

# Respuesta Transitoria de Parques Eólicos equipados con STATCOMs ante Huecos de Tensión

Ríos A.\*; Guevara D.; Manzano S.

Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial  
 Ambato, Tungurahua, Ecuador (Tel: 593-032-851894; e-mail: [a.ríos@uta.edu.ec](mailto:a.ríos@uta.edu.ec))

\* Investigador Prometeo

**Resumen:**

En este artículo se ha evaluado la respuesta transitoria y la capacidad de los parques eólicos de velocidad fija equipados con dispositivos electrónicos denominados STATCOM (Compensador Estático Síncrono) en mantener la continuidad de suministro ante huecos de tensión trifásicos. El objetivo de estos estudios es comprobar el efecto de los STATCOM en la capacidad de las turbinas y parques eólicos en cumplir los cada vez más exigentes requisitos de conexión de los operadores del sistema eléctrico.

Palabras clave: Turbinas eólicas, estabilidad transitoria, parques eólicos, integración en red, STATCOM.

Abstract: In this paper has been evaluated the transient response and the ability of fixed wind turbines equipped with FACTS device named STATCOM (Static Synchronous Compensator) to maintain the continuity of supply against a three-phase voltage sags. The aim of these studies is to verify the effect of STATCOM in the ability of wind turbines and wind farms to fulfill the more demanding grid connection requirements of power systems operators.

Keywords: Wind turbines, transient stability, wind parks, grid integration, STATCOM.

## 1. INTRODUCCION

Los códigos de conexión a red de parques eólicos proponen requerimientos técnicos cada vez más exigentes en régimen permanente y transitorio. Los dispositivos electrónicos FACTS son ampliamente implementados en la integración de parques eólicos a la red eléctrica.

Diversos estudios han demostrado la capacidad de los dispositivos FACTS en mejorar la respuesta de los parques eólicos en régimen permanente y ante contingencias [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

La conexión del STATCOM en un parque eólico permite elaborar estrategias de generación/consumo de potencia reactiva en el punto de conexión a red y compensar pequeñas variaciones de tensión [10, 11]. En comparación con el STATCOM, la batería de condensadores presenta una respuesta muy lenta y no puede realizar un control exacto de tensión en el punto de conexión a red del parque eólico. No obstante, el coste del STATCOM es más caro que la batería de condensadores.

Asimismo, el empleo del STATCOM en los parques eólicos permite estabilizar las variaciones instantáneas de tensión ante la aparición de huecos de tensión. La rápida respuesta del STATCOM mejora la respuesta transitoria del parque eólico, evitando situaciones de colapso de tensión ante contingencias severas.

El empleo del STATCOM mejora la respuesta transitoria del parque eólico durante la perturbación más severa en un sistema eléctrico: un cortocircuito trifásico. El control de tensión se realiza inyectando potencia reactiva durante el

hueco de tensión y en el momento de recuperación de la tensión, evitando la absorción de potencia reactiva del sistema eléctrico [12, 13, 14, 15, 16, 17].

En el presente artículo se evalúa la capacidad del parque eólico de velocidad fija de mantener la continuidad de suministro con ayuda de la conexión de STATCOMs y cumplir los requerimientos del código de conexión a red [18].

## 2. FUNDAMENTOS

### 2.1 Modelo dinámico del STATCOM

Un STATCOM es un dispositivo electrónico que puede generar o consumir potencia reactiva de forma controlada [19, 20, 21]. En la figura 1, se muestra el esquema simplificado de un STATCOM. El STATCOM consiste de una batería de condensadores, un convertidor electrónico, una reactancia de acoplamiento y un sistema de control asociado.

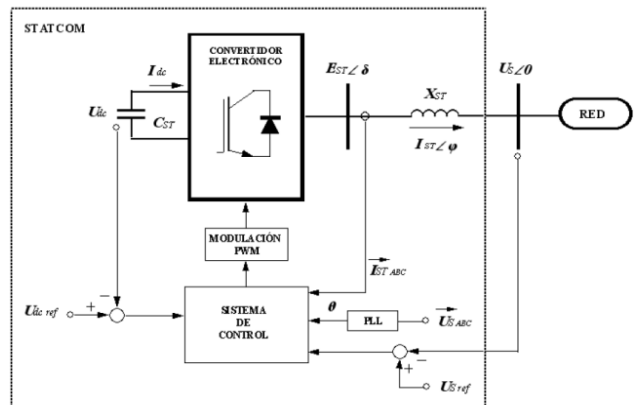


Figura 1. Esquema básico del dispositivo electrónico STATCOM

El sistema de control asociado establece las consignas de conmutación del convertidor electrónico, basado en una estrategia de modulación de ancho de pulso. El objetivo del sistema de control es mantener la tensión en el nudo al que se conecta el STATCOM,  $U_S$ , dentro del rango de funcionamiento normal, inyectando o absorbiendo corriente reactiva,  $I_{ST}$ . En este sentido, el STATCOM puede verse como una fuente controlada de tensión o de corriente.

El principio de funcionamiento de un STATCOM se basa en que el inversor de tensión transforma la tensión en continua, aportada por la batería de condensadores, a un sistema trifásico de tensiones de amplitud, frecuencia y ángulo de fase controlables. Su comportamiento es análogo al de un compensador síncrono, pero sin inercia mecánica y, por tanto, con una respuesta más rápida.

La diferencia entre la tensión suministrada por el convertidor electrónico,  $E_{ST}$ , y la tensión en el nudo controlado,  $U_S$ , produce un intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y la red eléctrica. Las siguientes expresiones que determina el intercambio de potencia activa,  $P_{ST}$ , y reactiva,  $Q_{ST}$ , entre el STATCOM y la red en un equivalente monofásico son:

$$P_{ST} = \frac{U_S \cdot E_{ST}}{X_{ST}} \sin\delta$$

$$Q_{ST} = \frac{U_S \cdot E_{ST} \cos\delta - U_S^2}{X_{ST}} \tag{1}$$

Donde  $X_{ST}$  es la reactancia de acoplamiento del STATCOM.

Si la tensión en bornes del convertidor electrónico es superior a la tensión del nudo controlado,  $E_{ST} > U_S$ , la corriente del STATCOM,  $\vec{I}_{ST}$ , presenta un desfase de  $90^\circ$  adelantada con respecto a la tensión  $\vec{E}_{ST}$ , figura 2a. En este caso, el STATCOM se comporta como un condensador y, por lo tanto, inyecta potencia reactiva al nudo controlado,  $Q_{ST} > 0$ .

Si por el contrario, la tensión en el punto de conexión es mayor que la tensión del convertidor electrónico,  $E_{ST} < U_S$ , la corriente del STATCOM,  $\vec{I}_{ST}$ , presenta un desfase de  $90^\circ$  retrasado con respecto a la tensión  $\vec{E}_{ST}$ , figura 2b. El STATCOM se comporta como una reactancia, que consume potencia reactiva,  $Q_{ST} < 0$ . Al no disponer de una fuente interna de energía, el STATCOM sólo puede intercambiar potencia reactiva.

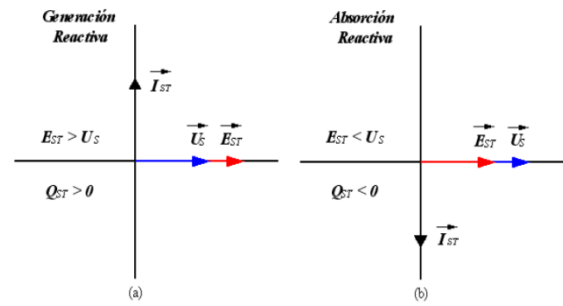


Figura 2. Diagrama vectorial del STATCOM: régimen capacitivo (a) y régimen inductivo (b).

Las pérdidas internas del STATCOM, que se producen en los semiconductores durante su funcionamiento, se compensan absorbiendo potencia desde la red eléctrica. Si se utilizará para este fin la energía almacenada en los condensadores del STATCOM, se reduciría la tensión en la etapa de continua.

Para evitar esta situación, se actúa sobre el ángulo de la tensión del convertidor electrónico,  $\vec{E}_{ST}$ , que se retrasa en un ángulo muy pequeño (del orden de  $0,1^\circ$  a  $0,2^\circ$ ) con relación a la tensión de la red,  $\vec{U}_S$ . De esta manera, el STATCOM absorbe una pequeña cantidad de potencia activa de la red para cubrir las pérdidas internas, manteniendo la tensión en la etapa de continua en el nivel de consigna. La absorción o generación de potencia activa se puede emplear para aumentar o reducir la tensión en la etapa de continua, lo que permite modificar la amplitud de la tensión de salida del convertidor electrónico,  $E_{ST}$ , y por tanto, la potencia reactiva generada o consumida por el STATCOM,  $Q_{ST}$ .

En la figura 3a, se muestra la característica de operación intensidad-tensión del STATCOM [22, 23]. Se observa que el STATCOM posee una pendiente de regulación, que oscila entre un valor máximo y un valor mínimo de la tensión,  $U_{Smax}$  y  $U_{Smin}$ . Esta pendiente determina la variación de intensidad reactiva en función de la variación de la tensión en el nudo controlado.

Además, el STATCOM es capaz de mantener la intensidad reactiva capacitiva e inductiva en su valor máximo independientemente de la tensión de la red. Asimismo, el STATCOM posee una capacidad adicional transitoria tanto en la región de funcionamiento capacitivo como inductivo. Estos dispositivos electrónicos, usualmente, poseen un tiempo transitorio de sobreintensidad muy corto, que depende de la máxima temperatura admisible por los semiconductores.

Por otro lado, en la figura 3b, se muestra la característica de operación tensión-potencia reactiva del STATCOM, se aprecia que su capacidad de absorber o generar potencia reactiva tiene una relación lineal con la tensión.

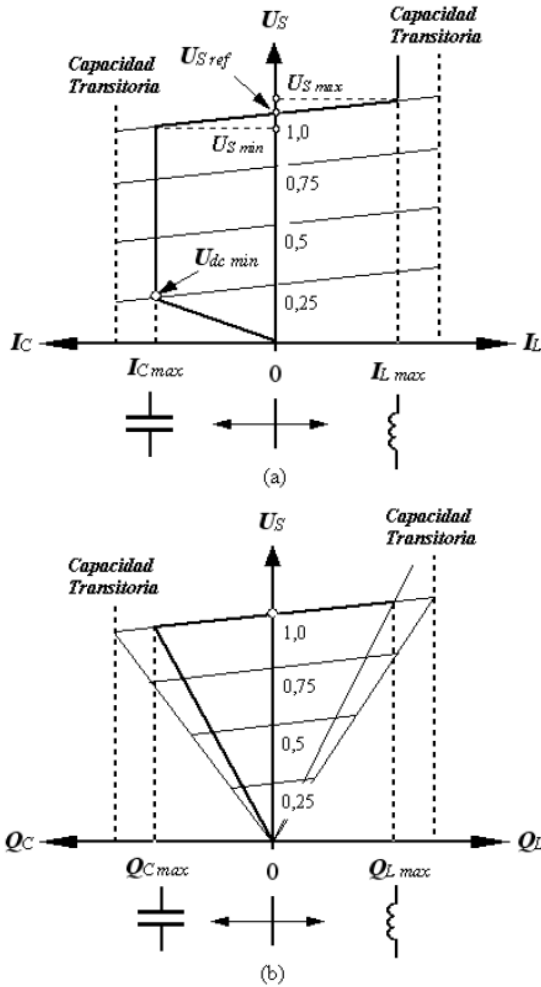


Figura 3. Curvas de operación del STATCOM: V-I tensión-intensidad (a) y Q-I potencia reactiva-intensidad (b).

Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del STATCOM en un sistema de referencia giratorio  $dq0$ , alineado con el vector espacial de tensión de la red, son las siguientes [19, 23]:

$$\begin{aligned}
 e_{STd} &= u_{sd} + R_{ST} \cdot i_{STd} + L_{STd} \frac{di_{STd}}{dt} - \omega_s \cdot L_{ST} \cdot i_{STq} \\
 e_{STq} &= u_{sq} + R_{ST} \cdot i_{STq} + L_{STd} \frac{di_{STq}}{dt} - \omega_s \cdot L_{ST} \cdot i_{STd}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Donde los subíndices  $d$  y  $q$  determinan la componente directa o en cuadratura de las magnitudes eléctricas de tensión e intensidad. Asimismo,  $\vec{E}_{ST} = e_{STd} + j e_{STq}$ , es la tensión a la salida del convertidor electrónico;  $\vec{U}_S = u_{sd} + j u_{sq}$  es la tensión en el nudo controlado de la red eléctrica;  $\vec{I}_{ST} = i_{STd} + j i_{STq}$  es la intensidad que inyecta el STATCOM;  $R_{ST}$  y  $L_{ST}$  son la resistencia y la reactancia de acoplamiento a la red, respectivamente.

La ecuación dinámica que rige el comportamiento de la etapa de continua del STATCOM, despreciando las pérdidas en el condensador es:

$$I_{dc} = C_{ST} \frac{dU_{dc}}{dt} \tag{3}$$

Donde  $U_{dc}$  es la tensión del condensador,  $I_{dc}$  es la intensidad en el condensador y  $C_{ST}$  es la capacidad del condensador.

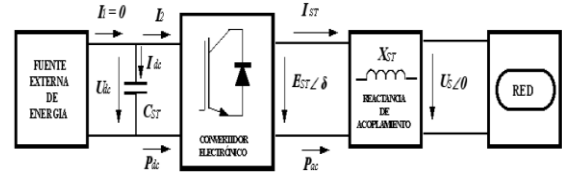


Figura 4. Diagrama de balance de potencia activa de un STATCOM.

La implementación práctica del modelo dinámico de la etapa de continua implica el cálculo de la tensión en el condensador,  $U_{dc}$ , en cualquier instante de tiempo. De la figura 4, se deduce que la intensidad que circula por el condensador es igual a:

$$I_{dc} = C_{ST} \frac{dU_{dc}}{dt} = I_1 - I_2 = -I_2 \tag{4}$$

Donde  $I_1$  es la intensidad continua que entra a la etapa de continua, y que en el caso del STATCOM, al no disponer de fuente de energía externa, es igual a cero,  $I_1 = 0$ ;  $I_2$  es la intensidad que entra al convertidor electrónico. Las variaciones de la tensión del condensador se determinan en función de la energía almacenada en este elemento en forma de campo eléctrico. Si se multiplica ambos miembros de la expresión anterior por la tensión  $U_{dc}$  se obtiene:

$$C_{ST} \cdot U_{dc} \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = -U_{dc} \cdot I_2 \tag{5}$$

Si esta expresión se rescribe en términos de energía y de potencia se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dW_c}{dt} = -P_{dc} \tag{6}$$

Donde  $W_c = \frac{1}{2} C_{ST} \cdot U_{dc}^2$  es la energía almacenada en el condensador mientras que  $P_{dc} = U_{dc} \cdot I_2$  es la potencia activa que intercambia el condensador con la red a través del convertidor electrónico. A partir de las expresiones anteriores, se calcula la tensión en la etapa de continua:

$$U_{dc} = U_{dc}(0) + \sqrt{\frac{2}{C_{ST}} \int_0^t \{-P_{dc}(t) dt\}} \tag{7}$$

Donde  $U_{dc}(0)$  es la tensión inicial del condensador. El balance entre la potencia en la etapa de continua,  $P_{dc}$ , y la potencia en los terminales del convertidor electrónico,  $P_{ac}$ , se expresa con ayuda de la siguiente ecuación:

$$P_{dc} = P_{ac} = U_{dc} \cdot I_2 = \frac{3}{2} u_{sd} \cdot i_{STd} \tag{8}$$

De esta forma, se relaciona la tensión en la etapa de continua,  $U_{dc}$ , y la potencia activa instantánea intercambiada con la red eléctrica a través del convertidor electrónico,  $P_{ac}$ , expresada en un sistema de referencia giratorio  $dq0$ . Es importante indicar, que en el sistema de referencia elegido, la componente en cuadratura de la tensión,  $u_{sq}$ , tiene un valor nulo. Por tanto, existe una relación directa entre las

componentes directa y en cuadratura de la corriente del STATCOM,  $i_{STd}$  y  $i_{STq}$ , y la potencia activa,  $P_{ST}$ , y la potencia reactiva,  $Q_{ST}$ , respectivamente, a transferir:

$$P_{ST} = \frac{3}{2} u_{sd} \cdot i_{STd}$$

$$Q_{ST} = \frac{-3}{2} u_{sd} \cdot i_{STq}$$
(9)

El sistema de control del STATCOM es el encargado de generar el sistema trifásico deseado a la salida del convertidor,  $\vec{E}_{STABC}$ , que determina la inyección o absorción de potencia reactiva necesaria para mantener la tensión en el nudo controlado,  $U_S$ , dentro sus valores de funcionamiento normal. En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques del control del STATCOM. En esta figura,  $\vec{E}_{STABC}$  es el sistema de tensiones trifásicas a la salida del convertidor electrónico,  $\vec{I}_{STABC}$  es el sistema trifásico de intensidades que inyecta el STATCOM a la red eléctrica,  $U_S$  es la tensión en el nudo controlado y  $U_{dc}$  es la tensión de la etapa de continua en el condensador.

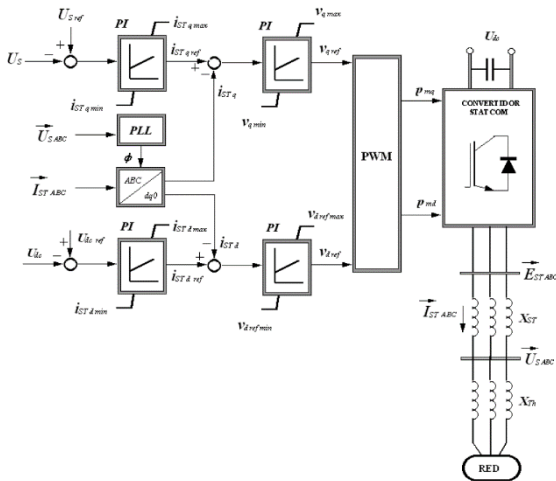


Figura 5. Diagrama de bloques de control del STATCOM implementado.

El sistema de control se implementa en un sistema de referencia síncrono dq0. Para la transformación del sistema de referencia abc al sistema de referencia síncrono dq0, se emplea un PLL (Phase Locked Loop) que proporciona el ángulo de giro  $\varphi$ .

El sistema de control actúa de la siguiente manera: la tensión en el nudo controlado,  $U_S$ , es continuamente comparada con la tensión de referencia,  $U_{Sref}$ , ante cualquier variación de la tensión controlada se enviará una señal de error al regulador PI de tensión alterna. Este regulador procesa la señal de error y determina el valor de referencia de la componente en cuadratura de la intensidad,  $i_{STqref}$ , necesario para llevar el error de tensión a un valor igual a cero, es decir, provocar un intercambio de potencia reactiva entre el convertidor y la red.

Es importante indicar que este regulador limita los valores de la intensidad  $i_{STqref}$  en función de la temperatura admisible de los semiconductores. En la actualidad, algunos fabricantes diseñan dispositivos STATCOM con una capacidad de

sobrecarga que puede oscilar entre  $-3$  p.u. capacitiva y  $+3$  p.u. inductiva durante 2 o 3 segundos [24].

Un segundo regulador PI de tensión es responsable de mantener constante la tensión en la etapa de continua del STATCOM. Ante cualquier variación de la tensión en el condensador,  $U_{dc}$ , se genera un error, que es procesado por el regulador, para proporcionar la señal de referencia de la componente directa de la intensidad,  $i_{STdref}$ .

Los valores de referencia obtenidos de la componente directa y en cuadratura de la intensidad,  $i_{STdref}$  e  $i_{STqref}$ , se comparan con las correspondientes componentes dq de la intensidad medida a la salida del convertidor electrónico, previamente transformados a un sistema de referencia síncrono dq0,  $i_{STd}$  e  $i_{STq}$ . El error resultante entre estas magnitudes genera una señal que es enviada a los reguladores de intensidad.

Finalmente, estos reguladores determinan las tensiones de referencia  $v_{dref}$  y  $v_{qref}$ , que son enviadas al generador de señales de modulación de ancho de pulso, PWM. Puesto que el índice de modulación de ancho de pulso es la variable de control del inversor de tensión, la salida del generador de señales son las componentes del índice de modulación,  $p_{md}$  y  $p_{mq}$ . Para realizar la modulación de tensión en el inversor, es necesario transformar los valores de referencia dq0 a un sistema de referencia abc, deshaciendo la transformada de Park. Realizada esta transformación, se determina los valores del sistema trifásico de tensiones deseado a la salida del convertidor electrónico,  $\vec{E}_{STABC}$ .

### 3. METODOLOGÍA

El estudio del impacto del STATCOM en la respuesta transitoria de un parque eólico equipado con turbinas eólicas de velocidad fija consiste en realizar los siguientes estudios:

- Analizar la influencia del STATCOM en la respuesta transitoria y en la continuidad de suministro del parque eólico tipo cuando se conecta un STATCOM de 2 MVA con capacidad de sobrecarga hasta tres veces su potencia nominal a cada turbina eólica del parque eólico. Este tipo de conexión se conoce como solución máquina, puesto que cada turbina eólica cuenta con un dispositivo de compensación de potencia reactiva.

En la figura 6 se muestra, de forma esquemática, la solución máquina para analizar la influencia del STATCOM en la respuesta transitoria del parque eólico.

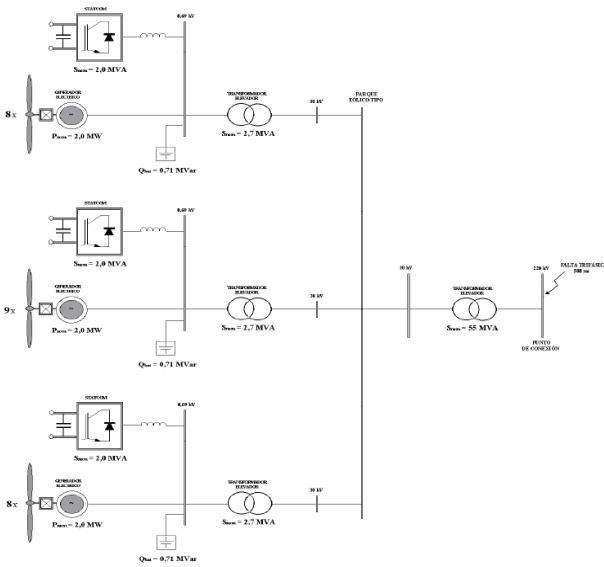


Figura 6. Conexión de un STATCOM a cada turbina de 2 MW de un parque eólico de 50 MW.

- Analizar la influencia del STATCOM en la respuesta transitoria y en la continuidad de suministro de un parque eólico tipo equipado con turbinas eólicas de velocidad fija cuando un STATCOM se conecta en el lado de media tensión de la subestación transformadora. Este tipo de conexión se denomina solución parque.

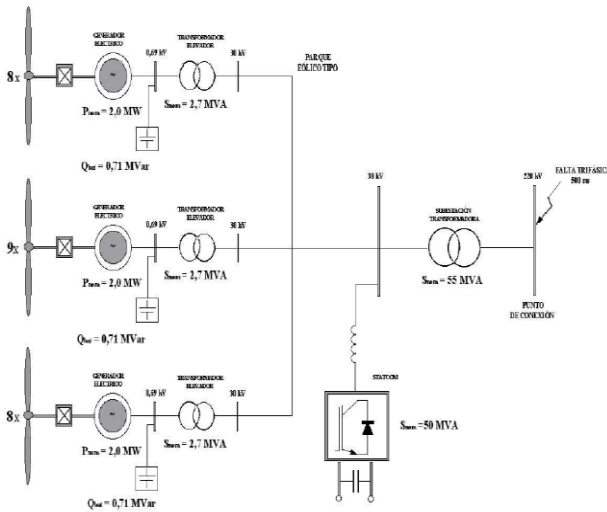


Figura 7. Conexión de un STATCOM en la subestación transformadora de un parque eólico de 50 MW.

El estudio propone comparar la influencia de un STATCOM de 100 MVA sin capacidad de sobrecarga y un STATCOM de 50 MVA con capacidad de sobrecarga de hasta tres veces su potencia nominal en la respuesta transitoria del parque eólico.

En la figura 7 se muestra, de forma esquemática, la solución a nivel parque propuesta para analizar la influencia del STATCOM.

El modelo dinámico del STATCOM y del parque eólico equipado con turbinas eólicas de velocidad fija se ha implementado en la plataforma informática DIGSILENT

Power Factory. Todas las simulaciones del estudio se han realizado con la ayuda del software específico antes mencionado. El parque eólico de velocidad fija se compone de 25 turbinas eólicas de velocidad fija de 2 MW.

Para determinar si la turbina eólica o el parque eólico se mantienen conectados después de un cortocircuito, se utilizarán los siguientes criterios:

- Los sistemas de protección de la turbina no actúan durante el período de simulación y, por tanto, no desconectan la turbina eólica. Sin embargo, se verifica si los parámetros evaluados de la turbina, superan los valores umbrales de los diferentes sistemas de protección. En la tabla 1, se muestran los valores característicos de los sistemas de protección de las turbinas eólicas.
- Los intercambios de potencia activa y reactiva, tanto durante el período de duración del hueco de tensión como en el periodo de recuperación posterior al despeje de una falta trifásica o bifásica, se deberán encontrar dentro de unos límites predeterminados.

Tabla 1. Umbrales típicos de disparo de los sistemas de protección.

Sistema de Protección	Umbral, p.u.	Tiempo de retardo, s
Huecos de Tensión	<0,85	1
	<0,2	Instantáneo
Sobrecorriente	>1,3	0,5
	>3,0	0,05
Sobrevelocidad	>1,1	Instantáneo
Sobretensión	>1,1	5,0
	>1,25	1,0
	>1,4	Instantáneo

En relación a los consumos puntuales de energía y potencia (activa y reactiva) durante el hueco de tensión y el período inmediatamente posterior al despeje de la falta, se definen tres zonas claramente diferenciadas.

La zona A correspondería a los primeros 150 ms después del inicio del hueco de tensión, la zona B se define como el periodo desde los 150 ms hasta los 500 ms de duración del hueco mientras que la zona C corresponde a los 150 ms inmediatamente posteriores al despeje de la falta.

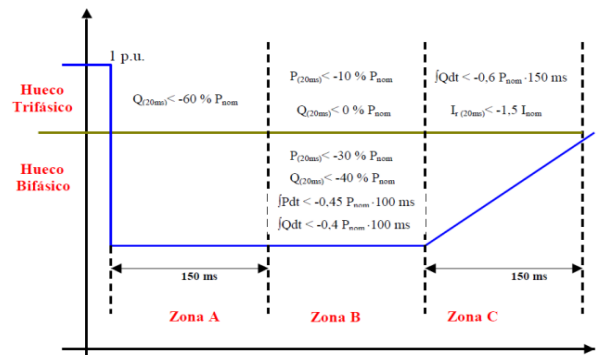


Figura 8: Zonas diferenciadas del hueco de tensión y límites de consumo de energía y potencia.

En la figura 8, se muestra de forma esquemática las zonas, diferenciadas de un hueco de tensión y los límites

establecidos de consumos de energía y potencia (activa y reactiva) e intensidad reactiva de una instalación eólica ante un hueco bifásico y trifásico.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1 Solución Máquina

En las figuras 9 a 12 se presentan los resultados obtenidos para un parque eólico al aplicarse la solución máquina ante una falta trifásica de 500 ms y una tensión residual del 20% en el punto de conexión.

Se comparan la respuesta transitoria del parque para los siguientes casos: en un primer caso, las turbinas eólicas del parque eólico no disponen de STATCOM y en un segundo caso, a cada turbina eólica del parque eólico se conecta un STATCOM de 2 MVA con una capacidad de sobrecarga hasta tres veces su potencia nominal.

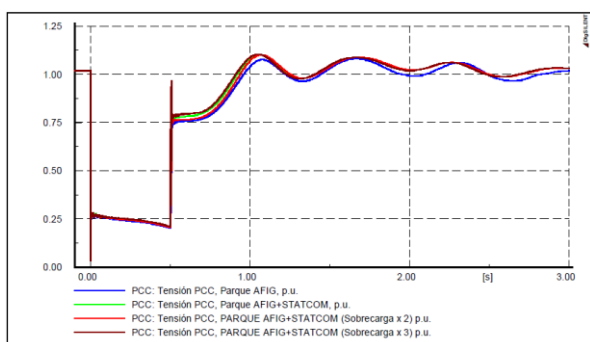


Figura 9: Impacto del STATCOM en la recuperación de tensión para un parque eólico con solución turbina.

En la figura 9 se muestra la influencia del STATCOM sobre la tensión en el punto de conexión. A medida que se incrementa la capacidad de sobrecarga del STATCOM, mejora significativamente la respuesta de tensión inmediatamente después del despeje de la falta, debido a la inyección de potencia reactiva en el momento de magnetización de los generadores asíncronos, reduciendo el consumo total de potencia reactiva del parque en ese instante.

Se observa de las figuras 9 y 10, que la tensión y potencia reactiva en el punto de conexión, en el caso de que las turbinas eólicas no dispongan de STATCOM y de conectar un STATCOM sin capacidad de sobrecarga, no recuperan sus valores anteriores a la falta mientras que en el caso de un STATCOM con capacidad de sobrecarga, si se recuperan.

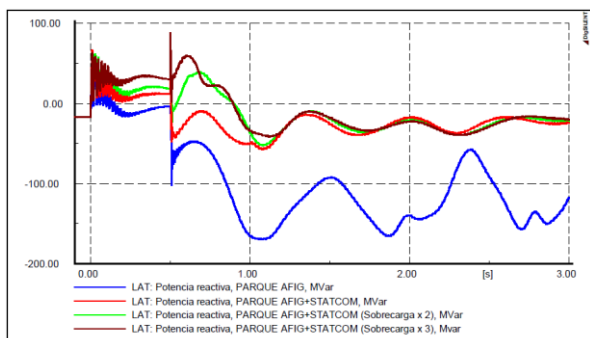


Figura 10: Influencia del STATCOM en un parque eólico con solución turbina sobre la potencia reactiva.

En la figura 11 se muestra la influencia del STATCOM sobre la respuesta transitoria de la velocidad de una turbina eólica del parque. Se observa que en el caso de no disponer de un STATCOM, la velocidad de giro presenta una respuesta inestable acompañada de grandes oscilaciones. Si a la turbina eólica se le conecta un STATCOM sin capacidad de sobrecarga, las oscilaciones de potencia se amortiguan lentamente. Finalmente, en el caso de conectar un STATCOM con capacidad de sobrecarga las oscilaciones de la velocidad de giro son rápidamente amortiguadas y alcanzan sus valores anteriores a la falta.

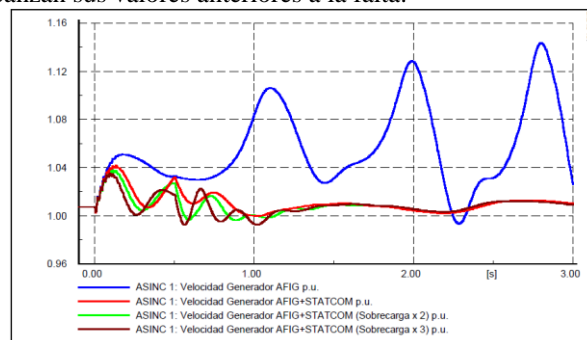


Figura 11: Influencia del STATCOM en un parque eólico con solución turbina sobre la velocidad de giro.

En la figura 12, se muestra la respuesta de la potencia activa del parque eólico. Al igual que en las figuras anteriormente analizadas, sólo cuando se conecta un STATCOM con capacidad de sobrecarga, la potencia activa recupera su valor anterior a la falta una vez despejada la misma. Asimismo, cuando las turbinas eólicas no se conectan en paralelo a un STATCOM o si el STATCOM no tiene capacidad de sobrecarga, la potencia activa del parque sufre grandes oscilaciones y no recupera su valor anterior a la falta.

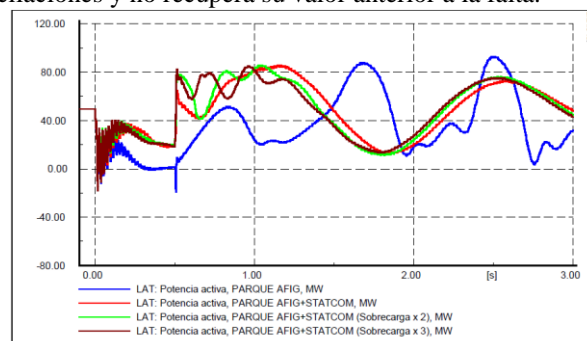


Figura 12: Influencia del STATCOM en un parque eólico con solución turbina sobre la potencia activa.

Tabla 2: Consumo de energía y potencia (activa y reactiva) en el estudio con solución máquina.

Límites de consumo establecidos en el P.O. 12.3	Consumos de activa y reactiva		
	Falta trifásica		
	Zona A	Zona B	Zona C
	0,15s	0,328s	0,152s
Consumo neto de potencia activa, P <sub>a</sub>	No limitado	<-10% P <sub>nom</sub> (20ms) 0,0/0,0/0,0/0,0%	No limitado
Consumo neto de potencia reactiva, Q <sub>r</sub>	<-60% P <sub>nom</sub> (20ms)	<0% P <sub>nom</sub> (20ms)	No limitado
	-10,1/0,0/0,0/0,0%	-28,4/0,0/0,0/0,0%	

Consumo neto energía activa, $E_a$	No limitado	No limitado	No limitado
Consumo neto energía reactiva, $E_r$	No limitado	No limitado	<60%Pnom(150ms) 6 <90ms p.u.
Consumo neto intensidad reactiva, $I_r$	No limitado	No limitado	14,6/-74,0/0,0/0,0ms p.u. <150%Inom(20ms) 174,3/-106,5/-23,5/0,0%

De la tabla 2, se observa que un parque eólico de velocidad fija sin ningún dispositivo de compensación de potencia reactiva, no cumple los requisitos por consumo de potencia reactiva en la zona B y por consumo de energía reactiva e intensidad reactiva en la zona C. En el caso de conectar un STATCOM de 2 MVA en paralelo a cada turbina eólica, el parque cumple los requisitos por consumo de potencia reactiva en la zona B y por consumo de energía reactiva e intensidad reactiva en la zona C, valores en negrita de la tabla 2. Los resultados mostrados en la tabla 2 permiten deducir que a medida que se eleva la capacidad de sobrecarga del STATCOM, se reduce el consumo de energía e intensidad reactiva en la zona C.

#### 4.2 Solución Parque

Un segundo estudio propone analizar la influencia sobre la respuesta transitoria del parque eólico cuando se aplica una solución parque. Se compara la influencia sobre un parque eólico con un STATCOM de 100 MVA sin capacidad de sobrecarga y de un STATCOM de 50 MVA con capacidad de sobrecarga de hasta 3 veces su potencia nominal. En la figura 13, se muestra la influencia del STATCOM en la tensión en el punto de conexión, se observa que el STATCOM de 50 MVA con capacidad de sobrecarga produce una mejora más significativa que el STATCOM de 100 MVA sin capacidad de sobrecarga. Además, se observa que sin dispositivos de compensación reactiva el parque eólicos se desconectará al superar los valores máximos admisibles.

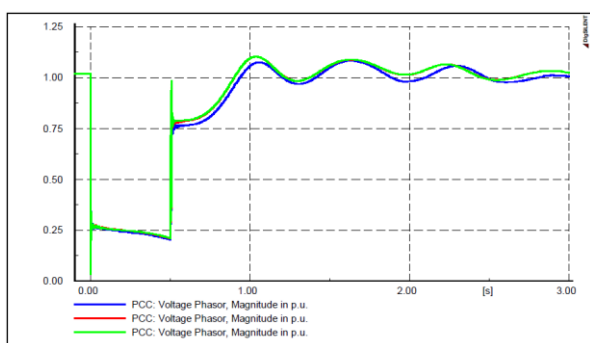


Figura 13: Influencia del STATCOM con solución parque eólico sobre la tensión en el punto de conexión.

En la figura 14, se muestra la respuesta de la potencia reactiva del parque eólico. La inyección de potencia reactiva del STATCOM sin y con capacidad de sobrecarga, reduce el consumo de potencia reactiva y hace estable el funcionamiento del parque eólico, puesto que la potencia reactiva alcanza su valor anterior a la falta, una vez despejado el hueco de tensión.

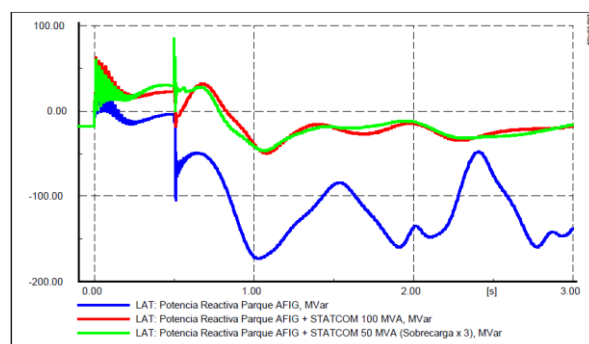


Figura 14: Influencia del STATCOM con solución parque en la potencia reactiva del parque eólico.

En la figura 15, se observa que la conexión de un STATCOM en el lado de media tensión de la subestación transformadora reduce las oscilaciones de la velocidad de giro y muestra una respuesta claramente amortiguada, alcanzando la velocidad de giro en algunos segundos el valor anterior a la falta.

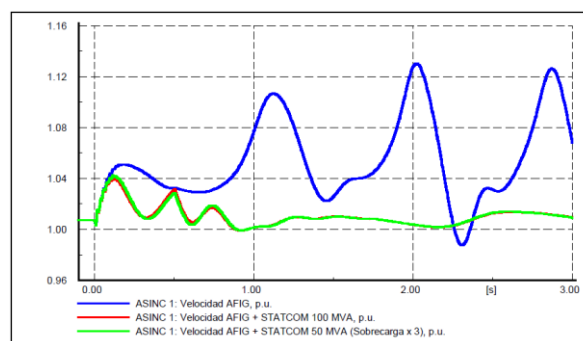


Figura 15: Influencia del STATCOM con solución parque en la velocidad de giro de la turbina eólica.

En la figura 16, se muestra la respuesta de la potencia activa del parque eólico. Sólo en el caso de la conexión de un STATCOM, la respuesta de la potencia activa ante un hueco de tensión presenta una evolución claramente amortiguada.

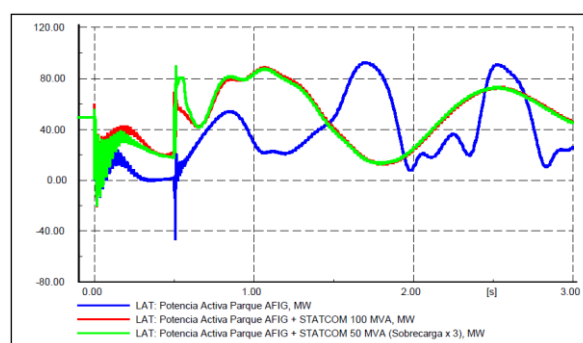


Figura 16: Influencia del STATCOM con solución parque en la potencia activa del parque eólico.

Finalmente, en la tabla 3 se comprueba si el parque eólico cumple las exigencias de consumo de potencia activa y reactiva, energía activa y reactiva e intensidad reactiva en las diferentes zonas de caracterización del hueco de tensión.

Tabla 3: Consumo de energía y potencia (activa y reactiva) de un parque eólico + STATCOM sobredimensionado ante un hueco de tensión trifásico.

Límites de consumo establecidos en el P.O. 12.3	Consumos de activa y reactiva		
	Falta trifásica		
	Zona A	Zona B	Zona C
	0,15s	0,328s	0,152s
Consumo neto de potencia activa, $P_a$	No limitado	<10% Pnom(20ms) 0,0,0,0,0,0,0%	No limitado
Consumo neto de potencia reactiva, $Q_r$	<60% Pnom (20ms) -10,1,0,0,0,0,0%	<0% Pnom (20ms) -28,4,0,0,0,0,0%	No limitado
Consumo neto energía activa, $E_a$	No limitado	No limitado	No limitado
Consumo neto energía reactiva, $E_r$	No limitado	No limitado	<60% Pnom(150ms) 6 <-90ms p.u. 14,6/-74,0,0,0,0,0ms p.u.
Consumo neto intensidad reactiva, $I_r$	No limitado	No limitado	<150% Inom(20ms) 174,3/-106,5/-23,5,0,0%

De la tabla 3, se observa que un parque eólico de velocidad fija sin ningún dispositivo de compensación de potencia reactiva, no cumple los requisitos por consumo de potencia reactiva en la zona B y por consumo de energía reactiva e intensidad reactiva en la zona C.

Por otro lado, en el caso de conectar en el lado de media tensión de la subestación transformadora, un STATCOM de 100 MVA sin capacidad de sobrecarga o un STATCOM de 50 MVA con capacidad de sobrecarga de hasta tres veces su potencia nominal, el parque cumple los requisitos por consumo de potencia reactiva en la zona B y por consumo de energía reactiva e intensidad reactiva en la zona C, valores en negrita de la tabla 3.

### 5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha demostrado que la conexión de STATCOMs mejora considerablemente la respuesta transitoria de los parques eólicos de velocidad fija así como su capacidad de mantener la continuidad de suministro ante huecos de tensión trifásicos.

Asimismo, se observa de los resultados obtenidos que la conexión de STATCOMs en el parque eólico, tanto en la solución máquina y como en la solución parque son técnicamente equivalentes, es decir, en ambos casos, se consigue que el parque eólico cumpla los criterios técnicos referentes a la capacidad de mantener la continuidad de suministro.

La elección de una u otra solución dependerá del coste económico que implica determinada solución técnica.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, SENESCYT, por su especial apoyo en el desarrollo de la presente propuesta, gracias a la financiación del proyecto PROMETEO: “Estudio de viabilidad técnica y económica de la integración de energías renovables en la provincia de Tungurahua”.

### REFERENCIAS

[1] N. Dizdarevic, M. Majstrovic and G. Andersson, “Reactive Power Compensation of Wind Energy Conversion System by Using Unified Power Flow Controller”, International Journal of Energy Technology and Policy, 2005, Vol. 3, No. 3.

[2] B. Ronner, P. Maibach and T. Thurnherr, “Operational Experiences of STATCOMs for Wind Parks”, IET Renewable Power Generation, 2008.

[3] S. Chaudhary, R. Teodorescu and P. Rodriguez, “Wind Farm Grid Integration using VSC based HVDC Transmission - an Overview”, IEEE Energy 2030 Atlanta, USA, 2008.

[4] L. Qi, J. Langston and M. Steurer, “Applying a STATCOM for Stability Improvement to an existing Wind Farm with Fixed-Speed Induction Generators”, Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.

[5] A. Sode-Yome and N. Mithulananthan, “Comparison of Shunt Capacitor, SVC and STATCOM in Static Voltage Stability Margin Enhancement”, International Journal of Electrical Engineering Education, UMIST, 2004.

[6] M. Aten, J. Martinez, and P. J. Cartwright, “Fault Recovery of a Wind Farm with Fixed Speed Induction Generators using a STATCOM.” *Wind Engineering*, Vol. 29, No. 4, PP. 365–375, 2005.

[7] B.T. Ramakrishnarao, B. Eswararao, L. Narendra, K. Pravallika, “A Statcom-Control Scheme for Power Quality Improvement of Grid Connected Wind Energy System”, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 2, Issue 3, May 2013.

[8] A. Ríos Villacorta, S. Arnaltes Gómez, J.L. Rodríguez Amenedo, “Improving Voltage Stability in a Wind Farm using SVC”, EWEC, London, United Kingdom. 22-25 November, 2004.

[9] A. Ríos Villacorta, “Influence of the DVR in the Transient Response of Wind Park against Voltage Sags”, Revista I+i: Investigación Aplicada e Innovación. Revista de Investigación e Innovación Tecnológica de TECSUP, Vol. 7 N°1, 2013.

[10] F. Díaz González, M. Martínez-Rojas, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, L. Trilla, “Strategies for Reactive Power Control in Wind Farms with STATCOM”, EPE Wind Energy Chapter Symposium 2010, Stafford 2010.

[11] R. Grunbaum, “Voltage Source Converters for Maintaining of Power Quality and Stability in Power Distribution”, European Conference on Power Electronics and Applications, 2005.

[12] G. Elsady, Y. A. Mobarak, and A. R. Youssef, “STATCOM for Improved Dynamic Performance of Wind Farms in Power Grid”, Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON’10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.

[13] M. S. El-Moursi, A.M. and Sharaf, “Novel STATCOM Controllers for Voltage Stabilization of Wind Energy Scheme”, International Journal of Global Energy Issues, Vol. 26, 2006.

[14] H. Gaztañaga, I. Etxeberria-Otadui, D. Ocasu and S. Bacha, “Real-Time Analysis of the Transient Response Improvement of Fixed-Speed Wind Farms by Using a Reduced-Scale STATCOM Prototype”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007.

[15] C. Han, A. Q. Huang, M. Baran, S. Bhattacharya, and W. Litzemberger, “STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System,” IEEE Trans. Energy Conv. , vol. 23, no. 1, pp. 226–232, Mar. 2008.

[16] W. Jie, S. Wei, Y. Bing-Chao, “Improvement of Low Voltage Ride through Capability of Wind Farm using STATCOM. Power System Protection and Control. 2011.

[17] C. Appala Narayana, D.V.N. Ananth, K.D. Syam Prasad, CH. Saibabu, S. Sai Kiran, T. Papi Naidu, “Application of STATCOM for Transient



- Stability Improvement and Performance Enhancement for a Wind Turbine Based Induction Generator”, *International Journal of Soft Computing and Engineering IJSCE*, Vol. 2, Issue 6, January 2013.
- [18] Red Eléctrica de España, REE, Procedimiento Operativo 12.3: “Requisitos de Respuesta frente a Huecos de Tensión de las Instalaciones de Producción de Régimen Especial”, Madrid, Octubre 2006.
- [19] C. A. Cañizares, “STATCOM Modelling for Voltage and Angle Stability Studies”, *Electrical Power & Energy Systems* 25, 2003.
- [20] R. J. Davalos and J. M. Ramírez, “Características Funcionales del STATCOM”, Segundo Congreso Bienal, Comité Nacional CIGRÉ, México, 13-15 Junio, 2001.
- [21] E. M. Adzic, S. U. Grabic and V.A. Katic, “Analysis and Control Design of STATCOM in Distribution Network Voltage Control Mode”, Sixth International Symposium Nikola Tesla, October 18- 20, Belgrade, 2006.
- [22] CIGRÉ Working Group 14.19, “Static Synchronous Compensator (STATCOM)”, Technical Report, CIGRÉ 1999.
- [23] R. Mohan Mathur and R. K. Varma, “Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission System”, Springer, Berlin, 2006.
- [24] N. Reddy, “D-VAR and Super VAR Technology Presentation”, Network Solutions of American Superconductor, STEP Group Meeting, San Diego, California, March 2004.