Autorizada

**Propuesta de proyecto de integración en Ingeniería Mecánica**

Licenciatura: Ingeniería Mecánica

Nombre del proyecto de integración (PI): Evaluación del impacto de las vibraciones mecánicas torsionales en un sistema de generación de energía eólica

Modalidad: Proyecto de investigación

Versión: Segunda

Trimestre lectivo: 17-Otoño

Nombre: Francisco Grande Vega
Matricula: 2123000486
Correo: master.x.grande@gmail.com

_____
Firma

Asesor: Dr. Irvin López García
Titular C, departamento de energía, teléfono: 5318-9000 ext. 9053
Correo: ilg@correo.azc.uam.mx

_____
Firma

Co-asesor: Dr. Francisco Beltrán Carbajal
Titular C, departamento de energía, teléfono: 5318-9069
Correo: fbeltran@correo.azc.uam.mx

_____
Firma

Fecha: 04 de diciembre del 2017

Declaratoria

En caso de que el Comité de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica apruebe la realización de la presente propuesta, otorgamos nuestra autorización para su publicación en la página de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Francisco Grande Vega

_____
Firma

Dr. Irvin López García

_____
Firma

Dr. Francisco Beltrán Carbajal

_____
Firma

1. Introducción

Un Sistema de Generación Eólico (SGE) es un sistema de conversión de energía, en donde la energía cinética contenida en el viento es convertida en energía eléctrica. Está compuesto por un grupo de subsistemas, como son: la de captación, transmisión mecánica, generador eléctrico y dispositivos de control. Fundamentalmente, a través de una turbina eólica se capta la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica rotacional, que es transmitida a un tren de potencia por medio de un par mecánico. El tren de potencia se conecta a un generador electrico, que transforma la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Los dispositivos de control se encargan de la regulación de la potencia y velocidad de la turbina para mantener al SGE en un estado de operación segura.

Los SGEs más modernos, interconectados a la red eléctrica, poseen una Turbina Eólica de Eje Horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés) compuesta por un rotor tripala y un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA) [1]. Su uso extendido se debe a la capacidad de operación de la turbina en un rango de potencia nominal máxima en un intervalo de velocidades del viento y en el generador eléctrico es posible ajustar el deslizamiento para obtener un voltaje a la frecuencia que demanda a red eléctrica [2].

La mejora continua en los susbsistemas de los SGEs permite que la capacidad de aprovechamiento de la energía del viento aumente en tales sistemas de generación. Esto ha permitido que se fabriquen SGEs comerciales con potencias nominales de 4.2MW y en etapa de desarrollo con potencias de 7.5MW, respectivamente [3-4]. El incremento de la potencia implica que un SGE esté sometido a mayores cargas dinámicas producidas por el viento y, debido a las fluctuaciones en la velocidad del viento y a la elasticidad del eje y palas, las cargas dinámicas son irregulares. Estás generan vibraciones torsionales de baja frecuencia que afectan al desempeño de los subsistemas de transmisión mecánico y eléctrico, ya que el par mecánico varia con la misma frecuencia que las vibraciones torsionales y este es el que recibe el generador eléctrico [5-6,13].

Para el control de la frecuencia del par mecánico que se suministra al GIDA se han propuesto controladores que actúan en diversos componentes, como las palas, cuya función es ayudar a reducir las oscilaciones de baja frecuencia [7]. Otros trabajos sugieren mecanismos de amortiguamiento que reducen el movimiento de la torre y que puede influir en las cargas dinámicas del sistema de transmisión [8-11]. Los controladores se diseñan a partir de modelos matemáticos que describen la dinámica del SGE, o bien de algún subsistema que lo compone. En particular, los modelos que representan el subsistema de transmisión, buscan caracterizar las vibraciones torsionales en la caja de velocidades y en el tren de potencia, con el fin de determinar qué elementos mecánicos están sometidos a mayores cargas.

Es por ello que, en esta propuesta de Proyecto de Integración se busca determinar la influencia de las vibraciones torsionales en la calidad de la energía eléctrica generada, planteando un modelo matemático que describa al subsistema de transmisión de un SGE en la etapa de potencia nominal máxima y además considere como variable la velocidad del viento. La finalidad es proponer una solución para atenuar las vibraciones torsionales en el subsistema de transmisión y reducir la variación del par mecánico que se trasmite al GIDA.

## 2. Antecedentes

Las vibraciones mecánicas en los SGEs han sido objeto de estudio debido a los efectos adversos que tienen en los subsistemas que lo componen, ya que las cargas dinámicas a las que se someten inducen vibraciones que son capaces de provocar daños estructurales. Específicamente, para el estudio de las vibraciones mecánicas torsionales en los subsistemas de captación y transmisión, se proponen modelos matemáticos para determinar las frecuencias naturales.

Todorov, Dobrev y Massouh (2009) realizaron un análisis de las vibraciones torsionales en el en la caja de velocidades compuesta por una etapa planetaria de baja velocidad y dos helicoidales de alta velocidad. Este componente se modeló como un sistema de 12 grados de libertad, en el que se considera la deformación por contacto entre los dientes de los engranes y flexibilidad de los ejes. Los resultados que se muestran al resolver dichas ecuaciones son las respuestas de cada una de las posiciones relativas de los engranes, respectivamente. Se observa que la amplitud de las vibraciones a la salida de la caja de velocidades se incrementa. En todas las etapas de transmisión, las frecuencias naturales de mayor amplitud ocurren a bajas velocidades (entre 0 y 10 Hz), de modo que las condiciones de resonancia ocurren durante el arranque de la turbina eólica [11].

Anaya-Lara, Jenkins y Ekanayake, (2009) reportan el estudio acerca de la influencia de las frecuencias de baja amplitud en el desempeño de un generador de inducción de velocidad fija. Se indica que dichas frecuencias se generan por las vibraciones a las que están sometidas las palas del rotor de una turbina tipo HAWT. Se emplea un modelo de dos grados de libertad para describir la dinámica de un Sistema de Generación Eólico de 300KW. Los resultados obtenidos muestran que existen dos frecuencias naturales de 2.7Hz y 11Hz, respectivamente. Debido a que la primera frecuencia en este caso de estudio es la que posee mayor amplitud, se determina que es la frecuencia mas significante que puede influir en las oscilaciones del torque mecánico transmitido al generador de inducción de velocidad fija [13].

Dolan (2010) describió mediante un modelo de 2 grados de libertad la torsión que existe en el subsistema de transmisión. En dicho modelo se asume que la torsión elástica y el amortiguamiento equivalente en el eje de alta velocidad es muy pequeño en comparación con el existente en la turbina eólica y el eje de baja de velocidad, pues el par al que se someten es alrededor de 8.7x10^5 Nm. La simulación del modelo se realiza en estado transitorio y empleando los parametros de una Turbina HAWT de 2MW. Los resultados muestran que el subsistema mecánico está sometido a una torsión constante cuya frecuencia es de 1.6Hz [5].

Bielecki, Barszcz y Wójcik, (2015) plantearon un modelo que describe la carga en los engranajes de una caja de velocidades, para la simulación de condiciones operativas reales y variables para modelar las vibraciones de una turbina HAWT. Se menciona que, debido a la variación de las velocidades del viento, los engranes se someten a cargas variables, ocasionando fatiga en ellos. El algoritmo que se usa para representar la velocidad angular, aceleración angular y el par mecánico trata de replicar las fluctuaciones reales. Se presentan mediante gráficos las comparaciones entre el conjunto de datos reales y los generados por el algoritmo y debido a la proximidad entre los datos, se concluye que el modelo propuesto puede ser utilizado para el estudio de simulaciones para el desarrollo de métodos de detección de fallas en la caja de velocidades [12].

Staino y Basu (2013) proponen un controlador de vibración activo que regula la flexión de las palas. Formulan un modelo matemático de las vibraciones torsionales para una turbina HAWT con rotor tripala. El modelo incluye el efecto de la rigidez centrífuga, la gravedad y considera la velocidad variable de la turbina eólica y la interacción dinámica de las palas de la turbina con la torre. Se muestran los resultados obtenidos al simular el sistema con el controlador, el cual reduce las oscilaciones en las palas y la amplitud de las frecuencias naturales que son de 0.2 y 1.1 Hz, respectivamente [6].

3. Justificación

Se busca proponer un modelo matemático que describa al subsistema de transmisión, para simular las condiciones operativas reales y caracterizar las vibraciones torsionales que influyen en la generación de la energía eléctrica. Los modelos en los trabajos anteriores se emplean para simular las cargas dinámicas a las que se somete la turbina eólica y caja de velocidades, ya sea para determinar posibles fallas o proponer esquemas de control para la atenuación de las vibraciones mecánicas.

4. Objetivos

Objetivo general

Determinar el impacto de las vibraciones mecánicas torsionales inducidas por el viento en un sistema de generación de energía eólica con una turbina de eje horizontal y un generador eléctrico de inducción doblemente alimentado, mediante el analisis del subsistema de transmisión mecanica.

Objetivos particulares

Identificar los principales problemas que ocasionan las vibraciones mecánicas torsionales inducidas por el viento en la calidad de la energía eléctrica.

Obtener un modelo matemático que describa las vibraciones torsionales inducidas por el viento en el susbsistema de transmisión mecánica.

Realizar la simulación del modelo matemático usando un software de simulación numérica, empleando parametros de un SGE de 2MW.

Integrar la dinámica de un generador de inducción doblemente alimentado controlado con el modelo del subsistema de transmisión mecánica antes mencionado.

Realizar un análisis de las vibraciones mecánicas torsionales acerca de los posibles efectos adversos en la calidad de la energía eléctrica generada.

5. Metodología

Se obtendrá un modelo matemático que describa las vibraciones mecánicas torsionales inducidas por el viento en un Sistema de Generación Eólico. En él se incluirán los efectos de rigidez, amortiguamiento, pares mecánicos externos e inercias de elementos mecánicos como las palas, caja de velocidades, ejes de alta y baja velocidad. Este modelo se empleará para analizar los modos de vibración torsionales generados y así obtener las respuestas de las velocidades y aceleraciones angulares generadas en el sistema.

El sistema de ecuaciones obtenido se simulará utilizando el software MatLab. Se emplearán los parámetros de operación de un Sistema de Generación Eólico de 2MW.

Luego, se determinará el par mecánico de salida utilizando la respuesta de la velocidad angular a la salida del subsistema de transmisión. Este es el par que se suministra al generador eléctrico, de modo que se aplicará la dinámica de un Generador de Inducción Doblemente Alimentado para analizar si existen variaciones de la frecuencia en la corriente eléctrica.

Una vez que se obtenga una respuesta de la frecuencia de la corriente eléctrica generada, se hará un análisis de las frecuencias del par mecánico suministrado al generador eléctrico para determinar si este afecta a la frecuencia de la corriente eléctrica generada. Se determinarán las posibles soluciones a través de la reducción de las vibraciones torsionales en el subsistema de transmisión mecánico.

6. Cronograma de actividades

Trimestre: 18-Invierno

| | | **Semana** | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Actividades** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| **1** | Determinar el modelo matemático que describe al subsistema de transmisión | x | x | | | | | | | | | | |
| **2** | Modelar el sistema de ecuaciones obtenido en Matlab | | | x | x | x | | | | | | | |
| **3** | Realizar el análisis de los modos de vibración generados en el subsistema de transmisión | | | | | | x | x | | | | | |
| **4** | Integrar la dinámica del Generador de Inducción Doblemente Alimentado | | | | | | | | x | | | | |
| **5** | Analizar las variaciones de la frecuencia eléctrica generadas por el par mecánico | | | | | | | | | x | x | | |
| **6** | Determinar las posibles soluciones para reducir las vibraciones torsionales y que influyen en la frecuencia de la corriente eléctrica. | | | | | | | | | | | x | x |
| **7** | Elaborar reporte final | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

7. Entregables

Reporte final

Memoria de cálculo

8. Referencias


[1] Bianchi, F., de Battista, H., and Mantz, R., 2007, Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design, Springer-Verlag, London.

[2] Ackermann, T., 2009, Wind power in power systems, John Wiley, Chichester, West Sussex, England.

[3] 2017, "Wind Turbines | GE Renewable Energy", Gerenewableenergy.com [Online]. Available: https://www.gerenewableenergy.com/wind-energy/turbines. [Accessed: 19- Oct- 2017].

[4] www.vestas.com, V., 2017, "Vestas | Turbines", Vestas.com [Online]. Available: https://www.vestas.com/en/products/turbines#!3mw-platform. [Accessed: 19- Oct-2017].

[5] Dolan, B., 2010, "Wind Turbine Modelling, Control and Fault Detection", Bachelor's degree, Technical University of Denmark.

[6] Staino, A., and Basu, B., 2013, "Dynamics and control of vibrations in wind turbines with variable rotor speed", Engineering Structures, 56, pp. 58-67.

[7] Abboudi, K., Walha, L., Driss, Y., Maatar, M., Fakhfakh, T., and Haddar, M., 2011, "Dynamic behavior of a two-stage gear train used in a fixed-speed wind turbine", Mechanism and Machine Theory, 46(12), pp. 1888-1900.

[8] Chen, J., and Georgakis, C., 2013, "Tuned rolling-ball dampers for vibration control in wind turbines", Journal of Sound and Vibration, 332(21), pp. 5271-5282.

[9] Zhang, Z., Staino, A., Basu, B., and Nielsen, S., 2016, "Performance evaluation of full-scale tuned liquid dampers (TLDs) for vibration control of large wind turbines using real-time hybrid testing", Engineering Structures, 126, pp. 417-431.

[10] Murtagh, P., Ghosh, A., Basu, B., and Broderick, B., 2008, "Passive control of wind turbine vibrations including blade/tower interaction and rotationally sampled turbulence", Wind Energy, 11(4), pp. 305-317.

[11] Todorov, M., Dobrev, I., and Massouh, F., 2009, "Analysis of torsional oscillation of the drive train in horizontal-axis wind turbine", 2009 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium.

[12] Bielecki, A., Barszcz, T., and Wójcik, M., 2015, "Modelling of a chaotic load of wind turbines drivetrain", Mechanical Systems and Signal Processing, 54-55, pp. 491-505.

[13] Ekanayake, J., Cartwright, P., Anaya-Lara, O., Jenkins, N., and Hughes, M., 2009, Wind energy generation, Wiley, Hoboken, N.J.


9. Apéndices

No aplica

10. Terminología

HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine o Turbina Eólica de Eje Horizontal

GIDA: Generador de Inducción doblemente alimentado

11. Infraestructura

No aplica

12. Estimación de costos

| Partida | | | |
|---|---|---|---|
| **Sueldo base semanal/ 40 horas** | **Tiempo dedicado al proyecto (horas)** | **Estimación de la partida ($/hora de trabajo)** | **Subtotal ($)** |
| **Asesor (Titular C)** | 48 | 143.41 | 6883.68 |
| **Co-asesor (Titular C)** | 48 | 143.41 | 6883.68 |
| **Software Matlab (licencia de software)** | | | 1869.91 |
| **Publicaciones y artículos de investigación** | | | 11332.80 |
| **Equipo de uso general (computo, impresora)** | | | 10000.00 |
| **Material de consumo (hojas, bolígrafos)** | | | 400.00 |
| | | **Total ($)** | 37370.07 |

13. Asesoría complementaria

No aplica

14. Patrocinio externo

No aplica

15. Publicación y difusión de los resultados

No aplica

**Evaluación del impacto de las vibraciones mecánicas torsionales en un sistema de generación de energía eólica**

| COMENTARIO DEL CEIM | | ACCIÓN RELIZADA EN LA PPI | |
|---|---|---|---|
| Pág. | Copiar íntegro el comentario del CEIM. | Pág. | Breve descripción del cambio realizado o justificación del cambio realizado |
| 5 | Revisar la redacción, pasando los detalles a los objetivos particulares | 5 | No se realizó cambio en la redacción debido a que debo indicar el tipo de Sistema de Generación Eólico que analizaré. Mis asesores consideran que es la mejor forma de redactar el objetivo general. |
| 5 | Falta de ortografía | 5 | Se agregó el espacio al párrafo correspondiente |
| 6 | Revisar falta de líneas | 6 | Se corrigió el formato de la tabla del cronograma de actividades |
| * | En la presentación se indicó explicar las causas de las vibraciones torsionales en un SGE | 3 | Se especificó el origen de las vibraciones torsionales en un SGE en la introducción |