

Análisis técnico-económico de los efectos del desbalance en redes de distribución con inclusión masiva de generación distribuida

Technical-economic analysis of the effects of unbalance in distribution networks with massive inclusion of distributed generation

D.E. Bedoya-Bedoya¹, C. Arango-Lemoine², S.X. Carvajal-Quintero³

¹ E3P, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales, Colombia. Email: daedoyabe@unal.edu.co

² E3P, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales, Colombia. Email: carangol@unal.edu.co

³ E3P, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales, Colombia. Email: sxcarvajalq@unal.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

En los sistemas eléctricos trifásicos, debido principalmente a la presencia de cargas o generadores monofásicos, los desbalances en tensiones y corrientes siempre existen. Sin embargo, en el análisis de los sistemas de potencia en general, estos desbalances no son tenidos en cuenta dado que en la mayoría de los casos son insignificantes. No obstante, en los casos que los desbalances son notorios, tienen gran impacto en la calidad de la potencia y pueden llegar a producir problemas en la operación de los sistemas y generar sobrecostos. En este artículo se exponen algunos de los principales efectos relacionados con los desbalances en las redes de distribución, los cuales son evaluados mediante la simulación de un sistema de distribución con características colombianas.

PALABRAS CLAVE: Generación distribuida, Sistemas de distribución, Desbalance, Cargas monofásicas.

ABSTRACT

In three-phase electrical systems, due mainly to the presence of single-phase loads or generators, the imbalances in voltages and currents always exist. However, in the analysis of power systems in general, these imbalances are not taken into account since in most cases they are insignificant. In cases where the imbalances are notorious, they have a great impact on the quality of the power and can lead to problems in the operation of the systems and generate overloads. This paper presents some of the main effects related to the imbalances in distribution networks, which are evaluated through the simulation of a distribution system with Colombian characteristics.

KEYWORDS: Distributed generation, Distribution systems, Unbalance, Single-phase loads.

1. INTRODUCCIÓN

Existe un creciente interés en el mundo por el uso de fuentes de energía no convencionales, impulsando el desarrollo de tecnologías de generación a pequeña escala cerca a los centros de consumo, principalmente de carácter renovable [1]. En este sentido, la integración

eficiente de Generación Distribuida (GD) en las redes de distribución es un tema de interés porque aporta tanto beneficios ambientales como técnicos y económicos relacionados con el aumento de la confiabilidad del sistema, la mejora en la calidad del servicio y la reducción de pérdidas eléctricas [2]–[4].

En Colombia han proliferado proyectos que involucran generación no convencional a pequeña escala, los cuales se han visto impulsados con la entrada en vigencia de la Ley 1715 de 2014, que promueve la difusión e integración de fuentes de energía no convencionales [5]. Sin embargo, las redes de distribución existentes fueron diseñadas para operar con flujos unidireccionales y sin la conexión masiva de recursos energéticos distribuidos [6], por lo que la inclusión de estos recursos al sistema eléctrico es actualmente un reto en la investigación nacional.

En las redes de distribución trifásicas el desbalance se destaca como una característica distintiva [7] con el potencial de afectar la operación del sistema e influir en la determinación de esquemas de conexión de nuevos agentes. Los efectos de este desbalance adquieren mayor complejidad con la conexión de GD, creando retos en el desarrollo de esquemas de protección y acelerando la necesidad de modernización de la infraestructura eléctrica, lo que conlleva a un aumento en los costos de expansión debidos al sobredimensionamiento de subestaciones y conductores.

En este artículo se realiza una conceptualización de los problemas técnicos asociados al desbalance en las redes de distribución, para ello en la segunda sección se realiza una revisión bibliográfica de los problemas y desafíos relacionados con el desbalance, en especial aquellos relacionados con la integración de generación distribuida; posteriormente, la tercera sección presenta un caso de estudio que se utilizará para evaluar los efectos del desbalance de las cargas y el generado por la entrada de generación solar monofásica en el sistema, luego, la sección cuatro presenta los resultados y análisis obtenidos del estudio de caso y finalmente la sección cinco presenta las conclusiones.

2. DESBALANCE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

El desbalance es definido por la Comisión Electrotécnica Internacional, como aquella condición en la que los módulos de la componente fundamental de las tensiones y/o los ángulos de desfase entre estas no son iguales [8]. Esta definición es adoptada en Colombia por medio de la Resolución CREG 065 de 2012 [9].

Según la norma IEC 61000-4-30 [3], el factor de desbalance de tensión (Voltage Unbalance Factor - VUF) se determina mediante la relación entre los módulos de las componentes de secuencia negativa y positiva de la misma. A partir de esta definición, el grado de desbalance suele expresarse como un porcentaje que se calcula mediante (1).

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} * 100 \quad (1)$$

Y las componentes de secuencia se obtienen a partir de los fasores de tensiones de línea mediante la transformación de Fortescue expuesta en (2).

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{ab} \\ \bar{V}_{bc} \\ \bar{V}_{ca} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Tradicionalmente, se sabe que las redes de distribución no son balanceadas [10]; sin embargo, no se le presta especial a los efectos del desbalance, puesto que el porcentaje suele ser pequeño. En los sistemas de distribución convencionales los desbalances se deben principalmente a la presencia de cargas monofásicas, cuyo comportamiento variante en el tiempo puede hacer que estos sean mayores. Además, los desbalances son más notorios entre más cerca se está de las cargas (especialmente nivel de baja tensión) [11].

A pesar de que los desbalances de tensión son pequeños en la mayoría de los casos, un pequeño desbalance de tensión implica un desbalance de corriente mucho mayor. Por ejemplo, en [12] se afirma que un desbalance de tensión del 1% puede producir un desequilibrio más del 6 al 10% en las corrientes en el sistema analizado.

A medida que el análisis de los sistemas de distribución se hace más complejo, es cada vez más importante tomar en cuenta el desbalance del sistema. Algunos de los efectos de este desbalance, son las corrientes de secuencia negativa que provocan problemas en los motores, relacionados con las vibraciones, el ruido y la alta temperatura, las cuales a su vez provocan corrientes de secuencia cero, las cuales pueden causar un mal funcionamiento de las protecciones, incrementos en las pérdidas del sistema, disminución de la capacidad de transporte y un incremento en el acoplamiento entre líneas paralelas y alimentadores [13].

Adicionalmente, las corrientes de carga desequilibradas pueden afectar negativamente al rendimiento de los controladores descentralizados, dando como resultado un desequilibrio de tensión y corriente. Además, estos desbalances pueden llevar a los mecanismos convencionales de limitación de corriente a un mal funcionamiento, dando lugar a sobre-corrientes o corrientes armónicas circulantes [14].

Por otro lado, las unidades de generación se ven afectadas por la calidad de la tensión, de la misma manera que

cualquier otro equipo. El impacto de las perturbaciones de voltaje incluye, entre otras, reducción de la vida útil de los equipos, accionamientos erróneos de los mismos y aumento de la probabilidad de ocurrencia de daños [15].

Además, la carga fuertemente desequilibrada aumenta el riesgo de sobretensiones debido a la generación distribuida y aumenta el riesgo de sub-tensiones debido a la alta demanda [15].

2.1. Inclusión de generación distribuida

Por definición, la DG es de tamaño limitado (generalmente 10 MW o menos) y puede ser conectada en la subestación, un alimentador de distribución o en el nivel de carga del cliente [16]. En cualquiera de estos casos, su integración crea nuevos retos para el sistema de potencia, especialmente cuando se trata de generación proveniente de fuentes intermitentes [12].

La gravedad de los posibles problemas en la red depende principalmente del tamaño relativo y la ubicación de la DG, las cargas y de la topología del alimentador de distribución [17]. En general, con baja penetración de DG en un sistema de distribución no se presentan problemas significativos, pero comienzan a cobrar importancia a medida que los niveles de penetración aumentan [12], [18]–[20] especialmente porque los sistemas de distribución convencionales no contemplan en su diseño la inclusión de generadores en sus redes [19].

Así pues, la DG puede tener impactos positivos en la red, pero también impactos negativos si la integración no se gestiona adecuadamente [19]. Por ejemplo, la generación distribuida fotovoltaica conectada en el lado de la demanda trae beneficios tales como la reducción de pérdidas técnicas y mejora en los perfiles de tensión en el alimentador; sin embargo, esta es una afirmación acertada siempre y cuando la relación entre la generación y la demanda permita que el flujo de potencia conserve la dirección convencional desde la subestación hacia la carga [17].

La conexión de pequeñas cantidades de generación distribuida tendrá principalmente efectos locales, mientras que su introducción masiva tendrá además efectos globales (es decir, incluyendo niveles de sub-transmisión y transmisión). Los generadores

monofásicos de tamaño relativamente grande, o la instalación de gran cantidad de pequeños generadores monofásicos pueden conllevar a aumentos en el desequilibrio de tensión. Así que la presencia de generadores monofásicos puede producir a un aumento del desequilibrio en redes de baja tensión [15].

No obstante, el tipo de conexión (monofásico o trifásico) de una fuente de generación, depende en gran medida del tamaño y la ubicación del aprovechamiento energético. En el caso de la generación solar fotovoltaica, esta puede clasificarse según su capacidad en tres tipos [12], [20]: escala de distribución¹, mediana escala y pequeña escala.

La escala de distribución la conforman plantas con capacidad entre 1 y 10MW y pueden conectarse a alimentadores convencionales de distribución en ciertos casos, pero generalmente requieren alimentadores dedicados y su conexión se hace a media tensión. Estas instalaciones son trifásicas y requieren uno o más transformadores de interconexión. Además, generalmente, deben incluir varios módulos inversores electrónicos y estar equipadas con esquemas internos y externos de protección, como protección de sobre-corriente rápida, protección de baja y sobretensión, protección de frecuencia y esquemas de protección anti-isla [20].

Las capacidades de mediana escala están entre 10 y 1000 kW e incluyen instalaciones en conjuntos residenciales o edificios. Las plantas más pequeñas (con capacidad comparable con la carga) pueden utilizar los transformadores existentes del cliente, posiblemente con cambios menores en la interconexión; en cambio las plantas más grandes pueden requerir transformadores de interconexión separados y tener instalaciones similares a las de mayor escala [20].

La pequeña escala la conforman capacidades de hasta 10kW. Esta categoría incluye principalmente unidades de generación fotovoltaica en azoteas, en las residencias de los clientes o conectadas a las redes de baja tensión. Las instalaciones típicas no requieren transformador de interconexión, son monofásicas y pueden sólo ayudar a satisfacer la demanda del cliente o inyectar potencia a la red [12]. Para reducir la complejidad en los estudios, muchos operadores de red agrupan las unidades

¹ La escala de distribución se refiere a las centrales de generación del operador del sistema y que se conectan directamente a las subestaciones primarias mediante alimentadores dedicados a media tensión.

fotovoltaicas instaladas en un circuito secundario común y los representan por una única unidad agregada [20].

Sin embargo, las unidades de generación solar fotovoltaica por encima de un nivel de potencia de entre 5 y 10 kW, típicamente, deben tener una salida trifásica equilibrada [19].

En el caso de las unidades a pequeña escala monofásicas representadas como una unidad agregada, para una operación técnicamente adecuada se requieren controles de generación (ya sean distribuidos o centralizados dentro de la red secundaria) para limitar no solo la cantidad de potencia total para no incurrir en aumentos de tensión excesivos, sino también para controlar las salidas de potencia de las unidades individuales de manera que no se genere un desequilibrio de tensión demasiado grande. Sin embargo, esta medida restringe el completo aprovechamiento del potencial de los sistemas solares fotovoltaicos, limitando su contribución a la producción sostenible de energía eléctrica [12], [19].

La generación monofásica instalada de manera desproporcionada en una sola fase, puede causar desequilibrios severos en las redes de distribución, conduciendo a daños en controladores o transformadores. Esto es debido a que el desequilibrio de tensión, tiene un impacto negativo en generadores o motores trifásicos distribuidos, tales como el aumento de la temperatura en los rotores, el ruido y la vibración, lo que puede llevar a deteriorar notablemente el equipo [19]. Por esto, es importante resaltar que el desbalance puede aumentar, con el incremento de la generación solar fotovoltaica [12] y que los desbalances son más notorios entre más cerca se esté de las cargas (generalmente nivel de baja tensión), produciendo incluso corrientes elevadas que las de las fases [11].

3. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a un sistema de distribución que cuenta con cuatro plantas de generación hidráulica de 720 kW, dos plantas de generación solar fotovoltaica de 300 kW y una de 100 kW.

Los generadores hidráulicos considerados están diseñados con salida trifásica equilibrada. Las plantas fotovoltaicas están conectadas a los nodos de R3, R7 y C5, siendo esta última la agregación de unidades

monofásicas que suma un total de 100 kW, mientras las demás se consideran trifásicas equilibradas.

El sistema cuenta con cargas de tipo residencial (R), industrial (I) y comercial (C) de naturaleza desequilibrada. La mayoría de estas agregaciones de carga se considera con desequilibrios imperceptibles, pero algunas se han definido con desequilibrios mayores a fin de visualizar los efectos sobre las tensiones y corrientes en el sistema.

La figura 1 muestra el diagrama unifilar del sistema analizado.

4. RESULTADOS

Los resultados de la simulación del sistema de distribución original (sin generación fotovoltaica), operando en estado estable, se presentan inicialmente. Como cargas con desequilibrios notables se tienen las que se presentan en la Tabla 1. Las demás cargas tienen un consumo equilibrado entre sus tres fases.

Tabla 1. Desbalances notables en las cargas.

Carga	Desbalance (%)	
	Tensiones	Corrientes
R5	0,5	17,82
C3	0,4	13,6
C5	0,3	11,3
C6	0,2	7,8

Bajo estas condiciones, la corriente en la línea anterior a la carga C3 presenta un desbalance de corrientes del 5.5%, mientras que la línea anterior a R3 4.8%. Por su parte, el tramo anterior a C5 presenta un desbalance de corrientes de 6.9% mientras que el tramo inicial del mismo alimentador presenta 4.5%.

Lo anterior muestra que agregación de mayor cantidad de cargas hace que los desbalances sean menores, tanto por la disminución de la posibilidad de que las cargas se encuentren desbalanceadas siguiendo un mismo patrón (conectadas a las mismas fases) como por la presencia de cargas equilibradas o menos desequilibradas aguas abajo. Esto implica que, aún con cargas altamente desequilibradas, los distintos tramos de una red de distribución pueden presentar desbalances muy bajos y que entre más lejos se encuentre de las cargas (mayores niveles de tensión) menores serán los desbalances.

No obstante, es importante tener en cuenta que la presencia de cargas monofásicas o desequilibradas puede deteriorar significativamente la calidad de la potencia en puntos del sistema más cercanos, generando desbalances

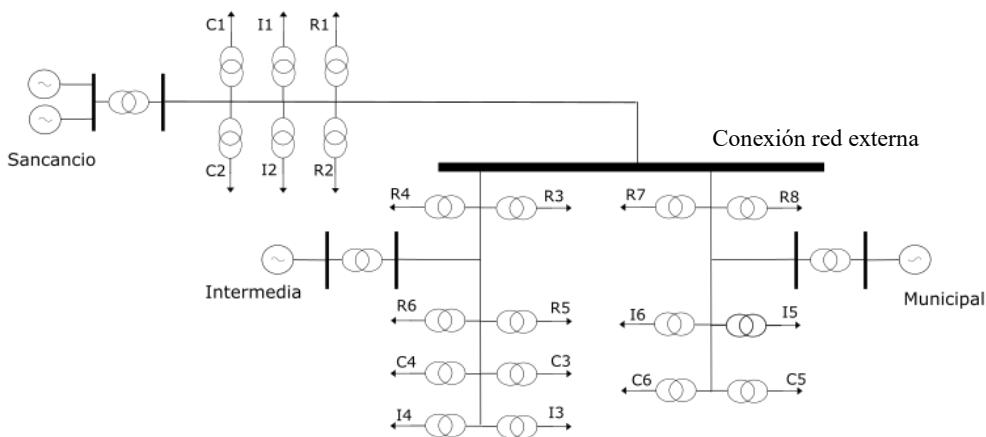


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema de distribución bajo estudio. **Fuente.** Elaboración propia.

que conlleven a los efectos indeseados presentados en la sección 2 de este artículo. Esto puede conllevar a aumentos de costos tanto por posibles penalizaciones como por el deterioro o fallo de equipos o la necesidad de expansión para mantener la seguridad en el sistema operando con estos desbalances.

Finalmente, la simulación del mismo sistema, ahora con la conexión de los generadores fotovoltaicos, modifica los desbalances en la red. Por ejemplo, la corriente en el tramo anterior a la carga C3 ahora presenta un desbalance de corrientes del 7.3% y el tramo anterior a R3 6.2%. Por otro lado, el tramo anterior a C5 presenta un desbalance de corrientes de 6.9% mientras que el tramo inicial del mismo alimentador presenta 2.5%.

Esto demuestra que la conexión de generación distribuida puede aumentar la gravedad de los desbalances en las redes de distribución, aún si tiene salida trifásica equilibrada, debido por ejemplo a la disminución del flujo de potencia haciendo menos estrechos los márgenes de desequilibrio. Sin embargo, la conexión de generación distribuida monofásica puede ayudar a reducir los desbalances en los sistemas eléctricos.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten evidenciar el alto potencial de la generación distribuida para, en muchos casos, mejorar la calidad de la potencia en los sistemas eléctricos, mejorando así su operación. No obstante, existe un gran riesgo de desmejorar los índices de rendimiento de los sistemas de potencia si la conexión u operación de los generadores distribuidos no se analiza profundamente.

Los desbalances en los sistemas de distribución generalmente son imperceptibles, pero si alcanzan porcentajes considerables, pueden tener impactos negativos en la calidad de la potencia y con ello aumentar costos de muchas maneras, tales como penalizaciones y aumentos de costos de expansión.

Por su parte, la generación distribuida monofásica o desequilibrada tiene el potencial de mejorar los desbalances en las redes de distribución, siempre y cuando se controle adecuadamente, trayendo así múltiples beneficios técnicos y económicos.

6. AGRADECIMIENTOS

La investigación de este trabajo fue apoyada por la Universidad Nacional de Colombia, a través del Departamento de Investigación de Manizales – DIMA, como parte del proyecto *“Diseño de estrategias operativas para la integración eficiente de recursos energéticos distribuidos en las redes de distribución en Colombia”* código 35911, el cual es desarrollado por el grupo de investigación *Environmental Energy and Education Policy – E3P*.

7. REFERENCIAS

- [1] P. Palensky and D. Dietrich, “Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, 2011.
- [2] F. Adinolfi, G. M. Burt, P. Crolla, F. D’Agostino, M. Saviozzi, and F. Silvestro, “Distributed Energy Resources Management in a Low-Voltage Test Facility,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2593–2603, Apr.

- 2015.
- [3] M. Afkousi-Paqaleh, A. Abbaspour-Tehrani Fard, M. Rashidinejad, and K. Y. Lee, "Optimal placement and sizing of distributed resources for congestion management considering cost/benefit analysis," *IEEE PES Gen. Meet. PES 2010*, pp. 1–7, 2010.
- [4] J. A. Peças Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, and N. Jenkins, "Integrating distributed generation into electric power systems : A review of drivers , challenges and opportunities," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 2007, pp. 1189–1203, 2010.
- [5] C. de Colombia, "Ley 1715 de 2014 por la cual se Regula la Integración de las Energías Renovables no Convencionales al Sistema Energético Nacional."
- [6] F. P. Sioshansi, Ed., *Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy*. Waltham: Academic Press, 2011.
- [7] S. Khushalani, J. M. Solanki, and N. N. Schulz, "Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 1019–1025, 2007.
- [8] International Electrotechnical Commission, *IEC 60050(161)*. Tech. Rep., 1990.
- [9] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, *Resolución 065 de 2012*. 2012.
- [10] S. M. Brahma and adly A. Gigis, "Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With High Penetration of Distributed Generation," *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 19, 2004.
- [11] P. D. F. Ferreira, P. M. S. Carvalho, L. A. F. M. Ferreira, and M. D. Ilic, "Distributed energy resources integration challenges in low-voltage networks: Voltage control limitations and risk of cascading," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 82–88, 2013.
- [12] M. Karimi, H. Mokhlis, K. Naidu, S. Uddin, and A. H. A. Bakar, "Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 594–605, 2016.
- [13] A. Jara-Morales, "Estudio de Flujos de Potencia y de Cortocircuito en Sistemas de Distribución de Media Tensión Incorporando Generación Distribuida," Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [14] M. S. Golsorkhi and D. D. C. Lu, "A Decentralized Control Method for Islanded Microgrids under Unbalanced Conditions," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 1112–1121, 2016.
- [15] M. Bollen and F. Hassan, *Integration of distributed generation in the power system*. 2014.
- [16] I. S. Bae, J. O. Kim, J. C. Kim, and C. Singh, "Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 287–292, 2004.
- [17] E. Liu and J. Bebic, "Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration Photovoltaics," *Natl. Renew. Energy Lab.*, no. February, 2008.
- [18] J. C. Gomez, J. Vaschetti, and C. V. Coyos, "Generación Distribuida: Tipo de Conexión del Transformador de Interconexión," *Cigre*, no. January, 2009.
- [19] R. Passey, T. Spooner, I. MacGill, M. Watt, and K. Syngellakis, "The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 6280–6290, 2011.
- [20] F. Katiraei and J. R. Aguero, "Solar PV Integration Challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.