



Ingeniería. Investigación y Tecnología

ISSN: 1405-7743

iit.revista@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de México
México

Velasco-Ramírez, E.; Ángeles-Camacho, C.; García-Martínez, M.

Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos

Ingeniería. Investigación y Tecnología, vol. XIV, núm. 1, enero-marzo, 2013, pp. 81-88
Universidad Nacional Autónoma de México
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40425635007>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos

Smart Transmission Grids - Benefits and Risks

Velasco-Ramírez E.

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

Correo: TVelascoR@iingen.unam.mx

Ángeles-Camacho C.

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

Correo: CAngelesC@ii.unam.mx

García-Martínez M.

Instituto Tecnológico de Toluca

Correo: mgarciam@ittoluca.edu.mx

Información del artículo: recibido: marzo de 2011, aceptado: febrero de 2012

Resumen

Actualmente los sistemas eléctricos operan cada vez más cercanos a sus límites de estabilidad, es por ello que se hace necesaria y primordial la transición hacia nuevos sistemas de transmisión que garanticen la eficiente entrega de la energía eléctrica, evitando con ello cortes de energía que generan importantes pérdidas en la economía de cualquier país del mundo. En este documento se realiza un análisis de los elementos necesarios para una sana y eficiente transición de una red de transmisión eléctrica verticalmente, integrada hacia una *red de transmisión inteligente*. Se presenta un análisis comparativo entre dos de los marcos de referencia más importantes, el de la UE y el de EUA, en el modelo, desarrollo, beneficios y riesgos en la implementación de estos sistemas.

Descriptores:

- sistema eléctrico
- red de transmisión inteligente
- transición
- beneficios y riesgos
- tecnología HVDC
- FACTS y PMU

Abstract

Nowadays the Power Systems are working near their stability limits, for this reason it is necessary and essential a transition to new transmission systems that ensure efficient delivery of electrical energy, with the objective to prevent “blackouts” that cause significant losses in the economy of any country in the world. This paper analyzes important elements to consider having a healthy and efficient transition from a power grid vertically integrated into a smart transmission grid. A comparative analysis in the model, development, benefits and risks of the implementation of these systems, between two of the main marcs of references of smart grids, the EU and the USA is presented.

Keywords:

- power systems
- smart transmission grid
- benefits & risks
- HVDC technology
- FACTS
- PMU

Introducción

La sociedad actual requiere grandes cantidades de energía para la industria, el comercio, la agricultura, el transporte, las comunicaciones, el uso residencial, etcétera. El suministro actual de esta energía es proporcionado principalmente por combustibles fósiles. En este escenario las fuentes de energía no renovables son el principal combustible que se utiliza en la generación de electricidad. En el futuro, el uso de las fuentes de energías renovables jugará un rol dominante en la generación de electricidad. El incremento en la integración de estas energías, sumado a los desarrollos tecnológicos en transmisión, generación y distribución, ha marcado un parteaguas en la industria eléctrica. La necesidad de tener sistemas de transmisión limpios, eficientes, confiables, tolerantes a disturbios y sensibles, ha propiciado el nacimiento de las llamadas “redes inteligentes”, lo que en inglés se conoce como “*smart grids*” (Fangxing *et al.*, 2010).

Los sistemas eléctricos de potencia tradicionales tienden a ser verticalmente integrados, es decir, una empresa es la responsable de la generación y transmisión y, en muchos casos, también de la distribución en su área de servicio. Hace algunos años se creía que este método ayudaría a optimizar la planeación y operación global del sistema, es decir, que una sola empresa debía tener el control total de la generación, la transmisión y, en algunos casos, también de la distribución. Actualmente, en muchos países está cambiando el paradigma de una red eléctrica, primordialmente centralizada y controlada por un solo operador, a una en la que participen diferentes empresas en la generación, distribución y operación, y donde los usuarios de la red sean más interactivos con el sistema. Bajo este marco, nace el concepto denominado “red inteligente”; como una visión de la infraestructura eléctrica flexiblemente controlable.

El sistema de monitoreo de la transmisión, más la tecnología de comunicación e información, en conjunto, crean una “red de transmisión inteligente”, que facilita la supervisión y control del transporte de energía eléctrica. Pasar a una red de transmisión inteligente es evolucionar de una red centralizada y pasiva que funciona en un único sentido (de proveedores a consumidores), a un modelo de red de transmisión automatizada, donde cada nodo en el sistema eléctrico es emisor y receptor, productor y consumidor y, en consecuencia, se obtiene la evolución de un esquema centralizado a uno distribuido. El control de la infraestructura eléctrica ha sido, hasta ahora, centralizado en una estructura vertical como sucede en los sistemas eléctricos. La desregu-

lación del sistema eléctrico crea la necesidad de un control distribuido. En este sentido, el concepto de red de transmisión inteligente permitirá a los sistemas de potencia permanecer fiables y seguros (Hommelberg *et al.*, 2007).

Definiciones y objetivos

La definición de “red inteligente” difícilmente se puede dar en pocas palabras, ya que involucra un gran número de conceptos, definiciones y tecnologías; sin embargo, de manera introductoria y muy simplista se puede definir como: una red que integra la generación centralizada a través de grandes plantas generadoras, con la generación distribuida en pequeña escala de energías renovables, en la cual el usuario puede consumir y enviar energía a la red, es decir, el lado de la demanda de la red se puede convertir, de manera controlada, en una “fuente” o en un “pozo” de energía.

Con la finalidad de describir de manera más detallada los conceptos que se involucran en la definición anterior, a continuación se presenta la visión que tienen la Unión Europea (UE) y el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) sobre el concepto de red inteligente de energía eléctrica

Visión de la Unión Europea

Para la Unión Europea el desarrollo de redes inteligentes considera un audaz programa de investigación, desarrollo y proyectos que se encaminen a la integración de la red de abastecimiento de energía, que satisfaga las necesidades de la Europa del futuro. En la figura 1 se muestra una visión integral de la red inteligente de la Unión Europea.

Según esta visión, las redes europeas de energía eléctrica del futuro deberán ser:

- **Flexibles:** Deberán satisfacer las necesidades de los consumidores con los retos que esto representará en el futuro.
- **Accesibles:** Garantizarán el acceso a la conexión de todos los usuarios de la red, particularmente a través de fuentes renovables y generación local altamente eficiente con emisiones contaminantes nulas o muy bajas.
- **Económicas:** Proveerán una cadena de valor por medio de la innovación, la administración eficiente de la energía, la competitividad y la regulación.

Uno de los objetivos fundamentales que se pretende lograr con la implementación de las redes inteligentes

europeas es duplicar la incorporación de la generación por medio de energías renovables, la cual es actualmente de 13%, para alcanzar un 26% en 2030 (Directorate-General, 2005).

Los elementos clave que incluye esta visión son los siguientes:

- Crear un conjunto de soluciones técnicamente probadas, económicamente factibles y que puedan ser desarrolladas rápidamente; las cuales permitan que las redes existentes acepten la inyección de potencia de todas las fuentes de energía disponibles.
- Armonizar los marcos de referencia regulatorios y comerciales de Europa para facilitar las transacciones sin fronteras de potencia y servicios de red, asegurándose que se acomodarán a un amplio rango de condiciones de operación.
- Establecer normas técnicas y protocolos compartidos que aseguren el acceso abierto y permitan la utilización de equipo del fabricante que se deseé seleccionar.
- Desarrollar sistemas de información, computación y telecomunicación que permitan mejorar la eficiencia de la red y aumentar los servicios disponibles para los consumidores.
- Asegurar la compatibilidad adecuada de los equipos de las redes actuales con los nuevos; de manera que se asegure la interoperabilidad de los arreglos de automatización y control.

Adicionalmente, las redes de distribución del futuro deberán convertirse en redes activas que sean capaces de permitir flujos de potencia bidireccionales; de la red al consumidor y del consumidor a la red (Directorate-General, 2005).

Visión del Departamento de Energía de Estados Unidos de Norteamérica

Con la finalidad de enfrentar los retos, que en el aspecto energético enfrenta esa nación, el Departamento de Energía de EUA (DOE, *Department of Energy*) estructuró recientemente su programa denominado “*Renewable and Distributed System Integration Program*”, mediante el cual se encuentra realizando nueve proyectos piloto. Cada uno de ellos integra energía limpia, producida en sitio con el fin de lograr una reducción de 20% en el pico de demanda en los alimentadores de distribución para el año 2015. Los proyectos están localizados a través de todo el país, e involucran a todos los niveles que integran la cadena de distribución, desde complejos residenciales e industriales hasta las compañías suministradoras, los cuales están desarrollando, conjuntamente, diferentes procedimientos para alcanzar la meta (DOE, 2008).

Algunas de las tecnologías que se están integrando son vehículos híbridos enchufables (PHEVs), turbinas eólicas, energía fotovoltaica, acumulación por bombeo, almacenamiento por aire comprimido, tecnología de micro redes y sistemas de automatización de alimentadores (Vojdani *et al.*, 2008).

El DOE establece que la generación renovable distribuida es “inteligente” porque:

- Reduce la emisión de gases de efecto invernadero.
- Mejora la eficiencia del sistema.
- Ayuda a diferir la necesidad de crecimiento del sistema.
- Reduce el pico de carga.
- Alivia la congestión.
- Mejora la confiabilidad.

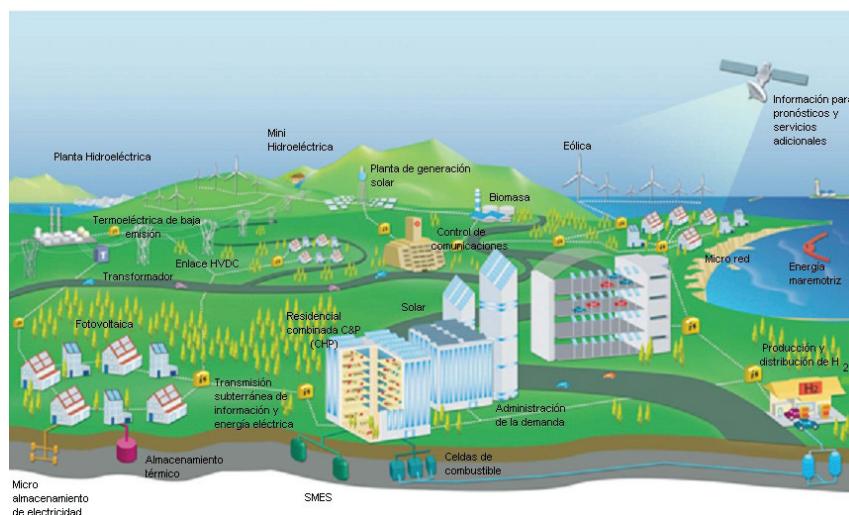


Figura 1. Visión de la comunidad europea de las redes inteligentes del futuro

- Mejora la seguridad del sistema.

En estos proyectos se encuentran trabajando juntos todos los interesados, entre ellos, desarrolladores habitacionales, industriales, compañías suministradoras, universidades y laboratorios nacionales como el EPRI.

En la tabla 1 se presenta una comparación entre la red actual y una red de transmisión inteligente (Hernández, 2010).

Transición hacia las redes de transmisión inteligente

La evolución hacia una red inteligente cambiará varios aspectos del modelo comercial actual y la relación de la industria con todos los productores, implicando y afectando a las empresas de generación, los reguladores, los proveedores de servicios de la energía, vendedores de tecnología de automatización y a los consumidores del servicio, de esta manera, las redes inteligentes optimizarán las interconexiones entre los productores y consumidores (Nehrir *et al.*, 2006).

Al observar lo que ha ocurrido en distintos países con algunos sistemas en que se han llevado a cabo reformas estructurales, se concluye que dichas transformaciones se pueden visualizar como un proceso de evolución natural, con el fin de obtener el máximo provecho de los recursos necesarios para la producción y suministro de la energía eléctrica, ya sea mediante la planeación y evolución de los sistemas integrados verticalmente, o a través de la apertura a la competencia para lograr una adecuada integración tecnológica y económica; y es así como surge el concepto denominado “red de transmisión inteligente”; como una visión de la infraestructura eléctrica que integra la generación y distribución flexiblemente controlables. Los retos impuestos por esta nueva visión deben alcanzarse de una manera económica, especialmente en países en desarrollo, ya que muchos de ellos no pueden tener acceso a tecnologías ambientalmente compatibles. Con la ayuda de nuevas ideas, soluciones inteligentes, así como innovaciones tecnológicas, los retos pueden ser superados.

El propósito fundamental de esta reestructuración en el diseño y operación de los sistemas eléctricos, es la de alcanzar los beneficios con una mayor eficiencia y competitividad de mercado eléctrico entre países o regiones a nivel global.

El mercado de las redes inteligentes tendrá un crecimiento dinámico impulsado por el cambio climático y por los programas de estímulo económico, ya que al integrar grandes cantidades de sistemas renovables de energía, el sistema eléctrico actual deberá adaptarse a este crecimiento, y es de gran importancia mencionar que la infraestructura actual no está diseñada para esta tarea.

Características de las redes inteligentes de transmisión

Las redes inteligentes tienen tres componentes primarios: facturación inteligente (*smart metering*), la infraestructura de la red y el sistema de control (*grid intelligence*), además de una gestión inteligente de datos (*utility IT*).

La figura 2 presenta, de manera general, la forma en la que una red inteligente puede ser definida. En esta figura quedan representados los elementos principales de un “sistema de transmisión inteligente”, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Sistema integral de protección
- Sistema de ahorro de energía
- Automatización y protección de la subestación
- Tecnología de HVDC y FACTS.

Cuando se implementa un sistema de transmisión inteligente se ofrece solución a varios problemas ocasionados en los sistemas eléctricos de potencia, entre las principales soluciones encontramos las que se presentan a continuación:

- Detectar y atender problemas en el sistema desde su inicio antes de que afecten el servicio.
- Responder a estímulos locales y globales y obtener más información sobre los problemas del sistema.

	Red Actual	Red de Transmisión Inteligente
Transmisión de Energía	De centrales a usuarios	En todas direcciones
Información	Dirigida a centros de mando	En todas direcciones
Operaciones	Centralizadas	Distribuidas Sistema Distribuido según jerarquía, negociación/ coordinación
Control	Centralizado: SCADA	

Tabla 1. Comparación de la red actual y una red de transmisión inteligente

- Incorporar mediciones, comunicaciones rápidas, diagnósticos centralizados avanzados y controles que restablezcan el estado estable del sistema después de interrupciones o disturbios.
- Adaptar automáticamente los sistemas de protección a las nuevas topologías de la red.
- Re-direccionar flujos de potencia, cambiar patrones de carga, mejorar perfiles de voltaje y realizar acciones correctivas a segundos de haber detectado el problema.
- Permitir a las cargas y a la generación distribuida participar en operaciones de control.
- La red de trasmisión debe ser inherentemente diseñada y operada con seguridad y confiabilidad como factor clave.
- Proveer al operador sistemas avanzados de visualización para mejorar su capacidad de supervisar el sistema.

Para lograr que los sistemas de transmisión inteligente tengan las características requeridas es necesario realizar varias iniciativas que permitan un óptimo funcionamiento de las redes de transmisión inteligente. Entre estas iniciativas realizadas se encuentra la incorporación de sensores de impedancia, monitoreo del sistema, implementación de portales del consumidor, comunicaciones usando fibras ópticas (sobre cables de guarda), agentes semiautónomos, métodos de visualización avanzados; Sistemas de almacenamiento de energía (ESS/STATCOM), aplicación de dispositivos controladores (FACTS, HVDC, WAM & WAP, PMU, etcétera (Favre-Perrodet *et al.*, 2009).

La implementación de estas soluciones ha permitido a los sistemas de transmisión obtener beneficios como la reducción de costos por congestión, disminución en la probabilidad de apagones, al igual que la salida o interrupciones forzadas de líneas u otros

elementos de transmisión, la reducción en tiempos de restauración por mantenimiento preventivo, los picos de demanda reducidos en las líneas de transmisión y otros beneficios debidos al autodiagnóstico.

En cuanto a la generación distribuida se ha reflejado un incremento de la penetración e integración y una mayor utilización de la misma. También se ha incrementado la seguridad y tolerancia del sistema de transmisión a ataques o desastres naturales y se han presentado mejoras en la calidad de la energía y confiabilidad, así como una mayor disponibilidad y capacidad de energía, debido a la optimización de flujos de potencia.

Implementación de controladores en las líneas de transmisión

El concepto de sistemas flexibles de transmisión en CA (FACTS), está basado en la incorporación de dispositivos de electrónica de potencia y sus métodos de control en las redes de transmisión, para hacerlas electrónicamente controlables. La implementación de esta tecnología ha alterado la forma de planear, diseñar y operar los sistemas de transmisión en el mundo.

La tecnología FACTS ha traído los siguientes beneficios:

- Incremento de la capacidad en los sistemas actuales de transmisión.
- Incremento de la confiabilidad y disponibilidad de las líneas de transmisión.
- Incremento en la estabilidad dinámica y transitoria de la red.
- Mejoras en la calidad de la energía eléctrica entregada a los usuarios.
- Su implementación causa un bajo impacto ambiental.

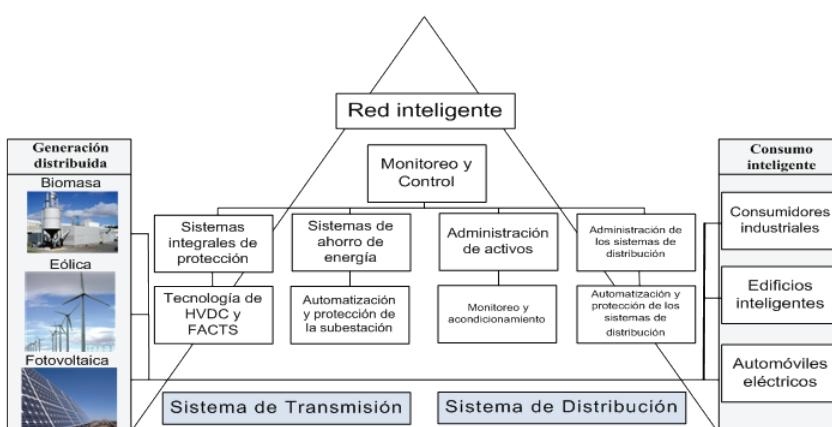


Figura 2. Esquema de operación de una red inteligente

En la figura 3 se presenta un esquema donde se ejemplifica la utilización de los diferentes dispositivos FACTS para controlar las redes de transmisión.

Beneficios económicos de la implantación de redes de transmisión inteligente

Existen varios beneficios económicos cuando se implementa una red de transmisión inteligente. A continuación se presentan algunos de los principales beneficios al implementar este tipo de redes:

- Creación de nuevas fuentes de trabajo, crecimiento económico de la región.
- Optimización de los capitales de inversión debido a menores límites de diseño y a un uso más eficiente de la red.
- Ahorro en impuestos debido a una depreciación mayor.
- Incrementa el nivel de utilización de la red, gestión (DOE, 2009).
- Entre los beneficios ambientales del empleo de estos esquemas de gestión de energía eléctrica se encuentran los siguientes:
 - Reducción en la emisión de gases de efecto invernadero (al implementar mayor número de proyectos basados en fuentes renovables de energía).
 - Mejora en la calidad del aire en las zonas urbanas.

Lo anterior se deriva del hecho de que son esenciales para la integración de fuentes de energía renovables y

para asegurar suministros de energía estables, tanto solar como eólicos.

Riesgos a considerar al implementar las redes de transmisión inteligente

Riesgos físicos

Con la implementación de redes inteligentes y el posible incremento en la carga de líneas de transmisión, los operadores de los sistemas eléctricos de potencia se verán forzados a operar los sistemas muy cerca a sus límites de estabilidad. Este nuevo punto de operación representa por sí solo un incremento en la vulnerabilidad del sistema, por lo que es necesario realizar estudios más detallados del comportamiento global del sistema a fin de mantener los márgenes de seguridad.

En sistemas altamente interconectados la estabilidad de la señal pequeña, especialmente oscilaciones inter-área, incrementan su importancia, la cual aumenta más si el sistema aumenta en tamaño o la carga de las redes de transmisión crece.

Las oscilaciones inter-área son un problema común en grandes redes de sistemas de potencia a lo largo y ancho del planeta.

Las oscilaciones inter-área de baja frecuencia cuando se presentan en sistemas eléctricos, limitan la cantidad de transferencia de energía sobre las líneas de transmisión entre las regiones que contienen a los grupos de generadores.

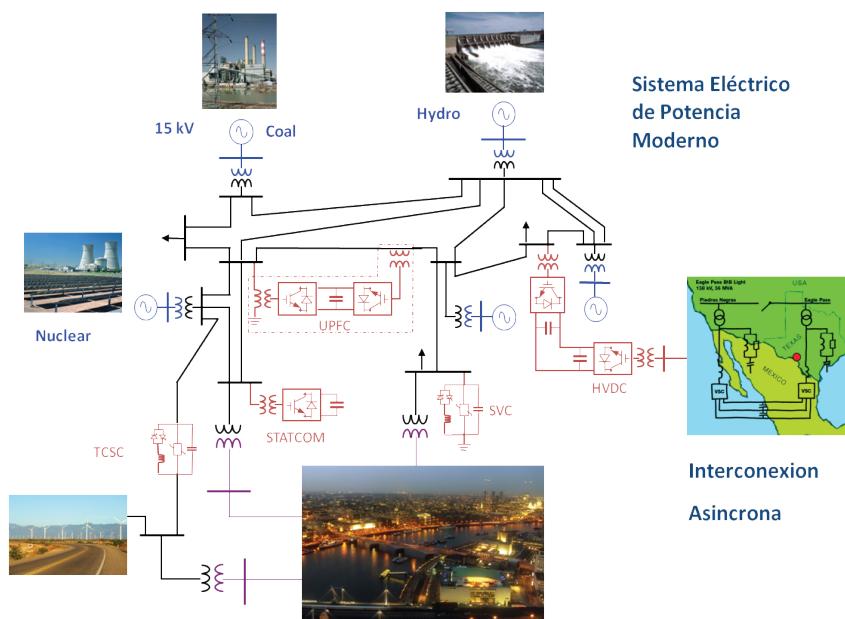


Figura 3. Red eléctrica con dispositivos FACTS embebidos

Si el tamaño del sistema y la carga de la red se incrementan, las oscilaciones inter-área también tenderán a incrementarse.

Riesgos cibernéticos

La transmisión de electricidad sobre redes inteligentes es altamente dependiente de los sistemas de control basados en computadora.

Cuando se tiene un sistema de comunicaciones basado en tecnología IP (*internet protocol*) se incrementa la vulnerabilidad del mismo, debido a los riesgos cibernéticos.

Cualquier falla en la red eléctrica, ya sea intencional o no, podría ser potencialmente devastador.

De no existir eficientes métodos de encriptación para la seguridad del sistema, cualquier persona con pocos conocimientos de ingeniería inversa podría dejar sin alimentación a cualquier usuario que se encuentre conectado a la red de transmisión inteligente.

En el año 2009 el diario *The Wall Street Journal*, reportó que espías cibernéticos provenientes de China, Rusia y algunos otros países habían penetrado las redes eléctricas de Estados Unidos de América y habían implantado *software* malicioso que podría usarse para afectar el funcionamiento del sistema. Desafortunadamente, las redes inteligentes podrían representar un sistema de fácil acceso para *hackers* que se encuentren navegando en el ciberespacio.

Si alguien lograra penetrar al sistema podría sabotearlo fácilmente, provocando apagones de dimensiones similares al ocurrido en Nueva York en el año 2003, que dejó a 50 millones de personas sin servicio eléctrico y de comunicaciones. Una vez ingresando y manipulando la red inteligente se tendría la posibilidad de controlar millones de dispositivos de protección o medidores de manera simultánea. También se podría afectar el balance de carga de un sistema local provocado por algún repentino incremento o decremento del factor de demanda.

Conclusiones

Cuando se desee implementar una red de transmisión inteligente es importante permitir que todos los actores participen de manera activa y comprometida con el proyecto. Es necesario que se proporcione calidad en la energía, así como garantizar la fiabilidad de su transmisión y distribución. La red de transmisión inteligente debe ser capaz de soportar nuevos mercados energéticos gestionados desde diversos sistemas. La red deberá anticiparse a los disturbios, así como corregirlos de ma-

nera instantánea cuando éstos sean ocasionados por desastres naturales o contra algún ataque mal intencionado.

Es importante considerar también que un sistema de transmisión de gran escala que contenga una variación espontánea de los parámetros de carga dará lugar a un aumento de la congestión. El aumento en la carga de los sistemas de transmisión existentes aumentará, lo que podría provocar falta de fiabilidad debido a un problema de cuello de botella o incluso a la ocurrencia de una falla en cascada en grandes sistemas eléctricos interconectados.

Una red de transmisión inteligente que carezca de medidas de seguridad eficientes puede provocar la pérdida de recursos importantes. Por lo anterior, es necesario que el reemplazo y adaptación de las nuevas tecnologías se haga de manera paralela a la implementación de la red.

Por lo tanto, es muy importante desarrollar modelos que permitan entender la interacción dinámica entre los nuevos elementos (sensores, controles, etcétera) y los sistemas eléctricos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM por el apoyo recibido a través del proyecto PAPIIT IN11510-2.

Referencias

- Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. Towards Smart Power Networks, EUROPEAN UNION, 2005.
- Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. European Smart Grids Technology Platform, EUROPEAN UNION, 2006.
- Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems. Third Status report on European Technology Platforms, EUROPEAN UNION, Marzo 2007.
- ENEL, Italy. Integrating Large Shares of Fluctuating Power Sources in to Power Electric Systems: Impact on the Development of Distribution Networks, Agosto 2008.
- Fangxing L., Wei Q., Hongbin S., Hui W., Jianhui W., Yan X., Zhao X., Pei Z. Smart Transmission Grid: Vision and Framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*, volumen 1 (número 2), 2010: 168-177.
- Favre-Perrod P., Crithley R., Catz E., Bazargan M. New Participants in Smart Grids and Associated Challenges in the Transition Towards the Grid of the Future. *IEEE Bucharest PowerTech*, 2009: 1-5.
- Hernández M. Inteligencia en la Red Eléctrica, en: Jornada sobre Redes Eléctricas Inteligentes, Electrificación del Transporte e

Integración de Energías Renovables (febrero 2010, Las Palmas de Gran Canaria, España), Universidad de las Palmas de Gran Canarias.

Hommelberg M.P.F., Warmer C.J., Kamphuis I.G., Kok J.K., Schaeffer G.J. Distributed Control Concepts Using Multi-Agent Technology and Automatic Markets: An Indispensable Feature of Smart Power Grids. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. June 2007.

Nehrir M.H., Caisheng W., Guda S.R. Alternative Energy Distributed Generation: Need for Multi-Source Operation, en: *38th Nort American Power Symposium*, 2006, pp. 547-551.

Stevenson W.D. y Grainger J.J. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*, Mc Graw Hill, 1996.

US Department of Energy (DOE). The Smart Grid: an Introduction, 2008.

US Department Of Energy (DOE). How the Smart Grid Promotes a Greener Future, 2009.

Vojdani A. Smart Integration. *IEEE Power and Energy Magazine*, volumen 6 (número 6), 2008: 71-79.

Este artículo se cita:

Citación Chicago

Velasco-Ramírez, Enrique, Cesar Ángeles-Camacho, Manuel García-Martínez. Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos. *Ingeniería Investigación y Tecnología XIV*, 01 (2013): 81-88.

Citación ISO 690

Velasco-Ramírez E., Ángeles-Camacho C., García-Martínez M. Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIV (número 1), enero-marzo 2013: 81-88.

Semblanza de los autores

Enrique Velasco-Ramírez. Es egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en donde obtuvo el grado de ingeniero eléctrico-electrónico en 2009. Participó en el Programa de Tecnología en Cómputo y el Laboratorio de Aplicaciones Inalámbricas, ambos incorporados a la División de Ingeniería Eléctrica de la UNAM. Actualmente realiza la maestría en sistemas eléctricos de potencia en la UNAM y participa en el proyecto SIMEFAS en la Subdirección de Transmisión de la CFE. Sus áreas de investigación están relacionadas con el análisis, modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia y sincrofases.

Cesar Ángeles-Camacho. Nació en México. Obtuvo el grado de ingeniero y maestro en ingeniería por el Instituto Tecnológico de Morelia, México en 1992 y 2000, respectivamente. En 2005, obtuvo el grado de doctor por la Universidad de Glasgow, Escocia. Se unió al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en 2005 como investigador. Sus intereses de investigación incluyen el modelado y simulación de FACTS y controladores para la calidad de potencia.

Manuel García-Martínez. Es egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en donde obtuvo el título de ingeniero mecánico electricista en 1976 y el grado de maestro en ingeniería eléctrica en 2007. Trabajó en la industria manufacturera y posteriormente fue investigador en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Toluca. Sus áreas de investigación están relacionadas con el diseño, análisis, modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia.