

Modelado de una turbina eólica doblemente alimentada de gran porte usando Matlab/Simulink

Powerful wind turbine modelling using Matlab/Simulink

Presentación: xx/10/2024

Matías Aravena

Departamento de Ingeniería Eléctrica-UTN-FRBB
matieze28@gmail.com

José Vissio

AES
Departamento de Ingeniería Eléctrica-UTN-FRBB
josevissio@gmail.com

Andrés García

Departamento de Ingeniería Eléctrica-GESE-UTN-FRBB
andresgarcia@frbb.utn.edu.ar

Adrián Gonnet

Departamento de Ingeniería Eléctrica-GESE-UTN-FRBB
gonnet@frbb.utn.edu.ar

Resumen

Debido al crecimiento de las energías renovables instaladas en la matriz energética de la República Argentina, se evidencian fallas relacionadas a estas tecnologías en desarrollo y constante crecimiento; especialmente en algunos sistemas sometidos a grandes solicitudes permanentes. Un ejemplo claro de esto son los reiterados fallos de componentes de potencia en convertidores de frecuencia. Para poder, a futuro comprender las causas y soluciones de esos fallos sistemáticos relacionados a estos componentes del sistemas, propone modelar el conjunto generador – convertidor de frecuencia – transformador de potencia acoplados a una red eléctrica mediante un modelo en variables de estado que permita una implementación futura de leyes de control óptimo e identificación de parámetros partiendo de mediciones reales disponibles en generadores eólicos instalados. Las mediciones utilizadas serán datos reales obtenidos de turbinas eólicas a fin de verificar su respuesta en distintos estados de la red eléctrica para verificar en última instancia las condiciones de trabajo de los componentes de potencia montados en convertidores de frecuencia, una vez que a futuro se consigan identificar los parámetros del modelo propuesto en este trabajo.

Palabras clave: Generador eólico, generador sincrónico, modelo en variables de estado, sistemas de control

Abstract

Due to the growth of renewable energies installed in the energy matrix of the Argentine Republic, failures related to these developing and constantly growing technologies are evident, especially in some systems subjected to large permanent loads. A clear example of this is the repeated failures of power components in frequency converters. To be able to understand the causes and solutions of these systematic failures related to these system components in the future, in this paper, a state-space variables model of the set frequency



converter-power transformer coupled to an electrical network will be presented, allowing for future optimal control implementations and parameter identification based on real measurements available in installed wind generators. The measurements used will be real data obtained from wind turbines to verify their response in different states of the electrical network to ultimately verify the working conditions of the power components mounted on frequency converters, once the model parameters in this paper will be correctly identified in the near future.

Keywords: Wind turbine, synchronous generator, state-space variables model, control systems

Introducción

Las diferentes fuentes de generación de energía actuales: hidrocarburos, solar, eólica y bioenergías a nivel mundial incrementarán mayormente el uso de energía eólica a 680 GW entre 2023 y 2027 (ver [[1] y [2]]). Por ello, el estudio de generación y control eólica son una fuente actual de investigación/desarrollo (ver [3]). En particular, los sistemas de control lineal y no-lineal que acompañan al funcionamiento de medianas y grandes turbinas eólicas, es crucial para obtener máximas potencias y aspectos de seguridad (ver por ejemplo [4]).

Tanto a nivel mundial como nacional, se puede apreciar que el mayor aporte de las energías renovables es de origen eólico. Si bien existen diversas tecnologías, las turbinas instaladas y en operación hoy en día utilizan generadores del tipo asincrónico, lo cual representa un desafío para la estabilidad del Sistema Argentino de Interconexión (SADI, [5]). De acuerdo con los Procedimientos Técnicos de CAMMESA, dichos generadores deben cumplir ciertas condiciones para acoplarse a la red y soportar exigencias definidas para cada emplazamiento (IEC 61400-1 Ed.3 (2005) y IEC 61400-12-1[6] y [7]).

Por otro lado, para una correcta inyección de energía en la red interconectada desde una turbina eólica, se requiere un sistema de control preciso que tenga en cuenta las non-linealidades del sistema turbina-carga mecánica, pero que a la vez contemple una regulación de velocidad (control de pitch) por razones de seguridad (ver por ejemplo [8]). Desde un punto de vista de sistemas dinámicos, por tratarse de un conjunto turbina-carga mecánica complejo con gran cantidad de variables de estado, deberá recurrirse a observadores lineales/no-lineales para la estimación de velocidades y esquemas de control (ver por ejemplo [9]).

Por otro lado, es sabido que el control de pitch de una turbina eólica puede realizarse de manera individual o colectiva (ver por ejemplo [10]), aunque ambos modos requieren de una estimación/medición de la velocidad de viento para predecir la región de funcionamiento de la turbina eólica. Como se expuso, un observador puede reconstruir la información que no se mida usando sensores dedicados (ver [3]). Por ello, se consideran tres zonas de trabajo: sub-sincronismo (baja energía cosechada), sincronismo (energía mediana), hiper-sincronismo (alta energía cosechada). En todas las zonas de funcionamiento, el convertidor de potencia corrige continuamente la señal en el rotor del generador para permitir que este se mantenga conectado a la red a través de un transformador de potencia. Sumado a esto, ante cualquier evento de red, el convertidor de frecuencia permite entregar energía reactiva a fin de colaborar con estabilizar la red y mantener la turbina en funcionamiento mientras dure el transitorio, de acuerdo con los procedimientos exigidos por CAMMESA.

Aunque en muchos modelos simplificados, se esquematiza al convertidor y su electrónica con un diodo, en verdad se trata de un puente H construido en general con transistores IGBT de potencia. Estos componentes son los que reciben los transitorios debidos a contra-tensiones inducidas de hasta 5 veces el valor en bornes (ver por ejemplo [11], [12] y [13]). Por estos motivos, se hace claro que dicha generación presenta las siguientes necesidades de investigación:

- Modelado completo turbina-carga mecánica con mediciones reales
- *Modelo en variables de estado para diseño de algoritmos de control y mantenimiento predictivo*
- Leyes de control aplicables a hardware actual: control óptimo singular y CPWL (ver [14], [15] y [16])
- Observador no-lineal para estimación de estados
- Simulaciones del modelo completo en Matlab/Simulink para predecir fallas/zonas de trabajo



En este trabajo se presenta a modo de *work-in-progress*, el diseño de un conversor DC-AC de potencia para conversión rotórica de un generador real eólico instalado en el parque Tres Picos, a partir de 690 V(RMS) y con objetivos de inyección en red. Se propone un esquema de conversión DC-AC desacoplado por fase preparado para la incorporación de leyes de control singular óptimas (ver [15]), que aseguren el funcionamiento como conjunto con mínima desviación de neutro y menor THD (distorsión armónica total). Como los componentes de potencia de estos equipos son objeto de reiteradas fallas debido a las exigencias constantes a las que se ven sometidos, el modelo planteado permitiría analizar el comportamiento de estos ante diferentes condiciones para evaluar motivos de fallo, plantear mediciones que lo confirmen e implementar acciones de mejoras.

Modelo completo de una turbina eólica de potencia

Una turbina eólica basa su modo de funcionamiento en extraer energía cinética del viento convirtiéndola en par de giro en su eje. Para poder extraer potencia de un generador dentro de una turbina eólica son necesarias ciertas condiciones de viento (valores mínimos y valores máximos), así como también que la turbina se encuentre orientada en la dirección del viento. Cumplidas estas condiciones, las palas recogen la energía cinética del viento, generando una condición de torque en el eje del buje del aerogenerador. Dicho eje se encuentra acoplado a una caja multiplicadora que amplifica la velocidad de giro por un valor constante.

De acuerdo con las condiciones presentes de viento, el resultado obtenido de este proceso es una velocidad en eje del generador que permite al mismo acoplarse a la red e inyectar potencia aparente. Si bien hay diferentes tipos de generadores utilizados para generación eólica, el predominante es el generador asincrónico con rotor bobinado. Para que un generador de este tipo se sincronice con la red, y teniendo en cuenta que la velocidad en su eje es variable dependiendo de la velocidad del viento, se utiliza el esquema de la Fig. 1:

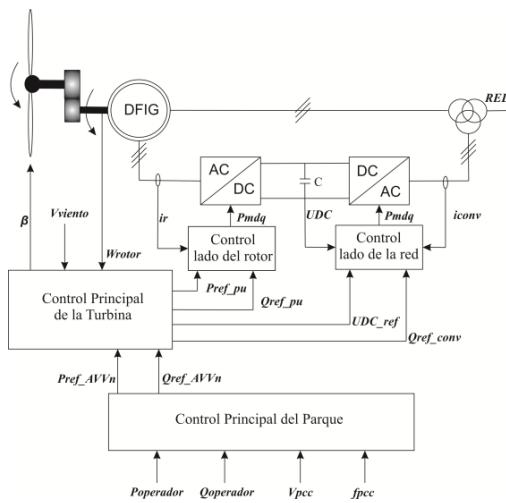


Figura 1: Esquema completo de un generador eólico de potencia con sus conversores y sistemas de control

Como se puede observar, el estator del generador tiene referencia de tensión a través de un transformador de potencia. A su vez, un convertidor de frecuencia genera una señal en el rotor del generador que permite extraer del estator un voltaje sincronizado con la de la red, pudiendo inyectar potencia. La turbina eólica presenta dos modos de control de acuerdo con el recurso eólico disponible y la velocidad de giro del generador, existen tres zonas de trabajo:

- Subsincronismo: El recurso es bajo, por lo que las palas van a 0° mediante el control de pitch y el convertidor inyecta una señal en el rotor de una frecuencia tal que permitan verse reflejados los 50Hz eléctricos en bornes del generador.
- Sincronismo: El recurso transmite al tren de potencia un torque tal que el mismo gire a velocidad de sincronismo. El convertidor de frecuencia inyecta una tensión continua en el rotor.

- Hipersincronismo: El recurso es alto, por lo que se regula el ángulo de pala mediante control de pitch a fin de obtener el máximo torque permitido en tren de potencia. El convertidor de frecuencia inyecta una señal en rotor a fin de adecuar el deslizamiento y permitir entregar 50Hz en rotor.

En cualquiera de estas tres zonas de funcionamiento, el convertidor corrige continuamente la señal en el rotor del generador para permitir que este se mantenga conectado a la red a través de un transformador de potencia. Sumado a esto, ante cualquier evento de red, el convertidor de frecuencia permite entregar energía reactiva a fin de colaborar con estabilizar la red y mantener la turbina en funcionamiento mientras dure el transitorio, de acuerdo con los procedimientos exigidos por CAMMESA.

Modelo de lado de red del Convertidor de Frecuencia

Una característica importante debido al uso de generadores asincrónicos doblemente alimentados es que bajo hipersincronismo el flujo de potencia se obtiene de ambos bobinados; estator y rotor. De ahí que esta zona de trabajo sea de alta cosecha de energía y rendimiento. El convertidor de frecuencia puede ser analizado en dos partes, una conectada y a cargo del control de la señal que se le entrega al rotor, mientras que la otra parte está conectada a la red a cargo, para este caso en hipersincronismo de la inyección de la potencia extraída desde el rotor. Bajo un régimen normal de funcionamiento el convertidor puede manejar hasta un 33% de la potencia del estator. A su vez regula la tensión del bus de continua, y el factor de potencia es configurable, trabajando en este caso con una tensión de línea de 690V.

Se analizará esta parte del convertidor de frecuencia como un conversor DC-AC, aunque debido a su naturaleza de funcionamiento en base a conmutación de transistores IGBT, la generación de armónicos es inevitable. Por tanto, es pertinente contar con un control que genere la menor cantidad de armónicos y cumplir con los requisitos de CAMMESA para la inyección de potencia a la red. Se propone para este objetivo la utilización de la técnica control óptimo singular (como trabajo futuro), para la cual se debe contar con un modelo en variables de estado del conversor (ver [15]). Este modelo cuenta con las siguientes partes:

- Bus de continua
- Puente H trifásico de IGBTs
- Filtro LC
- Trasformador de potencia
- La red como una reactancia y tensión.

Es posible considerar un convertidor de tres ramas, con tres filtros L-C independientes (Fig. 2):

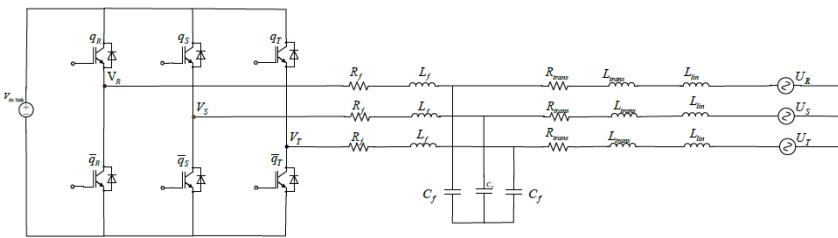


Figura 2: Circuito electrónico del convertir DC-AC de inyección en red

Para poder utilizar la técnica de control óptimo singular presentada en [15], se desarrollará el control del conversor como tres puentes H monofásicos independientes. Es posible entonces concebir un modelo de conversor simplificado por rama como se observa en la Fig. 3:

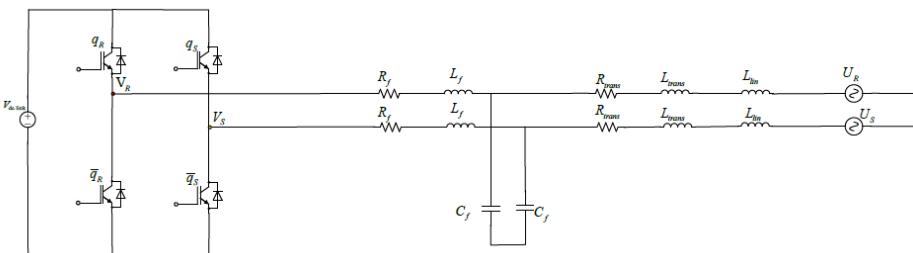


Figura 3: Esquema del conversor simplificado

Aplicando Kirchoff y desarrollando, se llega a las ecuaciones en variable de estado mostradas en la Ec. (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{L_f C_f} & \frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_f + R_{trans}}{L_f + L_{trans} + L_{lin}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{L_f C_f} \\ -1 \end{bmatrix} V_{RS} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_R + U_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dónde las variables son: $x_1 = V_c$, $x_2 = \dot{V}_c$, $x_3 = I_{RS}$. Con el mismo procedimiento, se obtienen las ecuaciones para los otros dos puentes H monofásicos. Se observa que bajo este desarrollo de obtendrían los tres puentes H monofásicos desacoplados entre sí, pero que bajo el control óptimo funcionan como un conjunto acoplado de ecuaciones (modelo completo).

Parámetros y mediciones reales

Para poder tener un control exacto de las condiciones instantáneas en las cuales opera el generador y poder generar acciones de control que permitan acoplarse a la red y entregar potencia de manera permanente, se toman diferentes tipos de mediciones. Estas mediciones reales detalladas a continuación se van a utilizar como variables en el modelo del trabajo de investigación en curso:

Señales mecánicas:

- Velocidad de viento
- Velocidad de giro eje lento
- Velocidad de giro eje rápido
- Torque en eje rápido

Señales eléctricas:

- Tensiones, corrientes y frecuencia de red
- Tensión bus de continua en convertidor de frecuencia y del rotor
- Corriente de línea de rotor
- Potencia activa/reactiva entregada Estator
- Potencia activa/reactiva entregada Rotor
- Tensión y corriente primario y secundario transformador de potencia
- Potencia reactiva/reactiva en primario de transformador de potencia

Por otro lado, se tienen los parámetros de cada uno de los componentes instalados (palas, caja multiplicadora, generador, convertidor de frecuencia y transformador de potencia), entregados por el fabricante. Esto permitirá obtener un modelo preciso, con la posibilidad de estudiar la contribución del conjunto a estabilizar la red eléctrica ante diferentes condiciones (Fig. 4).

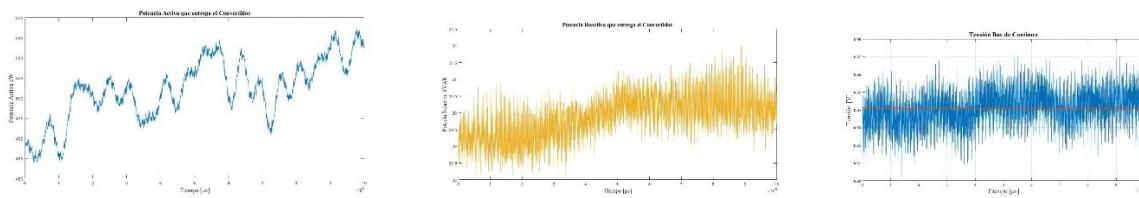


Figura 4: Mediciones reales de un generador eólico instalado en el parque tres picos

Conclusiones

En este trabajo se presenta una *work-in-progress* sobre el diseño de un sistema de control de potencia de un conversor DC-AC para generación eólica desde el rotor de un generador doblemente alimentado asincrónico. El trabajo se centra en el modelado en variables de estado de un bloque fundamental en la generación eólica: el conversor DC-AC para inyección de potencia en la red desde el rotor. Por otro lado, se ha propuesto un modelo trifásico en variables de estado del generador completo incluida la red que permite la incorporación de controles óptimos singulares de manera directa con base en resultados previos.

Es remarcable que las mediciones reales que se poseen de aerogeneradores ubicados en el parque eólico Tres Picos permitieron una correcta identificación de voltajes del bus de continua, así como potencias activas y reactivas de referencia para el control a utilizar. En este sentido, utilizando estas mediciones y adicionando nuevas mediciones que completen y complementen el conjunto se identificarán los parámetros del modelo en variables de estado presentado para la implementación posterior del control óptimo en dos etapas: a nivel de simulación en Matlab/Simulink y luego implementando hardware a escala de ensayos y laboratorio.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo y financiación de la Universidad tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, al grupo de Investigación GESE y el Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Referencias

- [1] G. W. E. Council. Global Wind Report 2023 (2023)
- [2] O. Apata and D.T.O. Oyedokun (2019). An overview of control techniques for wind turbine systems. Scientific African, vol. 10.
- [3] A. Shourangiz-Haghghi et al (2020). Developing More Efficient Wind Turbines: A Survey of Control Challenges and Opportunities. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 14, no. 4, pp. 53-64. doi: 10.1109/MIE.2020.2990353.
- [4] Gambier, A (2022). Multiobjective Optimal Control of Wind Turbines: A Survey on Methods and Recommendations for the Implementation. Energies, vol. 15, no. 567. <https://doi.org/10.3390/en15020567>
- [5] M. Mokhtari, S. Zouggar, M. L. Elhafyani, T. Ouchbel, N. K. M'sirdi and A. Naaman (2018). Voltage Stability Improvement of an Asynchronous Wind Turbine using Static Var Compensator with Single Input Fuzzy Logic Controller. 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Rabat, Morocco, pp. 1-6. doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702872.
- [6] International Electrotechnical commission. (2005). Sistemas de generación de energía eólica (IEC61400-1 Ed. 3)
- [7] International Electrotechnical commission. (2005). Sistemas de generación de energía eólica (IEC61400-12-1)
- [8] X. Yin and X. Zhao (2020). Composite Hierarchical Pitch Angle Control for a Tidal Turbine Based on the Uncertainty and Disturbance Estimator. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 1, pp. 329-339, Jan. doi: 10.1109/TIE.2019.2896261.
- [9] Yuan, Y., Chen, X., and Tang, J. (2017). Disturbance Observer-Based Pitch Control of Wind Turbines for Enhanced Speed Regulation. ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control, vol 139, no 7. <https://doi.org/10.1115/1.4035741>

- [10] Pitch control and yawing: systems for optimal wind turbine design.
<https://www.keba.com/en/news/industrial-automation/pitch-and-yaw-systems-wind-turbine>
- [11] Okedu Kenneth E. and Barghash Hind (2021). Enhancing the Transient State Performance of Permanent Magnet Synchronous Generator Based Variable Speed Wind Turbines Using Power Converters Excitation Parameters. *Frontiers in Energy Research*, vol. 9.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.655051>. DOI=10.3389/fenrg.2021.655051. ISSN=2296-598X
- [12] Bin Hao, Yingzhe Wu, Cheng Peng, Xinling Tang, Zhibin Zhao (2021). Modelling and solving of IGBT's transient analysis model based on the finite state machine. *IET Power Electron*, vol.14, pp: 1973–1984.
<https://doi.org/10.1049/pel2.12163>
- [13] Animesh Kundu 1, Aiswarya Balamurali 1, Philip Korta 1, K. Lakshmi Varaha Iyer 2
and Narayan C. Kar (2020). An Approach for Estimating the Reliability of IGBT Power Modules in Electrified Vehicle Traction Inverters. *Vehicles*, vol. 2, pp: 413–423. doi:10.3390/vehicles2030022
- [14] Andres García, Osvaldo Agamennoni and José Figueroa (2009). Applying Continuous Piecewise Linear Approximations to Affine Non-Linear Control systems. *IFAC Proceedings Volumes*, vol 42, no 6, pp: 114-119. ISSN 1474-6670. ISBN 9783902661456. <https://doi.org/10.3182/20090616-3-IL-2002.00020>.
- [15] Andrés García. Singular Optimal Control Applied to DC-AC converters (2014). 1er Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. FRBB.
- [16] S Ghoudelbourg, D Dib, A. Omeiri (2016). New techniques to improve the power control in the double-fed induction generator wind turbine. *Wind Engineering*.