

Comportamiento de las Armónicas de Voltaje y Corrientes, Debido a Desbalances de Líneas en un Sistema Eléctrico de Potencia con Cargas no Lineales

L.A González-Vargas¹ F. HuertaValenzuela² F.S. Sellschopp³

¹ *Resumen*— Se presenta el análisis y efecto de los desbalances de voltaje en una fase de la red de distribución industrial que incluye filtros pasivos sintonizados para reducción armónica y corrección del factor de potencia. El estudio considera diferentes niveles de abatimientos de voltaje para una de las fases del sistema trifásico. Además se incluye una condición de desbalance crítico aceptable para establecer diferencias notables. La condición de operación de los filtros armónicos en este estudio es que están sintonizados para la atenuación de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónica cuando la red es balanceada. En este sentido, el cambio de condición a la que el filtro está sometido con los desbalances, se espera la existencia de armónicas de secuencias cero, positiva y negativa. Asimismo se realizarán evaluaciones de índices armónicos dados en la norma IEEE519 para verificar su afectación debido a desbalances. El análisis se realiza con el software de simulación versión estudiantil PSCAD (Power Systems CAD)

Palabras clave: abatimientos desbalanceados, distorsión armónica, filtro sintonizado, armónicos, carga no lineal, Power Systems CAD.

Abstract-The effect analysis of voltage imbalance occurs in a phase of industrial distribution network that includes passive filters tuned to harmonic reduction and power factor correction. The study considers different levels of voltage drops of the phases for the three phase system. Also critical condition for establishing acceptable imbalance notable differences is included. The operating condition of harmonic filters in this study is that are tuned for attenuating 5th, 7th, 11th and 13th harmonic when the network is balanced. In this sense, the change of status to which the filter is subjected to imbalances are expected existence of harmonic zero sequence, positive and negative. Harmonic assessments given indexes were also made in the standard IEEE519 to verify their involvement due to imbalances.

The analysis is performed with the simulation software PSCAD student version (Power Systems CAD).

Keywords: unbalanced drops, harmonic distortion, tuned harmonic filter, non-linear load, Power Systems CAD.

I. INTRODUCCIÓN

En el proceso de elaboración de un reglamento sobre calidad de servicio o señales en un sistema de distribución de energía eléctrica existen distintos índices 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 en las señales, algunos de los índices a controlar son los armónicos de tensión y corriente, los huecos de tensión, abatimientos cortos, sobrevoltajes cortos, parpadeos y el grado de desbalance en tensión y en corriente, [1-6].

El estudio de las redes eléctricas trifásicas sometidas a perturbaciones armónicas generalmente contempla una red balanceada en donde cada armónico existente en la red está asociado a una de las componentes simétricas, [2,5,6]. Por una parte, el análisis armónico se realiza en estado estacionario y por otra parte las armónicas se pueden asociar directamente con la red de secuencia positiva, negativa o cero; esto se puede deducir a través de la representación de la serie de Fourier de los voltajes de fase, [2].

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 variables trifásicas no son iguales, [1]. El principal motivo de la existencia de redes trifásicas desbalanceadas lo constituye la conexión de cargas monofásicas a lo largo de la red en forma no balanceada, así como fallas existentes en una de las fases de dicha red. De hecho, la existencia de fallas en los conductores de alimentación conlleva a la aparición de abatimientos de voltaje de diferente duración y que pueden ser abatimientos de voltaje trifásicos balanceados o desbalanceados.

La mitigación armónica en redes trifásicas considera el diseño de filtros armónicos sintonizados y/o des-sintonizados bajo condiciones balanceadas y de estado estable. De esta forma, el diseño idealizado del filtro se puede ver limitado debido a diversas perturbaciones que pueden existir en la red, por lo cual, los índices armónicos obtenidos con dicho filtro pueden llegar a ser diferentes a lo calculado, [2, 5, 6].

¹ González Vargas Luis A. (luisglzvar@gmail.com), ² Francisco Huerta Valenzuela (fhv_1@hotmail.com). Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico S/N, Col. Periférico C.P. 35150 Cd. Lerdo Durango México. ³ Sellschopp S. Fco. Sergio (sellschopp@hotmail.com), Instituto Tecnológico de la Laguna.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En este estudio se ha considerado incluir un desbalance crítico aceptable. Se pretende revisar el comportamiento de las distorsiones armónicas de voltaje y corrientes, así como factor de potencia, voltaje y corriente rms, y las potencias. La carga no lineal es un convertidor de 6 pulsos que genera las armónicas típicas y una potencia de 933 kVA a 400V y fp de 0.8 en atraso.

A. SECUENCIAS DE FASE DE ARMÓNICAS.

En un sistema trifásico balanceado bajo condiciones no senoidales, los distintos componentes de frecuencias armónicas pueden expresarse por medio de las series de Fourier de los voltajes de fase, [2].

$$V_a(t) = V_1 \cos(\xi_0 t) + V_2 \cos(2\xi_0 t) + V_3 \cos(3\xi_0 t) + \dots + V_4 \cos(4\xi_0 t) + \dots \quad (1)$$

$$V_b(t) = V_1 \cos(\xi_0 t - 120^\circ) + V_2 \cos(2\xi_0 t + 120^\circ) + V_3 \cos(3\xi_0 t) + V_4 \cos(4\xi_0 t - 120^\circ) + \dots \quad (2)$$

$$V_c(t) = V_1 \cos(\xi_0 t + 120^\circ) + V_2 \cos(2\xi_0 t - 120^\circ) + V_3 \cos(3\xi_0 t) + V_4 \cos(4\xi_0 t + 120^\circ) + \dots \quad (3)$$

El voltaje de línea entra fases *a* y *b* se calcula con la operación de restar el voltaje de fase *b* de la fase *a*, y con identidades trigonométricas se llega a una expresión simplificada:

$$V_{ab} = V_a(t) - V_b(t) \\ V_{ab} = \sqrt{3} \cdot [V_1 \cos(\xi_0 t + 30^\circ) + V_2 \cos(2\xi_0 t - 30^\circ)] + V_4 \cos(4\xi_0 t + 30^\circ) + V_5 \cos(5\xi_0 t - 30^\circ) + \dots \quad (4)$$

A partir de la ec. (4) se observa que los ángulos de desfase son de +30° y -30°; los signos están directamente asociados a las secuencias positiva y negativa, respectivamente. Se aprecia que la secuencia cero se elimina de los voltajes de línea y no aparece en la ec. (4); esta secuencia estaría asociada a un desfase de 0°. En este sentido, la asociación de los signos del desfase con los índices armónicos de los voltajes indica aquel voltaje armónico asociado a una de las secuencias de redes, [2, 5, 6].

Considerando una variable *k* que tiene valores enteros positivos mayores que cero, (*k*=1,2,3,...), las armónicas del orden 3*k*+1 son de secuencia positiva, (de rotación directa) que causan calentamiento en conductores, disparo en circuitos de protección, calentamiento y aceleración de motores. Las armónicas del orden 3*k*-1 tienen secuencia negativa, (de rotación inversa) que

provocan calentamiento y problemas en motores debido a que tratan de frenarlo por medio de campos magnéticos de rotación inversa, también causan calentamiento en conductores. Finalmente las armónicas del orden 3*k* tienen secuencia cero y su conducción se da por el hilo neutro en un sistema trifásico a 4 hilos, causando sobrecalentamiento y sobrecarga en el neutro. Puede deducirse que para sistemas desbalanceados no se obtendrá una expresión directamente asociada entre signos de desfase y las señales armónicas ya que a manipulación de las expresiones con identidades trigonométricas pero con diferentes amplitudes como en (4), dará como resultado que cada voltaje armónico tendrá una componente de secuencia cero, positiva y negativa. Cabe mencionar que el análisis de circuitos trifásicos a frecuencia fundamental tiene las tres redes de secuencias; cero, positiva y negativa. Por lo tanto, por cada armónica existente en la red eléctrica desbalanceada se tendrán las tres secuencias; cero, positiva y negativa, [2].

TABLA 1. SECUENCIAS DE ARMÓNICAS

Armónica	Secuencia	Armónica	Secuencia
1	+	7	+
2	-	8	-
3	0	9	0
4	+	10	+
5	-	11	-
6	0	12	0

B. CÁLCULO DEL DESBALANCE EN REDES TRIFÁSICAS

Las componentes de secuencia se derivan de las componentes de fase a través de la transformación de Fortescue, usando la matriz de transformación de (5).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde el operador *a* es: *a* = 1 e^{j(120)}

El grado de desequilibrio se expresa como en (6), donde *V*₂ y *V*₁ son las componentes de secuencia negativa y positiva de la tensión de línea, respectivamente.

$$u_2 = \frac{V_2}{V_1} \quad (6)$$

Una fórmula alternativa dada en [1] se calcula con los voltajes de línea.

$$U_2 = 100 \cdot \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6S}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6S}}} \quad (7)$$

$$S = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (8)$$

En [3] se recomienda que el índice de desbalance en un suministro eléctrico no exceda el 2 %. En este trabajo se ha contemplado considerar el límite del 5%.

C. SINTONIZACIÓN DE FILTROS ARMÓNICOS PASIVOS

Los filtros pasivos de armónicas tienen una doble función en la red eléctrica, por una parte son el medio más común para corregir el factor de potencia y por la otra ofrecen una trayectoria de baja impedancia para drenar las corrientes armónicas existentes.

Los filtros pasivos sintonizados a frecuencias armónicas se diseñan considerando condiciones de operación estable y balanceada, aunque durante su funcionamiento se ven sometidos a comportamientos dinámicos por cambios de voltaje, corriente, potencia, resonancia y al conectarlos y desconectarlos, [2, 5, 6].

El diseño de un filtro pasivo sintonizado inicia desde la selección del orden del filtro, aunque comúnmente se selecciona el de primer orden formando una rama RLC serie, donde la sintonización se da para una sola armónica. Después es necesario seleccionar la capacidad adecuada del capacitor para aportar la potencia reactiva suficiente para corregir el factor de potencia a la frecuencia fundamental. Enseguida se deberá revisar el nivel del voltaje en que operará el capacitor, así como los valores de voltaje máximos y mínimos que puedan originarse en el punto de conexión de los capacitores, ya que la potencia del capacitor se ve afectada con el cuadrado del voltaje de alimentación. En este sentido, la potencia del capacitor puede verse cuadráticamente afectada.

El valor de la reactancia del capacitor, X_C y su potencia reactiva en $kVAR_C$, se relacionan por el voltaje en el capacitor V_C como:

$$X_C = \frac{(V_C)^2}{kVAR_C} \quad (9)$$

La capacitancia del filtro C_F a frecuencia fundamental f se calcula de la siguiente manera:

$$C_F = \frac{1}{2f \cdot f \cdot X_C} \quad (10)$$

el valor de inductancia del filtro L_F se calcula con:

$$L_F = \frac{1}{(2f)^2 (rh)^2 (C_F)} \quad (11)$$

Donde h es la armónica de sintonía y r es un factor empírico donde $r < 1$.

El producto rh hace que el filtro se sintonice por debajo de la frecuencia de armónica a mitigar. El factor r reduce la posibilidad de resonancias armónicas no deseadas que podría tener lugar si los parámetros del sistema cambian, [2, 5]. Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia armónica deseada. Esto permite que el filtro opere correctamente durante mayor tiempo de su vida útil.

La resistencia del filtro R_F está basada en el *factor de calidad* del filtro, Q y el rango recomendado es de 20 a 100, [5]. Dicho factor de calidad está asociado al valor mayor y menor de la impedancia del filtro en las frecuencias de resonancia paralelo y serie, respectivamente. A mayor Q se tiene menor R_F , mayor impedancia paralelo, menor impedancia serie y mayor agudeza en impedancia a las frecuencias de resonancia.

En cambio, cuando Q tiene un valor bajo, la impedancia se comporta de manera suavizada en las frecuencias de resonancia y sus valores están por debajo de la resonancia paralelo y por encima de la resonancia serie, fig. 1.

El factor de calidad se define como:

$$R_F = \frac{X_L}{Q} \quad (12)$$

Donde R_F es la resistencia del filtro y X_L es la reactancia del inductor a 60Hz.

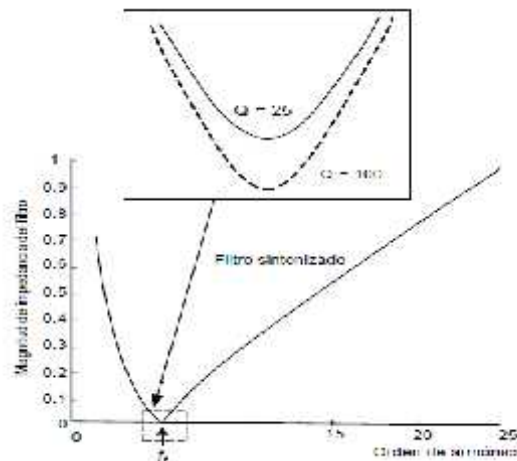


Fig. 1. Respuesta a la frecuencia para dos factores de calidad y la misma frecuencia de resonancia serie f_r

III. RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO EN PSCAD

Se trata el caso de un sistema eléctrico industrial, fig. 2, que cuenta con una carga no lineal importante consistente en un variador de velocidad de 6 pulsos de 480 V, 933 kVA y factor de potencia de 0.80 en atraso. Dicha carga esta alimentada a través de una línea corta y un transformador -Y de 1 MVA, 24/0.4 kV, Z%=4, $f=60$ Hz. La relación de corto circuito (SCR) en el lado de baja tensión es 15.5 y existe una distorsión armónica total de voltaje (THDv) y corriente (THDi) de 10.56% y 20.24% respectivamente.

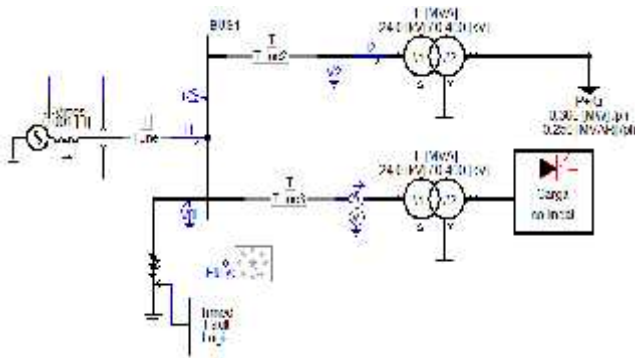


Fig. 2. Sistema eléctrico industrial en estudio

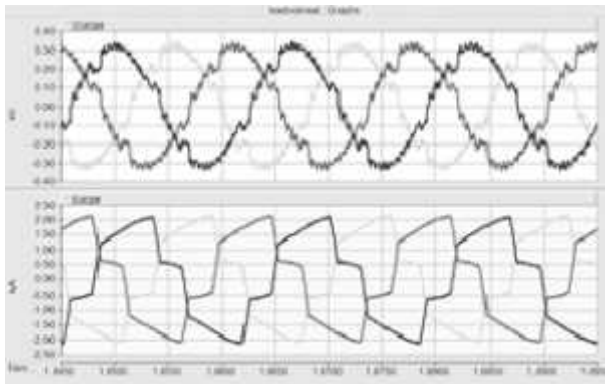


Fig. 3 Distorsión de señales del sistema eléctrico con la carga no lineal.

Dada la penalización por bajo factor de potencia, se desea elevar el fp a 0.95 en atraso mediante la instalación de un banco de capacitores para aportación de reactivos. Siguiendo la metodología en [2,5] para diseñar filtros armónicos y considerando valores de capacitores del mercado, el banco total de capacitores será de 260 kVAR a 400 V. Debido a la presencia de armónicos, y a la baja SCR que se presenta, la simple conexión del banco de capacitores genera una resonancia paralelo cercano a la armónica 9 que eleva

considerablemente los índices de distorsión a 28.61% de THDv y 73.531% de THDi.

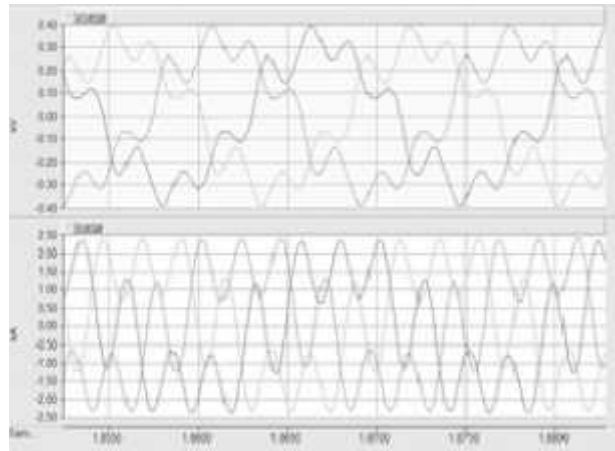


Fig. 4 Distorsión de señales del sistema eléctrico cuando se incluye el banco de capacitores para corrección de fp.

Consiguientemente se propone el diseño de filtros armónicos de orden 5, 7, 11, 13 y un pasa altas, de tal forma que se reduzcan los THD y minimizar la resonancia paralelo. La fig. 5 muestra una comparativa de la respuesta en frecuencia del sistema, sistema con banco de capacitores y sistema con filtros implementados a fin de visualizar como se comporta el sistema eléctrico en el punto de interés.

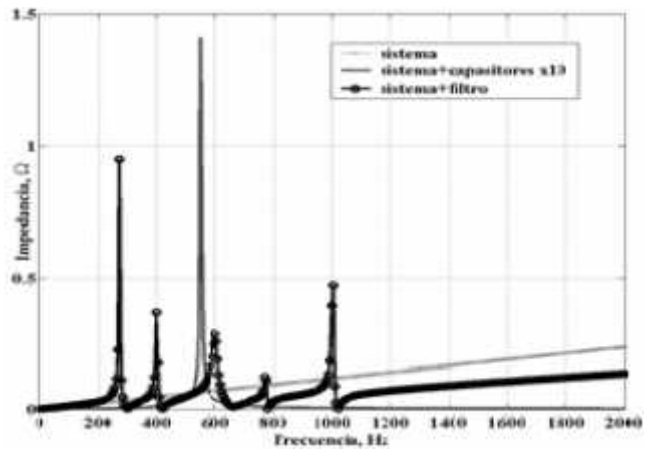


Fig. 5. Respuesta a la frecuencia del sistema eléctrico con diferentes dispositivos conectados.

Los resultados obtenidos con los filtros armónicos son satisfactorios y reducen el contenido armónico a 3.127% de THDv y 2.494% de THDi. La potencia que proporciona el sistema es de 857 kVA y un fp de 0.94 en atraso; es una mejora considerable y se puede ver en la fig. 6.

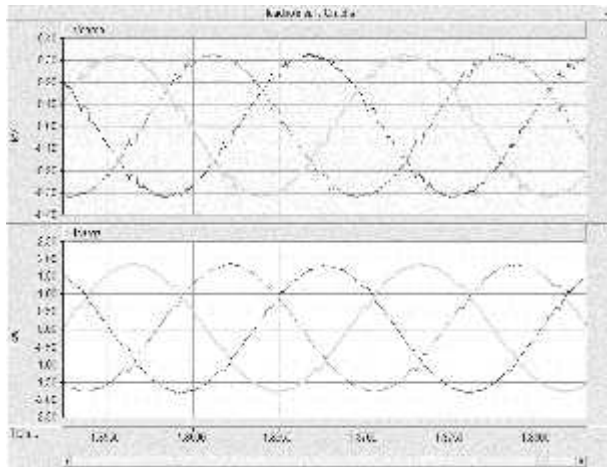


Fig. 6. Distorsión de señales del sistema eléctrico con los filtros pasivos de armónicos conectados.

Para realizar el estudio del efecto de desbalances en el sistema con filtros mitigadores de armónicos se procedió a desbalancear el sistema mediante la aplicación de una falla de fase a tierra con diferentes resistencias de contacto. La falla se encuentra en una parte del circuito que es ajena a la carga no lineal, pero produce un desbalance en la tensión de alimentación. El objetivo principal es visualizar cambios en los índices de distorsión armónica, aparición de otras componentes armónicas, así como aquellos voltajes o corrientes en los filtros que sean de consideración, debido únicamente al desbalance de tensión. Los niveles de desbalance por aplicación de una falla de fase A a tierra que se proponen son: 5%, 15% y 32%.

Cuando se tratan sistemas desbalanceados se considera el análisis de índices y factores por fase afin de dar cuenta de cómo se encuentra cada una de las fases por separado. La consideración en este trabajo para calcular los índices de distorsión armónica bajo condiciones de desbalance se aplican como en [2] para verificar índices de distorsión total.

$$THD_V = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \tag{13}$$

$$THD_I = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \tag{14}$$

Donde

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{\sum_{h \neq 1} V_{a_h}^2 + V_{b_h}^2 + V_{c_h}^2}{3}} \tag{15}$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{\sum_{h \neq 1} I_{a_h}^2 + I_{b_h}^2 + I_{c_h}^2}{3}} \tag{16}$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2}{3}} \tag{17}$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} \tag{18}$$

La condición de desbalance se obtendrá de la aplicación de una falla de fase A a tierra en el bus del lado de alta tensión. Esto generará un abatimiento de voltaje en la fase y por consecuencia un desbalance en la tensión trifásica. Para cada una de las condiciones se analizará el nivel de THD en voltaje y corriente del lado de baja tensión del transformador alimentador, así como la generación de armónicas en la corriente vistas desde las redes de secuencias.

La primera condición de desbalance por falla en el lado de alta tensión provoca un desbalance de voltaje del 5% en el lado de baja tensión. Con esta condición se observa en las figs. 7 y 8 las distorsiones de señales y la aparición de armónicas que originalmente no estaban. Los índices de distorsión armónica se calculan con (13) y (14), apreciando un ligero incremento en ambos índices comparados con el sistema balanceado con filtros armónicos. La THD_v aumentó a 3.700% y la THD_i a 2.884%, además se redujo la potencia aparente a 836 kVA y el factor de potencia calculado es de 0.94. Para la condición de desbalance de 15% en lado de carga se presenta mayor índice de distorsión, siendo de 4.30% de THD_v y 5.0% de THD_i. Además, la potencia baja a 742 kVA y un fp de 0.94. La distorsión de las señales se muestra en la fig. 9.

Finalmente con un desbalance del 32% se presenta una THD_v de 6.0% y una THD_i de 7.8%. La potencia baja a 512 kVA con un fp de 0.93. Al igual que en la fig. 8, existe un incremento de amplitud en armónicas triples que no se encontraban en el sistema balanceado, fig 11.

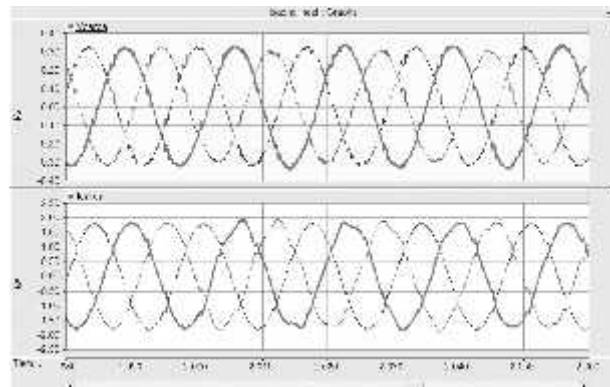


Fig. 7. Voltajes y corrientes lado carga con un desbalance del 5% a partir de 2 seg.

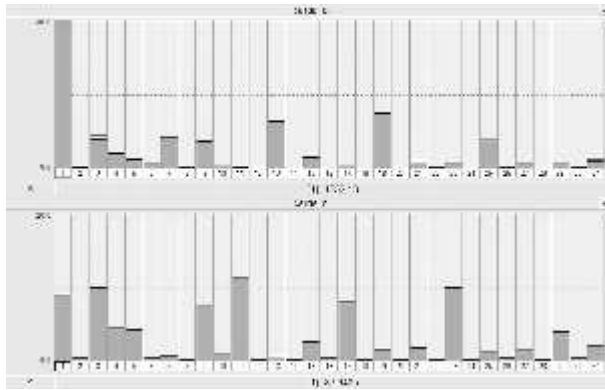


Fig. 8. Espectro armónico de corrientes en secuencia positiva y negativa con desbalance del 5%

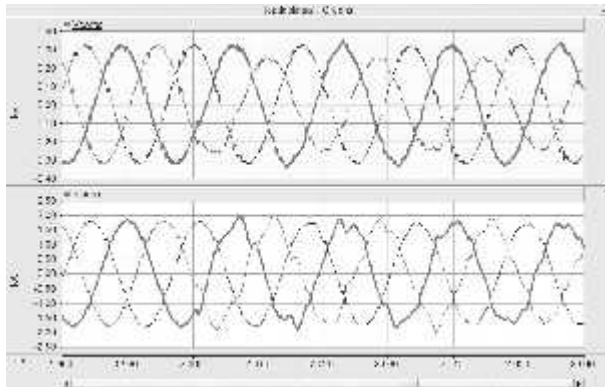


Fig. 9. Voltajes y corrientes lado carga con un desbalance del 15% a partir de 2 seg.

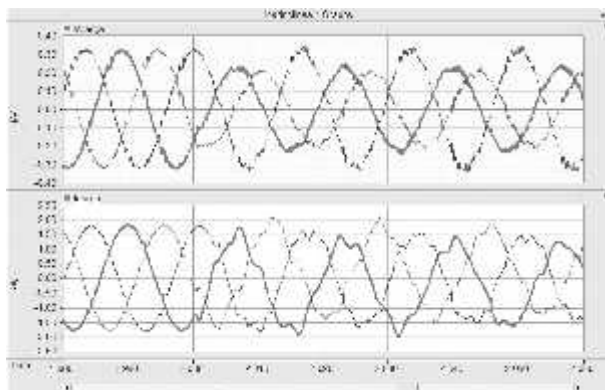


Fig. 10. Voltajes y corrientes lado carga con un desbalance del 32% a partir de 2 seg.

Con las condiciones de desbalance en tensión simuladas en este trabajo se visualiza que los índices de distorsión armónica de los voltajes y corrientes trifásicos tienden a aumentar conforme aumenta el porcentaje de desbalance. Por otra parte, las respuestas espectrales de las corrientes distorsionadas y originadas por los desbalances generan grandes cantidades de armónicas

triples. Analizando las figs. 8 y 11, se visualiza que, ante condiciones de desbalance se originan armónicas que no existían cuando el sistema era balanceado, además de que la relación “*secuencia-armónica*” ya no se respeta como lo dicho en la tabla 1.

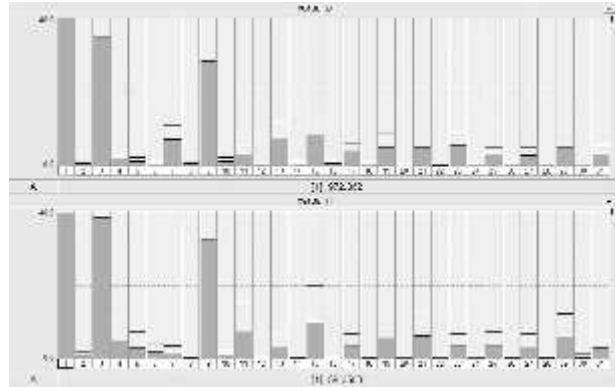


Fig. 11. Espectro armónico de corrientes en secuencia positiva y negativa con desbalance del 32%

IV. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de comportamiento del sistema eléctrico con filtros sintonizados de armónicas sometido a diferentes grados de desbalances por causa de abatimientos en el lado de alta tensión. Los resultados han mostrado que los índices trifásicos de distorsión armónica totales del voltaje y la corriente se ven considerablemente elevados.

En los sistemas trifásicos de amplio uso actualmente, supuestamente balanceados, y debido a la relación de desfase de 120 grados de cada fase, se tiene que las armónicas presentan una secuencia de sus respectivos fasores.

El análisis del comportamiento del sistema contaminado con armónicas ante desbalances de tensión permitió visualizar que se originan otras armónicas que originalmente no se encontraban en la red balanceada. Asimismo se hizo uso de las redes de secuencia para determinar el comportamiento de las armónicas generadas por los desbalances, revisando así que la teoría de armónicas desbalanceadas dan lugar a armónicas que se presentan en la red de secuencia positiva y negativa.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, por proporcionar todos los recursos necesarios para la realización del presente trabajo, por medio del Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico

VI. REFERENCIAS

- [1]. "IEC60050(161)," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, international Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility.
- [2]. Wakileh, George "Power System Harmonics: Fundamentals, Analysis, and Filter Design."Springler-Verlag Berlin Heidelberg New York 2001. ISBN 3-540-42238-2.
- [3]. IEEE. *IEEE Std. 1159-1995*: "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality"; Working Group on Monitoring Electrical Power Quality ofsc22, 1995.
- [4]. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE std 519-1992, IEEE Press.
- [5]. De la Rosa, F.C., "*Harmonics and Power Systems*," Editorial CRC Taylor and Francis Group, 2006.
- [6]. Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S and H. Wayne Beaty, "*Electrical Power Systems Quality*", Editorial McGraw-Hill, Segunda Edición, 2003.



M.C. Francisco Huerta Valenzuela.

Nació en la Ciudad de Torreón, Coah. México el 5 de agosto de 1979. Egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna de la carrera de Ingeniería Electrónica con la especialidad en comunicaciones en el año 2002. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en el Centro de Graduados del Instituto Tecnológico de la Laguna, ubicado en la ciudad de Torreón, Coah. México, en el año de 2004, en la especialidad en Control de Robots Manipuladores.

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, desempeñado el puesto de Investigador-Docente, en el Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico y en la División de Ingeniería Electromecánica respectivamente, el instituto se encuentra ubicado en la ciudad de Lerdo, Dgo. México. Cuenta con experiencia profesional en el ramo de la automatización industrial. Sus actuales líneas de investigación incluyen: Mecatrónica, diseño de controladores lineales y no lineales para sistemas electromecánicos, automatización industrial, control de movimiento, comunicaciones industriales y electrónica de control y de potencia.

VII. BIOGRAFÍA



Luis Amado. González Vargas nació en la ciudad de Lerdo, Dgo., el 25 de agosto de 1968. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Cd. Lerdo, Dgo. 2007. Recibió El grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en 2010.

Él ha participado en proyectos de investigación relacionados con estudios de la calidad de la energía en distintas empresas sus áreas de interés incluyen sistemas de potencia en régimen no senoidal y sistemas de control distribuido. M.C. González es miembro activo de la IEEE inscrito en la sociedad de potencia eléctrica.



Dr. F. S. Sellschopp, egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tepic en 1994. Obtuvo el grado de M.C. en Ingeniería Eléctrica en 1999 en el Instituto Tecnológico de La Laguna y el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el mismo instituto en 2003. Sus áreas actuales de investigación son máquinas y redes eléctricas,

calidad de la energía, estimación paramétrica y observadores.