

Control de velocidad mediante paso de pala para un aerogenerador experimental de pequeña potencia

Sergio Fragoso Herrera

Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España, e-mail: p52frhes@uco.es

Francisco Vázquez Serrano

Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España, e-mail: fvazquez@uco.es

Fernando Morilla García

Departamento de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, C/. Juan del Rosal 16, Madrid, España, e-mail: fmorilla@dia.uned.es

Resumen

El diseño de sistemas de control de velocidad variable representa un reto importante ya que se trata de procesos multivariables no lineales, con fuertes perturbaciones, diversas restricciones y gran interacción entre sus variables. En este trabajo se presenta la problemática que genera el diseño de sistemas de control para aerogeneradores haciendo especial hincapié en las soluciones basadas en técnicas de control multivariable. El objetivo es aplicar una de estas técnicas a un aerogenerador experimental de pequeña potencia de velocidad y paso variable (VS-VP), el cual reúne una tecnología similar a los equipos de mayor potencia. En este trabajo se presenta el análisis y diseño del lazo de control de velocidad actuando sobre el mecanismo servomotor de ángulo de paso de pala.

Palabras Clave: control multivariable, velocidad variable, paso variable, aerogenerador experimental.

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica ha experimentado un rápido crecimiento desde finales de la década de los 90. En el año 1997 solamente había instalada a nivel mundial una capacidad de 7480 MW. Inicialmente esta capacidad fue incrementando alrededor de los 2000 MW por año hasta alcanzar los 42 GW instalados en 2011 [16]. En cuanto a generación, en España en 2011 la producción eólica representó un 16.33% de la cobertura de la demanda eléctrica [5]. Estas estadísticas muestran como la energía eólica es una tecnología consolidada y asentada dentro del mix de generación.

El aumento de la generación de energía eléctrica por medio de la fuerza del viento, no solo se asocia a un aumento de la capacidad instalada, sino también a una mejora de su funcionamiento. Los aspectos más importantes a considerar son: la generación eficiente de la potencia y la regulación de la velocidad angular bajo condiciones cambiantes del viento.

Esta mejora de la eficiencia de las plantas de producción eólica constituye unos de los principales problemas a los que se enfrentan las empresas energéticas. Entre los avances encaminados a resolver este problema se encuentra la instalación de aerogeneradores de velocidad variable, con los que se pretende extraer la máxima energía eléctrica posible a bajas velocidades del viento y mantenerla en sus valores nominales cuando se presentan fuertes vientos. Esto aporta muchos beneficios con respecto a los aerogeneradores de velocidad fija, como mejor calidad en la energía eléctrica producida, mayor rendimiento y una considerable reducción en las vibraciones y esfuerzos mecánicos, tanto en la turbina, como en el generador eléctrico [13]. Junto a la velocidad variable, la capacidad de modificación del ángulo de paso de pala aporta mayor flexibilidad y controlabilidad al aerogenerador permitiendo aplicar estrategias de control multivariable, mejorando así el rendimiento [4], [8], [9], [12].

En este trabajo se aborda el diseño de un lazo de control de velocidad sobre el aerogenerador de pequeña potencia, con vista a una futura inclusión en una estrategia de control multivariable. El documento está estructurado como se indica a continuación. En la sección 2 se describe el funcionamiento del aerogenerador y la problemática de control en las diferentes regiones de operación. En la sección 3 se muestra el equipo experimental y sus características principales, así como, el sistema de adquisición y control utilizado. En la sección 4 se analiza el lazo de control de velocidad partiendo de la identificación de

la planta y terminando con la presentación de varios resultados. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones y los posibles trabajos futuros.

2. FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR Y PROBLEMÁTICA DE CONTROL

El modo de funcionamiento de todo aerogenerador es dependiente de la intensidad de la velocidad del viento. Fundamentalmente se distinguen tres regiones de operación [4], como se muestra en la figura 1. En la región I (carga parcial) el aerogenerador opera a potencia subnominal y el objetivo es extraer toda la energía posible con objeto de mejorar la eficiencia. En la región III (plena carga) el viento ha alcanzado una velocidad lo suficientemente alta para que la potencia producida se encuentre en niveles nominales. El objetivo en esta zona es mantener ese nivel de producción energética ante cualquier perturbación del viento para evitar posibles sobrecargas y fatigas estructurales. La región II es una región de transición entre ambas zonas.

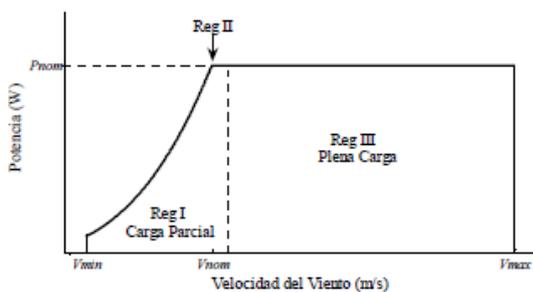


Figura 1: Regiones de operación en función de la velocidad del viento

La solución tradicionalmente adoptada en control de aerogeneradores consiste en el uso de controladores PID independientes en cada región de operación. En la región I los algoritmos MPPT (*Maximum Point Power Tracking*) [1] buscan una optimización del proceso generando puntos de consigna cambiantes para la velocidad ω_r y la potencia P_g , de forma que se consiga la máxima extracción de energía. En esta zona se suele aplicar un control de velocidad a través del par del generador τ_g , manteniendo el valor del ángulo de paso de pala β en el punto más adecuado para la optimización de la extracción de energía, figura 2.

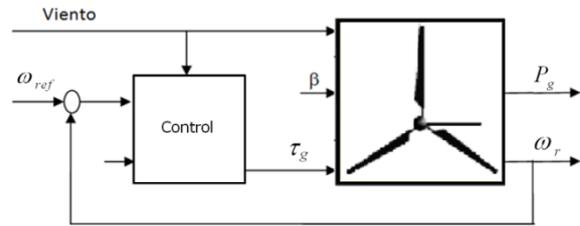


Figura 2: Control de velocidad en la región I

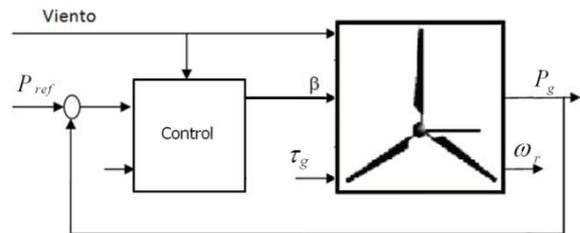


Figura 3: Control de potencia en la región III

En la región III es necesario mantener la potencia y la velocidad en sus valores nominales, mediante un controlador de potencia que modifica el ángulo de paso de pala y mantiene el par del generador en el valor nominal, figura 3.

Esta estrategia monovariable permite mantener al aerogenerador operando en cualquier punto. Sin embargo, ante cambios en la intensidad del viento, la potencia y la velocidad pueden exhibir un comportamiento inadecuado con amplias fluctuaciones, debido principalmente a la interacción existente no corregida con un único controlador.

Por tanto dado el “carácter multivariable” del proceso la línea de trabajo del grupo pretende aproximar un planteamiento de estrategia de control que cumple con las premisas [15]:

- Carácter MIMO, con una estructura similar mostrada por la figura 4, que incluya a la dos variables controladas (potencia y velocidad) así como las dos variables manipuladas (par y paso de pala)
- Puede ser empleado en las tres regiones de operación
- Permite incorporar una capa en un nivel superior, que incluye un algoritmo MPPT en la región I.

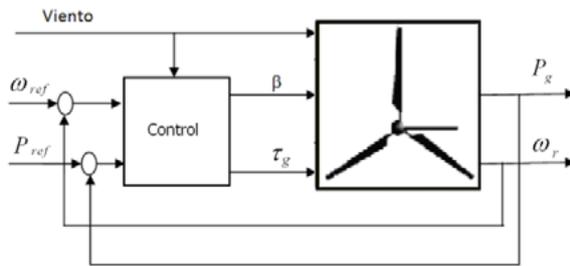


Figura 4: Control Multivariable del aerogenerador

3. EQUIPO EXPERIMENTAL

3.1 AEROGENERADOR DE PEQUEÑA POTENCIA

El aerogenerador de pequeña potencia empleado en este trabajo, figura 5 es el modelo EOLICC del fabricante Astrienne Didact. El equipo se compone de un rotor bihélice con acoplamiento directo a un generador de corriente continua de imanes permanentes, figura 6. Incorpora también un mecanismo de rotación de hélice a través de un servomotor de corriente continua de 10 W. El equipo dispone de un panel de potencia y un panel de control que permiten comandar al aerogenerador tanto en modo local (manual), como en modo exterior (conexión con sistema DAQ).



Figura 5: Imagen del aerogenerador



Figura 6: Detalle del rotor y generador eléctrico del aerogenerador

La tabla 1 recoge los principales parámetros del equipo. La torre junto a la góndola está situada en el interior de un pequeño túnel de viento y dispone de un motor-ventilador comandado por un variador de velocidad, el cual permite establecer las condiciones de viento, figura 6. Justo a la salida del ventilador, el flujo de aire pasa a través de una rejilla de fibra que transforma el caudal de aire turbulento en flujo laminar. Además dispone conjuntamente de unos deflectores laterales que canalizan el flujo de aire hacia el generador eólico, de manera que todo el flujo incide de forma transversal sobre el plano en el que se sitúa el rotor.

Tabla 1: Parámetros del aerogenerador de pequeña potencia

Parámetro	Unidad
Tensión de utilización	230 V
Frecuencia de utilización	50 Hz
Consumo eléctrico	2000 VA
Potencia motor-ventilador	1.1 KW
Diámetro del rotor	595 mm
Potencia nominal	80 W
Tensión nominal	24 V
Potencia máxima	94.8 W
Velocidad nominal	2300 rpm
Velocidad máxima	4000 rpm
Resistencia de armadura	1.44 Ω
Inductancia de armadura	0.56 mH
Inercia del rotor	1290 gcm ²
Constante de velocidad	95.3 rpm/V
Constante de par	100 mNm/A
Rango de velocidad de viento	0-42 km/h
Rango de ángulo de paso de pala	-2°-25°
Rendimiento máximo	79 %
Relación de transmisión	Acoplamiento directo

3.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y CONTROL

La adquisición y acondicionamiento de la señales de entrada y salida analógicas, así como, el aislamiento eléctrico y el rechazo al ruido electromagnético se efectúa por medio de unos módulos de acondicionamiento de la serie 5B de National Instruments insertados en un backplane 5B08 de 8 canales, del mismo fabricante. Este backplane se comunica con una tarjeta PCI a través de una placa de interfaz SC-2050 de National Instrument.

La arquitectura de control utilizada es la denominada PC-in-the-Loop, donde el ordenador actúa como controlador principal adquiriendo datos mediante una tarjeta serie PCI-6035E de National Instruments. La

tarjeta transmite en tiempo real los datos muestreados de sus canales hacia el software MATLAB/SIMULINK con la toolbox de tiempo real Real-Time Windows Target, que contiene el programa de control, figura 7.

El vector de señales de entrada analógicas se compone de las cuatro medidas que se realizan sobre el equipo: el ángulo de paso de pala (Pitch), la velocidad angular, la tensión generada a la salida del generador eléctrico y la medida de la señal del viento. Estas señales son capturadas con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Adicionalmente y como complemento al acondicionamiento previo que realizan los módulos de adquisición, cada señal de entrada analógica pasa a través de un filtro de primer orden discreto para la reducción del ruido de la señal, y a través de una etapa de adecuación de unidades.

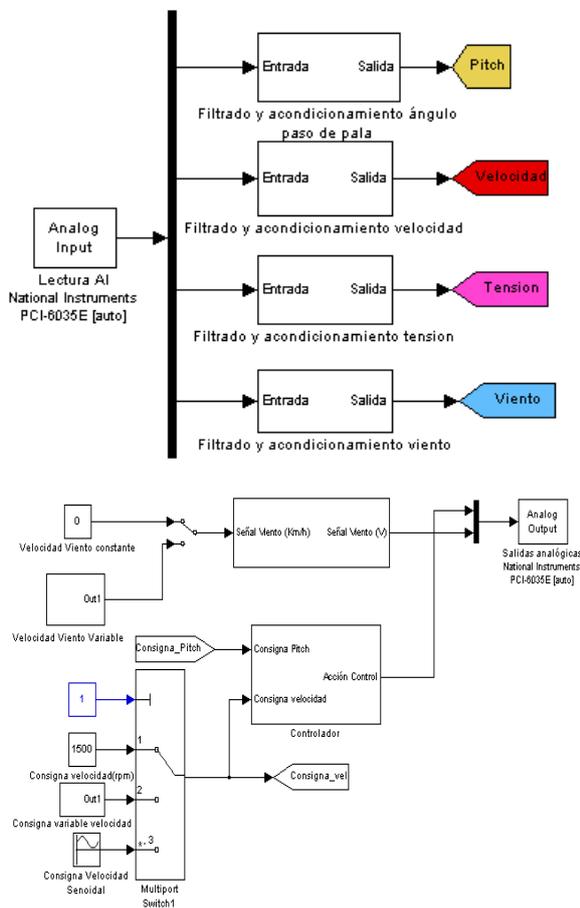


Figura 7: Diagramas de bloques del sistema real en Simulink

Para la captura de la señal de velocidad ha sido necesaria la incorporación de un módulo convertidor de frecuencia en tensión, el cual recoge la frecuencia de los pulsos establecidos por el encoder NPN que mide la velocidad del eje de la turbina y lo convierte en una señal de tensión de 0-10V.

En cuanto a salidas analógicas, desde el controlador se proporciona la consigna de velocidad de viento y el ángulo de paso de pala. La modificación de este último puede ser realizada mediante dos vías, en lazo abierto o en lazo cerrado, este último inserto en el lazo de control de velocidad. La señal de velocidad del viento previamente es tratada para la adecuación de unidades y puede presentar una única componente continua o comportarse como un viento variable. Las salidas analógicas son actualizadas con la misma frecuencia de 100 Hz.

4. CONTROL DE VELOCIDAD

El esquema de control multivariable propuesto en la figura 4, requiere del diseño de un lazo de control de velocidad y de un lazo de control de potencia. En esta sección se aborda la identificación y diseño del lazo de velocidad y se presentan los primeros resultados del control, considerando un planteamiento SISO donde no se efectúa ningún tipo de control sobre la potencia.

4.1 IDENTIFICACIÓN DE LA DINÁMICA DE VELOCIDAD

La figura 8 muestra la estructura de control de la velocidad angular ω_r . Existe un lazo exterior encargado de corregir el error de velocidad angular estableciendo consignas para un lazo interior. Este lazo interior regula la posición del ángulo de paso de pala β para influir sobre el comportamiento aerodinámico del equipo. De esta manera se consigue la velocidad angular deseada. Sobre la aerodinámica es donde se manifiesta de manera más abrupta los efectos de la perturbación del viento.

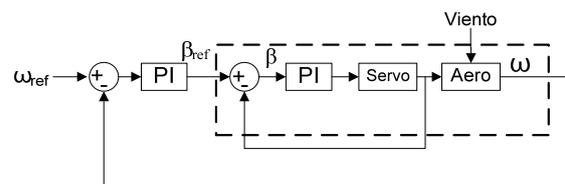


Figura 8: Esquema de control en cascada de la velocidad angular

La fase de identificación estuvo centrada fundamentalmente en la captura de la dinámica del bloque remarcado con línea discontinua en la figura 8. Este bloque es analizado como una caja negra donde se aplica un estímulo en forma de variación del ángulo de paso de pala y se mide el efecto provocado en la señal de velocidad angular. La justificación de esta identificación recae en buena medida en la correcta sintonía del lazo interior de control. Este subsistema capta la dinámica del

servosistema regulador del ángulo de paso de la pala. Algunos autores [2], [3] señalan que el bloque servomotor, generalmente hidráulico o neumático se comporta como un sistema integrador con una ganancia determinada. Tal afirmación fue corroborada en ensayos previos sobre el equipo. Con esta suposición sobre la dinámica del mecanismo servomotor se ha sintonizado un controlador con estructura PI de manera heurística mediante la técnica de Ziegler-Nichols y a través de la herramienta de sintonía de controladores SISO [14]. La sintonía busca una respuesta en lazo cerrado sobreamortiguada. La ganancia proporcional obtenida del controlador interior es $K_{p1} = 6$ grados/V y el tiempo integral $T_{i1} = 5$ s, con una saturación de ± 10 V y un slew-rate de ± 7 V/s.

La identificación se efectúa en varios puntos de trabajo buscando un modelo representativo aproximado. Los puntos de operación están definidos por la velocidad del viento y por el margen del ángulo de paso de pala que cubre la señal estímulo. El número de identificaciones efectuadas abarca aproximadamente el rango completo de variación del ángulo de paso de pala del equipo (-2° a 25°) para varias velocidades de viento constante. Estas velocidades se seleccionaron para que el aerogenerador siempre trabajara por debajo de su velocidad angular nominal de 2300 rpm. Las figuras 9 y 10 muestran el ajuste de un modelo de primer orden sin retardo y su correspondiente validación en varios puntos de la identificación.

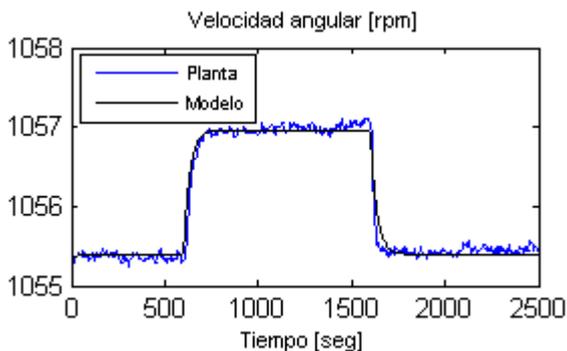


Figura 9: Ajuste y validación de un modelo de primer orden para una velocidad del viento de 8.33 m/s y una zona de ángulo de paso de pala de 17° - 14° - 17°

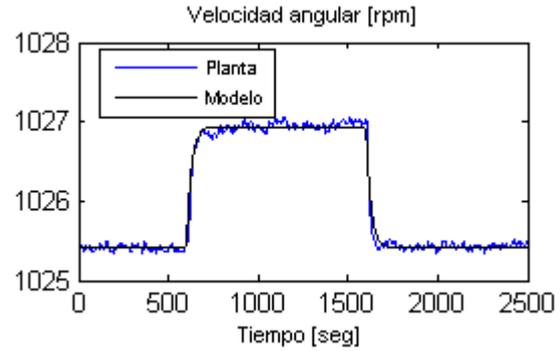


Figura 10: Ajuste y validación de un modelo de primer orden para una velocidad del viento de 8.88 m/s y una zona de ángulo de paso de pala de 19° - 16° - 19°

Mediante el análisis de los diferentes modelos parciales obtenidos, se ha considerado un modelo medio como modelo representativo de la dinámica de velocidad angular. El modelo es de primer orden sin retardo del tipo

$$G(s) = \frac{a}{1 + bs} \quad (1)$$

Con $a = -0.48$ y $b = 32.38$

4.2 LAZO DE CONTROL DE VELOCIDAD ANGULAR

El tiempo de asentamiento del modelo-sistema en lazo abierto es de aproximadamente 160 s. El sistema en lazo cerrado junto con el controlador ha sido diseñado para obtener un tiempo de asentamiento similar, para impedir que el controlador intente hacer al sistema más rápido frente a un cambio, generando señales de control elevadas que pueden provocar un sobrepaso excesivo no deseado sobre la consigna.

A través de la herramienta software de diseño paramétrico de controladores [10] se ha sintonizado un controlador de estructura PI con la especificación de tiempo de asentamiento requerida. El controlador diseñado presenta una ganancia proporcional de $K_{p2} = -0.81$ Hz/grados y un tiempo integral de $T_{i2} = 11$ s.

Una característica importante de los resultados reales es que el sobrepaso de la señal de velocidad en la dinámica de subida no supone más de un 5% de la referencia. Esto refleja que con este controlador se ha llegado a una situación de compromiso entre la velocidad de respuesta y el tipo de respuesta ofrecida en lazo cerrado.

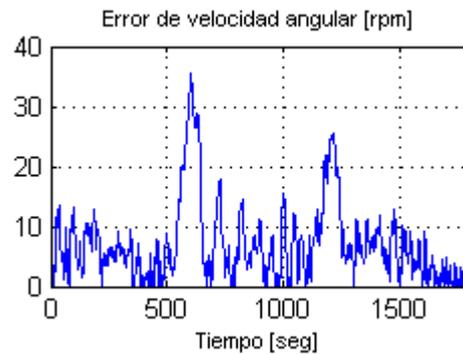
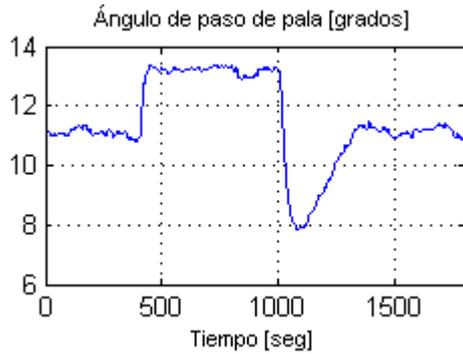
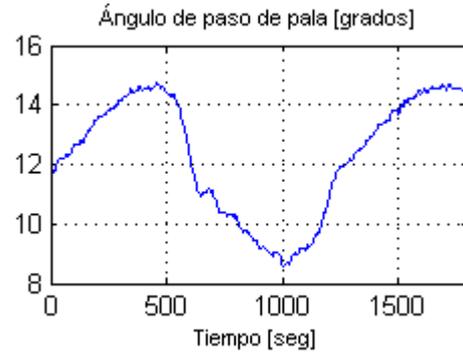
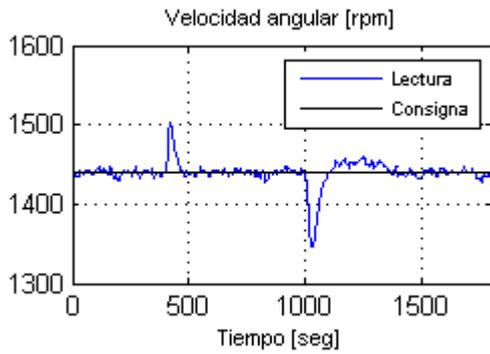


Figura 11: Salida y señal de control del aerogenerador frente a una perturbación provocada por una variación de la velocidad del viento

Figura 12: Salida, señal de control y valor absoluto del error de un seguimiento de consigna del aerogenerador

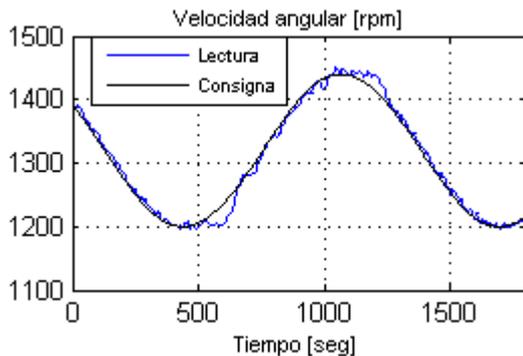
El sistema conjuntamente con el controlador es de tipo I, contiene un polo en el origen y por tanto es capaz de seguir referencias, figura 11 y rechazar perturbaciones a la salida provocadas por el viento, figura 12. En la figura 11 el aerogenerador es sometido a un viento test con una componente continua de 8.33 m/s, la cual presenta un primer salto escalón positivo de 0.55 m/s de amplitud a los 400 s de ensayo, y un salto negativo de -0.55 m/s en los 1000 s. El controlador intenta mantener una consigna de velocidad de 1440 rpm.

La figura 12 muestra el desempeño del controlador frente a un seguimiento de referencia senoidal oscilante entre 1440 rpm y 1200 rpm, con una componente de viento media de 8.33 m/s. A pesar del continuo cambio de la consigna, la media del error mantiene un valor bajo de 7.2 rpm.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado un aerogenerador VS-VP experimental de tecnología similar a los equipos de mediana y gran potencia, y sobre el cual es posible aplicar diferentes estrategias de control y extrapolar los resultados hacia otros equipos de mayor potencia.

En este trabajo, con el proceso de identificación de la velocidad angular-ángulo de paso de pala se ha llegado a la obtención de un modelo intermedio de primer orden sin retardo que ha permitido diseñar el controlador de velocidad. Tanto en simulación, como en los correspondientes ensayos realizados sobre el equipo experimental ha quedado de manifiesto como se ha conseguido la sintonía de un único controlador capaz de estabilizar al sistema frente a cambios de referencia en zonas de operación subnominal.



El proceso en estudio se considera como un sistema multivariable, por lo que una estrategia de control de estas características puede mejorar el funcionamiento del sistema. Como trabajo futuro se plantea el análisis y aplicación de una estrategia de control multivariable, con el diseño de la electrónica adicional para conseguir un control de potencia. Además se plantea el estudio de técnicas de minimización de interacción entre variables de control a través de redes de desacoplo [6], [7].

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de Excelencia P10-TEP-6056 Junta de Andalucía, España.

Referencias

- [1] Barakati, S., Kazerani, M., Aplevich, J. (2009). "Maximum Power Tracking for the Wind Turbine Systems including a Matrix Converter". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 24, no 3, pp 705-713.
- [2] Bianchi, F., D. Battista, H, et al. (2007). *Wind Turbine Control Systems Principles: Modelling and Gain Scheduling Design*. Germany, Springer
- [3] Bianchi, F., Mantz R.J., et al. (2004). "Power Regulation in Pitch-Controlled Variable Speed WECS Above Rated Wind Speed". *Renewable Energy*, vol 29, pp 1911-1922.
- [4] Boukhezzar, B., Lupu L., et al. (2007). "Multivariable Control Strategy for Variable Speed, Variable Pitch Wind Turbine". *Renewable Energy*, vol 32, pp 1273-1287
- [5] European Wind Energy Association (2011). *Pure Power. Wind Energy Targets for 2020 and 2030*
- [6] Garrido, J., Vázquez, F., Morilla, F. (2011). "An Extended Approach of Inverted Decoupling". *Journal of Process Control*, vol 21, pp 55-68.
- [7] González, M., Garrido, J., et al (2011). "Multivariable Centralized Control with Decoupling Feedforward Compensation for Residential Wind Turbine". *18th World Congress The International Federation of Automatic*. Milan (Italia).
- [8] González, M., Vázquez, F., Morilla, F. (2010). "Control Multivariable Centralizado con Desacoplo para Aerogeneradores de Velocidad Variable". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol 7, pp 53-64
- [9] Haque, M., Negnevitsky, M. (2010). "A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbines with a Permanent Magnet Synchronous Generator". *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 46.
- [10] Morilla, F., Vázquez, F., et al (2006). "PID Control Design with Guaranteed Stability". *7th IFAC Symposium on Advances in Control Education*
- [11] Muljadi, E., Butterfield, C.P., et al (1996). "Variable Speed Operation of Generators with Rotor-Speed Feedback in Wind Power Applications". *15th ASME Wind Energy Symposium*. Houston (Texas).
- [12] Nagai, B., Ameku, K., et al (2009). "Performance of a 3kW Wind Turbine Generator with Pitch Control System". *Applied Energy*, vol 86, pp 1774-1782.
- [13] Rodriguez, J.L., Burgos, J.C., et al (2003). *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*. Editorial Rueda.
- [14] Vázquez, F., Morilla, F., Sanmiguel, E. (2000). "Entorno Matlab para Diseño de Controladores PID". XXI Jornadas de Automática. Sevilla (España)
- [15] Vázquez, F., González, M., Garrido, J., Morilla, F. (2012). "Control Multivariable: aplicación al control de un aerogenerador". *X Simposio CEA de Ingeniería de Control*. Barcelona (España).
- [16] World Wind Energy Association (2011). *World Wind Energy Report 2010*. WWEA Head Office. Bonn (Alemania).