

Variación de los factores de desbalance de tensión y corriente en redes de distribución de MT por la generación distribuida

Miguel Piumetto, Juan Gomez Targarona,
Jorge Vaschetti
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y
Naturales, Universidad Nacional de Córdoba |
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional
de Río Cuarto | Universidad Tecnológica
Nacional, Facultad Regional de Córdoba
mpiumetto@efn.uncor.edu



Palabras clave: Generación distribuida, factores de desbalance, desclasificación de la red, transferencia del desbalance, modelado en ATP/EMTP

Resumen

Un sistema de Distribución de Media Tensión (MT) perfectamente balanceado tanto en tensión como en corriente no existe, lo que da origen al desbalance de tensión y de corriente, eventos permanentes que afectan a la calidad de potencia, producen ineficiencia en la red, que no deben subestimarse por las potencias involucradas, que son superiores a las necesarias y que producen efectos no deseados en las cargas sensibles, impactan en el diseño de las protecciones y provocan alteraciones en la vida de los equipos. En el manejo de las redes de distribución, el desbalance es un parámetro de la calidad de potencia pocas veces atendido, monitoreado y/o controlado.

Se definen los factores de desbalance de tensión y corriente en los niveles de media y baja tensión, el factor de asimetría total, el coeficiente de desclasificación y el coeficiente de transferencia de desbalance. Este trabajo presenta un estudio y análisis detallado de como varían los factores de desbalance por la inserción de la Generación Distribuida (GD) en una red de distribución de media tensión, teniendo en cuenta la naturaleza de las máquinas generadoras -síncronas o asíncronas-, el índice de penetración y el de dispersión de la GD. Se trabajó con un sistema real de distribución de la empresa EPEC de la Provincia de Córdoba, Argentina, modelizando el comportamiento con el software ATP/EMTP, calculando los factores de asimetría a partir de la potencia compleja y cuantificando el comportamiento eficiente de la red. Se investigó la variación de los distintos indicadores con generadores síncronos y asíncronos y con diferentes estados de carga y niveles de penetración de la GD.

Los resultados obtenidos muestran que: el efecto que produce la GD es positivo en cuanto a disminuir y/o controlar el desbalance en la red y que existen diferencias de acuerdo al tipo de generador, llegando a porcentaje importantes de reducción (hasta un 50% según las variables), que el desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistemas eléctricos de potencia y que el coeficiente de desclasificación es un buen indicador del comportamiento energético.

Introducción

El desbalance de una variable trifásica es una condición en la que las tres fases presentan diferencias en el módulo y/o desplazamiento angular entre fases, distinto de 120 grados eléctricos. La variable trifásica indicada de manera genérica puede ser indistintamente, la tensión fase-neutro, la tensión de línea o la corriente de un sistema trifásico [1] [2].

En los sistemas de potencia el desbalance de tensión y corriente es una ineficiencia importante que no debe subestimarse dado que las potencias involucradas son superiores a la necesaria en un sistema homólogo simétrico y aunque el tema no es esencialmente nuevo, en la literatura internacional se han propuestos diferentes estudios, metodologías y aplicaciones para el abordaje y soluciones en aspectos del tratamiento del desbalance de tensiones mediante la conexión de generadores distribuidos como: el control de la tensión [3], métodos de emplazamiento de GD en sistemas de distribución desbalanceados [4], análisis del desplazamiento del neutro y desbalance de tensiones con unidades de GD [5], análisis del comportamiento del factor complejo de desbalance [6] o teniendo en cuenta aspectos normativos y característicos de la GD [7] pero no se aborda la integración de la GD para la mitigación del desbalance en redes de media tensión.

En general el efecto del desbalance se resume en la aparición de componentes de secuencia inversa y homopolar que dan como resultado pérdidas adicionales de potencia y energía, calentamiento adicional de máquinas que limita la capacidad de carga nominal, reducción en el transporte de potencia en los sistemas de distribución y propagación del desbalance a otros nodos de conexión de la red [8].

Este trabajo presenta un estudio y análisis detallado de como varían los factores de desbalance por la inserción de la GD en una red de distribución de media tensión, teniendo en cuenta el índice de penetración y el de dispersión de la GD. Se trabajó con un sistema real de distribución, calculando los factores de asimetría a partir de la potencia compleja y cuantificando el comportamiento eficiente de la red. Se investigó la variación de los distintos indicadores como los factores de desbalance de tensión y corriente en los niveles de media y baja tensión, el factor de asimetría, el coeficiente de desclasificación y el coeficiente de transferencia de desbalance en diferentes estados de carga y penetración de la GD.

Definiciones y ecuaciones

De acuerdo a lo expresado en la norma IEEE 1159 -1995 [9] el desbalance de tensión se define, utilizando el método de las componentes simétricas, como la magnitud de la relación entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva, expresado en por ciento. Es claro entonces que para la determinación del grado de desbalance de un sistema se debe trabajar con las componentes de secuencia del sistema, para lo cual se deben conocer los módulos y ángulos de desfase de las componentes de fase.

De acuerdo a las normativas IEC e IEEE, el factor de desbalance de tensión (FDV) se expresa como (1):

$$FDV = (V_2/V_1) \times 100 \quad (1)$$

De acuerdo al Teorema de Fortescue y tomando los desarrollos matemáticos de los estudios

[10] [11], tenemos las siguientes definiciones para el estudio, la definición de los coeficientes complejos como:

$$Kv2 = (V_2/V_1) \quad (2)$$

$$Ki2 = (I_2^*/I_1^*) \quad (3)$$

$$Kv0 = (V_0/V_1) \quad (4)$$

$$Ki0 = (I_0^*/I_1^*) \quad (5)$$

Con los coeficientes complejos la potencia compleja quedará definida como:

$$S_{3\phi} = 3 \times V_1 \times I_1^* (1 + Kv2 * Ki2 + Kv0 * Ki0) \quad (6)$$

Entonces se define el factor de asimetría total (7) y el de desclasificación (8) como:

$$KA = Kv2 * Ki2 + Kv0 * Ki0 \quad (7)$$

$$D = 1 - KA \quad (8)$$

Tomando la definición del coeficiente de transferencia definido por IEC/TR 61000-3-13 [12] y en el estudio [13], se define como:

$$Tus - ds = FDVds / FDVus \quad (9)$$

dónde:

- ▶ FDVds es el nivel de tensión hacia donde se propaga el desbalance
- ▶ FDVus es el nivel de tensión en donde está la fuente de desbalance

Conceptualmente este coeficiente (9) determina la emisión global de propagación de la medida de desbalance, de un sistema de AT (aguas arriba) hacia un sub-sistema aguas abajo de media o baja tensión; por lo que definimos en este trabajo el coeficiente transferencia de desbalance como la razón entre el desbalance del nivel de tensión de media tensión con respecto al de baja, en donde se origina y se encuentra la fuente de desbalance, al cual definimos como Tbt-mt.

Nivel de penetración de la GD

Nivel de carga del sistema en %	GD máxima y en todos los usuarios singulares	Relación de 3:1 de la carga máxima en usuarios singulares	Relación de 1:1 de la carga máxima en usuarios singulares	GD resto alimentación	Relación de 0,25:1 de la carga máxima en usuario singulares	Sin GD
	5	4	3	2	1	0
25%	288%	219%	73%	69%	18%	0%
50%	144%	110%	37%	35%	9%	0%
100%	72%	55%	19%	18%	5%	0%
125%	58%	44%	15%	14%	4%	0%

Tabla 1: Nivel de carga y penetración de la GD

Sistema de media tensión en ATP/EMTP

El sistema eléctrico en estudio abastece la zona de Río II y Pilar de la Provincia de Córdoba, Argentina, corresponde a la empresa EPEC (Empresa Provincial de Energía de Córdoba), y posee demandas agroindustriales, comerciales y residenciales como se aprecia en la Figura A1 del ANEXO. El sistema seleccionado comprende una línea de 66 kV, una barra de 13,2 kV en Río II y dos alimentadores de 13,2 kV, denominados D3 y D4 como se observa en diagrama unifilar. La línea de AT es de conductor de 170 mm² de Al configuración triángulo, mientras que el tendido en 13,2 kV es con conductores de 50 mm² de Al con configuración plana. En el esquema radial, se indican los valores de carga máxima no simultáneos registrados durante el año 2009 en cada subestación transformadora (SET), se muestran los clientes singulares, industrias y distribuidoras.

Las hipótesis de estudio se basaron en considerar situaciones con GD [14] [15] [7], se comparan los resultados con el sistema radial original sin GD, para ello se fijaron para la GD las siguientes pautas: la GD se inyectará de manera fija y estacionaria en los clientes singulares, los cuales generan la potencia que consumen de acuerdo a su registro máximo. Los generadores seleccionados son síncronos (con fuente de energía fósil) y asíncronos (con fuente renovable eólica), la generación se efectúa en BT-380 V. La forma de conexión, es a través de transformadores elevadores de tensión, de acuerdo a los resultados [16]. Se seleccionan los clientes TOLEDO, TOLII y la Barra Distribuidora para analizar los registros en media y baja tensión.

Se fijó el criterio de que la GD inyectará valores de potencia activa como: $\frac{1}{4}$ de la carga

máxima, igual valor de la carga máxima, 3 veces la carga máxima, potencia activa igual a la carga en el resto de los clientes singulares y finalmente con todos los generadores simultáneos. En todos los casos se analiza con las configuraciones de Radial sin GD y Radial con GD, vemos en Tabla 1 un resumen de las situaciones planteadas.

Se plantearon las siguientes variables: a) el estado de carga del sistema es con el 25%, 50%, 100% y 125% del valor de carga máxima registrada no simultánea, y b) el Índice de penetración que es $I_p = \text{Potencias inyectadas/Carga total}$, además se consideró el Índice de dispersión $I_d = \text{Barras con GD/Total de barras con carga}$.

Se realizó el estudio de simulación con el software ATP/EMTP para una ventana de 500 ms. Se ubicaron dispositivos de medición de potencia, energía, tensión y corriente para el registro de valores instantáneos y máximos, procesando las magnitudes fasoriales a componentes simétricas mediante el uso del software MATLAB.

Para la fuente de desbalance, como las cargas han sido modeladas con impedancias constantes en cada uno de los clientes y SET, se considera que la potencia total en situación de desbalance sigue siendo igual al sistema balanceado y equilibrado, modificando solamente los módulos de las impedancias en +/- 50% en dos fases del sistema y manteniendo el ángulo de las impedancias igual.

Modelado de generadores

Las tecnologías asociadas a las potencias típicas actualmente en GD, están detalladas en la Tabla 2.

En el modelado de la GD se toman dos situaciones, una con turbinas eólicas (con generadores asíncronos) como fuente renovable tomado

Tecnología	Tamaño típico disponible
Combustibles fósiles	
Turbina a gas de ciclo combinado	35-400 MW
Motores combustión interna	5 kW-10 MW
Turbinas de combustión	1-250 MW
Micro-turbinas	35 kW-1 MW
Renovables	
Pequeñas hidro	1-100 MW
Micro hidro	25 kW-1 MW
Turbinas eólicas	200 W-3 MW
Fotovoltaicas	20 W-100 kW
Solar térmica	1 W-80 MW
Biomasa	100 kW-20 MW
Celda de combustible	200 kW-5 MW
Geotérmica	5-100 MW
Energía del océano	100 kW-1 MW
Motor stirling	2-10 kW

Tabla 2. Tipo de Tecnología de la GD y potencias disponibles

del estudio [17] y el otro tipo de GD es con motores de combustión interna (con generadores síncronos) tomado de [10].

La composición de la granja básica sigue los lineamientos fijados por el Western Electricity Coordinating Council [18], en la Figura 1 se presenta un diagrama unifilar detallado. De los esquemas básicos de generación eólica [19], se ha elegido simular por su simplicidad el de un generador asíncrono con rotor del tipo jaula de ardilla y su correspondiente compensación capacitiva. El componente del ATPDraw que simula al generador de inducción es el IM56A (*Induction Machine Squirrel Cage Rotor*) desarrollado por TEPCO de Japón (*Tokio Electric Power Company*), los detalles analíticos del modelo se encuentran descritos en el Theory Book [20][21] cuyo diagrama de simulación para el estudio se puede apreciar en Figura A2 del ANEXO.

Para la GD con fuente de combustibles fósiles, se toma el esquema planteado por ENARSA [22] del proyecto de GD en el país con generadores síncronos que en el ATPDraw se modeliza mediante el SM59_NC - Synchronous Machine, estado estacionario balanceado sin saturación tomado de RuleBook Cap VIII [20][21] apreciándose en Figura A3 del Anexo su modelado. La parametrización de los transformadores de acoplamiento se realiza con la subrutina BCTRAN del ATPDraw y sus características de conexionado están de acuerdo al estudio [16].

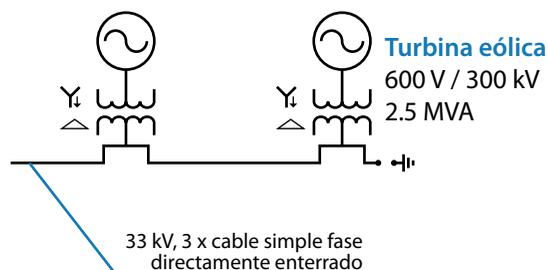


Figura 1. Diagrama unifilar de la planta de generación eólica

Resultados

El análisis se centró en la toma de datos, procesamiento y clasificación de tres puntos en el sistema de MT, dichos puntos son: a) La barra distribuidora de 13,2 Kv de Río II b) En el usuario de la Cooperativa de Toledo en el alimentador D3, marcado como "TOLEDO", en el cual se han tomado registros en el nivel de MT como en el de BT, y c) el punto del usuario de la Cooperativa de Toledo en el alimentador D4, marcado como "TOL II", en el cual también se han tomado registros en el nivel de MT y BT. Luego de procesar todos los factores de desbalance, factor de asimetría, factor de transferencia y las potencias asimétricas de pérdidas, en cada uno de estos puntos analizados, tenemos los siguientes resultados:

En Barra Distribuidora:

En la barra colectora, de donde parten los distintos ramales se midieron las tensiones de fase, las corrientes totales de ambos alimentadores, que al procesar estos valores instantáneos en MATLAB, se calculan y determinan los valores de los coeficientes de asimetría, el desbalance de tensión y corriente, la desclasificación y la energía activa perdida en cada situación planteada. Todos los resultados se comparan con el estado original, es decir sistema radial de cargas sin Generación Distribuida, observando la diferencia entre máquinas síncronas y asíncronas, mostrándose los resultados en las siguientes Figuras 2, 3 y 4 en las que se indica en rojo a los generadores asíncronos mientras que con azul a los síncronos.

Las características de funcionamiento de la barra son que en ella fluyen todas la cargas simétricas, asimétricas y todos los GD que inyectan

potencia simétrica distribuidos a lo largo de los distribuidores D3 y D4, lo que hace que su potencia de CC sea alta en comparación a los otros puntos del sistema, es el punto de partida de todos los alimentadores de la red de MT.

Comparando los efectos de la GD con máquinas síncronas o con asíncronas se observa que:

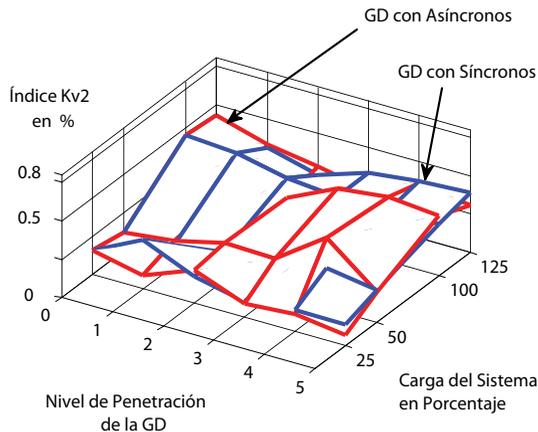


Figura 2. Índice de desbalance de tensión Kv2 en barra distribuidora de media tensión

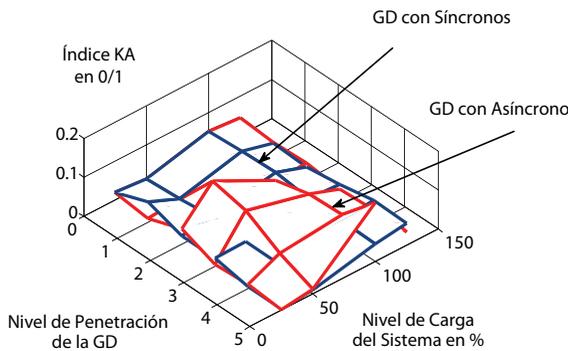


Figura 3. Índice de asimetría KA en barra distribuidora de media tensión

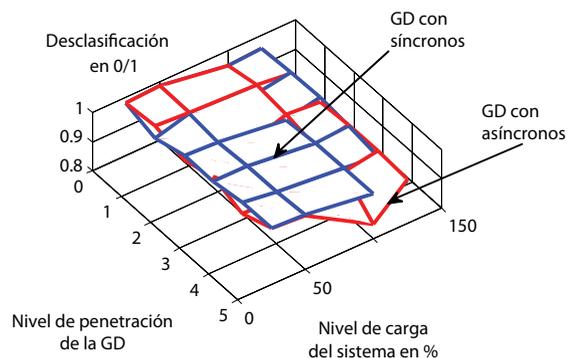


Figura 4. Índice de desclasificación en barra distribuidora de media tensión

1) con respecto al índice de desbalance Kv2, la GD mejora los índices Kv2 en casi todas las situaciones con el nivel de penetración, pero las máquinas asíncronas aportan una mejor reducción de este indicador en la mayoría de las situaciones que las máquinas síncronas 2) en cuanto al factor de asimetría, la GD mejora reduciéndolo, si bien no se observa importantes diferencias entre síncronos y asíncronos pero podemos concluir que los generadores síncronos aportan una mejor tendencia (reducción) de este indicador en la red. Lo mismo ocurre con el valor de la Desclasificación observando que la GD la acerca a uno, mejora el sistema, pero no hay una diferencia importante entre máquinas síncronas o asíncronas en cuanto a su aporte para este indicador en las distintas situaciones estudiadas.

En extremo del alimentador D3, Cooperativa Toledo zona urbana, marcado como TOLEDO:

En el punto del usuario TOLEDO, su potencia de carga es del 15% del total del sistema y es el usuario con mayor potencia de CC de todos los analizados. La característica de este alimentador es que posee las cargas y las GD en su extremo.

Todos los resultados se comparan con el estado original, es decir sistema radial de cargas sin GD, observando la diferencia entre máquinas síncronas y asíncronas, mostrándose los resultados en las siguientes Figuras 5, 6, 7 y 8.

En este usuario que posee mayor potencia de cortocircuito, la inyección de GD de acuerdo al tipo de máquina aporta lo siguiente:

- ▶ El índice Kv2 mejora con la GD, pero la GD con máquinas asíncronas reduce más el índice con baja penetración de GD en todos los niveles de carga del sistema mientras que las máquinas síncronas aportan mejor reducción en los distintos niveles de carga con altos índices de GD. Los indicadores KA y la desclasificación mejoran con la GD, pero la GD con máquinas asíncronas mejora más el índice con baja penetración de GD en todos los niveles de carga del sistema mientras que las máquinas síncronas aportan mejor indicador en los distintos niveles de carga con altos índices de GD.
- ▶ La potencia activa de asimetría, en este

usuario toda con igual signo, se reduce con la GD, pero la GD con máquinas asíncronas se reduce más con baja penetración de GD en todos los niveles de carga del sistema mientras que las máquinas síncronas reducen la pérdida en los distintos niveles de carga con altos índices de GD. El coeficiente de transferencia mejora con la GD, pero la GD con máquinas asíncronas reduce más el índice con baja penetración de GD en todos los niveles de carga del sistema mientras que las máquinas síncronas aportan mejor reducción en los distintos niveles de carga con altos índices de GD.

- El índice Kv2 en baja tensión del usuario TOLEDO mejora con la GD, pero la GD con máquinas asíncronas reduce más el índice con baja penetración de GD en todos los niveles de

carga del sistema mientras que las máquinas síncronas aportan mejor reducción en los distintos niveles de carga con altos índices de GD.

Conclusiones

De las variables estudiadas, son más relevantes el nivel de inserción de la GD (I_p) y la variación del nivel de carga del sistema que el índice de dispersión (I_d) u otro parámetro, otro aspecto observado es que un punto del sistema robusto (con mayor Pcc) y con mayor inserción de GD tiene mejor comportamiento relativo y se mejoran todos los indicadores analizados del desbalance que uno con menor Pcc y con menor nivel de GD o con GD dispersa. Por lo tanto podemos concluir que:

El desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistema eléctricos de potencia

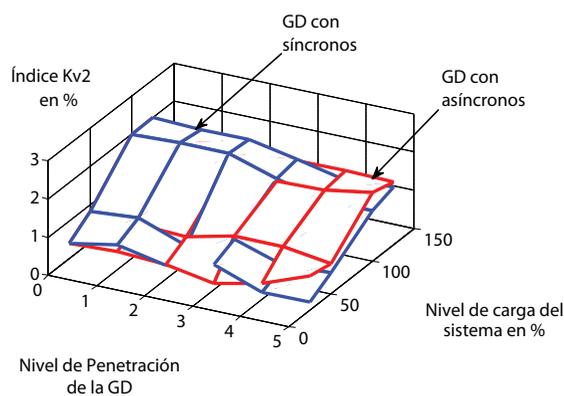


Figura 5. Índice de desbalance Kv2 en media tensión del usuario TOLEDO

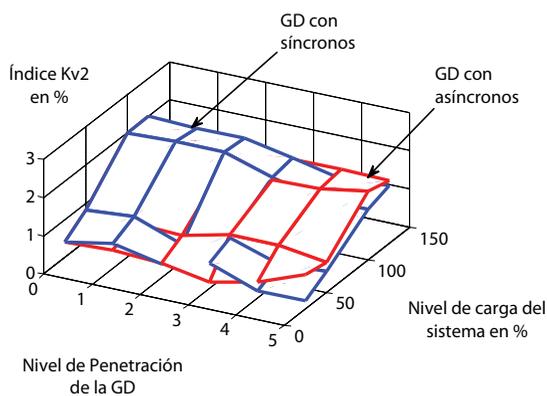


Figura 6. Factor de asimetría KA en media tensión del usuario TOLEDO

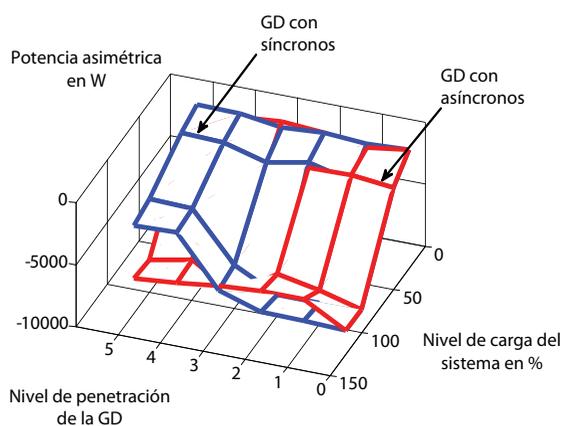


Figura 7. Potencia activa asimétrica en el usuario TOLEDO en media tensión

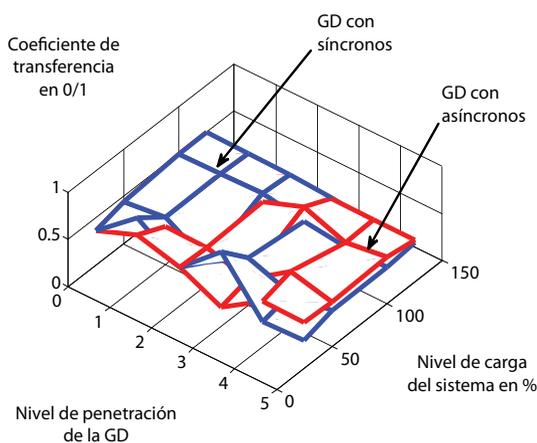


Figura 8. Coeficiente de transferencia del desbalance en usuario TOLEDO

Nivel de penetración de la GD						
Nivel de carga del sistema en %	GD máxima y en todos los usuarios singulares	Relación de 3:1 de la carga máxima en usuarios singulares	Relación de 1:1 de la carga máxima en usuarios singulares	GD resto alimentación	Relación de 0,25:1 de la carga máxima en usuario singulares	Sin GD
	5	4	3	2	1	0
25%						
50%						
100%						
125%						

Figura 9. Zona de dominio del tipo de generador de la GD de acuerdo al nivel de carga del sistema y el nivel de penetración de la GD

que produce demandas y pérdidas de energía adicionales generalmente desatendidos por las compañías y por los usuarios polifásicos.

El coeficiente de desclasificación, que indica la asimetría del sistema es una alternativa que permite caracterizar el desbalance en el sistema eléctrico. Su disminución se logra con la presencia de GD, creciendo la eficiencia energética en el sistema y se aprovecha entonces su capacidad de transporte y distribución.

La inserción de GD (potencia simétrica) atenúa el desbalance de tensión y al de corriente, lo que se traduce en mejora de la calidad de potencia tanto para la distribuidora por su mejora de la eficiencia en las redes como para el usuario en rendimiento energético de las cargas polifásicas. La presencia y el incremento de la GD en las redes, disminuye la potencia activa de pérdida total por desbalance en las redes de transporte y distribución, mejorando la relación de potencia activa útil distribuida con respecto a la pérdida.

Con la presencia de GD se reduce la propagación del desbalance a niveles superiores de tensión, disminuyendo el coeficiente de transferencia.

El aporte por el tipo de máquina generadora (síncrona o asíncrona) tiene la misma respuesta en ambos usuarios estudiado para todos los niveles de carga, observándose que para índices de penetración baja todos los indicadores (Kv2 en media y en baja tensión, KA, Desc., W asimétrica, coeficiente de transferencia) mejoran y se reducen más con máquinas asíncronas que son máquinas síncronas para todos los niveles de carga del sistema. El único indicador en la que se observa un comportamiento opuesto es en el Ki2. Dada las observaciones efectuadas no se puede definir el tipo de máquina más apropiada para la GD, ya que

las variaciones dependen más de su nivel de penetración que de otras variables como se puede apreciar en el resumen de la figura 9.

Bibliografía

- [1] Bollen, M.H.J., "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev., vol. 22, Nro. 11, pp. 49-50, Nov. 2002, (2002).
- [2] Pillay, P.; Manyage, M., "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol. 5, pp. 50-51, May 2001, (2001).
- [3] Dung, T.K.V., Kodjo, A., Mamadou L.D., "Voltage Unbalance Treatment for Distribution Network with Massively Connected Distributed Generators", IEEE 978-1-42445697-0, (2010).
- [4] Juanuwattanakul, P., Mohammad, A.S.M., Moses, P.S., "Voltage Analysis for Placement of DG in Unbalanced Distribution Networks", IEEE 978-1-4673-0378-1, (2011).
- [5] Lieven, D., Bert, R., Bart, M., Lieven, V., "Neutral-Point Shifting and Voltage Unbalance due to Single-Phase DG Units in Low voltage Distribution Networks", IEEE 978-1-4244-2235-7, (2009).
- [6] Ferreira, F., Cormane, J.A.A., Garcia, M.V.C., Costa, M.A.G., Oliveira, F.A., "Analysis of the Complex Voltage Unbalance Factor Behavior Resulting from the Variation of Voltage Magnitudes and Angles", IEEE 978-1-4244-7245-10, (2010).
- [7] Varizi, M., Vadhva, S., Oneal, T., "Distributed Generation Issues, and Standards", IEEE IRI 2011, Las Vegas USA, 978-1-4577-0966-1, (2011).
- [8] Gomez Targarona, J.C. "Calidad de Potencia: para usuarios y empresas eléctricas" Editorial Edigar S.A.- Bs. As, 2005.
- [9] IEEE 1159, IEEE Tech. Rep. 1995, IEEE "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", (1995).
- [10] Piumetto, M.; Gomez Targarona, J.C.; Vaschetti, J., "Análisis de la Reducción de los Factores de Desbalances en un Sistema de distribución de MT por la Inserción de la GD". CLADE 2012, Septiembre, Rosario Argentina.
- [11] Armas Teyra, M.; Gómez Sardy, J.; Perez Tello, C., "Análisis de un sistema de potencia desbalanceado mediante herramientas estadísticas, empleo de coeficientes complejos y modelización por redes neuronales artificiales" Revista Energética, julio 2007 ISSN 0120-9833.
- [12] IEC/TR 61000-3-13, "Assessment of Emission Limits for the Connection of Unbalanced Installations to MV, HV and EHV Power Systems", (2008).
- [13] Paranavithana, P.; Perera, S.; Koch, R.; Emin, Z., "Global Voltage Unbalance in MV Power Systems Due to Line Asymmetries", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 2353-2360, Oct. 2009, (2009).
- [14] Hernan, D., "Integrating Distributed Resource into Electric Utility Distribution Systems", EPRI White paper 1004061, California USA, (2001).
- [15] Loi Lei Lai, Tze Fun Chan, "Distributed Generation Induction and Permanent Magnet Generator", (ed). John Wiley & Sons, Ltd. Inglaterra, (2007).

- [16] Gomez, J.C.; Vaschetti, J.; Coyos, C.V.; Ibarlusea, C.; "Generación Distribuida: Tipo de Conexión del Transformador de Interconexión", UTN Cba - CIGRE 2009.
- [17] Vaschetti J., Gomez Targarona J.C., Arcurio, J., "Simulation of a Wind Power Plant Linked to a Transmission Grid Part I: Modeling the Basic Wind Farm", IEEE Latin American Transactions Vol. 11 N° 1 Feb.2013, (2013).
- [18] "WECC Wind Power Plant Power Flow Modeling Guide", WECC Wind Generator Modeling Group, Western Electricity Coordinating Council Modeling and Validation Work Group, www.wecc.biz/library/, May 2008.
- [19] "Wind Power Plant Collector System Design Considerations", IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group, Power & Energy Society General Meeting, 2009, PES'09. IEEE, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5275322.
- [20] Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book, Bonneville Power Administration, USA, August, 1986.
- [21] Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, Canadian/American EMTP User Group, 1987-92. [22] ENARSA, www.enarsa.com.ar, proyectos de Generación Distribuida I, II, III y IV.

ANEXO – DIAGRAMAS UNIFILARES

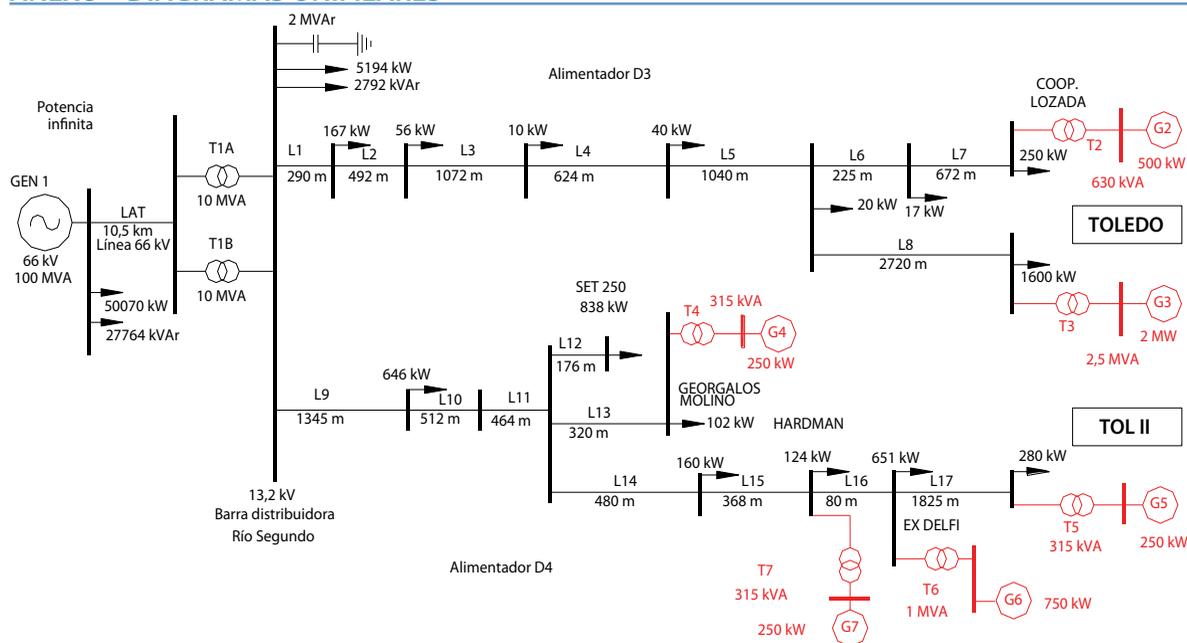
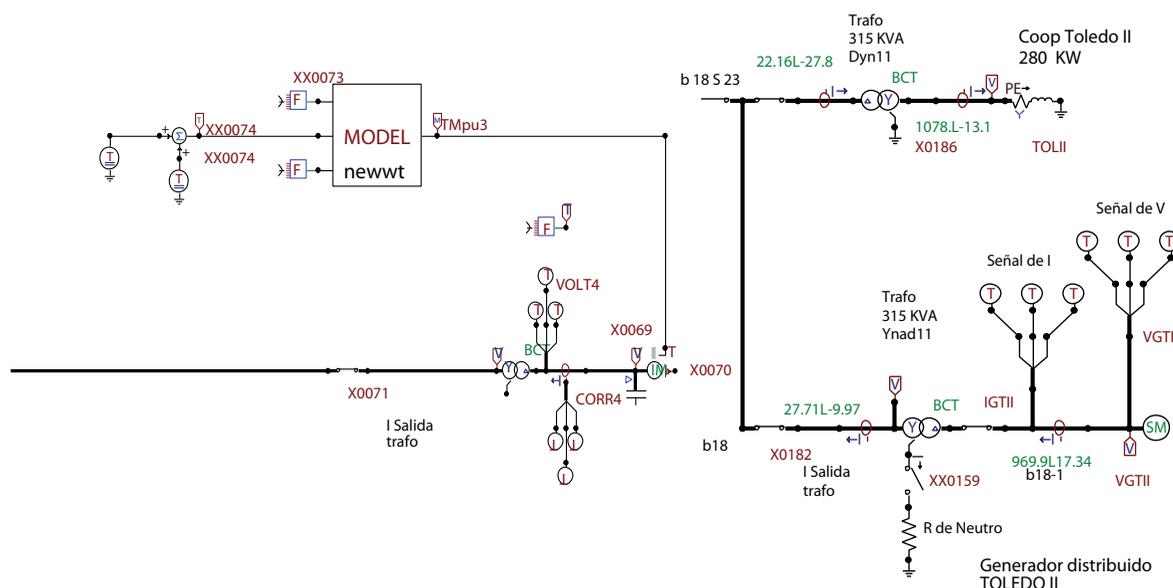


Figura A1. Diagrama unifilar del sistema eléctrico en estudio, con indicación de la carga máxima al 100% en los usuarios en los alimentadores y la posición de los GD en los usuarios singulares



Izquierda: Figura A2. Modelado en ATP/EMTP de un GD eólico con generador asíncrono y conexión a través de transformador en usuario TOLEDO II | Derecha: Figura A3. Modelado en ATP/EMTP de GD con generador síncrono y conexión a través de transformador en usuario TOLEDO II