

Análisis de las definiciones de **desequilibrio de tensión** en los sistemas de potencia



María Reyes Sánchez-Herrera
Patricio Salmerón-Revuelta
Salvador Pérez-Litrán
Alejandro Pérez-Vallés

Dra. por la Universidad de Huelva
Dr. en Ciencias Físicas
Dr. por la Universidad de Huelva
Ingeniero en Organización Industrial

UNIVERSIDAD DE HUELVA. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Ctra. Huelva – Palos de la Frontera, s/n - 21819 Palos de la Frontera (Huelva). Tfno. +34 959 217589. reyes.sanchez@die.uhu.es

Recibido: 06/09/2011 • Aceptado: 07/12/2011

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4375>

ASSESSMENT OF VOLTAGE UNBALANCE DEFINITIONS IN POWER SYSTEMS

ABSTRACT

- Documents recently published by IEC and IEEE standard have adopted as a measure of voltage unbalance the relationship between negative and positive sequence components. However, other imbalance indices are usual in practice, such as voltage unbalance defined by the National Electrical Manufacturers Association, NEMA, in USA, or those based on the maximum deviations of average voltages proposed by IEEE in its publications. This article analyzes the different definitions of voltage unbalance introduced in several standards over the last decades. Thus, a comparative assessment of different definitions versus the imbalance factor adopted by IEC has been carried out. This index is considered the true imbalance in this text. To do this, several simulation and experimental setups have been designed. The results obtained have allowed the importance of adopting a definition to achieve a correct imbalance measure in the characterization of voltage asymmetry in electricity networks to be highlighted.
- Keywords: Voltage unbalance, CEM standard, distortion, electric power quality.

RESUMEN

Los documentos publicados más recientemente por los estándares de IEC e IEEE han adoptado como medida del desequilibrio de tensión la relación entre la componente de secuencia inversa y la componente de secuencia directa. Sin embargo, otros índices de desequilibrio son habituales en la práctica, como es el caso del desequilibrio de tensión definido por la asociación americana de fabricantes de máquinas eléctricas, NEMA, o las desviaciones máximas de las tensiones respecto su promedio recogidas en publicaciones de IEEE.

Este artículo estudia las diferentes definiciones de desequilibrio de tensión introducidas en las distintas normas aparecidas a lo largo de las últimas décadas. Así, se ha realizado un análisis comparativo de las distintas definiciones respecto al factor de desequilibrio adoptado por IEC, y

al que se considera desequilibrio verdadero. Para ello, se han llevado a cabo distintos trabajos de simulación y montajes experimentales que han permitido poner de manifiesto la importancia de adoptar una definición y realizar una medida correcta del índice de desequilibrio para caracterizar la asimetría de tensión en las redes eléctricas.

Palabras clave: Desequilibrio de tensión, Normas CEM, Distorsión, Calidad de la potencia eléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

En sistemas de potencia trifásicos, en principio, las tensiones generadas son sinusoidales y equilibradas. Una tensión trifásica es equilibrada cuando las tres fases presentan el mismo valor eficaz y tienen una diferencia de fase de 120° entre cada dos de ellas, Figu-

ra 1, [1-2]. No obstante, las tensiones del sistema de potencia presentan desequilibrios en el subsistema de distribución de baja tensión. El desequilibrio de tensión puede venir provocado por distintas razones. Una de las causas principales es la desigual distribución de las cargas monofásicas entre las distintas fases que, además, pueden presentar una topología aleatoria. También son posibles otras causas tales como la asimetría de las impedancias de los arrollamientos de los transformadores, la presencia de bancos de transformadores en estrella y en triángulo en vacío, impedancias de transmisión asimétricas posiblemente debidas a una incompleta transposición, y la fusión accidental de fusibles en bancos de condensadores [3]. Por tanto, si bien las instalaciones industriales y comerciales pueden estar alimentadas por tensiones equilibradas, la misma instalación puede ser origen del desequilibrio en el punto de conexión común, PCC, a causa de su consumo desequilibrado. Ese consumo puede provenir en muchas de las ocasiones de cargas no lineales como el debido a los accionamientos eléctricos, lo que puede llevar a niveles de desequilibrio con distorsión que compliquen los procesos de medida y mitigación.

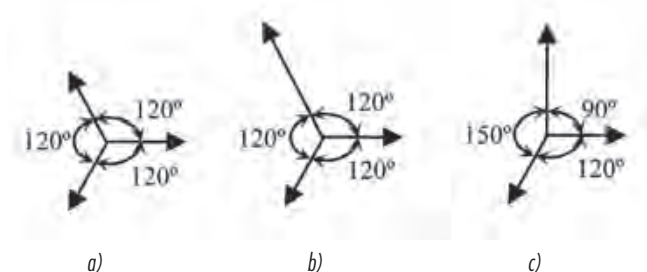


Figura 1: Diagramas fasoriales de sistemas trifásicos: a) equilibrado, b) desequilibrado en módulo, c) desequilibrado en módulo y fase.

Las tensiones desequilibradas en el PCC pueden provocar efectos perjudiciales sobre los equipos y el mismo sistema de potencia, ya que el efecto puede quedar intensificado por el hecho de que un pequeño desequilibrio en las tensiones de fase puede producir un desproporcionado aumento en las corrientes de fase, [3-4].

En este punto es por tanto necesario plantear dos cuestiones: la primera es limitar el desequilibrio de tensión en la red y la segunda proporcionar un método de medida de ese desequilibrio que no dependa de las condiciones del sistema.

De la primera cuestión se ha ocupado la UNE-EN 50160 que, en su punto 2.10, establece que “En condiciones normales de explotación, para cada período de una semana, el 95% de los valores eficaces promediados en 10 minutos de la componente inversa de la tensión de alimentación debe situarse entre el 0% y el 2% de la componente directa” [1]. Con respecto a la segunda cuestión, a lo largo de los últimos años han surgido distintas definiciones del desequilibrio de

tensión, propuestas por los diferentes estándares, cada una de las cuales se aplican más en unos países que en otros, [5-9].

Así pues, en este artículo se presentan las definiciones de desequilibrio de tensión más extendidas. Estas se aplican a un sistema de potencia sinusoidal y a través de los resultados obtenidos se contrastan las diferencias entre los valores proporcionados por cada una de ellas. Por otro lado, la aplicación de estas definiciones a un sistema en presencia de distorsión ha permitido comprobar que los valores obtenidos sufren variaciones adicionales respecto del caso sinusoidal.

Este trabajo se estructura de la siguiente forma: en la segunda sección se presentan las definiciones de desequilibrio de tensión que se pretenden analizar. En la tercera se aplican estas definiciones a un caso práctico resuelto mediante simulación, tanto para el caso sinusoidal como para el caso con presencia de distorsión, y se analizan los resultados obtenidos. En la cuarta sección se aplican las distintas definiciones a un caso real constituido por un conjunto de cargas conectadas a red a través de un sistema de autotransformadores para desequilibrar las tensiones a voluntad, y en la quinta se establecen las correspondientes conclusiones.

2. ÍNDICES DE DESEQUILIBRIO

El desequilibrio de tensión se caracteriza normalmente por medio de la tensión de secuencia inversa, y eventualmente, mediante la tensión de secuencia cero, referidas ambas a la tensión de secuencia directa,

$$UF = \frac{U^-}{U^+} 100 \quad ; \quad UF^0 = \frac{U^0}{U^+} 100 \quad (1)$$

donde U^+ es la componente de tensión de secuencia directa, U^- es la componente de tensión de secuencia inversa, y U^0 es la componente de tensión de secuencia cero. Aunque normalmente sólo se considera el valor absoluto del desequilibrio, bien podría incluir un ángulo de fase entre el cociente de las tensiones de secuencia que suministrara información sobre el carácter del desequilibrio. Esta misma definición, (1), fue igualmente adoptada en el Std. 1159 de IEEE-2009, y en este trabajo se considerará como la definición verdadera [6].

Para evitar el uso del álgebra compleja en el cálculo de las componentes simétricas, el estándar IEC 61000-4-30, [2], admite un método alternativo del cálculo del desequilibrio. En este sentido, se presenta la aproximación a la expresión (1) de UF (aproximation formula, AF) que se define como:

$$AF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2)$$

donde:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3)$$

El índice AF , (2), se obtiene a partir de las componentes fundamentales de las tensiones de línea. Además, dado que en el cálculo de (2) puede existir una diferencia entre los valores eficaces y las componentes fundamentales de la tensión, habrá que tener en cuenta esta circunstancia cuando las medidas se realicen en sistemas con distorsión. En IEC 61000-4-30, la ventana básica de medida utilizada para el cálculo del desequilibrio es la misma que para la magnitud de la tensión o la distorsión armónica. Esto es, el valor eficaz de la componente fundamental de la señal de entrada se mide en un intervalo de tiempo de 10 períodos para redes de 50 Hz o en un intervalo de tiempo de 12 períodos para las redes de 60 Hz.

No obstante, desde la década de los 80, han sido publicadas distintas definiciones para caracterizar el desequilibrio de tensión. En lo que sigue se introducen algunas de las definiciones más extendidas. Así, el desequilibrio de tensión de línea (*line voltage unbalance ratio*, LVUR) se define, en porcentaje y de acuerdo con NEMA MG1-1993 “*Motors and Generators*”, [7-9], como la máxima desviación de las tensiones de línea respecto al promedio de las tres tensiones de línea, referidas al promedio de las tensiones de línea:

$$LVUR = \frac{\max(|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|)}{V_{avg}} 100 \quad (4)$$

donde:

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (5)$$

Esta es la definición NEMA (*Nacional Electrical Manufacturers Association*); se define en función de las tensiones de línea, luego no se verá afectado por la presencia de tensiones de secuencia cero.

Dos documentos de IEEE introducen definiciones respectivas en función de las tensiones de fase, y por tanto, índices que se verán significativamente afectados por la presencia de tensiones de secuencia cero, [5, 7-9]. Por un lado, la relación de desequilibrio de tensión de fase (*phase voltage unbalance ratio*, PVUR1) definida, en porcentaje y de acuerdo con el Std. 141 de IEEE-1993, como la máxima desviación de las tensiones de fase respecto del promedio de las tensiones, referidas al promedio de las tensiones de fase:

$$PVUR1 = \frac{\max(|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|)}{V_{avg}} 100 \quad (6)$$

donde:

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (7)$$

Una segunda definición de la relación de desequilibrio de tensión de fase PVUR2, viene dada, en porcentaje y de acuerdo con el Std. 936-1987 de IEEE-1987, por la siguiente expresión:

$$PVUR2 = \frac{\max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c)}{V_{avg}} 100 \quad (8)$$

donde V_{avg} corresponde al definido en la ecuación (7). En esta ocasión, (8) relaciona la diferencia entre la tensión rms más elevada y la más reducida, referida al promedio de las tres tensiones. A diferencia del documento NEMA, los documentos IEEE utilizan las tensiones de fase en vez de las tensiones de línea.

Estas tres definiciones son muy fáciles de implementar porque dependen únicamente de los valores eficaces de las distintas fases de la tensión. Sin embargo, eso mismo conlleva que no reflejen completamente los efectos de desequilibrio en el sistema, como se comprobará en la sección siguiente.

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de evaluar los resultados aportados por cada uno de los índices, se ha diseñado una plataforma de simulación en el entorno *Matlab/Simulink*, Figura 2, que está constituida por una fuente de alimentación trifásica de 400/230V eficaces, y 50 Hz, sinusoidal y equilibrada, que alimenta a dos cargas lineales. La primera está formada por tres impedancias inductivas con el mismo valor nominal (40 W y 17 mH en serie) conectadas en estrella y la segunda por tres resistencias conectadas en estrella cuyo valor nominal es distinto en cada fase: 40 Ω en la fase 1, 30 Ω en la 2 y 45 Ω en la 3.

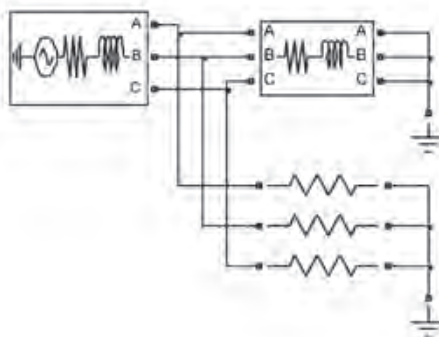


Figura 2: Plataforma de simulación

Se han tomado medidas de la tensión en el punto de conexión común en nueve casos, combinando tres condiciones diferentes de alimentación y la conexión/desconexión de cargas. Las condiciones de alimentación consideradas han sido: la descrita anteriormente (fuente equilibrada sinusoidal), una tensión de fuente desequilibrada en la que el valor eficaz de la tensión de la fase 1 sigue siendo 230 V, el de la segunda es $230 \cdot 0,9$ V y el de la tercera $230 \cdot 1,05$ V, y por último una tensión de fuente desequilibrada en la que el valor eficaz de la tensión de la fase 1 es 230 V, el de la segunda fase $230 \cdot 1,1$ V y el de la tercera $230 \cdot 0,8$ V.

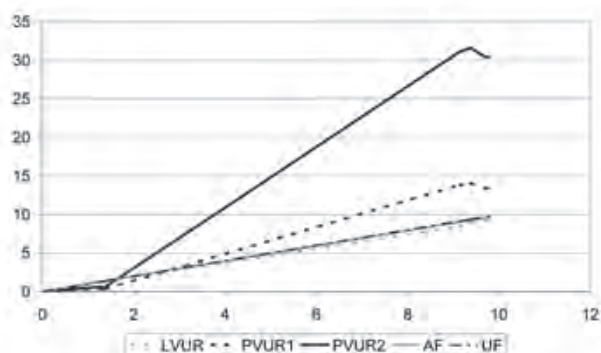


Figura 3: Valores proporcionados por los distintos índices cuando se aplican a las tensiones de un sistema de potencia sinusoidal en distintas condiciones de desequilibrio en función del desequilibrio de tensión y la conexión/desconexión de cargas.

Las definiciones de los índices de desequilibrio presentadas en la sección anterior se han aplicado a las tensiones obtenidas en los ensayos realizados y los resultados se muestran en las gráficas de la Figura 3 y los valores numéricos de la Tabla I (en la tabla se consideran únicamente los casos en que permanecen conectadas las dos cargas). La Figura 3 muestra el valor tomado por cada uno de los índices, LVUR, PVUR1, PVUR2, AF, UF en función del factor de desequilibrio UF (considerado desequilibrio verdadero). En ella se puede ver que las gráficas correspondientes a AF y UF son coincidentes, luego se comprueba que la expresión de AF es apropiada en el caso sinusoidal. También se observa que algunos índices se apartan bastante del factor de desequilibrio y que esas desviaciones únicamente son reducidas para pequeños valores de UF.

Fuente	Eq	Des 1	Des 2
UF (%)	1,29	4,78	9,72
Dif. LVUR-UF (%)	-0,44	-1,51	-4,72
Dif. PVUR1-UF (%)	-70,53	85,06	37,81
Dif. PVUR2-UF (%)	-50,19	232,50	212,69
Dif. AF-UF (%)	0	0	0

Tabla I: Diferencias entre los valores tomados por los distintos índices y el desequilibrio de tensión UF en los casos analizados en la plataforma de simulación con cargas lineales.

En la Tabla I se presentan de forma numérica las diferencias relativas del valor de cada índice respecto del factor de desequilibrio para cada nivel de desequilibrio considerado con ambas cargas conectadas. De ella se deduce que los índices PVUR1 y PVUR2 presentan un comportamiento creciente para valores en aumento del desequilibrio hasta presentar un valor máximo entorno al 5% de UF. A partir de ese valor, esas diferencias comienzan a reducirse.

Se observa también en la Tabla I cómo esas diferencias pueden llegar a estar por encima del 80% en el caso de PVUR1 y por encima del 200% en el caso de PVUR2. Finalmente, respecto del índice LVUR se deduce de la Tabla I que presenta un comportamiento siempre creciente conforme aumenta el desequilibrio llegando a ser cercano al 5% para un desequilibrio de 9,72%. Este índice es el utilizado por NEMA y la diferencia respecto del desequilibrio de tensión UF hace que aunque el desequilibrio real en la alimentación de un motor sea de 9,72, el índice NEMA asume un valor de 9,26.

A continuación se ha sustituido la carga lineal equilibrada de la plataforma de simulación por otra no lineal, equilibrada, compuesta por tres reguladores monofásicos con una impedancia inductiva (40Ω en serie con 17 mH) conectados en estrella. Se han tomado las tensiones en el punto de conexión común en los mismos casos que en la simulación anterior con ambas cargas conectadas y se han aplicado las definiciones de índices de caracterización del desequilibrio presentadas en la segunda sección.

Cuando existe distorsión en el sistema hay que añadir, a las diferencias entre los distintos índices presentados hasta ahora, otras adicionales. Estas se refieren al procedimiento de cálculo. En efecto, el desequilibrio de tensión se calcula como la relación entre la secuencia inversa y la directa de la componente fundamental de la tensión. Sin embargo, el resto de los índices basan su cálculo en los valores eficaces de las distintas fases de la tensión, cuyo valor es distinto de la componente fundamental en presencia de distorsión. Por lo tanto, se puede evaluar esa diferencia adicional como la desviación relativa del valor de cada índice en el caso con distorsión respecto del hipotético sinusoidal (que se obtiene realizando el cálculo correspondiente a cada índice

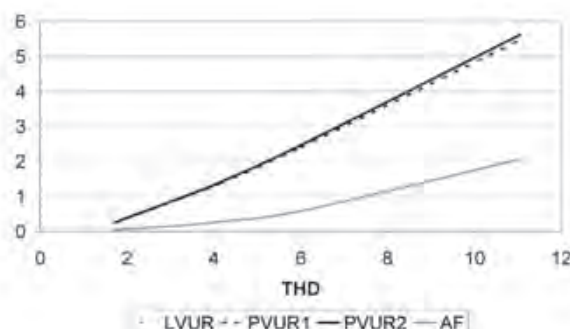


Figura 4: Desviaciones relativas en % de los distintos índices de desequilibrio de tensión respecto de su cálculo en el caso hipotético senoidal, en función del THD. UF=1,36%

considerando únicamente la componente fundamental de cada fase de la tensión). Estas desviaciones relativas se presentan respecto del THD (*Total Harmonic Index*) en el gráfico de la Figura 4 para un factor de desequilibrio del 1,36% y en la Figura 5 para un factor de desequilibrio entorno al 7%.

Se observa en ambas figuras, que la gráfica correspondiente a AF es prácticamente coincidente con la de LVUR y que todas presentan un comportamiento creciente para valores crecientes de la distorsión. Así por ejemplo el índice NEMA, LVUR, presenta hasta una diferencia del 2% cuando existe un desequilibrio del 1,36%. Esas desviaciones en el caso de los índices PVUR1 y PVUR2 alcanzan valores de hasta el 5,5%. La comparación de las Figuras 4 y 5 muestran que las diferencias relativas encontradas con desequilibrios mayores se reducen. Esto se debe a que al aumentar el desequilibrio, el aumento de la secuencia inversa de la componente fundamental de la forma de onda es comparativamente mayor que el aumento de las componentes armónicas.

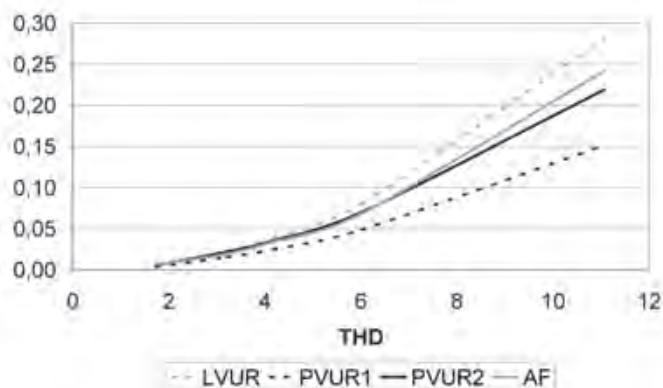


Figura 5: Desviaciones relativas en % de los distintos índices de desequilibrio de tensión respecto de su cálculo en el caso hipotético senoidal en función del THD. UF=7%

Por tanto, se puede concluir de los ensayos de simulación que existen diferencias significativas entre los distintos índices de desequilibrio analizados y el desequilibrio verdadero. También se puede concluir que la distorsión agrava este problema introduciendo una diferencia adicional entre el valor de cada índice cuando se consideran o no en su cálculo los armónicos de la forma de onda; esta última diferencia aumenta con el nivel de distorsión y disminuye con el nivel de desequilibrio.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se contrastan las conclusiones derivadas de los ensayos de simulación con los resultados obtenidos en una plataforma experimental diseñada al efecto, Figura 6. Así, se alimenta mediante un sistema de tensiones desequilibradas a tres cargas: un rectificador trifásico con una impedancia

capacitiva en el lado de continua ($310,5 \Omega$ en paralelo con $2200 \mu\text{F}$), un motor, y una carga trifásica compuesta por tres radiadores conectados en estrella (cada uno tiene una resistencia de 242Ω). El sistema de tensiones desequilibradas se obtiene a partir de tres auto transformadores alimentados desde la red que permiten modificar de forma independiente el valor eficaz de la tensión de cada una de las fases. En estos ensayos, el desequilibrio se ha obtenido disminuyendo el valor eficaz de la tensión correspondiente a la segunda fase.

Se ha medido la tensión en el punto de conexión común de las tres cargas con distintos valores de desequilibrio de fuente, y la conexión y desconexión de los radiadores correspondientes a las distintas fases. A las tensiones medidas se le han aplicado los distintos índices de caracterización del desequilibrio presentados en la segunda sección. Los índices se han calculado a partir de las tensiones medidas, y a partir de sus componentes fundamentales para evaluar las desviaciones relativas entre ambos. Estas desviaciones se han representado en la Figura 7 respecto de la relación THD/UF. Piénsese que según los resultados obtenidos en la plataforma de simulación, esas diferencias aumentan conforme crece la distorsión y según disminuye el desequilibrio.

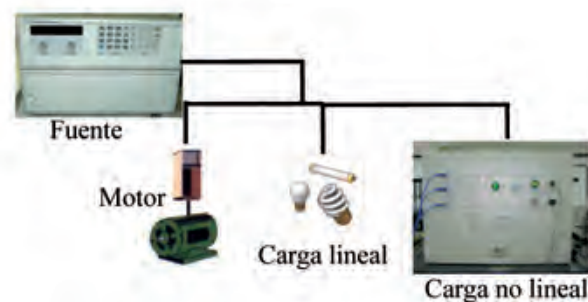


Figura 6: Plataforma experimental

En la Figura 7 se observa que para un valor del THD de alrededor de 13 veces el valor de UF, la desviación relativa del índice LVUR entre el caso con distorsión y el hipotético sinusoidal llega casi al 2,5%. Asimismo, se observa

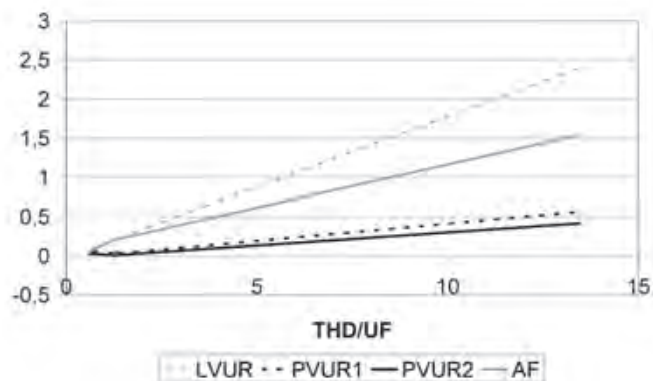


Figura 7: Desviaciones relativas en % de los distintos índices respecto de su valor si el sistema fuese sinusoidal, frente a la relación THD/UF.

efectivamente una tendencia creciente de las desviaciones relativas correspondientes a todos los índices respecto del aumento relativo de THD frente a UF.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado las definiciones más extendidas de índices de caracterización del desequilibrio de tensiones en los sistemas trifásicos de potencia. Se han aplicado las definiciones a distintos ensayos de simulación y a distintas pruebas experimentales, tanto para formas de onda sinusoidales como distorsionadas. Las definiciones propuestas se han aplicado a las medidas de tensión en el punto de conexión común de los distintos sistemas. Se han evaluado las diferencias de los valores aportados por los distintos índices respecto del factor de desequilibrio adoptado por la Norma IEC 61000 para establecer el valor máximo de desequilibrio en un sistema, y se ha puesto de manifiesto que las diferencias podrían llegar a ser considerables y distintas de unos índices a otros. Esto hace aconsejable desechar los índices LVUR, PVUR1 y PVUR2 para caracterizar el desequilibrio en la práctica industrial. Por otra parte, se ha comprobado la aparición de una diferencia adicional, cuando en el sistema existe distorsión. Así, se han determinado las desviaciones relativas del valor de cada índice y el correspondiente al mismo sistema si éste fuese sinusoidal. Se ha puesto de manifiesto que esas desviaciones relativas aumentan con el incremento de la distorsión y se reducen para desequilibrios crecientes. Por tanto, en condiciones generales, el desequilibrio de tensiones en sistemas de potencia deberá evaluarse a partir del factor de desequilibrio, UF, o bien según la fórmula aproximada del mismo, AF, a partir de las componentes fundamentales de las formas de onda de tensión y no a partir de sus valores eficaces. Sólo de esa forma serán equiparables los valores que proporcionan los distintos índices respecto al límite de desequilibrio recogido en el estándar UNE-EN 50160.

En este artículo se han presentado las definiciones más extendidas de índices de caracterización del desequilibrio de tensiones en los sistemas trifásicos de potencia. Se han aplicado las definiciones a distintos ensayos de simulación y de distintas pruebas experimentales, tanto para formas de onda sinusoidales como distorsionadas. Las definiciones propuestas se han aplicado a las medidas de tensión en el punto de conexión común de los distintos sistemas. Se han evaluado las diferencias de los valores aportados por los distintos índices respecto del factor de desequilibrio adoptado por la Norma IEC 61000 para establecer el valor máximo de desequilibrio en un sistema, y se ha puesto de manifiesto que las diferencias podrían llegar a ser considerables y distintas de unos índices a otros. También se ha comprobado la aparición de una diferencia adicional cuando en el sistema existe distorsión. Así, se han determinado las desviaciones relativas del valor de cada índice y el correspondiente al mismo sistema si éste fuese sinusoidal. Se ha puesto de manifiesto que esas

desviaciones relativas aumentan con el incremento de la distorsión y se reducen para desequilibrios crecientes. Por tanto, en condiciones generales, el desequilibrio de tensiones en sistemas de potencia deberá evaluarse a partir del factor de desequilibrio, UF, o bien según la fórmula aproximada del mismo, AF, a partir de las componentes fundamentales de las formas de onda de tensión y no a partir de sus valores eficaces. Sólo de esa forma serán equiparables los valores que proporcionan los distintos índices respecto al límite de desequilibrio recogido en los estándares.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CENELEC. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. EN 50160. Bruxelles: CENELEC, 1999.
- [2] CENELEC. Testing and measurement techniques – Power quality measurements methods. EN 61000-4-30. Bruxelles: CENELEC, 2003.
- [3] Jouanne A, Banerjee B. "Assessment of voltage unbalance". IEEE Transaction on Power Delivery. Oct 2001. Vol. 16-4. p. 782-790.
- [4] Pillay P, Manyase M. "Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies". IEEE Transaction on Energy Conversion. Dec 2006. Vol. 21. p. 813-822. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2005.853724>
- [5] ANSI/IEEE. IEEE Recommended Practice for Electrical Power Distributions for Industrial Plants. Std 141. Piscataway, N J: ANSI/IEEE, 1993.
- [6] IEEE. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. Std 1159. Piscataway, N J: IEEE, 2009.
- [7] Pillay P, Manyase M. "Definitions of voltage unbalance". IEEE on Power Engineering Review Magazine. May 2001. Vol. 21. p. 50-51. <http://dx.doi.org/10.1109/39.920965>
- [8] Bollen M H J. "Definitions of voltage unbalance". IEEE on Power Engineering Review. Nov 2002. p. 49-50. <http://dx.doi.org/10.1109/MPER.2002.1045567>
- [9] Seiphetlho T E, Rens A P J. "On the assessment of voltage unbalance", 14th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bergamo (Italy): IEEE 2010. p. 1-6. ISBN 978-1-4244-7244-4.