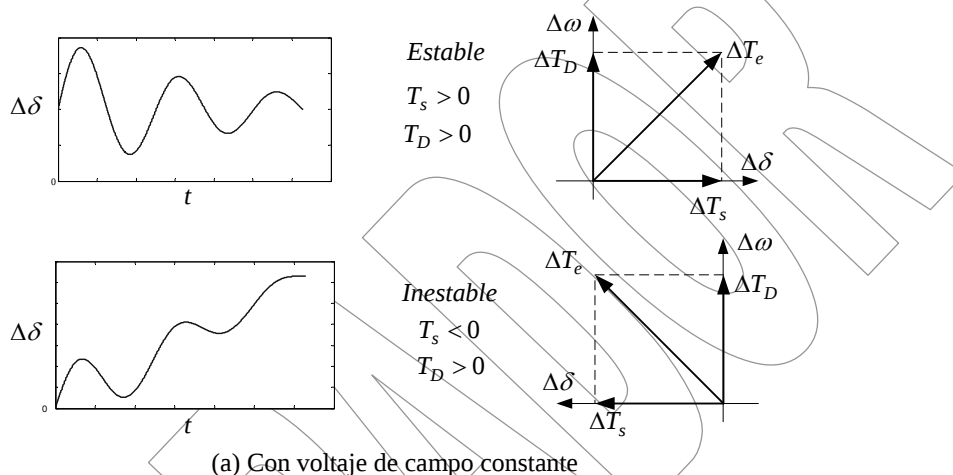


Figura 1.2. Naturaleza de la respuesta a pequeñas perturbaciones

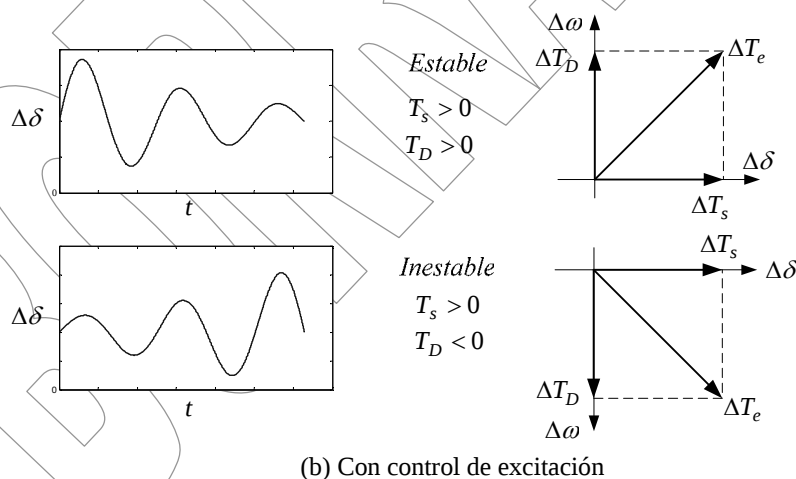


Figura 1.2. Naturaleza de la respuesta a pequeñas perturbaciones

La figura 1.2(b) ilustra la naturaleza de la respuesta de un generador sin regulador automático de voltaje. En la práctica actual de los sistemas de potencia, la estabilidad ante perturbaciones pequeñas es en gran parte un problema de insuficiente amortiguamiento de las oscilaciones. La estabilidad de los siguientes tipos de oscilaciones es de interés:

- *Los Modos locales o modos de máquina-sistema* son asociados con la oscilación de unidades a una estación de generación con respecto al resto del resto de sistemas de potencia. El término local es usado debido a que las oscilaciones son localizadas en una estación o una parte pequeña del sistema de potencia.
 - *Los Modos Inter-areas* son asociados con la oscilación de algunas máquinas en una parte del sistema contra máquinas en otras partes. Estos son causados por dos o mas grupos de máquinas muy cercanamente acopladas siendo interconectadas por débiles líneas.
 - *Los Modos de Control* son asociados con unidades de generación y otros controles. Mal ajustadas excitatrices, gobernadores de velocidad, convertidores HCVC y compensadores estáticos de VAR son las causas comunes de este modo de inestabilidad.
 - *Los Modos Torsionales* son asociados con los componentes rotacionales del eje del sistema turbina generador. Los modos de inestabilidad torsional pueden ser causados por la interacción con controles de excitación, gobernadores de velocidad, controles HCDC y líneas compensadas con capacitor serie.
- (b) *La Estabilidad Transitoria* es la habilidad del sistema de potencia para mantener el sincronismo cuando es sujeto a una perturbación transitoria severa. La respuesta resultante del sistema involucra grandes excusiones de los ángulos rotóricos de las máquinas y es influenciado por la relación potencia ángulo no lineal. La estabilidad depende de tanto del estado inicial operativo del sistema y de la severidad de la perturbación. Usualmente, el sistema es alterado tanque que la operación de régimen permanente posterior a la perturbación difiere de la anterior a la perturbación.

Las perturbaciones de variedad de grados de severidad y probabilidad de ocurrencia pueden ocurrir en el sistema. El sistema es, sin embargo, diseñado y operado para se estable ante un conjunto seleccionado de contingencias. Las contingencias son usualmente consideradas son cortocircuito de diferentes tipos: fase a tierra, fase a fase a tierra, y trifásico. Estos son usualmente asumidos que ocurren en las líneas de transmisión, pero ocasionalmente fallas en barras y transformadores son consideradas. La falla es asumida que es despejada por la operación apropiada de los interruptores para aislar el elemento fallado. En algunos casos, el recierre de alta velocidad puede ser asumido.

La figura 1.3 ilustra el comportamiento de una máquina sincrónica para situaciones estable e inestables. Esta muestra la respuesta el ángulo rotórico para un caso estable y para dos casos inestables. En el caso estable (Caso 1), el ángulo del rotor se incrementa a un máximo, entonces decrece y oscila con decremento en la amplitud mientras este alcanza el régimen permanente. En el Caso 2, el ángulo rotórico continua incrementando en forma continua hasta que el sincronismo es perdido. Esta forma de inestabilidad es referida como inestabilidad de *primera oscilación (first-swing)* y es causado por insuficiente torque sincronizante. En el Caso 3, el sistema es estable in la primera oscilación pero se hace inestable como un resultado del crecimiento de las oscilaciones cuando se acerca al estado de régimen permanente. Esta forma de inestabilidad generalmente ocurre cuando la condición de régimen permanente pos falla por si misma es una pequeña señal inestable, y no necesariamente como un resultado del disturbio transitorio.

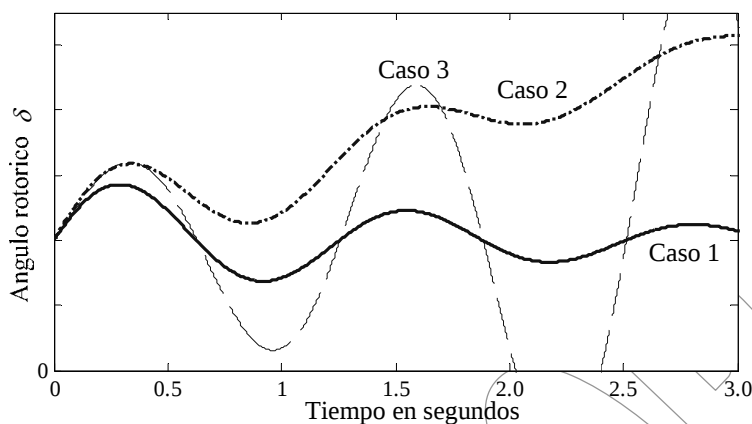


Figura 1.3. Respuesta del ángulo de la máquina a una perturbación transitoria

En grandes sistemas de potencia, la estabilidad transitoria puede no siempre ocurrir como inestabilidad de primera oscilación, es puede ser el resultado de la superposición de varios modos de oscilación causando grandes excusiones del ángulo rotórico mas allá de la primera oscilación.

En estudios de estabilidad transitoria el periodo de interés es usualmente limitado de 3 a 5 segundos luego de la perturbación, aunque este puede extenderse alrededor de 10 segundos para muy grandes sistemas con modos de oscilación dominante inter-areas.

El término *estabilidad dinámica* también ha sido ampliamente usado en la literatura como una clase de inestabilidad de ángulo rotorico. Sin embargo, este ha sido usado para denotar diferentes aspectos del fenómeno por diferentes autores. En la literatura norteamericana, esta ha sido mayormente para denotar estabilidad de pequeña señal en la presencia de equipos de control automático (primariamente reguladores de voltaje de generadores) como distinción de la clásica estabilidad de régimen permanente sin controles automáticos. En la literatura francesa y alemana, este ha sido usado para denotar que la estabilidad transitoria aquí tratada. Debido a que muchas confusiones han resultados del uso del termino estabilidad dinámica, tanto CIGRE e IEEE han recomendado que este no sea usado.

2.4 Estabilidad de Voltaje y Colapso de Voltaje

La *estabilidad de voltaje* es la habilidad de un sistema de mantener voltajes estables aceptables en todas las barras en el sistema bajo condiciones operativas normales, y después de ser sujeto a una perturbación. Un sistema entre en un estado de inestabilidad de voltaje cuando una perturbación, incremento en la carga demandada, o cambio en las condiciones del sistema causa un progresivo e incontrolable caída de voltaje. El principal factor causante de la inestabilidad de voltaje de los sistemas es satisfacer las exigencias de la demanda de potencia reactiva. El corazón del problema es usualmente la caída de voltaje que ocurre cuando la potencia activa y activa fluye a través de reactancias inductivas asociadas con las redes de transmisión.

Un criterio para la estabilidad de voltaje es que, a una condición operativa para cada barra en el sistema, la magnitud del voltaje de barra incrementa con la inyección de potencia reactiva en la misma barra que es incrementada. Un sistema es inestable en voltaje si, por al menos una barra en el sistema, la magnitud del voltaje de la barra (V) decrece con la inyección con la inyección de potencia reactiva (Q) es incrementada. En otras palabras, un sistema es estable en voltaje, si la sensibilidad $V-Q$ es positiva para cada barra y es inestable en voltaje si la sensibilidad $V-Q$ es negativa al menos en una barra.

La progresiva caída de voltaje en la barra puede también ser asociado con la salida del paso de los ángulos rotóricos. Por ejemplo, la gradual perdida de sincronismo de las maquinas como ángulos rotóricos entre dos grupoide maquinas se aproxima o excede a los 180° , puede resultar en voltajes muy bajos en puntos intermedios de la red.

En contraste, el tipo de sostenida caída de voltaje que sea relacionado con la inestabilidad de voltaje ocurre cuando la estabilidad de ángulo no es una cuestión. La inestabilidad de voltaje es esencialmente un fenómeno local, sin embargo, estas consecuencias pueden poseer un impacto de extensión amplia. El colapso de voltaje es más complejo que una inestabilidad de voltaje y es usualmente el resultado de una secuencia de eventos acompañando la inestabilidad de voltaje a un bajo perfil de tensiones en una parte significativa del sistema de potencia.

La inestabilidad de voltaje puede ocurrir por algunas diferentes vías. Una vía para entender la inestabilidad de voltaje, supóngase una red simple constituida por dos terminales. Este consiste de una fuente constante de voltaje (E_s), que alimenta una carga (Z_{LD}) a través de una impedancia serie (Z_{LN}). Este es representando un alimentador radial simple que alimenta una carga o un área de carga servido por un gran sistema a través de una línea de transmisión.

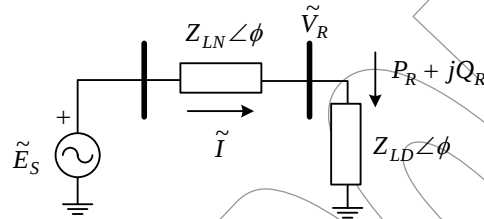


Figura 1.4. Un simple sistema radial para la ilustración del fenómeno de voltaje

La expresión de la corriente $\tilde{I}$ en la Figura 1.4 es:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_s}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}} \quad (1.3)$$

donde $\tilde{I}$ y $\tilde{E}_s$ son fasores, y

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{LN} &= Z_{LN} \angle \theta \\ \tilde{Z}_{LD} &= Z_{LD} \angle \phi \end{aligned}$$

La magnitud de la corriente es dada por

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \phi)^2}}$$

Esta puede ser expresado como:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}} \quad (1.4)$$

donde:

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi)$$

La magnitud del voltaje en el extremo de recepción es dado por:

$$\begin{aligned} V_R &= Z_{LD} I \\ V_R &= \frac{Z_{LD}}{\sqrt{F}} \frac{E_s}{Z_{LN}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

La potencia suministrada a la carga es:

$$\begin{aligned} P_R &= V_R I \cos \phi \\ P_R &= \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_s}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi \end{aligned} \quad (1.6)$$

Graficas de I , V_R y P_R son dadas en la Figura 1.5 como una función de Z_{LN}/Z_{LD} , para el caso con $\tan \theta = 1.0$ y $\cos \phi = 0.95$. Para hacer los resultados aplicables para cualquier valor de Z_{LN} , el valor de I , V_R y P_R son apropiadamente normalizados.

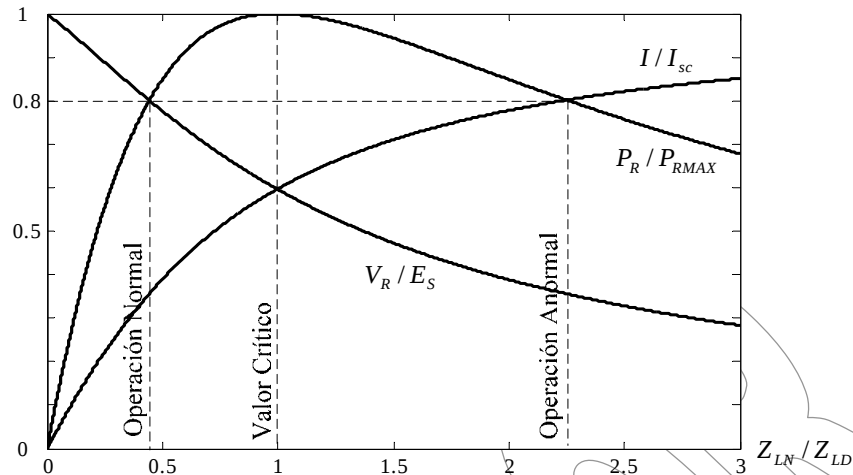


Figura 1.5. Voltaje, corriente y potencia en el extremo de recepción como función de la demanda de la carga para el sistema de la 1.4 ($I_{sc} = E_s/Z_{LN}$, $\cos \phi = 0.95$ atraso, $\tan \theta = 10.0$)

Con la demanda de carga es incrementada por el decremento de Z_{LD} , P_R es incrementada rápidamente inicialmente y entonces lentamente hasta alcanzar el máximo, luego de lo cual decrece. Esto es entonces un máximo valor de potencia activa que puede ser transmitido a través de una impedancia desde una fuente constante de voltaje. La potencia transmitida es máxima cuando la caída de voltaje en la línea es igual a la magnitud V_R , que es cuando $Z_{LN}/Z_{LD} = 1$. Como Z_{LD} es disminuido gradualmente, I se incrementa mientras V_R decrece. Inicialmente a valor alto de Z_{LD} . El incremento de I domina sobre la disminución en V_R , y de aquí P_R incrementa rápidamente con la disminución en Z_{LD} . Como Z_{LD} se acerca a Z_{LN} , el efecto de la disminución en I es solo un poco más grande que el de la disminución de I , y el efecto neto es la disminución de P_R .

La operación crítica correspondiente a la máxima potencia, representa el límite de operación satisfactoria. Para valores mayores de demanda, el control de la potencia por variaciones de carga puede ser inestable, que es, una disminución en la impedancia de carga reduce la potencia. Sin embargo el voltaje progresivamente disminuirá y el sistema se hará inestable dependiendo de las características de la carga. Con una característica de carga estática a impedancia constante, el sistema estabiliza a valores de potencia y tensión menos que los deseados. Por otro lado, con una característica de carga a potencia constante, el sistema se hace inestable a través de un colapso del voltaje de la barra de carga. Con otras características, el voltaje es determinado por la característica compuesta de la línea de transmisión y la carga. Si la carga es alimentada con transformadores con cargados de tomas automático bajo carga (*Under load tap-changing ULTC*), la acción de cambio de toma tratará de elevar el voltaje de la carga. Este posee el efecto de reducir la Z_{LD} efectiva vista por el sistema. Este es una forma simple y pura de inestabilidad de voltaje.

Desde el punto de vista de la estabilidad de voltaje, la relación entre P_R y V_R es de interés. Esto es mostrado en la Figura 2, para el sistema bajo consideración cuando el factor de potencia es igual a 0.95 en atraso.

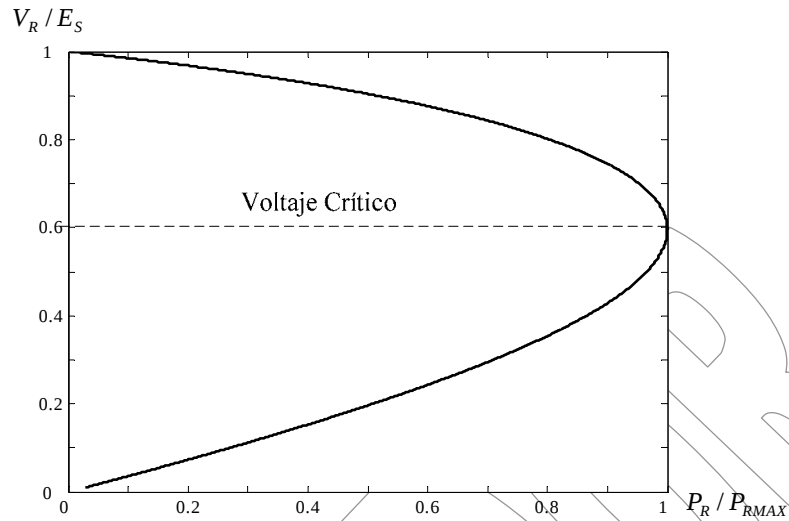


Figura 1.6. Característica de Potencia-Voltaje del sistema de la Figura 1.4

De la ecuación (1.5) y (1.6), se puede ver que el factor de potencia de la carga posee un significativo efecto en la característica de potencia-voltaje del sistema. Esto es, se espera que la caída de voltaje en la línea de transmisión sea una función de la potencia activa y también de la potencia reactiva transferida. La estabilidad de voltaje, de hecho, depende de la relación entre P , Q y V . La forma tradicional de mostrar esas relaciones es mostrada en la Figura 1.7 y 1.8.

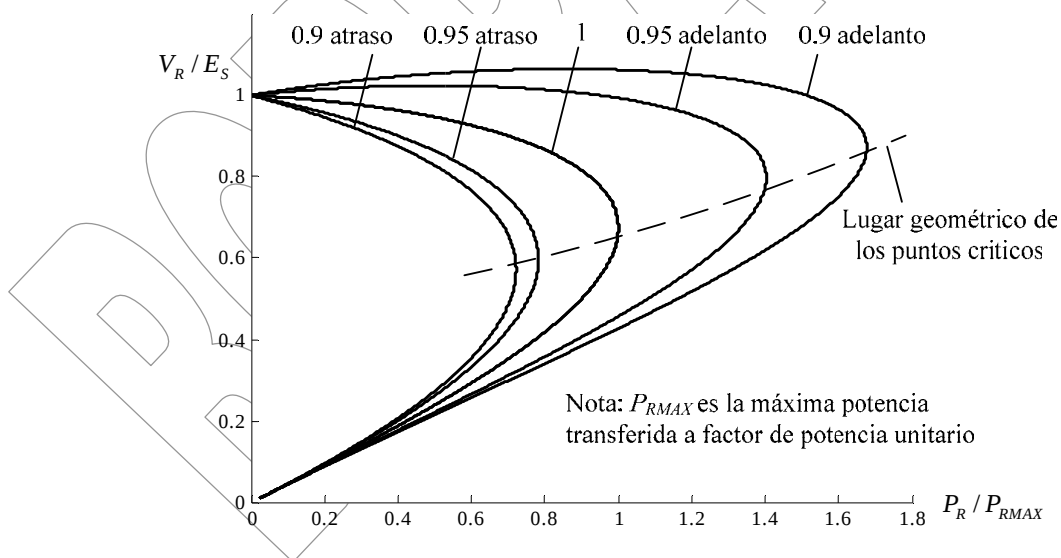


Figura 1.7. Característica V_R - P_R del sistema de la Figura 1.4 con diferentes factores de potencia de la carga

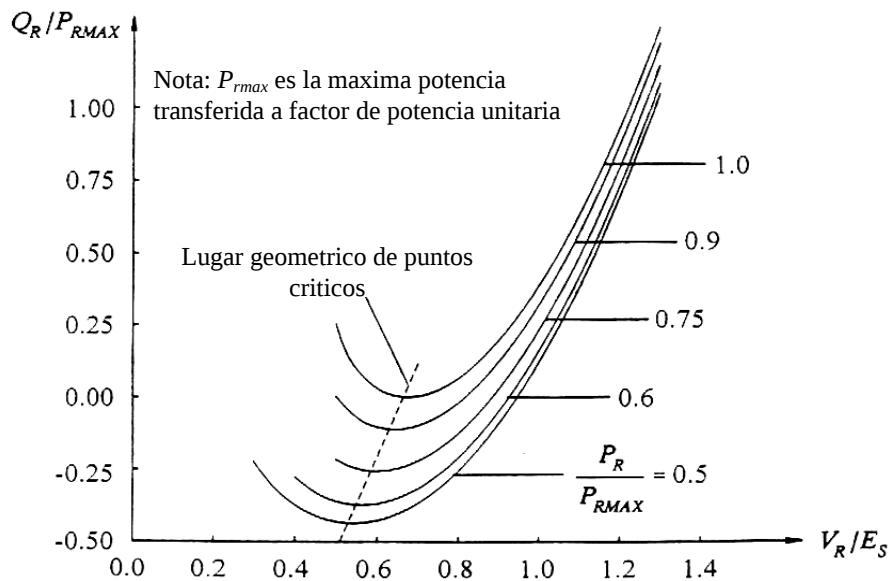


Figura 1.4. Característica V_R-P_R del sistema de la Figura 1.4 con relaciones P_R/P_{RMAX}

La Figura 1.7 muestra, para el sistema de potencia de la Figura 2.4, curvas de las relaciones V_R-P_R para diferentes valores de factor de potencia de la carga. El lugar geométrico de los puntos críticos de operación es mostrado por la línea a trazos en la figura. Normalmente, solo los puntos operativos por encima de los puntos críticos representan condiciones operativas satisfactorias. Una repentina reducción en el factor de potencia (incremento en Q_R) puede entonces causar que el sistema cambie de una condición operativa estable a una insatisfactoria, y posiblemente inestable, condición operativa representada por la parte más baja de la curva $P-V$.

La influencia de las características de potencia reactiva de los equipos en el extremo de recepción (cargas y equipos de compensación) es más aparente en la Figura 1.4. Esta muestra una familia de curvas aplicables al sistema de potencia de la Figura 1.4, cada uno de lo cuales representa relaciones entre V_R y Q_R para un valor fijo de P_R . El sistema es estable en la región donde la derivada dQ_R/dV_R es positiva. El límite de estabilidad de voltaje (punto crítico de operación) es alcanzado cuando la derivada es cero. Entonces las partes de la curva a la izquierda representan operación inestable. La operación estable en la región donde dQ_R/dV_R es negativa puede ser alcanzado solo con un compensación de potencia reactiva regulada poseyendo suficiente rango de control y una alta ganancia Q/V con una polaridad opuesta a aquella que es normal.

La descripción anterior del fenómeno de estabilidad de voltaje es básica e intenta ayudar a la clasificación y entendimiento de diferentes aspectos de la estabilidad de los sistemas de potencia. Los análisis han sido limitados a sistemas radiales, debido a que estos presentan una forma simple, clara, la forma del problema de estabilidad de voltaje. En sistemas de potencia reales, complejos, otros factores contribuyen al proceso del colapso del sistema debido a inestabilidad de voltaje: fortaleza del sistema de transmisión, niveles de potencia transferida, características de la carga, límites de capacidad de potencia reactiva del generador, y características de potencia reactiva de los equipos de compensación. En algunos casos, el problema es compuesto por acciones descoordinadas de variadas controles o sistemas de protección.

Para propósitos de análisis, es útil clasificar la estabilidad de voltaje en las siguientes subclases:

- (a) *Estabilidad de voltaje de grandes perturbaciones*, esta relacionada con una habilidad del sistema para controlar los voltajes siguientes a grandes perturbaciones tales como fallas del sistema, pérdidas de generación, o contingencia de circuito. Esta habilidad es determinada por las características

sistema-carga y la interacción de controles tanto continuos como discretos y protecciones. La determinación de estabilidad de grandes perturbaciones requiere el examen del comportamiento dinámico no lineal de un sistema sobre un periodo de tiempo suficiente para capturar las interacciones de equipos tales como ULTC (*Under Load Tap Changer*) y limitadores de corriente de campo de los generadores. El periodo de estudio de interés puede extender desde pocos segundos a diez minutos. Entonces, simulaciones dinámicas de periodos largos son requeridos para el análisis.

- (b) *Estabilidad de voltaje para perturbaciones pequeñas*, esta relacionada con la habilidad del sistema para controlar los voltajes siguientes a pequeñas perturbaciones tales como cambios incrementales en carga del sistema. Esta forma de estabilidad es determinadas por la característica de la carga, controles continuos, y controles discretos a un instante de tiempo dado. Este concepto es útil en determinar, en algún instante, como el voltaje del sistema responderá ante pequeños cambios del sistema.

Los procesos básicos contribuyentes a la inestabilidad de pequeña perturbación son esencialmente de naturaleza de régimen permanente. Sin embargo, el análisis estático puede ser efectivamente usado para determinar los márgenes de estabilidad, identificar factores que influyen en la estabilidad, y examinar un gran rango de condiciones del sistema y un gran numero de escenarios post-contingencias. Un criterio para la estabilidad de voltaje ante pequeños perturbaciones es que, a una condición de operación dada para cada barra en el sistema, la magnitud del voltaje de barra incrementando cuando la inyección de potencia reactiva en la misma barra es incrementada. Un sistema es inestable en voltaje si, para al menos una barra en el sistema, la magnitud del voltaje de barra (V) decrece cuando la inyección de potencia reactiva (Q) en la misma barra es incrementada. En otras palabras, un sistema es estable en voltaje si la sensibilidad V - Q es positiva para cada barra, y si la sensibilidad V - Q es negativa al menos es una barra el sistema es inestable.

La inestabilidad de voltaje no ocurre siempre en esta forma pura. Frecuentemente las inestabilidad de ángulo y voltaje van de la mano. Una puede conducir a la otra y la distinción puede no ser clara. Sin embargo, una distinción entre estabilidad de ángulo y estabilidad de voltaje es importante para el entendimiento de las causas subyacentes de los problemas para lograr desarrollar un apropiado diseño y procedimiento de operación.

Un tratamiento comprensivo de este aspecto, con un análisis en profundidad del problema es presentado por *Power System Voltage Stability* de C.W. Taylor.

2.5 Estabilidad de Término Medio y Término Largo

Los términos estabilidad de termino largo (*long-term*) y termino medio (*mid-term*) son relativamente nuevos en la literatura de la estabilidad de los sistemas de potencia. Ellos fueron introducidos por la necesidad de mediar con los problemas asociados con la respuesta dinámica de los sistemas de potencia a los severos trastornos. Severos trastornos del sistema resultan en grandes exclusiones de voltaje, ángulo, y flujos de potencia que con ello invoca las acciones de lentos procesos, controles, y protecciones no modelados en los estudios convencionales de estabilidad transitoria. Los tiempos característicos de los procesos y equipos activados por los grandes cambios de voltaje y frecuencia están en un rango de segundos (la respuesta de los equipos tales como protecciones y control de generadores) hasta algunos minutos (la respuesta de equipos tales como la energía suministrada por un promotor y los reguladores de voltaje-carga).

Los análisis de *termino largo* asume que las oscilaciones de potencia sincronizante entre maquinas se ha amortiguado, resultando en una frecuencia de sistema uniforme. El foco esta en los fenómenos muy lentos y de larga duración que acompañan los trastornos de gran escala y en el resultante grande y sostenido desequilibrio entre generación y consumo de potencia activa y reactiva. Este fenómeno incluye: dinámica de caldera en unidades térmicas, la dinámica de la compuerta y conducto en las unidades hidráulicas, control automático de generación, y los efectos de salida de frecuencia fundamental en las cargas y redes.

La respuesta de medio-termino representa la transición entre las respuesta de corto-termino y de largo-termino. En los estudios de estabilidad de medio-termino, el foco esta en las oscilaciones de potencia

sincronizante entre máquinas, incluyendo los efectos de algunos del fenómeno más lento, y posiblemente las excusiones grandes de voltaje y frecuencia.

Los rangos típicos de períodos de tiempo son los siguientes:

- Término corto o transitorio: 0 a 10 segundos.
- Término medio: 10 segundos a pocos minutos.
- Término largo: pocos minutos a 10 minutos.

Esto debe, sin embargo, ser destacado que la diferencia entre la estabilidad de medio-termino y largo-termino esta primariamente basado en el fenómeno que esta siendo analizado y a representación del sistema usada, particularmente con atención a los transitorios rápidos y las oscilaciones entre maquinas mas que en periodo de tiempo involucrado.

Generalmente, los problemas de estabilidad de largo y medio-termino son asociados con inadecuadas respuesta de equipos, pobre control y coordinación de equipos de protección, o insuficiente reservas de potencia activa/reactiva.

La estabilidad de largo-termino es usualmente interesada con la respuesta del sistema a disturbios mayores que involucran contingencias más allá de los criterios de diseño normal. Estos pueden vincular la cascada o separación del sistema de potencia en un número de islas separadas con los generadores de cada isla manteniendo el sincronismo. La estabilidad en este caso es una cuestión de si cada isla logra o no alcanzar un estado aceptable de equilibrio operativo con la mínima perdida de carga. Esto es determinado por la respuesta global de la isla siendo evidenciado esto por medio de la frecuencia y las protecciones de la unidad pueden producir una situación adversa y ayudar al colapso de la isla como un todo o en parte.

Otra aplicación de los análisis de estabilidad de largo-termino y medio-termino incluye el análisis dinámico de la estabilidad de voltaje, requiriendo la simulación de los efectos de los cambiadores de tomas de los transformadores, protección contra sobre excitación de los generadores y los limites de potencia reactiva, y cargas termostaticas. En este caso, las oscilaciones entre maquinas no son de mayor importancia. Sin embargo, cuidado debe ser tenido para no despreciar algunas de las rápidas dinámicas.

Hay limitada experiencia y literatura relacionada con el análisis de estabilidad de largo-termino y medio-termino. Como la mayor experiencia es ganada y demostrada las técnicas analíticas para simulación de dinámica lenta y rápida se ha hecho disponible, la distinción entre estabilidad de largo y medio-termino se hace menos significativa.

2.6 Clasificación de Estabilidad

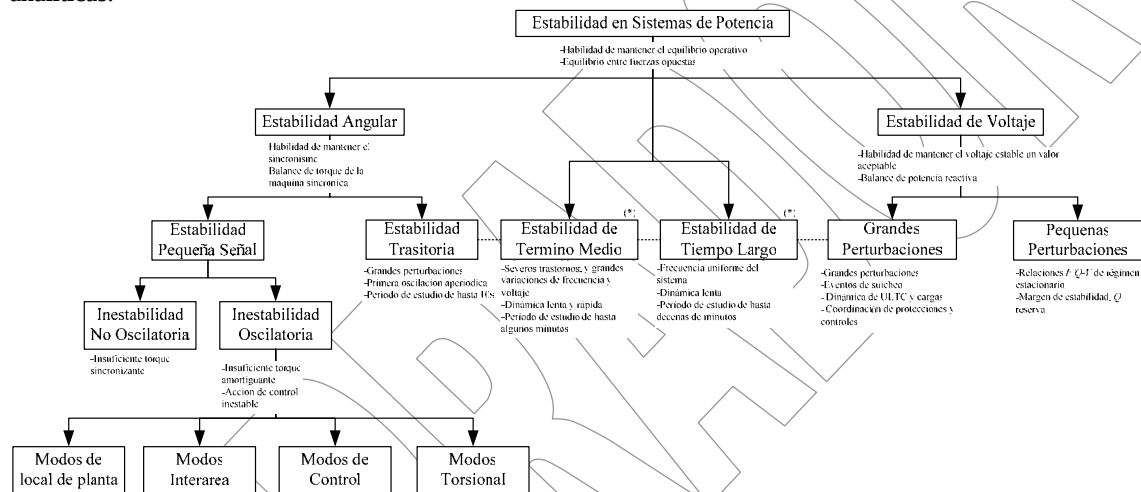
La estabilidad de un sistema de potencia es un problema sencillo; sin embargo, es impractico estudiar este como tal. Como se ha visto en las discusiones anteriores, la inestabilidad de un sistema de potencia puede tomar diferentes formas y puede ser influenciado por un amplio rango de factores. El análisis del problema de estabilidad, identificación de factores que contribuyen a la inestabilidad y la formación de métodos para mejorar la operación estable son grandemente facilitadas por la clasificación de la estabilidad en apropiadas categorías. La base son las siguientes consideraciones:

- Naturaleza física de la inestabilidad resultante.
- El tamaño de la perturbación considerada.
- Los dispositivos, procesos, y el espacio de tiempo que debe ser tomado en consideración para determinar la estabilidad.
- El más apropiado método de cálculo y predicción de estabilidad.

La Figura 1.9 da una grafica completa del problema de estabilidad de sistema de potencia, identificando sus clases y subclases en términos de las categorías descritas en las secciones previas. Como una necesidad practica, la clasificación ha sido basada en un número de consideraciones diversas, haciendo esto difícil para

seleccionar claramente la distinción entre categorías y proveer definiciones rigurosas y ahora convenientes para uso práctico. Por ejemplo, aquí hay solapamiento entre la estabilidad de medio-termino y de largo-termino y estabilidad de voltaje. Con los modelos apropiados de cargas, cambiador de toma bajo carga de transformadores y límites de potencia reactiva de generadores, las simulaciones de medio/largo-termino son idealmente adecuados para análisis dinámico de estabilidad de voltaje. Similarmente aquí hay un solapamiento entre estabilidad transitoria, medio-termino y largo-termino: las tres usan similares técnicas analíticas para la simulación de respuesta no lineal de dominio en el tiempo de grandes sistemas para grandes perturbaciones. Aunque las tres categorías son de interés, con deferentes aspectos del problema de estabilidad, en términos de análisis y simulación ellos son realmente extensiones de uno y otro sin fronteras claramente definidas.

Mientras la clasificación de la estabilidad de sistemas de potencia es un efectivo y conveniente medio para lidiar con la complejidad del problema, la estabilidad completa del sistema debe siempre ser mantenida en mente. Las soluciones a los problemas de estabilidad de una categoría no pueden ser a expensa de otros. Esto es esencial para ver todos los aspectos del fenómeno de estabilidad y a cada aspecto desde más de un punto de vista. Esto requiere que el desarrollo y bien pensado uso de diferentes tipos de herramientas analíticas.



(*): Con la disponibilidad de mejorar las técnicas analíticas proveyendo un enfoque unificado para el análisis de las dinámicas rápida y lenta, la distinción entre la estabilidad de termino largo y medio ha sido menos significativa.

Figura 1.5. Clasificación de la Estabilidad de Sistemas de Potencia