

**Reporte de Investigación
2007-03**

Modelación del Rotor de Turbinas de Viento en Simulación de Sistemas de Potencia: Parte II

**Responsables: Francisco M. González-Longatt
Supervisor: Francisco M. González-Longatt**



Línea de Investigación:
**Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida**



07-Ene-2006

Diferentes Tipos de Simulación y Requerimientos de Precisión

Como es conocido, las simulaciones computarizadas pueden ser empleadas para investigar fenómenos muy diferentes. De tal modo, los requerimientos concernientes al programa de simulación, el nivel de detalle necesario en los modelos, y los datos del modelo; pueden diferir substancialmente de que este siendo investigado. Dependiendo el objetivo de simulación, hay un gran número de diferente software o programas disponibles que son cada uno especialmente diseñado para tipos diferentes de investigación.

En lo sucesivo, el propósito de los diferentes tipos de simulación es discutido y para cada tipo diferente de simulación el nivel requerido de precisión de varias partes del modelo de la turbina de viento es brevemente evaluado. También se mencionará los programas típicos usados para esas simulaciones.

Se quiere expresar que los programas mencionados aquí son aquellos programas que son familiares de los autores, durante el trabajo. No significa que en ninguna manera que otros programas no mencionados aquí sean de valor inferior.

Transitorios Electromagnéticos

Los transitorios electromagnéticos son simulados programas especiales de transitorios electromagnéticos (EMTP) tal como el *Alternative Transient Program* (ATP), el DCG/EPRI EMTP, EMTDC, y Simpow. Esos programas incluyen una representación exacta de todos los componentes eléctricos, frecuentemente con la posibilidad de incluir una compleja representación de la saturación, propagación de ondas y arcos de cortocircuito, por ejemplo. Las simulaciones en general, son efectuadas en el dominio del tiempo, y la salida inmediata de la simulación son los valores instantáneos de voltajes, corrientes y cantidades derivadas de ellas.

Las simulaciones en EMTP son usadas para determinar corrientes de fallas de todos los tipos de fallas, tanto simétricas como asimétricas. Sobre-voltajes en conexión con transitorios de suicheo o conmutación, descargas atmosféricas así como ferro resonancia en grandes redes, por ejemplo, pueden ser también determinados, lo cual es útil para la coordinación de asilamiento. Las funciones exactas de electrónica de potencia (enlaces HVDC, SVC, STATCOMs y VSC) también pueden ser simulados con el uso de tales programas.

En general el nivel de detalle en los programas EMTP requieren de un modelo razonable de la turbina de viento en tales programas para incluir los componentes eléctricos significativos (tal como generador, electrónica de potencia posible (incluyendo controles básicos), posibles descargadores de sobre voltajes y posibles SVC). Otras partes, de la construcción pueden ser despreciadas o consideradas que son constante. Esto puede ser por ejemplo, el viento entrante, la potencia mecánica entrante y partes secundarias del sistema de control en algunos casos, el sistema mecánico de eje.

Estabilidad Dinámica y Simulaciones de Estabilidad Dinámica

La estabilidad transitoria y de voltaje son normalmente evaluado con el uso de programas especiales para la estabilidad transitoria (TSP –*transient stability program*), tal como el PSS/E (*Power System Simulator for Engineers*), Simpow, CYMSTAB, PowerFactory, y Netomac. En general esos programas posee una representación de forma de fasor para todos los componentes eléctricos. En algunos TSP, solamente es representada la secuencia positiva, mientras que otros TSP también incluyen una representación de secuencias negativas y cero. Las simulaciones son, en general efectuadas en el dominio del tiempo y la salida inmediata de la simulación son los valores de raíz media cuadrática (rms) de voltajes corrientes, y cantidades derivadas de ellas.

Las simulaciones de TSP son usadas para evaluar la estabilidad dinámica de grandes redes. El termino estabilidad dinámica y estabilidad transitoria son frecuentemente empleados indistintamente del mismo

aspecto del fenómeno de estabilidad del sistema de potencia. La definición conceptual de estabilidad transitoria es efectuada en Kundur (1994, paginas 17-27), además de otros, y asociada con la habilidad del sistema de potencia de mantener sincronismo cuando es sujeto a una severa perturbación transitoria. El termino estabilidad de voltaje es también de acuerdo con la definición de Kundur (1994, pag 27) y otros, como la habilidad del sistema de potencia de mantener voltajes estacionarios aceptables en todas las barras en el sistema bajo condiciones de operación normal y luego de ser sujeto a una perturbación. Ninguno de estos términos de estabilidad debe ser confundido con el fenómeno transitorio electromagnético real tal como descargas atmosféricas y transitorias de maniobra. Tales transitorios son caracterizados por una significativamente mas baja constantes de tiempo (microsegundos) y consecuentemente, simulaciones EMTP deben ser usadas para analizarse se fenómeno (sección 24.6.1). De tal modo, el termino análisis dinámico y análisis de estabilidad dinámica son comúnmente asociados con la habilidad del sistema de potencia de mantener tanto la estabilidad transitorio y estabilidad de voltaje. Brunttm, Hagsager y Knudsen (1999) y Noroozian, Knudsen y Bruntt (2000) junto con otros, dan ejemplos de investigaciones de la estabilidad dinámica con generación eólica.

El nivel general de detalle de tales programas requiere un modelo de turbina de viento razonable en tales programas, para incluir a los principales componentes: que es el generador, la electrónica de potencia posible (incluyendo controles básicos), posible compensación estática de reactivos, principales sistemas de control y protección, que pueden ser logrados y entrar en operación durante eventos simulados, sistemas de ejes suaves, y la potencia mecánica entrante proveniente del rotor de la turbina. Solamente una muy pocas de otras partes (por ejemplo el viento entrante) pueden ser considerados constantes o despreciados. En el Capítulo 25 and Slootweg, Polinder y Kling (2002) dan ejemplos de modelos de turbinas de viento, que han sido implementados en TSP. Los ejemplos también incluyen los más significativos datos típicos para el sistema de generación y el rotor de la turbina.

Como se muestra en la Sección 24.3.2 la potencia mecánica entrada desde el rotor de la turbina puede ser representado en muy diferentes formas, con representaciones de mas o menos detalladas. Sin embargo, una representación a potencia constante no es adecuada si el modelo debe ser capaz de representar una representativa reducción de potencia o acciones similares resultantes de la adherencia a el código de operación de la red, por ejemplo. Sin embargo se mantiene el hecho de cuando una mas simple o una aproximación estadística precisa de C_p es suficiente o cuando el modelo exacto aerodinámico con la representación de la transición aerodinámica es requerido. Estrictamente hablando, los efectos demostrados en la verificación del modelo aerodinámico del rotor en la Sección 27.2.3 muestran que solamente la representación mas exacta no incluye un pulso SHORT-LASTING torque. Sin embargo, es conocido que cuando este pulso de torque puede significativamente alterar el resultado final de algunos estudios de estabilidad completos o cuando este puede ser despreciado sin significativas consecuencia en los resultados finales.

Estabilidad de Pequeña Señal

La estabilidad de pequeña señal esta asociado con la habilidad de un sistema –usualmente un grande, tal como un sistema de potencia ac interconectado- para retornar a un punto estable de operación luego de una pequeña perturbación. En un ejemplo académico de análisis de estabilidad de pequeña señal, los autovalores del sistema, los cuales usualmente son complejos, y los correspondientes auto-vectores son calculados. Sin embargo, debido a que un gran sistema puede fácilmente incluir cientos e incluso miles de variables de estado –no se menciona el mismo numero exacto de autovectores de exactamente la misma dimensión- y no hay un medio adecuado de hacer esto con un simple trabajo con precisión adecuada.

Algunos programas de estabilidad de pequeña señal incluyen muy naturalmente los datos necesarios de para el sistema físico y sus sistemas de control relevantes, y poseen modelos ya construidos para efectuar el análisis de autovalores. Ejemplo de tales modelos son PSS/E con el modulo LSYSAN (*Linear System Analisis*) y Simpow. Esos dos programas, son comparados en Person et al. (2003). También se asume que otros programas de estabilidad dinámica incluirán módulos similares de análisis de sistemas lineales. Para referencias adicionales, ver por ejemplo, Paserba (1999), la cual da una vista general de un numero de paquetes computacionales de análisis de sistemas lineales. Hay también programas especiales para el análisis de autovalores, tales como AESOPS y PacDyn. Bachmann Erlich y Grabe (1999) proveen un

ejemplo de análisis de autovalores en el sistema de UCTE (Union pour Coordination du Transport d'Electricite) con el uso de un programa computacional especializado en autovalores.

Si es conveniente, existe también la posibilidad de efectuar el análisis de estabilidad de pequeña señal de manera indirecta por el uso de un programa de estabilidad dinámica en el dominio del tiempo. Aplicando una pequeña perturbación en la mayoría de los casos excita las auto-oscilaciones predominantes en el sistema, y las auto-oscilaciones puede entonces ser visible en muchas variables de salida tales como voltajes, corrientes, velocidad del rotor, y otras más. Un post-procesamiento, donde la frecuencia y el amortiguamiento de los variados modos de oscilación en una seleccionada sección de la curvas de salida post-perturbación son calculadas, dando un buen indicador de los autovalores que fueron excitados durante la perturbación. Esta es una forma fácil de obtener una idea inicial de un sistema o para confirmar los resultados obtenidos a través de un análisis de autovalores. Esto es llevado a cabo en Bachmann Erlich y Grebe (1999).

Hasta ahora, las turbinas de viento no han sido tomadas en cuenta en conexión con investigaciones de estabilidad de pequeña señal, debido a la naturaleza de la producción de energía del viento la cual ha sido tradicionalmente dispersa en los sistemas de potencia, debido al tamaño de las turbinas de viento individuales, lo cuales son del orden de magnitud más pequeña que las plantas de generación centralizadas e incluso de orden de magnitud mucho más pequeñas que los sistemas de potencia interconectados. Sin embargo el tamaño de turbinas de viento individuales y granjas de viento enteras en tierra firme además de la bahía a fuera *-offshore*, resultan en una más alta penetración de la energía eólica. Además, la controlabilidad de las modernas turbinas de viento esta siendo esta siendo mejorada. Esta característica esta haciendo incrementar de sobre manera la importancia de establecer códigos de conexión a la red. De tal modo, la energía eólica esta creciendo en importancia incluyendo en las investigaciones de estabilidad de pequeña señal.

El nivel general de detalle en los programas de estabilidad de pequeña señal, requieren un modelo de turbina de viento razonable en tales programas para incluir los componentes que pueden contribuir a y tener un impacto en las auto-oscilaciones del sistema (asi como representaciones linealizadas del sistema de eje, el sistema de control, el generador y posiblemente electrónica de potencia). Otras partes de la construcción pueden ser despreciada o consideradas constantes, tales como, el viento que entra, y todas las acciones discretas efectuadas por los sistemas de control y protecciones.

Modelado Aerodinámico y Dimensionamiento Mecánico

El diseño de una turbina de viento involucra muchas decisiones que toman en cuenta la construcción mecánica y el diseño aerodinámico. En este proceso, la turbina de viento en si misma esta en el centro de la investigación. La fortaleza y la forma de las palas, las dimensiones de los ejes y la caja convertidora, la fortaleza de la torre e incluso las fundaciones de la torre –especialmente para instalaciones fuera de bahía– han de ser consideradas muy cuidadosamente cuando se diseña la turbina de viento. Como *nosotros* típicamente no trabajamos en esos aspectos del desarrollo de la turbina de viento, las siguientes líneas son solamente algunas aspectos generales.

Hay muchos elementos CAD como herramientas de simulación que pueden manejar la construcción mecánica, y por otra parte, otras herramientas pueden tratar el objetivo de las propiedades aerodinámicas. Sin embargo, en la fase de diseño de una turbina de viento, las propiedades mecánicas y aerodinámicas deben ser consideradas como un todo. Consecuentemente, hay la necesidad de herramientas de simulación especializadas que puedan cumplir con ambos aspectos al mismo tiempo. Una de tales herramientas es el FLEX4, el cual puede representar la deflexión de las palas, también como el par torcional en el sistema del eje y en la torre. Una nueva versión, FLEX5 puede también lidiar con las deflexiones de la torre y las fundaciones.

Un modelo de turbina de viento razonable en tales programas ha de incluir los principales componentes mecánicos y aerodinámicos de las turbina de viento (es decir, palas, sistema de servos para el cambio de ángulo –si los cambios de ángulo están siendo evaluados, el sistema de ejes –incluyendo la caja convertidora, el generador –como mínima representación debe ser incluido el torque desacelerante, la torre

y en algunos casos hasta la fundaciones). También, el disco de freno de emergencia puede ser incluido si el impacto mecánico de una parada de emergencia de la turbina es lo que se desea evaluar. Finalmente, los factores externos más significativos que influyen a una turbina de viento es el viento en sí mismo, este debe ser representado de una manera realista tal como por medio de series de vientos medidas, preferiblemente con frecuencia ráfagas de viento.

Hasta ahora, el sistema de potencia ac externo, y en muchos casos el generador en sí mismo, tradicionalmente no son representados muy precisamente, debido al hecho de que las propiedades mecánicas y aerodinámicas han sido mucho más decisivas en el diseño. Para turbinas de viento tradicionales de velocidad fija con generadores de inducción ha sido aceptable la aproximación de representar el generador y, consecuentemente el sistema externo de potencia ac, por medio de un torque del entrehierro del generador dependiente de la velocidad. Sin embargo, como la controlabilidad de las turbinas de viento de velocidad variable, y las selecciones disponibles de estrategias de control (control de potencia o de velocidad, ver la sección 24.4.5.2) la opción de seleccionar estrategia de control ha de ser tomada en consideración también.

Investigación de Flickers

Aspectos relacionados a la calidad de servicio están más allá de las consideraciones de este documento, y no son mostrados. Se recomienda que se consulte el texto de Thomas Ackermann [1].

Cálculos de Flujo de Potencia y Cortocircuito

Los cálculos de flujo de potencia (LF) requieren el conocimiento de las propiedades eléctricas básicas del sistema de potencia, tales como impedancias de líneas, transformadores, datos de transformadores con cambiadores de tomas, además de datos operacionales del sistema de potencia, tales como la localización y tamaño de los consumos y producción de potencia momentáneos, ajustes de voltaje (o potencia reactiva) de los dispositivos de control del voltaje, y capacidad nominal de los transformadores. Los cálculos de cortocircuito (SC) requieren básicamente la misma información pero también incluye las impedancias de los generadores. Todos esos datos son comparativamente simples de obtener. Sin embargo, la cantidad de datos requeridos en redes bastante grandes puede ser considerable.

Los cálculos de LF y SC son usualmente efectuados con el uso de programas especiales, que son personalizados para el trabajo. Hay un gran número de programas disponibles para ese propósito (por ejemplo REPLAN, Integral, PSS/ETM, SimpowTM, PowerFactory y CYMFLOW y CYMFAULT, por mencionar al menos unos pocos). Los cálculos LF y SC asume un régimen estacionario (es decir, todas las derivadas son consideradas cero). Los cálculos de LF son usados para calcular los voltajes en todos los nodos y el flujo de potencia activa y reactiva en las líneas entre los nodos del sistema de potencia en varios puntos de operación. Los cálculos de SC son usados para calcular el nivel de corrientes de falla en el caso de un cortocircuito en cualquier parte del sistema.

En el caso de los cálculos de LF, es necesario solamente representar las entradas de potencia activa y reactiva, P y Q . Las turbinas de viento con generadores de inducción (Tipo A) deben ser representado con una máquina de inducción, con la potencia activa P ajustada para el valor momentáneo. Basado en la impedancia de la máquina, el programa de LF entonces calculará el consumo de potencia reactiva Q correspondiente al voltaje en terminales. (Unos muy pocos programas de LF no tienen incluido dentro el modelo del generador de inducción, en cuyo caso es necesario aplicar una representación PQ con el valor de Q ajustado a un valor apropiado. Un macro definido por el usuario puede ser muy conveniente para ello, si tal opción esta disponible en el programa). Las turbinas de viento de velocidad variable, sin embargo posee controlabilidad de la potencia reactiva. De tal modo, la más adecuada la representación es una representación PQ fija o, si la turbina de viento es ajustada para controlar voltaje, una representación PV.

En el caso de cálculos SC, la representación necesaria de la turbina de viento, dependerá de la tecnología de generación específica aplicada. En general, la representación de SC debe incluir las partes que proveerán soporte a la corriente de cortocircuito, si existe un cortocircuito en cualquier sitio en la

vecindad de la turbina de viento. Para turbinas de viento a velocidad fija con generadores de inducción (Tipo A y B) la maquina en si misma es una adecuada representación. Para turbinas de viento a velocidad variable con generadores de inducción doblemente alimentado (Tipo C) la maquina en si misma debe ser representada, mientras que las más pequeñas convertidores parciales frecuentemente deben ser despreciadas. Para turbinas de viento con convertidores (Tipo D) el generador esta desacoplado de la red ac, y solamente el convertidor esta directamente conectado a la red, la apropiada representación de SC debe ser un convertidor adecuado en tipo y capacidad.

BORRADOR

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

Referencias Documentales

- [1] Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Jhon Wiley & Sons, Ltd. England, 2005.
- [2] Aagaard Madsen. II. (1991) '*Aerodynamics and Structural Dynamics of a Horizontal Axis Wind Turbine: Raw Data Overview*', Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- [3] Akhmatov, V. (1999) '*Development of Dynamic Wind Turbine Models in Electric Power Supply*', MSc thesis, Department of Electric Power Engineering, Technical University of Denmark. [in Danish].
- [4] Akhmatov. V. (2002) 'Variable Speed Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generators, Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools', *Wind Engineering* 26(2) 85-107.
- [5] Akhmatov. V. (2003) '*Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power*', PhD thesis, Electric Power Engineering. Orsted-DTU, Technical University of Denmark, Denmark.
- [6] Akhmatov, V., Knudsen, II. (1999a) 'Dynamic modelling of windmills', conference paper. *IPST'99 International Power System Transients*, Budapest, Hungary.
- [7] Akhmatov, V., Knudsen, H. (1999b) 'Modelling of Windmill Induction Generators in Dynamic Simulation Programs', conference paper BPT99-243. *IEEE Budapest Power Tech '99*, Budapest, Hungary.
- [8] Bachmann. U., Erlich. I., Grebe, E. (1999) 'Analysis of Interarea Oscillations in the European Electric Power System in Synchronous Parallel Operation with the Central-European Networks', conference paper BPT99-070, *IEEE. Budapest Power Tech '99*, Budapest, Hungary.
- [9] Bruntt. M., Haysager, J., Knudsen, H. (1999) 'Incorporation of Wind Power in the East Danish Power System', conference paper BPT99-202, *IEEE Budapest Power Tech '99*, Budapest, Hungary.
- [10] Christensen, T., Pedersen, J., Plougmand, L. B., Mogensen, S., Sterndorf, H. (2001) 'FLEX5 for Offshore Environments', paper PG 5.8, *EWEC European Wind Energy Conference 2001*. Copenhagen, Denmark.
- [11] Freris, L. (1990) *Wind Energy Conversion Systems*. Prentice Hall, New York.
- [12] Gasch. R., Twelc. J. (2002) *Wind Power Plants*, James & James, London, UK.
- [13] Hansen, M. O. L. (2000) *Aerodynamics of Wind Turbines: Rotors, Loads and Structure*, James & James, London. UK.
- [14] Heier, S. (1996) *Windkraftanlagen im Netzbetrieb*, 2nd edn, Teubner, Stuttgart, Germany.
- [15] Hinrichsen, E. N. (1984) 'Controls for Variable Pitch Wind Turbine Generators', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS- 103(4) 886—892.
- [16] IEC (International Electrotechnical Commission) (1996) 'EMC-Part 3: Limits — Section 7: Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power Systems — Basic EMC Publication. (Technical Report)'. (IEC 61000-3-7, IEC), Geneva, Switzerland.
- [17] IEC (International Electrotechnical Commission) (1997) 'EMC, Part 4: Testing and Measurement Techniques Section 15: Flickermeter — Functional and Design Specifications', IEC 61100-4-15, IEC, Geneva, Switzerland.
- [18] Johansen, J. (1999) 'Unsteady Airfoil Flows with Application to Aeroelastic Stability', Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- [19] Knudsen, II., Akhmatov, V. (1999) 'Induction Generator Models in Dynamic Simulation Tools', conference paper. *IPST'99, International Power System Transients*, Budapest, Hungary.
- [20] Kundur, P. (1967) '*Digital Simulation and Analysis of Power System Dynamic Performance*'. PhD thesis. Department of Electrical Engineering, University of Toronto. Canada.
- [21] Kundur, P. (1994) *Power System Stability and Control*, EPRI, McGraw-Hill, New York.
- [22] Noroozian, M., Knudsen, II., Bruntt, M. (2000) 'Improving a Wind Farm Performance by Reactive Power Compensation', in *Proceedings of the IAST&D International Conference on Power and Energy Systems*. September 2000, Marbella, Spain, pp. 437-443.
- [23] Ortye, S. (1986) 'Unsteady Wake Effects Caused by Pitch-angle Changes', IEA R&D WECS Joint Action on Aerodynamics of Wind Turbines, 1st symposium, London, UK, pp. 58-79.
- [24] Paserba, J. (1996) '*Analysis and Control of Power System Oscillations*', technical brochure, July 1996, Ogre, Paris, France.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.

- [25] Persson, J., Sloomweg, J. G., Rouco, L., Slied, L., Kling, W. L. (2003) 'A Comparison of Eigenvalues Obtained with Two Dynamic Simulation Software Packages', conference paper I3PT03-254, *IEEE Bologna Power Tech*, Bologna, Italy, 23-26 June 2003.
- [26] Sloomweg J. G., Polinder H., Kling W. L. (2002) 'Reduced Order Models of Actual Wind Turbine Concepts', presented at IEEE Young Researchers Symposium. 7-8 February 2002. Leuven, Belgium.
- [27] Snel, H., Lindenburg, C. (1990) 'Aeroelastic Rotor System Code for Horizontal Axis Wind Turbines: Phatas II', European Community Wind Energy Conference. Madrid, Spain, pp. 284-290.
- [28] Snel, H., Schepers, J. G. (1995) 'Joint Investigation of Dynamic Inflow Effects and Implementation of an Engineering Method'. Netherlands Energy Research Foundation. ECN, Petten, The Netherlands.
- [29] Sorensen, J. N., Kock, C. W. (1995) 'A Model for Unsteady Rotor Aerodynamics', *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 58, 259-275.
- [30] Walker, J. F., Jenkins, N. (1997) *Wind Energy Technology*. John Wiley & Sons Ltd. London, UK.

BORRADOR

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores.