



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Ingeniería

**MEJORA EN LA AUTONOMÍA DE SISTEMAS EÓLICOS ANTE PERTURBACIONES DE VOLTAJE
DE RED MEDIANTE UN MODELO DE REFERENCIA DE CORRIENTE-ROTOR**

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctorado en Ingeniería

Presenta:

M. en C. Alonso Alejandro Jiménez Garibay

Dirigido por:

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Presidente

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Secretario

Dr. Aurelio Domínguez González

Vocal

Dr. Ramón Gerardo Guevara González

Suplente

Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López

Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González

Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Directora de Investigación y Posgrado

RESUMEN

El modo de condición de operación causado por perturbaciones de voltaje en sistemas de conversión de energía basados en generadores de inducción doblemente alimentados, han traído grandes retos en lo referente a eficiencia y confiabilidad. Esta tesis analiza el impacto de las perturbaciones de voltaje en las corrientes del rotor del generador ante caídas de 50, 80 y 100%, además, describe un procedimiento metodológico para obtener los modelos matemáticos de las corrientes de rotor, que permita aproximar su comportamiento ante condiciones de fallas de voltaje simétricas y asimétricas. Los resultados de los modelos matemáticos propuestos se comparan con simulaciones en el dominio del tiempo ejecutadas en SIMULINK de MATLAB con aproximadamente 95 % de similitud en condiciones de falla simétrica a tierra y 85 % de similitud en condiciones de falla asimétrica a tierra.

(Palabras clave: **Sistema de conversión de energía eólica, Generador de inducción doblemente alimentado, Corriente de rotor, Condición de falla, Caída de voltaje simétrica y/o asimétrica**)

ABSTRACT

Operation condition mode caused by voltage disturbances in wind energy conversion systems based on double fed induction generators, have brought great challenges regarding efficiency and reliability. This thesis shows the impact of the rotor currents under 50, 80, and 100 % voltage drop, in addition, describes an analysis methodology to obtain the rotor current models. The main focus of the research is approximate their behavior under symmetrical and asymmetrical fault conditions. The results of the proposed models are compared to MATLAB-SIMULINK time domain simulations with approximately 95% similarity to a symmetrical voltage drop and 85 % to asymmetrical voltage drop condition.

(Key words: Wind energy conversion system, Doubly fed induction generator, Rotor current, Fault condition Symmetrical and/or asymmetrical voltage drop)

A MI PADRE:

SALVADOR JIMÉNEZ HERNÁNDEZ

QDEP

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad de vivir.

A mi esposa Isaura López Daniel por su paciencia, cariño y apoyo incondicional.

A mi familia por siempre brindarme su apoyo.

A mis amigos por hacer gratos momentos de angustia y desespero.

Al Departamento de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Celaya, en particular al Ing. Abdón Ruiz Guerrero por su apoyo laboral y académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONACYT, por el apoyo económico brindado.

Y un agradecimiento especial a mis asesores en particular al Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz por ser mi guía en esta aventura.

¡Gracias!

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I – PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN	9
I. Introducción	9
I.1 Antecedentes	9
I.2 Planteamiento del problema	12
I.3 Justificación	13
I.4 Hipótesis.....	14
I.5 Objetivos	14
I.5.1 Objetivo General	14
I.5.2 Objetivos Particulares	14
I.6 Estructura general de la tesis	15
CAPÍTULO II	17
II. Revisión bibliográfica	17
II.1 Generador de Inducción Doblemente Alimentado	20
II.1.1 Circuito equivalente en estado estable.....	20
II.1.2 Circuito equivalente en estado dinámico.....	30
II.2 Caídas de voltaje (LVRT)	35
II.2.1.1 Simétricos	36
II.2.1.2 Asimétricos.....	37
CAPÍTULO III	38
III. Metodología	38
III.1 Modelo de tercer orden para un DFIG	38
III.2 Modelo de quinto orden para un DFIG.	40
III.2.1 Efecto del DFIG ante un hueco de voltaje simétrico	44
III.2.2 Efecto del DFIG ante un hueco de voltaje asimétrico	49
CAPÍTULO IV	52
IV. Resultados	52
IV.1 Diseño de plataforma de validación	52

IV.2 Comportamiento ante la evolución de la amplitud del convertidor lado rotor.	55
IV.3 Comportamiento ante la evolución del valor de frecuencia del convertidor lado rotor.....	59
IV.4 Condición transitoria ante una falla simétrica en el voltaje del “grid”	62
IV.4 Condición transitoria ante una falla asimétrica en el voltaje del “grid”	68
CAPÍTULO V	74
V. Conclusiones.....	74
Referencias bibliográficas	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Revisión bibliográfica.....	8
Tabla IV.1. Parámetros y configuración de bloque DFIG.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. I. 1. Capacidad instalada total de sistemas eólicos en el mundo, 2011 – 2014.....	10
Fig. I. 2. Sistema de conversión de energía eólica con un generador de inducción doblemente alimentado.....	11
Fig. II.1. Circuito equivalente idealizado del DFIG.....	23
Fig. II.2. Circuito equivalente por fase de un DFIG, con parámetros referidos a estator y diferentes frecuencias.....	29
Fig. II.3. Circuito equivalente por fase de un DFIG, con parámetros referidos a estator y misma frecuencia.....	29
Fig. II.4. Devanados trifásicos ideales para estator y rotor de un DFIG.....	31
Fig. II.5. Circuito equivalente eléctrico de un DFIG.....	31
Fig. II.6. Circuito equivalente $\alpha\beta$ en coordenadas del estator.....	34
Fig. II.7. Circuito equivalente dq en coordenadas síncronas.....	35
Fig. III.1. Relación entre marcos de referencia.....	45
Fig. III.2. Coordenadas de sincronización positiva e inversa.....	49
Fig. IV.1. Plataforma de simulación para la condición estable del sistema.....	53
Fig. IV.2. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud nula en el convertidor lado rotor.....	55

Fig. IV.3. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud del 10% en el convertidor lado rotor.....	56
Fig. IV.4. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud del 50% en el convertidor lado rotor.....	57
Fig. IV.5. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud del 100% en el convertidor lado rotor.....	58
Fig. IV.6. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición del valor de frecuencia del 6% en el convertidor lado rotor.....	60
Fig. IV.7. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición del valor de frecuencia del 12% en el convertidor lado rotor.....	61
Fig. IV.8. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición del valor de frecuencia de 30 Hz en el convertidor lado rotor.....	62
Fig. IV.9 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 20%.....	64
Fig. IV.10 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 50%.....	65
Fig. IV.11 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 80%.....	66
Fig. IV.12 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 100%.....	66
Fig. IV.13 Evolución y acercamiento de la falla simétrica en la corriente de rotor.....	67
Fig. IV.14 Gráfico de similitud entre la corriente de rotor ante la falla simétrica y el modelo de corriente propuesto; Gráfico de forma de onda del modelo de corriente propuesto.....	67
Fig. IV.15 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una falla asimétrica de fase a tierra.....	69
Fig. IV.16 Acercamiento del efecto de una falla asimétrica de fase a tierra en la corriente de rotor.....	69
Fig. IV.17 Gráfica de la evolución de la corriente de rotor ante falla asimétrica; Gráfica de la forma de onda en el lapso de duración de la falla.....	70
Fig. IV.18 Gráfico de similitud entre la corriente de rotor ante la falla asimétrica y el modelo de corriente propuesto; Gráfico de forma de onda del modelo de corriente propuesto.....	70
Fig. IV.19 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una falla asimétrica de dos fases a tierra....	71
Fig. IV.20 Acercamiento del efecto de una falla asimétrica de dos fases a tierra en la corriente de rotor.....	72
Fig. IV.21 Evolución y acercamiento de la falla simétrica en la corriente de rotor.....	72
Fig. IV.22 Gráfico de similitud entre la corriente de rotor ante la falla asimétrica y el modelo de corriente propuesto; Gráfico de forma de onda del modelo de corriente propuesto.....	73

CAPÍTULO

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

“Es de importancia para quien desee alcanzar una certeza en su investigación, el saber dudar a tiempo”

Aristóteles (384 AC-322 AC)

I. Introducción

I.1 Antecedentes

Las energías renovables provienen de fuentes de energía inagotables. Son energías limpias porque las emisiones de contaminantes, así como los gases de efecto invernadero asociados a su producción y consumo son insignificantes en relación a las energías convencionales (Kumar *et al.*, 2016).

Actualmente, la energía eléctrica generada a partir de sistemas eólicos, se establece como un pilar indiscutible en la producción eléctrica en diferentes partes del mundo, con una instalación de 370 GW que contribuye a cerca del 5 % de la producción global de electricidad. Países como Dinamarca, España, Portugal, Irlanda, Reino Unido y Alemania han alcanzado 10 % o más de su producción total a partir de la energía eólica. (WWEA, 2015).

Desde un punto de vista económico y tecnológico, la energía eólica se establece como la de mayor crecimiento, las cifras de la Fig. 1 muestran una realidad tangible y crecen continuamente.

La potencia de salida de los generadores, la potencia eléctrica producida cada vez mayor, la cantidad de granjas eólicas (wind farm), las locaciones fuera y dentro de tierra (offshore, onshore) y el porcentaje cada vez mayor que representa este tipo de energía renovable dentro de la matriz energética total, son evidencias del desarrollo de la capacidad instalada que presentan hoy en día (Nouh and Mohamed, 2014).

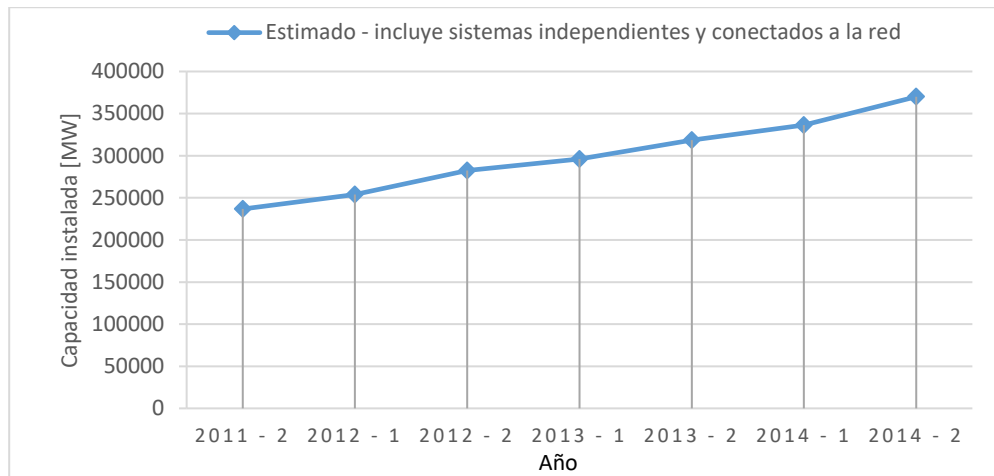


Fig. I. 1. Capacidad instalada total de sistemas eólicos en el mundo, 2011 – 2014.
Cortesía: WWEA - 2015

La producción de energía eólica a gran escala se constituye de manera general en tres fases; generación, transmisión y distribución. La naturaleza dinámica del viento y las cargas asociadas a la distribución, crean un reto importante en lo que refiere a flexibilidad, seguridad e inteligencia del sistema (Eltigani and Masri, 2015). El incremento de la producción eléctrica mediante un sistema eólico recae en la confiabilidad, una baja confiabilidad resulta en una fuente de energía inestable con un pobre rendimiento económico.

La turbina eólica con un generador doblemente alimentado (DFIG por sus siglas en inglés) es la tecnología preferida en el sistema de conversión de energía eólica, debido a que ofrece las siguientes ventajas: posibilidad de controlar por separado la potencia activa y reactiva, reduce los esfuerzos mecánicos de la turbina,

además, de que el convertidor bidireccional conectado entre rotor y red maneja solo una fracción de la potencia total del sistema (Feehally and Apsley, 2015, Mohd Zin et al., 2013, Iwanski et al., 2015).

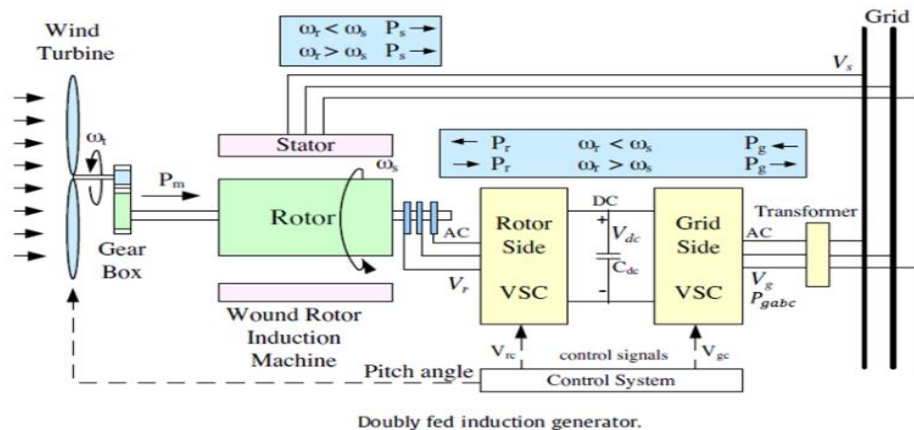


Fig. 1. 2. Sistema de conversión de energía eólica con un generador de inducción doblemente alimentado.

La Fig. 2 muestra un esquema de un sistema de conversión de energía eólica en estado estable, constituido por una turbina eólica con un DFIG, acoplados por una caja de engranes para lograr que con pocas revoluciones por minuto (RPM), se eleve a la velocidad de sincronía del generador, con ello se obtiene una inyección de potencia activa a la red por medio del estator, bajo esta condición el sistema se encuentra en sincronía, sin embargo, debido a la variabilidad del viento se puede transformar a un sistema subsíncrono si la velocidad cae o a un sistema supersíncrono si la velocidad aumenta.

La condición de subsincronía y supersincronía impactan en la potencia activa y reactiva de la red, por lo que es necesario la utilización de un convertidor CA-CD-CA bidireccional con un control desacoplado de potencia, que permite la inyección o extracción de energía en el rotor del generador con el objetivo de mantener la estabilidad de la red, la sincronía del sistema y abatir el problema de variabilidad del viento.

El sistema de conversión de energía eólica con DFIG, en estado estable presenta excelentes prestaciones para su implementación, de manera concluyente, es un sistema que maneja solo una fracción de potencia para solucionar la variabilidad del viento, además de controlar de manera independiente la potencia activa y reactiva del sistema, sin embargo, existen condiciones dinámicas en la red que recaen directamente en el comportamiento del DFIG y la estabilidad de la red (Veerasathian *et al.*, 2014).

Esta tesis se orienta hacia el análisis de las corrientes de rotor de un sistema de conversión de energía eólica trifásico con DFIG, que culmine en un modelo matemático que aproxime de manera aceptable el comportamiento ante caídas de voltaje en la red --simétricas y asimétricas--, bajo condiciones dinámicas de profundidad de la caída. La aportación del modelo brinda información relevante para el diseño de control no lineal y el cálculo de protecciones eficientes.

I.2 Planteamiento del problema

La conexión directa del estator del DFIG y la red en la Fig.2, crea vulnerabilidad ante fallas de la red. Una falla común es la caída de voltaje en estator, *Low Voltage Ride Throught - LVRT*, lo que resulta en una sobre corriente que fluye en el estator, misma que se refleja en el rotor colocando en riesgo el convertidor electrónico y el generador.

Existen tres posibilidades de manejar las fallas ocasionadas en la red dentro del sistema eólico:

1. La desconexión del sistema.
2. Diseño de un sistema de protección.
3. Diseño de convertidor con controlador no lineal.

La primera acción tiene el inconveniente de generar una inestabilidad en la red debido a la descompensación reactiva.

La segunda alternativa, es la más utilizada hoy en día para proteger el sistema ante la perturbación, básicamente se conectan resistencias en serie con el rotor, cuya conexión se controla por dispositivos semiconductores de potencia, *Active Crowbar*, sin embargo, crea problemas si no se calcula de manera adecuada el valor de las resistencias, ya que la conexión en serie con los devanados del rotor cambian la dinámica del generador lo que provoca un impacto negativo en la red. La tercera opción, tiene el inconveniente relacionado con la habilidad del convertidor de soportar la falla, cuyo impacto inmediato es la capacidad de potencia y por ende el tamaño, además de la complejidad que presenta el diseño del controlador no lineal para manejar la falla.

Cada alternativa cuenta con pros y contras, sin embargo, un factor en común en cada una de ellas son las corrientes de rotor.

I.3 Justificación

Los requerimientos de la normativa de red, *Grid codes*, en lo que respecta a caídas de voltaje establecen que la turbina eólica debe permanecer conectada a la red por un determinado periodo de tiempo antes de permitirse la desconexión y así no tener impactos en la estabilidad de la red. Ante esta condición, el modelo matemático de las corrientes de rotor toma una importancia relevante en el diseño de controladores no lineales que soporten la falla y en el diseño de protecciones de tipo *crowbar*, que ayuden a disipar la falla con el nivel de potencia reactiva establecida por la normativa.

Ahora bien, la naturaleza de la caída de tensión puede considerarse como simétrica o asimétrica y con una profundidad de caída variable, obteniéndose diferentes comportamientos del sistema.

La literatura reporta avances en estudios de las corrientes de rotor ante diferentes caídas, sin embargo se enfoca hacia encontrar el máximo valor de corriente, además de que los análisis incluyen la protección del *crowbar*.

Con lo que se concluye que, se carece de un estudio que deduzca matemáticamente las expresiones de las corrientes de rotor de un DFIG interconectado a la red.

I.4 Hipótesis

Ante caídas de tensiones de red, simétricas o asimétricas, en un sistema de conversión de energía eólica con un generador doblemente alimentado, existen expresiones matemáticas que aproximan el comportamiento de las corrientes del rotor, que brindan información para el diseño de protecciones eficientes y/o controladores no lineales.

I.5 Objetivos

I.5.1 Objetivo General

Proponer expresiones matemáticas que aproximen el comportamiento de las corrientes de rotor ante caídas en las tensiones de red (simétrica y asimétrica) en un sistema de conversión de energía eólica con un generador doblemente alimentado.

I.5.2 Objetivos Particulares

1. Obtener ecuaciones de voltaje, corriente y flujo magnético en el marco de referencia rotativo $dq0$ y en estado estable en forma vectorial.
2. Diseñar una simulación para un sistema de conversión de energía eólica, considerando las fases de generación y transmisión.
3. Diseñar una plataforma experimental en estado estable de un sistema de conversión de energía eólica.
4. Diseñar un sistema de monitoreo y adquisición de datos.
5. Obtener expresiones matemáticas de las corrientes de rotor del DFIG ante una caída de tensión en la red simétrica y asimétrica de profundidad variable.

6. Validar los modelos matemáticos con el comportamiento en simulación y de manera experimental y obtener el porcentaje de aproximación.

I.6 Estructura general de la tesis

El capítulo I, describe los antecedentes referentes a la ubicación que ocupa actualmente la energía eólica dentro de los esquemas energéticos mundiales, la topología más comúnmente utilizada, sus pros y contras. Se plantea una problemática con respecto al comportamiento dinámico del sistema ante caídas de tensión – simétricas y asimétricas - en la red. Se presenta una justificación acerca de la importancia de deducir expresiones matemáticas que aproximen de manera aceptable el comportamiento de las corrientes de rotor ante un hueco de voltaje y cómo se relaciona con el diseño de controladores no lineales y protecciones eficientes. Finalmente, se plantea la hipótesis, el objetivo general, los objetivos particulares y se presenta la estructura general de la tesis.

El capítulo II, describe de manera detallada la revisión bibliográfica acerca del comportamiento de un DFIG ante un hueco de voltaje. Se presenta un análisis matemático, a manera de marco teórico, donde se exponen los circuitos equivalentes del DFIG en estado estable y en estado dinámico, este último, dividido en el modelo $\alpha\beta$ y modelo dq , que sirven como punto de partida del análisis.

El capítulo III, presenta la metodología para la obtención de las expresiones matemáticas de las corrientes de rotor ante un hueco de voltaje simétrico y asimétrico, a partir del análisis de los modelos de tercer y quinto orden del DFIG. Se presenta el diseño de un sistema de conversión de energía eólica con DFIG a través de un software de simulación electrónica y se describe el funcionamiento en condiciones estables y transitorias-

En el capítulo IV, se presentan los resultados que validan el porcentaje de aproximación de las expresiones matemáticas de la corriente de rotor de un sistema de conversión de energía eólica con DFIG ante un hueco de voltaje simétrico y asimétrico, y ante perturbaciones con diferentes profundidades de caída, con respecto a los resultados de la simulación. Además se discute la importancia que tiene el comportamiento de las corrientes de rotor, en el diseño de esquemas de control no lineales, protecciones eficientes.

El capítulo V concluye los resultados obtenidos de la investigación y presenta un panorama general acerca del trabajo futuro que tiene como pilar los modelos matemáticos de la corriente de rotor desarrollados en el capítulo III.

Por último, se presenta la sección de referencias bibliográficas que sustentan el proyecto de investigación.

CAPÍTULO **II**

"Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo."

Albert Einstein (1879-1955)

II. Revisión bibliográfica

Actualmente las granjas eólicas se componen de sistemas con generadores de inducción doblemente alimentados, gracias a las ventajas que ofrecen en estado estable en cuanto a variabilidad del viento y desacoplo de potencias (Nouh and Mohamed, 2014, Mohd Zin *et al.*, 2013). Sin embargo, presenta desventajas durante periodos de perturbación de la línea , lo que se conoce como estado transitorio, que impactan directamente con la calidad de energía, estabilidad de la línea y seguridad del sistema (Rolán *et al.*, 2014).

En literatura se reportan esfuerzos por compensar los efectos ocasionados por perturbaciones de la línea, mediante técnicas de control (Zhu et al., 2015, Zhou *et al.*, 2015, Zhen *et al.*, 2015, Yipeng and Heng, 2014, Yingcheng and Nengling, 2012, Wenjie *et al.*, 2014, Veerasathian *et al.*, 2014, Joost *et al.*, 2015), dichas perturbaciones son; problemas de estabilización de red, desbalance de fases, regulación de frecuencia, elevaciones de voltaje en la línea y caídas de voltaje en la línea.

Las caídas de voltaje en la línea “*Low Voltage Ride Through – LVRT*”, representan un desafío importante debido al efecto ocasionado dentro del generador. Debido a que el estator del DFIG se conecta directamente con la línea (Justo *et al.*, 2015), una caída de voltaje en estator, genera una sobrecorriente, que se refleja en el rotor (generador de inducción), colocando en riesgo el convertidor electrónico de potencia bidireccional.

Además del efecto ocasionado de sobrecorriente, las normativas de red, pronuncian que el generador no debe de desconectarse de la red de manera inmediata (Eltigani and Masri, 2015), ya que, esto provoca una descompensación reactiva en la red, que llevaría a la inestabilidad.

Una manera de proteger al DFIG y al convertidor electrónico de potencia ante una sobrecorriente, sin desconectar el sistema de la red, es la adición de resistencias “*crowbar*” conectadas en serie con el rotor de la máquina eléctrica, cuya función es crear un camino de menor impedancia a la sobrecorriente, sin embargo, el valor de las resistencias afecta la dinámica del DFIG (Lafferte *et al.*, 2015).

Visto desde el punto de vista de control de LVRT, se obtiene el valor máximo de la corriente de rotor y se proponen diferentes metodologías para disminuir los efectos en el convertidor de lado rotor y la descompensación reactiva (Wenyong *et al.*, 2015b, Wenyong *et al.*, 2015a, Shuying *et al.*, 2015, Noorcheshma *et al.*, 2015, Madani *et al.*, 2015, Feng *et al.*, 2015, Chen *et al.*, 2015, Aimeng *et al.*, 2015, Vrionis *et al.*, 2014, Toledo *et al.*, 2014).

La forma (simétrica o asimétrica) y la profundidad de la caída de voltaje, modifican la dinámica del DFIG. La tabla 1 muestra las investigaciones relevantes sobre la problemática.

Tabla I. Revisión bibliográfica

Autor, año	Ecuaciones	Conclusiones
(Marmolejo et al., 2014)	$\psi_{s0} = \frac{v_{s0} - R_s i_{s0}}{j\omega_s}$ $\psi_s = \psi_{s0} e^{-\frac{R_s t}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}}}$ $\psi_{r0} = \frac{L_r}{L_m} \left[\frac{ v_s }{\omega_s} - \frac{3I_m \{v_s i_s^*\} (L_s - \frac{L_m^2}{L_r})}{3 v_s } \right] - j \left[\frac{\omega_s 3p I_m \{v_s i_s^*\} L_s L_r - L_m^2}{3p v_s L_m} \right]$ $\psi_r = \psi_{r0} e^{-\frac{R_s t}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}}} e^{-j\omega_m t}$	<p>El autor orienta el análisis a encontrar el valor de la protección ubicada entre el DFIG y el transformador de elevación, mediante la corriente de estator, ante un hueco de voltaje simétrico. Sin embargo, no analiza los efectos de la corriente de rotor, ante caídas de voltaje de profundidad variable, ni ante un hueco de voltaje asimétrico.</p>
(Gu et al., 2015)	$\psi_s = \frac{(1-k)v_{sm}}{j\omega_s} (\cos \omega_s t_1 - e^{-T_s t_1} + j \sin \omega_s t_1)$	<p>El análisis se centra en la optimización del valor de la resistencia de crowbar, considerando un hueco de voltaje simétrico y el proceso de liberación de falla. Sin embargo, no analiza en función de las corrientes del rotor.</p>
(Zhong et al., 2015)	$\psi_{s,0} = (L_m I_{ref} + L_s \frac{V_m - j\omega_s L_m I_{ref}}{R_s + j\omega_s L_s}) e^{j\omega_s t}$ $\psi_{r,0} = (L_r I_{ref} + L_m \frac{V_m - j\omega_s L_m I_{ref}}{R_s + j\omega_s L_s}) e^{j\omega_s t}$	<p>El autor analiza para un hueco de voltaje simétrico, considera el efecto de la resistencia de estator y de la resistencia de crowbar, mediante el valor pico de la corriente del estator.</p>

Los estudios relacionados con el comportamiento del DFIG ante caídas de voltaje, se orientan al cálculo de los flujos magnéticos ante huecos de voltaje simétricos, lo que permite definir el valor máximo de la corriente de estator, valor que se toma en cuenta para el diseño de protecciones de tipo crowbar.

Sin embargo, no se ha prestado atención a la dinámica del DFIG, ante huecos de voltaje simétricos y asimétricos, sin la dinámica que aporta la protección de crowbar. Lo que permite obtener información sobre la capacidad del DFIG ante

LVRT, misma, que es necesaria para el diseño de protecciones (Eissa, 2015) y controladores no lineales.

II.1 Generador de Inducción Doblemente Alimentado

II.1.1 Circuito equivalente en estado estable

El DFIG consiste en dos conjuntos de devanados trifásicos; colocados en estator y rotor respectivamente. Los devanados del DFIG necesitan alimentarse independientemente y la energía que se genera fluye de manera bidireccional. Una ventaja, es la posibilidad de alimentar directamente los devanados de rotor, ya sea en conexión estrella o delta, mediante un arreglo de anillos deslizantes colocados por construcción en el rotor del generador. El DFIG tiene características de un generador síncrono y uno de inducción tipo jaula de ardilla (Ackermann, 2005).

Los devanados de estator están separados de manera espacial por 120 grados y contienen determinados pares de polos, p . Cuando se alimentan de una fuente de voltaje trifásica balanceada de frecuencia f_s , se genera un flujo magnético en estator que rota con velocidad síncrona, n_s , cuya expresión en revoluciones por minuto, RPM , es:

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad \text{II.1}$$

En principio, de acuerdo con la Ley de Faraday, el flujo magnético rotacional de estator induce una fuerza electromotriz en los devanados de rotor, expresado como:

$$emf_{ind} = (v \times B)l \quad \text{II.2}$$

donde:

emf_{ind} = Fuerza electromotriz inducida en una espira del devanado del rotor.

v = Velocidad del flujo inducido en relacion con la rotación del flujo de estator.

B = Vector de densidad de flujo magnetico de estator.

l = Longitud del conductor.

Debido al voltaje inducido en los devanados de rotor y el voltaje inyectado de manera externa a través de los anillos deslizantes, una corriente comienza a fluir por el rotor, que a su vez, crea una fuerza inducida en el rotor del DFIG, definida por:

$$F = i \cdot (l \times B) \quad \text{II.3}$$

donde:

F = Fuerza inducida (en relación con el torque inducido del generador)

i = Corriente en el conductor del rotor

El voltaje inducido en el rotor depende de la relación entre la velocidad rotacional del flujo de estator y la velocidad rotacional del rotor. De hecho, la frecuencia angular de los voltajes y corrientes inducidos en el rotor en radianes sobre segundo, rad/s, queda definida por:

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \quad \text{II.4}$$

donde:

ω_r = Frecuencia angular de voltajes y corrientes en los devanados del rotor

ω_s = Frecuencia angular en los devanados del estator

ω_m = Frecuencia angular del rotor

Si, la frecuencia angular del rotor, depende de la velocidad de rotación mecánica y el número de par de polos:

$$\omega_m = p\Omega_m \quad \text{II.5}$$

Ω_m = Velocidad de rotación mecánica

Notar, que durante la operación de estado estable, los voltajes y corrientes en los devanados del rotor tienen una frecuencia angular, ω_r , el voltaje en el rotor inyectado de manera externa debe de tener la misma velocidad angular.

Por lo tanto, el término comúnmente utilizado para definir la relación entre la velocidad de estator y la frecuencia angular del rotor es el deslizamiento, s , que se expresa como:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad \text{II.6}$$

Así, la relación entre el deslizamiento y la frecuencia angular del estator y el rotor, se define por:

$$\omega_r = s\omega_s \quad \text{II.7}$$

De manera equivalente, puede derivarse, la expresión para la relación entre frecuencias:

$$f_r = sf_s \quad \text{II.8}$$

Dependiendo del signo del deslizamiento, es posible distinguir de entre tres modos de operación del DFIG.

$\omega_m < \omega_s \rightarrow \omega_r > 0 \rightarrow s > 0 \rightarrow$ Operación subsíncrona

$\omega_m > \omega_s \rightarrow \omega_r < 0 \rightarrow s < 0 \rightarrow$ Operación supersíncrona

$\omega_m = \omega_s \rightarrow \omega_r = 0 \rightarrow s = 0 \rightarrow$ Operación síncrona

La Fig. II.1, muestra una simplificación idealizada del DFIG, considerando lo siguiente:

Se asume que:

- El estator y rotor de la máquina están conectados en configuración estrella y solo se representa una fase.
- El estator esta alimentado por una red trifásica balanceada de corriente alterna, CA, con un voltaje de amplitud y frecuencia constante.
- El rotor esta alimentado por un convertidor de voltaje bidireccional trifásico balanceado de CA, con un voltaje de amplitud y frecuencia constante, independiente del estator.

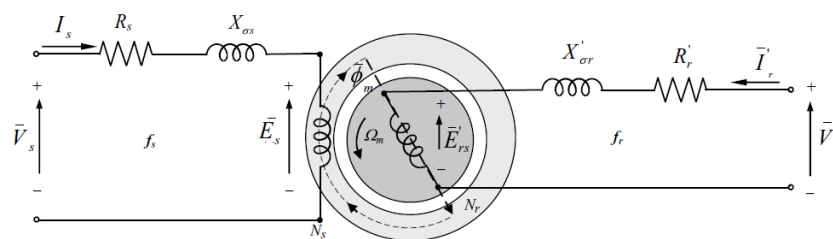


Fig. II.1. Circuito equivalente idealizado del DFIG.(Spertino et al., 2012)

Para representar las magnitudes de voltaje y corriente en estado estable, el análisis se lleva a cabo utilizando teoría clásica de vectores:

\vec{V}_s = Voltaje de alimentación del estator

\vec{V}'_r = Voltaje de alimentación del rotor

\vec{I}_s = Corriente inducida en el estator

\vec{I}'_r = Corriente inducida en el rotor

\vec{E}_s = Fuerza electromotriz inducida en el estator

$$\bar{E}'_r = \text{Fuerza electromotriz inducida en el rotor}$$

Los parámetros eléctricos del estator y del rotor son:

R_s = Resistencia del estator

R'_r = Resistencia del rotor

$X_{\sigma s}$ = Impedancia de dispersión del estator

$X'_{\sigma r}$ = Impedancia de dispersión del rotor

N_s = Número de espiras del devanado del estator por fase

N'_r = Número de espiras del devanado del rotor por fase

El voltaje y corriente, del estator y rotor, tienen diferentes frecuencias. La frecuencia del estator es fija si el estator se conecta directamente con la línea, mientras que, la frecuencia de los voltajes y corrientes del rotor son variables y dependen de la velocidad de la máquina. Consecuentemente, la impedancia del rotor también depende de la velocidad de la máquina.

Analizando el estator y rotor de manera separada, las ecuaciones del circuito equivalente eléctrico en estado estable se definen como:

Estator con f_s :

$$\bar{V}_s - \bar{E}_s = (R_s + X_{\sigma s})\bar{I}_s \quad \text{II.9}$$

donde:

$$X_{\sigma s} = j\omega_s L_{\sigma s} \quad \text{II.10}$$

y

$L_{\sigma s}$ = Inductancia de dispersión del estator

Rotor con f_r :

$$\bar{V}'_r - \bar{E}'_r = (R'_r + X'_{\sigma r})\bar{I}'_r \quad \text{II.11}$$

donde:

$$X'_{\sigma r} = j\omega_r L'_{\sigma r} = js\omega_s L'_{\sigma r} \quad \text{II.12}$$

Debido a que, los circuitos equivalentes y ecuaciones, para estator y rotor, operan a diferentes frecuencias, se dificulta el análisis de la máquina.

En aproximaciones prácticas, se transforma el circuito equivalente idealizado de la Fig. II.1, en un circuito equivalente en el que los voltajes y corrientes de rotor y estator operen a la misma frecuencia. Para tal propósito, de inicio, es necesario encontrar la relación entre las fuerzas electromotrices inducidas en estator y rotor. De acuerdo con la Ley de Lenz:

$$E = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{II.13}$$

El voltaje inducido, E , depende de la variación del flujo, ϕ , y el número de espiras o vueltas, N . Consecuentemente, el voltaje inducido en el devanado del estator, \bar{E}_s , es:

$$\bar{E}_s = \sqrt{2}\pi K_s N_s f_s \bar{\phi}_m \quad \text{II.14}$$

$\bar{\phi}_m$ = Flujo magnetizante

K_s = Factor de devanado de estator; en general, ligeramente menor a uno debido a la geometría de la máquina

De manera similar, en los devanados del rotor, debido a la velocidad de deslizamiento, la fuerza electromotriz inducida es:

$$\bar{E}'_r = \sqrt{2}\pi K_r N_r f_r \bar{\phi}_m \quad \text{II.15}$$

donde:

K_r = Factor de devanado de rotor; en general, ligeramente menor a uno, debido a la geometría de la máquina

Por lo tanto, la relación entre la fuerza electromotriz inducida en el estator y el rotor queda definida por:

$$\frac{\bar{E}'_{rs}}{\bar{E}_s} = s \frac{K_r N_r}{K_s N_s} \quad \text{II.16}$$

Frecuentemente se define un factor constante, u , que relaciona los voltajes inducidos de estator y rotor en velocidad cero ($s=1$):

$$\frac{1}{u} = \frac{K_r N_r}{K_s N_s} \quad \text{II.17}$$

Particularmente, en aplicaciones de conversión de energía eólica, los generadores están especialmente diseñados, de tal manera que el factor constante se define por la relación de transformación entre estator y rotor:

$$\frac{K_r}{K_s} \cong 1, \rightarrow u \cong \frac{N_s}{N_r} \quad \text{II.18}$$

Para referir el circuito de rotor al estator, es necesario referir los parámetros, corrientes y voltajes del rotor al estator. Antes de considerar la diferencia de frecuencias entre rotor y estator, es necesario tomar en cuenta la influencia del factor constante.

Tal como se plantea en la teoría del transformador ideal, el estator y rotor de un DFIG pueden ser tratados de forma equivalente al primario y secundario de un transformador. De manera que, las impedancias del rotor, referidas al lado del estator, pueden clacularse como:

$$R_r = R'_r u^2 \quad \text{II.19}$$

$$L_{\sigma r} = L'_{\sigma r} u^2 \quad \text{II.20}$$

Para voltajes y corrientes de rotor, se tiene que:

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{I}'_r}{u} \quad \text{II.21}$$

$$\bar{V}_r = \bar{V}'_r u \quad \text{II.22}$$

$$\bar{E}_{rs} = \bar{E}'_{rs} u \quad \text{II.23}$$

donde:

\bar{I}_r = Corriente del rotor, referida al estator debido al factor constante

\bar{V}_r = Voltaje de alimentación del rotor, referida al estator debido al factor constante

E_{rs} = Fuerza electromotriz inducida en el rotor, referida al estator debido al factor constante

El circuito equivalente de la Fig. II.1, se transforma al circuito equivalente de la Fig. II.2. Notar que las magnitudes de las frecuencias de estator y rotor se mantienen diferentes.

De acuerdo con la notación adoptada, el superíndice, 'r', utilizado para las magnitudes o parámetros del rotor, significa real o medible. Por el contrario, cuando no se utiliza el superíndice, significa que ha sido referida al estator. Para el caso del estator esta distinción no es necesaria.

Finalmente, se obtiene el circuito equivalente referido al estator en estado estable. La ecuación de los devanados del rotor para estado estable, se expresa como:

Para f_r :

$$\bar{V}_r - \bar{E}_{rs} = (R_r + js\omega_s L_{\sigma r})\bar{I}_r \quad \text{II.24}$$

Reescribiendo:

$$\bar{V}_r - s\bar{E}_s = (R_r + js\omega_s L_{\sigma r})\bar{I}_r \quad \text{II.25}$$

Para transformar a la frecuencia de estator:

$$\frac{\bar{V}_r}{s} - \bar{E}_s = \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_{\sigma r}\right)\bar{I}_r \quad \text{II.26}$$

Por lo que, para frecuencia f_s :

$$\bar{V}_s - \frac{\bar{V}_r}{s} - (R_s + j\omega_s L_{\sigma s})\bar{I}_s + \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_{\sigma s}\right)\bar{I}_r = 0 \quad \text{II.27}$$

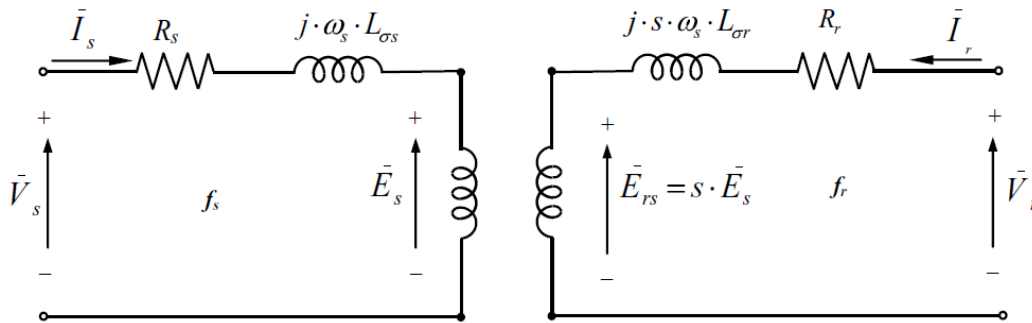


Fig. II.2. Circuito equivalente por fase de un DFIG, con parámetros referidos a estator y diferentes frecuencias. (Abad *et al.*, 2011b)

La Fig.II.3, muestra el circuito equivalente en estado estable, referido totalmente al estator, para un DFIG a frecuencia f_s . La fuerza electromotriz inducida en el estator es:

$$\bar{E}_s = j\omega_s L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad \text{II.28}$$

donde, L_m , es la inductancia magnetizante de la máquina, normalmente medida en el lado del estator.

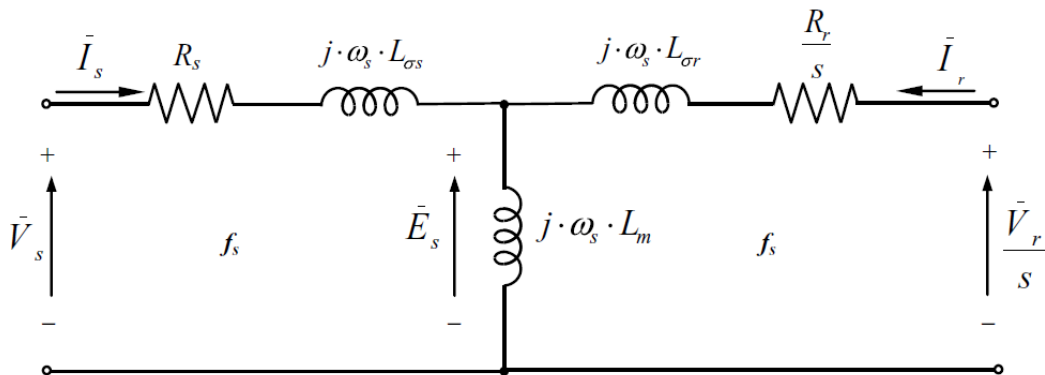


Fig. II.3. Circuito equivalente por fase de un DFIG, con parámetros referidos a estator y misma frecuencia. (Abad *et al.*, 2011b)

Las expresiones para flujos magnéticos e inductancias de dispersión, de estator y rotor, quedan definidas por:

$$\bar{\Psi}_s = L_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) + L_{\sigma s} \bar{I}_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r \quad \text{II.29}$$

$$\bar{\Psi}_r = L_m(\bar{I}_s + \bar{I}_r) + L_{\sigma r}\bar{I}_r = L_m\bar{I}_s + L_r\bar{I}_r \quad \text{II.30}$$

donde, L_s y L_r , son las inductancias de estator y rotor, respectivamente, definidas como:

$$L_s = L_m + L_{\sigma s} \quad \text{II.31}$$

$$L_r = L_m + L_{\sigma r} \quad \text{II.32}$$

Por lo que:

$$\bar{V}_s - R_s\bar{I}_s = j\omega_s\bar{\Psi}_s \quad \text{II.33}$$

$$\bar{V}_r - R_r\bar{I}_r = js\omega_s\bar{\Psi}_r \quad \text{II.34}$$

II.1.2 Circuito equivalente en estado dinámico

De acuerdo con los modelos de máquinas de CA desarrollados en la literatura, el modelo del DFIG idealizado y simplificado puede describirse como tres devanados en el estator y tres devanados en el rotor, como se ilustra en la Fig. II.4.

Los devanados son una representación ideal de la máquina real, que ayuda a derivar el circuito equivalente de la Fig.II.5.

Tomando en consideración el circuito equivalente idealizado, los valores instantáneos de voltaje, corriente y flujo del estator, pueden describirse como:

$$v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\Psi_{as}(t)}{dt} \quad \text{II.35}$$

$$v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\Psi_{bs}(t)}{dt} \quad \text{II.36}$$

$$v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\Psi_{cs}(t)}{dt} \quad \text{II.37}$$

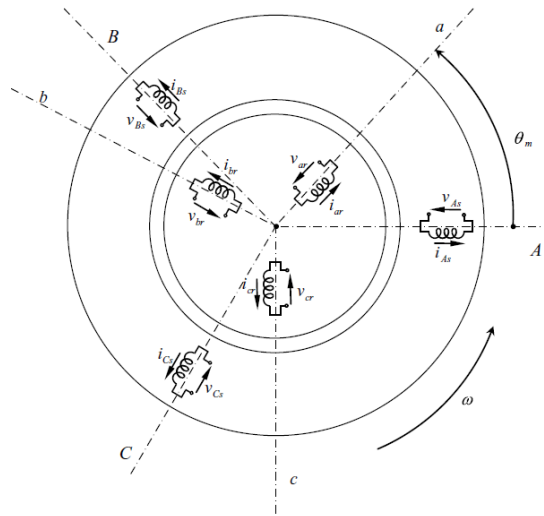


Fig. II.4. Devanados trifásicos ideales para estator y rotor de un DFIG. (Abad *et al.*, 2011b)

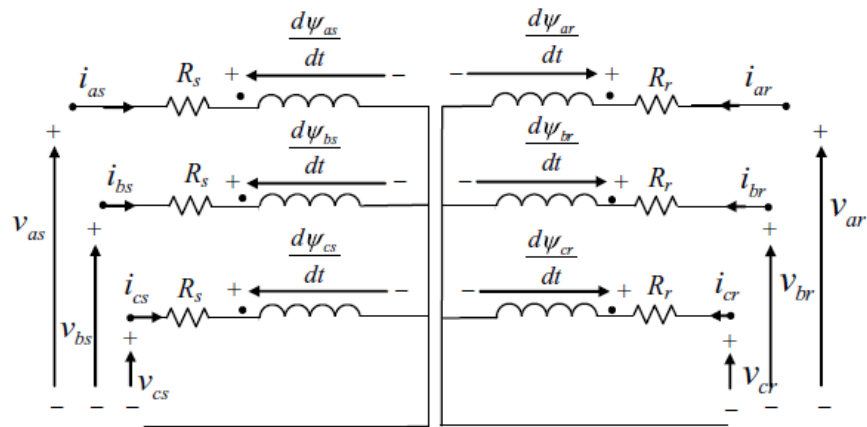


Fig. II.5. Circuito equivalente eléctrico de un DFIG. (Abad *et al.*, 2011b)

Donde, R_s es la resistencia de estator; $i_{as}(t)$, $i_{bs}(t)$ y $i_{cs}(t)$ son las corrientes de estator de las fases a, b y c . $v_{as}(t)$, $v_{bs}(t)$ y $v_{cs}(t)$, son los voltajes aplicados a los devanados del estator, por último, $\Psi_{as}(t)$, $\Psi_{bs}(t)$ y $\Psi_{cs}(t)$, son los flujos de estator.

Las magnitudes eléctricas del lado del estator, en estado estable, tienen una frecuencia angular senoidal constante impuesta por la red.

De manera similar. Para el lado del rotor:

$$v_{ar}(t) = R_r i_{ar}(t) + \frac{d\Psi_{ar}(t)}{dt} \quad \text{II.38}$$

$$v_{br}(t) = R_r i_{br}(t) + \frac{d\Psi_{br}(t)}{dt} \quad \text{II.39}$$

$$v_{cr}(t) = R_r i_{cr}(t) + \frac{d\Psi_{cs}(t)}{dt} \quad \text{II.40}$$

II.1.2.1 Modelo $\alpha\beta$

Las ecuaciones diferenciales derivadas del circuito equivalente del DFIG, se pueden representar en notación de vectores de espacio en el marco de referencia del estator, como:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\Psi}_s^s}{dt} \quad \text{II.41}$$

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\Psi}_r^r}{dt} \quad \text{II.42}$$

Donde, \vec{v}_s^s es el vector de espacio del voltaje del estator, \vec{i}_s^s es el vector de espacio de la corriente del estator y $\vec{\Psi}_s^s$ es el vector de espacio del flujo del estator, de manera similar para el rotor. Los superíndices s y r , indican que los vectores de espacio están referidos hacia los marcos de referencia de estator y rotor, respectivamente. Por otro lado, la correlación entre los flujos y corrientes, en notación de vectores de espacio, queda definida por:

$$\vec{\Psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^r = L_s \vec{i}_s^s + L_m e^{j\theta_m} \vec{i}_r^r \quad \text{II.43}$$

$$\vec{\Psi}_r^r = L_m \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^r = L_m e^{-j\theta_m} \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^r \quad \text{II.44}$$

De donde se obtiene que:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\Psi}_s^s}{dt} \quad \text{II.45}$$

$$\vec{v}_r^s = R_s \vec{i}_r^s - j\omega_m \vec{\Psi}_r^s + \frac{d\vec{\Psi}_r^s}{dt} \quad \text{II.46}$$

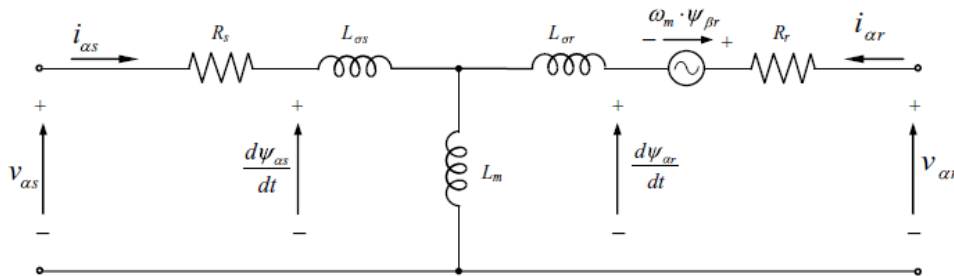
$$\vec{\Psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^s \quad \text{II.47}$$

$$\vec{\Psi}_r^s = L_m \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^s \quad \text{II.48}$$

Ahora, es necesario considerar que:

$$\frac{d\vec{\Psi}_r^r}{dt} e^{j\theta_m} = \frac{d\vec{\Psi}_r^s e^{j\theta_m}}{dt} - j\omega_m \vec{\Psi}_r^s e^{j\theta_m} \quad \text{II.49}$$

La Fig. II.6, muestra el circuito equivalente $\alpha\beta$ del DFIG en coordenadas del estator.



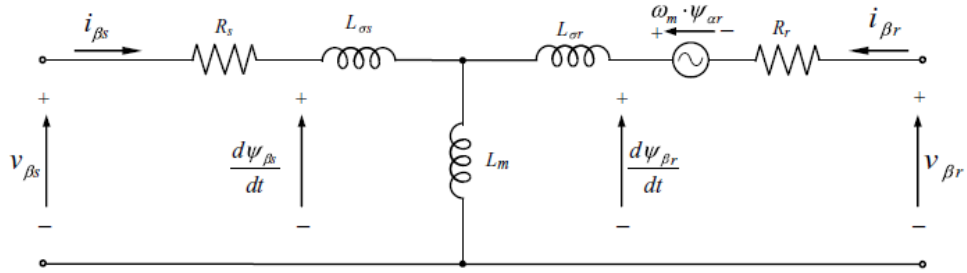


Fig. II.6. Circuito equivalente $\alpha\beta$ en coordenadas del estator. (Abad et al., 2011a)

II.1.2.2 Modelo dq

En esta sección, en contraste con la sección anterior, las ecuaciones diferenciales resultantes utilizan la notación de vector de espacio en un marco de referencia sincrónico:

$$\vec{v}_s^a = R_s \vec{i}_s^a + j\omega_s \vec{\Psi}_s^a + \frac{d\vec{\Psi}_s^a}{dt} \quad \text{II.50}$$

$$\vec{v}_r^a = R_r \vec{i}_r^a + j(\omega_s - \omega_m) \vec{\Psi}_r^a + \frac{d\vec{\Psi}_r^a}{dt} \quad \text{II.51}$$

El superíndice, a , denota vectores de espacio referidos a un marco rotativo sincrónico, las expresiones que representan los flujos magnéticos quedan definidas como:

$$\vec{\Psi}_s^a = L_s \vec{i}_s^a + L_m \vec{i}_r^a \quad \text{II.52}$$

$$\vec{\Psi}_r^a = L_m \vec{i}_s^a + L_r \vec{i}_r^a \quad \text{II.53}$$

Para una alimentación de voltajes senoidales, en estado estable, las componentes dq de los voltajes, corrientes y flujos serán valores constantes, en contraste con las componentes $\alpha\beta$ que son magnitudes senoidales. La Fig.II.7, representa el circuito equivalente dq para un DFIG, en coordenadas síncronas.

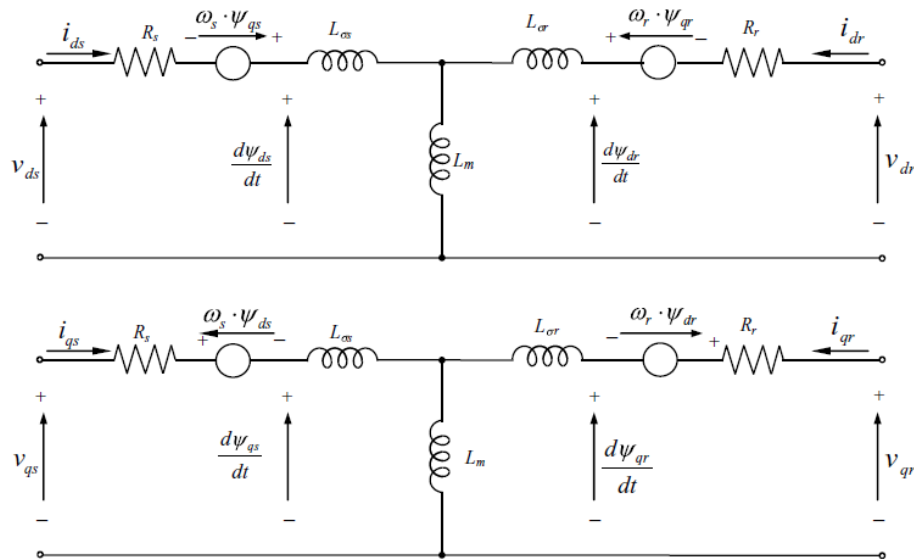


Fig. II.7. Circuito equivalente dq en coordenadas síncronas. (Abad *et al.*, 2011a)

II.2 Caídas de voltaje (LVRT)

II.2.1 Huecos de voltaje

La calidad de la energía ha supuesto una gran preocupación para todos los desarrolladores y gestores de la red eléctrica desde sus comienzos. Dentro de la calidad de la energía, los huecos de voltaje tienen una importancia enorme porque son muy perjudiciales para casi todos los equipos que se ven sometidos a ellos. En las publicaciones relacionadas con la calidad de suministro eléctrico no existe una única definición de hueco de voltaje. A modo de ejemplo se muestran dos normas:

- Norma UNE-EN 50160: “Disminución brusca del voltaje de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% del voltaje declarado V_c , seguido del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de voltaje dura de 10 ms. a 1 min. La profundidad

de un hueco es definida como la diferencia entre el voltaje eficaz mínimo durante y el voltaje declarado. Las variaciones de voltaje que no reducen el voltaje de alimentación a un valor inferior al 90% de V_c no son considerados como huecos”.

- Norma IEEE Std 1159-1995: “Disminución del voltaje o de la corriente entre un 0.1 y un 0.9 p.u. a la frecuencia de la red con duraciones desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto”. De hecho, en el Procedimiento de verificación, validación, y certificación de los requisitos del PO 12.3 sobre la respuesta de las instalaciones eólicas ante huecos, documento que regula los ensayos a realizar en generadores eólicos, se define la profundidad del hueco como la caída de voltaje por debajo del 85% del nominal, ya que la norma IEC 61000-4-30 deja libre la elección del valor a partir del cual se considera como hueco de voltaje una perturbación.

II.2.1.1 Simétricos

Normalmente, el voltaje de la red eléctrica oscila en torno a su valor nominal con variaciones comprendidas en un rango máximo del $\pm 10\%$ de dicho valor. Un hueco es la caída repentina de voltaje en una o más fases, seguida de un rápido restablecimiento en un corto espacio de tiempo. Si el voltaje cae por debajo del 1%, entonces se considerará una interrupción breve (si dura menos de 3 minutos). Si está por encima del 90%, entonces se considerará que el voltaje se encuentra en su rango normal de funcionamiento aunque, como ya se ha indicado, depende de la norma en uso.

Por lo que, un hueco de voltaje es una función de la profundidad de la caída y la duración de la perturbación.

II.2.1.2 Asimétricos

En el caso de que se desee estudiar un sistema ante huecos no simétricos, bifásicos o monofásicos, ya no se pueden aplicar los principios del apartado anterior, ya que las corrientes por cada fase serán distintas. Por lo tanto, se debe de analizar las tres fases por separado, mediante la teoría de las componentes simétricas, cuyo postulado cita, que cualquier variable trifásica desequilibrada puede descomponerse como la suma de tres sistemas equilibrados:

Componente directa o de secuencia positiva: es la que existe en los sistemas equilibrados. El orden de las fases es el normal: fase A \rightarrow fase B \rightarrow fase C.

Componente inversa o de secuencia negativa: se cambia la secuencia de fases: fase A \rightarrow fase C \rightarrow fase B. Si se aplica esta secuencia a un motor, este girará en el sentido contrario al normal.

Componente homopolar o de secuencia cero: es un sistema donde las tres ondas tienen la misma fase, es decir, las tres fases son en todo momento iguales.

En un sistema trifásico equilibrado sólo aparece la componente directa y las otras dos se hacen nulas. En un sistema donde dos fases estén invertidas sólo aparecerá la componente inversa. En cualquier otro caso el sistema se puede descomponer en las tres secuencias, de manera que el valor de cada fase será la suma del valor que la misma fase tiene en cada una de las tres componentes. El análisis de la red eléctrica en presencia de desequilibrios requiere en general el análisis apoyándose en la teoría de las componentes simétricas.

CAPÍTULO

"El método de investigación científica no es sino la expresión necesaria de la modalidad de trabajo de la mente humana"

Thomas Henry Huxley (1825-1895)

III. Metodología

III.1 Modelo de tercer orden para un DFIG

La inclusión de transitorios en la red y transitorios en el estator del generador incrementa el orden del modelo completo del sistema, lo que resulta en un incremento en el tiempo computacional debido a la integración numérica. Por esta razón, se ha vuelto convencional reducir el orden del modelo matemático del generador y despreciar los transitorios de la red para estudios de estabilidad de sistemas de potencia de gran escala. A continuación se muestra una metodología estándar presentada por (Ekanayake *et al.*, 2003) en donde se desprecia la razón de cambio del flujo del estator, así, la componente diferencial de las ecuaciones desaparece, por lo que el comportamiento del voltaje de estator y rotor en un marco de referencia síncrono, queda definido como:

$$\bar{v}_{ds} = \bar{R}_s \bar{i}_{ds} - \bar{\Psi}_{qs} \quad \text{III.1}$$

$$\bar{v}_{qs} = \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{\Psi}_{ds} \quad \text{III.2}$$

III.3

$$\begin{aligned}\bar{v}_{dr} &= \bar{R}_r \bar{i}_{dr} - s \bar{\Psi}_{qr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{dr} \\ \bar{v}_{qr} &= \bar{R}_r \bar{i}_{qr} + s \bar{\Psi}_{dr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{qr}\end{aligned}\quad \text{III.4}$$

Cuando se desprecia el transitorio del estator, las ecuaciones del generador pueden simplificarse como:

$$\bar{v}_{ds} = \bar{R}_s \bar{i}_{ds} - \bar{X}_1 \bar{i}_{qs} + \bar{e}_d \quad \text{III.5}$$

$$\bar{v}_{qs} = \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{X}_1 \bar{i}_{ds} + \bar{e}_q \quad \text{III.6}$$

$$\frac{d\bar{e}_d}{d\bar{t}} = -\frac{1}{\bar{T}_o} \left[\bar{e}_d + \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{qs} \right] + s \omega_s \bar{e}_q - \omega_s \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{v}_{qr} \quad \text{III.7}$$

$$\frac{d\bar{e}_q}{d\bar{t}} = -\frac{1}{\bar{T}_o} \left[\bar{e}_q - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{ds} \right] - s \omega_s \bar{e}_d + \omega_s \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{v}_{dr} \quad \text{III.8}$$

Donde:

$$\bar{T}_o = \frac{\bar{L}_{rr}}{\omega_s \bar{R}_r} \quad \text{III.9}$$

El torque electromagnético puede entonces simplificarse mediante los siguientes pasos:

- Utilizar las ecuaciones de voltaje de estator y rotor simplificadas y despreciar el término de la resistencia.

$$\bar{i}_{ds} = \frac{1}{\bar{L}_{ss}} \bar{v}_{qs} - \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{ss}} \bar{i}_{dr} \quad \text{III.10}$$

$$\bar{i}_{qs} = -\frac{1}{\bar{L}_{ss}} \bar{v}_{ds} - \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{ss}} \bar{i}_{qr} \quad \text{III.11}$$

- Sustituir las corrientes resultantes en la ecuación total de torque electromagnético, lo que simplifica a:

$$T_e = -\frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{ss}} (\bar{i}_{dr} \bar{v}_{ds} + \bar{i}_{qr} \bar{v}_{qs}) \quad \text{III.12}$$

III.2 Modelo de quinto orden para un DFIG.

Los devanados del estator y rotor de un generador de inducción pueden representarse como dos conjuntos de bobinas ficticias ortogonales, colocadas en un eje directo (eje d) y un eje de cuadratura (eje q). El modelo general de quinto orden para un DFIG puede desarrollarse, considerando las siguientes condiciones y supuestos:

- La corriente del estator se asume positiva cuando fluye hacia la máquina eléctrica.
- Las ecuaciones se derivan sobre una referencia síncrona.
- El eje q , se asume con 90° de adelanto del eje d , con respecto a la dirección de rotación.
- La componente q del voltaje del estator se elige como la parte real y la componente d como la parte imaginaria.

Las ecuaciones de la máquina pueden representarse en términos de las variables de la máquina o en términos de las variables de un marco de referencia arbitrario. Sin embargo, para estudios de sistemas de potencia es deseable utilizar una representación del sistema por unidad (p.u.).

Las ecuaciones que describen el voltaje de la máquina en el estator y el rotor quedan definidas como:

$$\begin{aligned}\bar{v}_{ds} &= \bar{R}_s \bar{i}_{ds} - \bar{\Psi}_{qs} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{ds} \\ \bar{v}_{qs} &= \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{\Psi}_{ds} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{qs}\end{aligned}\tag{III.13}$$

$$\begin{aligned}\bar{v}_{dr} &= \bar{R}_r \bar{i}_{dr} - s \bar{\Psi}_{qr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{dr} \\ \bar{v}_{qr} &= \bar{R}_r \bar{i}_{qr} + s \bar{\Psi}_{dr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_{qr}\end{aligned}\tag{III.14}$$

donde:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_{ds} &= \bar{L}_{ss} \bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \bar{i}_{dr} \\ \bar{\Psi}_{qs} &= \bar{L}_{ss} \bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \bar{i}_{qr}\end{aligned}\tag{III.15}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_{dr} &= \bar{L}_{rr} \bar{i}_{dr} + \bar{L}_m \bar{i}_{ds} \\ \bar{\Psi}_{qr} &= \bar{L}_{rr} \bar{i}_{qr} + \bar{L}_m \bar{i}_{qs}\end{aligned}\tag{III.16}$$

de la ecuación III.16:

$$\bar{i}_{dr} = \left(\frac{\bar{\Psi}_{dr} - \bar{L}_m \bar{i}_{ds}}{\bar{L}_{rr}} \right)\tag{III.17}$$

$$\bar{i}_{qr} = \left(\frac{\bar{\Psi}_{qr} - \bar{L}_m \bar{i}_{qs}}{\bar{L}_{rr}} \right)\tag{III.18}$$

Sustituyendo la ecuación III.17-18 en las ecuaciones III.15 y con III.19:

$$\bar{X}_1 = \left[\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \right] \quad \text{III.19}$$

$$\bar{\Psi}_{ds} = \bar{X}_1 \bar{i}_{ds} + \left(\frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \right) \bar{\Psi}_{dr} \quad \text{III.20}$$

$$\bar{\Psi}_{qs} = \bar{X}_1 \bar{i}_{qs} + \left(\frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \right) \bar{\Psi}_{qr} \quad \text{III.21}$$

Incorporando el efecto transitorio para el DFIG, las componentes de voltaje electromotriz se definen como:

$$\bar{e}_d = -\frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{\Psi}_{qr} \quad \text{III.22}$$

$$\bar{e}_q = \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{\Psi}_{dr} \quad \text{III.23}$$

Sustituyendo de las ecuaciones III.22-23 en las ecuaciones III.20-21:

$$\bar{\Psi}_{ds} = \bar{X}_1 \bar{i}_{ds} + \bar{e}_q \quad \text{III.24}$$

$$\bar{\Psi}_{qs} = \bar{X}_1 \bar{i}_{qs} - \bar{e}_d \quad \text{III.25}$$

Sustituyendo las ecuaciones III.24-25 en III.13:

III.26

$$\begin{aligned}\bar{v}_{ds} &= \bar{R}_s \bar{i}_{ds} - \bar{X}_1 \bar{i}_{qs} + \bar{e}_d + \frac{\bar{X}_1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{i}_{ds} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{e}_q \\ \bar{v}_{qs} &= \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{X}_1 \bar{i}_{ds} + \bar{e}_q + \frac{\bar{X}_1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{i}_{qs} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d}{dt} \bar{e}_d\end{aligned}\quad \text{III.27}$$

Sustituyendo de la ecuación III.17-18 en la ecuación III.14 y después sustituyendo $\bar{\Psi}_{dr}$ y $\bar{\Psi}_{qr}$ en términos de \bar{e}_d y \bar{e}_q de la ecuación III.22-23:

$$\frac{d\bar{e}_d}{d\bar{t}} = -\frac{1}{\bar{T}_o} \left[\bar{e}_d + \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{qs} \right] + s \omega_s \bar{e}_q - \omega_s \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{v}_{qr} \quad \text{III.28}$$

$$\frac{d\bar{e}_q}{d\bar{t}} = -\frac{1}{\bar{T}_o} \left[\bar{e}_q - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{ds} \right] - s \omega_s \bar{e}_d + \omega_s \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{v}_{dr} \quad \text{III.29}$$

Donde:

$$\bar{T}_o = \frac{\bar{L}_{rr}}{\omega_s \bar{R}_r} \quad \text{III.30}$$

Sustituyendo las ecuaciones III.22-23 en la ecuación III.17-18:

$$\bar{i}_{dr} = \left(\frac{\bar{\Psi}_{dr} - \bar{L}_m \bar{i}_{ds}}{\bar{L}_{rr}} \right) = \frac{1}{\bar{L}_m} \bar{e}_q - \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{ds} \quad \text{III.31}$$

$$\bar{i}_{qr} = \left(\frac{\bar{\Psi}_{qr} - \bar{L}_m \bar{i}_{qs}}{\bar{L}_{rr}} \right) = -\frac{1}{\bar{L}_m} \bar{e}_d - \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{qs} \quad \text{III.32}$$

El torque electromagnético se calcula usando:

$$T_e = \bar{\Psi}_{ds} \bar{i}_{qs} - \bar{\Psi}_{qs} \bar{i}_{ds} \quad \text{III.33}$$

Sustituyendo las ecuaciones III.24-25 en la ecuación III.33, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T_e = (\bar{X}_1 \bar{i}_{ds} + \bar{e}_q) \bar{i}_{qs} - (\bar{X}_1 \bar{i}_{qs} - \bar{e}_d) \bar{i}_{ds} = \bar{e}_q \bar{i}_{qs} + \bar{e}_d \bar{i}_{ds} \quad \text{III.34}$$

Sustituyendo \bar{e}_d y \bar{e}_q en términos de $\bar{\Psi}_{dr}$ y $\bar{\Psi}_{qr}$ en la ecuación III.34:

$$T_e = \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} (\bar{\Psi}_{dr} \bar{i}_{qs} - \bar{\Psi}_{qr} \bar{i}_{ds}) \quad \text{III.35}$$

Sustituyendo la ecuación III.16 en la ecuación III.35:

$$T_e = \bar{L}_m (\bar{i}_{dr} \bar{i}_{qs} - \bar{i}_{qr} \bar{i}_{ds}) \quad \text{III.36}$$

III.2.1 Efecto del DFIG ante un hueco de voltaje simétrico

Considerando que el generador asíncrono estándar tipo rotor devanado, se utiliza como DFIG, la representación de quinto orden (Ekanayake *et al.*, 2003) de una máquina de inducción en el marco de referencia dq se elige como modelo dinámico del DFIG (Abad *et al.*, 2011a). Se desprecia la saturación magnética, y se asume que no existe fluctuación de frecuencia. Cuando la convención del generador se utiliza para estator y rotor, las ecuaciones de voltaje y flujo del circuito equivalente dinámico del DFIG puede escribirse como:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \Psi_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_r \Psi_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} \end{cases} \quad \text{III.37}$$

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs} \end{cases} \quad \text{III.38}$$

Utilizando un marco de referencia rotativo síncrono con el eje d orientado al flujo de estator (Valikhani and Sourkounis, 2014), la Fig.III.1, muestra la relación entre el marco de referencia dq y el marco de referencia estacionario. En la figura, θ es el ángulo de fase inicial del flujo de estator. El símbolo x , sintetizado por las componentes de los ejes dq , es el vector de voltaje, corriente o flujo. Es un vector de rotación en espacio con respecto al marco de referencia estacionario pero un fásor estático relativo al marco de referencia rotativo síncrono.

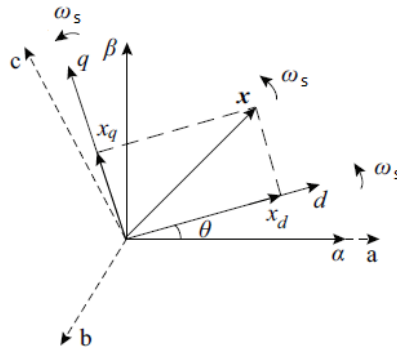


Fig. III.1 - Relación entre marcos de referencia.

Por consiguiente, el modelo dinámico del DFIG puede expresarse como el fásor correspondiente:

$$\bar{V}_s = -R_s \bar{I}_s + j\omega_s \bar{\Psi}_s + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_s \quad \text{III.39}$$

$$\bar{V}_r = -R_r \bar{I}_r + j\omega_s \bar{\Psi}_r + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_r \quad \text{III.40}$$

$$\bar{\Psi}_s = -L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r \quad \text{III.41}$$

$$\bar{\Psi}_r = L_r \bar{I}_r - L_m \bar{I}_s \quad \text{III.42}$$

Asumiendo que ocurre un hueco en voltaje simétrico en un tiempo $t=t_0$, el voltaje instantáneo de la caída en los terminales del DFIG va de V_{s0} a V_{s1} . De las ecuaciones III.3 y III.5, el flujo de estator puede expresarse como:

$$\frac{d}{dt} \bar{\Psi}_s + \left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s \right) \bar{\Psi}_s = \bar{V}_s + \frac{R_s L_m \bar{I}_r}{L_s} \quad \text{III.43}$$

Considerando que la resistencia de estator es pequeña comparada con la inductancia, el flujo de estator se obtiene, resolviendo la ecuación diferencial:

$$\bar{\Psi}_s = \frac{\bar{V}_s}{j\omega_s} + c e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s \right) t} \quad \text{III.44}$$

Donde c es la constante de integración.

De acuerdo con la Ley de conservación de flujo magnético (Metatla *et al.*, 2014), la ecuación diferencial cumple con las siguientes condiciones de frontera:

$$\bar{\Psi}_s = (t = t_{0+}) = \bar{\Psi}_s(t = t_{0-}) \quad \text{III.45}$$

Así, la expresión para el flujo de estator durante una falla se obtiene como:

$$\bar{\Psi}_{s1} = \frac{\bar{V}_{s1}}{j\omega_s} + \bar{\Psi}_{sf} e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right) t} \quad \text{III.46}$$

El valor inicial del flujo transitorio es:

$$\bar{\Psi}_{sf} = \frac{1}{j\omega_s} (\bar{V}_{s0} - \bar{V}_{s1}) e^{\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right) t_0} \quad \text{III.47}$$

La corriente de estator se obtiene por la sustitución de la ecuación III.11 en la ecuación III.5:

$$\bar{I}_{s1} = \frac{L_m \bar{I}_r}{L_s} - \frac{\bar{V}_{s1}}{j\omega_s L_s} - \frac{1}{j\omega_s L_s} \left[(\bar{V}_{s0} - \bar{V}_{s1}) e^{\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right) t_0} e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right) t} \right] \quad \text{III.48}$$

Por otra parte, de las ecuaciones III.5 y III.6, el flujo del rotor puede escribirse como:

$$\bar{\Psi}_r = \frac{1}{L_s} \left[(L_s L_r - L_m^2) \bar{I}_r + L_m \bar{\Psi}_s \right] \quad \text{III.49}$$

Sustituyendo la ecuación III.13 en III.14, el voltaje de rotor se obtiene después de eliminar la parte integral del flujo de estator por la ecuación III.3:

$$\bar{V}_r = L_r' \frac{d}{dt} \bar{I}_r + (R_r' + j\omega_r L_r') \bar{I}_r + \bar{E} \quad \text{III.50}$$

donde:

$$R_r' = R_r + \left(\frac{L_m}{L_s}\right)^2 R_s \quad \text{III.51}$$

$$\text{III.52}$$

$$L'_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$$

$$\bar{E} = (L_s \bar{V}_s - R_s - j\omega_r L_s) \frac{L_m \bar{\Psi}_s}{L_s^2} \quad \text{III.53}$$

El término \bar{E} es el voltaje contra-electromotriz inducido en los devanados del rotor. \bar{V}_r , es el voltaje de CA del convertidor de lado rotor.

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{V}_r - \bar{E} - (L'_r \frac{d\bar{I}_r}{dt})}{R'_r + j\omega_r L'_r} \quad \text{III.54}$$

Para $t < 0$:

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{V}_r - \bar{E}}{R'_r + j\omega_r L'_r} \quad \text{III.55}$$

La ecuación refleja que la corriente de rotor es función de la caída de voltaje y la dinámica del estator. Con la perspectiva del proceso físico, como los devanados del rotor cortan el campo magnético estático causado por los componentes no periódicos del flujo del estator, una fuerza electromotriz de CD se induce en el rotor relacionado al estator en los devanados del rotor.

Visto desde las ecuaciones obtenidas, la componente de CD del flujo de estator se genera para evitar que el flujo de estator cambie cuando ocurre un hueco de voltaje en la red. La componente de CD, correspondiente a la corriente de CD que se genera durante el hueco de voltaje, continúa decreciendo por la acción de amortiguamiento de la resistencia de estator.

Las corrientes generadas por el hueco de voltaje, contienen componentes transitorias periódicas y no periódicas. La componente periódica se determina por la corriente de rotor y el voltaje en los terminales después de la falla, mientras que la componente transitoria está relacionada con la profundidad de la caída de voltaje y el tiempo de la falla.

III.2.2 Efecto del DFIG ante un hueco de voltaje asimétrico

Durante un hueco en voltaje asimétrico, el vector de voltaje rotativo en el espacio puede descomponerse en la suma de tres componentes secuenciales; secuencia-positiva rotando con dirección positiva, secuencia-negativa rotando con dirección negativa y secuencia-cero u homopolar.

De acuerdo a la teoría de la variable simétrica, las variables eléctricas del DFIG se pueden descomponer en componentes de secuencia positiva y negativa, bajo las coordenadas de sincronización positiva e inversa, como lo muestra la Fig.III.2. El símbolo y indica el vector de voltaje, corriente o flujo de estator o rotor. Los subíndices + y - indican la componente de secuencia positiva y negativa, respectivamente.

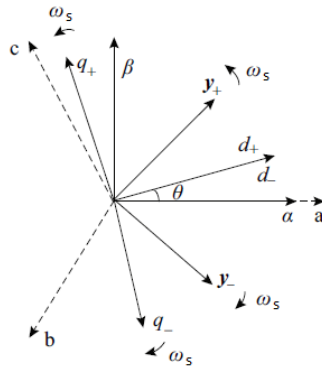


Fig. III.2 – Coordenadas de sincronización positiva e inversa.

Por lo tanto, el flujo de estator bajo un hueco de voltaje asimétrico, puede resolverse por la ecuación III.3:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\Psi}_{s2+}}{dt} = \bar{V}_{s2+} - \left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right)\bar{\Psi}_{s2+} \\ \frac{d\bar{\Psi}_{s2-}}{dt} = \bar{V}_{s2-} - \left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right)\bar{\Psi}_{s2-} \end{cases} \quad \text{III.56}$$

donde \bar{V}_{s2} , es el voltaje en terminales después de la falla.

Asumiendo que los parámetros del DFIG son simétricos (Hasni *et al.*, 2012) y el voltaje de alimentación trifásico proveniente de la red esta balanceado, la componente de secuencia negativa del flujo de estator antes de la falla debe de ser cero. Por lo que, el flujo de estator después de la falla puede calcularse por medio de la ecuación III.18, como:

$$\bar{\Psi}_{s2+} = \frac{\bar{V}_{s2+}}{j\omega_s} + \bar{\Psi}_{s2+} e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right)t} \quad \text{III.57}$$

$$\bar{\Psi}_{s2-} = \frac{-\bar{V}_{s2-}}{j\omega_s} + \bar{\Psi}_{s2-} e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right)t} \quad \text{III.58}$$

Donde, los valores iniciales de las componentes de secuencia positiva y negativa, para el flujo de estator transitorio son:

$$\bar{\Psi}_{s2+} = \frac{1}{j\omega_s} (\bar{V}_{s0} - \bar{V}_{s2+}) e^{\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s\right)t_0} \quad \text{III.59}$$

$$\Psi_{s2-} = \frac{1}{j\omega_1} \dot{U}_{s2-} e^{\left(\frac{R_s}{L_s} - j\omega_1\right)t_0} \quad \text{III.60}$$

La componente de secuencia positiva del flujo de estator genera la corriente de rotor con una frecuencia fundamental relacionada con la frecuencia de estator, con coordenadas de sincronización positiva y características similares a las presentadas con un hueco de voltaje simétrico.

Cuando el devanado de rotor corta la fuerza electromotriz rotativa con dirección negativa, se induce una corriente de rotor con cerca del doble de la frecuencia fundamental con respecto a la frecuencia de lado rotor. Si la alimentación que provee el convertidor de lado-rotor es simétrica, no habrá corriente de

secuencia negativa con frecuencia fundamental (relacionada con el estator) en el devanado del rotor.

Por lo tanto, la corriente con la que contribuye el DFIG puede expresarse sustituyendo los flujos obtenidos en las ecuaciones III.19 y III.20 en la ecuación III.5:

$$\dot{i}_{s2+} = \frac{L_m \dot{i}_{r+}}{L_s} - \frac{\dot{U}_{s2+}}{j\omega_1 L_s} - \frac{1}{j\omega_1 L_s} \left[(\dot{U}_{s0} - \dot{U}_{s2+}) \cdot e^{\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_1\right) t_0} e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_1\right) t} \right] \quad \text{III.61}$$

$$\dot{i}_{s2-} = \frac{\dot{U}_{s2-}}{j\omega_1 L_s} - \frac{\dot{U}_{s2-} e^{\left(\frac{R_s}{L_s} - j\omega_1\right) t_0} e^{-\left(\frac{R_s}{L_s} - j\omega_1\right) t}}{j\omega_1 L_s} \quad \text{III.62}$$

Las expresiones III.21 y III.24, demuestran que la componente de CD de los flujos de estator en las coordenadas de sincronización positiva e inversa, se genera bajo condiciones de hueco de voltaje asimétrico de la red. Las componentes de CD son amortiguadas por la resistencia de estator. La componente de secuencia negativa del flujo de estator se relaciona con la componente de secuencia correspondiente de la falla de voltaje, considerando que, el flujo de estator de la secuencia positiva se determina por la condición de estado estable y la falla de voltaje.

CAPÍTULO IV

"Si he hecho descubrimientos invaluables ha sido más por tener paciencia que cualquier otro talento"

Isaac Newton (1643-1727)

IV. Resultados

IV.1 Diseño de plataforma de validación

Tal como se ha desarrollado en los capítulos anteriores, las corrientes del rotor de un generador de inducción doblemente alimentado en un sistema de conversión de energía eólica, toma un rol determinante en la operación, debido a su participación durante la condición estable del sistema, cuya referencia es la base del control de desacople de potencias activa y reactiva.

Además, el comportamiento en corriente que presenta el generador ante una falla de voltaje depende de variables como: la velocidad de la turbina, la regulación por cambio del ángulo de paso, el bus de corriente directa que forma el vínculo entre los dos convertidores CD-CA conmutados de potencia que integran el convertidor bidireccional que alimenta el lado rotor del generador y la frecuencia de operación del convertidor de lado rotor.

Siendo estas dos últimas importantes, visto desde la perspectiva de las características transitorias de la falla del generador, en lo referente a la duración de la perturbación.

Para la validación del porcentaje de aproximación de los modelos de corriente desarrollados en el capítulo III y propuestos en esta investigación, fue necesario, dada la potencia del generador, utilizar una plataforma de simulación diseñada en el entorno MATLAB-Simulink, con la intención de reproducir condiciones de operación en estado estable y transitorio del sistema. La Figura IV.1 muestra el diagrama de bloques y conexiones utilizado para la condición estable del sistema, para el caso del lado línea (grid side) se emuló mediante una fuente de CA trifásica cuyas variables son: amplitud, fase y frecuencia constantes, para el caso de la impedancia presentada por la línea de transmisión, se utilizó un elemento tipo “choke” trifásico resistivo conectado a un elemento de medición de voltaje y corriente trifásico. Para el caso de lado rotor, el convertidor bidireccional fue sustituido por una fuente trifásica de amplitud y frecuencia variable con la intención de emular la inyección de frecuencia en los anillos del rotor del generador y aportar el voltaje necesario para compensar el sistema. La fuente de lado rotor está conectada a un elemento de protección tipo “breaker”, que a su vez se conecta a un elemento de medición de voltaje y corriente trifásico.

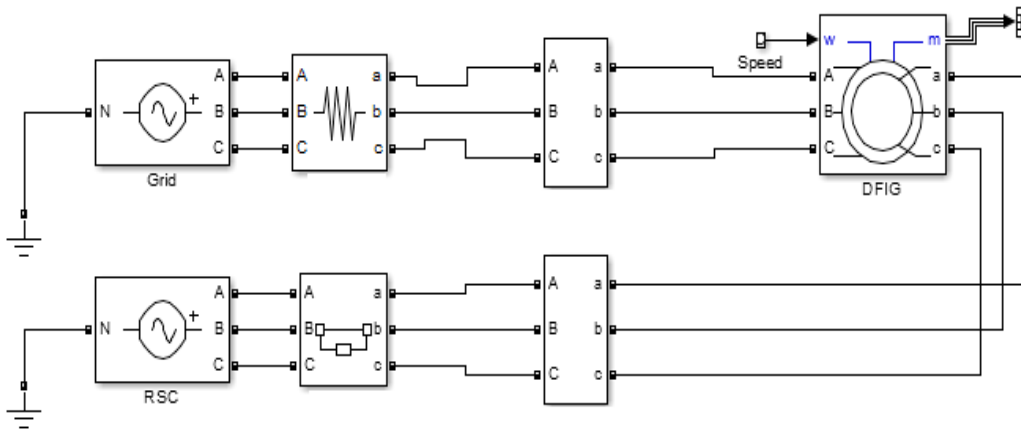


Fig. IV.1. Plataforma de simulación para la condición estable del sistema.

El generador es del tipo doblemente alimentado, cuyas terminales son velocidad de rotación, terminales de conexión a los devanados de estator y rotor, tradicionalmente el devanado de estator se configura en conexión estrella y el devanado de rotor se interconecta con los anillos rozantes del generador. En la tabla IV.1 se presentan los parámetros y la configuración de la máquina.

Tabla IV.1. Parámetros y configuración de bloque DFIG.

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia nominal	3 M	VA
Voltaje línea-línea	960	V _{rms}
Frecuencia	60	Hz
Resistencia de estator (R_s')	0.01379	p.u.
Inductancia de estator (L_s')	0.04775	p.u.
Resistencia de rotor (R_r')	0.007728	p.u.
Inductancia de rotor (L_r')	0.05067	p.u.
Inductancia mutua (L_m)	2.416	p.u.
Número de polos (p)	4	
Configuración		
Entrada mecánica	Velocidad (ω)	
Tipo de rotor	Devanado	
Marco de referencia	Síncrono	
Unidades	p.u.	

Fuente: Hojas de datos de aerogenerador marca GAMESA modelo V-07_GC-311

IV.2 Comportamiento ante la evolución de la amplitud del convertidor lado rotor.

Durante la condición estable, el control debe de compensar cualquier variación existente en la potencia activa y reactiva del sistema, siempre y cuando la falla no alcance los límites de protección, las figura IV.2 muestra el comportamiento de los voltajes y corrientes del estator y del rotor del generador del sistema ante variaciones de arranque del sistema con una aportación nula del convertidor del lado rotor.

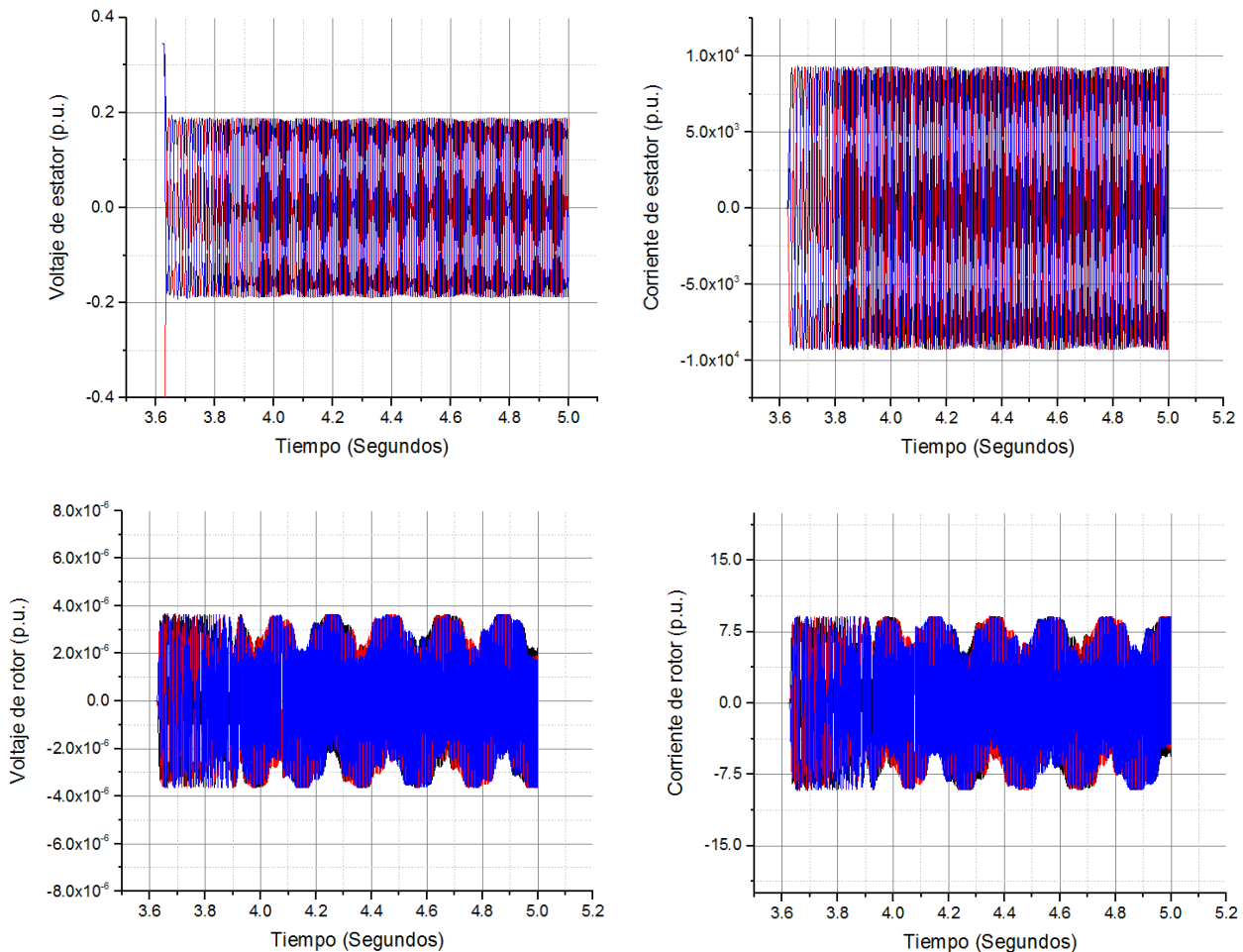


Fig. IV.2. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud nula en el convertidor lado rotor.

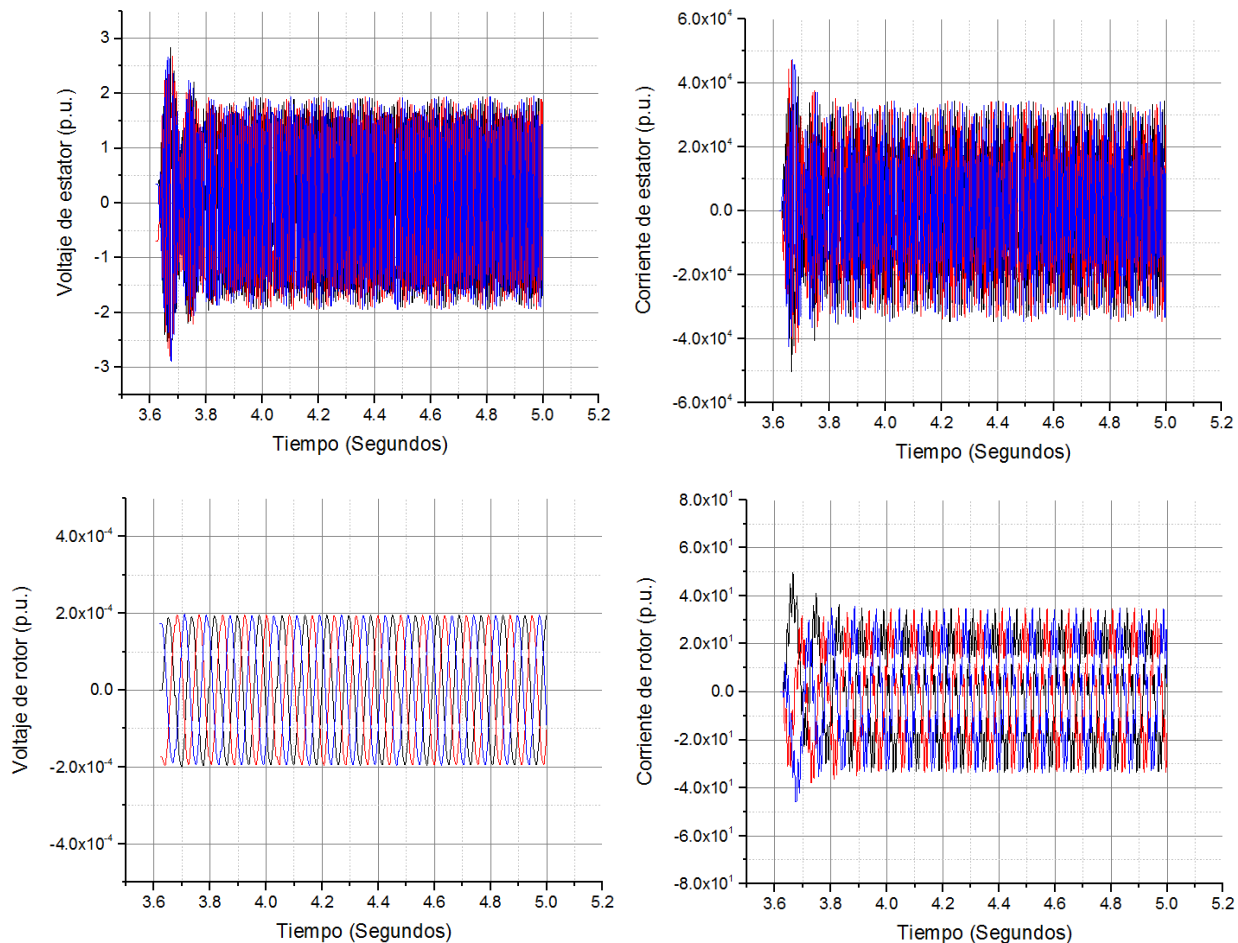


Fig. IV.3. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud del 10% en el convertidor lado rotor.

La gráfica de la parte superior izquierda de la figura IV. 2 muestra el voltaje trifásico inyectado al estator a través del “grid”, en la parte superior derecha la gráfica muestra el comportamiento de la corriente en el estator y las gráficas inferiores muestran de igual forma voltaje y corriente trifásica del rotor. En este caso en particular es posible visualizar oscilaciones tanto en el voltaje y la corriente reflejados en el rotor, debido a la ausencia de control y el valor de las inductancias y resistencias que afectan la amplitud y forma de las señales.

La figura IV.3 muestra la evolución de la amplitud en voltaje del convertidor de lado rotor de nulo a un 10%, al igual que la figura IV.2, las gráficas de la parte superior muestran los voltajes y corrientes del estator y las gráficas de la parte inferior muestran los voltajes y las corrientes del rotor. Para este caso en particular se visualiza una interacción entra la amplitud de voltaje inyectado en el rotor y su repercusión en la amplitud y forma de las señales de voltaje y corriente del estator.

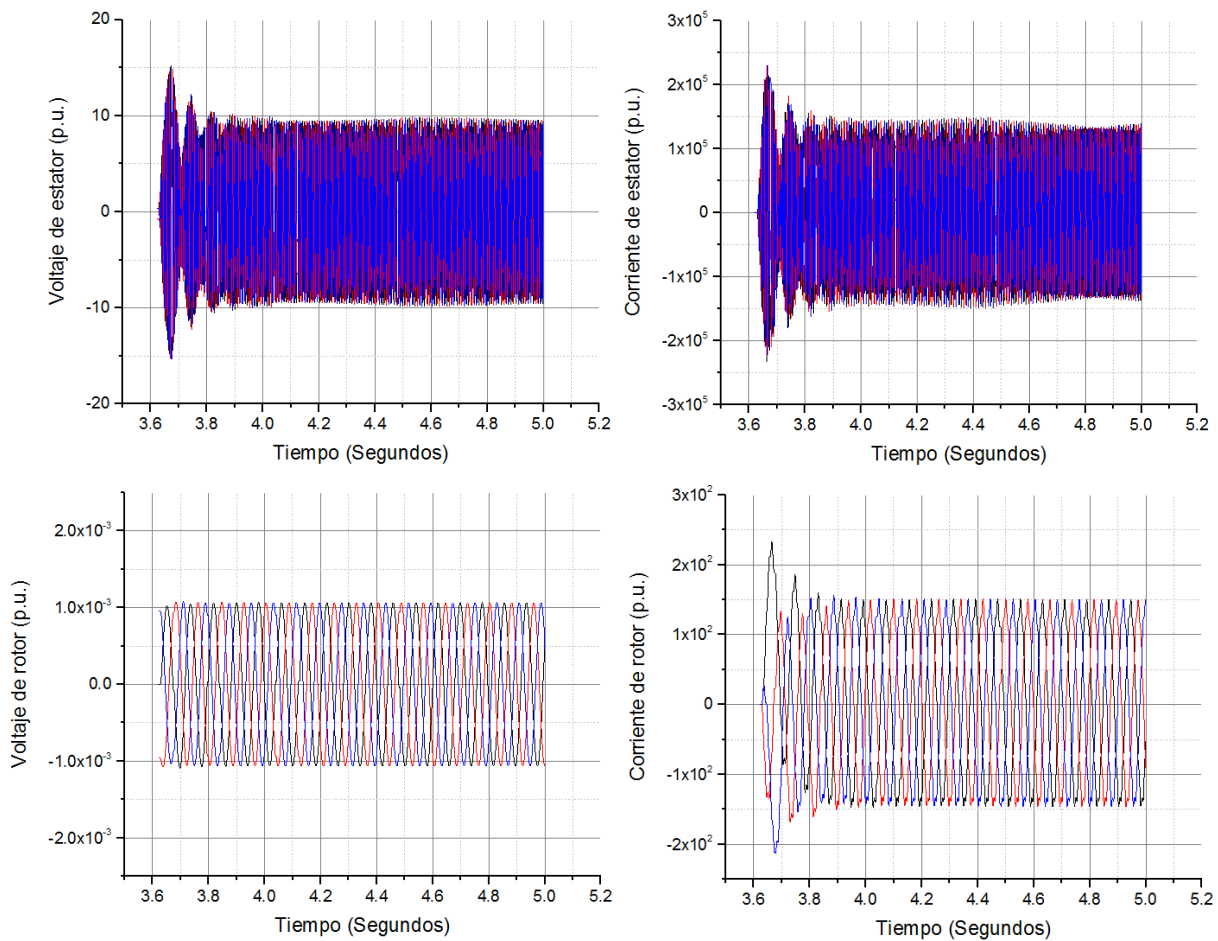


Fig. IV.4. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud del 50% en el convertidor lado rotor.

En el caso específico de que la amplitud del lado rotor aumente a un 50% p.u. comienza a visualizarse una estabilización en voltajes y corrientes, tal y como se muestra en la figura IV.4, aunque ante este efecto la amplitud aumenta en cierto porcentaje en comparación con amplitudes por debajo de este porcentaje, es importante recordar que el objetivo de este tipo de sistemas basados en el generador tipo “*DFIG*”, es el control de desacoplo de potencia activa y reactiva, cuyas variables principales son el voltaje y la corriente, así, este tipo de oscilaciones necesitan controles robustos, en cuyo caso, se requiere mayor consumo computacional, aunado a la necesidad de controladores en tiempo real, debido a que una descompensación reactiva en el “*grid*” genera problemas para los usuarios finales, y por ende para el sistema.

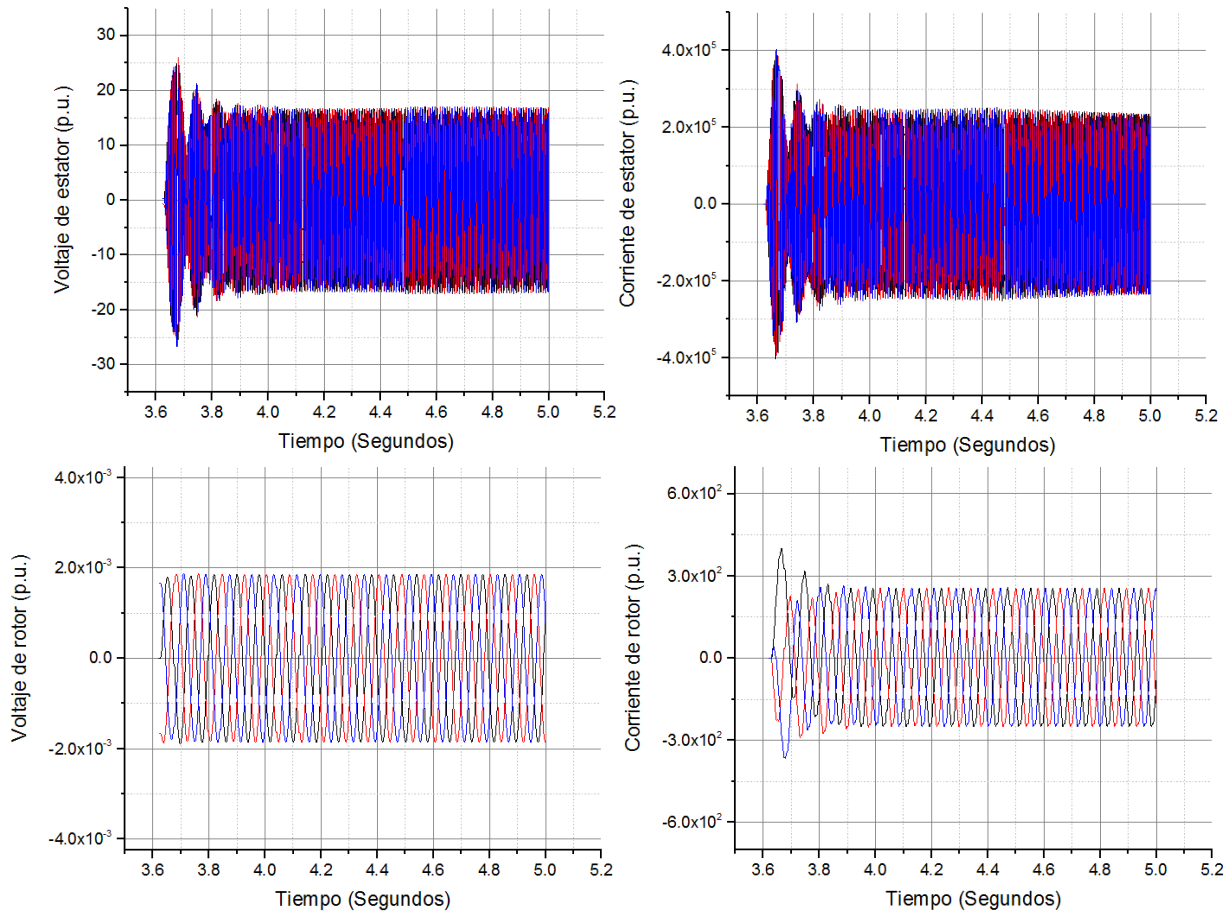


Fig. IV.5. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición de amplitud del 100% en el convertidor lado rotor.

Cuando la amplitud del lado rotor alcanza el 100 % p.u. el sistema se considera estable, esto es, voltajes y corrientes nominales, lo que resulta en un equilibrio de potencias reflejado en el “grid”, que realmente es lo que se busca en este tipo de sistemas, en congruencia con los organismos normativos mundiales. Cabe mencionar que esta amplitud se logra mediante el convertidor bidireccional y un control del bus de CD que interconecta los dos convertidores.

IV.3 Comportamiento ante la evolución del valor de frecuencia del convertidor lado rotor.

Una variable más, de importancia para el correcto funcionamiento del sistema, es la frecuencia de la señal que se inyecta al rotor del generador. Esta acción tiene como consecuencia la regulación de la potencia generada, a través de la compensación de la variabilidad de la velocidad del viento.

Como se mencionó en el capítulo I, una de las ventajas de estos sistemas es la posibilidad de solo manejar el 20 al 30 % de la potencia mediante el convertidor bidireccional, sin embargo, es necesario tomar en cuenta los efectos que conlleva la variación de esta variable, en los voltajes y corrientes del generador.

Si la frecuencia del convertidor de lado rotor se encuentra en un valor aproximado al 6% p.u., los voltajes y corrientes del generador se comportan de acuerdo a lo plasmado en la figura IV.6. En este punto, en el generador subsisten dos frecuencias, la primera es función del “grid”, tradicionalmente 50 o 60 Hz, mientras que la segunda depende del convertidor de lado rotor y de la velocidad de rotación de la turbina, y de acuerdo a la funcionabilidad del sistema, éste podrá operar en sub, súper o en sincronía.

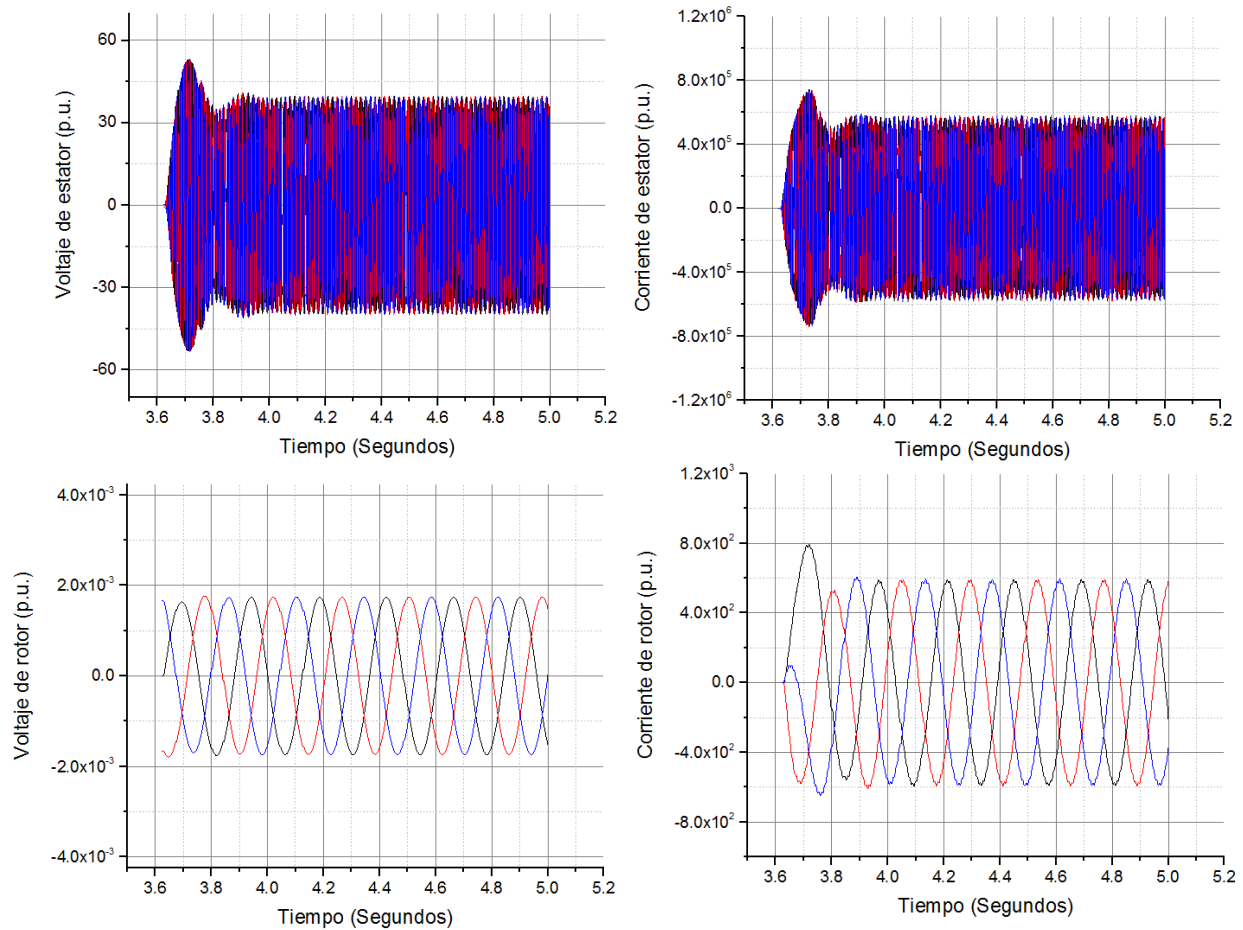


Fig. IV.6. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición del valor de frecuencia del 6% en el convertidor lado rotor.

Cuando la frecuencia aumenta, es un indicativo de que el sistema se encuentra en subsincronía - caso común- debido a una disminución de la velocidad de rotación del aerogenerador, para este instante la máquina migra de cuadrante de operación.

La figura IV.7 muestra los voltajes y corrientes de estator y rotor para el caso en el que la frecuencia tiene un 12% del valor máximo.

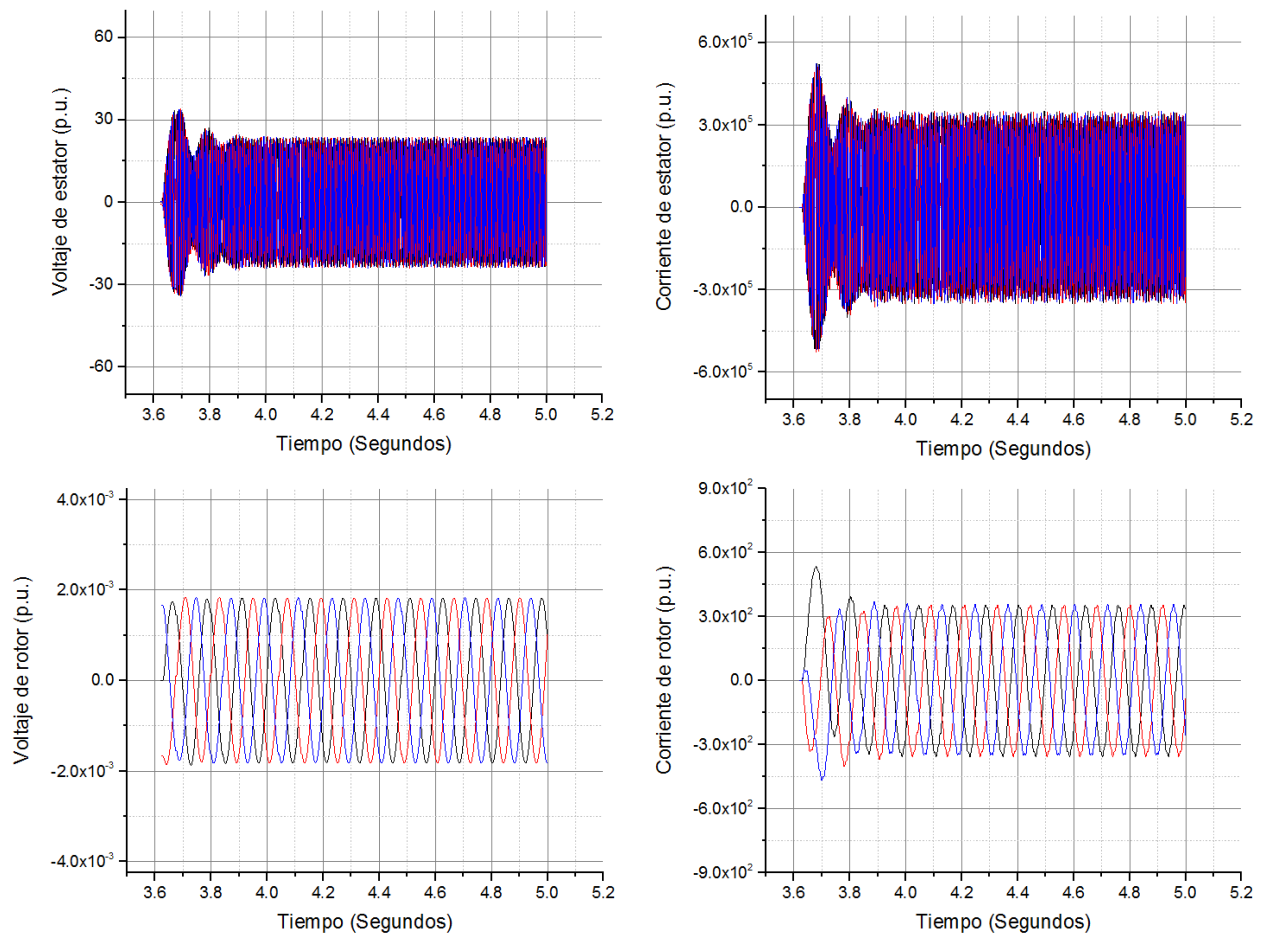


Fig. IV.7. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición del valor de frecuencia del 12% en el convertidor lado rotor

De acuerdo con reportado en la literatura comercial, un valor típico en este tipo de sistema es de 30 Hz, a este punto el sistema alcanza la sincronía, para tal efecto, el sistema genera las potencia nominales calculadas y se mantiene la condición de estabilidad en el “grid”, la figura IV.8 muestra los voltajes y corrientes de estator y rotor de la máquina.

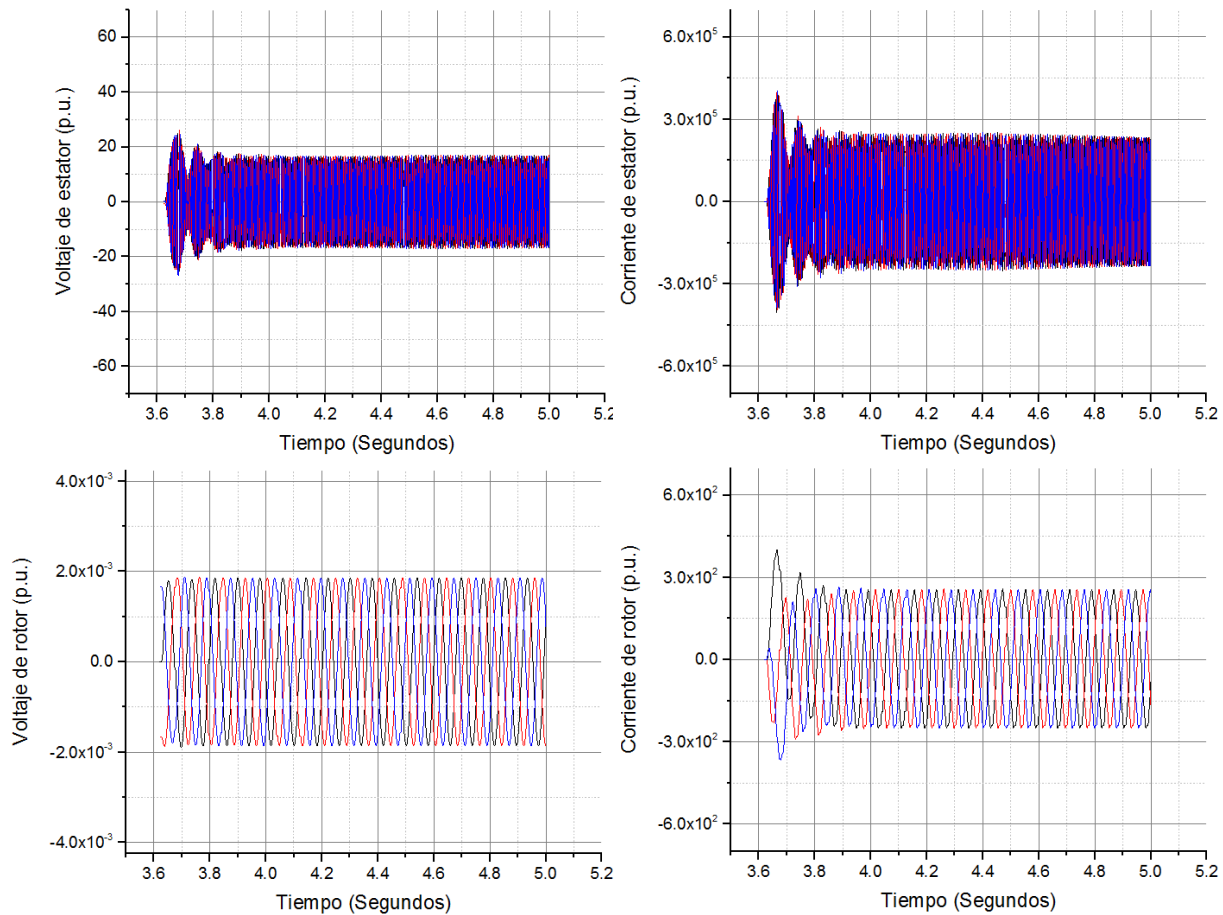


Fig. IV.8. Voltajes y corrientes del estator y del rotor ante condición del valor de frecuencia de 30 Hz en el convertidor lado rotor.

IV.4 Condición transitoria ante una falla simétrica en el voltaje del “grid”.

Aunque los sistemas de conversión de energía eólica basados en el generador de inducción doblemente alimentado cuentan con importantes ventajas con respecto a otros esquemas, son vulnerables a perturbaciones en el “grid”, las cuales pueden ser ocasionadas por desbalances reactivos o por fenómenos atmosféricos. Los desbalances reactivos son una función de caídas o aumentos en la amplitud del voltaje y de cambios en la frecuencia. Siendo las caídas de voltaje las fallas típicas reportadas, para ello, surge un concepto denominado “capacidad

de manejo de falla – FRT por sus siglas en inglés”, esta característica de los controles permite al sistema compensar reactivamente el “grid”, y sobreponerse a la falla.

Sin embargo, esta capacidad del controlador para compensar reactivamente depende de la profundidad de la falla y la duración.

La falla que ocurre por condiciones atmosféricas es la más crítica, debido a que cuando ocurre una descarga eléctrica cerca o en el sistema de protección del sistema o central eólica, el voltaje del “grid” sufre una falla a tierra, lo que indica que la amplitud del voltaje cayó a cero, durante un lapso de tiempo pequeño (10 - 100 ms típico).

Este efecto repercute directamente en el estator del generador, debido a que está conectado directamente, ocasionando un aumento en la corriente, misma que se refleja en rotor con una amplitud que es función del valor de las impedancias de los devanados del rotor. Comúnmente son sobrecorrientes que colocan en peligro la integridad de los convertidores electrónicos de potencia y el generador.

En literatura se reportan intentos de representar este tipo de transitorios de corriente, tal como se describe en el capítulo II, sin embargo cada uno de ellos analiza desde diferentes perspectivas, siendo pocos los que se focalizan en el comportamiento del generador, a continuación se muestran una serie de pruebas que permitirán validar el porcentaje de similitud del modelo de corriente de rotor propuesto, en primer lugar se analiza para una falla del tipo simétrica esto es que las tres fases se perturban de igual forma.

La figura IV.9 muestra una caída de amplitud en el grid de aproximadamente 20%, mismo que se visualiza en el gráfico de la parte superior izquierda, esto ocasiona un aumento en la corriente de estator, la cual es función del flujo magnético.

El voltaje de rotor solo sufre una pequeña deformación, sin embargo la corriente del rotor se ve afectada en mayor proporción, gráficos de la parte inferior. Recordando que este valor de aumento de la corriente depende del valor de las impedancias de los devanados del rotor, así mientras más grande en cuestión de potencia sea el generador, este valor aumentara en igual proporción.

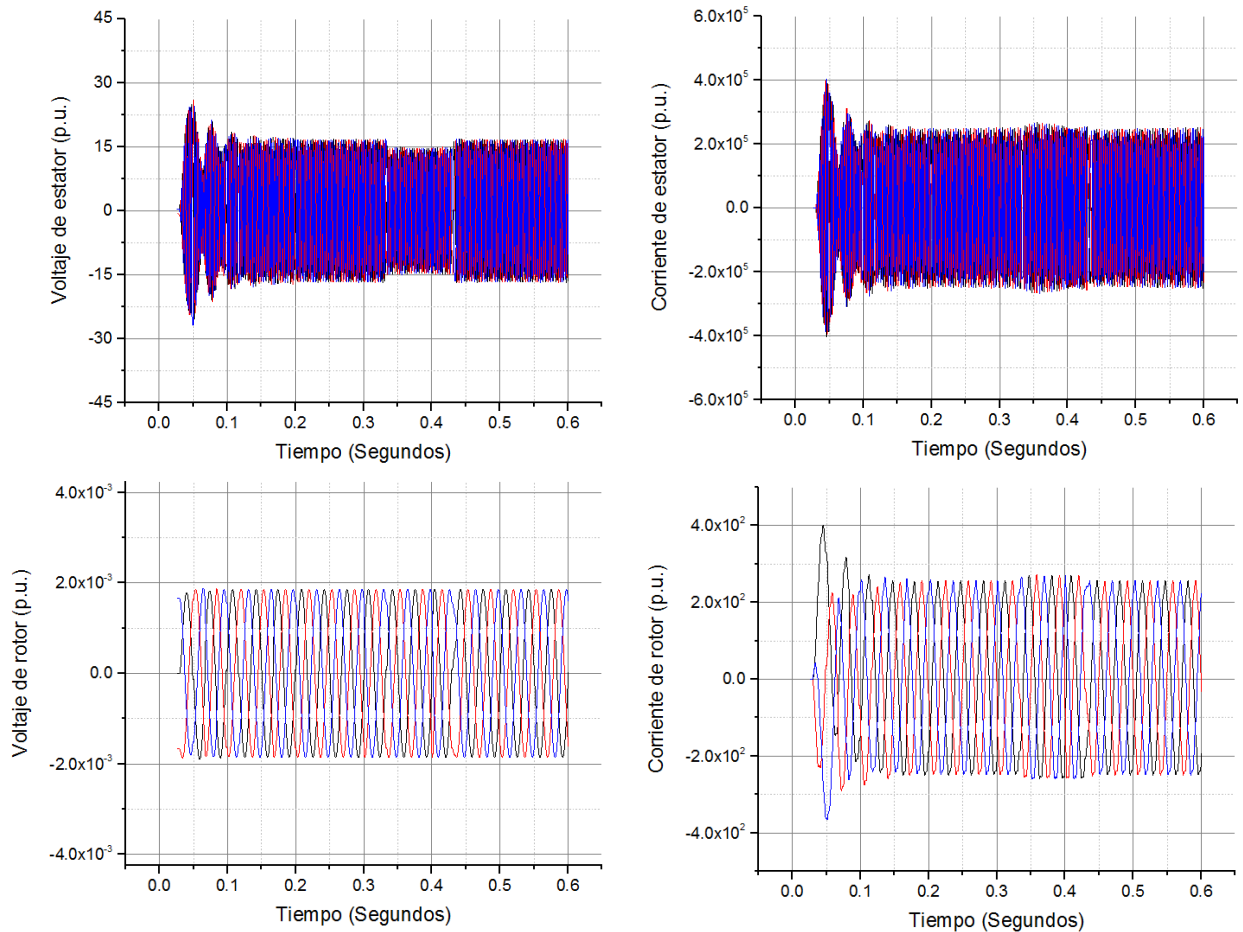


Fig. IV.9 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 20%.

Conforme la caída de voltaje en el grid sea más profunda, la corriente en el rotor también aumentara de manera proporcional, las figuras IV.10 y IV.11 muestran este efecto.

Análisis de las corrientes del rotor de un sistema eólico ante huecos de voltaje simétricos y asimétricos.

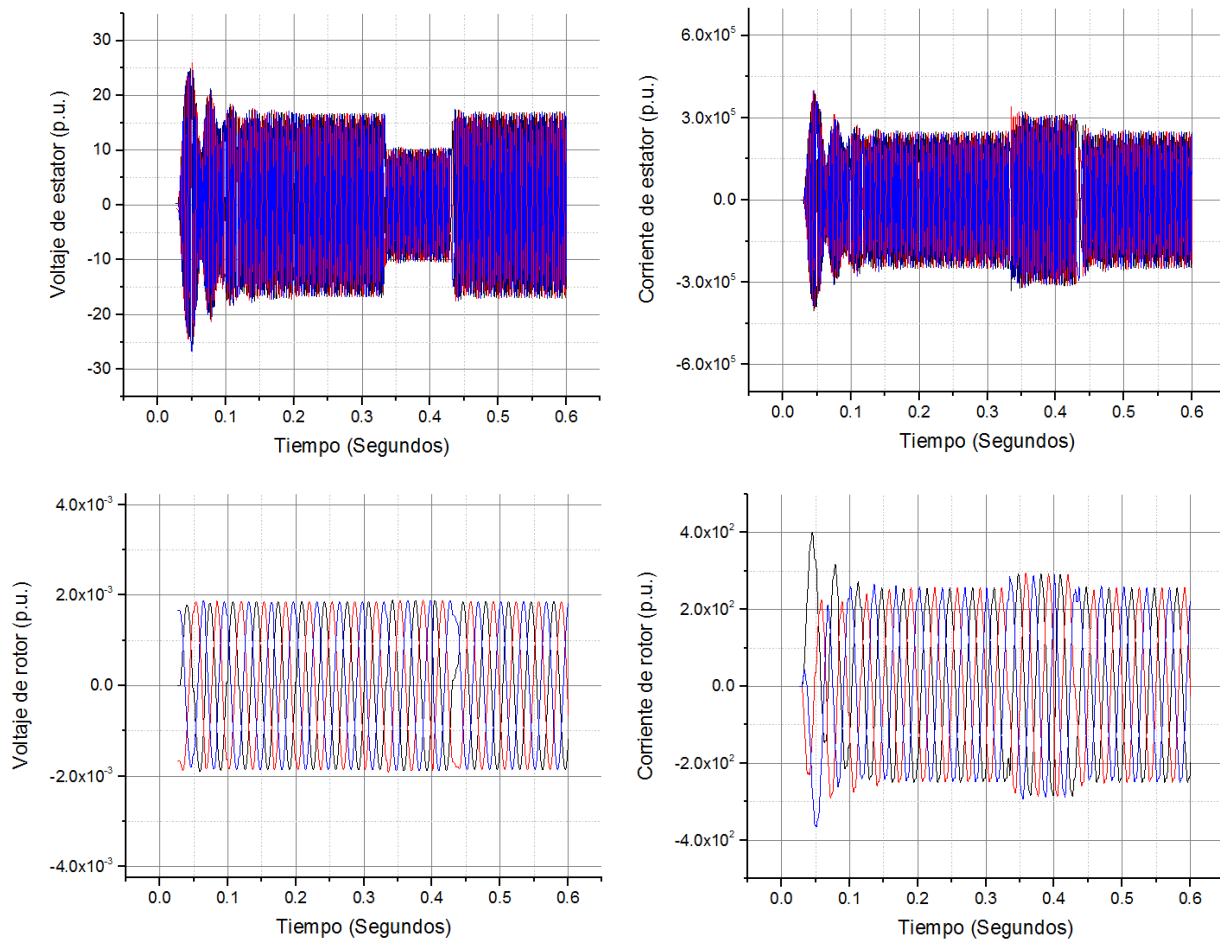
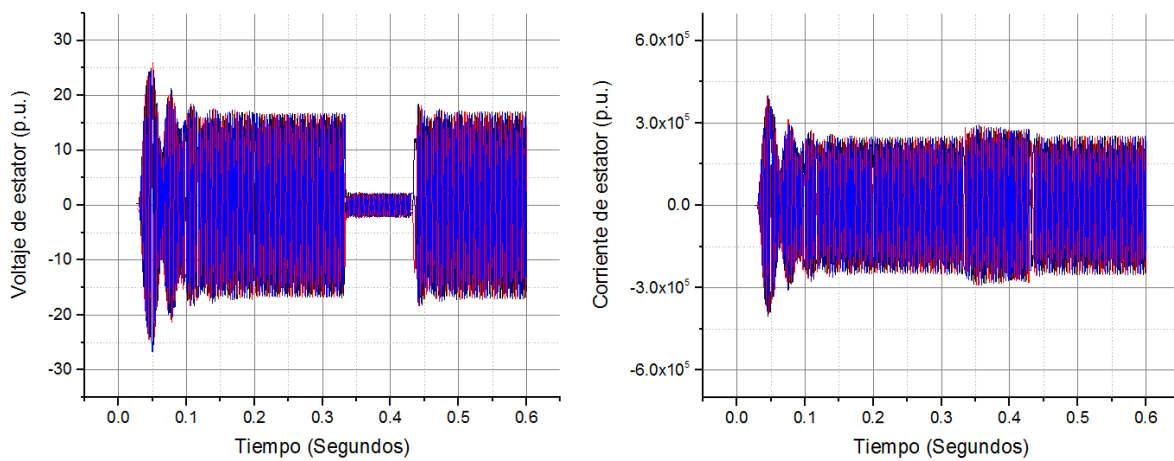


Fig. IV.10 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 50%



Análisis de las corrientes del rotor de un sistema eólico ante huecos de voltaje simétricos y asimétricos.

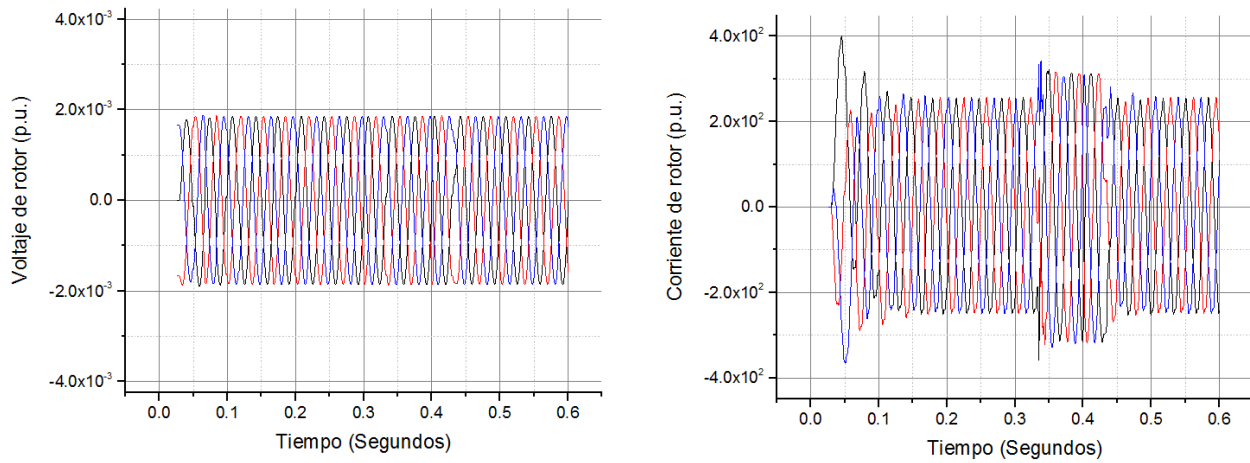


Fig. IV.11 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 80%.

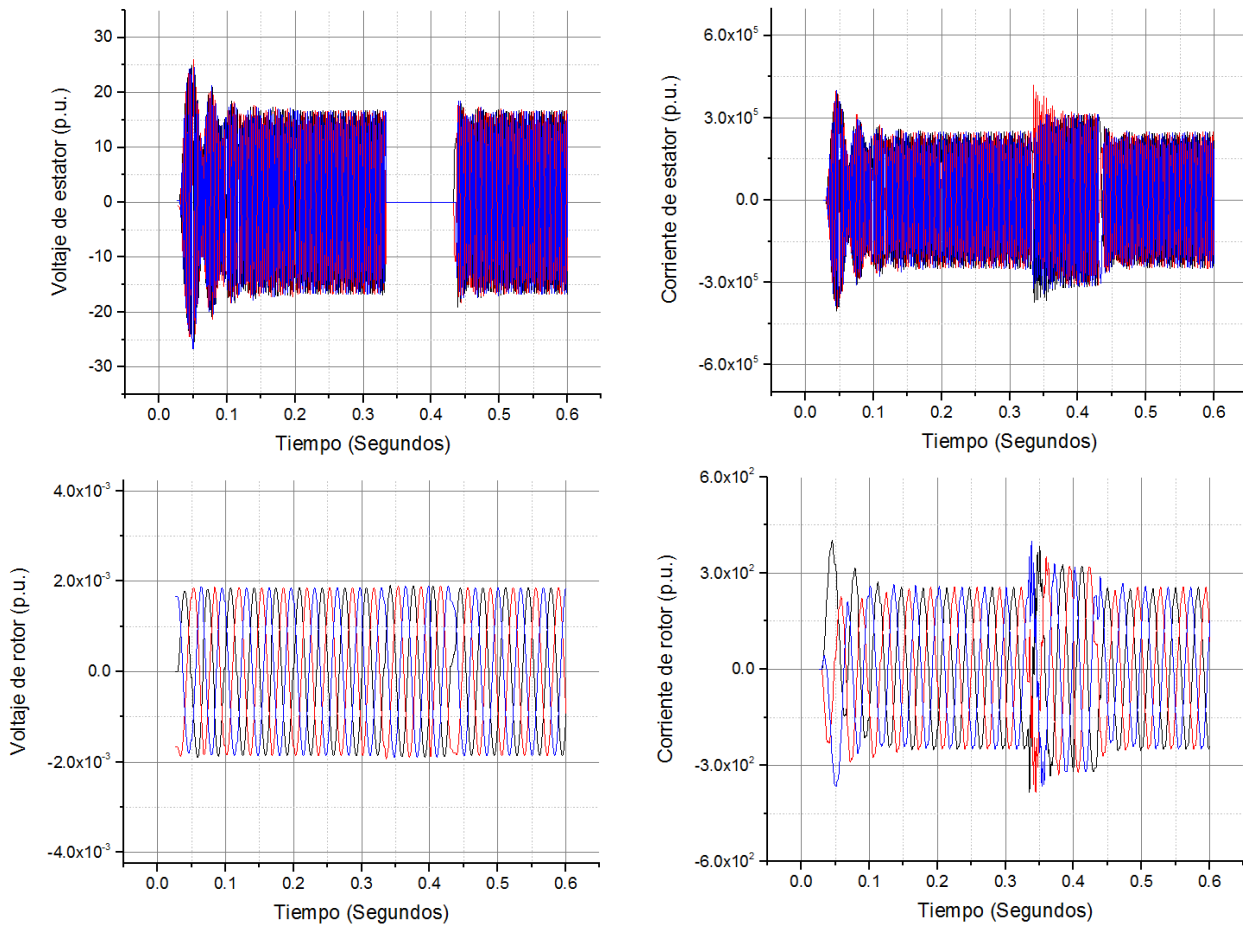


Fig. IV.12 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una caída de voltaje del 100 %.

La figura IV.12 muestra el caso más crítico de caída de voltaje, el cual es denominado falla simétrica a tierra, es justamente en la gráfica de corriente de rotor que se validará el primer modelo de corriente propuesto que hace referencia a la sección III.2.1 ecuación III.55. Para ello la figura IV. 13 muestra dos gráficos, el primero muestra la evolución de una sola fase de la corriente del rotor, la segunda muestra un acercamiento del instante en el cual ocurre la falla simétrica.

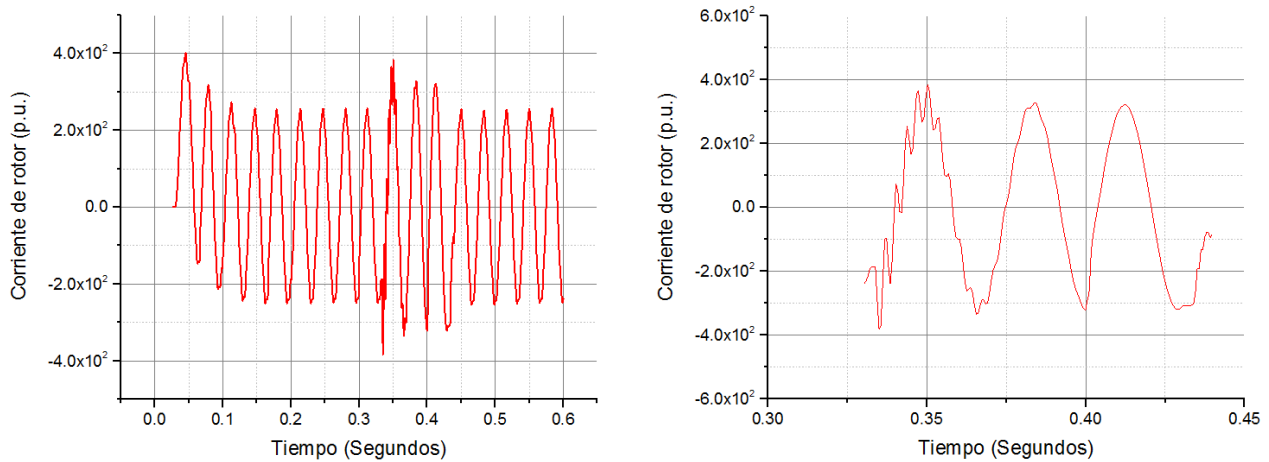


Fig. IV.13 Evolución y acercamiento de la falla simétrica en la corriente de rotor.

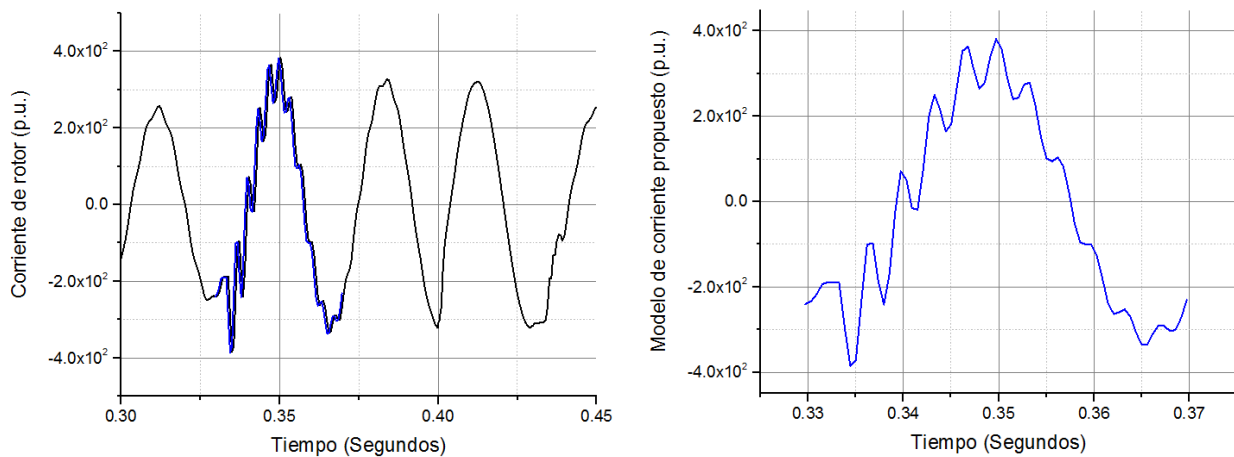


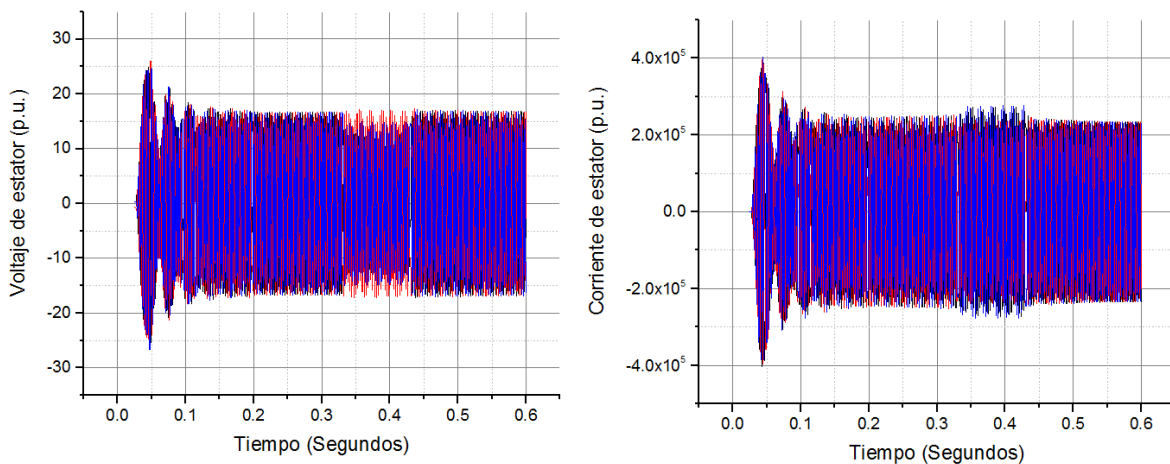
Fig. IV.14 Gráfico de similitud entre la corriente de rotor ante la falla simétrica y el modelo de corriente propuesto; Gráfico de forma de onda del modelo de corriente propuesto. .

De acuerdo a la poca complejidad que presenta el modelo propuesto el porcentaje de similitud es aproximadamente del 98%, bajo las condiciones de prueba de la plataforma de simulación.

IV.4 Condición transitoria ante una falla asimétrica en el voltaje del “grid”.

El sistema cambia las condiciones de la corriente de rotor dependiendo de la forma en la que ocurre la falla, en congruencia con lo reportado en la literatura la falla simétrica no es común en este tipo de sistemas debido a que este fenómeno es muy improbable que ocurra, sin embargo mucha atención se ha puesto a las fallas asimétricas, que pueden ser: falla a tierra de una sola fase o falla a tierra de dos fases.

La figura IV.15 muestra la evolución de los voltajes y corrientes de estator y rotor ante una falla asimétrica de una fase a tierra, lo que significa que solo una fase tiene la perturbación.



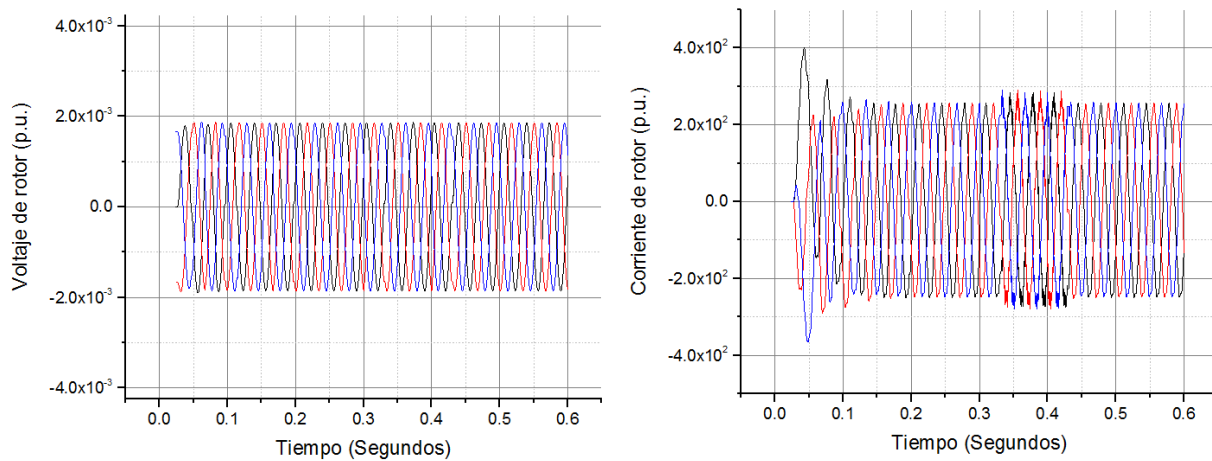


Fig. IV.15 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una falla asimétrica de fase a tierra.

A comparación de lo que ocurre, bajo la perspectiva de la corriente de rotor, con una falla simétrica, existe ahora una componente de corriente directa en el modelo que modifica durante todo el lapso de la falla la corriente, la figura IV.16 muestra un acercamiento de este fenómeno.

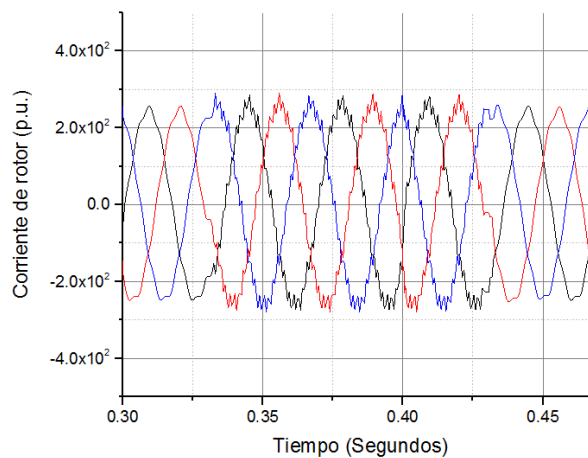


Fig. IV.16 Acercamiento del efecto de una falla asimétrica de fase a tierra en la corriente de rotor.

Análisis de las corrientes del rotor de un sistema eólico ante huecos de voltaje simétricos y asimétricos.

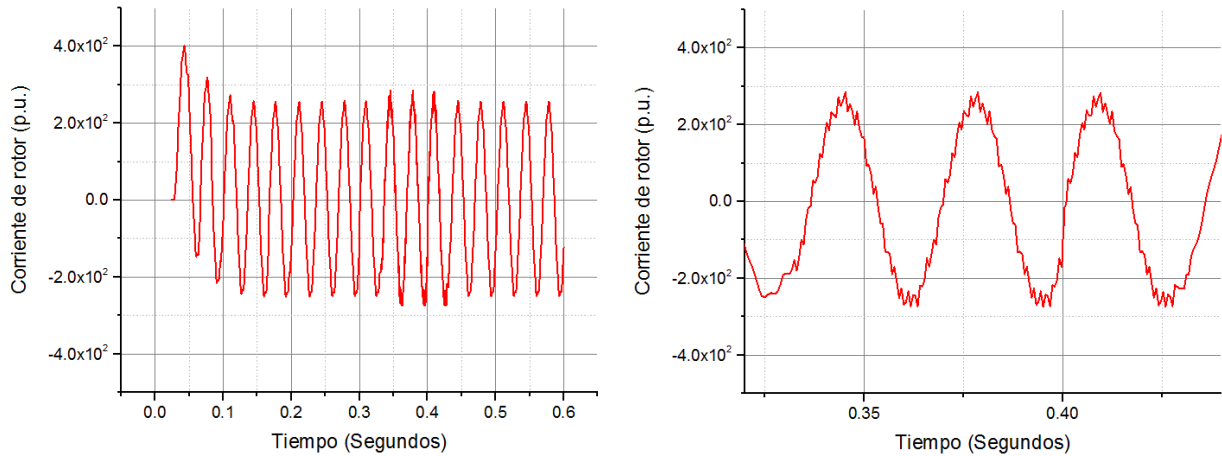


Fig. IV.17 Gráfica de la evolución de la corriente de rotor ante falla asimétrica; Gráfica de la forma de onda en el lapso de duración de la falla.

Ahora bien haciendo referencia a la sección III.2.2, la figura IV. 18 muestra la similitud entre la corriente de rotor sometida a condiciones experimentales contra el modelo teórico desarrollado mediante la teoría de la variable simétrica.

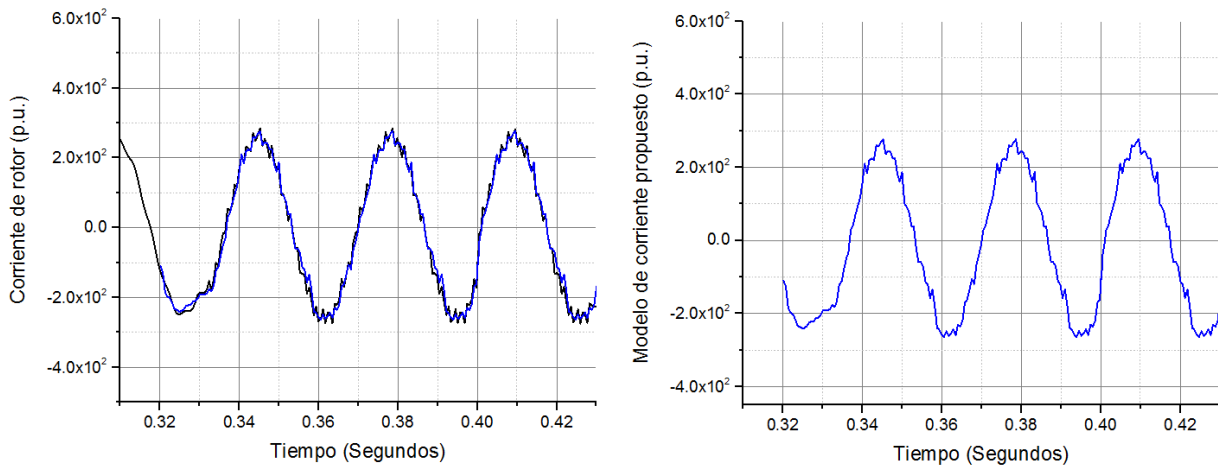


Fig. IV.18 Gráfico de similitud entre la corriente de rotor ante la falla asimétrica y el modelo de corriente propuesto; Gráfico de forma de onda del modelo de corriente propuesto.

La figura IV.19 muestra ahora la evolución de los voltajes y corrientes de estator y rotor ante una falla asimétrica de dos fases a tierra, lo que significa que dos fases tienen la perturbación.

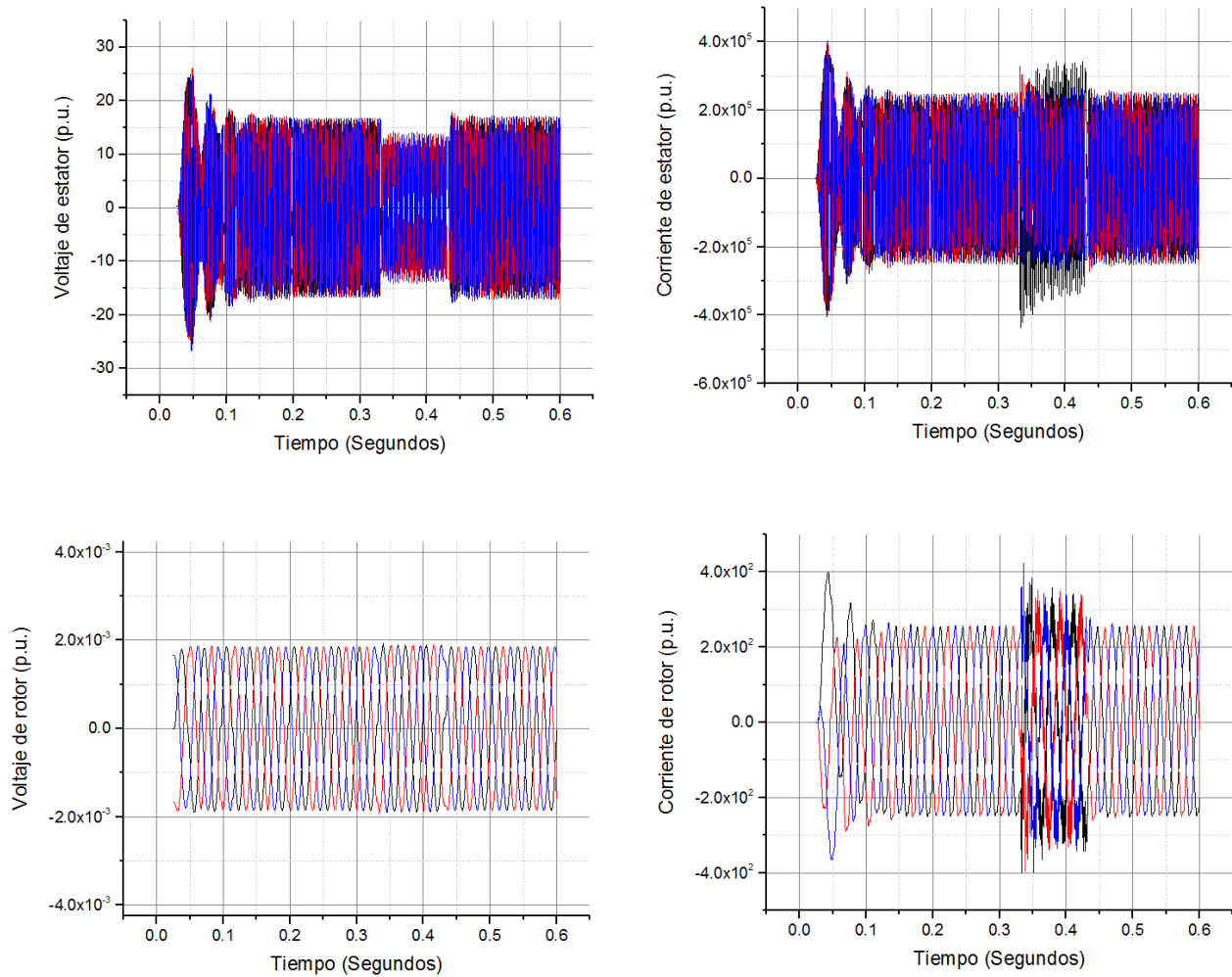


Fig. IV.19 Voltajes y corrientes de estator y rotor ante una falla asimétrica de dos fases a tierra.

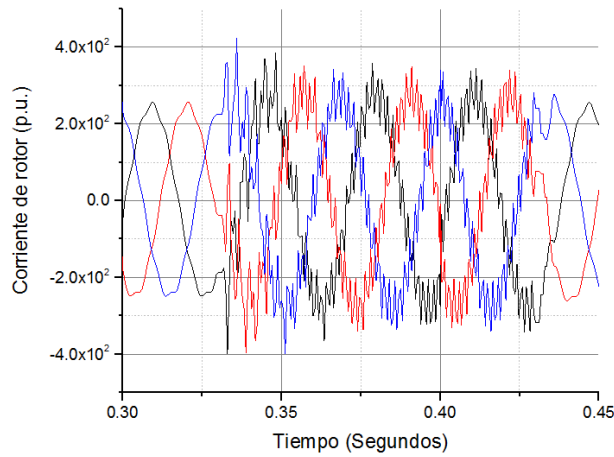


Fig. IV.20 Acercamiento del efecto de una falla asimétrica de dos fases a tierra en la corriente de rotor.

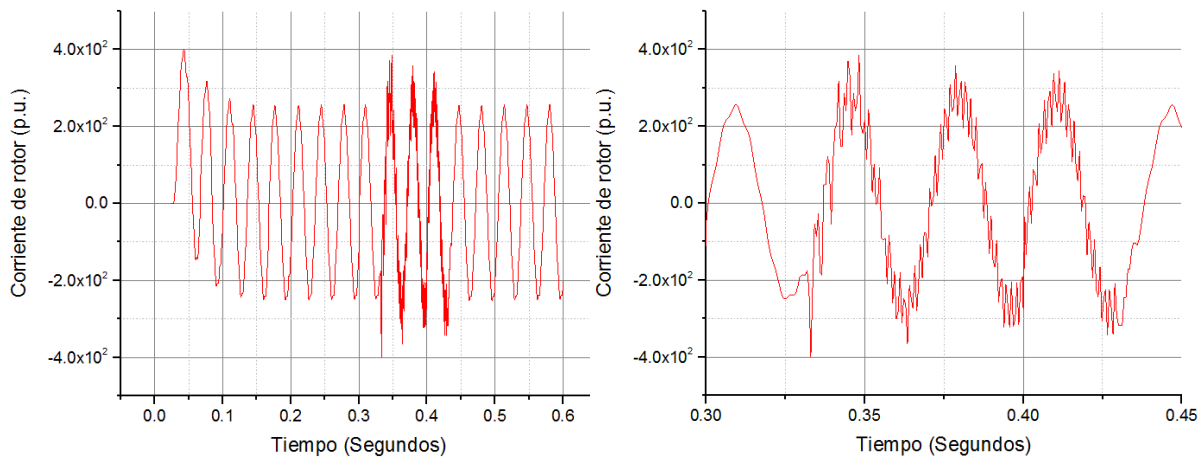


Fig. IV.21 Evolución y acercamiento de la falla simétrica en la corriente de rotor

Haciendo referencia a la sección III.2.2, la figura IV. 22 muestra la similitud entre la corriente de rotor sometida a condiciones experimentales contra el modelo teórico desarrollado mediante la teoría de la variable simétrica

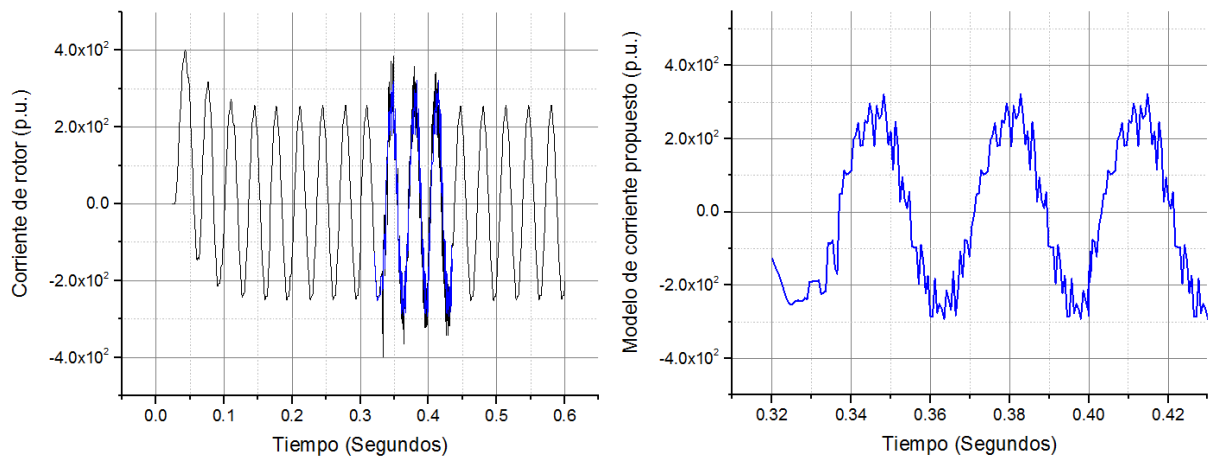


Fig. IV.22 Gráfico de similitud entre la corriente de rotor ante la falla asimétrica y el modelo de corriente propuesto; Gráfico de forma de onda del modelo de corriente propuesto.

CAPÍTULO V

"La inteligencia es la habilidad de adaptarse a los cambios"

Stephen Hawking

V. Conclusiones

Los sistemas que permiten la utilización de energías renovables para la generación de energía, son cada vez desarrollados con mejores características, los sistemas eólicos se coloca entre las mejores alternativas gracias a su desarrollo tecnológico, y el sistema basado en generador doblemente alimentado como la primer opción debido a sus ventajas con respecto a las demás configuraciones.

Países como Dinamarca apuestan a este tipo de tecnología como fuente principal de abastecimiento de energía, sin embargo, las no linealidades que presenta ante temas relacionados con la calidad de la energía han logrado que haya bastantes esfuerzos guiados hacia la comprensión del comportamiento del sistema ante fenómenos imprevistos.

Tal es el caso de esta investigación, la cual obtiene modelos teóricos de comportamiento de la corriente de rotor ante perturbaciones simétricas y asimétricas con la intención de identificar estados que permitan mejorar el sistema en alguna de las partes que lo integran.

Uno de ellos es el sistema de protección ante fallas de fase a tierra, denominado crowbar, este sistema es simple, se utilizan resistencias en serie con los anillos del rotor del generador para crear un camino alternativo para la sobrecorriente del rotor mediante un accionamiento basado en tecnología de estado sólido, típicamente tiristores. Sin embargo existen algunos problemas relacionados a ello, el primero y el más significativo es que desconectar el sistema crea un desbalance reactivo debido a la pérdida del control desacoplado de potencias y el segundo es el valor de las resistencias ya que alteran el comportamiento del generador aumentando el valor de la impedancia de los devanados de rotor.

El accionamiento del crowbar recae en una expresión matemática que calcula el valor máximo permisible de la corriente de rotor, sin embargo como ya se analizó, cuando existe fallas a tierra en las fases se generan picos en la forma de onda de la corriente lo que puede llevar a una posible desconexión del sistema, así el modelo desarrollado puede contribuir al cálculo óptimo del valor máximo de corriente y su duración ya que las impedancias del generador sirven como amortiguadores en este proceso.

Los modelos desarrollados también pueden contribuir al diseño de nuevos controladores no lineales que ayuden a eficientar el proceso.

Referencias bibliográficas

- Abad, G., Pez, J., Rodr, Guez, M., Marroyo, L. & Iwanski, G. 2011a. Dynamic Modeling of the Doubly Fed Induction Machine. *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation Applications*. Wiley-IEEE Press.
- Abad, G., Pez, J., Rodr, Guez, M., Marroyo, L. & Iwanski, G. 2011b. Steady State of the Doubly Fed Induction Machine. *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation Applications*. Wiley-IEEE Press.
- Ackermann, T. 2005. *Wind Power in Power Systems*, Wiley.
- Aimeng, W., Wenyuan, X. & Alsmadi, Y. Performance comparison of LVRT techniques for DFIG wind turbine under asymmetrical voltage sags. *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2015 IEEE 11th International Conference on*, 9-12 June 2015 2015. 254-258.
- Chen, W., Xu, D., Zhu, N., Chen, M. & Blaabjerg, F. 2015. Control of Doubly Fed Induction Generator to Ride Through Recurring Grid Faults. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, PP, 1-1.
- Eissa, M. M. 2015. Protection techniques with renewable resources and smart grids—A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1645-1667.
- Ekanayake, J. B., Holdsworth, L. & Jenkins, N. 2003. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines. *Electric Power Systems Research*, 67, 207-215.
- Eltigani, D. & Masri, S. 2015. Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 770-780.
- Feehally, T. & Apsley, J. M. 2015. The Doubly Fed Induction Machine as an Aero Generator. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 51, 3462-3471.
- Feng, W., Vilathgamuwa, D. M. & Choi San, S. 2015. Design of mode switching scheme for low-voltage ride-through of doubly fed induction generators. *Renewable Power Generation, IET*, 9, 109-119.
- Hasni, M., Mancor, Z., Mekhtoub, S. & Bacha, S. 2012. Parametric Identification of the Doubly Fed Induction Machine. *Energy Procedia*, 18, 177-186.
- Iwanski, G., Pura, P. & Luszczuk, T. Properties and control of variable speed doubly fed induction generator. *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015 Tenth International Conference on*, March 31 2015-April 2 2015 2015. 1-8.
- Joost, M., Tisborn, G., Groke, H. & Orlik, B. Control of doubly fed induction generators during grid faults. *PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of*, 19-20 May 2015 2015. 1-8.

- Justo, J. J., Mwasilu, F. & Jung, J.-W. 2015. Doubly-fed induction generator based wind turbines: A comprehensive review of fault ride-through strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 447-467.
- Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, Soma S., Devabhaktuni, V. K., Lee, Jin W., Nikolaidis, E., Andersen, B. & Afjeh, A. 2016. Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 209-224.
- Lafferte, D., Dias, M. & Zacharias, P. Novel crowbar system in doubly fed induction generators. PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven, June 29 2015-July 2 2015 2015. 1-6.
- Madani, S. M., Sadeghi, R., Kharkan, B. & Abadi, M. Improving the LVRT capability of the DFIG-based wind turbines during fault. Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2015 6th, 3-4 Feb. 2015 2015. 503-508.
- Marmolejo, A., Palazzo, M. & Delfanti, M. Short-circuit current of a doubly-fed induction generator: Analytical solution and insights. Energy Conversion (CENCON), 2014 IEEE Conference on, 13-14 Oct. 2014 2014. 128-133.
- Metatla, S., Mekhtoub, S., Ibtouen, R. & Nesba, A. Dynamic behavior of doubly fed induction generator during network voltage dips. Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2014 International Conference on, 3-6 Nov. 2014 2014. 1-6.
- Mohd Zin, A. A. B., Pesaran H.A, M., Khairuddin, A. B., Jahanshaloo, L. & Shariati, O. 2013. An overview on doubly fed induction generators' controls and contributions to wind based electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 692-708.
- Noorcheshma, P., Sreedevi, J. & Sivaprasad, V. Low Voltage Ride through (LVRT) of DFIG and PMSM wind turbine. Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2015 IEEE International Conference on, 5-7 March 2015 2015. 1-5.
- Nouh, A. & Mohamed, F. Wind energy conversion systems: Classifications and trends in application. Renewable Energy Congress (IREC), 2014 5th International, 25-27 March 2014 2014. 1-6.
- Rolán, A., Pedra, J. & Córcoles, F. 2014. Detailed study of DFIG-based wind turbines to overcome the most severe grid faults. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 868-878.
- Shuying, Y., Yin, C., Liuchen, C., Zhen, X. & Xing, Z. Virtual inductance self-demagnetization based LVRT control strategy for doubly fed WTs. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015 IEEE, 15-19 March 2015 2015. 2988-2992.
- Spertino, F., Di Leo, P., Ilie, I.-S. & Chicco, G. 2012. DFIG equivalent circuit and mismatch assessment between manufacturer and experimental power-wind speed curves. *Renewable Energy*, 48, 333-343.
- Toledo, E. J., Aromataris, L., Tarnowski, G. C. & Perrone, O. E. Modelo de aerogenerador de velocidad variable DFIG con control LVRT. Biennial

- Congress of Argentina (ARGENCON), 2014 IEEE, 11-13 June 2014 2014. 696-701.
- Valikhani, M. & Sourkounis, C. A comparative study of rotor flux position- and stator flux position-based direct power control method in a DFIG wind turbine system. *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2014 Ninth International Conference on, 25-27 March 2014 2014. 1-5.
- Veerasathian, C., Ongsakul, W. & Mitra, J. Voltage stability assessment of DFIG wind turbine in different control modes. *Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, 2014 International Conference and Utility Exhibition on, 19-21 March 2014 2014. 1-6.
- Vrionis, T. D., Koutiva, X. I. & Vovos, N. A. 2014. A Genetic Algorithm-Based Low Voltage Ride-Through Control Strategy for Grid Connected Doubly Fed Induction Wind Generators. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 29, 1325-1334.
- Wenjie, C., Blaabjerg, F., Nan, Z., Min, C. & Dehong, X. Comparison of control strategies for Doubly fed induction generator under recurring grid faults. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE, 16-20 March 2014 2014. 398-404.
- Wenyong, G., Liye, X., Shaotao, D., Xi, X., Yuanhe, L. & Yifei, W. 2015a. Evaluation of the Performance of BTFCLs for Enhancing LVRT Capability of DFIG. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 30, 3623-3637.
- Wenyong, G., Liye, X., Shaotao, D., Yuanhe, L., Xi, X., Weiwei, Z. & Luo, L. 2015b. LVRT Capability Enhancement of DFIG With Switch-Type Fault Current Limiter. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 62, 332-342.
- Yingcheng, X. & Nengling, T. 2012. System frequency regulation in doubly fed induction generators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43, 977-983.
- Yipeng, S. & Heng, N. Direct power control for DFIG under unbalanced and harmonically distorted grid voltage in stationary frame. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014 IEEE, 14-18 Sept. 2014 2014. 1500-1506.
- Zhen, X., Xuguang, Z., Xing, Z., Shuying, Y. & Lingxiang, W. 2015. Improved Ride-Through Control of DFIG During Grid Voltage Swell. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 62, 3584-3594.
- Zhou, L., Liu, J. & Zhou, S. 2015. Improved Demagnetization Control of a Doubly-Fed Induction Generator Under Balanced Grid Fault. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 30, 6695-6705.
- Zhu, R., Chen, Z., Tang, Y., Deng, F. & Wu, X. 2015. Dual-Loop Control Strategy for DFIG-based Wind Turbines under Grid Voltage Disturbances. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, PP, 1-1.