

Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Raúl González G., Humberto R. Jiménez G. y Javier Lagunas M.

Introducción

El uso de sistemas fotovoltaicos para generación de electricidad es una práctica cada vez más común en el ámbito internacional. Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de 95 % en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia. Un dato que puede servir como referencia para dimensionar el nivel de penetración de esta tecnología en estos últimos años son los más de 1200 MW de potencia pico instalada a nivel mundial, con un crecimiento anual del orden de 16 %.

En México, al igual que en muchos otros países en desarrollo, el uso de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red tiene una penetración y desarrollo aún incipiente.

En países industrializados, gracias a la maduración alcanzada en las tecnologías de dispositivos fotovoltaicos y convertidores estáticos de potencia, así como a la reducción en sus costos de fabricación, la generación fotovoltaica ligada a la red se ha venido convirtiendo gradualmente en una alternativa viable en el esquema de generación distribuida. En él, una combinación de plantas centrales y un gran número de pequeños generadores dispersos en la red eléctrica satisfacen la de-

manda de electricidad; esto es hoy en día una realidad en algunos países como Dinamarca, Holanda, Alemania y Japón.

En términos generales, los generadores fotovoltaicos distribuidos conectados a la red pueden aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución, dependiendo de las características y condiciones operativas de red de distribución, así como de la localización de éstos dentro de la misma. Los beneficios potenciales más importantes son:

- Suavización de picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del inmueble o alimentador.
- Alivio térmico a equipos de distribución, lo que implica también la posibilidad de postergar inversiones de capital para incrementar su capacidad o reemplazo.
- Disminución de pérdidas por transmisión y distribución.
- Soporte de voltaje en alimentadores de distribución.
- Compensación de potencia reactiva en el alimentador.

Características del sistema fotovoltaico

Las principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son: el arreglo fotovoltaico, que es el elemento encargado de transformar la luz del sol en electricidad; y un elemento acondicionador de la potencia producida (un inversor c.d./c.a.), cuya función es adecuar la energía generada por el arreglo a las características eléctricas de la red para su conexión a ésta.

Un arreglo fotovoltaico está constituido por un determinado número de módulos o unidades fotovoltaicas individuales. El número de unidades depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo, –que corresponde al voltaje de operación del inversor– se obtiene mediante la conexión serie de un número determinado de módulos; y la potencia, a través de la conexión paralelo de dichas series. La potencia nominal de los módulos normalmente está entre 50 y 200 W_p, aunque hoy en día algunos fabricantes ofrecen módulos arriba de 200 W_p. El material



más comúnmente usado en la fabricación de los módulos fotovoltaicos es el silicio; la eficiencia típica de estos módulos en condiciones estándar de irradiancia y temperatura (i.e., 1,000W/m², 25°C, AM1.5) se encuentra entre 12 y 15% para silicio monocristalino, entre 11 y 14 %, para silicio policristalino; y entre 5 y 7 % para los de silicio amorfo.

El acondicionamiento de la potencia eléctrica generada por el arreglo fotovoltaico (c.d.) –indispensable para la conexión de éste a la red eléctrica convencional– se realiza mediante un inversor (c.d./c.a.) que convierte la corriente directa producida por el generador fotovoltaico a corriente alterna, en fase y a la frecuencia de la red para una conexión segura y confiable del sistema a ésta. La eficiencia de los inversores es generalmente mayor a 90% cuando éstos operan arriba del 10% de su potencia nominal.

Para extraer siempre la máxima potencia disponible en el arreglo fotovoltaico, el inversor incorpora entre sus funciones un elemento de control que sigue permanentemente el punto de máxima potencia del arreglo (MPPT, por sus siglas en inglés) mediante un ajuste continuo de la impedancia de la carga.

En relación con los aspectos de seguridad y de calidad de la energía producida, las compañías suministradoras del servicio eléctrico requieren de los fabricantes y usuarios de estos equipos el cumplimiento de normas y disposiciones aplicables que garanticen que la instalación y operación del inversor, y del sistema fotovoltaico en su conjunto, sea segura y no afecte adversamente la calidad de la energía.

Tradicionalmente, es un sólo inversor (de la capacidad adecuada) el que maneja la potencia nominal de todo un arreglo fotovoltaico. Sin embargo, cada vez es más común el uso de varios inversores conectados en paralelo y cada uno maneja una parte proporcional de la potencia del arreglo. Incluso, en algunos casos, el inversor viene directamente montado en el respaldo del módulo de manera individual (módulos c.a.). El uso de estas dos últimas configuraciones, inversores en paralelo y ‘módulos c.a.’, muy probablemente se verá incrementado en el futuro en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos integrados a los edificios. Pues esta característica facilita más la expansión de la capacidad de los sistemas, que opera independiente y emplea una instalación más sencilla.

Con el rápido crecimiento de los sistemas distribuidos conectados a la red, hoy en día existe una amplia variedad de productos desarrollados específicamente para la instalación de los módulos fotovoltaicos en las edificaciones. Éstos incluyen estructuras de montaje para fachadas fotovoltaicas, perfiles para tejados, techos planos, incluso algunas tejas fotovoltaicas que pueden ser utilizadas para reemplazar tejas convencionales. Cada uno de estos nuevos productos facilita la integración de los sistemas fotovoltaicos a la fachada y/o techo de los edificios, sin detrimento de la apariencia estética del inmueble.

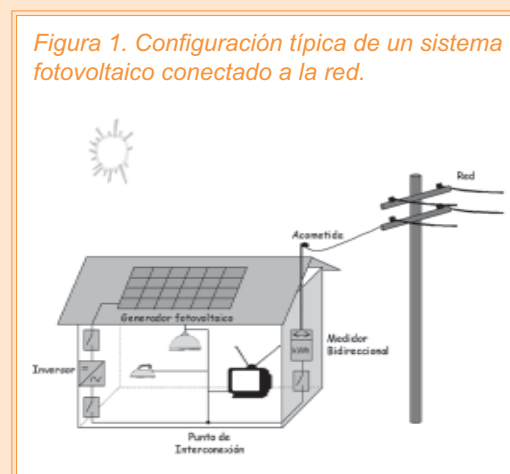
Configuración típica de un sistema conectado a red

En el caso particular de los sistemas fotovoltaicos ligados a la red, cuya principal aplicación se da en viviendas o edificaciones dentro de las zonas urbanas, los elementos conversores (módulos fotovoltaicos) encargados de trans-

formar la luz del sol en electricidad se instalan sobre el techo de las construcciones para proveer a éstos una mayor y mejor exposición a los rayos solares. En cuanto a la conexión eléctrica del sistema a la red, ésta se lleva a cabo a través de un inversor. La Figura 1 muestra la configuración y conexión típica de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

Como cualquier otra instalación eléctrica, estas instalaciones se habilitan con los medios apropiados para realizar, adecuadamente y en forma segura, la conexión y la desconexión eléctrica del sistema fotovoltaico de la red; y para proporcionar la adecuada protección al equipo y a las personas contra condiciones de operación no deseadas. Para tales efectos, se siguen las normas y recomendaciones de carácter general; y las establecidas en particular para este tipo de aplicaciones, como es la norma IEEE Std 1547 (IEEE, Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems).

En una instalación como la mostrada, la electricidad para alimentar las cargas en el inmueble puede venir (total o parcialmente) del sistema fotovoltaico o de la red eléctrica convencional in-



distintamente. En este esquema la fuente de energía que provee la electricidad a las cargas es transparente en todo momento para el usuario, dado que la calidad de la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico es similar a la de la red eléctrica convencional. Cuando existe un déficit entre la demanda de electricidad en el inmueble respecto a la generación fotovoltaica, este diferencial es cubierto con electricidad proveniente de la red eléctrica convencional. En caso contrario, cuando se presenta un excedente entre la demanda respecto a la generación fotovoltaica, éste es directamente inyectado a la línea de distribución del proveedor del servicio eléctrico.

Potencial de penetración e implantación de la tecnología

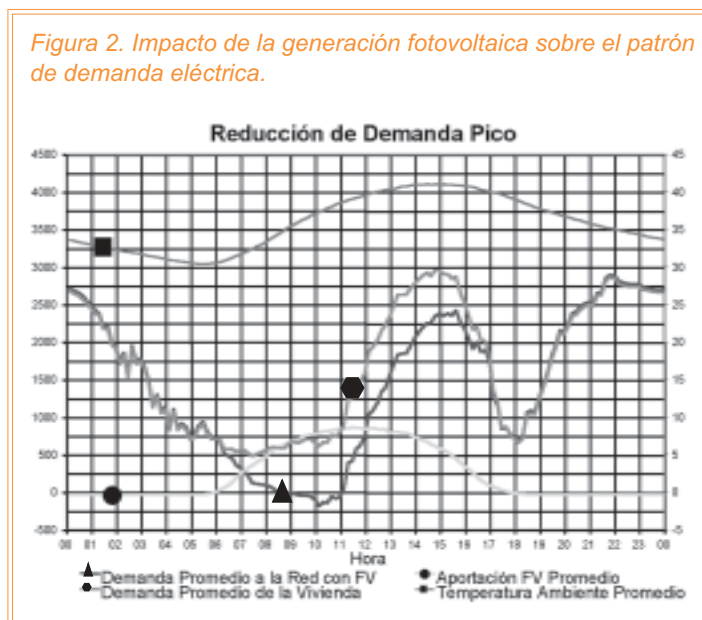
Como ya se mencionó anteriormente, el uso masivo de sistemas fotovoltaicos con conexión a la red –como una alternativa de generación distribuida– ofrece beneficios potenciales tanto al sistema eléctrico como a los usuarios individuales. Se prevé que las primeras aplicaciones económicamente competitivas de esta tecnología, desde el punto de vista de los costos directos de inversión y generación (sin involucrar los costos ambientales), serán aquellas que provean beneficios adicionales o ‘valor agregado’ para el usuario y la empresa eléctrica.

Estos posibles beneficios adicionales de la generación fotovoltaica ligada a la red se pueden clasificar en tres grupos: beneficios relacionados con la producción de la energía eléctrica, beneficios en la integración arquitectónica y beneficios ambientales.

Dentro de los beneficios derivados de la generación eléctrica

ca existe un gran potencial en la reducción de la demanda pico y del consumo eléctrico en horas pico, que se pueden aplicar en inmuebles comerciales, industriales o habitacionales, y en los edificios públicos en general. Esto debido a que el perfil de generación fotovoltaica tiene un buen grado de coincidencia con el perfil de la demanda eléctrica en el inmueble. A manera de ejemplo, la Figura 2 muestra gráficamente cómo la generación fotovoltaica incide sobre el patrón de demanda de un usuario cualquiera y abate el pico vespertino de demanda eléctrica, el cual coincide con la temperatura ambiente máxima registrada en la zona. Asimismo, en dicho gráfico se puede notar la inyección del fluido eléctrico a la red durante la mañana, justo cuando la generación fotovoltaica supera la demanda del usuario.

Figura 2. Impacto de la generación fotovoltaica sobre el patrón de demanda eléctrica.



México es un país con un excelente recurso solar. La irradiación diaria (promedio anual) sobre una superficie horizontal es superior a 4.4 kWh/m²·día, en todo el territorio nacional y en algunos sitios es superior a 6 kWh/m²·día (un valor de los más altos en el mundo). Además, por encontrarse cerca del ecuador, es relativamente constante a lo largo de todo el año. Con base en lo anterior, la explotación de la tecnología fotovoltaica en México brinda condiciones favorables para contribuir en forma importante a los requerimientos energéticos del país. Y su utilización puede resultar más rentable en comparación con muchos otros países.

En México, al igual que en muchos otros países en desarrollo, el uso de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red tiene una penetración y desarrollo aún incipiente. Por lo mismo, la experiencia que se tiene con esta forma de generación de electricidad en particular es limitada. Sin embargo, la región noroeste del país presenta condiciones favorables para la generación distribuida de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos conectados a la red, en virtud de que las condiciones de su sistema eléctrico (el cual se encuentra separado del sistema eléctrico nacional), las tarifas de energía, los patrones de uso de la electricidad y el recurso solar en la



región, se combinan de manera tal que su utilización –bajo determinados esquemas de financiamiento– puede implicar importantes beneficios económicos, tanto al dueño del sistema fotovoltaico como a la compañía suministradora de electricidad.

Con el propósito de conocer en profundidad y detalle las implicaciones tanto técnicas como económicas, inherentes a la implantación de esta tecnología en el territorio nacional; así como su potencial de aplicación en un entorno propio, el IIE trabaja desde hace algunos años en esta línea de investigación y desarrollo tecnológico. Esta dedicación obedece a que la utilización de la tecnología fotovoltaica ligada a la red aparece cada vez con mayor fuerza y frecuencia en otros países como una opción para la generación distribuida de electricidad, con un mercado potencial importante. De igual modo, con objeto de mantenerse informado y actualizado sobre el estado de esta tecnología en el ámbito mundial, el IIE está incorporado al Acuerdo IEA-PVPS y participa en las actividades y proyectos que se realizan en el seno de dicho Acuerdo.

Como resultado de proyectos específicos desarrollados sobre esta línea de investigación y de la supervisión de distintos sistemas fotovoltaicos implementados bajo entornos operacionales igualmente distintos, el IIE ha logrado obtener y asimilar invaluable conocimientos y experiencias alrededor de esta tecnología en aplicaciones específicas y bajo condiciones reales de operación. Caso concreto es el impacto que esta alternativa de generación distribuida tiene sobre la demanda y el consumo de las viviendas, y sobre el transformador de distribución; así como sobre las implicaciones inherentes a una implantación masiva de la misma.

A diferencia de lo que ocurre en países altamente industrializados, las redes eléctricas en México presentan condiciones operativas de menor estabilidad y, en apariencia, es por esta razón que algunas de las pruebas piloto realizadas en el país con sistemas fotovoltaicos conectados a la red, muestran una variedad de problemas que no son típicos de este mismo tipo de aplicaciones en los países industrializados.

En México, las redes de distribución del sistema eléctrico siguen una configuración radial con respecto al punto de generación, lo que proporciona una configuración que origina una expansión de las líneas igualmente radial conforme los usuarios del fluido eléctrico aumentan. Una expansión de este tipo ocasiona que, en muchos casos, la calidad del servicio eléctrico disminuya y se presenten apreciables variaciones de voltaje en la línea debido a las fluctuaciones de la demanda. Lo anterior repercute en algunas averías a los equipos, tanto del proveedor del servicio eléctrico como a los de los mismos usuarios.

En general, ese problema se origina cuando el sistema eléctrico comienza a operar por arriba de su capacidad de regulación para la que fue diseñado, debido al incremento de la demanda eléctrica producto del crecimiento demográfico. La compañía suministradora de electricidad trabaja en la solución de este tipo de problema; sin embargo, debido a la alta inversión que representa el incremento de la capacidad de regulación y el de la propia línea, aún existe un número importante de líneas de distribución que operan bajo esta condición.

Las zonas urbanas son el sector donde más se acentúa este problema, por lo tanto, es en este sector donde la generación fotovoltaica ligada a la red (en el esquema de generación distribuida) se muestra como una alternativa que puede aportar beneficios importantes a la compañía suministradora del servicio eléctrico, algunos pueden ser: la reducción del pico de demanda vespertino, la reducción de pérdidas por distribución, el aplaza-

Con el rápido crecimiento de los sistemas distribuidos conectados a la red, hoy en día existe una amplia variedad de productos desarrollados específicamente para la instalación de los módulos fotovoltaicos en las edificaciones.

miento de inversiones para incrementar la capacidad de la red de distribución y, en un escenario de gran escala, pudiera sustituir inversiones en capacidad de generación y transmisión.

La formulación de una estrategia local potencialmente exitosa para una implantación masiva (gradual) de sistemas fotovoltaicos conectados a red en una región como el noroeste del país, necesariamente tiene que estar ligada a la implementación y desarrollo de un mayor número de proyectos piloto-demostrativos de sistemas fotovoltaicos ligados a la red en la zona. Lo que permitiría evaluarlos ampliamente bajo las condiciones particulares de operación del circuito eléctrico en cuestión y conocer detalladamente el origen de la problemática que afecta el buen desempeño de los sistemas cuando interactúan en redes débiles. Esta problemática impacta la confiabilidad, seguridad y el nivel de mantenimiento demandado por los equipos, especialmente en lo relacionado con el incremento de fallas en los acondicionadores de potencia.

La ejecución de proyectos de este tipo permite, además de identificar los entornos y las potenciales barreras técnicas, reconocer las barreras sociales y económicas a las que previsiblemente se enfrentaría la implementación de este tipo de aplicaciones en el ámbito nacional. En el IIE se estima que los proyectos futuros que atiendan esta línea de investigación, ineludiblemente, tomarán en cuenta esta problemática.



Referencias

González R., Medrano C., Lagunas J. et al. *Pequeños Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica, fase II: Informe Técnico Anual 2001, Informe Interno IIE/01/14/11779/I002/P*, febrero de 2002.

Lorenzo, E. et. al. *Electricidad solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*, Sevilla, Ed. Progensa, 1994.

Report IEA–PVPS T1–10:2001. *Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries*, September 2001.

Raúl González Galarza

Ingeniero mecánico electricista egresado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (1976). En 1984, se integró como investigador al IIE, en la Gerencia de Energías No Convencionales. Desde entonces colabora en proyectos vinculados con el desarrollo y aplicación de sistemas convertidores de energía.

Es coautor de dos patentes y un registro de marca en el área eólica. Participó y dirigió proyectos de desarrollo tecnológico en las áreas de microhidráulica, energía eólica y solar fotovoltaica. Ha impartido diversos cursos de actualización y publicado artículos técnicos y de difusión sobre estos temas. Fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores de 1990 a 1993.

rgg@iie.org.mx

Humberto Raúl Jiménez Grajales

Ingeniero electrónico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (1998); obtuvo su maestría en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Morelos (Cenidet, 2002). Desde 2001 labora en el IIE en la GENC, donde se ha desempeñado como investigador en la línea de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red Eléctrica. Tiene publicados artículos técnicos en revistas nacionales e internacionales de congresos afines a su línea de investigación.

hjimenez@iie.org.mx

Javier Lagunas Mendoza

Ingeniero mecánico electricista, especializado en las áreas eléctrica y electrónica, por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Tiene su Maestría en Ingeniería, con especialidad Control por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

Desde 1992 se desempeña como investigador-jefe de proyecto dentro de la GENC y su especialidad es en instrumentación y control de equipos convertidores de energía. Dirigió algunos proyectos bajo contrato: uno sobre la modernización de estaciones hidrométricas y climatológicas para la CFE y otro sobre sistemas fotovoltaicos para electrificación rural para General Motors-Ovonic. Ha publicado artículos en revistas nacionales y, actualmente, es miembro de la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) de México.

jlagunas@iie.org.mx