

Impacto en la Operación de un Relé de Sobrecorriente de Tiempo Inverso por Tensión Armónica en la Red Eléctrica

C.A Morales-Bazán¹, F.S. Sellschopp-Sánchez², J.A. Basurto-Mendez³, M.A. Arjona-López³, R. Loera-Palomo³

¹Resumen— Este artículo muestra los resultados que se obtuvieron al experimentar sobre la operación de un relevador de sobrecorriente que se somete a contaminación armónica y ante el incremento de esta. La evaluación experimental se realiza en un sistema de potencia de 4 nodos que se arma con módulos didácticos que simulan un sistema de 380 KV. La inyección de contaminación armónica se realiza mediante una fuente generadora de armónicos. Los resultados de la experimentación muestran que ante el incremento de contaminación armónica se afecta en mayor medida la operación apropiada del relevador. En este caso los armónicos influyen incrementando el tiempo de operación, el cual podría ocasionar una mala operación en la coordinación de las protecciones, pudiendo tener como consecuencia daños muy importantes en los elementos a proteger del sistema de potencia.

Palabras claves—Armónicas, coordinación, relevador de sobrecorriente, sistema de potencia, tiempo de operación.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una gran diversidad de tipos de cargas que consumen energía eléctrica, donde estas cargas se pueden clasificar en dos grupos generales: cargas lineales y no lineales, [1]. Estas cargas lineales y no lineales consumen corrientes que presentan perfiles de onda senoidales y no senoidales, respectivamente, por lo que el efecto de estas corrientes sobre las tensiones de alimentadores del sistema eléctrico puede repercutir de manera diferente. Por un lado, el incremento de cargas lineales impacta principalmente en la regulación de tensión, por lo que se puede utilizar bancos de capacitores o reguladores de tensión para remediar este problema. Por el otro lado, el incremento de cargas no lineales también repercute en la regulación de tensión, pero dependiendo de las características de la red y de la relación de carga no lineal contra carga lineal, la caída de tensión estará distorsionada a tal grado que la tensión en los alimentadores puede estar también distorsionada y la solución a la regulación de tensión se puede complicar, [2].

El problema de la distorsión en la forma de onda de la tensión de las redes eléctricas es hasta cierto punto de gran

interés. Aquellos usuarios que cuentan con cargas lineales recibirán tensiones distorsionadas y por ende consumirán corrientes distorsionadas o contaminadas. Pero puede presentarse un problema más grave cuando este usuario tiene instalado un banco de capacitores para mejorar su factor de potencia, resultando en que se agrava la distorsión en tensión y corriente debido al fenómeno de resonancia. El problema no es menor para los otros usuarios que tienen instaladas cargas no lineales; los equipos no lineales constan principalmente de dispositivos con electrónica de potencia y están diseñados para recibir una alimentación senoidal a frecuencia del sistema. Dichas cargas no lineales presentan corrientes distorsionadas principalmente por corrientes a frecuencias armónicas, [2]. Por tanto, si la tensión de alimentación está distorsionada por armónicas, en consecuencia la corriente de estas cargas presentará una mayor distorsión en la corriente, pudiendo entonces verse más afectado el dispositivo no lineal y a la vez repercutir más en la distorsión de la tensión de la red eléctrica. En este mismo sentido, cualquier equipo que se encuentre conectado a la red eléctrica distorsionada, sufrirá modificaciones en su operación, pudiéndolos afectar en menor o mayor manera.

Algunos de los equipos conectados a la red eléctrica son los dispositivos de protección, donde la distorsión armónica puede influir negativamente en mayor o menor medida en el funcionamiento del relevador de protección, según su característica y diseño de operación. En estos dispositivos se menciona que un nivel de distorsión en la tensión menor al 20%, no tiene gran efecto sobre la operación de las protecciones [3]. Los interruptores y los fusibles igualmente quedan afectados en su capacidad de interrupción por la presencia de distorsión armónica. [3]. Dado que los relevadores de sobrecorriente necesitan las señales de corriente que provienen de los secundarios de los TC para operar, los relés podrían tener una operación incorrecta ya que los TC llegan a saturarse debido a la presencia de armónicos en la red eléctrica [3]. En este artículo se aborda el problema de la distorsión armónica en la tensión de la red eléctrica cuando un

¹ Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de la Laguna

s/n, Colonia Centro, C.P. 27000 Torreón, Coahuila, México. camb70@hotmail.com

dispositivo de protección por sobrecorriente debe actuar ante un escenario de falla. Se proponen un caso de contaminación armónica, donde cada armónico se incrementa para lograr un mayor índice de distorsión armónica total, y se mide el tiempo de operación del relé de sobrecorriente. Este tiempo de operación se compara contra el tiempo obtenido cuando la falla se aplica al sistema eléctrico con onda senoidal de 60 Hz. Las gráficas de tiempo contra porcentaje de distorsión se grafican tratando de obtener alguna tendencia en la forma de operación del relé de sobrecorriente.

II. DISTORSIÓN ARMÓNICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Los sistemas eléctricos están sujetos a una gran variedad de perturbaciones, y una de éstas es la distorsión armónica de corrientes y tensiones, como se muestra en la Figura 1. Los equipos que están conformados por convertidores electrónicos son las fuentes principales de contaminación armónica, provocando circulación de corrientes distorsionadas por la red eléctrica. Para que la tensión nodal en la red eléctrica esté distorsionada, puede ser porque la caída de tensión en los alimentadores es considerable o porque se presenta un fenómeno de resonancia provocado por la existencia de un circuito tanque y una corriente armónica que excita al circuito tanque, [1], [2].

Los escenarios de contaminación armónica en las redes eléctricas pueden separarse en tres causas:

- a. Tensión senoidal alimentando carga no lineal que consume corriente distorsionada.
- b. Tensión no senoidal alimentando carga lineal que consume corriente distorsionada por causa de la fuente.
- c. Tensión no senoidal alimentando carga no lineal que consume corrientes con mayor grado de distorsión que la causa.

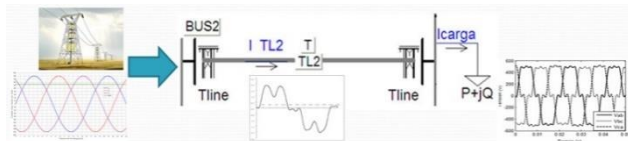


Figura 1. Distorsión de tensión al final del alimentador por corriente distorsionada

En el caso de las señales distorsionadas en una red eléctrica, la aparición de la contaminación armónica en la tensión indica que la corriente distorsionada presenta altos niveles o que ocurre un fenómeno de resonancia combinado

con distorsión de corriente, [1], [2]. A partir de esa tensión distorsionada en la red, todos los equipos eléctricos, sean cargas lineales o no lineales, conectados a la red consumirán corriente distorsionada.

En el caso equipos de protección y de fallas en las redes eléctricas, el tener una tensión de red distorsionada o puramente senoidal si puede hacer la diferencia. Aquellos dispositivos de protección que detectan la diferencial de corriente respecto al tiempo pueden hacer operar incorrectamente a la protección, [3].

Una falla franca se puede catalogar como una gran carga resistiva aplicada a la red eléctrica, por lo tanto, una carga lineal. Cuando la tensión es senoidal y la corriente en el alimentador esta distorsionada, esa gran carga resistiva estará consumiendo una corriente senoidal, similar al perfil de la tensión; por tanto la distorsión armónica no deberá afectar al dispositivo de protección, [3]. Pero cuando el perfil de tensión está distorsionado, dicha gran carga consumirá corrientes distorsionadas, esperando que esto si afecte la operación del dispositivo de protección.

III. RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE

Un relevador que opera cuando sobrepasa un valor de ajuste de corriente se le llama relevador de corriente. Este relevador puede operar de forma instantánea, o con cierto tiempo de retraso [5].

Los relevadores digitales no se ven afectados por los cambios en las magnitudes de los armónicos ya que los filtros en las etapas de procesamiento de señal digital eliminan los armónicos mayores de la frecuencia fundamental mediante una conversión de análogo a digital [6].

Un buen sistema de filtrado en un relé digital debe cumplir con lo siguiente [7]:

- Respuesta de pasabanda cercano a la frecuencia del sistema.
- Rechazo a CD y rampa
- Rechazo o atenuación de Harmónicos
- Respuesta Rápida
- Buen comportamiento Transitorio

El relevador a utilizar es el modelo SPAJ 131C de la marca ABB. Este relevador no cuenta con filtros digitales para eliminar la contaminación armónica. El relevador puede usarse para protección contra sobrecorriente de falla monofásica, bifásica y trifásica. Puede utilizarse como protección de sobrecorriente de tiempo definido y de tiempo inverso. La relación entre la corriente y el tiempo cumple con las normas BS 142 de 1996 e IEC 60255-3 y generalmente se expresa como:

$$t = \frac{k \times \beta}{\left(\frac{I}{I_{>}}\right)^{\alpha} - 1} \tag{1}$$

Donde:

t = es el tiempo de operación en segundos

k= Multiplicador de tiempo

I= corriente medida

I>= corriente de arranque

El relevador maneja cuatro características con diferentes pendientes. Se determina la pendiente de las curvas tiempo/corriente mediante los valores de α y β los cuales se muestran en la Tabla I.

TABLA I

Curvas características de tiempo/corriente	α	β
Normalmente Inverso	0.02	0.14
Muy Inverso	1.00	13.5
Extremadamente Inverso	2.00	80.0
Inverso de larga duración	1.00	120.0

En la Figura 2 se muestra las gráficas tiempo/corriente para la característica Normalmente Inversa para diferentes valores de k.

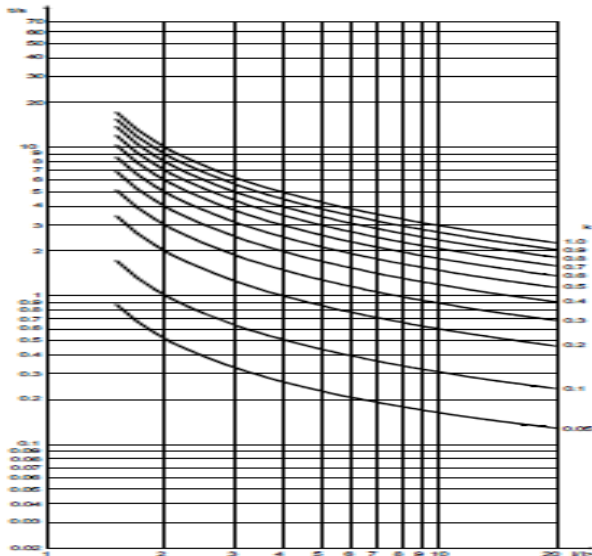


Figura 2. Curva característica Normalmente Inverso

Hay que tomar en cuenta que las gráficas de las características del relevador incluyen un tiempo de filtrado y un tiempo de detección, además del tiempo de disparo del relé. Cuando el tiempo de operación del relé se calcula utilizando la expresión matemática anterior (1), se le deben

de agregar 30 ms para tomar en cuenta los tiempos mencionados [8].

IV. SISTEMA EXPERIMENTAL CON CASOS DE ESTUDIO

El diagrama esquemático del sistema eléctrico experimental se muestra en la Figura 3 y en la Tabla II se da la información del sistema de potencia de 4 nodos.

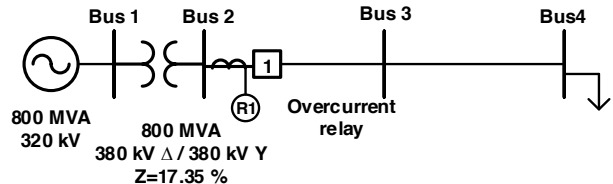


Figura 3. Sistema de Prueba de 4 nodos

TABLA II
Información del sistema de prueba de 4 nodos

Subestación	800 MVA, 380 KV
Transformador	800 MVA, 380 KV Δ / 380 KV Y, Z=17.35%
Línea 2-3	13+j109.3 Ω, Longitud 360 Km
Línea 3-4	13+j109.3 Ω, Longitud 360 Km
Carga	Resistiva Trifásica, 400 W cada fase, variable
Relé de Sobrecorriente	R1 ABB SPAJ 131C

En el diagrama unifilar se observa claramente el relevador de sobrecorriente de tiempo inverso, el cual se encuentra ubicado en el bus 2 y la falla se aplica al final del alimentador, en el bus 4.

Este mismo sistema está conformado experimentalmente con módulos didácticos de De Lorenzo, como se muestra en la Figura 4, donde la alimentación principal del circuito se realizó con una fuente de potencia de inyección armónica para controlar el contenido armónico de la señal de tensión. Posteriormente, se aplica una falla a tierra al final del alimentador con la finalidad de evaluar el tiempo de operación del relé de sobrecorriente.

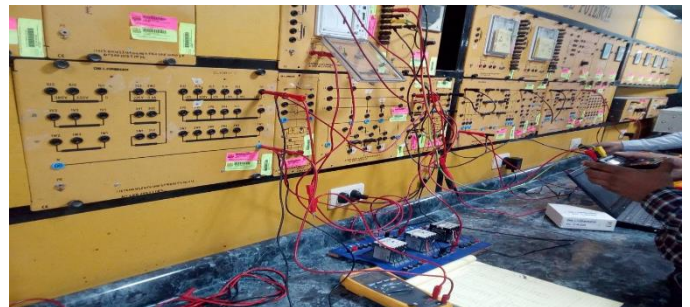


Figura 4. Módulos

Los casos de estudio para evaluar la operación del relé de sobrecorriente en este sistema eléctrico consta de la aplicación de un voltaje nominal a 60 Hz, sumándole de

manera individual un armónico, así el índice de distorsión armónica total (DAT) se incrementa de manera controlada.

$$DAT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\%$$

Donde el subíndice h indica el orden armónico, V es la tensión RMS y V_1 es la tensión RMS a frecuencia fundamental de 60 Hz.

El armónico que se le inyectó al sistema fue el armónico 5, presentando valores de DAT del 0%, 25%, 50% y 75%.

V. RESULTADOS

El Relevador de Sobrecorriente fue probado con un generador de armónicos como Fuente del sistema de Potencia. Armónicos de 5 Orden son alimentados al sistema de Potencia con diferentes valores de DAT: 0%, 25%, 50% y 75%. Se aplicó una falla en el último bus del sistema de potencia. La corriente de cortocircuito le llega al relevador por medio de TCs simulando una relación de 1000:1.

Los ajustes que se le dieron al relevador con la característica Normalmente Inverso fueron los siguientes:

Ajuste de la Toma de Corriente (TS): 0.5 A

Ajuste de Indicador de Tiempo (TDS): 0.05

Se aplicaron diez fallas trifásicas en el bus 4 sin contaminación armónica para obtener tiempos de operación del relevador. Los resultados se muestran en la Tabla III.

TABLA III

Tiempos de operación del relevador con una falla trifásica en el nodo 4

Número de Falla	Tiempo de Operación del Relevador (s)
1	0.50
2	0.51
3	0.52
4	0.47
5	0.45
6	0.47
7	0.47
8	0.50
9	0.47
10	0.47
	$\bar{x} = 0.483$

En otro escenario se inyectó al sistema de potencia contaminación armónica de quinto Orden primero con un DAT del 25%, luego con un DAT 50% y por último con un

DAT del 75%. Se aplicó una falla trifásica en el bus 4 con los diferentes porcentajes de DAT antes mencionados. Los resultados se dan en la Tabla IV.

TABLA IV

Tiempos de operación del relevador con una falla trifásica en el nodo 4 para diferentes valores de DAT

Número de Falla	Tiempo de Operación del Relevador (s)		
	DAT 25 %	DAT 50%	DAT 75%
1	0.576	0.64	0.768
2	0.576	0.64	0.640
3	0.576	0.64	0.640
4	0.576	0.64	0.768
5	0.528	0.64	0.768
6	0.576	0.64	0.768
7	0.576	0.64	0.768
8	0.576	0.64	0.768
9	0.576	0.64	0.768
10	0.576	0.64	0.768
	$\bar{x} = 0.571$	$\bar{x} = 0.64$	$\bar{x} = 0.742$

Estos resultados se graficaron y se muestran en la Figura 5. En la cual se observa el incremento en el tiempo de operación del relevador conforme aumenta el porcentaje del DAT en forma lineal.

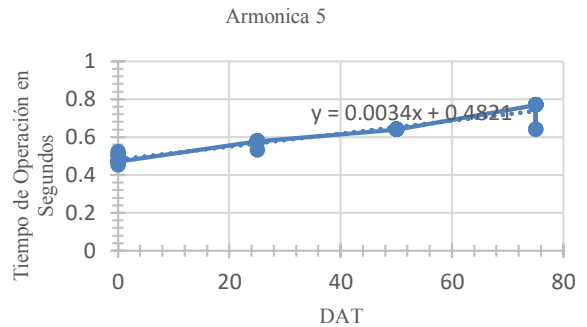


Figura 5. Gráfica de tiempo de operación del relevador SPAJ 131C para una característica normalmente inversa con aumento en porcentaje en el DAT.

En la Figura 5 se observa claramente que la gráfica tiene un comportamiento lineal la cual está regida por una ecuación de línea recta.

VI. CONCLUSIONES

En esta evaluación experimental se demostró que los armónicos tienen un alto impacto en los tiempos de operación del relevador. A mayor índice de Distorsión Armónica Total mayor es el tiempo de operación del relevador de sobrecorriente.

La importancia de que los relevadores cuenten con un sistema de filtrado de armónicos para poder mitigar esos efectos es esencial. Los relevadores modernos digitales

cuenta ya con un buen sistema de filtrado para tener inmunidad ante la presencia de armónicos.

VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de la Laguna a través de la División de Estudios de Posgrado e Investigación en el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por las facilidades otorgadas para llevar a cabo este estudio. También se reconoce el apoyo recibido del Tecnológico Nacional de México.

VIII. REFERENCIAS

- [1] S. Surya, M. F. McGranaghan, R. C. Dugan and H. W. Beaty, *Electrical Pwer Systems Quality*, McGraw-Hill Press Feb. 2012.
- [2] F. C. De la Rosa, *Harmonics, Power systems, and Smart Grids*, CRC Press, 2nd Ed. April 2015.
- [3] Arrillaga, N. R. Watson, *Power System Harmonic*, John Wiley and Sons
- [4] H. Tin, A. Abu-Siada and M. S. Masoum, "Impact of Harmonics on the Performance of Over-Current Relays", IEEE AUPEC 2011.
- [5] P.M. Anderson "Power System Protection" Wiley-IEEE Press Nov. 1998
- [6] Benabes, Philippe, and Catalin-Adrian Tugui, "Effective modeling of CT functions for fast simulations using MATLAB-Simulink and VHDLAMS applied to Sigma-Delta architectures" Circuits and System (ISCAS), 2011 IEEE International Symposium on, IEEE, 2011.
- [7] Schweitzer III, Daqing Hou, "Filtering for Protective Relays", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, Washington.
- [8] ABB, "SAPJ 131 C Overcurrent relay User's manual and Technical precision"2002

IX. BIOGRAFÍA



Morales Bazán Carlos Alberto. Nació en Torreón, Coahuila, México; el 25 de Marzo de 1969. Egresado de la carrera de Ingeniería Industrial en Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna en 1990. En 2012 obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna.

Él tiene experiencia en el área de Instalaciones Eléctricas tanto residencial, comercial e Industrial. También ha trabajado como supervisor de mantenimiento electromecánico. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de la Laguna en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Sus áreas de interés son las de Protecciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia Máquinas y Redes Eléctricas. El M.C. Morales ha participado con artículo en la Reunión Internacional de Verano RVP-AI 2012 de la IEEE realizado en Acapulco Guerrero, México 2012 y en CONAEE 2013 y 2014.



Francisco Sergio Sellschopp Sánchez. Nació en Cd. Victoria, Tamaulipas, México; el 26 de Agosto de 1974. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tepic en 1994 en la ciudad de Tepic, Nayarit, México. Obtuvo el grado de M.C. en Ingeniería Eléctrica en 1999 en el Instituto Tecnológico de La Laguna y en 2003, el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el mismo instituto en la ciudad de Torreón, Coahuila, México.

Él actualmente forma parte de la planta académica del posgrado de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas y redes eléctricas, calidad de la energía, estimación paramétrica y observadores. El Dr. Sellschopp es reconocido como perfil deseable PROMEP además de ser miembro de la IEEE.



Basurto Méndez Jesús Abraham. Nace en diciembre de 1994 en Torreón, Coahuila, México. A los 18 años terminó su bachillerato en el Instituto de Desarrollo Bilingüe Boston. Continuando sus estudios universitarios en el Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, graduándose en el 2018 de obteniendo su título en Ingeniería Eléctrica.

El comienza su vida laboral en la misma institución en donde cursó su bachillerato dando cursos de matemáticas en dicha Institución a los 18 años. En el 2015 ya laboraba formalmente en la misma institución como maestro de tiempo completo. Para el año 2017 entra a laborar a la universidad María Ester Zuno de Echeverría (MEZE). Actualmente labora en la empresa RPM en Torreón, Coahuila, México. Nunca perdiendo el interés en indagar más sobre la calidad y eficiencia de la utilización de la energía eléctrica.

Ing. Basurto Obtuvo el primer lugar de su generación en la especialidad de potencia. Continúa con su visión de dar catedra en una universidad y así poder alentar a las futuras generaciones sobre la importancia del uso adecuado de la energía eléctrica.



Marco Antonio Arjona López. Nació en Santa María, Tepic, Nayarit, México; el 13 de junio de 1966. Ingeniero Eléctrico egresado del Instituto Tecnológico de Durango en 1988 en la ciudad de Durango, Durango, México. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de la Laguna en 1990 en Torreón, Coahuila México. Obtuvo el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica por el Imperial College of Science,

Technology and Medicine en Londres, Inglaterra en 1996. Él actualmente forma parte de la planta académica del posgrado en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas eléctricas y energías renovables. El Dr. Arjona es reconocido por Sistema Nacional de Investigadores como investigador desde el año de 1992. En el año 2008, le otorga la distinción de Investigador Nacional Nivel II, gracias a los trabajos de investigación. Además, pertenece a la IEEE como senior member del año 2008 a la fecha.