



# CONTROL PASIVO TOLERANTE A FALLOS DE SENSADO EN DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN DINÁMICOS - SVC MEDIANTE UNA ESTRATEGIA HÍBRIDA

## PASSIVE CONTROL TOLERANT TO SENSING FAULTS IN DYNAMIC COMPENSATION DEVICES - SVC THROUGH A HYBRID STRATEGY

Jessica Ramírez <sup>1,\*</sup> , Leony Ortiz <sup>1</sup> , Alexander Aguila <sup>1</sup> 

Recibido: 15-05-2022, Recibido tras revisión: 13-06-2022, Aceptado: 17-06-2022, Publicado: 01-07-2022

### Resumen

En esta investigación se desarrolla un sistema de control tolerante a fallas pasivas, para un compensador reactivo estático acoplado a una microred en modo conectado, orientado a aquellas fallas que resultan de daños comunes en sus sistemas de sensado. El método planteado utiliza un controlador óptimo robusto  $H_\infty$  y redes neuronales artificiales como método de estimación no lineal. La simulación, validación, identificación de la planta y el diseño del controlador se llevan a cabo por medio de un sistema benchmark de una microred, programado en Matlab/Simulink. La investigación muestra valiosos resultados como el mejoramiento en la confiabilidad y resiliencia de los compensadores estáticos ante fallas de sensado, mejoras en el comportamiento de la señal de salida del controlador del compensador estático expuesto a las fallas de sensado y disminución el error con respecto al controlador clásico.

**Palabras clave:** control robusto, DSTATCOM, FTC,  $H_\infty$ , Micro-red, NARX

### Abstract

In this research, a passive fault tolerant control system is developed for a static reactive compensator coupled to a microgrid in connected mode, oriented to those faults that result from common damages in their sensing systems. The proposed method uses an  $H_\infty$  robust optimal controller and artificial neural networks as a nonlinear estimation method. The simulation, validation, plant identification and controller design are carried out using a microgrid Benchmark system, programmed in Matlab/Simulink. The research shows valuable results such as: the improvement in the reliability and resilience of static compensators against sensing failures, improvements in the behavior of the output signal of the static compensator controller exposed to sensing failures and the error decrease with respect to the classic controller.

**Keywords:** DSTATCOM, FTC,  $H_\infty$ , microgrids, NARX, Robust control

<sup>1,\*</sup>Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador.  
 Autor para correspondencia ✉: [jramirezg4@est.ups.edu.ec](mailto:jramirezg4@est.ups.edu.ec)

Forma sugerida de citación: Ramírez, J.; Ortiz, L. y Aguila, A. "Control pasivo tolerante a fallos de sensado en dispositivos de compensación dinámicos - SVC mediante una estrategia híbrida," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 28, pp. 34-43, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.03>.

## 1. Introducción

Las necesidades mundiales de energía continúan incrementándose, debido al aumento de las industrias y a las relacionadas con el transporte. De esta manera, tales requerimientos han llevado al surgimiento de nuevas formas de generación de electricidad a través de recursos de energías renovables y el uso de redes más pequeñas que las tradicionales, conocidas como microrredes (MR) [1–3]. Una MR puede entenderse como un sistema eléctrico en pequeña escala, que contiene varios generadores, cargas y sistemas de almacenamiento de energía distribuidos [1, 4–6].

Esto se debe al surgimiento de nuevos tipos de cargas, tales como vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento que funcionan con corriente directa, que se conectan junto con cargas de corriente alterna, que son más recurrentes en redes domésticas [4]. Las MR mixtas o híbridas AC/DC han tomado especial relevancia para los investigadores, debido a la viabilidad ofrecida por cada tipo de MR, con la única necesidad de incluir dispositivos de conversión de energía que funcionan con elementos de electrónica de potencia [7–13].

Debido a sus características, las MR deben ser capaces de funcionar tanto en modo conectado a una red como en modo independiente, y por cada modo debe existir una correcta operación y control, que incluso debe ser capaz de tolerar ciertos problemas y fallas [1, 4, 13, 14].

El control de las operaciones también debe considerar elementos característicos de cierto tipo de generación como eólica y solar, donde la variabilidad e intermitencia son comunes; y estos son aspectos que deben considerarse para una operación continua, estable, segura y resiliente de la MR híbrida. Existen diferencias y cambios significativos a una red eléctrica tradicional, en comparación a las funcionalidades ofrecidas por las MR, especialmente aquellas que operan en AC y DC. En aspectos relacionados con el control y los problemas que podrían ocurrir en la operación, tales cambios están directamente relacionados con la existencia de operaciones de control distribuidas y la existencia de flujos de potencia bidireccionales [15, 16].

Como se indicó previamente, uno de los aspectos más relevantes para el funcionamiento apropiado de las MR es la presencia de control robusto, que debe ser capaz de tolerar la existencia de fallas en varios componentes del sistema de control y de la MR. Durante eventos de falla y de mal funcionamiento de sensores y actuadores de los diferentes subsistemas de la MR, el sistema de control con retroalimentación tradicional puede no ser capaz de garantizar la estabilidad del sistema o el desempeño de todos sus componentes.

Por lo tanto, existen nuevas estrategias para la gestión de este tipo de redes, entre las que pueden mencionarse control tolerante a fallas (Fault Tolerant Controls, FTC por sus siglas en inglés) [1, 13, 14, 17].

Tales estrategias permiten el surgimiento de sistemas de control tolerantes a fallas (Fault-tolerant Control Systems, FTCS por sus siglas en inglés), que pueden superar las deficiencias antes mencionadas [18].

El control tolerante a fallas puede dividirse en dos grupos: control activo (AFTCS), que son aquellos que contienen estrategias de diagnóstico y detección de fallas en tiempo real, a través del uso de información. Los sistemas de control activo también tienen mecanismos de reconfiguración que permiten a la MR mantenerse estable y con un desempeño aceptable, aun cuando existan fallas en varios componentes del sistema [1, 18, 19].

Por otra parte, los controles tolerantes a fallas pasivos son diseñados para tener una estructura robusta única, esto es, no hay manera de que sean reconfigurados automáticamente durante eventos de falla. Otra diferencia es que ellos no consideran la información que un sistema de detección y diagnóstico de fallas (Fault Detection and Diagnosis System, FDD por sus siglas en inglés) puede tener [1, 18].

Los sistemas de control tolerantes a fallas han sido ampliamente estudiados, y existen varias propuestas que operan en modo conectado a una red y también cuando la MR opera en modo independiente. La operación en modo conectado a la red convencional se apoya en los parámetros de la red principal, y la mayoría de las propuestas previamente establecidas están relacionadas con el uso de bancos de capacitores y sistemas de transmisión AC flexibles (Flexible AC Transmission Systems, FACTS por sus siglas en inglés). En el caso de estrategias de control avanzadas, también se utilizan regulaciones de voltaje en las zonas de generación, a pesar de que los controladores pueden estar directamente en el elemento a ser controlado, como se muestra en la Figura 1 [1], [20].

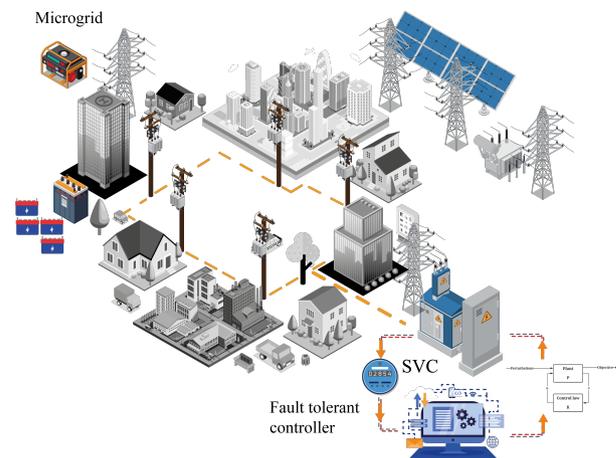


Figura 1. Control tolerante a fallas

Por otra parte, en operación aislada, los investigadores han determinado que existen otras necesidades, tal como la selección correcta del sistema generador,

que viene a ser el líder de frecuencia [20]. Principalmente, cuando existe una alta penetración de fuentes de generación con energías renovables, con sus inherentes características de intermitencia y discontinuidad, se complica el empleo de estrategias de control tradicionales para MR [20].

En [20] se presenta un sistema FTC que permite la tolerancia a fallas mediante un controlador adaptativo basado en modelo, a través de un control PID entonado por un algoritmo genético y una estructura con inteligencia; se afirma que esta estructura garantiza el monitoreo de las condiciones de la MR, lo cual permite la regulación de la frecuencia y la amplitud del voltaje. Se considera la existencia de escenarios de falla, incluyendo fallas en los actuadores, conexión repentina de carga, así como también fallas de corta duración, lo cual permite probar el desempeño del método propuesto.

En [21] se presenta una estrategia FTC para hacer frente a la pérdida de efectividad y fallas inmovilizantes que ocurren en un SVC; la estrategia utilizada en ese documento emplea una técnica adaptativa de retroceso con un control de superficie dinámica (Dynamic Surface Control, DSC por sus siglas en inglés). Los resultados de la investigación muestran que la estrategia puede producir un buen desempeño sobre señales en el sistema a lazo cerrado, bajo la ocurrencia de las fallas descritas.

Otras investigaciones centran su atención en controladores tolerantes a fallas para sistemas de control en un área amplia, pero no se centran en un SVC. El controlador encuentra generalmente la manera de hacer frente a fallas sobre la comunicación de señales para controlar el sistema completo. Otras investigaciones utilizan sistemas de compensación estáticos o dinámicos para controlar el ángulo de máquinas síncronas, donde el control robusto trata de mantener la máquina en buenas condiciones operacionales [22].

## 2. Materiales and métodos

### 2.1. Microredes

En general, las MR son un conjunto revolucionario de elementos que trabajan conjuntamente para generar, transportar y suministrar potencia a un conjunto de cargas en una cierta área geográfica, que pueden operar en forma aislada o con un enlace de interconexión con una red convencional. Esto implica que una MR debe tener elementos de generación y cargas, que buscan un balance constante en función de los recursos disponibles a nivel tecnológico y ambiental. En general, las MR hacen uso de sistemas de generación que aprovechan recursos renovables como agua, viento, calor o radiación solar [23, 24].

Los sistemas de generación y los puntos de consumo están vinculados por sistemas de distribución

que pueden ser AC o DC, como se muestra en la Figura 1, con la correspondiente necesidad de tener elementos de conversión AC/DC o DC/AC. Por otra parte, y debido a las necesidades de cubrir deficiencias que pueden surgir de las implicaciones de un sistema completo, pero con recursos limitados, puede disponerse de sistemas de compensación reactiva e incluso sistemas de almacenamiento, que a largo plazo pueden mejorar la calidad de servicio [25–27].

### 2.2. Red neuronal

Puede concebirse un modelo abstracto bastante sencillo del funcionamiento de una neurona artificial, el cual puede observarse en la Figura 2.

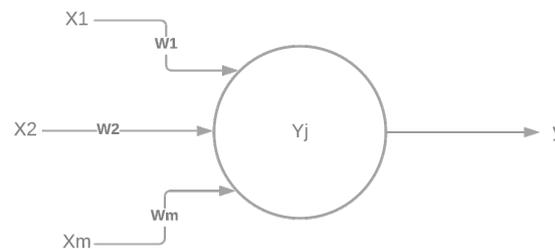


Figura 2. Neurona artificial

La neurona artificial está constituida por un conjunto de pesos representados por los valores  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_m$ , que representan las conexiones sinápticas de una neurona real, un vector  $x$  que contiene las entradas  $y$ , finalmente, una salida de la unidad representada por  $y$ , que es el resultado de una función de activación.

Una red neuronal artificial es la composición computacional de múltiples procesadores elementales que forman un sistema adaptativo que, a través de un algoritmo, es capaz de ajustar sus pesos con el fin de mejorar el desempeño con el empleo de muestras. Una de las principales ventajas de las redes neuronales artificiales es la facilidad de usar data de entrenamiento a través de procesos supervisados y no supervisados. El proceso supervisado ocurre haciendo uso de data conocida de entrada y salida, esperando que la data de salida de la red neuronal sea lo más similar posible a la data de salida disponible. El aprendizaje no supervisado utiliza un conjunto de patrones que son válidos para encontrar estructuras o configuraciones que están presentes en la data [28].

### 2.3. Compensación Estática de VAR (*Static Var Compensation, SVC*)

Dentro de los dispositivos tipo FACT, el compensador reactivo estático está en la categoría de los que tienen una conexión baipás. El dispositivo en cuestión recibe el nombre de TCR y consiste de un inductor controlado por medio de dispositivos de electrónica de potencia

conocidos como tiristores [29]. A través del control correcto del disparo del TCR se obtiene una variación de la reactancia que, a largo plazo, implica un cambio en el consumo de potencia reactiva en el punto de conexión del compensador; entonces es posible mejorar el factor de potencia en dicho punto. El voltaje de la barra también se revisa en este punto [29–32].

El dispositivo es controlado modificando el ángulo de disparo de los elementos de potencia que constituyen el SVC. Esta lógica de control se implementa por lazos de control que pueden contener controladores PI o PID, o incluso opciones más robustas como la que será implementada en esta investigación [33–37]. Los dispositivos de compensación reactiva se utilizan en las MR con el fin de compensar factores de potencia que están fuera de parámetros normales [29–37].

Debido a los efectos de las cargas conectadas al sistema, una alteración del factor de potencia resulta en una afectación del voltaje en las barras del sistema [29–37]. Por otra parte, es usual que los sistemas de generación en la MR requieran consumo o que debido a sus propios principios de generación causen modificaciones en los valores reactivos, los cuales pueden producir una caída del voltaje de salida de las unidades y, por tanto, una caída en la potencia. Este problema puede ser resuelto con la instalación de un SVC [29–37].

## 2.4. H-infinito ( $H_\infty$ )

Se emplea para obtener controladores con desempeño garantizado y que son estables; el uso de estos modelos se presenta como un problema de optimización a través del cual se encuentra un modelo que satisfaga el objetivo. Una de las principales ventajas de este método es que es ampliamente aplicable en sistemas multivariables, mientras que parte de sus desventajas incluyen un alto nivel de conocimiento matemático y un entendimiento del sistema a ser controlado.

El nombre del método se basa en el hecho que la optimización se lleva a cabo en el llamado espacio Hardy, en la mitad positiva del plano complejo, y representa el máximo valor del espacio mencionado, entendido como la máxima ganancia en cualquier dirección y en cualquier frecuencia para un sistema SISO. Es la máxima magnitud de la respuesta en frecuencia. Dentro de sus usos está la reducción del impacto de una perturbación en un sistema a lazo cerrado, que puede verse como estabilidad o desempeño.

La planta tiene entradas exógenas que incluyen una señal de referencia, perturbaciones y señales manipuladas. Por otra parte, existen salidas entre las cuales hay una señal de error que debe ser minimizada y las variables medidas que serán utilizadas como señales de control en el sistema. Las variables manipuladas pueden calcularse por medio de las señales medidas y el valor de  $K$ . La expresión (1) sirve para formular el problema en forma matricial [17, 38, 39].

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = P(s) \times \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

Es posible calcular la dependencia de  $z$  en  $w$  por medio de la transformación fraccional lineal inferior (Lower Linear Fractional Transformation, LFT por sus siglas en inglés) que se muestra en la ecuación (2), donde  $F_l \times (P, K)$  representa el resultado de la LFT que puede ser empleada para encontrar la relación entre  $z$  and  $w$ .

$$\begin{aligned} z &= F_l \times (P, K) \times w \\ F_l \times (P, K) &= P_{11} + P_{12} \times K \times \\ &\quad (I - P_{22} \times K)^{-1} \times P_{21} \end{aligned} \quad (2)$$

De acuerdo con lo anterior, se sabe que el objetivo del método en cuestión requiere encontrar un controlador  $K$  tal que se minimice  $F_l \times (P, K)$  según la norma  $H_\infty$ , siendo la misma aplicable al diseño llevado a cabo por medio de  $H_2$ . Existen algunas técnicas para alcanzar el objetivo, entre las cuales está la parametrización de Youla-Kucera que conduce a controladores de muy alto orden, métodos basados en la solución de dos ecuaciones de Riccati que requieren muchas simplificaciones. Finalmente, el método basado en optimización con una reformulación de Riccati utilizando inecuaciones lineales matriciales, un método que requiere pocas suposiciones [17].

## 2.5. Diseño del controlador tolerante a fallas

La señal de control es manipulada directamente por el controlador, que reemplaza un controlador PI tradicional que fue parte del sistema de control, y cuyo desempeño se compara con el del controlador  $H_\infty$ .

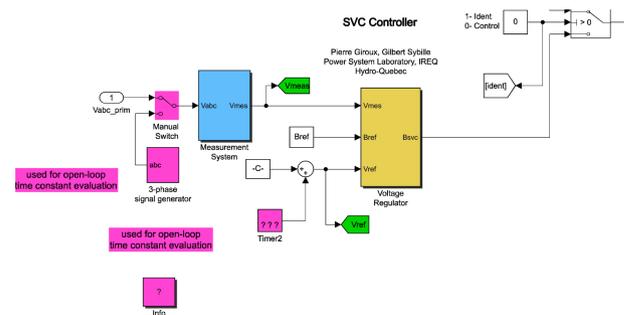


Figura 3. Área del controlador

La Figura 3 ilustra el área del controlador en la cual se inserta el controlador robusto. Puede verse que las variables que se miden son las que corresponden a las señales de voltaje, además de tener los valores correspondientes a las referencias necesarias para generar señales de control adecuadas.

Por otra parte, la Figura 4 muestra la manera en la cual el controlador diseñado es ubicado dentro del regulador de voltaje, considerando la necesidad de reducir el error a 0. El error corresponde a aquellos valores que resultan de la diferencia entre el voltaje medido y el voltaje de referencia, además de restar el valor correspondiente a la señal de control, que en este caso está representada por  $B_{svc}$ . Se entiende que el controlador actúa directamente sobre la señal de control.

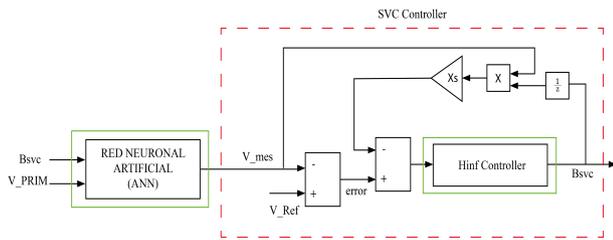


Figura 4. Diseño del regulador de voltaje

## 2.6. Formulación del problema

Se dice que un controlador es tolerante a fallas cuando este controlador es capaz de mantener los objetivos de control, a pesar de estar sujeto a la ocurrencia de fallas; las fallas en cuestión pueden ser aditivas o no aditivas, dependiendo de la alteración que ellas causen. A largo plazo, estas alteraciones en las mediciones crean modificaciones en las ecuaciones del espacio de estados, mientras que las fallas no aditivas o multiplicativas causan cambios en los términos del espacio de estados.

La tolerancia a fallas puede alcanzarse mediante estrategias pasivas o activas, y en algunos casos son capaces de mantener el controlador con cambios en sus parámetros, mientras que en otros casos las leyes de control pueden ser reconfiguradas [1, 13].

## 3. Resultados and discusión

### 3.1. Caso de estudio

Para el presente estudio, se propone el uso de un sistema de prueba tipo benchmark, que corresponde a una MR de catorce barras compuesta de dos sistemas de almacenamiento de energía, dos plantas de generación fotovoltaica, un generador diésel y un punto de interconexión con una red convencional. Además de cargas lineales y no-lineales, y, finalmente, un SVC. El modelo mencionado puede verse en la Figura 5 [3].

El controlador es sujeto a simulaciones para obtener un modelo detallado de la planta a través de uso del espacio de estados; el proceso de simulación genera una planta del controlador SVC. El método propuesto se prueba con la ocurrencia de fallas de sensado no maliciosas de tipo incipiente o abrupto en el primario del sistema de control, y el controlador tolerante a fallas

diseñado mediante la metodología  $H_{\infty}$  se implementa dentro del SVC.

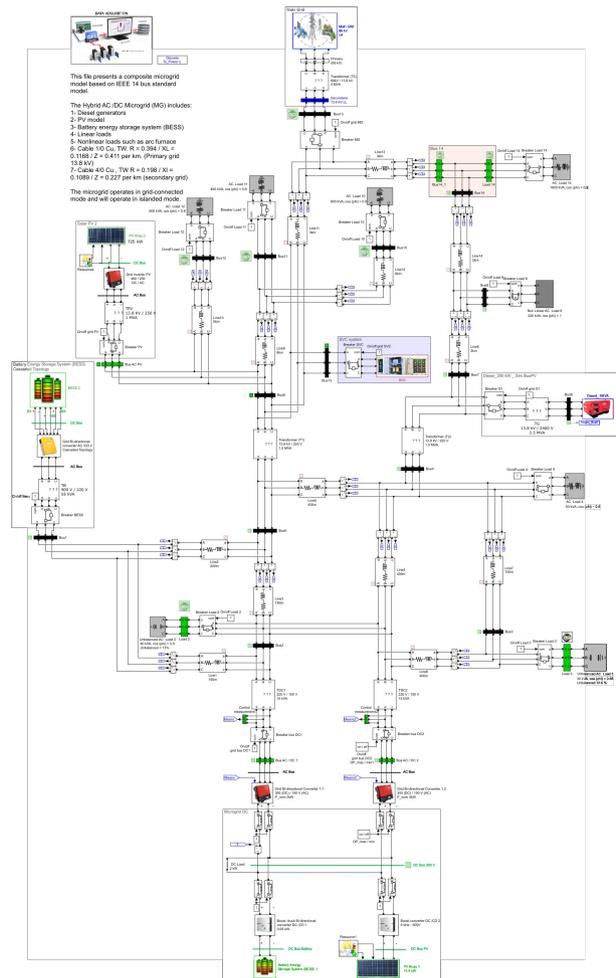


Figura 5. Diagrama de la microred

### 3.2. Resultados

El controlador que se obtiene a través del proceso de diseño propuesto genera los parámetros para el controlador de acuerdo con lo que se muestra en la ecuación (3), donde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  representan los arreglos que forman el espacio de estados que describe la región del controlador de voltaje del SVC.

$$A = \begin{bmatrix} -2.85e^{-3} & -437.52 & -200.38 \\ -189.32 & -108.03 & -119.03 \\ -31.96 & 10.56 & -21.65 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -2.25e^{+3} \\ -9.54e^{+3} \\ -2.56e^{+3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = [-2.68e^{-17} \quad -6.32e^{-17} \quad 3.62e^{-19}]$$

$$D = 0$$

Por otra parte, la red neuronal instalada está diseñada para trabajar con dos entradas, cada capa tiene

un total de diez neuronas en su capa oculta, mientras que cada una tiene tres neuronas de salida. Existen dos sistemas disponibles del tipo NARX y cada uno es usado independientemente para trabajar con las señales primarias y secundarias. Sobre la base de lo que se estableció anteriormente, se desarrollaron simulaciones correspondientes a las fallas. Se planifica que la falla ocurra a un tiempo de simulación de 0,4 segundos, una vez que la MR ha encontrado estabilidad en su punto de operación. Las fallas ocurren según lo explicado por diferentes factores que disparan alteraciones en las señales adquiridas del primario; las fallas probadas son incipientes, Figuras 6 y 9, y otra de tipo abrupta que se muestra en la Figura 7.

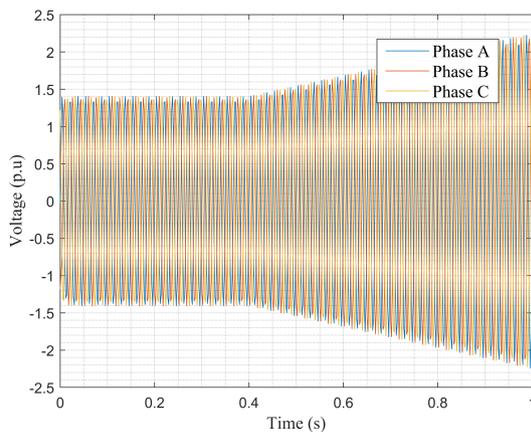


Figura 6. Falla incipiente en el primario

Puede verse que la falla abrupta que ocurre a los 0,4 segundos de simulación causa una salida con valor de 0, lo que sugiere una desconexión del sensor de voltaje involucrado.

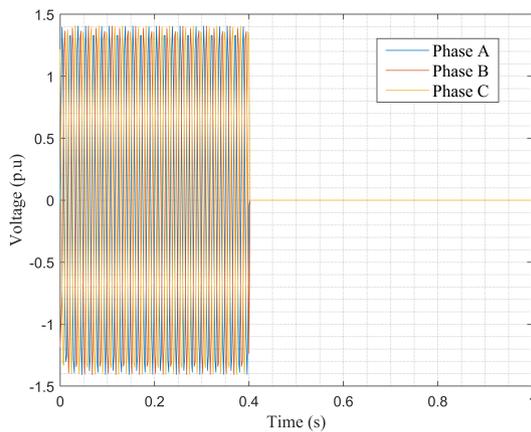


Figura 7. Falla abrupta en el primario

Las señales mostradas fueron probadas con el fin de verificar cómo una falla de sensado puede causar cambios indeseados en las señales de control de los

dispositivos vinculados a tales señales. En este caso específico, la señal de control dispara la potencia de los dispositivos de detección involucrados en la operación de SVC.

### 3.3. Falla incipiente

La Figura 8 muestra una comparación del desempeño de ambos métodos de control y cómo ellos se desarrollan antes de la ocurrencia de la falla incipiente.

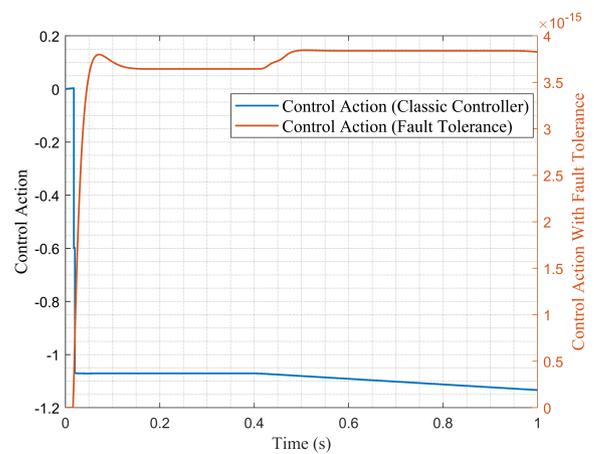
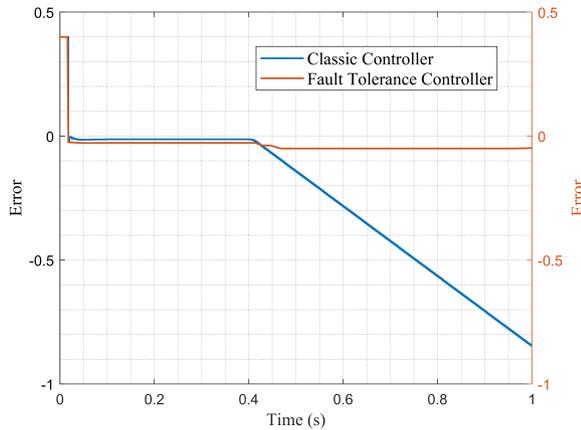


Figura 8. Acción de control: falla incipiente

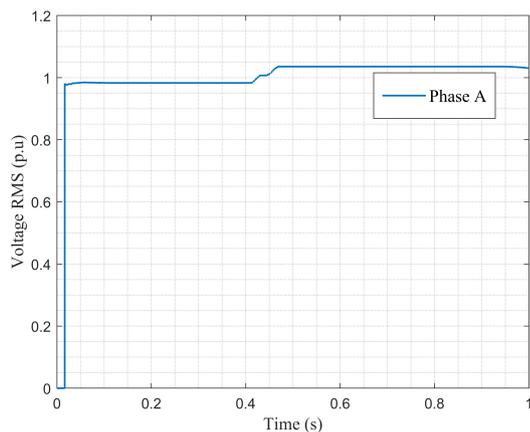
Puede verse que la acción de control resultante de ambos métodos es completamente diferente en forma y magnitud. La acción de control resultante del controlador PI tiene una magnitud que varía entre 0 y  $-1,2$  aproximadamente, mientras que la acción de control resultante del controlador  $H_\infty$  diseñado varía entre 0 y  $4 \times 10^{-15}$ . Estas magnitudes son alteradas por los puntos de referencia a los cuales el sistema está sujeto antes de los 0,4 segundos de ocurrencia de la falla, y una vez que ocurre la falla, la acción de control es inmediatamente modificada.

La Figura 9 se presenta para un mejor entendimiento del comportamiento; dicha figura ilustra el valor de error que ocurre con cada acción de control, el cual debe ser minimizado. Se observa que cuando ocurre una falla, el comportamiento de la acción de control del controlador PI tiende a una divergencia constantemente creciente, mientras que en el caso del controlador construido en la presente investigación el error tiende a cambiar, pero el cambio es mínimo en comparación con la acción de control más tradicional.



**Figura 9.** Error: falla incipiente

La Figura 10 muestra el comportamiento del voltaje de salida (pu) en la fase A, luego que la señal es procesada por el controlador  $H_\infty$  y una etapa constituida por una red neuronal artificial. Una vez que ocurre la falla, el voltaje tiende a tener una fluctuación como un efecto esperado, sin que esta modificación sea significativa, ya que tiene una variación de 0,02 unidades con respecto a la condición prefalla.



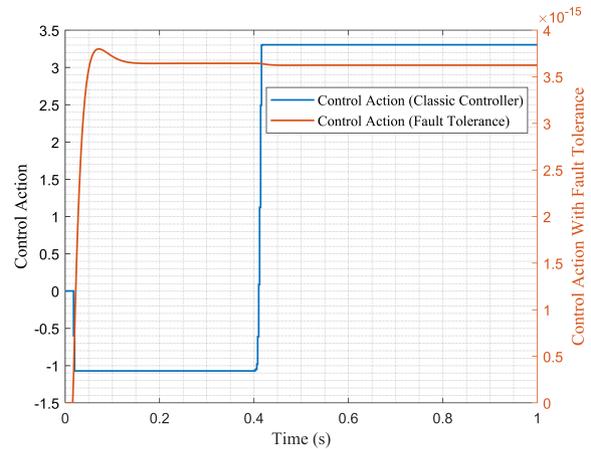
**Figura 10.** Voltaje RMS (pu), fase A: falla incipiente

### 3.4. Falla abrupta

De manera similar a lo que fue reseñado con la falla incipiente, se presentan los resultados obtenidos para el caso de falla es abrupta; la Figura 11 muestra el comportamiento de la acción de control para la falla abrupta.

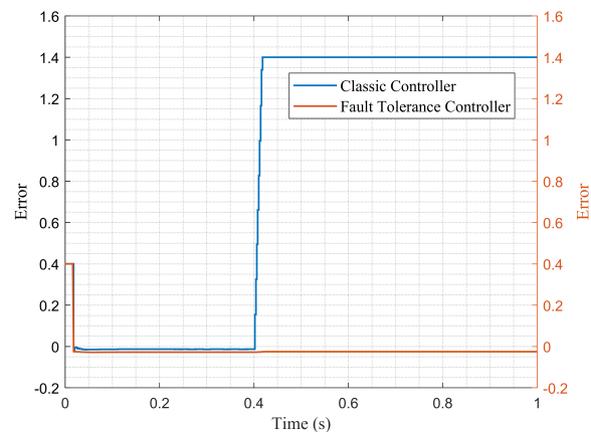
Puede visualizarse nuevamente que la acción de control con un controlador tradicional tiene una variación entre  $-1,2$  y  $3,5$  unidades, teniendo un cambio repentino a los 0,4 segundos, en la ocurrencia de la falla. Por otro lado, la acción de control con el uso del sistema  $H_\infty$  se mantiene en el intervalo entre 0 y

$4 \times 10^{-15}$ , con un comportamiento similar al obtenido en la falla estudiada previamente; incluso, el controlador muestra una menor fluctuación después de 0,4 segundos de la falla incipiente.



**Figura 11.** Acción de control: falla abrupta

También se presenta la Figura 12, correspondiente al error producido como un efecto de la acción de control con ambos controladores. Una vez más, es evidente que el error causado por el controlador  $H_\infty$  es mucho menor que el producido por el controlador PI luego de la ocurrencia de la falla. El controlador PI causa nuevamente una divergencia en el error, a pesar de que en este caso el error se estabiliza en un corto período de tiempo.



**Figura 12.** Error: falla abrupta

Como se reseñó previamente, se grafica el voltaje RMS en la fase A como un efecto de la implementación del controlador robusto; el resultado se muestra en la Figura 13.

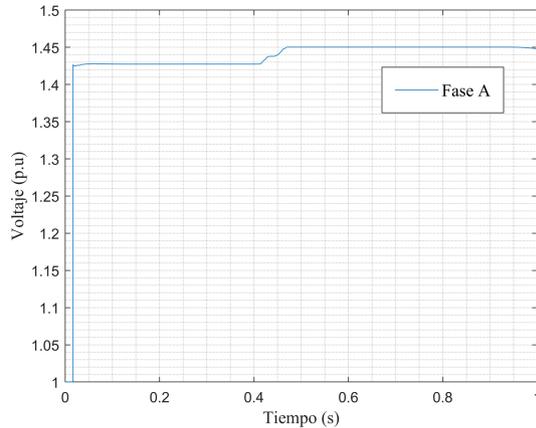


Figura 13. Voltaje RMS (pu), fase A: falla abrupta

Dado que el error es producido por la acción de control es pequeño, la variación que ocurre en el voltaje también es pequeña, lo cual valida la robustez del controlador ante la ocurrencia de fallas de sensado.

#### 4. Conclusiones

Se verifica que la implementación de un controlador tolerante a fallas diseñado por medio de  $H_\infty$ , mejora la capacidad de los controladores de soportar alteraciones producidas por eventos de falla en la entrada del controlador. El desempeño es mucho mejor que el de un controlador PI convencional. La nueva estrategia de control es efectiva para mantener la estabilidad sin cambios significativos.

Se prueba exitosamente la operación del controlador diseñado por medio de simulación con el software Simulink/Matlab, especializado en simulación de sistemas dinámicos. El software permitió llevar a cabo simulaciones con el fin de realizar la identificación del sistema, además del diseño del controlador y su validación en una microred implementada por medio de un sistema benchmark.

Los parámetros del controlador diseñado fueron calculados exitosamente. El sistema de control pasivo tolerante a fallas de sensado diseñado muestra mejor desempeño ante una falla abrupta que ante una incipiente, a pesar de que en ambos casos es significativamente mejor que un controlador tradicional.

El desempeño correcto de una red neuronal artificial se alcanza como un paso previo a la introducción de una señal medida en el controlador involucrado; la señal producida por un error de sensado es procesada por una red neuronal artificial y esta señal se introduce posteriormente en el controlador.

Se propone introducir la metodología de este artículo académico para el desarrollo de controladores robustos que puedan tolerar fallas maliciosas y la ocurrencia de otros tipos de fallas, así como también en

diferentes tipos de dispositivos que requieren una acción de control robusta. Por otra parte, se propone realizar una investigación comparativa con algoritmos de selección que permitan escoger la mejor acción de control como resultado de diferentes metodologías, para mejorar su desempeño.

#### Referencias

- [1] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, "A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids," *Heliyon*, vol. 6, no. 8, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04799>
- [2] Á. J. Pérez Pazmiño and L. Ortiz Matos, "Despliegue óptimo de redes de distribución y generación distribuida para microrredes eléctricas híbridas CA aisladas usando método heurístico," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 15, no. 1, pp. 80–96, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Oj9FP0>
- [3] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonz, I. Isaac, and J. L. Gabriel, "Hybrid AC / DC microgrid test system simulation : grid-connected mode," *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02862>
- [4] F. Chishti and B. Singh, "Hybrid control of renewable based microgrid synchronized to 3p4w ac distribution network," in *2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (IC-NTE)*, 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICNTE51185.2021.9487755>
- [5] M. Zolfaghari, G. B. Gharehpetian, M. Shafiekhah, and J. P. Catalão, "Comprehensive review on the strategies for controlling the interconnection of AC and DC microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, no. October 2021, p. 107742, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107742>
- [6] M. Ortiz and E. M. Garcia Torres, "Pronóstico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresión adaptativa multivariante spline (MARS)," p. 32, 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/3yewXQw>
- [7] H. Yu, S. Niu, Z. Shao, and L. Jian, "A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*,

- vol. 135, p. 107476, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107476>
- [8] K. Beleño, J. Berrio, A. Pardo, and G. Oscar, “Diseño de una smart grid para un sistema híbrido de energía,” *Prospectiva*, vol. 11, no. 2, pp. 94–101, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15665/rp.v11i2.44>
- [9] E. Baneshi, S. M. H. kalali, and A. B. Dehkordi, “Microgrid optimal planning in two functional modes grid connected and the intentional islanding,” in *2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI)*, 2019, pp. 857–863. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/KBEI.2019.8735048>
- [10] D. Carrión and L. Ortiz, “Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos,” *Ingenius*, no. 10, pp. 44–48, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17163/ings.n10.2013.05>
- [11] L. O. Matos, L. B. Gutiérrez, J. W. Sánchez, and A. A. Téllez, “An arx-petri nets algorithm for active identification of an ac/dc microgrid simulation,” in *2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2019, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCAC.2019.8921191>
- [12] J. R. Collaguazo Solís and L. Ortiz Matos, “Control de voltaje óptimo para sistemas de almacenamiento de energía de batería (BESS) acoplados a microrredes de AC utilizando algoritmos LQG.” [Online]. Available: <https://bit.ly/3OBT48Z>
- [13] S. X. Garrido Jácome and L. Ortiz Matos, “Estrategia activa de tolerancia a fallas para el control Buck-Boost de micro-redes eléctricas en DC,” 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bo7D1r>
- [14] S. P. Quishpe Guamantica and L. Ortiz Matos, “Detección de fallas de sensado en convertidores CA/CC para micro-redes híbridas usando análisis de componentes principales (PCA),” 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3QKPKdJ>
- [15] M. Hosseinzadeh and F. R. Salmasi, “Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2809–2823, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2620803>
- [16] G. X. Álvarez Yanchapanta and H. I. Vaca Vallejo, “Diseño de una microred híbrida a base de energía fotovoltaica y energía térmica diesel para reducir la contaminación ambiental,” *Universidad de las Fuerzas Armadas. ESPE*, pp. 1–5, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3xN2Eiw>
- [17] A. F. Falcón Ayala and L. Ortiz Matos, “Confiabilidad en microredes eléctricas AC/DC usando control robusto  $H_\infty$  y estrategias de tolerancia a fallas,” 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bqDOO5>
- [18] S. Jadidi, H. Badihi, and Y. Zhang, “Passive fault-tolerant control of pwm converter in a hybrid ac/dc microgrid,” in *2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*, 2019, pp. 90–94. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/REPE48501.2019.9025123>
- [19] B. N. Alhasnawi, B. H. Jasim, and B. E. Sedhom, “Distributed secondary consensus fault tolerant control method for voltage and frequency restoration and power sharing control in multi-agent microgrid,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 133, no. August 2020, p. 107251, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107251>
- [20] A. Vargas-Martínez, L. I. M. Avila, Y. Zhang, L. E. Garza-Castañón, and E. R. C. Ortiz, “Model-based fault-tolerant control to guarantee the performance of a hybrid wind-diesel power system in a microgrid configuration,” *Procedia Computer Science*, vol. 19, no. Seit, pp. 712–719, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.094>
- [21] Y. Xu, S. Tong, and Y. Li, “Adaptive fuzzy fault-tolerant control of static var compensator based on dynamic surface control technique,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 73, no. 3, pp. 2013–2023, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11071-013-0919-3>
- [22] F. Rafael and S. Sevilla, “Fault-tolerant Wide-area Control of Power Systems,” Ph.D. dissertation, 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tXSNW6>
- [23] A. Alexander, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, “Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multi-criteria decision algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. 9, p. e08061, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08061>
- [24] L. Ortiz-Matos, A. Aguila-Tellez, R. Hincapié-Reyes, and J. González-Sánchez, “Multi-criteria optimization of the deployment of a grid for rural electrification based on a heuristic method,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 73, p. 012020, jul 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/73/1/012020>

- [25] K. Wang, Y. Ma, P. Ding, R. Mu, and R. Sun, "Operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid," in *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, pp. 821–824. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592593>
- [26] U. Akram, M. Khalid, and S. Shafiq, "Optimizing a grid-connected micro-grid with optimal renewable generation and battery energy storage," in *2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE)*, 2017, pp. 1–9. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IEEEGCC.2017.8448232>
- [27] Y.-G. Lv, C.-Y. Long, and T.-Q. Cai, "Research on coordinated operating control of micro-grid power system including wind power, photovoltaic system and battery storage," in *2014 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 1, 2014, pp. 181–187. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2014.7009114>
- [28] K. Gurney, *An Introduction to Neural Networks*. CRC Press, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315273570>
- [29] S. Bharti, S. Dewangan, and S. Ram, "Performance of wind farm distribution system under balanced and unbalanced condition with svc & statcom," in *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, 2016, pp. 182–187. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915927>
- [30] J. Aho and J. Turunen, "Power quality support for industrial load using hybrid svc," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1049>
- [31] X. Yang, W. Wang, and W. Jin, "The influence and control measures of distributed photovoltaic generation on the voltage in distribution system," in *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, 2012, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CICED.2012.6508538>
- [32] D. Jacome and A. Águila, "Localización y dimensionamiento óptimo de dispositivos SVC para la compensación de potencia reactiva en SEP," pp. 1–17, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bhLlyx>
- [33] H. Ebrahimirad, A. Choobdar, and G. Dehnavi, "A new control approach for voltage quality improvement in distribution power system by means of an svc," in *2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2008, pp. 583–586. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp:20080588>
- [34] Y. Y. Ojeda-Rebolledo, L. D. Pabón-Fernández, E. Caicedo-Peñaranda, J. L. Díaz-Rodríguez, and A. Pardo-García, "Compensador estático var para sistemas de distribución," *Mundo Fesc*, vol. 11, no. 21, pp. 70–86, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/39LZFiv>
- [35] K. Tsunedomi, Y. Imazu, S. Tamura, T. Sodeyama, T. Omori, D. Cheung, M. Parr, and S. Gough, "Effectiveness of d-svc on rural networks," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, pp. 1–4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1020>
- [36] N. Demirovic, "Impact of statcom and svc to voltage control in systems with wind farms using induction generators (ig)," in *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*, 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1069>
- [37] R. Gitibin and F. Hoseinzadeh, "Comparison of d-svc and d-statcom for performance enhancement of the distribution networks connected wecs including voltage dependent load models," in *2015 20th Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, 2015, pp. 90–100. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/EPDC.2015.7330479>
- [38] W. Tian, Y. Wang, W. Deng, and L. Li, "H-infinity control for a class of multiple time delay fuzzy descriptor systems," in *2013 6th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*, 2013, pp. 115–118. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICINIS.2013.36>
- [39] D. N. Abara and A. Lanzon, "H-infinity-pid controller for an open-loop unstable system," in *2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON)*, 2017, pp. 134–138. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/NIGERCON.2017.8281886>