INFLUENCIA DE LAS ONDAS DISTORSIONADAS PERIODICAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE SOBRE ELEMENTOS ELECTRICOS.

José A. Salazar P.
Ingeniero Eléctrico
E.E.Q. S.A.

Milton A. Toapanta O.
Ingeniero Eléctrico
Profesor Principal FIE/EPN

Resumen._ Los efectos de voltaje y corriente no sinusoidales en el comportamiento de algunos equipos como: relés de protección, transformadores, medidores de watt-hora de disco de inducción y máquinas de inducción es revisado desde un punto de vista analítico. El valor medio cuadrático de la forma de onda distorsionada es importante en la evaluación de la vida útil del equipo. No todos los equipos eléctricos tienen igual comportamiento frente a ondas no sinusoidales. El principio de superposición se ajusta adecuadamente al análisis de estas ondas distorsionadas sobre los equipos revisados. Este articulo presenta las tendencias del desempeño de algunos equipos eléctricos basados en los principios que los gobiernan, frente a ondas distorsionadas.

Abstract._ The effects of nonsinusoidal voltages and load currents in the perfomance of several equipments such as : protection relays, transformers, induction watthour meter and induction machines are reviewed since an analytical viewpoint. The root mean square value of a distorted waveforms is important in the assessment of a functional life
of equipments. Not all electric devices have the same behavior in front to nonsinusoidal waveforms. The superposition principle has a good adaptation for the analysis of this distorted waveforms over electric equipments. This paper present the tendency of the perfomance that some electric equipments had in consideration your principles in front a distorted waveforms.

INTRODUCCION

El estudio de una red, así como también la de diversos equipos en condiciones sinusoidales pasa ha ser un caso particular del análisis de su comportamiento cuando se tienen ondas distorsionadas de características periódicas, desde el mismo flujo de potencia hasta la evaluación de la vida útil de un equipo. Las pruebas de aparatos eléctricos como por ejemplo los relés de protección, transformadores de potencia, medidores de watt-hora de disco de inducción, máquinas rotativas, etc. se realiza considerando que su medio de trabajo se encontrará inmerso en ondas puramente sinusoidales. sin embargo, su desempeño frente a ondas no sinusoidales pasa ha ser un asunto que realmente merece la atención de las diversas Empresas Eléctricas así como la de los fabricantes de estos equipos. Se hace necesario además, el llegar a establecer una norma internacional que proporcione los límites permitidos de la distorsión, en forma análoga a la penalización del bajo factor de potencia para las industrias.
El abaratamiento de los dispositivos de control electrónico de potencia como los tiristores, ha coadyuvado a la proliferación del uso de estos elementos en equipos a nivel industrial, y por ende un incremento en la inyección de ondas distorsionadas de corriente y voltaje en las redes de distribución. Existen también otros tipos de cargas no lineales como hornos de arco, soldadoras electricas, etc. que igualmente pueden producir ondas distorsionadas (Fig.1), que pueden resultar en algunos casos muy dañinas para los equipos de los usuarios de la red.

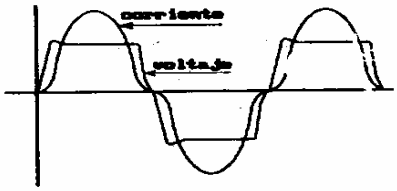
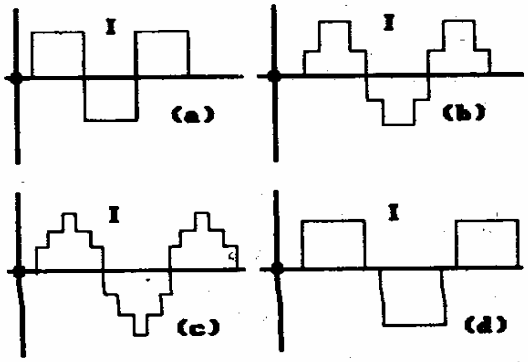


Figura 1

Este artículo presenta algunas de las tendencias de los diversos equipos equipos, mencionados anteriormente, en un medio no sinusoidal, luego de realizar un análisis con varias formas de ondas distorsionadas, partiendo de sus principios básicos de funcionamiento y con ayuda del ordenador.
Se ha realizado un análisis en estado estable del comportamiento algunos de los relés de protección de un SEP, medidor de watt-hora de disco de inducción, transformador de potencia y máquinas de inducción, con las formas de ondas de la figura 2.



Figuras 2 a,b,c,d._ Formas de onda de prueba

EFECTOS DE LAS ONDAS DISTORSIONADAS SOBRE ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTENCIA

Relés de Protección._ Se han realizado muchos estudios sobre el desempeño de los relés de protección de un sistema de potencia bajo condiciones de efectos transitorios del sistema [1], no obstante, estas consideraciones bajo un medio estable de ondas distorsionadas periódicas, se crea una cierta incertidumbre sobre si los resultados anteriormente obtenidos por otros

investigadores se ajustan a estas nuevas situaciones.
Se ha establecido que los relés que pueden presentar más problemas al aparecer ondas de tipo no sinusoidal, son los relés de tipo electromecánico. Dentro de esta clasificación de los relés instantáneos, de voltaje y sobrecorriente de tiempo inverso, tienen un límite dentro del cual tienen su puesta de trabajo que es el siguiente.

$$I \le I_{rms} \le \frac{I_a}{\sqrt{1 - \sum_{h=2}^{\infty} P_h^2}} \qquad (1)$$

$$V \le V_{rms} \le \frac{V_a}{\sqrt{1 - \sum_{h=2}^{\infty} P_h'^2}} \qquad (2)$$

donde Ia y Va pueden son los valores de voltaje o la corriente en condiciones sinusoidales, y los factores de distorsión de las formas de onda son Ph y Ph´. Como se puede apreciar de la relación anterior, si por ejemplo se tiene un contenido armónico del voltaje de un 30 % , su valor **Vrms** de puesta en trabajo del relé puede tener un límite superior de 1.05 p.u. , asumiendo **Va** igual a 1 p.u. , lo que implica que para que el dispositivo entre en funcionamiento este va ha requerir un 5 % más de voltaje que el de calibración original.
Si se considera que es un caso preocupante para el relé instantáneo de sobrevoltaje, con mucho mayor razón para el relé de sobrecorriente de tiempo inverso, ya que además de que se incrementan los valores de corriente a manejar, los tiempos de entrada en trabajo lo hacen en forma similar. La figura 3 muestra el efecto que podría darse [3].

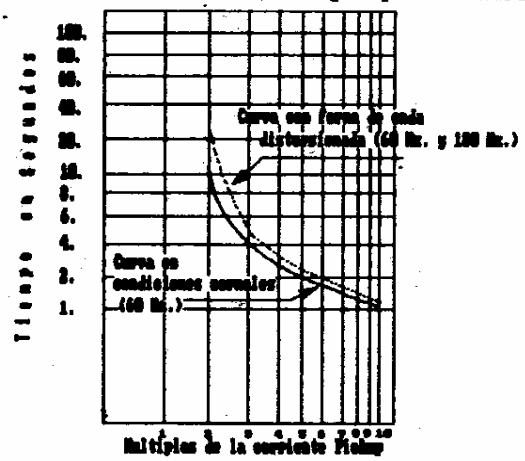


***Figura 3.** Característica de un relé de tiempo inverso (SOC-9) para 60 Hz. y una forma de onda conteniendo frecuencias de 60 Hz. y 180 Hz. (1º y 3º armónicos).*

Si se toma en cuenta que los tiempos de calibración se ven afectados, como consecuencia de este incremento también podría esperarse condiciones peligrosas de inestabilidad de sistema en caso de fallas.
Ya que los armónicos de corriente pueden producir efectos similares a los ocasionados por corrientes de secuencias negativas o cero, este parámetro se debe tomar muy en cuenta en los relés conectados a tierra, para evitar falsas operaciones del dispositivo. En los relés de reactancia y tipo MHO sus zonas de operación se ven afectadas debido a la aparición de ondas no sinusoidales, además, se crea una región llamada zona de par no definido [4], en la cual no se puede conocer con certeza si vá o nó a operar el dispositivo en situaciones que normalmente se espera que opere.
Los relés de tipo estático los cuales han reemplazado poco a poco a los de tipo electromecanico , son menos propensos a tener mal funcionamiento debido a ondas distorsionadas con respecto a los anteriores, sin embargo, dependiendo del diseño del dispositivo, este puede tener problemas si se utiliza el cruce por cero como referencia para realizar sus funciones especificas o cuando se toma el valor medio cuadrático (rms) de la onda de entrada como parámetro.
En cuanto a los relés de tipo digital se puede decir que no caen, *per se* ante ondas distorsionadas y con mucha más razón si están controlados por computadoras digitales, las cuales permiten tener un menejo más versátil de los dispositivos de protección, siempre y cuando se cuente con un adecuado software para el control.

Medidores de watt-hora de disco de inducción . Este equipo utiliza básicamente bobinas de voltaje y corriente, así como el disco de material no magnético el cual gira a una velocidad controlada por un imán permanente. Si bien este dispositivo viene diseñado de fábrica para trabajar con ondas puramente sinusoidales, existen de hecho algunos inconvenientes técnicos cuando se presentan ondas distorsionadas en el registro del consumo de energía.
Si por ejemplo, se asume una carga resistiva con corriente y voltaje de las siguientes características :

$$v = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \, sen(nwt + \theta_{nv}) \qquad (3)$$

$$i = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \, sen(hwt + \theta_{hi}) \qquad (4)$$

se puede establecer los flujos generados por las bobinas de corriente (ϕi) y voltaje (ϕv) como :

$$\phi_i = K_i \sum_{h=1}^{\infty} I_h \, sen(hwt + \theta_{hi}) \qquad (5)$$

$$\phi_v = 2 \frac{K_v}{L_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n}{n\,w} \, sen(nwt + \theta_{nv} - \frac{\pi}{2}) \qquad (6)$$

donde Kv, Lv, Ki son constantes de las bobinas de voltaje y corriente. Asumiendo, que el flujo que cruza por los ramales de las bobinas de voltaje se relacionan con los flujos de corriente de manera simétrica, se

tiene que :

$$\phi_A = \phi_{v/2} - \phi_i \quad (7a) \qquad \phi_B = \phi_{v/2} + \phi_i \quad (7b)$$

donde ϕA y ϕB son los flujos resultantes que actúan sobre el disco.

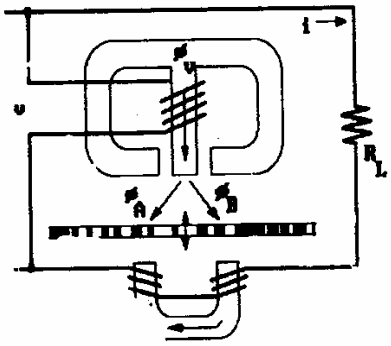


Figura 4.

Si se considera que el camino recorrido por la corriente de eddy sobre el disco que tienen una impedancia *Zdk* igual a (*Rd + jwk Ld*) La distribución espacial de corriente con respecto a un eje de referencia, será idéntica que la **fem** creada, entonces se tiene un circuito similar a

$$L_d \frac{di(t)}{dt} + R_d\, i(t) = e(t) \qquad (8)$$

que al resolverla proporciona las corrientes inducidas debido a los flujos producidos por las bobinas de voltaje y corriente , en función de los flujos resultantes ϕA y ϕB se tiene lo siguiente :

$$i_A = -\frac{K_v}{L_v}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{V_n}{Z_{nd}} + K_i\sum_{h=1}^{\infty}\frac{hwI_h}{Z_{hd}} \qquad (9)$$

$$i_B = -\frac{K_v}{L_v}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{V_n}{Z_{nd}} - K_i\sum_{h=1}^{\infty}\frac{hwI_h}{Z_{hd}} \qquad (10)$$

donde Znd y Zhd se definen como:

$$Z_{hd} = \frac{R_d\cos(hwt + \theta_{hi} - \alpha_{hd}) + hwL_d\, sen(hwt + \theta_{hi} - \alpha_{hd})}{R_d^2 + (hwL_d)^2} \qquad (11)$$

$$Z_{nd} = \frac{R_d\cos(nwt + \theta_{nv} - \alpha_{nd} - \frac{\pi}{2}) + nwL_d\, sen(nwt + \theta_{nv} - \alpha_{nd} - \frac{\pi}{2})}{R_d^2 + (nwL_d)^2} \qquad (12)$$

el ángulo de impedancia del disco αd está dado por

$$\alpha_{nd} = arctang(\frac{nwL_d}{R_d}) \quad (13a) \qquad \alpha_{hd} = arctang(\frac{hwL_d}{R_d}) \quad (13b)$$

de donde las fuerzas sobre el disco se han definido como

$$\overline{F_A} = K_s(\overline{I_A} \times \overline{\phi_B}) \quad (14a) \qquad \overline{F_B} = K_s(\overline{I_B} \times \overline{\phi_A}) \quad (14b)$$

luego la fuerza total sobre el disco es

$$\overline{F_{total}} = \overline{F_B} - \overline{F_A} \qquad (15)$$

el coeficiente *Ks* se utiliza para representar la longitud del camino recorrido por la corriente de eddy inducida sobre el disco y así como para tomar en cuenta la área cubierta por el campo magnético sobre el disco.

Si se considera el caso h=n se tendrá una fuerza total igual a:

$$F_{total} = \frac{2K_sK_vK_i}{L_v}\sum_{h=1}^{\infty} V_h\, I_h\, \frac{(R_d\cos(\alpha_{dh}) - hwL_d\, sen(\alpha_{dh}))}{R_d^2 + (hwL_d)^2} \qquad (16)$$

puesto que esta ecuación no es dependiente del tiempo entonces además de indicar la fuerza total, representa la fuerza promedio desarrollada en el disco. De donde el torque promedio total actuante sobre cada *I*-ésimo elemento de corriente por la distancia *dl* desde el centro del disco está dado por la relación (17):

$$T_s = \sum_{i=1} F_{total}\, dl \qquad (17)$$

ya que el torque de frenado (*Tb*), está relacionado directamente con el flujo producido por el imán permanente que actúa sobre el disco de material no magnético, se ha podido establecer que la fuerza de frenado (*Fb*) está dada por (18):

$$F_b = S\left(\frac{-k'\phi_m^2}{R_m} - k''\sum_{h=1}^{\infty}\left(K_I^2 I_h^2 + \left(\frac{K_v}{hwL_d}\right)^2 V_h^2\right)\frac{(R_d sen(\alpha_{dh}) + hwL_d\cos(\alpha_{dh}))}{R_d^2 + (hwL_d)^2}\right) \quad (18)$$

S, es la velocidad de giro del disco, k'' es una constante mucho menor que la unidad, ($k'\ \phi^2 m\ /\ Rm$) tiene un valor númerico aproximado a la unidad. A partir de las anteriores ecuaciones obviamente se puede encontrar el torque de frenado (Tb) e igualar al torque desarrollado en el disco. Pero también se puede equiparar las fuerzas que actúan sobre el disco, tanto las fuerzas que hacen que se produzca la rotación, así como las fuerzas que producen un efecto de frenado y en base de estas encontrar la velocidad S de giro del disco (19).

$$S = \frac{\frac{2K_sK_vK_I}{L_v}\left(F_1|Z_{dh}|^2 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h (R_d\cos(\alpha_{dh}) - hw\,L_d sen(\alpha_{dh}))\right)}{-K1'|Z_{dh}|^2 - K23\sum_{h=1}^{\infty}\left(K_I^2 I_h^2 + \left(\frac{K_v}{hwL_d}\right)^2 V_h^2\right)(R_d sen(\alpha_{dh}) + hwL_d\cos(\alpha_{dh}))} \quad (19)$$

donde $|Zdh|^2 = (Rd^2 + (hw\ Ld)^2)$ $F1$ es la fuerza total evaluada para h=1.
Las siguientes figuras se han obtenido al realizar un programa digital con las ecuaciones encontradas (Fig. 5 a,b) ; se han utilizado las formas de onda de las figuras 2a,2b,2c,2d con este objetivo.

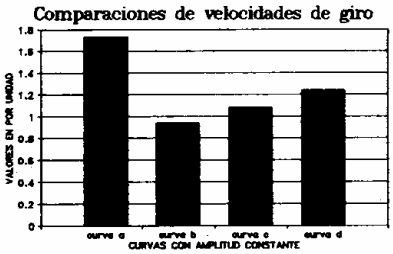


Figura 5a.

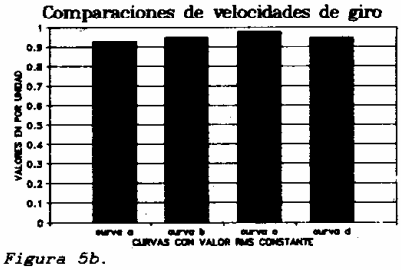


Figura 5b.

La forma de onda cuadrada es la que provoca ya sea menor o mayor giro del disco, dependiendo de la característica de las curvas, ya sea con amplitud constante o igual valor **rms** que la forma de onda sinusoidal (1 p.u. de amplitud). Las formas de onda 2b,2d son típicas de conversores de tres pulsos y la forma de onda 2c se la encuentra en conversores de doce pulsos.
Analizando la velocidad de giro con las formas de onda de la figura 2a,2b,2c,2d se pueden extraer los siguientes resultados:

- Si se tiene formas de onda con amplitud constante (1 p.u) la forma de onda que posea mayor valor medio cuadrático es la que provoca mayores sobrelecturas en el medidor.
- El factor de distorsión no es un parámetro muy confiable en la estimación de la sobrelectura cuando se tienen formas de onda con igual amplitud.
- Si se tienen formas de onda con igual valor medio cuadrático la onda cuadrada es la que provoca una mayor disminución de la velocidad de giro del disco.
- La forma de onda que posee mayor grado de distorsión es la que provoca mayores efectos, ya sean que estas produzcan una sobrelectura cuando se tiene una forma con igual amplitud que la sinusoidal en condiciones normales, o que se dé una disminución en el giro del disco cuando se tienen formas de onda con igual valor medio cuadrático.
- Los armónicos más cercanos a la fundamental son los que provocan lecturas anormales en el medidor.
- Se debe tomar en cuenta la dirección del flujo armónico de potencia, ya sea que este se dé desde la carga o desde el sistema de distribución, pues el signo del error relativo depende mucho de la dirección de este flujo.

Transformadores._ Si bien por sus diferentes tipos de conexión los transformadores trifásicos, pueden atenuar en algo el efecto de los armónicos más severos, no sucede lo mismo con los transformadores tipo monofásico los cuales se ven afectados mayormente influenciados por el efecto de los armónicos de la red.
Existen varios modelos complejos del transformador en condiciones no lineales como los sugeridos en la referencia [7], con los cuales se pueden obtener resultados aceptables en el análisis de las pérdidas de un transformador en situaciones no sinusoidales. Sin embargo, el circuito equivalente del transformador en condiciones normales se lo puede utilizar para cada armónico presente en la forma de onda distorsionada, sin incurrir en errores significativos.
Las pérdidas del cobre se incrementan debido al efecto piel que se hace más pronunciado a frecuencias superiores a la fundamental, presentes en los armónicos de las formas de onda distorsionadas. Si se omite la rama correspondiente a la admitancia de excitación del modelo clásico, pero tomando en cuenta el orden del armónico, la corriente de carga primaria (p) será entonces (20):

$$| I_{ph} | = \frac{| V_{ph} |}{| Z_h |} \qquad (20)$$

donde h es el orden del armónico. Entonces la impedancia total vista desde el primario será:

$$| Z_h | = \sqrt{(R_{ph} + R'_{sh} + R'_{carga\ h})^2 + (h\ w)^2\ (L_{ph} + L'_{sh} + L'_{carga\ h})^2} \qquad (21)$$

donde los términos *Rph*, *Rsh*, *R carga h'*, corresponden a las resistencias del primario, secundario y carga respectivamente pero bajo influencia del *h*-ésimo armónico; al igual que las inductancias. Luego entonces las pérdidas óhmicas de un transformador están dadas para el *h*-ésimo armónico por la ecuación 22:

$$W_{ohmicas_h} = | V_{ph} |^2 \frac{(R_{ph} + R_{sh})}{| Z_h |^2} \qquad (22)$$

Según esta última relación las pérdidas totales en el cobre están dadas por la suma de cada una de las pérdidas producidas por cada armónico individual aplicado, esto sin incurrir en grandes errores y evitando la necesidad de un análisis complejo.
Las pérdidas por histéresis prácticamente no son afectadas por el efecto de los armónicos. No obstante, el factor de distorsión de una onda juega un papel muy importante al evaluar la variación de estas pérdidas de histéresis, ya que para un gran factor de distorsión de la forma de onda de voltaje o corriente el lazo de histéresis se verá afectado en su área efectiva y por lo tanto se deberá recurrir a factores de corrección aún cuando estas aparentemente siempre se mantienen constantes.
Las pérdidas por corrientes parásitas si se ven afectadas por el efecto de los armónicos de la onda distorsionada. La forma de onda cuadrada es la que más penetra en el material y de ahí que produzcan mayores pérdidas parásitas . Se ha podido observar que estas pérdidas para un flujo pico constante deberán variar con el cuadrado del valor **rms** del voltaje inducido. Si se tienen algunas formas de onda, ya sea con amplitud constante o igual valor **rms**, la forma de onda que tenga mayor factor de distorsión generalmente puede provocar mayores pérdidas parásitas.
Al estimar con un algoritmo computacional las pérdidas parásitas sobre una lámina hipotética basados en las relaciones propuestas por [12] y utilizando las formas de onda de las figuras 2a,2b,2d se obtuvierón los siguientes resultados (figura.6a,b).

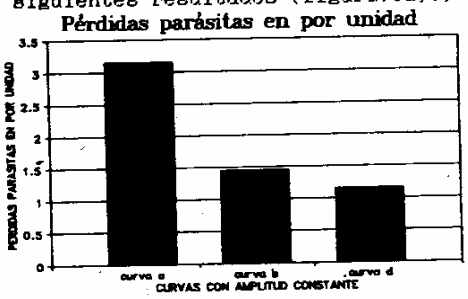


Figura 6a.

Las anteriores figuras muestran como la onda cuadrada es la que prevalece en el incremento de las pérdidas parásitas, ya sea cuando todas estas ondas tengan amplitud constante o

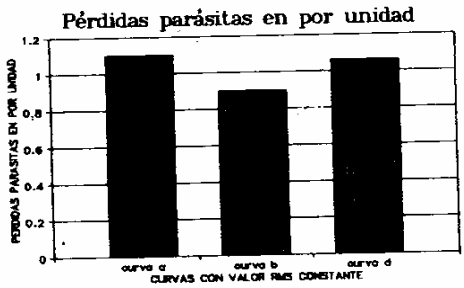


Figura 6b.

cuando tienen igual valor **rms** que la onda sinusoidal. La forma de onda de la curva 2b es la que se obtiene en conversores de tres pulsos al igual que la curva 2d, difieren entre sí por el ángulo de disparo de los tiristores del conversor.
Si bien en condiciones sinusoidales las pérdidas parásitas constituyen la parte menor de las pérdidas del núcleo y que suelen ser del orden del 20 % al 50 %. En condiciones no sinusoidales este factor puede ser diferente, pues hasta podría darse el caso de que las pérdidas parásitas en el núcleo sobrepasen a las pérdidas por histéresis en una relación 3/2 [8].
Una estimación de las pérdidas que se pueden incrementar en régimen no lineal es muy necesaria para evitar pérdidas de vida útil del elemento eléctrico, más aún si se tienen condiciones de sobrecarga sobre un transformador y más aún si se suman a estos efectos los desbalances de voltaje, el resultado a la larga puede ser preocupante para el equipo.

Máquinas de inducción. Al igual que el tratamiento que se asumió para el modelo armónico del transformador se puede utilizar para un análisis del motor de inducción. Como se puede suponer, las resistencias e inductancias del modelo equivalente serán las correspondientes a cada uno de los armónicos de la forma de onda ingresada.
El deslizamiento par el *h*-ésimo armónico de campo con respecto al rotor es

$$S_h = \frac{h \mp (1 - S_o)}{h} \qquad (23)$$

h es el orden del armónico y *So* el deslizamiento en condiciones sinusoidales. En esta relación se ha considerado el término ± ya que las velocidades y sentidos de rotación de las componentes de fuerza magnétomotriz (**fmm**) del inducido dependen tanto de los armónicos espaciales de la **fmm** como de los armónicos de tiempo de la onda de corriente. En otras palabras ya que los armónicos de corriente pueden provocar efectos similares a los provenientes desde corrientes de secuencias negativas y cero, lo que se puede

esperar es que se produzca un deslizamiento con cierta tendencia a la unidad, a medida que el orden del armónico se incremente, o lo que es lo mismo una inclinación a tener un motor bloqueado en el peor de los casos

Las pérdidas en el cobre del estator son similares a las que se pueden producir en un transformador bajo condiciones no sinusoidales. El efecto piel tiene mayor influencia en conductores de mayor diámetro, de ahí que se produzcan mayores incrementos de las pérdidas en las barras de cobre del rotor o en su defecto en los devanados rotóricos. Bajo régimen no lineal existen frecuencias lo suficientemente altas dentro de las componentes armónicas como para hacer que la resistencia efectiva de las barras se incrementen y mucho más si se tienen barras profundas o doble jaula en el rotor, ya que se ha comprobado [9] que se produce mayor calentamiento en la presencia de los armónicos debido a este arreglo.

Las pérdidas en el núcleo no son tan relevantes, por lo que se las suele despreciar.

Los torques armónicos son relativamente pequeños comparados con el torque obtenido a frecuencia fundamental. Ya que estos son alternativamente positivos y negativos, de ahí que el torque total de entre estos torques armónicos es un pequeño torque de frenado. No obstante esta observación, el efecto de tener torques pulsantes a la larga pueden causar fatigas en el material del eje, al igual que un desgaste en sus soportes debido a que al incrementarse la temperatura por el aumento de las pérdidas, la grasa lubricante puede superar su capacidad térmica y por ende perder sus propiedades.

En nuestro medio no existen aún niveles significativos de contaminación armónica en las redes de distribución dado el relativo bajo uso de dispositivos semiconductores de potencia, no obstante, la tendencia de la industrias está dirigida a proveerse de este tipo de equipos dada la confiabilidad y versatilidad debido a que son más compactos. Esto indudablemente puede a la larga ser contraproducente para las Empresas Eléctricas las cuales poco o nada de importancia dan a la investigación de campo sobre estos tópicos ; pues se deberían expedir sanciones a las industrias que se salgan de ciertos límites de distorsión de la forma de onda sinusoidal de manera similar a la penalización del bajo factor de potencia, para que de este modo se eviten daños en sus equipos, así como el proveer al usuario de la red de distribución de un servicio aceptable. Las pérdidas económicas tanto en la lectura del consumo de energía como las debidas a daños en los transformadores de distribución debidas a ondas no sinusoidales, son parámetros válidos para realizar pruebas, para que de esta manera se puedan obtener ciertas medidas preventivas en el futuro y así evitar tomar medidas correctivas que suelen ser a menudo muy caras.

Una carga que podría considerarsele como carga no lineal, es la soldadora eléctrica. En el Ecuador este tipo de equipo es muy común, sobre su uso no existe restricción alguna. En casi todas las ciudades del país hay las llamadas metalmecánicas las cuales en sus labores diarias provocan distorsión de la forma de onda de corriente, que se inyecta en la red de la cual es alimentada, provocando en los usuarios más cercanos, molestias y hasta daños en sus equipos caseros debido a este efecto. Ante esto, el problema se vuelve más de competencia de la Empresa Eléctrica que provee el servicio, más que del usuario mismo. Es evidente que ante la pasividad del usuario que tiene este tipo de problemas no salen a la luz pública; sin embargo si se analiza el problema este puede tener tintes de caracter socio-económico ya que no es una solución viable el suspender las actividades de las metalmecánicas dispersas en la ciudad, sino más bien buscar una manera técnica de resolverlo. Esto es suministrar a estas pequeñas industrias de filtros adecuados para atenuar o eliminar este efecto molestoso que los usuarios de la red más cercanos a esta mecánica industrial suelen soportar.

Conclusiones

1. Se ha realizado un trabajo de investigación bibliográfica, extractando lo más importante, sobre los efectos técnicos y económicos que provocan para la distorsión de las ondas de voltaje y corriente; para lo cual se ha considerado cuatro formas de ondas de prueba dadas por la figura 2, a, b, c y d, que han sido aplicadas a la ecuación (19) para determinar la velocidad de giro de un contador de energía.
   Las mismas formas de onda se han aplicado para evaluar las pérdidas por histéresis para el transformador.
2. Los relés electromecánicos son más afectados que los relés de estado sólido o digital. Dependiendo del tipo de relé los armónicos pueden provocar que el tiempo de puesta de trabajo se incremente, haciendo que la selectividad y coordinación de las protecciones cambien sustancialmente.
3. En los contadores de energía de disco de inducción se nota una lectura anormal tal como se puede visualizar en los resultados presentados en las curvas 5a y 5b.
   Cuando se trata de curvas de amplitud constante (curva 5a) la de forma de onda cuadrada es la que influye mucho más en la lectura del contador de energía. En cambio, cuando se trata de curva de valor RMS constante (curva 5b) la que más incide es la forma de onda tipo C.
4. El efecto de los armónicos sobre los transformadores se traduce en un incremento de las pérdidas parásitas, tal como se presentan en los gráficos 6a y 6b.
   Al determinar el valor de las perdidas parásitas en el transformador con una onda cuadrada ésta sobrepasa las 3 veces el valor por unidad mientras que con la curva d es ligeramente superior al valor por unidad. Estos resultados se obtuvieron para el caso de operación del transformador con amplitud constante.
   Si se trata de valor RMS constante el valor de las pérdidas parásitas con onda cuadrada supera ligeramente el valor por uno.
   De todas maneras este incremente de pérdidas se traduce en un incremento de temperatura que disminuye la vida útil del equipo.

REFERENCIAS

[1] V. A. Warrington." Protective relays their theory and Practice", Vol II, 3º Edc. Chapman & Hall a Halsted Press Book. London Reprinted, John Wiley & sons, New York 1978.

[2] Power Systems Relaying Comittee ,"Sine-Wave Distortions in Power Systems and the Impact on Protective Relaying", A report 84 TH 0115-6 PWR, prepared by Power Systems Relaying Committee of IEEE Power Engineering Society.

[3] S. Goldberg, W. F. Horton, "The Effect of Harmonics on the Operating Points of Electromechanical Relays ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, Nº 5 , May 1985, Pag. 1178-1188.

[4] H. Kudo, A. Watanabe, K. Seo, Y. Ohura, K. Matsuzawa," Development of New Distance Relays to Cope with Natural Frequency Transients in UHV/EHV Transmission Systems ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, Nº 12, December 1985, pag. 3518-3522.

[5] H. S. Soutar, O. P. Malik, " Theorical Analysis of Single-Phase Induction Watthour meter ",IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-88, Nº 8, August 1969, pag. 1275-1280.

[6] Y. Baghzouz, O. T. Tan," Harmonic Analysis of Induction Watthour Meter Perfomance ", IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-104, Nº 2, February 1985, pag. 399-406.

[7] S. Goldberg, W. F. Horton, " Induction Watthour Meter Accuracy with Non-sinusoidal Currents ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2 , Nº 3, July 1987, pag. 683-690.

[8] J. D. Green, Ch. A. Gross,"Non-linear Modelling Transformers",IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, Nº 3 , May/June 1988, pag. 434-438.

[9] J. D. Lavers, P. Biringer, H. Hollitscher, " The effect of third harmonic flux distortion on the Core Losses in Thin Magnetic Steel Laminations ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, Nº 6, November/December 1977, pág. 1856-1862.

[10] IEEE Working Group on Power Systems Harmonics, " The effects of Power Systems Harmonics on Power Systems Equipments and Loads ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, Nº 9, September 1985, pag. 2555-2562.

[11] M. S. Hwang, W. M. Grady, H. W. Sanders, " Distribution Transformer Windings Losses due to Non-sinusoidal Currents ",IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, Nº 1, January 1987, pag. 140-146.

[12] M. D. Hwang, W. M. Grady, H. W. Sanders, " Calculation of Windings Temperatures in Distributions Transformers Subjected to Harmonics Currents ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3 , July 1988, pág. 1074-1079.

[13] A. Semlyem, N. Rajakovic," Harmonic Domain Modelling of Laminated Iron Core ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, Nº 1, January 1989, pág. 382-390.

[14] E. A. Klingshirn, H. E. Jordan, " Polyphase Induction Motor Perfomance and Losses on Non-sinusoidal voltage sources ",IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-7, Nº 3, March 1968 pag. 624-633.

[15] A. S. Langsdorf, " Teoría de las máquinas de corriente alterna ", Edtr. Mc Graw-Hill de México de C. V., 1967 Trdc. del Inglés, Atlacomulco 499-501, México.

[16] J. R. Linders, " Effects of Power Supply Variations on AC Motor Characteristics ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-8, Nº 4, July/August 1972, pag. 383-400.

[17] J. R. Linders , " Electric wave Distortions : Their Hidden Cost and Containment ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, Nº 5, September/October 1979 pag. 458-471.

[18] D. E. Steeper, R. P. Stratford, " Reactive Compensation and Harmonic Supression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters " IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-12, Nº 3 May/June 1976, pag. 232-254.

[19] D. A. Gonzáles, J. C. McCall, " Design of Filters to Reduce Harmonic Distortions in Industrial Power Systems ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, Nº 3, May/June 1987, pag. 504-511.