



Propuesta de Modelo en una Microred Eléctrica Basado en un Sistema Híbrido ante una Falla Eléctrica Detectada

Méndez Navarro Alejandro, Rodríguez Hernández Jose Jorge, Ávalos García Jorge Hugo y Villalobos Guerra Arnoldo Ulises

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Zamora
amendez@teczamora.mx

Resumen

Las microredes son diseñadas para trabajar en dos modos de operación, conectadas a la red eléctrica principal y de forma autónoma. Son usadas para mejorar la eficiencia, seguridad y calidad de la energía eléctrica. El consumidor tiene la capacidad de administrar y gestionar la energía eléctrica. Son consideradas como sistemas de potencia distribuidos ya que son integradas por fuentes renovables, fuentes convencionales y sistemas de almacenamiento de energías, por consecuencia el flujo de potencia en una microred no es de forma unidireccional. El enfoque propuesto en el presente trabajo es basado en observadores de estado a partir de la medición de voltajes y corrientes en la microred. Dichas mediciones se realizan por dispositivos que incluyen medidores inteligentes, redes de sensores inalámbricos y unidad de medición de fasores.

Palabras clave: Sistemas híbridos, microredes eléctricas, observadores de estado, detección de fallas.

1. Introducción

Debido al rápido crecimiento en las últimas décadas en términos de tecnologías de la información y comunicación, monitoreo y medición, control y automatización, almacenamiento de energía eléctrica y a la gran demanda de confiabilidad, seguridad y disponibilidad en los sistemas de potencia eléctrica, éstos son testigos de la aparición de las microredes eléctricas inteligentes. Una microred eléctrica inteligente tiene la capacidad de formar un sistema distribuido de potencia la cual está integrada por fuentes de energías renovables (eólica, paneles fotovoltaicos, celdas de combustiones, entre otros), fuentes de energías convencionales (generadores diésel y gas natural) y dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica; estas fuentes de energía suministran potencia eléctrica en forma local dentro de una región de cobertura establecida. Las fuentes de energías convencionales son usadas cuando las fuentes de energías renovables no son capaces de suministrar la potencia eléctrica que demandan las cargas conectadas en una microred. El objetivo principal de las microredes es formar un sistema eficiente y confiable capaz de entregar la potencia eléctrica incluso en casos de fallos en la red principal [1-3].

Las microredes eléctricas son diseñadas para trabajar en dos modos de operación, conectada a la red eléctrica principal y autónoma. En el caso de presentarse una falla o alguna situación de emergencia en una red eléctrica principal, una microred es capaz de seguir operando en modo autónomo y se garantiza el suministro de potencia eléctrica a las cargas conectadas en la microred, en el momento que la falla en la red eléctrica principal es restaurada la microred puede conectarse a la red principal [4].

Como una microred está integrada por distintos generadores distribuidos, el flujo de potencia eléctrica se puede presentar de forma bidireccional bajo distintas condiciones en los modos de operación. Por otro lado, los niveles de corriente que se presentan en fallas ocasionadas por los cortos circuitos son de magnitudes distintas en el modo conectado y autónomo. Es por ello que es



necesario diseñar los sistemas de protección adaptables que sean capaces de trabajar con seguridad en ambos modos de operación [5-6].

Una red eléctrica opera bajo condiciones balanceadas, cuando el sistema llega a ser no balanceada es debido a alguna falla en algún punto específico en el sistema. Estas fallas se pueden presentar por un sin número de razones, por ejemplo la caída de un árbol sobre las líneas de transmisión o distribución, terremotos que dañen las líneas de transmisión o distribución, aislamiento por avería en algún componente conectado a la red, y demás. Las fallas se clasifican en simétricas y asimétricas. Las fallas simétricas se tienen de dos tipos, las tres fases en cortocircuito o las tres fases a tierra. Por otro lado, fallas asimétricas se caracterizan por ser fallas de línea a tierra, línea a línea, doble línea a tierra. Además existen otros tipos de fallas debido a condiciones como el malfuncionamiento en los actuadores y sensores, variaciones anormales de parámetros del proceso y fallas en equipos debido a cambios estructurales, por mencionar algunos [7].

El objetivo del presente trabajo, es el presentar una propuesta de la dinámica de los microredes eléctricas inteligentes a partir de un enfoque basado en sistemas híbridos ante la detección de una falla eléctrica detectada.

2. Marco Teórico

Los sistemas híbridos lineales (LHS, por sus siglas en inglés *Linear Hybrid Systems*) se caracterizan por interactuar entre sistemas dinámicos continuos y discretos. La naturaleza de estos sistemas resulta de la conjunción entre controladores con decisiones lógicas o controladores embebidos con los procesos físicos, por lo tanto su análisis requiere la combinación de las áreas de la ciencia de la computación e ingeniería en control [1]. La conjunción de las palabras sistemas híbridos usado en el contexto anterior fue usado por primera vez por H. S. Witsenhausen en 1966 en [2]. Witsenhausen reporta el comportamiento dinámico de los sistemas en función de entradas continuas a tramos considerando el estado continuo sin saltos y la conmutación entre sistemas lineales ocurre sólo cuando el estado continuo satisface las condiciones dadas por cada tipo de conmutación. Los sistemas híbridos lineales pueden ser utilizados para representar distintos tipos de sistemas de ingeniería tales como sistemas mecánicos [3], sistemas de control con histéresis [4], sistemas de control de nivel de agua [5], electrónica de potencia [6], sistemas biológicos y químicos [1], autoservicio en medios de transporte como bicicletas públicas [7], en aplicaciones de la industria automotriz: control en motor y en tren motriz [8], etc. Las razones para estudiar sistemas híbridos lineales pueden ser muy diversas, según [9] existen tres grandes aplicaciones en las que tienen una gran influencia los sistemas híbridos lineales: 1) diseño de sistemas tecnológicos, 2) lógica en la toma de decisiones y las acciones de control embebido con la combinación de procesos físicos continuos y 3) procesos físicos que presentan un comportamiento no suaves.

Un sistema híbrido lineal \sum_{σ} es una colección de sistemas lineales $Y = \{\sum_1, \dots, \sum_m\}$ donde cada \sum_i para $i=1, \dots, m$ evoluciona en el espacio $\mathfrak{X} = \mathbb{R}^n$ y conmutadas por una señal σ tomadas valores en $\{1, \dots, m\}$ que determina la evolución del sistema. La ecuación de estado \sum_{σ} tiene la siguiente forma

$$\begin{aligned} \dot{x}(\tau) &= A_{\sigma}x(\tau), & x(\tau_0) &= x_0 \\ y(\tau) &= C_{\sigma}x(\tau) & & \\ \sigma &\in 1, \dots, m. & & \end{aligned} \quad (1)$$

donde $y \in \mathbb{R}^r$ es la señal de la salida. La evolución lineal cuando $\sigma = i$ es representado por $\sum_i(A_i, C_i)$ o simplemente \sum_i donde las matrices A_i y C_i son de dimensión apropiada.



En el siguiente ejemplo se muestra la interacción entre los estados continuos y discretos en un LHS. La regulación de la temperatura, ver figura 1, $T(t)$ en una habitación con un sistema de calefacción opera con dos estados discretos: encendido y apagado $q(\tau) = \{encendido, apagado\}$. En cada estado discreto, la temperatura $T(\tau)$ en una habitación evoluciona en el tiempo τ y es descrita por dos sistemas lineales distintos Σ_1 y Σ_2 ; en consecuencia, por dos ecuaciones diferenciales distintas $\dot{T}(\tau) = f_1(\cdot)$ y $\dot{T}(\tau) = f_2(\cdot)$.

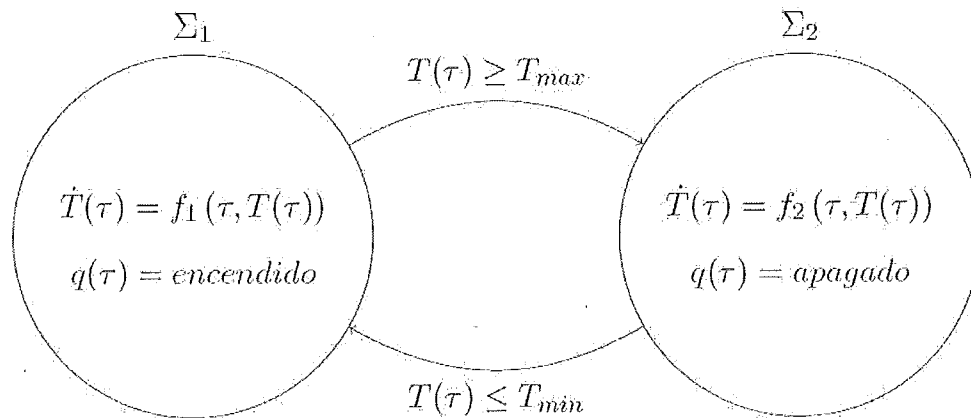


Figura 1. Sistema de temperatura modelado por un sistema híbrido lineal.

Este sistema tiene un estado híbrido $[q(\tau), T(\tau)]$, el estado discreto solo puede tomar dos estados $q(\tau) = \{encendido, apagado\}$ y el estado continuo $T(\tau)$ puede tomar valores reales, $T(\tau) \in \mathbb{R}$. Los cambios en el estado discreto son determinados por el estado continuo: si $T(\tau) = T_{max}$ se conmuta al estado *apagado*; por otro lado si $T(\tau) = T_{min}$ se conmuta al estado *encendido*, como se muestra en la figura 2.

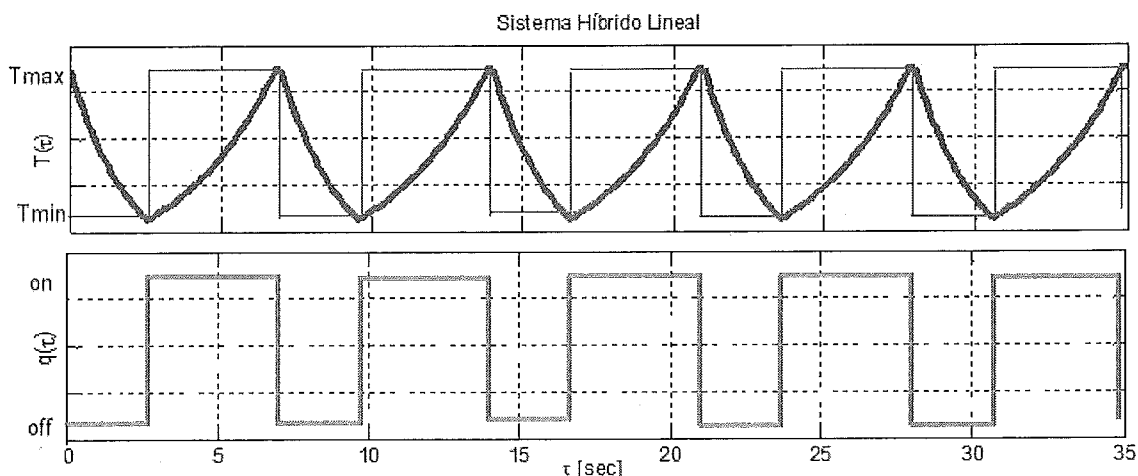


Figura 2. Dinámica del estado híbrido en el sistema de calefacción en una habitación.

Existen diferentes versiones de modelos de sistemas híbridos lineales que se distinguen respecto a su comportamiento y fenómenos [10], por mencionar algunos: autómatas híbridos, sistemas híbridos conmutados (sistemas de tiempo continuo conmutados por eventos discretos [11]), sistemas



definidos a trozos, sistemas dinámicos lógicos mixtos, sistemas complementarios, autómatas temporizados [1], dichos modelos tienen distintos campos de aplicación. Como los sistemas híbridos lineales interactúan con dinámica en tiempo continuo (modelado por ejemplo por ecuaciones diferenciales) y dinámica de eventos discretos (modelado por ejemplo con autómatas y redes de Petri), las propiedades cualitativas en las que se han concentrado los estudios de los LHS es el modelado, estabilidad, controlabilidad, identificación y observabilidad. Por otro lado, también se estudia la conmutación entre los sistemas lineales continuos que es llevada a cabo por una señal de conmutación, que se puede clasificar en dependiente del estado continuo, dependiente del tiempo, autónomo (en el que se desconoce la regla que define la señal de conmutación) y controlado.

La red eléctrica convencional presenta cuatro componentes principales, plantas de generación, red de transmisión, red de distribución y control de energía eléctrica [13]. Por naturaleza, la red eléctrica convencional es un sistema con estructura electromecánica, con flujo de energía eléctrica unidireccional, de generación centralizada, tiene instalados pocos sensores, restauración, manipulación y control de forma manual, además, los consumidores tienen una pequeña y nula participación en la gestión y administración de la energía eléctrica [14]. La red convencional suministra la energía eléctrica desde plantas de generación, a un gran número de usuarios. Las principales plantas de generación son nucleares, geotérmicas, petróleo, hidroeléctrica, eólicas y plantas de carbón, las características de estas es que son centralizadas.

En contraste con la red eléctrica convencional, en una red inteligente su estructura es digital, soporta dos líneas de comunicación de electricidad e información (el suministro de energía eléctrica es distribuido y automatizado), la generación es descentralizada, se supervisa, controla y restaura de forma automática, además, los consumidores participan en la administración y gestión de la energía eléctrica [14]. La red inteligente se usa con mayor eficiencia y calidad en el suministro de energía eléctrica, mantener la sostenibilidad ambiental, flexibilidad en gestión de demanda eléctrica, presenta confiabilidad y seguridad que permite que la red sea observable, controlable y plenamente integrada a partir de numerosos sensores, es decir, proporciona la capacidad en forma segura de integrar fuentes de energía renovables [2, 15], vehículos eléctricos y generadores distribuidos dentro de la red, figura 3.

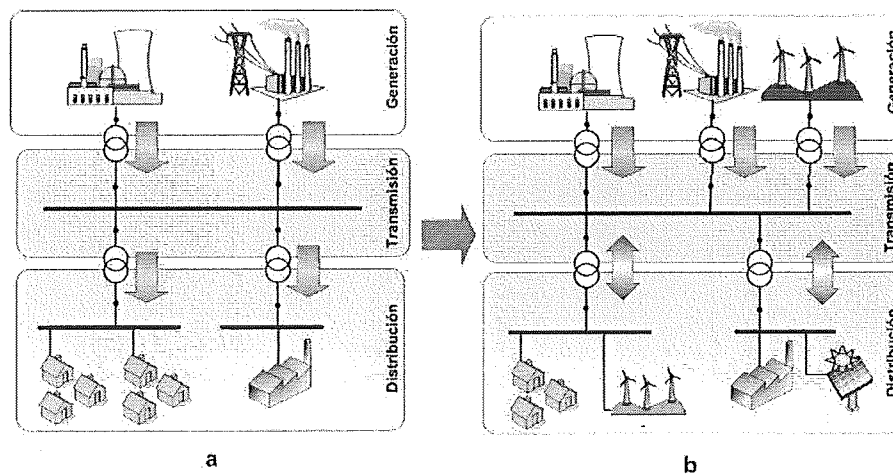


Figura 3. Red eléctrica convencional, b) Red eléctrica inteligente [16].

Una red eléctrica integrada de generadores distribuidos (fuentes de energías renovables, hidráulica, solar térmica, biomasa, solar, eólica, geotérmica, marica, entre otras) así como dispositivos de almacenamiento de energía los cuales suministran la demanda de energía eléctrica en forma local dentro de una región de cobertura establecida, se llama microrred [3]. Si se presenta una falla o alguna situación de emergencia en una red eléctrica principal, una microrred es capaz de seguir operando en modo autónoma y se garantiza el suministro de potencia eléctrica a las cargas conectadas en la microrred, en el momento que la falla en la red eléctrica principal es restaurada la microrred puede conectarse a la red eléctrica principal.



3. Metodología y Resultados

Una microred eléctrica opera con dos modos de operación, es decir, con dos estados discretos: conectado y autónomo $q(\tau) = \{conectado, autonomo\}$. En cada estado discreto, el voltaje entre el alambre y el plano de tierra $v(z, \tau)$ y la corriente que circula a través de él $i(z, \tau)$ evoluciona en el tiempo τ y desplazamiento de onda z , pueden tomar valores reales, $v, i \in \mathbb{R}$. Es descrita por cuatro sistemas no lineales distintos $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ y Σ_4 ; en consecuencia por cuatro ecuaciones diferenciales no lineales distintas.

El sistema híbrido no lineal Σ_1 representa el sistema operando en modo conectado a la red principal con generadores distribuidos conectados a la microred, Σ_3 modo conectado en generadores distribuidos totalmente desconectados, Σ_2 representa el sistema operando en modo autónomo con generadores distribuidos totalmente conectados y Σ_4 representa el sistema operando en modo autónomo con generadores distribuidos desconectados, como se aprecia en la figura 3.

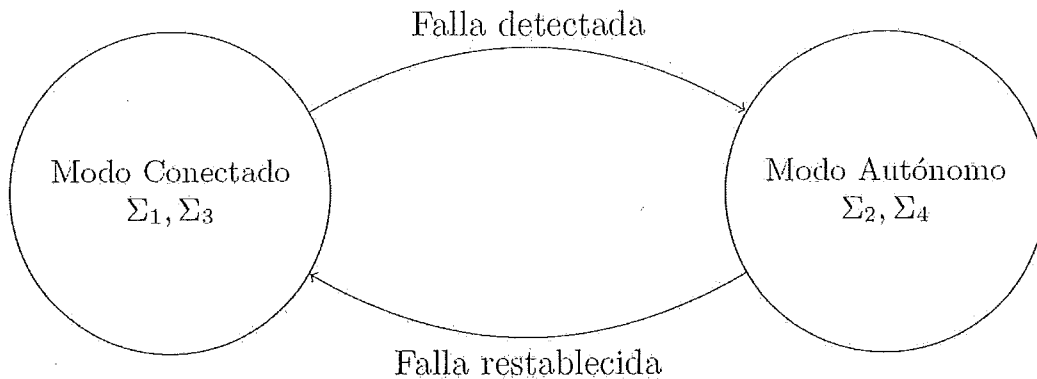


Figura 3. Modo de operación de una microred eléctrica inteligente.

Los cambios en el estado discreto son determinados por la detección de la falla en el sistema principal: si se detecta una falla cuando la microred se encuentra en modo conectado se conmuta al estado $q(\tau) = autonomo$; por otro lado, si se restablece la falla se conmuta al estado $q(\tau) = conectado$.

Propuesta de modelo en una microred eléctrica basado en un sistema híbrido ante una falla eléctrica detectada representa un sistema híbrido Σ_σ con una colección de sistemas cuatro lineales no lineales $\Upsilon = \{\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4\}$ donde cada Σ_i para $i = 1, \dots, 4$ evoluciona en el espacio $\mathfrak{S} = \mathbb{R}^n$ y conmutadas por una señal σ tomadas valores en $\{conectada, autonomo\}$ que determina la evolución del sistema. La ecuación de estado Σ_σ tiene la siguiente forma

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= A_\sigma(z, \tau)x + B_\sigma(z, \tau)y \\
 y &= C_\sigma(z, \tau)x + D_\sigma(z, \tau)y \\
 \sigma &\in \{conectado, autonomo\}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

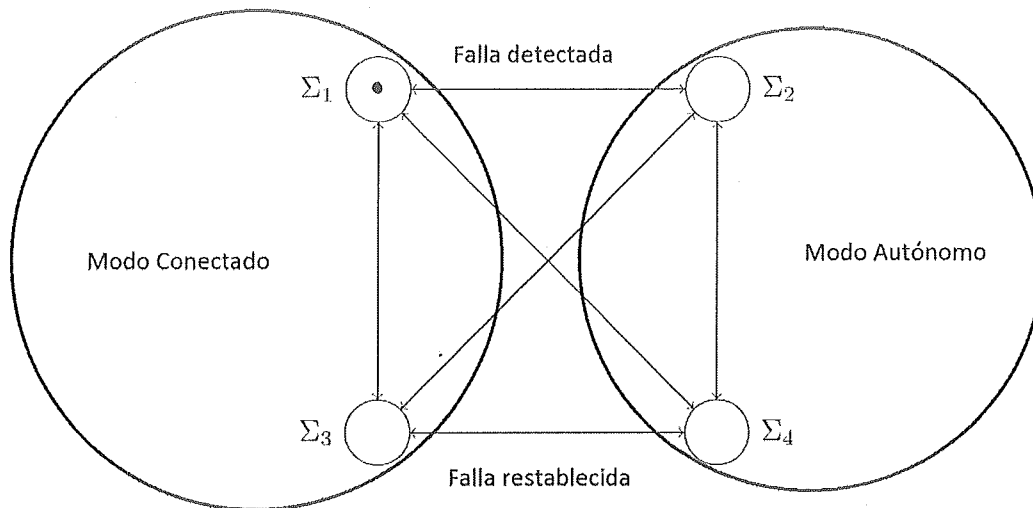


Figura 4. Modo de operación de una microred eléctrica inteligente.

donde $y = \begin{bmatrix} v(x, \tau) \\ i(x, \tau) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^r$ es la señal de la salida y es la misma salida en todo el sistema, la dinámica cambian dependiendo del modo que se encuentre operando la microred eléctrica. La evolución del sistema cuando $\sigma = i$ es representado por $\Sigma_i (A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i)$ o simplemente Σ_i donde las matrices A_i, B_i, C_i, D_i, E_i y F_i son de dimensión apropiada. En tabla 1 se muestra la dinámica de una microred eléctrica basado en un sistema híbrido ante una falla eléctrica detectada.

Tabla 1. Dinámica de una microred eléctrica basado en un sistema híbrido ante una falla eléctrica detectada.

Σ_i		Generadores distribuidos conectados		Generadores distribuidos desconectados	
		$v(z, \tau)$	$i(z, \tau)$	$v(z, \tau)$	$i(z, \tau)$
$q(\tau)$	Conectado	$\Sigma_1 :$ $\dot{x} = A_\sigma(z, \tau)x + E_\sigma(z, \tau)y$ $y = C_\sigma(z, \tau)x(\tau) + F_\sigma(z, \tau)y$ $\sigma \in \text{conectado}.$		$\Sigma_2 :$ $\dot{x} = A_\sigma(z, \tau)x + B_\sigma(z, \tau)y$ $y = C_\sigma(z, \tau)x(\tau) + D_\sigma(z, \tau)y$ $\sigma \in \text{conectado}.$	
	Autónomo	$\Sigma_3 :$ $\dot{x} = A_\sigma(z, \tau)x + E_\sigma(z, \tau)y$ $y = C_\sigma(z, \tau)x(\tau) + F_\sigma(z, \tau)y$ $\sigma \in \text{autonomo}.$		$\Sigma_4 :$ $\dot{x} = A_\sigma(z, \tau)x + B_\sigma(z, \tau)y$ $y = C_\sigma(z, \tau)x(\tau) + D_\sigma(z, \tau)y$ $\sigma \in \text{autonomo}.$	



Si la microred eléctrica se encuentra operando en modo conectada a la red principal con generadores distribuidos conectados a la microred, figura 4, la dinámica de la salida $y = \begin{bmatrix} v(x, \tau) \\ i(x, \tau) \end{bmatrix}$ se encuentra representada por Σ_1 como

$$\begin{aligned} \Sigma_1 : \\ \dot{x} &= A_\sigma(z, \tau)x + E_\sigma(z, \tau)y \\ y &= C_\sigma(z, \tau)x(\tau) + F_\sigma(z, \tau)y \\ \sigma &\in \text{conectado}. \end{aligned} \quad (3)$$

donde las matrices A_σ , C_σ , E_σ y F_σ son de dimensión apropiada.

La metodología presentada como propuesta para la dinámica de una microred eléctrica basado en un sistema híbrido ante una falla eléctrica detectada toma ventaja en el conocimiento de la señal de conmutación modelada por los dos estados que guarda el sistema, cuando dicho sistema opera en modo conectado y cuando opera de modo autónomo. La ventaja principal es que se pueden separar los estados observables y los estados no observables.

4. Conclusiones

En la actualidad, no existe un método universal para el modelado de las microredes eléctricas inteligentes ya que estos sistemas presentan no linealidades, incertidumbres o perturbaciones. Este modelo basado en sistemas híbridos permite desarrollar un método robusto basado en con enfoque de observadores para la detección e identificación de la falla presente en la microred. Sin embargo, aunque se sabe que la dinámica del estado continuo es una dinámica no lineal, se tiene un modelo general de la microred eléctrica. Donde se pueden estudiar las propiedades cualitativas en las que se han concentrado los estudios como es el modelado, estabilidad, controlabilidad, identificación y observabilidad. Por otro lado, también se estudia la conmutación entre los sistemas continuos (la detección de fallas).

Referencias

- [1] J. Hare, X. Shi, S. Gupta, and A. Bazzi, "Fault diagnostics in smart micro-grids: A survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1114{1124, 2016.
- [2] I. Colak, S. Sagiroglu, G. Fulli, M. Yesilbudak, and C.-F. Covrig, "A survey on the critical issues in smart grid technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 396{405, 2016.
- [3] F. Li, W. Qiao, H. Sun, H. Wan, J. Wang, Y. Xia, Z. Xu, and P. Zhang, "Smart transmission grid: Vision and framework," *IEEE transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 168{177, 2010.
- [4] M. Esreraig and J. Mitra, "An observer-based protection system for microgrids," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1{7, IEEE, 2011.
- [5] B. Li, Y. Li, Z. Bo, and A. Klimek, "Design of protection and control scheme for microgrid systems," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International*, pp. 1{5, IEEE, 2009.
- [6] E. Sortomme, S. Venkata, and J. Mitra, "Microgrid protection using communication-assisted digital relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2789{2796, 2010.
- [7] J. Zhang, *Robust observer based fault diagnosis for nonlinear systems*. PhD thesis, ResearchSpace@ Auckland, 2013.
- [8] G. Buigues, A. Dy_sko, V. Valverde, I. Zamora, and E. Fern_andez, "Microgrid protection: Technical challenges and existing techniques," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*, 2013.



- [9] E. Sortomme, G. Mapes, B. Foster, and S. Venkata, "Fault analysis and protection of a microgrid," in Power Symposium, 2008. NAPS'08. 40th North American, pp. 1-6, IEEE, 2008.
- [10] H. Al-Nasseri, M. Redfern, and R. O'Gorman, "Protecting micro-grid systems containing solid-state converter generation," in 2005 international conference on future power systems, pp. 5-8, IEEE, 2005.
- [11] F. Z. Peng, Y. W. Li, and L. M. Tolbert, "Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer-driven microgrid," in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, IEEE, 2009.
- [12] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter, "Microgrid protection," in Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, pp. 1-6, IEEE, 2007.
- [13] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, "Smart grid? the new and improved power grid: A survey," IEEE communications surveys & tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 944-980, 2012.
- [14] H. Farhangi, "The path of the smart grid," IEEE power and energy magazine, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, 2010.
- [15] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, "The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges," Computer Communications, vol. 36, no. 18, pp. 53-81, 2011.
- [16] ANDRADE, Carlos Andrés Díaz; HERNÁNDEZ, Juan Carlos. Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica—Estado del Arte. Sistemas & Telemática, 2011, vol. 9, no 18, p. 53-81.