

# Efecto del modelado de los transitorios de red en la respuesta de aerogeneradores basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla ante huecos de tensión

L. Rouco, P. García y J. L. Zamora  
Universidad Pontificia Comillas  
E.T.S. de Ingeniería (ICAI), Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)  
C./ Alberto Aguilera, 23, 28015 Madrid  
Teléfono: 34-91-5406109, Fax: 34-91-5423176, Correo electrónico Luis.Rouco@iit.upco.es

M. Rodríguez  
Navantia  
Ferrol

J. A. Torres  
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
Las Palmas de Gran Canaria

## 1 Introducción

La generación eólica ha experimentado en España un desarrollo espectacular los últimos diez años. La generación eólica instalada a finales del año 2004 casi alcanzaba los 8000 MW. La energía eólica presenta características singulares con relación a otras tecnologías de generación eléctrica debido a: (1) el carácter aleatorio de la fuente de energía primaria (el viento) y (2) las características específicas del elemento de conversión electromecánica de la energía.

La integración a gran escala de la generación eólica en el sistema eléctrico presenta varios problemas. Entre los cuales merece la pena destacar [1]: Programación horaria, control frecuencia - potencia, control tensión - reactiva y estabilidad.

Este artículo está interesado por los efectos de la generación eólica sobre la estabilidad del sistema. La ocurrencia de una falta en la red produce una reducción de la tensión de alimentación de los aerogeneradores durante un corto periodo de tiempo (hueco de tensión). Ello puede provocar la desconexión de los mismos por actuación de sus protecciones de mínima tensión. Cuando gran número de parques eólicos están conectados a la red de transporte debido a su elevada potencia (como es el caso de España), la ocurrencia de una falta en la misma puede dar lugar a la desconexión de un volumen elevado de generación eólica debido a la cercanía eléctrica de los parques eólicos a la citada red y ello conducir al colapso del sistema.

La respuesta de los aerogeneradores ante huecos de tensión depende de la tecnología de los mismos. Las tecnologías de aerogeneradores más difundidas están basadas en máquina asíncronas de jaula de ardilla,

máquinas asíncronas doblemente alimentadas y máquinas síncronas multipolares.

Este artículo estudia los efectos del modelado de los transitorios de red en la respuesta de aerogeneradores basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla. Los estudios de estabilidad de sistemas de energía eléctrica desprecian los transitorios de red debido a dos razones [2]: (1) la frecuencia de los transitorios de red (la frecuencia fundamental) está alejada de las frecuencias de los transitorios electromecánicos estudiados en estudios de estabilidad y (2) el tamaño del modelo dinámico resultante haría imposible estudios prácticos de grandes sistemas.

Este artículo analiza el efecto del modelado de los transitorios de red en la respuesta de aerogeneradores basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla ante huecos de tensión considerando la presencia de condensadores de compensación de potencia reactiva. Se evalúa el efecto sobre la máxima duración del hueco sin que se produzca la pérdida de sincronismo de la máquina y sobre las magnitudes fundamentales (deslizamiento, tensión y par electromagnético). En la referencia [3] se abordó este estudio ignorando el efecto de los condensadores de compensación.

El artículo está organizado como sigue. La sección 2 detalla el modelo de conexión de los aerogeneradores a la red. La sección 3 presenta el modelo del parque incluyendo los transitorios de red. La sección 4 proporciona el modelo del parque despreciando los transitorios de red. La sección 5 contiene los resultados de simulación de los casos considerados. La sección 6 ofrece las conclusiones del artículo.

**Palabras clave:** aerogeneradores, máquinas de inducción de jaula de ardilla, huevos de tensión, transitorios de red.

## 2 Modelo de la conexión de los aerogeneradores a la red

Los grandes parques eólicos están conectados a la red de alta tensión (132 and 220 kV). En este caso, los aerogeneradores están conectados a la red de alta tensión a través de dos transformadores baja tensión/media tensión (BT/MT) y media tensión/alta tensión (MT/AT) de acuerdo con el diagrama unifilar de la Figura 1. Valores típicos de las tensiones de cortocircuito de los citados transformadores son 6% y 12% respectivamente. En este trabajo se representan los aerogeneradores de un parque por un aerogenerador equivalente y se desprecian las impedancias de los cables de conexión de los aerogeneradores a las barras de MT.

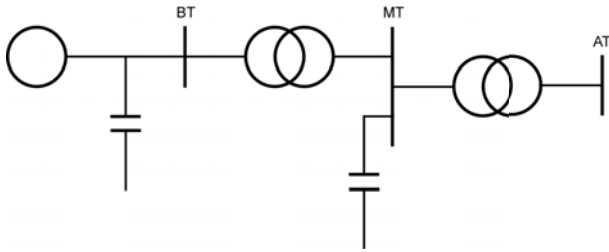


Figura 1: Diagrama unifilar de la conexión de un aerogenerador a la red de alta tensión.

La reactancia equivalente de la red está determinada por la potencia de cortocircuito de la misma. La potencia nominal del parque debe ser como máximo 1/20 de la potencia de cortocircuito [4]. En este caso la reactancia equivalente de la red es del 5% en la potencia base del aerogenerador equivalente y los transformadores MVA base. Los aerogeneradores están equipados con condensadores de compensación de potencia reactiva conectados en baja tensión. Se ha considerado que los condensadores de compensación en baja tensión mejoran el factor de potencia la máquina de inducción hasta 0.97.

Tras la aprobación del Real Decreto 436/2004 los generadores del régimen especial, y en particular los parques eólicos están incentivados para el mantenimiento de una banda de factor de potencia en horas punta, llano y valle [5]. Ello se logra instalando baterías de condensadores en las barras de media tensión que típicamente compensan las pérdidas de potencia reactiva en las los transformadores en condiciones de plena carga. En consecuencia, en el modelo de conexión de los aerogeneradores a la red se va a considerar la conexión de condensadores de compensación no sólo en baja tensión sino en media tensión también.

## 3 Modelo del parque eólico incluyendo los transitorios de red

### 3.1 Modelo del generador de inducción

El modelo de la máquina de inducción en ejes directo y transversal en un sistema de referencia que gira a la velocidad de sincronismo y que incluye los transitorios de estator está descrito por las ecuaciones:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s}{dt} + j\omega_s \boldsymbol{\Psi}_s \quad (1)$$

$$\mathbf{0} = R_r \mathbf{i}_r + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r}{dt} + j\omega_r \boldsymbol{\Psi}_r$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (2)$$

donde:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_s \\ \boldsymbol{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_m \\ \mathbf{L}_m & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix}$$

$$T_e = \boldsymbol{\Psi}_{qr} \mathbf{i}_{dr} - \boldsymbol{\Psi}_{dr} \mathbf{i}_{qr}$$

$$T_m = T_{e0}$$

Las tensiones  $\mathbf{v}$ , corrientes  $\mathbf{i}$  y flujos  $\boldsymbol{\Psi}$  son magnitudes complejas, cuyas partes real e imaginaria son las proyecciones de la magnitud compleja correspondiente en los ejes directo y transversal. Los subíndices “s” y “r” indican respectivamente los circuitos del estator y del rotor. Las matrices de inductancia  $\mathbf{L}$  son matrices diagonales  $2 \times 2$ .

### 3.2 Modelo del parque eólico cuando sólo hay compensación de potencia reactiva en baja tensión

Cuando se considera que en el parque eólico sólo hay compensación de potencia reactiva en baja tensión, el modelo de la conexión del aerogenerador a la red en ejes directo y transversal en un sistema de referencia que gira a la velocidad de sincronismo está descrito por las ecuaciones:

$$\mathbf{v}_e = R_e \mathbf{i}_e + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\Psi}_e}{dt} + j\omega_s \boldsymbol{\Psi}_e + \mathbf{v}_s$$

$$\mathbf{i}_e = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_{c1} \quad (3)$$

$$\mathbf{i}_c = \frac{C_1}{\omega_0} \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} + j\omega_s C \mathbf{v}_s$$

donde:

$$\boldsymbol{\Psi}_e = \mathbf{L}_e \mathbf{i}_e$$

La resistencia  $R_e$  e inductancia  $L_e$  incluyen no sólo la resistencia y la inductancia equivalente de la red sino también la resistencia y la inductancia de los transformadores BT/MT y MT/AT.

Si las ecuaciones (1) y (3) se escriben conjuntamente y se eliminan las corrientes resulta:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{d\psi_s}{dt} \\ \frac{d\psi_r}{dt} \\ \frac{d\psi_e}{dt} \end{bmatrix} &= -\omega_0 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_m & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_m & \mathbf{L}_{rr} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_e \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \\ \psi_e \end{bmatrix} \\ &- \omega_0 \begin{bmatrix} j\omega_s \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & j\omega_r \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & j\omega_s \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \\ \psi_e \end{bmatrix} \\ &+ \omega_0 \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_e \end{bmatrix} \\ \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} &= \frac{\omega_0}{C_1} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_m & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_m & \mathbf{L}_{rr} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_e \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \\ \psi_e \end{bmatrix} \\ &- \omega_0 \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Cuando las ecuaciones (2), (4) y (5) se escriben conjuntamente de forma compacta se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (6)$$

siendo  $\mathbf{x}$  el vector de variables de estado y  $\mathbf{u}$  el vector de entradas:

$$\mathbf{x}^T = [\psi_s^T \quad \psi_r^T \quad \psi_e^T \quad \mathbf{v}_s^T \quad \omega_r]$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{v}_e$$

### 3.3 Modelo del parque cuando hay compensación de potencia reactiva en baja y media tensión

Cuando se considera que en el parque eólico hay compensación de potencia reactiva tanto en baja como en media tensión, el modelo de la conexión del aerogenerador a la red en ejes directo y transversal en un sistema de referencia que gira a la velocidad de sincronismo está descrito por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{c2} &= R_t \mathbf{i}_t + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_t}{dt} + j\omega_s \psi_t + \mathbf{v}_s \\ \mathbf{i}_t &= \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_{c1} \\ \mathbf{i}_{c1} &= \frac{C_1}{\omega_0} \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} + j\omega_s C_1 \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_e &= R_e \mathbf{i}_e + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_e}{dt} + j\omega_s \psi_e + \mathbf{v}_{c2} \\ \mathbf{i}_e &= \mathbf{i}_t + \mathbf{i}_{c2} \\ \mathbf{i}_{c2} &= \frac{C_2}{\omega_0} \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} + j\omega_s C_2 \mathbf{v}_s \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

$$\psi_t = \mathbf{L}_t \mathbf{i}_t$$

La resistencia  $R_t$  y la inductancia  $L_t$  son del transformador BT/MT. La resistencia  $R_e$  y la inductancia  $L_e$  incluyen ahora no sólo la de la resistencia e inductancia equivalente de la red sino también la resistencia y la inductancia del transformador MT/AT. La capacidad  $C_2$  corresponde al condensador de compensación conectado en las barras de MT.

Si las ecuaciones (1) y (7) se escriben conjuntamente y se eliminan las corrientes resulta:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{d\psi_s}{dt} \\ \frac{d\psi_r}{dt} \\ \frac{d\psi_t}{dt} \\ \frac{d\psi_e}{dt} \end{bmatrix} &= -\omega_0 \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_m & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_m & \mathbf{L}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_e \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \\ \psi_t \\ \psi_e \end{bmatrix} \\ &- \omega_0 \begin{bmatrix} j\omega_s \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & j\omega_r \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & j\omega_s \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & j\omega_s \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \\ \psi_t \\ \psi_e \end{bmatrix} \\ &+ \omega_0 \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_{c2} \\ \mathbf{v}_e \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} \\ \frac{d\mathbf{v}_{c2}}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{\omega_0}{C_1} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \frac{\omega_0}{C_1} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\frac{\omega_0}{C_2} \mathbf{I} & \frac{\omega_0}{C_2} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_m & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_m & \mathbf{L}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_e \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \\ \psi_t \\ \psi_e \end{bmatrix} \\ &- \omega_0 \begin{bmatrix} j\omega_s \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & j\omega_s \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ \mathbf{v}_{c2} \\ \mathbf{v}_e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Cuando las ecuaciones (2), (8) y (9) se escriben conjuntamente de forma compacta se obtiene también un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma (6) donde el vector de variables de estado  $\mathbf{x}$  ahora es:

$$\mathbf{x}^T = [\psi_s^T \quad \psi_r^T \quad \psi_e^T \quad \mathbf{v}_s^T \quad \mathbf{v}_{c2}^T \quad \omega_r]$$

## 4 Modelo del parque eólico despreciando los transitorios de red

Cuando se desprecian los transitorios de estator, el modelo eléctrico de la máquina de inducción (descrito

por las ecuaciones (1) pasa a estar descrito por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_s &= R_s \mathbf{i}_s + j\omega_s \boldsymbol{\psi}_s \\ \mathbf{0} &= R_r \mathbf{i}_r + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} + j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \end{aligned} \quad (10)$$

El modelo de la conexión de la máquina de inducción a la red está descrita por las ecuaciones de la red en términos de la matriz de admitancias nodales:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{0} \\ -\mathbf{i}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ee} & \mathbf{Y}_{ec} & \mathbf{Y}_{es} \\ \mathbf{Y}_{ce} & \mathbf{Y}_{cc} & \mathbf{Y}_{cs} \\ \mathbf{Y}_{se} & \mathbf{Y}_{sc} & \mathbf{Y}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

Si las ecuaciones (10) y (11) se escriben conjuntamente quedan en la forma:

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} &= -\omega_0 R_r \mathbf{i}_r - \omega_0 j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \quad (12) \\ \begin{bmatrix} \mathbf{i}_r \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (\mathbf{L}^{-1})_{rr} & (\mathbf{L}^{-1})_{rm} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ (\mathbf{L}^{-1})_{mr} & (\mathbf{L}^{-1})_{ms} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -j\omega_s & -R_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{Y}_{ec} & \mathbf{Y}_{es} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{cc} & \mathbf{Y}_{cs} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{sc} & \mathbf{Y}_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_r \\ \boldsymbol{\psi}_s \\ \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_e \\ \mathbf{v}_c \\ \mathbf{v}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{ee} \\ \mathbf{Y}_{ce} \\ \mathbf{Y}_{se} \end{bmatrix} \mathbf{v}_e \end{aligned} \quad (13)$$

La solución del sistema de ecuaciones (13) proporciona la expresión de las corrientes del rotor  $\mathbf{i}_r$  es función de los flujos del rotor  $\boldsymbol{\psi}_r$  y de la tensión detrás de la impedancia equivalente de la red  $\mathbf{v}_e$ . Cuando las ecuaciones (2) y (13) se escriben conjuntamente de forma compacta se obtiene también un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma (6) donde el vector de variables de estado  $\mathbf{x}$  ahora es:

$$\mathbf{x}^T = [\boldsymbol{\psi}_r^T \quad \omega_r]$$

## 5 Resultados de simulación

Se estudia la respuesta de un aerogenerador de 660 kW que opera en condiciones nominales ante un hueco de tensión abrupto en la tensión detrás de la reactancia equivalente de la red. La tensión cae de forma abrupta hasta el 20% de la tensión nominal durante el hueco. Se consideran dos casos de estudio: sin y con compensación de potencia reactiva en media tensión.

### 5.1 Caso sin compensación de potencia reactiva en media tensión

La máxima duración del hueco sin que se produzca la pérdida de estabilidad es 290 milisegundos cuando no se representan los transitorios de red y 300 milisegundos

cuando se representan los transitorios de red. La capacidad de almacenamiento de energía de los condensadores de compensación y de los flujos en los devanados de las máquinas no afecta significativamente a la capacidad del aerogenerador de aguantar los huecos de tensión. Sin embargo, la respuesta de las magnitudes fundamentales del circuito sí están afectadas por el modelado de los transitorios de red.

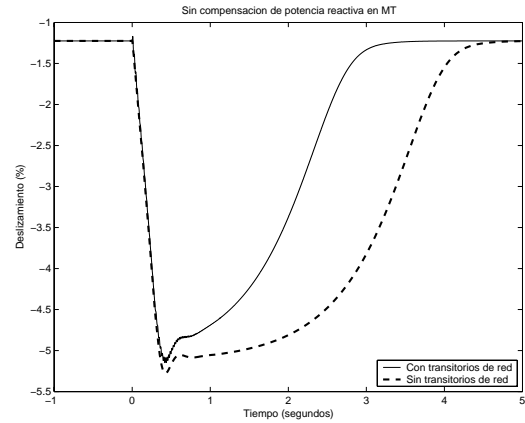


Figura 2: Caso sin compensación de potencia reactiva en MT: Deslizamiento.

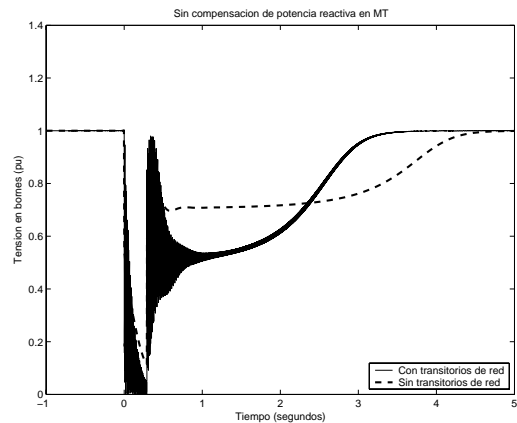


Figura 3: Caso sin compensación de potencia reactiva en MT: Tensión en bornes.

La Figura 2 compara la evolución del deslizamiento del aerogenerador cuando se modelan los transitorios de red y cuando se ignoran los mismos en el caso en que el hueco tiene una duración de 290 milisegundos. Se aprecia que cuando el hueco está aplicado, el deslizamiento (en valor absoluto) crece con la misma pendiente en los casos considerados. Sin embargo, cuando se produce la eliminación del hueco el deslizamiento se recupera más rápidamente cuando se considera la representación de los transitorios de red.

La Figura 3 compara la evolución de la tensión en bornes del aerogenerador en los casos comparados en la Figura 2. Se aprecia como mientras que la profundidad del hueco de tensión en bornes de la máquina es mayor cuando se modelan los transitorios de red, la duración del hueco es menor. La menor duración del hueco es

resultado del restablecimiento más rápido de la velocidad del generador.

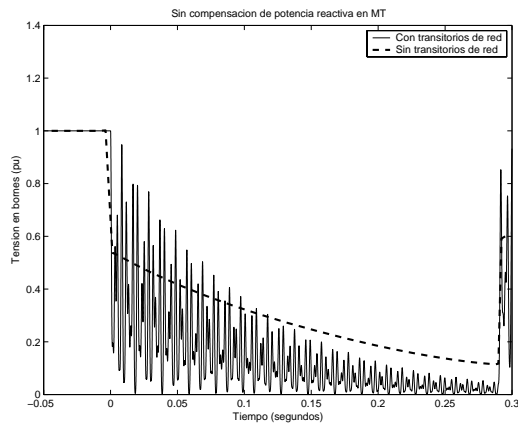


Figura 4: Caso sin compensación de potencia reactiva en MT: Tensión en bornes (detalle durante el hueco).

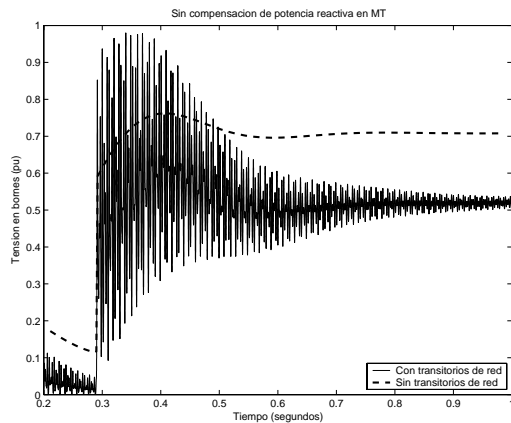


Figura 5: Caso sin compensación de potencia reactiva en MT: Tensión en bornes (detalle después de liberado el hueco).

La Figura 3 no muestra con detalle las oscilaciones de la frecuencia fundamental presentes en la tensión en bornes cuando se representan los transitorios de red. La Figura 4 compara la variación de la tensión en bornes durante el hueco de tensión. En este caso se aprecian las oscilaciones de la frecuencia fundamental presente en la tensión en bornes. El valor medio de la tensión en bornes cuando se representan los transitorios de red es inferior a la tensión en bornes cuando se desprecian los transitorios de red. La Figura 5 compara la variación de la tensión después de la eliminación del hueco.

La Figura 6 y la Figura 7 muestran respectivamente la evolución del par electromagnético durante el hueco y después de la eliminación del hueco. El par electromagnético cuando se desprecian los transitorios de red está próximo al valor medio del par que se alcanza cuando se desprecia los transitorios de red. El efecto de la oscilación de la frecuencia fundamental en el par se traduce en un proceso de frenado tras el hueco más rápido que cuando se desprecian los transitorios de red.

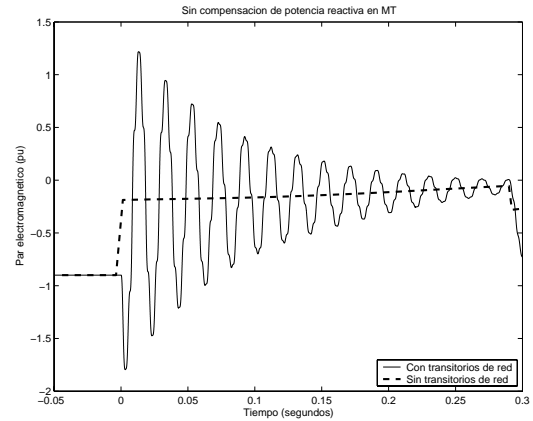


Figura 6: Caso sin compensación de potencia reactiva en MT: Par electromagnético (detalle durante el hueco).

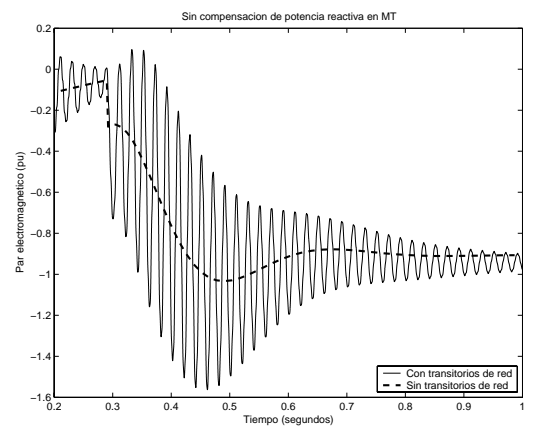


Figura 7: Caso sin compensación de potencia reactiva en MT: Par electromagnético (detalle después de liberado el hueco).

## 5.2 Caso con compensación en media tensión

La máxima duración del hueco sin que se produzca la pérdida de estabilidad es 280 milisegundos cuando no se representan los transitorios de red y 290 milisegundos cuando se representan los transitorios de red. La capacidad de almacenamiento de energía de los condensadores de compensación en media tensión considerados ahora no afecta significativamente a la capacidad del aerogenerador de aguantar los huecos de tensión.

La Figura 8 compara la evolución del deslizamiento del aerogenerador cuando se modelan los transitorios de red y cuando se ignoran los mismos en el caso en que el hueco tiene una duración de 280 milisegundos. También en el caso que hay compensación de potencia reactiva en media tensión se aprecia el mismo comportamiento del deslizamiento que se tenía sin compensación de potencia reactiva en media tensión: el deslizamiento (en valor absoluto) crece con la misma pendiente en los casos considerados y cuando se produce la eliminación del hueco el deslizamiento se recupera más rápidamente cuando se considera la representación de los transitorios de red.

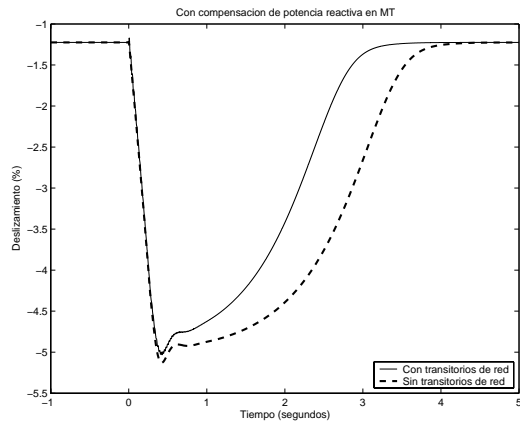


Figura 8: Caso con compensación de potencia reactiva en MT: Deslizamiento.

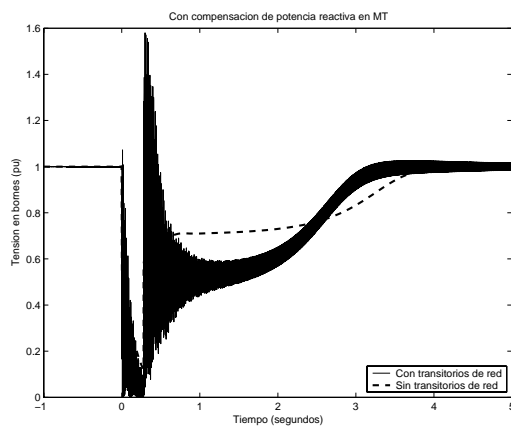


Figura 9: Caso con compensación de potencia reactiva en MT: Tensión en bornes.

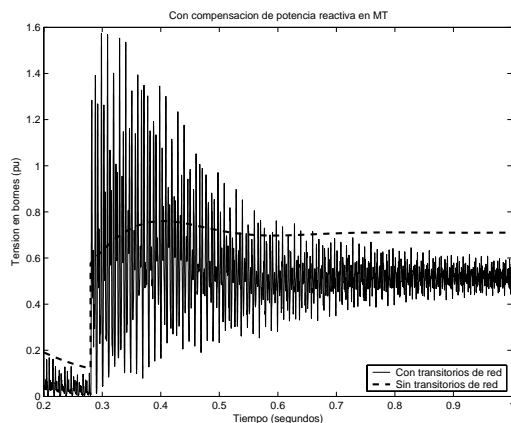


Figura 10: Caso con compensación de potencia reactiva en MT: Tensión en bornes (detalle después de liberado el hueco).

La Figura 9 compara la evolución de la tensión en bornes del aerogenerador representado y despreciando los transitorios de red. Se vuelve apreciar como mientras que la profundidad del hueco de tensión en bornes de la máquina es mayor cuando se modelan los transitorios de red, la duración del hueco es menor. La menor duración del hueco es resultado del restablecimiento más rápido de la velocidad del generador. Sin embargo, la tensión máxima que se alcanza en bornes del generador una vez liberado el

hueco alcanza prácticamente del 160% de la tensión nominal. Dicha sobretensión no se pone de manifiesto cuando se desprecian los transitorios de red.

## 6 Conclusiones

Los modelos para el estudio de la estabilidad de los sistemas eléctricos desprecian los transitorios de red. Los estudios de estabilidad de parques eólicos también los desprecian. Los parques eólicos basados en máquinas de inducción de jaula de ardilla están equipados con condensadores de compensación de potencia reactiva conectados en bornes de los aerogeneradores (baja tensión) y en las barras de media tensión de la subestación media tensión/alta tensión del parque eólico.

Este artículo ha analizado el efecto de despreciar los transitorios de red cuando el parque eólico está equipado con condensadores de compensación en baja y media tensión. La representación de los transitorios de red no afecta a la duración máxima del hueco que puede soportar el aerogenerador sin que pierda sincronismo. Sin embargo, sí afecta al proceso de frenado y de recuperación de la tensión. Además cuando se representan los transitorios de red y se considera la presencia de condensadores de compensación tanto en baja como en media tensión se pone de manifiesto la aparición de sobretensiones que llegan al 160% de la tensión cuando se produce la eliminación del hueco.

## 7 Referencias

- [1] NetWork of Experts on Wind Power, "Wind Power in the UCTE Interconnected System", 25 November 2004, Disponible en [www.ucte.org](http://www.ucte.org).
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, New York, 1994.
- [3] P. Ledesma, Análisis Dinámico de Sistemas Eléctricos con Generación Eólica, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2001.
- [4] Ministerio de Industria y Energía, "Normas administrativas y técnicas para funcionamiento y conexión a las redes eléctricas de centrales hidroeléctricas de hasta 5.000 kVA y centrales de autogeneración eléctrica". B.O.E. No. 219, 12 Septiembre 1985.
- [5] Ministerio de Economía, "Real Decreto 436/2004 de 12 de marzo de 2004 por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial". B.O.E. No. 85, 8 de Abril de 2004.