

Modelado de la saturación en un sistema de generación eólica basado en DFIG

Jorge P. Murillo Oviedo, Francisco B. Herrera Fernández, Lesyani T. León Viltre

RESUMEN / ABSTRACT

El artículo presenta el modelado de un sistema de conversión de energía del viento basado en un Generador de Inducción Doblemente Alimentado en presencia de la saturación en la máquina afectando el comportamiento dinámico. A partir de un modelo básico de este tipo de proceso, se desarrolla el modelado del efecto de la saturación basado en las ecuaciones que implican la inductancia mutua, como principal variable para indicar la presencia de la saturación. Las variables consideradas en el sistema fueron velocidad de rotor, potencia y tensión y corrientes en estator y rotor. Se demuestra la posibilidad de obtener con el modelo desarrollado el comportamiento de las principales variables cuando el punto de operación se mueve de la zona de inductancia de mutua constante a la zona donde esta varía debido a la saturación. Se muestran los resultados de la simulación del modelo general que demuestran su efectividad en las condiciones de operación especiales cuando se presenta la saturación magnética en el generador.

Palabras Claves: modelo de saturación magnética, DFIG, Sistemas de conversión de energía del viento

The article presents the modeling of a wind energy conversion system based on a Double Feed Induction Generator in the presence of saturation in the machine, affecting the dynamic behavior. From a basic model of this type of process, the modeling of the effect of saturation is developed based on the equations that imply mutual inductance, as the main variable to indicate the presence of saturation. The variables considered in the system were rotor speed, power and voltage and currents in stator and rotor. . It is demonstrated the real possibility of using the developed model to obtain the behavior of the main variables when the operating point moves from the zone of constant mutual inductance to the region where it is varying because of saturation. The results of simulation of the general model are shown, demonstrating their effectiveness in special operating conditions when magnetic saturation occurs in the generator.

Keywords: magnetic saturation model, DFIG, Wind Energy Conversion System

Modeling and identification in a DFIG-WECS in the presence of saturation

1. -INTRODUCCIÓN

La presencia de no linealidades es común en una amplia variedad de procesos tecnológicos y representa una complejidad en lo relacionado con la modelado, análisis y procedimientos de identificación que sean necesario aplicar. En las máquinas eléctricas de inducción una de estas no linealidades es la saturación magnética.

En general para el modelado de sistemas que contienen no linealidades se han desarrollado varios métodos, incluyendo los clásicos método de la función descriptora [1] y los basados en modelos lineales equivalentes [2-5]. Sobre el modelado en máquinas eléctricas y específicamente en motores y generadores de inducción, se han desarrollado varias investigaciones sobre el modelado para estos tipos de proceso considerando la presencia de la saturación, demostrándose la necesidad de incluir los efectos de esta en el modelado de máquinas de inducción en general, como se resume por Bossio [6].

Los Generadores de Inducción Doblemente Alimentados, conocidos normalmente como DFIG por sus siglas en inglés, *Doubly Fed Induction Generator*, continúan siendo objeto de estudio en lo relativo al modelado, identificación y control. Particularmente lo relacionado con el control de este tipo de proceso ha venido recibiendo una creciente atención [7 -18]. Por otra parte, varios trabajos analizan el comportamiento de estas máquinas en diferentes condiciones relacionadas principalmente con los voltajes de operación (disturbios, fallos, etc.) [19 - 23]. Prácticamente todos estos estudios son realizados considerando puntos de operación del sistema, en los cuales los motores trabajan en la parte lineal de la característica de saturación y sin tener en cuenta la presencia de esta no linealidad en el sistema. Esta saturación magnética se caracterizará en el modelado por la inductancia mutua, la cual usualmente se le denomina L_m , en lo referente a considerar o no la presencia de esta no linealidad en la operación de la máquina. Si L_m es considerado constante, resulta por tanto un modelo lineal, mientras que considerar el mismo como variante con la corriente implica considerarlo como un elemento no lineal.

En situación de L_m variando, que corresponde a considerar diferentes zonas de operación, se presenta entonces la necesidad del cálculo permanentemente del valor de L_m . Esto introduce una complejidad adicional en los modelos a considerar. El procedimiento de cálculo de L_m está bien fundamentado en la literatura técnica revisada [24 - 28]. Particularmente también se reportan varios modelos que especialmente consideran el efecto no lineal provocado por la saturación magnética [29-32], representada en estos casos por una L_m variable no lineal. En este trabajo se presenta una novedosa forma de introducir el cambio en L_m en forma simplificada en el modelado, a partir de un modelo particularmente determinado en el sistema que se investiga. El efecto de la saturación, como fenómeno no lineal, en DFIG es por tanto el objeto de estudio en esta investigación, siendo el objetivo general determinar, mediante modelado y simulación, el efecto de esta no linealidad en los sistemas de generación eólica cuando estos están sometidos a régimen especiales de operación, tales como subidas o huecos de tensión.

Los sistemas de conversión de energía del viento basados en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG-WECS, por sus siglas en inglés) incorporan varios elementos que determinan el comportamiento de la generación, entre ellos los correspondientes sistemas de control, siendo el fundamental el subsistema de control de velocidad del rotor, el cual incluye elementos de aseguramiento de la integridad y estabilidad del sistema. Estos limitadores de velocidad también significan un efecto no lineal, de saturación, en el comportamiento general del sistema, lo cual se suma, en puntos de operación extremos, a las otras características no lineales. Esto se interpreta entonces como una saturación rotacional, la que es función directa la velocidad y potencia del viento. El otro objetivo general del artículo es demostrar, mediante técnicas de identificación, la posibilidad de determinar modelos generales del sistema DFIG-WECS en las condiciones especiales de operación antes mencionadas.

La investigación es realizada usando la simulación de los diferentes modelos, tanto del DFIG, como del sistema general de generación, debido a la imposibilidad de realizar algunos experimentos directamente sobre el sistema real seleccionado para el trabajo, debido a las propias características de envergadura y complejidad del mismo.

La estructura de este artículo se compone de una primera sección donde se resume el modelado de la máquina de inducción general, comprendiendo la saturación como elemento no lineal. Una segunda sección exponiendo las características fundamentales y modelo del motor tomado como base para la investigación, continuando en este orden con sucesivas secciones exponiendo el modelo general del sistema, sus características y los resultados de los experimentos para diferentes condiciones especiales de operación, considerando subidas y huecos de tensión. Finalmente se presenta una valoración general con las correspondientes conclusiones.

2.- EL MODELADO DE LA SATURACIÓN

El flujo magnético en las máquinas eléctricas de inducción tiene una relación directa con la corriente de magnetización, representada por la inductancia mutua, L_m . La presencia de saturación en esta relación significa que la densidad de flujo no aumenta linealmente con la corriente de magnetización a partir de un determinado valor de esta corriente. La figura 1 muestra el comportamiento de la relación flujo magnético y corriente de magnetización en una hipotética máquina de inducción en circuito abierto, donde se aprecia que a partir de un determinado valor de la corriente el valor del flujo deja de tener un comportamiento lineal. En esta investigación se consideró la característica mostrada en la figura 2, obtenida experimentalmente por simulación de modelo de una máquina real instalada en un sistema de generación eólica en operación en la provincia de Holguín, Cuba, cuyas características se exponen en la siguiente sección.

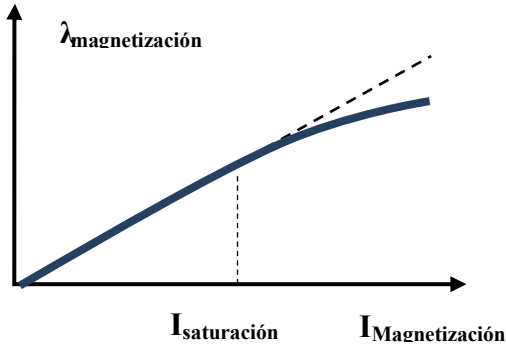


Figura 1
Característica básica de la relación flujo λ / corriente magnetización I en una máquina de inducción en circuito abierto.

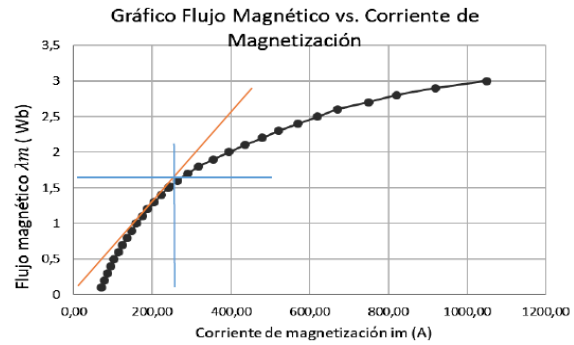


Figura 2
Característica real obtenida por simulación

Sobre esta base el modelo vectorial general a considerar parte de las ecuaciones básicas para este tipo de máquina, sin considerar la saturación es:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + j\omega_e \lambda_s \quad (1)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_r = 0 \quad (2)$$

Donde V, I, R y λ representan los valores vectoriales respectivamente, de las tensiones, corrientes, resistencias y flujos magnéticos en estator y rotor, identificadas en cada caso por los subíndices s y r. Por otra parte ω_e representa la velocidad angular referente al sistema de coordenadas DQ, mientras ω_r significa velocidad angular del rotor. Complementariamente a las ecuaciones (1) y (2) se tiene que:

$$I_m = I_s + I_r \quad (3)$$

$$\lambda_m = L_m I_m \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = P \cdot \frac{J_m}{2} (T_e - T_c) \quad (5)$$

donde los vectores indicados significan:

I_m : Corriente de magnetización

λ_m : Flujo de magnetización

J_m : Momento de inercia

P : Número de polos

T_e : Torque electromagnético

T_c : Torque de carga

La saturación se introduce mediante la representación de la variación del flujo magnético en función de la corriente de magnetización. Considerando esta relación como la planteada en la figura 2, implica considerar dos zonas de operación. La primera, por debajo de la corriente I_m de saturación, donde la relación es lineal y por tanto L_m es constante, y por encima de ese valor se obtiene una relación no lineal. En esta zona L_m en general se expresa en función de I_m como

$$\lambda_m(i_m) = L_m(I_m) * I_m \quad (6)$$

El valor instantáneo de I_m puede calcularse a partir de las corrientes en los ejes de coordenadas dq mediante:

$$i_m = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (7)$$

A su vez estas corrientes de magnetización se calculan a partir de las correspondientes corrientes de estator y rotor en los ejes dq, como:

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \quad (8a)$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \quad (8b)$$

Se han desarrollado varias formas de modelar la expresión no lineal expresada en (6). Un ejemplo de ello es la relación [28]:

$$L_m(i_m) = \frac{(\alpha - L_p \cdot i_m)}{(\beta + i_m)} \quad (9)$$

Donde α y β , dependen de parámetros del generador, y L_p es una constante calculada a partir de inductancia de pérdida tanto del estator como del rotor.

En la figura 3 se ejemplifica, para $\alpha = 2,8$ y $\beta = 5,7$, para una máquina de 3,5 KW.

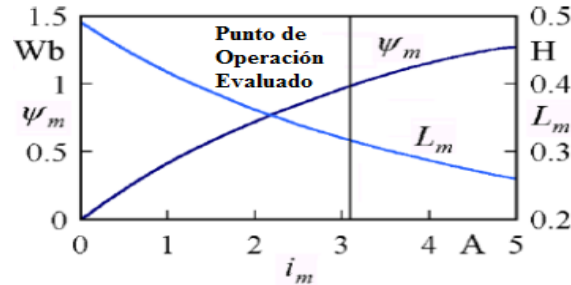


Figura 3
Ejemplo real: Relación flujo, corriente e inductancia magnetización [28]

En esta investigación no se toma este modelo tomado como ejemplo por no corresponder a la máquina bajo estudio, sino que se determina experimentalmente por simulación, dando como resultado la característica mostrada en la figura 2. Teniendo modelada de alguna forma la variación de L_m en función de la corriente de magnetización, entonces es posible introducir este efecto en el modelo de la máquina a simular. La relación no lineal ajustada es:

$$I_m = 60 - 400.58 \cdot \ln\left(1 - \frac{\lambda_m}{3.42}\right) \quad (10)$$

Una comparación de los valores obtenidos con esta expresión y los valores mostrados en la figura 2 muestra una adecuada correspondencia sobre todo cuando comienza a manifestarse la saturación (parte no lineal). La diferencia va de desde 12,1 % para flujo magnético de 0.1 Wb a 8,44% para flujo 2.5 Wb, cubriendo esto toda la zona de operación. Para flujo cercano al punto de comienzo de la no linealidad la correspondencia es mejor.

Se escala a una máquina de características similares en cuanto a la no linealidad, de potencia 860 Kw obteniéndose:

$$L_m = 6.1618e^{-3} \text{ H (para la región de operación lineal)}$$

Y los restantes parámetros con valores:

$$R_r = 0.00172 \text{ } \Omega; R_s = 0.0035 \text{ } \Omega; P = 4 \text{ Mw}; \omega_e = 377 \text{ rpm.}$$

Combinando con la expresión (4) se obtiene el modelo no lineal general para la inductancia de magnetización L_m como:

$$L_m = \begin{cases} 0.0062 & \text{para } \lambda_m \leq 1,52 \\ \frac{1.21 \cdot \lambda_m}{|60 - 3400.28 \cdot \ln(1 - \frac{\lambda_m}{3.42})|} & \text{para } \lambda_m > 1,52 \end{cases} \quad (11)$$

El objetivo consiste entonces en la introducción de la expresión (11) en el sistema de ecuaciones que representa el modelo. El procedimiento que se introduce es calcular las corrientes de estator y rotor en los ejes qd, I_{sd} , I_{sq} , I_{rd} e I_{rq} y a continuación, por este orden, el cálculo de I_m mediante (7), λ_m por medio de (10) y en función de este valor obtenido (comparado con 1,52) se aplica la expresión (11) para el cálculo de L_m .

3.- EL MODELADO DEL DFIG-WECS

Se realiza el modelado del DFIG-WECS considerando una estación de trabajo concreta, radicada en Gibara, Holguín, Cuba, donde está en aplicación en un sistema de generación eólica, conectado a 690 V (tensión nominal) mediante un transformador de 34,5 Kv a 0,690 Kv. Las cargas del sistema son las que existen realmente en esa localidad. En la tabla 1 se indica los principales datos asociados al DFIG G52-850 en funcionamiento en dicha instalación.

Tabla 1
Datos característicos del DFIC G52-850

Tensión V= 690 voltios	Frecuencia nominal f_{nom} = 60 Hz
Resistencia de estator $R_s = 0.0035 \Omega$	Número de polos = 4
Resistencia del Rotor $R_r = 0.0031 \Omega$	Inductancia mutua constante $L_{m0} = 0,00621$ H
Inductancia de estator $L_{ls} = 8.84801e-5$ H	Inductancia del rotor $L_{lr} = 1.289e-4$ H

En este sistema el circuito de rotor queda conectado a la red a través de un sistema de convertidores de electrónica de potencia, mientras que el estator es conectado directamente a la red según se observa en la figura 4

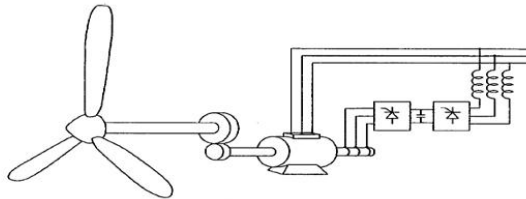


Figura 4
Esquema básico de un DFIG aplicado en generación eólica.

El rotor del generador de inducción de rotor bobinado es alimentado por el convertidor trifásico del lado de la máquina, que aplica un sistema trifásico de tensiones de frecuencia variable. La modificación de la amplitud y frecuencia de las corrientes del rotor, resulta en una modificación del par y, consecuentemente, de la velocidad de giro del rotor, cuyo objetivo es que la turbina eólica trabaje en el punto de máximo rendimiento cuando cambia la velocidad del viento [31].

Para el modelado se implementa las ecuaciones descritas en la sección anterior, en un entorno SimuLink / MatLab, considerando los modelos de equipos acoplados al generador para poder considerar condiciones de operación reales. Por tanto, esto implica el trabajo en lazo cerrado. En el diagrama mostrado en la figura 5 se representa simbólicamente (en lenguaje SimuLink) el esquema del modelo completo general, donde se aprecia la posición de la máquina bajo estudio, incluido en el bloque denominado **DFIG**, en un sistema real de generación. El sistema de control fundamental está en el bloque denominado **CONTROL PLL**, mientras que con el bloque **SIMULADOR FALLAS** se generan los disturbios necesarios para el estudio del sistema bajo estas condiciones. Por razones lógicas de dimensión y complejidad del modelo Simulink no se puede mostrar aquí en todos los detalles, pero si la implementación de la saturación, lo cual es mostrado en la figura 6. En este modelo se aprecia el efecto de retroalimentación que se presenta en el cálculo de λ_m , y consecuentemente el valor de L_m . El valor final de L_m es determinado externamente, implementando la expresión 11.

La concepción del marco experimental para la simulación e identificación de este modelo se fundamenta en las siguientes consideraciones:

- a) Sistema trifásico balanceado.
- b) La determinación del punto de operación a partir de la velocidad del viento.

La velocidad del viento se considera como la variable principal para la determinación del comportamiento dinámico del sistema completo. Se considera como su punto de operación el valor de 11 m/s, mientras los valores mínimo y máximo lo tomamos como 5 y 14 m/s, respectivamente

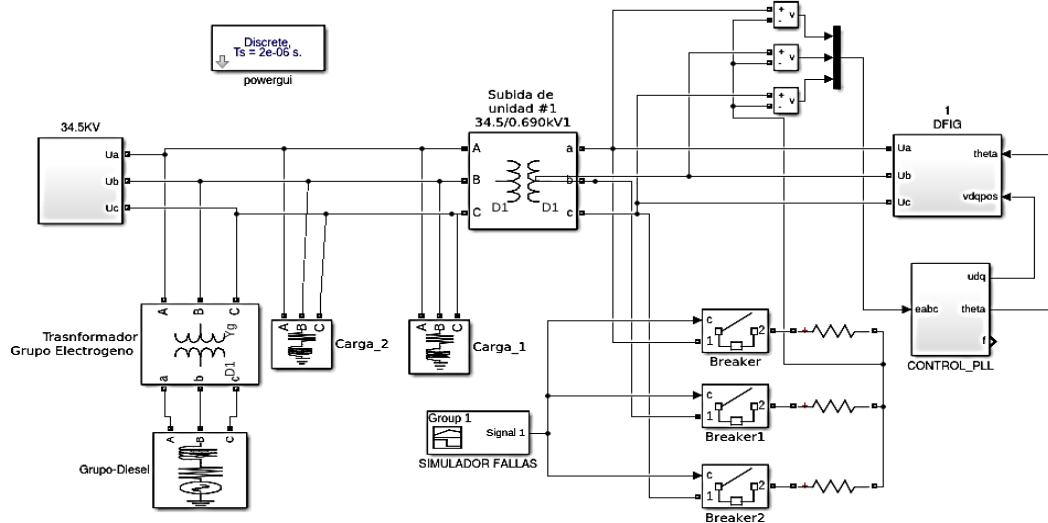


Figura 5
 Modelo general del SGE/DFIG para experimentación

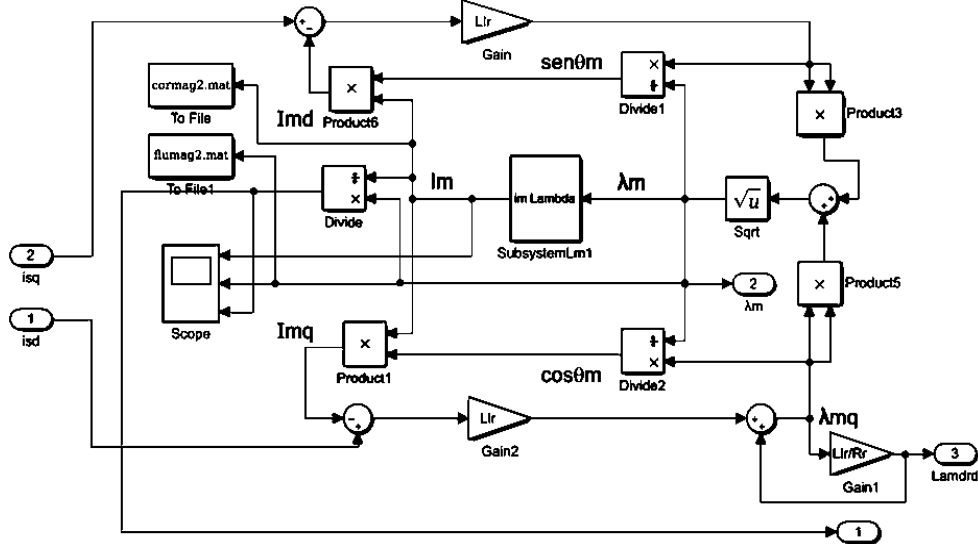


Figura 6
 Modelado propuesto para la no linealidad saturación

c) Las alteraciones en la tensión constituye el principal disturbio presente en estos tipos de sistemas. Estos disturbios están asociados a los niveles de tensión en la línea de alimentación (estator), y está normado las denominaciones y clasificación de estos. Entre los principales disturbios se encuentran:

- Huecos de tensión. Disminución del nivel de tensión de duración corta, normalmente entre medio ciclo de la frecuencia fundamental y un segundo. Causa: Entrada al sistema de grandes equipos consumidores. Se clasifican en ligeros, medios o grandes, dependiendo del nivel de profundidad (relación tensión en hueco a tensión normal).
- Subida de tensión. Aumento de la tensión provocado por entrada / salida de equipamientos en el sistema.
- Interrupciones en línea. Falla de tensión por interrupción en alimentación.
- Cortocircuitos.

En este estudio se consideran los dos primeros tipos.

d) Se considera que las fallas se presentan por igual en todas las fases, con recuperación de la tensión

e) Presencia de control de velocidad del rotor. Implica la presencia de lazo cerrado a los efectos de los procedimientos de identificación.

f) Las variaciones de tensión como disturbio variando hasta un 70 % alrededor del punto de operación.

g) Las variables de salida se consideran la potencia entregada por el generador, la velocidad del rotor.

h) El sistema posee control de velocidad, así como su protección a vientos fuertes y control de potencia.

En resumen, se considera el DFIG-WECS como un sistema con:

- Variables de entrada:
 - Entrada de referencia: Viento (m/s)
 - Disturbios: Fallas trifásica balanceada (huecos y subidas de tensión)
- Variables de salida:
 - Potencia entregada (Pot, MW)
 - Velocidad del rotor (W_r , rpm)

Este modelo es validado para varias condiciones de operación y disturbios, lo cual se expone a continuación.

4.- EXPERIMENTACIÓN BÁSICA

Los experimentos se realizan para diferentes combinaciones de valores de velocidad del viento y niveles de tensión en línea. Estas variaciones en el nivel de tensión se realizan de forma tal que abarque ambas zonas de operación para el parámetro L_m , tanto para valor constante, como para L_m variable, para atender las diferentes condiciones de saturación.

En todos los experimentos se toma el tiempo final de simulación de 4 seg, para dar tiempo a que el período transitorio inicial desaparezca y con ello se establezcan las señales a medir. El periodo de muestreo se selecciona de 1 ms, lo cual permitirá uniformar posteriormente los procedimientos de identificación a aplicar para la determinación de los modelos.

Para este sistema sin saturación (L_m constante en el valor indicado anteriormente), operando para una velocidad de viento de 11 m/s, tensión en estator de 368 V rms y una tensión en el rotor proporcionada por el sistema de control (los inversores), se obtienen los resultados mostrados en la figura 7 en cuanto a velocidad angular, torque, corrientes en estator y rotor (fase A), así como las potencias activa y reactiva, en ese mismo orden de arriba abajo, en un tiempo de 4 segundos.

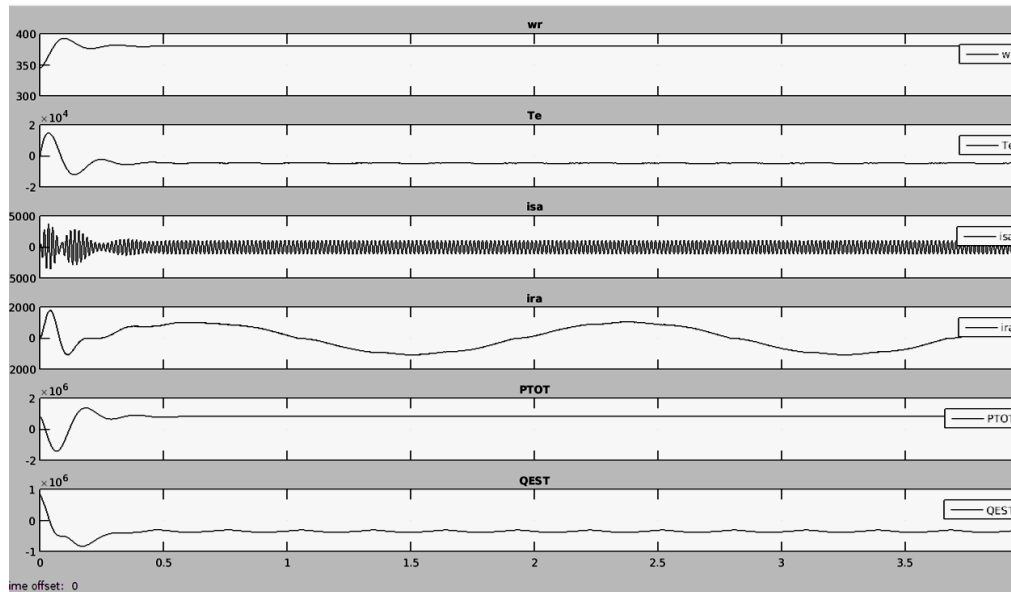


Figura 7

Comportamiento general del modelo del DFIG-WECS

Velocidad rotor; Torque; Corrientes estator y rotor; Potencias activa y reactiva)

El comportamiento de las dos variables de salida (potencia y velocidad, ante los disturbios huecos y subida de tensión proporcionado por el modelo desarrollado se resumen en la figura 8.

En disturbios se consideraron, como ejemplo, los huecos de tensión, con una duración de 0.2 seg y hasta 90% de profundidad. Por su parte como subida de tensión se consideró también de 0.2 seg y un valor de 40% por encima del punto de operación. Se toma en consideración además que el sistema de control solo garantiza la recuperación del estado estable en fallas de magnitud relativamente pequeñas. En todos los casos se comprueba que la potencia presenta más variación relativa que la variación que experimenta la velocidad dado precisamente por la acción del sistema de control. Para ambos tipos de disturbios el tiempo de recuperación está entre 0.2 y 0.3 segundos.

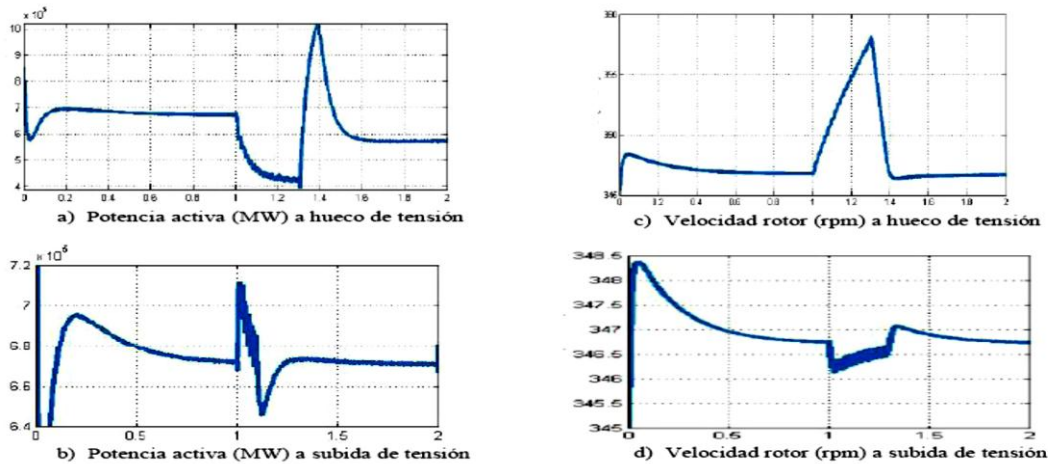


Figura 8

Comportamiento de potencia y velocidad de rotor resultante del modelo a disturbios en $t = 1$ seg.

Particularmente se observa la captura por los modelos de las posibles pequeñas oscilaciones que pueden presentarse en ambas variables. En el caso de la velocidad el gráfico demuestra el comportamiento del sistema de control, por la rápida recuperación y alta regulación de esta variable ante este tipo de disturbio, en forma similar al caso de presencia de huecos de tensión. Por su parte el comportamiento del modelo de la potencia ante subida de tensión es muy similar al de los datos reales en cuanto a la respuesta transitoria y a las oscilaciones del sistema.

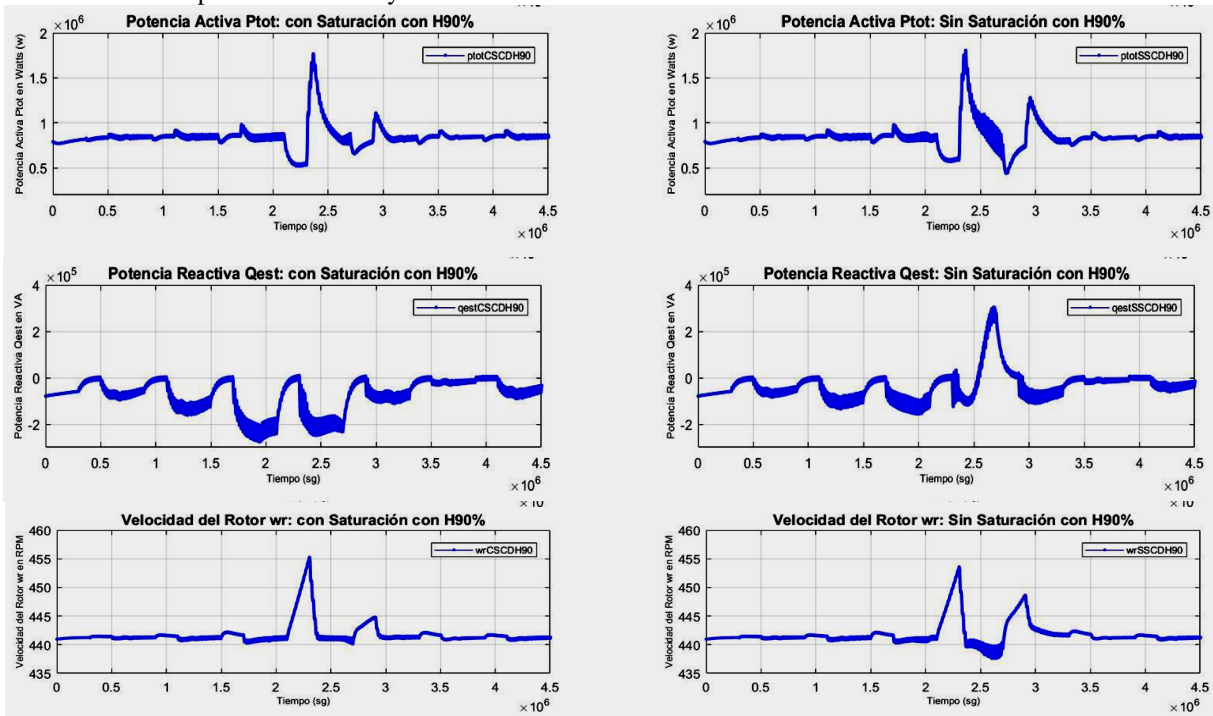


Figura 9

Resultados del modelo con y sin saturación ante huecos de tensión (90%).

La novedad encontrada en la investigación se basó en el análisis del comportamiento del modelo que incluye el efecto de la saturación. En este sentido se compara el comportamiento del modelo sin saturación con el comportamiento del modelo con saturación ante subidas y huecos de tensión, y en ambos casos para diferentes niveles de disturbios. Como muestra de los resultados obtenidos se presenta en la figura 9 los resultados antes huecos de tensión significativos (90%), para las potencias y la velocidad. Se comprueba que en todos los casos se obtiene un comportamiento que sigue los principios de operación. Se comprobó que para disturbios de menor magnitud las variaciones en estos comportamientos son lógicamente menores.

Esto implica la validez de usar el modelo como elemento detector de la presencia de la saturación ante disturbios, permitiendo esto concluir que el modelo puede incluirse en algún sistema de identificación de dinámicas de comportamiento, en este caso solo con efectividad en presencia de disturbios.

Respecto a fallas por huecos de tensión los modelos obtenidos son satisfactorios, pero sin tener en cuenta los transitorios ocasionados por el sistema de control al tratar de estabilizar la potencia, aunque en algunos casos el modelo no puede reproducir de manera eficiente cambios bruscos en la potencia tanto de elevación como de pérdida de la misma. El comportamiento de la velocidad ante huecos de tensión tiene resultados similares al de la potencia, en cuanto al comportamiento principal pero no el de las oscilaciones del sistema de control, pero en este caso no es de tanta importancia pues son oscilaciones muy pequeñas que no tienen importancia a la hora de analizar el comportamiento del DFIG.

4. CONCLUSIONES

Se comprueba la validez del modelo desarrollado para incluir el efecto de la saturación en el generador, lo cual permite realizar otros estudios del comportamiento de los sistemas DFIG-WECS considerando este efecto no lineal cuando están en condiciones especiales de operación, siendo posible obtener comportamientos dinámicos con un adecuado grado de aproximación al comportamiento dinámico del sistema. Este modelo puede entonces ser usado para otros estudios sobre la operación de estos sistemas cuando la saturación está presente. Se concluye finalmente la validez de poder incluir la saturación en los modelos que representen este tipo de sistema, dado la evidente influencia de la misma en el comportamiento dinámico de las principales variables de operación en el DFIG-WECS.

REFERENCIAS

1. Krylov, N. and Bogoliubov, N. *Introduction to nonlinear mechanics*. New York: Princeton University Press; 1943.
2. Caughey, K. "Equivalent linearisation techniques". *Journal of Acoustical Society of America*. vol. 5, pp. 1706–1711, 1963
3. Iwan, W.D. "A generalization of the concept of equivalent linearization". *International Journal of Non-linear Mechanics*. vol. 8, pp. 279–87. 1973
4. Roberts, J.B. and Spanos, P.D. *Random vibration and statistical linearization*. Chichester: Wiley; 1991.
5. Bogoliubov, N.N. and Mitropolsky, Y.A. *Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations*. New York: Gordon and Breach; 1961.
6. Bossio, G.R. Modelado de las irregularidades del motor de inducción: aplicaciones en la estimación de posición y el diagnóstico de fallas. PhD Thesis. Universidad Nacional de la Plata, Argentina; 2014. Available: <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1356/>, 2014
7. Neves, F. et al. "The SVFT-Based Control". *IEEE Transactions on Industrial electronics*. 2014; 61(8): 4152-4160.
8. León, L. et al. "Análisis y modelado del generador de inducción doblemente alimentado". *Revista Ingeniería Energética*. vol. 35, no. 2, pp. 101-111, 2014
9. Mehta, B. et al. "Small signal stability enhancement of DFIG based wind power system using optimized controllers parameter". *Electrical Power and Energy Systems*. vol. 70, pp. 70–82. 2015
10. Mondal, A.K. and Bera, P. Design of P-I Controller of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator Using Flower Pollination Algorithm. In: Bera R, Sarkar S, Chakraborty S, editors. *Advances in Communication, Devices and Networking*. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer; vol. 462, pp. 755-766, 2018
11. Dawit, W. et al. "Mitigation of power Quality Issues of wind and geothermal Power generation system by using FACTS devices". *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*. vol. 6, no. 3, pp. 42-50, 2018
12. Abdeddaim, S. and Betka, A. "Optimal tracking and robust power control of a DFIG wind turbine". *Electrical Power and Energy Systems*. vol. 49, no. 3, pp. 234-242, 2013
13. Beltran, B. et al. "Second order sliding mode control of a DFIG driven wind turbine". *IEEE Transaction on Energy Conversion*. vol. 27, no. 2, pp. 261-269, 2012
14. Boudjema, Z. et al. "Nonlinear control of a DFIG supplied by a matrix converter for wind energy conversion systems". *Journal of Electrical Engineering*. vol. 13, no. 4, pp. 269-276, 2013
15. Djeriri, Y. et al. "A comparative study between Field oriented control strategy and direct Power control strategy for DFIG". *Journal of Electrical Engineering*. vol. 14, no. 2, pp. 159-167, 2014

16. Mehdipour, C. et al. "Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under balanced network conditions". *Electrical Power and Energy Systems*. vol. 83, pp. 560–569, 2016
17. Rahab, A. et al. "An overall control of BDFIG using direct power control for WECS under unbalanced grid voltage conditions". *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*. vol. 4, no. 3, pp. 53-63, 2018
18. Bounadja, E. et al. "Variable structure control of a DFIG for Wind energy conversion systems". *Energy Procedia*. vol. 50, no. 4, pp. 999-1007, 2014
19. Jimenez, A.A. et al. "Analysis of rotor current impact on DFIG-WECS under fault condition". *IEEE Latin American Transaction*, vol. 16, no. 2, pp. 329-334, 2018
20. Seman, S. et al. "Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance". *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 21, no. 11, pp. 1782-1789, 2016
21. Lopez, E. et al. "Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips". *IEEE Transactions and Industrial. Electronics*. vol. 56, no. 10, pp. 246–4254, 2009
22. Hu, J. et al. "Dynamic modeling and improved control of FIG under distorted grid voltage conditions". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 26, no. 3, pp. 163–175, 2011
23. Marques, G. "Understanding the Doubly Fed Induction Generator During Voltage Dips". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 6, pp. 421 – 431, 2012
24. Zhu, R. et al. "Dual-Loop Control Strategy for DFIG-based Wind Turbines under Grid Voltage Disturbances". *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 31, pp. 2239 - 2253, 2015
25. Zhou, L. et al. "Improved Demagnetization Control of a Doubly-Fed Induction Generator Under Balanced Grid Fault". *IEEE Transactions on Power Electronics*. vol. 30, pp. 6695-6705, 2015
26. Zhen, X. et al. "Improved Ride-Through Control of DFIG During Grid Voltage Swell". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 62, pp. 3584-3594. 2015
27. Tang, N. et al. *A saturation model for induction machine by space vector*. China: Fuzhou University; 2001
28. Fraile, J. *Máquinas Eléctricas*. España: McGraw Hill; 2005
29. Blas, A. Modelización de la histéresis magnética y su aplicación en el cálculo numérico de máquinas eléctricas. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona; 2006.
Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93617>
30. Martín, M.E. Aportación al modelado del motor trifásico de inducción con consideración de la saturación y el efecto de la doble jaula. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93622>, 2016
31. Lupsa-Taturu, L. "A Flux-Based Expression of Induction Machine Magnetizing Inductance". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 25, no. 1, pp. 268-270, 2010
32. Bispo, D. et al. "A new strategy for induction machine modeling taken into account the magnetic saturation". *IEEE transaction on Industrial Application*. vol. 37, pp. 1710- 1719, 2001
33. Monjo, L, et al. "Saturation effects on torque and current-slip curves of squirrel-cage induction Motors". *IEEE Transaction on Energy Conversion*. vol. 28, no. 1, pp. 243-254, 2013
34. León, L.T. Control basado en la transformada de Fourier para un restaurador dinámico de tensión que alimenta un generador eólico. Tesis. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. 2014
Available: <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/9281>

AUTORES

Jorge P. Murillo Oviedo. Profesor, MSc e Ingeniería Eléctrica. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador; Decano Facultad Ingeniería. Temas de investigación en control de accionamientos eléctricos y electrónicos. Email: jmurillo65@hotmail.com

Francisco Herrera Fernández: Profesor; Dr. Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba; Temas de investigación en modelado e identificación inteligente de sistemas. e-mail: herrera@uclv.edu.cu

Lesyani León Viltres: Profesor; Dra. Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba; Temas de investigación Accionamientos eléctricos y sistemas alternativos de generación eléctrica. lesyani@uclv.edu.cu

