

## **Modelado del Generador de Corriente Directa Incluyendo los Efectos de la Saturación Magnética y la Temperatura**

### ***Modeling of the Direct Current Generator Including the Magnetic Saturation and Temperature Effects***

Alfonso J. Mercado-Samur<sup>1</sup>  
Andrés J. Saavedra-Montes<sup>2</sup>  
Juan R. Camarillo-Peñaranda<sup>3</sup>

---

1 Departamento de Energía Eléctrica y Automática,  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia  
sede Medellín, Medellín-Colombia  
ajmercads@unal.edu.co

2 Departamento de Energía Eléctrica y Automática,  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia  
sede Medellín, Medellín-Colombia  
ajsaaved@unal.edu.co

3 Departamento de Energía Eléctrica y Automática,  
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia  
sede Medellín, Medellín-Colombia  
jrcamarillo@unal.edu.co

**Resumen**

En este artículo se propone la inclusión del efecto de la temperatura sobre la resistencia de campo al modelo del generador de corriente directa DC1A válido para estudios de estabilidad. Se parte del modelo lineal del generador, luego se incluye el efecto de la saturación magnética y por último el cambio en la resistencia de campo debido a la temperatura producida por la corriente de campo. La metodología aplicada para validar el modelo es la comparación de resultados experimentales y simulaciones de los modelos. La comparación visual de los resultados simulados con resultados experimentales muestra el acierto del modelo propuesto, puesto que presenta el menor error de los modelos comparados. El acierto del modelo propuesto se observa a través del índice Suma Normalizada de Errores Cuadráticos Modificada igual a 3.8979%.

**Palabras clave**

Generador de corriente directa; saturación magnética; resistencia de campo; efecto de la temperatura; modelo dinámico.

**Abstract**

In this paper the inclusion of temperature effect on the field resistance on the direct current generator model DC1A, which is valid to stability studies is proposed. First, the linear generator model is presented, after the effect of magnetic saturation and the change in the resistance value due to temperature produced by the field current are included. The comparison of experimental results and model simulations to validate the model is used. A direct current generator model which is a better representation of the generator is obtained. Visual comparison between simulations and experimental results shows the success of the proposed model, because it presents the lowest error of the compared models. The accuracy of the proposed model is observed via Modified Normalized Sum of Squared Errors index equal to 3.8979%.

**Keywords**

Direct current generator; magnetic saturation; field resistance; temperature effect; dynamic model.

## 1. INTRODUCCIÓN

El modelado de sistemas dinámicos es una de las herramientas más importantes con las que cuentan los ingenieros. Los modelos permiten analizar y predecir el comportamiento de los sistemas. Para realizar estudios de estabilidad y planeación del sistema de potencia es necesario tener modelos de los sistemas involucrados en la operación del mismo, como son el generador sincrónico, el sistema de excitación y el gobernador de velocidad. Dichos modelos deben representar de forma precisa los fenómenos que ocurren en el sistema. Uno de los dispositivos usados como sistema de excitación es el Generador de Corriente Directa (GCD).

El estándar IEEE 421.5 presentado por (IEEE, 2006) incluye los modelos estandarizados de sistema de excitación más usados en la industria. En dicho documento se presenta el modelo DC1A, el cual corresponde a un GCD que incluye la saturación magnética del núcleo del generador. Éste modelo incluye un valor fijo de la resistencia de campo ( $R_{ef}$ ), sin embargo esta resistencia cambia con la temperatura, la cual es correspondiente a la corriente de campo del generador. Utilizar un valor fijo de resistencia de campo en el análisis del GCD introduce errores que limitan la validez de los estudios eléctricos que se realicen con dicho modelo.

Calsan y De Almeida (2011) comparan los desempeños de cuatro modelos de sistema de excitación asociados a un generador sincrónico usado en generación distribuida con una carga aislada. A través de simulaciones se llega a la conclusión de que el sistema de excitación DC1A no es la mejor opción para usarse en dichos sistemas. Las simulaciones presentadas por Calsan y De Almeida (2011) utilizan el modelo DC1A incluyendo un valor fijo de  $R_{ef}$ . Si el modelo DC1A incluye el cambio en  $R_{ef}$  debido a la temperatura, los resultados reportados por Calsan y De Almeida (2011) serán diferentes, pueden mostrar una mejora del desempeño del sistema DC1A o confirmar que no es la mejor opción.

El objetivo del presente artículo es proponer y validar un modelo del GCD que tenga en cuenta el efecto de la temperatura en el devanado de campo a través del cambio del valor de  $R_{ef}$ . El modelo se obtiene partiendo de la aproximación lineal del generador, luego se agrega el efecto de la saturación magnética y por último se usa

una aproximación para adicionar el efecto del cambio de  $R_{ef}$  debido al cambio de la temperatura. El modelo se valida contrastando simulaciones con datos experimentales y calculando la Suma Normalizada de Errores Cuadráticos Modificada (SNECM) para comparar el desempeño del modelo propuesto en contraste con el modelo lineal y el modelo con saturación. Finalmente, se obtiene un modelo del GCD que es una mejor representación que el modelo DC1A, puesto que la SNECM obtenida es menor que las SNECM obtenidas con los modelos lineal y el modelo que incluye la saturación magnética.

## 2. METODOLOGÍA

En la presente sección se presenta la deducción del modelo del GCD. Se parte del modelo lineal del GDC, luego se incluye la saturación magnética y por último se adiciona el efecto del cambio en el valor de la resistencia de campo debido a la temperatura producida por la corriente de campo.

### 2.1 Modelo Lineal del GCD con Excitación Independiente

En la Fig. 1 se muestra el circuito equivalente del GCD con excitación independiente:

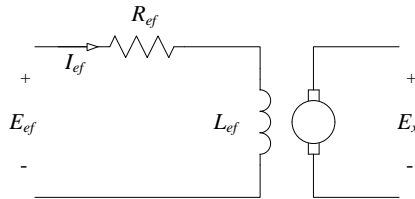


Fig. 1. Circuito equivalente del GCD con excitación independiente. Fuente: Autores

Del circuito mostrado en Fig. 1 se deduce (1):

$$E_{ef} = I_{ef} R_{ef} + \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Donde  $E_{ef}$  es la tensión de campo,  $I_{ef}$  es la corriente de campo y  $\phi$  el flujo magnético en el entrehierro, que a su vez está dado por (2), donde  $L_{ef}$  es la inductancia de campo del generador:

$$\phi = L_{ef} I_{ef} \tag{2}$$

La tensión inducida en el devanado de armadura,  $E_x$ , está dada por (3):

$$E_x = K_x \phi \tag{3}$$

Donde  $K_x$  es el producto de la velocidad angular y una constante que depende de las características constructivas del generador.

## 2.2 Modelo de la Saturación Magnética en el Modelo del GCD

En la Fig. 2 se muestra la curva de corriente de campo contra tensión en la armadura del generador, donde se observa el efecto de la saturación magnética en el núcleo de la máquina, pues para un mismo valor de corriente de campo hay valores diferentes de tensión de armadura correspondientes a la línea del entrehierro y a la curva de magnetización de la máquina. La diferencia se observa a partir de 0,4 A aproximadamente. Éste fenómeno se describe matemáticamente por (4), donde la corriente de campo tiene una porción lineal y una no lineal  $\Delta I_{ef}$  debida a la saturación magnética.

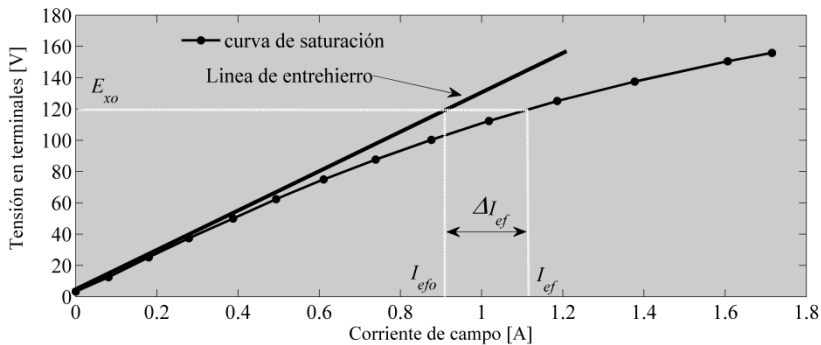


Fig. 2. Curva de saturación magnética típica de un GCD. Fuente: Autores

$$I_{ef} = E_x/R_g + \Delta I_{ef} \quad (4)$$

En (4),  $R_g$  es la pendiente de la línea del entrehierro. La porción de la corriente de campo debida a la saturación magnética depende de una función no lineal de la tensión inducida  $S_e(E_x)$  y se expresa como:

$$\Delta I_{ef} = E_x S_e(E_x) \quad (5)$$

### 2.3 Valores del Sistema en por Unidad

Para facilitar los análisis del sistema de potencia es necesario escalar las variables y parámetros de los modelos a un sistema que se ha denominado sistema por unidad (p.u.). Es posible seleccionar diferentes bases para definir el sistema p.u. Para el presente caso se utilizan las siguientes bases:  $E_{xbase} = E_{efbase}$ ,  $R_{gbase} = R_g$  y  $I_{efbase} = E_{xbase}/R_{gbase}$ . Donde,  $E_{efbase}$  es la tensión de campo para la cual el GDC operando en vacío alcanza el valor de tensión nominal en el devanado de armadura. Al cambiar los valores del sistema a p.u. e incluir el modelo de saturación magnética en (1) se obtiene el modelo presentado en (6):

$$\overline{E_{ef}} = K_E \overline{E_x} + \overline{E_x} S_E(\overline{E_x}) + T_E \frac{d\overline{E_x}}{dt} \quad (6)$$

Donde la barra superior indica que el valor está en p.u., además  $T_E = L_{fu}/R_{gb}$ ,  $K_E = R_{ef}/R_{gb}$  y  $S_E(\overline{E_x}) = \overline{S_e(\overline{E_x})}(R_{ef}/R_{gb})$ . La ecuación (6) expresa el comportamiento del GDC con saturación magnética (Kundur, 1994). La función  $S_E(\overline{E_x})$  se puede expresar como  $S_E(\overline{E_x}) = A_{E_x} e^{B_{E_x} \overline{E_x}}$ , según se recomienda en IEEE (1981).

### 2.4 Modelado del Cambio de la Resistencia del Devanado de Campo debido a la Temperatura

Se reescribe (6) para apreciar la influencia de la resistencia del devanado de campo en el comportamiento de la máquina. Esto se hace tomando como factor común la fracción  $R_{ef}/R_{gb}$ , y se presenta en (7):

$$\overline{E_{ef}} = \frac{R_{ef}}{R_{gb}} (\overline{E_x} + \overline{E_x} S_e(\overline{E_x})) + T_E \frac{d\overline{E_x}}{dt} \quad (7)$$

Para resolver (7), se aproxima  $S_e(\overline{E_x})$  como se presenta en (8):

$$S_e(\overline{E_x}) = (R_g/R_T) \overline{S_E}(\overline{E_x}) \quad (8)$$

Donde  $R_T$  es el valor medido de la resistencia de campo del generador. Ahora, se incluye una nueva función al sistema  $R_{ef}(\overline{I_{ef}})$ , la cual representa la variación de la resistencia de campo debida a la variación de la temperatura en el devanado de campo, la cual es consecuencia de la variación de la corriente de campo. Finalmente se reemplaza  $R_{ef}(\overline{I_{ef}})$  en (7), teniendo como resultado (9):

$$\overline{E_{ef}} = \frac{R_{ef}(\overline{I_{ef}})}{R_{gb}} (\overline{E_x} + \overline{E_x} S_e(\overline{E_x})) + T_E \frac{d\overline{E_x}}{dt} \quad (9)$$

La ecuación (9) incluye la saturación magnética y el cambio en la resistencia de campo debido al flujo de corriente en el devanado de campo. En la Fig. 3 se presenta (9) como un diagrama de bloques.

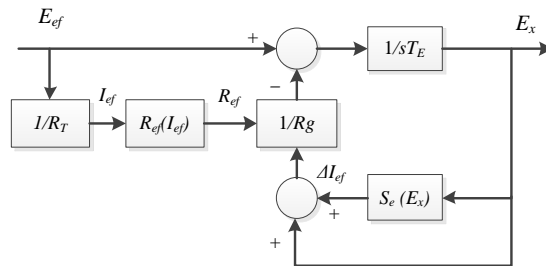


Fig. 3. Diagrama de bloques de un generador de corriente directa que incluye la saturación magnética y el cambio en la resistencia del devanado de campo debido al cambio de temperatura. Fuente: Autores

## 2.5 Estimación de los Parámetros del Modelo del Generador

A continuación se describen las pruebas y los procedimientos seguidos para calcular los parámetros del modelo del GCD presentado en la Fig. 3.

### 2.5.1 Función de saturación magnética

El valor de  $\overline{S_e(E_x)}$  se calcula tomando dos puntos de la curva de saturación: el primer punto corresponde a un valor de tensión en terminales cercano a la tensión nominal y el segundo punto con un valor de tensión en terminales que corresponde al 75% de la tensión nominal. Con estos valores se haya  $S_e(E_x)$  de acuerdo a (10). Para mayor detalle ver IEEE (1981):

$$S_e(E_x) = \frac{(A - B)}{B} \quad (10)$$

Donde B corresponde a  $I_{efo}$  y A corresponde a  $I_{ef}$  en la Fig. 2. Con los valores de corriente de campo correspondientes a los dos valores de voltaje den terminales seleccionados se calculan los valores  $\overline{S_e(E_x)}_1$  y  $\overline{S_e(E_x)}_2$ , y posteriormente se calculan los parámetros  $A_{E_x}$  y  $B_{E_x}$  de la función de saturación  $\overline{S_e(E_x)}$  que se muestran en (11):

$$\overline{S_e(E_x)} = A_{E_x} e^{B_{E_x} * E_x} \quad (11)$$

Esto se logra con el sistema de ecuaciones representado en (12) y (13):

$$\overline{S_e(E_x)}_1 = A_{E_x} e^{B_{E_x} E_{x100\%}} \quad (12)$$

$$\overline{S_e(E_x)}_2 = A_{E_x} e^{B_{E_x} E_{x75\%}} \quad (13)$$

Resolviendo los parámetros del sistema se obtiene la solución presentada en (14) y (15):

$$B_{E_x} = \ln(\overline{S_e(E_x)}_1 / \overline{S_e(E_x)}_2) / (E_{x100\%} - E_{x75\%}) \quad (14)$$

$$A_{E_x} = (R_g * \overline{S_e(E_x)}_1) / (R_T * e^{B_{E_x} E_{x100\%}}) \quad (15)$$



**2.5.2 Medición de la resistencia e inductancia del devanado de campo**

La resistencia de campo se obtiene por medida directa en el devanado de campo y la inductancia de campo se obtiene a través de un experimento. Primero se mide la resistencia del devanado de campo de la máquina a temperatura ambiente,  $R_T$ . Para esta medida se utiliza un puente de Wheatstone. Al momento de realizar la medida, la temperatura ambiente fue de 25°C, por lo cual no fue necesario corregir el valor medido, según recomienda IEEE (1984).

Para calcular la inductancia de campo se aplica un escalón al circuito de campo del GCD con la máquina en reposo, al cual se conecta una resistencia externa 100 veces más pequeña que la resistencia del devanado de campo para no afectar significativamente la medición de la constante de tiempo del devanado de campo, ver Fig. 4a. Se registra la respuesta temporal de la tensión en la resistencia externa usando un osciloscopio y con el valor de resistencia total se calcula la evolución de la corriente de campo del GCD en el tiempo. Desde dicha respuesta transitoria se calcula el tiempo de estabilización  $\tau$ , el cual se mide cuando la señal alcanza el 63,2% de su valor de estado estable, como se muestra en la Fig. 4b. Posteriormente se calcula la inductancia de campo con los valores de  $R_{ef}$  y  $\tau$  usando (16):

$$\tau = L_{ef} / R_{tot} \tag{16}$$

Donde  $R_{tot}$  es la suma de la resistencia del devanado de campo y la resistencia externa  $R$ . De (16) se calcula  $L_{ef}$ .

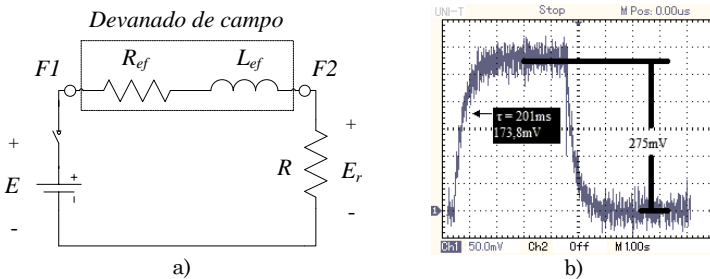


Fig. 4. a) Montaje experimental para obtener inductancia de campo y b) Respuesta transitoria del circuito montado vista por el osciloscopio en  $R$ . Fuente: Autores

### **2.5.3 Función que relaciona la resistencia de campo con la corriente de campo**

Para la función que relaciona la corriente de campo y la resistencia de campo, se realiza la prueba de saturación al generador esperando entre registros un tiempo de treinta minutos para que la temperatura se estabilice y así encontrar un valor de resistencia para cada valor de la corriente de campo. La función que representa la relación entre la corriente y la resistencia de campo para una máquina particular está dada por (17):

$$R_{ef} = (9.5819 * I_{ef}) + 78 \quad (17)$$

## **2.6 Modelo Parametrizado**

Se siguieron los procedimientos descritos anteriormente para hallar los parámetros del modelo, dando como resultado los valores que se muestran en la Tabla 1.  $R_g$  se halla calculando la pendiente de la línea del entrehierro en la Fig. 2.  $A_{Ex1}$  y  $A_{Ex2}$  corresponden a los valores para el modelo con saturación y para el modelo propuesto, respectivamente.

Tabla 1. Parámetros del modelo del GDC presentado en la Fig. 4

Parámetro	Valor
$R_T$	78 $\Omega$
$L_{ef}$	15,88 H
$R_g$	119,327 $\Omega$
$A_{Ex1}$	1,32E-01
$A_{Ex2}$	1,73E-01
$B_{Ex}$	67,308
$E_{xbase}$	93 V

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A continuación se presenta la comparación de la respuesta real de un generador de corriente directa con simulaciones realizadas con el modelo lineal del GCD, el modelo que incluye la saturación, y el modelo propuesto en este trabajo. Esta comparación sirve para corroborar el grado de representación de cada modelo. Para evaluar el grado de representación de cada modelo cualitativamente,

se calcula el índice de error SNECM (18), propuesto por Camarillo-Peñaranda y Saavedra-Montes (2012):

$$SNECM[\%] = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_x - V_{mx})^2}{\sum_{i=1}^n E_x^2}} \quad (18)$$

Donde  $V_{mx}$  es el voltaje en terminales del generador entregado por el modelo  $x$ . Para obtener los datos experimentales se usó un GCD de 5 kW, 125 V de tensión nominal de armadura y 125 V de tensión nominal de campo, una corriente de campo nominal de 3 A y una velocidad mecánica nominal de 1750 rpm. El GCD es impulsado por un motor sincrónico de 5kVA y 220V de tensión nominal. En la Fig. 5 se presenta la comparación de las respuestas de los modelos y la respuesta del generador real.

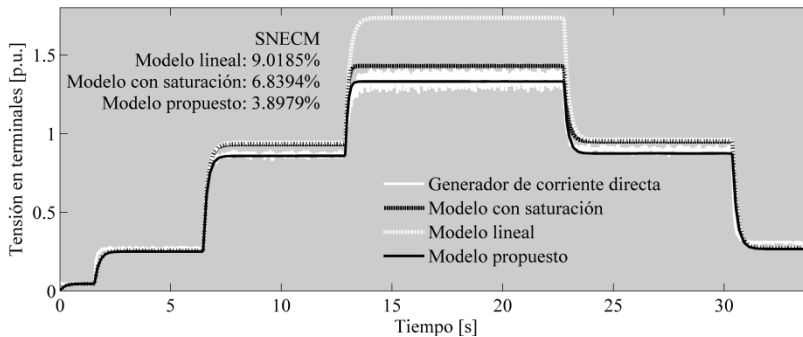


Fig. 5: Comparación de las respuestas del modelo lineal, el modelo incluyendo la saturación magnética, el modelo propuesto y la respuesta real del generador.

Fuente: Autores

Se aplicaron tres escalones ascendentes y dos descendentes, al devanado de campo del GDC. El primer escalón se aplicó en  $t \cong 2s$ , el segundo en  $t \cong 7$  y el tercero en  $t \cong 13s$ . En el primer escalón el valor de  $E_x$  se encuentra en la zona lineal. En esta zona los tres modelos representan exactamente al generador. El segundo escalón lleva el valor de  $E_x$  al codo de saturación y esta zona aunque el modelo con saturación muestra una mejor representación que el modelo lineal, ambos modelos se alejan de la respuesta real, mien-

tras que el modelo propuesto presenta una respuesta cercana a la respuesta real. En el tercer escalón,  $E_x$  se encuentra en la zona de saturación magnética. En esta zona el error introducido por el modelo lineal para presentar al generador es evidente. El modelo con saturación es una mejor representación del generador, sin embargo no es una representación exacta. Dado que el modelo propuesto mejora la representación del modelo con saturación incluyendo el cambio de la resistencia de campo debido al cambio de la corriente de campo, el modelo propuesto es una mejor representación del GCD. Como se observa en la Fig. 5 en la medida que la máquina es llevada a zona de saturación, aumentando la corriente de campo, el modelo propuesto es una mejor representación del GCD que el modelo lineal DC1A o que el modelo DC1A incluyendo la saturación magnética.

#### **4. CONCLUSIONES**

En este artículo se propuso un modelo del generador de corriente directa, el cual incluye la saturación magnética y el cambio de la resistencia de campo debido a la temperatura. La comparación del voltaje en terminales correspondiente a tres modelos del generador de corriente directa y la respuesta experimental, corrobora que el modelo propuesto es una mejor representación del generador. El modelo propuesto presenta la menor SNECM.

#### **5. AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue soportado por la beca doctoral 095-2005 de COLCIENCIAS y por la Universidad Nacional de Colombia a través de los proyectos IDENT-EXGEN y SMART- ALEN.

#### **6. REFERENCIAS**

Calsan, M. & De Almeida, M. C. (2011). Dynamic performance analysis of Synchronous Generators Excitation Systems in Distributed genera-

- tion power plants. In Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics, (pp. 1-8).
- Camarillo-Peñaranda, J. R. & Saavedra-Montes, A. J. (2012). Dynamic model validation via error indexes. In 2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems, (pp. 1–6).
- IEEE, (1981). Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-100(2), 494–509.
- IEEE, (1984). IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines. IEEE Std 113-1985 (Revision of IEEE Std 113-1973). 1–38.
- IEEE, (2006). IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992). 1–85.
- Kundur, P. (1994). Power system stability and control. McGraw-Hill.