

Sistemas de Control Tolerante a Fallas en Redes de Distribución de Energía

Adriana Vargas-Martínez* Luis Eduardo Garza-Castañón*
Ruben Morales-Menendez*

* *Tecnológico de Monterrey, Monterrey NL México,*
{*adriana.vargas.mtz, legarza, rmm*} @itesm.mx

Abstract: Se presentan dos *Sistemas de Control Tolerante a Fallas (SCTF)* aplicados a Redes de Distribución de Energía. Estos sistemas están diseñados utilizando diferentes técnicas basadas en el Control Adaptable por Modelo de Referencia. Dichos sistemas fueron probados ante diferentes esquemas de falla: 1) el desempeño del actuador de la máquina Diésel se reduce (40 % y 80 %), 2) se conecta a la micro red una carga de 0.5 MW y 3) una falla trifásica con duración de 0.5 segundos es introducida a la micro red. Es importante recalcar que los métodos propuestos han podido corregir los escenarios de falla aplicados. Los resultados de la simulación muestran un rendimiento superior a técnicas de control clásicas.

Keywords: Sistemas de Control Tolerante a Fallas, Control Adaptable, Control Predictivo, MRAC, MPC.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática mundial alrededor de la energía gira en torno al balance de la demanda de energía y la capacidad de generación instalada, además de la consecución de objetivos como la disminución del consumo de combustibles fósiles, operación estable de los sistemas eléctricos, operación económica más conveniente y mayor penetración de fuentes de energía renovable. Típicamente los sistemas de potencia entregan energía a los usuarios a través de los subsistemas de generación, transmisión y distribución. Ese solía ser el escenario en los sistemas eléctricos de potencia, en el que los consumidores únicamente consumían; sin embargo, actualmente la integración de unidades de generación distribuida brinda mayor protagonismo a los consumidores, generándose el concepto de micro redes eléctricas.

Esta investigación que es una extensión de los trabajos de Minchala-Avila et al. (2013) y Vargas-Martínez et al. (2014) presenta diferentes metodologías de diseño de *SCTF* para controlar una unidad de generación maestra en una microred, en este caso particular un generador diesel.

Los objetivos de control son mantener los niveles de voltaje y frecuencia en los terminales del generador dentro de límites de operación estables y cubrir la demanda de carga. Este artículo propone un caso de un *SCTF* aplicado a una microred. La estructura de este artículo es la siguiente: en la sección 2 se describe el sistema de estudio. En la sección 3 se revisan los diferentes *SCTF*, la sección 4 presenta un caso de estudio en donde se aplicó un *SCTF*. En la sección 5 se discuten los resultados y en la sección 6 se concluye la investigación.

* Este trabajo fué parcialmente apoyado por *Tecnológico de Monterrey* a través de las cátedras de investigación en *Control Supervisorio y Avanzado y Autotrónica*

2. RED DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA (MICRORED)

La operación de las microredes ofrece distintas ventajas a los usuarios de la red, ya que mejora la eficiencia de la energía, reduciendo las pérdidas por transmisión y distribución, mejoran la confiabilidad y resiliencia, reducen el impacto ambiental mejorando la red operativa.

Además la creciente demanda del mundo por una energía más accesible, eficiente, generada y distribuida con un mínimo impacto ambiental, en conjunto con una alta eficiencia, confiabilidad, operabilidad en los sistemas de generación de energía llevan a la necesidad de diseñar redes de energía con la característica de que sean tolerantes a fallas para así garantizar las características mencionadas. Una microred con características de un control tolerante a falla además de distribuir la energía de manera eficiente es capaz de corregir y prevenir situaciones de emergencia como fallas, cortes de energía, perturbaciones y cambios en la demanda de energía de los usuarios.

Una configuración típica de una microred consiste en una unidad de generación distribuida, cargas controlables y unidades de almacenamiento de energía. El generador de la máquina diesel está compuesto de dos máquinas: la máquina diesel y la máquina síncrona.

En la Fig. 1 se puede observar el esquema de la máquina diesel en donde el actuador es modelado por un sistema de primer orden con ganancia K_a y constante de tiempo T_a . El bloque de máquina diesel contiene al sistema de combustión, y es el responsable de simular el movimiento de los pistones y en consecuencia el cigüeñal, para así generar el torque $T(s)$ en el eje de la máquina. También es modelado el uso del tiempo muerto y una constante de torque K_b . El bloque del volante de inercia (*flywheel*) es una aproximación de la compleja dinámica de la inercia

generada dentro de la máquina, mientras que representa el coeficiente de fricción. La salida $x_2(t)$ representa la velocidad angular del eje de la máquina.

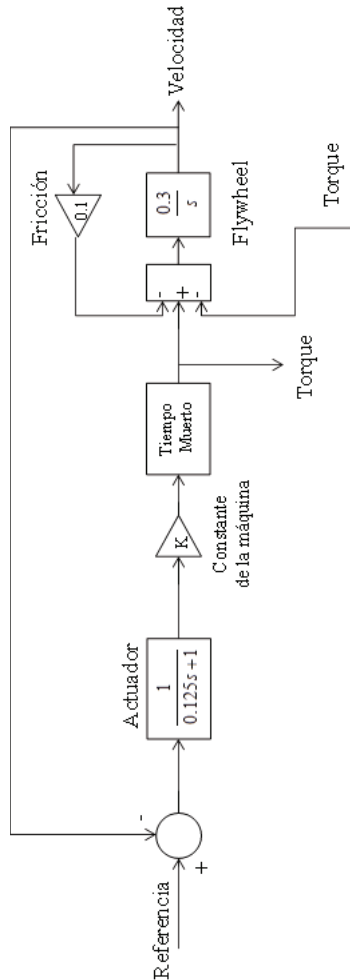


Fig. 1. Diagrama de bloques de una máquina diesel.

Por otra parte, $d(s)$ es utilizado para modelar los cambios de carga en el eje del rotor. El modelo continuo en espacio de estados de la máquina diesel es:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{1}{T_a} x_1(t) + \frac{K_a}{T_a} u(t) + d(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \gamma K_b x_1(t - \tau) - \rho \gamma x_2(t) + d(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Para la máquina síncrona, el eje de la máquina es manejado por un generador de fuerza motriz ya sea: vapor, turbina hidráulica o una máquina diesel. El modelo en espacio de estados de la máquina síncrona utilizando ecuaciones dinámicas con dq (cuadratura directa) como marco de referencia, a través de la transformación de *Park* para una carga pura resistiva RL conectada a la máquina síncrona se sumaría así, Minchala-Avila et al. (2013):

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}v_F \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(R_s + R_L) & \omega L_s & 0 \\ -\omega L_s & -(R_s + R_L) & -\omega M_s \\ 0 & 0 & -R_F \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_F \end{bmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_s \\ 0 & L_s & 0 \\ M_s & 0 & L_F \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

donde $[i_d \ i_q \ i_F]^T$ son el dq del estator y las corrientes de campo, respectivamente; R_s y R_F son las resistencias del estator y la corriente; L_s , L_m , y L_F son la inductancia del estator, la inductancia magnética, y la inductancia de campo; M_s representa la inductancia mutua; $\omega = 2\pi f$ es la velocidad eléctrica; v_d y v_q son los voltajes dq del estator, y v_F es el voltaje de campo que es usado como ley de control.

Además, el generador de turbina eólica, es seleccionado como generador de fuerza motriz y generador de inducción para convertir energía. Esta combinación de turbina eólica con máquina asíncrona es el sistema comercial que comúnmente se encuentra y es capaz de generar hasta 3 MW, Lee et al. (2008), Duan et al. (2008).

La microrred también cuenta con un sistema de almacenamiento de energía integrado por una batería eléctrica el cual convierte la energía química almacenada en energía eléctrica, Duan et al. (2008). La configuración de la microrred es mostrada en la Fig. 2. En esta figura el acrónimo *DC* significa controlador distribuido, *CB* es un breaker de circuito. Minchala-Avila et al. (2013) presenta los detalles de modelación para diseño de controladores de los componentes de ésta microrred.

3. SISTEMAS DE CONTROL TOLERANTE A FALLAS (SCTF)

En la actualidad la sociedad demanda no solamente una mayor cantidad, sino una mejor calidad en los productos y servicios, lo cual a su vez presiona a las empresas e industrias a contar con sistemas de producción con grados de disponibilidad elevados y altamente confiables. El surgimiento de fallas inesperadas tanto en las líneas de producción como en los sistemas de abastecimiento de energía, agua, comunicaciones, etc. trae consigo pérdidas económicas cuantiosas y el potencial de dañar equipos y vidas humanas. Esto ha incentivado a los investigadores a poner atención especial en el diseño de métodos y sistemas que puedan minimizar el impacto de las fallas cuando estas se presentan.

Los *SCTF* se han desarrollado con la principal finalidad de permitir la operación del proceso o sistema aún en condiciones de falla. Esta operación puede ser de forma normal o degradada, y evitando al máximo una interrupción completa del funcionamiento que ponga en riesgo el servicio/producción o la integridad del personal y los equipos. Algunos de las áreas donde se han aplicado los *SFTC* incluyen: sistemas aeroespaciales, industria automotriz, procesos industriales, redes de abastecimiento de agua y de energía eléctrica, Blanke et al. (2003).

Los *SCTF* se pueden clasificar en activos y pasivos. En los métodos activos cuando una falla ocurre el sistema de con-

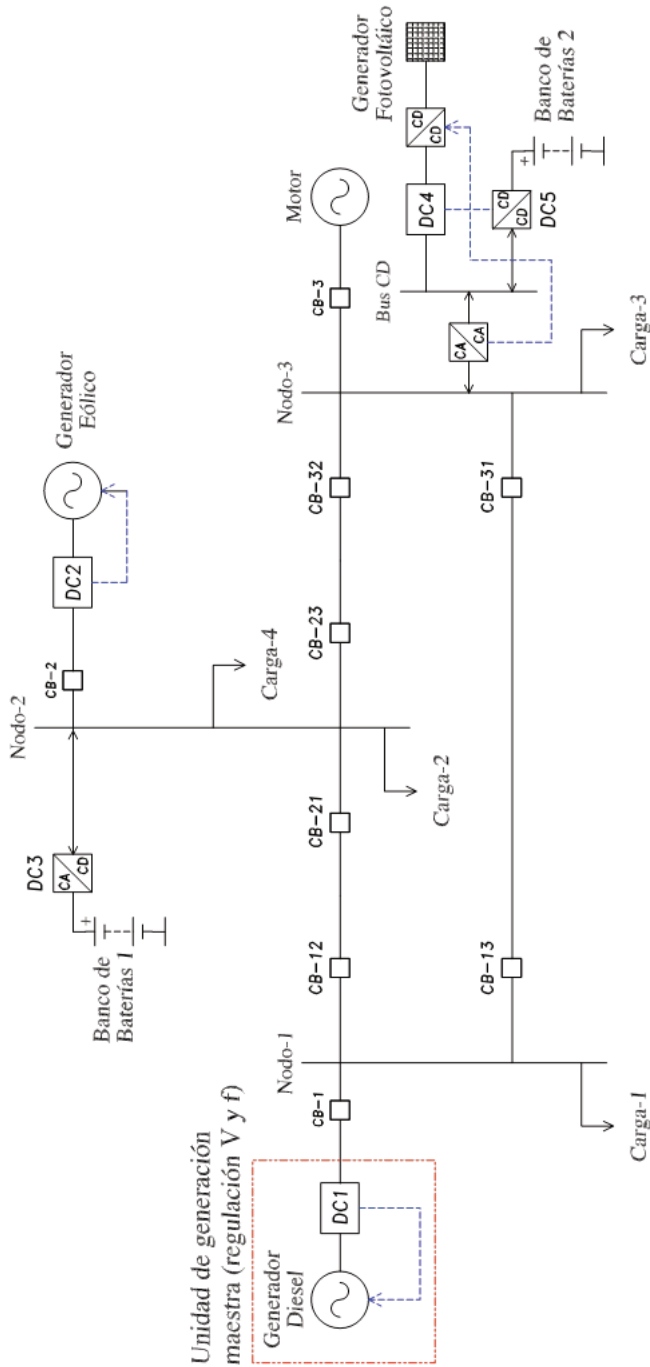


Fig. 2. Micro-red eléctrica.

control se reconfigura utilizando algunas de las propiedades del sistema original, con el fin de mantener un desempeño aceptable, además de estabilidad y robustez. En algunos casos se acepta un desempeño degradado del sistema. En los métodos pasivos el sistema tiene un esquema de control fijo prediseñado para controlar el efecto de ciertas fallas y tener un grado de robustez aceptable, Blanke et al. (2001).

Para implementar los *SCTF* activos se requieren de dos etapas: detección y aislamiento de la falla, y reconfiguración o acomodo del controlador. Para realizar la primera parte, se han propuesto diversas técnicas cuantitativas, cualitativas o basadas en información histórica,

Venkatasubramanian et al. (2003a), Venkatasubramanian et al. (2003b), Venkatasubramanian et al. (2003c). Para realizar la reconfiguración del controlador se utilizan diferentes técnicas, tales como: métodos pseudo-inversos, seguimiento de modelo, y optimización. Los métodos de acomodo pueden realizarse por control adaptable o por switcheo de un banco de controladores, Lunze and Richter (2006).

La experiencia adquirida en las últimas décadas, Zhang and Jiang (2008), demuestra que los objetivos se pueden alcanzar por medio de técnicas de control como el *Control Adaptable por Modelo de Referencia*. Además, en años recientes, los métodos de inteligencia artificial, tales como redes neuronales, sistemas difusos y algoritmos genéticos, se han incorporado a los *SCTF*, dando lugar a esquemas más flexibles y robustos, Garza-Castañón and Vargas-Martínez (2010).

Una de las principales razones por la cual se utilizan métodos basados en inteligencia artificial es porque estos métodos pueden reproducir el comportamiento de modelos no lineales basándose en los datos del proceso y no en el modelo matemático. La metodología de los *SCTF* ayuda a evadir las fallas mencionadas, mediante el uso de diferentes disciplinas y sistemas teóricos que al combinarse crean redundancia en el proceso, lo cual hace que este sea estable y adaptable ante dichas fallas, Patton (1997). Es decir, la meta de los *SCTF* es proveer un sistema de auto reparación al proceso en el cual las fallas son detectadas y aisladas utilizando un sistema de diagnóstico de fallas que detecta los modos de fallas y la manera en que el proceso es afectado en cuanto a seguridad y disponibilidad. Después de que las fallas son detectadas, estas son reparadas mediante un sistema que rediseña el controlador para evitar fallas críticas y procurar que el proceso siga operando con normalidad, Blanke et al. (2003).

4. CASO DE ESTUDIO: REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

Como caso de estudio se analizarán dos *SCTF* basadas en *Control Adaptable por Modelo de Referencia (MRAC)*. El *esquema-1* utiliza un *MRAC*, combinado con un controlador *PID*, sintonizado por un *Algoritmo Genético (AG)* para controlar frecuencia y un controlador *MRAC* clásico para controlar el voltaje.

El *esquema-2* utiliza el mismo tipo de controlador para controlar frecuencia pero para controlar voltaje utiliza un controlador *MRAC* junto con una *Red Neuronal Artificial (RNA)*.

4.1 Esquema 1: *MRAC* control-voltaje y *MRAC+PID(AG)* control-frecuencia.

El controlador *MRAC* implementa un controlador en lazo cerrado que involucre a los parámetros que deben de ser optimizados para modificar la respuesta del sistema y alcanzar el valor final deseado. El mecanismo de adaptación ajusta los parámetros del controlador para que la salida del proceso sea igual que la salida del modelo de referencia. El modelo de referencia es especificado como el modelo con

el comportamiento ideal deseado. El controlador *MRAC* se diseñó utilizando la teoría de *Lyapunov*, Astrom and Wittenmark (1995). El procedimiento matemático para el desarrollo de este tipo de control empieza con la definición de la ecuación del error:

$$e = y_{proceso} - y_{referencia} = G_{proceso}u - G_{referencia}u_c \quad (3)$$

donde e , $y_{proceso}$, $y_{referencia}$, $G_{proceso}$, u , $G_{referencia}$ y u_c representan el error, salida del proceso, salida de la referencia, modelo del proceso, entrada del proceso, modelo de referencia y entrada de control, respectivamente.

Para un sistema de segundo orden, el esquema *MRAC* cuenta con dos parámetros de adaptación: una ganancia adaptiva ante-alimentada θ_1 , y una ganancia adaptiva retro-alimentada θ_2 . Estos parámetros de adaptación serán actualizados para seguir al modelo de referencia. Entonces, la entrada se re-escrive en términos de los parámetros de adaptación:

$$u = \theta_1 u_c - \theta_2 y_{proceso} \quad (4)$$

El teorema de estabilidad de *Lyapunov* establece lo siguiente: Si existe una función $V : R^n \rightarrow R$ que sea positiva definida y su derivada es negativa semidefinida; entonces, la solución $x(t) = 0$ es estable si la $\frac{dV}{dt}$ es negativa definida la solución será asintóticamente estable. V representa la función de *Lyapunov* del sistema, por lo tanto si:

$$\frac{dV}{dt} < 0 \text{ y } V(x) \rightarrow \infty \text{ entonces } \|x\| \rightarrow \infty \quad (5)$$

La solución es asintóticamente estable. Para diseñar el controlador *MRAC* basado en la teoría de *Lyapunov*, el primer paso es derivar una ecuación diferencial del error que contenga a los parámetros de adaptación. Entonces, la función de *Lyapunov* y el mecanismo de adaptación necesitan ser establecidos para reducir el error a cero. La derivada de la función de *Lyapunov* usualmente es negativa semidefinida. Por lo tanto, determinar la convergencia de los parámetros es necesaria para establecer una excitación persistente y una observabilidad uniforme en el sistema y en la señal de referencia, Nagrath and Gopal (2006). La función de *Lyapunov* propuesta es, Vargas-Martínez et al. (2013):

$$V(e, \theta_1, \theta_2) = \frac{1}{2} \left(a_{1r} e^2 + \frac{1}{\gamma b_r} (b_r \theta_1 - b_r)^2 + \frac{1}{\gamma b_r} (b_r \theta_2)^2 \right) \quad (6)$$

donde b_r , γ y $a_{1r} > 0$. La ecuación anterior será cero cuando el error sea cero y los parámetros del controlador sean iguales a los valores deseados. La función de *Lyapunov* es válida si su derivada es negativa. Por lo tanto, la derivada de la función anterior es:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -e \frac{d^2 e}{dt^2} - a_{0r} e^2 + \frac{1}{\gamma} (b_r \theta_1 - b_r) \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \gamma u_c e \right) \\ & + \frac{1}{\gamma} (b_r \theta_2) \left(\frac{d\theta_2}{dt} - \gamma y_p e \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Los parámetros de adaptación seleccionados para asegurar que el error sea cero son, Astrom and Wittenmark (1995):

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \gamma u_c e \text{ y } \frac{d\theta_2}{dt} = \gamma y_p e \text{ entonces } \dot{V} = -e \frac{d^2 e}{dt^2} - a_{0r} e^2 \quad (8)$$

MRAC+PID(AG) control-frecuencia. Para superar las limitaciones de una estructura clásica *MRAC* (umbral de acomodo de la falla menor que cuando se combina con

otras estructuras), un controlador *PID* ideal es introducido ante-alimentadamente en la estructura del *MRAC*, Fig. 3. Los parámetros del *PID* fueron obtenidos utilizando un *AG*. En este esquema, el desempeño deseado en lazo cerrado del sistema es establecido como el desempeño del sistema cuando no existen fallas en el mismo.

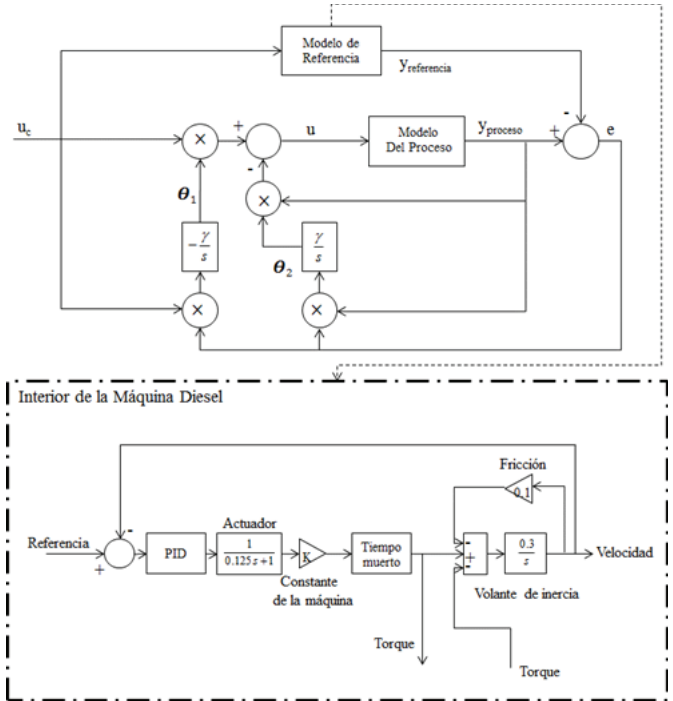


Fig. 3. MRAC+PID(AG) control-frecuencia.

MRAC control-voltaje. Este controlador utiliza la teoría de control *MRAC* por *Lyapunov* y su estructura se puede observar en la Fig. 4.

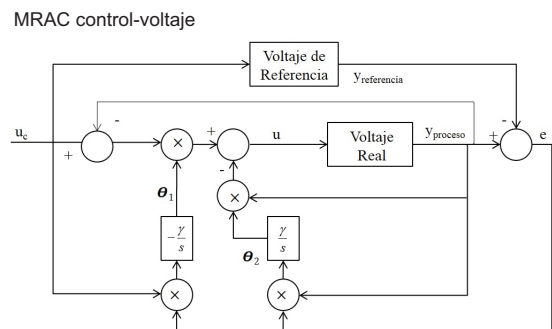


Fig. 4. MRAC control-voltaje.

4.2 Esquema 2: MRAC+RNA control-voltaje y MRAC+PID (AG) control-frecuencia.

Esta metodología integra al control *MRAC* una red neuronal (*RNA*) junto con un *PID* sintonizado por un *AG* para el control de voltaje y el controlador de frecuencia es el mismo que el utilizado en el *esquema-1*.

MRAC+RNA+PID control-voltaje. Para incrementar el umbral de acomodo de la falla del sistema, una *RNA* junto con un *PID* fueron integrados a la estructura del controlador *MRAC*, Fig. 5. En este nuevo esquema el

controlador *PID* ayuda a atenuar el sobreimpulso y bajoimpulso del sistema, además ayuda a obtener el tiempo de estabilización y de elevación deseados.

La *RNA* ayuda a atenuar el efecto de la falla en el sistema. Para crear la *RNA*, las entradas del proceso sin fallas fueron introducidas como parámetros de entrenamiento de la red. Esta red es una *RNA* de dos capas ante alimentada con 20 neuronas escondidas sigmoideas y una neurona lineal de salida. Para entrenar la red se utilizó el algoritmo de *Levenberg-Maquard* de retro propagación.

MRAC RNA+PID control-voltaje

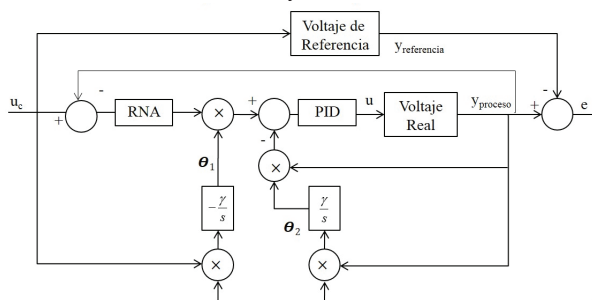


Fig. 5. MRAC RNA+PID control-voltaje.

5. RESULTADOS

Para poder comparar los esquemas propuestos, se simularon diferentes condiciones de operación de la microred y diferentes escenarios de falla:

- (1) El desempeño del actuador de la máquina Diesel se reduce (40 % y 80 %),
- (2) Se conecta a la micro red una carga de 0.5 MW, y
- (3) Una falla trifásica con duración de 0.5 segundos es introducida a la microred

Los dos esquemas propuestos fueron comparados con un controlador base en la librería de *MATLAB*[®] (ejemplo: gobernador y controlador *PI* para control de frecuencia y controlador *IEEE* tipo 1 para controlar el voltaje). La Figs. 6 y 7 muestran la comparación de los resultados.

Como se puede observar en estas figuras, los resultados de la simulación demuestran que el uso de la *RNA* en combinación con el controlador *MRAC* mejora la capacidad de tolerancia de la falla, lo cual se puede observar claramente cuando la falla del actuador es del 80 %.

En la Fig. 6 se puede observar que para el control de frecuencia con una falla en el actuador de 40 % tanto el *esquema-1* como el *esquema 2*, se tardan en acomodarse la falla alrededor de 45 segundos. Además, la carga de 0.5 MW en ambos esquemas es acomodada en menos de 10 segundos y la falla trifásica es corregida en 20 segundos. Por otra parte, cuando la falla de actuador es de 80 % el *esquema-1* se tarda alrededor de 80 segundos en acomodarse los 3 tipos de fallas simuladas en cambio el *esquema 2* acomoda la falla en el actuador en 30 segundos, la carga de 0.5 MW en 10 y la falla trifásica en 20 segundos. En la Fig. 7 se observa que para el control de voltaje tanto en la falla de actuador del 40 % y 80 % los resultados son muy similares, en ambos casos los esquemas 1 y 2 acomodaron la falla en actuador en alrededor de 25 segundos, la carga de

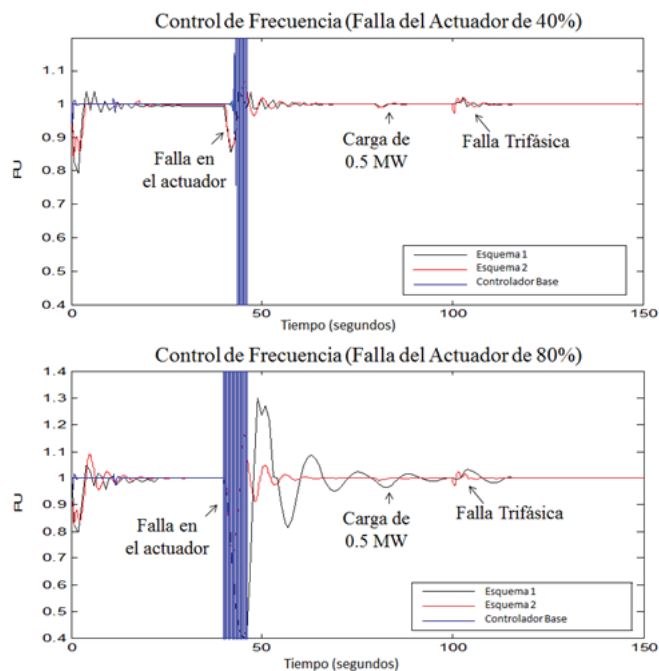


Fig. 6. Comparación de *SCTF* para el control de frecuencia.

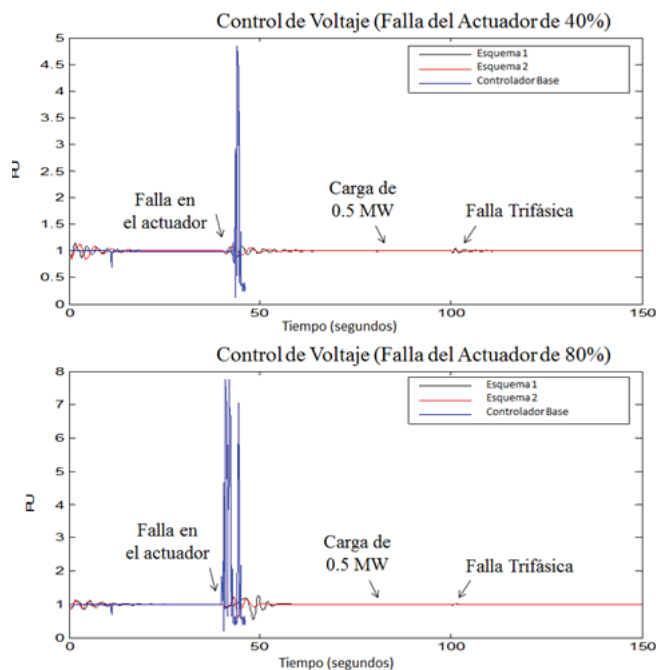


Fig. 7. Comparación de *SCTF* para el control de voltaje.

0.5 MW es prácticamente imperceptible, y la falla trifásica es acomodada en menos de 5 segundos.

También se puede observar que el *esquema-2* fue capaz de acomodarse la falla de actuador tanto del 40 % y 80 %, la conexión de la carga de 0.5 MW y la falla trifásica lo cual llevo a una menor variación en el voltaje y un desempeño mejor en comparación del *esquema-1*.

Por otra parte se puede observar que cuando la falla en el actuador aumenta a un 80 % el *Esquema 1* presenta problemas de oscilación en la frecuencia de la micro red

por un lapso de 90 segundos, mientras que el *esquema-2* rápidamente corrige estas oscilaciones.

Por último, es claramente observable que los esquemas que involucran *MRAC* tienen un mejor desempeño que el controlador base de *MATLAB*[®], el cual al momento de ocurrir la falla se vuelve inestable.

6. CONCLUSIONES

Se desarrollaron diferentes *SCTF* aplicados a una red de distribución de energía aislada. Es importante recalcar que los métodos propuestos han podido corregir los escenarios de falla aplicados. Los resultados de la simulación muestran un rendimiento superior a técnicas de control clásicas, sobre todo cuando se presentan escenarios de fallas en los que los controladores clásicos no son capaces de mantener estabilidad en el sistema. Los *SCTF* están basados en el control adaptable, el cual tiene una inherente capacidad de acomodo de perturbaciones y fallas. Por otra parte la combinación de este tipo de control con otros sistemas como el controlador *PID* o la *RNA*, hacen que se incremente la robustez y umbral de falla del sistema garantizando la estabilidad del mismo.

REFERENCES

- Astrom, K. and Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control*. Addison-Wesley Publishing Company, 2nd edition.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., and Staroswiecki, M. (2003). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer-Verlag, Germany, 1st edition.
- Blanke, M., Staroswiecki, M., and Wu, N. (2001). Concepts and Methods in Fault-Tolerant Control. In *American Control Conf*, 2606–220. USA.
- Duan, Y., Gong, Y., Li, Q., and Wang, H. (2008). Modelling and Simulation of the Microsources within a Microgrid. In *Int Conf on Electrical Machines and Systems*, 2667–2671. China.
- Garza-Castañón, L. and Vargas-Martínez, A. (2010). Artificial Intelligence Methods in Fault Tolerant Control. In In-TECH (ed.), *Chapter of Book Automation, Control-Theory and Practice*. Austria.
- Lee, S., Yim, J., J.H.Lee, and Sul, S. (2008). Design of Speed Control Loop of a Variable Speed Diesel Engine Generator by Electric Governor. In *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1–5. Canada.
- Lunze, J. and Richter, J. (2006). *Control Reconfiguration: Survey of Methods and Open Problems*. ATP, Ruhr-Universität Bochum, Germany.
- Minchala-Avila, L., Vargas-Martínez, A., Zhang, Y., and Garza-Castañón, L. (2013). A Model Predictive Control Approach for Integrating a Master Generation Unit in a Microgrid. In *Conf on Control and Fault-Tolerant Systems*, 674–679.
- Nagrath, I. and Gopal, M. (2006). *Control Systems Engineering*. Anshan Ltd Press, UK, 5th edition.
- Patton, R. (1997). Fault-Tolerant Control: The 1997 Situation. In 3rd *IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, 1033–1055. UK.
- Vargas-Martínez, A., Garza-Castañón, L., Puig, V., and Morales-Menendez, R. (2013). Fault Tolerant Control for a Second Order LPV System using Adaptive Control Methods. In *IFAC Joint Conf 5th Symp on System Structure and Control*, 852–857.
- Vargas-Martínez, A., Minchala-Avila, L., Zhang, L., Garza-Castañón, L., and Badihi, H. (2014). Hybrid Adaptive Fault-Tolerant Control Algorithms for Voltage and Frequency Regulation of an Islanded Microgrid. *Int Trans on Electrical Energy Systems*.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., and Kavuri, S. (2003a). A Review of Process Fault Detection and Diagnosis - Part I: Quantitative Model-based Methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3), 293–311.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., and Kavuri, S. (2003b). A Review of Process Fault Detection and Diagnosis - Part II: Qualitative Models and Search Strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3), 313–326.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., and Kavuri, S. (2003c). A Review of Process Fault Detection and Diagnosis - Part III: Process History based Methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3), 327–346.
- Zhang, Y. and Jiang, J. (2008). Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2), 229–252.