

Determinación de parametros del generador síncrono usando pruebas de simulación de rechazo de carga

Yosniel Agüero*, José Reyes†, Aylen Velazquez‡, Gary Sosa§, Luis Viera¶

Universidad de Guadalajara, CUCEI

Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

Guadalajara, Jalisco, México

*yosniel.aguero9368, †jose.reyes0963, ‡aylen.velazquez7287, §gary.sosa9369, ¶luis.viera7283@alumnos.udg.mx

Abstract—En este trabajo se muestra el procedimiento para obtener los parámetros estándar de un generador síncrono de polos salientes mediante simulaciones de pruebas de rechazo de carga en MATLAB/Simulink. La metodología se fundamenta en las normas IEEE 115 e IEEE 1110, y permite identificar parámetros fundamentales como las reactancias sincrónicas, transitorias y subtransitorias en los ejes directo (d) y en cuadratura (q), así como las constantes de tiempo asociadas en condiciones de circuito abierto y de cortocircuito. Para ello, se implementaron tres pruebas de rechazo de carga: una en el eje directo, una en el eje en cuadratura y una en un eje arbitrario, ajustando las condiciones operativas del generador de manera que la corriente de armadura se alinee con el eje de interés. Durante cada prueba, se registraron las respuestas transitorias de tensión, corriente y excitación, a partir de las cuales se calcularon los valores de las reactancias y las constantes de tiempo características. El estudio confirma que el análisis de los ejes d y q proporciona un marco completo para describir el comportamiento dinámico del generador, permitiendo representar de manera precisa la interacción entre el flujo del rotor y las corrientes de armadura bajo diferentes condiciones de operación.

I. INTRODUCCIÓN

El generador síncrono es una de las principales máquinas utilizadas en los sistemas eléctricos de potencia para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. Su comportamiento dinámico juega un papel fundamental en la estabilidad del sistema, especialmente durante perturbaciones, variaciones de carga o fallas. Por esta razón, el conocimiento detallado de sus parámetros eléctricos es esencial para el modelado, simulación y análisis del sistema en condiciones transitorias.

Este trabajo describe el procedimiento para obtener los parámetros estándar del generador síncrono de polos salientes. Este tipo de máquina, una de las dos categorías principales de generadores síncronos, es idónea para centrales hidroeléctricas, donde las turbinas suelen operar a bajas velocidades de rotación. Su diseño con un rotor de polos salientes permite una generación eficiente de flujo magnético incluso a regímenes tan bajos como 50 a 300 rpm.

Los parámetros fundamentales del generador síncrono son: r_s , r_{fd} , r_{kd} , r_{kq1} , r_{kq2} , x_{Ls} , x_{1fd} , x_{1kd} , x_{1kq1} , x_{1kq2} , x_{md} y

x_{mq} . Estos se determinan a partir de ensayos experimentales o mediante procedimientos de identificación basados en normas, los cuales permiten obtener un modelo representativo del comportamiento electromagnético de la máquina.

Los parámetros estándar del generador síncrono son las reactancias sincrónicas, las reactancias sincrónicas transitorias, las reactancias sincrónicas subtransitorias, las constantes de tiempo transitorias y subtransitorias en circuito abierto y las constantes de tiempo transitorias y subtransitorias en cortocircuito, es decir: x_d , x_q , x'_d , x'_q , x''_d , x''_q , T'_{do} , T'_{qo} , T''_{do} , T''_{qo} , T'_d , T'_q , T''_d , T''_q .

Estos valores constituyen la base para la elaboración de modelos dinámicos precisos que permiten analizar la respuesta de la máquina bajo diferentes condiciones de operación y diseñar estrategias de control y protección más eficientes.

Existen principalmente 2 pruebas para la determinación de parámetros de un generador síncrono, los cuales han obtenido importancia debido al bajo nivel de riesgo y a su facilidad, los cuales son el método de respuesta en frecuencia y el método de rechazo de carga.

El método de rechazo de carga consiste en realizar pruebas de rechazo de carga en dos puntos operativos, donde las componentes de corriente sólo existan en el eje de interés.

En este trabajo se implementan las pruebas de rechazo de carga en el eje directo, en el eje en cuadratura y en un eje arbitrario, para la obtención de los parámetros estándar del generador síncrono de polos salientes, utilizando como base las normas IEEE 115 [1] y IEEE 1110 [2], y el procedimiento propuesto por Pequenna et al. [4], [5] a través de simulaciones en el software Matlab-Simulink.

II. PRUEBAS DE RECHAZO DE CARGA PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE GENERADORES SÍNCRONOS

Las pruebas de rechazo de carga constituyen una metodología estandarizada según las normas IEEE 115 para la determinación experimental de los parámetros operativos de generadores síncronos. Estas pruebas se realizan mediante la desconexión brusca del generador del sistema de potencia,

manteniendo constante la tensión de campo y registrando la respuesta transitoria de las variables eléctricas.

A. Prueba de rechazo de carga en el eje directo $-d-$

La prueba de rechazo de carga en el eje $-d-$ se ejecuta con el generador entregando potencia activa nula y potencia reactiva máxima, condiciones bajo las cuales la corriente de armadura se alinea exclusivamente con el eje directo. Durante el rechazo de carga, se registra el decaimiento transitorio de la tensión terminal, cuyo análisis permite determinar las reactancias síncrona, transitoria y subtransitoria del eje directo (x_d, x'_d, x''_d), así como las constantes de tiempo en circuito abierto (T'_{do}, T''_{do}).

B. Prueba de rechazo de carga en el eje en cuadratura $-q-$

Para esta prueba, se ajusta la operación del generador de modo que el ángulo de potencia coincida con el ángulo del factor de potencia, logrando que la corriente de armadura posea únicamente componente en cuadratura. El análisis del transitorio de tensión resultante del rechazo de carga permite calcular la reactancia síncrona y subtransitoria del eje q (x_q, x''_q).

C. Prueba de rechazo de carga en el eje arbitrario

Esta prueba representa la metodología más comprensiva, ya que se realiza con el generador operando en condiciones de carga arbitrarias, con componentes de corriente tanto en el eje directo como en cuadratura. El procesamiento de la respuesta transitoria, particularmente de la componente en cuadratura de la tensión y corriente, permite determinar el conjunto completo de parámetros del eje q ($x_q, x'_q, x''_q, T'_{qo}, T''_{qo}$).

III. SIMULACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para determinar los parámetros del generador se utilizó como base el esquema mostrado en la Fig. 1

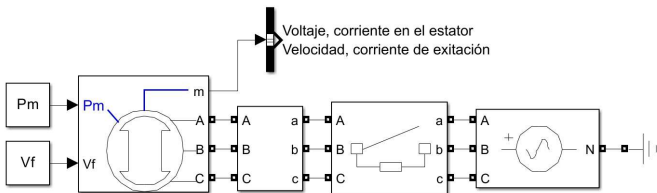


Fig. 1: Modelo base implementado en Simulink.

A. Prueba de rechazo de carga en el eje $-d-$

Para esta prueba se verifica antes del rechazo de carga que $P_0 = 0$ pu, $Q_0 = 0.1239$ pu, $V_{t0} = 1$ pu, $i_{t0} = 0.1239$ pu y $v_f = 0.87$ pu.

Para el rechazo de carga en $t = 25$ s, se obtiene el comportamiento para la tensión en los terminales de generador (v_t) mostrados en la Fig. 2.

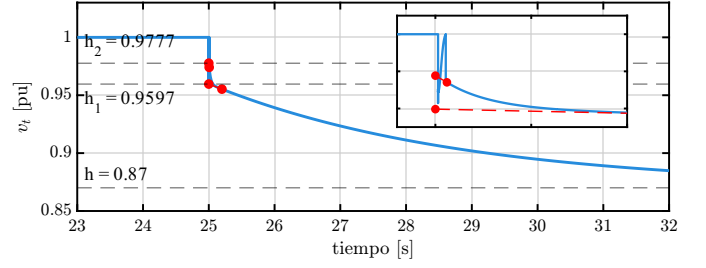


Fig. 2: Voltaje en terminales de la máquina durante el rechazo de carga.

Para calcular los valores de reactancias se obtiene las intersecciones en las tendencias del voltaje terminal con el eje del voltaje terminal en el momento que ocurre el rechazo de carga como muestra la Fig. 2. Utilizando estos valores se calculan las reactancias como se muestra a continuación, donde $A = 1 - h_2$, $B = 1 - h_1$ y $C = 1 - h$:

$$x_d = \frac{C}{i_{t0}} = \frac{1 - 0.87}{0.1239} = 1.0492 \text{ pu}$$

$$x'_d = \frac{B}{i_{t0}} = \frac{1 - 0.95965}{0.1239} = 0.3257 \text{ pu}$$

$$x''_d = \frac{A}{i_{t0}} = \frac{1 - 0.97770}{0.1239} = 0.18 \text{ pu}$$

Para determinar las constantes de tiempo de circuito abierto se utiliza la curva de corriente de campo obtenida durante el rechazo de carga mostrado en la Fig. 3, donde T'_{do} le pertenece a h_2 y a T''_{do} le pertenece a h_1 , donde se obtiene que $T'_{do} = 3.8955$ s y $T''_{do} = 0.0245$ s, que es el instante donde las constantes decrecen a $1/e \approx 0.368$ de su valor inicial.[1], [2]

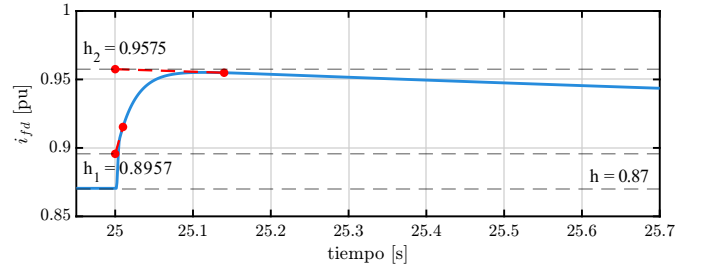


Fig. 3: Corriente de excitación durante el rechazo de carga.

B. Prueba de rechazo de carga en el eje $-q-$

Para esta prueba se verifica antes del rechazo de carga que $P_0 = 0.6249$ pu, $Q_0 = 0.3054$ pu (carga capacitiva), $V_{t0} = 1$ pu, $i_{t0} = i_{q0} = 0.6665$ pu, $v_f = 0.87$ pu, $\delta_0 = \varphi_0 = 26.05^\circ$.

Durante esta prueba se obtiene el comportamiento para ω_r y V_t mostrados en las Fig. 4 respectivamente.

Para determinar los parámetros de x'_q y x''_q se procede como se muestra a continuación, donde $A = 1$, $B = h_1 = 0.9666$ pu y $C = h_2 = 0.9065$ pu.

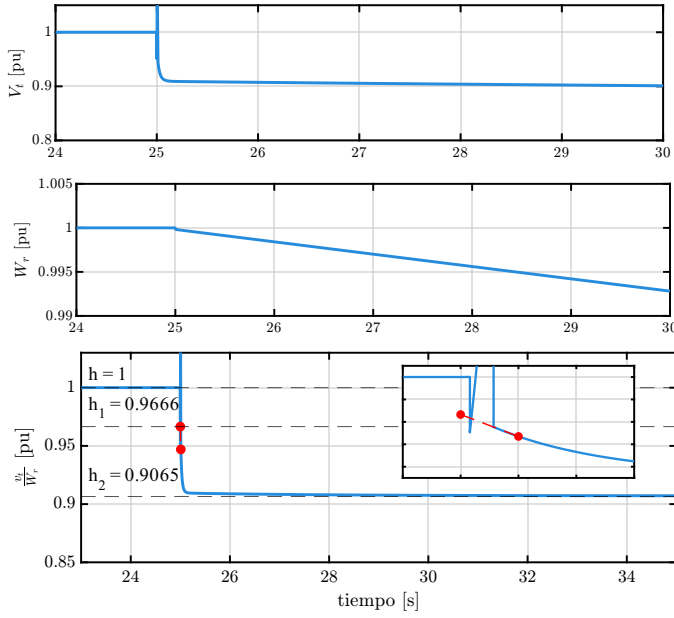


Fig. 4: Comportamiento de V_t y ω_r durante la prueba de rechazo de carga en el eje $-q-$.

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{i_{q0}} = \frac{\sqrt{1^2 - 0.9065^2}}{0.6665} = 0.6334 \text{ pu}$$

$$x_q'' = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{A^2 - B^2}}{i_{q0}} = \dots$$

$$\dots = \frac{\sqrt{1^2 - 0.9065^2} - \sqrt{1^2 - 0.9666^2}}{0.6665} = 0.2489 \text{ pu}$$

C. Prueba de rechazo de carga en el eje arbitrario

Las cantidades eléctricas en el instante antes que se realiza el rechazo de carga son: $P_0 = 0.8437 \text{ pu}$, $Q_0 = 0.5222 \text{ pu}$, $V_t = 1.0003 \text{ pu}$, $i_{t0} = 0.5729 \text{ pu}$, $v_f = 1.7688 \text{ pu}$, $\delta_0 = 20.8946$. Usando las expresiones dadas en [5], en los datos de las Fig. 5, los parámetros x_q y x_q'' se pueden calcular de la siguiente manera:

$$x_q = \frac{(V_t \sin(\delta))_0}{i_{q0}} = \frac{0.3566}{0.5729} = 0.6224 \quad (1)$$

$$x_q'' = x_q \frac{h}{i_{q0}} = 0.6224 \times \frac{0.2425}{0.5729} = 0.1991 \quad (2)$$

La constante de tiempo T_{q0}'' se obtiene de la curva de voltaje mostrada en la Fig. 5, que es el instante donde se cumple que $v_q = V_\infty + 0.368(v_q(t_0) - V_\infty)$, donde $V_\infty = 0$ y $v_q(t_0) = h$, donde se obtiene $T_{q0}'' = 0.0333$.

D. Resultados generales

En la Tabla I se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de rechazo de carga en el eje $-d-$, eje $-q-$ y eje

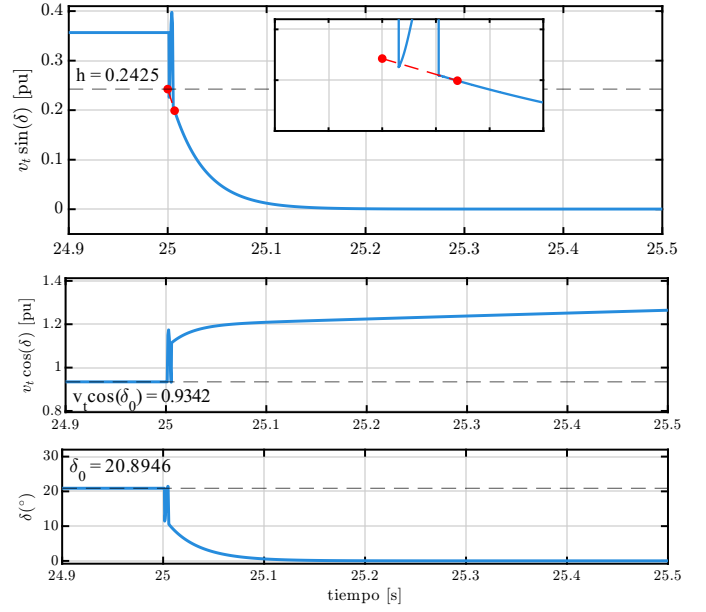


Fig. 5: Comportamiento de V_t y δ_0 durante la prueba de rechazo de carga en el eje arbitrario.

arbitrario; comparados con los valores de diseño del generador dados por [4].

Los valores de T_d' , T_d'' y T_q'' se obtienen usando las siguientes expresiones:

$$T_d' = x_d' \frac{T_{d0}'}{x_d'} \quad (3)$$

$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{x_d'' T_{d0}'}{x_d' T_d'} \quad (4)$$

$$T_q'' = \frac{x_q''}{x_q} T_{d0}'' \quad (5)$$

TABLE I: Parámetros en p.u.

Parámetro	Rechazo de carga en el eje directo	Rechazo de carga en el eje directo	Rechazo de carga en eje arbitrario	Calculados	Valores de diseño
T_{d0}'	3.8955	—	—	—	3.7724
T_{d0}''	0.0245	—	—	—	0.0238
T_{q0}''	—	—	0.0333	—	0.0334
x_d	1.0492	—	—	—	1.0495
x_q	—	0.6334	0.6224	—	0.6313
x_d'	0.3257	—	—	—	0.3320
x_d''	0.18	—	—	—	0.1963
x_q'	—	0.2489	0.1991	—	0.2496
T_d'	—	—	—	1.2093	1.1939
T_d''	—	—	—	0.0135	0.0140
T_q''	—	—	—	0.0131	0.0132

Como se observa en la Tabla I, al comparar los valores obtenidos mediante las simulaciones realizadas en Matlab/Simulink, se valida la precisión de las pruebas de rechazo de carga, y se verifican las especificaciones del fabricante, ya que concuerdan con los valores de diseño.

IV. CONCLUSIONES

Los parámetros obtenidos tienen un impacto directo en el diseño, operación y estabilidad de la máquina síncrona, su importancia radica en que permiten construir modelos matemáticos confiables que simulan el comportamiento real del generador bajo perturbaciones. Además, parámetros como las constantes de tiempo son esenciales para el ajuste de sistemas de excitación, controles y protecciones, garantizando su funcionamiento adecuado.

Los parámetros obtenidos en las pruebas permiten realizar análisis de estabilidad confiables, integración segura de los generadores a la red, realizar análisis de estabilidad confiables, etc.

En este trabajo se implementaron y analizaron 3 ensayos de rechazo de carga: en el eje directo, en el eje en cuadratura y en un eje arbitrario; se lograron obtener valores de reactivancias síncronas, transitorias y subtransitorias, así como las constantes de tiempo transitorias y subtransitorias en circuito abierto. Se concluye que los parámetros obtenidos concuerdan con los valores de diseño del generador, validando modelos dinámicos como una herramienta indispensable en el análisis de estabilidad transitoria y en el diseño de sistemas de control y protección en máquinas síncronas.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 115, *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines Part I - Acceptance and Performance Testing Part II - Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis*, IEEE, 1995.
- [2] IEEE Std 1110, *Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*, IEEE, 2002.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, USA, 1994.
- [4] J.C. Pequenna and E. Ruppert, *Sobre a Determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos para Estudos de Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos*, Master Thesis, FEEC/UNICAMP, Brazil, 2009.
- [5] J. C. Pequenna Suni, E. Ruppert, and F. Fajoni, "A guide for Synchronous Generator Parameters Determination Using Dynamic Simulations Based on IEEE Standards," in *Proc. XIX Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, Italy, 2010.