

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**

MÁQUINAS SÍNCRONAS:
CORTOCIRCUITOS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

CORTOCIRCUITOS

1. CORTOCIRCUITO PERMANENTE TRIFÁSICO EN BORNES DEL INDUCIDO

Se produce un *cortocircuito trifásico en bornes* de una máquina síncrona cuando los tres conductores de fase se ponen simultáneamente en contacto, justo en bornes del inducido de la máquina (Fig. 1). Este cortocircuito es *simétrico* y, por consiguiente, bastará con analizar lo que sucede en una de las fases.

La corriente de cortocircuito que se produce en cada fase del inducido pasará por un período transitorio y, posteriormente, alcanzará un régimen *permanente* cuyo valor eficaz se va a denominar I_{ccp} . Luego, en la Fig. 1, I_{ccp} es el valor eficaz de las corrientes i_a , i_b e i_c .

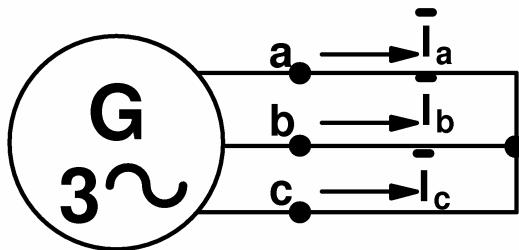


Fig. 1: Cortocircuito trifásico en bornes de una máquina síncrona

Supóngase, de momento, que la máquina síncrona que se va a cortocircuitar es de rotor cilíndrico y que la resistencia R de una de las fases del inducido es despreciable frente a su reactancia síncrona X_s . Se supondrá que las fases del inducido están conectadas en estrella, con lo cual las corrientes con que se trabaja son a la vez de fase y de línea. La suposición de la conexión estrella no quita generalidad al razonamiento puesto que siempre se puede obtener la estrella equivalente a un devanado conectado en triángulo. Por lo tanto, el circuito equivalente de una fase del inducido durante un cortocircuito trifásico permanente es el indicado en la Fig. 2.

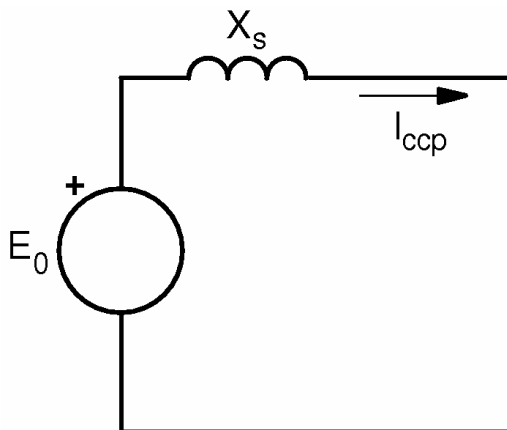


Fig. 2: Circuito equivalente de una máquina síncrona durante un cortocircuito trifásico permanente

Recuérdese que existen dos valores de la reactancia síncrona X_s , el valor saturado $X_{s(sat)}$ y el valor no saturado $X_{s(no\ sat)}$. El valor saturado se utiliza en conjunción con la curva de vacío (Fig. 3), mientras que el valor no saturado se utiliza conjuntamente con la recta de entrehierro (Fig. 3). Teniendo esto en cuenta, la aplicación de la ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. 2 da el siguiente resultado:

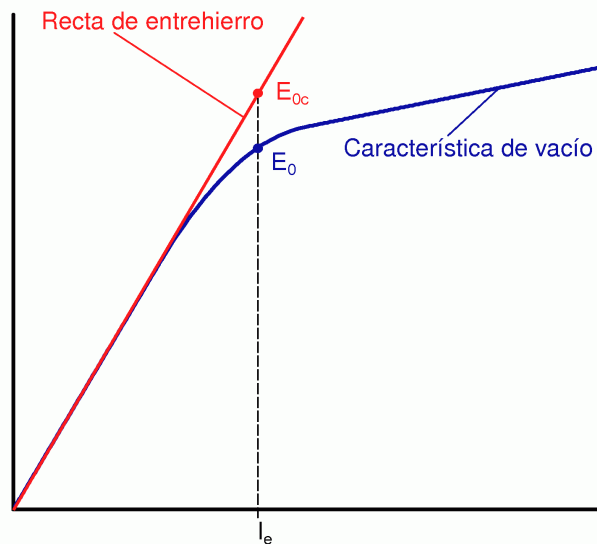


Fig. 3: Característica de vacío y recta de entrehierro de una máquina síncrona

$$I_{ccp} = \frac{E_{0c}}{X_s(\text{no sat})} = \frac{E_0}{X_s(\text{sat})} \quad (1)$$

El valor eficaz E_{0c} de la f.e.m. de vacío se obtiene sobre la *recta de entrehierro* y el valor E_0 se obtiene de la *característica de vacío* (Fig. 3). Si justo antes del cortocircuito el fasor de la tensión en bornes era $\bar{V}$ y el de la corriente era $\bar{I}$, estas f.e.m.s se pueden obtener así:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{0c} &= \bar{V} + j X_s(\text{no sat}) \bar{I} \\ \bar{E}_0 &= \bar{V} + j X_s(\text{sat}) \bar{I} \end{aligned} \quad (2)$$

La corriente de cortocircuito está desfasada casi 90° con respecto a la f.e.m. de vacío. Esto significa que esta corriente prácticamente sólo tiene componente según el eje directo o eje longitudinal d, mientras que su componente sobre el eje transversal q es despreciable. De esto se deduce que las expresiones (1) y (2) siguen siendo válidas para las máquinas de polos salientes, si en dichas expresiones se utilizan las reactancias síncronas longitudinal no saturada $X_d(\text{no sat})$ y longitudinal saturada $X_d(\text{sat})$, en lugar de las reactancias $X_s(\text{no sat})$ y de $X_s(\text{sat})$, respectivamente:

$$I_{ccp} = \frac{E_{0c}}{X_d(\text{no sat})} = \frac{E_0}{X_d(\text{sat})} \quad (\text{Máquinas de polos salientes}) \quad (3)$$

La corriente permanente de cortocircuito no es excesivamente grande, incluso puede ser inferior a la corriente nominal. Sin embargo, la corriente transitoria de cortocircuito, de la que se tratará más adelante, sí que alcanza valores elevados y resulta peligrosa para la máquina.

2. CORTOCIRCUITOS PERMANENTES ASIMÉTRICOS EN BORNES DEL INDUCIDO

El estudio de los cortocircuitos permanentes asimétricos requiere del uso del método de las *componentes simétricas*. La aplicación de este método da lugar a las expresiones que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1: Formulario para los cortocircuitos asimétricos

	<u>Cortocircuito fase-neutro:</u> $\bar{V}_a = 0 ; \quad \bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 ; \quad \bar{I}_a = \bar{I}_{ccN}$ $I_{ccN} \approx \frac{3 E_0}{X_1 + X_2 + X_0}$
	<u>Cortocircuito fase-fase:</u> $\bar{I}_a = 0 ; \quad \bar{I}_b = -\bar{I}_c ; \quad \bar{V}_b = \bar{V}_c$ $I_{ccF} = I_b \approx \frac{\sqrt{3} E_0}{X_1 + X_2}$
	<u>Cortocircuito fase-fase-neutro:</u> $\bar{I}_a = 0 ; \quad \bar{I}_b = \bar{I}_c ; \quad \bar{V}_b = \bar{V}_c = 0$ $I_b \approx \frac{\sqrt{3} \sqrt{X_2^2 + X_0^2 + X_2 X_0}}{X} E_0$ $I_{ccN} = 3 \frac{X_2}{X} E_0$ $(X = X_1 X_2 + X_2 X_0 + X_0 X_1)$

Se utiliza esta nomenclatura:

X_1 es la reactancia que presenta la máquina frente a las corrientes de secuencia directa.

X_2 es la reactancia que presenta la máquina frente a las corrientes de secuencia inversa.

X_0 es la reactancia que presenta la máquina frente a las corrientes de secuencia homopolar.

X_1 se corresponde con la reactancia síncrona saturada de la máquina, ya que el circuito equivalente de la Fig. 2 está deducido cuando la máquina se alimentaba con un sistema de corrientes de secuencia directa y, por lo tanto, este circuito es el que hay que utilizar con la componente de secuencia directa. Los valores de las reactancias inversa y homopolar, X_2 y X_0 , los suministra el fabricante de la máquina.

En las máquinas de polos salientes estas reactancias son las que presenta la máquina según el eje longitudinal d.

3. TRANSITORIO DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN BORNES DEL INDUCIDO

3.1. Cortocircuito trifásico brusco en bornes de una máquina síncrona previamente en vacío

3.1.1. Descripción del fenómeno

En este apartado se va a estudiar el transitorio que aparece en las corrientes del inducido de una máquina síncrona cuando se produce, justo en bornes de la máquina, un cortocircuito simultáneo de las tres fases de forma muy rápida y brusca.

Durante este transitorio intervienen todos los devanados de la máquina: el inducido, en el estator, y el inductor y el amortiguador, en el rotor. Recuérdese que el *devanado amortiguador* es un devanado de jaula de ardilla colocado en las ranuras del rotor, en las máquinas de rotor cilíndrico, o partes de jaulas de ardilla colocadas en ranuras ubicadas en la cara externa de los polos del rotor, en las máquinas de polos salientes. Además, las corrientes de Foucault que se puedan inducir sobre el cuerpo de hierro macizo del rotor se asimilan al efecto de un devanado amortiguador. Por lo tanto, en lo que sigue se considera devanado amortiguador a este devanado propiamente dicho más el efecto de las piezas de hierro macizo del rotor.

Supóngase, de momento, que la máquina síncrona es de rotor cilíndrico, tiene conexión estrella y se encontraba funcionando en vacío antes de producirse el cortocircuito. Por lo tanto, si la tensión en bornes de la máquina antes del cortocircuito tiene un valor eficaz V , su f.e.m. de vacío tiene un valor eficaz E_0 que se obtiene así:

$$E_0 = V \quad (4)$$

El transitorio que se produce en las corrientes durante un cortocircuito se debe al principio de la constancia del flujo total concatenado (*principio de Doherty*), basado en la ley de Lenz, que dice lo siguiente:

“el flujo total concatenado en un circuito cerrado inductivo no puede cambiar de forma brusca al presentarse una perturbación, sino que momentáneamente mantiene su valor inicial”.

Como se indicó en el apartado 1, la corriente de cada fase del inducido evolucionará desde un valor inicial nulo (máquina en vacío) hasta alcanzar un régimen permanente donde la corriente varía sinusoidalmente en el tiempo y tiene un valor eficaz I_{ccp} . Esto conlleva el que el campo magnético de la máquina también evolucionará desde el que existe en vacío (originado únicamente por la acción del devanado inductor) hasta el que aparece cuando existe, además, la reacción de inducido desmagnetizante debida a las corrientes permanentes de cortocircuito en el inducido, cuyo valor eficaz es I_{ccp} . El carácter inductivo de los devanados de la máquina provoca, según el principio de Doherty, que los flujos y, consecuentemente, las corrientes no puedan variar instantáneamente entre ambos estados (vacío y régimen permanente de cortocircuito). Entonces, existe un régimen transitorio hasta que estas magnitudes alcanzan finalmente sus valores de régimen permanente.

En los regímenes permanentes el campo magnético en el entrehierro es perfectamente giratorio, si se desprecian los armónicos de dicho campo. Es decir, se trata de un campo de amplitud constante que gira a una velocidad también constante. Como el rotor de la máquina gira a la misma velocidad que el campo (la velocidad de sincronismo), no se inducen f.e.m.s

en los devanados del rotor durante los regímenes permanentes. Por lo tanto, en régimen permanente no circulan corrientes por el devanado amortiguador y por el inductor sólo circula la corriente continua originada por la tensión continua con que se lo alimenta.

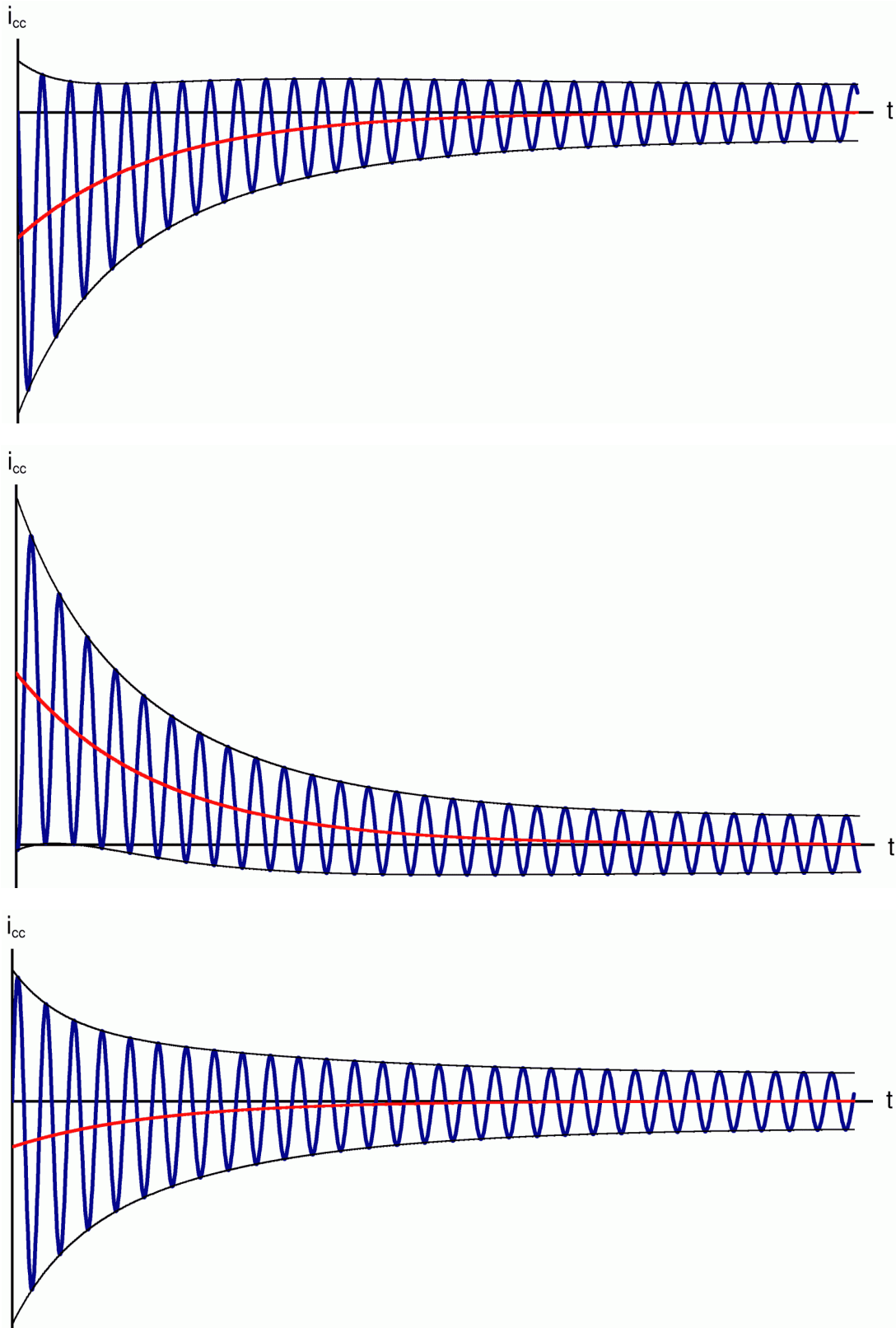


Fig. 4: Corrientes de cortocircuito brusco en las tres fases del inducido de una máquina síncrona

Durante el transitorio de cortocircuito la amplitud del campo magnético en el entrehierro variará en función del tiempo, por lo que los devanados del rotor empezarán a “ver” un campo magnético variable en el tiempo y se inducirán f.e.m.s en ellos. En consecuencia, durante este transitorio, a diferencia de lo que sucede en los regímenes permanentes, aparecerán f.e.m.s inducidas en los devanados inductor y amortiguador que originarán corrientes transitorias en ellos. Estas corrientes, según la Ley de Lenz, intentarán oponerse a las variaciones de flujo; lo cual, a su vez, afectará también a las corrientes en las fases del inducido.

En resumen, durante el transitorio de cortocircuito la corriente en una fase del inducido, i_{cc} , será la suma de la de régimen permanente más las debidas a los efectos de los devanados inducido, inductor y amortiguador.

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo de la evolución de las corrientes de las tres fases del inducido de una máquina síncrona durante un cortocircuito trifásico brusco. Se puede apreciar que cada una de estas corrientes es igual a la suma de una componente alterna simétrica, i_{as} , cuya amplitud va decreciendo hasta alcanzar la del régimen permanente, y una componente unidireccional, i_u , que decrece exponencialmente hasta anularse. Luego:

$$i_{cc} = i_u + i_{as} \quad (5)$$

En las imágenes de la Fig. 4 la componente unidireccional es la línea media de cada onda y se ha dibujado de color rojo. En esta figura se ha utilizado el criterio, que se va a mantener a partir de ahora, de empezar a contar el tiempo desde el momento de producirse el cortocircuito; es decir, el instante $t = 0$ es cuando se inicia el cortocircuito.

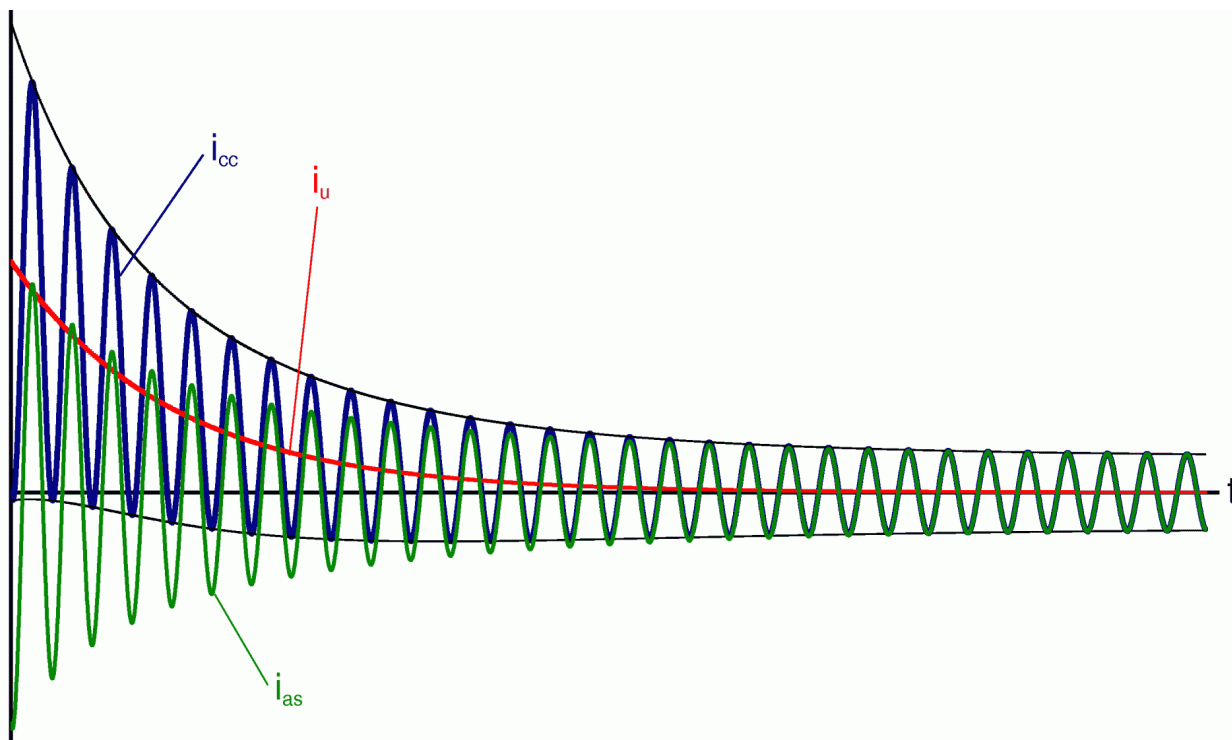


Fig. 5: Corriente de cortocircuito (i_{cc}) de una fase del inducido y sus componentes unidireccional (i_u) y alterna simétrica (i_{as})

En la Fig. 5 se muestra la evolución de la corriente de una fase del inducido durante un cortocircuito brusco, i_{cc} , y sus componentes unidireccional, i_u , y alterna simétrica, i_{as} . Las componentes alternas simétricas de las corrientes de las tres fases del inducido tienen la misma frecuencia y las mismas envolventes, existiendo un desfase de 120° entre ellas. Esto da lugar a que sus valores iniciales sean diferentes en las tres fases. Dado que antes del cortocircuito las corrientes en las fases del inducido eran nulas (marcha en vacío), el valor inicial de la corriente i_{cc} debe ser también nulo en las tres fases. Esto hace que en cada fase del inducido los valores iniciales de las componentes unidireccional y alterna simétrica sean iguales, pero de signos opuestos. Por lo tanto, el valor inicial de la componente unidireccional también toma valores distintos en las tres fases (véase la Fig. 4), aunque la constante de tiempo T_i de esta componente es igual en todas las fases.

La componente alterna simétrica es debida al efecto de los devanados del rotor y la componente unidireccional es originada por el devanado inducido. La componente unidireccional (Fig. 6) tiene una constante de tiempo T_i cuyo valor es del orden de las décimas de segundo. Su valor inicial en una fase se lo denominará i_{u0} (Fig. 6). Así pues, se cumple que

$$i_u = i_{u0} \cdot e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (6)$$

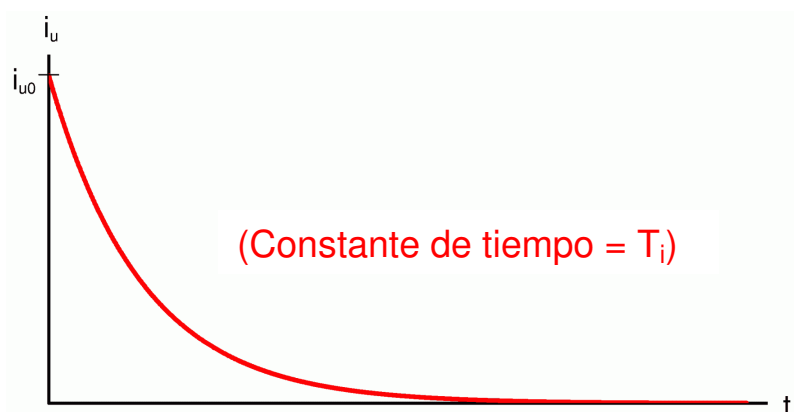


Fig. 6: Componente unidireccional de la corriente de cortocircuito en una fase del inducido

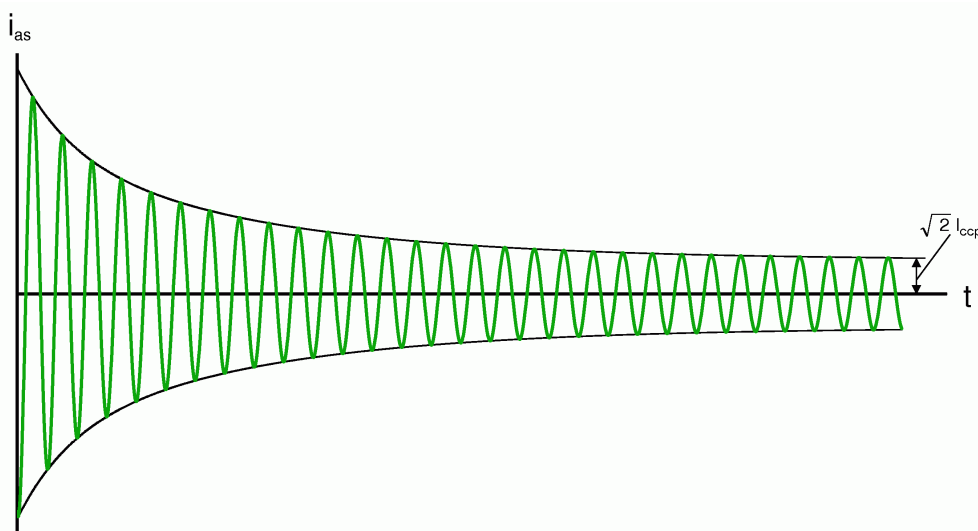


Fig. 7: Componente alterna simétrica de la corriente de cortocircuito en una fase del inducido

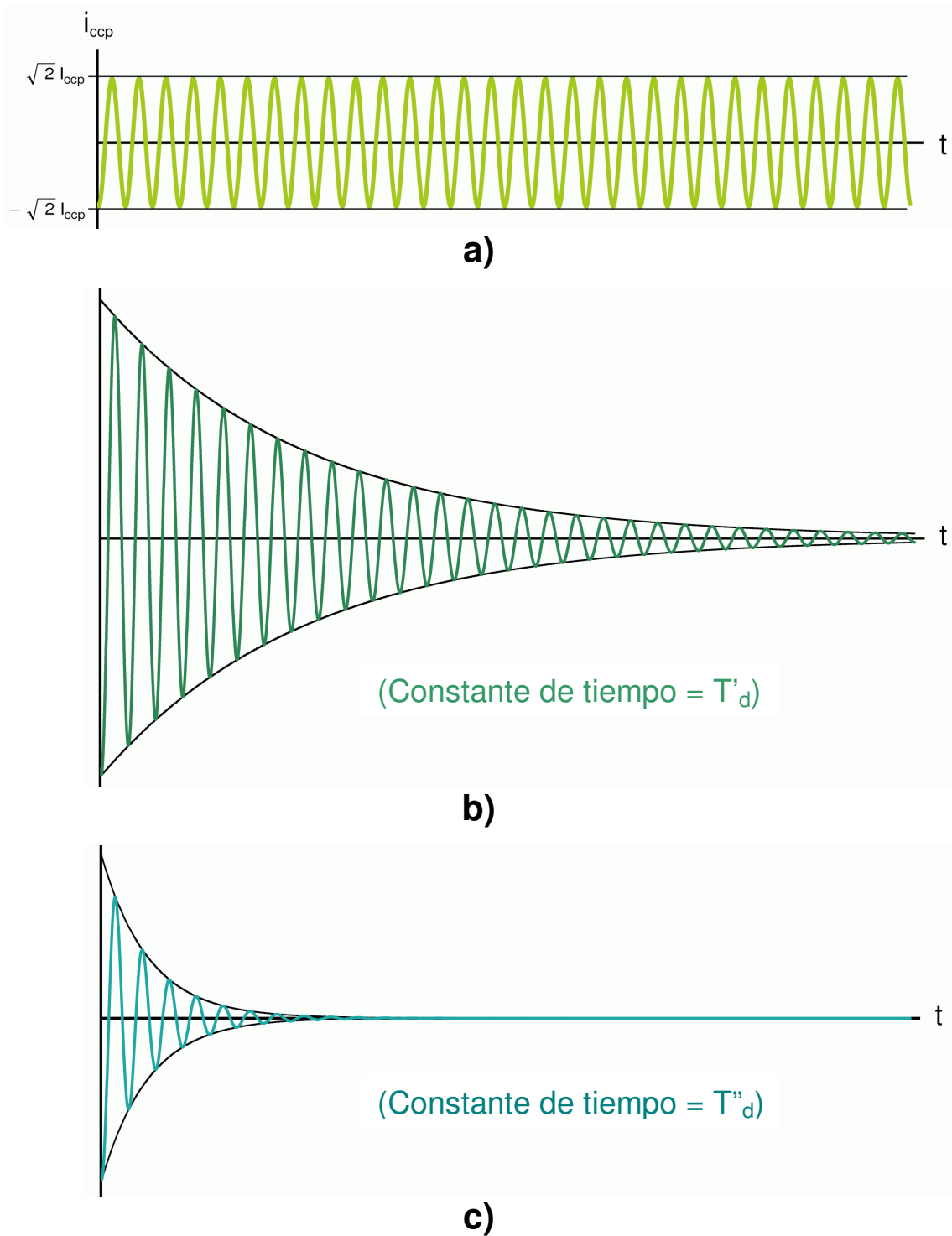


Fig. 8: Componentes de la corriente alterna simétrica i_{as} :

- a) Corriente permanente de cortocircuito
- b) Componente transitoria
- c) Componente subtransitoria

La componente alterna simétrica de la corriente de una fase del inducido tiene la forma mostrada en la Fig. 7 y se puede considerar como la suma de tres corrientes: la de régimen permanente, la componente transitoria y la componente subtransitoria (Fig. 8).

La corriente *permanente* de cortocircuito (Fig. 8a) ya se estudió en el apartado 1. Se trata de una corriente perfectamente sinusoidal cuyo valor eficaz es I_{ccp} y que está desfasada 90° con respecto a la f.e.m. de vacío e_0 (cuyo valor eficaz es E_0).

La componente *transitoria* (Fig. 8b) es originada por la acción del devanado inductor y se trata de una corriente alterna amortiguada hasta anularse. Su amplitud disminuye exponencialmente con una constante de tiempo T'_d cuyo valor es del orden de los segundos.

La componente *subtransitoria* (Fig. 8c) es originada por la acción del devanado amortiguador y, al igual que la transitoria, se trata de una corriente alterna amortiguada hasta anularse. Su amplitud disminuye exponencialmente con una constante de tiempo T''_d cuyo valor es del orden de las centésimas de segundo y, por lo tanto, se anula al cabo de pocos ciclos de la onda.

3.1.2. Valor eficaz de la corriente alterna simétrica

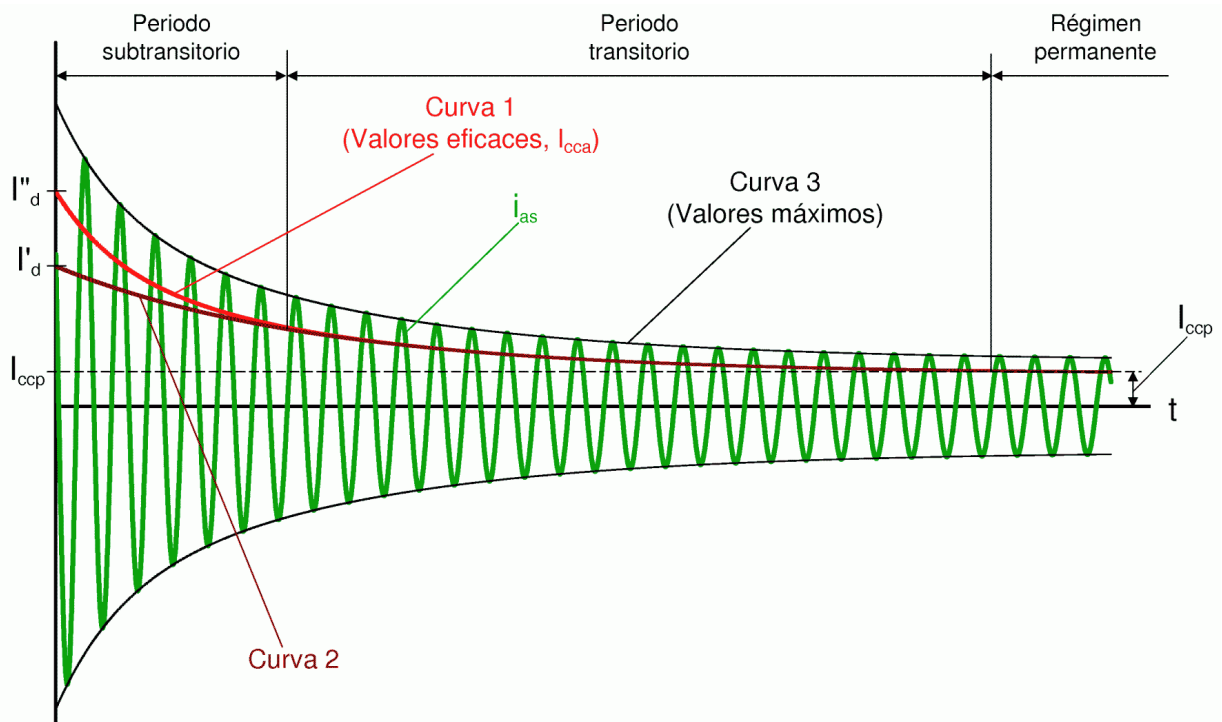


Fig. 9: Corriente alterna simétrica i_{as} y su valor eficaz I_{cca}

En la Fig. 9 se ha vuelto a representar la componente alterna simétrica i_{as} de una fase del inducido. En esta corriente se pueden distinguir tres periodos. En un primer periodo, el *periodo subtransitorio*, i_{as} es la suma de las tres componentes (permanente, transitoria y subtransitoria) representadas en la Fig. 8. La componente subtransitoria se anula muy rápidamente, en pocos ciclos, con lo que i_{as} entra en el *periodo transitorio* en el que sólo tiene las componentes permanente y subtransitoria. Durante el periodo transitorio se produce la anulación de la componente unidireccional i_u (no representada en la Fig. 9), pues la constante de tiempo T_i de esta componente es mucho menor que la constante T'_d de la componente transitoria. Finalmente la componente transitoria también acaba por anularse y se entra en el *régimen permanente* donde la corriente de cortocircuito es una onda perfectamente sinusoidal de valor eficaz I_{ccp} . El transitorio de la corriente de cortocircuito abarca, pues, los periodos subtransitorio y transitorio.

En la Fig. 9 se han dibujado también las envolventes de la corriente i_{as} . La envolvente superior (curva 3) muestra la evolución temporal de los valores máximos de i_{as} . Dividiendo esta curva de valores máximos por $\sqrt{2}$ se obtiene la curva 1 de la Fig. 9 que muestra la variación en el tiempo del valor eficaz I_{cca} de la corriente i_{as} .

I_{cca} será la suma de los valores eficaces de las componentes permanente, transitoria y subtransitoria, luego vendrá expresada mediante una relación que tiene esta forma:

$$I_{cca} = I_{ccp} + C_1 e^{-\frac{t}{T'_d}} + C_2 e^{-\frac{t}{T''_d}} \quad (7)$$

que en el periodo transitorio, al anularse la componente subtransitoria, se reduce a

$$I_{cca} = I_{ccp} + C_1 e^{-\frac{t}{T'_d}} \quad (\text{durante el periodo transitorio}) \quad (8)$$

Se denomina *corriente subtransitoria* I''_d al valor inicial del valor eficaz I_{cca} de la corriente alterna simétrica i_{as} (véase la Fig. 9)

Supóngase por un momento que la máquina síncrona careciera de devanado amortiguador y, en consecuencia, no existirían ni la componente subtransitoria ni el periodo subtransitorio de la corriente i_{as} . En este caso, el valor eficaz I_{cca} se calcularía desde el principio mediante la relación (8) y vendría dado por la curva 2 de la Fig. 9. La curva 2 coincide con la 1 salvo en el periodo subtransitorio y se puede dibujar extrapolando hacia atrás la forma que tiene la curva 1 en el periodo transitorio.

Se denomina *corriente transitoria* I'_d al valor inicial del valor eficaz de la corriente alterna simétrica i_{as} en el caso de que no existiera devanado amortiguador. I'_d es, pues, el valor inicial de la curva 2 en la Fig. 9.

Nótese que se denomina “corriente subtransitoria” tanto a la componente de la corriente de cortocircuito representada en la Fig. 8c como al valor eficaz I''_d definido anteriormente. De igual manera, se denomina “corriente transitoria” tanto a la componente de la corriente de cortocircuito representada en la Fig. 8b como al valor eficaz I'_d definido anteriormente. En la redacción este texto se ha procurado evitar confusiones entre las dos interpretaciones de estos términos. De todos modos el lector deberá percatarse a qué magnitud se refiere el texto en cada momento cuando utiliza los términos “corriente transitoria” y “corriente subtransitoria”.

De acuerdo con la definición de la corriente transitoria I'_d , este es el valor que se calculará mediante la expresión (8) en el instante $t = 0$. Análogamente, introduciendo el valor $t = 0$ en la expresión (7) se obtendrá el valor I''_d . De todo esto se deduce que

$$C_1 = I'_d - I_{ccp} ; \quad C_2 = I''_d - I'_d \quad (9)$$

Por consiguiente, la expresión que permite calcular el valor eficaz I_{cca} de la corriente alterna simétrica i_{as} en cualquier instante se obtendrá de (7) y (9) y es la siguiente

$$I_{cca} = I_{ccp} + (I'_d - I_{ccp}) e^{-\frac{t}{T'_d}} + (I''_d - I'_d) e^{-\frac{t}{T''_d}} \quad (10)$$

La corriente alterna simétrica, i_{as} , (Fig. 9) viene dada por esta relación:

$$i_{as} = \sqrt{2} I_{cca} \cos(\omega t + \gamma) \quad (11)$$

Teniendo en cuenta las relaciones (5), (6) y (11) se deduce que la corriente total de cortocircuito de una fase del inducido, i_{cc} , (Fig. 5) viene dada por la siguiente fórmula:

$$i_{cc} = \sqrt{2} I_{cca} \cos(\omega t + \gamma) + i_{u0} e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (12)$$

En las expresiones (11) y (12) el valor eficaz I_{cca} se calcula mediante la relación (10) y el ángulo γ se obtiene teniendo en cuenta que la corriente alterna simétrica, i_{as} , de una fase está desfasada 90° en retraso con respecto a su f.e.m. de vacío e_0 . Evidentemente, los ángulos γ para dos fases distintas se diferencian en 120° .

Dado que antes del cortocircuito la corriente en cada fase del inducido era nula (marcha en vacío), en el instante inicial la corriente de cortocircuito, i_{cc} , también es nula. Esto significa que los valores iniciales, i_{u0} e i_{as0} , de las corrientes unidireccional y alterna simétrica son iguales y opuestos. Como en el instante inicial ($t = 0$) el valor eficaz I_{cca} es igual a I''_d , de (11) se deduce finalmente que

$$i_{u0} = -i_{as0} = -\sqrt{2} I''_d \cos \gamma \quad (13)$$

3.1.3. Corriente de choque

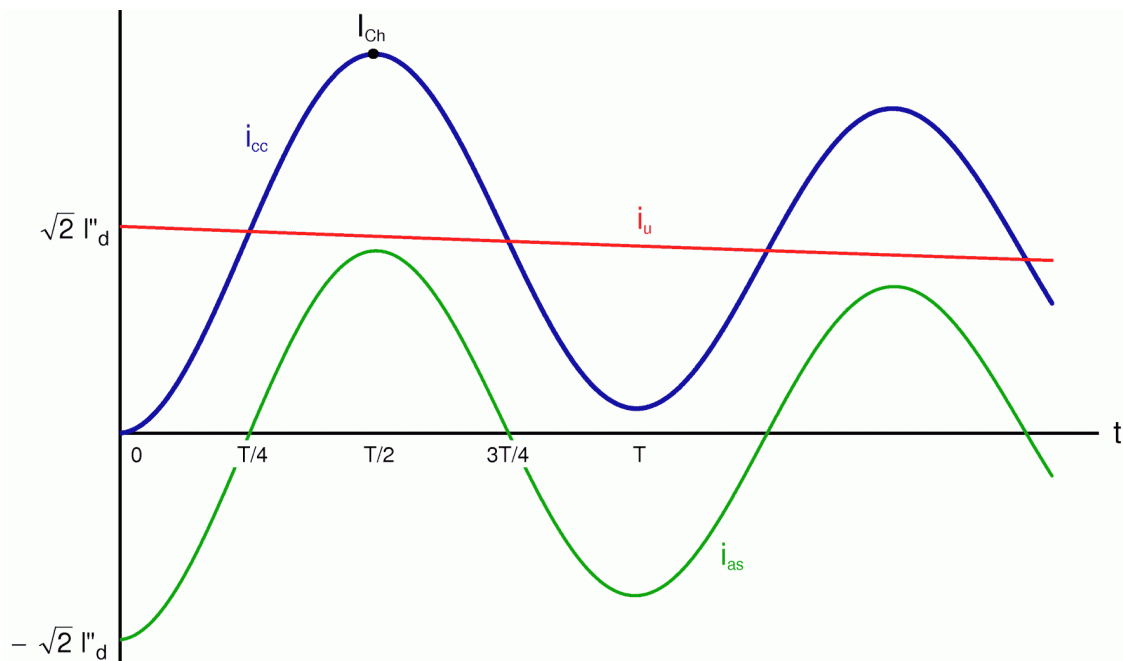


Fig. 10: Corriente de choque I_{ch}

Se denomina *corriente de choque* I_{ch} al máximo valor que puede llegar a alcanzar la corriente de cortocircuito i_{cc} cuando éste se produce en las peores condiciones posibles.

El cortocircuito se da en las peores condiciones posibles; esto es, dará lugar a los mayores valores máximos, si se inicia justo en el momento en que la componente alterna simétrica i_{as} toma su valor máximo positivo o negativo ($\sqrt{2} I''_d$ o $-\sqrt{2} I''_d$) (véase la Fig. 10). Esto, según la relación (11), significa que su ángulo de fase γ vale 0 o 180°. Dado que la corriente está desfasada 90° con respecto a la f.e.m. de vacío, lo anterior también significa que el cortocircuito se produce en las peores condiciones posibles si se inicia justo en el momento en el que la f.e.m. de vacío e_0 tiene un valor nulo.

Supóngase una situación peor que la realidad en la que las constantes de tiempo T_i , T'_d y T''_d son muy grandes. Por lo tanto, se puede aceptar que en el primer semiperiodo de la onda no existe atenuación en la corriente unidireccional ni en la corriente alterna simétrica (Fig. 11).

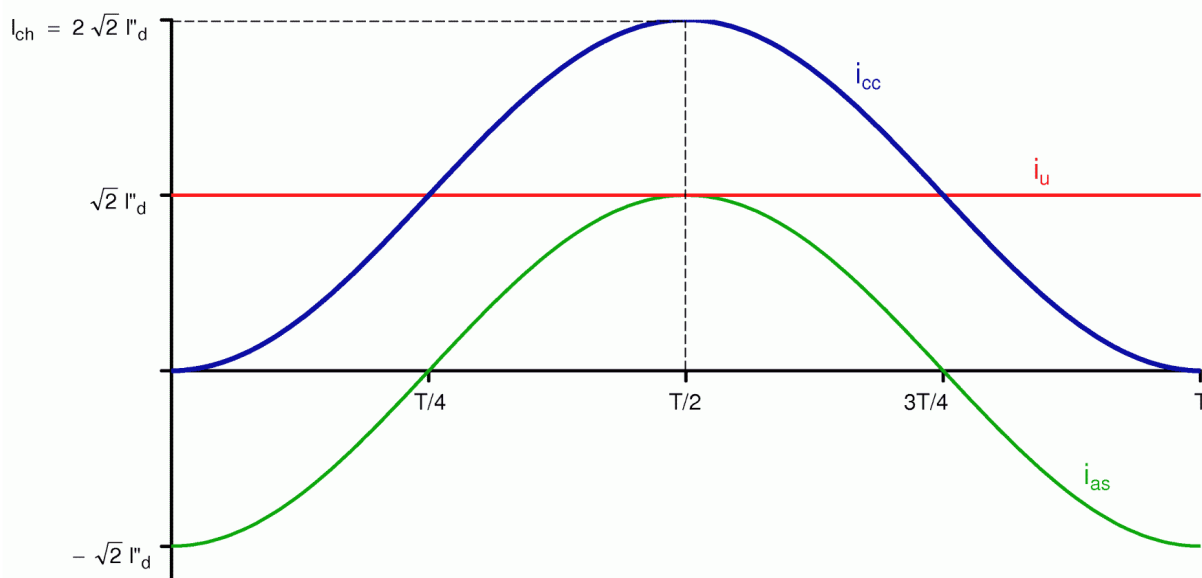


Fig. 11: Corriente de choque ideal

Se comprueba en la Fig. 11 que en este caso la corriente de choque es el valor de la corriente de cortocircuito en el instante $t = T/2$ (siendo T el periodo de la corriente alterna simétrica, i_{as}). En consecuencia, con estas suposiciones se obtiene una corriente de choque cuyo valor es

$$I_{Ch} = 2\sqrt{2} I''_d \quad (14)$$

En realidad, sí que existe amortiguación en las componentes de la corriente de cortocircuito, especialmente en la componente subtransitoria. Por esta razón, en la práctica se acepta que la corriente de choque, como mucho, alcanza este valor

$$I_{Ch} = 1,8\sqrt{2} I''_d = 2,5 I''_d$$

Por consiguiente, la corriente de choque se calculará de una forma bastante aproximada mediante la siguiente relación:

$$I_{Ch} = 2,5 I''_d \quad (15)$$

La corriente de choque puede alcanzar valores entre 5 y 10 veces la corriente de plena carga. Por lo tanto, aunque la corriente permanente de cortocircuito no es muy grande y el régimen transitorio es breve; la corriente de cortocircuito durante el régimen transitorio es peligrosa, ya que provoca unos esfuerzos dinámicos muy grandes y da lugar a un aumento importante en las pérdidas en los devanados.

3.1.4. Reactancias transitoria y subtransitoria

A la hora de analizar un cortocircuito trifásico brusco en bornes de una máquina síncrona en vacío se pueden utilizar las expresiones (10), (12) y (13) para conocer el valor de la corriente de cortocircuito en cualquier instante y la expresión (15) para determinar la corriente de choque.

Los valores de las constantes de tiempo T_i , T'_d y T''_d son siempre los mismos para todos los cortocircuitos trifásicos en bornes de la máquina y los proporciona el fabricante. Recuérdesse el orden de magnitud de estas constantes de tiempo:

T''_d : del orden de las centésimas de segundo

T_i : del orden de las décimas de segundo

T'_d : del orden de los segundos

El ángulo γ depende del momento en que se produce el cortocircuito y es 90° mayor que el ángulo de fase de la f.e.m. de vacío e_0 .

La pulsación ω es la misma que tenía la f.e.m. de vacío e_0 antes del cortocircuito.

El valor eficaz de la corriente permanente de cortocircuito, I_{ccp} , se obtiene mediante las expresiones (1) y (4), donde la reactancia síncrona X_s la suministra el fabricante de la máquina.

Se comprueba, pues, que sólo falta calcular las corrientes transitoria I'_d y subtransitoria I''_d para tener completamente determinada la corriente de cortocircuito. Para ello se define la *reactancia subtransitoria*, X''_d , que en el instante inicial del cortocircuito refleja los efectos de las corrientes inducidas en todos los devanados de la máquina, de forma similar a como en el régimen permanente la reactancia síncrona X_s representa el efecto de la reacción de inducido. Análogamente, la *reactancia transitoria*, X'_d , refleja en el instante inicial del cortocircuito los efectos de las corrientes inducidas en todos los devanados de la máquina menos el devanado amortiguador. En consecuencia, I'_d e I''_d se pueden obtener mediante estas relaciones:

$$I'_d = \frac{E_0}{X'_d} \quad (16)$$

$$I''_d = \frac{E_0}{X''_d} \quad (17)$$

El valor eficaz E_0 de la f.e.m. de vacío viene dado por la fórmula (4) y las reactancias X'_d y X''_d son parámetros proporcionados por el fabricante de la máquina.

3.2. Cortocircuito trifásico brusco en bornes de una máquina síncrona previamente en carga

Si ahora se tiene una máquina síncrona cilíndrica alimentando una carga equilibrada en la que se produce un cortocircuito trifásico brusco en bornes del inducido, se obtienen en sus fases unas corrientes de cortocircuito que tienen las mismas componentes que en el caso de funcionamiento previo en vacío (Figs. 4 a 9).

Por lo tanto, en este caso también se podrán aplicar las relaciones (10), (12) y (15).

Las constantes de tiempo de las componentes unidireccional, transitoria y subtransitoria (T_i , T'_d y T''_d) de la corriente de cortocircuito tienen los mismos valores que cuando el cortocircuito se realiza estando la máquina en vacío.

El valor eficaz de la corriente permanente de cortocircuito, I_{ccp} , se obtendrá mediante las relaciones (1) y (2), que se repiten a continuación

$$I_{ccp} = \frac{E_{0c}}{X_s(\text{no sat})} = \frac{E_0}{X_s(\text{sat})} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{0c} &= \bar{V} + j X_s(\text{no sat}) \bar{I} \\ \bar{E}_0 &= \bar{V} + j X_s(\text{sat}) \bar{I} \end{aligned} \quad (2)$$

Cuando el cortocircuito se produce estando la máquina síncrona en carga, lo que se modifica es el cálculo de las corrientes transitoria I'_d y subtransitoria I''_d , que ahora se efectúa mediante estas fórmulas:

$$I'_d = \frac{E'_r}{X'_d} \quad (18)$$

$$I''_d = \frac{E''_r}{X''_d} \quad (19)$$

donde E'_r y E''_r se denominan *tensiones internas detrás de la reactancia transitoria* y *detrás de la reactancia subtransitoria*, respectivamente. Estas magnitudes se calculan así:

$$\bar{E}'_r = \bar{V} + j X'_d \bar{I} \quad (20)$$

$$\bar{E}''_r = \bar{V} + j X''_d \bar{I} \quad (21)$$

siendo $\bar{V}$ e $\bar{I}$ los fasores de la tensión en bornes y de la corriente del inducido antes del cortocircuito.

Comparando estas relaciones con las (16) y (17), deducidas en el apartado anterior, se puede apreciar que las expresiones para analizar un cortocircuito con la máquina funcionando previamente en vacío ($I = 0$) se pueden considerar un caso particular de las obtenidas para cuando el cortocircuito se produce con la máquina en carga.

3.3. Cortocircuito trifásico brusco en una máquina de polos salientes

La corriente de cortocircuito es inductiva y, por lo tanto, prácticamente sólo tiene componente longitudinal (según el eje d). En consecuencia, para estudiar los cortocircuitos bruscos en máquinas de polos salientes funcionando previamente en vacío se emplean las mismas expresiones que para las máquinas cilíndricas, si se utilizan las reactancias y las constantes de tiempo de la máquina según el eje d.

Sin embargo, si la máquina estaba funcionando en carga antes del cortocircuito, la corriente que circulaba por ella probablemente tenía una componente transversal (según el eje q). En el régimen permanente de cortocircuito la corriente tiene una componente transversal despreciable, prácticamente nula. Por lo tanto, habrá un transitorio según el eje q y existirá una componente transversal de la corriente de cortocircuito que evolucionará desde el valor inicial antes del cortocircuito hasta el valor nulo al llegar al régimen permanente. Este transitorio tiene unas constantes de tiempo diferentes a las del eje d.

No obstante lo anterior, normalmente se obtienen resultados suficientemente exactos si en este caso también se considera sólo la componente longitudinal de la corriente de cortocircuito.

4. CORTOCIRCUITOS ASIMÉTRICOS BRUSCOS

Si se produce un cortocircuito asimétrico habrá un régimen transitorio en las corrientes del inducido hasta alcanzar sus valores de régimen permanente, los cuáles se calculan mediante las expresiones de la tabla 1.

Las corrientes en las fases del inducido durante estos cortocircuitos, al igual cuando el cortocircuito es trifásico, constarán de una componente unidireccional y de una alterna simétrica; la cual, a su vez, es igual a la suma de las componentes permanente, transitoria y subtransitoria. Sus constantes de tiempo son diferentes a las del cortocircuito trifásico.

En los cortocircuitos asimétricos, cada una de las componentes de la corriente tiene diferentes amplitudes en las tres fases. Para cada fase se pueden definir los valores eficaces de la corriente permanente, I_{ccp} , la corriente transitoria, I'_d , y la corriente subtransitoria, I''_d .

Para calcular los valores de I'_d e I''_d se vuelven a utilizar las fórmulas de la tabla 1. Para calcular la corriente transitoria, I'_d , se da a la reactancia de secuencia directa, X_1 , el valor de la reactancia transitoria, X'_d . Análogamente, para calcular la corriente subtransitoria, I''_d , se da a la reactancia de secuencia directa, X_1 , el valor de la reactancia subtransitoria, X''_d . En ambos casos las reactancias de secuencia inversa y homopolar, X_2 y X_0 , conservan los mismos valores que en régimen permanente, los cuáles los proporciona el fabricante de la máquina.

5. CORTOCIRCUITOS AL FINAL DE UNA LÍNEA ALIMENTADA POR UNA MÁQUINA SÍNCRONA

Hasta este momento se ha supuesto que los cortocircuitos se producían justo en bornes del inducido de la máquina síncrona. Considérese ahora que la máquina síncrona alimenta a una línea que presenta esta impedancia por fase:

$$\bar{Z}_L = R_L + j X_L$$

y que el cortocircuito se produce al final de esta línea.

Las corrientes de cortocircuito seguirán teniendo las mismas componentes que cuando el cortocircuito se producía en bornes de la máquina, pero su amplitud y sus constantes de tiempo se verán modificadas.

En este caso, para calcular los valores eficaces I_{ccp} , I'_d e I''_d , habrá que modificar los denominadores de las expresiones de la tabla 1 y las (1), (16), (17), (18) y (19) -según el tipo de cortocircuito de que se trate- añadiéndoles la impedancia Z_L .

Como ejemplo, se va a analizar el cortocircuito trifásico representado en la Fig. 12 de una máquina de rotor cilíndrico que estaba previamente con una carga equilibrada.

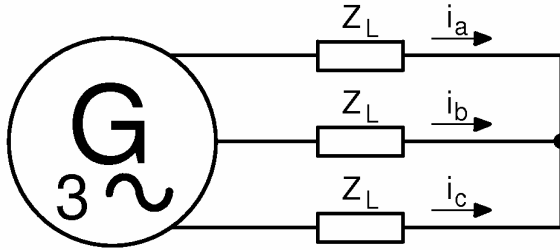


Fig. 12: Cortocircuito trifásico al final de una línea

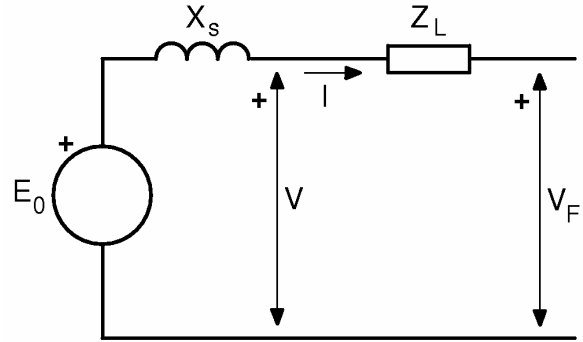


Fig. 13: Circuito equivalente antes del cortocircuito

En la Fig. 13 se ha representado el circuito equivalente de una fase del inducido antes del cortocircuito, cuando el fasor de la corriente es $\bar{I}$, el de la tensión en bornes de la máquina es $\bar{V}$ y el de la tensión al final de la línea es $\bar{V}_F$. Se cumplirá que:

$$\bar{V} = \bar{V}_F + (R_L + j X_L) \bar{I} \quad (22)$$

Los fasores $\bar{E}_0$, $\bar{E}'_r$ y $\bar{E}''_r$ de las f.e.m.s se calculan de forma similar a cuando el cortocircuito es en bornes del inducido (relaciones (2), (20) y (21)). Luego:

$$\bar{E}_0 = \bar{V} + j X_s \bar{I} = \bar{V}_F + (R_L + j (X_s + X_L)) \bar{I} \quad (23)$$

$$\bar{E}'_r = \bar{V} + j X'_d \bar{I} = \bar{V}_F + (R_L + j (X'_d + X_L)) \bar{I} \quad (24)$$

$$\bar{E}''_r = \bar{V} + j X''_d \bar{I} = \bar{V}_F + (R_L + j (X''_d + X_L)) \bar{I} \quad (25)$$

Los valores eficaces I_{ccp} , I'_d e I''_d se obtienen ahora por medio de las siguientes expresiones, que son generalizaciones de las (1), (18) y (19):

$$I_{ccp} = \frac{E_{0c}}{\sqrt{R_L^2 + (X_s(\text{no sat}) + X_L)^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{R_L^2 + (X_s(\text{sat}) + X_L)^2}} \quad (26)$$

$$I'_d = \frac{E'_r}{\sqrt{R_L^2 + (X'_d + X_L)^2}} \quad (27)$$

$$I''_d = \frac{E''_r}{\sqrt{R_L^2 + (X''_d + X_L)^2}} \quad (28)$$

Las constantes de tiempo T_i , T'_d y T''_d tendrán ahora valores diferentes de los que tienen cuando el cortocircuito es en bornes de la máquina, que son los que suministra el fabricante. Existen expresiones que permiten calcular estas nuevas constantes de tiempo en función de los parámetros de la máquina proporcionados por el fabricante y de la impedancia de la línea.

Si el cortocircuito trifásico al final de la línea se produce cuando la máquina se encontraba en vacío ($I = 0$), las expresiones anteriores pueden seguir aplicándose. En este caso sucederá que

$$I = 0 \rightarrow E''_r = E'_r = E_0 (= V = V_F) \quad (29)$$

(Cortocircuito con la máquina previamente en vacío)

6. VALORES TÍPICOS DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LOS CORTOCIRCUITOS

En la tabla 2 se indican los valores que usualmente tienen los parámetros de las máquinas síncronas que influyen en los cortocircuitos.

Tabla 2: Valores típicos de los parámetros de las máquinas síncronas

	X_d (no sat) (p.u.)	X'_d (p.u.)	X''_d (p.u.)	X_2 (p.u.)	X_0 (p.u.)	T_i (s)	T'_d (s)	T''_d (s)
Turboalternadores de 2 polos	1,1	0,16	0,09	0,1	0,035	0,09	0,6	0,035
Turboalternadores de 4 polos	1,1	0,23	0,12	0,13	0,05	0,2	1,3	0,035
Alternadores de polos salientes con devanado amortiguador	1,15	0,37	0,24	0,29	0,11	0,15	1,8	0,055

(p.u. = por unidad)

La segunda columna de la tabla 2 (X_d (no sat)) se refiere a la reactancia síncrona X_s no saturada, en las máquinas síncronas de rotor cilíndrico, y a la reactancia síncrona longitudinal X_d no saturada, en las máquinas de polos salientes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cortés Cherta, Manuel. “*Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo IV: Máquinas síncronas y motores de c.a. de colector*”. Editores técnicos asociados. Barcelona. 1977.
- [2] Fraile Mora, Jesús. “*Máquinas eléctricas*”. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. Madrid. 2003.
- [3] Kostenko, M. P.; Piotrovski, L. M. “*Máquinas eléctricas. Tomo II*”. Editorial Mir. Moscú. 1976.
- [4] IEEE Std 1110-2002. “*IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*”. IEEE Power Engineering Society. Nueva York. 2003.
- [5] Sanz Feito, Javier. “*Máquinas eléctricas*”. Pearson Educación. Madrid. 2002.
- [6] S. Sarma, Mulukutla. “*Synchronous machines*”. Gordon and Breach Science Publishers. Nueva York. 1979.