APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

Desarrollo histórico en Cuba sobre las herramientas de cálculo utilizadas para el análisis de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia

Juan Boza

Recibido: Enero del 2005
Aprobado: Marzo del 2005

Resumen / *Abstract*

Se expresan, en apretada síntesis, las etapas de desarrollo y algunas de las características de los programas para computadoras digitales, desarrollados en el país, y utilizados en el cálculo de la estabilidad, fundamentalmente en la estabilidad transitoria. Se citan, así mismo, algunas de sus principales aplicaciones en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).
Palabras clave: estabilidad, estática transitoria y dinámica

In this paper are exposed an historic abstract about the development of tools that have been used in Cuba for calculation and analysis of the stability problems on electric power system, with emphasis on transient stability problems. Also are show several characteristics of digital programs for computer used in academic and investigation fields.
Key words: stability, static, transient and dynamic

INTRODUCCIÓN

En los estudios de los sistemas eléctricos de potencia,[1] se acostumbra a diferenciar distintos tipos de estabilidad en relación con la naturaleza de la perturbación, su magnitud, los aparatos y procesos involucrados, el tiempo que debe ser tomado en consideración para analizar si la operación será estable o no, y el método de cálculo mas apropiado para ello. Esto dio lugar a un conjunto de clasificaciones las cuales se intentan esclarecer.

V. Vénikov diferencia la estabilidad **estática de la dinámica** indicando que la primera se considera en el caso de perturbaciones de pequeña magnitud o cuando el régimen se modifica gradualmente -se trata esencialmente de procesos de estado estable-, en tanto que la segunda se analiza para desviaciones grandes debidas a cambios de configuración del sistema y está asociada a procesos transitorios.

E. Kimbark utiliza una clasificación conceptualmente similar, pero que se diferencia de la precedente porque utiliza la denominación **transitoria** en lugar de dinámica.

Pérez Donsión , por su parte, prefiere otra clasificación que comprende cuatro categorías a las que llama **estática**, **dinámica**, **transitoria** y no lineal. Las categorías estática y transitoria coinciden con la clasificación expuesta por Kimbark, no obstante, asocia la denominación de estabilidad dinámica a perturbaciones relativamente pequeñas y repentinas

cuyo efecto puede estudiarse modelando el sistema mediante ecuaciones diferenciales lineales, mientras indica que la cuarta categoría corresponde a un término matemático referido a una clase general de problemas de estabilidad tratados en todos los sistemas de ingeniería -no solamente los sistemas eléctricos de potencia- y que se estudian mediante ecuaciones no lineales, aunque no necesariamente ecuaciones diferenciales. Sin embargo, no precisa la naturaleza o el tipo de procesos que involucra esta última categoría.

P. Kundur recurre a una clasificación basada en criterios más amplios, distinguiendo la **estabilidad de ángulo** de la **estabilidad de voltaje**. La primera se refiere a la capacidad del sistema para mantener el sincronismo y el equilibrio de potencias activas, la restante a la capacidad para mantener aceptablemente estable el voltaje y el equilibrio de potencias reactivas. Aunque frecuentemente la inestabilidad de voltaje y la de ángulo ocurren prácticamente juntas, o una conduce a la otra, esta distinción puede ayudar a comprender las causas subyacentes de los problemas y, por lo tanto, a identificar las mejores soluciones en cada caso. En esta última clasificación, tanto para la estabilidad de ángulo como para la de voltaje, se consideran **la estabilidad frente a pequeñas perturbaciones y la estabilidad frente a grandes perturbaciones.** La primera coincide con el concepto de estabilidad dinámica tratado anteriormente, en cambio, la estabilidad frente a grandes perturbaciones comprende tres subcategorías: **estabilidad transitoria o de corto alcance, estabilidad de alcance medio y estabilidad de largo alcance.**

Los estudios de corto alcance comprenden los primeros instantes posteriores a la perturbación, se analiza solamente la primera oscilación y el objetivo fundamental es determinar si la respuesta del sistema es estable o no, sin considerar la acción de ningún dispositivo de control.

Las perturbaciones grandes conllevan apreciables variaciones de voltaje y frecuencia, que implican la acción de dispositivos de regulación y control cuya respuesta demanda algunos segundos y que, por lo tanto, no se modelan en los estudios de estabilidad transitoria. Los estudios de alcance medio están orientados a analizar la dinámica del sistema, considerando la acción de esos dispositivos.

La respuesta dinámica general de los sistemas de potencia puede involucrar también la influencia de componentes cuya respuesta es relativamente muy lenta, tales como las tuberías forzadas de gran longitud de centrales hidroeléctricas o las calderas con varias etapas de recalentamiento en unidades térmicas. El estudio del comportamiento del sistema incluyendo la influencia de estos componentes, evidentemente, requiere de un análisis que comprenda tiempos de análisis bastante prolongados, estos estudios son los denominados de largo alcance.

En general, se acostumbra indicar que los intervalos típicos que comprende los distintos tipos de estudios son del orden de 0 a 10 s, para los estudios de estabilidad transitoria, 10 s a pocos minutos para los de alcance medio y desde unos pocos minutos hasta aproximadamente 10 min para los de largo alcance. Sin embargo, realmente no puede establecerse una división bien definida entre cada una de las categorías, particularmente la frontera entre los intervalos que comprende los estudios de alcance medio y largo es bastante difusa y, muchas veces, están superpuestos.

W. Stevenson define el **límite de estabilidad** como el máximo flujo de energía que puede darse en un punto determinado del sistema sin que se pierda la condición de funcionamiento estable. Sin embargo, ese valor no es el mismo para el régimen estable que para el transitorio, es decir, que el flujo de energía máximo admisible cuando su variación se produce gradualmente no es el mismo que si ese cambio ocurre bruscamente. Se diferencia entonces el límite de estabilidad para el régimen estable correspondiente al régimen transitorio, siendo este último el que, generalmente, impone más restricciones al sistema.

Como se ha observado, el término estabilidad está asociado tanto al régimen permanente como al transitorio, no obstante, las herramientas de análisis y las soluciones tecnológicas requeridas en uno u otro caso pueden ser muy diferentes.

Según Pérez Donsión, el análisis de la estabilidad transitoria es el que reviste mayores dificultades e importancia. Las dificultades se deben principalmente a que los problemas de estabilidad transitoria están asociados a perturbaciones grandes que no permiten la linealización de las ecuaciones que describen la dinámica del sistema. La importancia reside, fundamentalmente, en que las perturbaciones grandes pueden originar la pérdida de sincronismo de una o varias de las unidades de generación o, en las circunstancias más desafortunadas, hasta pueden producir el colapso del sistema.

El análisis precedente hace evidente que una de las tareas primordiales de los ingenieros de sistemas

eléctricos de potencia es predecir las situaciones más desfavorables ante la ocurrencia de grandes perturbaciones y desarrollar las estrategias adecuadas para enfrentarlas, de modo que las consecuencias y efectos negativos sean mínimos. En este sentido, la simulación computacional constituye una herramienta de gran valor para los estudios de la estabilidad transitoria.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS ESTUDIOS DE ESTABILIDAD.[1]

Los primeros problemas relacionados con la estabilidad de los sistemas eléctrico[1] datan de inicios de la década del 20. Stevenson W. señala que cuando los alternadores eran accionados por máquinas alternativas de vapor uno de los problemas fundamentales del servicio eran las oscilaciones debidas a las variaciones periódicas del momento impulsor. Estas oscilaciones provocaban fluctuaciones del voltaje y de la frecuencia que se transmitían a los motores conectados al sistema y, algunas veces, cuando la frecuencia natural de oscilación de los motores coincidía con la de las oscilaciones de la máquina primaria se perdía completamente el sincronismo. Sin embargo, E. Kimbark diferencia la pérdida de sincronismo debida a las oscilaciones del momento mecánico, comúnmente llamadas penduleo o *hunting*, de la pérdida de sincronismo debida a la inestabilidad. Este autor, en coincidencia con P. Kundur, indica que los primeros problemas de estabilidad estaban asociados a centrales hidroeléctricas alejadas de los centros de carga y que, por razones económicas, operaban cerca de su límite de estabilidad estática. Estas instalaciones ocasionalmente podían perder el sincronismo durante el funcionamiento en régimen estable, aunque más frecuentemente ello ocurría con posterioridad a una falla o una perturbación grande. Según los conceptos y definiciones expuestos en la sección anterior esta última visión es la más acertada.

V. Vénikov afirma que la necesidad de estudiar los procesos transitorios electromecánicos en los sistemas eléctricos de potencia surgió en los EE.UU., donde se efectuaron las primeras publicaciones en la materia, destacando el trabajo de Park que propuso las ecuaciones diferenciales de la máquina sincrónica.

En la antigua URSS se trabajó prolíficamente en este campo, pudiendo identificarse un conjunto de investigadores que produjo una obra muy significativa entre la segunda mitad de la década de los 20 y hasta finales de los 80. Si bien son muchos los autores de dicho país, que se han destacado, no puede dejar de mencionarse como referente insoslayable a Vénikov, cuya vasta obra en relación con los procesos transitorios en los sistemas eléctricos de potencia debe considerarse prácticamente de lectura obligatoria para los especialistas en la materia.

Desde que se detectaron los primeros inconvenientes y hasta el presente, las características de los problemas de estabilidad se han modificado sensiblemente. En efecto, como es bien conocido, en el transcurso de los últimos ocho decenios los sistemas eléctricos han crecido notoriamente, tanto en potencia como en extensión, y la interconexión ha constituido un medio casi indispensable para lograr mejores condiciones económicas de explotación. No obstante, dicha modalidad de operación implica el aumento de la complejidad de los problemas de estabilidad y tiende a empeorar las consecuencias de la inestabilidad. Esto se puso claramente de manifiesto el 9 de noviembre de 1965 en América del Norte, cuando se produjo el colapso de la región noroeste del gran sistema conformado por las redes interconectadas de EE.UU. y Canadá .

Posteriormente sucedieron muchas averías en el sistema norteamericano, entre ellas puede destacarse la ocurrida el 13 de julio de 1977 y que implicó la interrupción completa del suministro de electricidad a la ciudad de New York y sus alrededores durante aproximadamente 25 h.

Mucho más recientemente, el 14 de diciembre de 1994, tuvo lugar en la zona occidental de Norteamérica un incidente importante debido a problemas de estabilidad transitoria, el cual fue descripto y analizado detalladamente por Rovnyak, Taylor y Thorp.

Las tendencias actuales en la planificación y la operación de los sistemas de potencia han originado nuevos tipos de problemas de estabilidad. Los estudios de largo alcance vienen cobrando mayor importancia en la medida que se acrecienta la complejidad de los sistemas de control. Asimismo, las condiciones financieras cada vez más exigentes implican la construcción de sistemas menos redundantes y conducen a la necesidad de operarlos muy cerca del límite de estabilidad transitoria, evidentemente, esto hace que los estudios destinados a indagar acerca de las condiciones de funcionamiento que garantizan la fiabilidad requerida adquieran cada vez más relevancia y actualidad.

Inicialmente, para analizar la estabilidad transitoria, era suficiente aplicar el llamado **método de las áreas iguales**, el que es bastante sencillo porque se trata esencialmente de un método gráfico que no requiere la integración de las ecuaciones diferenciales del

sistema. Sin embargo, el aumento en la complejidad de los problemas generó la necesidad de obtener información más amplia que la que dicho método puede proporcionar, especialmente cuando los estudios involucran muchos grupos de generación de potencia comparable interconectados mediante redes de transmisión complicadas. En estos casos la aplicación de métodos numéricos y técnicas discretas para la solución simultánea del sistema de ecuaciones conformado por la **ecuación de oscilación** de cada máquina y las ecuaciones algebraicas de la red se hacen prácticamente indispensables. El vertiginoso desarrollo de las ciencias de la computación ha impulsado la aplicación de los estudios de estabilidad transitoria basados en estas técnicas.

Por otra parte, debe decirse también que hace algunos años se ha comenzado a prestar más atención a los llamados **métodos directos**, cuya aplicación a los sistemas eléctricos fue propuesta por Gless en 1966, pero que todavía no han alcanzado gran desarrollo ni trascendencia y son de alcance limitado. Los métodos directos se basan en la función de energía de Lyapunov y una de las mayores limitaciones para su aplicación a los sistemas de potencia reside en que aún no se han establecido procedimientos formales sistemáticos para construir la función de Lyapunov en el caso de sistemas no lineales sin ninguna restricción respecto de las alinealidades.

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LAS HERRAMIENTAS DE CÁLCULO EMPLEADAS EN CUBA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD

A principios de la década de los 60 en el Departamento de Desarrollo del Ministerio de la Industria Eléctrica (MIE), se explotaba un Analizador de Redes de la General Electric, con prestaciones limitadas en cuanto al número de generadores a modelar, barras,[2] las líneas (incluyendo transformadores) y las cargas. Este equipo fue explotado, por el autor de este trabajo y otros especialistas, para realizar estudios de flujo de carga, cortocircuitos y estabilidad transitoria.[2,3]

A partir de tener conocimientos sobre el estudio de desarrollo del SEN para Cuba, ejecutado en Francia con la utilización de programas para computadoras digitales, en el Departamento de Desarrollo nació la iniciativa de comenzar la utilización de las computadoras para estos fines. No transcurrió mucho tiempo, para que esta iniciativa se hiciera realidad.

Con la instalación en Cuba de la primera computadora digital, Elliot 803-B de fabricación inglesa, e instalada en el Centro de Cálculo de la Universidad de La Habana, surgió la posibilidad a partir de 1966 de realizar los primeros cálculos de flujo de carga en el SEN con la propia biblioteca de programas de la Elliot y haciendo uso de la experiencia adquirida en el trabajo con el analizador de redes, y a partir de esta fecha se comenzaron a realizar los primeros trabajos para desarrollar programas de flujo de carga y estabilidad transitoria en el país.

Los primeros se desarrollaron en el Departamento de Desarrollo del Ministerio de la Industria Eléctrica (MIE), con la asesoría de un destacado especialista de la entonces República Socialista de Checoslovaquia Este programa se desarrolló para la computadora Elliot 803-B en lenguaje Autocode (propio de esta computadora), y en 1970 se usaron los primeros programas desarrollados en el país.

En el 1975 en el Centro de Investigaciones Energéticas (CIE) se desarrolló el programa ESTADIN[4] escrito en FORTRAN IV para las computadoras IRIS-10 e IRIS-50. Su principal utilización fue en el estudio de estabilidad del Sistema Eléctrico (SEN) realizado en el Departamento de Desarrollo del MINBAS con la entrada en servicio de nuevas unidades de generación en la planta Carlos Manuel de Céspedes. Este programa más tarde integró un paquete de programas (flujo, cortocircuitos y estabilidad transitoria), utilizado con fines docentes en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) y programado en lenguaje Basic

A partir de 1976 se utilizó en el Departamento de Regímenes del Despacho Nacional de Cargas del MINBAS el programa Dinámico para la computadora IRIS-50 en lenguaje FORTRAN IV, STANDARD (nivel H) y luego se realizó una versión para micro-computadora en FORTRAN 77, para incluir la automática contra averías y otros factores. Este programa se utilizó en el estudio de estabilidad del SEN con la entrada en servicios de la segunda unidad de 125 MW de Nuevitas.

A partir de 1985 comenzó a utilizarse el programa MUSTANG desarrollado en Riga, antigua URSS, en 1980. El mismo permite la modelación completa de la automática contra averías. Este programa permitió realizar estudios de estabilidad a gran escala en el SEN con la entrada en servicios de la unidad de 330 MW de la Central de Matanzas y la tercera unidad de 125 MW de Nuevitas. El programa se explotó en las máquinas computadoras del tipo EC (EC-1035).

Las primeras versiones del programa PSX, comenzaron a explotarse en el Departamento de Regímenes del Despacho Nacional de Carga, de la UNE, a partir de 1998. El programa de estabilidad transitoria de este paquete de programas permite ante diferentes perturbaciones simples o simultáneas observar gráficamente o por tablas los resultados propios de la estabilidad. Permite simular la automática contra averías instalada en el sistema eléctrico nacional. Este programa constituye una herramienta de trabajo del Despacho Nacional de Cargas y otros departamentos de la UNE

Se han desarrollado otros programas que han tenido aplicación en la docencia: "Transient Stability Program",[5] Tesis de Especialidad, resultado del curso dictado, en el CIE a principios de la década del 70, por los reconocidos profesores Stott y Brameller, de la Universidad de Manchester, Inglaterra. Este curso resultó de gran significación para los participantes, pues se logró un gran avance en los conocimientos sobre el tema y de hecho constituyó el despegue de todo el trabajo posterior desarrollado: "Programa para el estudio de la estabilidad transitoria utilizando Matlab";[1] "Algoritmo para el análisis de la estabilidad ante pequeñas perturbaciones en un sistema generador-barra infinita"; "Algoritmo para el análisis de la estabilidad ante pequeñas perturbaciones en sistemas eléctricos de potencia". También como trabajo de diploma se desarrolló un programa para la estabilidad dinámica de un sistema multimáquinas.

En la Unión Eléctrica y en las universidades cubanas se explota actualmente el paquete de programas Power Systems Explorer (PSX), que entre otros, posee un programa para el cálculo de la estabilidad transitoria en los sistemas eléctricos de potencia. Este programa al igual que otros que se explotan a nivel mundial tiene la posibilidad de simular los sistemas de excitación y los gobernadores de velocidad de las unidades generadoras, así como también las cargas de un sistema eléctrico de potencia.[2]

Para hacer un uso eficiente de los programas existentes a nivel mundial, actualmente se hace énfasis en perfeccionar los modelos y los parámetros de estos. En particular la IEEE ha desarrollados diferentes investigaciones en perfeccionar los modelos de los sistemas de excitación y de los reguladores de velocidad de las máquinas sincrónicas.

CONCLUSIONES

En la tabla que se muestra en el anexo 1, se especifican algunas de las características de los programas desarrollados y utilizados en el país, destacando los modelos matemáticos de los elementos representados en cada uno de los programas señalados, observándose el desarrollo que fueron experimentando estos debido a: el auge tecnológico de las computadoras, al desarrollo de los modelos matemáticos a nivel internacional y a la experiencia alcanzada por los investigadores y especialistas relacionados con el tema de la estabilidad

REFERENCIAS

1. **Feltán Corina, M.:** "Programa para el estudio de la estabilidad transitoria utilizando Matlab", Tesis de Maestría, CIPEL, Cuba, 2001.
2. **Boza Valerino, J. y Antonio González M.:** "Elevación de la seguridad del servicio de un sistema eléctrico en condiciones de avería". *Revista Ingeniería Energética*, Vol. XIV, Cuba, 1993.
3. **González Cueto, J.:** Resumen de la Tesis "Aplicación y desarrollo de métodos para el análisis de redes eléctricas de potencia", Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Cuba, 2000.
4. **Boza Valerino. Juan:** "Elevación de la estabilidad dinámica del SEN", Tesis de Doctorado, CIE. Cuba, 1982.
5. **Boza Valerino, Juan. y J. González Cueto:** "Transient Stability Program", Tesis de Maestría, CIE-UCLV, Cuba, 1973.

AUTOR

Juan G. Boza Valerino

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: jboza@electrica.cujae.edu.cu

ANEXO 1

Tabla 1
Características de los programas desarrollados en el país para el cálculo de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia

Elemento	Programas			
	Estadin	Dinámico	Mustang	PSX
Generador	Ejes d-q (un modelo)	Ejes d-q (un modelo), saturación, amortiguamiento y procesos electromagnéticos	Ejes d-q (un modelo) amortiguamiento y procesos electromagnéticos	Ejes d-q (4 modelos de generadores)
Sistema de excitación	No	1 modelo simple	6 modelos	4 modelos: CD (2), AC y ST
Regulador de velocidad de la turbina	No	1 modelo simple	1 modelo	6 modelos (4 para turbinas de vapor y 2 para hidráulicas)
Líneas y transformadores	Equivalente	Equivalente	Equivalente	Equivalente
Carga	Admitancia	Admitancia Motor de inducción	Carga compleja. Característica estática. Motor asincrónico. Compensador sincrónico	Se representa como función del voltaje y la frecuencia
Automática contra averías	No	Si	Si	Si
Método numérico	Runge Kutta 4º orden	Método Trapezoidal	Método de Adams de III y IV orden	Método Trapezoidal
Lenguaje de Programación	Fortran IV-Basic	Fortran 77	Fortran	C++ - Borland Delphi
Año	CIE- 1975	Despacho de Cargas- 1976	Riga- URSS 1985	CEE- UCLV- 1998