

Análisis de la Operación Estable de los Generadores de Reluctancia Autoexcitados, bajo Condiciones Variables en la Carga, la Capacidad de Excitación y la Velocidad

Fernando Martínez García¹ y Sonia Navarro Gómez²

¹Departamento de Energía Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones
Escuela Universitaria Politécnica de Almadén. Universidad de Castilla la Mancha
Plaza de Manuel Meca 1. Almadén (Ciudad Real). Spain
fernando.mgarcia@uclm.es

²Departamento de Electrónica
Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá
Carretera Madrid – Barcelona Km 33,600. Alcalá de Henares (Madrid). Spain
sonia.nvrr@gmail.com

Resumen. Las máquinas síncronas de reluctancia pueden funcionar como generadores autoexcitados, de forma aislada, cuando su rotor, impulsado por un motor de arrastre, gira a una velocidad fijada y se conectan entre los bornes de salida condensadores de la capacidad adecuada para que proporcionen la potencia reactiva necesaria para la autoexcitación. Obtenidos mediante ensayos los parámetros característicos del generador trifásico, se presenta un modelo que determina los límites de operación estable en el funcionamiento estacionario, cuando varían la capacidad de excitación, la velocidad de giro o la carga conectada. La validez del análisis se ha verificado mediante la comparación de algunos valores teóricos con sus correspondientes medidas experimentales.

Palabras clave

Self-excited Reluctance Generator, Reluctance Generator, Synchronous Generator.

1. Introducción

Los generadores síncronos de reluctancia, autoexcitados, presentan casi todas las ventajas de los generadores de inducción: ausencia de escobillas, tamaño reducido, ausencia de corriente continua necesaria para la autoexcitación, reducidos costes de fabricación y mantenimiento y autoprotección frente a sobrecargas y cortocircuitos. Además la frecuencia de la tensión de salida no depende de la carga ni de la capacidad de los condensadores conectados y se consigue el valor deseado regulando la velocidad del motor de arrastre.

2. El fenómeno de la autoexcitación

La transformación de la energía en un generador eléctrico se expresa, en función de las ecuaciones de Kirchoff, aplicando el principio de conservación. Las condiciones para que exista transformación unidireccional de la energía en los generadores eléctricos con un único

devanado se resumen en las dos condiciones siguientes: el coeficiente de autoinducción debe ser una función periódica del ángulo de giro del rotor, de tal forma que el valor medio del Par Interno, en un período, sea distinto de cero, y el rotor debe ser dentado [5].

Cuando existe un magnetismo remanente en la máquina y se crean las condiciones necesarias para la autoexcitación, mediante la conexión de condensadores, se genera una corriente de frecuencia $f = \Omega Z_r / 4\pi$, (Ω = velocidad de giro y Z_r = número de dientes del rotor). El proceso de autoexcitación en el generador síncrono de reluctancia es similar al del generador de inducción. El punto de operación, en ambos casos, viene definido por la carga, la curva de magnetización de la máquina, la capacidad de los condensadores conectados y la velocidad del rotor.

3. El modelo matemático en estado estacionario

Mediante la aplicación de la Teoría de las Dos Reacciones de A. Blondel y de la Transformación de A. H. Park, se obtienen las ecuaciones vectoriales aplicables al movimiento estacionario de los generadores síncronos trifásicos de reluctancia variable:

$$\bar{V} + R_i \bar{I}_i + jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q = 0 \quad (1)$$

$$\bar{I}_i = \bar{I}_c + \bar{I}_l \quad (2)$$

$$\bar{V} = X_c \bar{I}_c = Z \bar{I}_l \quad (3)$$

El diagrama vectorial, correspondiente al caso de carga inductiva, se representa en la figura 1. La expresión (1) constituye un caso particular de la ecuación del funcionamiento estacionario de los alternadores convencionales de polos salientes, al hacer $E_0 = 0$.

I_d e I_q representan las componentes de la corriente en el devanado inducido, (I_i). I_c es la corriente de excitación absorbida por los condensadores. ($X_c = 1/2\pi fC$). I_l es la corriente absorbida por la carga. ($Z = R + jX$, por fase). V es la tensión de salida, por fase.

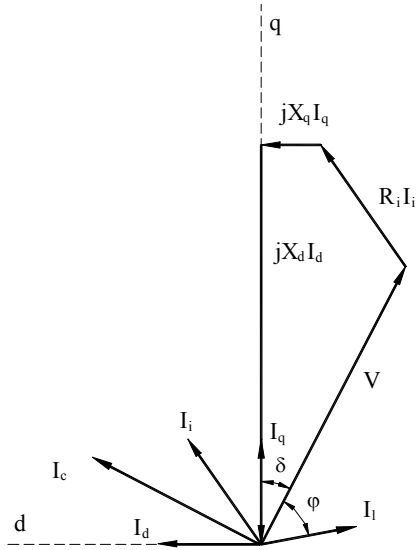


Figura 1. Diagrama fasorial del generador trifásico con carga inductiva.

El generador debe funcionar en la región de saturación para conseguir la autoexcitación. Se supondrá que la saturación en el eje q es despreciable, por lo que X_q es constante. Por este motivo X_d saturada es una incógnita.

Los parámetros R_i , X_q y X_d no saturada se obtendrán mediante ensayos [5]. Conocidos Ω , C , y Z , pueden obtenerse el ángulo de potencia δ y el valor de X_d .

4. Comportamiento del generador bajo condiciones variables

En el funcionamiento a velocidad variable se supondrá que las reactancias varían linealmente con la frecuencia.

Así, si $a = f/f_{base} = \Omega/\Omega_{base}$, se sustituyen X , X_d , X_q y X_c por aX , aX_d , aX_q y $(1/a)X_c = bX_c$.

Del diagrama fasorial de la figura 1 se obtienen las ecuaciones que proporcionan δ y X_d :

$$tg \delta = \frac{X_c (R X_q - R_i X) + R_i (R^2 + a^2 X^2)}{X_c b [R R_i + a^2 X X_q + (R^2 + a^2 X^2)] - a X_q (R^2 + a^2 X^2)} \quad (4)$$

$$a X_d = \frac{tg \delta (a^2 R_i X^2 + R^2 R_i - R_i X X_c) + b R^2 X_c + a X^2 X_c + b R R_i X_c}{R^2 + a^2 X^2 - X X_c - b R X_c tg \delta} \quad (5)$$

La expresión de la tensión de salida resulta:

$$V = I_d \left[\frac{X_c / \sqrt{(R^2 + a^2 X^2)}}{a \sqrt{(R^2 + a^2 X^2)} \cos \delta - X_c \sin(\phi + \delta)} \right] \quad (6)$$

Para garantizar la autoexcitación y el funcionamiento estable, deben satisfacerse las condiciones [3]:

$$0 < \delta < \delta_{po} \quad (7)$$

$$0 < X_d < X_0 \quad (8)$$

δ_{po} = ángulo de potencia en el par de desenganche, (pull out), y X_0 = valor de X_d no saturada.

De la curva de magnetización, según el eje d, de la máquina, se obtiene el valor de $I_d = I_d(X_d)$, que se utilizará para obtener el valor de V .

Una vez que se ha obtenido V pueden obtenerse las demás variables: I_i , I_c , I_l , Pérdidas eléctricas, Potencia de salida, Rendimiento etc...

Para verificar la validez del modelo, se han realizado ensayos experimentales, bajo diferentes condiciones, a una máquina universal para aplicaciones didácticas, configurada como generador de reluctancia trifásico [5].

Los datos de la máquina son:

$V_b = 220$ V; $I_b = 2,31$ A; $n_b = 1500$ rpm; $f_b = 50$ Hz; $Z_b = V_b/I_b = 95,2$ ohm, (1 pu); $R_i = 10,5$ ohm, (0,11 pu); $X_q = 80,5$ ohm, (0,85 pu); $X_0 = 280$ ohm, (2,94 pu).

La curva de magnetización de la máquina, según el eje d, se representa en la figura 2.

Para simplificar el proceso de cálculo se ha aproximado mediante una expresión polinómica de sexto grado.

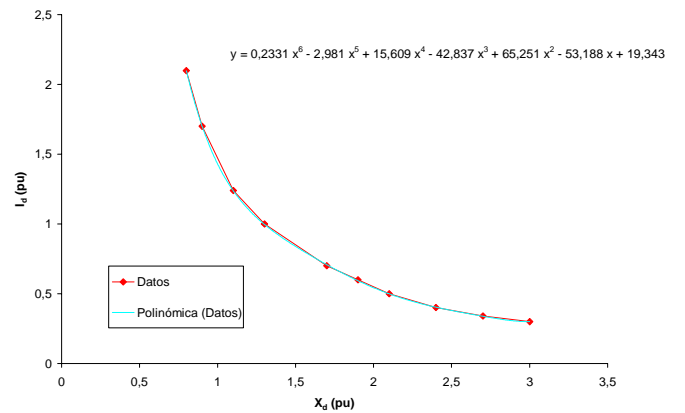


Figura 2. Curva de magnetización, según el eje d, de la máquina bajo test

4.1 Variación de la capacidad de excitación

En la figura 3 se representan las curvas: $X_d = X_d(C)$ y $\delta = \delta(C)$, para $a = 1$, ($n = 1500$ rpm), y diferentes valores de Z , obtenidas a partir de (4) y (5), para la máquina bajo test. ($z = |Z|$, expresado en valores p.u.; $k = \cos \varphi$).

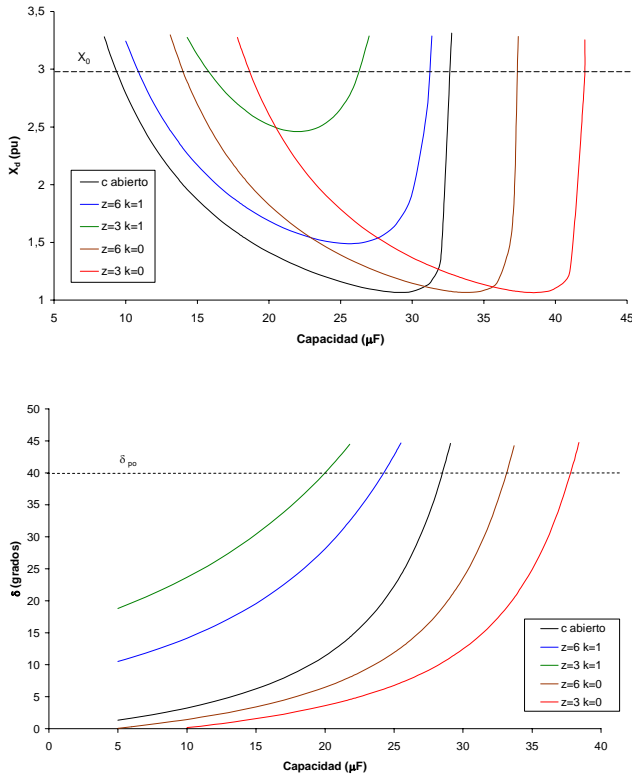


Figura 3. $X_d = X_d(C)$ y $\delta = \delta(C)$, para Ω , z y k constantes

El rango de operación en el que la autoexcitación es posible, viene determinado por la condición $X_d < X_0$. Este rango se estrecha cuando el valor de la impedancia de carga disminuye. La condición $X_d = X_0$ determina dos valores de C , (C_1 y C_2), que dependen de los valores fijados de Ω y Z . Además, la curva $X_d(C)$ presenta un mínimo, X_{dm} , para $C = C_m$. Se verifica $C_1 < C_m < C_2$.

La curva $\delta(C)$ es creciente. El valor de δ_{po} , fijados C , Ω y Z , se obtiene a partir de [3]:

$$\delta_{po} = \frac{\varphi_d + \varphi_q}{2} - 45^\circ \quad (9)$$

siendo $\varphi_d = \arctg(X_d/R_i)$ y $\varphi_q = \arctg(X_q/R_i)$.

Existe un valor $\delta_{po \min}$ para cada una de las curvas $X_d(C)$. Se obtiene haciendo $\varphi_{d \min} = \arctg(X_{dm}/R_i)$. Esto significa que, fijados Ω y Z , el rango de funcionamiento estable del generador queda restringido a $C_1 < C < C_m$. En la Tabla 1 se indica el rango de valores de C para el funcionamiento estable del generador en las condiciones de carga representadas en la figura 3.

Existe un valor de Ω a partir del cual las raíces C_1 y C_2 son imaginarias. Se trata de la velocidad de corte a partir de la cual la autoexcitación no es posible [5].

TABLA 1 – RANGO DE VALORES DE CAPACIDAD PARA LA AUTOEXCITACIÓN

Carga (pu)	δ_{po} mín (grados)	Capacidad (μF)
Circuito abierto	38,3	9,5 – 28,3
$z = 6$ y $k = 1$	39,1	11 – 24,1
$z = 3$ y $k = 1$	39,9	16 – 20,2
$z = 6$ y $k = 0$	38,3	14,1 – 32,9
$z = 3$ y $k = 0$	38,3	18,8 – 37,5

En la figura 4 se representa la curva $V = V(C)$, obtenida a partir de (6).

En el rango $C_1 < C < C_m$, V aumenta cuando C aumenta, alcanzando su máximo valor para $C = C_m$. Para $C > C_m$ la máquina no opera y, por tanto, $V = 0$.

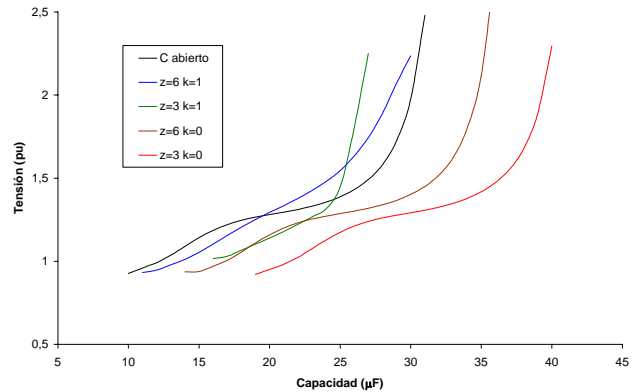
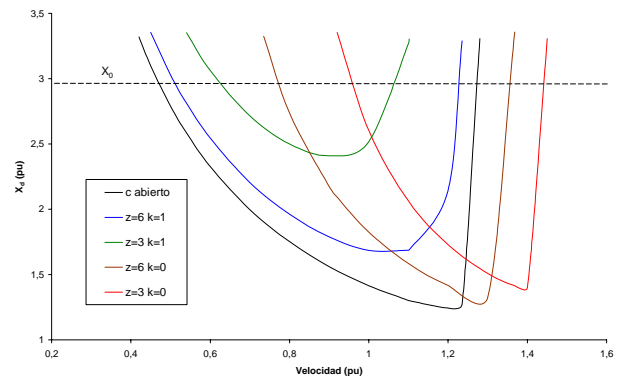


Figura 4. $V = V(C)$, para Ω , z y k constantes

4.2 Variación de la velocidad

En la figura 5 se representan las curvas $X_d = X_d(a)$ y $\delta = \delta(a)$, para $C = 20 \mu F$ y diferentes valores de Z , obtenidas a partir de (4) y (5), para la máquina bajo test. ($a = n/n_{base}$).



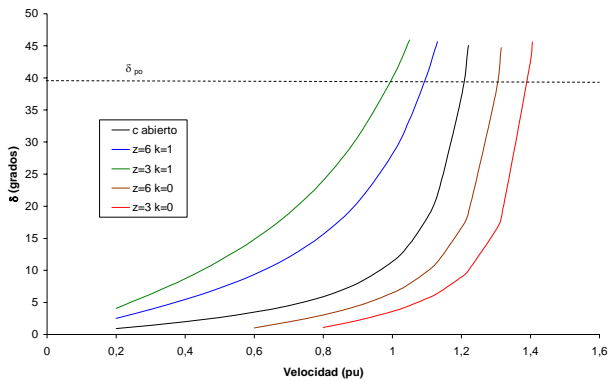


Figura 5. $X_d = X_d(a)$ y $\delta = \delta(a)$, para C , z y k constantes

El rango de operación en el que la autoexcitación es posible, determinado por $X_d < X_0$, viene determinado por los valores $a_1 < a < a_2$, que dependen de los valores fijados de C y Z . Además, la curva $X_d(a)$ presenta un mínimo, X_{dm} , para $a = a_m$. Se verifica $a_1 < a_m < a_2$.

La curva $\delta(a)$ es creciente. El valor de $\delta_{po\ min}$, fijados C y Z , se obtiene para $a = a_m$. El rango de funcionamiento estable del generador queda restringido a $a_1 < a < a_m$. En la Tabla 2 se indica el rango de valores de a para el funcionamiento estable del generador en las condiciones de carga representadas en la figura 5.

TABLA 2 – RANGO DE VALORES DE VELOCIDAD PARA LA AUTOEXCITACIÓN

Carga (pu)	$\delta_{po\ min}$ (grados)	Velocidad (pu)
Circuito abierto	38,7	0,45 – 1,21
$z = 6$ y $k = 1$	39,4	0,48 – 1,11
$z = 3$ y $k = 1$	39,9	0,61 – 0,97
$z = 6$ y $k = 0$	38,9	0,75 – 1,32
$z = 3$ y $k = 0$	39,1	0,94 – 1,41

En la figura 6 se representa la curva $V = V(a)$, obtenida a partir de (6). En el rango $a_1 < a < a_m$, V aumenta cuando a aumenta, alcanzando su máximo valor para $a = a_m$. Para $a > a_m$, $V = 0$.

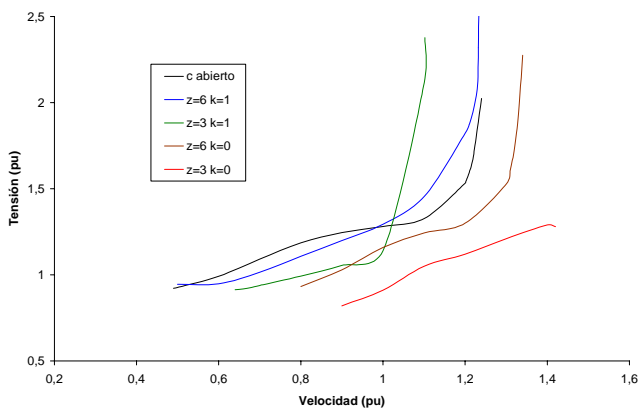


Figura 6. $V = V(a)$, para C , z y k constantes

4.3 Variación de la carga

En la figura 7 se representan las curvas $X_d = X_d(z)$ y $\delta = \delta(z)$, para $C = 20 \mu F$, $a = 1$ y diferentes valores de k , para la máquina bajo test.

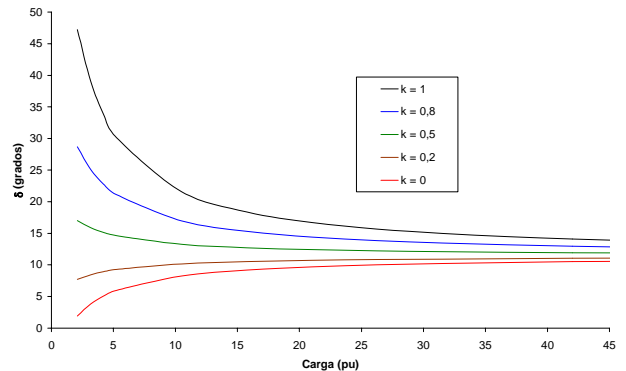
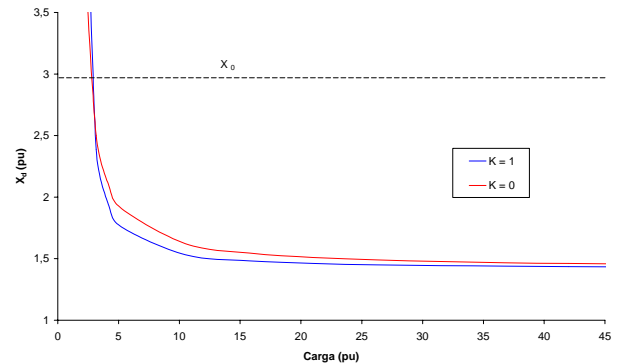


Figura 7. $X_d = X_d(z)$ y $\delta = \delta(z)$, para C , Ω y k constantes

Cuando z disminuye, X_d aumenta. El valor de z para el que $X_d = X_0$ es el mínimo valor de la impedancia de carga que limita el rango de operación de la máquina para factores de potencia bajos aunque para $k > 0,6$ es más restrictiva la condición $\delta < \delta_{po}$.

En la Tabla 3 se recogen los valores mínimos de z para el funcionamiento estable del generador en las condiciones representadas en la figura 7.

TABLA 3 – VALORES MÍNIMOS DE z PARA LA AUTOEXCITACIÓN

k ($\cos \varphi$)	δ_{po} (grados)	z mínima (pu)
1	40,2	2,99
0,8	40,1	2,94
0,5	39,8	2,68
0,2	39,4	2,66
0	39,2	2,64

En la figura 8 se representan las curvas $V = V(z)$, figura 8.a, y $V = V(I_1)$, figura 8.b, para $C = 20 \mu\text{F}$, $a = 1$ y diferentes valores de k .

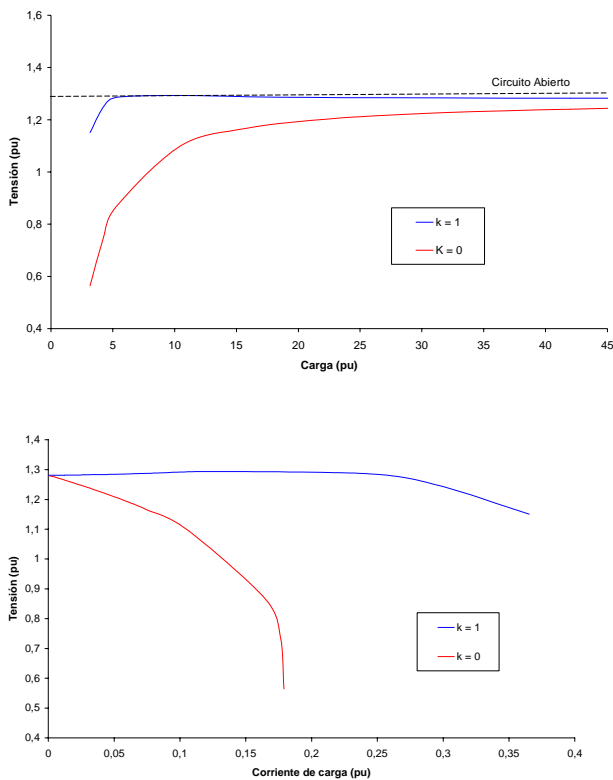


Figura 8. $V = V(z)$ y $V = V(I_1)$, para C , Ω y k constantes

En la figura 9 se representa el efecto de la variación del factor de potencia de la carga, (k), sobre X_d , (figura 9.a), δ , (figura 9.b) y V , (figura 9.c), para $C = 20 \mu\text{F}$, $a = 1$ y diferentes valores de z .

En la figura 9.a se observa que, para factor de potencia 1, X_d es mínima y δ y V son máximas. Cuando k disminuye, desde 1 hasta 0, la curva $X_d(k)$ varía de forma convexa; $V(k)$ lo hace de forma cóncava y $\delta(k)$ disminuye hasta alcanzar su valor mínimo para $k = 0$.

Nótese, además, que, para $k = 0,3$, el valor de δ es constante con independencia del valor de la impedancia de carga.

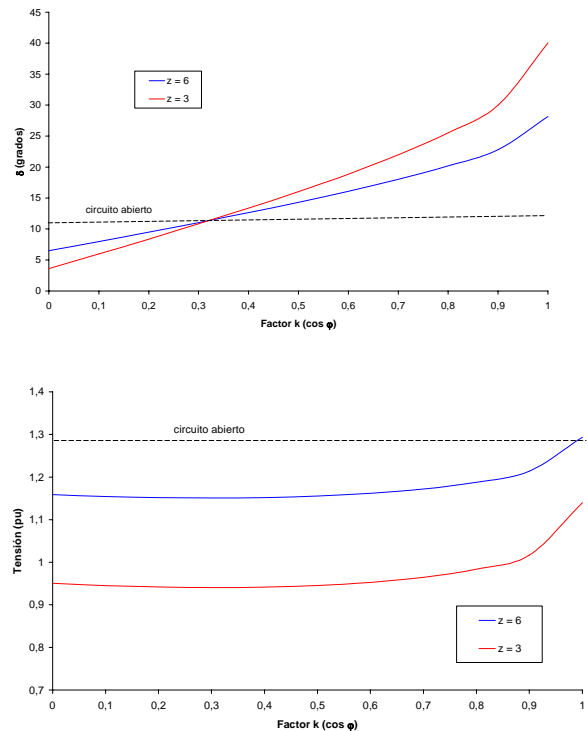
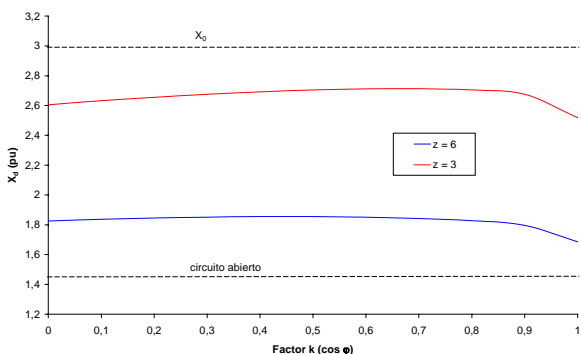


Figura 9. Variación de X_d , δ y V en función de k , para C , Ω y z constantes

5. Conclusiones

El modelo permite determinar los límites en el funcionamiento estacionario de un generador trifásico de reluctancia, autoexcitado, previa obtención experimental de sus parámetros característicos, cuando varía cualquiera de los tres parámetros externos a la máquina: capacidad de excitación, velocidad de giro e impedancia de carga.

Para que se produzca la autoexcitación y el funcionamiento sea estable, se ha obtenido que el rango de operación está limitado por: los valores mínimo y máximo de la capacidad de excitación, ($C_1 < C < C_m$); los valores mínimo y máximo de la velocidad de giro, ($a_1 < a < a_m$) y el valor mínimo de la impedancia de carga, (Z_{\min}) al que corresponde un valor máximo de la corriente de carga, ($I_{1\max}$).

Se han obtenido y representado las expresiones que determinan estos valores límite. La validez del modelo ha sido verificada contrastando algunos de los resultados teóricos calculados con sus correspondientes medidas experimentales. Para ello se ha utilizado una máquina universal para aplicaciones didácticas, configurada como generador de reluctancia trifásico [5].

Referencias

- [1] Abdel Kader, F. E. *The Reluctance Machine as a Self Excited Reluctance Generator*. Electric Machines and Power Systems. nº 10. pp: 141-148. 1985.
- [2] Alolah, A. *Capacitance Requirements for Three Phase Self-excited Reluctance Generator*. IEE Proc. Part C. Vol 138. nº 3. pp: 193-198. 1991.
- [3] Honsinger, V. *Steady State Performance of Reluctance Machines*. IEEE Trans PAS. Vol 90. nº 1. pp:305-317. 1971.
- [4] Lawrenson, P. J. y Agu, L. A. *Theory and Performance of Polyphase Reluctance Machines*. IEE Proceedings. Vol 111. nº 8. pp: 1435-1445. 1964.
- [5] Martínez García, Fernando. *Una Contribución al Estudio de los Generadores Síncronos de Reluctancia Variable con Devanado de Excitación y Autoexcitados*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2002.