NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Nota técnica: "Gestión del Ciclo de Vida de Transformadores en Plantas Fotovoltaicas. Parte 2"

1. Niveles de la distorsión armónica

Habiendo visto en la Parte 1 la descripción y formulación de los parámetros más significativos en el análisis de la distorsión armónica en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), a continuación vamos a comentar acerca de los niveles permitidos de las componentes armónicas.

En tal sentido, nos vamos a referir, en la presente Parte 2, a los requisitos establecidos en la norma IEEE 519 (Recommended Practice And Requirements For Harmonic Control In Electric Power Systems).

Esta norma presenta un conjunto de recomendaciones y guías prácticas, en relación a los requisitos necesarios para el control de las componentes armónicas y la compensación de los flujos reactivos, en los SEP.

En base a lo antedicho, define y establece los niveles máximos permitidos para la distorsión armónica.

A tal fin, se clasifican los niveles y las distorsiones totales, en relación a las ondas de tensión y corriente.

En la siguiente tabla, se resumen y establecen los niveles máximos permitidos para las componentes armónicas en la onda de tensión.

Tensión Nominal (V)	Distorsión Armónica Individual (%)	Distorsión Armónica Total (%)
U ≤ 69 kV	3	5
69 kV < U ≤ 161 kV	1,5	2,5
U > 161 kV	1	1,5

Debemos aclarar que la expresión utilizada por la norma, en relación al cálculo de la Distorsión Armónica Total de la onda de tensión, es la siguiente:

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

Siendo:

V(k) = componente armónica individual de la onda de tensión.
Vn = tensión nominal del sistema.
k = orden k-ésimo del armónico.

Para la onda de corriente se establecen los siguientes niveles máximos permitidos, considerando tres rangos de tensión nominal del sistema y cinco categorías de componentes armónicas, en función de la relación Icc/Ic:

Vn (kV)	Icc/Ic	TDD (%)	k < 11 (%)	11 ≤ k < 17 (%)	17 ≤ k < 23 (%)	23 ≤ k < 35 (%)	k ≥ 35 (%)
≤ 69	< 20	5	4	2	1,5	0,6	0,3
	20 – 50	8	7	3,5	2,5	1	0,5
	50 – 100	12	10	4,5	4	1,5	0,7
	100 – 1000	15	12	5,5	5	2	1
	> 1000	20	15	7	6	2,5	1,4
> 69 ≤ 161	< 20	2,5	2	1	0,75	0,3	0,15
	20 – 50	4	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25
	50 – 100	6	5	2,25	2	0,75	0,35
	100 – 1000	7,5	6	2,75	2,5	1	0,5
	> 1000	10	7,5	3,5	3	1,25	0,7
> 161	< 50	2,5	2	1	0,75	0,3	0,15
	≥ 50	4	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25

En este caso, los límites se especifican a través del parámetro Distorsión de Demanda Total, dado por la expresión de cálculo:

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

Siendo:

I(k) = componente armónica individual de la onda de corriente.
Ic = corriente máxima de carga en el punto de evaluación.
Icc = corriente de cortocircuito en el punto de evaluación.

k = orden k-ésimo del armónico.

La norma también aclara algunos temas de índole práctica, como a continuación se detalla.

- No se acepta la existencia de componente unidireccional en el contenido armónico.
- En el caso de armónicas de orden par, se deben incrementar en un 25 % los límites indicados en la tabla previa.
- Para la corriente de cortocircuito, debe utilizarse en el cálculo el valor mínimo en el punto de evaluación, ya que así se consigue un análisis en condiciones más severas. Se destaca que a menor valor de Icc/Ic (sistema menos robusto), la exigencia en la distorsión armónica es mayor.
- Los sistemas más robustos tienen la capacidad de transmitir niveles mayores de componentes armónicas, sin generar una distorsión significativa en las ondas de tensión (caídas en la red).

2. Efectos de la distorsión armónica sobre las ondas de tensión y corriente

Antes de abocarnos al desarrollo de los efectos de los armónicos sobre los trafos de potencia y distribución, vamos a dar una breve descripción de la incidencia de la distorsión armónica sobre las ondas de tensión y corriente en un SEP.

Podemos tener los siguientes efectos:

a) <u>Sobre la onda de tensión</u>

Es importante tener en cuenta que las componentes armónicas de la onda de tensión son causa de la generación de armónicos en la onda del flujo magnético, en un dado bobinado, según se observa en la siguiente expresión:

$$\varphi k = \frac{Uk}{j(\omega k)N} \qquad \text{con } k = 1, 2, 3, \ldots$$

Siendo:

Uk = componente armónica k-ésima en la onda de tensión.
φk = componente armónica k-ésima en la onda del flujo magnético.
ω = pulsación angular en la frecuencia fundamental.
k = orden h-ésimo del armónico.
N = número de espiras del bobinado.

Debido a que la distorsión armónica total en la onda de tensión (THDu) en los SEP, no debe exceder el límite del 5 % (fijado por el nivel de 69 kV), así como las amplitudes de las componentes son relativamente pequeñas, en relación a la fundamental (k = 1), se pueden obviar éstas, en una primera instancia, sin obtener errores apreciables, a la hora de evaluar los efectos de la distorsión sobre los transformadores.

Es por este motivo que, al no influir significativamente las componentes Uk (k ≥ 2), las Pérdidas en Vacío del trafo se pueden asumir que son debidas solamente a U1 (k = 1).
En tal sentido, de aquí en más, cuando hagamos referencia a los efectos de los contenidos armónicos en los trafos, estaremos directamente involucrando a los que pertenecen a la onda de corriente, como veremos a continuación.

b) Sobre la onda de corriente

Las componentes de la onda de corriente Ik, poseen un peso significativo en los SEP.
Estas componentes son la causa principal del aumento de las pérdidas adicionales en los bobinados y otras partes estructurales de los trafos.
Podemos distinguir las siguientes componentes de pérdida:

- Pérdida por la resistencia óhmica de los bobinados

  Debido al aumento del valor eficaz de la corriente de carga que circula por el trafo (como consecuencia de la distorsión armónica), también aumentará la pérdida por efecto Joule, ya que las mismas son directamente proporcionales al cuadrado del citado valor eficaz.

- Pérdida por corrientes de Foucault en los bobinados

  Sabemos que, al estar estas pérdidas relacionadas con el flujo magnético, las mismas variarán con la magnitud del valor eficaz de la corriente de carga al cuadrado y de la frecuencia al cuadrado.
  Es importante tener en cuenta que, por el efecto pelicular, el flujo magnético no concatena a todos los conductores que conforman los bobinados, a altas frecuencias.
  En la Parte 3 vamos a detallar estos aspectos, relacionados con la distribución del campo magnético en los bobinados de un trafo.
  En principio, podemos decir que existe un incremento del campo magnético disperso, generando así un incremento significativo de las pérdidas.
  El incremento de estas pérdidas, por la actividad armónica, será la causa directa de un sobrecalentamiento efectivo en el interior del transformador.
  Esta componente se puede expresar de la siguiente forma:

$$\mathrm{Pf} = \mathrm{Pfn} \sum_{k=1}^{kmax} k^2 \times \left(\frac{Ik}{In}\right)^2$$

  Siendo:

  Pfn = pérdida por Foucault en condiciones nominales de operación.
  Pf = pérdida por Foucault debido a la actividad armónica.
  In = valor eficaz de la corriente a frecuencia nominal y carga nominal.
  Ik = valor eficaz de la corriente del armónico de orden k.

- Otras pérdidas adicionales

La acción del flujo de dispersión, sobre distintas estructuras metálicas del transformador, también será la causa de la generación de pérdidas, como ser en el núcleo magnético, cuba, abrazaderas, etc.
La existencia de componentes armónicas provocará el aumento de estas pérdidas, con un consecuente incremento de la temperatura en las zonas estructurales afectadas.
En los transformadores en aceite, este hecho será un factor importante en el aumento de la temperatura del punto caliente en el volumen del líquido aislante y en una consecuente gasificación.
Esta pérdida se caracteriza por aumentar con el "cuadrado" de la magnitud de la corriente armónica, pero no así con el correspondiente orden, sino que aumentarán en una cantidad de aproximadamente "0,8" en el exponente armónico.
En tal sentido, se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\mathrm{Pop} = \mathrm{Popn} \sum_{k=1}^{kmax} k^{0,8} \times \left(\frac{Ik}{In}\right)^2$$

Siendo:

Popn = otras pérdidas adicionales en condiciones nominales.
Pop = otras pérdidas adicionales por actividad armónica.
In = valor eficaz de la corriente a frecuencia nominal y carga nominal.
Ik = valor eficaz de la corriente del armónico de orden k.

Como ya comentamos previamente, se utiliza un factor de 0,8 como exponente del armónico de orden k. Este valor es especificado en las normas y verificado experimentalmente.

3. Consecuencias de la distorsión armónica sobre los transformadores

En una primera aproximación, podemos resumir algunos efectos principales y significativos de la acción de los armónicos sobre los transformadores.
Vale aclarar que los iremos desarrollando a lo largo del trabajo, en sucesivas partes.
Tendremos:

- Aumento de las pérdidas en el núcleo magnético y otras partes estructurales.

- Aumento de las pérdidas en los conductores (bobinados).

- Saturación del núcleo magnético por variación del punto de operación en la curva característica de flujo-corriente.

- Eventual existencia de saturación de medio ciclo en el núcleo magnético, como consecuencia de la presencia de armónicos pares y de componente unidireccional en la distorsión resultante (no permitida por la norma).

- Reducción de la vida útil debido al sobrecalentamiento, provocado por el aumento de las pérdidas.
- Deterioro de la aislación en las cercanías de los terminales, debido a la solicitación de alta tensión, como consecuencia de la operación de dispositivos de electrónica de potencia.
- Disminución de la eficiencia operativa.
- Desclase de la potencia nominal.
- Generación de resonancia paralelo según el orden “k” del armónico, así como fenómenos de ferrorresonancia.

Departamento de Ingenieria.
Nova Mirón S.A.