NOVA MIRON
SERVICIOS & TRANSFORMADORES

Nota técnica: "Gestión del Ciclo de Vida de Transformadores en Plantas Fotovoltaicas. Parte 4"

1. Operación con carga variable

El transformador instalado en la planta FV se caracteriza fundamentalmente por operar bajo un ciclo de carga variable, a lo largo del día, debido a que la radiación solar es intermitente.

Un hecho a tener en cuenta es que las variaciones de la radiación solar se manifiestan en más de una ocasión en el transcurso de las aproximadamente 8 horas de disponibilidad, determinando así una operación fluctuante del transformador.

En tal sentido, se establece que el transformador de la SET elevadora tendrá asociada una operación especial, distinta a la correspondiente a transformadores regulares, bajo un entorno de carga constante a lo largo del día.

Lo anterior nos determina una perspectiva distinta en el diseño de la máquina, en relación a los transformadores regulares, prestando especial atención a las pérdidas involucradas durante la operación.

Por ejemplo, habrá que considerar el impacto de las pérdidas en vacío del transformador, ya que a baja radiación solar, se manifestará un incremento de dichas pérdidas.

Otro factor de diseño importante, a tener en cuenta, será aquel relacionado con las variaciones del ciclo de carga operativo, debido a que se observará una fluctuación de la corriente que circulará por el transformador.

Es decir, la operación a corrientes fluctuantes llevará a establecer un ciclo térmico de las mismas características, cuya consecuencia negativa inmediata será la de acelerar el envejecimiento térmico de la aislación, con la correspondiente disminución de la vida útil de la máquina, en su ciclo de vida previsto.

Derivado de este problema, se podrá detectar la existencia de Descargas Parciales en el sistema de aislación, así como un aumento de la Temperatura del Punto Caliente (Tpc) durante el desarrollo del ciclo operativo, lo cual favorecerá el proceso de degradación del aislamiento.

Como ya comentamos en la Parte 3, el tiempo de vida en servicio del transformador estará fuertemente determinado por el valor de la Temperatura del Punto Caliente (Tpc) y por lo tanto será un objetivo principal el de establecer las condiciones de trabajo para una operación en régimen armónico de la corriente.

Lo anterior se asocia con la evaluación de la capacidad de carga del transformador y su desclase consecuente, a través del cálculo del Factor K.

2. Problemas en los transformadores en plantas FV

Se pueden establecer en tres categorías los problemas que presentan los transformadores en las plantas FV, a saber:

- Existencia de Armónicos.
- Cargas No Lineales.
- Ciclos de operación intermitentes.

A continuación se realiza una descripción general de cada categoría.

2.1. Existencia de Armónicos

Como ya hemos comentado en las partes previas, las componentes armónicas de la corriente poseen un efecto negativo principal en los sistemas eléctricos de potencia.
La consecuencia inmediata será la de generar pérdidas adicionales en los arrollamientos de los transformadores, así como en distintos componentes estructurales que lo conforman.
Según ya habíamos indicado, la expresión de pérdidas en los arrollamientos por acción de las componentes armónicas de la corriente viene dada por:

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

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.

Y en las partes estructurales:

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

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.

De esta expresión podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Las pérdidas por Foucault, como consecuencia de la existencia de componentes armónicas en la corriente, varía con el “cuadrado” de la componente eficaz de orden “k”, así como con el “cuadrado” de la frecuencia de dicha componente.
- Se observa que al aumentar el valor eficaz de la poliarmónica de corriente, habrá un incremento significativo de las pérdidas por efecto Joule (proporcional con el “cuadrado” de la corriente).
- El aumento de las pérdidas en los arrollamientos llevará a un incremento consecuente de las temperaturas en el interior del transformador (aumento de la generación de calor → aumento de la $T0$ → > $\Delta T0$).
- Se deberá tener en cuenta en el cálculo y diseño del transformador, el aumento de las Pérdidas en Vacío en el núcleo magnético, debido a la presencia de las componentes Ik.
- Se deduce entonces que el dueño de la planta FV deberá especificar los Armónicos generados por el inversor, efectivamente utilizado.

- Además, para instalaciones complejas, se deberán proveer los resultados de la simulación con armónicos, sobre el nodo en donde el transformador será conectado.
- Se deduce, en tal sentido, que los valores de las componentes armónicas deberán utilizarse en el cálculo de las pérdidas y en el diseño de la refrigeración del transformador.

2.2. Cargas No Lineales

Será importante destacar que la capacidad de generación de energía eléctrica de la planta FV, si no posee almacenamiento, estará directamente relacionada con la radiación disponible en el lugar de emplazamiento, la hora del día y las condiciones climáticas, determinando así una característica variable en el tiempo.
Por lo tanto, podemos señalar las siguientes conclusiones:

- La curva de carga tendrá la misma característica variable que la curva de irradiación.
- La operación en vacío en la planta FV tendrá como consecuencia un impacto en la Pérdida de Capitalización.
- De lo dicho previamente, el dueño de la planta FV deberá asegurarse que la capitalización del transformador tenga en consideración la curva de carga.
- Se deberá tener en cuenta el tamaño del transformador, debido a las variaciones de la irradiación solar.
- Los transformadores regulares se diseñan (por lo general) para operar en servicios de cargas constantes y no para cargas que varían en el día. La variación de carga trae aparejado un desafío en el diseño enfocado
- Es decir, el transformador deberá especificarse para operar en los ciclos de generación de energía de la planta FV, así como la característica de salida de los inversores.
- No deberá olvidarse, en la especificación, las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento de la planta FV.
- Tener en cuenta que un transformador sobredimensionado tendrá la capacidad de poder suministrar la máxima energía solar, transformada en energía eléctrica, a la red.
- También tener en cuenta que este diseño (sobredimensionado) provocará un aumento en el costo de la planta FV (mayores inversores, líneas de distribución, etc.).

2.3. Ciclos de operación intermitentes

A continuación se describen los posibles ciclos de operación intermitente del transformador, los cuales impactan negativamente en el rendimiento del mismo.

a) Transitorios de Tensión

- Las salidas de los inversores instalados en la planta FV, poseen componentes armónicas en la onda de tensión, debido a la conmutación electrónica, lo cual puede derivar en descargas a ciertas frecuencias.
- Los transitorios de tensión pueden afectar el diseño del lado MT, lo cual debe su causa a la conmutación multi etapa de los bancos de capacitores o también por operaciones de los interruptores.

- Es aconsejable la instalación de una pantalla electroestática, con el objetivo de atenuar la transferencia de las perturbaciones de tensión desde el lado BT al lado MT. Además, permite limitar la transferencia de sobretensiones desde MT a BT y a los inversores.

b) Corriente de Inserción

- Los transformadores en las plantas FV pueden encontrarse sometidos a altos valores de la Corriente de Inserción, durante el proceso de conmutación.
- El valor de la Corriente de Inserción puede encontrase en el rango de 4 a 40 veces el valor de la correspondiente corriente nominal.
- A los fines prácticos de los cálculos y del diseño, se adopta de 7 a 12 veces el valor de la corriente nominal.
- Su existencia impacta sobre la calidad de la energía del sistema eléctrico de potencia, cuyo efecto inmediato será las caídas de tensión en la red.
- Este problema deberá tenerse muy en cuenta cuando se establecen las especificaciones del transformador a ser emplazado en la planta FV.

c) Corriente de Alimentación y Desbalance de Tensión

- Los desbalances de carga en el lado de BT, de un transformador de tres arrollamientos, puede ser un factor importante de problemas.
- Por ejemplo, si los inversores suministran corrientes desbalanceadas, se tendrá como consecuencia un aumento en el calentamiento de los arrollamientos del transformador.
- Un desbalance de tensión puede devenir en un excesivo incremento de temperatura en el núcleo magnético y en los arrollamientos. También puede provocar ruido excesivo y eventual saturación del núcleo.

d) Regulación de Tensión

- La tensión de salida del transformador se puede ajustar por variación del tap del conmutador (ya sea sin tensión o bajo carga), el cual vendrá instalado, por lo general, en el lado de MT.
- En ocasiones, el conmutador podrá instalarse en el lado de BT, a través del requerimiento de atender al deterioro de los paneles solares a lo largo del tiempo.
- Se sabe que un gran porcentual de fallas en los transformadores es debido a problemas en los conmutadores (en especial los de bajo carga o CBC).
- De lo anterior, se desprende que una frecuente conmutación en la operación de las plantas FV, requerirá un incremento de las intervenciones por Mantenimiento sobre el CBC.

e) Componente de Continua

- Se deberá prestar mucha atención a la eventual existencia de una componente en corriente continua (la poliarmónica de corriente puede contener una componente en continua o valor medio no nulo). Esta componente se transferirá al bobinado conectado al inversor.

- En tal sentido llevará a aumentar la corriente de magnetización del núcleo magnético, con la consecuente saturación del mismo y el aumento de la corriente circulando en partes estructurales.
- Además, aumentará la temperatura del núcleo y el ruido audible del transformador.
- La componente de corriente continua esperada en los inversores, deberá incluirse en la especificación del transformador, permitiendo de tal modo al calculista-proyectista analizar y evaluar los efectos que se deberán tener en cuenta en el diseño del transformador.

3. Gasificación en los transformadores por actividad en plantas FV

La generación de gases en los transformadores instalados en plantas FV, tiene su origen, por lo general, en las consecuencias derivadas del "stress térmico".

Lo anterior es el resultado de la actividad de las componentes armónicas y a la operación en un régimen de carga variable del transformador.

En tal sentido, será muy común observar, ante casos de gasificación, la verificación de este estado anómalo en transformadores en baño de aceite nuevos, registrando, de tal modo, una concentración en el aumento del parámetro Total de Gases Combustibles (TGC), a través del tiempo.

En base a resultados de análisis de patrones de gases, en transformadores instalados en plantas FV, se observan actividades significativas de los gases: Hidrógeno (H_2), Etano (C_2H_6) y Metano (CH_4).

La característica típica de los gases indicados (relevados de campo), corresponden a la categoría de diagnóstico, denominada de "Envejecimiento Térmico".

Como ya hemos comentado, la causa de esta gasificación se corresponde fundamentalmente por la existencia de pérdidas adicionales por Foucault y otras partes estructurales, debido a la actividad de las componentes armónicas.

Por ejemplo, se ha observado que en un espectro de armónicos de una planta FV, la componente de tercera armónica puede alcanzar un valor de 0,35 º/1, en referencia al valor normalizado de la corriente nominal de 1 º/1.

Lo anterior nos lleva a concluir que el aporte de la tercera armónica a las pérdidas adicionales en el transformador, será importante, teniendo así un impacto significativo en el calentamiento interno de la máquina y la gasificación consecuente.

De igual forma, de estos análisis se observa que la Temperatura del Punto Caliente (Tpc) puede alcanzar un incremento del 15 %, en relación al valor nominal, lo cual puede llevar a superar el máximo permitido.

Recordemos que la vida esperada del transformador estará directamente asociada al valor y a la continuidad en el tiempo de la Tpc, ya que este parámetro es el que impacta directamente, en forma negativa, en el envejecimiento del papel y el aceite.

Los proyectistas-calculistas del transformador, deberán tener muy presente la característica del espectro armónico de la planta FV, ya que de esta forma se podrán establecer los requerimientos correctos y el diseño adecuado de la refrigeración de la máquina.

Es por este motivo que los dueños de las plantas FV deberán especificar con precisión el tipo y cantidad de armónicos presentes en el punto de interconexión con el transformador, los cuales serán generados por los inversores de la planta.

Como resultado de la interacción entre los dueños de las plantas FV y los fabricantes de transformadores, se establecerán las responsabilidades pertinentes, elaborando así los roles de cada una de las partes para asegurar la compatibilidad del transformador, con el fin específico de ser emplazado en una planta FV.

A continuación, detallamos una característica típica de gases disueltos en el aceite, de un transformador operando en una planta FV.

CH4 (ppm	C2H4 (ppm)	C2H6 (ppm)	H2 (ppm)	C2H2 (ppm)	O2 (ppm)	N2 (ppm)	CO (ppm)	CO2 (ppm)	TGC (ppm)
462	45	610	1510	0	29200	73510	60	780	2687

Se observa la elevada concentración del gas Hidrógeno, así como la de los gases Metano y Etano, superando, en todos los casos, los límites recomendados.

Considerando los límites especificados en el estándar IEEE C57-104 del parámetro TGC, podemos observar que el transformador se clasifica, en su estado operativo, en la Condición Nº 3.

Estado	CH4	C2H4	C2H6	C2H2	H2	CO	CO2	TGCD
Condición 1	<120	<50	<65	<1	<100	<350	<2500	**<721**
Condición 2	121-400	51-100	66-100	2-9	101-700	351-570	2500-4000	**721-1920**
Condición 3	401-1000	101-200	101-150	10-35	701-1800	571-1400	4001-10000	**1921-4630**
Condición 4	>1000	>200	>150	>35	>1800	>1400	>10000	**>4630**

La cual, en base a la referencia del citado estándar, nos determina una degradación significativa de la aislación, recomendando evaluar cada gas en particular y enfocarse en el estudio de la evolución de los gases.

De todo lo descripto previamente, se concluye que será un factor importante el de establecer la capacidad de carga del transformador de distribución emplazado en la planta FV, ya que la actividad de las componentes armónicas limitará esta función principal.

4. Capacidad de carga del transformador

Una forma de determinar el desclase consecuente del transformador, por la acción de los armónicos presentes en la instalación, es a través del denominado Factor K.

El objetivo será el de establecer cuál es el valor de la corriente poliarmónica que genera la misma pérdida equivalente a la corriente nominal senoidal.

De esta forma quedará establecido un desclase del transformador, asegurando así de no exceder la Tpc nominal del mismo y por lo tanto garantizar la vida útil de diseño.

Por lo tanto, y con el fin ya indicado de cuantificar la capacidad de un transformador de entregar su potencia nominal (o corriente nominal) con un dado contenido armónico en la onda de corriente, se define el factor K de la siguiente forma:

$$K = \frac{\sum_{k=1}^{kmax} k^2 \, Ik^2}{In^2}$$

Sin entrar en una demostración formal, se puede establecer que el valor máximo eficaz de la corriente poliarmónica en tanto por uno, que puede circular por el transformador, de forma tal de obtener la misma pérdida equivalente que en el caso de operación nominal a régimen senoidal, será:

$$\mathrm{Imax(pu)} = \sqrt{\frac{1 + \mathrm{Ptn}}{1 + \mathrm{K}\frac{\mathrm{In}^2}{\sum_{k=1}^{kmax} \mathrm{Ik}^2}\ \mathrm{Ptn}}}$$

En donde:

Ptn = Pfn + Popn

Será así como se obtendrá la Potencia Aparente (kVA o MVA) del transformador (desclase en relación a la Potencia aparente Nominal de diseño), requerida para no comprometer el estado de la aislación sólida, a lo largo de la vida operativa del mismo.

Departamento de ingeniería.
Nova Mirón S.A.