

# Control desacoplado de potencia activa y reactiva instantánea en aerogeneradores basados en máquinas de inducción doblemente alimentadas

Fernando Berrutti

Instituto de Ingeniería Eléctrica – Facultad de Ingeniería (UdelaR)

[berrutti@fing.edu.uy](mailto:berrutti@fing.edu.uy)

**Resumen:** El presente trabajo tiene como objetivo la descripción del sistema de control del convertidor del lado rotor asociado a los generadores de inducción doblemente alimentados y su interacción con el sistema de control de la turbina a efectos de lograr implementar el desacople de potencia activa y reactiva instantánea que fluye por el estator y la simulación de funcionamiento de la máquina con este controlador, en caso que se encuentre trabajando sobre una red de alta potencia de cortocircuito sin presentar anomalías. Para dicho propósito se asumirá un modelo ideal de convertidor (eficiencia unitaria y sin generación de armónicos), y del modelo dinámico de quinto orden de la máquina de inducción, eligiendo un esquema de control vectorial donde el eje directo del marco de referencia dq es colineal con la tensión estatórica, girando a la frecuencia de la red eléctrica. A partir del marco de referencia rotatorio elegido se determina la interrelación existente entre las diferentes magnitudes eléctricas involucradas en el análisis a efectos de deducir las expresiones que rigen el intercambio de potencia activa y reactiva instantáneas entre el estator y la red en función de las corrientes en eje directo y en cuadratura del rotor, así como el acoplamiento existente de la dinámica de las componentes de la tensión de rotor a través de estas corrientes. Esta última situación conllevará el diseño de un controlador que desacople esta dinámica mediante la utilización de lazos de alimentación directo (feedforward), permitiendo generar una referencia de tensión adecuada para que el convertidor del rotor pueda efectuar el desacople de potencias. Se analizará la repercusión que tendrá esta forma de control sobre el desempeño global de la máquina sin detallar la intervención del convertidor de estator. Finalmente se realizarán distintas simulaciones a efectos de verificar el funcionamiento del generador con el controlador implementado.

**Palabras clave:** Control de par, control de potencia reactiva, aerogeneradores de velocidad variable, generadores de inducción doblemente alimentados.

## I. NOMENCLATURA

$v_{ds}$ : componente en eje directo de tensión estatórica.

$v_{qs}$ : " en eje en cuadratura de tensión estatórica.

$i_{ds}$ : " en eje directo de corriente estatórica.

$i_{qs}$ : " en eje de cuadratura de corriente estatórica.  
 $v_{dr}$ : componente en eje directo de tensión rotórica.  
 $v_{qr}$ : " en eje en cuadratura de tensión rotórica.  
 $i_{dr}$ : " en eje directo de corriente rotórica.  
 $i_{qr}$ : " en eje de cuadratura de corriente rotórica.  
 $\Psi_{dr}$ : " en eje directo de flujo rotórico.  
 $\Psi_{qr}$ : " en eje en cuadratura de flujo rotórico.  
 $\Psi_{ds}$ : " en eje directo de flujo estatórico.  
 $\Psi_{qs}$ : " en eje de cuadratura de flujo estatórico.  
 $\omega_s$ : frecuencia angular de la red eléctrica.  
 $\omega_r$ : frecuencia angular eléctrica del rotor.  
 $\omega_g$ : velocidad de giro en el eje de alta velocidad.  
 $\tau_s$ : par desarrollado por el generador de inducción.  
 $p_r$ : potencia activa instantánea por el rotor.  
 $p_s$ : potencia activa instantánea por el estator.  
 $p_t$ : potencia activa instantánea total.  
 $q_s$ : potencia reactiva instantánea por el estator.  
 $C_p$ : coeficiente de potencia.  
 $G$ : relación de la caja multiplicadora.  
 $J$ : inercia del conjunto turbina – generador.  
 $p$ : número de polos.  
 $\beta$ : ángulo de paso.  
 $\lambda$ : velocidad específica de la turbina.  
 $v$ : velocidad del viento.  
 $R$ : radio de la turbina.

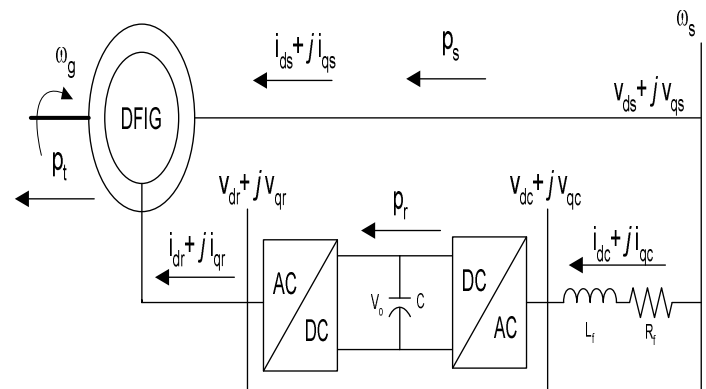


Fig.1: Esquema básico del DFIG y magnitudes eléctricas relevantes en el análisis.

## II. INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto ANII PR\_FSE\_2010\_03 "Estudios dinámicos del sistema eléctrico uruguayo con creciente penetración de energía eólica y generación renovable" y el programa de apoyos de postgrado PR-POS-2008-003.

El control del convertidor del rotor de un aerogenerador de velocidad variable se encuentra íntimamente ligado al sistema de control de la turbina: en función de las consignas de velocidad angular y par requeridas por la turbina para operar bajo una determinada premisa de control, el convertidor debe generar la tensión a inyectar en bornes del rotor de la máquina, con una amplitud y frecuencia adecuada a efectos de lograr los referidos requerimientos. En estos casos, es necesario que el generador trabaje sobre un amplio rango de velocidades, y a su vez, que desarrolle un par electromagnético acorde a la velocidad angular, a efectos de maximizar la extracción de potencia en el mayor rango de velocidad de viento posible, o limitar la misma, en función de las condicionantes físicas de los diferentes dispositivos que constituyen el aerogenerador.

Paralelamente al control de par, lo que se traduce directamente en el control de potencia activa instantánea total que fluye desde generador hacia la red, es posible controlar en forma desacoplada, la potencia reactiva instantánea desarrollada por el estator.

De acuerdo a las características de la fuente primaria, resulta imprescindible la utilización de un modelo dinámico de la máquina de inducción que permita obtener el grado de detalle necesario para observar la evolución instantánea de las diferentes magnitudes eléctricas que participan en el intercambio de potencia, y desarrollar una estrategia de control que se adapte a estas condiciones. Para abordar el análisis se ha optado por trabajar con el modelo de quinto orden de la máquina de inducción referida a ejes dq rotando a la frecuencia de la red a la cual se encuentra el generador interconectado y con el vector espacial de la tensión estática colineal con el eje d, de acuerdo a la figura 2.

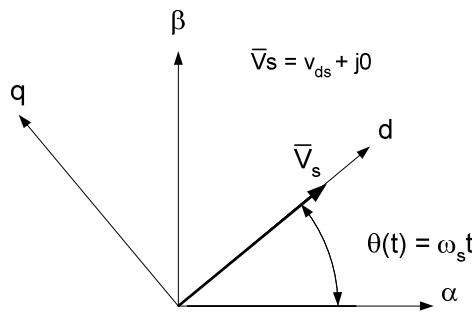


Fig.2: Orientación de ejes dq elegidas para el análisis.

Dado que el propósito principal de este trabajo es caracterizar el comportamiento dinámico del generador de inducción doblemente alimentado, la red elegida será de una alta potencia de cortocircuito y se supondrá que no habrán anomalías ni en la amplitud de tensión ni en la frecuencia de la misma.

### III. MODELO DINÁMICO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

De acuerdo a lo expuesto en la introducción, el modelo de la máquina de inducción utilizado será dado por las ecuaciones

(1), donde explícitamente se está utilizando la orientación vectorial elegida ( $v_{qs} = 0$ ), y el par motriz de la turbina eólica:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \quad (1)$$

$$0 = r_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds}$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr}$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr}$$

$$\frac{2}{p} J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 C_p (\lambda, \beta) v^3}{\frac{2}{p} G \omega_r} + \frac{3p}{4} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}$$

El modelo presentado supone la máquina lineal, sin tomar en cuenta fenómenos como la saturación en el núcleo, efecto skin o armónicos espaciales. Por otra parte, la notación utilizada es de acuerdo a la convención de la máquina como motor.

### IV. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL VECTORIAL

#### A. Hipótesis de trabajo

Si bien el modelo implementado por el simulador responde al modelo de quinto orden cuya descripción está dado por las ecuaciones (1), a efectos de realizar el control vectorial se realizarán las siguientes hipótesis de trabajo:

- 1) La fuente a la cual se interconecta el aerogenerador es equilibrada, con amplitud y frecuencia constante.
- 2) Las pérdidas por efecto Joule en el estator son despreciables:  $r_s \approx 0$ .
- 3) Los transitorios de flujo magnético en el estator son

$$\text{despreciables: } \frac{d\psi_{ds}}{dt} = \frac{d\psi_{qs}}{dt} = 0$$

La primera hipótesis de trabajo corresponde a la forma de operar el simulador; la segunda y tercer hipótesis serán verificadas mediante las simulaciones luego de efectuado el análisis que será desarrollado a continuación. En particular, la

tercera hipótesis presupone que el control se efectúa sobre una máquina de inducción de tercer orden.

### B. Condiciones particulares de trabajo

Imponiendo las hipótesis planteadas en el conjunto de ecuaciones (1), se realiza una significativa simplificación en la ley de Faraday aplicada al estator del generador y a la segunda cardinal, que se terminan traduciendo en las siguientes expresiones:

$$\frac{2}{p} J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 C_p (\lambda, \beta) v^3}{\frac{2}{p} G \omega_r} - \frac{3p}{4} \psi_{qs} i_{ds} \quad (2)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} = 0$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = -\frac{v_{ds}}{\omega_s}$$

Se puede observar una simplificación importante en el par electromagnético desarrollado por el generador debido a la anulación de uno de sus términos. Por otra parte, se deduce que es posible controlar las corrientes en el estator si se logra controlar las corrientes que fluyen por el rotor de la máquina, lo cual se traducirá en el control de potencia activa y reactiva instantánea que fluye por el estator. Reordenando los términos, y recordando las expresiones de potencia activa y reactiva instantánea se deducen las siguientes ecuaciones:

$$\tau_s = \frac{3p}{4} \psi_{qs} \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \quad (3)$$

$$p_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) = -\frac{3}{2} v_{ds} \frac{L_m}{L_s} i_{dr}$$

$$q_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds}) = -\frac{3}{2} \frac{v_{ds}}{L_s} \left( \frac{v_{ds}}{\omega_s} + L_m i_{qr} \right)$$

En síntesis, controlando la corriente en eje directo del rotor, se controla el par desarrollado por el aerogenerador, y controlando la corriente en eje de cuadratura del rotor se controlan los intercambios de potencia reactiva del estator. Asimismo, el control de estas corrientes implican la imposición de una tensión en el rotor del generador de inducción cuya amplitud y frecuencia se encuentra determinada por la dinámica de las dos componentes de la ley de Faraday del conjunto de ecuaciones (1). La particularidad de estas ecuaciones radica en el acoplamiento de las dinámicas de corriente y tensión del rotor en los respectivos ejes dq. Si no se actúa con el propósito de desacoplar la dinámica de las corrientes rotóricas, no será posible controlar en forma independiente el par y la potencia reactiva estática desarrollada por el generador de inducción.

### C. Desacople de dinámica de magnitudes del rotor

Considerando las simplificaciones realizadas según el conjunto de ecuaciones (2), la ley de Faraday en el rotor de la máquina se reduce a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} v_{dr} &= r_r i_{dr} + \sigma \frac{di_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \left[ \sigma i_{qr} - \frac{L_m}{L_s \omega_s} v_{ds} \right] \\ v_{qr} &= r_r i_{qr} + \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \sigma i_{dr} \\ \sigma &= L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \end{aligned} \quad (3)$$

El acoplamiento referido en el conjunto de ecuaciones (3) implica que el controlador a diseñar debe considerar la inclusión de lazos de alimentación directa para eliminar la influencia de los términos cruzados, y asegurar un desempeño aceptable del control de cada una de las componentes de corriente rotóricas en lazo cerrado, de acuerdo al esquema de control que se observa en la Fig.3.

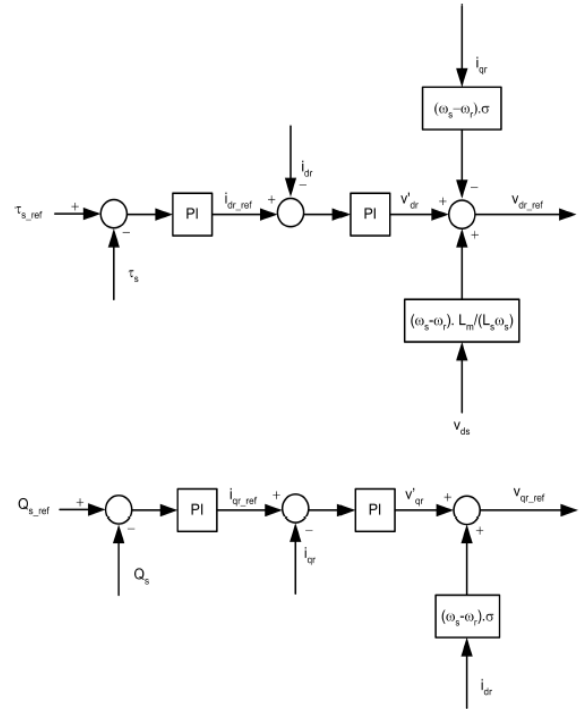


Fig.3: Controlador para el convertidor lado rotor de un DFIG

Las referencias de las componentes de tensión rotórica en ejes dq generadas de esta forma permitirán actuar sobre el control PWM de forma tal que se implemente el control independiente de las corrientes en eje directo y en eje de cuadratura, por lo tanto, del par desarrollado, y la potencia reactiva intercambiada entre el estator de la máquina y la red eléctrica. Las simulaciones que serán presentadas presuponen que el ancho de banda del control PWM es muy alto y por lo tanto, la transferencia entre la tensión del convertidor rotórico

y la referencia generada es unitaria.

## V. ZONAS OPERATIVAS

Si bien el objetivo principal del presente trabajo no es una descripción detallada del funcionamiento de las zonas operativas del generador, brevemente se hará una mención a las mismas debido a que son consecuencia directa de la implementación del sistema de control descrito anteriormente.

Al requerir el control tanto de las componentes de corriente como de tensión en el rotor del generador de inducción, se controla la potencia que circulará por el rotor de la máquina, y al mismo tiempo, la potencia que circulará por el estator, motivo por el cual, el esquema de control presentado es relevante al punto que determinará la característica de los intercambios de potencia que tomarán lugar en el aerogenerador.

Suponiendo que el aerogenerador se encuentra trabajando a una velocidad de viento constante, el modelo en régimen permanente derivará en las siguientes ecuaciones de intercambio de potencia (4), gráficamente representadas en la Fig.4:

$$p_s = \frac{3}{2} v_{ds} i_{ds} = \frac{3}{2} \frac{L_m^2}{L_s} \omega_s i_{dr} i_{qr}$$

$$p_r = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) = -\frac{3}{2} (\omega_s - \omega_r) \frac{L_m^2}{L_s} i_{dr} i_{qr} \quad (4)$$

$$p_t = p_s + p_r = \frac{3}{2} \frac{L_m^2}{L_s} \omega_r i_{dr} i_{qr}$$

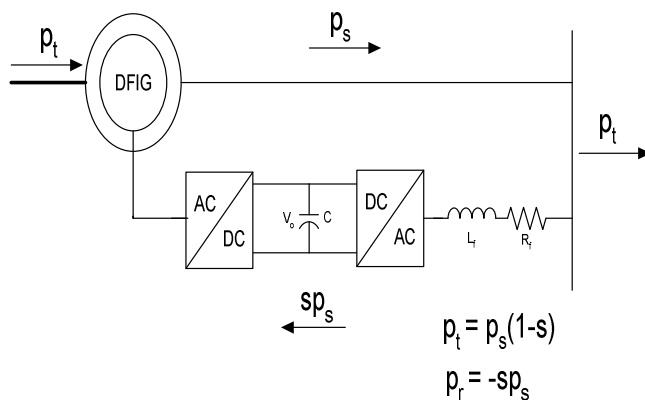


Fig.4: Intercambios de potencia activa instantánea en un DFIG.

Se puede observar que:

- 1) En régimen de operación subsíncrona ( $s > 0$ ), el estator de la máquina generará potencia suficiente para abastecer las necesidades propias de consumo, determinadas por el sistema de control del

convertidor estático, y entregar la potencia restante a la red eléctrica.

- 2) En caso de operación sincrónica ( $s=0$ ), no existiría, en términos ideales, intercambio de potencia activa a través del rotor de la máquina.
- 3) En caso de operación supersíncrona ( $s > 0$ ), el flujo de potencia en el rotor se revierte, aportando potencia tanto rotor como estator a la red eléctrica.

## VI. SIMULACIONES

Se presentarán dos escenarios de simulación en los cuales se mostrará la evolución de las corrientes desarrolladas en el rotor del generador de inducción frente a variaciones en la consigna de par y potencia reactiva en el estator. Al mismo tiempo se verificará la validez de las hipótesis realizadas para arribar a las ecuaciones que vinculan par y potencia reactiva con las respectivas componentes de corriente rotórica en eje directo y cuadratura.

### A. Simulación 1: Control de potencia reactiva instantánea a velocidad de viento constante.

La simulación realizada consiste en mantener la velocidad de viento constante en un valor tal que la potencia total generada por la máquina es 750kW y variar las consignas de potencia reactiva desarrollada en el estator de la siguiente forma: inicialmente, el estator no intercambia potencia reactiva con la red; a los 2 segundos de simulación, se cambia la consigna de reactiva, pasando a producir 150kVAr; a los 6 segundos, cambia nuevamente la consigna pasando a consumir 50kVAr, y finalmente a los 8 segundos se vuelve al estado inicial, es decir, no se intercambia potencia reactiva con la red (ver Fig.5).

A partir de la simulación se puede observar que la evolución de las corrientes en eje de cuadratura de rotor y estator son las que regulan la evolución de la potencia reactiva, en tanto que las corrientes en eje directo, correspondientes al control de par (o potencia activa), permanecen aparentemente constantes (ver Fig.6 y 7) como era de esperar del análisis previamente realizado. Al realizar una ampliación de las corrientes en eje directo (ver Fig.8 y 9), se puede observar la existencia de oscilaciones correspondientes a los transitorios de flujo magnético estático que fueron despreciados a efectos de llegar a las expresiones que vinculaban directamente al par y a la potencia reactiva a las corriente en eje directo y en cuadratura del rotor respectivamente, en los momentos que existe un cambio de consigna en la potencia reactiva a desarrollar por el estator. Esto indica que a pesar que el desacople no es perfecto, es razonable dada la amplitud y tiempo de asentamiento de los transitorios observados,

siendo estos más rápidos que los transitorios de inicialización del modelo dinámico (Fig.8 - Fig.9).

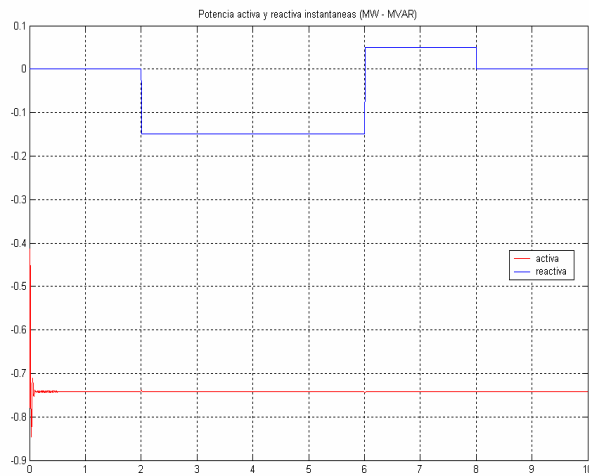


Fig.5: Consignas de potencia activa y reactiva instantáneas.

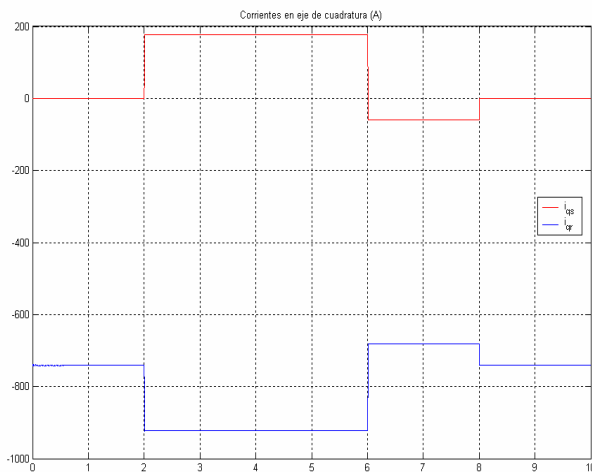


Fig.6: Corrientes  $i_{qr}$ ,  $i_{qs}$ .

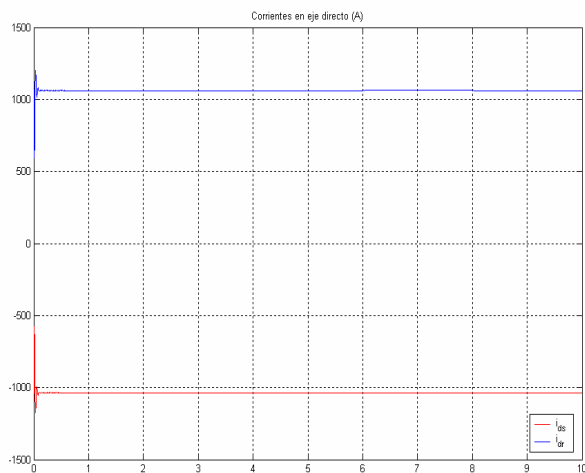


Fig.7: Corrientes  $i_{ds}$ ,  $i_{dr}$ .

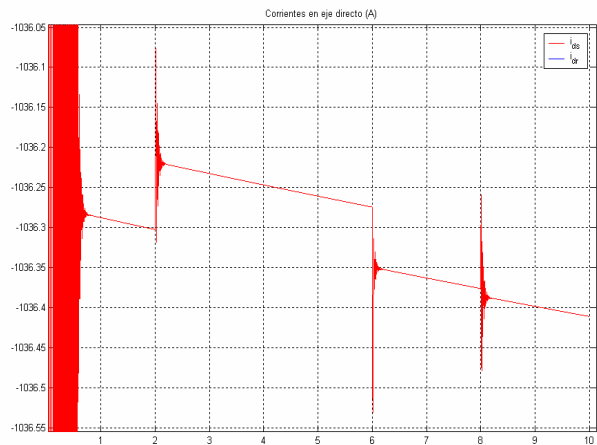


Fig.8: Ampliación  $i_{ds}$

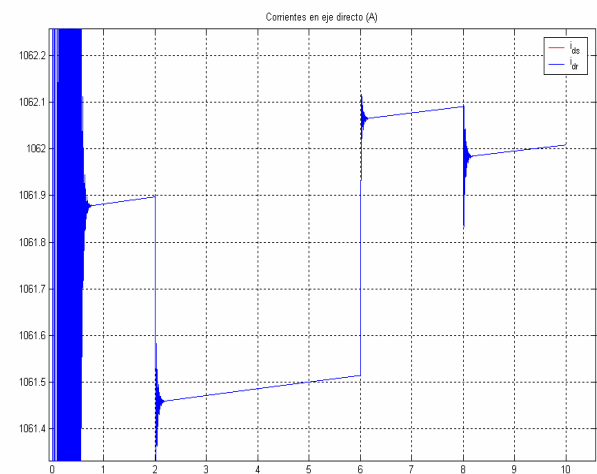


Fig.9: Ampliación  $i_{dr}$

**B. Simulación 2: Control de potencia reactiva instantánea frente a una rampa de velocidad de viento**

En esta simulación se conservará el patrón de consignas de potencia reactiva descritas en la simulación anterior. La diferencia radica en que la velocidad del viento (según Fig.10) aumentará en forma de rampa pasando por las tres regiones operativas que definen el funcionamiento de la turbina eólica, estableciendo una consigna de par dinámica y variando la referencia de corriente en eje directo en el rotor, y por tanto en el estator (ver Fig.11). Inicialmente el generador entrega 750kW de potencia a la red y a los 0.5 segundos de simulación comienza a aumentar la velocidad del viento, la evolución temporal de la potencia en estos instantes se debe a la aparición de la rampa en la zona de optimización de energía. A los 2.4 segundos entra en la zona de velocidades intermedias y a los 3.0 segundos se activa el control de ángulo de paso, limitando la potencia generada a 2.000kW.

Se puede observar en las Figs. 12 y 13 que la corriente en eje directo del rotor (y estator) controlan la dinámica de la potencia activa de la máquina, en tanto que las corrientes en eje de cuadratura controlan la dinámica de la potencia reactiva, de forma idéntica a lo expuesto en la primera simulación, observándose que es posible controlar en forma simultánea e independiente la potencia activa y la potencia reactiva. Finalmente en las Fig. 14, 15, 16, 17 se muestra el efecto del cambio de consigna de potencia reactiva y activa en las componentes de eje directo y de cuadratura de la corriente del rotor en forma respectiva, verificándose que los transitorios debidos a la componente transitoria del flujo del estator pueden ser despreciados y validando el esquema de desacople de potencia activa y reactiva propuesto.

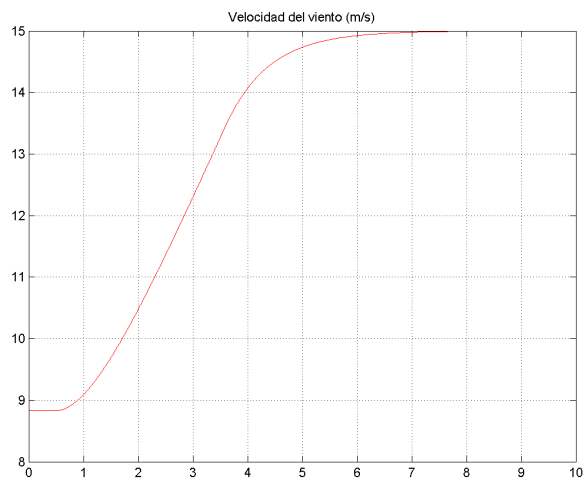


Fig.10: Velocidad de viento impuesta al aerogenerador

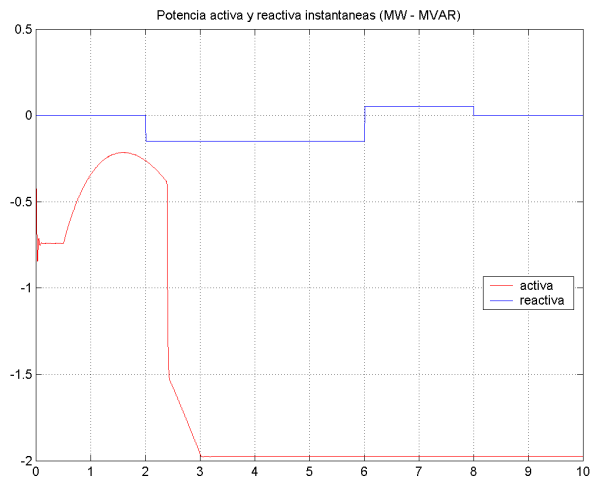


Fig.11: Consignas de potencia activa y reactiva instantáneas

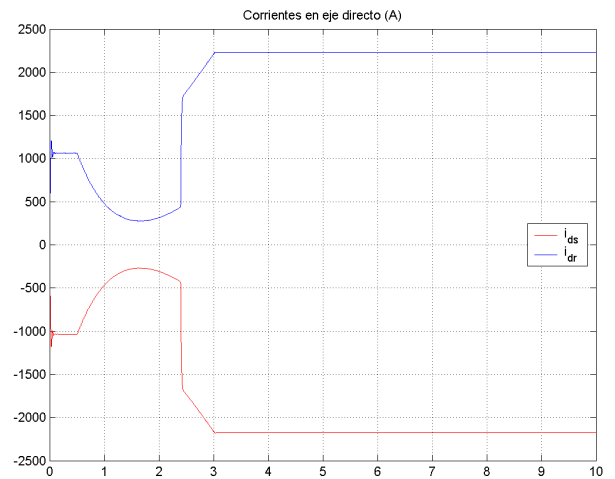


Fig.12: Corrientes  $i_{ds}$ ,  $i_{dr}$ .

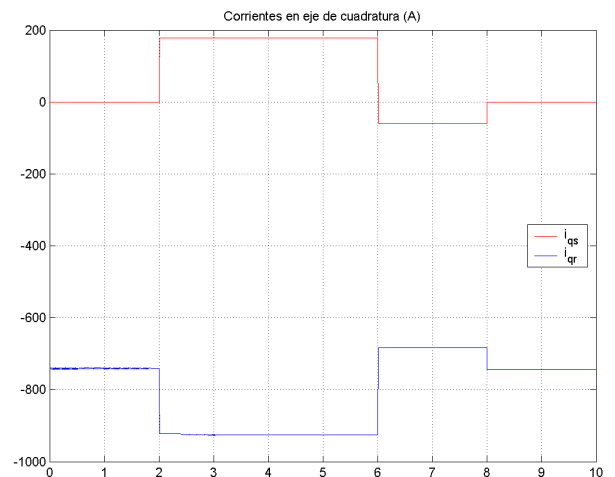


Fig.13: Corrientes  $i_{qs}$ ,  $i_{qr}$ .

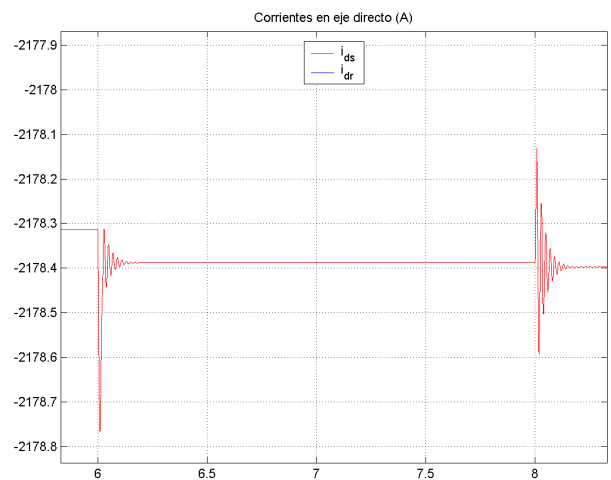


Fig.14: Detalle corriente  $i_{ds}$  frente a cambio de consigna de potencia reactiva.

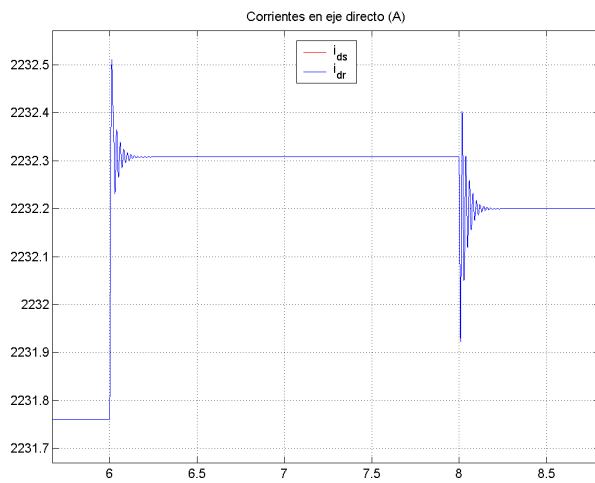


Fig. 15: Detalle corriente  $i_{dr}$  frente a cambio de consigna de potencia reactiva.

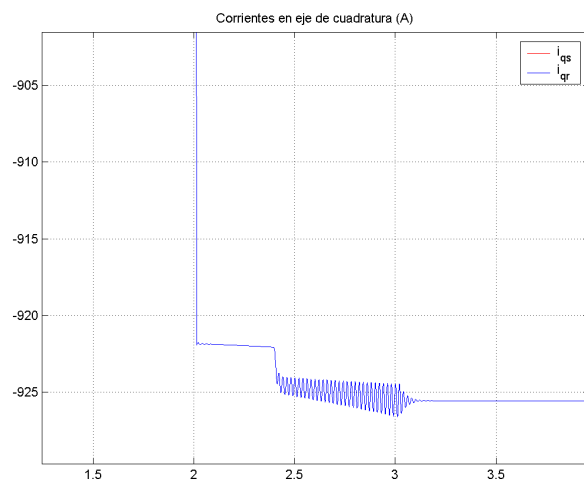


Fig. 16: Detalle corriente  $i_{qr}$  frente a cambio de zonas de operación de la turbina.

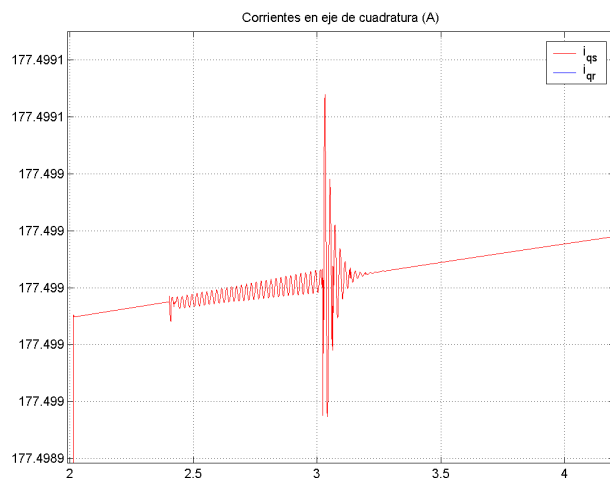


Fig. 17: Detalle corriente  $i_{qs}$  frente a cambio de zonas de operación de la turbina.

## VII. CONCLUSIONES

A partir de la implementación del modelo detallado en el presente trabajo se concluye que es posible implementar el control desacoplado de potencia activa y reactiva en el generador de inducción doblemente alimentado tal como se realiza en las máquinas sincrónicas, a partir de la generación adecuada de las referencias de tensión y frecuencia para alimentar el rotor del generador, siendo importante observar que a diferencia del generador sincrónico, la implementación del control desacoplado de potencia activa y reactiva se implementa necesariamente con la máquina de inducción trabajando a velocidad variable. Las consignas de tensión y frecuencia en el rotor se imponen en función del par y velocidad de referencia que genera el sistema de control de la turbina, en tanto que la referencia de potencia reactiva que intercambia el estator y la red deberá ser fijada de acuerdo a la política de operación de la máquina.

Por otra parte se debe recalcar la importancia de la validez de las hipótesis que conllevan a la reducción de orden del modelo de la máquina de inducción, a efectos de implementar el control, dado que permite visualizar claramente como se ven afectadas las diferentes magnitudes eléctricas de interés al actuar sobre las diferentes variables de estado.

## VIII. APÉNDICE

### A. Datos del generador

$U_n$ : 690V – 50Hz  
 $P_n$ : 2.000kW  
 $p$ : 4  
 $J_g$ : 70 kg.m<sup>2</sup>  
 $n_{g\_max}$ : 1620 r.p.m.  
 $r_s$ : 1.5mΩ  
 $r'_r$ : 2.0mΩ (referida al estator)  
 $L_m$ : 2.4mH  
 $L_s$ : 2.5mH  
 $L'_r$ : 2.5mH (referida al estator)

### B. Datos de la turbina y tren de engranajes

La curva  $C_p(\lambda, \beta)$  utilizada para las simulaciones correspondiente a la turbina de 2MW es la siguiente [2]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

El máximo absoluto es  $C_p(6.325, 0) = 0.4382$

$P_n$ : 2.000kW  
 $R$ : 37.5m  
 $\rho$ : 1.225 kg/m<sup>3</sup>

$J_t: 1.4 \times 10^6 \text{ kg.m}^2$   
 $n_{t\_max}: 18 \text{ r.p.m.}$   
 $G = 90$

## IX. REFERENCIAS

- [1] Fernando D. Bianchi, Hernán de Battista, Ricardo J. Mantz "Wind turbina control systems: principles, modelling and gain scheduling design," *Springer. 2006.*
- [2] A. Perdana, O. Carlson, and J.Persson. "Dynamic response of grid connected wind turbina with doubly fed induction generator during disturbances". *Nordic Workshop on power and industrial electronics. Trondheim 2004.*
- [3] Shuhui Li, Timothy A. Haskew. "Analysis of decoupled dq vector control in DFIG back-to-back PWM converter".
- [4] HU Jia-Bing, He Yi-kang. "Dynamic modelling and robust current control of wind turbina driven DFIG during external AC voltage dip". *Journal of Zhejiang University. 2006.*
- [5] Shuhui Li, Timothy A. Haskew. "Integrating electrical and aerodynamic characteristics for DFIG speed control study".
- [6] "Decoupled control of active and reactive power for a grid connected doubly fed induction generator". *DRPT2008 6-9 April 2008. Nanjing China.*
- [7] Lie Xu, Phillip Cartwright. "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy conversion" *IEEE Transactions on energy conversion. Vol.21, No.3, September 2006.*
- [8] D.Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk "Power control of a variable speed wind turbina driving a DFIG".
- [9] T. Gennam, E.M. Berkouk, B. Francois. "Modelling and control of a doubly fed induction generator (DFIG) based wind conversion system".
- [10] Thomas Ackermann. "Wind Power in Power Systems". *John Wiley & Sons. 2005*
- [11] Ion Boldea Syed A. Nasar. "The Induction Machine Handbook". CRC Press, 2002.
- [12] A. Kulka. "Pitch and torque control of variable speed wind turbines". *Msc.Thesis. Chalmers University of Technology. Goteborg.2004*
- [13] E. Muljadi. C.P. Butterfield "Pitch controlled variable speed wind turbina generation" *NREL/CP-500-27143. February 2000.*
- [14] J.G. Sloopweg, H.Polinder, W.L. Kling. "Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator"
- [15] Shuhui Li, Rajab Challao, Marty J. Nemmers. "Comparative study of DFIG power control using stator-voltage and stator-flux oriented frames".
- [16] F.Poitiers, M. Machmoum. R. Le Doeuff, M. E. Zaim. "Control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems". *Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Saint Nazaire, France.*
- [17] C. Jauch. "Stability and Control of Wind Farms in Power Systems" *Ph.D. Thesis RisØ National Laboratory. Roskilde. Denmark. 2006.*
- [18] V. Akhmatov. "Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amounts of wind power" *Ph.D. Thesis. Electric Power Engineering, Ørsted-DTU. Technical University of Denmark. 2003.*
- [19] T. Petru. T.Thiringer. "Modelling of wind turbines for power systems studies". *Power systems, IEEE transactions, 2002, 17, 1132-1139.*
- [20] Y. Li, A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini "Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies". *IEEE transactions on energy conversion. Vol.21. No.1. March 2006.*

## X. BIOGRAFÍA

**Fernando Berrutti** nació en Montevideo, Uruguay en 1980. Se graduó como Ingeniero Electricista en la Facultad de Ingeniería (UdelaR) en el año 2006. Actualmente es docente ayudante del Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería (UdelaR). Desde 2007 se desempeña como especialista en proyectos eléctricos en la Gerencia Proyectos y Normalización de UTE.