



CONTROL DE TENSION EN SISTEMAS DE GENERACION EOLICA USANDO GENERADORES DE INDUCCION DOBLEMENTE ALIMENTADOS

E. Toledo*

L. Aromataris**

***CEED. Universidad Nacional de Misiones**

**** GASEP. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Río Cuarto**

RESUMEN

El rápido crecimiento de la generación de energía eólica trae consigo nuevos requerimientos para la integración de turbinas eólicas a la red. Esto se debe a que en los últimos años alrededor del mundo, las plantas de generación convencionales están siendo reemplazadas por plantas de generación eólica. Dentro de los requerimientos se establece que estas nuevas tecnologías deben ofrecer servicios auxiliares similares a los de las plantas convencionales, como lo es el control de tensión en estado estable y también durante fallas cercanas a la planta de generación. En este trabajo se explora y compara el comportamiento de distintas alternativas de control de voltaje de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), que es la tecnología de generación eólica más usada en la actualidad. Para ello se investiga el comportamiento de una red de transmisión ante una perturbación que pone en peligro la estabilidad de tensión de largo plazo de la misma. Para ello se considerará, en el primer caso, que el control de tensión de la barra terminal de la planta eólica se realizará únicamente a través del convertidor del lado del rotor, mientras que en el segundo caso, el control de tensión contará también con el aporte adicional de potencia reactiva entregada por el convertidor del lado de la red. Los resultados mostrarán la importancia que tiene este aporte adicional de potencia reactiva para la estabilidad de tensión del sistema.

PALABRAS-CLAVE

Energía eólica, estabilidad de tensión, control de tensión, generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), LVRT, control coordinado, control de potencia reactiva, estrategias de control, modelo DFIG.

1. INTRODUCCIÓN

El rápido desarrollo de la generación de energía eólica trae consigo nuevos requerimientos para la integración de las turbinas eólicas a la red. Estos requerimientos están relacionados a los servicios auxiliares que las turbinas eólicas pueden ofrecer, como ser el control de tensión y la habilidad de permanecer conectadas durante huecos de tensión (LVRT). [1]

Pero no todas las tecnologías de generación eólica son capaces de proveer servicios auxiliares. Dentro de las tecnologías existentes, la más difundida es la máquina de inducción doblemente alimentada (DFIG en inglés), la cual tiene la capacidad de contribuir con potencia reactiva para el control de tensión de la red [2]. En esta turbina eólica el circuito del estator está conectado directamente a la red,

mientras que el circuito del rotor se conecta mediante un convertidor electrónico. La potencia que pasa por el convertidor oscila entre el 20 y 30 % de la potencia nominal dependiendo solamente del margen de variación del deslizamiento y los requerimientos de potencia reactiva. Las pérdidas en el convertidor electrónico de potencia son reducidas, comparado con un sistema en donde se debe convertir la potencia total tal como ocurre en las turbinas eólicas cuyo generador es sincrónico. Esto reduce el costo del convertidor ya que es de menor tamaño. Debido a que es una máquina eólica de velocidad variable permite reducir las fluctuaciones de tensión en el punto de conexión a la red y permiten tener un control independiente de la potencia activa y reactiva que se entrega [3]. Otro beneficio es que se puede ajustar la velocidad del rotor en función de la velocidad del viento, de tal forma que la eficiencia aerodinámica sea la óptima.

El control de tensión a través de los generadores DFIG ha sido discutido en varios artículos. Simulaciones dinámicas ilustrando la acción de control de tensión en turbinas de velocidad variable es presentado en [4]. En este artículo se comparan las diferentes corrientes de estado estable del convertidor del lado del rotor (RSC, siglas en inglés), para diferentes escenarios de absorción y generación de potencia reactiva (Q). Sin embargo, no considera el aporte de potencia reactiva que puede entregar el convertidor del lado de la red (GSC, siglas en inglés). Los límites de capacidad de entregar potencia reactiva desde el estator del generador DFIG es estudiando en [5], pero en este estudio no se considera el aporte del GSC. Diferentes algoritmos de control de tensión son sugeridos en [6], donde se utiliza únicamente el GSC, sin considerar la contribución significativa que aporta el RSC.

En el presente trabajo se compara el comportamiento de una red de transmisión altamente cargada cuyos requerimientos de potencia reactiva están cerca del límite disponible. En estas condiciones se aplicara una perturbación que pone en peligro la estabilidad de tensión de largo plazo. Para ello se considerará, además del control convencional de tensión producido por máquinas sincrónicas, el control de tensión aportado por un parque eólico compuesto por turbinas DFIG. En el primer caso se considerará que el control de tensión en la barra terminal de la turbina eólica será realizado por el convertidor del lado del rotor (RSC), sistema comúnmente utilizado para este tipo de máquinas, aportando potencia activa y reactiva en forma independiente. El convertidor del lado de la red (GSC) solamente realizará aportes de potencia activa. En el segundo caso, ambos convertidores podrán controlar tensión y aportar potencia activa y reactiva a través de ambos.

Los resultados mostrarán que en el segundo caso, el aporte adicional de potencia reactiva puede ser determinante para mantener o no la estabilidad de tensión del sistema.

2. CAPACIDAD DE POTENCIA REACTIVA DE DFIG

En la figura 1 se muestra el esquema de un generador DFIG donde se puede apreciar un sistema mecánico de engranajes que acopla las palas con el generador asincrónico. Se observa también la conexión directa desde el estator a la red de transmisión. El rotor está conectado a un convertidor electrónico back-to-back que consta de dos dispositivos electrónicos independientes separados por una barra que mantiene un nivel de tensión continua constante.

Sobre el lado del rotor se puede apreciar el convertidor RSC mientras que sobre el lado de la red se muestra el convertidor GSC. La figura 1 muestra el diagrama esquemático del sistema DFIG.

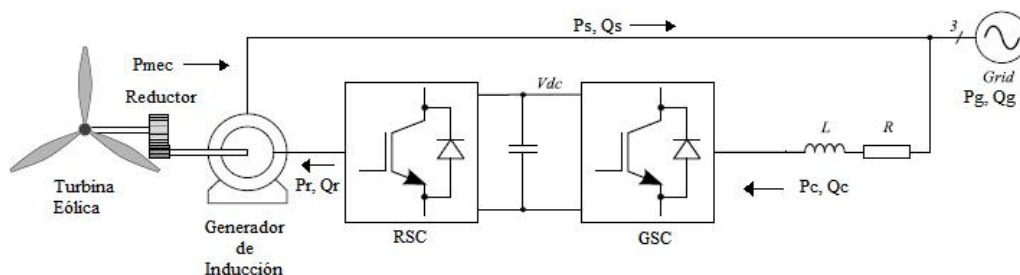


Figura 1 - Diagrama esquemático del sistema de generación DFIG

El convertidor del lado del rotor, RSC, controla independientemente la potencia activa y reactiva de la máquina. Este control se realiza a través de los ejes d q , los cuales se encuentran referenciados en el sistema del estator y son ortogonales entre sí. De esta forma, la componente d de la corriente del rotor es usada para controlar la potencia reactiva y la componente q de la corriente del rotor es usada para controlar el torque de la turbina eólica. Este control consta de dos controles PI en cascada. El primero es el control PQ, el cual recibe la potencia activa y reactiva medida en la red y la compara con las de referencia, pasando luego por un control PI que tiene como salida las corrientes de referencia. Estas señales entran al segundo control, que es el control de corriente, el cual compara estas referencias con las corrientes medidas y a través de un nuevo control PI cambian la tensión del rotor [7].

El convertidor del lado de la red, GSC, es el que mantiene el voltaje DC en un valor predefinido, independiente de la magnitud y dirección de la potencia del rotor. En este caso el convertidor intercambia solo potencia activa con la red, por lo tanto, la transmisión de potencia reactiva desde la máquina doblemente alimentada hacia la red se realiza a través del estator.

Sin embargo si se agrega al GSC un control PI adicional que tenga en cuenta la señal de error de la tensión, es posible que la máquina pueda también emitir potencia reactiva adicional a través de este convertidor, aumentando el aporte de potencia reactiva en situaciones donde se requiera.

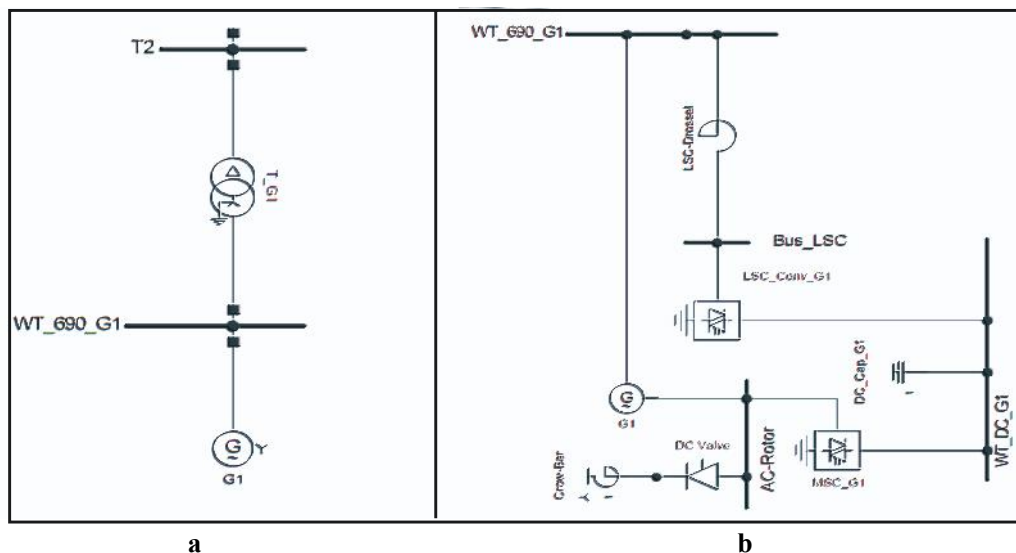


Figura 2 – Modelos de librería DigSilent. a) Modelo DFIG integrado b) Modelo DFIG en componentes

En el presente trabajo, para realizar simulaciones sobre el sistema eléctrico en estudio y modelar ambos tipos de controles de DFIG se utilizó el programa DigSilent ya que posee una librería de modelos de máquinas DFIG que contemplan ambos tipos de controles. Uno de los modelos es integrado, es decir que el generador y los controles RSC y GRC forman un bloque donde el usuario no puede acceder a las variables intermedias. Este modelo controla la tensión terminal solamente a través del convertidor RSC mientras que el GSC emite o consume solamente potencia activa (Figura 2.a). La librería ofrece también otra alternativa donde los componentes de la planta están modelados en forma separada (Figura 2.b) [8]. De esta manera se puede acceder a controles intermedios de forma que el convertidor GSC puede aportar una porción de la potencia reactiva a fin de colaborar con el control de tensión.

3. CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio se consideró un sistema formado por 14 barras que está compuesto por distintos elementos que hacen al funcionamiento del mismo. En la figura 3 podemos observar la topología del mismo.

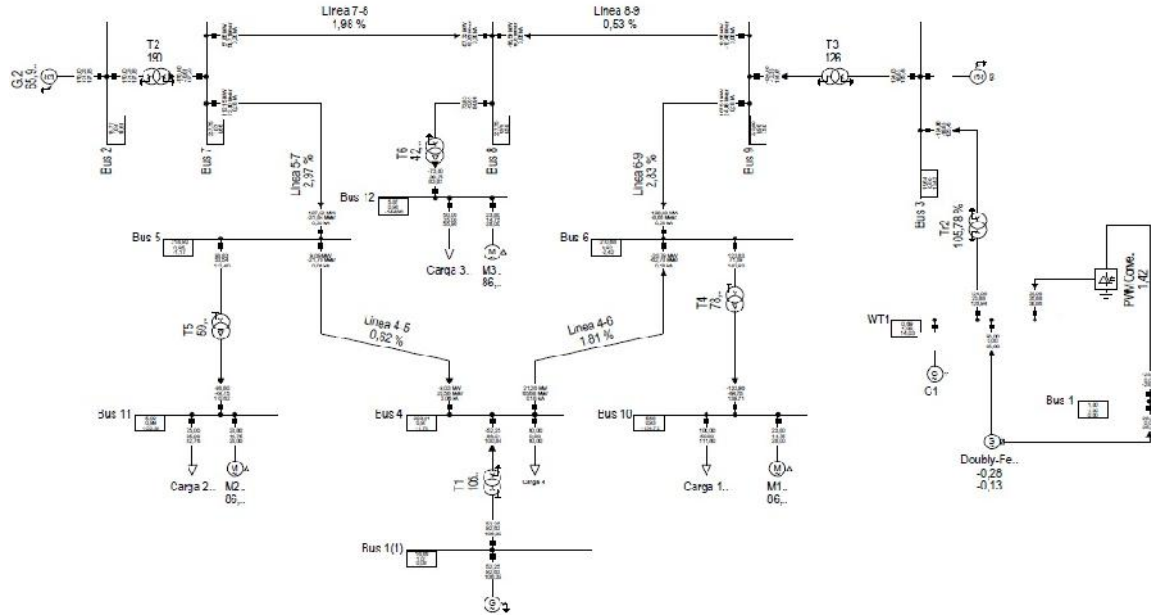


Figura 3 - Sistema de 14 barras

El parque generador está compuesto por dos plantas con máquinas sincrónicas y un parque con generación eólica. La demanda está concentrada en tres barras donde un 50 % de la carga fue modelada como estática y el otro 50 % como motores de inducción. El sistema posee seis transformadores de los cuales, los que alimentan la demanda, poseen la capacidad de regulación de tensión bajo carga. A continuación se presentan las características principales de los elementos citados:

Tabla 1 - Generadores Sincrónicos

	Generador 1	Generador 2
S nominal (MVA)	110	300
V nominal (KV)	16,5	18
Controles	IEEEX1 (regulador de tensión) IEEEG3 (regulador de velocidad) MAXEX2 (regulador de excitación)	IEEEX1 (regulador de tensión) IEEEG3 (regulador de velocidad) IMAXEX2 (regulador de excitación)

Tabla 2 – Parque Eólico – Característica por máquina

Tipo de máquina	DFIG
S nominal (MVA)	2,22
V nominal (KV)	0,69

Tabla 3 - Motores

	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Potencia nominal (MVA)	28	28	28
Tensión nominal (KV)	6	6	6

Tabla 4 – Demanda no motora

	Carga 1	Carga 2	Carga 3
Tipo de carga	estática	estática	estática
Potencia activa (MW)	100	75	50
Potencia reactiva (Mvar)	50	35	25
Tensión nominal (KV)	6	6	6

3.1 Simulaciones

Las simulaciones contemplan dos casos:

- a) El parque eólico esta modelado por 57 máquinas DFIG donde se controla la tensión terminal a través del convertidor RSC
- b) El parque eólico esta modelado por 57 máquinas DFIG donde se controla la tensión terminal a través de los convertidores RSC y GSC.

La falla que se aplica en ambas simulaciones corresponde a un cortocircuito trifásico con despeje y desconexión en una de las líneas del sistema.

Las curvas de salida muestran el comportamiento de algunas variables de la red para cada caso:

3.1.1 Caso 1 – Parque eólico con control de tensión a través de RSC

El caso base muestra que antes de la perturbación los niveles de tensión están dentro de límites admisibles. Las máquinas sincrónicas están generando potencia reactiva al límite de su capacidad. El parque eólico se encuentra funcionando en el punto nominal de su capacidad de potencia activa y reactiva.

Al tiempo de 1 segundo se aplica la falla mencionada anteriormente sobre la línea que une las barras 8 y 9. A los 120 milisegundos se produce el despeje de la falla y la salida de servicio de la línea. A los 55 segundos se produce la acción del limitador de sobreexcitación (MAXEX2) del generador sincrónico 2 y la tensión terminal cae progresivamente hasta alcanzar el valor correspondiente a la tensión de campo admisible. A los 59 segundos se produce la acción del MAXEX2 del generador sincrónico 1 produciéndose el mismo fenómeno que se produjo con el generador 2 (Figura 4-a). Durante todo este tiempo los transformadores con cambiadores de toma bajo carga actuaron para recuperar la tensión en la demanda produciendo así la recuperación de la potencia activa y reactiva de la carga estática. Este proceso, que finalmente llegó al límite de los cambiadores de tomas, necesitó del aporte de potencia reactiva de los generadores y ocasionó, en parte, la acción de los limitadores MAXEX2. El parque eólico mantuvo sus valores de tensión terminal, potencia activa y reactiva (Figura 5-a y 6-a) en valores aproximadamente constantes hasta que se produce la acción de los limitadores MAXEX2. Luego de esto se produce un incremento importante de la potencia reactiva del DFIG para sostener los valores de tensión a costa de la disminución de la potencia activa generada por el mismo. Las tensiones en la carga (Figura 7-a) caen a valores inadmisibles típicas de un escenario de inestabilidad de tensión tal como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 5 – Tensión en barras de carga

	Tensión antes de la falla (p.u.)	Tensión después de la falla (p.u.)
Carga 1	0,95	0,84
Carga 2	0,99	0,83
Carga 3	0,98	0,71

3.1.2 Caso 2 – Parque eólico con control de tensión a través de RSC y GSC

El caso base es el mismo que para el caso 1.

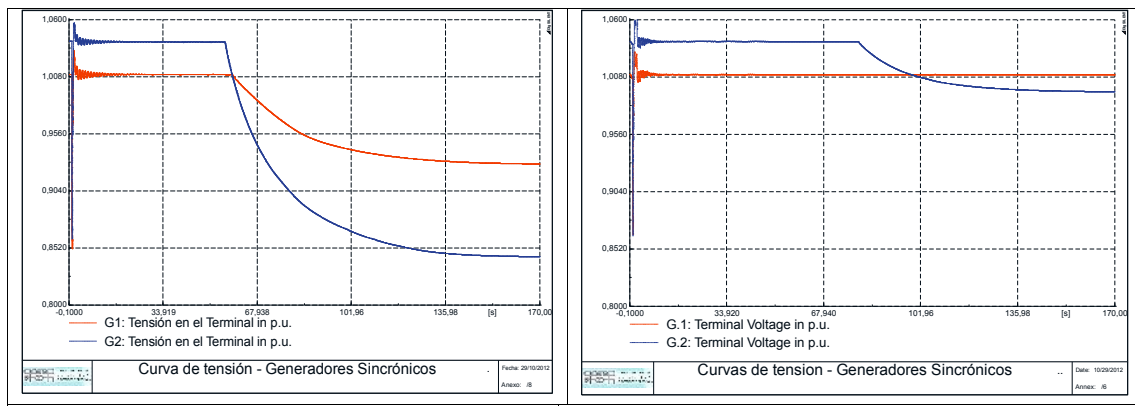
Al tiempo de 1 segundo se aplica la falla mencionada sobre la línea que une las barras 8-9. A los 120 milisegundos se produce el despeje de la falla y la salida de servicio de la línea. A los 79 segundos se produce la acción del limitador de sobreexcitación (MAXEX2) del generador síncronico 2 y la tensión terminal cae progresivamente hasta alcanzar el valor correspondiente a la tensión de campo admisible. En este caso la acción del limitador se produce más tarde que en el caso anterior debido al aporte adicional de potencia reactiva producida por el parque eólico (Figura 4-b). En el caso del generador 1, la tensión terminal se mantiene debido a que la potencia reactiva adicional aportada no hace necesaria la acción de las protecciones de ese generador síncronico. En estas condiciones, la tensión terminal del parque eólico (Figura 5-b) puede ser sostenida en los valores de consigna mejorando sensiblemente el perfil de tensiones de todo el proceso. Durante todo este proceso actúan los cambiadores de tomas bajo carga de los transformadores de distribución pero no llegan al límite. Las potencias emitidas por el parque eólico muestran una salida adecuada al tipo de control utilizado, donde se privilegia el control de tensión frente a la emisión de potencia activa. La porción de potencia activa que emitía el convertidor GSC sufre una disminución para dar lugar a la potencia reactiva necesaria que mantiene la tensión terminal en los valores prefijados (Figura 6-b). Las tensiones en la carga disminuyen pero mantienen los valores de tensión dentro de un perfil admisible para esas condiciones (Figura 7-b). En la tabla 6 se pueden observar los resultados.

Tabla 6. Tensión en barras de carga

	Tensión antes de la falla (p.u.)	Tensión después de la falla (p.u.)
Carga 1	0,96	0,95
Carga 2	0,99	0,96
Carga 3	0,98	0,95

3.1.3 Curvas de salida

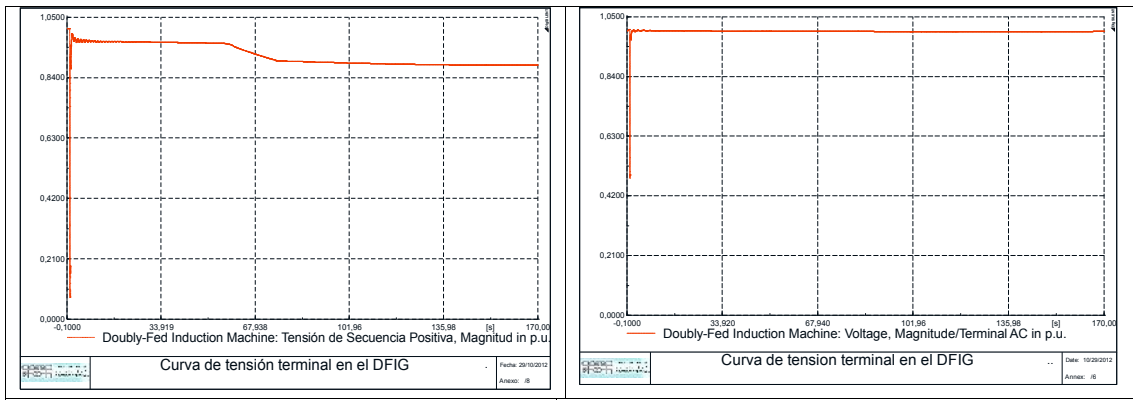
A continuación se presentan las curvas de salida donde las figuras a) pertenecen al primer caso mientras que las figuras b) pertenecen al segundo.



a)

b)

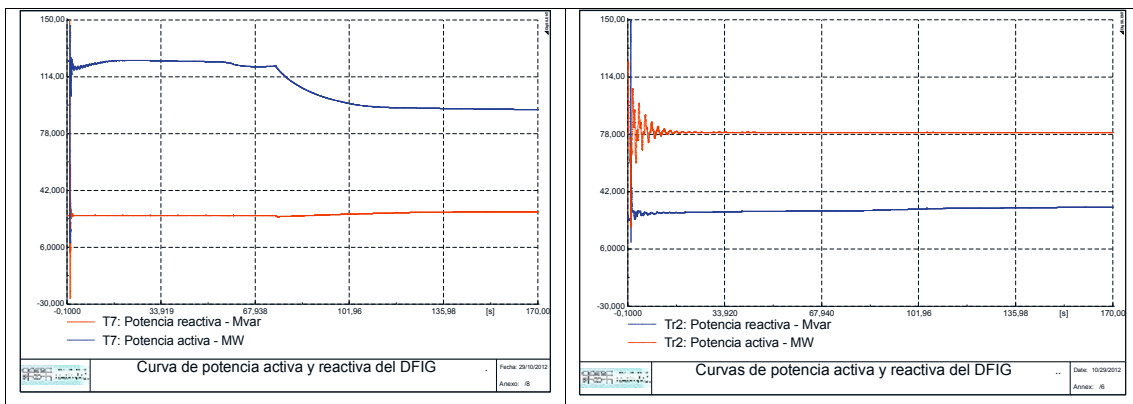
Figura 4. Tensiones terminales en generadores síncronicos 1 y 2



a)

b)

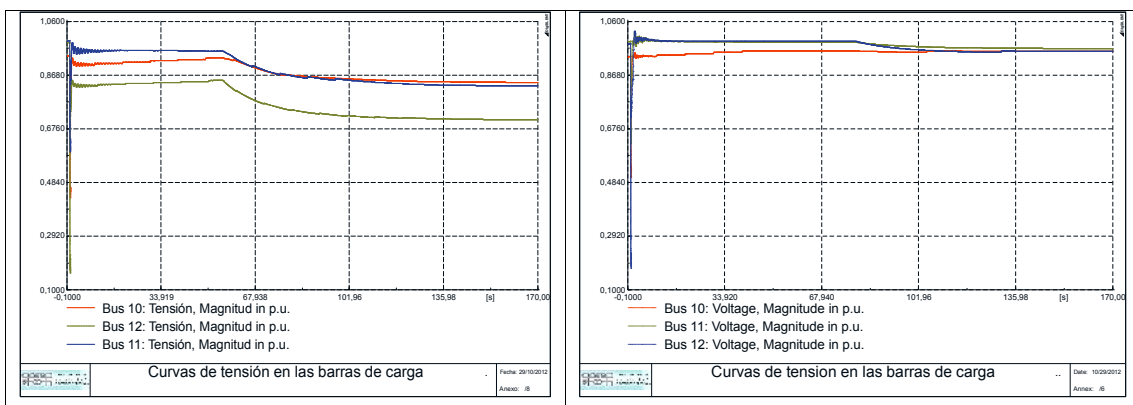
Figura 5. Tensiones terminales en planta eólica



a)

b)

Figura 6. Potencia activa y Reactiva generada en planta eólica



a)

b)

Figura 7. Tensiones en la carga



6. CONCLUSIÓN

Una de las tecnologías más difundidas de máquinas eólicas es la máquina de inducción doblemente alimentada (DFIG), la cual tiene la capacidad de contribuir con potencia reactiva para el control de tensión de la red. En esta turbina eólica el circuito del estator está conectado directamente a la red, mientras que el circuito del rotor se conecta mediante un convertidor electrónico. Debido a que es una máquina eólica de velocidad variable permite reducir las fluctuaciones de tensión en el punto de conexión a la red y permiten tener un control independiente de la potencia activa y reactiva que se entrega. El control de tensión a través de los generadores DFIG puede ser realizado por el convertidor del lado del rotor RSC, sistema comúnmente utilizado para este tipo de máquinas, aportando potencia activa y reactiva en forma independiente. El convertidor del lado de la red, GSC, solamente realiza aportes de potencia activa. Sin embargo se ha propuesto en la bibliografía la utilización del control GSC para controlar tensión y aportar potencia reactiva a la red cuando sea necesario.

Para situaciones de estabilidad de tensión de largo plazo se ha mostrado en el presente trabajo que la utilización simultánea de ambos controles puede aportar potencia reactiva adicional y por consiguiente evitar la inestabilidad de tensión de un sistema cargado a su límite de potencia reactiva, luego de una fuerte perturbación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kayikci, M.; Milanovic, J.V.; , "*Reactive Power Control Strategies for DFIG-Based Plants*", Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.22, no.2, pp.389-396, June 2007
Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2007.
- [2] Vittal, E.; O'Malley, M.; Keane, A.; , "*A Steady-State Voltage Stability Analysis of Power Systems With High Penetrations of Wind*", Power Systems, IEEE Transactions on , vol.25, no.1, pp.433-442, Feb. 2010
- [3] Shuhui Li; Haskew, T.A.; Williams, K.A.; Swatloski, R.P.; , "*Control of DFIG Wind Turbine With Direct-Current Vector Control Configuration*", Sustainable Energy, IEEE Transactions on , vol.3, no.1, pp.1-11, Jan. 2012.
- [4] J. G. Sloomweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "*Voltage control methods with grid connected wind turbines: a tutorial review*", Wind Eng., vol. 25, no. 6, pp. 353–365, 2001
- [5] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "*Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator*," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 2, pp. 194–204, Jun. 2003.
- [6] P. Ledesma and J. Usaola, "*Contribution of variable-speed wind turbines to voltage control*", Wind Eng., vol. 26, no. 6, pp. 347–358, 2002.
- [7] Poller M, *Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms*, DIgSILENT GmbH, Germany.
- [8] Doc.TechRef, "*Dynamic Modelling of Doubly-Fed Induction Machine Wind-Generators*", Published by DIgSILENT GmbH, Germany, 14 August 2003.