

INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA A LA INERCIA MECANICA ROTACIONAL DE AEROGENERADORES

Álvarez Álvarez Mateo (1), Osvaldo Rodríguez Villalón (2)

(1) [Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo] | [m.alvarez100@pascualbravo.edu.co]

(2) [Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] |
[osvaldo@ugto.mx]

Resumen

En este trabajo se analizan los parámetros, cálculos y condiciones en las cuales se produce potencia en las turbinas de un aerogenerador y aprovechamiento de la inercia para almacenamiento de energía. En este sentido, la inercia mecánica del generador síncrono juega un papel importante ya que dicha inercia puede verse como una conversión de la energía cinética de una masa rotativa en energía eléctrica entregada a la red, ayudando a la red a reducir la caída/incremento de la frecuencia.

Resumen

In this research, the parameters, calculations and conditions which are involved in electric power energy production in wind turbines of wind generators are analyzed, and also how the system is taking advantage of rotational inertia as potential energy storage. Following this reasoning, mechanical rotational inertia of synchronous generators play an important roll since inertia can be seen as cinetical energy conversion through a rotative mass converted into electric power energy delivered to the electric network, thus helping to the network to reduce the drop/increment on frequeny operation.

Palabras Clave

Frecuencia; Turbina; Generador ; Inercia rotacional

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de esta investigación se ha utilizado trabajos de fin de grado de maestría de varias universidades tales como Análisis de la Inercia Virtual como estrategia de control en aerogeneradores con tecnología DFIG y su impacto en la estabilidad del sistema [1] y Modelado y control dinámico de un Aerogenerador [2], también se apoya en la patente de un Sistema de controlador de inercia para aerogenerador [3]

Debido a las caídas de frecuencia en la producción de energía en los aerogeneradores y desaprovechamiento de la inercia que hay en sus turbinas, esta investigación se hace con el fin de estudiar y analizar el movimiento que se puede producir en las turbinas gracias a la inercia y aprovechando este movimiento inercial en contra de las caídas de frecuencia que se da en las turbinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se verán sus respectivas ecuaciones para el funcionamiento mecánico de las turbinas, las simulaciones en el programa Matlab, ilustraciones y tablas para la mejor comprensión del texto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

• 1. DEFINICIÓN

El funcionamiento físico de un aerogenerador de imanes permanentes responde, como muchos sistemas físicos, a una ecuación diferencial, cuya solución particular es la solución estacionaria o de equilibrio del sistema. Sobre un generador eléctrico actúan dos grupos de fuerza: las fuerzas que lo aceleran y las fuerzas que lo frenan. Como un generador es un sistema físico que tiene un movimiento circular, en vez de fuerzas, los momentos de las fuerzas que lo hacen girar o lo frenan. La ecuación diferencial que rige el movimiento del aerogenerador es

$$M_a - M_f = I\alpha \quad (1)$$

donde M_a es el momento de las fuerzas que aceleran el generador (momento de aceleración),

M_f es el momento de las fuerzas que frenan el generador (momento de frenado), I es el momento de inercia del rotor, y α es la aceleración angular del rotor. Si M_a y M_f fueran constantes, el generador adquiriría un movimiento acelerado y la velocidad angular se haría infinita, pero este comportamiento no es físicamente posible, y gracias a que M_f (momento de frenado) es función lineal de la velocidad angular, el sistema llega a una situación de equilibrio, en la cual la velocidad angular adquiere un valor constante.

Hay diferentes niveles de respuesta en los generadores y la red de cara a corregir la frecuencia de red, en el caso de una repentina caída o incremento de frecuencia. Una primera respuesta es una respuesta natural del generador convencional, que consiste en entregar una potencia instantánea debida a la energía rotativa almacenada en los ejes, a esto se le denomina respuesta inercial. Una segunda respuesta es la dada por un controlador específico que incrementa la generación de potencia proporcionalmente a la desviación de la frecuencia de red respecto de la frecuencia nominal, esto requiere de unos 15 a 60 segundos, y permite detener la frecuencia en su ascenso/descenso. Sin embargo, no permite retornar al valor de frecuencia nominal, esta respuesta se denomina respuesta primaria. La tercera y cuarta respuestas son las denominadas respuestas secundarias o terciarias que se basan en gestionar la generación de potencia activa desde generadores, incluyendo el arranque de unidades de generación, que se encuentran detenidas, con objeto de mover el valor de la frecuencia de red hasta el valor de frecuencia nominal.

En este sentido, en relación a la respuesta inercial, las plantas de potencia convencionales que usan máquinas síncronas como generadores, se encuentran rígidamente conectadas a la red, por lo que un cambio en la frecuencia se traduce directamente en un cambio proporcional de la velocidad de giro de la turbina. En este sentido, la inercia mecánica del generador síncrono juega un papel importante ya que dicha inercia puede verse como una conversión de la energía cinética de una masa rotativa en energía eléctrica entregada a la red, ayudando a la red a reducir la caída/incremento de la frecuencia.

La conversión de energía cinética en eléctrica puede expresarse en generación de potencia activa, es decir, la energía rotativa es proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación de la turbina, que es proporcional a la frecuencia de red. Como la potencia es la cantidad de energía por unidad de tiempo, la potencia entregada, debido al cambio de la frecuencia, puede expresarse, mediante deducción matemática, como negativamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia.

El documento "Frequency behavior of grid with high penetration rate of wind generation"[4] describe la adición de una potencia inercial extra a la referencia al convertidor, de la potencia activa del controlador del aerogenerador. Esta potencia activa extra es calculada como proporcionalmente negativa a la tasa de cambio de frecuencia, con un parámetro que define su proporcionalidad. Sin embargo, la entrega de potencia cae rápidamente después de esto.

• 2. SISTEMA MECANICO

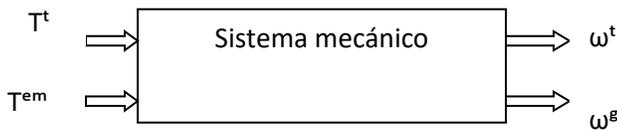


Figura 1.1 Modelado del sistema mecánico con sus variables de entrada y salida

El sistema mecánico representa la dinámica de la caja multiplicadora de velocidad (figura 1.2), necesaria para acoplar el régimen de giro de la turbina eólica (baja velocidad) y el generador eléctrico (alta velocidad). Existen diferentes maneras de representar este sistema físico. En (Clark et al., 2010) se recomienda utilizar el modelo de una masa, en donde se considera un disco giratorio con momento de inercia equivalente a la suma de los momentos individuales de sus componentes: J_t , J_{cm} y J_g (figura 1.3).

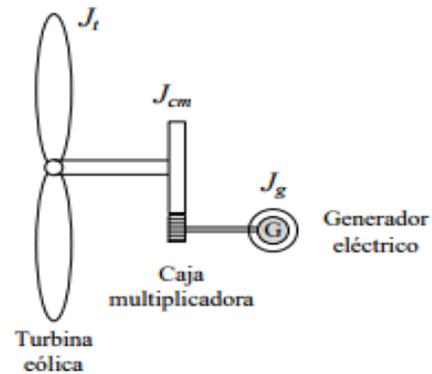


Figura 1.2 Acoplamiento entre la turbina eólica y el generador eléctrico

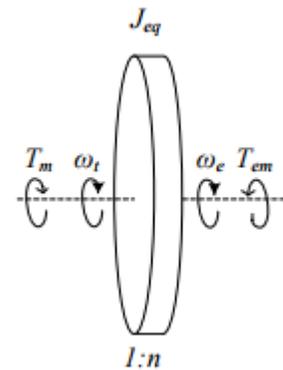


Figura 1.3 Modelo del sistema mecánico del aerogenerador

Tomando como referencia el lado de baja velocidad, la ecuación física que representa la dinámica del sistema considerado es:

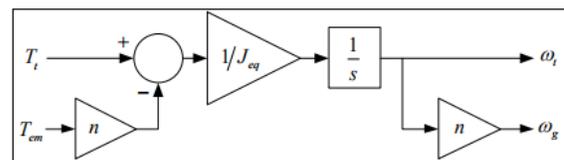
$$T^t - nT^{em} = J^{eg} \frac{d\omega^t}{dt} \quad (2) \text{ Donde:}$$

J^{eg} =Momento de inercia equivalente del sistema mecánico (kg.m²)

n = Relación de transmisión de la caja multiplicadora

Aplicando el operador de Laplace a la ecuación, se obtiene una nueva ecuación, cuya representación en diagrama de bloques se observa en la figura 1.4

$$\omega_t(s) = \frac{1}{sJ_{eq}} [T_t(s) - nT_{em}(s)] \quad (3)$$

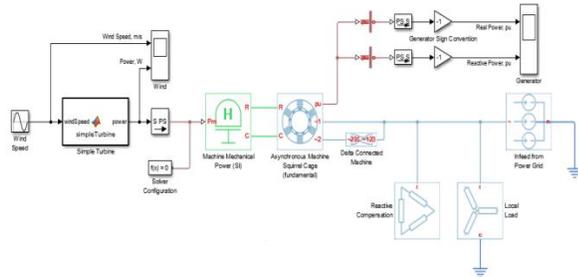


1.4 Diagrama de bloques del sistema mecánico

Muchos autores prefieren expresar las características inerciales del sistema mediante el parámetro constante de inercia, H, en lugar de momento de inercia, J. La ecuación 1.5 expresa la relación existente entre estas variables, referidas al lado de baja velocidad

$$H^{eg} = \frac{1/2 J^{eg} \omega_{base}^2}{P_{base}} \quad (4)$$

1.5 Ecuación del sistema mecánico con constante de inercia H



1.6 Ejemplos Simulink sección Simscape Power Systems "Three-Phase Asynchronous Wind Turbine Generator"

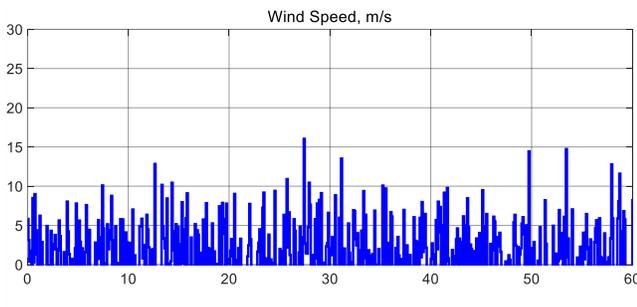


Fig.1.7 Velocidad del tiempo considerando una entrada aleatoria

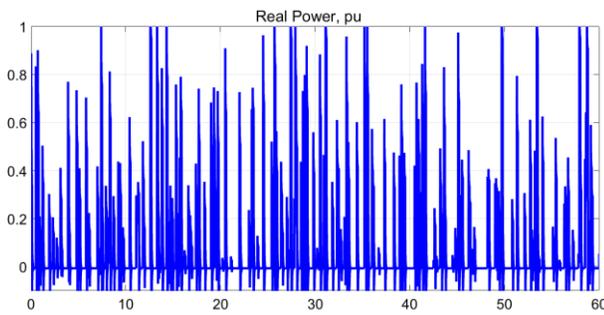


Fig.1.8 Potencia activa producida por el generador ante entrada de viento aleatoria y alta inercia

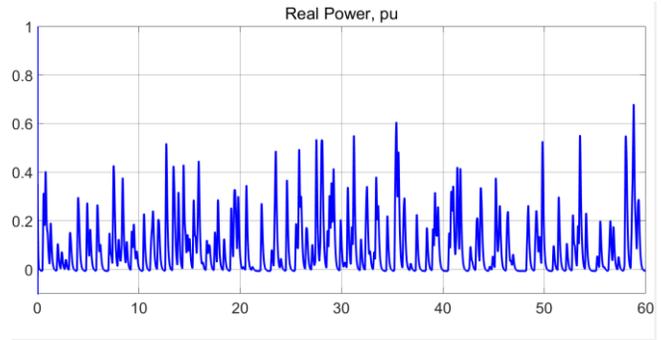


Fig.1.9 Potencia activa producida con baja inercia y viento aleatorio

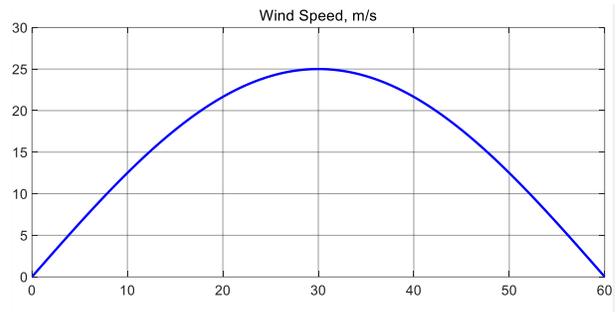


Fig.1.10 Función de viento aproximado a una función sinusoidal

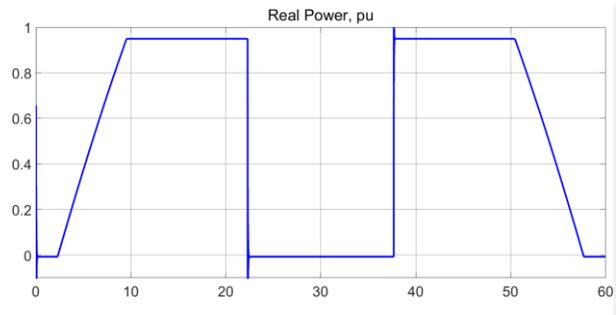


Fig.1.11 Potencia activa producida con alta inercia y viento aproximado a una función sinusoidal

1.8 Simulación de ejemplo 2.7 (Generator)

H (Inertial Constant)	4
W (Rated output power)	150e ³
Cut in speed m/s	3
Rated output speed m/s	12
Cut out speed m/s	23

1.9 Parametros de la simulación

En la simulación anterior se presenta una constante de inercia en un sistema de un aerogenerador, en la entrada de viento hay una velocidad máxima de 25 m/s y produce en el generador 1.0pu máximo de potencia real en dos ocasiones, solo con una caída de -0.02pu (El tiempo de la simulación fue de 60 segundos). Se establece la comparación en la potencia activa producida por el generador, considerando una función de viento aleatoria y una función sinusoidal, además de la constante de inercia arriba indicada con respecto a una constante de inercia cercana a cero (Figuras 1.7 – 1.11).

- 3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Un método de almacenamiento de energía consiste en el empleo de un volante de inercia, conservando así la energía en forma mecánica - cinética-. El empleo de volantes de inercia puede ser una solución a la problemática que supone el almacenamiento de energía eléctrica.

El volante de inercia se trata de un disco metálico, que comienza a girar cuando se le aplica un par motor. Una vez está girando, se frena cuando se somete a un par resistente. La ecuación de energía almacenada es la siguiente:

$$E = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (5)$$

E = Energía almacenada

I = momento de inercia, que es función de la masa y la distancia al eje de giro.

ω = velocidad angular

Por tanto, a mayor masa ubicada a mayor distancia del centro de giro, mayor energía almacenada. Como la velocidad angular está al cuadrado, resulta más rentable incidir en tratar de elevar el número de revoluciones antes que aumentar la masa o las dimensiones para alcanzar una mayor energía almacenada.

Además, los volantes de inercia permiten que la transferencia energética sea muy rápida

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha mostrado el efecto que tiene la inercia sobre el sistema mecánico mediante ecuaciones y simulaciones que permitió la demostración de su funcionamiento y el aprovechamiento de la inercia para contribuir a la

caída de frecuencia en las centrales de aerogeneradores.

Además de lo mencionado en el párrafo anterior hay una amplia y buena introducción sobre la inercia en los aerogeneradores con teoría y ejemplos que permiten que su lectura sea más fácil y no tan compleja

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente a mi Institución Universitaria Pascual Bravo en Colombia por hacer posible este verano de investigación, al igual a la Universidad de Guanajuato por haberme aceptado y facilitado sus instalaciones. Y por último a el Doctor Osvaldo Rodriguez por su ayuda en la teoría y bases en este tema, siendo así posible este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Ochoa C., Danny V (2015). Análisis de la Inercia Virtual como estrategia de control en aerogeneradores con tecnología DFIG y su impacto en la estabilidad del sistema, <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1945/1/T-SENESCYT-01119.pdf>
- [2] Nistal L., Juan (2015). Modelado y control dinámico de un Aerogenerador, <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5990/372196.pdf?sequence=1>
- [3] Jimenez, Buendia (2015). Sistema de controlador de inercia para aerogenerador, <http://patentados.com/patente/inercia-aerogenerador/>
- [4] J. Duval, B. Meyer; 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania