

Autor: Héctor A. López Carballido.

Universidad de destino: Chalmers University of Technology

Supervisor: Törbjorn Thiringer

Coordinador académico: Julio Usaola

Cotutor uc3m: Julio Usaola

Fecha de lectura: 25/05/09

Calificación: 10

Resumen del proyecto

En este proyecto final de carrera se ha investigado el control de una turbina de viento equipada con un generador de inducción, que a su vez está equipado con resistencias del rotor variables. En el mismo, el análisis, modelado y control del generador de inducción ha sido llevado a cabo. En particular, el mayor interés del proyecto se puso en la reducción de las fluctuaciones del par generado por el generador de inducción, para así reducir el estrés mecánico tanto en la caja de cambios como en la estructura mecánica, así como reducir las fluctuaciones en la potencia entregada a la red.

Diferentes métodos de control fueron estudiados para encontrar la elección más adecuada. Una vez seleccionado el método de control que se iba a emplear, se compararon los resultados obtenidos con la máquina de inducción donde se había implementado el controlador de las resistencias variables, con la misma máquina de inducción sin el controlador. Esta comparación se realizó para estudiar la mejora que se obtenía al utilizar el controlador.

Antes de nada, voy a mencionar los capítulos de los que consta el proyecto, para a continuación realizar un breve resumen de cada uno de ellos. El cuerpo del proyecto fue organizado como sigue:

- Capítulo 1, introducción y el trabajo previo.
- Capítulo 2, descripción de las turbinas de viento y de los parques eólicos offshore.
- Capítulo 3, presentación de la máquina de inducción.
- Capítulo 4, diseño del controlador.
- Capítulo 5, resultados utilizando diferentes tipos de curvas.
- Capítulo 6, describe el diseño final del controlador y sus características.

- Capítulo 7, conclusiones.
- Capítulo 8, Futuro trabajo.

CAPÍTULO 1

La energía eólica es sin ningún tipo de duda una importante fuente de energía, y hoy en día se está llevando a cabo una expansión masiva. Sin embargo, las posibles localizaciones en tierra para poder emplazar un parque eólico se están acabando, y por lo tanto el interés en posibles localizaciones en el mar está creciendo. En el mar, hay mucho más espacio, y no sólo eso, también la velocidad media del viento disponible en los mares es mayor.

Por estas razones, la energía eólica offshore es una solución prometedora para países con una alta densidad de población y sin lugares adecuados para la construcción de parques eólicos. Por supuesto, que existen limitaciones para la construcción de esta clase de parques eólicos, tales como unos costes de desarrollo mayores.

Sin embargo, los cables son necesarios para transportar la energía, y si se transporta como una señal trifásica, solo se pueden utilizar cables hasta un máximo de 100 km. Puesto que es necesario transportar grandes cantidades de potencia eléctrica a largas distancias, está demostrado, que es necesario utilizar líneas de transporte HVDC, y el primer parque con estas características está siendo ahora construido en el Mar del Norte. Además las líneas de transmisión HVDC han sido utilizadas con éxito durante los últimos 40 años, y existen algunos hechos bien conocidos y aceptados por todos que pueden ser muy útiles para los parques eólicos offshore. El más importante, es que la red interna del parque y la red de tierra están aisladas, lo que nos da nuevas posibilidades teniendo en cuenta la red de corriente alterna del parque offshore.

En este sistema de corriente alterna local, el voltaje y la frecuencia pueden ser cambiados por el convertidor AC-DC. Esto abre la posibilidad de quitar el convertidor conectado al generador que existe en cada turbina de viento, pero aun así teniendo rotores de velocidad variable gracias al control central para todo el conjunto del parque eólico, cambiando la frecuencia de la red a la que están directamente conectados los generadores de inducción. Esto reduciría los costes del sistema de turbinas de viento, a la vez aumentaría la fiabilidad del sistema. Y es aquí donde el sistema de resistencias variables del rotor resulta ser muy interesante, ya que puede reducir el estrés mecánico en la turbina como haría un sistema de velocidad variable.

Un asunto muy interesante para este sistema con resistencias del rotor variables es la selección de un control adecuado. Con resistencia del rotor controlables sería posible absorber las variaciones de potencia entrante cambiando la velocidad del rotor de una

forma mucho más rápida que con un pitch controller, lo que daría una calidad de la potencia de salida mucho mejor.

CAPÍTULO 2

En este capítulo se realiza un breve resumen de los sistemas de turbinas de viento mas utilizados. También se introducen la ventajas de combinar parques eólicos offshore con líneas de transmisión HVDC.

Una turbina eólica es un mecanismo que transforma la energía viento en energía eléctrica a través de un generador. Los diseños actuales de aerogeneradores se pueden clasificar en aerogeneradores de pala de paso fijo y aerogeneradores de pala de paso variable.

Los de paso fijo presentan un ángulo de inclinación de la pala constante cara al viento. Los de paso variable permiten adaptar dicha inclinación de pala en función de la velocidad del viento, rotando alrededor del eje longitudinal de la pala, y modificando las propiedades del perfil aerodinámico en su confrontación frente al viento incidente.

Los aerogeneradores de paso fijo consisten en una aeroturbina de palas fijas y un generador de rotor de jaula bobinada (máquina asíncrona de inducción), conectados mediante una caja multiplicadora de engranajes. El devanado del estator del generador está conectado a la red. Sus ventajas fundamentales son la simplicidad del equipo y su costo.

Los aerogeneradores de paso variable es un mecanismo de giro de inclinación de las palas, que supone una mayor complejidad y costo del equipo, pero que se justifica por la optimización de la captación de energía. Dentro de las máquinas de paso variable, las diferentes opciones de regulación de velocidad se pueden comparar, desde los diseños menos sofisticados a los más complejos.

Los aerogenerador de velocidad fija consiste en una caja multiplicadora y un generador asíncrono directamente acoplado a la red por su estator, con unas baterías de condensadores para compensar la energía reactiva. Los inconvenientes de funcionar a velocidad fija son las sobrecargas mecánicas que se generan debido a las ráfagas de viento. Estas fluctuaciones de potencia en el viento se traducen, aunque filtradas, en fluctuaciones de la potencia eléctrica generada.

Los aerogeneradores de velocidad variable pueden ser con generador de inducción doblemente alimentado, este sistema está formado por un sistema multiplicador y un generador asíncrono cuyo estator está conectado directamente a la red y cuyo rotor lo

está a través de dos convertidores de frecuencia.

También existen generadores de velocidad variable con generador síncrono múltiplo, estos sistema son los más complejos de todos. El sistema multiplicador se elimina merced a un generador síncrono multipolo, empleándose para variar la velocidad en el estator dos convertidores que controlan toda la potencia de la máquina.

Para conectar un parque eólico offshore con la tierra, la mejor alternativa son las líneas de transmisión HVDC. Esto es debido al hecho de que para la transmisión de grandes cantidades de potencia a largas distancias no es factible con los sistemas de transmisión tradicionales de corriente alterna.

Ha sido demostrado que cuando la cantidad de potencia a transmitirse, así como la distancia, son lo suficientemente grandes, las líneas de transmisión HVDC son más baratas que los sistemas de corriente alterna tradicionales. De igual forma los sistemas de transmisión de corriente continua provocan menores pérdidas.

CAPÍTULO 3

En este capítulo, se presenta el modelo de la maquina de inducción. Además, se muestra la linearización del modelo obtenida. Al final, se demuestra que como depende el comportamiento del modelo de la maquina de inducción respecto al valor de las resistencias del rotor.

Para la modelización de la máquina de inducción se utilizó la transformación de Park para pasar de un sistema trifásico a un sistema bifásico. Al final se obtuvo un sistema de ecuaciones como el que se muestra a continuación y que se implementaron en MATLAB para crear el modelo.

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt}$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{r\beta}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r L_r i_{r\beta} + \omega_r L_m i_{s\beta}$$

$$0 = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r L_r i_{r\alpha} - \omega_r L_m i_{s\alpha}$$

Si se reorganizan las ecuaciones en forma de matrices el resultado es:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}$$

y la forma del espacio de estados queda como:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = Ax + Bu$$

Una vez obtenido el modelo, se llevo a cabo la linearización obteniendo como matrices A y B las que se muestran a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-L_m R_s}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{-L_2 L_m \omega_1 + L_2 L_m (\omega_1 - \omega_{r0})}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \frac{L_m (R_r + R_{gr})}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{L_m L_r \omega_1 - L_m L_r (\omega_1 - \omega_{r0})}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \left(\frac{L_m^2 i_{sq0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) + \left(\frac{L_m L_r i_{rq0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) \\ \left(\frac{-L_2 L_r \omega_1 + L_m^2 (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \frac{-L_r R_s}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{-L_m L_r \omega_1 + L_m L_r (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \frac{L_m (R_r + R_{gr})}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{-L_m^2 i_{sd0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) - \left(\frac{L_m L_r i_{rd0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) \\ \frac{L_m R_s}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{-L_2 L_m \omega_1 + L_2 L_m (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \frac{-L_2 (R_r + R_{gr})}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{-L_m^2 \omega_1 - L_2 L_r (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \left(\frac{-L_2 L_m i_{sq0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) - \left(\frac{L_s L_r i_{rq0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) \\ \left(\frac{L_2 L_r \omega_1 - L_m^2 (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \frac{L_m R_s}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{L_m L_r \omega_1 - L_m L_r (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) & \frac{-L_2 (R_r + R_{gr})}{L_s L_r - L_m^2} & \left(\frac{-L_2 L_r (\omega_1 - \omega_r)}{L_s L_r - L_m^2} \right) - \left(\frac{L_s L_r i_{rd0}}{L_s L_r - L_m^2} \right) \\ -1.5 \frac{p^2 L_m i_{rq0}}{J} & 1.5 \frac{p^2 L_m i_{rd0}}{J} & 1.5 \frac{p^2 L_m i_{sq0}}{J} & -1.5 \frac{p^2 L_m i_{sd0}}{J} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{L_m (R_r + R_{gr}) i_{rd}}{L_s L_r - L_m^2} \\ 0 & \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & 0 & \frac{L_m (R_r + R_{gr}) i_{rq}}{L_s L_r - L_m^2} \\ 0 & 0 & \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} & 0 & -\frac{L_s (R_r + R_{gr}) i_{rd}}{L_s L_r - L_m^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} & -\frac{L_s (R_r + R_{gr}) i_{rq}}{L_s L_r - L_m^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p}{J} & 0 \end{bmatrix}$$

Al estudiar el comportamiento del modelo de la maquina de inducción respecto al valor de las resistencias del rotor, se observo que a mayores valores de la resistencia del rotor la respuesta de la corriente del estator era más amortiguada durante los cambios del par de entrada.

CÁPITULO 4

El objetivo del controlador que se implemento es poder controlar el deslizamiento del

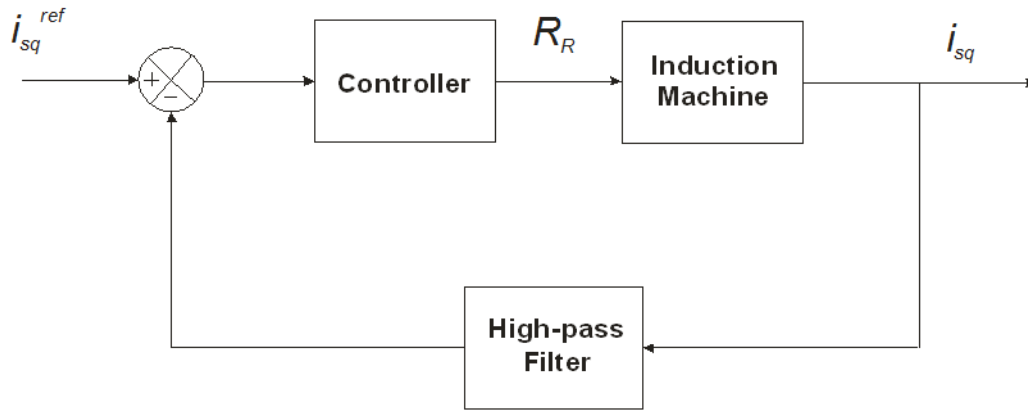
generador. El deslizamiento del generador varía con la energía generada cuando varía la velocidad, y es función de la resistencia del devanado del rotor, es decir, a mayor resistencia mayor deslizamiento, por lo que una forma de variar el deslizamiento consiste en variar la resistencia del rotor del alternador. La estructura del sistema consta de un sistema multiplicador, generador asíncrono y unas resistencias del rotor variables. Al variar la resistencia del rotor se varía el deslizamiento, entre un 1% y un 10%, lo que permite a los aerogeneradores absorber los golpes de viento, reduciendo las cargas extremas sobre el multiplicador, a la vez que se genera una potencia eléctrica sin fluctuaciones. La energía de las ráfagas de viento se elimina mediante un ligero aumento de la velocidad de la cadena cinemática y mediante la disipación en resistencias en el rotor.

El deslizamiento del generador varía con la energía generada cuando varía la velocidad, y es función de la resistencia del devanado del rotor, es decir, a mayor resistencia mayor deslizamiento, por lo que una forma de variar el deslizamiento consiste en variar la resistencia del rotor del alternador. Deslizamiento variable.- La estructura de deslizamiento variable consta de un sistema multiplicador, generador asíncrono y unas resistencias del rotor variables. Al variar la resistencia del rotor se varía el deslizamiento, entre un 1% y un 10%, lo que permite a los aerogeneradores absorber los golpes de viento, reduciendo las cargas extremas sobre el multiplicador, a la vez que se genera una potencia eléctrica sin fluctuaciones. La energía de las ráfagas de viento se elimina mediante un ligero aumento de la velocidad de la cadena cinemática y mediante la disipación en resistencias en el rotor.

En este capítulo primero se realizó la reducción del orden del modelo linearizado de la máquina de inducción, para que de esta forma fuese más sencillo el diseño del posterior controlador. La función de transferencia del sistema de segundo orden quedo como se muestra a continuación:

$$F(s) = \frac{6737600s}{s^2 + 11,01s + 233,8}$$

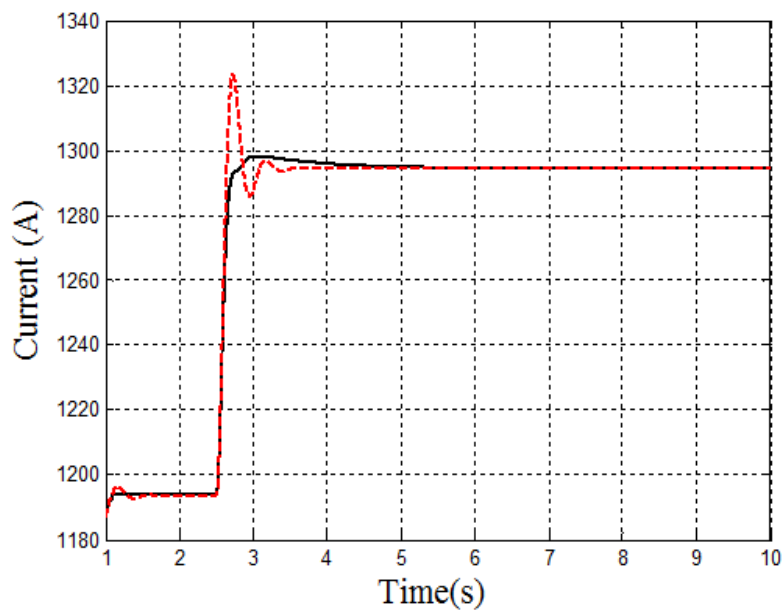
Tras reducir el orden de la modelo linearizado de la maquina de inducción hasta un modelo de orden 2, se paso al diseño del controlador. La idea que hay detrás del controlador es pasar la componente q de la corriente del estator por un filtro paso-alto, para obtener las componentes de alta frecuencia de la señal que se desea eliminar. El diagrama de bloques del controlador se muestra a continuación:



Se estudiaron diferentes tipos de controladores, como el controlador proporcional o el controlador proporcional-integral. Al final el controlador que se utilizó, fue un doble integrador, cuya función de transferencia se muestra debajo:

$$F_c(s) = \frac{Kp}{s^2}$$

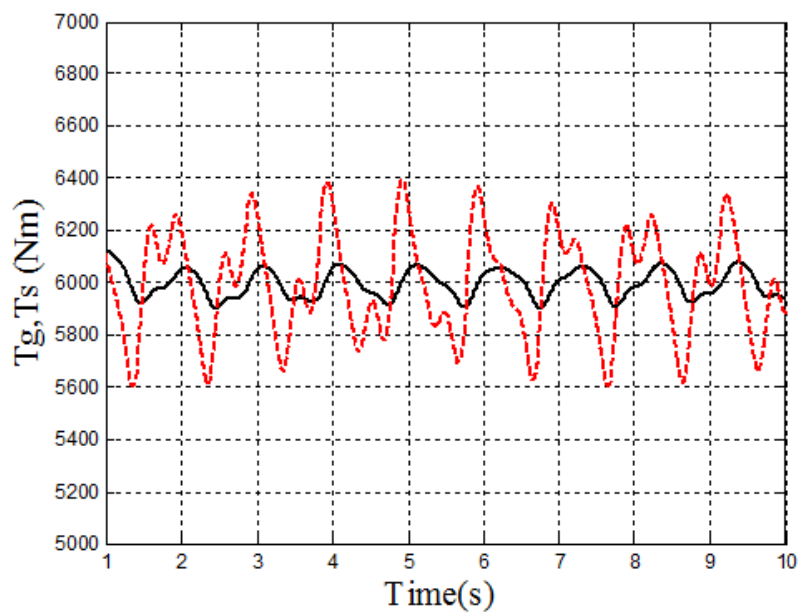
Con este controlador se obtuvo el mejor amortiguamiento de la señal como se puede apreciar en la siguiente imagen, donde se puede apreciar la corriente del estator ante una variación en el par mecánico de entrada (con línea roja el sistema sin control y con línea negra el sistema controlado).



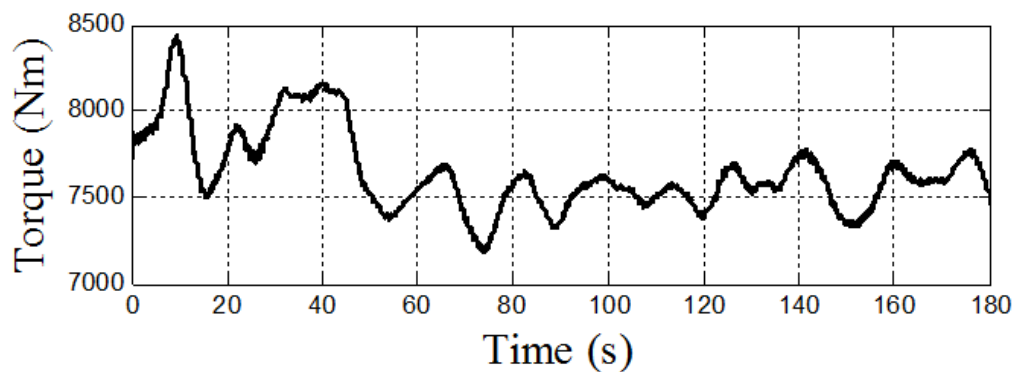
CAPÍTULO 5

En este capítulo se implementó en matlab/simulink el controlador diseñado en el capítulo anterior para observar la respuesta de todo el sistema ante diferentes tipos de señales de entrada, así como para analizar la mejora en la calidad de la potencia y la reducción del estrés mecánico.

Primero se expuso al sistema a una serie de curvas sintéticas para ver cómo se comportaba el sistema para diferentes tipos de formas de ondas. Un ejemplo de este tipo de curva se puede ver a continuación.

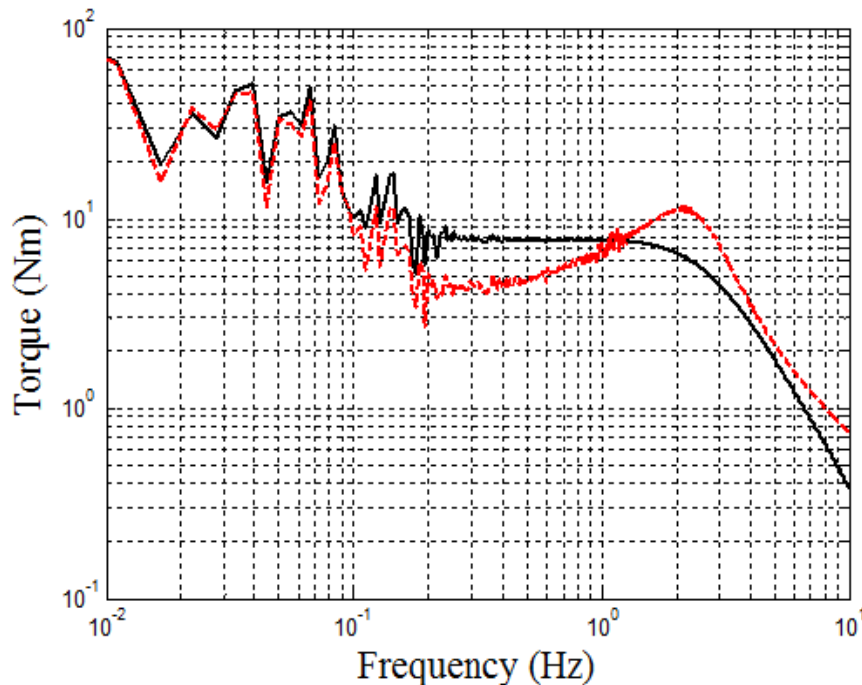


Posteriormente se expuso el sistema a datos reales del par mecánico en una turbina de viento para ver la respuesta del controlador ante curvas de par mecánico reales como la que se muestra debajo.



Para estudiar la calidad de la potencia eléctrica en las turbinas eólicas se suele recurrir a un parámetro llamado flicker contribution que da idea de la calidad de la potencia midiendo las fluctuaciones en la señal de potencia. Después de realizar diferentes pruebas se obtuvo que la reducción del flicker estaba fuertemente relacionada con la forma de la onda, y esta se podía reducir desde un 35% hasta un 60% implementando el controlador, donde el 60% corresponde a señales de onda con mucho rizado.

También se llevó a cabo el estudio de la reducción en el estrés mecánico que se obtiene al implementar el controlador de las resistencias variables del rotor. En la imagen mostrada tras estas líneas se observa que al implementar el controlador se obtiene una reducción en las componentes de alta frecuencia del par generado, que son las que más afectan al estrés mecánico.



CAPÍTULO 6

En este capítulo se muestran los valores seleccionados para los diferentes parámetros que se pueden seleccionar dentro del controlador, siendo el más importante el valor por defecto de la resistencia del rotor. A continuación se muestran estos valores:

- Frecuencia de corte del filtro paso-alto: 20Hz
- Ganancia: 0,3

- Resistencia del rotor media: $1,8e-3$

CAPÍTULO 7

En este capítulo se exponen las conclusiones a las que se llegaron a lo largo del trabajo realizado. Antes de nada, decir que el propósito de este proyecto fue evaluar el comportamiento de una turbina de viento equipada con un generador de inducción que a su vez monta resistencias del rotor variables.

CAPÍTULO 8

En este último capítulo, se exponen una posible guía sobre el futuro trabajo que se podría realizar.