



---

# **TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

## **Instituto Tecnológico de Morelia**

División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica

### **T E S I S**

## **“Modelación y Análisis de la Máquina de Inducción Doblemente Alimentada Conectada a la Red Eléctrica para Estudios de Propagación de Armónicas”**

Presenta:

**M.C. Emmanuel Hernández Mayoral**

Para obtener el grado de:

**Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica**

Director de tesis:

**Dr. Manuel Madrigal Martínez**

Morelia, Michoacán, Enero, 2015

# Resumen

Los parques eólicos tienen un gran potencial para convertirse en una fuente de energía a gran escala para la producción de electricidad en México. Los futuros proyectos para parques eólicos tendrán un rango de capacidad instalada de 250MW hasta 1000 MW, por lo que, han de desarrollarse nuevos conceptos para todo el sistema eléctrico, así como confiables diseños de los elementos del parque eólico (tomando en cuenta los aspectos de la calidad de la energía como huecos de tensión, interrupciones cortas y largas, decrementos de tensión, fluctuación y desbalance de voltaje así como la distorsión armónica, entre otros aspectos) que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes. Este es un reto a conseguir, tanto para los fabricantes como para los promotores y operadores del sistema para aprovechar el enorme recurso eólico.

En respuesta a los citados aspectos de la calidad de la energía, esta Tesis se presenta como una aportación original al análisis y modelado basado en aerogeneradores con generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) conectado a la red eléctrica para estudios de propagación de armónicas. Es por ello, que se presenta un modelo armónico confiable en estado estable de la interconexión del DFIG a la red eléctrica ya que el modelado del sistema se complica por el hecho de que la mayor parte de la atención se centra en el rotor y no en el estator de la máquina de inducción, ya que es en el rotor donde las armónicas son generadas por el convertidor de frecuencia. En el DFIG la fuente de voltaje en el rotor tiene componentes armónicas de la frecuencia fundamental, esas frecuencias inducen otras frecuencias en la corriente del estator las cuales no son armónicas de la frecuencia del sistema, resultando más complejo hablar acerca de estudios armónicos cuando se presentan inter-armónicos en el sistema. Por esa razón, esta Tesis presenta un claro análisis de las armónicas generadas por el DFIG en estado estable resultando en un modelo apropiado para análisis armónico del DFIG el cual puede ser usado para el análisis armónico en sistemas de potencia.

Se han desarrollado modelos de cada uno de los componentes necesarios para la interconexión del DFIG a la red eléctrica. El modelo de red y los componentes eléctricos del DFIG se construyen con los modelos estándar de la biblioteca de MATLAB/Simulink. El modelo de viento, el modelo aerodinámico y el modelo mecánico (capítulo II y III) se construyeron con componentes personalizados desarrollados en MATLAB/Simulink.

Los resultados obtenidos de los modelos propuestos y de las mediciones reales desarrolladas en el laboratorio indican que las corrientes armónicas y no-armónicas pueden existir en ambos lados de la máquina, es decir, por estator y por rotor, dependiendo del deslizamiento y de la frecuencia fundamental para ambas fuentes de voltaje.

# Contenido

## I. INTRODUCCIÓN

1.1	Introducción .....	1
1.2	Tecnologías de los aerogeneradores .....	3
1.2.1	Aerogenerador de Jaula de Ardilla .....	7
1.2.2	Aerogenerador con control dinámico de deslizamiento .....	8
1.2.3	Aerogenerador doblemente alimentado (DFIG) .....	8
1.2.4	Aerogenerador Full Converter .....	9
1.3	Modelado de elementos del parque eólico para estudios de propagación de armónicas ..	11
1.3.1	Carga del sistema .....	12
1.3.2	Máquinas eléctricas y transformador .....	13
1.3.3	Líneas de transmisión y elementos de derivación (shunt) .....	13
1.3.4	Convertidor CA-CA .....	14
1.4	Estado del arte .....	14
1.5	Objetivos .....	16
1.5.1	Objetivo general .....	16
1.5.2	Objetivos particulares .....	16
1.6	Justificación .....	17
1.7	Publicaciones realizadas durante el transcurso de la investigación .....	18
1.8	Descripción del problema .....	18
1.9	Descripción por capítulos .....	19

## II. TEORÍA DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

2.1	Introducción .....	21
2.2	Ecuaciones de transformación – cambio de variables .....	21
2.3	Variables del circuito estacionario transformadas a marco de referencia arbitrario .....	23
2.4	Marcos de referencia comúnmente usados .....	25
2.5	Análisis de la máquina de inducción vista desde estator .....	26
2.5.1	Ecuaciones de voltaje en variables de máquina .....	27
2.5.2	Ecuación del par en variables de máquina .....	30
2.5.3	Ecuaciones de voltaje en variables del marco de referencia arbitrario .....	31
2.5.4	Análisis en estado estable de la máquina de C.A. ....	33

2.6	Análisis de la máquina de inducción vista desde el rotor .....	36
2.6.1	Ecuaciones de transformación – cambio de variables.....	36
2.6.2	Ecuaciones de voltaje en variables del marco de referencia arbitrario.....	38
2.6.3	Análisis de operación en estado estable.....	39
2.7	Validación de resultados .....	41
2.7.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	41
2.7.2	Implementación del modelo en estado estable .....	45
2.7.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	46
2.7.4	Comparación de resultados .....	47
<b>III. MÁQUINA DE INDUCCIÓN A FRECUENCIAS ARMÓNICAS .....</b>		<b>50</b>
3.1	Introducción .....	50
3.1.1	Componente de secuencia positiva de la máquina de inducción .....	50
3.1.2	Componente de secuencia negativa de la máquina de inducción .....	51
3.1.3	Componente de secuencia cero de la máquina de inducción.....	51
3.2	Ecuaciones de voltaje armónico en variables de máquina .....	52
3.3	Análisis de la máquina en estado estable a frecuencias armónicas .....	52
3.3.1	Análisis de la máquina de inducción vista desde el estator .....	52
3.4	Máquina de inducción vista desde el rotor.....	56
3.4.1	Análisis de la máquina en estado estable a frecuencias armónicas.....	57
3.4.2	Máquina de inducción vista desde el rotor.....	57
3.5	Validación de resultados .....	58
3.5.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	58
3.5.2	Implementación del modelo en estado estable .....	61
3.5.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	64
3.5.4	Comparación de resultados .....	65
<b>IV. MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA (DFIG)</b>		
4.1	Introducción .....	68
4.2	Análisis del DFIG en estado estable a frecuencia fundamental .....	69
4.2.1	Efectos del DFIG alimentado solo por estator.....	70
4.2.2	Efectos del DFIG alimentado solo por rotor .....	70
4.2.3	Balance de potencias del DFIG a frecuencia fundamental.....	71
4.3	Validación de resultados del DFIG a frecuencia fundamental .....	74
4.3.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	74
4.3.2	Implementación del modelo en estado estable .....	77
4.3.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	78
4.3.4	Comparación de resultados .....	78

4.4	Análisis del DFIG en estado estable a frecuencias armónicas .....	81
4.4.1	Análisis de la máquina de inducción vista desde el estator .....	81
4.4.2	Análisis de la máquina de inducción vista desde el rotor .....	82
4.4.3	Armónicas de secuencia cero .....	82
4.4.4	Balance de potencias del DFIG a frecuencias armónicas.....	83
4.5	Validación de resultados (Caso 1. Fuente de voltaje armónica en estator y fuente de voltaje puramente senoidal en rotor) .....	84
4.5.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	84
4.5.2	Implementación del modelo en estado estable .....	87
4.5.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	89
4.5.4	Comparación de resultados .....	90
4.6	Validación de resultados (Caso 2. Fuente de voltaje puramente senoidal en estator y fuente de voltaje armónica en rotor) .....	91
4.6.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	91
4.6.2	Implementación del modelo en estado estable .....	94
4.6.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	96
4.6.4	Comparación de resultados .....	96
4.7	Validación de resultados (Caso 3. Fuente de voltaje quasi-senoidal en estator y voltaje puramente senoidal en rotor) .....	97
4.7.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	98
4.7.2	Implementación del modelo en estado estable .....	101
4.7.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	103
4.7.4	Comparación de resultados .....	104

## **V. CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CONECTADO A ESPALDAS**

5.1	Introducción .....	106
5.2	Análisis del convertidor de frecuencia.....	107
5.2.1	Técnicas de conmutación PWM.....	108
5.3	Análisis del convertidor conectado a espaldas a frecuencias armónicas .....	110
5.3.1	Convertidor conectado a la máquina de inducción .....	111
5.3.2	Convertidor conectado a la máquina a frecuencias armónicas (estado dinámico) .....	113
5.3.3	Convertidor conectado a la máquina a frecuencias armónicas (estado estable).....	114
5.4	Validación del DFIG alimentado por un convertidor conectado a espaldas .....	118
5.4.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	118
5.4.2	Implementación del modelo en estado estable .....	122
5.4.3	Implementación del sistema de prueba en el laboratorio .....	125
5.4.4	Comparación de resultados .....	126

## **VI. INTERCONEXIÓN DEL DFIG A LA RED ELÉCTRICA**

6.1	Introducción .....	129
6.2	Análisis de flujo de potencia para el DFIG .....	130
6.3	Modelos aplicables para el análisis de flujos de potencia .....	132

6.3.1	Modelo PQ.....	132
6.3.2	Modelo RX .....	133
6.4	Análisis de la interconexión del DFIG a la red eléctrica .....	138
6.5	Simulación del DFIG conectado a la red eléctrica .....	141
6.5.1	Implementación del modelo en estado dinámico.....	141
6.5.2	Implementación del modelo en estado estable .....	144
6.5.3	Comparación de resultados .....	151
6.5.4	Corriente y voltaje de la red.....	152
6.5.5	Corriente y voltaje del convertidor del lado de la red .....	153
6.5.6	Corriente en el bus de CD.....	155
	CONCLUSIÓN.....	160
	APORTACIONES .....	161
	REFERENCIAS.....	163
	Anexo A .....	168
	Anexo B.....	169