

ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS DE LA

CALIDAD DE LA ENERGÍA EN AEROGENERADORES DE GRAN POTENCIA

Emmanuel Hernández Mayoral¹

¹Universidad del Istmo -
Tehuantepec
Av. Universitaria Bo.
Santa Cruz s/n
Santo Domingo, Tehuantepec,
Oaxaca, México, C.P. 60670



emanuel.mayoral7@gmail.com

Recibido: **Noviembre 15, 2016.**

Recibido en forma revisada: **Noviembre 28, 2016.**

Aceptado: **Enero 12, 2017.**

Resumen: El funcionamiento de los aerogeneradores tiene un impacto en la calidad de la energía conectada a la red eléctrica. Dependiendo de la configuración de la red eléctrica y del tipo de aerogenerador a implementar, pueden surgir diferentes problemas de calidad de energía. Estos aerogeneradores tienen una producción de energía dependiendo de las variaciones naturales en la velocidad del viento. Si el aerogenerador opera a velocidad fija, los gradientes de la sombra de torre y de la velocidad del viento resultarán en una potencia fluctuante causando perturbaciones de voltaje (flickers). En el caso de aerogeneradores de velocidad variable, la inyección de corrientes armónicas en la red eléctrica resulta ser un gran inconveniente. Dependiendo del tipo de inversor utilizado, se producen diferentes órdenes de armónicas. Por esta razón es importante conocer los principales problemas de la calidad de la energía cuando el aerogenerador se conecta a la red eléctrica.

+ Palabras claves.- Calidad de la energía, aerogenerador, variación de frecuencia.

Abstract: The operation of wind turbines has an impact on the power quality when they connect to the electrical network being the configuration of the network and the type of wind turbine used who determinate the power quality problems may arise. For this is considered very important to know the natural variations of the wind. The wind turbine, for the operation velocity is divided in: Fixed-speed and variable-speed: If the wind turbine is operating at fixed-speed, the tower shadow and wind speed gradients will result in fluctuating power. The power fluctuations caused by the turbine may cause flicker disturbances. In order to evaluate the significance of flicker, measurements and subsequent flicker calculations must be performed. In the case of variable-speed wind turbines, one drawback is the injection of harmonic currents into the electrical network. Depending on the type of inverter used, different orders of harmonics are produced. For this reason it is important to know the main problems of power quality presented in wind turbines connected to the network electrical.

+ *Keywords: power quality, wind turbines, frequency variations.*

Introducción

La energía eléctrica representa el principal insumo que mueve al mundo industrial, por eso es vital saber administrarla ya que cerca del 55% de la energía eléctrica producida en México es consumida por los sectores comercial e industrial. Por lo tanto el buen uso de la energía eléctrica permite una economía que tiende a la globalización, así el ahorro de energía es una alternativa viable para reducir costos de operación y mejorar los niveles de competitividad dentro del mundo industrial.

La calidad de la energía puede definirse como la ausencia de interrupciones, sobre-voltajes y deformaciones producidas por armónicas en la red eléctrica y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. El papel de las redes de distribución se limita principalmente a la interconexión entre sistemas eólicos de generación y transmisión por un lado y centros de carga por el otro. La integración de la energía eólica en las redes de distribución las transformará de pasivas a redes activas. Varios trabajos publicados están relacionados con este tema; Larsson, Demoulias y Dokopoulos, (1996) han demostrado que los generadores embebidos en las redes de distribución pueden afectar el funcionamiento en dichas redes eléctricas de varias maneras como pueden ser: nuevas prácticas de protección para proporcionar protección a la red contra condiciones anormales, afectar las pérdidas de las redes de distribución, problemas de estabilidad y problemas de calidad de energía.

La calidad de potencia se refiere a factores que describen la variabilidad del nivel de voltaje, así como la distorsión de las formas de onda de voltaje y corriente. Los diferentes parámetros de calidad de la energía se dividen en diferentes categorías, según la escala de tiempo de los fenómenos examinados. Este documento da una clara explicación a los fenómenos de la calidad de la energía eléctrica de acuerdo a las normas internacionales, y así llegar a un estudio más profundo de los fenómenos electromagnéticos de la calidad de la energía eléctrica. Se ha publicado un gran número de trabajos relacionados con la calidad de la energía. Freris (1990) da una introducción histórica breve de la calidad de la energía. Cuando se trata de la calidad de la energía de los generadores embebidos, en general, y de los aerogeneradores, en particular, sólo son relevantes algunos problemas específicos de calidad de la energía. Trabajos publicados que abarcan este campo son: La mejora de la calidad

de la energía de los parques eólicos (Johnson, 1985), la mejora de la calidad de la energía de los parques eólicos mediante la utilización de compensadores estáticos avanzados (Gardner, 1993) y la calidad de la energía y la conexión a la red eléctrica de los aerogeneradores (Gerdes y Santjer, 1994). La potencia de los aerogeneradores puede subdividirse en diferentes fenómenos. Algunos trabajos publicados que tratan de diferentes fenómenos de calidad de energía son; Cálculos de flujo de carga (Larsson y Thiringer, 1995), flickers (Larsson, Carlson, Sidén, 1995), análisis armónico (Thorborg, 1988), protección contra descargas atmosféricas y sobrevoltajes (Jenkins, 1996). También se ha publicado un trabajo sobre las normas internacionales para la calidad de la energía de los aerogeneradores (Jorgensen, Christensen, Tande, Vikkels y Norgård, 1996) y los sistemas de medición de la calidad de la energía de los aerogeneradores (VDEW Publication, 1994).

Existencia de la calidad de la energía en aerogeneradores

Los aerogeneradores conectados a la red eléctrica afectan a la calidad de la energía dependiendo de la interacción entre la red eléctrica y el aerogenerador. La frecuencia de los sistemas de gran potencia es normalmente muy estable y por lo tanto no hay problema. En las redes autónomas donde, por ejemplo, se utilizan motores diesel, un aerogenerador no causará muchas interrupciones en una red de alto voltaje. Por lo tanto, las interrupciones no serán consideradas en este escrito. Al final cualquier desviación de voltaje, corriente o frecuencia que provoque la mala operación de los equipos de uso final y deteriore la economía o el bienestar de los usuarios debe erradicarse. Los efectos asociados a problemas de calidad de la energía en aerogeneradores de gran potencia son: incremento en las pérdidas de energía, daños a la producción, a la economía y la competitividad empresarial e incremento del costo, deterioro de la confiabilidad, de la disponibilidad y del confort.

Aspectos de la calidad de la energía en aerogeneradores

Transitorios

Es un cambio súbito y unidireccional en la condición de estado estable del voltaje, la corriente o ambos y de frecuencia diferente a la frecuencia del sistema de potencia. Son de moderada y elevada magnitud pero de corta duración (orden de los microsegundos). Normalmente están caracterizados por sus tiempos de ascenso (1 a 10 μ sec) y descenso (20 a 150 μ sec) y por su contenido espectral. En la Tabla 1 se muestra la clasificación de diferentes fenómenos electromagnéticos de la calidad de la energía. Los transitorios se presentan principalmente al arrancar y detener los aerogeneradores de velocidad fija (Demoulias y Dokopoulos, 1996). Los aerogeneradores se encuentran conectados a la red eléctrica cuando la velocidad del viento supera los 3 - 4 m/s. Durante la secuencia de conexión, la velocidad del aerogenerador se eleva hasta que la velocidad del generador es cercana a la velocidad sincrónica. El generador se conecta entonces a la red eléctrica. Para evitar una gran corriente de arranque, se utiliza un arrancador suave para limitar la corriente durante la secuencia de arranque. Cuando los bancos de capacitores están conectados, se produce un pico de corriente grande. Este transitorio a veces alcanza un valor del doble de la corriente nominal del aerogenerador.

Categorías	Contenido espectral	Duración	Magnitud de voltaje
TRANSITORIOS			
<u>IMPULSIVOS</u>			
Nanosegundos	5 ns o más	< 50 ns	
Microsegundos	1 μs o más	50 ns – 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms o más	> 1 ms	
<u>OSCILATORIOS</u>			
Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
Media frecuencia	5 – 500 kHz	20 μs	0 – 8 pu
Alta frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μs	0 – 4 pu
VARIACIÓN DE CORTA DURACIÓN			
<u>INSTANTÁNEAS</u>			
Sag (Valles)		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
Swell (Crestas)		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
<u>MOMENTÁNEAS</u>			
Interrupciones		0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
Sag (Valles)		30 ciclos – 3 s	0.1 – 0.9 pu
Swell (Crestas)		30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu
<u>TEMPORALES</u>			
Interrupciones		3 s – 1 min	< 0.1 pu
Sag (Valles)		3 s – 1 min	0.1 – 0.9 pu
Swell (Crestas)		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
Interrupciones sostenidas		> 1 min	0.0 pu
Bajo voltaje		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
Sobrevoltajes		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
Desbalance de voltaje		Estado estable	0.5 – 2%
VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
Interrupciones sostenidas		> 1 min	0.0 pu
Bajo voltaje		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
Sobrevoltajes		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
Desbalance de voltaje		Estado estable	0.5 – 2%
DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA			
Desplazamiento de C.D.		Estado estable	0 – 0.1 %
Armónicas	0 – 100th H	Estado estable	0 – 20%
Inter-armónicas	0 – 6 kHz	Estado estable	0 – 2%
Hendiduras		Estado estable	
Ruidos	Banda – ancha	Estado estable	0 – 1%
FLUCTUACIONES			
	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
VARIACIONES DE FRECUENCIA			
		< 10 s	

Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995.

Tabla 1. Clasificación de los fenómenos electromagnéticos de la calidad de energía.

Depresiones de Voltaje (Sags o Dips)

Un Sag de voltaje, o Dip de tensión, es una reducción en el voltaje de excitación con una duración de entre un ciclo y unos segundos. Estas depresiones de voltaje son normalmente asociadas a fallas del sistema, a la energización de grandes cargas, al arranque de motores de elevada potencia y a la energización de transformadores de potencia (Bollen, 1996). Aunque debidamente equipados con arrancadores suaves, los aerogeneradores no causan caídas de voltaje. De acuerdo con la norma sueca SS 421 18 11, la caída de voltaje durante la secuencia de puesta en marcha de los motores debe limitarse al 5%. Los efectos nocivos de las depresiones de voltaje dependen de su duración y de su profundidad. También presenta efectos sobre la velocidad de los motores. Existen diferentes estrategias para mitigar los efectos de estos problemas. En la Figura 1 se muestra la forma de onda característica de un sag de voltaje.

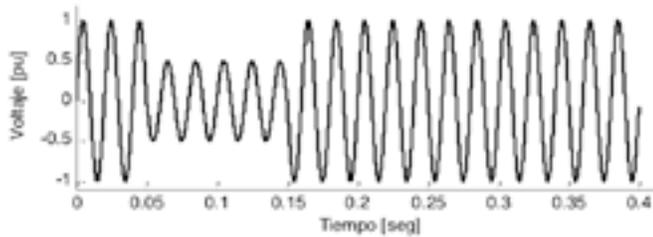


Figura 1. Sags de voltaje.

Crestas de voltaje (Swells)

Una cresta (Swell) se define como un incremento del valor rms de entre 1,1 y 1,8 p.u. con una duración desde 0,5 ciclos a un minuto del voltaje o la corriente. Como en el caso de las depresiones, las crestas son asociadas a fallas en el sistema aunque no son tan comunes como las depresiones. Un caso típico es la elevación temporal del voltaje en las fases durante una falla línea a tierra. También pueden ser causadas por la desconexión de grandes cargas o la energización de grandes bancos de capacitores. En la Figura 2 se muestra la forma de onda característica de un Swell de voltaje.

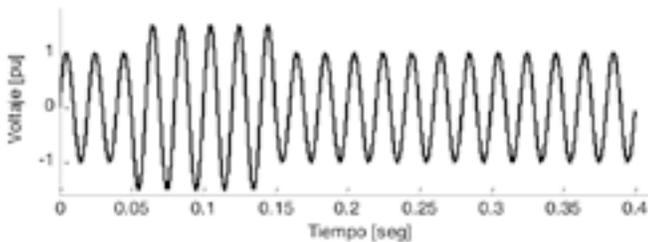


Figura 2. Swell de voltaje.

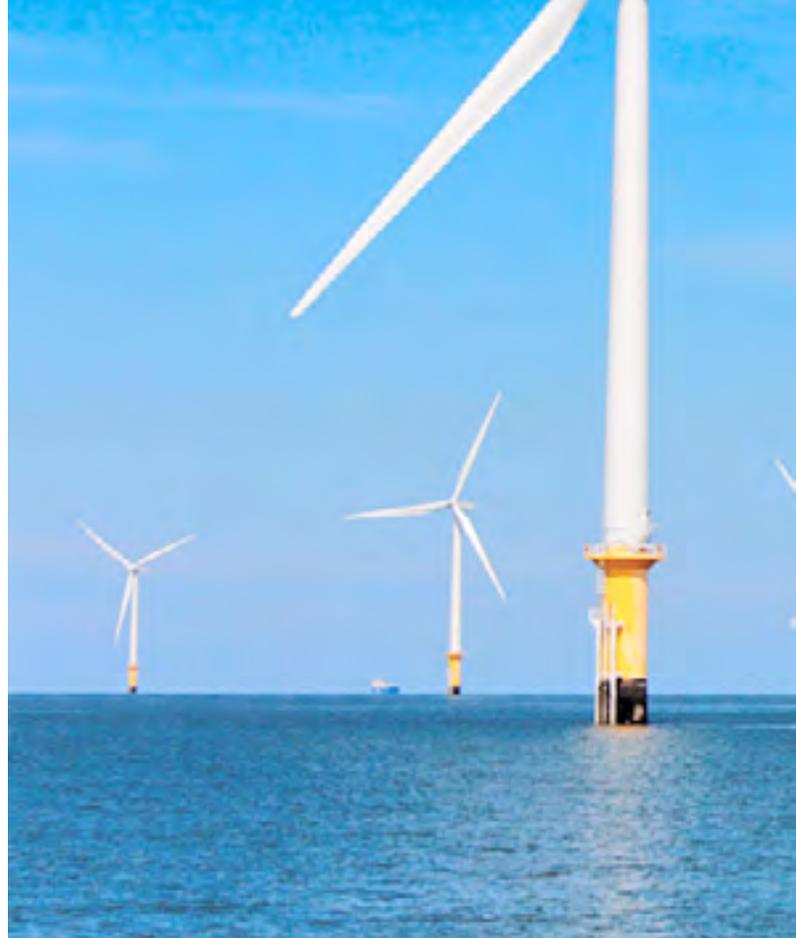


Variaciones de voltaje de larga duración

Son aquellas desviaciones del valor rms del voltaje que ocurren con una duración superior a un minuto. La norma ANSI C84.1 especifica las tolerancias en el voltaje de estado estable en un sistema de potencia. Una variación de voltaje se considera de larga duración cuando excede el límite de la ANSI por más de un minuto. Debe prestarse atención a los valores fuera de estos rangos.

Sobrevoltaje

Es el incremento del voltaje a un nivel superior al 110% del valor nominal por una duración mayor de un minuto. Los sobrevoltajes son usualmente el resultado de la desconexión de grandes cargas en los aerogeneradores o debido a la conexión de bancos de capacitores. Generalmente se observa cuando el sistema es muy débil para mantener la regulación del voltaje o cuando el control del voltaje es inadecuado. La incorrecta selección del tap en los transformadores puede también ocasionar sobrevoltajes en el sistema.



Distorsión de la forma de onda

La distorsión de la forma de onda es una desviación estable del comportamiento idealmente senoidal del voltaje o la corriente a la frecuencia fundamental del sistema de potencia. Se caracteriza, principalmente, por el contenido espectral de la desviación. Existen cinco formas primarias de distorsión de la forma de onda: corrimiento CD, armónicas, Inter-armónicas, ruido electromagnético. Se definirán solo las que se presentan más a menudo en los aerogeneradores de gran potencia.

Armónicas

Las armónicas son voltajes o corrientes senoidales cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental del sistema. Las formas de onda distorsionadas son descompuestas, de acuerdo con Fourier, en la suma de una componente fundamental más las componentes armónicas. La distorsión armónica se origina, fundamentalmente, por la característica no lineal de las cargas en los sistemas de potencia. El nivel de distorsión armónica se describe por el espectro total armónico mediante las magnitudes y el ángulo de fase de cada componente individual. Es común, además, utilizar un criterio denominado Distorsión Armónica Total (THD) como una medida de la distorsión. Dentro de los efectos nocivos que presentan las armónicas, se pueden citar los siguientes:

- + Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas, asociadas con las diferentes corrientes armónicas, causan vibraciones y ruido acústico en transformadores, reactores y máquinas rotativas.

- + Provocan la disminución del factor de potencia.

Valor Nominal	Rango Deseable	Rango Aceptable
120	126 – 114	127 – 110
208	218 – 197	220 – 191
240	252 – 228	254 – 220
480	504 – 456	508 – 440
2,400	2,525 – 2,340	2,540 – 2,280
4,160	4,370 – 4,050	4,400 – 3,950
4,800	5,040 – 4,680	5,080 – 4,560
13,800	14,490 – 13,460	14,520 – 13,110
34,500	36,230 – 33,640	36,510 – 32,780

Fuente: Norma ANSI C84.1.

Tabla 2. Tabla de rangos deseables y aceptables.

Subvoltaje

Es la reducción en el valor rms del voltaje a menos del 90% del valor nominal por una duración mayor de un minuto. La conexión de una carga o la desconexión de un banco de capacitores pueden causar un bajo voltaje hasta que los equipos de regulación actúen correctamente para restablecerlo. Los circuitos sobrecargados pueden producir bajo voltaje en las terminales de la carga. El sobrevoltaje y el subvoltaje generalmente no se deben a fallas en el aerogenerador sino que son causadas comúnmente por variaciones de la carga u operaciones de conexión y desconexión.

Desbalance de voltaje

El desbalance de voltaje en un sistema eléctrico ocurre cuando los voltajes entre las tres líneas no son iguales y puede ser definido como la desviación máxima respecto al valor promedio de los voltajes de línea, dividida entre el promedio del voltaje de línea, expresado en porcentaje. Las fuentes más comunes del este desbalanceo de voltaje son las cargas monofásicas conectadas en circuitos trifásicos, los transformadores conectados en delta abierto, fallas de aislamiento en conductores no detectadas, etc. Por norma se recomienda que el desbalance sea menor al 2%.



- + Están asociados con el calentamiento de capacitores.
- + Pueden provocar ferresonancia.
- + Provocan calentamiento debido al incremento de las pérdidas en transformadores y máquinas.
- + Al incrementarse la corriente debido a las armónicas, se aumentan el calentamiento y aumentan las pérdidas en los cables.
- + Las armónicas de voltaje pueden provocar disturbios en los sistemas electrónicos. Por ejemplo, afectan el normal desempeño de los tiristores.

La mitigación de los efectos nocivos de los armónicos puede llevarse a cabo mediante:

- + El monitoreo constante de los sistemas para detectar la presencia de armónicas indeseables.
- + La utilización de filtros para eliminar las armónicas indeseables.
- + El dimensionamiento los transformadores, máquinas y cables teniendo en cuenta la presencia de corrientes no senoidales (presencia de armónicas).

La distorsión armónica puede ser cuantificada por varios métodos diferentes. Uno de los métodos más comunes es la Distorsión Armónica Total (THD). Otro método para cuantificar las armónicas es la distor-

sión armónica individual. Por ejemplo, en las Normas IEC 1000-2-2 y CENELEC EN 50160 se indica el THD máximo y el valor máximo permitido de un componente individual. Hoy en día, las normas nacionales e internacionales no incluyen armónicos entre 2-10 kHz. Si se utilizan inversores forzados, las armónicas de orden inferior serán reemplazadas por armónicas de orden superior. Mediante el uso de PWM se eliminan las armónicas de baja frecuencia y la primera armónica tendrá una frecuencia alrededor de la frecuencia de conmutación (5 a 10 kHz).

Inter-armónicas

Se llaman inter-armónicas a los voltajes o corrientes con componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual trabaja el sistema. Las inter-armónicas se pueden encontrar en redes de todas las clases de voltajes. Las principales fuentes de inter-armónicas son los convertidores estáticos de frecuencia, los cicloconvertidores, los motores asincrónicos y los dispositivos de arco (Hernández y Madrigal, 2014). Efectos de calentamientos, similares a los producidos por las armónicas, son causados por las inter-armónicas.

Flickers

Las cargas que muestran variaciones rápidas y continuas de la magnitud de la corriente pueden causar variaciones de voltaje que son frecuentemente denominadas “flicker”. El término flicker se deriva del impacto de las fluctuaciones de voltaje en las lámparas al ser percibidas por el ojo humano como parpadeos. Una de las causas más comunes de las fluctuaciones de voltaje en los sistemas de transmisión y distribución son



los hornos de arco. La señal de flicker se define por su magnitud rms expresada como por ciento del voltaje nominal. Si se conoce la emisión de flicker de un aerogenerador, entonces la magnitud del flicker conectado a la red eléctrica podría calcularse siendo el propósito la medición del nivel de emisión de flicker del aerogenerador en condiciones de referencia en cualquier condición de la red y de la velocidad del viento.

Variaciones de frecuencia

La frecuencia está directamente relacionada con la velocidad de rotación de los generadores que componen el sistema. Normalmente existen ligeras variaciones de frecuencia debido a la fluctuación del balance entre la generación y la demanda de potencia de un sistema eólico. El Consejo de la Industria de Tecnología de la Información (ITIC) describe los valores tolerables y la duración de las variaciones de voltaje que pueden ocurrir sin dañar o interrumpir las funciones de operación del aerogenerador. Estos valores son aplicables a sistemas de 120 V a 60 Hz. Se definen tres regiones; la región prohibida, donde no es posible la explotación, la zona de operación sin interrupciones y la región donde no deben suceder daños permanentes a sus equipos ante variaciones de dicha magnitud.

Conclusión

Existen diferentes tipos de aerogeneradores disponibles en el mercado y se dividen en: velocidad fija y velocidad variable. Ambos grupos de aerogeneradores tienen ventajas y desventajas en cuanto a la interacción con la red y la calidad de la energía. Los diferentes fenómenos de calidad de la energía producidos por los aerogeneradores de velocidad fija y variable se resumen en la Tabla 3.

Problema de calidad de la energía	Velocidad fija	Velocidad variable	Comentarios
Variación de voltaje	X	X	Causado por una producción de energía desigual
Dips de voltaje	-	-	Equipado con arrancador suave
Flicker	X	-	Causado por el efecto "sombra de torre"
Armónicas	X	X	Causado por el inversor
Transitorios	X	X	Causado por la conexión de capacitores
Variación de frecuencia	X	X	Causado principalmente por redes autónomas

Tabla 3. Problemas de calidad de la energía causados por aerogeneradores de velocidad fija y velocidad variable.

Los aerogeneradores tienen una producción de energía desigual después de las variaciones naturales del viento siendo esta producción la misma para todo tipo de aerogeneradores. Si el aerogenerador está funcionando a velocidad fija, la sombra de la torre resultará en una potencia fluctuante. Tanto la producción de energía como la fluctuación de la energía causan variaciones de voltaje. Los cálculos de flujo de carga pueden usarse para calcular las variaciones lentas en el voltaje causado por la producción de energía de los aerogeneradores. Las fluctuaciones de energía causadas por la sombra de la torre pueden también causar perturbaciones de flicker. Para calcular el impacto en el flicker, se debe conocer la magnitud de las caídas de voltaje o la emisión de flicker del aerogenerador. Con respecto a los aerogeneradores de velocidad fija, éstos no producen armónicas pero cuando se trata de aerogeneradores de velocidad variable, la situación es lo contrario. Dependiendo del tipo de inversor utilizado, se producen diferentes órdenes de armónicas. Los transitorios parecen ocurrir principalmente cuando los aerogeneradores son arrancados y detenidos simultáneamente pero equipados con un arrancador suave se puede evitar una gran corriente de arranque y, por lo tanto, una caída de voltaje. Cuando el banco de capacitores se encuentre conectado se producirá un pico de corriente grande afectando sustancialmente el voltaje en el lado de bajo voltaje del transformador. El uso de sofisticados aerogeneradores de velocidad variable puede mejorar la frecuencia eliminando este problema.

Actualmente no se tienen en cuenta todos los diferentes tipos de fenómenos de calidad de la energía presentes en los sistemas eólicos. Los métodos, cálculos y los modelos utilizados son demasiado simplificados. Por esa razón es necesario desarrollar modelos que permitan analizar y mitigar los fenómenos electromagnéticos generados por una pobre calidad en la energía garantizando el buen funcionamiento del sistema eléctrico de potencia con el fin de predecir la interacción entre los aerogeneradores y la red eléctrica necesitando nuevos y mejores modelos que incluyan todas las características de los aerogeneradores. Estos modelos podrían ser herramientas útiles para predecir la calidad de energía en los aerogeneradores. Los tipos de aerogeneradores que, en combinación con la red eléctrica, ocasionaran problemas de calidad de la energía podrían ser rechazados y reemplazados en una etapa temprana de la planificación por un tipo más apropiado de aerogenerador.

Bibliografía

+Larsson, Å., "Voltage and Frequency Variations on Autonomous Grids: A Comparison of Two Different Wind-Diesel Systems", *Proceedings of the European Union Wind Energy Conference (EUWEC '96)*, May 1996, Göteborg, Sweden, p. 317 - 320.

+Demoulias, C. S., Dokopoulos, P., "Electrical Transients of Wind Turbines in a Small Power Grid", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 3, September 1996, p. 636 - 642.

+Freris, L.L. (ed.), *Wind Energy Conversion Systems*, Prentice Hall International (UK) Ltd, 1990, 388 p.

+Johnson, G.L., *Wind Energy Systems*, Prentice Hall International Inc., New Jersey, USA, 1985, 360 p.

+Gardner, P., "Flicker from Wind Farms". *Proceedings of the BWEA/SERC RAL Workshop on Wind Energy Penetration into Weak Electricity Network*, Rutherford, U.K., June 1993, p. 27 - 37.

+Gerdes, G., Santjer, F., "Power Quality of Wind Turbines and their Interaction with the Grid". *Proceedings of the European Wind Energy Conference (EWEC '94)*, Thessaloniki, Greece, 10-14 October 1994, p. 1112 - 1115.

+Larsson, Å., Thiringer, T., "Measurements on and Modelling of Capacitor-Connecting Transients on a Low-voltage Grid Equipped with Two Wind Turbines", *Proceedings of the International Conference on Power System Transients (IPST '95)*, Lisbon, Portugal, Sept. 1995, p. 184 - 188.

+Larsson, Å., Carlson, O., Sidén, G., "Electrical Generating Systems in Wind Turbine Applications", *Proceedings of the IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference*, Vol. *Electrical Machines and Drives*, June 1995, p. 205 - 210.

+Thorborg, K., *Power Electronics*. Prentice Hall International (UK) Ltd, 1988. 504 p.

+Jenkins, N., "Embedded generation Part 2", *Power Engineering Journal*, October 1996, p. 233 - 239.

+Jørgensen, P., Christensen, J. S., Tande, J. O., Vikkelsø, A., Nørgård, P., "Elkvalitet ved nettilslutning af vindmøller Del 1: Stationære spændingsforhold", Roskilde, Information Service Department, Risø National Laboratory, 1996, 118 p. (in Danish).

+VDEW Publication, "Technische Richtlinie Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Mittelspannungsnetz des Elektrizitätsversorgungsunternehmens (EVU)", Frankfurt am Main, VDEWVerlag, 1994, 48 p. (in German).

+Bollen, M. H. J., "Voltage sags: effects, mitigation and predicts", *Power Engineering Journal*, June 1996, p. 129 - 135.

+Emmanuel Hernández; Manuel Madrigal. *A Step Forward in the Modeling of the Doubly-fed Induction Machine for Harmonic Analysis*. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014; 29(1):149-157.

