

1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

<b>Código:</b>	CIDII-020513
<b>Centro de Investigación:</b>	CENTRO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA
<b>Programa:</b>	Control en sistemas eléctricos de potencia
<b>Título del Proyecto:</b>	Algoritmos de Control de Auto-Sanación Aplicados en Microrredes Eléctricas
<b>Grupo de Investigación:</b>	Grupo de Investigación en Control y Automatización
<b>Area de Conocimiento:</b>	Ciencia y Tecnología
<b>Línea de Investigación:</b>	Ingeniería de control y tecnologías de
<b>Tipo de Investigación:</b>	Básica Desarrollo
<b>Campo :</b>	Tecnologías
<b>Investigador Principal :</b>	LUIS ISMAEL MINCHALA AVILA
<b>Proyectos Vinculados :</b>	Modelación de Microrredes (2012 - 2013)
<b>Duración del Proyecto :</b>	12 Meses
<b>Localización del Proyecto :</b>	Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. Oficina y laboratorio del Grupo de Investigación en Control y Automatización Industrial
<b>Fecha de ingreso :</b>	01/10/2013 12:27

## 2. ANTECEDENTES

Los cortes energéticos causan enormes pérdidas económicas; precisamente por ello, muchos esfuerzos para desarrollar tecnología que pueda evitar o mitigar sus efectos están siendo realizados. Existen diversas tendencias y tecnologías emergentes que abordan esta temática, tales como las unidades de generación distribuida y las microrredes eléctricas. La generación distribuida (GD) está principalmente compuesta por fuentes de energía renovable (FER) que pueden usarse como fuentes de emergencia cuando ocurren los apagones. La GD podría aportar potencia a la red, además de poder ser utilizada para propósitos de cobertura de demanda en horas pico. En este proyecto de investigación, se propondrán estrategias de monitoreo y control para redes de distribución eléctrica con generación distribuida (microrredes), de manera que se las provea de capacidades de auto-sanación, tolerancia a fallos y óptima operación para cobertura de demanda. El ambiente de prueba estará basado en un modelo de simulación que involucra la integración de turbinas de viento, paneles solares, generadores de combustión y de gas y cargas activas. En el eventual caso de una falla, los dispositivos de protección se encargarán de aislar el segmento defectuoso, para entonces ejecutar las acciones de control correspondientes, basadas en un marco metodológico de tolerancia a fallas, para recuperar el suministro energético en los segmentos de red sin falla. Estas estrategias de control son asistidas por un sistema de monitoreo y diagnóstico distribuido, que realiza monitoreo en tiempo real de voltajes y corrientes de los terminales de las unidades de generación y de los nodos de la red.

## 3. JUSTIFICACIÓN

Las microrredes eléctricas se definen como sistemas de potencia de bajo y medio voltaje con fuentes de generación distribuida (GD), dispositivos de almacenamiento y cargas controlables, conectados a la red principal o aislados. La operación de las microrredes ofrece muchas ventajas a los consumidores y empresas eléctricas, mejorando la eficiencia energética, reduciendo pérdidas en transmisión y distribución, ofreciendo más alta confiabilidad y robustez en la operación del sistema eléctrico, reduciendo el impacto ambiental a través de la minimización del consumo de combustibles fósiles y brindando una estrategia de reemplazo de infraestructura económicamente eficiente. La operación de las microrredes está relacionada con la generación de energía cerca de los consumidores [1-3]. Sin embargo, las microrredes poseen características de operación distintas a los sistemas eléctricos de potencia, tales como: baja inercia, líneas mayormente resistivas y alta penetración de fuentes de energía renovable (FER). Las unidades de microgeneración, típicamente localizadas cerca de los usuarios, han emergido como una opción interesante y a considerarse para cubrir las demandas de carga de los usuarios. Las opciones que mayor madurez comercial han adquirido son los generadores de energía eólica y solar.

La energía eólica, es una fuente de energía prometedora que no genera emisiones y cada vez atrae más la atención de ingenieros, científicos y usuarios. Las turbinas de viento son estructuras de envergadura variada movidas por el viento, mismo que desde una perspectiva estricta de diseño se considera tienen un comportamiento estocástico. Adicionalmente, la unión de varias turbinas de viento constituyen los conocidos parques eólicos. Típicamente, las turbinas de viento son instaladas en lugares de acceso restringido, por ejemplo en alta mar, por lo que garantizar su correcta operación y mantenimiento es un tema de mucho interés [4]. Para cubrir éstos requerimientos y retos, se requieren desarrollar tecnologías de control avanzado, que involucren conceptos de tolerancia a fallos, auto-sanación, auto-diagnóstico y optimización de los recursos [5-7].

Otro beneficio de una microrred es la capacidad de seleccionar las fuentes de energía para cubrir la demanda actual, considerando condiciones ambientales, restricciones técnicas y regulatorias. Resulta importante considerar que cuando fuentes de microgeneración, como las FERs se añaden al sistema de distribución, importantes cuestiones relacionadas con los niveles de voltaje y frecuencia de operación deben ser considerados [8].

En virtud a las razones expuestas en los párrafos precedentes, ésta propuesta se enfoca en el desarrollo de estrategias de control que provean a las redes de distribución eléctrica con GD y FER de capacidades de auto-sanación, tolerancia a fallos y óptima operación para cobertura de demanda.

La característica más importante y a la ventaja más notable del enfoque de tolerancia a fallos radican en que la microrred podrá seguir operativa, con un nivel de degradación específico, después de que hayan ocurrido fallas en la red o en algún componente de la misma. Esta estrategia previene que una falla se propague en el sistema y produzca efectos más severos. En resumen, las principales ventajas de un sistemas de control con tolerancia a fallos (CTF) son [9]: la disponibilidad y fiabilidad del sistema pueden mantenerse en presencia de fallas, prevención de propagación de fallas de componentes para evitar ocasionar una falla del sistema, uso de información redundante para detectar fallas y finalmente la posibilidad de reconfigurar la arquitectura del sistema para mitigar los efectos de fallas en el sistema o en sus componentes.

El CTF basa su funcionamiento en la redundancia, que puede manifestarse de dos maneras: redundancia física (hardware) y lógica. Ésta área activa de investigación, define dos tipos de sistemas con tolerancia a fallos, cuya diferencia radica en si se detecta la falla o no. Definiéndose por tanto los sistemas de control activos con tolerancia a fallos (CATF) y los de control pasivo con tolerancia a fallos (CPTF). En esta investigación, se utilizará principalmente el enfoque de CATF. Un sistema CATF generalmente requiere la implementación de un módulo de diagnóstico y detección de fallas (DDF) y de un bloque reconfigurador del algoritmo de control. El

principal propósito del módulo DDF es detectar, aislar e identificar fallas, determinando cuáles afectan la disponibilidad y seguridad del sistema. La tarea de reconfiguración del controlador se encarga de recalcular los parámetros del mismo para reducir los efectos que las fallas podrían producir en el sistema [10-12].

El uso de esquemas CTF en sistemas de distribución eléctricos pretende resolver cuestiones relacionadas con mitigar los efectos de apagones y recuperar el suministro de energía en los sectores de la red sin fallos. Adicionalmente, resulta importante mencionar la fuerte dependencia que los sistemas de control en sistemas eléctricos tienen con las mediciones de los parámetros de la red, por lo que las estrategias de control que mitiguen fallas en los sensores, son de enorme aplicación práctica.

Por tanto, los sistemas CTF son altamente requeridos en el diseño de las redes inteligentes (Smart Grids) para incrementar la confiabilidad y seguridad en sus arquitecturas. Una rápida restauración del sistema de distribución ayudaría a reducir índices de calidad que las empresas de distribución miden, por ejemplo: SAIFI (índice de duración promedio de fallas en el sistema) y SAIDI (frecuencia de interrupción promedio del sistema).

A pesar de que el estado del arte en automatización de los sistemas de distribución eléctricos y las tecnologías que están relacionadas en ese campo es impresionante y existen gran cantidad de contribuciones; no se ha abordado con detalle suficiente la problemática de auto-sanación de la red eléctrica y las oportunidades de investigación en ésta área son muy amplias [13].

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo General

El principal objetivo de ésta investigación es el desarrollar estrategias de monitoreo, diagnóstico y control tolerante a fallos (auto-sanación) para redes de distribución eléctrica con generación distribuida y fuentes de energía renovable, para mejorar la confiabilidad del sistema. Las funciones principales de ésta técnica son: detección automática de fallas, diagnóstico y mitigación de las mismas. La microrred podrá operar de forma independiente o conectada a la red principal.

### 4.2 Objetivos Especificos

- 1 Proponer diferentes metodologías de CTF, tales como enfoques basado en datos, modelos, control adaptativo (MRAC), predictivo (MPC) e inteligente (difuso, neuronal y neuro-difuso).
- 2 Desarrollar estrategias de despacho óptimo de energía en la microrred, operando en forma independiente o conectada a la red.
- 3 Desarrollar un ambiente de pruebas estándar para probar los algoritmos de control.
- 4 Evaluar los diferentes algoritmos de CTF para fallas de magnitudes diversas y condiciones de operación distintas.
- 5 Desarrollar un prototipo de microrred para pruebas de hardware-in-the-loop.

## 5. ESTADO DEL ARTE

Para obtener los mejores resultados en ésta investigación, se proponen seguir la siguiente metodología:

### Revisión del estado del arte

Este paso consiste en conseguir información confiable, de alto contenido científico/técnico acerca del tema; organizarla y estudiar para obtener conocimientos específicos sobre problemas y soluciones relacionados con la temática de investigación. El resultado esperado de éste paso es escribir un marco teórico detallado acerca del tema.

### Desarrollar un plan de solución

Una vez que la información ha sido analizada, es posible seleccionar alternativas de solución con metodologías existentes y seleccionar de forma adecuada componentes de hardware, software y algoritmos que se requerirían. En éste punto de la investigación, todos los gastos relacionados a su desarrollo deberían conocerse con detalle.

### Recolección de datos de campo

En virtud de que el desarrollo tecnológico pretende acoplarse a los requerimientos del mundo real, harán falta mediciones de una red de distribución real, de forma que el ambiente de prueba se adecúe a ésta información. Los resultados esperados de ésta etapa son: Un registro completo de la operación de un alimentador del sistema distribución de la ciudad de Cuenca. Adicionalmente, datos de mediciones de radiación solar y velocidad del viento serán recolectados.

### Desarrollo de la plataforma de pruebas (testbed)

Ésta etapa está relacionada con la generación de un modelo del sistema utilizando los datos de campo del

punto anterior. Se generará por tanto, un estudio de caso al que se aplicarán las estrategias de CTF. En principio, una configuración de microrred típica se adaptará a los datos del sistema, cuya arquitectura se ilustra en la Fig. 1.

Figura 1. Configuración típica de una microrred

Considerando investigaciones previas, un sistema de potencia híbrido eólico-diesel ha sido implementado en Matlab/Simulink, cuyo detalle se ilustra en las Figs. 2 y 3.

Figura 2. Hybrid wind-diesel power system architecture

La arquitectura de la Fig. 2 muestra un generador diesel compuesto por dos máquinas: una máquina diesel y un generador síncrono. Adicionalmente, una turbina eólica con un generador de inducción han sido conectados al sistema al igual que un sistema de almacenamiento de energía a través de convertidores electrónicos de potencia. Otra FER conectada al sistema es un arreglo de fotovoltaicos (PV) que transforman la irradiación solar en energía eléctrica.

Figura 3. Sistema de potencia híbrido eólico-diesel en Simulink.

#### Desarrollo de los algoritmos

Dos técnicas de control se usarán principalmente para el desarrollo de los algoritmos de control con tolerancia a fallos: control de modelo predictivo (MPC) y control de modelo de referencia (MRAC) combinado con técnicas de control inteligente como redes neuronales, control difuso, redes bayesianas y algoritmos genéticos.

#### Análisis de resultados

Los análisis de los resultados deben realizarse de manera cuidadosa, de forma que sea posible concluir qué técnica ó qué combinaciones de técnicas de control ofrecen mejores resultados. Un marco metodológico de pruebas de experimentos se obtendrá como resultado de ésta etapa.

#### Generación de reportes y artículos

Toda investigación científica debe generar reportes bien documentos, lo cual será parte de ésta investigación también y adicionalmente se complementarán los reportes con artículos a enviarse a revisión a revistas y congresos internacionales para su publicación.

## 6. METODOLOGÍA

La metodología será:

- Revisión del estado del arte
- Desarrollar un plan de solución
- Recolección de datos de campo
- Desarrollo de la plataforma de pruebas (testbed)
- Desarrollo de los algoritmos
- Análisis de los resultados
- Generación de reportes y artículos

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zhang, Y. M. and Jiang, J. (2001), Integrated active fault-tolerant control using IMM approach, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 37, no. 4, pp. 1221-1235.
- [2] Zhang, Y. M. and Jiang, J. (2002), An active fault-tolerant control system against partial actuator failures, IEE Proceedings ¿ Control Theory and Applications, vol. 149, no. 1, pp. 95-104.
- [3] Zhang, Y. M. and Jiang, J. (2008), Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, Annual Reviews in Control, vol. 32, no. 2, pp. 229-252.
- [4] Zhang, Y. M. and Jiang, J. (2003), Fault tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, vol. 39, no. 3, pp. 838-848.
- [5] Blanke, M., Izadi-Zamanabadi, R., Bogh, R. & Lunau, Z. (1997), Fault tolerant control systems ¿ a holistic view, Control Engineering Practice, vol. 5, no. 5, pp. 693-702.
- [6] Mikic-Rakic, M., Mehta, N. & Medvidovic, N. (2002), Architectural Style Requirements for Self-Healing Systems, Technical Report of Computer Science Department, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA.
- [7] Kahrobaeian, A., Mohamed, Y.A.-R.I. (2012), Smart control interface for robust operation of DG units in grid connected and islanded modes, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp.1-8, 16-20 Jan. 2012.
- [8] Jauch, E. T., Smart grid volt/var management: challenges of integrating distribution DG, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp.1-5, 16-20 Jan. 2012.
- [9] Ha, B., Lee, S., Shin, C., Kwon, S., Park, S., & Park, M. (2009), Development of intelligent distribution automation system, 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia & Pacific, p. 1.

- [10] Thompson M., Martini T. and Seeley N. (2011), Wind Farm Volt/VAR Control using a Real-time Automation Controller, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- [11] Thompson, M., and Kopf, D. (2009). Reactive power control system for wind farm application using IEC 61850, Proceedings of the 11th Annual Western Power Delivery Automation Conference, Spokane, WA.
- [12] Craig, D. and Befus, C. (2006), Implementation of a distributed control system for electric distribution circuit reconfiguration, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp.342-347, 21-24 May 2006.
- [13] El-Khattam, W., Bhattacharya, K., Hegazy, Y., Salama, M. M. A. (2004), Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684.
- [14] AlHajri, M. F., El-Hawary, M. E. (2007), Optimal distribution generation sizing via fast sequential quadratic programming, 2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, pp.63-66, 10-12 Oct. 2007.
- [15] Li, C., et al (2012), Energy management system architecture for new energy power supply system of islands, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp.1-8, 16-20 Jan. 2012.
- [16] Wang, C., Liu, M., and Guo, L., Cooperative operation and optimal design for islanded microgrid, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp.1-8, 16-20 Jan. 2012.
- [17] Zhang, Y. M. and Chamseddine, A. (2011), Fault tolerant flight control techniques with application to a quadrotor UAV testbed, In Automatic Flight Control Systems ¿ Latest Developments, Ed. by T. Lombaerts, InTech Open Access Publisher, ISBN: 978-953-308-85-1.
- [18] Guo J., Tao G., Liu Y. (2011). A multivariable MRAC scheme with application to a nonlinear aircraft model. Automatica, vol. 47, no. 4, pp. 804-812.
- [19] Maciejowski, J. M. & Jones, C. N. (2003). MPC fault-tolerant flight control case study: flight 1862, IFAC Symposium on Safeprocess, Washington D.C., USA.
- [20] Minchala, I., Vargas-Martínez, A., Zhang, Y. M., Garza-Castañón, L., and Viola, J. (2012), Model-based control approaches for optimal integration of a hybrid wind-diesel power system in a microgrid, Submitted to 2nd International Conference on Smart Grids and Green Systems, Germany.
- [21] Minchala, I., Vargas-Martínez, A., Zhang, Y. M., and Garza-Castañón, L. (2012). A model predictive control approach for optimal integration of a diesel generator as a frequency and voltage leader in a microgrid, Submitted to 2013 European Control Conference, Zurich, Switzerland.
- [22] Parker, M., Ng, C., and Ran, L. (2011). Fault tolerant control for a modular generator-converter scheme for direct drive wind turbines, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 305-315.
- [23] Sloth, C., Esbensen, T. and Stoustrup, J. (2011), Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines, Mechatronics, vol. 21, pp. 645-659.
- [24] Wei, X. and Verhaegen, M. (2011), Sensor and actuator fault diagnosis for wind turbine systems by using robust observer and filter, Wind Energy, vol. 14, pp. 491-516.
- [25] Kamal, E., Aitouche, A., Ghorbani, R., and Bayart, M. (2012). Robust fuzzy fault-tolerant control of wind energy conversion systems subject to sensor faults, IEEE Tran. on Power Electronics Sustainable Energy, vol. 3.
- [26] Fan, L. and Song, Y. (2012), Neuro-adaptive model-reference fault-tolerant control with application to wind turbines, IET Control Theory & Applications, vol. 6, pp. 475-486.
- [27] Badihi, H., Zhang, Y. M., Hong, H. (2012), Fuzzy gain-scheduled active fault-tolerant control of a wind turbine, Journal of the Franklin Institute, Submitted and under review.
- [28] Badihi, H., Zhang, Y. M., Hong, H. (2012), Wind turbine torque actuator fault-tolerant control using fuzzy modeling and identification approach, To be submitted soon.
- [29] Badihi, H., Zhang, Y. M., Hong, H. (2012), Fault-tolerant control design for a large off-shore wind turbine using fuzzy gain-scheduling and signal correction, Submitted to 2013 American Control Conference, Washinton DC, USA.
- [30] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G. (2009), Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
- [31] Jonkman, J., and Buhl, M. (2005), FAST User¿s Guide, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
- [32] Jiang, J., and Zhang, Y. M. (2003), Fault diagnosis and reconfigurable control of a pressurizer in a nuclear power plant, Preprints of the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Washington, D.C., USA, June 9-11, 2003, pp. 1095-1100.
- [33] Jiang, J., and Zhang, Y. M. (2003), Integrated diagnosis and reconfigurable control for actuator and sensor faults in a pressurizer in a nuclear power plant, Third Int. DCDIS Conference on Engineering Applications and Computational Algorithms, Guelph, Canada, May 15-18, 2003, pp. 64-69. [43] Mahmoud, M., Jiang, J., and Zhang, Y. M. (2003), Active Fault Tolerant Control Systems:
- [34] Mahmoud, M., Jiang, J., and Zhang, Y. M. (2003), Active Fault Tolerant Control Systems: Stochastic Analysis and Synthesis, Springer-Verlag, Berlin, Germany (ISBN: 3-540-00318-5).
- [35] Jiang, B. Mao, Z., Yang, H., and Zhang, Y. M. (2009), Fault Diagnosis and Fault Accommodation for Control Systems, Chinese National Defence Publisher (ISBN: 9787118060843).
- [36] CanmetEnergy Leadership in ecoInnovation. Smart Grid in Canada 2011-2012. <http://canmetenergy.nrcan.gc.ca/sites/canmetenergy.nrcan.gc.ca/files/files/pubs/2012-224-eng.pdf>
- [37] Canadian Electricity Association. The smart grid a preagmatic approach. <http://www.electricity.ca/media/SmartGrid/SmartGridpaperEN.pdf>
- [38] <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/introducing-smart-grids-to-canada/1012341>.

article

[39] S. Harris. (2012) Introducing smart grids to Canada. <http://www.cbc.ca/news/canada/story/2011/03/11/f-power-2020-smart-grid.html>

[40] Smart Grids in the North American context: a policy leadership conference a US-Canada clean energy dialogue event. [http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart\\_grid/Smart\\_Grids\\_in\\_a\\_North\\_American\\_Context\\_English.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grids_in_a_North_American_Context_English.pdf)

## 8. RESULTADOS ESPERADOS

Los algoritmos de CTF para una óptima integración de GD en redes de distribución eléctrica incrementarán su confiabilidad, reducirán los índices del SAIDI y SAIFI. Además, se reducirá el consumo de combustible fósil debido al uso de FER, garantizando cubrir la demanda y la calidad de la energía.

## 9. TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y/O SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

...

## 10. IMPACTOS DEL PROYECTO

Adicionalmente, se espera obtener lo siguiente:

- Un modelo de prueba estándar, microrred eléctrica
- Algoritmos de CTF adaptados al modelo
- Resultados de simulaciones y experimentos en diferentes escenarios de funcionamiento del modelo de prueba
- Artículos científicos

## 11. INFORMACIÓN DE COFINANCIADORES (en caso de que existieran)

