

ESQUEMA DE COMPENSACIÓN A USUARIOS POR MALA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

A. E. Díez ^{*†}, J. A. Bohórquez ^{*}, J. A. Lopera ^{*}, G. J. Suárez ^{*}

^{}Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.*

Recibido 12 Abril 2010; aceptado 5 Junio 2010
Disponibile en línea: 25 Junio 2010

Resumen: En el presente artículo se presenta una propuesta para incluir los indicadores THDv, Pst y Vumb, definidos inicialmente por (CREG, 1998) como estándares de la calidad de la potencia y posteriormente incluidos en (CREG, 2005a) como variables necesarias para medir la calidad de la potencia, en el esquema actual de calidad del servicio de distribución definido en (CREG, 2008).
Copyright © 2007 UPB.

Palabras clave: Calidad de Potencia, THDv, Vumb, Pst, Usuarios.

Abstract: This paper presents a proposal to include THDv, Pst and Vumb indicators in the actual scheme of distribution power quality, defined in (CREG, 2008).

Keywords: Power Quality, THDv, Vumb, Pst, Users.

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1998, la regulación define los estándares de la calidad de la potencia, sin embargo sólo contempla el autocontrol y la compensación a usuarios por la duración y la frecuencia de las interrupciones en el servicio de energía.

(CREG, 2000) publica la metodología definitiva para el cálculo, seguimiento y control de indicadores DES y FES, propuesta inicialmente por (CREG, 1998) y (CREG, 2004) establece los límites para los indicadores DES y FES actualmente vigentes.

(CREG, 2005), establece los requerimientos mínimos de los equipos de medición para el monitoreo de los estándares de la calidad de la potencia definidos por (CREG, 1998), adicionalmente establece la metodología de medida, registro, recolección y reporte de valores e indicadores.

(CREG, 2008) establece que la calidad del servicio de los sistemas de distribución local, se debe evaluar trimestralmente en términos de la calidad media brindada por el operador de red a sus usuarios, comparada con una calidad media de referencia establecida para cada período de evaluación. Las calidades medias se expresan como un índice de discontinuidad que relaciona la cantidad promedio de Energía No Suministrada (ENS) por cada unidad de Energía Suministrada (ES).

De esta manera a cada operador de red se le aplica un esquema de incentivos el cual, le hará disminuir o aumentar su cargo por uso, dependiendo de la calidad del servicio prestado. Adicionalmente establece un esquema de compensaciones a los usuarios “peor servidos”, para garantizar un nivel mínimo de calidad a los usuarios.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 4488388 ext 6750.
E-mail: andresediez@yahoo.com (Andrés Emiro Díez Restrepo).

Esta nueva metodología establecida por (CREG, 2008), deberá reemplazar el esquema vigente de la calidad del suministro establecido en (CREG, 2000).

Actualmente los diferentes operadores de red se encuentran realizando el proceso de medida, registro, recolección y reporte de valores e indicadores establecidos por (CREG, 2005), mientras se definen mecanismos de seguimiento y control que garanticen el cumplimiento de los indicadores y a su vez el buen producto suministrado a los usuarios.

Dada la necesidad regulatoria de establecer un mecanismo de seguimiento y autocontrol, y considerando el proceso de medición y registro de los indicadores exigidos por (CREG, 2005), por parte de los operadores de red, se realiza una propuesta de incluir dentro de los indicadores de la calidad de la potencia, los indicadores THDv, Vumb y Pst.

2. INDICADORES DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA PROPUESTOS

Dadas las nuevas directrices de la Regulación Nacional presentadas en (CREG, 2008), la cual sólo considera la indemnización a los usuarios peores servidos por la discontinuidad del servicio, es necesario disponer de un esquema de compensación a usuarios por el incumplimiento de los límites de los indicadores THDv, Vumb y Pst, que garanticen la buena calidad de la potencia eléctrica y contribuyan al mejoramiento continuo del sector.

La justificación para utilizar los indicadores propuestos se basa en: que son ampliamente conocidos a nivel nacional e internacional y que son establecidos por (CREG, 2005) como indicadores para medir la calidad de la potencia.

Se presenta entonces, el esquema de cálculo propuesto para los indicadores THDv, Vumb y Pst. La propuesta se basa en el valor equivalente de la energía suministrada con mala calidad y por fuera de los límites permitidos por la regulación.

Cada indicador se define y se presenta acompañado de un método de cálculo propuesto, considerando un período de liquidación trimestral similar al propuesto por (CREG, 2008) y según el período de registro cada 10 minutos propuesto en

(CREG, 2005a), para los indicadores THDv, Vumb y Pst.

2.1. Indicador de Distorsión Armónica de Tensión – THDv

La potencia ideal suministrada a un usuario es equivalente a:

$$P_{\text{Ideal}} = \frac{(V_{60\text{Hz rms}})^2}{R_{\text{equiv}}} \quad (1)$$

De manera similar, la potencia armónica suministrada se puede expresar como:

$$P_{\text{Armónica}} = \frac{\sum_{i=2}^n (V_{Hi \text{ rms}})^2}{R_{\text{equiv}}} \quad (2)$$

Se puede entonces, expresar la potencia armónica suministrada en función de la potencia ideal como se muestra en la siguiente expresión.

$$\frac{P_{\text{Armónica}}}{P_{\text{Ideal}}} = \frac{\sum_{i=2}^n (V_{Hi \text{ rms}})^2}{(V_{60\text{Hz rms}})^2} \quad (3)$$

Adicionalmente, la distorsión armónica total está definida como:

$$\text{THDv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n (V_{Hi \text{ rms}})^2}{(V_{60\text{Hz rms}})^2}} \quad (4)$$

Al integrar las relaciones (3) y (4), anteriormente presentadas, se obtiene la expresión equivalente para la potencia armónica suministrada o potencia con mala calidad como se presenta a continuación:

$$P_{\text{Armónica}} = P_{\text{Ideal}} \times \text{THDv}^2 \quad (5)$$

donde:

P_{Ideal} : Potencia rms equivalente a partir de una onda a 60 Hz y libre de componentes armónicas diferentes a la fundamental.

$V_{60\text{Hz rms}}$: Tensión rms a partir de la onda de tensión a frecuencia fundamental (60 Hz).

R_{equiv} : Resistencia equivalente utilizada para obtener una potencia media a partir de una tensión rms dada.

$P_{\text{armónica}}$: Potencia rms compuesta por las potencias armónicas rms obtenidas a partir de las diferentes componentes armónicas de tensión.

$V_{\text{Hi rms}}$: Tensión armónica de cada componente.

THDv: Distorsión armónica total de tensión.

Después de definir la potencia armónica suministrada o con mala calidad, en función del indicador THDv, se puede proceder a establecer el indicador.

Si se considera el intervalo de medición propuesto por (CREG, 2005), los límites propuestos por (IEEE, 1992), en cuanto a distorsión armónica total de la onda de tensión (THDv) y la liquidación trimestral semejante a la propuesta por (CREG, 2008), el indicador se puede definir como:

$$I \text{ PAsci} = \text{Max} [0; \text{THDvi} - \text{THDvm}] \quad (6)$$

donde:

$I \text{ PAsci}$: Indicador de la potencia armónica suministrada en el circuito c en el período i-ésimo.

THDvi: Distorsión armónica total registrada en el período i-ésimo.

THDvm: Distorsión armónica total máxima permitida por la regulación, según IEEE (1992), El THDv debe ser inferior al 5%. para los niveles de tensión 1, 2 y 3.

i: Cada uno de los períodos de medida cada diez minutos durante un trimestre.

A su vez se puede establecer la energía armónica suministrada y el valor que se debe compensar a los usuarios durante el período de medida trimestral.

$$\text{EATc [kWh]} = \sum_{i=1}^n (I \text{ PAs}_i)^2 \times \frac{3 \times \text{CM}_p}{\text{DT}_p \times 24 \times 6} \quad (7)$$

$$\text{VCAc [\$/]} = \text{EATc} \times \text{CI} \quad (8)$$

donde:

CI: Costo Estimado de la energía servida con mala calidad. Este valor se debe definir posteriormente como complemento a este trabajo, junto con la forma de actualizarse al mes en el cual se efectúa la compensación.

CM_p : Consumo promedio mensual del usuario durante el trimestre p de evaluación, en kWh.

DT_p : Días del trimestre p.

EATc: Energía armónica total en kWh a compensar en el circuito c.

n: Número de mediciones registradas durante el trimestre cada 10 minutos según CREG (2005a).

VCAc: Valor a Compensar al usuario, ya sea trifásico o monofásico, por el incumplimiento del indicador THDv en el circuito c, al cual se encuentra conectado el usuario.

i: Cada uno de los períodos de medida cada diez minutos durante un trimestre.

2.2. Indicador de Desbalance de Tensión – V_{umb}

La potencia ideal suministrada a un usuario es equivalente a:

$$P_{\text{Ideal}} = \frac{(V_{1 \text{ rms}})^2}{R_{\text{equiv}}} \quad (9)$$

De manera similar, la potencia suministrada por las componentes de secuencia negativa y cero se puede expresar como:

$$P_{V_{\text{umb}}} = \frac{\sqrt{V_{2 \text{ rms}}^2 + V_{0 \text{ rms}}^2}}{R_{\text{equiv}}} \quad (10)$$

Para el cálculo de este indicador no se considera la componente de secuencia cero debido a que los medidores sólo suministran registros de secuencia positiva y negativa para el cálculo del desbalance. De esta forma se puede expresar la potencia de secuencia negativa o potencia generada por desbalance de tensión, suministrada en función de la potencia ideal como se muestra en la siguiente expresión.

$$\frac{P_{Vumb}}{P_{Ideal}} = \left(\frac{V_{2 \text{ rms}}}{V_{1 \text{ rms}}} \right)^2 \quad (11)$$

Adicionalmente, el desbalance de tensión está definido como:

$$Vumb = \frac{V_{2 \text{ rms}}}{V_{1 \text{ rms}}} \quad (12)$$

Al integrar las relaciones presentadas anteriormente, la expresión equivalente para la potencia por desbalance o potencia con mala calidad es:

$$P_{Vumb} = P_{Ideal} \times Vumb^2 \quad (13)$$

donde:

P_{Ideal} : Potencia rms equivalente ideal de suministro.

$V_{1 \text{ rms}}$: Tensión rms de secuencia positiva.

Z_{equiv} : Resistencia equivalente utilizada para obtener una potencia media a partir de una tensión rms dada.

P_{S02} : Potencia rms compuesta por las componentes de secuencia negativa y secuencia cero.

$V_{0 \text{ rms}}$: Tensión rms de secuencia cero.

$V_{2 \text{ rms}}$: Tensión rms de secuencia negativa.

P_{Vumb} : Potencia rms generada por el desbalance en la onda de tensión.

$Vumb$: Desbalance de tensión.

Después de definir la potencia suministrada por el desbalance de tensión o con mala calidad, en función del indicador $Vumb$, se puede proceder a establecer el indicador.

Si se considera el intervalo de medición propuesto por (CREG, 2005), los límites propuestos por (IEEE, 1992), en cuanto a desbalance de tensión y la liquidación trimestral semejante a la propuesta por (CREG, 2008), el indicador se puede definir como:

$$I_{PDSci} = \text{Max} [0; Vumb_i - Vumbm] \quad (14)$$

donde:

I_{PDSci} : Indicador de la potencia por desbalance suministrada en el período de registro i -ésimo.

$Vumb_i$: Desbalance de tensión registrado en el período i -ésimo.

$Vumbm$: Desbalance de tensión máximo permitido por la regulación, según (IEEE, 1992), el desbalance debe ser inferior al 2%.

i : Cada uno de los períodos de medida cada diez minutos durante un trimestre.

A su vez se puede establecer la energía suministrada por desbalance de tensión y el valor que se debe compensar a los usuarios durante el período de medida trimestral.

$$EDTc [\text{kWh}] = \sum_{i=1}^n (I_{PDs_i})^2 \times \frac{3 \times CM_p}{DT_p \times 24 \times 6} \quad (15)$$

$$VCDTc [\text{\$}] = EDTc \times CI \quad (16)$$

donde:

CI : Costo Estimado de la energía servida con mala calidad. Este valor se debe definir posteriormente como complemento a este trabajo, junto con la forma de actualizarse al mes en el cual se efectúa la compensación.

CM_p : Consumo promedio mensual del usuario durante el trimestre p de evaluación, en kWh.

DT_p : Días del trimestre p .

$EDTc$: Energía por desbalance total en kWh a compensar en el circuito c .

n : Número de mediciones registradas durante el trimestre cada 10 minutos según CREG (2005).

$VCDTc$: Valor a Compensar al usuario trifásico por el incumplimiento del indicador $Vumb$ en el circuito c , al cual se encuentra conectado el usuario.

i : Cada uno de los períodos de medida cada diez minutos durante un trimestre.

2.3. Indicador de fluctuaciones de tensión - Pst

Para el caso del indicador Pst, se propone utilizar el equivalente de interrupción para valores de Pst superiores a uno (1,0), mediante las curvas de susceptibilidad a Pst constante. Estas curvas establecen que para un valor de Pst superior a uno (1,0) existe un equivalente de interrupción rectangular (tensión de suministro = 0 p.u.), que varía según la magnitud del Pst.

Al parametrizar las curvas presentadas en la Figura 1, se debe establecer que para cada valor de Pst superior a (1,0); se puede obtener un valor de interrupción rectangular (tensión de suministro = 0 p.u.) equivalente. Así para un valor de Pst = 2, la interrupción equivalente es aproximadamente 2 ms.

A continuación en [Figura 1](#), se presenta las curvas de susceptibilidad a Pst constante, explicadas por ([Lopera y Díez, 2005](#)) y contenidas en ([CREG, 2005b](#)).

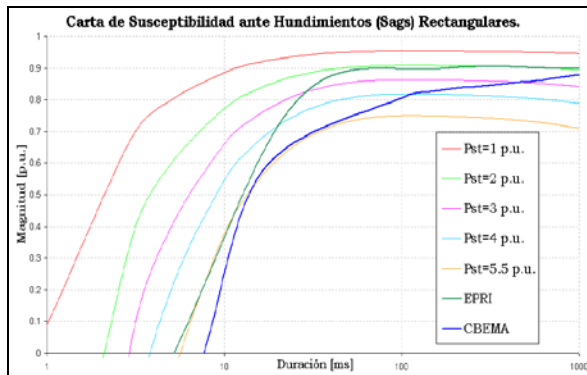


Fig. 1. Curvas de susceptibilidad Pst constante.
Tomada de ([Lopera y Díez, 2005](#)).

La parametrización de las curvas de susceptibilidad a Pst constante se debe realizar como complemento a este trabajo, este documento sólo presenta el fundamento y la metodología de cálculo de los indicadores y las compensaciones respectivas.

Para establecer las interrupciones equivalentes causadas por valores de Pst superiores a (1,0); se propone el siguiente método.

Si $Pst_i \leq 1$, entonces $IPst_i = 0$

Si no, $IPst_i = TIPst_i$

$$TTIPst = \sum_{i=1}^n TIPst_i \quad (17)$$

donde:

Pst_i: Valor del Pst en un período i-ésimo de registro.

IPst_i: Indicador de Pst para un i-ésimo período.

TIPst_i: Tiempo [h] de las interrupciones en el i-ésimo período, causadas por el incumplimiento del Pst, los diferentes valores del TIPst_i se obtienen de la parametrización de las curvas de susceptibilidad a Pst constante.

TTIPst: Tiempo total [h] de la interrupción causada por valores de Pst superiores a uno (1,0).

n: Número de mediciones registradas durante el trimestre cada 10 minutos según CREG (2005).

Finalmente, se puede establecer el valor de la compensación a los usuarios por las interrupciones causadas por el incumplimiento del indicador Pst de la siguiente manera.

$$VCT_{Pst}^c [\$] = TTIPst \times \frac{3 \times CM_p}{DT_p \times 24} \times CI \quad (18)$$

donde:

CI: Costo Estimado de la energía servida con mala calidad. Este valor se debe definir posteriormente como complemento a este trabajo, junto con la forma de actualizarse al mes en el cual se efectúa la compensación.

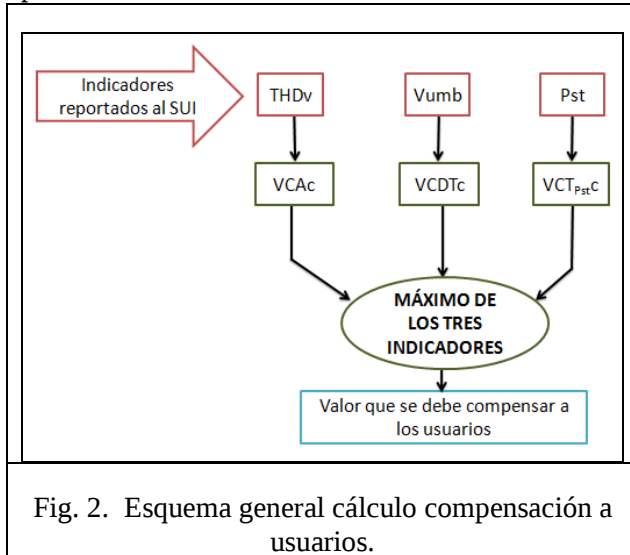
CM_p: Consumo promedio mensual del usuario durante el trimestre p de evaluación, en kWh.

DT_p: Días del trimestre p.

VCT_{Pst}^c: Valor a Compensar al usuario, ya sea trifásico o monofásico, por el incumplimiento del indicador Pst en el circuito c, al cual se encuentra conectado el usuario.

2.4. Esquema general de compensación

En Finalmente se presenta en la [Figura 2](#), el esquema general para el cálculo de la compensación a usuarios por la mala calidad de potencia.



3. CONCLUSIONES

Los indicadores THDv y Vumb, se calculan utilizando los valores rms de las ondas de tensión aplicadas a una resistencia equivalente constante, por medio de las relaciones presentadas en este trabajo se puede expresar la potencia promedio y calcular la potencia suministrada por desbalance de tensión o por contenido armónico.

La propuesta presentada en este trabajo, pretende proporcionar las primeras iniciativas para autocontrol de la calidad de la potencia en Colombia, al incluir los indicadores THDv, Vumb y Pst, en un esquema simple y compatible con lo propuesto en (CREG, 2008).

El esquema presentado busca generar una metodología fácil y rápida para el cálculo de los indicadores, la comparación con los límites permitidos y el cálculo de compensaciones a los usuarios afectados por la mala calidad de la potencia.

Hace falta investigación sobre el comportamiento actual del sistema Colombiano para validar los límites actualmente vigentes y sobre las metodologías que pueden utilizar los Operadores de Red para el control de usuarios que afectan la calidad de la potencia.

REFERENCIAS

- BOHÓRQUEZ, A. (2004) Evaluación de Fenómenos Calificadores de la Calidad de la Potencia Eléctrica. Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana.
- BOLLEN, M. (2000) Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and interruptions. New York, IEEE Press.
- CREG (1998) Resolución 070. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2000) Resolución 096. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2002) Resolución 082. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2004a) Resolución 103. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2004b) Documento-042. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2005a) Resolución 024. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2005b) Documento-017. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- CREG (2008) Resolución 097. Bogotá, Colombia. Comisión De Regulación De Energía y Gas.
- ICONTEC (1989) Tensiones nominales en sistemas de energía eléctrica a 60 Hz en redes de servicio público. NTC 1340. Bogotá, Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación.
- ICONTEC (2002) Calidad de la potencia – CPE - Definiciones y términos fundamentales. NTC 5000. Bogotá, Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación.
- IEC (1990) Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment - Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. IEC 61000-2-2. Geneva, International Electro-technical Commission.
- IEC (1997) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 15: Flickermeter - Functional and design specifications. IEC 61000-4-15. Geneva, International Electro-technical Commission.

- IEEE (1992) Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE 519. New York, Institute of Electric and Electronic Engineers.
- IEEE (1995) Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Standard 1159. New York, Institute of Electric and Electronic Engineers.
- IEEE (2001) Voltage Sags Indices. IEEE Standard 1564. New York, Institute of Electric and Electronic Engineers.
- LOPERA, J y DIEZ, A. (2005) Modelo sintético y sistémico para la evaluación de la calidad de la potencia. Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana.

SOBRE LOS AUTORES

Andrés Emiro Díez Restrepo

Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana. Maestría en Transmisión y Distribución de energía. Área de interés investigativo: Calidad de la Potencia Eléctrica.

Armando Bohórquez Cortazar

Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana. Maestría en Transmisión y Distribución de energía. Área de interés investigativo: Calidad de la Potencia Eléctrica.

Jairo Augusto Lopera Pérez

Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana. Maestría en Transmisión y Distribución de energía. Área de interés investigativo: Calidad de la Potencia Eléctrica.

Gabriel Jaime Suárez Londoño

Profesor de la Universidad Pontificia Bolivariana. Especialización en Transmisión y Distribución de energía. Área de interés investigativo: Calidad de la Potencia Eléctrica.