

Obtención de parámetros del generador sincrónico bajo régimen dinámico

Jaime Alonso Castillo Marín*, José Ómar Trujillo Gómez**, Adriana Marcela Montaña Bejarano*** y Emmy Yadira Ruiz Vargas****

En este artículo (escrito el 20 de agosto de 2004) se explican los principales parámetros del generador sincrónico, se realiza una breve descripción de las pruebas de laboratorio para su medición, se presentan los resultados obtenidos para una máquina de baja potencia y finalmente se hace una comparación de éstos con los valores estándar de máquinas de características similares.

This article explains the main parameters of the synchronous generator, it also carries out a brief description of the laboratory tests for their measure. The obtained results for a low power machine are displayed. Finally it shows a comparison between these results and the standard values of machines with similar characteristics.

Palabras claves: análisis transitorio del generador sincrónico, corrientes de cortocircuito, estimación de parámetros, generador sincrónico, medida de variables eléctricas.

* Estudiante de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Actualmente trabaja como auxiliar de investigación del Centro de Estudios de Energía.

** Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialista en máquinas eléctricas y alta tensión, magister en ingeniería de sistemas. Actualmente trabaja como coinvestigador en el Centro de Estudios de Energía.

*** Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, magister en ingeniería eléctrica. Actualmente trabaja como investigadora en el Centro de Estudios de Energía.

**** Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, magister en ingeniería eléctrica. Actualmente trabaja como investigadora en el Centro de Estudios de Energía.

INTRODUCCIÓN

En los estudios para el planeamiento operativo y de expansión de los sistemas de potencia es de suma importancia conocer el comportamiento dinámico de la red. Parte de estos estudios se centra en el funcionamiento y respuesta de los generadores sincrónicos a los cambios del sistema. Por tal razón, es importante conocer el procedimiento para la obtención de los parámetros dinámicos del generador sincrónico mediante un análisis matemático sencillo que arroje resultados confiables.

GENERADOR SINCRÓNICO

Para generar potencia eléctrica, el generador sincrónico es el más utilizado en los sistemas de potencia, los cuales constructivamente son de polos salientes o de polos cilíndricos.

El devanado de la armadura generalmente se coloca en el estator de la máquina para lograr la señal trifásica al nivel de tensión y potencia deseados.

En el rotor se tiene el devanado de campo, también llamado de excitación, colocado en ranuras sobre su periferia. Para el caso de polos cilíndricos utilizados para máquinas de alta velocidad, se emplean por lo regular dos o cuatro polos; por el contrario, en máquinas de baja velocidad más de cuatro polos van configurados en bobinas prefabricadas que se colocan en los

polos. Lo anterior predetermina el comportamiento tanto en estado estacionario como en condición transitoria, debido a la variación del entrehierro que modifica los valores de reactancia de la máquina sincrónica.

Estado estable

Para el estudio del comportamiento del generador sincrónico en estado estable se toma un generador de rotor cilíndrico de dos polos y se estudia operando en vacío. La corriente que circula por el devanado del campo crea una fuerza magnetomotriz (fmm_f), la cual da origen a un flujo (Φ_f) que a su vez crea un flujo ligado con cada uno de los devanados del estator (Ψ_{fA} , Ψ_{fB} , Ψ_{fC}). La tensión generada en los bornes del estator está dada para la fase A por (1)

$$E_{fA} = \frac{-d\Psi_{fA}}{dt} = \omega M_{fA} \sin(\omega t) \quad (1)$$

donde M_f es la inductancia mutua de los devanados del estator respecto al devanado del campo y ω es la velocidad angular sincrónica de la máquina.

Cuando al generador se conecta una carga en sus terminales, circulan corrientes por el bobinado de armadura, que dan origen a una nueva fuerza magnetomotriz llamada reacción de armadura, la cual, dependiendo del factor de potencia, en adelanto, atraso o unitario, afecta la fuerza magnetomotriz del campo en forma diferente; para el caso de una carga en adelanto

la nueva fuerza magnetomotriz refuerza la existente, el caso contrario se tiene para cargas en atraso.

La fuerza magnetomotriz de armadura (fmm_a), constituida por tres componentes debido a la diferencia de fase entre las corrientes, es constante en su magnitud y gira a velocidad sincrónica. Por consiguiente, se tiene una fuerza magnetomotriz resultante (fmm) como la suma de la fmm_f y la fmm_a , la cual da origen a flujos ligados ($\Psi_{rA}, \Psi_{rB}, \Psi_{rC}$) generando una tensión en bornes, dada para la fase A por (2)

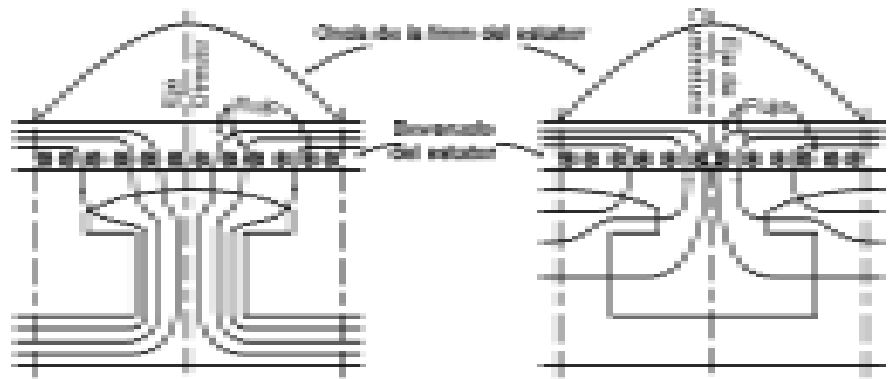


Figura 1. Efecto de reacción de armadura en eje directo y de cuadratura en estado estable [1].

donde L_A es la inductancia por fase del estator y α es el ángulo de atraso de fmm_a con respecto a fmm_f .

La componente de la tensión por efecto de reacción de armadura está $\pi/2$ atrasada con respecto a la corriente que le da origen, y si se suman los efectos físicos propios de la armadura, una reactancia de dispersión (χ_{dis}) y una resistencia propia del devanado (R_a), se tiene (3)

$$E_{rA} = -\frac{d\Psi_{rA}}{dt} = \omega M_r I_f \sin(\omega t) + \omega L_A I_m \sin(\omega t - \alpha)$$

$$V_T = E_g - j\chi_a I - j\chi_{dis} I - R_a I \quad (3)$$

$$V_T = E_g - j\chi_s I - R_a I$$

donde χ_s es la suma de reactancias y es llamada reactancia sincrónica.

Si se considera un rotor de polos salientes, el análisis es distinto debido a que el entrehierro no es constante. Para hacer notar esta diferencia el análisis se realiza por el método de las dos componentes, el eje directo y el eje en cuadratura. El primero está en sentido de la cara polar del rotor y el segundo en sentido transversal; el eje directo está en la dirección donde se tiene menos entrehierro –por consiguiente, mayor flujo– y el eje en cuadratura coincide con la dirección de mayor entrehierro –por tanto, menor flujo–.

Esta reluctancia variable afecta la fuerza magnetomotriz de reacción de armadura. Por tanto, la fuerza magnetomotriz resultante (fmm) se divide en dos componentes: una en sentido del eje de directo (fmm_d) y otra en cuadratura (fmm_q). La fmm_d se conforma por la fuerza magnetomotriz del campo (fmm_f) y de reacción de armadura (fmm_{ad}) y la fmm_q se conforma por la fuerza magnetomotriz de reacción de armadura en ese sentido (fmm_{aq}) [4], [5].

Las fuerzas magnetomotrices de reacción de armadura en el eje directo y de cuadratura son producidas por las com-

(2) ponentes de corriente de armadura en estos ejes. En la misma forma que en el caso del rotor de polos cilíndricos, se tienen dos tensiones atrasadas $\pi/2$ con respecto a las corrientes que las generan; de esta manera, si se consideran un conjunto y se suman los efectos físicos, se tiene (4)

$$V_T = E_g - j\chi_{aq} I_q - j\chi_{ad} I_d - j\chi_{dis} I - R_a I \quad (4)$$

$$V_T = E_g - j\chi_q I_q - j\chi_d I_d - R_a I$$

donde χ_q es la reactancia sincrónica en el eje de cuadratura y χ_d es la reactancia sincrónica en el eje directo.

Aunque el método de las dos componentes se desarrolló para máquinas de polos salientes también se utiliza en máquinas de rotor cilíndrico, debido a que su entrehierro no es del todo constante por las ranuras que se encuentran en el rotor y el estator.

En la figura 1 se muestra la distribución de flujo de reacción de armadura en el eje directo y en cuadratura para estado estable.

Estado transitorio

Si se supone que ocurre una falla cuando el generador opera en vacío, y se desprecia la resistencia de armadura, el flujo que se presenta es el flujo de excitación producido en el rotor, el cual da origen a unos flujos en los devanados de la armadura cortocircuitados ($\Psi_{EA}, \Psi_{BB}, \Psi_{CC}$). Los flujos ligados deben permanecer constantes aun después de la falla [1], por lo que durante ésta se producen flujos sinusoidales diferentes, los cuales hacen que circulen corrientes que crean flujos adicionales ($\Psi_{AA}, \Psi_{BB}, \Psi_{CC}$), haciendo que los flujos ligados tengan entonces dos componentes: un flujo (Ψ_{EA}) proporcional a corrientes alternas (I_{Aa}, I_{Ba}, I_{Ca}) y un flujo (Ψ_{EA}) proporcional a corrientes directas (I_{Aa}, I_{Ba}, I_{Ca}) [2].

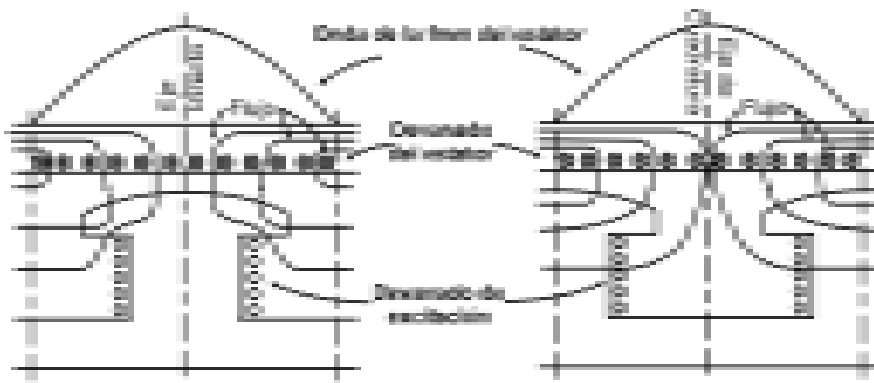


Figura 2. Efecto de reacción de armadura en eje directo y de cuadratura en estado transitorio [1].

El efecto combinado de las componentes ac y α de la corriente en las tres fases produce una fuerza magnetomotriz de reacción de armadura que lleva a un flujo de reacción de armadura a través del entrehierro que se enlaza con los bobinados del rotor y crea corrientes en él. Las corrientes de fase ac producen una fuerza magnetomotriz de reacción de armadura ac ($fmm_{a,ac}$) que se comporta en forma similar a la fmm_a de estado estable, la cual rota a la misma velocidad que el rotor y, por consiguiente, a la misma velocidad que la fmm_f . Esta fuerza magnetomotriz de reacción de armadura desmagnetiza la máquina, por tanto los flujos ligados del rotor producidos por $fmm_{a,ac}$ serán constantes y negativos.

Las corrientes α en cada fase producen una fuerza magnetomotriz estacionaria $fmm_{a,\alpha}$ que genera un flujo de armadura estacionario ($\Phi_{a,\alpha}$). La $fmm_{a,\alpha}$ en el momento de la falla se encuentra alineada con el eje directo del rotor y gira en sentido contrario a él. El significado de este fenómeno es que el flujo ligado del rotor $\Psi_{a,\alpha}$ producido por $\Phi_{a,\alpha}$ es inicialmente positivo, magnetizando la máquina y luego al girar el rotor varía cosenoidalmente.

En el instante de la falla, tanto las fuerzas magnetomotrizes de la armadura ac como α están dirigidas a través del eje directo del rotor. Al girar el rotor las fmm de armadura ac giran, induciendo corrientes adicionales α en el rotor, y las fmm de armadura α , que son estacionarias, inducen corrientes ac adicionales en él [2].

La energía magnética almacenada tanto en el rotor como en el estator decae con el tiempo debido a las resisten-

cias propias de los devanados, y las corrientes α inducidas que mantienen los flujos decaen exponencialmente a cero en un periodo determinado por una constante de tiempo del circuito $\tau = L/R$. La componente cc de la corriente de fase de la armadura decae con una constante de tiempo de armadura τ_a y la componente α de la corriente de campo disminuye con la constante de tiempo del bobinado de campo, llamada constante de tiempo de cortocircuito transitoria de eje directo τ'_d . Las corrientes cc del rotor inducen corrientes ac en el estator y la magnitud de la com-

ponente ac de la corriente del estator llega a un estado estacionario con la misma constante de tiempo τ'_d .

En la figura 2 se puede observar la distribución de flujo de reacción de armadura para el periodo transitorio en el eje directo y de cuadratura.

Dado que la inductancia depende del flujo ligado y la corriente, se observa que ante una disminución de flujo existe una disminución de inductancia y, por consiguiente, de reactancia. De acuerdo con lo anterior y observando las figuras 1 y 2, se puede concluir que la reactancia sincrónica de eje directo (χ_d) es mayor que la reactancia transitoria de eje directo (χ'_d) y que al no tener componente del devanado de campo en el eje de cuadratura la distribución de flujo en estado transitorio es muy parecida a la de estado estable, con una pequeña diferencia debido a la influencia del devanado de campo en el eje directo; por esta razón, usualmente se asume $\chi_q \approx \chi'_q$ [1].



Figura 3. Efecto de reacción de armadura en eje directo y de cuadratura en estado subtransitorio [1].

Estado subtransitorio

Un instante después de ocurrida una falla se tiene un estado subtransitorio, el cual se caracteriza porque el rotor pierde o gana un poco de velocidad y por ende tiende a salir de sincronismo. El primer efecto que se observa en ambos ejes es la inducción de tensión en los devanados de amortiguamiento o jaula de ardilla, ya que existe una velocidad relativa entre las barras del devanado y el campo giratorio de la armadura según la ecuación (5)

$$E = (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (5)$$

Debido a esta tensión, circula una corriente por el devanado de amortiguamiento y se crea un flujo en sentido opuesto cumpliendo con el teorema del flujo ligado constante [1]; estas corrientes también dan origen a un par de amortiguamiento, el cual lleva el rotor de nuevo a la velocidad sincrónica, poniendo fin al estado subtransitorio.

La componente de la corriente continua del devanado de amortiguamiento decae con una constante de tiempo del bobinado de amortiguamiento llamada la constante de tiempo de cortocircuito subtransitoria de eje directo τ''_d . Debido a la magnitud de la resistencia del bobinado de campo y del devanado de amortiguamiento se tiene que $\tau''_d \ll \tau'_d$ por lo tanto la componente α de la corriente del bobinado de amortiguamiento decae con mayor rapidez que la componente α de la corriente de campo.

En la figura 3 se observa la distribución de flujos de reacción de armadura en estado subtransitorio.

De la relación entre flujo y la reactancia establecida anteriormente y teniendo en cuenta las figuras 1 y 3 se puede concluir que χ''_d es muy pequeña respecto a χ'_d . En el período subtransitorio se tiene una distribución de flujo muy parecida en el eje directo y el eje de cuadratura, con un poco más de reluctancia en este último; esto hace que la reactancia χ''_q sea un poco mayor que χ''_d pero en la práctica se puede afirmar que $\chi''_d \approx \chi''_q$ [1].

Por todo lo anterior, la componente ac de la armadura es de forma sinusoidal con dos envolventes; la primera envolvente de estado subtransitorio con una constante de tiempo τ''_d la segunda envolvente de estado transitorio que se amortigua con una constante de tiempo τ'_d y posterior a ésta se encuentra una corriente duradera de cortocircuito;

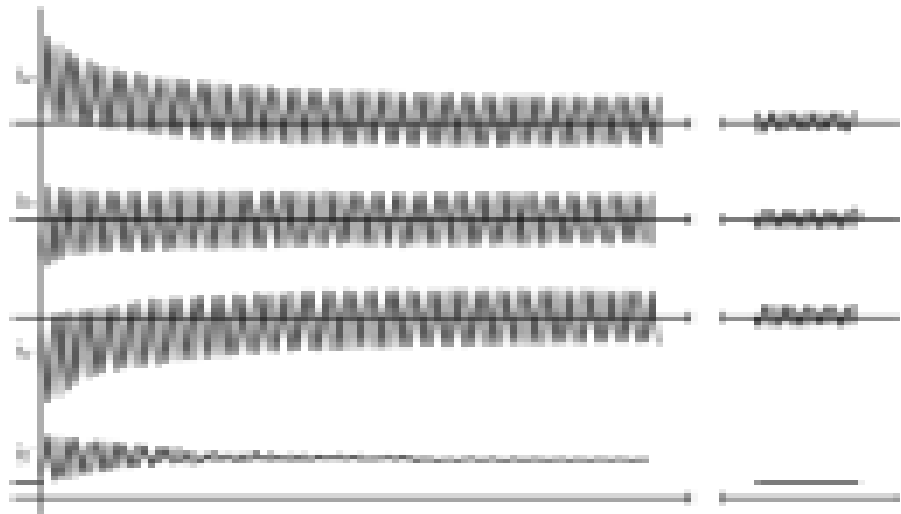


Figura 4. Oscilograma de cortocircuito [1].

de este modo, la ecuación de la corriente ac de armadura está dada por (6)

$$(6)$$

La componente de corriente α en el campo también se amortigua con estas constantes de tiempo.

La componente α en la armadura y la componente ac en el campo son corrientes inducidas y se amortiguan con la constante de tiempo de armadura τ_a .

PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo según la norma IEC 34-4 de 1967, "Recommendations for Rotating Electrical Machinery (excluding machines for traction vehicles). Part 4: Methods for Determining Synchronous Machine Quantities from Test".

Prueba de vacío

Para realizar esta prueba se debe conducir la máquina a velocidad sincrónica; la corriente de campo, el voltaje de línea y la frecuencia se deben medir simultáneamente. Se comienza desde una tensión superior a la nominal, $1,3V_n$, y se baja en pasos iguales hasta $0,2V_n$ si el voltaje residual así lo permite (cuando $I_f = 0$ se obtiene la tensión residual). Se grafica V , vs. I_f se corrige la curva cuando existen voltajes residuales, moviendo con la línea del entrehierro toda la gráfica al origen o por medio del corte de la corriente [3].

Prueba de cortocircuito trifásico sostenido

La corriente de línea y la corriente de campo se deben medir simultáneamente. La velocidad de rotación puede diferir

de la velocidad sincrónica (ω_s) pero esta diferencia no debe ser mayor de $0,2\omega_s$. Se cortocircuitan las terminales de la armadura y luego se aplica la corriente de excitación; se encuentra la relación entre la corriente de cortocircuito de la armadura y la corriente de excitación, y por último la característica se obtiene realizando la gráfica I_f vs. I_f [3].

Prueba de cortocircuito trifásico súbito

Esta prueba se realiza a velocidad sincrónica: se hace un cortocircuito trifásico en los terminales de la armadura con la máquina en vacío. Es importante que la excitación de la máquina sea independiente, es decir, no puede ser auto-excitada. El voltaje en terminales de la máquina, la corriente de excitación y la temperatura de los devanados de campo deben medirse inmediatamente antes de realizar el cortocircuito. Para obtener valores no saturados es recomendable que la prueba se lleve a cabo a diferentes tensiones de armadura entre 0,1 y 0,4 del valor nominal; para obtener valores de saturación la tensión en los terminales de la armadura antes del cortocircuito debe estar en un rango entre 0,6 y 1 del valor de tensión nominal.

Se obtienen el oscilograma de la corriente de armadura de cada fase y la corriente de excitación; los valores estacionarios se pueden medir con instrumentos no muy precisos [3].

Prueba para la determinación de la reactancia de secuencia cero

Para la medida de la reactancia de secuencia cero los tres devanados de la armadura son puestos en serie y se cierra el circuito de tal modo que circule corriente nominal a través de ellos. La relación entre el voltaje en uno de los devanados y la corriente que circula por él da como resultado la impedancia de secuencia cero, debido a que la resistencia de secuencia cero es despreciable; la reactancia de secuencia cero está dada como (7) [1].

$$\chi_0 \approx V_{id} / I_{3s} \quad (7)$$

Obtención de parámetros a partir de valores conocidos

La referencia [3] enuncia algunas relaciones que permiten obtener parámetros por medio de valores conocidos; en esta forma se puede determinar la reactancia de secuencia positiva χ_1 y negativa χ_2 .

$$\chi_1 \approx \chi_d \quad (8)$$

$$\chi_2 \approx \frac{\chi_d + \chi_q}{2} \quad (9)$$

En las máquinas de rotor cilíndrico los valores de los parámetros en eje de cuadratura son semejantes a los parámetros en eje directo debido a la uniformidad del entrehierro.

MÁQUINA SELECCIONADA PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS Y PRUEBAS REALIZADAS

La máquina sincrónica utilizada para la medición de los parámetros es un generador sincrónico del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Esta máquina es de rotor cilíndrico y posee las características que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1
Características de la máquina

S	3,53 kVA
V	208/120 V
I	9,8/16.4 A
f	60 Hz
n	1.800 r.p.m.
No. de fases	3

Prueba de vacío

Los datos obtenidos de la prueba se muestran en la nube de puntos de la figura 5.

Se realizó una regresión polinómica de tercer orden, ya que ésta da el mejor ajuste para valores cerca de la tensión nominal; se hizo la corrección de la curva por medio del corte de la corriente y se encontraron la tensión monofásica y la línea del entrehierro, cuya característica se muestra en la figura 6 y se describe como (10).

$$V_{10} = \frac{9,66(I_f - 0,0085)^3 - 86,89(I_f - 0,0085)^2 + 267,66(I_f - 0,0085) + 2,28}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$V_{ag} = 131,182656I_f$$

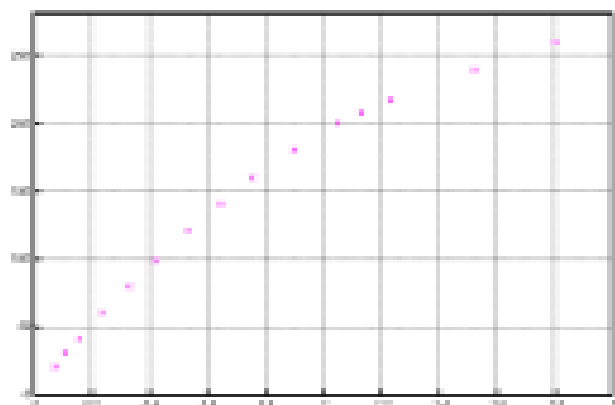


Figura 5. Prueba de vacío (nube de puntos).

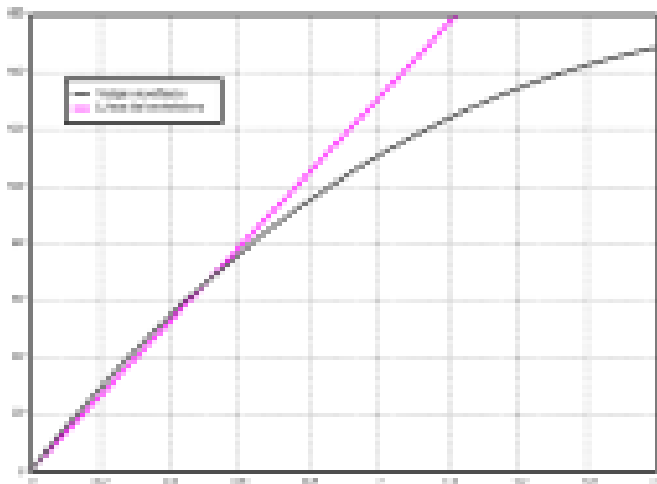


Figura 6. Prueba de vacío.

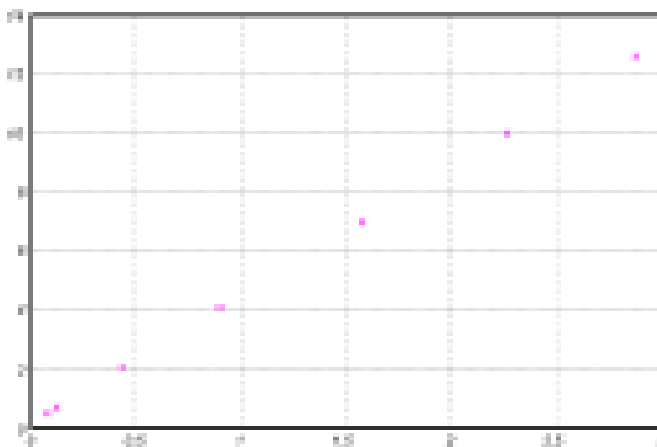


Figura 7. Prueba de cortocircuito sostenido (nube de puntos).

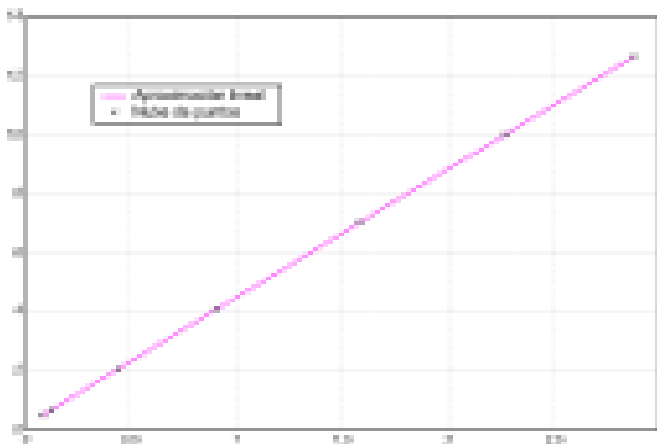


Figura 8. Prueba de cortocircuito sostenido.

Prueba de cortocircuito trifásico sostenido

Los datos obtenidos de la prueba se muestran en la nube de puntos de la figura 7.

Se realizó una regresión lineal, se hizo la corrección de la curva por medio del corte de la corriente y se encontró la característica de la figura 8, donde

$$I_a = 4,351I_f \tag{11}$$

Determinación de la reactancia sincrónica de eje directo

Una vez conocidas las características de vacío y de cortocircuito sostenido se encuentra la reactancia sincrónica de eje directo, como la relación de la tensión nominal y la corriente de cortocircuito correspondiente al mismo valor de la corriente de excitación. La tensión en el caso de reactancia de eje directo saturada se toma de la característica de tensión monofásica y para el caso no saturado corresponde a la tensión sobre la línea del entrehierro.

Prueba de cortocircuito súbito

El oscilograma obtenido para la prueba de cortocircuito súbito se muestra en la figura 9.

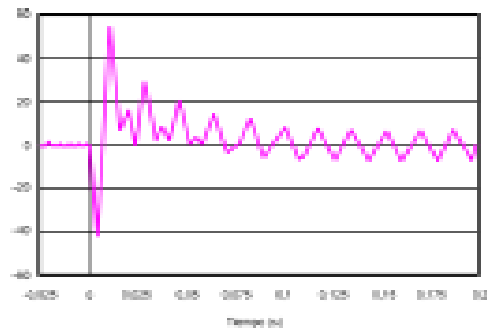


Figura 9. Oscilograma de cortocircuito.

Al analizar este oscilograma se puede observar que existen la componente alterna y la componente continua para la corriente de armadura, lo que indica que el cortocircuito se realizó en un instante en el cual la tensión no era máxima ni mínima; por consiguiente, en la corriente de armadura se indujo una componente de corriente continua. También se puede observar que en los primeros ciclos negativos se tiene una inversión de la señal, problema que puede atribuirse a la influencia de la jaula de ardilla, la cual se adaptó de manera superficial en el rotor, ya que no existía en el diseño original de la máquina. La jaula, al tratar de llevar de nuevo el generador a la velocidad sincrónica, produce un par de

aceleración muy grande, el cual hace que la velocidad del rotor sea superior a la velocidad sincrónica; posterior a éste, se produce un par de frenado y así continúa el ciclo hasta llevar el generador a la velocidad sincrónica.

Determinación de la constante de tiempo de armadura

Para la determinación de la constante de tiempo de armadura se busca la componente α del oscilograma de cortocircuito, cuya característica lineal se obtiene al utilizar una escala logarítmica en el eje de corriente, como se muestra en la figura 10; la constante de tiempo se define como el período de tiempo necesario para que el valor inicial se reduzca al 36,8%.

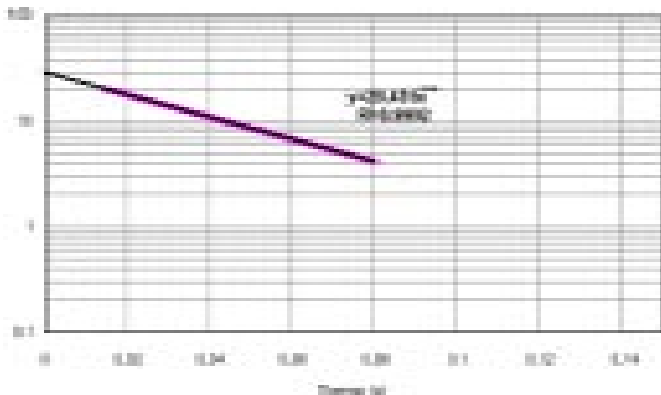


Figura 10. Componente de corriente continua.

Determinación de la reactancia y constante de tiempo de cortocircuito transitoria de eje directo

Siguiendo el análisis del oscilograma, se encuentran tanto la corriente duradera de cortocircuito (I_0) como su envolvente. Esta última gráfica se realiza en escala semilogarítmica (figura 11), y se determina el aporte de corriente del período transitorio (I''_0) como la extrapolación de la parte lineal de la curva en el corte del eje vertical. La constante de tiempo de cortocircuito transitoria de eje directo se determina como el tiempo en que la magnitud cae al 36,8% del valor inicial; la reactancia transitoria de eje directo se define como (12).

$$\chi'_d = \frac{E}{I''_0/\sqrt{2} + I_0/\sqrt{2}} \tag{12}$$

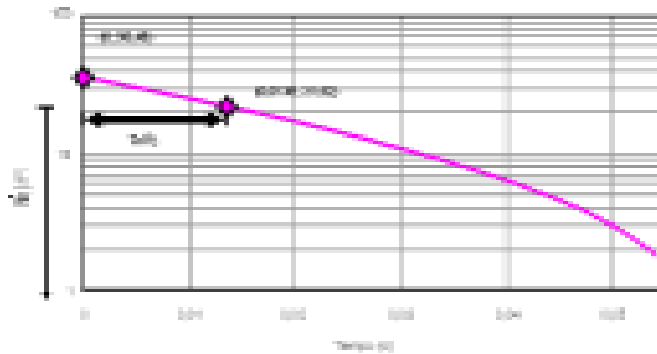


Figura 11. Envolvente de la corriente del período transitorio.

Determinación de la reactancia y constante de tiempo de cortocircuito subtransitoria de eje directo

Para la determinación de los parámetros subtransitorios se realiza la gráfica de la resta del valor no lineal de la envolvente del oscilograma con la extrapolación hecha del período transitorio (figura 12). El corte con el eje vertical determina el aporte de corriente del período subtransitorio (I''_d), la constante de tiempo de cortocircuito subtransitoria de eje directo se determina como el período de tiempo en que la magnitud cae al 36,8% del valor inicial y la reactancia subtransitoria de eje directo está dada por (13).

$$\chi''_d = \frac{E}{I''_d/\sqrt{2} + I''_0/\sqrt{2} + I_0/\sqrt{2}} \tag{13}$$

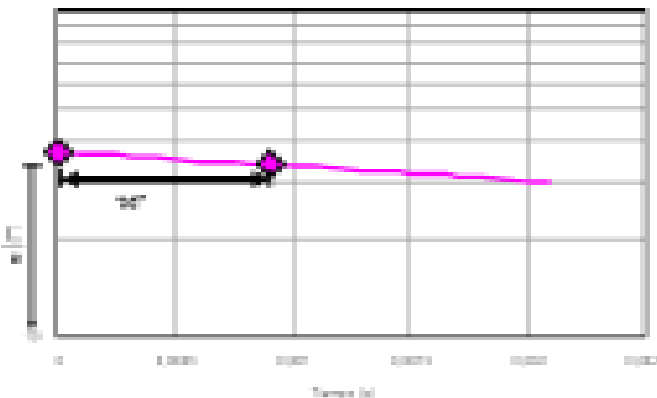


Figura 12. Envolvente de la corriente del período sub-transitorio.

Tabla 2
Comparación de los parámetros con valores estándar

Potencia	Turbo generador - Rotor sólido (p.u.)			Generador ECI (*)		Generador ECI (p.u.)	
	Baja	Media	Alta	$X_{d\text{ nsat}}$	$X_{d\text{ sat}}$	$X_{d\text{ nsat}}$	$X_{d\text{ sat}}$
χ_d	0,95	1,1	1,45	30,15	24,19	2,46002	1,97373
χ'_d	0,12	0,23	0,28		3,979		0,325
χ''_d	0,07	0,12	0,17		2,145		0,175
χ_0	0,01	-	0,1		0,014		0,001
χ_2	0,07	0,12	0,17		2,145		0,175
τ'_d	0,4	1,1	1,8		0,028		0,028
τ''_d	0,02	0,035	0,05		0,009		0,009
τ_a	0,04	0,16	0,35		0,042		0,042
χ_d/χ'_d	7,92	4,78	5,18		7,577		7,577
χ_d/χ''_d	13,57	9,17	8,53		14,056		14,056
χ'_d/χ''_d	1,71	1,92	1,65		1,855		1,855

(*) Todas las unidades están en S.I.

RESULTADOS OBTENIDOS

En la tabla 2 se muestran los valores estándar presentados en [1], junto con los valores obtenidos de las pruebas realizadas y las relaciones establecidas.

Se hace la comparación de las reactancias obtenidas bajo la premisa de que en el sistema por unidad se puede efectuar la comparación sin importar la potencia o el nivel de las máquinas comparadas.

CONCLUSIONES

Se observa que los valores de reactancias obtenidos de la máquina seleccionada para el estudio son muy cercanos a los valores estándar para máquinas de rotor cilíndrico.

Se encuentra una estrecha similitud en las relaciones de reactancias, lo cual confirma que se está comparando con respecto al tipo de máquina adecuado.

Se puede observar que las constantes de tiempo son muy pequeñas respecto a las constantes de tiempo estándar. Esto se atribuye a la diferencia de las inercias mecánicas que presentan la máquina bajo prueba y la máquina estándar, independientemente de la inercia mecánica del rotor; la constante de tiempo de la armadura es igual entre la máquina estándar y la máquina bajo prueba.

Se deja establecido un procedimiento para la obtención de los parámetros dinámicos del generador sincrónico me-

dante un análisis matemático sencillo que arroje resultados confiables.

NOTA

Para realizar este trabajo los autores contaron con el apoyo del Centro de Estudios de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como trabajo dirigido adjunto al proyecto "Análisis del comportamiento dinámico de los sistemas de potencia. Aplicación caso interconexión de Colombia con países vecinos".

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Estudios de Energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialmente a los profesores J. Barona y A. Marín.

BIBLIOGRAFÍA

- Kimbarck, E.W. (1968). *Power System Stability: Synchronous Machines*, cap. 12. Nueva York: Dover Publications, Inc.
- Machowski, J. (1998). *Power System Dynamics and Stability*, caps. 3-4, J. Peters, Ed. Baffins Lane: John Wiley & Sons.
- Recommendations for rotating electrical machinery (excluding machines for traction vehicles). Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from test.* (1967). IEC 34-4.
- Anderson, P.M. & Fouad, A.A. (1977). *Power System Control and Stability*, cap. 4. Ed. Iowa: The Iowa State University Press.
- Saadat, H. (1999). *Power Systems Analysis*, cap. 8. McGraw Hill.
- Grainger, J.J. & Stevenson, W.D. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*, cap. 3. McGraw Hill.