

CONTROL DE MODO DESLIZANTE PARA MICRORREDES: UNA REVISIÓN

SLIDING MODE CONTROL FOR MICROGRIDS: A REVIEW

Héctor Mauricio Yépez Ponce¹ Darío Fernando Yépez Ponce²

¹Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador
E-mail: mauroyopez32@gmail.com

²Instituto Superior Tecnológico Eloy Alfaro, Esmeraldas, Ecuador
E-mail: dfyp1991@gmail.com

Resumen

La necesidad de suministrar energía eléctrica a cualquier parte del mundo motivó a la creación del término microrred. En los últimos años ha ido tomando fuerza debido a que una microrred facilita la integración de fuentes renovables (solar, eólica, térmica) para la distribución de energía eléctrica. Las microrredes pueden funcionar de manera independiente, ya sea de manera aislada o en coordinación con la red principal debido a que integran generadores de energía propios, recursos de almacenamiento y tecnologías de información que permiten la organización y control de la red. La implementación de una microrred obliga a plantear estrategias de control que permitan satisfacer con la demanda de carga local, aprovechar la mayor cantidad de energía, reducir costos e incrementar la fiabilidad. Este artículo de revisión presenta la arquitectura de una microrred, modos de operación, niveles de control jerárquico y una comparación de las investigaciones realizadas que han obtenido resultados al realizar simulaciones e implementar los diferentes tipos de controladores en microrredes.

Palabras clave– Control Jerárquico, Control de Modo Deslizante, Microrredes AC, Microrredes DC y Microrredes Híbridas.

Abstract

The need to supply electric power to any part of the world motivated the creation of the term microgrid. In recent years it has been gaining strength because a microgrid facilitates the integration of renewable sources (solar, wind, thermal) for the distribution of electrical energy. Microgrids can operate independently, either in isolation or in coordination with the main network because they integrate their own power generators, storage resources and information technologies that allow the organization and control of the network. The implementation of a microgrid forces to propose control strategies that allow to satisfy with the demand of local load, to take advantage of the greater amount of energy, to reduce costs and to increase reliability. This review article presents the architecture of a microgrid, modes of operation, levels of hierarchical control, and a comparison of research that has resulted in simulations and implementation of different types of microgrid controllers.

Key Words– Hierarchical Control, Slider Mode Control, AC Microgrids, DC Microgrids and Hybrid Microgrids.

INTRODUCCIÓN

Una microrred se enmarca como una red eléctrica integrada, que utiliza sus propios generadores de energía, elementos de almacenamiento, controladores e interfaces. Estos sistemas utilizan tecnología digital que permiten la inclusión de fuentes renovables (solar, eólica, térmica, otras) a la red con el objetivo de autoabastecerse y operar de forma aislada a la red principal si esta llegara a fallar; de esta manera poder asegurar la continuidad del servicio y aumentar la confiabilidad de suministro a la carga local (Gonzalez Castro, Cusguen Gomez, Mojica Nava, & Pavas Martinez, 2017).

Una microrred puede tener dos modos de operación: modo conectado a la red y modo aislado (Ahmed, Hojabri, Humada, Daniyal, & Frayyeh, 2015). En el modo conectado a la red, la red suministra energía a los diferentes elementos de la microrred, en este modo el control se enfoca principalmente en el flujo de potencia activa y reactiva. En el modo aislado el mayor desafío es mantener la tensión y frecuencia dentro de parámetros aceptables que permitan a los generadores cumplir con la demanda de la red (Medina, 2014).

Entre los beneficios que puede satisfacer una microrred están: mejorar la confiabilidad y calidad de energía, corrección de caída de voltaje, reducir costos, proporcionar funciones de suministro de energía interrumpible, regulación de frecuencia y capacidad de potencia de la red (Ahmed et al., 2015)(Lasseter, 2003). Para lograr estos beneficios se aplican técnicas de control lineales y no lineales.

Según Coban (2017), El Control de Modo Deslizante, (SMS por sus siglas en inglés), fue establecido a principios de 1950 por Emelyanov, es uno de los controles más poderosos de estructura variable no lineal debido a la robustez que brinda al sistema contra incertidumbres o perturbaciones que afecten de manera directa o indirecta a la planta.

El SMC controla la cantidad de interés en un sistema mediante la aplicación de señales de control discontinuas, esto incluye la baja sensibilidad a variaciones de parámetros y un rechazo a perturbaciones, produciendo un mayor rendimiento y llevando al sistema a un estado de estabilidad que se conoce como superficie deslizante (Pathan & Thosar, 2018). Consta principalmente de dos fases: la fase deslizante que obliga al sistema a deslizarse a lo largo de una sección transversal, lugar en el cual el sistema tiene un comportamiento normal y la fase de alcance que está diseñada para alcanzar el múltiple deslizante desde cualquier punto en el espacio de estados (Gireesh & Seema, 2015).

Este artículo de revisión consta de 3 secciones, en la sección 1 se analizará la estructura de las microrredes, los niveles de control jerárquico y finalmente las investigaciones realizadas en los últimos años aplicando el control de modo deslizante en las microrredes eléctricas DC, AC e híbridas se tratan en la sección 2 y finalmente en la sección 3 se indican las conclusiones fruto de la revisión.

DESARROLLO

2.1 Métodos y Materiales

Esta investigación se diseñó bajo la metodología Prisma (Liberati et al., 2009). La investigación se fundamentó en la pregunta: ¿Cómo se ha implementado el control de modo deslizante en las diferentes estructuras de microrredes?

Con base en la pregunta de investigación planteada y con la finalidad de especificar la investigación, se definieron términos generales de búsqueda como: sliding mode control, microgrids, hierarchical control y control in microgrids en las siguientes bases de datos: IEEExplorer, Scopus y Web of Science. Se emplearon ecuaciones de búsqueda y términos booleanos con la finalidad de restringir la cantidad de documentos que se centran en esta investigación: [("Sliding mode control" AND "microgrids"), ("Sliding mode control" AND "DC microgrids"), ("Sliding mode control" AND "AC microgrids"), "Sliding mode control" AND "Hybrid microgrids")].

La búsqueda de los artículos de investigación se realizó en las bases de datos propuestas y se obtuvieron 148 resultados en IEEExplorer, 126 en Scopus y 70 en Web of Science; para un total de 344 resultados. A partir de estos últimos, se encontraron 15 duplicados en el gestor bibliográfico Mendeley, luego se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para eliminar artículos que no correspondan, de esta forma se obtuvieron un total de 37. Finalmente, se realizó la revisión sistemática en los 37 artículos de investigación originales.

2.2 Estructura de una Microrred

2.2.1 Estructura de una microrred DC

Las microrredes de DC están captando más atención que las de AC, debido a que la mayor parte de dispositivos modernos domésticos y comerciales funcionan con suministro de DC y fuentes de energías renovables. Por otro lado, el uso de microrredes AC demuestran ser ineficientes ya que utilizan múltiples conversiones DC-AC-DC (D. Zhang & Wang, 2017) (S. Singh & Fulwani, 2014b). La estructura de una microrred DC en modo aislado se representa en la Figura 1, donde los generadores distribuidos, carga activa, carga resistiva y dispositivo de almacenamiento de energía están conectados al bus de DC.

2.2.2 Estructura de una microrred AC

En la red de transmisión general, la energía eléctrica se genera, transmite y distribuye en AC; debido a que en AC los transformadores de potencia convierten la energía de un nivel de tensión a otro con el objetivo de disminuir las pérdidas en la transmisión. Su estructura típica se muestra en la Figura 2. En las microrredes AC, las generaciones distribuidas y los dispositivos de almacenamiento de energía se conectan al bus de AC a través de dispositivos electrónicos de alimentación (Ma & Ouyang, 2019).

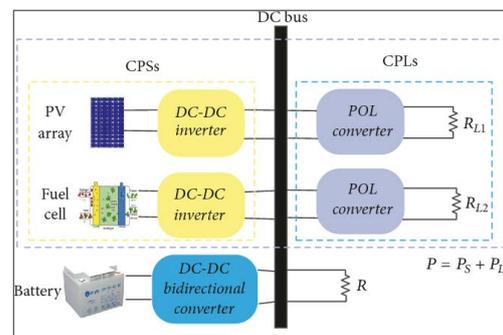


Figura 1: Estructura de una microrred DC.
Fuente: D. Zhang & Wang, 2017.

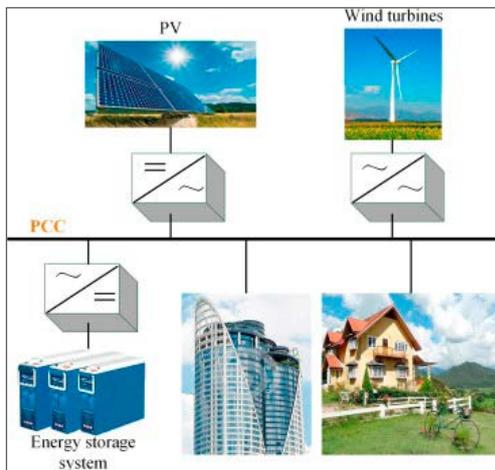


Figura 2: Estructura de una microrred AC.
Fuente: Ma & Ouyang, 2019.

2.2.3 Estructura de una microrred híbrida

La microrred híbrida AC/DC representada en la Figura 3. Contiene bus de AC y bus de DC. Puede suministrar energía a cargas de AC y cargas de DC directamente. El concepto de microrredes híbridas es más útil ya que se pueden utilizar las ventajas de ambas microrredes, sin embargo la operación y control resulta más compleja debido a la coexistencia de ambas microrredes (Roy et al., 2018).

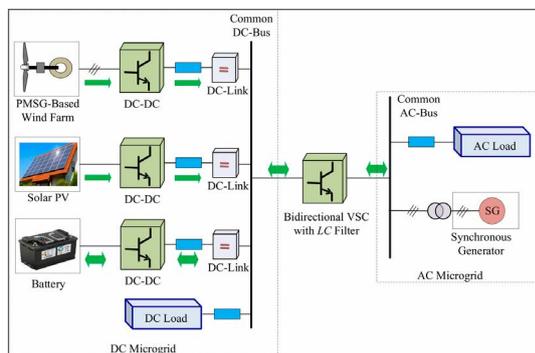


Figura 3: Estructura de una microrred AC/DC.
Fuente: Roy et al., 2018.

2.3 Control jerárquico de una Microrred

El modelo tradicional de control jerárquico de microrredes tiene tres niveles: el nivel de control primario es el encargado de mantener el equilibrio de potencia de la microrred para lo-

grar una operación autónoma (Morstyn, Savkin, Hredzak, & Tuan, 2018). El control secundario se introduce para restaurar la frecuencia y voltaje a los valores nominales introducidos por el control primario y/o para corregir las relaciones de carga compartida entre las fuentes (R. Zhang & Hredzak, 2019). Finalmente, el control terciario es responsable del control del flujo de energía y de la toma de decisiones dependiendo de la demanda y el estado de la microrred (Ghazzali & Haloua, 2018).

2.4 Control de Modo Deslizante

El controlador de modo deslizante es un caso especial de un controlador de estructura variable, donde una ley de control de conmutación de alta velocidad impulsa la trayectoria del sistema no lineal en una superficie específica y elegida por el usuario en el espacio de estado (Zhijun Li, Deng, & Gu, 2010).

En el diseño de SMC, se consideran dos aspectos importantes: Primero establecer la dinámica de la superficie de deslizamiento que se define por primera vez en el espacio de estado, debe ser estable y puede ser lineal, esta superficie es la encargada de regir el comportamiento del sistema cuando se encuentra en el modo de deslizamiento (Zhijun Li et al., 2010). Segundo es el diseño de un controlador que permita a las trayectorias que se encuentren cerca de la superficie de deslizamiento se dirijan hacia la superficie establecida por el diseñador. Una vez alcanzada esta superficie, la dinámica del lazo cerrado, lo hace independiente de las perturbaciones en los parámetros del sistema, de esta manera se logra una excelente robustez (Utkin, 1992).

La característica más importante de este controlador es no ser sensible a las incertidumbres estructurales, la dinámica y las perturbaciones no modeladas, lo que permite ser empleado en aplicaciones para el control de sistemas no lineales, variantes en el tiempo y sistemas con incertidumbre. En la Figura 4, se presenta

la interpretación gráfica del control por modo deslizante, parte de un punto inicial (X_0), la ley de control lo conduce a la superficie de deslizamiento (modo de alcanzabilidad) y una vez allí se desliza atrapado por la superficie hasta el valor deseado (superficie deslizante) (García & Zambrano, 2004).

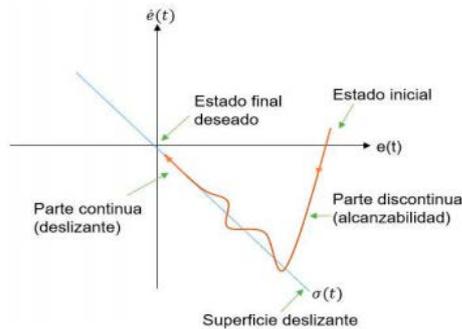


Figura 4. Superficie de deslizamiento.
Fuente: García & Zambrano, 2004.

2.4.1 Estructura del SMC

La estructura del controlador se modifica intencionalmente a medida que su estado cruza la superficie de acuerdo con una ley de control prescrita (Sira-Ramírez & Llanes-Santiago, 1994) Por lo tanto, el primer paso en SMC es definir la superficie deslizante $S(t)$. $S(t)$ se elige para representar un comportamiento global deseado, por ejemplo, estabilidad y seguimiento del rendimiento. $S(t)$ presentada en (1), es una ecuación diferencial integral que actúa sobre la expresión de error de seguimiento.

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

Donde $e(t)$ es el error de seguimiento, es decir, la diferencia entre el valor de referencia o el punto de ajuste, $R(t)$ y la medición de salida, $X(t)$, o $e(t) = R(t) - X(t)$ y es un parámetro de ajuste, que ayuda a definir $S(t)$; Este término es seleccionado por el diseñador, λ determina el rendimiento del sistema en la superficie deslizante, n es el orden del sistema.

El objetivo del control es asegurar que la variable controlada sea igual a su valor de referencia en todo momento, lo que significa que $e(t)$ y sus derivados deben ser cero. Una vez que se alcanza el valor de referencia, la ecuación. (1) indica que $S(t)$ alcanza un valor constante. Para mantener $S(t)$ en este valor constante, lo que significa que $e(t)$ es cero en todo momento, Es decir:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 \quad (2)$$

Una vez que se ha seleccionado la superficie deslizante, se debe prestar atención al diseño de la ley de control que lleva la variable controlada a su valor de referencia y satisface la ecuación (2). Se procede a representar la ley de control de un SMC, $U(t)$, compuesta por dos partes que se suman, una parte continua, $U_c(t)$, y una parte discontinua, $U_d(t)$, [5], Es decir:

$$U(t) = U_c(t) + U_d(t) \quad (2)$$

La parte continua viene expresada de la siguiente manera:

$$U_c(t) = f(X(t), R(t)) \quad (3)$$

Donde $f(X(t), R(t))$ es una función variables de la variable controlada y el valor de referencia.

La parte discontinua, $U_d(t)$, incorpora un elemento no lineal que incluye el elemento de conmutación de la ley de control. Esta parte del controlador es discontinua a través de la superficie deslizante.

$$U_d(t) = Kd \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (4)$$

Donde KD es el parámetro de ajuste responsable del modo de alcance. δ es un parámetro de ajuste utilizado para reducir el problema de parloteo. El parloteo es una oscilación de alta frecuencia alrededor del punto de equilibrio deseado. No es deseable en la práctica, porque implica una actividad de alto control y también puede excitar dinámicas de alta frecuencia ig-

noradas en el modelado del sistema (Colantoni, Desages, Romagnoli, & Palazoğlu, 1995).

En resumen, la ley de control generalmente da como resultado un movimiento rápido para llevar el estado a la superficie deslizante, y un movimiento más lento para continuar hasta alcanzar el estado deseado (Camacho & Smith, 2000)

2.4.2 Aplicaciones del SMC

Considerando la robustez de este controlador se han realizado múltiples investigaciones en diferentes áreas, por ejemplo en robots móviles: en (Benaziza, Slimane, & Mallem, 2017), se propone un enfoque de seguimiento de trayectoria. Se utiliza el SMC para converger el error de ángulo y posición a cero en poco tiempo con estabilidad asintótica, los resultados de la simulación muestran una buena convergencia para trayectorias circulares, sinusoidales y específicas. También ha sido aplicada en brazos robóticos, en (Eltayeb, Rahmat, Eltoum, Ibrahim M. H., & Basri, 2020), se aplica un controlador de modo deslizante adaptativo (ASMC) diseñado para un sistema de manipulador no lineal de brazo robótico de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Se descubrió que, incluso en presencia de las incertidumbres de los parámetros, el rendimiento del controlador propuesto para el seguimiento de la trayectoria es robusto. Además, el parloteo se reduce significativamente. Incluso se han realizado estudios en el área espacial que implican un alto grado de complejidad. En (Wang, Liu, Wu, & Tang, 2012), se aplica un método de SMC basado en tecnología de control de tiempo finito, con la finalidad de lograr un seguimiento a la posición de salida de la nave espacial en presencia de perturbaciones externas. También se da una ley de control de tiempo finito para estabilizar la posición de la nave espacial.

En este trabajo se hará énfasis en la aplicación de este tipo de control en microrredes eléctricas.

2.4.3 SMC en microrredes DC

Los controles de modo deslizante son los más adecuados para controlar la estructura de los convertidores DC-DC debido a su robustez y resistencia. A continuación, se presentan algunos ejemplos de SMC aplicado a microrredes DC.

El uso SMC basado en modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) se utiliza para hacer que la frecuencia sea constante; así, la frecuencia de conmutación del sistema es la misma que la de una onda triangular. En (D. Zhang & Wang, 2017), se propone un control de voltaje del bus para una microrred DC en modo isla. La estrategia de control usada en este caso es un control adaptativo en modo deslizante basado en PWM, que reduce en gran medida la dificultad del diseño del filtro y permite rastrear el voltaje del bus de manera rápida y precisa sin sensores o circuitos de hardware adicionales, lo cual es esencial para la escalabilidad del sistema. En (P. Singh & Lather, 2018), se utiliza el control antes mencionado para controlar el voltaje de un convertidor elevador que permita el funcionamiento estable de la microrred DC. Finalmente en (S. Singh & Fulwani, 2014), se presenta un diseño de SMC basado en PWM para disminuir las inestabilidades de impedancia negativa producidas por el comportamiento negativo de la resistencia incremental de los convertidores en el punto de carga y asegura el voltaje terminal requerido dentro de los límites cercanos, mostrando una robustez razonable para suministrar y cargar variaciones laterales.

En (Yasin, Ashraf, Bhatti, Ahmad, & Rashid, 2016), se diseñó un control de modo deslizante para resolver el problema de las corrientes circulantes y el reparto de carga desequilibrado y se lo compara con un control PID lineal. El SMC demostró ser superior ya que a pesar de existir un alto contenido de ondulación presenta un buen rendimiento y hace frente a perturbaciones externas coincidentes mejor que el controlador

PID. Sin embargo, el control indirecto del voltaje lo hace vulnerable al cambio de resistencia de carga, esto se debe a que la superficie deslizante fue diseñada a partir de la corriente del inductor.

En (Setyawan, Peng, & Jianfang, 2014), se implementó el SMC en una microrred DC compuesta por un panel solar fotovoltaico, batería de plomo ácido para almacenamiento de energía y una resistencia de carga DC. El método de control se implementó al convertidor de carga y descarga de la batería con el fin de mantener una estabilidad en el voltaje de salida y equilibrio de potencia en caso de variaciones de irradiación solar. También se aplicó un filtro de lavado que minimiza la respuesta transitoria del sistema dando como resultado que el control de modo deslizante es 0.387% más eficiente durante los sobre impulsos que el control PI, además el tiempo de establecimiento del control de modo deslizante es menor que el control PI.

En (Armghan, Yang, Wang, Ali, & Armghan, 2020), se propuso un algoritmo integral de retroceso para el control de múltiples generadores renovables y los resultados se comparan con el rediseño adaptativo de Lyapunov (ALR, por sus siglas en inglés) y el control de modo deslizante. En esta investigación se estudiaron varios aspectos como la variación de la velocidad del viento para la energía eólica, el cambio de temperatura y la irradiancia en los paneles fotovoltaicos y también la variación de carga resistiva de DC. Luego de realizar las respectivas simulaciones en Matlab/Simulink se obtuvo que las tres técnicas de control responden de manera eficiente a los transitorios y rastrean el voltaje del bus de DC, sin embargo; el que mostró mejor desempeño fue el algoritmo integral de retroceso.

También se ha investigado el modelo matemático de una microrred DC para analizar la estabilidad y el rendimiento dinámico, utilizando un SMC basado en modulación de histéresis (Muhammad Rashad, Muhammad Ashraf,

Bhatti, Minhas, & Ahmed, 2018); este método se utiliza principalmente para mejorar el efecto parloteo en SMC. El efecto parloteo se produce cuando la frecuencia de conmutación inicia un comportamiento dinámico en la superficie deslizante y hace que el sistema comience a fluctuar a frecuencia alta que puede producir grandes pérdidas de conmutación.

La implementación de un esquema de control descentralizado en una microrred DC real en (Cucuzzella et al., 2018); muestra el análisis teórico y la validación de un SMC de orden superior para la regulación de voltaje en convertidores DC basadas en impulso en cuatro escenarios diferentes: Perturbación con una variación de potencia con una velocidad rampa limitada, perturbación con una variación de potencia por pasos, variación escalonada de la referencia de voltaje y uso compartido de corriente. Demostrando que el método de control en el múltiple deslizante propuesto, es exponencialmente estable en el punto de operación deseado.

La investigación en (Chang, 2018)an intelligent sliding mode controlled voltage source inverter (VSI, presentó un controlador híbrido, el cual asocia una tecnología de control robusta como el SMC y un algoritmo de aprendizaje automático para controlar un inversor de voltaje. El uso de un sistema adaptativo neuro difuso (NFIS, por sus siglas en inglés), garantiza la estabilidad en tiempo finito de los errores de seguimiento con una mayor solidez a las incertidumbres del sistema. Las simulaciones y experimentos realizados en esta investigación ilustran un comportamiento transitorio rápido y una respuesta satisfactoria de estado estacionario a los cambios en los pasos de carga, variaciones de parámetros de filtro y cargas de tipo rectificador.

En (Benadero, Cristiano, Pagano, & Ponce, 2015), Se analizaron los efectos no lineales de dos convertidores de potencia interconectados en una microrred DC aislada. La técnica de control se aplicó a un convertidor de potencia bidi-

reccional DC-DC para controlar el voltaje del bus DC bajo cargas de potencia constantes instantáneas. Mostrando un rendimiento rápido para rechazar cambios de potencia de carga, útil para determinar la región en la cual se puede operar de manera segura el sistema y mantener la estabilidad bajo variaciones de carga desconocidas.

En (Vivek, 2019), se presentó una microrred DC que tiene tres micro fuentes y una carga resistiva. En esta investigación se compara el diseño de un control basado en PI y un SMC enfocados en la caída de voltaje, que permita regular el voltaje de salida de la red y potencia compartida entre las fuentes. Mediante las pruebas de simulación en el software de Matlab/Simulink se observa que el controlador de caída basado en SMC da una respuesta más rápida y una mejor regulación del voltaje que el controlador basado en PI.

En (Cucuzzella, Rosti, Cavallo, & Ferrara, 2017), se realizó un estudio de las estrategias de SMC de orden superior aplicadas a la regulación de voltaje en una microrred DC aislada, compuesta por varias unidades de generación distribuida interconectadas, líneas de alimentación y cargas. Primero se aplica un SMC de segundo orden para resolver el problema de control de voltaje, luego se utiliza un SMC de tercer orden para obtener una señal de control continuo y disminuir el parloteo del sistema. Además, se prueba la estabilidad asintótica de todo el sistema y el rendimiento del enfoque de control descentralizado.

En (Mokhtar, Marei, & El-Sattar, 2019), se estableció un esquema de caída de voltaje adaptativo para superar la no linealidad del sistema basado en dos controladores PI adaptativos. Uno tiene la función de eliminar los errores de intercambio de corriente entre las unidades de la microrred y el otro se asigna al bucle secundario para mantener el voltaje del bus DC en el valor nominal al cambiar las líneas de caída. Finalmente, un SMC para controlar simultáneamente el voltaje de salida y la corriente de entrada de

cada convertidor. Los resultados obtenidos por medio del paquete PSCAD/EMTDC, muestran que el esquema de caída adaptativo logra mantener una distribución de potencia precisa entre los convertidores y restablece el voltaje del bus DC a su valor nominal incluso bajo la dinámica de la carga. Además, el SMC regula estrictamente los voltajes terminales y las corrientes de entrada de las unidades de microrred con una respuesta dinámica rápida.

En (Agarwal, Deekshitha, Singh, & Fulwani, 2015), se propuso un SMC robusto para la unidad de almacenamiento de un convertidor de impulso bidireccional DC/DC en una microrred aislada alimentada por una carga de energía constante. El controlador propuesto regula el voltaje del bus DC dentro de los límites establecidos y es robusto con respecto a las grandes variaciones en la fuente de energía renovable y carga. La estabilidad del diseño fue validada por medio del simulador digital OPAL-RT, con una efectividad del 0.83% de su valor nominal.

En (Minhas, Khalid, & Frey, 2017), se utilizó un algoritmo de aprendizaje, para predecir la generación de energía renovable con anticipación. Este modelo de predicción presenta algunas incertidumbres como el exceso de energía y cargas no controladas. Para mitigar las incertidumbres y equilibrar el flujo de energía de la microrred se propone un control de carga directa que utiliza el SMC. Los resultados numéricos demuestran la validez de la metodología propuesta, al equilibrar con éxito la potencia generada con respecto a la demanda de carga.

En (Saha, Roy, Mahmud, Haque, & Islam, 2018), se utilizó el SMC para estimar con precisión el error en la medición de datos sea por falla de sensores o ataques cibernéticos. Esta técnica de control lo que hace es estimar el error en las mediciones y rectificar los datos corruptos medidos por el sensor. Por medio de rigurosas pruebas en el simulador bajo condiciones de falla y ataque se pudo comprobar que la técnica

de control utilizada presenta resistencia a fallas y detecta cuando se está efectuando un ataque cibernético a una microrred DC.

2.4.4 SMC en microrredes AC

En las microrredes AC los principales objetivos de control son la estabilidad del voltaje y frecuencia que funcionan una vez que la red principal ha sido desconectada (Morstyn et al., 2018). A continuación, se presentan algunas investigaciones realizadas en los últimos años.

En (Morstyn et al., 2018), se desarrolló una estrategia de control jerárquico para una microrred AC con batería distribuida y sistemas de almacenamiento de energía por ultra condensador. Se utiliza SMC de múltiples agentes para el equilibrio del estado de carga entre los sistemas de almacenamiento de energía de la microrred AC. El uso de este control evita las corrientes circulantes, aumenta la eficiencia y reduce la degradación en la vida útil de los componentes. Para las pruebas se utilizó un simulador digital en tiempo real de RTDS Technologies que verifica la correcta comunicación entre los niveles de control primario, secundario y terciario.

En (R. Zhang & Hredzak, 2019), se planteó una estrategia de control multiagente para la restauración de frecuencia, regulación de voltaje promedio a valores nominales, balance de estado de carga y distribución proporcional de potencia reactiva entre sistemas de baterías fotovoltaicas distribuidas en una microrred con retardos de tiempo de comunicación. Se aplica SMC en tiempo fijo para lograr el estado de equilibrio de carga a través de un valor estimado por un observador que estima el estado promedio de carga de una batería. El control propuesto garantiza robustez a las variaciones de carga y generación fotovoltaica intermitente. El rendimiento dinámico se verificó en el simulador RTDS en tiempo real en una microrred AC europea de referencia.

En (Ghazzali & Haloua, 2018), se propuso un nuevo controlador de frecuencia y voltaje secundario distribuido para microrredes AC en modo aislado. Se desarrolló un SMC distribuido que impulsa la amplitud de frecuencia y voltaje a sus referencias en tiempo finito independientemente de la naturaleza de las cargas, el controlador es insensible a los cambios en la red de comunicaciones y a las operaciones plug-and-play ya que no se producen fluctuaciones durante la conexión o desconexión de un componente de la microrred.

En (Cucuzzella, Trip, Ferrara, & Scherpen, 2019), se realizó un esquema combinado del control descentralizado en modo deslizante y el control promedio distribuido para la regulación cooperativa de voltaje en microrredes AC. En esta investigación el SMC se encarga de restringir el estado de la microrred en un colector adecuado donde el componente de voltaje de cada unidad de generación distribuida es igual a cero. Los resultados obtenidos a través del software de simulación muestran efectividad en la convergencia de los dos controles en estado estacionario.

En (Li et al., 2019), se planteó una estrategia de control jerárquico distribuido para el funcionamiento en paralelo de inversores de fuente de voltaje (VSI, por sus siglas en inglés) en microrredes de AC. Se propone un control de corriente de bucle interno basado en SMC y control de voltaje de bucle externo basado en un control mixto. Además, se usó el control de generación automática económica distribuida (EAGC, por sus siglas en inglés) basada en el sistema multiagente (MAS, por sus siglas en inglés) y el control de voltaje automático distribuido (AVC, por sus siglas en inglés) para restaurar la magnitud de voltaje y las desviaciones de frecuencia causadas por el controlador de caída y lograr un despacho de potencia activa óptimo al mismo tiempo. Los resultados de la simulación demuestran que la estrategia de control propuesta

tiene un buen rendimiento transitorio, robusto contra fallas de un solo punto y permite que las microrredes funcionen económicamente.

En (Incremona, Cucuzzella, Ferrara, & Magni, 2018), se empleó una arquitectura de control jerárquico basada en un modelo de control predictivo (MPC, por sus siglas en inglés) y SMC diseñado para estabilizar las microrredes AC en modo aislado con una topología compleja y afectadas por dinámicas de carga desconocidas e incertidumbres inevitables de modelado. El objetivo de esta investigación fue mantener los voltajes de salida de las unidades de generación distribuida en una capa límite mientras se lograba un intercambio de corriente entre las mismas. También se utiliza un SMC subóptimo de segundo orden para rastrear de manera descentralizada las referencias de voltaje generadas por un supervisor de MPC. La efectividad del algoritmo propuesto se confirma en los resultados de la simulación realizadas en una microrred con cuatro unidades de generación distribuida en una topología tipo anillo.

2.4.5 SMC en microrredes Híbridas

En general, una microrred híbrida AC/DC incluye diferentes recursos de energía distribuida y sistemas de almacenamiento, además de una cantidad de cargas AC y DC (Baghaee, Mirsalim, Gharehpetian, & Talebi, 2017). A continuación, se muestra los avances obtenidos aplicando SMC en microrredes híbridas AC/DC.

En (Baghaee et al., 2017), se propuso una estrategia de control basada en controladores basados en SMC para una microrred híbrida que incluye cargas no lineales y no balanceadas. La técnica de control robusto se diseñó en base a un SMC para el control de potencia activa y reactiva de los recursos de energía distribuidos y también para controlar la corriente de secuencia negativa y armónica en presencia de cargas no

lineales. Finalmente, el rendimiento del esquema de control se evaluó en el entorno de Matlab/Simulink en el dominio de tiempo fuera de línea y luego se verificó en el simulador digital en tiempo real OPALRT. Realizadas las pruebas la microrred híbrida mantuvo su estabilidad cuando enfrenta perturbaciones de señales grandes o pequeñas y mejoró su rendimiento para cargas no lineales y no balanceadas.

En (Sun, Zhou, Guerrero, & Zhang, 2015), se presentó un diseño de control para la distribución de energía de carga entre fases, y permitir que la energía se utilice por completo. El esquema de control combina el SMC adaptable de retroceso y el control de caída que proveen al sistema alta confiabilidad, tolerancia a fallas y capacitancia reducida. Finalmente, la simulación y los resultados experimentales demostraron la validez de la aplicación propuesta en la microrred híbrida y su esquema de control de gestión de energía.

En (Alam, Ashfaq, Zaidi, & Memon, 2016), se diseñó un controlador de corriente convencional y un SMC para el control de retroalimentación de un convertidor híbrido de interconexión bidireccional de una microrred AC/DC. El SMC mantuvo la estabilidad de potencia en diferentes condiciones de funcionamiento. Esto aseguró que el sistema híbrido permanezca estable y atienda a las no linealidades de las cargas dinámicas.

En (Amirkhan, Radmehr, Rezanejad, & Khorrami, 2020), se propuso una estrategia de control robusta para proporcionar respuestas estables basada en superficies de modo deslizante para controlar una microrred híbrida DC/AC conectada a la red bajo variaciones de carga y parámetros. Se utiliza la dinámica de error, a las superficies de modo deslizante con la finalidad de proporcionar un movimiento más estable para las variables de estado.

CONCLUSIONES

La red eléctrica convencional ha comenzado a sufrir transformaciones, prueba de ello son las microrredes eléctricas compuestas por fuentes de energía renovable, tecnologías digitales, recursos de almacenamiento, y lo más importante que pueden funcionar de manera autónoma y eficiente si la red principal llegara a fallar. En este documento se hizo una revisión de la estructura y las estrategias de control utilizadas para cada tipo de microrred. Se observó que la mayoría de investigaciones realizadas hasta la fecha están enfocadas en el control de microrredes DC, ya que este tipo de microrredes implican mayor eficiencia y menor simplicidad en su diseño.

Por otro lado se demostró que el control de modo deslizante proporciona un control robusto y con mejores resultados que los controles lineales PI y PID. Algunas ventajas del SMC son: brindar estabilidad al sistema ante incertidumbres y perturbaciones externas, menor tiempo de establecimiento, mayor eficiencia durante los sobre impulsos, mejorar el efecto parloteo, y reducir el orden del sistema. Sin embargo, una de las desventajas más relevantes que presenta el SMC es la vulnerabilidad a vibraciones de alta frecuencia durante la fase alcance, esto se debe a que la frecuencia de conmutación real no es infinita.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, A., Deekshitha, K., Singh, S., & Fulwani, D. (2015). Sliding mode control of a bidirectional DC/DC converter with constant power load. 2015 IEEE 1st International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2015, (c), 287-292. <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2015.7152056>
- Ahmed, M. N., Hojabri, M., Humada, A. M., Danial, H. Bin, & Frayyeh, H. F. (2015). An Overview on Microgrid Control Strategies. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, (5), 2249-8958.
- Alam, F., Ashfaq, M., Zaidi, S. S., & Memon, A. Y. (2016). Robust droop control design for a hybrid AC/DC microgrid. 2016 UKACC International Conference on Control, UKACC Control 2016. <https://doi.org/10.1109/CONTROL.2016.7737547>
- Amirkhan, S., Radmehr, M., Rezanejad, M., & Khormali, S. (2020). A robust control technique for stable operation of a DC/AC hybrid microgrid under parameters and loads variations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 117(October 2019), 105659. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105659>
- Armghan, H., Yang, M., Wang, M. Q., Ali, N., & Armghan, A. (2020). Nonlinear integral backstepping based control of a DC microgrid with renewable generation and energy storage systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 117(October 2019), 105613. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105613>

- Baghaee, H. R., Mirsalim, M., Gharehpetian, G. B., & Talebi, H. A. (2017). A Decentralized Power Management and Sliding Mode Control Strategy for Hybrid AC/DC Microgrids including Renewable Energy Resources. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3203(c), 1-1. <https://doi.org/10.1109/tii.2017.2677943>
- Benadero, L., Cristiano, R., Pagano, D. J., & Ponce, E. (2015). Nonlinear Analysis of Interconnected Power Converters: A Case Study. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 5(3), 326-335. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2015.7229651>
- Chang, E. C. (2018). Study and application of intelligent sliding mode control for voltage source inverters. *Energies*, 11(10), 14. <https://doi.org/10.3390/en11102544>
- Coban, R. (2017). Dynamic integral sliding mode control of an electromechanical system. *Automatika*, 58(3), 266-272. <https://doi.org/10.1080/00051144.2018.1426263>
- Cucuzzella, M., Lazzari, R., Trip, S., Rosti, S., Sandroni, C., & Ferrara, A. (2018). Sliding mode voltage control of boost converters in DC microgrids. *Control Engineering Practice*, 73(675999), 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.01.009>
- Cucuzzella, M., Rosti, S., Cavallo, A., & Ferrara, A. (2017). Decentralized Sliding Mode voltage control in DC microgrids. *Proceedings of the American Control Conference*, (January 2018), 3445-3450. <https://doi.org/10.23919/ACC.2017.7963479>
- Cucuzzella, M., Trip, S., Ferrara, A., & Scherpen, J. (2019). Cooperative Voltage Control in AC Microgrids. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2018-Decem(Cdc), 6723-6728. <https://doi.org/10.1109/CDC.2018.8618898>
- Ghazzali, M., & Haloua, M. (2018). Distributed voltage and frequency control of islanded AC microgrids. *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702969>
- Gireesh, G., & Seema, P. N. (2015). High frequency SEPIC Converter with PWM Integral Sliding Mode Control. *Proceedings of IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy, TAP Energy 2015*, 393-397. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2015.7229651>
- Gonzalez Castro, N. Y., Cusguen Gomez, C. A., Mojica Nava, E. A., & Pavas Martinez, F. A. (2017). Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales. *Revista UIS Ingenierías*, 16(2), 93-104. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017009>
- Incremona, G. P., Cucuzzella, M., Ferrara, A., & Magni, L. (2018). Model predictive control and sliding mode control for current sharing in microgrids. *2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control, CDC 2017, 2018-Janua(Cdc)*, 2661-2666. <https://doi.org/10.1109/CDC.2017.8264045>
- Lasseter, R. H. (2003). *MicroGrids*. 305-308. <https://doi.org/10.1109/pesw.2002.985003>
- Li, Z., Cheng, Z., Xu, Y., Wang, Y., Liang, J., & Gao, J. (2019). Hierarchical control of parallel voltage source inverters in AC microgrids. *The Journal of Engineering*, 2019(16), 1149-1152. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8620>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., ... Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and me-

- ta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), e1–e34. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- Ma, W., & Ouyang, S. (2019). Control strategy for inverters in microgrid based on repetitive and state feedback control. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 111(March), 447–458. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.002>
- Medina, R. D. (2014). Microrredes Basadas en Electrónica de Potencia: parte II: Control de Potencia Activa y Reactiva. *Ingenius*, (12), 24–34. <https://doi.org/10.17163/ings.n12.2014.03>
- Minhas, D. M., Khalid, R. R., & Frey, G. (2017). Load control for supply-demand balancing under Renewable Energy forecasting. 2017 IEEE 2nd International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2017, (June 2016), 365–370. <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001071>
- Mokhtar, M., Marei, M. I., & El-Sattar, A. A. (2019). An adaptive droop control scheme for DC microgrids integrating sliding mode voltage and current controlled boost converters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 1685–1693. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2776281>
- Morstyn, T., Savkin, A. V., Hredzak, B., & Tuan, H. D. (2018). Scalable Energy Management for Low Voltage Microgrids Using Multi-Agent Storage System Aggregation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 1614–1623. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2734850>
- Muhammad Rashad, Muhammad Ashraf, Bhatti, A. I., Minhas, D. M., & Ahmed, B. A. (2018). Mathematical modeling and stability analysis of DC microgrid using SM hysteresis controller. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 95, 507–522. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.001>
- Pathan, M., & Thosar, A. (2018). Study on Microgrids and Its Control Using Conventional and Sliding Mode Control. *Proceedings of the 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies, ICCTCT 2018*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICCTCT.2018.8551133>
- Roy, T. K., Mahmud, M. A., Islam, S. N., Muttaqi, K. M., Haque, M. E., & Oo, A. M. T. (2018). Control and power sharing in hybrid AC/DC microgrids using a nonlinear backstepping approach. 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544450>
- Saha, S., Roy, T. K., Mahmud, M. A., Haque, M. E., & Islam, S. N. (2018). Sensor fault and cyber attack resilient operation of DC microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 99(December 2016), 540–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.01.007>
- Setyawan, L., Peng, W., & Jianfang, X. (2014). Implementation of sliding mode control in DC microgrids. *Proceedings of the 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2014*, 578–583. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2014.6931231>
- Singh, P., & Lather, J. S. (2018). A PWM-based sliding mode voltage control of DC-DC boost converter for DC microgrid. 8th IEEE Power India International Conference, PIICON 2018. <https://doi.org/10.1109/POWERI.2018.8704456>
- Singh, S., & Fulwani, D. (2014a). A PWM based sliding-mode control for negative im-

- pedance stabilization in DC Micro-grids. Proceedings of 6th IEEE Power India International Conference, PIICON 2014. <https://doi.org/10.1109/34084POWERI.2014.7117696>
- Singh, S., & Fulwani, D. (2014b). Constant power loads: A solution using sliding mode control. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 1989–1995. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048775>
- Stramosk, V., Benadero, L., Pagano, D. J., & Ponce, E. (2013). Sliding mode control of interconnected power electronic converters in DC microgrids. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 8385–8390. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700538>
- Sun, Q., Zhou, J., Guerrero, J. M., & Zhang, H. (2015). Hybrid Three-Phase / Single-Phase Microgrid. 30(10), 5964–5977. IEEE.
- Vivek, K. (2019). Design and Analysis of Voltage Droop Control Technique for DC Microgrids. Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics and Communication and Aerospace Technology, ICECA 2019, 795–799. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2019.8822144>
- Yasin, A. R., Ashraf, M., Bhatti, A. I., Ahmad, S., & Rashid, M. (2016). Sliding mode control for efficient utilization of renewable energy sources in DC micro grid: A comparison with a linear PID controller. Proceedings of the 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2016, (Epe), 621–625. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781414>
- Zhang, D., & Wang, J. (2017). Adaptive Sliding-Mode Control in Bus Voltage for an Islanded DC Microgrid. Mathematical Problems in Engineering, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8962086>
- Zhang, R., & Hredzak, B. (2019). Nonlinear Sliding Mode and Distributed Control of Battery Energy Storage and Photovoltaic Systems in AC Microgrids With Communication Delays. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(9), 5149–5160. <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2896032>