

PERSPECTIVA DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN EN REDES ELÉCTRICAS CON ALTA PENETRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

PERSPECTIVE OF THE DISTRIBUTION TRANSFORMER IN ELECTRIC NETWORKS WITH HIGH PENETRATION OF DISTRIBUTED GENERATION AND ELECTRIC VEHICLES

Álvaro José Bazurto Cubillos¹, Jefferson Zúñiga Balanta², Diego Fernando Echeverry³, Carlos Arturo Lozano⁴

Fecha de recepción: 9 de febrero de 2016

Fecha de revisión: 30 de marzo de 2016

Fecha de aprobación: 12 de abril de 2016

Referencia: A. J. Bazurto Cubillos, J. Zúñiga Balanta, D. F. Echeverry, C. A. Lozano (2016). Perspectiva del transformador de distribución en redes eléctricas con alta penetración de generación distribuida y vehículos eléctricos. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 26 (2), pp. 35-48, DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1710>

RESUMEN

La modernización de las redes eléctricas es una realidad que genera nuevos desafíos en el diseño, operación y gestión del transformador de distribución, los cuales dependerán, entre otras cosas, de condiciones particulares como la topología de la red y los índices de penetración de tecnologías de movilidad eléctrica y generación distribuida (GD). Este artículo revisa aspectos generales de la bibliografía internacional frente al impacto que puede tener la generación distribuida y los vehículos eléctricos en el transformador en el marco de las *Smart Grid*. También se presentan las principales estrategias aplicadas para mitigar los posibles impactos negativos.

1. Ing. Electricista, joven investigador e innovador, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, alvaro.bazurto@correounivalle.edu.co

2. Ing. Electricista, asistente de docencia, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, jefferson.zuniga@correounivalle.edu.co

3. Ing. Electricista, Ph.D., profesor asociado, investigador Grupo GRALTA, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, diego.echeverry@correounivalle.edu.co

4. Ing. Electricista, Ph.D., profesor asociado, investigador Grupo GRALTA, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, carlos.a.lozano@correounivalle.edu.co

Palabras clave: smart grid, generación distribuida, vehículos eléctricos, V2G, transformador inteligente, transformador de distribución.

ABSTRACT

New challenges in the operation, management, and design of the distribution transformer are required due to the modernization of electricity networks. These challenges depend among other things on particular conditions as network topology, distributed generation, and penetration rates of the electric mobility technologies. In this paper, a state of the art of the potential impacts that distributed generation and electric vehicles may generate on the operation of the distribution transformer is developed. Major strategies used to mitigate potential negative impacts are also presented.

Keywords: smart grid, distributed generation, electric vehicles, V2G, smart transformer, distribution transformer.

INTRODUCCIÓN

Una red inteligente, o *Smart Grid*, es aquella que incorpora las tecnologías de la información en toda la cadena del servicio de energía eléctrica, con el fin de minimizar el impacto ambiental, mejorar la eficiencia del sistema, la confiabilidad, el servicio y optimizar los mercados de electricidad, así como reducir los costos [1]. En una red inteligente se facilita la administración de recursos de energía mediante tecnologías de medición avanzada, y se obtiene información en tiempo real tanto para proveedores como consumidores. Este desarrollo potencia la gestión del consumo por parte del usuario y la incorporación de tecnologías de automatización y control en la red.

Un aspecto importante de las *Smart Grid*, o redes inteligentes, es que facilitan la incorporación de generación distribuida a partir de fuentes de energías renovables y la integración de cargas especiales como el vehículo eléctrico. Por otra parte, la incursión de estas cargas especiales, como los vehículos eléctricos,

puede traer a la red impactos negativos, como por ejemplo el estrés en los equipos del sistema de distribución de aquellos vecindarios donde existan altos niveles de penetración de estas cargas [2-4]. En cuanto a la generación distribuida fotovoltaica, eólica, entre otras, que utilizan convertidores electrónicos, se prevé que su incorporación masiva puede generar impactos en la calidad de la potencia, los cuales requieren ser estudiados con detalle [5-7].

Según "The EV Project" [8], la incursión de la generación distribuida y los vehículos eléctricos en la red de distribución es necesaria para ayudar a reducir la contaminación con CO₂. Sin embargo, se indica que puede haber consecuencias al introducir estas nuevas tecnologías en los sistemas de distribución, como: sobrecalentamiento de elementos de la red, violaciones de límites de tensión, elevados niveles de distorsión armónica y reducción de tiempo de vida útil, entre otras. Bajo el escenario que plantea la modernización de las redes de distribución, el transformador, como parte integral de la red, debe adaptarse y evolucionar

para trabajar en su nuevo entorno (presencia de armónicos, flujo de potencia bidireccional, regulación de tensión, variaciones inesperadas de carga) y satisfacer las necesidades tanto del usuario como de las empresas de energía.

Este artículo presenta una revisión de los impactos de la generación distribuida y los vehículos eléctricos en la red, y en el funcionamiento del transformador de distribución, así como las diversas estrategias desarrolladas para mitigar los impactos negativos.

1. IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA RED

La modernización de las redes de distribución, así como la incursión de nuevas fuentes de generación a partir de energías renovables, localizadas en los centros de consumo, plantean grandes retos en la operación y gestión de los sistemas de potencia. El transformador, como parte integral de la red, debe responder satisfactoriamente a este nuevo entorno.

Para entender mejor la nueva dinámica del sistema eléctrico es necesario contextualizar los aspectos que involucra la red eléctrica actual. La generación distribuida se define en [5], como aquella generación de tamaño reducido (10 MW o menor) e interconectada a nivel de subestación, distribución o carga final del usuario, que emplea como métodos de generación la energía solar, eólica, celdas de combustible, generadores de combustión interna y micro centrales hidroeléctricas. La incorporación de este tipo de generación en la red de distribución provoca flujos de energía bidireccionales, que pueden comprometer la calidad, confiabilidad, sostenibilidad y rentabilidad del sistema si no se cuenta con una adecuada gestión y operación.

En [5, 7, 9 - 11], los autores plantean las implicaciones que la generación distribuida puede presentar en la red. A continuación se presenta una clasificación de impactos realizada a partir de la literatura consultada.

Impactos positivos:

- Reducción de pérdidas de distribución por transporte de energía.
- Soporte de tensión ante variaciones de carga y gestión de potencia reactiva, dependiendo del tipo de control configurado en el inversor de potencia.
- Mejoramiento de la capacidad de distribución y generación.
- Mejoramiento de la confiabilidad de la red.
- Retrasa la inversión en ampliaciones de la infraestructura de transmisión y generación.
- Facilita la incorporación de fuentes de generación a partir de energías renovables.

Impactos negativos:

- Inyección de armónicos al sistema por uso de convertidores electrónicos, los cuales generan calentamiento del transformador y reducción de su vida útil.
- Variaciones súbitas de potencia por la dependencia de factores climáticos, como el sol y el viento, los cuales presentan intermitencia de disponibilidad.
- Dificultad para la coordinación de protecciones como consecuencia de la variación en los niveles de cortocircuito de la red y flujos bidireccionales.
- Desequilibrios de voltaje en la red en potencia por penetración de fuentes de generación monofásicas.

Como ya se mencionó, existe una serie de impactos debido a la incursión de la GD en la

redes de distribución. Sin embargo, la magnitud del impacto que dichas fuentes de generación puedan producir en la red depende, entre otras cosas, de la ubicación particular en el sistema de cada una de estas. En [12] los autores analizan cómo la GD afecta las pérdidas técnicas de la red y los perfiles de voltaje. Concluyen que con un mayor porcentaje de inyección de potencia a la red se reducen las pérdidas técnicas del sistema, pero se incrementa la magnitud de voltaje del nodo. Por este motivo es necesario calcular el punto óptimo de ubicación de la GD en la red, donde se garantice el valor mínimo de pérdidas técnicas sin superar los límites de tensión del sistema.

Un aspecto crítico de la incursión de fuentes de GD es la coordinación de protecciones [11, 13 - 16]. En [11] se revisan los impactos sobre la coordinación de protecciones (disparos indeseados, pérdida de observabilidad de la corriente de falla, pérdida de coordinación entre protecciones de sobrecorriente) en sistemas radiales. Concluyen que es necesario realizar una planificación detallada en la ubicación de la GD con el fin de garantizar la confiabilidad de las protecciones.

En [13] plantean que la presencia de flujos de potencia bidireccional, junto con la instalación de nuevas fuentes de generación, puede ocasionar una variación de los niveles de corriente de cortocircuito y de impedancia en el punto de falla. Esta condición afecta principalmente la selectividad de la protección. Otro aspecto a tener en cuenta, es que los sistemas con GD pueden trabajar independiente de la red, en sistemas llamados "islas" o "microrredes"; por esta razón las protecciones tienen el reto de adaptarse a esta nueva topología del sistema. La solución a estos cambios de topología son las protecciones adaptativas.

Teniendo en cuenta los impactos que la GD puede presentar sobre las protecciones de la red, en [16] proponen un método para determinar el índice de descoordinación de la protección PMI (*Protection Miscoordination Index*); este método puede cuantificar el impacto negativo de la GD e indicar la probabilidad de falla en la coordinación de protecciones; adicionalmente, puede ser utilizado para determinar la capacidad máxima de generación que puede ser instalada en un alimentador.

En [17] se analizan otros efectos, por ejemplo, se realizó una simulación en Matlab con datos reales de la comunidad de Mueller en Austin, Texas, donde se aprecia que, cuando hay mayor irradiación solar, el factor de potencia en la red se reduce hasta valores de 0,6 debido a que la configuración del arreglo de paneles solo entrega energía activa a los hogares. Igualmente, se presentan desbalances de corriente muy pequeños que no afectan a la red de manera importante.

El impacto de las fuentes de GD depende del porcentaje de penetración que tenga sobre la red tradicional; en [18] se analiza el impacto de la energía solar fotovoltaica ante diferentes niveles de penetración en una red de 97 nodos del occidente australiano. Luego de analizar niveles de penetración del 10%, 20%, 30% y 50%, los autores concluyen que la incursión de fuentes de generación mejora los perfiles de voltaje y los niveles de cargabilidad del transformador ante niveles de penetración moderada durante las horas de aporte de energía a la red. Sin embargo, para niveles masivos de penetración superior al 50% se superan los límites de tensión y se hacen necesarios sistemas inteligentes de control de voltaje.

En [19] se realiza una investigación en la cual combinan modelos de carga y se consideran aspectos atmosféricos para determinar, mediante un análisis térmico, el tiempo de vida útil del transformador. Como resultado de esta investigación se presenta una metodología para cuantificar los beneficios económicos debidos a la extensión de vida de los transformadores por el uso de fuentes de generación distribuida.

Uno de los impactos negativos de la incursión de la generación distribuida es el efecto en la calidad de la energía de la red, a causa de la masiva penetración de inversores de potencia con alta distorsión armónica. En [20] se estudia el efecto de los armónicos en el aislamiento de los transformadores. Se usa el incremento del factor de disipación como medida para analizar el efecto del envejecimiento del aislamiento, dando como resultado que los papeles aislantes sometidos a un mayor esfuerzo por parte de voltajes con alto contenido armónico, presentan un factor de disipación mayor. Se encontró un aumento significativo en la velocidad de degradación del aislamiento en un entorno operativo con mayor nivel de THD (*Total Harmonic Distorsion*), para armónicos de baja frecuencia. De acuerdo con los resultados obtenidos en [20], se puede concluir que la penetración de generación distribuida que utilice inversores de potencia de baja calidad, que inyecten un alto contenido de armónicos a la red, aumenta el riesgo de falla en el aislamiento del transformador.

2. IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA RED

Las tecnologías de movilidad eléctrica han tomado una gran relevancia en los últimos años, debido a los altos costos asociados a los

combustibles fósiles y al impacto que estos tienen sobre el cambio climático. Las grandes potencias mundiales vienen promoviendo políticas que facilitan la masificación de estas tecnologías; por otra parte, existe un reciente interés de la industria automotriz por la fabricación de vehículos eléctricos (VE). En [21-23] plantean varios impactos del uso de VE; el más significativo es no generar emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Por otra parte, desde el punto de vista de la red eléctrica se plantean impactos como: caída de tensión, congestión de líneas e incremento de pérdidas de distribución, sobrecargas en el transformador y modificación de la curva de demanda.

La incursión de los vehículos eléctricos se encuentra ligada al uso de cargadores de baterías. Estos dispositivos no lineales de alta potencia pueden generar un porcentaje significativo de distorsión armónica en la red; en [24], por ejemplo, se analiza el comportamiento de los perfiles de tensión y corriente, y las pérdidas en el transformador, en escenarios donde se simulan diferentes niveles de distorsión armónica, los cuales representan los ciclos de recarga de baterías de un vehículo eléctrico. En [24] y [25] se concluye que durante el ciclo de carga rápida se presentan los mayores niveles de distorsión armónica y sobrecarga del transformador objeto del escrutinio.

En otro estudio, que analiza el impacto de los vehículos en la red y el transformador [17], el autor concluye que las recargas no controladas de vehículos eléctricos producen desbalances en la red trifásica, dado que por lo general los cargadores de baterías de uso residencial son de carga monofásica; si estos dispositivos son de diseño simple y sin filtrado de armónicos, pueden ocasionar disparos indeseados de las

protecciones, sobrecalentamiento del neutro, pérdidas en la red, calentamiento de equipos, disminución de calidad del servicio, entre otros. En [26] se realiza un estudio acerca de los efectos de dos tipos de vehículos (tipos doméstico e industrial) en la calidad de energía; se observa que la condición más crítica para la red se presenta con la carga de los vehículos domésticos debido a la configuración monofásica del inversor, la cual genera altos niveles de distorsión armónica, principalmente de corriente y desbalance en las fases de la red. Además, se discuten técnicas y métodos para atenuar la amplitud de los armónicos que se presentan en las ondas de voltaje y corriente.

En estudios, como los realizados en [27], se evalúa la aceleración en el envejecimiento de los transformadores debido a cargas de vehículos eléctricos. La vida útil del transformador depende directamente del estado del aislamiento, el cual a su vez guarda una estrecha relación con la temperatura de operación del mismo. En condiciones normales de operación, el transformador objeto de estudio permanece con un consumo de potencia menor a su valor nominal. Sin embargo, al ir incorporando vehículos eléctricos, su nivel de carga va aumentando hasta superar su límite de potencia. Con el fin de determinar el grado de impacto de la penetración de vehículos en el transformador, los autores utilizan como indicadores el factor equivalente de envejecimiento del aislamiento (FEQA) y el porcentaje de pérdida de vida (LOL%). Luego de realizar simulaciones para varios escenarios de penetración, los autores concluyen que la incursión de vehículos sin el acompañamiento de un adecuado sistema de gestión de recarga de los mismos, puede ocasionar un incremento en el porcentaje de pérdida de vida del transformador hasta del 350% bajo el esquema estudiado.

La posible masificación de los vehículos eléctricos en regiones como Estados Unidos y Europa, ha llevado a idear mecanismos y tecnologías que permitan mitigar los posibles impactos negativos, como los descritos y, adicionalmente, incluir beneficios o impactos positivos en el sistema. En [28], por ejemplo, los autores realizan una extensa recopilación de información sobre los impactos en la red y el transformador debido a la utilización de tecnologías V2G (del inglés *Vehicle to Grid*). Esta tecnología consiste en utilizar los vehículos eléctricos como sistema de almacenamiento de energía. Para este fin es necesaria una nueva figura en la cadena del sector eléctrico denominada "Agregadores", la cual se encarga de gestionar la carga y descarga de los vehículos eléctricos de tal forma que facilite y mejore la operación de la red. En otras palabras, la empresa agregadora representa a cada uno de los usuarios que hagan contrato con esta ante las compañías comercializadoras y operadoras de la red, garantizando una respuesta activa de los usuarios en el comportamiento de la demanda de energía.

Los impactos positivos de la tecnología V2G en la red eléctrica, planteados en [28-30], son:

- Facilitan la regulación de frecuencia ante contingencias del sistema al utilizar las baterías de los vehículos como reserva rodante y fuentes distribuidas.
- Permiten la fácil incorporación de fuentes de energía renovables, como la eólica y solar, al respaldar la generación ante intermitencias ocasionadas por las variaciones climáticas.
- Puede ayudar a dar soporte de energía reactiva a los operadores de red (dependiendo de la configuración del inversor).
- Permite la regulación de potencia activa y el balance de cargas en la red.

- Facilita la incorporación de los programas de respuesta de la demanda y aplanamiento de la curva típica de consumo. Tiene aplicación en la reducción de pico máximo de demanda y llenado de valles.
- Permite la mejora en la eficiencia, estabilidad y confiabilidad de la red.

Por otra parte, las tecnologías de V2G pueden presentar los mismos impactos negativos descritos en [17]; sin embargo, en la actualidad existen diferentes métodos que permiten la mitigación de los impactos ocasionados por los vehículos eléctricos, lo que facilita su incorporación en la red.

3. MITIGACIÓN DE EFECTOS NEGATIVOS PROVOCADOS POR LA PENETRACIÓN DE GD Y VE

La tecnología en torno a los transformadores de distribución debe adaptarse y evolucionar para trabajar en su nuevo entorno. La literatura alrededor de esta temática acuña el término "*Smart Transformer*", refiriéndose a los equipos adaptados para trabajar en el ambiente de las redes inteligentes.

Algunos autores [31-32] se refieren a los *Smart Transformer (ST)*, como transformadores con sistemas avanzados de medición y monitoreo (temperatura, corriente, voltaje y frecuencia), los cuales permiten la transferencia de datos en tiempo real al operador, por medio de diferentes protocolos de comunicación, lo que permite un mejor seguimiento al equipo y se convierte, de esta manera, en una herramienta eficaz para programas de mantenimiento preventivo y gestión de la demanda. Sin embargo, actualmente el término ST comprende un concepto más amplio, que va desde la adquisición de datos

del funcionamiento del transformador hasta la toma de decisiones de manera autónoma para cambiar sus parámetros de funcionamiento, con el fin de mejorar la calidad de energía de la red eléctrica, por ejemplo, los perfiles de voltaje, y responder a necesidades del sistema.

De acuerdo con [24], las *Smart Grid* desempeñarán un papel importante en la operación de los vehículos eléctricos, ya que la carga podrá ser controlada por un agregador, aprovechándolos como almacenadores de energía y dando soporte al sistema durante las horas de máxima demanda de carga, en este sentido dicho control funcionará como método de mitigación de los impactos negativos de estos elementos en la red.

Los diferentes métodos para la mitigación de los impactos se enfocan principalmente en tres aspectos: control de voltaje por medio de cambiadores automáticos de TAP, control de distorsión armónica y control de cargabilidad.

3.1 Control de voltaje por medio de cambiadores automáticos de TAP

En [33] los autores proponen un transformador de distribución inteligente, que emplea un sistema electrónico de cambiador de TAP bajo carga con un sistema de comunicación bidireccional. Este sistema permite la regulación automática de voltaje, telemetría y control remoto para servicios públicos de energía, lo que facilita su aplicación en redes inteligentes. En el documento se proponen dos sistemas de comunicación: el primero, un híbrido entre PLC (*Power Line Communication*) y una tecnología inalámbrica enfocado para redes de distribución en zonas rurales, y un segundo sistema de comunicación por redes inalámbricas enfocado para zonas urbanas. La

principal característica del sistema propuesto es la fácil expansión, lo que permite la gestión de un conjunto de ST con la misma ruta de comunicación. Estas características hacen que el ST sea una alternativa prometedora para las aplicaciones en sistemas de distribución, ya que permite la autorregulación de tensión y gestión de la red, siendo adecuado para la generación distribuida y demás aplicaciones de las redes inteligentes, porque permite controlar parámetros de calidad de energía, como las variaciones de voltaje.

Los autores en [34] plantean, desde la perspectiva de la empresa privada "Siemens", la disponibilidad para desarrollar transformadores con control automático de TAP, monitoreo y gestión de la sobrecarga, basado en mediciones *online* del estado del aceite y la temperatura.

En [35] los autores plantean el transformador de tensión regulada como una herramienta para solucionar los problemas de voltaje en una red con gran penetración de generación distribuida. Los autores del documento concluyen que el transformador logra cumplir con los niveles de voltajes permitidos, y desempeña de manera satisfactoria su propósito. Sin embargo, se recomienda especial atención al diseño del algoritmo de control, para evitar fluctuaciones de tensión en la red.

En [36] y [37] plantean tres estrategias de control enfocadas en mantener el voltaje de la red dentro de los valores permitidos por la normativa correspondiente, mediante el control electrónico del cambiador de TAP.

Las estrategias estudiadas se relacionan a continuación:

- Control de tensión constante en el barraje principal de la red.
- Control de tensión promedio en el final de cada rama del circuito.
- Control de tensión promedio en todos los puntos de conexión del usuario.

En [36] se centran en el análisis de las variaciones de voltaje en el lado de baja tensión de la red, mientras que en [37] se enfocan en la fluctuaciones que se pueden presentar por el lado de media tensión del transformador, las cuales pueden afectar la calidad de suministro del usuario. Los autores concluyen que con la primera estrategia de control se obtienen resultados que satisfacen los requerimientos técnicos del sistema, y adicionalmente necesita una menor infraestructura para su implementación.

La estrategia de control de voltaje por medio de cambiadores automáticos de TAP bajo carga, genera sobreesfuerzo en el dispositivo y pérdidas de conmutación, debido a la operación bajo carga. En [38] proponen un método de control coordinado de un cambiador de TAP con almacenamiento de energía. El método busca, por medio de energía almacenada en baterías, mitigar los esfuerzos eléctricos y las pérdidas de conmutación en el cambiador de TAP, lo que permite que el dispositivo opere con una carga menor, o sin carga.

3.2 Control de distorsión armónica

En el mundo existen diversas normativas que proporcionan los criterios de calidad de energía de la red y los valores máximos de distorsión armónica que los dispositivos pueden inyectar al sistema. Sin embargo, la normativa y la fabricación de dispositivos electrónicos, principalmente inversores, que generen un menor nivel de distorsión armónica, no representan una solución total al problema de

la calidad de la energía; la alta penetración de elementos, como los cargadores de baterías (incluso cuando se fabrican bajo los criterios exigidos por norma), presenta una mayor posibilidad de reducción de los índices de calidad de energía.

En [39] y [40] los autores plantean diferentes métodos para la mitigación de armónicos, enfocándose directamente en el escenario de carga de los vehículos eléctricos. Los métodos que relacionan los autores son:

- División del intervalo de carga óptimo empleando un algoritmo genético.
- Despacho óptimo usando algoritmo genético.
- Banco de filtros activos y pasivos.
- Aumento en el nivel de voltaje del cargador de baterías.

Por otro lado, la industria de los transformadores tampoco ha sido ajena a la búsqueda de soluciones que permitan el trabajo de los equipos en ambientes con niveles de distorsión armónica considerablemente alta. En [41] la compañía ABB presenta su serie de transformadores para trabajo en presencia de armónicos denominados K-Factor.

Bajo una condición de trabajo con alto nivel de distorsión armónica, el transformador presenta una mayor elevación de temperatura, limitando su potencia nominal; esta situación ocasiona que se deba cambiar por otro de mayor potencia o disminuirse la carga. En este sentido, el factor "K" se define en [41] "como aquel valor numérico que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador". En conclusión, los transformadores con factor "K" están diseñados para un valor de potencia nominal considerando las pérdidas generadas

por un nivel de distorsión armónica específico. El valor de múltiplo "K" depende del nivel de armónicos que el transformador esté en capacidad de soportar para mantener los niveles de temperatura permisibles para la potencia diseñada.

Otros autores plantean la implementación de transformadores de distribución monofásico con convertidores AC-AC y control sobre los pulsos del convertidor por medio de tecnología PWM (*Pulse-Width Modulation*), con el fin de permitir el correcto funcionamiento del transformador bajo una alta penetración de cargas no lineales [42]. Entre algunas de las ventajas que proponen los autores sobre la utilización de dichos equipos se encuentra la posibilidad de compensar hasta un 50% las sobretensiones y subtensiones, la facilidad de desconectar la carga ante un evento de falla y la capacidad de entregar una forma de onda con bajo nivel de THD, incluso cuando el voltaje de entrada es distorsionado por la presencia de cargas no lineales.

3.3 Control de cargabilidad del transformador

En [43] el autor realiza estudios de sistemas fotovoltaicos utilizados para alimentar apartamentos, teniendo en cuenta la penetración de vehículos híbridos y eléctricos, además se evalúan algunos métodos o estrategias de carga controlada de vehículos para disminuir su impacto sobre la red. Se encontró que el escenario ideal es el de fomentar la carga lenta durante diferentes periodos del día, es decir, en las mañanas antes de salir al trabajo, al mediodía mientras se almuerza y en la noche al regresar a los hogares, ya que de esta manera tanto la red como los paneles solares se reparten la carga y evitan sobrecargas de transformadores en horas de la noche.

Una propuesta de construir estaciones de alquiler de baterías es presentada en [44], con las cuales se lograría tener un mayor control del proceso de recargas de las mismas, consiguiendo una reducción en los impactos sobre la red y, al mismo tiempo, una mejor eficiencia económica del proceso. Adicionalmente, en las estaciones de alquiler y recarga se implementaría el modelo V2G, con el que se puede inyectar energía a la red en caso de ser necesario.

En [45] se presenta una simulación de V2G, donde se demuestra que al tener un control de la gestión de la carga y descarga de las baterías de los vehículos eléctricos se logra reducir las pérdidas y mejorar el control de tensión en la red, manteniendo estos cambios en un rango menor al 5%. Con este control también se puede ayudar a aplanar la curva de demanda, ya que las baterías de los vehículos permitirían tener una reserva de energía que se inyectaría a la red.

Los autores en [46] realizaron una simulación del parqueadero de una compañía donde los empleados dejan cargando sus vehículos durante su horario laboral; este incorpora las tecnologías V2G y V2V (del inglés *Vehicle to Vehicle*). Se utiliza un algoritmo para realizar esta carga con energía proveniente de la red o de la generación distribuida instalada en el lugar, dependiendo del precio de la energía eléctrica en ese instante, lo que ayuda a reducir costos al usuario y evita sobrecargas en la red de distribución.

4. CONCLUSIONES

La inclusión de las tecnologías de movilidad eléctrica y generación distribuida en la red de distribución trae consigo una serie de

impactos en la red, varios de los cuales afectan la operación y vida útil del transformador. Se identifica que las tecnologías GD y VE pueden ocasionarle al transformador la reducción de su vida útil, debido fundamentalmente a dos factores: el aumento en los niveles de distorsión armónica por el uso de inversores de potencia y, en segunda instancia, por las sobrecargas que se pueden presentar por la masificación de vehículos eléctricos.

Por otra parte, las tecnologías de GD y VE pueden impactar de manera positiva la red y el transformador, siempre y cuando se implementen en ambientes con gestión y control inteligente de la demanda.

Actualmente se plantean soluciones para mitigar los impactos negativos (variaciones de tensión, distorsión armónica y cargabilidad del transformador) de la masificación de la GD y los VE, las cuales van desde modificaciones e instalación de nuevos equipos al transformador tradicional, hasta la gestión inteligente de la carga y el uso de transformadores con convertidores AC-AC.

Debido a la inminente penetración de tecnologías de movilidad eléctrica y generación distribuida, así como a los requerimientos de las redes inteligentes de energía, se vuelve pertinente e importante avanzar en el desarrollo de los llamados "*Smart Transformers*" y en plantear mecanismos de gestión de la demanda.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores y Semilleros de Investigación "Virginia Gutiérrez de Pineda" de Colciencias a través del contrato RC-

0618-2013 y a la Universidad del Valle por el apoyo para el desarrollo de este trabajo de investigación. Al grupo de investigación en alta tensión GRALTA por brindar el espacio y el apoyo académico para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] EPRI: Electric Power Research Institute (2011). *Smart Grid Resource Center*. En: <http://smartgrid.epri.com/>.
- [2] Moghe, R., Kreikebaum, F., Hernández, J. E., Kandula, R. P. and Divan, D. (2011). Mitigating distribution transformer lifetime degradation caused by grid-enabled vehicle (GEV) charging. En *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, pp. 835-842. doi: 10.1109/iece.2011.6063857
- [3] Hilshey A. D., P., Hines, D. H., Rezaei, P. and Dowds, J. R. (2013). Estimating the impact of electric vehicle smart charging on distribution transformer aging. En *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC. doi: 10.1109/pesmg.2013.6672925
- [4] Gong, Q., Member, S., Midlam-mohler, S., Marano, V. and Rizzoni, G. (2012). Study of PEV Charging on Residential Distribution Transformer Life. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), pp. 404-412. doi: 10.1109/tsg.2011.2163650
- [5] Barker, P. P. and De Mello, R. W. (2000). Determining the impact of distributed generation on power systems. Radial distribution systems. En *2000 Power Eng. Soc. Summer Meet. (Cat. No. 00CH37134)*, 3, pp. 1645-1656. doi: 10.1109/pess.2000.868775
- [6] Pezeshki, H., Wolfs, P. J. and Ledwich, G. (2014). Impact of High PV Penetration on Distribution Transformer Insulation Life. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(3), pp. 1212-1220. doi: 10.1109/tpwr.2013.2287002
- [7] McDermott, T. E. and Dugan, R. C. (2012). Distributed generation impact on reliability and power quality indices. En: *2002 Rural Electr. Power Conf. Pap. Present. 46th Annu. Conf. (Cat. No. 02CH37360)*, pp. 1-7. doi: 10.1109/recon.2002.1002301
- [8] US Department of Energy (2012). *The EV Project*. En: <http://energy.gov/eere/vehicles/avta-ev-project>.
- [9] Endesa (2015). *Smartcity Málaga: un modelo de gestión energética sostenible para las ciudades del futuro*. En: <http://www.endesa.com/>
- [10] Hasanzadeh, A., Edrington, C. S. and Bevis, T. (2012). Comprehensive study of power quality criteria generated by PV converters and their impacts on distribution transformers. En: *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, pp. 5820-5826. doi: 10.1109/iecon.2012.6389132
- [11] Mashau, T. and Kibaara, S. (2011). Impact of Distributed Generation on Protection Coordination in a Radial Distribution Feeder. En *Proceedings of 2011 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, Soest, Germany, pp. 1-5.

- [12] Bawan, E. K. (2000). Distributed Generation Impact on Power System Case study: Losses and Voltage Profile. En: *2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Bali, pp. 1-6.
- [13] Benato, R., Caldon, R. and Corsi, S. (2005). Protection requirements in distribution systems with high DG and possibility of intentional islanding. En *18th Int. Conf. Exhib. Electr. Distrib. (CIRED 2005)*, Turin, Italy, pp. v3-88. doi: 10.1049/cp:20051184
- [14] Sadeh, J., Bashir, M. and Kamyab, E. (2011). Effect of distributed generation capacity on the coordination of protection system of distribution network. En *2010 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. (T&D-LA)*, São Paulo, pp. 110-115. doi: 10.1109/tdc-la.2010.5762869
- [15] Gómez, J. C. (2013). Effect of the presence of distributed generation on the studies of overcurrent protection coordination. En *22nd Int. Conf. Electr. Distrib.*, pp. 10-13. doi: 10.1049/cp.2013.0792
- [16] Pholborisut, N., Saksornchai, T. and Eua-Arporn, B. (2011). Evaluating the impact of distributed generation on protection system coordination using protection miscoordination index. En *ECTI-CON 2011 - 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011*, Khon Kaen, pp. 865-868. doi: 10.1109/ecticon.2011.5947977
- [17] Uriarte, F. and Hebner, R. (2013). *Impact of residential Photovoltaic Generation and electric vehicles on distribution transformers*. Center of Electromechanics, The University of Texas at Austin, pp. 1-60.
- [18] Masoum, A. S., Moses, P. S., Masoum, M. S. and Abu-Siada, A. (2012). Impact of rooftop PV generation on distribution transformer and voltage profile of residential and commercial networks. *2012 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. ISGT*, pp. 5-11, 2012. doi: 10.1109/isgt.2012.6175693
- [19] Mousavi-Agah, S. M. and Abyaneh, H. A. (2011) Quantification of the Distribution Transformer Life Extension Value of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3), pp. 1820-1828. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2115257
- [20] Ghunem, R., Hamid, M., Jayaram, S., Seethapathy, R. and Naderian, A. (2011). Transformer insulation risk assessment under smart grid environment due to enhanced aging effects. En *2011 Electr. Insul. Conf.*, Annapolis, MD, pp. 276-279. doi: 10.1109/eic.2011.5996161
- [21] Ustun, T. S., Zayegh, A. and Ozansoy, C. (2013). Electric vehicle potential in Australia: Its impact on smartgrids. *IEEE Ind. Electron. Mag.*, 7(4), pp. 15-25. doi: 10.1109/mie.2013.2273947
- [22] Morais, H., Sousa, T., Vale, Z. and Faria, P. (2014). Evaluation of the electric vehicle impact in the power demand curve in a smart grid environment. *Energy Convers. Manag.*, 82, pp. 268-282. doi: 10.1016/j.enconman.2014.03.032
- [23] Leou, R. and Lu, C. (2013). Impact Analysis of Electric Vehicles on distributions

- systems considering uncertainties. En *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Viena, pp. 2063-2068. doi: 10.1109/iecon.2013.6699449
- [24] Masoum, A. S., Deilami, S., Moses, P. S. and Abu-Siada, A. (2010). Impacts of battery charging rates of plug-in electric vehicle on smart grid distribution systems. En *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.*, Gothenburg, pp. 1-6. doi: 10.1109/isgteurope.2010.5638981
- [25] Moses, P. S., Deilami, S., Masoum, A. S. and Masoum, M. A. S. (2010). Power quality of smart grids with plug-in electric vehicles considering battery charging profile. En *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur. ISGT Eur.*, Gothenburg, pp. 1-7. doi: 10.1109/isgteurope.2010.5638983
- [26] Trovão, J. and Pereirinha, P. (2011). Electric vehicles chargers characterization: Load demand and harmonic distortion. En *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Lisbon, pp. 1-7. doi: 10.1109/epqu.2011.6128871
- [27] Rutherford, M. J. and Yousefzadeh, V. (2011). The impact of Electric Vehicle battery charging on distribution transformers. En *2011 Twenty-Sixth Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Fort Worth, Tx, pp. 396-400. doi: 10.1109/apec.2011.5744627
- [28] Yilmaz, M. and Krein, P. T. (2013). Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(12), pp. 5673-5689. doi: 10.1109/tpel.2012.2227500
- [29] Drude L., L., Pereira-Junior, C. and Rüter, R. (2014). Photovoltaics (PV) and electric vehicle-to-grid (V2G) strategies for peak demand reduction in urban regions in Brazil in a smart grid environment. *Renew. Energy*, 68, pp. 443-451. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.049
- [30] López, M. A., De la Torre, S., Martín, S. and Aguado, J. A. (2015). Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 64, pp. 689-698. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.07.065
- [31] Solteiro, I. (2013). Smart Transformers. En *Technology Days South Africa*. pp. 24.
- [32] Rao, N. M., Narayanan, R., Vasudevamurthy, B. R. and Das, S. K. (2013). Performance requirements of present-day distribution transformers for Smart Grid. *2013 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia, ISGT Asia 2013*, pp. 1-6. doi: 10.1109/isgt-asia.2013.6698769
- [33] Quevedo, J. O., Giacomini, J. C., Beltrame, R. C., Cazakevicius, F. E., Rech, C., Schuch, L., Marchesan, T. B., De Campos, M., Sausen, P. S. and Kinas, J. R. (2013). Smart distribution transformer applied to Smart Grids. En *2013 Brazilian Power Electron. Conf.*, Gramado, pp. 1046-1053. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785244
- [34] Hipszki, G., Schmid, R., Maier, R., Handt, K. and Buchgraber, G. (2011). Distribution transformer - Ready for the smart grid. En *21 International Conf. Electr. Distrib.*, Frankfurt, pp. 6-9.
- [35] Körner, C., Hennig, M., Schmid, R. and Handt, K. (2012). Gaining experience with a

- regulated distribution transformer in a smart grid environment. *CIREC 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid*, pp. 4-7. doi: 10.1049/cp.2012.0782
- [36] Kadurek, P., Cobben, J. F. G. and Kling, W. L. (2010). Smart MV/LV transformer for future grids. En *Speedam 2010 - Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1700-1705. doi: 10.1109/speedam.2010.5545067
- [37] Kadurek, P., Cobben, J. F. G. and Kling, W. L. (2011). Smart transformer for mitigation of voltage fluctuations in MV networks. En *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, Rome, pp. 1-4. doi: 10.1109/eeeic.2011.5874838
- [38] Liu, X., Aichhorn, A., Liu, L. and Li, H. (2012). Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration. *IEEE Trans. Smart Grid*, 3(2), pp. 897-906. doi: 10.1109/tsg.2011.2177501
- [39] Masoum, M. S., Deilami, S. and Islam, S. (2010). Mitigation of harmonics in smart grids with high penetration of plug-in electric vehicles. En *IEEE PES Gen. Meet.*, Minneapolis, MN, pp. 1-6. doi: 10.1109/pes.2010.5589970
- [40] Byrne-Finley, J., Johnson, B. K., Hess, H. and Xia, Y. (2011). Harmonic distortion mitigation for electric vehicle recharging scheme. En *North American Power Symposium (NAPS)*, Boston, MA, pp. 1-7. doi: 10.1109/NAPS.2011.6025174
- [41] Escarria, H. (2012). *Transformadores para aplicaciones especiales. Presencia de armónicos factor K*. Slide ABB Group. Santiago Chile, pp. 1-68.
- [42] Aeloiza, E. C., Enjeti, P. N., Moran, L. A. and Pitel, I. (2003). Next generation distribution transformer: to address power quality for critical loads. En *IEEE 34th Annu. Conf. Power Electron. Spec. 2003. PESC '03*, pp. 1266-1271, 3. doi: 10.1109/pesc.2003.1216771
- [43] Salenbien, R., Büscher, J., Driesen, J. and Member, S. (2014). Apartment Building Electricity System Impact of Operational Electric Vehicle Charging Strategies. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(1), pp. 264-272. doi: 10.1109/tste.2013.2281463
- [44] Zheng, Y., Dong, Z., Xu, Y., Meng, K., Zhao, J. and Qiu, J. (2014). Electric Vehicle Battery Charging/Swap Stations in Distribution Systems: Comparison Study and Optimal Planning. *IEEE Trans. Power Syst.*, 29(1), pp. 221-229. doi: 10.1109/tpwrs.2013.2278852
- [45] Wang, H., Song, Q., Zhang, L., Wen, F. and Huang, J. (2012). Load characteristics of electric vehicles in charging and discharging states and impacts on distribution systems. En *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012)*, Hangzhou, pp. 1-7. doi: 10.1049/cp.2012.1837
- [46] Ma, T., Mohamed, A. and Mohammed, O. (2012). Optimal charging of plug-in electric vehicles for a car park infrastructure. En *2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Las Vegas, NV, pp. 1-8. doi: 10.1109/ias.2012.6374035