

09 | MAYO 2022



FACTOR K COMO PARÁMETRO DE EFICIENCIA EN TRANSFORMADORES SECOS DE DISTRIBUCIÓN

AUTOR: Ing. Laura Condori

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	2
2 ¿QUÉ ES EL FACTOR K EN TRANSFORMADORES?	3
3 EFECTOS EN LOS TRANSFORMADORES	4
4 VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES CON FACTOR K	5
PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE L FACTOR K	6
RESUMEN	6
NORMAS	6
7 CONCLUSIONES	6
8 RECOMENDACIONES	6
9 BIBLIOGRAFÍA	7



Debido a la incorporación masiva de equipos electrónicos a los sistemas de distribución, los transformadores de distribución están sometidos a condiciones de operación distintas a las de diseño, por causa de la circulación de corrientes armónicas.

En la actualidad, los transformadores de distribución que alimentan cargas industriales manejan corrientes con alto contenido armónico, muchos de estos transformadores han sido construidos solo para soportar el aumento de temperatura debido a las corrientes parásitas a frecuencia nominal de 60 Hz, es decir, gran parte de los transformadores de distribución tienen un factor K igual a 1.

Es necesario cuantificar el efecto que producen estas corrientes armónicas para determinar la capacidad del transformador de soportar estas nuevas condiciones de operación.

En este artículo se presenta la importancia del factor K al dimensionar un transformador y como afecta en el funcionamiento del mismo. También se hace referencia en este artículo la estimación de dicho factor.

1 INTRODUCCIÓN

Las cargas no lineales producen corrientes armónicas en los alimentadores de distribución y como efecto de esto, los transformadores de distribución aumentan sus pérdidas.

Las pérdidas de corriente de Foucault tienen mayor significancia en las pérdidas de los transformadores de distribución, ya que, al existir componentes armónicas, las pérdidas aumentan aproximadamente al cuadrado de la frecuencia.

Por lo general, los transformadores instalados en los sistemas de distribución han sido proyectados para suministrar energía a cargas que operan con frecuencias nominales. Si estos transformadores alimentan cargas no lineales y su diseño constructivo no considera la circulación de corrientes armónicas, los transformadores podrían experimentar calor excesivo en sus bobinados, reduciendo su vida útil y propiciando el corte de suministro.

Para abordar el problema de las pérdidas en los transformadores de distribución se han estudiado algunas técnicas como: mitigar las componentes armónicas de las cargas que alimentan estos transformadores, estimar el K adecuado para los transformadores usando las componentes armónicas individuales de corriente y desarrollar modelos de pérdidas de transformadores por medio de elementos finitos

2 ¿QUÉ ES EL FACTOR K EN TRANSFORMADORES?

El factor K es un indicador que permite estimar la capacidad que tiene un transformador de soportar los efectos térmicos producidos por las corrientes armónicas.

Este factor considera las pérdidas adicionales que las corrientes de Eddy provocan en el transformador, debido a la presencia de armónicas, siendo proporcionales al cuadrado de la frecuencia.

Está relacionado a las pérdidas por calentamiento que un transformador puede tolerar cuando esta alimentando cargas no lineales.

El factor K esta expresado como:

$$\text{Factor K} = \frac{\sum_1^h (h^2 * [I_h]^2)}{\sum_1^h (I_h)^2}$$

Donde: $I_{h(pu)}$ = la magnitud de una armónica específica individual
 h = es el orden de la armónica (3era,5ta,etc.).

Considerando un rectificador trifásico, se calcula el factor K y la máxima corriente que el transformador puede manejar con respecto a su nominal.

h	$I_h \%$	I_h^2	$h^2 I_h$
1	100	10,000.00	10,000.00
5	17.5	306.25	7,656.25
7	11	121.00	5,929.00
11	4.5	20.25	2,450.25
13	2.9	8.41	1,421.29
17	1.5	2.25	650.25
19	1	1.00	361.00
Suma		10,459.16	28,468.04

Factor K	$\sum h^2 I_h^2 / \sum I_h^2$	2.72
I_{max}	$(1.15/1+0.15K)^{.5}$	90.4%

Tabla 1. Cálculo del factor k para un transformador que alimenta a un rectificador

Cuando las pérdidas parásitas de los devanados de los transformadores a frecuencia fundamental son multiplicadas por el factor K se obtiene las pérdidas reales causadas por las corrientes armónicas

$$P_{ec} = P_{ec_{fund}} * \text{factor k}$$

Donde: P_{ec} : Pérdidas por corrientes de eddy reales
 $P_{ec_{fund}}$: Pérdidas por corrientes de eddy a frecuencia fundamental

En el caso de equipo de cómputo, la CBMA (Computer Business Manufacturer Association) establece un procedimiento aproximado para determinar la capacidad disponible de un transformador, en el que considera que las armónicas de bajo orden son las dominantes requiriendo conocer la corriente pico y la corriente eficaz de la carga.

Se debe tener un factor K adecuado para los transformadores, este valor adecuado permite que los transformadores soporten la distorsión armónica total en corriente de corriente de sus respectivas cargas.

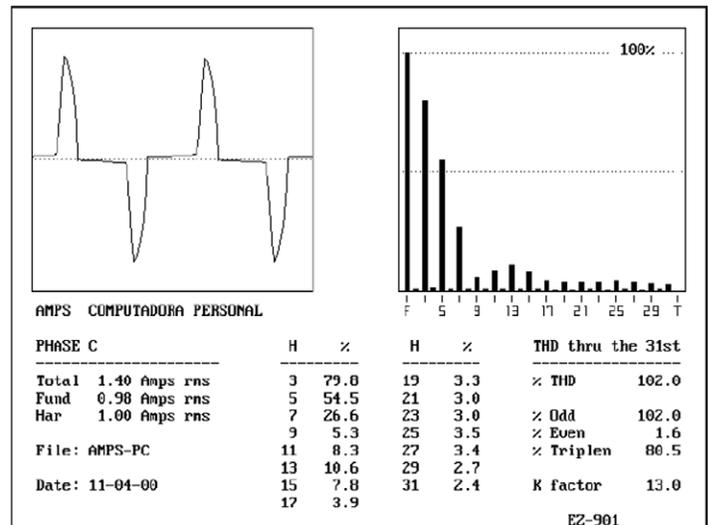
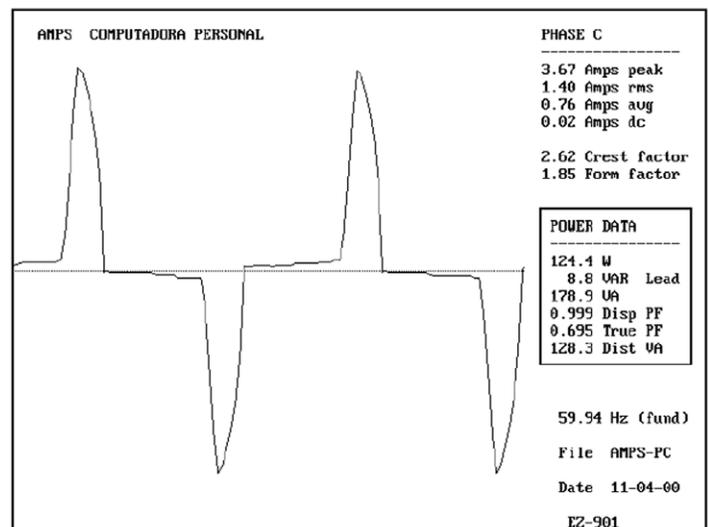


Figura 1. Forma de onda y espectro armónico de voltaje y corriente de una Computadora Personal

$$\text{Factor de degradación} = \frac{1.4142}{I_{\text{pico}}/I_{\text{eficaz}}}$$

Para un transformador que alimente un grupo de computadoras cuya forma de onda individual sea la mostrada en la figura XXX el factor de degradación es:

$$\text{Factor de degradación} = \frac{1.4 \cdot 1.4142}{3.67} = 0.54$$

Por lo que un transformador que opere bajo estas condiciones, puede proporcionar el 54% de su capacidad nominal.

Otro efecto perjudicial ocurre cuando las cargas no lineales consumen su corriente en fracciones de un semiciclo que coincide con el valor máximo de voltaje, tal como sucede en los circuitos que alimentan a computadoras personales, afectando la regulación de tensión del sistema.

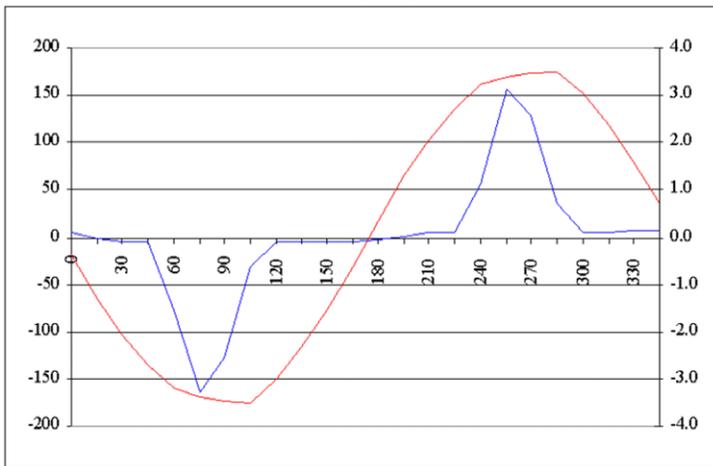


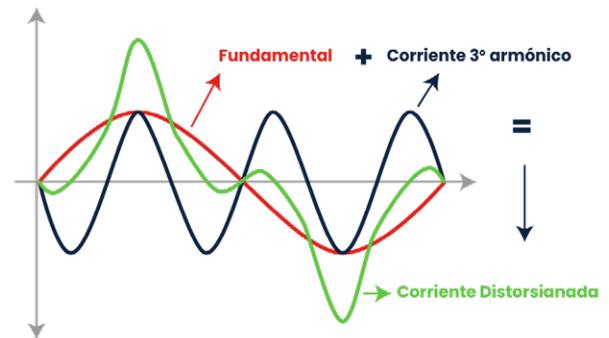
Figura 2. Corriente que ocurre cerca del valor máxima del Voltaje, deformándose

3 EFECTOS EN LOS TRANSFORMADORES

En los transformadores de propósito general la potencia nominal esta definida para señales senoidales de voltajes balanceados y corrientes que no excedan de 0.5% THD, en una magnitud dada que no se exceda el límite de elevación de temperatura, estableciéndose dichos parámetros en la placa de datos.

Durante su ocupación, los transformadores de potencia están sujetos a esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos los cuales degradan el sistema de aislamiento aceite/papel, siendo la temperatura excesiva, la presencia de oxígeno y humedades combinadas con los esfuerzos eléctricos los factores principales que aceleran dicha degradación.

Como causas secundarias se ubican los esfuerzos mecánicos originados por la excitación del núcleo y corto circuitos.



Las corrientes armónicas producen un calentamiento adicional en los devanados de los transformadores, por el incremento en las pérdidas causadas por las corrientes de Eddy, que son función tanto de la corriente eficaz que circula como de la frecuencia al cuadrado de la señal, debiéndose de considerar su capacidad en forma reducida con respecto a su nominal, cuando alimentan cargas no lineales de acuerdo al estándar ANSI/IEEE C57.110. La distorsión del voltaje causa pérdidas adicionales en el núcleo, pero su impacto es poco significativo.

Esta situación explica los incrementos considerables en la temperatura de los transformadores que alimentan cargas no lineales, aun cuando la corriente de carga esté por debajo de su capacidad nominal, exponiéndose a fallas prematuras.

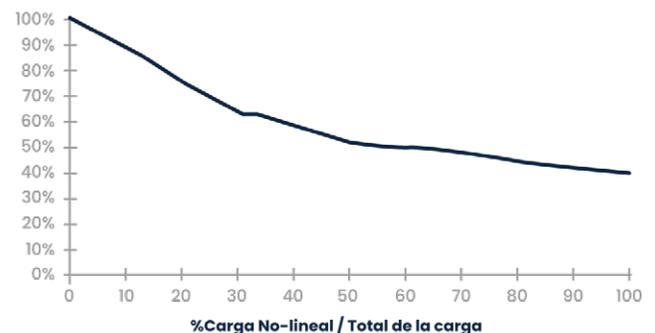


Figura 3. Reducción en la capacidad de transformadores con relación a la carga no lineal que alimenta

La capacidad disponible del transformador puede llegar a ser únicamente el 50 % de su nominal, cuando el 70% de su carga es no lineal, aplicando típicamente a transformadores de 440/220V que alimentan en su totalidad equipo electrónico. En los transformadores principales de distribución la reducción es menos severa debido a la cancelación de armónicas entre diversas cargas.

Underwriters Laboratories (UL) establece el método denominado factor K para transformadores secos, que es un índice de la capacidad del transformador para soportar

los efectos del calentamiento producidos por las cargas no lineales, siendo diseñados para operar a su capacidad nominal con corrientes que tengan niveles de distorsión de acuerdo a dicho factor, sin que se excedan los límites nominales de elevación de temperatura. Los valores de factor K normalizados en transformadores son 1,4,9,13,20,30,40 y 50 siendo los más usados 4,13,20.



Tipo de carga	Factor K
Lámparas incandescentes (sin dimmers de estado sólido), calefactores eléctricos resistivos (sin controles de calor de estado sólido), motores (sin controladores de estado sólido), transformadores de control, dispositivos electromagnéticos de control, motor generador (sin controladores de estado sólido).	K-1
Lámparas de descarga, UPS con filtros de entrada opcional, equipos de calefacción inductivos, PLC y controladores de estado sólido.	K-4
Equipos de telecomunicaciones, UPS sin filtros de entrada.	K-13
Servidores de computadores, controladores de estado sólido (variadores de frecuencia), conectores multiconductor para instalaciones de salud, escuelas, etc., conectores multiconductor para alimentadores en equipos de inspección o prueba o para líneas de producción.	K-20
Conectores multiconductor para circuitos industriales, médicos y laboratorios educacionales, conectores multiconductor para circuitos comerciales en oficinas, pequeños servidores.	K-30
Otras cargas identificadas como productores de grandes cantidades de armónicos.	K-40

Tabla 2. Clasificación del factor K para transformadores de distribución
Fuente. Tomada de Gouda, Amer y Salem (2011)

4 VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE TRANSFORMADORES CON FACTOR K

- » Incorporar un blindaje electrostático entre los devanados primario y secundario para la atenuación de picos de voltaje, ruido de líneas y transitorios.
- » Ciertos fabricantes elaboran los devanados utilizando tiras de lámina (foil), generalmente de aluminio, en lugar de alambre magneto para reducir las corrientes de Eddy y minimizar el calentamiento adicional. Así mismo, se tiene la ventaja de reducir los esfuerzos por volataje entre las capas de los devanados ya que se utiliza una vuelta por capa.
- » Por ejemplo, si en el diseño de un transformador de 200V se consideran 10V por vuelta, usando alambre y definiendo 2 capas se tienen hasta 200V entre 2 espiras contiguas de 2 diferentes capas, pero para devanados con lámina se tienen 20V entre capas contiguas.
- » En el arreglo donde se utilizan láminas se puede devanar el primario y secundario en la misma altura axial reduciendo su volumen y las corrientes de Eddy.
- » La barra de neutro esta dimensionada para manejar el 200% de la corriente de línea
- » Ocupan menos espacio que los convencionales
- » Tienen una menor corriente de inrush

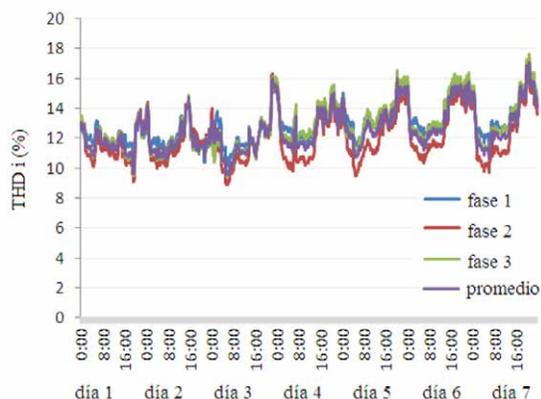


Figura 4. Ejemplo, Factor K en transformador que alimenta carga industrial agrícola

PREGUNTAS FRECUENTES SOBRE EL FACTOR K

» ¿UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K ELIMINA LOS ARMÓNICOS?

NO, el factor K es la capacidad de tolerar armónicos sin sufrir desgaste en el equipo, no de eliminarlos.

» ¿UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K ES MÁS EFICIENTE?

Si son eficientes si son utilizados en la aplicación adecuada.

» ¿UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K= 13 DE 150°C PUEDE TRABAJAR A 115°C O A 80°C?

Si, considerando cargas con factor K= 1, es decir que las cargas no seas con contenido armónico.

7 CONCLUSIONES

- » Reducción de la eficiencia provocada tanto por el incremento en la corriente eficaz como por las corrientes de eddy que son función del cuadrado de la frecuencia.
- » Incremento en los costos de operación
- » Capacidad de operación reducida con la relación a su nominal
- » Inversión en capital adicional
- » Incremento en la temperatura, pudiendo exceder los límites de elevación sobre la temperatura ambiente, provocando fallas prematuras
- » Incremento en los costos de mantenimiento por servicio y por reemplazo
- » Reducción de la productividad de la empresa por paros inesperados

RESUMEN

Las armónicas no son buenas.

Las armónicas se generan por cargas no lineales.

Las armónicas al estar presentes generan calentamiento excesivo en los sistemas eléctricos, provocando daños.

Incrementan el riesgo de una falla.

Aumentan las pérdidas en los distintos equipos de distribución.

NORMAS

ANSI/IEEE C.57.110: Práctica recomendada por IEEE para establecer la capacidad del transformador cuando se alimentan corrientes de carga no sinusoidales.

IEEE Std 519-2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power systems.

Especificación de la UL1561 (Underwriter Laboratories)

8 RECOMENDACIONES

- » Identificar en cada nivel de voltaje que carga se tiene y de que características.
- » Es recomendable para establecer el factor K adecuado realizar simulación de armónicos al realizar un diseño o proyecto.
- » Elegir un adecuado factor K según la carga que se tiene
- » Para mitigar los armónicos se puede realizar lo siguiente:
 - Limitar las fuentes generadoras de armónicas.
 - Balancear cargas en sistemas trifásico.
 - Dimensionar los neutros a un 200% (soporta trabajar con presencia de armónicas)
 - Tierras aisladas
 - Filtros de armónicas
 - Factor K (soporta trabajar con presencia de armónicas)



**SOLUCIONES DE CALIDAD, RENDIMIENTO
Y DURABILIDAD SUPERIOR, PARA LAS
APLICACIONES MÁS EXIGENTES**

9 BIBLIOGRAFÍA

- » IEE. (1998). IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-Sinusoidal Load Currents. IEE Std C57.110-1998 <http://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.89206>
- » Revista TECNURA. Tecnología y cultura afirmando el conocimiento
Estimación del factor K en transformadores de distribución usando
modelos de regresión lineal
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS – COLOMBIA
<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a02>.
- » Distorsión Armónica - Ing. Eugenio Téllez Ramírez
PROGRAMA DE AHORRO DE ENERGIA. AUTOMATIZACIÓN, PRODUCTIVIDAD Y
CALIDAD S.A. de C.V. apc@mail.precitool.com.mx

Todos los derechos reservados | © 2022 Amper SRL