

ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO DE LOS MECANISMOS INHERENTES AL FENÓMENO DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA

José E.O. Pessanha *, V. Leonardo Paucar, Marcos J. Rider *

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mails: pessanha@dee.ufma.br, lpaucar@ieee.org, mjridr@ieee.org

RESUMEN

En este trabajo se investiga la dinámica envuelta en los escenarios de inestabilidad de tensión usando como herramienta de análisis un programa computacional de estabilidad transitoria modificado. Esas modificaciones incluyen modelos de los equipamientos y de las cargas relevantes al fenómeno de estabilidad de tensión, sistemas de control de los transformadores con tap variable, limitadores de sobreexcitación de los generadores y un algoritmo de integración numérica de paso variable para simular fenómenos dinámicos en el largo plazo. Se enfatiza la eficiencia y utilidad del análisis dinámico al investigar los mecanismos involucrados en el proceso de colapso de tensión. La adopción de modelos dinámicos de las cargas permite identificar los parámetros críticos que permitirán el desarrollo e implantación de medidas correctivas y preventivas con la finalidad de garantizar una operación segura del sistema eléctrico. Se presentan los resultados de estudios computacionales realizados con un sistema de potencia de prueba real en el cual se identifican problemas de estabilidad de tensión y a partir de ellos se proponen medidas para mejorar la estabilidad de tensión del sistema.

ABSTRACT

In this work is investigated the dynamics involved in the scenarios of voltage instability of power systems using as analysis tool a modified transient stability computer program. Those modifications include models of the equipment and loads relevant to the phenomenon of voltage stability, control systems of the transformers with variable tap, generators over-excitation limiters and a numerical integration algorithm with variable step to simulate dynamic phenomena in the long term. It is emphasized the efficiency and utility of the dynamic analysis when investigating the mechanisms involved in the process of voltage collapse. The adoption of dynamic models of the loads allows to identify the critical parameters that will allow the development and implementation of corrective and preventive actions with the purpose of guaranteeing a secure operation of the electric energy system. The results of computer studies related to voltage stability problems of a real power system are reported and some measures to improve the voltage stability of a power system are reported.

INTRODUCCIÓN

Recientemente son frecuentes los problemas de estabilidad de tensión en los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Las causas de este problema están documentados en la literatura y generalmente se refieren a SEP muy cargados, inadecuado soporte de potencia reactiva, etc. [1, 11, 21, 10]

La inestabilidad de tensión es un fenómeno dinámico que se origina cuando la dinámica de la carga intenta restablecer el consumo de potencia de tal forma que supera la capacidad del sistema compuesto de generación y transmisión. [21]

El análisis de la estabilidad de tensión puede realizarse

adoptando métodos estáticos, dinámicos e inclusive híbridos y que consideran técnicas de inteligencia artificial. Los métodos estáticos son aproximados y derivan de metodologías de flujo de potencia, técnicas de espacio de estado y valores singulares. Los métodos dinámicos específicos en el dominio del tiempo consideran la resolución de un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones a diferencias. Alternativamente pueden ser utilizados programas de estabilidad transitoria electromecánica. Sin embargo, pueden existir restricciones para la adopción de este procedimiento pues los programas de estabilidad transitoria a veces no modelan dispositivos que influyen en el problema de estabilidad de tensión.

Por ejemplo, el limitador de corriente de campo sobre la tensión terminal del generador es relevante al fenómeno de estabilidad de tensión. Sin embargo, el período de tiempo para actuación de este dispositivo supera al período de tiempo de un fenómeno transitorio electromecánico. Por esta razón los dispositivos de dinámica lenta no se consideran en los programas convencionales de estabilidad transitoria electromecánica.

Típicamente los fenómenos de estabilidad transitoria angular se simulan durante 10 s [1] si bien ese tiempo puede extenderse. La eficiencia del estudio y los límites de esa extensión de tiempo dependen del método de integración numérica y de los modelos de los dispositivos de control. Si el tiempo de estudio se extiende hasta unos 2 minutos pueden detectarse situaciones desfavorables al simular dispositivos de dinámica lenta en caso estén disponibles y ver si actuaron de acuerdo con su lógica de control.

Con relación al uso de métodos convencionales de análisis de estabilidad de frecuencia (largo plazo) en los estudios de estabilidad de tensión, se debe destacar que sus objetivos primarios no están relacionados a la estabilidad de tensión, sino con problemas como desbalance de potencia activa y variaciones de frecuencia.

En este trabajo se presentan aspectos relevantes del análisis de estabilidad de tensión en el dominio del tiempo, así como los modelos y principales modificaciones hechas a un programa originalmente desarrollado para análisis de la estabilidad transitoria electromecánica. La eficiencia y utilidad del análisis

en el dominio del tiempo se verifica a través de simulaciones computacionales de escenarios de estabilidad de tensión en un sistema equivalente real del sur-sureste brasileño.

ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO DEL FENÓMENO DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN

El análisis en el dominio del tiempo del fenómeno de estabilidad de tensión es útil para determinar el tiempo de coordinación de los equipamientos, esclarecer el fenómeno y evitar dimensionamientos excesivos en la fase de proyecto. La simulación en el dominio del tiempo obliga a un análisis cuidadoso, a la utilización y desarrollo de modelos más detallados, simular dinámicas rápidas asociadas con las fases finales del colapso y obtener el desempeño dinámico del sistema a través de gráficos que permitan visualizar la evolución en el tiempo del fenómeno de estabilidad de tensión.

La estructura general del modelo representando el sistema de potencia para el análisis de la estabilidad de tensión en el dominio del tiempo, es similar al del análisis convencional de estabilidad electromecánica de medio y largo plazo [1]. Las ecuaciones matemáticas que describen la dinámica completa de un SEP se expresan según las ecuaciones (1) a (4) [2-7]:

$$\dot{x} = \bar{f}(x, y, z, w, u, p, t) \quad (1)$$

$$\bar{0} = \bar{g}(x, y, z, w, u, p, t) \quad (2)$$

$$z(k+1) = \bar{h}(x, y, z(k), w, u, p, t) \quad (3)$$

$$w = \bar{\phi}(t) \quad (4)$$

Donde:

- \bar{x} - vector m-dimensional conteniendo las variables de estado dinámicas.
- \bar{y} - vector n-dimensional conteniendo las variables de estado algebraicas.
- \bar{z} - vector q-dimensional conteniendo las variables que sufren alteraciones a través de pasos discretos.
- \bar{w} - vector r-dimensional conteniendo las variables que envuelven un tiempo largo.
- \bar{u} - vector s-dimensional conteniendo las variables de control independientes;
- \bar{p} - vector s-dimensional correspondiente a los parámetros del sistema;

- \vec{f} - vector de funciones no-lineales que describen las ecuaciones dinámicas de las máquinas síncronas, sistemas de excitación, reguladores automáticos de tensión, reguladores de velocidad, cargas, compensadores estáticos, etc.
- \vec{g} - vector de funciones no-lineales de las ecuaciones algebraicas de las restricciones impuestas por la red y también de las ecuaciones algebraicas de las máquinas síncronas, cargas, sistemas de excitación, reguladores de tensión, reguladores de velocidad, compensadores estáticos, etc.
- \vec{h} - vector de las funciones que expresan la naturaleza discreta en el tiempo de las variables z .
- $\vec{\phi}$ - vector de funciones no-lineales temporales asociadas a los ciclos de carga de las programaciones de generación e intercambio, etc.
- k - instante de un evento discreto.
- t - tiempo en segundos, minutos u horas.

Los métodos para analizar el fenómeno de la estabilidad de tensión envuelven las ecuaciones (1) y (2) en donde las reducciones y/o simplificaciones pueden realizarse de acuerdo al objetivo de estudio como también de los mecanismos envueltos. Los métodos dinámicos de análisis son clasificados como métodos en el dominio del tiempo y métodos simplificados [7].

Métodos Simplificados

Diversos métodos dinámicos simplificados para el análisis de la estabilidad de tensión de medio y largo plazo han sido presentados en la literatura. En [8] se presenta una metodología envolviendo simulaciones sucesivas de flujos de potencia en el que un nuevo flujo de potencia es simulado después de cada maniobra de líneas de transmisión o cambio de tap de transformadores.

El método de [9] aproxima la evolución en el tiempo del fenómeno de estabilidad de tensión de medio y largo plazo a través de una sucesión de puntos de equilibrio. La dinámica transitoria es despreciada y la ecuación (1) es substituída por la ecuación de equilibrio (5) [5].

$$0 = \vec{f}(x, y, z, w, u, p, t) \quad (5)$$

En estos sucesivos puntos de equilibrio la estabilidad de tensión se calcula vía los valores propios de las matrices de estado y/o Jacobiano y factores de sensibilidad. Este método ha sido aplicado para determinar la estabilidad de tensión de medio y largo plazo de SEP.

Métodos en el Dominio del Tiempo

Los métodos de análisis en el dominio del tiempo corresponden a la forma tradicional de análisis de la dinámica de un sistema de potencia. Para la simulación dinámica en el tiempo se adoptan algoritmos de integración numérica que resuelven el conjunto de ecuaciones algebraicas-diferenciales no-lineales (1) a (4).

El método de integración trapezoidal implícito presentado en [9] unifica los fenómenos rápidos (transitorios electromecánicos) y lentos (de largo plazo) y ha sido implementado en una de las primeras versiones del programa ETMSP (Extended Transient Mid-Term Stability Program) [11]. El modo (transitorio o de largo plazo) de las simulaciones es definido por el tamaño del paso de integración. Se adiciona un amortiguamiento artificial para eliminar las oscilaciones de potencia sincronizante y para permitir el uso de pasos de integración grandes en la simulación de la dinámica de largo tiempo. Es posible mudar de un modo para otro adicionando o removiendo el amortiguamiento artificial y variando el paso de integración. Así el paso de integración puede variarse desde milisegundos hasta un segundo y ha sido aplicado en sistemas de dimensión moderada no incluyendo motores de inducción [11].

Métodos de integración mas eficientes utilizan pasos de integración de paso variable y son adecuados para resolver sistemas rígidos de ecuaciones diferenciales [12] con constantes de tiempo que van desde milisegundos a decenas de segundos. El programa EUROSTAG [13] posee un algoritmo que controla el tamaño del paso de integración en función del error local de truncamiento pudiendo variar de 1 ms a 100 s. Este programa es usado para simular el fenómeno de estabilidad de tensión en el dominio del tiempo.

El programa ETMSP versión 3.0 [14] utiliza un método de integración implícito y posee modelos de equipamientos y de dispositivos de control relevantes

para el estudio de la estabilidad transitoria de tensión como para la estabilidad de tensión de largo plazo. Esta versión es capaz de simular sistemas de potencia de grande porte.

Otra metodología para analizar el fenómeno de estabilidad de tensión incluye una utilización alternada entre simulación dinámica (ecuaciones diferenciales) y simulación cuasi-permanente (ecuaciones algebraicas) de acuerdo con las condiciones del sistema [15], [16].

Están disponibles programas comerciales para el análisis de la dinámica electromecánica de los SEP tal como el PSS/E (Power System Simulator for Engineering), el programa DIGSILENT, entre otros, que también pueden ser útiles para estudiar la estabilidad de tensión en el dominio del tiempo.

EL PROGRAMA VOLTDYN

Fue desarrollado un programa computacional para simular escenarios de estabilidad de tensión en el dominio del tiempo. El programa, identificado por el nombre VOLTDYN (VOLTage DYNamics), es una versión modificada de un programa computacional de estabilidad transitoria electromecánica en el dominio del tiempo [17]. La modificación del programa original tuvo la finalidad de modelar los principales mecanismos, dispositivos de control y tipos de carga inherentes al fenómeno de estabilidad de tensión. La versión original disponible del programa considera los siguientes modelos:

- Máquinas síncronas – modelos I, II, III y IV.
- Motores de inducción - motor de inducción tipo jaula de ardilla simple y motor de inducción tipo doble jaula de ardilla.
- Reguladores de velocidad y de tensión.
- Compensadores estáticos – reactor controlado a tiristores/capacitor conmutado a tiristor y reactor saturado/capacitor fijo.
- Elementos shunt de compensación.
- Carga tipo impedancia constante.

Con el objetivo de ampliar la capacidad de ese programa en relación a los estudios de estabilidad de

tensión en el dominio del tiempo, fueron agregados los siguientes modelos de equipos y dispositivos de control y de carga:

- Modelo discreto de transformador con cambio automático de tap. [1]
- Limitador de corriente de campo. [1]
- Carga tipo energía constante controlada por termostato. [1]
- Modelo dinámico de carga tipo: potencia constante, corriente constante. [18]

El modelo de transformador con cambio automático de tap

El modelo de transformador disponible en el programa original [17] se muestra en la Figura 1.

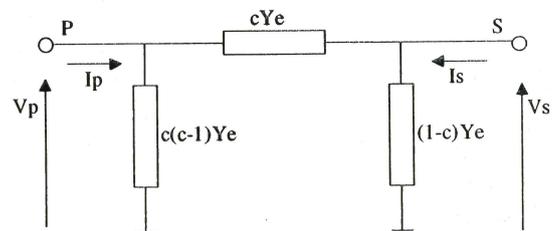


Fig. 1 Modelo del transformador con cambio de tap.

Este modelo permite un cambio no automático de tap a través de un comando establecido en el archivo de entrada del programa. Con este modelo no se puede establecer una lógica de control para monitorear la tensión en barras específicas. Para resolver el problema, se propone un sistema de control para un cambio automático de tap según el diagrama de bloques de la Figura 2, utilizando el modelo del transformador disponible.

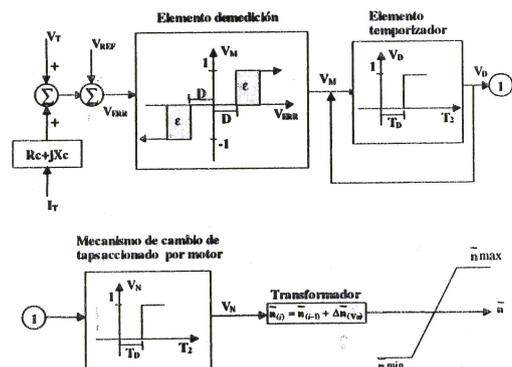


Fig. 2 Sistema de control para cambio automático de tap.

La señal de entrada del elemento de medición es una señal de error de tensión y la salida, VM , puede asumir un valor de 0, +1 o -1, dependiendo de la señal de entrada (V_{err}). La característica del elemento de medición posee una banda muerta D y una banda de histéresis ϵ .

El elemento temporizador es usado para evitar cambios no necesarios de tap en respuesta a variaciones transitorias de tensión y, si se desea, introducir un atraso de tiempo antes de mover el tap. La unidad temporizada especifica el tiempo de duración que la señal de error de tensión excede la banda muerta D . La salida VD de la unidad temporizada es normalmente cero. Si el tiempo acumulado T del temporizador excede TD , entonces VD se ajusta en función de VM (+1 o -1), enviando una señal para el motor a fin de mover el tap para arriba o para abajo. El atraso de tiempo TD es igual a $TD0$ para el primer movimiento del tap. Para los movimientos siguiente el atraso TD es igual a $TD1$. Esto permite introducir un atraso de tiempo intencional entre las sucesivos cambios de tap. La faja de acción de los taps también está sujeta a límites máximos y mínimos.

El motor y el mecanismo de cambio de tap pueden ser representados por una simple constante de tiempo TM inherente al equipamiento. La señal de salida VN representa un cambio incremental en la posición del tap y puede ser igual a 0, +1 o -1.

Un cambio en la posición de tap se refleja en el modelo de transformador como una variación incremental en pu, en relación de espiras. La relación de espiras luego de la i -ésima operación es:

$$\bar{n}_i = \bar{n}_{i-1} + \Delta\bar{n} \cdot (V_n) \quad (6)$$

donde Δn es el incremento en pu de la relación de espiras. Si la barra controlada es del lado primario, después del i -ésimo cambio de tap se tiene [1]:

$$\bar{n}_i = \bar{n}_{i-1} - \Delta\bar{n} \cdot (V_n) \quad (7)$$

Del modelo ilustrado en la Figura 1:

$$\bar{Z}_e = \bar{n}_s^2 \cdot (\bar{Z}_{p0} + \bar{Z}_{s0}) \quad (8)$$

$$\bar{Y}_e = \frac{1}{\bar{Z}_e} \quad (9)$$

$$c = \frac{1}{\bar{n}} \quad (10)$$

Donde n es la relación de espiras, ns es la relación de espiras del lado secundario del transformador, Z_{p0} y Z_{s0} son las impedancias nominales del primario y secundario. Las barras superiores denotan valores en pu.

Limitador de corriente de campo o de sobre-excitación

En los estudios de estabilidad de tensión de largo plazo es importante representar los limitadores de corriente de campo debido a la influencia de estos dispositivos en el desarrollo del fenómeno. En la Figura 3 se ilustra el diagrama de bloques del conjunto implementado en el programa conteniendo el regulador de tensión y el limitador de sobre-excitación.

El limitador de sobreexcitación actúa de la siguiente forma: cuando la corriente de campo (I_{fd}) excede un valor máximo pre-establecido (ICPM1), la señal VF1 del lazo de control número 1 actúa para reducir instantáneamente la excitación. Cuando la corriente de campo se encuentre abajo de ICPM1, la acción limitadora es ejecutada a través del lazo 2. Cuando la corriente de campo atiende ICPM2, se cambia a la posición de la llave para la posición "bajo". Este procedimiento asegura que la corriente de campo, caso ocurra un segundo disturbio, no sobrepase el valor inferior (ICPM2) por un período de tiempo suficiente para permitir el enfriamiento de la máquina. Cuando la corriente de campo se encuentre abajo de ICPM2, la señal VF4 contribuye para ajustar rápidamente la salida del bloque integrador para cero.

La amplitud de la señal de control VF2 y el valor de la ganancia $K2$ determinan el atraso de tiempo y la acción de la rampa [1]. La función rampa especifica los valores máximo y mínimo de la corriente de campo y el tiempo de actuación del limitador.

En las simulaciones de largo plazo, pequeños pasos de integración numérica aumentan el tiempo de procesamiento. Para mejorar este problema fue desarrollado un algoritmo de integración de paso variable aprovechando el método original donde el tamaño del paso de integración es ajustado en función de un cálculo de error de truncamiento local. A pesar de que esta técnica presenta una buena precisión numérica, el tamaño del paso de integración no puede asumir valores elevados debido al riesgo de ocurrir inestabilidad numérica, limitándose hasta la faja de 1 segundo, para ciertos casos. Este límite depende del grado de complejidad del sistema simulado como de los modelos disponibles.

SIMULACIONES COMPUTACIONALES

El sistema de potencia ilustrado en la Figura 5 representa el sistema equivalente sur-sureste brasileño [19]. Este sistema está compuesto por 8 generadores y 36 barras. Los equipamientos de compensación de potencia reactiva no están representados en el sistema.

Descripción del sistema

Los modelos incluyen amortiguamiento, efectos transitorios y sub-transitorios representados en los generadores de las barras 1, 31, 32, 33, 34, 51 y 61. Los generadores de las barras 1, 31, 34, 51 y 61 poseen reguladores de tensión con limitadores de sobreexcitación. El generador de la barra 26 se representa por una barra infinita.

Los transformadores T_1 y T_2 poseen control automático de tap y los demás transformadores poseen tap fijo.

Las cargas de las barras 1, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 29, 31, 51 y 61 fueron modeladas de acuerdo con la ecuación 3.6 y sus parámetros se incluyen en la Tabla 1. Todos los modelos fueron ajustados con una constante de tiempo de 30 s y con conductancia máxima y mínima de 50% del valor nominal. En [20] se presentan resultados de la aplicación de este modelo de carga en un sistema real.

El objetivo de este trabajo no sólo es investigar la influencia del modelo en un SEP real sino también verificar el desempeño del programa modificado.

Contingencias

- Un corto-circuito trifásico ocurre en $t = 9.9$ s en la barra 16, la falla se elimina en $t = 10$ s al abrir la línea entre las barras 16 y 17.
- En el instante $t = 15$ s, sale la línea entre las barras 28 y 30.
- En el instante $t = 17$ s, sale una de las líneas entre las barras 15 y 16.

Gráficos y análisis de los resultados

El comportamiento del sistema en respuesta a la secuencia de eventos puede ser visto en el conjunto de Figuras 6. En las Figuras 6(a) y 6(b) se ilustra el comportamiento dinámico de la tensión en el lado primario y secundario del transformador T1. Como se esperaba, la tensión en el lado primario es reducido a cada cambio de tap en cuanto que la acción del cambio de tap en la tensión del lado secundario no resulta ser el efecto esperado.

El comportamiento dinámico de la corriente de campo de un generador de la barra 1 y el comportamiento dinámico de la tensión terminal de este mismo generador están ilustrados en las Figuras 6(c) y 6(d), respectivamente. Estas curvas indican que el sistema es estable para la condición post-contingencia, con niveles de tensión inferiores a la condición pre-contingencia.

No se puede olvidar que algunos generadores presentes en el sistema poseen limitadores de sobreexcitación, por lo tanto, ¿será que 150 s es un tiempo suficiente para garantizar que en caso no haya nuevas perturbaciones el sistema permanecerá en condiciones de equilibrio ilustradas por las curvas anteriores?. Las curvas de las Figuras 6(e) y 6(f) responden a esta pregunta, con el tiempo de simulación extendido para 350 s. Se observa la acción del limitador de sobreexcitación causando la pérdida del control de la tensión terminal del generador. La corriente de campo comienza a ser limitada aproximadamente en $t = 215$ s, siendo mantenida en 5% encima del valor nominal, conforme es establecido por los parámetros del limitador. A pesar de la acción del limitador, el sistema post-contingencia permanece estable.

La metodología presentada puede ser aplicada a sistemas eléctricos de potencia reales tal como el

sistema eléctrico interconectado (SEIN) peruano, siendo necesario solamente el previo procesamiento

adecuado de los datos y parámetros del sistema a ser estudiado.

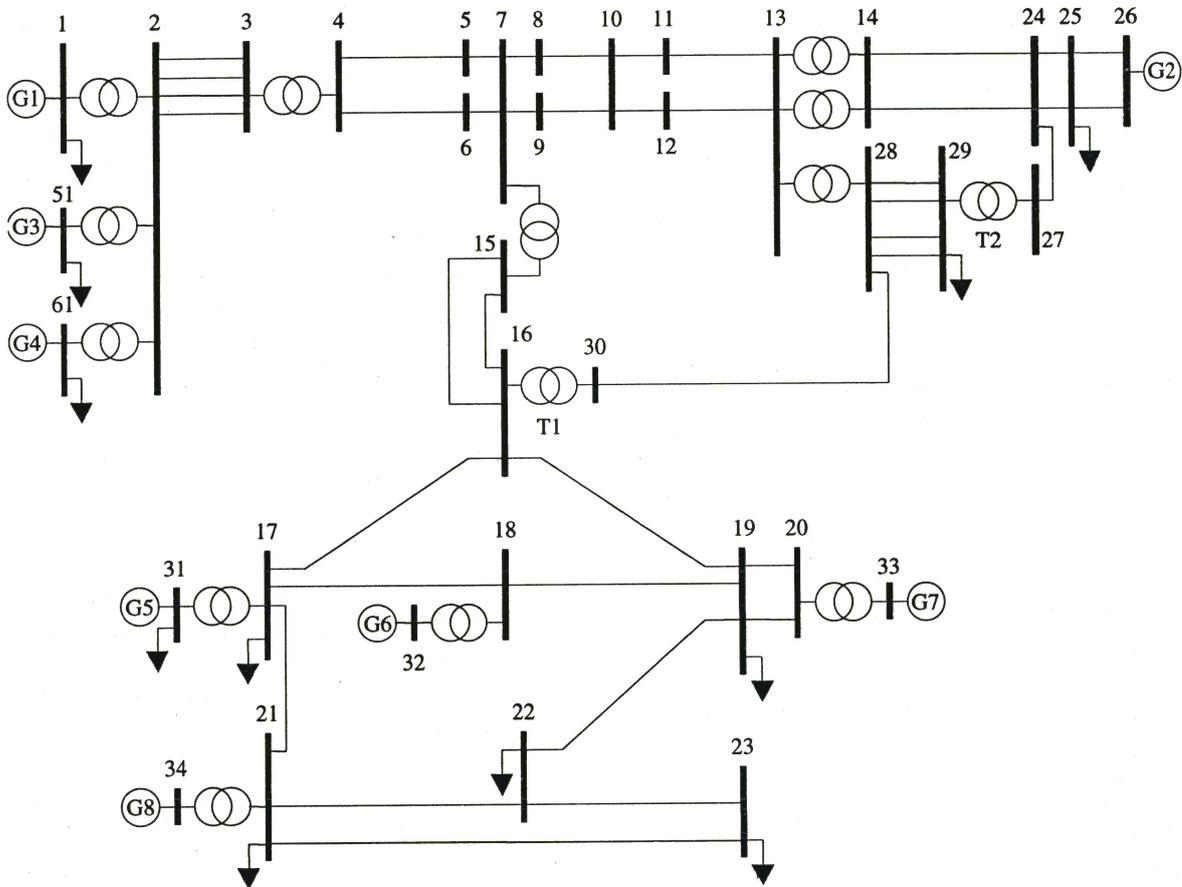


Fig. 5 Diagrama unifilar del sistema equivalente sur-sureste brasileño.

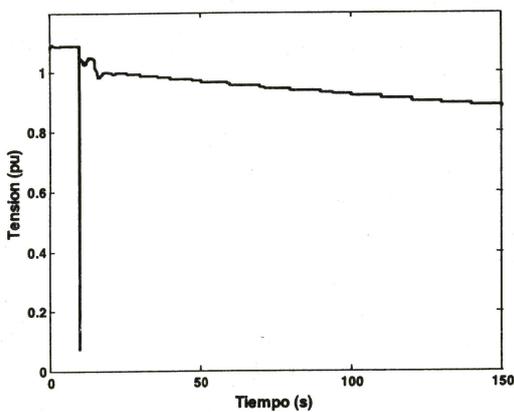


Fig. 6a Comportamiento dinámico de la tensión en la barra 30.

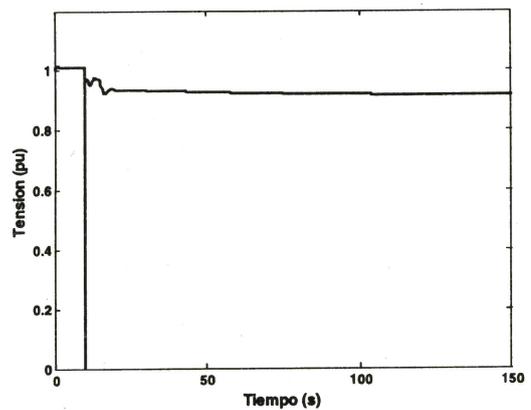


Fig. 6b Comportamiento dinámico de la tensión en la barra 16.

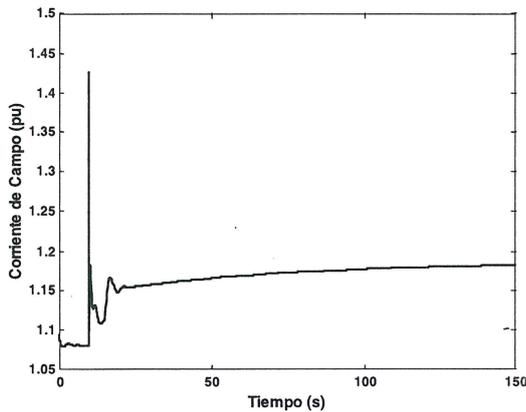


Fig. 6c Comportamiento dinámico de la corriente de campo del generador G1.

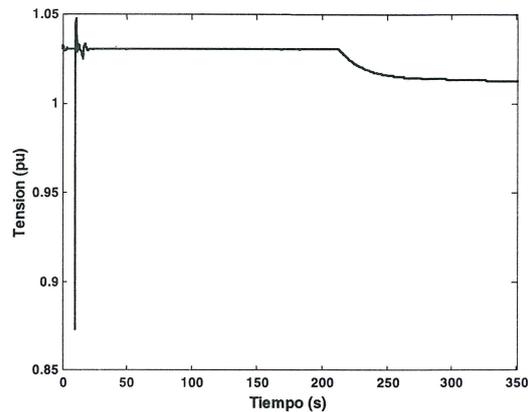


Fig. 6f Comportamiento dinámico de la tensión terminal del generador G1.

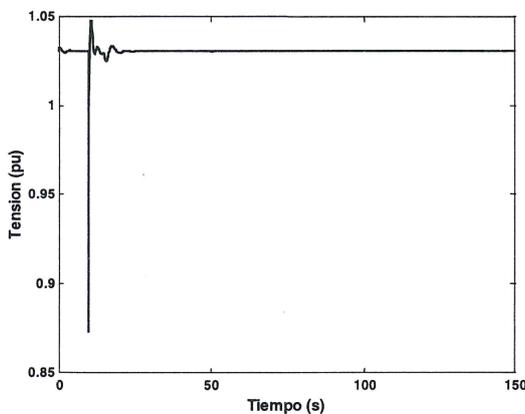


Fig. 6d Comportamiento dinámico de la tensión terminal del generador G1.

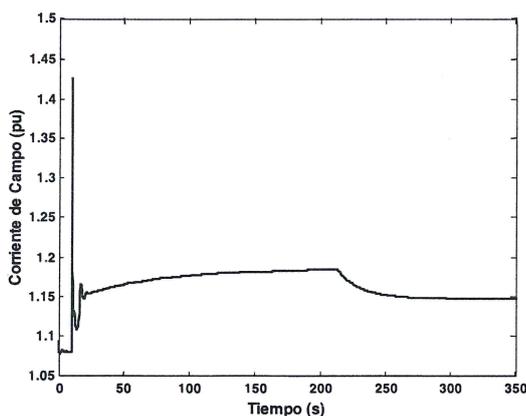


Fig. 6e Comportamiento dinámico de la corriente de campo del generador G1.

CONCLUSIONES

El análisis del fenómeno de estabilidad de tensión en el dominio del tiempo es importante en el planeamiento y operación de los sistemas de potencia debido a las informaciones relevantes que este tipo de análisis puede proporcionar, destacando:

1. Establece el tiempo de coordinación de los equipamientos.
2. Aclara el fenómeno y previene de excesivo dimensionamiento en la fase de proyecto.
3. Obliga a un análisis cuidadoso y al desarrollo y uso de modelos más detallados de componentes.
4. Simula la dinámica rápida asociada con la fase final del colapso de tensión.
5. Demuestra y presenta el desempeño dinámico del sistema a través de gráficos donde se visualiza la evolución en el tiempo del fenómeno de la estabilidad de tensión.

Con relación a la herramienta de análisis usada en este trabajo, la adaptación del programa original para simular escenarios transitorios y de largo plazo de fenómenos de estabilidad de tensión fue dividida en dos etapas. La primera etapa de implementación de los modelos de dispositivos de control y de las cargas relevantes al fenómeno de estabilidad de tensión del largo plazo. De esa forma, los mecanismos inherentes al fenómeno son capturados durante la simulación computacional, conforme ilustra el conjunto de simulaciones. En la segunda etapa se evalúa la

Tabla 1. Datos de los modelos de las cargas.

Barra	V (pu)	MW (Total)	MVAr (Total)	MW (%) constante	MVAr (%) constante	I (%) constante	Z (%) constante
1	1.030	2.70	0.0	100.0	--	--	--
17	1.014	4.40	0.0	100.0	--	--	--
19	1.048	1461.00	-339.0	100.0	100.0	--	--
21	1.053	2.80	0.0	100.0	--	--	--
22	1.062	2.40	0.0	100.0	--	--	--
23	1.049	678.30	120.8	100.0	--	--	--
25	1.043	6150.00	-2400.0	50.0	50.0	50 (MW)	50 (MVAr)
29	0.996	2300.00	377.0	100.0	100.0	--	--
31	0.995	1.70	0.0	100.0	--	--	--
51	1.030	2.70	0.0	100.0	--	--	--
61	1.030	2.70	0.0	100.0	--	--	--

confiabilidad y la eficiencia del método numérico para simular tanto los fenómenos transitorios como los de argo plazo. A partir de esa evaluación se incluyeron algunas mejoras en el método numérico.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el soporte de CAPES y CNPq del Brasil.

REFERENCIAS

1. **P. Kundur**, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
2. **T. Van Cutsem**, "Analysis of Emergency Voltage Situations", Proc. 11th PSCC, Avignon, France, vol.1, pp. 323-330, 1993.
3. **I. Hiskens**, "Analysis Tools for Power Systems Contending with Nonlinearities", Proceedings of IEEE, vol. 83, no.11, pp.1573-1587, Nov. 1995.
4. **P.A. Löf**, "On static analysis of long-term voltage stability in electric power systems", Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1995.
5. **T.V. Cutsem, Y. Jacquemart, J.N. Marquet, and P. Pruvot**, "A Comprehensive Analysis of Mid-term Voltage Stability", IEEE Trans. on Power Systems, SM 511-6, summer meeting, 1994.
6. **V.H. Quintana and L. Vargas**, "Voltage stability as affected by discrete changes in the topology of power networks", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, no. 4, pp. 346-352, July 1994.
7. **P.P. Carvalho Mendes**, "Aplicação de redes neurais artificiais na análise em tempo real da estabilidade de tensão de regime permanente desistemas elétricos de potência", Proposta de Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Dez. 1997
8. **W.R. Lachs**, "Dynamic Study of an ExtremeSystem Reactive Deficit", IEEE Transactions onPower Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 9, pp. 2420-2426, Sep. 1985.
9. **R.J. Frowd J.C. Giri and R. Podmore**, "Transient stability and long-term dynamics unified", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-101, no.10, pp.3841-3849, Oct. 1982.
10. **T. Van Cutsem**, "Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods", Proceedings of the IEEE, vol.88, no.2, pp.208 – 227, Feb. 2000
11. **Taylor, C.W.**, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, 1994.
12. **EPRI Report EL-6627**, "Long-Term Power System Dynamics", Final Report of Project 90-7, General Electric Company, Apr. 1974.
13. **J. Deuse and M. Stubbe**, "Dynamic Simulationof Voltage Collapse", paper 92 SM 396-2 PWRs, IEEE/PES Summer Meeting, July, 1992.
14. **EPRI**, "User`s Manual - Extended Transient / Midterm Stability Program Package (ETMSP Version 3.0), Ontario Hydro, June 1992.

15. **W. W. Price et. al.**, "A Multi-Faceted Approach to Power system Voltage Stability Analysis", CIGRÉ-205, 1992.
16. **A. Kurita et. al.**, "Multiple time-scale power system dynamic simulation", paper 92 WM 128-9 PWRs, IEE/PES Winter Meeting, Jan. 1992.
17. **C.P. Arnold**, "Solutions of the Multi-Machine Power-System Transient Stability Problem", Ph.D. Thesis, UMIST, 1976.
18. **M.K. Pal**, "Voltage stability conditions considering load characteristics", *IEEE Trans. on Power System*, vol.7, pp. 243-249, Feb. 1992.
19. **Comunicación privada con el "Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)"**, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
20. **W. Xu and Y. Mansour** "Voltage stability analysis using generic dynamic load models", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.9, no.1, pp. 479 – 493, Feb. 1994.
21. **Th. Van Cutsem and C. Vournas**, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998.

