

**Ex - Comité de Estudio 38
Análisis y Técnicas de Sistemas de Potencia**

**NUEVA METODOLOGÍA ESTÁTICA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Luis Aromataris(*)
Facultad de Ingeniería - UNRC

Patricia Arnera Jean Riubrugent
IITREE – Facultad de Ingeniería – UNLP

RESUMEN

En este trabajo se presenta una nueva metodología para el análisis de la estabilidad de tensión de largo plazo. Esta metodología utiliza técnicas estáticas de cálculo y tiene las ventajas de las técnicas estáticas convencionales, en lo que a tiempo de CPU se refiere, pero goza además de la confiabilidad de los resultados que se obtienen en las metodologías dinámicas. Los resultados se muestran en gráficas que relacionan a las variables fundamentales vs. Tiempo

PALABRAS CLAVE: Estabilidad de Tensión, Técnicas Estáticas, Dinámica de Largo Plazo.

1.0 INTRODUCCION

Actualmente, los sistemas eléctricos de potencia (SEP) operan bajo un esquema de crecimiento de la demanda cada vez más exigente. Debido a que la infraestructura de la generación y transporte de la energía tiene una velocidad de crecimiento bastante menor, la habilidad de esos sistemas para mantener la estabilidad de tensión se convierte en un problema cada vez más acuciante. Ante estas exigencias, las empresas de energía deben redoblar esfuerzos para mantener la estabilidad de tensión en esos sistemas debiendo incrementar los estudios y simulaciones digitales de posibles perturbaciones que puedan ocurrir a efectos de prevenir comportamientos anormales que puedan desencadenar en colapso de tensión del sistema. A partir de los resultados de esas simulaciones, se pueden tomar las medidas preventivas y correctivas para mantener el funcionamiento en estado normal.

Una de las técnicas de simulación ampliamente utilizada es el análisis dinámico, el cual es requerido para el estudio de las formas estabilidad de tensión de corto plazo, que involucran cargas tales como motores o cargas cuyo comportamiento es de una dinámica rápida ante cambios abruptos en sus variables de alimentación. Este análisis dinámico es también usado para las formas lentas de estabilidad de tensión, pero el tiempo de simulación se vuelve excesivo cuando se deben simular grandes sistemas con gran cantidad de

contingencias a estudiar (3). Además es necesario contar con una gran cantidad de datos, adicionales a los del estudio de flujo de potencia, relativos a los dispositivos que integran el SEP y de sus controles, tales como reactancias, constantes de tiempo, ganancias, y otros parámetros, cuyos valores son a veces difíciles de obtener.

Para la estabilidad de tensión de largo plazo también se utilizan técnicas estáticas, las cuales aproximan el comportamiento dinámico a través de “instantáneas” que muestran el estado del sistema luego de algunos segundos hasta varios minutos luego de producida la perturbación (1), (2). Estas simulaciones se basan fundamentalmente en programas de flujo de potencia adaptados a la problemática a resolver. Uno de los problemas que poseen las técnicas estáticas es que las “instantáneas” no tienen en cuenta la cronología exacta del tiempo de actuación de los dispositivos del sistema luego de producida la perturbación. Esto se refiere fundamentalmente al tiempo de actuación de los cambiadores de tomas de los transformadores de distribución, cuando su tensión a bornes esta fuera de sus valores admisibles y al tiempo de actuación de los limitadores de sobreexcitación de los generadores, cuando la corriente supera sus valores límites. Esto puede producir resultados erróneos, fundamentalmente cuando dos o más dispositivos comienzan a actuar en forma simultáneamente o con intervalos de actuación cercanos entre si.

Finalmente, otra metodología utilizada para este tipo de estudio son las curvas P-V y Q-V, pero simplemente pueden ser utilizadas para un análisis aproximado, ya que para grandes sistemas los resultados pueden ser imprecisos (5).

En este trabajo se presentará una metodología que explota las ventajas de las técnicas estáticas de trabajo, en lo que a tiempo de ejecución y cantidad de datos necesarios se refiere, y aprovecha casi totalmente las ventajas de la confiabilidad de los resultados que se obtienen en las metodologías dinámicas de cálculo. Se mostrará que se pueden obtener aproximadamente las gráficas de salida típicas de una corrida dinámica, que muestran a las variables fundamentales vs. tiempo, resolviendo solamente el sistema algebraico de

(*)Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Rio Cuarto, Ruta 36 , Km 601,
Rio Cuarto - Cordoba CP: 5800
Email: laromata@ing.unrc.edu.ar

ecuaciones, esto es, sin resolver el sistema de ecuaciones diferenciales asociado al problema.

2.0 METODOLOGIA.

El estudio de estabilidad de tensión de largo plazo generalmente se realiza dentro de un intervalo de tiempo que oscila aproximadamente entre 0 y 5 minutos. En este escenario generalmente están involucrados sistemas eléctricos de potencia altamente cargados, grandes cantidades de potencia que viajan a través de la red desde generaciones remotas hacia áreas de carga y la aplicación repentina de grandes perturbaciones. Estas perturbaciones, generalmente pérdida de grandes generadores o de importantes líneas de transmisión, causan que la tensión caiga en las áreas de carga. Esto produce la actuación de los cambiadores de tomas de los transformadores de distribución y los reguladores de tensión que intentan restaurar los niveles de tensión a los valores anteriores. La carga intenta retomar los valores de potencia originales produciendo nuevas caídas de tensión. Ante estas condiciones los generadores más cercanos pueden sobrecargarse y pueden actuar los limitadores de sobreexcitación, disminuyendo la producción de potencia reactiva en la zona conflictiva. Los generadores más alejados deben suministrar la potencia reactiva perdida produciendo un aumento de las pérdidas y de la caída de tensión. El sistema no puede sostener el nivel de tensión y se produce el colapso de tensión parcial o total.

En el desarrollo de este fenómeno se ven involucrados dispositivos tales como transformadores de distribución y limitadores de sobreexcitación de generadores cuyos tiempos de actuación oscilan desde varios segundos hasta minutos. Esto implica que durante la dinámica del proceso se van produciendo eventos separados en el tiempo por intervalos de decenas de segundos. Entre cada evento las variables del SEP permanecen transitoriamente estables. En aquellos casos en que el SEP mantiene la estabilidad luego de la perturbación inicial, las oscilaciones de alta frecuencia del ángulo del rotor del generador se amortiguan después de pocos segundos mientras se activan los controladores de tiempo de los transformadores de distribución y de los limitadores de sobreexcitación si así corresponde. Dependiendo de la regulación de los controladores, las variables del sistema permanecen durante decenas de segundo transitoriamente estables, hasta que se produce la primera actuación de los dispositivos según una cronología determinada. Este proceso puede ser resuelto mediante las técnicas de simulación tradicionales de la dinámica de corto plazo con pasos de integración de $\frac{1}{2}$ ciclo, pero con un excesivo tiempo de computación. Mejoras en el tiempo de computación

se pueden conseguir con pasos de integración variables, esto es, con pequeños pasos de integración en las zonas de alta frecuencia y con pasos de integración más elevados en zonas de comportamiento estable.

Una mejora sustancial en el tiempo de computación se puede obtener utilizando la metodología propuesta en el presente trabajo, esto es, calculando solamente los estados del SEP donde permanece transitoriamente estable, sin tener en cuenta los transitorios de alta frecuencia entre esos estados. Esto implica que el modelo matemático del SEP únicamente estará representado por un sistema de ecuaciones algebraicas, esto es, se representará básicamente por el mismo modelo utilizado en el estudio de flujo de potencia, pero adaptando las características de los dispositivos que integran el SEP, al problema a resolver. En el próximo apartado se detallará el modelo de cada uno de los dispositivos.

Debido a que no se integran las ecuaciones diferenciales que modelan la dinámica del sistema a lo largo del tiempo, la cronología de los eventos se controla calculando el tiempo de actuación de dispositivos tales como los cambiadores de tomas de los transformadores o la actuación de los limitadores de sobreexcitación de los generadores.

3.0 MODELADO DE COMPONENTES DEL SEP

Los modelos de los dispositivos que componen el SEP difieren tanto del modelo utilizado en estudios de flujo de potencia como de los utilizados en simulaciones dinámicas.

3.1. Modelo del Generador

Para el generador se tomará el modelo de estado estacionario según se muestra en la figura 1.

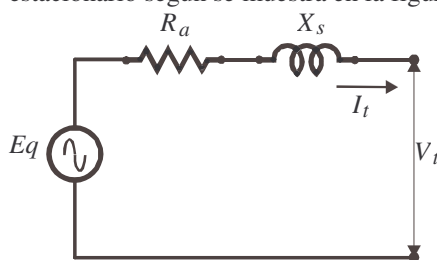


Figura 1 Modelo del Generador

Las variables que gobiernan su comportamiento están relacionadas a través de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} X_s &= X_d = X_q \\ E_q &= V_t + (R_a + j X_s) I_t \\ E_q &= X_{ad} i_{fd} \end{aligned}$$

Siendo:

R_a : Resistencia del Generador

X_s : Reactancia sincrónica

X_d : Reactancia sincrónica de eje directo saturada

X_q : Reactancia sincrónica de eje en cuadratura saturada

X_{ad} : Reactancia de eje directo no saturada.

E_q : Tensión detrás de la Impedancia Sincrónica

V_t : Tensión terminal del generador.

I_t : Corriente del generador.

i_{fd} : Corriente de campo del generador.

3.2. Modelo del Regulador Automático de Tensión (RAT).

Mientras no se active el limitador de sobreexcitación del generador se considerará que el RAT mantiene el valor de tensión especificada a bornes de la máquina sincrónica. Luego de aplicada la perturbación inicial y en cada uno de los eventos la tensión terminal no tendrá un valor estrictamente igual al valor especificado sino que estará afectada por el error en régimen permanente. Este error depende fuertemente del tipo de RAT, de su ganancia y de la carga aplicada al generador. En el presente trabajo se ha adoptado el modelo SEXS propuesto en la librería de modelos de PSS/E, ya que representa un tipo no específico, pero incorpora características generales de una amplia variedad de sistemas de excitación. El error de la tensión terminal en régimen permanente se puede calcular con suficiente aproximación utilizando la siguiente ecuación:

$$error = \frac{\left[\sqrt{3} \left(\frac{Q_G - Q_{Gcb}}{S_n} \right) \right]}{K}$$

donde:

Q_G = Potencia reactiva emitida por el generador luego del evento.

Q_{Gcb} = Potencia reactiva emitida por el generador en el caso base.

S_n = Potencia Nominal de la máquina.

K = Ganancia del RAT.

3.3. Modelo del Regulador Automático de Velocidad (RAV).

Ante la caída de una carga importante o de un generador, la demanda resultante se repartirá entre las máquinas sincrónicas según su potencia nominal. Esto se puede llevar a cabo a través de un proceso iterativo que reparta la diferencia de potencia absorbida por la barra de referencia antes y después de la perturbación inicial y de cada uno de los eventos posteriores.

3.4. Modelo del Limitador de Sobreexcitación.

El modelo del Limitador de Sobreexcitación está preparado para detectar altos valores de corriente de campo y luego de una demora de tiempo permitida, actuará llevando la excitación a valores predeterminados (entre 100 y 110% de la corriente de campo nominal). La característica de tiempo inverso esta detallada en la figura 2.

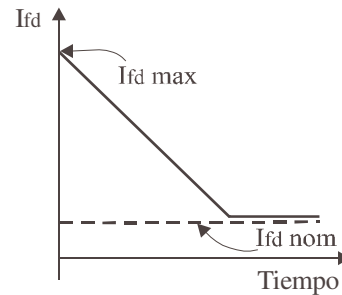


Figura 2. Característica del limitador de sobreexcitación

En cada evento que se produce en el sistema se calcula la corriente de campo del generador. Si ésta sobrepasa el valor nominal, se calcula el tiempo de demora permitido utilizando los parámetros que determinan la curva de tiempo inverso. Cumplido dicho tiempo, se comienza a disminuir la corriente de campo hasta alcanzar su valor nominal o el valor más cercano permitido.

3.5. Modelo de la Carga.

La carga será estática y se contemplarán tres modelos:

- Modelo de carga de impedancia constante: donde la potencia de carga está en función de la tensión elevada al cuadrado
- Modelo de carga de corriente constante: donde la potencia de carga es directamente proporcional a la tensión.
- Modelo de carga de potencia constante: donde la potencia de la carga es independiente de las variaciones de tensión.

3.6. Modelo de la Red

El modelo de la red será el mismo que se utiliza en el estudio de flujo de potencia pero la carga no se conectará directamente a la barra de alta tensión sino que se conectará a la barra de baja tensión del transformador de distribución. Los datos de estos transformadores además de los datos típicos del estudio de flujo de potencia serán: la tensión máxima y mínima de la barra de tensión controlada y el tiempo de actuación del primer movimiento y de los movimientos posteriores del cambiador de tomas.

4. CASO DE ESTUDIO

En la figura 3 se presenta un sistema eléctrico de 10 barras, 3 generadores. Éste es sometido a una perturbación que consiste en la caída de una de las líneas entre las barras 5 y 6. Las cargas están ubicadas en barras 7 y 10 y se conectan al sistema a través de sendos transformadores con cambiadores de tomas bajo carga T4 y T6 respectivamente. El generador G1 es una barra de potencia infinita. Se estudiará el comportamiento dinámico de este sistema comparando la salida producida por el programa PSS/E versión 26 y el programa elaborado según los lineamientos del presente trabajo. Los datos del sistema figuran en el Apéndice.

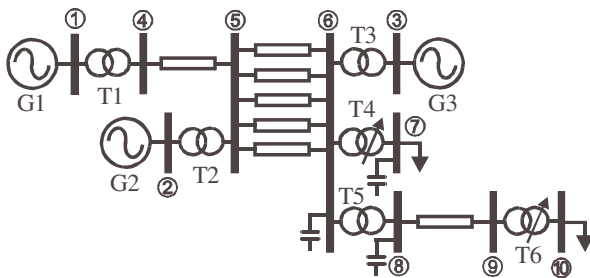


Figura 3. Caso de Estudio

La falla fue aplicada a los 20 segundos y la simulación se extendió hasta los 850 segundos. En la figura 4 se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo seguido por las tensiones terminales de los generadores G2 y G3 utilizando la parte dinámica del programa PSS/E. Debido a que la corriente de campo del generador G3 supera su valor admisible, se puede observar que a los 137,76 segundos se produce la acción del limitador de sobreexcitación de este generador. Esto significa que la corriente de campo queda fija a partir de ese instante en 1.05 veces la corriente nominal. Esto hace que la tensión terminal de esa barra caiga a un valor de 0.8884 pu a los 850 segundos, valor de tensión inadmisiblemente bajo. La tensión terminal en la otra barra de generación disminuye levemente y se estaciona en un valor de 0.9623 pu.

En la figura 5 se pueden visualizar las mismas curvas pero siguiendo la metodología estática propuesta por este trabajo. En este caso la acción del limitador de sobreexcitación se produce a los 139,80 segundos, esto es, con un error respecto a PSS/E del 1,5%. A los 850 segundos las tensiones terminales en las barras de los generadores G2 y G3 se estacionan en los valores de 0.9621 pu y 0.8848 pu. Esto da un error respecto de PSS/E de 0.02 y 0.4 % respectivamente.

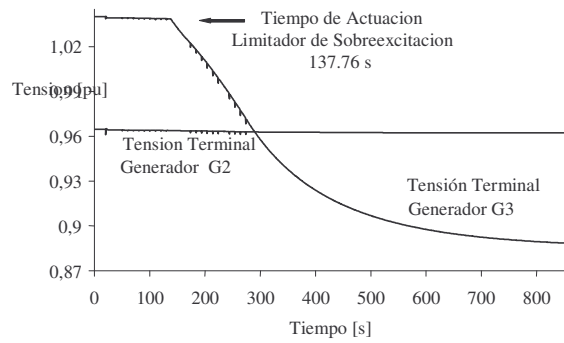


Figura 4. Tensiones Terminales Generadores G2 y G3. Programa PSS/E

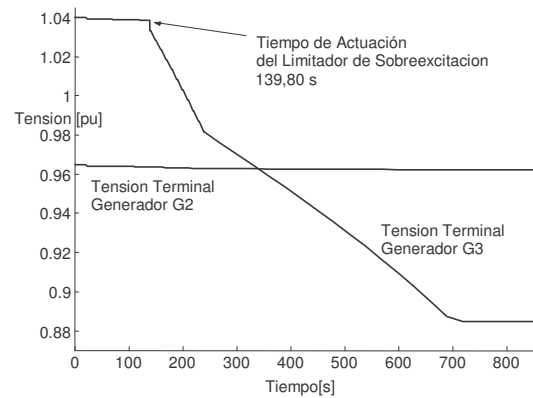


Figura 5. Tensiones Terminales Generadores G2 y G3. Programa Metodología Estática

En las figuras 6 y 7 se pueden observar las tensiones en las barras de carga, esto es en barras 7 y 10, según PSS/E y según la metodología estática propuesta respectivamente. En ellas se puede observar claramente la actuación del transformador T6, intentando levantar la tensión en barra 10 luego de la perturbación. A pesar de ello, a los 850 segundos, la tensiones caen a valores de 0.8404 pu y 0.8262 pu en barras 7 y 10 respectivamente, según el programa PSS/E. Utilizando la metodología estática propuesta, los niveles de tensión en ese tiempo descienden hasta un valor de 0.8380 pu y 0.8236 pu. Como se puede apreciar, el error es de aproximadamente 0,3 %.

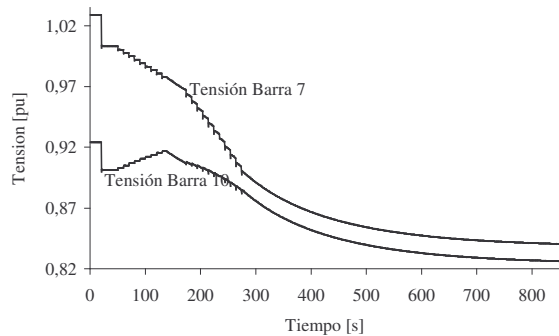


Figura 6. Tensiones Barras de Carga 2 y 3. Programa PSS/E

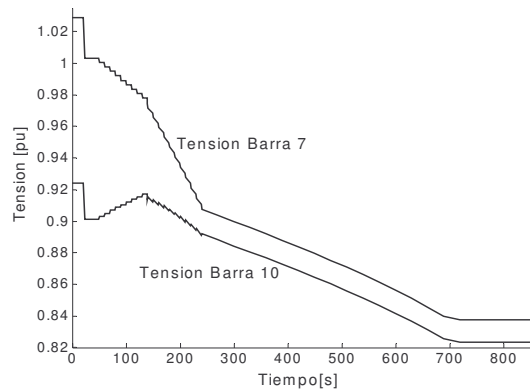


Figura 7. Tensiones Barras de Carga 2 y 3. Metodología Estática

3.0 CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología estática para el cálculo de la estabilidad de tensión de largo plazo. Ésta presenta algunas ventajas respecto de otros métodos existentes. Respecto de las metodologías estáticas comparte las ventajas de velocidad de cálculo y mínima cantidad de datos para su ejecución. Sin embargo es más precisa que aquella ya que además incursiona en la cronología de eventos que se desarrollan en el SEP luego de la perturbación. Respecto de las metodologías dinámicas comparte las ventajas respecto de la precisión y confiabilidad de los resultados. Sin embargo no comparte el alto costo de tiempo de cálculo y la gran cantidad de datos necesarios para su ejecución.

4.0 APENDICE

Datos del Flujo de Potencia

Datos de Generación

	MW	MVAR	V(pu)	Ra	Xd
G1	3987.498	851.645	0.980	0.0046	0.21500
G2	1935.999	226.311	0.964	0.0046	0.21500
G3	1154.001	702.971	1.040	0.0046	0.21500

Datos de la carga

B	MW	MVAR
7	3545	1380
10	3260	910

Datos de la Líneas y transformadores

D - H	R	X	Y	Tap
1 - 4	0.0000	0.0020	0.0000	0.8857
2 - 5	0.0000	0.0045	0.0000	0.8857
3 - 6	0.0000	0.0125	0.0000	0.9024
4 - 5	0.0000	0.0040	0.0000	
5 - 6	0.0015	0.0288	1.1713	

6 - 7	0.0000	0.0030	0.0000	0.9625
6 - 8	0.0000	0.0026	0.0000	0.9500
8 - 9	0.0010	0.0030	0.0000	
9 - 10	0.0000	0.0010	0.0000	0.98125

Datos de los Transformadores reguladores

D - H	Vmax	Vmin	Tap max	Tap min	Paso
6 - 7	1.100	0.90	1.03	0.97	0.00625
9 - 10	1.100	0.90	1.03	0.92	0.00625

Datos de la Compensación

B MVAR

6 763.00

7 600.00

8 1710.00

Datos Dinámicos (base de datos PSS)

0,'OLTC1',9,10,T6,30,5,2/
 0,'OLTC1',6,7,T4,35,5,2/
 1,'GENCLS',1,999,0/
 2,'GENROU',2,4.10,0.033,0.56,0.062,2.09,0,2.07,1.99,
 0.28,0.49,0.215,0.155,0,0/
 3,'GENROU',3,4.10,0.033,0.56,0.062,2.09,0,2.07,1.99,
 0.28,0.49,0.215,0.155,0,0/
 2,'SEXS',2,0.1,10,400,0.02,0,6/
 3,'SEXS',3,0.1,10,400,0.02,0,6/
 3,'MAXEX2',3,1,3.07,1.05,50,1.3,25,1.6,0,1,0.002,-5/
 7,'CLODBL',C1,25,0,0,60,0,2,0.0,0.0/
 10,'CLODBL',C2,75,0,0,20,0,2,0.0,0.0

Datos Dinámicos (Metodología Estática)

Trafo 6 ,30; 10

Ganancia , 400, 400, 400

Limitador, 3.5 100 2.87 1.05 1.6 50 0 0.002

REFERENCIAS

- 1) Gao, B, Morison,G, Kundur, P. "Voltage Stability evaluation using Modal Analysis", Trans on Power Systems, Vol 7, Nro. 4, November 1992.
- 2) Kundur, P. "Power System Stability and Control". McGraw-Hill Inc.1993.
- 3) Power Technologies Inc. PSS/E. Program Application Guide. Volumen II. 1999.
- 4) Task Force 38.02.11. Cigre Technical Brochure. "Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena". Electra, No.159, April 1995.
- 5) Taylor,C."Power System Voltage Stability". Mc Graw-Hill Inc.1994.