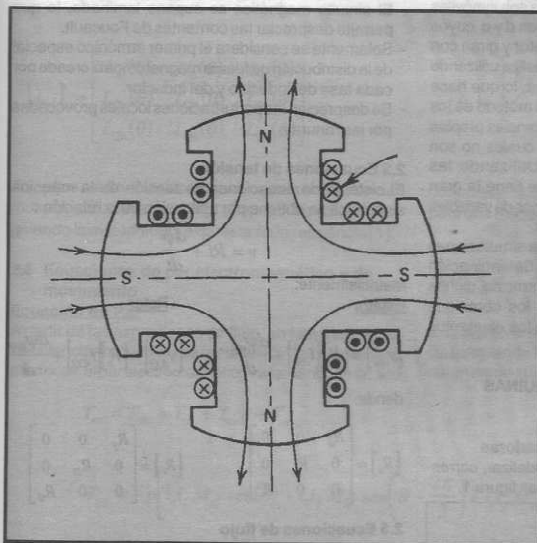


Simulación transitoria de la máquina sincrónica

Corto circuito brusco

Análisis por computador



RESUMEN

Este artículo presenta la simulación del corto circuito trifásico brusco de una máquina sincrónica de polos salientes. También se realiza el cálculo de reactancias y constantes de tiempo, a partir de las variaciones de las corrientes. El estudio fue realizado a velocidad sincrónica, partiendo de las ecuaciones eléctricas, magnéticas y mecánicas que describen el sistema. La simulación se realizó con la ayuda de los programas de computador CIRCUIT+ y FLUX2D.

ABSTRACT

This paper presents a set of performed simulations of the three-phase short circuit for a synchronous machine with saliency. The determination of the machine's characteristic parameters from the simulations is also described. The study was performed at synchronous speed, starting from electrical, magnetical and mechanical equations which constitute a linear system of differential equations. In this work we have simulated, by means of the CIRCUIT+ and FLUX2D software.

PALABRAS CLAVES

Máquina sincrónica, régimen transitorio, corto circuito brusco, elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de los regímenes transitorios de las máquinas se realiza en varias fases: primero la descripción general

□ **Martha Cecilia Amaya Enciso, M. Sc.**
Ingeniera Electricista
Profesora Asociada
Universidad del Valle

□ **Albert Alexandre Foggia, Ph.D.**
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Instituto Nacional Politécnico de Grenoble

□ **René Fevillet, Ph.D.**
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Instituto Nacional Politécnico de Grenoble

* Este texto se recibió, para ser publicado, en mayo de 1997

de los fenómenos físicos que conducen al establecimiento de las ecuaciones que rigen dichos fenómenos, en seguida, la obtención de modelos o circuitos equivalentes a fin de reducir los fenómenos complejos par facilitar su estudio.

En este trabajo, con la ayuda del paquete de software CIRCUIT+, se realizó la simulación de los regímenes transitorios de corto circuito de una máquina sincrónica de polos salientes a la velocidad de sincronismo, a partir de las ecuaciones eléctricas, magnéticas y mecánicas que forman un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes periódicos.

Hasta el presente, el estudio de regímenes transitorios se realiza, habitualmente, utilizando la transformación de PARK, que sustituye los devanados de las fases a, b, c, cuyos conductores y ejes magnéticos son inmóviles con respecto al estator, en dos devanados d y q cuyos ejes magnéticos son solidarios con el rotor y giran con él. En el presente trabajo, el estudio se realiza utilizando las ecuaciones originales de la máquina, lo que hace necesarias muchas simulaciones con el método de los elementos finitos para calcular las inductancias propias y mutuas de todos los devanados, los cuales no son suministrados por los fabricantes. Utilizando las ecuaciones originales de la máquina se tiene la gran ventaja de acceder a todos los valores físicos de variables tales como corrientes, tensiones, pares.

En el presente artículo se presentan las simulaciones para el corto circuito brusco trifásico, la determinación de los parámetros de la máquina a partir de dichas simulaciones y su comparación con los obtenidos experimentalmente y por el método de los elementos finitos.

2. ECUACIONES DE LAS MAQUINAS SINCRÓNICAS

2.1 Descripción e hipótesis simplificadoras

La máquina sincrónica que se va a modelizar, corresponde a la estructura representada en las figura 1.

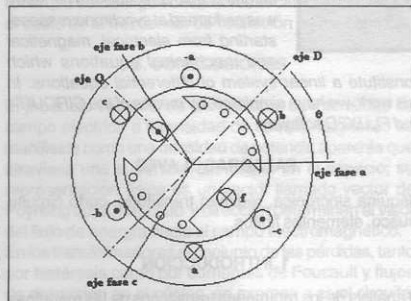


Figura 1: Máquina sincrónica trifásica de polos salientes

El rotor contiene el devanado inductor, bobinado alrededor de los polos y un devanado en cortocircuito llamado devanado amortiguador. Para el análisis del comportamiento, este devanado amortiguador se descompone en dos, uno a lo largo del eje polar (Índice D) y otro a lo largo del eje interpolar (Índice Q), magnéticamente en cuadratura.

El inducido fijo, llamado también estator, está provisto de tres fases idénticas a, b, c, decaladas entre sí en el espacio y en el tiempo un ángulo de $2\pi/3$.

Por simplificación en el análisis se utilizan las siguientes hipótesis:

- El circuito magnético se supone no saturado, lo que permite expresar los flujos como funciones lineales de las corrientes.
- El circuito magnético se supone laminado, lo que permite despreciar las corrientes de Foucault.
- Solamente se considera el primer armónico espacial de la distribución de fuerza magnetomotriz creada por cada fase del inducido y del inductor.
- Se desprecian las perturbaciones locales provocadas por las ranuras.

2.2 Ecuaciones de tensión

El sistema de ecuaciones de tensión de la máquina sincrónica se obtiene por aplicación de la relación:

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt}$$

Matricialmente:

Estator

Rotor

$$[v_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d\psi_{abc}}{dt}$$

$$[v_{DQ}] = [R_r][i_{DQ}] + \frac{d\psi_{DQ}}{dt}$$

donde:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}$$

2.3 Ecuaciones de flujo

Matricialmente:

Estator

Rotor

$$[\psi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{DQ}]$$

$$[\psi_{DQ}] = [L_{sr}][i_{abc}] + [L_r][i_{DQ}]$$

donde

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{fd}(\theta) & L_{ad}(\theta) & L_{aq}(\theta) \\ L_{df}(\theta) & L_{bd}(\theta) & L_{dq}(\theta) \\ L_{qd}(\theta) & L_{db}(\theta) & L_{qq}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{as}(\theta) & L_{bs}(\theta) & L_{cs}(\theta) \\ L_{sa}(\theta) & L_{sb}(\theta) & L_{sc}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{fd}(\theta) & L_{ad}(\theta) & L_{aq}(\theta) \\ L_{df}(\theta) & L_{bd}(\theta) & L_{dq}(\theta) \\ L_{qd}(\theta) & L_{db}(\theta) & L_{qq}(\theta) \end{bmatrix}$$

2.3 Ecuaciones de flujo

Matricialmente

Estatótor

$$[\psi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{rDQ}]$$

donde

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{fa}(\theta) & L_{fb}(\theta) & L_{fc}(\theta) \\ L_{Da}(\theta) & L_{Db}(\theta) & L_{Dc}(\theta) \\ L_{Qa}(\theta) & L_{Qb}(\theta) & L_{Qc}(\theta) \end{bmatrix}$$

Rotor

$$[\psi_{rDQ}] = [L_{sr}][i_{abc}] + [L_r][i_{rDQ}]$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ar}(\theta) & L_{ar}(\theta) & L_{ar}(\theta) \\ L_{br}(\theta) & L_{br}(\theta) & L_{br}(\theta) \\ L_{cr}(\theta) & L_{cr}(\theta) & L_{cr}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ff}(\theta) & L_{fd}(\theta) & L_{fq}(\theta) \\ L_{df}(\theta) & L_{dd}(\theta) & L_{dq}(\theta) \\ L_{qf}(\theta) & L_{qd}(\theta) & L_{qq}(\theta) \end{bmatrix}$$

Todos los coeficientes de autoinductancia e inductancias mutuas, utilizados en este párrafo se calculan siguiendo la metodología expuesta en la referencia [1].

2.4 Ecuaciones de par electromagnético y de movimiento

Ecuación de Par

A partir de las expresiones de flujo, en términos de las inductancias requeridas para establecer las ecuaciones eléctricas, el par electromagnético instantáneo se puede

determinar fácilmente, gracias a la expresión general para una máquina que posee k devanados.

$$T_{em} = \frac{p}{2} \sum_{j=1}^k \sum_{p=1}^k i_j i_p \frac{dL_{jp}}{d\theta}$$

donde p es el número de pares de polos:

Desarrollando la expresión, realizando las derivadas y reagrupando términos el par electromagnético es:

$$T_{em} = T_{exc} + T_{rel} + T_{amD} + T_{amQ}$$

$$T_{exc} = -p \left[i_a i_f M_{af} \sin(\theta) + i_b i_f M_{bf} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c i_f M_{cf} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$T_{rel} = -p \left[(i_a^2 + 2i_b i_c) L_2 \sin(2\theta) + (i_c^2 + 2i_a i_b) L_2 \sin\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + (i_b^2 + 2i_a i_c) L_2 \sin\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$T_{amD} = -p \left[i_a i_D M_{aD} \sin(\theta) + i_b i_D M_{bD} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c i_D M_{cD} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$T_{amQ} = +p \left[i_a i_Q M_{aQ} \cos(\theta) + i_b i_Q M_{bQ} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c i_Q M_{cQ} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

A: matriz dinámica del estado del sistema

C: matriz de observación

D: matriz de transmisión directa.

La integración del sistema de ecuaciones diferenciales es numérica, en intervalos de tiempo suficientemente pequeños para que las fuentes puedan ser consideradas constantes durante la duración de un paso de cálculo. Las matrices A, B, C y D dependen del estado de los semiconductores. A cada paso de tiempo el programa verifica si se debe producir una conmutación, recalcula las matrices A, B, C y D y continúa la simulación con una nueva configuración.

El método de integración utiliza las exponenciales de las matrices. Los vectores X y Y se obtienen por las relaciones:

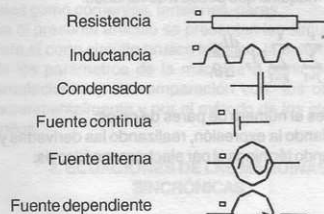
$$X(t + \Delta t) = e^{A\Delta t} X(t) + A^{-1} * (e^{A\Delta t} - 1) * B * U(t)$$

$$Y(t + \Delta t) = C * X(t + \Delta t) + D * U(t + \Delta t)$$

La fase de explotación de los resultados permite el trazado de las curvas de evolución sea por pantalla o en papel, la realización de análisis espectrales y el cálculo de valores instantáneos o integrales (valores medios, eficaces o medios rectificados).

Convenciones y simbología

CIRCUIT+ utiliza la convención generador.



3.2 Circuito Equivalente del Estator

Las ecuaciones de tensión y de flujo son las siguientes:

$$V_a = R_a i_a + L_0 \frac{di_a}{dt} + M_0 \left[\frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right] + v_{\psi a}$$

$$V_b = R_a i_b + L_0 \frac{di_b}{dt} + M_0 \left[\frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right] + v_{\psi b}$$

$$V_c = R_a i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + M_0 \left[\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right] + v_{\psi c}$$

donde $v_{\psi a}$, $v_{\psi b}$, $v_{\psi c}$ son fuentes de tensión dependientes iguales a:

$$v_{\psi a} = \frac{d\psi_a}{dt}; v_{\psi b} = \frac{d\psi_b}{dt}; v_{\psi c} = \frac{d\psi_c}{dt}$$

donde:

$$\psi_a = \psi_{af} + \psi_{ar}; \psi_b = \psi_{bf} + \psi_{br}; \psi_c = \psi_{cf} + \psi_{cr}$$

$$\psi_{af} = L_2 \left[\cos(2\theta) i_a + \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right]$$

$$\psi_{ar} = M_{af} \cos(\theta) i_f + M_{ad} \cos(\theta) i_D + M_{aQ} \sin(\theta) i_Q$$

$$\psi_{bf} = L_2 \left[\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_a + \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_b + \cos(2\theta) i_c \right]$$

$$\psi_{br} = M_{bf} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_f + M_{bd} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_D + M_{bQ} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_Q$$

$$\psi_{cf} = L_2 \left[\cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_a + \cos(2\theta) i_b + \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right]$$

$$\psi_{cr} = M_{cf} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_f + M_{cd} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_D + M_{cQ} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_Q$$

Se tiene entonces para el estator los circuitos equivalentes de las figuras 2 y 3.

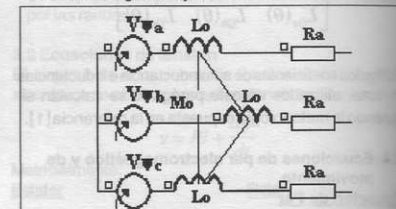


Figura 2: Circuito equivalente estático

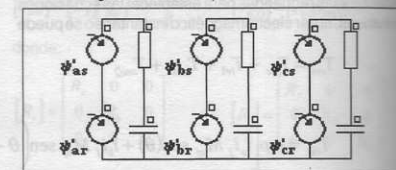


Figura 3: Circuito auxiliar de flujo, para la máquina sincrónica máquina de polos salientes

3.3 Circuito equivalente del rotor

Para el rotor se tienen las ecuaciones de tensión y de flujo siguientes:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_D \frac{di_D}{dt} + v_{\psi f}$$

$$0 = R_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} + M_D \frac{di_f}{dt} + v_{\psi D}$$

$$0 = R_Q i_Q + L_Q \frac{di_Q}{dt} + v_{\psi Q}$$

con:

$$v_{\psi f} = \frac{d\psi_f}{dt}; v_{\psi D} = \frac{d\psi_D}{dt}; v_{\psi Q} = \frac{d\psi_Q}{dt}$$

donde:

$$\psi_f = M_{af} \cos(\theta) i_a + M_{af} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + M_{af} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_c$$

$$\psi_D = M_{aD} \cos(\theta) i_a + M_{aD} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + M_{aD} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_c$$

$$\psi_Q = M_{aQ} \sin(\theta) i_a + M_{aQ} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + M_{aQ} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_c$$

Se tiene entonces para el rotor los circuitos equivalentes de las figuras 4 y 5.

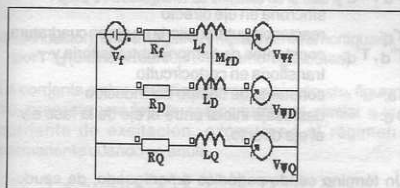


Figura 4: Circuito equivalente rotórico máquina sincrónica

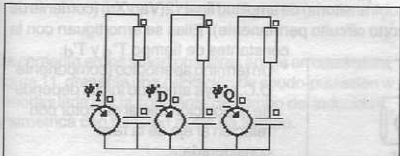


Figura 5: Circuito auxiliar de flujo, de la máquina sincrónica

3.4 Circuito equivalente de la malla mecánica

$$T_{em} = T_m + J \frac{1}{p} \frac{d\omega}{d\theta}$$

Hay que precisar que en el par motor se debe tener en cuenta el par de frotamiento dinámico

T_f proporcional a la velocidad, el par resistente estático

T_o constante, y el par de carga propiamente dicho
 T_{ch} Se representa la malla mecánica por un circuito eléctrico equivalente donde:

T_{em} está representado por una serie de fuentes dependientes de tensión definidas por las ecuaciones del párrafo 1.4.

T_f está representado por una resistencia,

T_o y T_{ch} son representados por fuentes de tensión continua.

w es el análogo de la corriente.

J está representado por una inductancia.

Entonces el circuito equivalente es el de la figura 6

Las fuentes dependientes de par electromagnético están dadas por las ecuaciones del párrafo 1.4. A causa de

las limitaciones impuestas en CIRCUIT+, para las fuentes dependientes, se debió realizar un circuito auxiliar para representar los términos

$$(i_a^2 + 2i_a i_c), (i_b^2 + 2i_b i_c), (i_c^2 + 2i_c i_a), i_a i_D, i_b i_D, i_c i_D, i_a i_Q, i_b i_Q, i_c i_Q$$

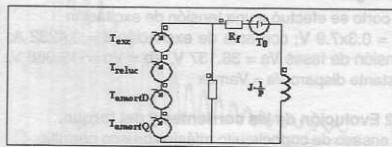


Figura 6: Circuito equivalente de la malla mecánica.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tanto las simulaciones como los ensayos se realizaron sobre una máquina sincrónica de polos salientes del Laboratorio de Electrotecnia de Grenoble-Francia. Los valores nominales de la máquina a simular son:

Potencia Aparente: $S = 3 \text{ KVa}$
 Tensión de fase: $V = 127 \text{ V}$
 Corriente: $I = 7.9 \text{ A}$
 Frecuencia: $F = 50 \text{ Hz}$
 Número de polos: $2p = 4$

En la tabla 1, abajo, se dan los parámetros calculados con la ayuda del programa de elementos finitos FLUX2D.

PARÁMETRO	VALOR
Resistencia de Inducido H_a (ohms/fase)	0.156000
Resistencia de excitación R_f (ohms)	5.600000
Resistencia amortiguadora directa D (ohms)	9.300000
Resistencia amortiguadora cuadratura R_Q (ohms)	6.000000
Inductancia propia de la fase L_D (H)	0.050340
Coefficiente de Inductancia de rotación L_2 (H)	0.005773
Inductancia propia de excitación L_f (H)	3.442894
Inductancia propia amortiguadora directa L_D (H)	0.609266
Inductancia propia amortiguadora cuadratura L_Q (H)	0.304857
Inductancia mutua entre fases M_0 (H)	-0.022160
Inductancia mutua fase-inductor M_{af} (H)	0.365298
Inductancia mutua fase-amort. directa M_{aD} (H)	0.121902
Inductancia mutua fase-amort. cuadratura M_{aQ} (H)	0.086482
Inductancia mutua inductor-amort. directa M_{fD} (H)	0.888508
Momento de Inercia J (Kg.m^2)	0.367000
Par estático T_o (N-m)	0.001000

Tabla 1: Parámetros de la máquina

4.1 Procedimiento de corto circuito

El cortocircuito se realizó según el esquema de la figura 7, conectando tres interruptores comandados a los bornes del estator, con las siguientes características:

- Resistencia pasante: 0.01Ω
- Resistencia de bloqueo: $10\,000 \Omega$
- Tensión inversa: $15\,000 \text{ V}$
- Frecuencia de disparo: 0.1 Hz
- t Instante de disparo: 0.045068 s
- t Instante de extinción: 9.9 s

Para obtener el régimen permanente antes del cortocircuito, se precargó la inductancia de excitación a un valor de corriente proporcional a 0.3 veces la corriente

de excitación en vacío, para no tener sobrecorrientes demasiado importantes en el período subtransitorio. Se simuló una primera parte de 0.01 segundos sin almacenamiento y una segunda parte con almacenamiento de 1.2 segundos.

El corto se efectuó a una tensión de excitación $V_f = 0.3 \times 7.9$ V; corriente de excitación $i_f = 0.4232$ A; tensión de fases $V_a = 38.137$ V, $V_b = V_c = -19.068$ V, instante disparo $V_a = V_{amax}$

4.2 Evolución de las corrientes y del torque.

El ensayo de cortocircuito trifásico brusco permitió:

- Validar el modelo presentado en el capítulo 2
- Determinar los valores de

$$x_d, x'_d, x''_d, T_d, T'_d \text{ y } T''_d$$

- Hacer una comparación con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio y con la ayuda del paquete de elementos finitos FLUX2D referencia [5].

Se pudo constatar que la forma de las curvas es la misma que aquella de los ensayos experimentales y por elementos finitos y obedecen a las expresiones analíticas [2].

La corriente en una fase cualquiera, figura 8, es la suma de tres términos:

$$i_a = -\sqrt{2}V_{a0} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(\omega t - \theta_0) + \frac{\sqrt{2}V_{a0}}{2} \left(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x''_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \cos \theta_0 + \frac{\sqrt{2}V_{a0}}{2} \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x''_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \cos(2\omega t - \theta_0)$$

con,

V_{a0}, i_{f0} : tensión de fase y corriente de excitación antes del corto circuito

x''_d, x'_d y x_d : reactancias subtransitoria, transitoria y síncrona en eje directo

x''_q : reactancia subtransitoria en eje en cuadratura

T'_d, T''_d : constantes de tiempo subtransitoria y transitoria en cortocircuito

T_a : constante de tiempo del inducido

θ_0 : desfase inicial entre el eje de la fase a y el eje directo.

Un término pseudo-periódico amortiguado, de pseudo-pulsación ω , de amplitud inicial $\sqrt{2}(V_{a0}/X''_d)$ (corriente subtransitoria) de amplitud final $\sqrt{2}(V_{a0}/X_d)$ (corriente de corto circuito permanente). Ellas se amortiguan con las constantes de tiempo T'_d y T''_d .

- * Un término aperiódico (componente D.C.) cuya amplitud inicial depende de la posición inicial del rotor con relación al eje de la fase considerada.

- * Un término pseudo-periódico amortiguado, de pseudo-pulsación 2ω , cuya amplitud es generalmente baja debido a que x''_d y x''_q tienen valores numéricos vecinos.

Las corrientes de las fases b y c se obtienen reemplazando θ_0 por $(\theta_0 - 2\pi/3)$ y $(\theta_0 + 2\pi/3)$ respectivamente.

Para la corriente de excitación, figura 9, hay:

$$i_f = i_{f0} \left[1 + \frac{x_d - x'_d}{x'_d} \left(e^{-\frac{t}{T'_d}} - \left(1 - \frac{T_{ep}}{T'_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} - \frac{T_{ep}}{T'_d} e^{-\frac{t}{T_d}} \cos \theta_f \right) \right]$$

$$T_{ep} = \frac{x_d}{x'_d}$$

- * Una oscilación de pseudo-pulsación amortiguada con la constante de tiempo del inducido T_a (extinción del flujo en el inducido)

- * La diferencia de dos exponenciales, una lentamente amortiguada por T'_d (condicionada a la extinción del flujo)

112

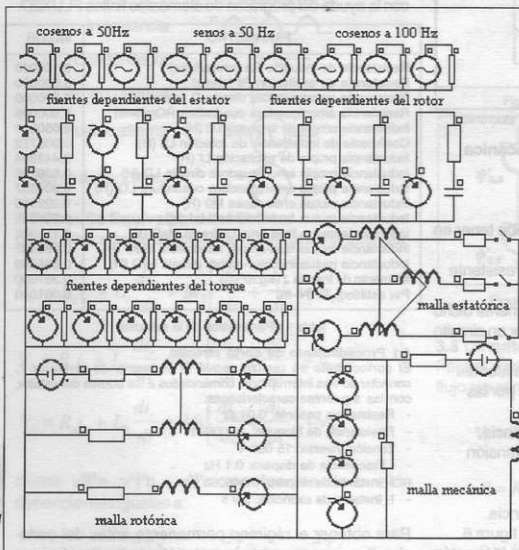


Figura 7: Esquema equivalente de corto circuito, máquina de polos salientes

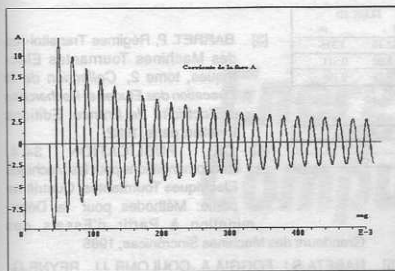


Figura 8 : Oscilograma de corriente de la fase A

en el inductor); la otra negativa y rápidamente amortiguada por T''_d (extinción del flujo en los amortiguadores).

La corriente en los amortiguadores en eje directo, figura 10, presenta una ley de comportamiento similar a la corriente de excitación, excepto en el régimen permanente cuando se anula.

$$i_d = i_{f0} \frac{R_f L_{ad} x_d - x_d}{R_d L_{af} x_d} \left[\left(1 - \frac{T_d}{T'_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} - \left(1 - \frac{T_d}{T''_d} - \frac{T_d}{T'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \frac{T_d}{T'_d} e^{-\frac{t}{T''_d}} \cos \alpha t \right]$$

$$T_d = \frac{L_{af}}{R_d}$$

La corriente en los amortiguadores en eje en cuadratura, figura 11, presenta una oscilación de pseudo-pulsación w amortiguada por la constante de tiempo del inducido T_a y simétrica con relación al eje de tiempo.

$$i_q = i_{f0} \frac{3R_d L_{af}}{2L_q L_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \alpha t$$

Para el par electromagnético, figura 12, la interpretación es muy simple:

- * Un par proporcional al seno del ángulo entre los ejes magnéticos del rotor y estator, este ángulo tiene un valor cero al instante del corto y varía en ωt .
- * Un par de «reluctancia subtransitoria» en $\sin 2\omega t$ debido a la interacción entre los devanados rotóricos en cortocircuito de estructura anisotrópica y el flujo estatórico.

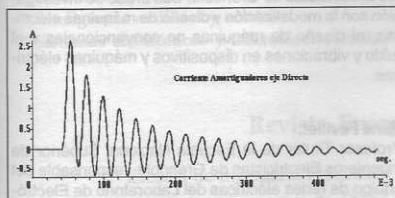


Figura 10: Oscilograma de corriente de amortiguadores en eje directo

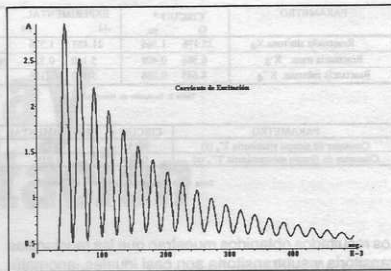


Figura 9 : Oscilograma de corriente de excitación

$$T_{em} = -\frac{3V_{ab}}{\omega} p \left[\frac{x'_d - x'_q}{2x_d x'_q} e^{-\frac{t}{T'_d}} \sin(2\alpha t) \right] - \frac{3V_{ab}}{\omega} p \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x'_q} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_d} e^{-\frac{t}{T_d}} \right] \sin \alpha t$$

4.3 Cálculo de reactancias y constantes de tiempo

Se calcularon las reactancias y las constantes de tiempo subtransitorias, transitorias y de régimen permanente, siguiendo la metodología expuesta en la referencia [4]. En las tablas 2 y 3 abajo, se hace una comparación entre los resultados obtenidos a partir de las simulaciones por CIRCUIT+ (columna 1), los resultados experimentales (columna 2), y la simulación por finitos FLUX2D (columna 3), realizada de acuerdo a la metodología expuesta en [5].

Se encontró que para las reactancias, el valor numérico es del mismo orden por CIRCUIT+ que por los otros dos métodos. Los resultados obtenidos son ligeramente superiores. Esta diferencia puede atribuirse a las siguientes causas:

- En las curvas de corrientes estáticas el primer pico (I_{s1}) es siempre menor que el segundo, lo que se traduce en un aumento en el cálculo de la reactancia subtransitoria.
- Quizás se subestimó el valor para las inductancias de fuga que intervienen fuertemente en x'_q y x'_d .
- Posibles errores en el cálculo por elementos finitos de las inductancias de los devanados.

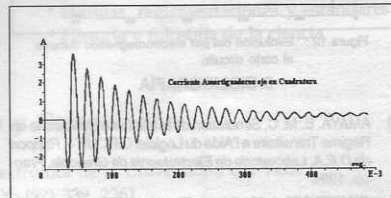


Figura 11: Oscilograma de corriente de amortiguadores en eje en cuadratura

PARAMETRO	CIRCUIT+		EXPERIMENTAL		FLUX 2D	
	Ω	pu	Ω	pu	Ω	pu
Reactancia sincrónica X_d	25.176	1.566	21.483	1.336	22.16	1.378
Reactancia trans. X'_d	6.566	0.408	5.160	0.321	5.00	0.311
Reactancia subtrans. X''_d	4.645	0.288	3.160	0.196	3.19	0.198

Tabla 2: Evolución de Reactancias

PARAMETRO	CIRCUIT+	EXPERIMENTAL	FLUX2D
Constante de tiempo transitoria T'_{d0} (s)	0.155	0.129	0.153
Constante de tiempo subtransitoria T''_{d0} (s)	0.015	0.018	0.021

Tabla 3: Comparación de Constantes de Tiempo

Los resultados obtenidos muestran que las reactancias transitoria y subtransitoria son casi iguales, anomalía que puede ser explicada muy fácilmente. En efecto, la reactancia de fuga del amortiguador en eje directo es demasiado grande con relación a la reactancia de fuga del inductor (en una máquina de polos salientes estos valores son del mismo orden en p.u.) y no interviene en el subtransitorio.

5. CONCLUSIONES

Después de comparar los cálculos y la evolución de las curvas con los ensayos experimentales y la simulación por elementos finitos, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el estudio de los regímenes transitorios de las máquinas sincrónicas se puede realizar con la ayuda del paquete de software CIRCUIT+.

Los tiempos de simulación por CIRCUIT+ son mucho más cortos que los utilizados por elementos finitos para las mismas condiciones.

Es necesario emprender la inclusión del efecto de saturación y la modelización de los regímenes asincrónicos.

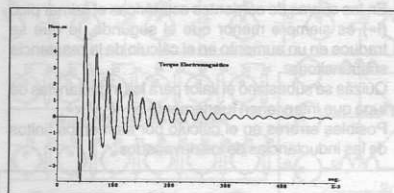


Figura 12: Evolución del par electromagnético durante el corto circuito

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMAYA, E. M. C., Simulation de la Machine Synchrone en Régime Transitoire a l'Aide du Logiciel CIRCUIT+, Rapport de D.E.A., Laboratoire de Electrotechnia de Grenoble, Francia, 1994
- [2] CHATELAIN J., Machines Electriques, Tomes 1 et 2, Presses Polytechniques Romandes, 1983.

- [3] BARRET, P., Régimes Transitoires des Machines Tournantes Electriques, tome 2, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Editions Eyrolles, paris, 1982.
- [4] CEI, PUBLICATION 34.4, Recommendations pour les Machines Electriques Tournantes. Quatrième partie: Méthodes pour la Détermination à Partir d'Essais des Grandeurs des Machines Synchrones, 1985
- [5] NABETA.S.I., FOGGIA.A., COULOMB.J.L., REYNE.G., Détermination des Paramètres d'une Machine Synchrone par Simulation des Eléments Finis de l'Essai SSFR

AUTORES

Martha Cecilia Amaya Enciso,
Ingeniera Electricista de la Universidad del Valle, Magíster en Sistemas de Generación de Energía de la misma Institución, Diploma de Estudios a Profundidad del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble-Francia. Profesora Asociada de la Cátedra de Conversión de Energía en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. En la actualidad se encuentra en Comisión de Estudios para realizar el tercer año de Doctorado en el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble-Francia. Su campo de investigación la modelización y estudio en régimen transitorio de máquinas eléctricas.



Albert Alexandre Foggia,
Ingeniero Electricista del Instituto Nacional Politécnico de Grenoble-Francia, Doctor-Ingeniero de la misma Institución, Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad Claude Bernard de Lyon-Francia. Desde 1968 se desempeña como Profesor Titular en el Equipo de Máquinas Eléctricas del Laboratorio de Electrotecnia de Grenoble y la Escuela Nacional Superior de Ingenieros Electricistas de Grenoble. Sus áreas de investigación son la modelización y diseño de máquinas eléctricas, el diseño de máquinas no convencionales y el ruido y vibraciones en dispositivos y máquinas eléctricas.

René Fevillet,
Profesor Titular de la Escuela Nacional Superior de Ingenieros Electricistas de Grenoble, responsable del equipo de redes eléctricas del Laboratorio de Electrónica de Grenoble. Su campo y la estabilidad de los sistemas de potencia.