Esfuerzos Electrodinámicos en Transformadores

Parte 1

1. Introducción

Los esfuerzos electrodinámicos que se desarrollan en el interior de los transformadores, específicamente en los bobinados del primario y secundario, adquieren una vital relevancia en todas las etapas del ciclo de vida de los mismos.

Este hecho tiene su justificación por el creciente aumento de las capacidades de cortocircuito de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) modernos, asociada al incremento de los niveles de generación en los nodos de la red y a las interconexiones implementadas, tanto en el plano local como internacional.

En tal sentido, las especificaciones, diseño y fabricación de la etapa de pre puesta en servicio y los contextos operativos, tanto en la etapa de vida esperada como en la del fin de la vida, serán factores fundamentales para asegurar una adecuada capacidad del transformador para soportar las condiciones de cortocircuito de la red.

Los esfuerzos electrodinámicos, derivados de las corrientes de cortocircuito, son los causantes de eventuales procesos de fallas de naturaleza mecánica y eléctrica.

Entre los primeros podemos encontrar las deformaciones y colapso/ruptura de los bobinados del transformador y entre los segundos aquellos que se relacionan indirectamente con los mecánicos, fundamentalmente por daños en la aislación.

A su vez, la circulación de corrientes de cortocircuito en el transformador, será causa de daños en los bushings y en la cuba, así como un eventual riesgo de incendio en la instalación.

En tal sentido, procederemos a realizar, en primer lugar, una breve descripción del tipo de corrientes de cortocircuito que pueden establecerse en un SEP, ante un estado de falla y la incidencia de éstas en función del tipo de transformador.

Luego, pasaremos a explicar los tipos de esfuerzos electrodinámicos que se desarrollan en el interior del transformador, al circular la corriente de cortocircuito.

También evaluaremos los efectos o problemas ocasionados por los mismos, principalmente la acción de los esfuerzos sobre los bobinados.

Seguiremos con una introducción al tema del comportamiento dinámico de los esfuerzos sobre los bobinados, así como las consecuencias de este proceso físico.

Finalmente, veremos cómo influyen todos estos problemas sobre las distintas etapas del ciclo de vida del transformador, en especial las relacionadas con la especificación, diseño y fabricación del mismo.

Con el fin de exponer todos estos temas, el presente trabajo se ha dividido en las siguientes partes:

<u>Parte 1</u>

1. Introducción.
2. Tipos de fallas y corrientes de cortocircuito.
3. Tipos de esfuerzos electrodinámicos.

Parte 2

1. Efectos de los esfuerzos y resistencia térmica al cortocircuito.
2. Fundamentos del análisis electrodinámico.
3. Incidencia en el ciclo de vida del transformador.
4. Conclusiones.

2. Tipos de fallas y corrientes de cortocircuito

En este ítem vamos a determinar las bases del cálculo de las corrientes de cortocircuito que pueden manifestarse en un SEP. En concreto, vamos a enfocarnos en solamente dos de los posibles tipos de fallas que pueden establecerse en la instalación.

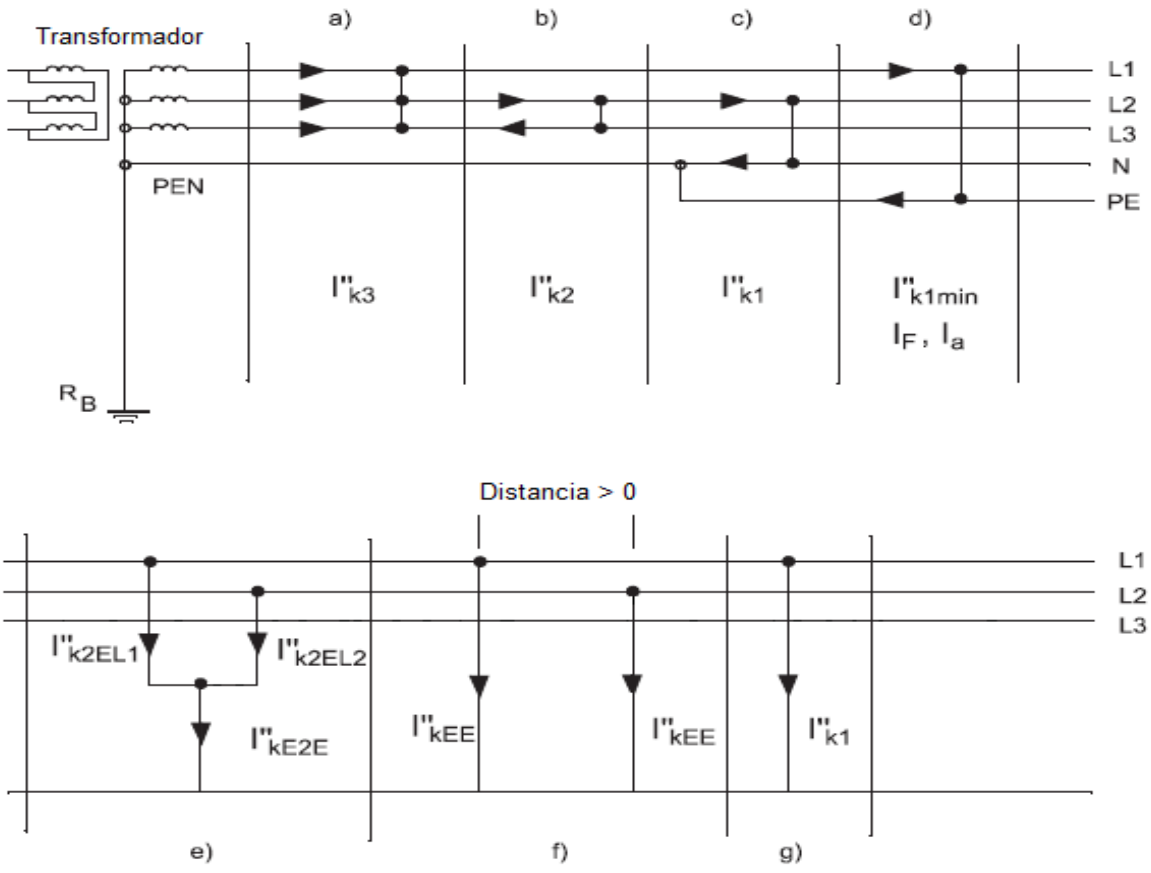
A estos fines, seguiremos las definiciones y lineamientos especificados en la norma IEC 60909 (Short-circuit currents in three-phase a.c. systems).

Esta norma define al cortocircuito como la conexión conductiva accidental o intencional, a través de un camino de relativa baja resistencia o impedancia, entre dos o más puntos de un circuito, los cuales se encuentran por lo general a diferentes potenciales.

Las posibles corrientes de cortocircuito que pueden establecerse en un SEP, se encuentran asociadas a los siguientes tipos de fallas:

a) Falla trifásica.
b) Falla bifásica.
c) Falla monopolar a neutro (conductor de fase y neutro),
d) Falla monopolar a PE (conductor de fase y PE).
e) Falla bifásica a tierra.
f) Falla doble monofásica a tierra.
g) Falla monofásica a tierra.

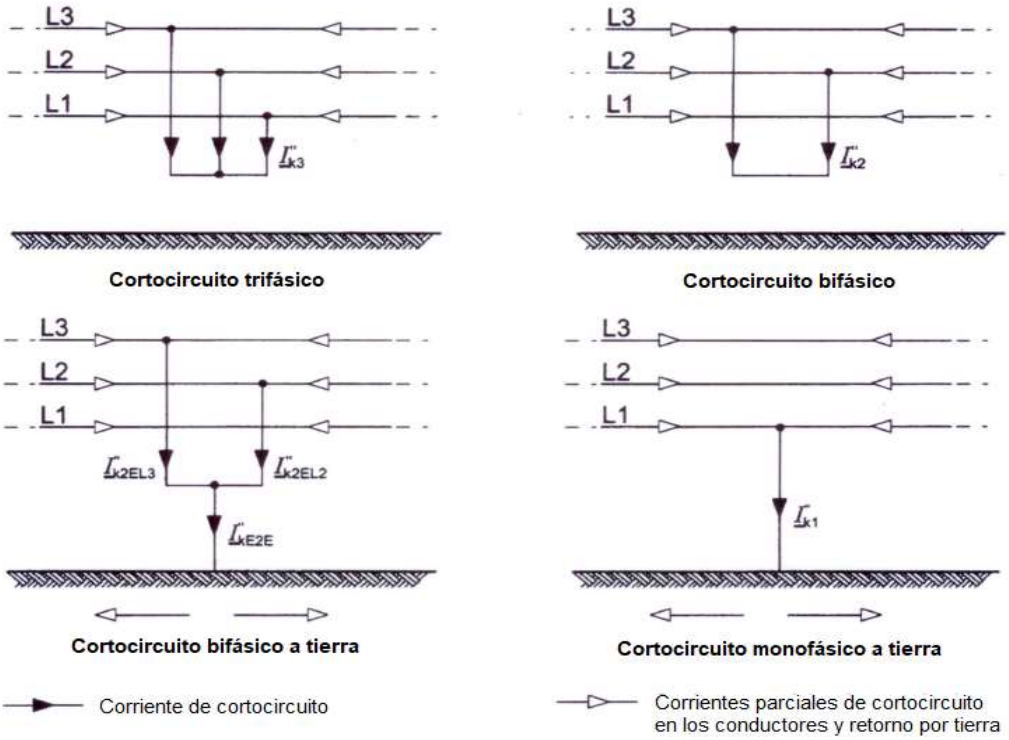
Figura N° 1



En la figura N° 1 se detallan las características conductivas para cada tipo de falla, así como la denominación, indicada por la IEC 60909, para cada corriente asociada.

A los fines de simplificar, destacamos a continuación las fallas más comunes.

Figura N° 2



Hay que tener en cuenta que el cortocircuito trifásico es de característica simétrica, por lo que a los fines de los cálculos bastará solamente recurrir a un simple circuito de secuencia directa.

En general, el bifásico se caracteriza por desarrollar una corriente de magnitud menor al trifásico. El cortocircuito monofásico a tierra también cumple con esta condición, con la excepción de tener el caso de un transformador con conexionado YNd, incorporando además un bobinado interno en triángulo.

También se puede verificar que la magnitud de la corriente de cortocircuito monofásico a tierra es mayor a la correspondiente trifásica, cuando se cumple la relación $Z_0/Z_d < 1$, siendo Z_0 la impedancia homopolar y Z_d la impedancia de secuencia directa del sistema.

Atendiendo a lo antedicho, en forma general, el cortocircuito trifásico será el de mayor intensidad y en consecuencia el que eventualmente podrá provocar el mayor daño al transformador. En tal sentido, bastará con que el diseño del transformador tenga la capacidad de soportarlo.

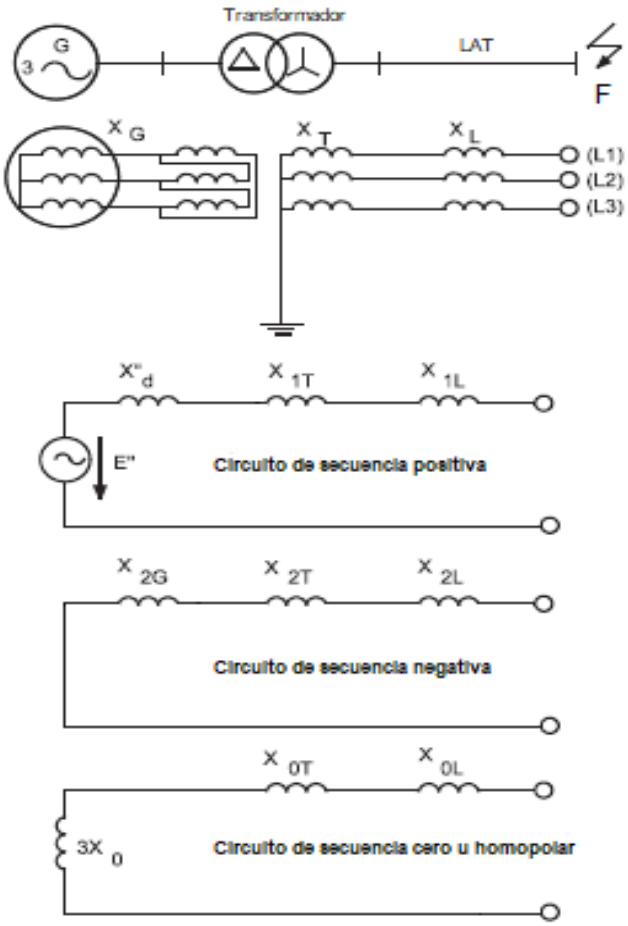
Como ya comentamos, hay excepciones a este caso, correspondiendo una de ellas a un transformador con conexión YNd y un arrollamiento interno conectado en triángulo.

Para este tipo de transformador, la corriente de falla monofásica a tierra será la de mayor intensidad. Por lo tanto el diseño al cortocircuito de esta máquina deberá estar basado en el tipo de falla indicado.

En tal sentido, será más efectivo encarar solamente los cálculos y efectos de las corrientes de cortocircuito trifásico y monofásico a tierra, a través del método de los circuitos de secuencia de la red.

Sin entrar en los fundamentos de este método, a continuación se detallan los circuitos de secuencia, para cada componente simétrica, es decir: Directa (o Positiva), Inversa (o Negativa) y Homopolar (o Cero), vistos desde el punto de falla F.

Figura N° 3



Se destacan las reactancias (se desprecian los componentes resistivos) del generador, transformador y línea de transmisión, para cada una de las secuencias, denotando con “1” a la directa, con “2” a la inversa y con “0” a la homopolar.

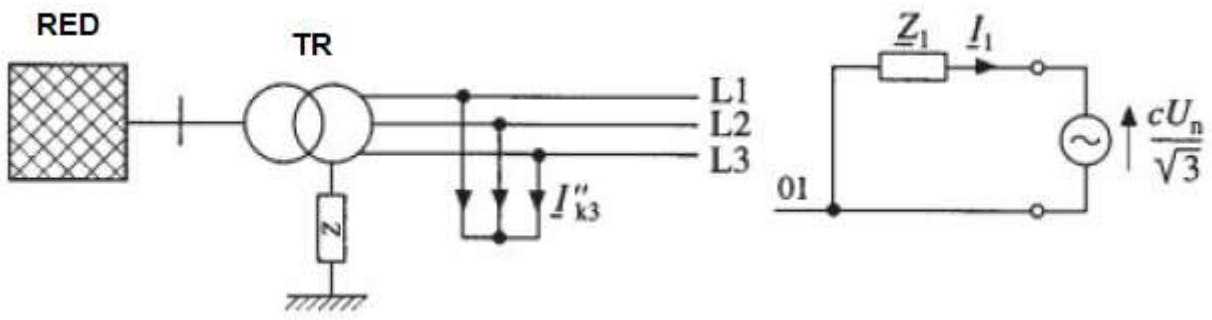
En base a estos circuitos de secuencia se pueden determinar los niveles de las corrientes de cortocircuito, en función de cada tipo de falla y la consecuente interconexión de los mismos.

De tal forma, a continuación se detalla el cálculo de las corrientes de cortocircuito para los tipos de fallas ya indicados como principales, en el análisis de los esfuerzos electrodinámicos sobre los transformadores.

A) Falla trifásica

Como ya comentamos, esta falla es de característica simétrica (asumiendo balance en las tres fases), por lo que el circuito equivalente, en función de los correspondientes de secuencia, quedará:

Figura N° 4



El factor "c" se denomina Factor de Tensión y en la norma se especifica con los siguientes valores, en función de la tensión nominal de la red.

Tensión nominal de la red (Un)	c_{max}	c_{min}
100 a 1000 V	1,05	0,95
>1 kV a 35 kV	1,10	1,00
>35 kV	1,10	1,00

c_{max} = para el cálculo de la mayor corriente de cortocircuito.
c_{min} = para el cálculo de la menor corriente de cortocircuito.

Las condiciones de borde en el punto de falla, teniendo en cuenta el esquema, serán:

$U_{L1} = U_{L2} = U_{L3} = 0$

$\mathbf{I_{L1}} + \mathbf{I_{L2}} + \mathbf{I_{L3}} = 0$

Por lo tanto:

$$\mathbf{I_1} = \frac{\mathrm{c}\,\mathbf{Un}}{\sqrt{3}\,\mathbf{Z_1}} = \text{corriente de secuencia directa.}$$

$\mathbf{Z_1}$ = j (X_{1red} + X_{1TR} + X_{1L}) = impedancia de secuencia directa.

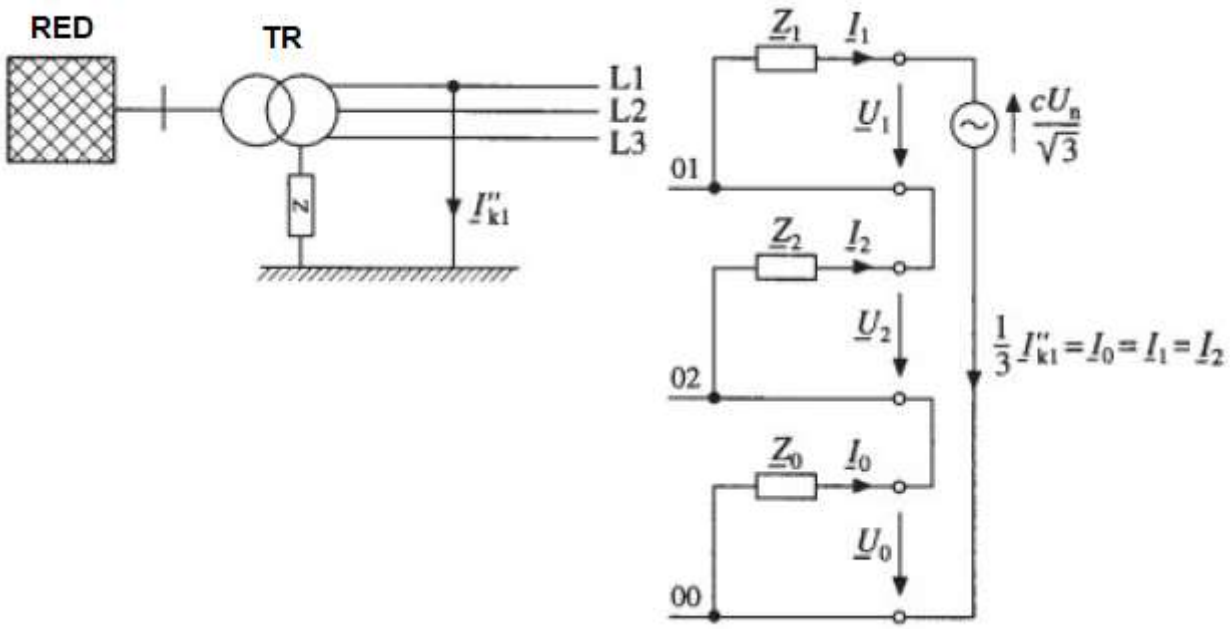
Aplicando la transformación inversa de componentes simétricas, se obtiene el valor, en magnitud, de la corriente de cortocircuito trifásico en el punto de falla.

$$\mathbf{I''_{k3}} = \mathbf{I_1} = \frac{\mathbf{c\,Un}}{\sqrt{\mathbf{3}}\,\mathbf{Z_1}} = \textbf{corriente de cortocircuito trifásico}$$

B) <u>Monofásica a tierra</u>

En este caso, el circuito equivalente para el cálculo de esta corriente será:

Figura N° 5



Ahora, las condiciones de borde en el punto de falla serán:

$\mathbf{U_{L1}}$ = 0

$I_{L2} = I_{L3} = 0$

$I_{L1} = I''_{k1}$

Entonces:

$I_1 = I_2 = I_0$

$$I_1 = \frac{c\,Un}{\sqrt{3}\,Z_s} = \text{corriente de secuencia directa} = \text{inversa} = \text{homopolar.}$$

$Z_s = Z_1 + Z_2 + Z_0$

Aplicando la transformación inversa de componentes simétricas, se obtiene el valor, en magnitud, de la corriente de cortocircuito monofásico a tierra en el punto de falla.

$$I''_{k1} = 3\,I_1 = \frac{\sqrt{3}\,c\,Un}{Z_s} = \textbf{corriente de cortocircuito monofásico a tierra.}$$

Es importante destacar que el valor de esta corriente estará fundamentalmente determinado por la característica que presente el circuito de secuencia homopolar.
Es decir, esta característica determinante estará asociada al tipo de conexionado del transformador, ya que dependiendo de la configuración interna de los bobinados, así como el tipo de puesta a tierra del centro de estrella, el valor de la Z_0 adquirirá valores específicos en el cálculo.

Muy importante a tener en cuenta es el comportamiento en el tiempo de la corriente de cortocircuito. A estos fines se pueden establecer dos clases, a saber:

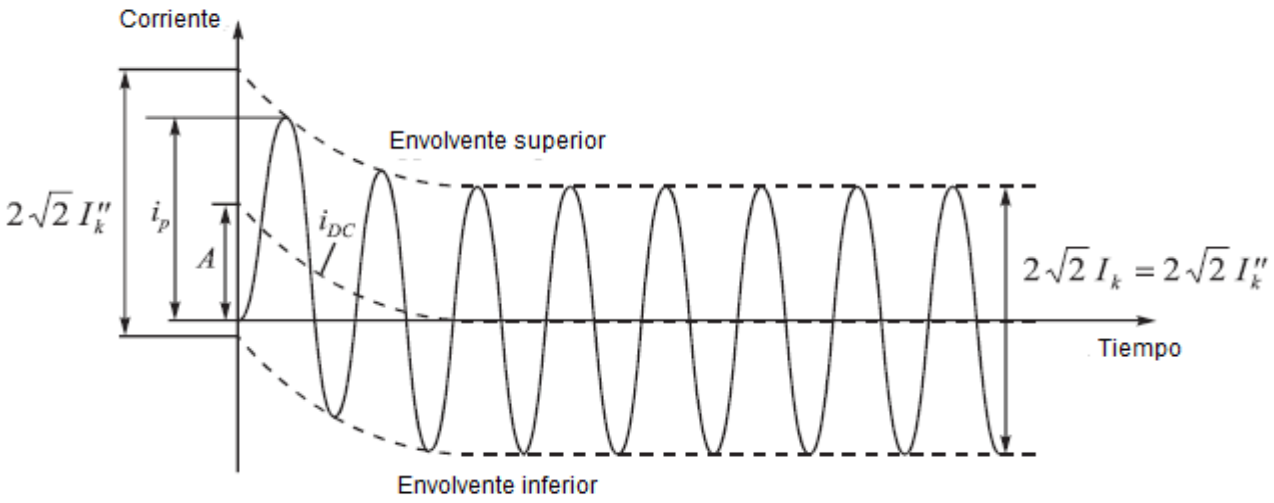
a) <u>Cortocircuito lejano al generador</u>

En este caso se verifican las siguientes relaciones.

- $I''_k < 2\,I_{nG}$.
- O también $I''_k = I_k$.

La característica en el tiempo de esta corriente será:

Figura N° 6



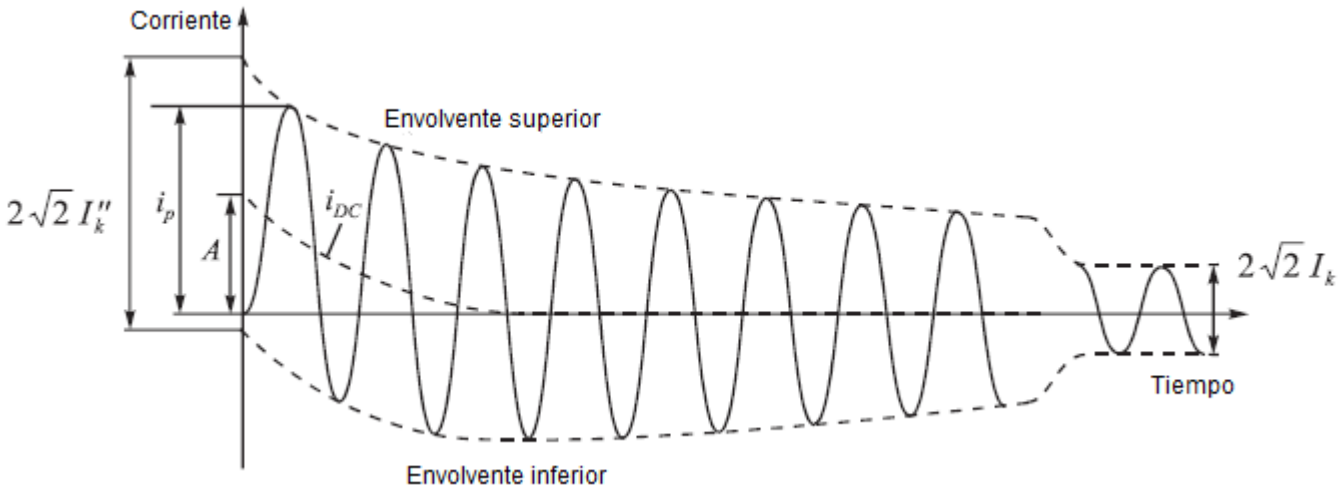
b) <u>Cortocircuito cercano al generador</u>

Ahora se cumplen las siguientes relaciones:

- $I''_k > 2\ I_{nG}$.
- O también $I''_k > I_k$.

Con la característica indicada en la siguiente figura.

Figura N° 7



En este caso será determinante, en el establecimiento de la corriente de cortocircuito, las características subtransitorias y transitorias del generador sincrónico.

Se tiene:

- I_{nG} = corriente nominal del generador.
- I''_k = corriente inicial simétrica de cortocircuito.
- i_p = corriente pico de cortocircuito.
- i_{DC} = corriente aperiódica de decaimiento.
- A = valor inicial de la componente aperiódica.
- I_k = corriente de cortocircuito en régimen permanente.

3. Tipos de esfuerzos electrodinámicos

Los esfuerzos que se establecen en el interior del transformador (bobinados), son consecuencia de la interacción del campo magnético asociado al flujo de dispersión y la corriente que circulará por el bobinado.

La expresión de base para el cálculo de estos esfuerzos (fuerzas) será la siguiente relación vectorial, $\mathbf{F} = i\,\mathbf{L} \times \mathbf{B}$.

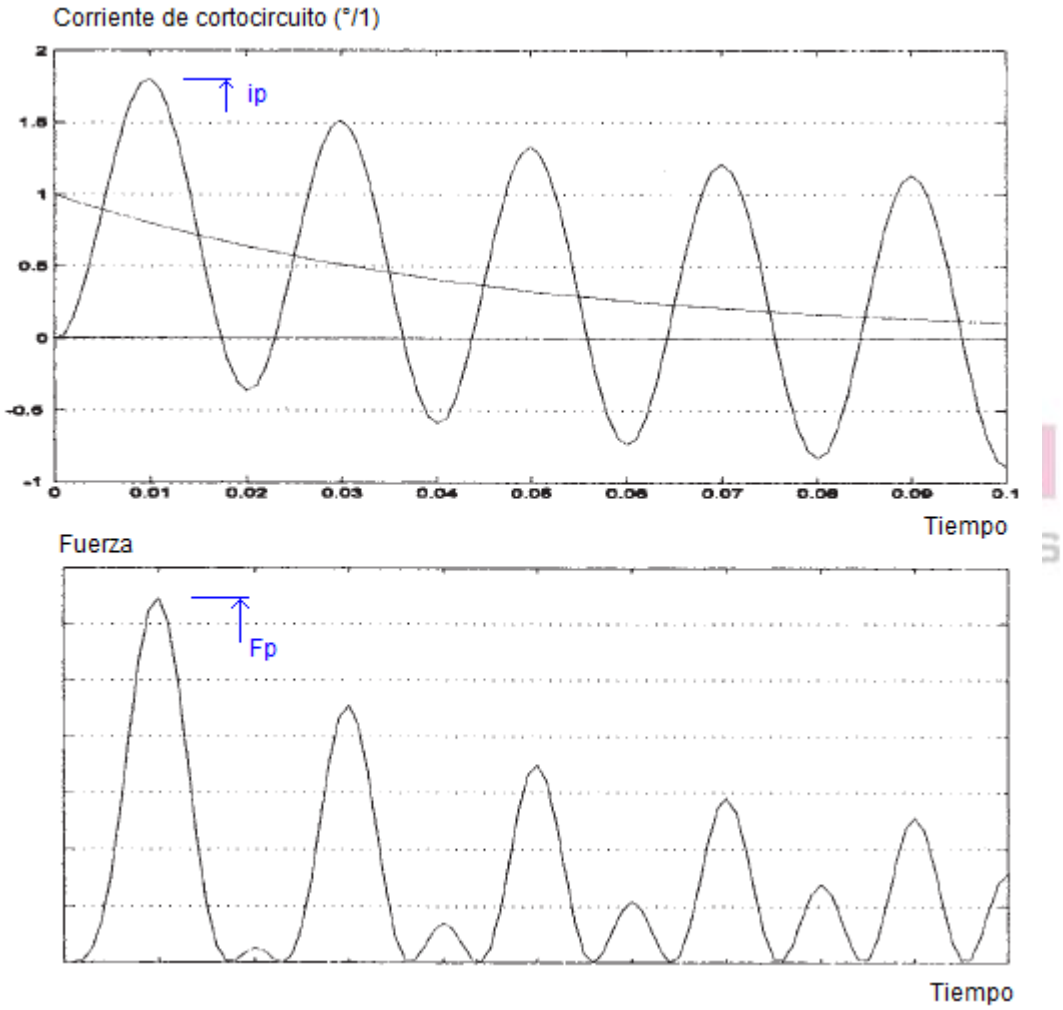
En donde “i” es la corriente que circula por el bobinado, L es la longitud total del bobinado, B es el campo magnético de dispersión y F la fuerza que se establece sobre el bobinado.

Como el campo magnético de dispersión depende en forma directamente proporcional a la corriente que circula por el bobinado (B(i) ~ i), entonces se desprende, de la relación previa, que la magnitud de la fuerza será directamente proporcional al cuadrado de la corriente ($F \sim i^2$).

En condiciones nominales de operación, el transformador deberá estar diseñado para poder soportar dichos esfuerzos, pero también, deberá estarlo para poder tener la capacidad de resistir los esfuerzos que se establecen en los estados de cortocircuito.

En base a lo indicado en el ítem 2 y teniendo en cuenta la dependencia funcional de la fuerza con la corriente, en la siguiente figura podemos observar las características en el tiempo de ambas magnitudes.

Figura N° 8



En la misma, se observa la corriente de cortocircuito en el tiempo, con su componente en alterna y de decaimiento. Se destaca el valor “ip”, correspondiente, según ya hemos visto, al máximo que alcanza dicha corriente.

Se concluye entonces que, cuando por los bobinados circule una corriente de cortocircuito, ante un eventual estado de falla, las fuerzas que se generen serán de apreciable valor, determinando el establecimiento de esfuerzos electrodinámicos de magnitud significativa.

En la figura inferior se destaca la característica temporal de la fuerza ($F \sim i^2$) que se desarrolla en los bobinados, como consecuencia de la circulación de la corriente de cortocircuito. También se observa el máximo que alcanza la fuerza (Fp), valor asociado a la corriente ip.

Muy importante es considerar las componentes de F(t). Tendremos 4 en total, a saber:

- Dos componentes de alterna. Una a frecuencia de red con un decaimiento en el tiempo y la otra a doble frecuencia de red, con un valor constante pero pequeño.

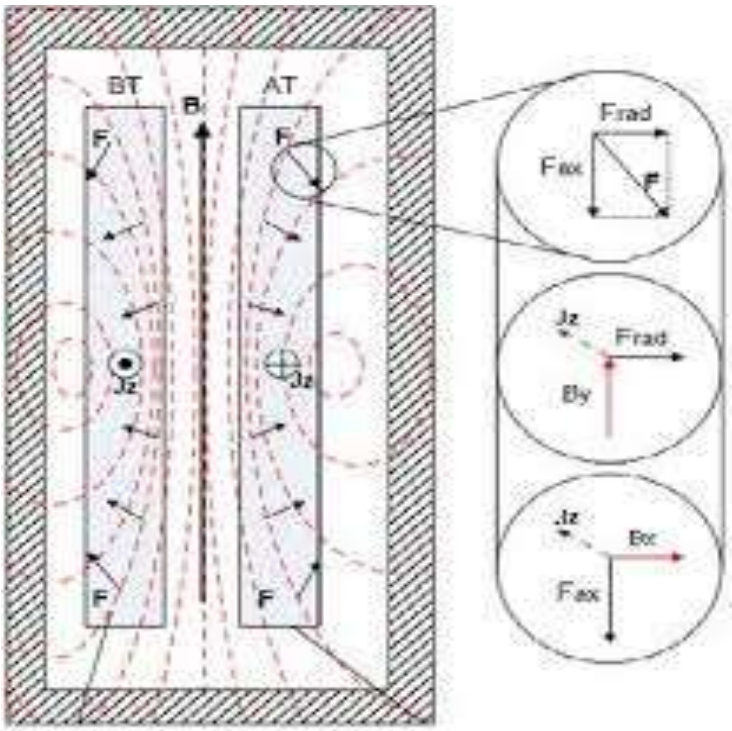
- Dos componentes unidireccionales. Una de valor constante y la otra con decaimiento en el tiempo.

Teniendo en cuenta la naturaleza vectorial de la fuerza **F**, a los fines del estudio de los esfuerzos y sus efectos, es conveniente evaluarlos en relación a sus componentes en el espacio.

A estos fines, se establecen las componentes Axial y Radial de la citada fuerza (**F = Fax** + **Frad**).

En el siguiente esquema, podemos observar cómo se despliega la fuerza **F** resultante, punto a punto, en el interior de los bobinados, así como las correspondientes componentes ya citadas.

Figura N° 9



En la figura se observa una ventana del núcleo magnético de un transformador, con el bobinado interno en BT y el externo de AT.

También se observan las líneas del campo de dispersión, así como la fuerza **F** en distintos puntos de los bobinados. Como ya comentamos, esta fuerza se representa, por convención, a través de las componentes radial (**Frad**) y axial (**Fax**).

El campo de dispersión radial tendrá la dirección en el eje “x”, dado por el valor **Bx** y el campo de dispersión axial en el eje “y”, con un valor dado por **By**.

A los fines del estudio de los efectos de los esfuerzos radial y axial sobre los bobinados, será conveniente tener en cuenta cómo se constituye la estructura magnética-mecánica en la ventana del núcleo del transformador. Tendremos:

$\Phi r \rightarrow Br \equiv Bx \rightarrow Fax$ (componente axial).

$\Phi a \rightarrow Ba \equiv By \rightarrow Frad$ (componente radial).

Siendo:

Φr = flujo de dispersión radial.

Φa = flujo de dispersión axial.

En la Parte 2 veremos, atendiendo a lo visto en la presente, las características en detalle de cada uno de los esfuerzos generados en los bobinados (Axial y Radial), así como los efectos de éstos sobre la estructura general del transformador y sobre el ciclo de vida del mismo.

Ingenieria- Nova Mirón S.A.