

Artículo de revisión

Estrategias de rechazo de carga para mitigar la recuperación retardada de tensión inducida por falla: desarrollo y tendencias

Load shedding strategies to mitigate fault induced delayed voltage recovery: development and trends

Gustavo Araujo-Suárez^a, Carmen Luisa Vásquez Stanescu^a

^aUniversidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Barquisimeto, Venezuela.

DOI: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24721.10081>

Recibido: 29-01-2022

Aceptado: 22-02-2022

Resumen

La recuperación retardada de la tensión inducida por falla (FIDVR) es una importante amenaza para la estabilidad de tensión de los sistemas eléctricos de potencia con carga dominada por motores de inducción. Durante la década pasada se han propuesto estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR y evitar una inestabilidad de tensión. El presente trabajo analiza las estrategias de rechazo de carga publicadas en la literatura científica para mitigar la FIDVR. Se aplica una clasificación de publicaciones científicas basada en un método sistemático de evaluación de características, para ello se identifican las características de las estrategias de acuerdo a sus aspectos metodológicos y tecnológicos de diseño y funcionalidad; además se evalúan las características según su grado de pertenencia y con ello se clasifican las publicaciones analizadas. El resultado del análisis de las estrategias de rechazo de carga, basado en reglas empíricas y métodos analíticos, reveló que aún no son del todo eficientes para determinar la mínima cantidad de carga a desconectar, ni lo suficientemente rápidas para disminuir eficazmente el tiempo de recuperación de la tensión; y se encuentra además que los métodos de diseño basados en inteligencia artificial representan una gran oportunidad para superar estos desafíos.

Palabras clave: recuperación retardada de tensión inducida por falla, rechazo de carga, inestabilidad de tensión de corto plazo, motores de inducción.

Código UNESCO: 3306.09- Ingeniería y tecnología eléctricas, transmisión y distribución.

Abstract

Fault-induced delayed voltage recovery (FIDVR) is a major threat to the voltage stability of electrical power systems with load dominated by induction motors. Over the past decade, load rejection strategies have been proposed to mitigate FIDVR and avoid voltage instability. This paper analyzes the load shedding strategies published in the scientific literature to mitigate FIDVR. A classification of scientific publications based on a systematic method of evaluation of characteristics is applied, for which the characteristics of the strategies are identified according to their methodological and technological aspects of design and functionality; Further the characteristics are evaluated according to their degree of belonging and with this the analyzed publications are classified. The result of the analysis of the load shedding strategies, based on empirical rules and analytical methods, revealed that they are not yet fully efficient in determining the minimum amount of load to be disconnected, nor fast enough to effectively reduce the voltage recovery time; and it is also found that design methods based on artificial intelligence represent a great opportunity to overcome these challenges.

Keywords: fault-induced delayed voltage recovery, load shedding, short term voltage instability, induction motors.

UNESCO Code: 3306.09- Electrical technology and engineering, transmission and distribution.

1. Introducción

La recuperación retardada de la tensión inducida por falla (FIDVR, por sus siglas en inglés) se reconoció por primera vez a principio de los años 90 cuando se registró uno de los principales incidentes de este tipo en el sistema eléctrico de Southern California Edison de Estados Unidos, dejando sin servicio eléctrico a los usuarios en un área de 1.400 km² del condado de Riverside [1]. A partir de la década pasada están ocurriendo estas incidencias con mayor frecuencia hasta el punto que hoy día se consideran una importante amenaza para la operación segura y confiable de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). La razón de ello es la alta concentración de motores de inducción en los actuales sistemas eléctricos debido al creciente uso de aires acondicionados, sobre todo, en la temporada de verano o en áreas de clima cálido [2].

La FIDVR representa el caso más típico de los problemas relacionados con la estabilidad de tensión de corto plazo en los SEP [3]. Este se describe como un evento en el cual, los motores de inducción de los compresores de las unidades de aire acondicionado residenciales disminuyen su velocidad y se bloquean, en respuesta a una caída de tensión en sus terminales causada por una falla en el sistema eléctrico de transmisión o distribución. Bajo esta condición de rotor bloqueado, los motores demandan un alto consumo de potencia reactiva, lo que agrava aún más la disminución de la tensión iniciada por la falla y retardando su recuperación al valor normal [4].

Las publicaciones científicas en el campo de la estabilidad de tensión de corto plazo, específicamente en el tema de la FIDVR, han ido en aumento en los últimos años. La Figura 1.a, muestra el número de publicaciones científicas en las bases de datos de publicaciones del IEEE [5] y Elsevier [6] durante el período 2010 – 2021, obtenidas mediante una búsqueda con la palabra clave “FIDVR”. Como se observa en la Figura 1.a, existe una tendencia creciente en publicaciones científicas relacionadas con la FIDVR. Además, la Figura 1.b muestra la distribución de las publicaciones científicas disponibles en la base de datos del IEEE en las diferentes áreas de investigación de la FIDVR durante el período 2010 – 2021, se observa que hay una mayor contribución de publicaciones científicas en las áreas de análisis y control de la FIDVR, igualmente un mayor interés de la comunidad científica en tratar estos aspectos.

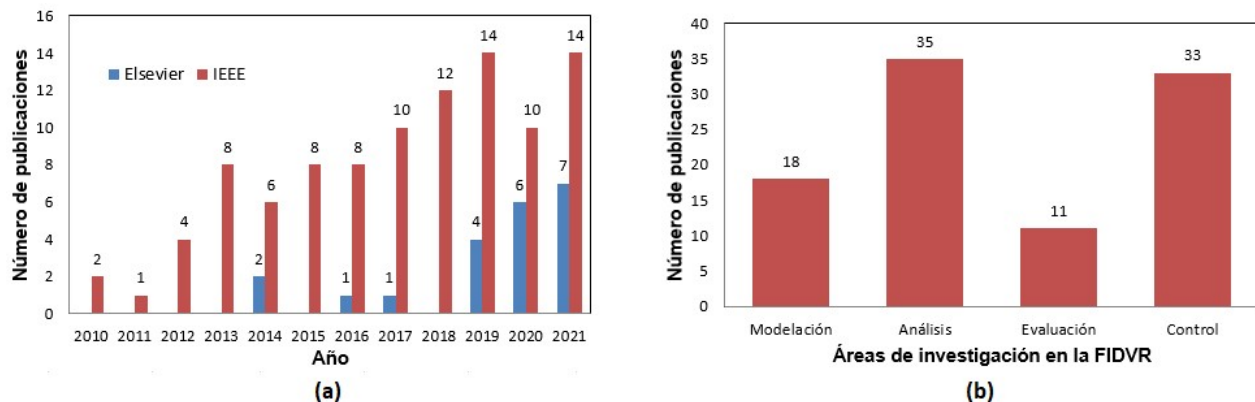


Fig. 1: (a) Publicaciones científicas disponible en las bases de datos del IEEE y Elsevier relacionados con el tema de la FIDVR durante el período 2010-2021. (b) Distribución de la literatura disponible en las bases de datos del IEEE en diferentes subtópicos relacionados con la FIDVR durante el período 2010-2021.

Las soluciones como medidas de control para mitigar la FIDVR encontradas en la literatura científica revisada se clasifican en dos (2) categorías: desde el lado del suministro y de la demanda de la energía eléctrica [7]. Desde el lado del suministro de la energía eléctrica la solución más común aplicada por las empresas eléctricas es incrementar el soporte de potencia reactiva mediante el uso de dispositivos flexibles de transmisión en corriente alterna [8]. También en esta categoría se encuentra el uso de inyección de potencia reactiva y la capacidad de operación bajo condiciones anormales de tensión de los inversores inteligentes de las nuevas unidades de generación distribuida de energía renovable de tipo eólica y fotovoltaica [9].

En cambio, desde el lado de la demanda, la solución más frecuente han sido los esquemas convencionales de rechazo de carga por tensión (UVLS, por sus siglas en inglés), por ser una medida económica. Estos esquemas consisten básicamente en desconectar un valor predeterminado de carga cuando la tensión del sistema eléctrico permanece por debajo de un nivel específico para un tiempo predeterminado [10]. A pesar que se han utilizado tradicionalmente como medida de control y protección para mitigar los problemas de estabilidad de tensión, aún no han sido del todo eficientes para desconectar la mínima cantidad de carga para mitigar la FIDVR.

Por otra parte, en la literatura publicada durante el periodo 2010 – 2021 en las bases de datos revisadas, se encuentran varias estrategias de rechazo de carga como alternativas de solución a los esquema convencionales de UVLS para mitigar la FIDVR. Estos nuevos esquemas operan de manera adaptiva a las dinámicas de las condiciones de operación del SEP durante la recuperación de la tensión. Estas utilizan el valor dinámico de la magnitud de la tensión, el valor de un índice de estabilidad o un indicador del comportamiento del motor de inducción como su velocidad o la energía cinética, entre otros, relacionado con la recuperación de la tensión para determinar con base a éste el momento de activación e inclusive la ubicación y cantidad de carga a desconectar de acuerdo a la severidad de la FIDVR.

Hoy día, las ventajas que ofrecen los sistemas de medición de área amplia [11] y la tecnología de las técnicas de aprendizaje automático [12] están siendo utilizadas en el desarrollo de novedosas estrategias de rechazo de carga para el control de la FIDVR. Los sistemas de medición de área amplia ofrecen una mayor visibilidad del sistema eléctrico, mientras que las técnicas de aprendizaje automático proporciona mayor velocidad de cálculo y precisión y, finalmente, gran capacidad de solución de problemas altamente complejos y no lineales.

En general, todas estas estrategias comparten varias características de diseño y funcionalidad, por ejemplo, centralizados o descentralizados, estáticos o dinámicos, de lazo cerrado o abierto y, finalmente, basados en la respuesta o basados en eventos [13]. Cualquiera que sea el criterio de diseño y funcionalidad, el momento de activación, la ubicación y la cantidad de carga a desconectar son los factores críticos que están presente en todas las estrategias y determinan su efectividad en la mitigación de la FIDVR [14].

El análisis de las diferentes estrategias de rechazo de carga permite identificar sus características, ventajas, limitaciones y la tendencia en el desarrollo del tema, con lo cual se puede encontrar vacíos de conocimiento y oportunidades de investigación de nuevas estrategias novedosas. En este sentido, el propósito de este trabajo es realizar un análisis de las estrategias de rechazo de carga que han sido publicadas en la literatura científica durante los últimos diez años para mitigar la FIDVR, en términos de sus avances tecnológicos, funcionales o metodológicos que representan para los SEP.

2. Desarrollo

2.1. Metodología

El presente trabajo corresponde a una investigación analítica con diseño documental llevada a cabo mediante una metodología de clasificación de publicaciones científicas, basado en un método sistemático de evaluación de características [15]. La Figura 2 muestra las tres (3) fases operativas de la metodología implementada para caracterizar el estado de arte de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR e identificar la tendencia en el desarrollo de las mismas.

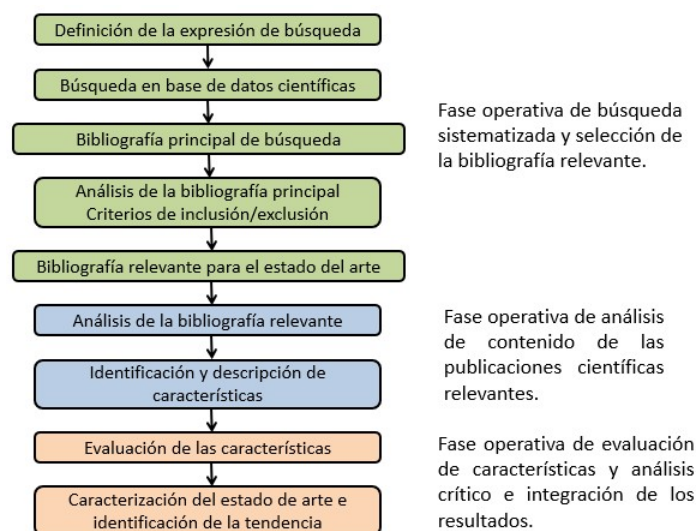


Fig. 2: Diagrama de flujo de la metodología.

Primero se construye una expresión de búsqueda usando operadores booleanos y palabras clave relacionados con el tema. Para este trabajo científico se utilizó la siguiente expresión de búsqueda: (“FIDVR” OR “faulted induced delayed

voltage recovery” OR “short term voltage stability” OR “short term voltage instability” AND “load shedding”.

Con esta expresión booleana se realiza una búsqueda exhaustiva de publicaciones científicas en las bases de datos *IEEEExplore Digital Library* [5] y *ScienceDirect* [6]. De esta búsqueda se recopilieron 189 publicaciones científicas relacionados con los temas: FIDVR, estabilidad de tensión de corto plazo, inestabilidad de tensión de corto plazo y rechazo de carga. Estas publicaciones científicas constituyen la bibliografía principal de búsqueda. Posteriormente, mediante la aplicación de criterios de inclusión y exclusión, se examina esta bibliografía y se seleccionan aquellas científicas relevantes entre el período 2010 – 2021, relacionados con estrategias de rechazo de carga para controlar o mitigar el fenómeno de la FIDVR, excluyendo aquellos relacionados con estrategias de rechazo de carga por frecuencia. De la aplicación de estos filtros se obtuvo como bibliografía relevante para el estudio del estado del arte, 16 publicaciones conformada por artículos científicos publicados en las bases de datos del IEEE y Elsevier, identificados en la primera columna del Cuadro 3, cada uno corresponde a una estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR.

En la segunda fase operativa de la metodología se realiza un análisis de contenido [16], para identificar y describir las características comunes entre las diferentes publicaciones científicas de la bibliografía relevante, en términos de los avances metodológicos, funcionales o tecnológicos de las estrategias de rechazo de carga.

En la última fase operativa se utiliza un sistema de codificación para evaluar las características según su grado de pertenencia y se clasifican las diferentes publicaciones científicas con base a la evaluación de estas características. Finalmente, se realiza un análisis crítico e interpretación de los resultados de la evaluación para caracterizar el estado del arte e identificar la tendencia en el desarrollo de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR.

2.2. Descripción de las características

Existen diferentes estrategias de rechazo de carga para enfrentar la FIDVR, las cuales tienen características específicas que se pueden clasificar en varias categorías. Un análisis de contenido de tipo descriptivo [16], permite identificar y describir estas características en términos de los avances metodológicos, funcionales y tecnológicos que ellas representan en el control y mitigación de la FIDVR. A continuación se describen las características más importantes seleccionadas para analizar las estrategias de rechazo de carga y garantizar al mismo tiempo que el análisis de todos los artículos científicos sean tratados de la misma forma.

a. Esquema de operación

De acuerdo al esquema de operación, la transmisión de la información de la señal de disparo de la estrategia de rechazo de carga se puede clasificar como centralizada o descentralizada. En los esquemas de rechazo de carga **centralizados**, la información de la señal de disparo se transmite para desconectar la carga en varios sitios claves del sistema eléctrico. Estos esquemas se apoyan en los sistemas de medición de área amplia, por lo que se les suele denominar esquemas de protección de área amplia o esquemas de protección especial. En cambio, en un esquema **descentralizado** la carga se desconecta con solo la información local en la misma barra y no dispone de ninguna comunicación o coordinación con las otras barras o subestaciones [14].

b. Forma de activación

La activación de la estrategia de rechazo de carga se puede dar con base a la respuesta del sistema eléctrico o con base a la ocurrencia de un evento. En la activación **basada en la respuesta** la estrategia de rechazo de carga utiliza un indicador para monitorear la evolución de la respuesta del sistema eléctrico y activar la desconexión de la carga cuando el valor del indicador excede un valor crítico preestablecido. Mientras que las estrategias **basada en evento** la activación de la desconexión de la carga ocurre bajo el reconocimiento de una perturbación o evento particular.

c. Ubicación de la barra de desconexión

Algunas estrategias de rechazo de carga efectúa la desconexión de la carga en **barras previamente establecidas** de acuerdo a criterios de operación propios de cada operadora del sistema eléctrico. Mientras que otras estrategias determinan las **barras más efectivas** de acuerdo a su contribución a la severidad de la FIDVR. En este caso la carga total en la barra de transmisión o distribución es tratada como un motor de inducción equivalente para evaluar la contribución de cada barra de carga a la FIDVR.

d. Tipo de desconexión de carga

La cantidad de carga a desconectar puede ser bajo un enfoque estático o dinámico. Bajo el enfoque estático se desconecta una cantidad de carga **fija** en cada etapa de la estrategia. Por el contrario, en el enfoque dinámico se desconecta una

cantidad de carga **variable** de acuerdo a la magnitud de la perturbación y el comportamiento dinámico del sistema eléctrico. Es decir, utiliza una variable relevante del sistema eléctrico relacionada con la severidad del evento FIDVR para determinar, en función del comportamiento dinámico de esta variable, la mínima cantidad de carga a desconectar.

e. Tipo de control

Algunas estrategias de rechazo de carga usan un lazo de control de emergencia para dar una mayor robustez al control de la FIDVR. El esquema de control de **lazo abierto** utiliza acciones predefinidas que son determinadas fuera de línea basadas en simulaciones de escenarios típicos con contingencias concebidas y no ajusta su acción para dar seguimiento al progreso del sistema. Mientras que el esquema de control de **lazo cerrado** está diseñado para funcionar varias veces, y cada acción depende en gran medida del resultado de la acción tomada previamente.

f. Método de diseño

Los métodos de diseño empleados en el desarrollo de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR se pueden clasificar en tres grandes categorías: basados en reglas fijas, basados en métodos analíticos y basados en métodos de inteligencia artificial. Normalmente las estrategias convencionales de UVLS utilizan métodos de diseño **basados en reglas fijas** para desconectar una cantidad fija de carga una vez superado un valor de tensión preestablecido durante un cierto tiempo. En las estrategias basadas en **métodos analíticos**, un índice o variable relevante relacionado con la severidad de la FIDVR se calcula matemáticamente para determinar la ubicación óptima y la cantidad de carga a desconectar en la barra de manera adaptativa a las condiciones de operación del sistema. Mientras que las estrategias basadas en métodos de **inteligencia artificial** un algoritmo de aprendizaje automático extrae la relación entre las condiciones de operación inicial del sistema eléctrico y las acciones de control de rechazo de carga para luego determinar con el modelo aplicado en línea la ubicación y desconexión de la carga de manera efectiva.

2.3. Evaluación de las características

La evaluación de las características se realizó mediante una codificación que asigna a cada característica un valor, el cual se definió como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1: Codificación para evaluar las características.

Valor	Definición
0,5	Se asigna a una característica que no emplea las capacidades tecnológicas actuales
1	Se asigna a una característica neutra que se puede mejorar
2	Se asigna a una característica que es la deseada

El Cuadro 2 muestra la evaluación de las características en cada una de las diferentes estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR. La última columna muestra el porcentaje de publicaciones que incluye cada característica. Este valor se calculó con referencia a la cantidad total de publicaciones seleccionadas (16 artículos científicos).

En relación al esquema de operación, el esquema centralizado es la característica deseada con el valor más alto porque emplea las capacidades tecnológicas que ofrece los sistemas de medición de área amplia, a través de la medición sincronizada de fasores, para obtener una visión completa del SEP. Así mismo, los beneficios que ofrece la medición sincronizada de fasores son aprovechados por algunas estrategias de rechazo de carga para determinar la contribución de cada barra del sistema eléctrico a la FIDVR y seleccionar a partir de una lista de mérito la ubicación de la barra más efectiva donde desconectar la carga. Por lo tanto, la ubicación de la barra de desconexión en barra efectiva es la característica deseada y tiene la puntuación más alta.

La forma de activación basada en la respuesta recibe el valor más alto de la puntuación porque puede determinar el instante de activación de la estrategia de rechazo de carga de acuerdo al tiempo de recuperación de la tensión en la barra o el tiempo de recuperación de la velocidad en el motor u otra variable ligada con la evolución de la FIDVR. Esto permite desconectar la carga solo en aquellos casos de eventos que originan una recuperación retardada de la tensión, independiente de tener que reconocer la ocurrencia de una perturbación o evento en particular lo cual pudiera dar una activación errónea y por lo tanto, una desconexión de carga innecesaria.

Para el tipo de desconexión de carga, el valor más alto se asignó a aquellas estrategias que son capaces de determinar automáticamente para la desconexión de carga una cantidad variable de acuerdo a la severidad de la FIDVR. La desconexión de una cantidad de carga adaptable a las diferentes condiciones de operación del sistema eléctrico, es una

característica deseada en el desarrollo de las nuevas estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR. Además, en aquellas estrategias diseñadas para operar en varias etapas bajo un esquema de control de lazo cerrado la desconexión de la carga necesaria en la siguiente etapa se ajusta en gran medida en función del resultado medido de la acción realizada en la etapa anterior, lo cual le da una mayor flexibilidad a la estrategia. Por lo tanto, el tipo de control de lazo cerrado tiene una puntuación más alta que el control de lazo abierto.

Cuadro 2: Evaluación de las características de las estrategias de rechazo de carga.

Item	Características	Opciones	Valor	Publicaciones (%)
A	Esquema de operación	Descentralizado	0,5	43,75
		Centralizado	2	56,25
B	Forma de activación	Basado en evento	1	18,75
		Basado en la respuesta	2	81,25
C	Ubicación de la barra de desconexión	En barra preestablecida	1	43,75
		En barra efectiva	2	56,25
D	Tipo de desconexión de carga	Fija	1	37,50
		Variable	2	62,50
E	Tipo de control	Lazo abierto	1	81,25
		Lazo cerrado	2	18,75
F	Método de diseño	Basado en reglas fijas	-	18,75
		Basado en métodos analíticos	-	50,00
		Basado en inteligencia artificial	-	31,25

2.4. Resultados

Los resultados del análisis de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR se presenta en el Cuadro 3. Cada estrategia se evaluó con base a la puntuación asignada a cada característica mostrada en el Cuadro 2.

Cuadro 3: Clasificación bibliográfica de las estrategias de rechazo de carga.

Ref.	Año	Características						Total
		A	B	C	D	E	F	
[17]	2011	2	2	2	2	1	Método analítico	9
[18]	2013	2	2	2	1	1	Método analítico	8
[19]	2013	0,5	2	2	1	1	Método analítico	6,5
[20]	2015	0,5	2	1	1	1	Basado en reglas	5,5
[21]	2017	2	2	2	2	1	Método analítico	9
[22]	2018	0,5	2	1	1	1	Basado en reglas	5,5
[23]	2018	0,5	1	1	2	1	Basado en reglas	5,5
[24]	2018	0,5	2	1	1	1	Método analítico	5,5
[25]	2019	2	2	2	2	1	Método analítico	9
[26]	2019	2	2	2	1	1	Método analítico	8
[7]	2019	0,5	2	1	2	1	Método analítico	6,5
[27]	2019	2	2	2	2	1	Inteligencia artificial	9
[28]	2020	2	2	1	2	2	Inteligencia artificial	9
[29]	2020	2	1	2	2	2	Inteligencia artificial	9
[30]	2021	2	1	2	2	1	Inteligencia artificial	8
[31]	2021	0,5	2	1	2	2	Inteligencia artificial	7,5

A partir del porcentaje de publicaciones dado en la última columna en el Cuadro 2 y la matriz de información disponible en el Cuadro 3, el análisis del estado del arte y la tendencia en el desarrollo de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR se discute en la siguiente sección.

2.5. Discusión de los resultados

Las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR se clasificaron primero de acuerdo al esquema de operación. El 56,25 por ciento de las estrategias utilizan un esquema de operación centralizado mientras que el 43,75 por ciento usan únicamente mediciones locales en la barra de carga bajo un esquema de operación descentralizado sin la interacción con otras barras, por lo que no necesita de una infraestructura de comunicación. En cambio, las estrategias de rechazo de carga que operan bajo un esquema centralizado aprovechan los beneficios que ofrece la tecnología de los sistemas de medición de área amplia y la medición sincronizada de fasores para coordinar las acciones de desconexión de carga en varias barras tomando en cuenta el panorama completo de la FIDVR en el SEP.

Con relación a la activación de la estrategia de rechazo de carga, el 81,25 por ciento de las estrategias analizadas se inclinó en gran medida a determinar el instante de activación con base a la respuesta del sistema eléctrico. Las estrategias que comparten esta característica de alto impacto activan la desconexión de la carga solo en aquellos casos de eventos que originan una recuperación retardada de la tensión. Normalmente, utilizan el tiempo de recuperación de la magnitud de la tensión en la barra o el tiempo de recuperación de la velocidad del motor para monitorear la evolución de la recuperación de la tensión y activar la estrategia. Mientras que el 18,75 por ciento activan la desconexión de la carga mediante el reconocimiento de la ocurrencia de un evento particular, lo cual pudiera dar una activación errónea y por lo tanto una desconexión de carga innecesaria.

La identificación de la barra más efectiva para desconectar la carga fue utilizada en el 56,25 por ciento de las estrategias propuesta en la literatura versus el 43,75 por ciento de las estrategias que lo hicieron en barras previamente establecidas. Casi todas las estrategias que identificaron la mejor ubicación para la desconexión de la carga también optaron por el diseño de una estrategia bajo un esquema de operación centralizado lo que reafirma la importancia del uso de la medición sincronizada de fasores y los sistemas de medición de área amplia en el desarrollo de estrategias de rechazo de carga más efectivas para mitigar la FIDVR.

La desconexión de una cantidad de carga variable es un factor clave para lograr una recuperación más rápida de la tensión con menos desconexión de carga. El 62,5 por ciento de las estrategias analizadas desconecta una cantidad de carga variable de acuerdo a la severidad de la FIDVR proporcionando a la estrategia mejor adaptabilidad a las condiciones de operación del sistema eléctrico. Por el contrario el 37,5 por ciento de las estrategias desconecta un valor fijo de la carga en cada etapa de la estrategia.

Algunas estrategias usan un control de emergencia de lazo cerrado para ajustar la acción correctiva de la desconexión de carga a la severidad de la perturbación proporcionando robustez a la estrategia. Sin embargo, el 18,75 por ciento de los artículos analizados emplean este tipo de control mientras que el restante 81,25 por ciento emplea un control de emergencia de lazo abierto dada su simplicidad.

Con relación a los métodos de diseño, las estrategias convencionales de UVLS basados en reglas fijas tienen un porcentaje de publicaciones igual al 18,75 por ciento, estas estrategias tienen la ventaja de su simplicidad de cálculo. Sin embargo, la activación de la estrategia determinada por reglas empíricas no resulta lo suficientemente rápida para disminuir eficazmente el tiempo de recuperación de la tensión. Por su parte, las estrategias basadas en métodos analíticos con el porcentaje de publicaciones más alto igual al 50 por ciento representan una alternativa de solución a las estrategias convencionales de UVLS para mitigar la FIDVR. No obstante, las estrategias basadas en inteligencia artificial con un porcentaje de publicaciones igual al 31,25 por ciento, comparado con los métodos analíticos, tienen la ventaja de mayor velocidad de cálculo, menor requerimientos de datos y poseen la capacidad de descubrir y extraer nuevo conocimiento.

Por lo expuesto anteriormente, se reconoce que la tendencia en el desarrollo de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR es: 1) Usar mediciones sincronizadas de fasores de área amplia. 2) Determinar la activación de la estrategia con base a la respuesta del sistema eléctrico de potencia. 3) Identificar la barra más efectiva para desconectar la carga en esa localidad bajo un esquema de operación centralizado. 3) Ajustar la cantidad de carga a desconectar en la estrategia de rechazo de carga a la severidad de la FIDVR con la intención de maximizar la recuperación rápida de la tensión y minimizar la cantidad de carga a desconectar. 4) Usar el control de emergencia de lazo abierto, aunque hay un interés en el control de lazo cerrado. 5) Aunque los métodos analíticos se han empleado en el desarrollo de la mayoría de las estrategias de rechazo de carga, en los últimos años se ha incrementado el interés en usar técnicas de aprendizaje automático.

Adicionalmente, algunas de estas estrategias propuestas de rechazo de carga para mitigar la FIDVR han sido implementadas con éxito en sistemas eléctricos reales [18], [20], [21], [22], [24].

3. Conclusiones

En los últimos años de la década pasada hay un aumento en las publicaciones científicas relacionadas con la FIDVR. En este trabajo se presentó un análisis de las estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR, propuestas en la literatura especializada publicada en las bases de datos del IEEE y Elsevier durante el lapso 2010 – 2021, mediante la clasificación bibliográfica utilizando un método sistemático de evaluación de características. Se identificó las características comunes entre las diferentes estrategias de rechazo de carga y se evaluó el impacto de estas características, según su grado de pertenencia, en la activación, ubicación y cantidad de carga a desconectar para mitigar la FIDVR. La tendencia es determinar la activación de la estrategia de rechazo de carga con base a la evolución de la recuperación retardada de la tensión y desconectar en la barra más efectiva, bajo un esquema de operación centralizado, la mínima cantidad de carga según la severidad de la FIDVR.

El análisis del estado del arte de las estrategias de rechazo de carga basada en reglas empíricas y métodos analíticos reveló que aún no son del todo eficientes para determinar la mínima cantidad de carga a desconectar, ni lo suficientemente rápidas para disminuir eficazmente el tiempo de recuperación de la tensión. En cambio, los métodos de diseño basados en inteligencia artificial representan una gran oportunidad para superar estos desafíos en términos de precisión, alta velocidad de cómputo, menor requerimiento de datos y gran capacidad para descubrir y extraer conocimiento en el control de problemas relacionados con la estabilidad de tensión de corto plazo específicamente con la FIDVR. No obstante, la tecnología de medición sincronizada de fasores de área amplia es necesaria para implementar estas nuevas estrategias inteligentes de rechazo de carga.

Referencias

- [1] P. Irminger; D. T. Rizy; H. Li; T. Smith; K. Rice; F. Li; S. Adhikari. Air conditioning stall phenomenon - testing, model development, and simulation. In *PES T & D 2012*, pages 1–8. Orlando, FL, USA, IEEE, 2012. <https://doi.org/10.1109/TDC.2012.6281531>.
- [2] H. Saber; M. R. Karimi; E. Hajipour; N. Farzin; S. M. Hashemi; A. Agheli; H. Ayoubzadeh; M. Ehsan. Investigating the effect of ambient temperature on fault-induced delayed voltage recovery events. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(9):1781–1790, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1025>.
- [3] N. Hatziaargyriou; J. Milanovic; C. Rahmann; V. Ajarapu; C. Canizares; I. Erlich; D. Hill; I. Hiskens; I. Kamwa; B. Pal; P. Pourbeik; J. Sanchez-Gasca; A. Stankovic; T. Van Cutsem; V. Vittal; C. Vournas. Definition and classification of power system stability – revisited & extended. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(4):3271–3281, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9286772>.
- [4] S. Adhikari; J. Schoene; N. Gurung; A. Mogilevsky. Fault induced delayed voltage recovery (FIDVR): Modeling and guidelines. In *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Atlanta, GA, USA, 2019. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8973440>.
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. *IEEEExplore Digital Library*. <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.
- [6] Elsevier. *ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/>.
- [7] A. R. R. Matavalam; V. Ajarapu. PMU-based monitoring and mitigation of delayed voltage recovery using admittances. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6):4451–4463, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8701501>.
- [8] M. Paramasivam; A. Salloum; V. Ajarapu; V. Vittal; N. Bhatt; S. Liu. Dynamic optimization based reactive power planning to mitigate slow voltage recovery and short term voltage instability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4):3865–3873, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6558852>.
- [9] W. Wang; F. de Leon. Quantitative evaluation of DER smart inverters for the mitigation of FIDVR in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(1):420–429, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8770152>.
- [10] R. Verayiah; A. Mohamed; H. Shareef. Review of under-voltage load shedding schemes in power system operation. *Przeglad Elektrotechniczny*, 90(7):99–103, 2014. https://www.researchgate.net/publication/288094761_Review_of_under-voltage_load_shedding_schemes_in_power_system_operation.
- [11] R.B. Sharma; G.M. Dhole. Wide area measurement technology in power systems. *Procedia Technology*, 25:718–725, 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316305126>.
- [12] S. M. Mirafteyazadeh; F. Foadelli; M. Longo; M. Pasetti. A survey of machine learning applications for power system analytics. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, Italy, 2019. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8783340>.
- [13] K. Mollah; M. Bahadornejad; N. K. C. Nair; G. Ancell. Automatic under-voltage load shedding: A systematic review. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–7, San Diego, CA, USA, 2012. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6345547>.
- [14] R. M. Lariq; M. W. Mustafa; M. N. Aman. A critical review of the state-of-art schemes for under voltage load shedding. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(5):1–26, 2019. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2050-7038.2828>.
- [15] J. Hurtado. *Metodología de la investigación. Guía para la comprensión holística de la ciencia*. Quiron Ediciones, Caracas, Venezuela, 2012.
- [16] M. Barrera. *Análisis en investigación*. Ediciones Quirón, Caracas, Venezuela, 2009.
- [17] H. Bai; V. Ajarapu. A novel online load shedding strategy for mitigating fault-induced delayed voltage recovery. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1):294–304, 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5454321>.
- [18] A. Mahari; H. Seyedi. A fast online load shedding method for mitigating FIDVR based on novel stability index. In *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pages 1–6, Mashhad, Iran, 2013. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6599887>.

- [19] B. Otomega; T. Van Cutsem. Distributed load interruption and shedding against voltage delayed recovery or instability. In *2013 IEEE Grenoble Conference*, pages 1–6, Grenoble, France, 2013. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6652479>.
- [20] S. V. Kolluri; J. R. Ramamurthy; S. M. Wong; M. Peterson; P. Yu; M. R. Chander. Relay-based undervoltage load shedding scheme for entergy's western region. In *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pages 1–5, Denver, CO, USA, 2015. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7285651>.
- [21] Y. Dong; X. Xie; K. Wang; B. Zhou; Q. Jiang. An emergency-demand-response based under speed load shedding scheme to improve short-term voltage stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5):3726–3735, 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7822924>.
- [22] Y. Lee; H. Song. Multi-phase under voltage load shedding scheme for preventing delayed voltage recovery by induction motor power consumption characteristics. *Applied Sciences*, 8(7):1115, 2018. <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/7/1115>.
- [23] A. Joseph; M. Cvetković; P. Palensky. Predictive mitigation of short term voltage instability using a faster than real-time digital replica. In *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8571803>.
- [24] S. M. Hashemi; M. Sanaye-Pasand; M. Abedini. Under-impedance load shedding: a new preventive action against voltage instability. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(2):201–208, 2018. <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2018.5851>.
- [25] S. R. Moghadam; E. Hajipour; N. Farzin; M. Vakilian; M. Ehsan. Improvement in voltage recovery delay phenomenon caused by air conditioners specific performance. In *2019 International Power System Conference (PSC)*, pages 523–529, Tehran, Iran, 2019. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9081481>.
- [26] E. A. Tapia; D. G. Colomé. Mitigación de la recuperación retardada de tensión inducida por falla mediante desconexión de carga basada en el comportamiento dinámico de la carga. *Revista Técnica "Energía"*, 16(1):23–31, 2019. <https://revistaenergia.cenace.gob.ec/index.php/cenace/article/view/332>.
- [27] C. X. Jiang; Z. Li; J. H. Zheng; Q. H. Wu. Power system emergency control to improve short-term voltage stability using deep reinforcement learning algorithm. In *2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, pages 1872–1877, Beijing, China, 2019. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9077322>.
- [28] S. Chen; Y. Bai; Z. Jun. Dynamic load shedding strategy using distributional deep reinforcement learning in power system emergency control. In *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pages 248–253, Wuhan, China, 2020. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9346749>.
- [29] Q. Huang; R. Huang; W. Hao; J. Tan; R. Fan; Z. Huang. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2):1171–1182, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8787888>.
- [30] Q. Li; Y. Xu; C. Ren. A hierarchical data-driven method for event-based load shedding against fault-induced delayed voltage recovery in power systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(1):699–709, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9091249>.
- [31] L. Zhu; Y. Luo. Deep feedback learning based predictive control for power system undervoltage load shedding. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(4):3349–3361, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9312447>.

Sobre los autores

Gustavo Araujo-Suárez

Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica. Candidato a Doctor en el programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, mención Productividad de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Venezuela. Profesor agregado, Jefe de sección de Máquinas Eléctricas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, UNEXPO. Áreas de investigación: Estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia. Herramientas de simulación digital.

Correo electrónico: garaujo@unexpo.edu.ve

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5356-6011>

Carmen Luisa Vásquez Stanescu

Ingeniero Electricista. Magister Scientiarum en Ingeniería Eléctrica. Doctora en Ciencias Técnicas. Profesora - Investigadora titular jubilada de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Barquisimeto, Venezuela. Áreas de investigación: Gestión energética. Cambio climático.

Correo electrónico: cvasquez@unexpo.edu.ve

Código ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0657-3470>

Forma de citar:

G. Araujo-Suárez y C.L. Vásquez Stanescu. Estrategias de rechazo de carga para mitigar la recuperación retardada de la tensión inducida por falla: desarrollo y tendencias. Publicaciones en Ciencias y Tecnología. 15(2): 51-60, 2021. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>