

Estado del Arte de las Soluciones a Perturbaciones Armónicas en Generadores Eoloeléctricos Interconectados a la Red basados en un Generador Doblemente Alimentado

Adolfo Rafael López Núñez

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, Morelos, México, Tel: 777-3627770
adolfo_rafael@cenidet.edu.mx

Jesús Darío Mina Antonio

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, Morelos, México, Tel: 777-3627770
jmina@cenidet.edu.mx

Jesús Aguayo Alquicira

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, Morelos, México, Tel: 777-3627770
jaguayo@cenidet.edu.mx

Gabriel Calderón Zavala

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Cuernavaca, Morelos, México, Tel: 777-3627770
gcalderon@cenidet.edu.mx

Resumen

En las últimas décadas, la tecnología asociada a la generación eoloeléctrica ha avanzado significativamente. Sin embargo, en el contexto de los generadores eoloeléctricos interconectados a la red eléctrica, existen diversas perturbaciones eléctricas que pueden provocar consecuencias negativas en la calidad de la energía. En este artículo se muestra

una revisión del estado del arte de los problemas producidos en generadores eolieléctricos interconectados a red, específicamente debido a perturbaciones armónicas. Se muestran los diferentes escenarios que la literatura reporta sobre las fuentes de los armónicos, su interacción con los generadores eolieléctricos y las soluciones propuestas por diversos autores. La revisión se centra en sistemas eolieléctricos basados en el generador doblemente alimentado.

Palabra(s) Clave(s): Armónicos, back-to-back, DFIG, WECS.

1. Introducción

La generación de energía eléctrica a partir de energía eólica es hoy en día la de mayor penetración en el mercado de las energías renovables, con tasas de crecimiento anual superiores al 30%[1]. Este auge de la generación eolieléctrica está ligado al avance que la electrónica de potencia ha tenido en las tres últimas décadas, con lo cual se han logrado desarrollar Sistemas de Conversión de Energía Eólica (Wind Energy Conversion System: WECS) eficientes, de bajo costo y con flexibilidad para su interconexión con la red eléctrica. No obstante este escenario, las compañías dedicadas al sector energético se han enfrentado a nuevos problemas, entre ellos, la confiabilidad de las fuentes de generación y la calidad de la energía que estas fuentes producen.

Atendiendo a la velocidad de giro del rotor, los WECS se pueden clasificar en dos tipos: de velocidad fija y de velocidad variable. En lo que respecta a los de velocidad variable, el Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés), es el más usado. En este sistema, el tamaño de los convertidores electrónicos de potencia es reducido ya que éstos se encuentran en el circuito del rotor. Entre los convertidores electrónicos de potencia hay tres tipos ampliamente usados en el mercado de la energía eólica: el convertidor back-to-back, el multinivel y el convertidor matricial [2]. En este trabajo la revisión se hace en torno a los WECS interconectados a red basados en DFIG y un convertidor back to back. Dicho convertidor se encuentra constituido por un convertidor del lado del rotor (RSC, por sus siglas en inglés), un convertidor del lado de

la red (GSC, por sus siglas en inglés) y por un capacitor de desacoplo entre ambos convertidores (ver Fig. 1). Los objetivos de control típicos son: el control de la potencia activa y reactiva entre el estator del DFIG y la red, mediante el RSC; el control de la potencia reactiva entre el convertidor y la red, y la regulación del bus de cd (dc-link en la Fig. 1), mediante el GSC. Además de estos objetivos de control, existen otros aspectos de interés en la operación de los WECS, específicamente los relacionados con la calidad de la energía asociados a determinadas perturbaciones eléctricas [3].

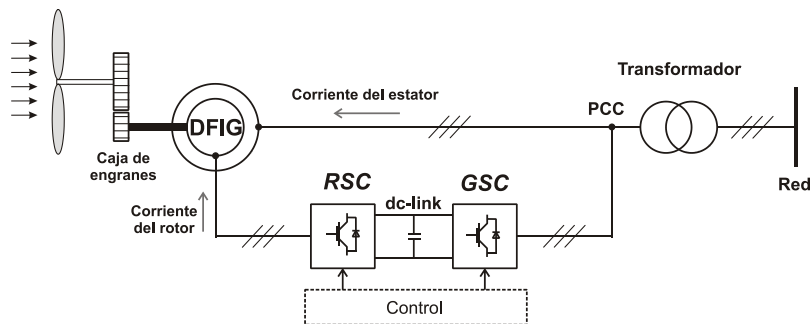


Fig. 1. Diagrama esquemático del WECS basado en DFIG.

La calidad de la energía está definida entre otros factores, por las características de: amplitud, forma, frecuencia y simetría, de la onda de tensión y/o corriente, las cuales en teoría deben ser puramente senoidales; no obstante, son afectadas por perturbaciones en la red eléctrica. Estas perturbaciones en la red también afectan a los sistemas de generación interconectados, como es el caso de los WECS, con consecuencias diversas como puede ser el daño del generador, del convertidor electrónico, etc. Existe una variedad de disturbios que impactan en la calidad de la energía, sin embargo, los que juegan un papel crucial en los WECS interconectados son: los huecos de tensión, el flicker y las perturbaciones armónicas [4, 5]. En este sentido, el fenómeno de interés para esta revisión es el de las perturbaciones armónicas.

2. Fuentes generadoras de armónicos en WECS interconectados a red

Las perturbaciones armónicas son un fenómeno que causa problemas tanto a los usuarios como a la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica. En la literatura se puede detectar, de manera genérica, dos escenarios como fuentes armónicas en un WECS interconectado:

- Perturbaciones armónicas provenientes de la red.
- Perturbaciones armónicas provenientes del WECS.

2.1 Armónicos provenientes de la red

Dado que el WECS está conectado a la red, éste se vuelve sensible a cualquier perturbación armónica proveniente de la misma. Los voltajes distorsionados en el estator generan corrientes armónicas en el WECS, éstas a su vez pueden generar rizo de voltaje, pulsaciones de torque o potencia debido la presencia del tercer armónico de corriente, sobrecalentamiento y aumento de pérdidas en los embobinados del estator, bajo factor de potencia, entre otros [6]; en algunos casos, estas afectaciones pueden tener efectos destructivos en el DFIG [5]. Las soluciones encontradas en la literatura involucran el uso de *dispositivos de potencia personalizados (Custom Power Devices)*, así como diversas *estrategias de control implementadas en los convertidores*.

2.1.1 Dispositivos de potencia personalizados

Este grupo de soluciones para eliminar el problema de los armónicos provenientes de la red se dividen en tres diferentes: STATCOM, DVR y UPQC, todos estos se caracterizan por ser soluciones externas al WECS.

STATCOM. El compensador estático (STATCOM, por sus siglas en inglés), es un filtro shunt diseñado para corregir el factor de potencia, filtrar armónicos de corriente, así como lograr un balance de las cargas, esto mediante la inyección de potencia reactiva (ver Fig. 2) [4]. Funciona como una fuente de voltaje controlada por corriente, la cual mediante un

esquema de control apropiado, inyecta las componentes armónicas generadas por la carga pero desfasadas 180 grados. El STATCOM solo se limita al control de la potencia reactiva; sin embargo, para compensar fluctuaciones de la potencia activa e.g. debido a la variación del viento, se utilizan baterías como sistemas de almacenamiento (BEES, por sus siglas en inglés) incorporadas al STATCOM [7, 8].

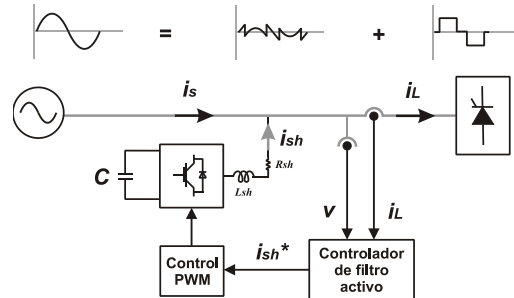


Fig. 2. Configuración general del STATCOM.

DVR. El restaurador dinámico de voltaje (DVR, por sus siglas en inglés), es la alternativa más efectiva y económica para proteger cargas sensibles de diversas perturbaciones del lado de la línea. El DVR está basado en un convertidor PWM con un bus de cd capacitivo y se conecta en serie con la línea través de un filtro pasa-bajas y un transformador de acoplamiento (ver Fig. 3). Su función es insertar un voltaje de magnitud y frecuencia adecuada, a fin de re-establecer el voltaje del lado de la carga a la amplitud y forma deseada, aun cuando la fuente de voltaje se encuentre desbalanceada y/o distorsionada [9–11]. Al igual que el STATCOM, el DVR puede utilizarse en conjunto con BEES para controlar el flujo de potencia activa y reactiva.

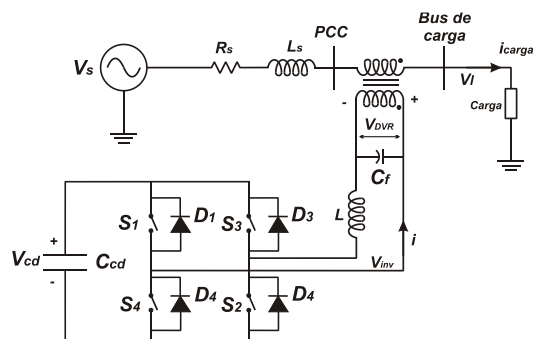


Fig. 3. Esquema DVR.

UPQC. El acondicionador unificado de la calidad de la energía o (UPQC, por sus siglas en inglés), es un dispositivo que consiste en dos inversores en configuración back-to-back. El UPQC se encarga de las perturbaciones tanto en la corriente de la carga como en el voltaje de la línea (ver Fig. 4).

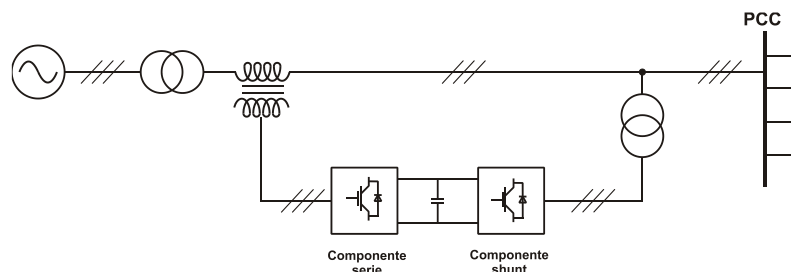


Fig. 4. Configuración básica de un UPQC.

La componente en serie del UPQC inserta voltajes apropiados para mantener los voltajes en las terminales de carga a un nivel deseado, balanceado y libre de distorsión armónica; de manera simultánea, la componente shunt del UPQC inyecta corriente en el sistema de ac para compensar los problemas en la corriente de carga tales como: bajo factor de potencia, corrientes armónicas, cargas desbalanceadas, etc.; es decir, se busca que las corrientes de la fuente se convierten en sinusoides equilibradas y en fase con los voltajes de la misma.

Cabe mencionar que el rendimiento de estas soluciones depende en gran medida de la impedancia del WECS y puede conducir a una no deseada resonancia paralela con la red [7, 12, 13].

2.1.2 Estrategias de control implementadas en los convertidores

Para lograr el control de corrientes armónicas en el WECS, bajo distorsiones del voltaje de red, es esencial un control preciso de las componentes armónicas de la corriente del rotor. En este sentido, se han utilizado reguladores de corriente Proporcional Integral (PI), Proporcional Resonante (PR) y Proporcional Integral Resonante (PIR) [14-16].

En el regulador PI, cada secuencia armónica es representada como una señal de cd en su respectivo marco de referencia; en este sentido, el regulador PI requiere una transformación coordinada y una descomposición de las componentes armónicas de corriente.

Por su parte, el regulador PR se puede implementar en el marco de referencia $\alpha\beta$. La parte proporcional mejora la respuesta dinámica del sistema, mientras que la parte resonante es responsable de regular la componente fundamental así como sus componentes armónicas. Es importante mencionar que cada regulador PR es capaz de controlar una sola componente armónica, por lo que su estructura puede volverse muy compleja si varias componentes armónicas de voltaje se ven involucradas.

En el caso del PIR, la parte PI se encarga de la componente fundamental, mientras la parte resonante se encarga de las componentes armónicas (ver Fig. 5). Aquí no se requiere un PIR por cada componente armónica de corriente, pues una sola parte resonante es capaz de regular dos componentes armónicas de manera simultánea.

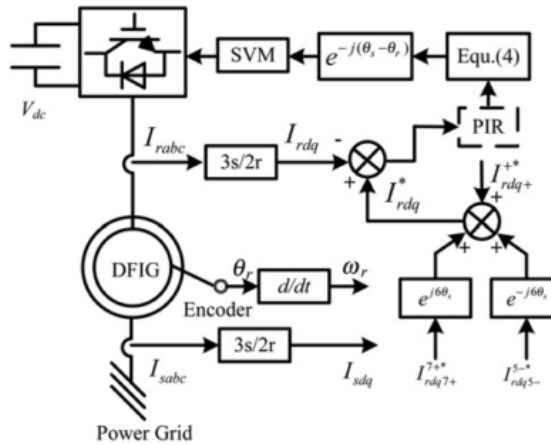


Fig. 5. Esquema de control del DFIG en condiciones de voltaje distorsionado utilizando reguladores de corriente PIR propuesto en [16].

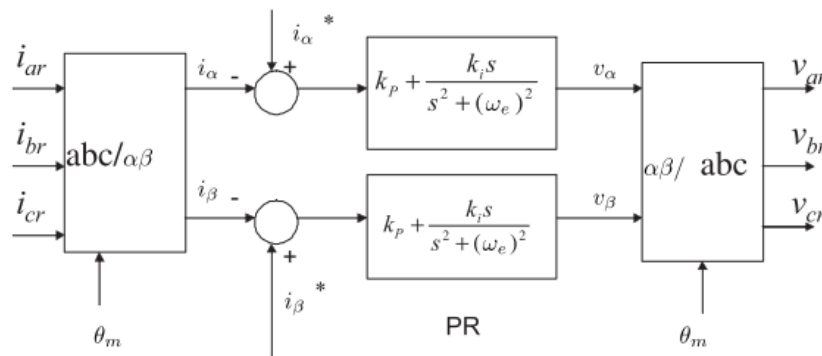


Fig. 6. Esquema de control proporcional resonante (PR) propuesto en [17].

En [17] se desarrolla un control PR en el marco de referencia $\alpha\beta$ para minimizar las corrientes armónicas del rotor así como las pulsaciones del torque; para este control no se toma en cuenta al GSC (ver Fig. 6). Las principales ventajas del método propuesto son: (i) solo se requiere una transformación ($abc/\alpha\beta$) y (ii) no se requieren filtros armónicos. La estrategia de control propuesta es comparada con un control PI en dq+ y dq-, y con la estrategia de control PIR en dq+. En [18] se presenta el diseño de un regulador PIR en un marco de referencia síncrono, el parámetro proporcional se escoge de manera que se garantice en el sistema un suficiente margen de fase; sin embargo,

esta técnica no es aplicable en situaciones prácticas, debido a que el ancho de banda del parámetro resonante no fue considerado.

En [19] se propone un control coordinado del RSC y del GSC que consiste en un control PI y en un compensador resonante de doble frecuencia (DFR), implementado en el marco de referencia dq+. El control del RSC se encarga de eliminar las oscilaciones de torque así como las corrientes armónicas quinta y séptima, mientras que el GSC es designado para asegurar una salida constante de potencia reactiva (ver Fig. 7).

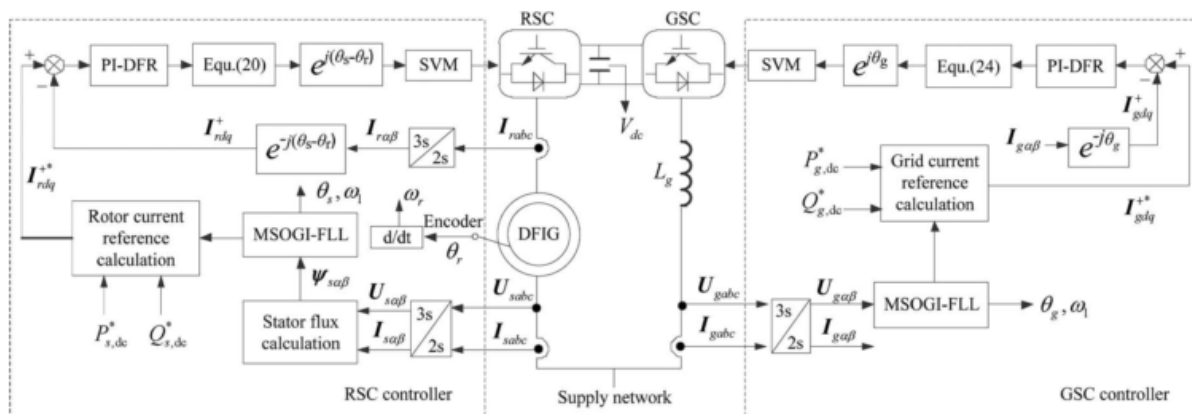


Fig. 7. Diagrama esquemático del sistema simulado en [19].

De manera similar, en [20] se propone una estrategia coordinada entre el RSC y el GSC para eliminar las distorsiones que provienen de la red. Aquí, el RSC es controlado mediante un control de potencia directa (DPC, por sus siglas en inglés) para eliminar la potencia reactiva del estator así como las oscilaciones del torque; mientras que la potencia activa y reactiva de salida son controladas mediante el GSC con un control vectorial en conjunto con un PIR sintonizado a seis veces la frecuencia de sincronización para eliminar los armónicos de voltaje quinto y séptimo (ver Fig. 8).

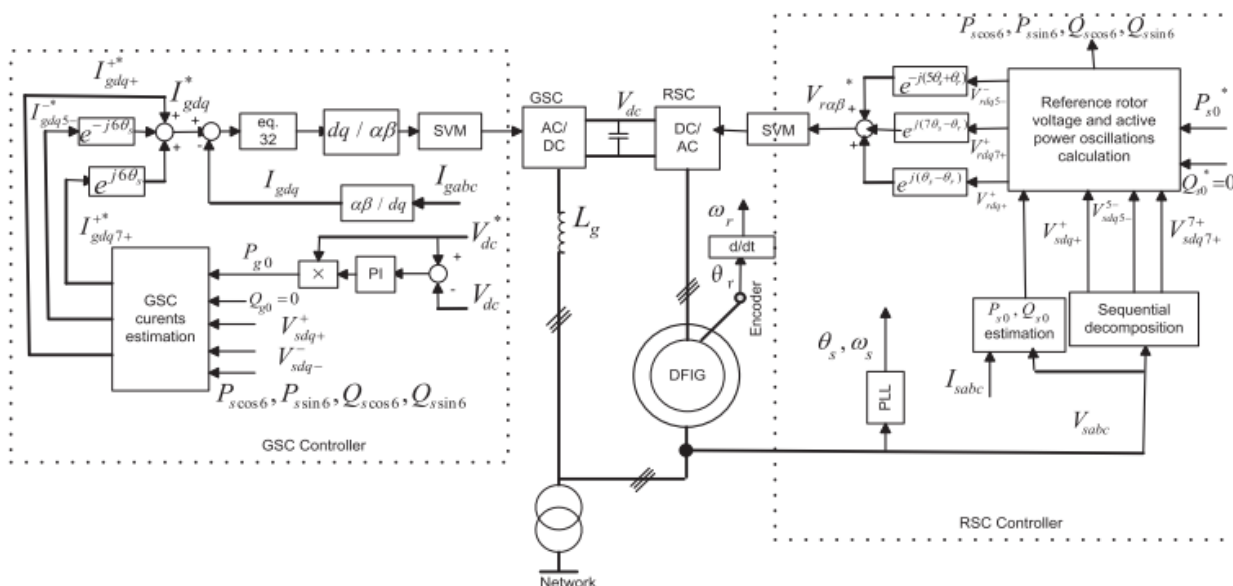


Fig. 8. Diagrama esquemático del sistema simulado en [20].

Un método supresor de armónicos de corriente en el estator es propuesto en [21] y [22], aquí se utiliza un controlador resonante para eliminar las armónicas quinta y séptima. Este control consta de dos lazos: uno de corriente del rotor basado en un PI y que regula la salida de potencia activa y reactiva; y otro de corriente armónica del estator, el cual usa un controlador resonante en el que las armónicas de quinto y séptimo orden son convertidas en armónicos de sexto orden. En [23] se propone el uso de modos deslizantes; aquí, el RSC es utilizado para que el torque electromagnético y la potencia reactiva del estator se mantengan libres de fluctuaciones ante perturbaciones del voltaje de red. Esta propuesta puede verse limitada en el aspecto práctico debido a la alta frecuencia de conmutación utilizada.

2.2 Armónicos provenientes del WECS

Los armónicos provenientes del WECS es otro de los escenarios en cuanto a perturbaciones armónicas se refiere; en donde la inyección de componentes armónicas de voltaje o corriente hacia la red pueden ocasionar problemas como: calentamiento

excesivo de los transformadores y de los conductores [24]. Las causas principales de armónicos provenientes del WECS son: armónicos producidos por cargas no lineales propias y armónicos producidos por el WECS como tal, es decir, asociados a la operación de los componentes que lo conforman (generador, convertidor electrónico de potencia).

Para comprender el escenario de armónicos provenientes del WECS debido a cargas no lineales, es importante recordar que contrario a los sistemas de generación convencionales (plantas generadoras situadas a grandes distancias de los centros de consumo y compleja infraestructura de transporte de energía), ha surgido un modelo alternativo denominado Fuentes de Energía Distribuidas (FED), en el que las fuentes de energía eléctrica no están conectadas a los grandes sistemas de transmisión. En una FED basada en WECS parte de la energía es para alimentar las cargas propias e.g. algún domicilio o negocio, y el excedente se vierte hacia la red. Estas cargas propias generalmente son no lineales.

En relación a los armónicos producidos por cargas propias no lineales, las soluciones se basan en la implementación de estrategias de control aplicadas al WECS[25]. Por su parte, en cuanto a los armónicos producidos por la operación de los componentes del WECS, la solución propuesta es mediante el uso de convertidores back to back multinivel, lo cual ha minimizado significativamente este problema [2, 26, 27]. Las soluciones para ambos escenarios se presentan a continuación.

2.2.1 Armónicos producidos por cargas propias no lineales

Entre las soluciones para este escenario, basadas en el control del WECS, en [28, 29] se aborda el filtrado de los armónicos producidos por cargas no lineales mediante el control del RSC; en dichos trabajos se hace uso de un filtro selectivo pasa bandas para extraer las componentes armónicas para mitigar los armónicos quinto y séptimo de corriente. Adicional a la mitigación de los armónicos, el esquema es también capaz de controlar las potencias activas y reactivas (ver Fig. 9).

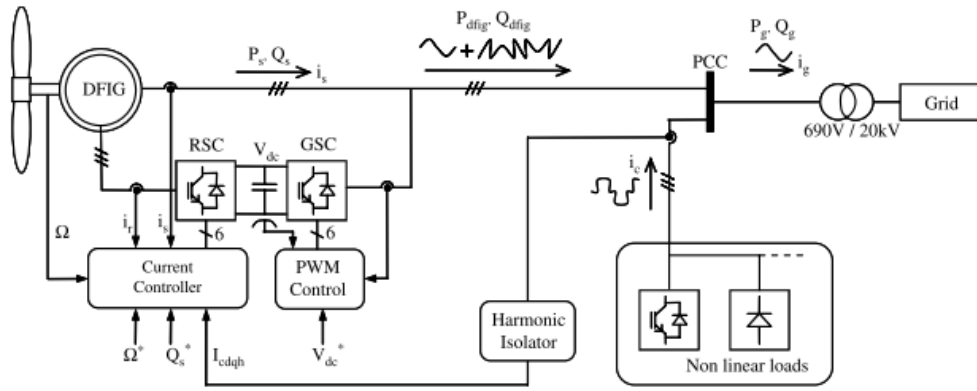


Fig. 9. Principio de control simultáneo de potencia y mitigación de armónicos de corriente mostrado en [29].

En [30] se usa un control orientado a campo (FOC, por sus siglas en inglés), sin sensor, de un filtro activo capaz de capturar la máxima potencia del WECS y de eliminar los armónicos de corriente más significativos en cargas no lineales. Este control regula tanto la corriente fundamental como sus respectivas armónicas (ver Fig. 10).

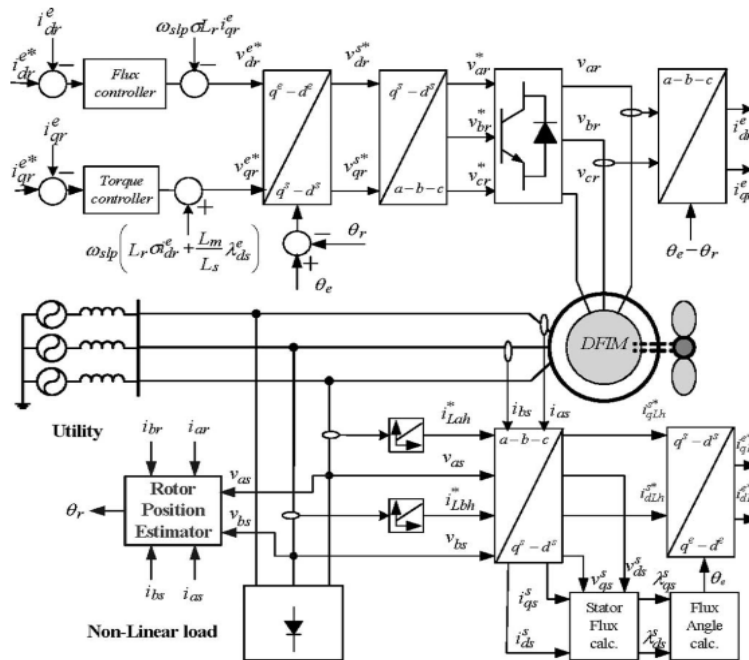


Fig. 10. Estrategia de control mostrada en [30].

En [31] se propone una estrategia de control en el RSC que extrae la máxima potencia y en función de ésta, compensa la potencia reactiva y los armónicos de la red debido a cargas no lineales. Aquí, se busca operar al RSC en su máxima capacidad en términos de compensación de potencia reactiva y capacidad de filtración; y que el GSC garantice un voltaje limpio del bus de cd y una corriente senoidal en la red (Fig. 11).

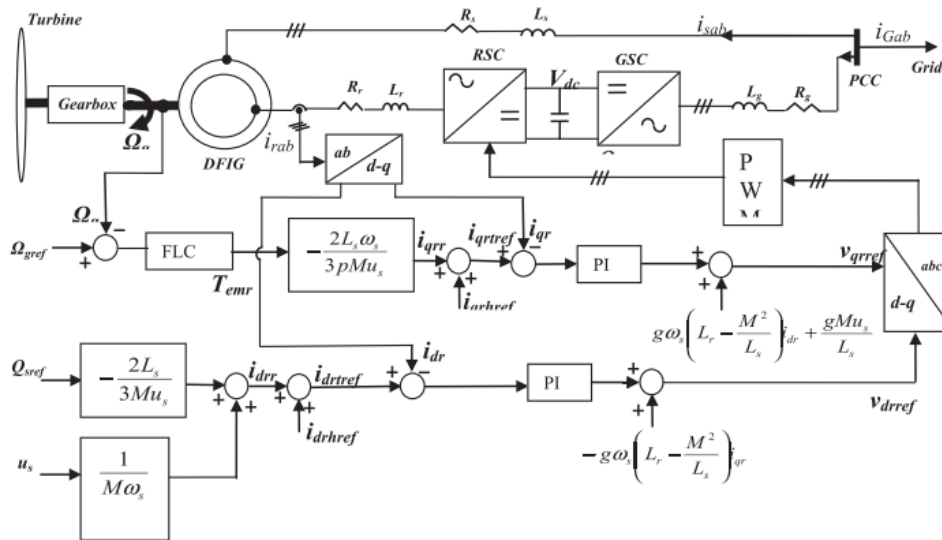


Fig. 11. Estrategia de control en el RSC para mitigación de armónicos.

En [32] se hace uso de un nuevo esquema de control implementado en la referencia fundamental para eliminar los armónicos de voltaje quinto y séptimo en el PCC para un sistema aislado. En este esquema, dichos armónicos son convertidos en un armónico de sexto orden que se elimina mediante un control PIR en el RSC. En [5] se propone un nuevo control en el que el GSC se comporta como un filtro activo shunt con detección de control de voltaje, el cual regula el voltaje del sistema. Mientras que en el RSC se implementa un modulador interpolativo, el cual es usado para evitar la propagación de armónicos así como para mejorar el rendimiento del DFIG.

Es importante notar que a pesar del buen resultado que puedan tener estas alternativas de control, se debe tener en cuenta que el uso del WECS (DFIG/Convertidor) para

compensar las perturbaciones por cargas no lineales, puede afectar el rendimiento del WECS [29, 33, 34]. Adicionalmente, en los artículos previamente revisados, las cargas no lineales se consideran balanceadas, suposición que muchas veces no se cumple y que puede derivar en desbalance de voltaje, desigual distribución de las corrientes del estator, etc.[35].

2.2.2 Armónicos producidos por el convertidor back to back

En un WECS interconectado a la red, el convertidor back to back puede ser una fuente importante de voltajes y/o corrientes armónicas, existen tres configuraciones posibles para un convertidor back to back: *matricial*, *multinivel* y *resonante*. Entre éstas, el back to back multinivel se reporta como el más apropiado para eliminar armónicos provenientes del WECS. La Fig. 12 muestra el modelo eléctrico de esta topología, donde el subíndice G representa las variables del lado de la red, el subíndice M representa las variables del lado del generador y L_f es el filtro inductivo.

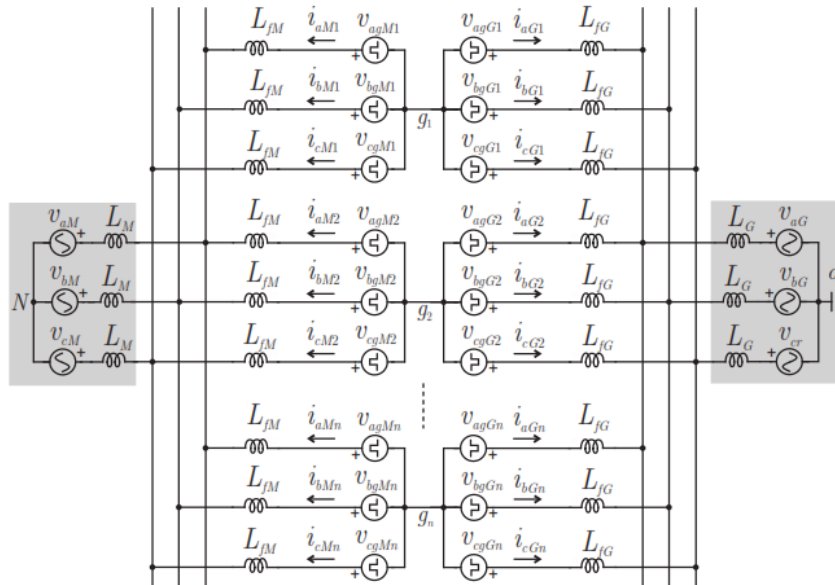


Fig. 12. Modelo eléctrico del convertidor back to back multinivel.

Las diferentes topologías de convertidores multinivel pueden ser clasificadas dentro de las siguientes cuatro categorías [2]: configuración con diodos de fijación (diode clamps), configuración con interruptor de interconexión bidireccional, configuración con múltiples inversores de tres fases y configuración con inversores de puente H de fase simple en cascada. Una característica común de las 4 diferentes topologías de los convertidores multinivel es que en teoría, todas las topologías pueden ser construidas para tener un número arbitrario de niveles, sin embargo, en la práctica, algunas topologías son más fáciles de realizar que otras.

Una de las ventajas de esta topología es su alta disponibilidad ya que si un módulo de potencia llega a fallar, el sistema aún tiene la habilidad de operar [36, 27], siempre que se le complemente de un sistema de reconfiguración. Además, los convertidores multinivel no comparten el mismo bus de cd, por lo que este bus es un elemento redundante que contribuye a incrementar la confiabilidad de todo el sistema.

En [36–38], se logra la reducción del contenido armónico desfasando y sincronizando la generación de la señal PWM de cada módulo de acuerdo con: $\theta_p = 2\pi/n$, donde θ_p es el ángulo de desfase en radianes entre las portadoras de los n módulos convertidores. Una desventaja es que esta topología tiende a crear corrientes circulantes de secuencia cero (zero-sequence circulating current); diversas estrategias para minimizar estas corrientes, mientras se reduce el efecto armónico de las corrientes de salida, se han tratado en [39–41], sin embargo, implican un incremento en la complejidad del WECS, así como en las pérdidas de conmutación. Otra desventaja es el voltaje desbalanceado entre los buses de cd de cada convertidor, para lo cual se han reportado numerosas soluciones de hardware y software. Las soluciones basadas en hardware necesitan componentes adicionales que incrementan el costo de los convertidores y reducen su confiabilidad, las segundas requieren gran capacidad computacional para lograr la modulación de las señales del convertidor [42].

3. Conclusiones

Las emisiones armónicas de voltaje o corriente son un problema de calidad de energía que no debe subestimarse; en este sentido, la revisión de la literatura ha llevado a la identificación de dos escenarios con respecto a las perturbaciones armónicas en WECS interconectados a la red, estos son: *armónicos provenientes de la red* y *armónicos provenientes del WECS*.

En lo que respecta al escenario de los armónicos provenientes de la red, las cargas no lineales en la red son las responsables de las perturbaciones armónicas de voltaje y que afectan al WECS. Por otro lado, en lo que respecta al escenario de los armónicos producidos por el WECS, estas perturbaciones se producen por el mismo convertidor back to back o por cargas no lineales en el contexto de la generación distribuida. La mayoría de las soluciones propuestas en la literatura están basadas en el control del WECS ya sea del RSC y/o del GSC, muchas de ellas están diseñadas para algún o algunos armónicos específicos, y pocas soluciones resuelven el problema para un rango amplio de armónicos. Se resalta también que demandarle al RSC y/o al GSC, otras tareas como es la compensación de armónicos, adicionales a los objetivos típicos de control en WECS (control de potencia activa, reactiva, regulación del bus de cd, seguimiento de máxima potencia, etc.), puede implicar una afectación en el rendimiento del WECS. Ligado a esta última observación, las soluciones basadas en hardware, es decir, en el uso de mejores topologías de convertidores electrónicos de potencia y mejores esquemas de modulación, pueden ayudar a reducir el esfuerzo demandado al WECS desde el punto de vista de control.

4. Referencias

- [1] E. Matrinot, "Renewables Global Futures Report (Paris: REN21)," *Renew. Energy Policy Netw. 21stCentury*, 2013.

- [2] J. M. Carrasco, et al., "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources : A Survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [3] T. Ackermann, "*Wind Power in Power Systems.*" John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [4] V. S. Kumar, A. F. Zobaa, and R. D. Kannan, "Power Quality and Stability Improvement in Wind Park System Using STATCOM," *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 169–176, 2010.
- [5] J. Amini, "Novel Control Method of Grid Connected Converter of Doubly Fed Induction Generator to Achieve Disturbances Rejection," *10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, pp. 1–5, 2011.
- [6] J. Hu, et al., "Dynamic Modeling and Improved Control of DFIG Under Distorted Grid Voltage Conditions," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 1, pp. 163–175, Mar. 2011.
- [7] M. Khadem, M. Basu, and M. Conlon, "Power Quality in Grid Connected Renewable Energy Systems: Role of Custom Power Devices," *Int. Conf. Renew. Energies Power Qual.*, 2010.
- [8] M. Tarafdar-Hagh, M. B. B. Sharifian, and S. Galvani, "Impact of SSSC and STATCOM on Power System Predictability," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 56, pp. 159–167, Mar. 2014.
- [9] H. Abdollahzadeh, M. Jazaeri, and A. Tavighi, "A New Fast-Converged Estimation Approach for Dynamic Voltage Restorer (DVR) to Compensate Voltage Sags in Waveform Distortion Conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 598–609, Jan. 2014.
- [10] R. A. Kumar, et al., "Compensation of Voltage Sags and Harmonics with Phase-Jumps through DVR with Minimum VA Rating using Particle Swarm Optimization," *2009 World Congr. Nat. Biol. Inspired Comput.*, pp. 1361–1366, 2009.

- [11] A. Ghosh and G. Ledwich, "Compensation of Distribution System Voltage using DVR," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 4, pp. 1030–1036, 2002.
- [12] I. Axente, M. Basu, and M. F. Conlon, "Dc Link Voltage Control of UPQC for Better Dynamic Performance," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 9, pp. 1815–1824, Sep. 2011.
- [13] H. Fujita and H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt-Active Filters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 2, pp. 315–322, Mar. 1998.
- [14] L. Xu, "Enhanced Control and Operation of DFIG-based Wind Farms During Network Unbalance," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 23, no. 4, pp. 1073–1081, 2008.
- [15] R. Pena, et al., "Control Strategy for a Doubly-Fed Induction Generator Feeding an Unbalanced Grid or Stand-alone Load," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 355–364, Feb. 2009.
- [16] H. Nian and Y. Song, "Optimised Parameter Design of Proportional Integral and Resonant Current Regulator for Doubly Fed Induction Generator during Grid Voltage Distortion," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 8, no. 3, pp. 299–313, Apr. 2014.
- [17] M. H. Lingling-Fan, et al, "Control of DFIG for Rotor Current Harmonics Elimination," *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–7, 2009.
- [18] I. Etxeberria-Otadui, "A Single Synchronous Frame Hybrid (SSFH) Multifrequency Controller for Power Active Filters," *Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1640–1648, 2006.
- [19] J. Hu, H. Xu, and Y. He, "Coordinated Control of DFIG's RSC and GSC Under Generalized Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 7, pp. 2808–2819, Jul. 2013.

- [20] E. G. Shehata and G. M. Salama, "Direct Power Control of DFIGs based Wind Energy Generation Systems under Distorted Grid Voltage Conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 956–966, Dec. 2013.
- [21] F. Blaabjerg, et al., "Stator Current Harmonic Control with Resonant Controller for Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 7, pp. 3207–3220, 2012.
- [22] W. Chen, et al., "Stator Harmonic Current Suppression for DFIG Wind Power System under Distorted Grid Voltage," no. 50877072, pp. 307–314, 2012.
- [23] M. I. Martinez, et al., "Sliding-Mode Control for DFIG Rotor- and Grid-Side Converters under Unbalanced and Harmonically Distorted Grid Voltage," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 2, pp. 328–339, Jun. 2012.
- [24] M. Mora-Barajas and P. Bañuelos-Sánchez, "Contaminación Armónica Producida por Cargas No Lineales de Baja Potencia: Modelo Matemático y Casos Prácticos," *Ing. Investig. y ...*, pp. 189–198, 2010.
- [25] M. Kesraoui, et al., "Using a DFIG Based Wind Turbine for Grid Current Harmonics Filtering," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 968–975, Feb. 2014.
- [26] B. Andresen and J. Birk, "A High Power Density Converter System for the Gamesa G10x4,5 MW Wind Turbine," *EPE 2007*, pp. 1–8.
- [27] T. Zhang and A. Zain, "Modular Converter System Reliability & Performance Analysis in Design," *2nd Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst.*, pp. 252–258, Jun. 2010.
- [28] A. Gaillard, P. Poure, and S. Saadate, "Reactive Power Compensation and Active Filtering Capability of WECS with DFIG without any Over-rating," *Wind Energy*, December 2009, pp. 603–614, 2010.

- [29] A. Gaillard, et al., "Variable Speed DFIG Wind Energy System for Power Generation and Harmonic Current Mitigation," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1545–1553, Jun. 2009.
- [30] M. T. Abolhassani, et al., "Integrated Doubly Fed Electric Alternator/Active Filter (IDEA), a Viable Power Quality Solution for Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 642–650, 2008.
- [31] M. Boutoubat, L. Mokrani, and M. Machmoum, "Control of a Wind Energy Conversion System Equipped by a DFIG for Active Power Generation and Power Quality Improvement," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 378–386, Feb. 2013.
- [32] V. Phan and H. Lee, "Control Strategy for Harmonic Elimination in Stand-Alone DFIG Applications with Nonlinear Loads," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 9, pp. 2662–2675, 2011.
- [33] V. Phan and H. Lee, "Elimination of Voltage Harmonics in a Stand-Alone DFIG using a PI-R Controller in the Fundamental Reference Frame," *2010 IEEE Int. Conf. Sustain. Energy Technol.*, pp. 1–6, Dec. 2010.
- [34] R. I. Bojoi, et al., "Current Control Strategy for Power Conditioners using Sinusoidal Signal Integrators in Synchronous Reference Frame," vol. 20, no. 6, pp. 1402–1412, 2005.
- [35] G. Todeschini, "Wind Energy Conversion Systems as Active Filters under Unbalanced Load Conditions," *14th Int. Conf. Harmon. and Qual. Power*, 2010.
- [36] J. Birk and B. Andresen, "Parallel-Connected Converters for Optimizing Efficiency, Reliability and Grid Harmonics in a Wind Turbine," *Eur. Conf. on Power Electron. and Appl.*, pp. 1–7, 2007.
- [37] F. B. Grigoletto and H. Pinheiro, "Modulation and Circulating Current Control of Parallel Connected back-to-back Converters for WECS," *XI Brazilian Power Electron. Conf.*, pp. 631–638, Sep. 2011.

- [38] D. Zhang, F. Wang, and R. Burgos, "Impact of Interleaving on AC Passive Components of Paralleled Three-Phase Voltage-Source Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 1042–1054, 2010.
- [39] S. Ogasawara, J. Takagaki, and A. Nabae, "Novel Control Scheme of a Parallel Current-Controlled PWM Inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 5, pp. 1023–1030, 1992.
- [40] Z. Ye, et al., "Control of Circulating Current in Two Parallel Three-Phase Boost Rectifiers," vol. 17, no. 5, pp. 609–615, 2002.
- [41] F. Wang, R. Burgos, and D. Boroyevich, "Common Mode Circulating Current Control of Interleaved Three-Phase Two-Level Voltage-Source Converters with Discontinuous Space-Vector Modulation," *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 2801–2807, Sep. 2009.
- [42] G. Escobar, "Control of a Three Level Converter used as a Synchronous Rectifier," *PESC 04*, pp. 3458–3464, 2004.

7. Autores

M. C. Adolfo Rafael López Núñez, obtuvo su título de Licenciatura y Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, en los años 2008 y 2011 respectivamente. Actualmente se encuentra adscrito al programa doctoral en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.

Dr. Jesús Mina, obtuvo el título de Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 1999; el título de M. C. en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en 2002; el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional Autónoma de México en 2008. El Dr. Mina realizó también una estancia postdoctoral en la Universidad del Sur de California entre 2008-2009. Desde 2009 labora en el CENIDET en el Departamento de Ingeniería Electrónica donde lleva a cabo investigación en las áreas de: diseño y control de convertidores cd-cd, control de sistemas de generación eoloeléctrica y diagnóstico de fallas.

Dr. Jesús Aguayo Alquicira obtuvo su título de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica opción Potencia por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo

Tecnológico (CENIDET) en el 2004, lugar en donde labora actualmente como investigador para el Departamento de Ingeniería Electrónica.

M. C. Gabriel Calderón Zavala, obtuvo su título de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, en 2009. Actualmente se encuentra adscrito al programa doctoral en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos.