NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Nota técnica: "Gestión del Ciclo de Vida de Transformadores en Plantas Fotovoltaicas". Parte 1

1. Introducción

El objetivo de este artículo es el de describir los efectos nocivos que ocurren en los transformadores de distribución y potencia, que se encuentran instalados en las plantas fotovoltaicas.

El factor principal, que afecta notoriamente la etapa de vida esperada de un transformador, emplazado en una subestación elevadora de una planta fotovoltaica, es el sobrecalentamiento interno. Este sobrecalentamiento será una consecuencia directa de la contaminación armónica, derivada de la actividad de los inversores de potencia.

Importante será resaltar, desde un comienzo, que las componentes armónicas, que se generan en el proceso de conversión de los inversores, provocarán una caída en el rendimiento y funcionalidad del transformador, debido a la generación de pérdidas adicionales.

Además, el sobrecalentamiento por armónicos provocará una solicitación adicional sobre el proceso natural de envejecimiento de la celulosa y del aceite, lo cual llevará a una gasificación característica en el muestreo de rutina de mantenimiento (en el caso de transformadores en aceite).

Por lo tanto, nuestro enfoque será el describir, en primer lugar, cómo los armónicos inciden en el desarrollo de la pérdidas adicionales y cómo éstas se integran en el Modelo Térmico Convencional del transformador, de forma tal de especificar un modelo que contemple la acción de la distorsión armónica.

Continuaremos analizando el proceso de gasificación consecuente, junto al factor de desclase, el cual se deberá tener muy en cuenta cuando se especifique el transformador (o transformadores) que será instalado en una planta fotovoltaica.

De la mano de lo dicho previamente, debemos considerar con suma atención que, muchos de los transformadores elevadores que se encuentran instalados en plantas fotovoltaicas, no han sido especificados para operar en ambientes con contaminación armónica, con toda la falta de precauciones en el diseño y fabricación que todo esto conlleva.

En tal sentido, nos centraremos en desarrollar el presente trabajo, a través del concepto de la Gestión del Ciclo de Vida del Transformador, es decir, desde su concepción/especificación, hasta su disposición final, pasando por los ciclos de Operación y Mantenimiento.

De esta forma, se podrán obtener conclusiones interesantes que permitirán realizar una especificación adecuada del transformador, así como un diseño y fabricación acordes al contexto operativo.

Estas conclusiones también serán muy útiles para implementar correctamente el ciclo de la Operación y Mantenimiento de la etapa de vida esperada.

En la presente Parte 1, vamos a comenzar describiendo los conceptos básicos, asociados con la contaminación armónica, tanto en las ondas de tensión como de corriente.

2. Clasificación de los armónicos en los sistemas eléctricos de potencia

Podemos clasificar a los armónicos, que pueden manifestarse en un sistema eléctrico de potencia, de la siguiente forma:

a) Armónicos enteros

Refieren a las ondas no senoidales periódicas, cuya característica principal es que las frecuencias de cada una son múltiplos enteros de la frecuencia de red (frecuencia fundamental).
Las formulaciones matemáticas de estas ondas, tanto de tensión como de corriente, son las siguientes:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{n} V_k \cos\cos(k\omega_1 t + \alpha_k) = V_0 + v^{(1)}(t) + v^{(2)}(t) + \cdots$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n} I_k \cos\cos(k\omega_1 t + \beta_k) = I_0 + i^{(1)}(t) + i^{(2)}(t) + \cdots$$

En donde k es un número entero, el cual representa el orden del armónico.
$\omega_1 = 2\pi f_1$, es la pulsación de la componente fundamental.
f_1 es la frecuencia fundamental.
V_k = amplitud máxima de la componente de tensión, correspondiente al armónico "k".
I_k = amplitud máxima de la componente de corriente, correspondiente al armónico "k".
V_0 = componente de asimetría de la onda de tensión.
I_0 = componente de asimetría de la onda de corriente.

Una característica común en las instalaciones eléctricas, es la existencia de armónicos con simetría de media onda, es decir aquellas ondas de tensión o de corriente en donde solamente existen los armónicos impares (k = 1 (fundamental), k = 3, k = 5, etc.).
Los armónicos de orden par no suelen ser comunes en las instalaciones, por lo que generalmente se atribuyen a alguna anomalía operacional (por ej. operación incorrecta en dispositivos electrónicos de potencia).
Obviamente existen excepciones, como es el caso de los sistemas de rectificación de media onda, etc.

b) Armónicos Triplen

En este caso las ondas poseen frecuencias correspondientes a múltiplos impares del 3er armónico, es decir, k = 3, 9, 15, 21, 27, …
Revisten suma importancia en los sistemas de potencia con la estrella puesta a tierra, ya que tienden a sobrecargar al conductor de neutro, por la existencia de una corriente de circulación en éste.
Lo anterior debe su causa a que los armónicos de 3er orden de la corriente del neutro, son 3 veces mayores a la corriente de fase de 3er armónica, por encontrarse pulsando éstos en fase.

c) Interarmónicos

Se caracterizan por poseer frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Se manifiestan como frecuencias discretas o como un espectro de banda.
Deben su causa a la operación de cicloconvertidores, máquinas asincrónicas, convertidores estáticos de frecuencia, etc.
Un efecto, principalmente nocivo de estos armónicos, es la generación de cuplas parásitas de baja frecuencia en las máquinas rotativas asincrónicas.

d) Subarmónicos

Corresponden a ondas cuyas frecuencias son menores a la frecuencia fundamental.
Deben su causa a fenómenos de resonancia entre armónicos de corriente o tensión, con las capacidades e inductancias (serie) del sistema de potencia. Este efecto es conocido como de "Resonancia Subsincrónica".
También se relacionan con sistemas de operación altamente inductivos, así como aquellos que se encuentran conformados con grandes bancos de capacitores.

e) Armónicos Característicos

Son las ondas cuyas frecuencias se asocian a la secuencia dada por $(12\ m + 1)\ f_1$. El número "m" pertenece a los enteros.
El origen se puede asignar a la operación de inversores y rectificadores.

f) Armónicos No Característicos

En este caso, las ondas poseen frecuencias en la secuencia dada por $(12\ m - 1)\ f_1$. El número "m" pertenece a los enteros.
Deben su causa a la operación de sistemas eléctricos de características no simétricas.

g) Armónicos de secuencia

Podemos agruparlos de la siguiente forma:

- De secuencia positiva

  Las frecuencias de las ondas vienen dadas por la secuencia: $h\ f_1$, con h = 1, 4, 7, 10, ….
  Ocurren al operar con cargas no lineales en sistemas de potencia.

- De secuencia negativa

  Las frecuencias de las ondas vienen dadas por la secuencia: $h\ f_1$, con h = 2, 5, 8, 11, ….
  También deben su causa al operar con cargas no lineales en sistemas de potencia.

- De secuencia homopolar

Las frecuencias de las ondas vienen dadas por la secuencia: h f_1, con h = 3, 6, 9, 12, ….
Se originan al operar con desbalances.

h) Armónicos Espaciales

Refieren a los armónicos en los flujos magnéticos de las máquinas eléctricas (máquinas sincrónicas y asincrónicas).
Son consecuencia de la asimetría geométrica de los circuitos magnéticos del estator y del rotor.
Pertenecen a la secuencia de frecuencias dada por: h f_1, siendo h un número entero.

i) Armónicos Temporales

Corresponden a los armónicos de tensión y corriente en las máquinas eléctricas rotativas, a dispositivos de electrónica de potencia (fuentes inversoras, PWM, etc.) y a condiciones anómalas en el sistema de potencia (desbalances y fallas).
En las máquinas eléctricas rotativas se generan por la saturación del núcleo magnético.
Como los espaciales, pertenecen a la secuencia de frecuencias dada por: h f_1, siendo h un número entero.

3. Distorsión armónica. Parámetros

A continuación, vamos a exponer un conjunto de parámetros que permiten cuantificar la distorsión armónica en una onda de tensión o de corriente.

La idea es presentar aquellos parámetros que se consideran representativos de los problemas, asociados a la distorsión armónica.

Tendremos:

a) Valor eficaz de la tensión

$$V = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V(k)^2}$$

Siendo V(k) el valor eficaz de la tensión, correspondiente al armónico de orden “k”, que compone la onda resultante de tensión v(t).

b) Valor eficaz de la corriente

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I(k)^2}$$

Siendo I(k) el valor eficaz de la corriente, correspondiente al armónico de orden “k”, que compone la onda resultante de corriente i(t).

c) Factor de Distorsión

Mide la relación entre el contenido armónico de la onda y su correspondiente valor eficaz.
El Factor de Distorsión de la onda de corriente será:

$$FDi = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I(k)^2}}{I}$$

Y el Factor de Distorsión de la onda de tensión será:

$$FDv = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V(k)^2}}{V}$$

d) Factor Armónico o Distorsión Armónica Individual

Representa una medida de la contribución de la armónica de orden “k”, de una dada onda, en relación a su componente fundamental.
La expresión, para la onda de corriente, es la siguiente:

$$FAi(k) = \frac{I_{(k)}}{I_{(1)}}$$

Para la onda de tensión tendremos:

$$FAv(k) = \frac{V_{(k)}}{V_{(1)}}$$

Para k > 1.

e) Distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés)

Es un índice que cuantifica el contenido armónico de la onda distorsionada, estableciendo así una medida del valor efectivo de los armónicos.
Se especifica tanto para la onda de tensión como para la de corriente.
La expresión de la THD para la onda de corriente será:

$$\mathrm{THD_i} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty}[\mathrm{I(k)}]^2}}{\mathrm{I(1)}} \times 100$$

Para la onda de tensión tendremos:

$$\mathrm{THD_v} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty}[\mathrm{V(k)}]^2}}{\mathrm{V(1)}} \times 100$$

Representa la relación entre el valor eficaz de los armónicos (distorsión armónica), expresado en porcentual del valor eficaz de la fundamental.
Es uno de los parámetros más utilizados en los análisis de las redes eléctricas, siendo con el FA muy útiles para evaluar operaciones de dispositivos que se calibran para la componente fundamental de la onda.

f) Distorsión de Demanda Total (TDD, por sus siglas en inglés)

Con el fin de incorporar un índice que relacione la distorsión armónica con el total de la corriente nominal (demanda de la carga) que circula por la instalación, se definió este factor, para la onda de corriente, de la siguiente forma:

$$\mathrm{TDD_i} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty}[\mathrm{I(k)}]^2}}{\mathrm{In}}$$

Este parámetro es de suma importancia cuando se obtienen altos valores de THD, en condiciones de operación a baja carga y, por lo tanto, la distorsión no es significativa por el bajo nivel consecuente de la potencia de distorsión (o de Deformación).
En términos prácticos, se puede adoptar la secuencia de armónicos hasta el nivel 50, en el proceso de suma del numerador de la expresión.

Departamento de
Ingeniería Nova Mirón S.A