

Desbalances - Estudio de alternativas para su estimación

Gonzalo Casaravilla
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
gcp@fing.edu.uy

Virginia Echinope
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Universidad de la República
echinope@fing.edu.uy

Abstract—Este trabajo presenta los problemas que ocasionan los desbalances de tensión y corriente en las redes de distribución y algunas formas de estimarlos con diferentes grados de precisión.

Se recopilan las definiciones de desbalance de acuerdo a las normas internacionales así como las fórmulas alternativas que algunas de estas normas proponen para su cálculo simplificado.

A su vez, se presentan y comparan las diferentes fórmulas de cálculo para el desbalance establecidas en distintos reglamentos de calidad de servicio en varios países de la región.

Finalmente se realiza un análisis comparativo de los resultados que se obtienen de la aplicación de las distintas metodologías presentadas ante diferentes situaciones del voltaje de alimentación.

Tomando en cuenta los límites máximos de desbalance admisibles recomendados por la normativa internacional, se extienden los resultados obtenidos para los desbalances en tensión al desbalance en corriente, considerando parámetros típicos de las redes de distribución.

I. INTRODUCCIÓN

En el proceso de elaboración de una reglamentación sobre calidad de servicio en un sistema de distribución de energía eléctrica existen distintos parámetros que califican el desempeño de la red para los cuales deben establecerse valores de referencia que no deberán ser superados. Específicamente cuando se trata de perturbaciones los índices a controlar son los armónicos de tensión y corriente, los huecos de tensión, el flicker y el grado de desbalance en tensión y en corriente. Sobre estos últimos se basará este estudio.

Un sistema trifásico se califica como desbalanceado cuando los módulos de la componente fundamental de las tensiones del sistema no son iguales y/o cuando los ángulos de desfase entre las tensiones del mismo no son iguales. [1]

El principal motivo para la existencia de redes trifásicas desbalanceadas lo constituye la distribución de cargas monofásicas no equilibradas a lo largo de la red, que a su vez cambia a lo largo del tiempo dependiendo de la hora del día. Existen otros motivos menores como la diferencia en las impedancias vistas de los conductores debido a que generalmente es prácticamente imposible hacer transposiciones en redes de baja tensión y las asimetrías en las impedancias de los transformadores convencionales.

El desbalance en las redes de distribución provoca pérdidas adicionales por calentamiento así como disminución en la eficiencia de los motores de inducción trifásicos tan frecuentemente utilizados en la industria. Según se establece en la norma IEEE 1159 [2] un desbalance de 3,5 % en tensión puede

resultar en un 25 % de aumento del calentamiento en algunos motores.

De acuerdo a lo expresado en la norma IEC 61000-4-30 [3] 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 con respecto a 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, a menos que se emplee algún método alternativo.

II. NORMATIVA INTERNACIONAL: DEFINICIONES Y FÓRMULAS DE CÁLCULO

De acuerdo a la norma IEC 61000-4-30 [3], el grado de desequilibrio se expresa usualmente como (1), donde U_2 corresponde a la componente de secuencia negativa de la tensión de línea y U_1 corresponde a la componente de secuencia positiva de la tensión de línea.

$$u_2 = 100 * \frac{U_2}{U_1} \quad (1)$$

Las componentes de secuencia se derivan de las componentes de fase a través de la transformación de Fortescue (2).

$$\begin{bmatrix} \overline{U_1} \\ \overline{U_2} \\ \overline{U_0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{U_{ab}} \\ \overline{U_{bc}} \\ \overline{U_{ca}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

Por lo que para determinar las componentes de secuencia de las tensiones de un sistema trifásico parece estrictamente necesario conocer las tres componentes de fase de las tensiones así como los ángulos de desfase entre ellas. Esto implica que en una campaña de medida donde se deba controlar el desbalance, debería instalarse un equipo que fuera capaz de registrar estos seis parámetros.

A los efectos de simplificar este conjunto de medidas, la norma IEC 61000-4-30 [3] y la norma IEEE 1159 [2] proponen fórmulas de cálculo alternativas. Ambas tienden a que sean necesarios menos parámetros para estimar el índice de desbalance, lo cual se logra con distintos grados de exactitud en cada caso.

II-A. Fórmula alternativa según IEC 61000-4-30

En esta norma se propone que para un sistema trifásico el índice de desbalance definido en (1) puede calcularse como (3)

$$u_2 = 100 * \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3)$$

donde β se calcula según (4)

$$\beta = \frac{U_{abfund}^4 + U_{bcfund}^4 + U_{cafund}^4}{(U_{abfund}^2 + U_{bcfund}^2 + U_{cafund}^2)^2} \quad (4)$$

donde las tensiones U_{ijfund} corresponden a la componente fundamental de la tensión entre la fase i y la fase j .

II-B. Fórmula alternativa según IEEE 1159

En este caso el índice de desbalance se estima como la desviación máxima entre el valor de los voltajes de línea y el promedio de los voltajes de línea, dividida entre el promedio de los voltajes de línea, según se expresa en (5) donde los subíndices i y j corresponden a las fases a , b y c .

$$u_2 = 100 * \text{máx}\left[\frac{U_{ij} - U_{media}}{U_{media}}\right] \quad (5)$$

II-C. Comparación de las fórmulas alternativas

Es claro que en cualquiera de las fórmulas presentadas, para determinar el índice de desbalance es necesario conocer los valores *r.m.s* de las tensiones de línea del sistema.

La fórmula propuesta por la norma IEEE 1159 no establece específicamente que los valores de tensión necesarios para el cálculo se restrinjan a la componente fundamental.

En el caso de la fórmula propuesta por la norma IEC 61000-4-30 se verificó que para un sistema de tensiones trifásicas con componente directa e inversa no nulas, el cálculo es exacto. Tomando en cuenta la transformación (2), la fórmula propuesta para el desbalance calculado a partir de las tensiones de línea del sistema da efectivamente la relación $\frac{U_2}{U_1}$.

Resulta claro que en el caso que en el sistema de tensiones haya componente homopolar, esto no afecta la fórmula propuesta, dado que la componente homopolar de un sistema compuesto es nula (suma de las tres componentes compuestas).

A los efectos de evaluar la exactitud de la fórmula propuesta por la norma IEEE 1159 se simuló una situación con un índice de desbalance de acuerdo a (1) del 2% constante con una variación del ángulo de desfase entre la componente positiva y negativa de secuencia entre 0 y 2π . En la fig. 1 se aprecian los resultados obtenidos.

Se puede observar que el resultado obtenido es exacto para algunos ángulos de desfase, mientras que para otros ángulos de desfase el error relativo que se deriva de la aplicación de la aproximación puede llegar hasta un 13%.

También en la fig. 1 se muestra la simulación para la fórmula alternativa propuesta por la norma IEC 61000-4-30 la cual, como ya se adelantó, da un resultado exacto para cualquier ángulo de desfase entre las componentes de secuencia.

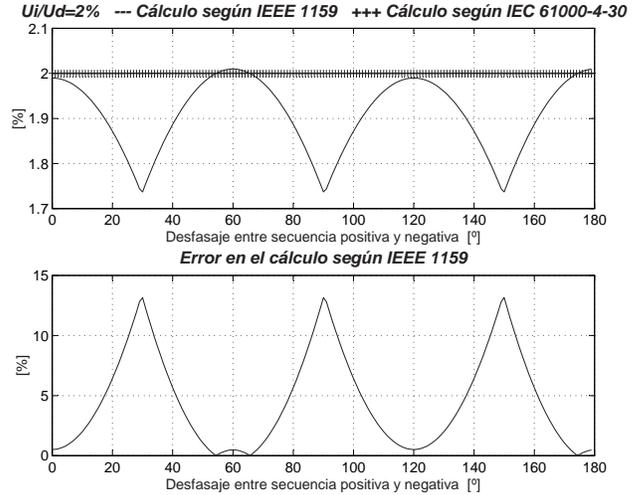


Fig. 1. Cálculo para un desbalance de 2%

III. PROPUESTAS PARA EL DESBALANCE EN LOS REGLAMENTOS DE CALIDAD DE SERVICIO

Si bien algunos de los reglamentos de calidad de servicio de los países de la región no tienen en cuenta el desbalance dentro de sus parámetros a controlar (es el caso de Argentina y Ecuador), muchos otros sí. Más precisamente, los reglamentos de Colombia, Guatemala, Chile y Bolivia.

En el reglamento de Guatemala, el desbalance se controla a partir de la determinación del Índice de Calidad del Desbalance de Tensión suministrada por el distribuidor que se calcula de acuerdo a (6) donde $V_{m\acute{a}x/m\acute{i}n}$ son las tensiones máximas y mínimas de las tensiones de fase.

$$ATDT = \frac{3 * (V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{V_a + V_b + V_c} * 100 \quad (6)$$

En el reglamento de Bolivia, se da la definición del índice de desbalance de acuerdo a (1) y se establece que si el desbalance se determina en forma indirecta, se debe calcular para cada período de 15 minutos el desbalance en función de los valores medidos de las tensiones entre las fases de acuerdo a la fórmula (3) propuesta por [3].

En el caso del reglamento de Chile se establece que a partir de la medida de las tensiones fase-fase o fase-neutro, según corresponda, se deberán determinar las tensiones de secuencia positiva, negativa y cero mediante la transformación de componentes de fase a componentes simétricas.

El reglamento de calidad de servicio de Colombia establece que el índice de desbalance se calculará a partir de la fórmula propuesta en la norma IEEE 1159.

Es evidente que tanto en el reglamento de Bolivia como en el de Chile se llega a resultados exactos en la determinación del índice de desbalance. En el caso de Colombia el error que se comete es el que se analizó en la sección II – C (fig. 1). En el caso de la fórmula de cálculo propuesta en el reglamento de Guatemala, se realizó una simulación análoga a

la realizada para la fórmula propuesta por la norma IEEE 1159. Se trabajó con un índice de desbalance según (1) constante del 2% con una variación del ángulo de desfase entre la componente positiva y negativa de secuencia entre 0 y 2π . En la figura 2 se aprecian los resultados obtenidos. Se puede observar que el resultado no coincide con el 2% para ningún valor de desfase entre las componentes de secuencia. Se aprecia también que el error relativo que se comete en el cálculo oscila entre un 50% y un 74%, que son porcentajes importantes tratándose de índices a partir de los cuales se pueden calcular penalizaciones.

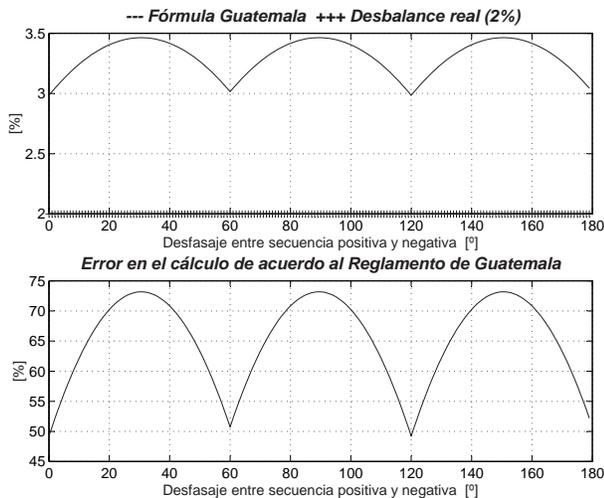


Fig. 2. Cálculo de acuerdo al reglamento de Guatemala

En el proyecto de reglamento presentado por la Facultad de Ingeniería a la URSEA en Uruguay, Niveles de Referencia de las Perturbaciones del Servicio de Distribución de Energía Eléctrica, se establece la utilización de la fórmula de cálculo (3) propuesta por la norma IEC 61000-4-30 para la determinación del índice de desbalance en tensión.

IV. LÍMITE PARA EL ÍNDICE DE DESBALANCE EN TENSIÓN

La norma europea EN 50160 [4] establece que, tanto para baja tensión como para media tensión, 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. Se establece la salvedad, en baja tensión, que en algunas regiones equipadas con líneas parcialmente monofásicas o bifásicas, los desequilibrios pueden alcanzar el 3% en los puntos de suministros trifásicos.

La norma IEC 61000-2-2 [5], al igual que la norma IEEE 1159, recomienda que el índice de desbalance en un suministro eléctrico no debe superar el 2%.

En la norma IEC61000-4-30 se establece que el período de medida debe ser de una semana con valores cada 10 minutos

y/o cada 2 horas. Una de las metodologías de comparación propuestas establece que uno o más de los valores semanales con 95% de probabilidad (expresada en por ciento) se debe comparar con el valor contractual establecido.

Evidentemente estos límites que establece la normativa internacional son adoptados generalmente por las reglamentaciones de calidad de servicio vigentes. La reglamentación Colombiana adopta explícitamente las recomendaciones de la norma IEEE 1159.

Existen algunos casos, como los reglamentos de Guatemala y Bolivia donde se establecen límites algo mayores a los contemplados por las normas vigentes. En particular, éstos países han establecido un límite para el desbalance del 3%, lo cual parece lógico si se tiene en cuenta que en casi todos los casos hace relativamente poco tiempo que se han empezado a controlar estos índices y la idea general es trabajar hacia el establecimiento de metas alcanzables para los distintos actores de los sistemas eléctricos.

En otros países donde se han adoptado los límites propuestos por la normativa internacional, se han establecido plazos para medir el índice de desbalance sin generar penalizaciones, a los efectos de conocer el nivel general de desbalance del sistema. Es éste el caso del proyecto de reglamento presentado en Uruguay, donde se propone que, luego de un período inicial de ajuste, el desbalance en tensión no debe superar el 2%.

También existen casos, como en el reglamento Chileno, donde por el momento sólo se propone medir el índice de desbalance para obtener valores estadísticos antes de proponer un límite para este parámetro.

V. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PARA EL ÍNDICE DE DESBALANCE EN CORRIENTE

En toda reglamentación sobre calidad de servicio de la energía eléctrica, en cierto modo se "responsabiliza" al distribuidor por la calidad en la tensión y como contraparte al usuario por la calidad de la corriente.

Resulta evidente que las causas y efectos sobre la tensión y la corriente del sistema no son tan estrictamente separables. De todas formas, parece necesario que si se establecen límites para el desbalance en tensión, también se deban establecer límites para el desbalance en corriente.

En la figura 3 se plantea un esquema muy simplificado de la red desde el punto de suministro de la tensión de fase U_f hasta el punto donde se conecta al usuario PCC (Point of Common Coupling). Se asume que la potencia de cortocircuito antes del transformador de distribución es muy grande y que por lo tanto, el parámetro que influye en los cálculos en el PCC es directamente la impedancia del transformador que conecta el usuario al sistema.

Si se plantean las ecuaciones de este sistema en componentes simétricas se obtiene:

$$\overline{U}_1 = \overline{U}_f - \overline{Z}_{cc} \overline{I}_1 \quad (7)$$

$$\overline{U}_2 = 0 - \overline{Z}_{cc} \overline{I}_2 \quad (8)$$

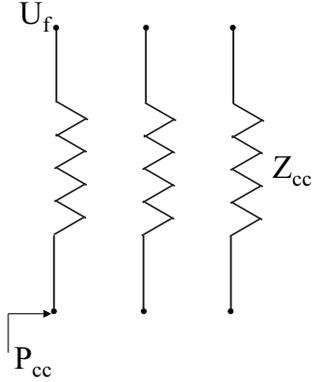


Fig. 3. Esquema simplificado de distribución

De acuerdo a la definición de desbalance:

$$u_2 = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_{cc}I_2}{|U_f - Z_{cc}I_1|} \quad (9)$$

Si la caída en la impedancia Z_{cc} es pequeña, el denominador de (9) se puede aproximar por U_f , por lo que entonces u_2 queda:

$$u_2 \approx \frac{Z_{cc}I_2}{U_f} = \frac{Z_{cc}kI_1U_f3}{U_fU_f3} \quad (10)$$

Donde

$$k = \frac{I_2}{I_1} \quad (11)$$

es el desbalance en corriente.

Tomando en cuenta que la potencia de cortocircuito S_{cc} se define como (12) y que la potencia aparente del sistema se expresa como (13).

$$S_{CC} = \frac{U^2}{Z_{cc}} \quad (12)$$

$$S_{CN} = 3U_fI_1 \quad (13)$$

la expresión (10) queda como (14).

$$u_2 \approx k \frac{S_{CN}}{S_{CC}} \quad (14)$$

En una red de distribución con su máxima carga, es normal que la relación $\frac{S_{CN}}{S_{CC}}$ sea del orden de 1/20 dado los valores usuales de 5% de la impedancia de cortocircuito de un transformador de distribución.

Si se toma como límite para el desbalance de tensión el valor de 2% propuesto por la norma IEC 61000-2-2, la ecuación (14) permite concluir que el desbalance máximo en corriente compatible con el desbalance admisible en tensión debe ser 40%.

Es éste el valor máximo que se propone para el desbalance en corriente para los usuarios en el proyecto de reglamento

presentado en Uruguay. A excepción de este caso, en ninguno de los reglamentos de calidad de servicio estudiados se propone limitar el desbalance en corriente, sólo se establecen límites para el desbalance en tensión.

Respecto a la situación normal donde la potencia aparente contratada supera la potencia disponible en virtud de factores de simultaneidad de las cargas que aplica el distribuidor, también es razonable suponer que los desbalances de los diversos clientes de un sistema de distribución compensan mutuamente sus desbalances individuales.

V-A. Análisis de metodologías de cálculo para el desbalance en corriente

Para determinar el índice de desbalance en corriente definido como en (15) en forma precisa se deben determinar las componentes de secuencia para la corriente a partir de las componentes de las corrientes de línea con una transformación análoga a la presentada en (2).

$$i_2 = 100 * \frac{I_2}{I_1} \quad (15)$$

La normativa internacional no propone fórmulas alternativas para simplificar la determinación del desbalance en corriente. La fórmula 3 propuesta por la norma IEC 61000-4-30, reformulada para la corriente, proporciona un cálculo exacto del índice de desbalance en corriente si el sistema de corrientes no tiene componente homopolar. Cuando se trata de obtener una expresión similar en un sistema de corrientes con componente homopolar, no se llega a una expresión independiente de los desfases entre las corrientes de cada fase y la expresión que se obtiene es sumamente complicada del punto de vista computacional.

En resumen, parece más razonable cuando se quiere hallar el desbalance en corriente, en un sistema con componente homopolar no nula, que se midan los módulos de las corrientes de fase con sus correspondientes desfases y se apliquen las fórmulas de transformación de componentes fásicas a componentes simétricas para hallar los módulos de la corriente inversa y directa a los efectos de determinar exactamente el desbalance del sistema.

VI. CONCLUSIONES

Se analizaron las normas y reglamentaciones haciendo un estudio comparativo de las diferentes formas de caracterizar y medir el desbalance de tensión.

Del análisis surge que la opción de adoptar la norma IEC 61000-4-30 es factible desde el punto de vista de la complejidad de medida y máxime teniendo en cuenta que ofrece valores sin error.

Respecto al valor recomendado de 2%, es compatible con criterios internacionales además de ser un valor máximo aconsejado desde el punto de vista de los perjuicios a los que son sometidas ciertas cargas con alimentación desbalanceada.

Se presentó con qué criterio determinar razonablemente el nivel máximo admisible para el desbalance de carga de tal forma de ser compatible con redes reales.

Finalmente se establece cómo se debe medir el desbalance de corriente y la imposibilidad de utilizar fórmulas simplificadas en el caso de sistemas con neutro.

REFERENCES

- [1] "IEC 60050(161)," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, international Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 161: Electromagnetic compatibility.
- [2] "IEEE std 1159," IEEE, Tech. Rep., 1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [3] "IEC 61000-4-30," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 2003, electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.
- [4] "EN 50160," CENELEC, Tech. Rep.
- [5] "IEC 61000-2-2," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.