

Corrientes de Excitación en un Transformador Trifásico.

1. Introducción.

En un transformador monofásico la corriente en vacío no puede ser sinusoidal debido a la característica no lineal del hierro.

La descomposición en series de Fourier de la corriente de vacío de un transformador monofásico se vio que presenta solo armónicos impares, siendo el da mayor peso el tercero; con el propósito del análisis que sigue aproximaremos la corriente de vacío por la fundamental más el tercer armónico, esto es:

$$i(t) \cong \sqrt{2} \cdot I_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cos(3\omega t + \varphi_3)$$

Consideremos un transformador trifásico, en vacío, formado por tres transformadores monofásicos con sus primarios y secundarios conectados en estrella.

Estudiemos las corrientes por las tres fases del transformador:

$$i(t)_A = i(t)_{A1} + i(t)_{A3} = \sqrt{2} \cdot I_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cos(3\omega t + \varphi_3)$$

$$\begin{aligned} i(t)_B &= i(t)_{B1} + i(t)_{B3} = \sqrt{2} \cdot I_1 \cos\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cos\left(3\omega t + \varphi_3 - 3 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= \sqrt{2} \cdot I_1 \cos\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cos(3\omega t + \varphi_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i(t)_C &= i(t)_{C1} + i(t)_{C3} = \sqrt{2} \cdot I_1 \cos\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cos\left(3\omega t + \varphi_3 + 3 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= \sqrt{2} \cdot I_1 \cos\left(\omega t + \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot I_3 \cos(3\omega t + \varphi_3) \end{aligned}$$

Se observa que las terceras armónicas de las corrientes de las tres fases se encuentran en fase (sistema homopolar de corrientes) por lo cual si el neutro del transformador no se conecta entonces no podrán circular las terceras armónicas por las bobinas del transformador.

El hecho de que no puedan circular las terceras armónicas de corriente provoca que las mismas sean sinusoidales $i(t)_A = i(t)_{A1}$; como la relación flujo corriente esta impuesta por la curva del hierro, la cual no es línea, provoca que el flujo ya no sea más sinusoidal.

Entonces la no circulación de las corrientes de tercera armónica hace que el flujo, en cada fase, se deforme y por tanto aparezcan armónicos en el flujo:

$$\phi(t)_A \cong \sqrt{2} \cdot \phi_1 \cos(\omega t + \psi_1) + \sqrt{2} \cdot \phi_3 \cos(3\omega t + \psi_3)$$

$$\begin{aligned} \phi(t)_B &\cong \sqrt{2} \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot \phi_3 \cos\left(3\omega t + \psi_3 - 3 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= \sqrt{2} \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot \phi_3 \cos(3\omega t + \psi_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi(t)_C &\cong \sqrt{2} \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot \phi_3 \cos\left(3\omega t + \psi_3 + 3 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= \sqrt{2} \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot \phi_3 \cos(3\omega t + \psi_3) \end{aligned}$$

Como la tensión inducida es la derivada del flujo entonces aparece contenido armónico en la misma; siendo el tercer armónico el componente de mayor peso.

$$e(t)_A \cong \sqrt{2} \cdot w \cdot \phi_1 \cos(\omega t + \psi'_1) + \sqrt{2} \cdot 3 \cdot w \cdot \phi_3 \cos(3\omega t + \psi'_3)$$

$$\begin{aligned} e(t)_B &\cong \sqrt{2} \cdot w \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi'_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot 3 \cdot w \cdot \phi_3 \cos\left(3\omega t + \psi'_3 - 3 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= \sqrt{2} \cdot w \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi'_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot 3 \cdot w \cdot \phi_3 \cos(3\omega t + \psi'_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e(t)_C &\cong \sqrt{2} \cdot w \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi'_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot 3 \cdot w \cdot \phi_3 \cos\left(3\omega t + \psi'_3 + 3 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= \sqrt{2} \cdot w \cdot \phi_1 \cos\left(\omega t + \psi'_1 + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} \cdot 3 \cdot w \cdot \phi_3 \cos(3\omega t + \psi'_3) \end{aligned}$$

Los flujos de tercer armónico son homopolares por la misma razón que se vio lo eran las corrientes y por tanto las tensiones inducidas, derivadas de los flujos homopolares de cada fase, serán tensiones homopolares; esto es la tensión de fase inducida debido al flujo de tercer armónico de la fase A está en fase con el de la fase B y con el de la fase C.

Observar que las tensiones de línea no presentan terceros armónicos pues al hacer la diferencia de las tensiones de fase los mismos se cancelan.

Se concluye que en un transformador Yy sin conectar los neutros las corrientes homopolares de tercer armónico no tienen camino y por tanto aparecen tensiones inducidas de tercer armónica, en cada fase, las cuales son homopolares.

Observar que la presencia de tensiones de terceras armónicas en las tensiones de fase tiene como consecuencia adicional que los neutros de la fuente y de del transformador ya no estén a la misma tensión.

Si el neutro del transformador se conecta al neutro de la fuente entonces por las bobinas de la máquina circulara la fundamental y la tercera armónica de la corriente y por la línea de neutro circulará una corriente igual a:

$$i(t)_N = i(t)_A + i(t)_B + i(t)_C = \sqrt{2} \cdot 3 \cdot I_3 \cos(3\omega t + \varphi_3)$$

O sea una corriente del triple de la frecuencia de la red y valor eficaz $I_N = 3 \cdot I_3$.

Debido a que las corrientes de tercer armónico circulan el flujo será sinusoidal y por tanto también lo serán las tensiones inducidas.

El hecho de haber dado un camino a las corrientes de tercer armónico provoco que desaparezcan los terceros armónicos del flujo; esto también se hubiera conseguido si en lugar de conectar el neutro primario al neutro de la fuente se hubiera dado un camino a las terceras armónicas de corriente mediante el neutro del secundario del transformador.

2. Transformador conectado Yy.

El análisis de un transformador Yy se realizó en la introducción.

3. Transformador conectado Yd.

Si el primario presenta el neutro conectado de forma de que las terceras armónicas de corriente tengan un camino entonces las tensiones y los flujos no tendrán componentes homopolares.

Si el neutro del primario se encontrara aislado entonces por el primario del transformador no pueden circular las corrientes homopolares (terceras armónicas y sus múltiplos).

Las corrientes homopolares que no pueden circular por el primario lo pueden hacer dentro del triángulo del secundario por lo cual el flujo de tercer armónico se cancela y las tensiones son puramente sinusoidales, tanto de línea como de fase.

Observar que las corrientes de línea en el secundario no presentan terceras armónicas pues son la diferencia de dos corrientes de fase y por tanto las terceras armónicas se anulan.

4. Transformador conectado Dy.

Valen todas las apreciaciones realizadas para el caso Yd.

Las corrientes homopolares circulan dentro del triángulo, los flujos y tensiones no presentan terceras armónicas y las corrientes de líneas son sinusoidales puras aun cuando las corrientes de fase del primario no lo son.

5. Transformador conectado Yz.

Este grupo de conexión resulta interesante estudiar el caso que ninguno de los dos neutros se encuentra conectado por lo cual no existe camino para las corrientes de tercer armónico y sus múltiplos (homopolares).

Al no circular las corrientes homopolares aparece flujo de tercer armónico y por tanto en cada media bobina secundaria se induce tensión de tercer armónico, pero dado que la tensión de fase es la diferencia de las tensiones inducidas en cada media bobina entonces la tensión de fase no tiene tensión de tercer armónico y por tanto tampoco lo tendrán las tensiones de línea.

La conexión zigzag bloque las tensiones homopolares.

Este grupo de conexión presenta la particularidad que no circula corriente de tercer armónico pero además las tensiones de fase y línea son sinusoidales.

6. Transformador conectado Yy con bobinado terciario conectado en D.

La opción de dejar circular los terceros armónicos de la corriente por el hilo de neutro no es utilizada por los problemas que ocasiona esto; las corrientes del triple de la frecuencia circulando por los hilos neutros provocan interferencia y caídas de tensión en el triple de la frecuencia.

Una opción es utilizar transformadores con terciarios en triángulo de forma que las terceras armónicas de corrientes circulen por esta bobina y así dar un camino a las corrientes homopolares y evitar la deformación del flujo y las tensiones de fase.

7. Influencia del tipo e núcleo en la generación de armónicos en el flujo.

Es importante analizar el efecto que tendrá el no dejar circular las terceras armónicas de las corrientes de vacío dependiendo del tipo de núcleo del transformador.

- Banco trifásico.

En este caso los flujos de tercer armónico circulan por el hierro de cada transformador monofásico lo cual da lugar a flujo elevado y por tanto a tensiones inducidas en las fases altas.

Por lo anterior se diseñan los transformadores monofásicos para que en vacío estén por debajo del codo de saturación (B bajo, zona línea) lo implica encarecimiento de la máquina.

- Transformador plano de 5 o 4 columnas.

Sucede lo mismo que en el caso del banco trifásico; se tiene un camino por el hierro para el flujo homopolar por lo cual el efecto las tensiones de fase es importante.

- Transformador plano de 3 columnas.

En este caso, de existir flujo de tercer armónico el mismo será muy bajo pues está obligado a circular por el aire (cuba y aceite) dado que no existe un camino por el hierro para el flujo homopolar.

El resultado es que los flujos y las tensiones de fase de tercer armónico serán muy bajos o casi nulos.

Conclusión se tiene flujos sinusoidales (casi) y las tensiones de fase son prácticamente sinusoidales aun con corrientes sinusoidales; esto es así pues adquiere relevancia en el circuito magnético la reluctancia por el aire la cual “linealiza” el hierro.

Ejercicio.

Dado un transformador trifásico industrial Yy0 de 200 kVA, que será instalado en redes trifásicas sin neutro y donde se desea que las tensiones menos de un 5% de armónicos generados por el transformador.

- Indicar el tipo de núcleo que especificaría para la compra del equipo.
- Indicar el rango de U_z (%) que elegiría para este transformador. Justificar adecuadamente.

Respuestas.

Se debe especificar un transformador de núcleo plano de tres columnas por ser el que presentara valores menores para los flujos homopolares.

$V_h \geq V_3$ Las tensiones armónicas múltiplos de 3 también son homopolares.

Los flujos homopolares son flujos que se cierran por el aire por tanto: $\Phi_f \cong 3 \cdot \Phi_h$

Entonces:

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{3 \cdot w \cdot \Phi_3}{w \cdot \Phi_1} = \frac{3 \cdot \Phi_3}{\Phi_1} \leq \frac{3 \cdot \Phi_h}{\Phi_1} \cong \frac{\Phi_f}{\Phi_1} \cong u_{cc}$$

Con el transformador en cortocircuito se cumple: $v_{cc} = R \cdot i + \frac{d\Phi_f}{dt} \cong \frac{d\Phi_f}{dt} \Rightarrow u_{cc} U_N = w \cdot \Phi_f$

Además se debe cumplir que: $U_N \cong w \cdot \Phi_1$

Se especifica un transformador con impedancia de cortocircuito inferior al 5%.

Observaciones.

- En todo el análisis anterior se despreció el efecto de armónicos tales como el quinto y el séptimo que no son homopolares.
- Los armónicos 5° y 7° son de menor peso que el tercero.
- Todos los armónicos múltiplos de 3 son homopolares (3°, 9°, 15°); en rigor las magnitudes homopolares (corrientes, flujos, tensiones) incluyen a estos armónicos pero son de menor peso.