



# Diseño e implementación de un sistema de deslaste rápido de carga mediante la función de protección $df/dt$ (81R) basada en ROCOF

María Fernanda Aguilar-Isidro<sup>a</sup>, Mario A. Paternina<sup>a</sup>, Pamela Suárez-Velázquez<sup>b</sup>, José Manuel Ramos-Guerrero<sup>a</sup>, Alejandro Zamora-Mendez<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>b</sup>Centro Nacional de Control de Energía

<sup>c</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

## RESUMEN

El presente documento exhibe el desarrollo de un sistema de protección mediante la utilización de la metodología o cálculo del ROCOF (*rate of change of frequency*). Con el fin de obtener un deslaste de carga que permita una recuperación de frecuencia del sistema en un menor tiempo y se pueda evitar posibles fallos en el mismo. Para ello se desarrolló una co-simulación entre el software de DigSilent Power Factory donde con el lenguaje DPL (DigSilent Programming Language) se realiza la simulación de EMT del sistema IEEE 39-BUS y en Matlab se hace el procesamiento de datos para obtener la estimación de la frecuencia y posteriormente del ROCOF. La protección es probada y comparada en diferentes escenarios.

© 2024 Universidad Autónoma de Nuevo León. Todos los derechos reservados

## 1. Introducción

La continuidad y la calidad son dos requisitos extremadamente importantes para un sistema eléctrico satisfactorio. La continuidad se refiere a garantizar que la energía producida por la central llegue a la carga final (tanto doméstica como industrial) sin interrupción, ya que las interrupciones pueden tener efectos directos e inmediatos. Calidad significa que la energía debe suministrarse en determinadas condiciones para garantizar que los distintos equipos conectados al sistema puedan funcionar correctamente y que no se reduzca su vida útil. La expansión del sistema eléctrico de potencia (SEP) es motivo de preocupación porque los componentes del sistema pueden operar cerca de sus límites, provocando fallas que provocan el colapso total en el sistema. La mayoría de los cortes de energía son causados por desviaciones de frecuencia e interrupciones de voltaje<sup>[1]</sup> Para mantener la estabilidad de los sistemas frente a contingencias severas, se proponen esquemas de protección del sistema y esquemas de acciones remediales.

Correos electrónicos: fernanda\_96@comunidad.unam.mx (María Fernanda Aguilar-Isidro), mra.paternina@fi-b.unam.mx (Mario A. Paternina), pamelas.suarez@cenace.gob.mx (Pamela Suárez-Velázquez), josema95@comunidad.unam.mx (José Manuel Ramos-Guerrero), azamora@umich.mx (Alejandro Zamora-Mendez)

© 2024 UANL. Todos los derechos reservados.

### 1.1. Estado del arte

Chown *et al.*<sup>[2]</sup> describen la relación que hay entre la inercia de un sistema con un caso de estudio en Irlanda y la tasa de cambio de la frecuencia, para poder concluir que tanto los consumidores como los generadores pueden resistir un cambio de ROCOF de máximo 1 Hz/s en un lapso no mayor a 500 ms, para después utilizar un modelo de costos de producción para resolver el problema del compromiso de unidades y de despacho económico con una resolución para el 2030 y 2050.

Bonnet *et al.*<sup>[3]</sup> abordan la importancia de estandarizar el desempeño de las protecciones de alta y baja frecuencia, de acuerdo con sus antecedentes fisicomatemáticos de la frecuencia y de su tasa de cambio, y debido a que gracias a la interconexión con las energías renovables (solar, fotovoltaica y eólicas), la frecuencia sufre un cambio.

Toledo *et al.*<sup>[4]</sup> describen cómo realizar la construcción de una protección con una típica arquitectura de área amplia, con la comunicación entre Matlab y DigSILENT Power Factory. En PowerFactory, se hace una simulación electromagnética que se utiliza para que Matlab haga el procesamiento de datos, y a partir de la transformada de Fourier se calcula fase y magnitud del fasor para llegar a estimar la frecuencia.

Begovic *et al.*<sup>[5]</sup> describen cómo la protección de área amplia tiene numerosas aplicaciones, así como las mejores estrategias de detección y control a través del concepto de protección avanzada contra perturbaciones de área amplia, ya que ofrecen una mejor

gestión de las perturbaciones y una oportunidad significativa para un rendimiento del sistema más confiable bajo mayores transferencias de energía y economías operativas.

Es importante hablar de la protección de área amplia y cómo esta puede ayudar a hacer un sistema de protección más flexible y de una respuesta más rápida. Para eso, existe una metodología para realizar la protección, una arquitectura<sup>[6]</sup>. La metodología, filosofía y arquitectura de la protección de área amplia va a depender del sistema eléctrico que esté protegiendo, ya que, como se dijo anteriormente, la protección de área amplia tiene numerosas aplicaciones.

Con el aumento de las fuentes de energía renovables es muy posible que disminuya la inercia del sistema, por lo que la tasa de cambio de la frecuencia va en aumento<sup>[7]</sup>. Con la tecnología de protección de relés comúnmente utilizada en la actualidad, se necesitan 30 ms para detectar cualquier cambio en la frecuencia. Sin embargo, para detectar cualquier cambio con precisión se requiere más tiempo<sup>[3]</sup>.

### 1.2. Planteamiento del problema

La variación permanente y aleatoria de las condiciones de carga y generación no convencional en los SEP da como resultado variaciones en la frecuencia, las cuales se deben minimizar con el fin de conservar el balance carga-generación. No obstante, durante décadas la frecuencia se ha contemplado como un valor constante, pero con la modernización de los SEP, especialmente en relación con el aumento en la integración de la energía renovable que se incorpora al sistema este paradigma ha cambiado. Por este hecho, es conveniente explorar las aplicaciones del ROCOF, ya que se pueden utilizar en esquemas de acción remedial para el deslastre rápido de carga, con el fin de acelerar el tiempo de operación en situaciones de baja o alta frecuencia y/o detectar pérdidas de sincronismo con la red.

### 1.3. Contribución

La principal contribución de esta investigación radica en el diseño, implementación y validación de un esquema de protección innovador basado en ROCOF para realizar acciones de deslastre de carga y prevenir desequilibrios de carga-generación en el sistema eléctrico disminuyendo tiempos de reacción en el esquema de acción remedial en comparación con otros esquemas como es el de bajo voltaje o frecuencia. Para la implementación se utiliza la plataforma DigSILENT Power Factory junto con Matlab, lo que permite la integración de herramientas de simulación y análisis de alto nivel. DigSILENT Power Factory y su lenguaje de programación DPL utilizado junto con Matlab proporcionan una interfaz que permite mostrar los resultados de forma gráfica.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Sistemas de protección

La función de la protección por relevadores es originar el retiro rápido del servicio de cualquier elemento del SEP cuando éste sufre algún evento de cortocircuito o cuando el sistema funciona de manera anormal que pueda ocasionar algún problema. El sistema de protecciones tiene como objetivo minimizar los efectos que ocasionan las diferentes fallas que puedan ocurrir<sup>[9]</sup>.

La primera reacción del sistema de protección cuando hay una falla es desconectar el circuito donde se ocasionó la falla para evitar que esta se propague, la desconexión del circuito fallado se realiza mediante interruptores automáticos, ocasionando un transitorio, que puede implicar sobretensiones y descompensación de generación-carga lo que implica un cambio en la frecuencia.

### 2.2. Sistemas de Protección de Área Amplia (WAMS)

Una protección de área amplia se utiliza para evitar que el sistema sufra un apagón total, parcial o una caída de tensión en un escenario donde ningún elemento sufra alguna falla o que esté operando fuera de sus límites de operación. Esta situación podría presentarse luego de la eliminación de una falla muy severa o de un aumento muy abrupto de carga.

Por lo que una protección de área amplia surge como necesidad de varios factores, como los cambios repentinos en las condiciones de operación debido a la liberación del mercado eléctrico, así como la necesidad de tener un SEP más confiable; ya que un apagón es cada vez más costoso.

### 2.3. Tasa de cambio de la frecuencia (ROCOF $df/dt$ )

El ROCOF se utiliza para realizar deslastres rápidos de carga, para acelerar el tiempo de operación en situaciones de sobrefrecuencia y subfrecuencia, así como detectar pérdida de red. Por ejemplo, se puede omitir un relé de deslastre de carga dedicado centralizado y reemplazarlo con deslastre de carga distribuido, si todos los alimentadores salientes están equipados con dispositivos de protección.

Una aplicación especial del ROCOF es detectar la pérdida de red (pérdida de red, formación de islas). Cuanto más se diferencie la carga restante de la carga antes de la pérdida de red, mejor detecta la situación la función ROCOF<sup>[7]</sup>. En la actualidad, las tecnologías de medición existentes para la detección de ROCOF se utilizan principalmente para detectar la formación de islas en parte de la red de distribución y desconectar los generadores distribuidos de la red.

### 2.4. Esquema de deslastre automática de carga (EDAC)

Un EDAC se implementa para restaurar la estabilidad de frecuencia si la frecuencia del sistema cae por debajo de su valor permisible de operación durante un disturbio mayor tal como la pérdida de generación o el disparo de enlaces interregionales clave, lo cual puede producir un gran desbalance carga-generación<sup>[10]</sup>.

En esos casos, la capacidad de generación decrece, pero la carga permanece constante y causa un rápido decremento en la frecuencia. Si otros generadores no son capaces de aportar la potencia necesaria, entonces la frecuencia comienza a caer aún más. Para detener este descenso en la frecuencia del sistema, la cual puede llevar a un colapso total del sistema, la forma más rápida es desconectar temporalmente una porción de la carga eléctrica del sistema mediante relevadores de tiro de carga por baja frecuencia<sup>[11]</sup>.

## 3. Estimación fasorial, frecuencia y tasa de cambio de la frecuencia mediante la transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier (DFT) es utilizada en gran variedad de aplicaciones de tratamiento de señales, principalmente en aplicaciones de filtrado y análisis espectral.

Para la estimación fasorial se usa la DFT no recursiva, que está representada como sigue<sup>[8]</sup>:

$$W_N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \omega_N & \omega_N^2 & \cdots & \omega_N^{N-1} \\ 1 & \omega_N^2 & \omega_N^4 & \cdots & \omega_N^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_N^{N-1} & \omega_N^{2(N-1)} & \cdots & \omega_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matriz de Fourier se compone de los factores armónicos de fase, por lo que al multiplicar las la inversa de esta matriz por un vector de voltajes obtenemos los coeficientes de Fourier y de ello podemos obtener el fasor de voltaje (magnitud y ángulo).

$$[\hat{\xi}_1 \hat{\xi}_2 \cdots \hat{\xi}_{n-1}] = W_N^{-1} [s_1 s_2 \cdots s_m] \quad (2)$$

$$\hat{a} = |\hat{\xi}_1| \quad (3)$$

$$\varphi = \angle \hat{\xi}_1 \quad (4)$$

Una vez obtenido el ángulo se calcula la derivada para obtener la frecuencia y posteriormente, se calcula el ROCOF como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\varphi(t))}{dt} \quad (5)$$

$$\text{ROCOF}(t) = \frac{df(t)}{dt} \quad (6)$$

Se realizan algunas pruebas para comprobar el algoritmo, para las cuáles se usa una señal monofásica  $x(t)$ , de dicha señal se obtuvo ángulo y fase; para posteriormente estimar la frecuencia y el ROCOF. La Fig. 1 muestra la amplitud de la señal representa la ecuación

$$x(t) = X_m (1 + k_x \cos \omega t) \cos(\omega_0 t + k_a \cos(\omega t - \pi))$$

y la estimación de la amplitud que se calcula con la DFT, con una frecuencia de muestreo de 10000 Hz y una frecuencia en el sistema de 60 Hz.

La Fig. 2 muestra la señal de la ecuación

$$x(t) = X_m (1 + k_x \cos \omega t) \cos(\omega_0 t + k_a \cos(\omega t - \pi))$$

y la estimación de la fase que se calcula con la DFT, con una frecuencia de muestreo de 10000 Hz.

La Fig. 3, muestra dos señales, la primera es la frecuencia de la señal anterior y la segunda la estimación de la frecuencia con la ecuación de la frecuencia a partir de la fase que se estimó con la DFT ( $\hat{\phi}$ ).

La Fig. 4 presenta la estimación del ROCOF partir de la estimación de la frecuencia anterior ( $\hat{f}$ ).

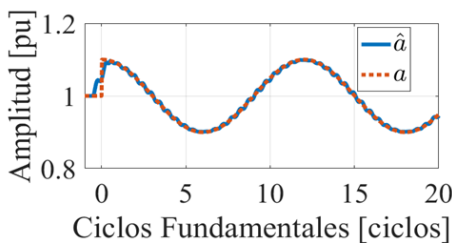


Fig. 1. Estimación de amplitud ( $\hat{a}$ ) y amplitud de la señal ( $a$ ).

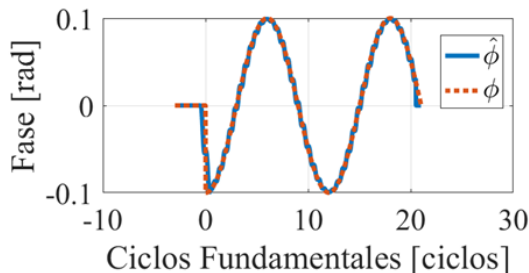


Fig. 2. Estimación de fase ( $\hat{\phi}$ ) y fase de la señal ( $\phi$ ).

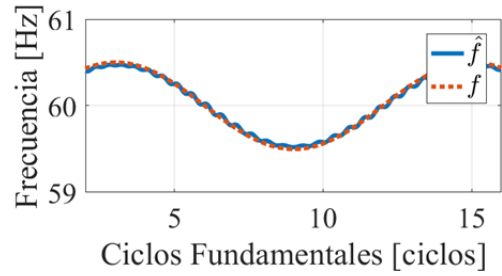


Fig. 3. Estimación de frecuencia ( $\hat{f}$ ) y frecuencia de la señal ( $f$ ).

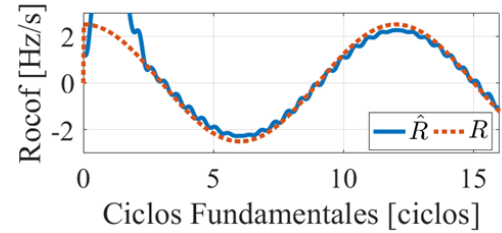


Fig. 4. Estimación de ROCOF ( $\hat{R}$ ) y ROCOF de la señal ( $R$ ).

### 3.1. Estimación de amplitud, fase, frecuencia y ROCOF con la comunicación de Matlab-DigSILENT PowerFactory

Se implementó un esquema de comunicación entre DigSILENT PowerFactory y Matlab, donde de la simulación en DigSILENT se obtienen paquetes de 200 datos por cada 20 ms, que son usados por Matlab para calcular la amplitud y fase en tiempo real y posteriormente estimar frecuencia y ROCOF.

En la simulación se realizan 3 eventos a las 0.5 s: una falla de línea a tierra en la línea de transmisión al 50%, que ocasiona su desconexión y la salida de operación de los generadores 9 y 10. Para comprobar la estimación del ROCOF, se calcula la derivada con la función `diff` en Matlab para poder comparar con la estimación presentada en este trabajo. El resultado se puede observar en la Fig. 5.

## 4. SISTEMA IEEE 39 NODOS

El Sistema IEEE de 39 nodos consta de 39 buses, 10 generadores, 19 cargas, 34 líneas y 12 transformadores y se muestra en la Fig. 6.

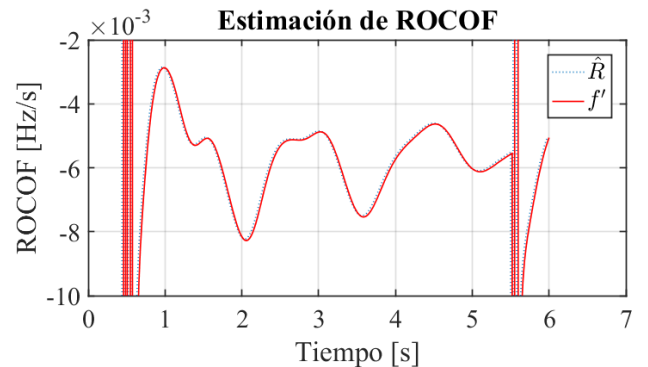


Fig. 5. Comparación de la derivada del promedio de la frecuencia con la estimación del ROCOF.

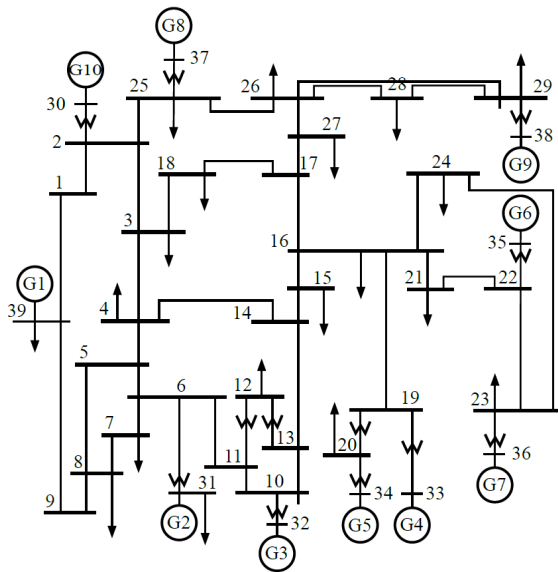


Fig. 6. Diagrama unifilar del sistema IEEE de 39 buses (New England).

*Escenario 1: Falla en la línea de transmisión y pérdida de generación.* Se considera una falla eléctrica línea tierra al 50% de la línea 14-15 en  $t = 0.5$  s despejada correctamente en  $t = 0.55$  s. Este evento ocasiona la desconexión de la línea 14-15 y la salida de operación del generador G09 con 830 MW y de G10 con 250 MW, dejando de suministrar 1080 MW.

*Escenario 2: Falla en la línea de transmisión, y pérdida de generación más una segunda pérdida de generación.* El según escenario es un caso particular en el que además de tener una falla a tierra y la pérdida de 2 generadores (G09 con 830 MW y de G10 con 250 MW), transcurridos 5 s, en  $t = 5.55$  s sale de operación el generador G06 con 650 MW. En total se deja de suministrar 1730 MW al sistema, correspondientes al 28% de la demanda, este comportamiento del sistema indica la necesidad de incorporar un EDAC.

#### 4.1. Esquema de desconexión automática de cargas propuesto para el sistema IEEE 39 nodos

Para realizar el esquema de desconexión de los puntos críticos de la estimación de la frecuencia se calculan 6 umbrales para hacer la desconexión de carga. Por definición la derivada es la pendiente de una curva de la siguiente ecuación

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

La *Tabla 1* resume los valores obtenidos para cada umbral en el EDAC, dichos umbrales son los que se programaran como límites para hacer la desconexión de carga.

En la *Fig. 7* se muestran los ajustes de ROCOF, calculados a partir de los ajustes de frecuencia.

En la *Fig. 8* se observan cuales son las características de la interfaz gráfica: A, perturbación del sistema; B, umbrales de ROCOF; C, ROCOF promedio; D, tiempo universal coordinado (UTC); E, actuación del EDAC; F, etapas activas de desconexión de carga.

## 5. Resultados

Se propusieron 4 esquemas de desconexión automática de carga por cada escenario como se observa en la *Tabla 2*.

Tabla 1. Ajuste del umbral para los EDAC

Umbral	ROCOF (Hz/s)
1	-0.32773
2	-0.29684
3	-0.23300
4	-0.33453
5	-0.28657
6	-0.27453

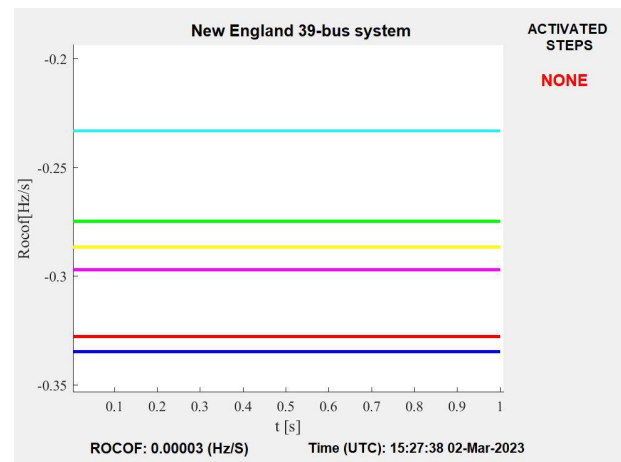


Fig. 7. Umbrales para la desconexión de carga.

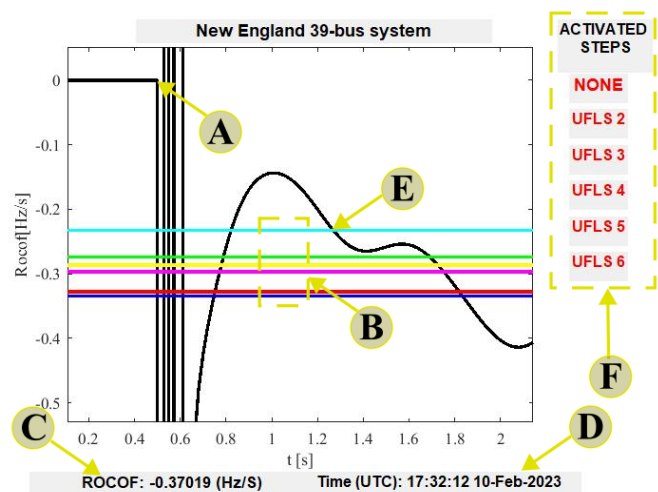


Fig. 8. Interfaz gráfica creada en MATLAB con el comportamiento del ROCOF y los umbrales calculados para el deslastre de carga.

**Tabla 2.** Carga que se utilizan para la desconexión de carga para cada paso

Paso	EDAC <sub>1</sub>		EDAC <sub>2</sub>		EDAC <sub>3</sub>		EDAC <sub>4</sub>	
	Carga	P (MW)	Carga	P (MW)	Carga	P (MW)	Carga	P (MW)
1	39	600	20	550	24	250	27	200
2	20	550	8	450	15	320	29	150
3	3	250	23	247	3	250	24	250
	27	200	7	233	16	50	15	320
4	21	150	21	150	4	400	3	250
	24	250	28	330	8	450	16	50
5	15	320	15	320	20	550	4	400
6	26	130	26	139	20	550	4	400

En la Fig. 9 se puede observar como la después de la perturbación del primer escenario, la protección detecta el primer y el segundo umbral a los 0.62 s y 0.82 s.

Mientras que en la Figura 11 se puede ver como el comportamiento de la frecuencia, dando a conocer que la frecuencia no paso de la banda de operación de 58.9 y 60.2, ya que la protección reacción muy rápido.

## 6. Conclusion

Con este trabajo se logró diseñar e implementar una protección de deslastre de carga en un sistema de protección de área amplia basada en la tasa de cambio de la frecuencia o la función  $df/dt$  para evitar desequilibrios de carga-generación en el sistema.

La exploración e investigación en la literatura ayudó a entender el alcance que puede llegar a tener un esquema de acción remedial, mediante la función de protección  $df/dt$  basada en el ROCOF y como esta puede estabilizar el sistema cuando ocurren grandes disturbios.

La implementación del sistema se hizo mediante el uso de DigSI-LENT Power Factory y su lenguaje de programación DPL y la comunicación que se hizo con Matlab, esta herramienta permitió conocer el funcionamiento del sistema para de esta forma conocer el estado en el que se encuentra dicho sistema y analizar su respuesta de frecuencia y ROCOF.

El esquema de deslastre de carga automática por baja frecuencia fue probado en dos escenarios y con varios esquemas, con ello se pudo validar el correcto funcionamiento del esquema de la protección propuesta en el sistema de prueba IEEE de 39 nodos y 10 generadores, y se concluye que la protección funciona de una mejor manera cuando hay un cambio brusco en el sistema.

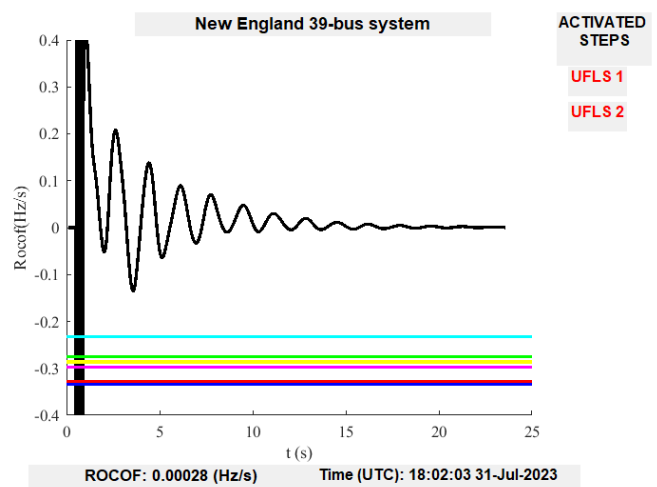
Se propone probar otros algoritmos de estimación para calcular la frecuencia y el ROCOF.

La implementación de los esquemas propuestos en un simulador en tiempo real permitirá el uso experimental de la propuesta plasmada en esta tesis.

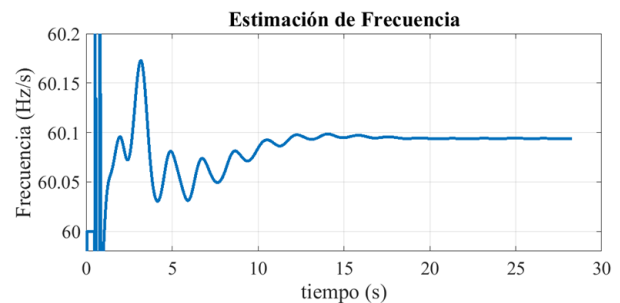
La exploración de otros tipos de eventos (fallas o contingencias) permitirá proveer otros umbrales.

## Referencias

- [1] T. Shekari, F. Aminifar y M. Sanaye-Pasand, "An Analytical Adaptive Load Shedding Scheme Against Severe Combinational Disturbances," en *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 4135-4143, sept. 2016.



**Fig. 9.** Comportamiento del ROCOF para el primer esquema de deslastre de carga en el primer escenario.



**Fig. 10.** Comportamiento de frecuencia para el primer esquema de deslastre de carga en el primer escenario.

- [2] G.A. Chown, J. Wright, R. van Heerden, yM. Coker. "System inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF) with increasing nonsynchronous renewable energypenetration," *Cigré 2017: 8th Southern Africa Regional Conference*, nov. 2017, Somerset West, Cape Town, Sudáfrica.
- [3] A. Bonetti, J. Zakonjsek y U. Rudez, "Bringing ROCOF into spotlight in Smart Grids: new standardization and UFLS method," *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, Izmir, Turquía, 2020, pp. 238–244.
- [4] C. Toledo-Santos, G. Mejía-Ruiz, M. R. A. Paternina, A. Zamora, y D. Dotta, "Building up a Wide-Area Protection System Simulator," *2020*

- 52nd North American Power Symposium (NAPS), Tempe, AZ, USA, 2021, pp. 1–6.
- [5] M. Begovic, D. Novosel, D. Karlsson, C. Henville y G. Michel, “Wide-Area Protection and Emergency Control,” en *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 876–891, mayo 2005.
- [6] C. Rehtanz y J. Bertsch, “A new wide area protection system,” *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, Porto, Portugal, 2001, pp. 6 pp. vol.4-
- [7] P. García y E. Gerardo, *Simulación de un esquema de alivio de carga considerando el efecto de amortiguamiento de carga*, Tesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [8] “IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems,” en *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, vol., no., pp.1–61, 28 dic.. 2011.
- [9] J. Hmad, H. Trabelsi y S. Rhili, “ROCOF Anti-Islanding Strategy Based on Frequency Tracking Observer for Three Phase DG Inverter,” *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Yasmine Hammamet, Tunisia, 2018, pp. 281–286.
- [10] J. Bertsch, C. Carnal, D. Karlson, J. McDaniel y Khoi Vu, “Wide-Area Protection and Power System Utilization” en *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 997–1003, mayo 2005.
- [11] D. K. Papailiou, “Innovation in the Power Systems industry” en *Cigre Science & Engineering*, vol. 10, pp. 3–16, Feb. 2018.