Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelado del Comportamiento Dinámico de Sistemas de Generación Eólica Ante Perturbaciones de Red

Autor: Shahazad Abrahim

Tutor: Msc, Lesyani León Viltre

Santa Clara

2010

"Año 52 de la Revolución"

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelado del Comportamiento Dinámico de Sistemas de Generación Eólica Ante Perturbaciones de Red

Autor: Shahazad Abrahim

Tutor: Msc, Lesyani León Viltre

Santa Clara

2010

"Año 52 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

La justicia engrandece a las naciones. Mas el pecado es afrenta de los pueblos. Santa Biblia, Proverbios 14:34.

Solo la moralidad de los individuos conservará lo esplendido de las naciones. José Martí.

DEDICATORIA

A todos mis seres queridos y en especial, a mi sobrino Zephy.

•

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora MSc. Lesyani León Viltre por la constancia en su apoyo para ver acabado un trabajo de esta magnitud en un relativamente corto periodo de tiempo.

A Dr.Mathias Bollen por sus artículos, su ayuda y su consejo en estudiar los huecos de tensión.

A I.Margaris (National Technical University of Athens) por sus consejos en modelar la maquina DFIG.

A Dr. José Ángel Pepe por su perspicacia en el arte de la simulación.

Al Ing. Dieter Rojas Remis, especialista del grupo de energía eólica del INEL por sus muchos consejos y gran iniciativa en ayudar a que este trabajo se completara.

Al Ing. Yaidel Muñoz Acosta para su ayuda en la determinación del momento de inercia del rotor de la turbina G52-850.

Al colectivo de operadores e ingenieros del emplazamiento Gibara I, en especial al Ing. Leuber.

A toda mi familia, incluyéndole a la cubana por su gran apoyo durante mi estancia en Cuba.

TAREA TÉCNICA

Se propone modelar la maquina DFIG para su posterior empleo en investigaciones de perturbaciones en la red eléctrica. Esto incluye los sub-sistemas mecánicos que son el rotor y el tren de potencia. Además se propone modelar el sistema electrónico que incluye los lazos de control y los convertidores de electrónica de potencia.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo se propone el modelado del aerogenerador de turbina de velocidad variable con generador asincrónico doblemente alimentado (DFIG), característico del parque eólico Gibara 1 en Cuba. A pesar de que existen otros parques conectados a la red eléctrica en Cuba, hasta el momento es el parque de Gibara el de mayor potencia total instalada (5100 kW), así como el que mejores características técnicas. El generador de inducción doblemente alimentado tiene una serie de ventajas como son la posibilidad de realizar un control independiente de la potencia activa y reactiva actuando sobre la excitación del rotor. Con esta tecnología la capacidad nominal del convertidor de frecuencia es menor que la total de la máquina lo que representa una ventaja.

En el trabajo se presentan las ecuaciones que representan los modelos no solo de la maquina, sino también del convertidor, la turbina y algunas de fallas frecuentes en la red. De esta forma, utilizando el Simulink del Matlab, es presentan mediante simulaciones el comportamiento del DFIG ante distintas perturbaciones a las que puede ser sometido el sistema, con el fin de desarrollar los controladores adecuados.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	ivv
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	
Organización del informe	2
CAPÍTULO 1.CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS EÓLICOS	MODERNOS 3 - 20
1.1 Modelos electromecánicos de aerogeneradores	3 - 5
1.1.1 Tecnologías de los aerogeneradores actuales	5 - 9
1.1.2 Generador de inducción	9 - 10
1.1.3 Generador asincrónico doblemente alimentado	10 -11
1.2 Control de aereogeneradores	
1.2.1 Sistemas de velocidad fija	11 - 12
1.2.2 Sistemas de velocidad variable	12

1.3	VSC	Cs conectados como interfaz entre la red y sistemas renovables	13	- 17
1.	.3.1	Efectos de los huecos de tensión sobre los VSC	18	- 20

vii

CAPÍTULO 2. MODELO DEL SISTEMA BASADO EN LA MA	AQUINA DFIG
2.1 Modelado del viento	21
2.2.1 Modelado de la turbina	
2.2.2 Modelado del tren de potencia	
2.3 Obtención de las ecuaciones de la máquina	
2.4 Ecuaciones del convertidor	
2.5 El modelado de las fallas	

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE LOS MODELOS Error! Bookmark not defined.

3.1	Construcción de los modelos	Error! Bookmark not defined. 37 - 41
3.2	Resultados de las simulaciones	Error! Bookmark not defined.42 - 43
3.3	Respuesta del sistema ante fallas	
CONCL	USIONES Y RECOMENDACIONES	
Concl	usiones	
Recor	nendaciones	
REFERI	ENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

INTRODUCCIÓN

Diferentes análisis sobre la tendencia mundial del consumo de energía revelan un considerable aumento de las necesidades energéticas en los próximos años. En estos análisis también se muestra que el empleo masivo de las energías fósiles para abastecer estas necesidades plantea problemas a corto plazo, debidos a la contaminación del medio ambiente y por las limitaciones de estos recursos.

La utilización del viento para generar electricidad se puede considerar hoy en día como una tecnología madura; con niveles de crecimiento muy elevados a nivel mundial, fundamentalmente Europa, Norte América y China.

En Cuba existe la intensión de aprovechar este recurso renovable y ya se ha incorporado en el sistema eléctrico cubano como una de las fuentes de generación. Es cierto que la potencia instalada, menor de 10 MW, es poco significativa si se compara con la demanda actual del sistema, 2900 MW en los meses de invierno, sin embargo las perspectivas de crecimiento que existen son altas.

Como parte del desarrollo de las energías renovables en Cuba, se ha iniciado un programa eólico muy ambicioso con el que se pretende instalar una potencia considerable en el orden de los cientos de MW. De ello actualmente existen tres parques eólicos interconectados, dos al SEN, Turiguanó y Gibara y el otro, Los Canarreos, al micro sistema de la Isla de la Juventud.

El estudio de estos sistemas resulta de gran importancia para su desarrollo futuro en Cuba, por lo que el modelado del sistema DFIG, el de mayor capacidad instalada, resultará muy provechoso para el estudio de su comportamiento ante perturbaciones en la red eléctrica.

1

Teniendo en cuenta esto el *Objetivo* del trabajo es modelar el generador de inducción doblemente alimentado para simular su comportamiento ante diferentes perturbaciones.

Los objetivos específicos son:

- Estudiar el estado del arte sobre las tecnologías de aerogeneradores actuales, y su utilización en Cuba.
- Obtener las ecuaciones del modelo y sub-modelos del DFIG
- Implementación en Matlab de los modelos y analizar los resultados de las simulaciones.

Organización del informe

Para ello se ha estructurado el trabajo en tres capítulos; en el primero se hace una revisión sobre las principales características de los sistemas eólicos actuales.

En el segundo capítulo se representan las ecuaciones que describen el modelo de la maquina, así como también los diferentes sub-modelos que lo integran (modelo del viento, de la turbina, del tren de potencia, convertidor, entre otras)

Finalmente, en el capítulo 3 se presentan los resultados de la implementación del modelo en el Simulink \mathbb{R}^{TM} del Matlab \mathbb{R}^{TM} y el comportamiento del sistema ante diferentes perturbaciones.

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS EÓLICOS MODERNOS

Los aerogeneradores modernos son sistemas complejos integrados por varios subsistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos. Como es de suponer, el modelado de un sistema tal va acorde a las características investigadas y de ahí se distingue entre los modelos de estado estable y dos tipos de modelos dinámicos. Los modelos de estado estable son para investigaciones de flujo de carga y son de una complejidad mucho más reducida que los modelos dinámicos los cuales son destinados a utilizarse en investigaciones de la interacción dinámica entre el sistema eólico y la red eléctrica como es el caso de las investigaciones de la estabilidad transitoria de voltaje y el parpadeo (flicker). Por tanto los modelos dinámicos necesariamente reflejan un mayor nivel de detalles de todos los componentes del sistema que integran.

Cabe señalar que es importante representar el sistema con un nivel óptimo de detalles no solamente en función del objetivo de la investigación sino también en cuanto al tiempo de simulación requerida, donde lógicamente se procura que este último sea lo mínimo posible.

1.1 Modelos electromecánicos de aerogeneradores

El modelado realizado en este trabajo se considera como uno destinado a usarse en una investigación de estabilidad transitoria de voltaje. Como se dio a entender arriba, este modelo toma en cuenta varios aspectos de todos los componentes mostrados en la Figura 1.1 que permite una correcta representación del comportamiento dinámico del aerogenerador ante perturbaciones de la red. En [1] se precisa que en una investigación como esta, el tiempo total de duración del régimen dinámico de la red no debe exceder los 10s.



Figura 1.1.Estructura general del modelo del sistema eólico basado en la máquina DFIG.

Además, el sistema se someterá a un corto circuito trifásico, lo que representa el transitorio más violento que pueda experimentar [2] por no más de 100ms.

De forma concisa y global se establecen en [1] los siguientes requisitos que debe satisfacer un modelo dinámico de un aerogenerador.

- Deben predecir valores suficientemente correctos de potencias activas y reactivas y del perfil de voltaje.
- Deben predecir valores suficientemente correctos monitoreados por el sistema de protección, tanto de los parámetros eléctricos como los mecánicos. Estos incluyen voltaje, corriente, frecuencia, velocidad del generador y de la turbina y el torque mecánico.
- En el caso de aerogeneradores de velocidad variable con generadores controlados por convertidores (sistema DFIG y generador de imanes permanentes PMG), la representación del convertidor es crítica ya que las turbinas se desconectan cuando el convertidor se bloquea.
- Modelos a utilizarse para sitios aislados tendrán con un modelo adicional que desconecta al banco de capacitores de compensación, el generador, el convertidor y

que da la consigna para la parada total de la turbina. Es importante analizar la necesidad de incluir la función de parada de la turbina o deshabilitar el cálculo de los estados en caso de la parada de la turbina porque cuando se desconecta el sistema de la red eléctrica su torque electromagnético se hace cero mientras que el torque mecánico mantiene el valor dictado por la velocidad del viento en ese instante. Este desbalance en torques puede manifestarse como una inestabilidad numérica en la ecuación de movimiento del sistema y en última instancia hacer que se cuelga la simulación por un tiempo indefinido.

 Cuando se toman en cuenta los códigos de red para el acople de generadores eólicos, la complejidad de los modelos puede aumentar. De esta forma, el modelo de un aerogenerador asilado de velocidad variable debe contener una representación de la protección del convertidor que simula el bloqueo del convertidor y la desconexión del generador ante fallas en la red.

1.1.1 Tecnologia de los aerogeneradores actuales

A pesar de la proliferación de diferentes conceptos y novedades en los aerogeneradores modernos, sigue siendo los de mayor empleo las topologías siguientes:

- a) Turbina de paso fijo con generador de inducción de jaula y arrancador suave (concepto Danés).
- b) Turbina de paso variable con generador de inducción doblemente alimentado controlado por convertidores de fracción de la potencia nominal (sistema DFIG).
- c) Turbina de paso variable con generador síncrono (con excitación eléctrica o con imanes permanentes) y convertidor electrónico de plena potencia.

El primer tipo de turbina, también conocido como la del concepto Danés se muestra esquemáticamente en la Figura 1.1.1. Incorpora una caja de velocidad y una turbina de paso fijo que está diseñada para funcionar cercana a la velocidad nominal del viento, la cual al sobrepasarse provoca un flujo turbulento sobre las palas y de hecho este es el mecanismo de control de potencia que utilizan conocido como control por perdida de sustentación o *stall control*. Lógicamente, las posibilidades de control eléctrico de este tipo de sistema

eólico son mínimas y son más propensos a los efectos negativos sobre el sistema mecánico que generan las perturbaciones eléctricas de la red que se examinan en el capitulo siguiente.

En evento de huecos de tensión, la máquina de inducción de jaula consume elevadas cantidades de potencia reactiva de la red contribuyendo a la prolongación del evento transitorio en el PCC del parque, y también provocando la aceleración descontrolada de la turbina que se tiene lugar por el desbalance entre el torque electromagnético reducido (ocasionado por el hueco de tensión en la red) y el torque mecánico proveniente de la turbina que se mantiene en función de la velocidad del viento [3]. Además requiere de un banco de capacitores o sistema de compensación estática para su consumo de potencia reactiva.



Figura 1.1.1. Esquema de turbina basada en el concepto Danés.

El sistema basado en la máquina doblemente alimentada se muestra esquemáticamente en la Figura 1.1.2. A diferencia del sistema anterior, incorpora una turbina de paso variable y utiliza una maquina asincrónica con rotor bobinado conectado a la red a través de dos convertidores en configuración *back-to-back*[3-4]. El sistema de convertidores tiene una máxima capacidad de 30% de la potencia nominal de la máquina lo que define un ahorro económico importante en este sistema en cuanto al costo del convertidor. Teniendo en cuenta que las frecuencias eléctricas y mecánicas se desacoplan por los convertidores, se

hace posible una operación a velocidad variable. Esto significa que la velocidad del rotor se puede controlar según una función objetiva, como *máximo rendimiento de energía* o *mínima emisión acústica*. Invariablemente esta característica de velocidad variable se implementa para un máximo aprovechamiento energético. La velocidad del rotor se controla por cambiar la potencia del generador de tal manera que se iguala a un valor derivado de la función objetiva [3]. Por tanto el generador al variar su velocidad, seguirá la trayectoria que describe el valor máximo de potencia en la Figura 2.2.3.



Figura 1.1.2. Sistema eólico basado en la máquina doblemente alimentada.

En la Figura 1.1.3 se muestra el esquema del sistema basado en la máquina sincrónica que puede o no llevar una caja de velocidad. El generador puede ser de rotor bobinado o de imanes permanentes y el acople a la red eléctrica en cada caso es a través de un convertidor electrónico de plena potencia. El sistema convertidor puede consistir en dos convertidores en configuración back-to-back o un rectificador con un solo inversor. En cualquier caso, el sistema convertidor permite operación a velocidad variable por desacoplar las frecuencias eléctricas y mecánicas pero cabe señalar que independientemente de la topología del convertidor, este es de capacidad total del generador lo que implica un costo elevado en

comparación con el sistema DFIG. Igual que al sistema DFIG, la limitación de la potencia mecánica de la turbina es a través de la regulación del ángulo de pitch de la turbina [3].



Figura 1.1.3. Sistema eólico basado en la máquina sincrónica y convertidores electrónicos de plena potencia.

Generalmente las turbinas de paso variable, y en especifico el basado en la máquina DFIG, demuestran mejores características operacionales en cuanto a la calidad de energía producida, las posibilidades de control a la luz de las exigencias de los nuevos códigos de red y su comportamiento mecánico ante variaciones de velocidad del viento. Según [5] las ventajas de las turbinas de paso variable sobre las de velocidad constante son:

Son más rentables y proveen un sistema simple de control del ángulo de paso donde la velocidad de control del generador permite que las constantes de tiempo del control de ángulo de paso sean mayores reduciendo así la complejidad de este y su necesidades energéticas. A velocidades de viento debajo de la nominal el ángulo de paso es regulado para conseguir la máxima eficiencia aerodinámica del rotor y estos ángulos de pitch viendo siendo mínimos. Para velocidades superiores a la nominal, el ángulo de pitch es aumentado, tendiendo mas a la posición de bandera hasta llegar al pitch correspondiente a la velocidad de salida, para limitar la potencia extraída del viento a expensas de la eficiencia aerodinámica del rotor.

- Las turbinas de paso variable son más capaces de filtrar las excursiones del torque mecánico ocasionadas por las ráfagas del viento. Por tanto reducen los sobreesfuerzos mecánicos a los cuales el tren de potencia (eje de baja velocidad y la caja de velocidad) se ve sometido.
- Son capaces de compensar dinámicamente las pulsaciones de torque y de potencia ocasionadas por la llamada interacción rotor-torre que se debe a la interacción entre las turbulencias generadas por las palas del rotor y de la propia torre presión.
- Mejoran la calidad de energía por poseer inherentemente una mayor elasticidad en su sistema mecánico contribuyendo a reducción notable del parpadeo (flicker).
- La eficiencia total del sistema se mejora ya que es posible ajustar la velocidad de giro de la turbina en función de la velocidad del viento para operar a eficiencia máxima.
- Reducen las emisiones acústicas ya que es posible operar a bajas velocidades para una producción reducida.

En los rangos de mediana y de gran potencia, independientemente de la topología utilizada, estos sistemas viene siendo de rotor con tres palas ubicado a barlovento [3, 6]. Se ha favorecido al rotor de tres palas por poseer este mejores características estéticas y también de estabilidad mecánica [6].

De todas las posibilidades, el concepto basado en la máquina doblemente alimentada se ha demostrado ser superior tanto desde el punto de vista económico como técnico. El convertidor back-to-back utilizado necesita ser de una capacidad de solamente entre un 25-30% de la capacidad nominal del generador [4] y su operación a velocidad variable se traduce en última instancia a un mayor captura anual de energía del viento. Además, las características del concepto DFIG posibilita amplias estrategias de control de tal manera que estas plantas pueden participar activamente en el control de voltaje y de frecuencia como se especifica en los nuevos códigos de red de los países con alta penetración de energía eólica [7] y [8].

1.1.2 Generador de inducción

La elección de la máquina de inducción para el generador se debe a su sencillez y robustez mecánica, su bajo costo de mantenimiento y bajo costo inicial en comparación con la máquina sincrónica. Además, es menos propenso a perturbaciones bruscas en torque a diferencia de la máquina sincrónica. Su desventaja principal es que necesita una fuente externa de corriente de magnetización y por tanto es muy sensible a las perturbaciones de la red, principalmente el hueco de tensión o 'voltage dip'. El estator del generador se conecta directamente a la red y recibe la corriente de magnetización de ella. Para mejorar las condiciones de voltaje en el punto de acople y minimizar las pérdidas debido a su transporte, se instalan bancos de capacitores o unidades STATCOM para la generación local de la potencia reactiva requerida para la excitación del generador. La maquina funciona como generador cuando es movida a velocidades superiores a la correspondiente a la velocidad síncrona de la red eléctrica, en cual caso su deslizamiento es negativo.

1.1.3 Generador asíncrono doblemente alimentado

La máquina DFIG es una máquina de inducción de rotor bobinado con su circuito de rotor conectado a la red a través del sistema de convertidores de electrónica de potencia mientras que el estator es conectado directamente a la red. Su empleo en la generación eólica se considera como una aplicación natural del accionamiento Scherbius puesto que el rango de velocidad es restringido (correspondiente al rango comprendido entre la velocidad de entrada y la de salida)[4, 9].

Las siguientes relaciones estáticas son validas para la DFIG [10].

Como accionamiento Scherbius, se prevé la operación súper-sincrónica y sub-sincrónica de la DFIG tanto en modo generador como motor y [11] lo resume de la siguiente tabular. Tabla 1.1.3.1. Dirección de flujo de potencia activa para el modo motor y generador de la DFIG en operación súper y sub – síncrona.

		Motor	Generador
Sub-síncrono	P_s	Consume	Genera
$n < n_s$; $s > 0$	P_r	Genera	Consume
Súper- síncrono	P_s	Consume	Genera
$n > n_s$; $s < 0$	P_r	Consume	Genera

Además, en [11], se lleva a cabo un análisis detallado para demostrar que la corriente del rotor de la DFIG es una función de la velocidad y de la potencia reactiva del estator, y que el voltaje del rotor lleva una dependencia funcional más fuerte en la velocidad que en las potencias con la siguientes conclusiones importantes: *la corriente del rotor determina los valores máximos de potencias activas y reactivas del estator y la velocidad de la maquina se determina por el voltaje del rotor más que cualquier otro parámetro.*

1.2 Control de aerogeneradores

El tema del control de aerogeneradores es de gran importancia teniendo en cuenta las características de este tipo de generación en cuanto a la variabilidad del viento y su efecto sobre la calidad de la energía producida. Como se indico arriba cada uno de los tres conceptos mencionados arriba tiene previsto un mecanismo para controlar la potencia que generan, algunos más eficaces que otros.

1.2.1 Sistema de paso fijo

El sistema de paso fijo corresponde al sistema conocido como *concepto Danés*. Este sistema tiene un rotor diseñado para funcionar cercano a su valor de máxima eficiencia en

base de la velocidad nominal del viento en el sitio en que se instala. Por este motivo la turbina gira a una velocidad constante o casi constante. Al sobre pasarse la velocidad del viento por su umbral superior, el rotor empieza a funcionar con una eficiencia reducida producto al flujo turbulento inducido sobre su superficie. De esta manera la energía extraída del viento se limita y en última instancia el torque mecánico se reduce, efectivamente limitando la potencia aerodinámica de entrada al generador. Este ultimo suele a ser una maquina de inducción de jaula.

Desafortunadamente, este sistema es muy propenso a experimentar sobrecargas mecánicas en su tren de potencia y estas variaciones, a veces bruscas, se transmiten a la frecuencia eléctrica afectando así la calidad de la energía generada.

1.2.2 Sistema de paso variable

Se explico arriba que los sistemas basados en la maquina DFIG y la maquina síncrona utilizan el mismo concepto para limitar la potencia aerodinámica, o sea, una turbina de paso variable que se efectúa a través de la regulación del ángulo de pitch de la turbina en un lazo de control de velocidad actuando sobre la excitación del rotor de la maquina. A diferencia de la turbina de paso fijo que opera a velocidad constante, la turbina de paso variable opera a una razón de velocidad del punto de pala constante y esto implica un cambio en la velocidad de giro para diferentes condiciones de viento.

Entonces el lazo de regulación de velocidad de la maquina, actuando sobre el voltaje inyectado a una frecuencia y amplitud determinada en el rotor por el convertidor back-toback, se controla la velocidad de operación en rangos bastante amplios, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía del viento y definiendo así, su rentabilidad.

Este sistema de control se consigue a través del control desacoplado de potencias en la maquina que se hace posible por el mando vectorial de la maquina[12]. A diferencia de las turbinas de paso fijo, las de paso variable son de mayor complejidad pero quizás la energía adicional captada por la característica de velocidad variable y las mejoras en cuanto a los esfuerzos a que se somete el sistema mecánico justifica se elección sobre un sistema de paso fijo.

1.3 VSCs conectados como interfaz entre la red y sistemas renovables de energía.

Un VSC ('Voltage Source Converter') de dos niveles (Figura 1.3.1) conectado a una red eléctrica con tensión de línea de 2.3KVrms, el valor nominal de la tensión DC será aproximadamente: $3400V \approx 2.3KV \cdot 2$, lo que implica que se precisa un IGBT o IGCT de 6500V (máxima tensión de bloqueo en directo del dispositivo $\approx 1.5 .. 2.0 \cdot uDCbase$). Con los semiconductores actuales no es posible conectar un VSC de dos niveles a una red de mayor tensión de línea sin emplear transformadores. Siempre que sea posible se debe evitar el uso de transformadores, y por tanto se hace necesario recurrir a nuevas topologías que sean capaces de manejar mayores tensiones.



Figura 1.3.1.VSC de dos niveles conectado a la red eléctrica a través de un filtro L

Estas nuevas topologías son los convertidores multinivel y matriciales. Un ejemplo es el convertidor que se muestra en la Figura 1.3.2. Se trata de un VSC de tres niveles de diodos limitadores, también denominada NPC. Para esta topología, esta misma tensión se puede manejar con IGBTs o IGCTs de 3300V. A su vez, estos dispositivos son capaces de manejar mayores corrientes que un IGBT o IGCT de 6500V, lo que supone que el convertidor maneja mayores potencias sin necesidad de emplear transformadores.



Figura 1.3.2.VSC de tres niveles NPC conectado a la red eléctrica a través de un filtro LCL

Las aplicaciones de este tipo de convertidores son diversas, por ejemplo:

Industria: Excitación de motores, bombas, etc. que se pueden encontrar en cementeras, industrias de producción de papel, industrias petroquímicas, etc.

Transmisión y distribución de energía: parques eólicos, HVDC, STATCOMs, filtros activos, UPS de alta potencia, etc (Ap. C).

Tracción: Convertidores del lado de la red y convertidores del lado de la máquina.

Los VSCs trifásicos se pueden comportar como rectificadores (VSR 'Voltage Source Rectifier') o como inversores (VSI – 'Voltage Source Inverter') en función del sentido que tenga la transferencia de energía. Por tanto, se trata de una estructura completamente bidireccional. Cuando están conectados a la red eléctrica reciben el nombre de rectificadores PWM ('Pulse Width Modulation'), rectificadores activos, rectificadores 'boost', 'active front end', etc [13].

Esta estructura tiene numerosas ventajas frente a los rectificadores no controlados o controlados basados en diodos rectificadores o tiristores, respectivamente. Algunas de éstas son: menor rizado del DC-bus con condensadores menores, control del flujo de potencias activa y reactiva entre la red eléctrica y el convertidor, reducción de la distorsión armónica

de la corriente de la red eléctrica, desplazamiento del factor potencia (*DPF*) controlable, etc. El control del flujo de la potencia activa permite realizar funciones de regeneración, y por otro lado el control del flujo de la potencia reactiva permite fijar el desplazamiento del factor de potencia y si es necesario, dependiendo de la aplicación del VSC, compensar potencia reactiva. Debido a estas ventajas y al aumento en los requerimientos de reducción de armónicos de la corriente de línea, alta eficiencia, posibilidad de regeneración, etc., el uso de los rectificadores activos cada vez se está extendiendo más en aplicaciones de distribución y transmisión de energía eléctrica, de interfaz entre la red eléctrica y máquinas de corriente alterna de alta potencia, de interfaz entre la red eléctrica y sistemas de energía renovables, etc.

El VSC (Figura 1.3.3) trabaja como etapa interfaz con la red eléctrica, principalmente para obtener una baja distorsión armónica de la corriente AC (igr) y un desplazamiento de fase controlable en la tensión de salida del convertidor con respecto a la tensión de red (eg r). Desde el punto de vista del balance de potencia, esto significa que el armónico fundamental de las potencias activa y reactiva debería ser controlado y los otros armónicos de las potencias activa y reactiva deberían ser cero. Además el VSC usado como rectificador activo trabaja también como etapa interfaz con la carga DC. Así, el VSC debe ser controlado para tener una componente DC controlable de la tensión del DC-bus, uDC, y los otros armónicos cerca de cero, independientemente que la carga DC sea lineal, no lineal, pasiva o activa.



PCC: Punto común de conexión

Figura 1.3.3. VSC usado como rectificador activo

Convertidores multinivel aplicados a la energía eólica.

En los últimos años, la energía eólica es la tecnología de generación de energía eléctrica que más rápidamente está creciendo a nivel mundial, concretamente a una velocidad media anual de un 40%. Se trata de una energía renovable segura y limpia comparada con el combustible fósil o la energía nuclear, y además en la actualidad comienza a tener un coste competitivo comparado con las energías anteriormente comentadas.[13]

Actualmente, la mayoría de las turbinas eólicas, también denominadas aerogeneradores, son de velocidad variable debido a la capacidad de capturar energía en el punto óptimo con reducidas fluctuaciones de la potencia que se entrega a la red, menos estrés mecánico y menos ruido aerodinámico. Además incrementan la eficiencia en un rango de 3% a 28%, dependiendo de las condiciones y los parámetros de diseño, comparada con las turbinas de velocidad fija. El funcionamiento de la turbinas de velocidad variable es posible gracias a convertidores basados en Electrónica de Potencia, que actúan como interfaz entre las variaciones del viento y la red eléctrica cuyas características son constantes [13].

Para manejar estos rangos de potencia es recomendable el uso de convertidores multinivel. Concretamente, los más empleados son los VSCs multinivel de diodos limitadores como el que se muestra en la Figura 1.3.2 lo que reduce la corriente y las pérdidas del sistema para la misma potencia. Por tanto se reduce la posibilidad de fallos que es muy importante, especialmente en instalaciones 'offshore', donde el transporte resulta caro y muy difícil. Así, los convertidores multinivel son un elemento fundamental en las turbinas eólicas denominadas '*Multi-Megawatt*'.

Otra ventaja muy importante de emplear convertidores multinivel es la reducción del filtro de línea. Según se muestra en [13]puede llegar a ser de un 45%, lo que implica menor tamaño y coste.

1.3.1 VSCs conectados como interfaz entre la red y nuevos sistemas de generación

eléctrica.

El sector eléctrico mundial está experimentando una compleja reorganización, impulsada por tecnologías energéticas más limpias, eficientes y sostenibles. Como consecuencia, se está produciendo un importante cambio en la estructura tecnológica de la generación eléctrica, con fuertes incrementos tanto de la potencia instalada como de la producción mediante sistemas basados en gas natural y en energías renovables. Esta evolución permitirá a corto plazo diversificar el modo de generación, caminando hacia sistemas de generación distribuida.

Los problemas técnicos que deben superarse para la implantación de este modelo energético son importantes. De un lado debe dotarse a todos los puntos de generación, de convertidores de potencia, controlados electrónicamente, por ejemplo VSCs como los representados en la Figura 1.3.2., de modo que dispongan de la posibilidad de ajustar los parámetros básicos de la energía que entregan a la red. El inconveniente de emplear los VSCs como interfaz entre el sistema de generación y la red eléctrica es la sensibilidad de éstos ante perturbaciones de la red como armónicos, tensiones desbalanceadas, 'dips', etc. Por esta razón deben estar dotados de sistemas de protección rápidos y eficaces, capaces de cumplir y/o mejorar la normativa vigente para interconexión a red y actuación ante perturbaciones en la misma.

1.3.2. Efectos de los 'dips' sobre los VSCs conectados a la red eléctrica. Elementos de protección y de compensación.

Para un 'dip' de tensión, donde el módulo de la secuencia positiva de la tensión de red se reduce a V, la máxima potencia que se puede entregar a la red (Pg) está limitada por la máxima corriente que puede entregar el convertidor ($Pg \max =VI q\max x$). Si la potencia resultante es inferior a la potencia del generador (Pw) se produce un incremento de la tensión del DC-bus, a menos que esta energía se almacene o disipe en algún punto del sistema



Figura 1.3.4. Convertidor 'back-to-back' conectado a la línea de distribución

En el pasado, la práctica común ante un 'dip' o hueco de tensión era desconectar de la red eléctrica el VSC e incluso la máquina, de tal forma que el excedente transitorio de energía se trataba de disipar o almacenar en algún punto del sistema, freno disipativo, condensadores del DC bus, etc.

Sin embargo, en la actualidad, debido al aumento de los convertidores de potencia usados como interfaz es inaceptable la pérdida de estas unidades de generación cada vez que se produce un 'dip' en la red eléctrica. Por ejemplo, en el caso de no desconectar el sistema de la Figura 1.3.4 de la red eléctrica ante un hueco debido a un cortocircuito remoto se puede producir un exceso de energía que debe ser disipado o almacenado. El diseño de tales elementos de almacenamiento o de disipación, depende de factores como el coste,

especificaciones de la red eléctrica, el valor durante el 'dip' del módulo de la secuencia positiva de las tensiones de la red y la duración de éste. Dependiendo de estos factores, una o una combinación de las siguientes soluciones puede ser aplicada:

Almacenamiento de energía en el rotor. La potencia del generador se puede controlar para que Pw = Pg cambiando la referencia de par de la máquina. Si las especificaciones de la red indican que después del 'dip' de tensión se tiene que restaurar el valor de potencia 'predip' entonces no se debe cambiar las consignas de las palas debido al tiempo de respuesta de los elementos mecánicos.

Freno disipativo. El factor de limitación de esta solución es el calor generado por el resistor que disipa la energía, lo que puede ser un problema en el caso de 'dips' de elevada duración.

Almacenamiento de energía en el DC-bus. Esto es posible aumentando el valor de los condensadores del DC-bus, pero se incrementa de forma considerable el coste del sistema.

Sobre corriente. Consiste en diseñar el VSC para que la corriente por fase sea mayor que la nominal, de forma que *iq* > *Ibase*. En este caso, hay que analizar las limitaciones térmicas de la red eléctrica, especialmente si varios aerogeneradores son conectados al mismo PCC. La propuesta actual de algunos fabricantes de generadores eólicos consiste en conectar al lado de la máquina un *'active crowbar'* que ante un hueco en la red entra en funcionamiento y disipa el excedente de energía que genera la máquina eléctrica[9].

Los VSCs que se conectan a la red eléctrica pueden tener dos tipos de cargas conectadas al DC bus: activas o pasivas. En el caso de carga activa, por ejemplo, otro VSC conectado a un generador eléctrico como en la Figura 1.3.3, el VSC conectado a la red eléctrica puede trabajar como rectificador o como inversor. Si trabaja como rectificador es la red eléctrica la que entrega energía al convertidor, mientras que si trabaja como inversor (también se denomina modo regenerativo) es el convertidor el que entrega energía a la red eléctrica. En esta segunda situación, que fue analizada en párrafos anteriores, ante una caída de la tensión de red se puede producir un exceso de potencia activa entre la producida por el generador y la máxima potencia activa que es capaz de entregar el VSC a la red. La potencia excedente hay que disiparla o almacenarla.

Por otro lado, si la carga es pasiva y se trata de una resistencia, el VSC conectado a la red eléctrica sólo puede trabajar como rectificador PWM. Ante una caída de tensión de la red el objetivo es mantener constante la potencia activa que entrega la red eléctrica. Si esta compensación del 'dip' requiere una corriente superior a la máxima que pueden entregar los elementos del convertidor, entonces se reduce la consigna de potencia activa con el objetivo de que sea constante.

CAPÍTULO 2. MODELO DEL SISTEMA BASADA EN LA MÁQUINA DOBLEMENTE ALIMENTADA

Se presentan los modelos analíticos de las componentes del sistema eólico y su derivación. Se justifica el modelado requerido para esta investigación en cuanto al efecto sobre los resultados de las simulaciones presentadas en el siguiente capítulo teniendo en cuenta el tiempo de duración de los transitorios investigados. De esta manera el sistema a modelar se ve integrado por los siguientes sub-modelos:

- Modelo del viento
- Modelo de la turbina
- Modelo del tren de potencia
- Modelo del generador
- Modelo de los convertidores y sus sistemas de control
- Modelo de la red eléctrica
- Modelos de las fallas

2.1 Modelo del viento

El periodo promedio de variación de la velocidad del viento es mucho mayor que la duración total de los transitorios investigados y por tanto se puede considerar como constante [1].

2.2.1 Modelo de la turbina

La turbina eólica es una parte integral de un sistema de generación eólica pues se responsabiliza para interceptar el viento y convertir la energía cinética captada en un torque

mecánico que mueve al generador con la mayor eficiencia posible. Es un dispositivo cuyo funcionamiento esta en base de los principios de generar la fuerza de sustentación por perfiles aerodinámicos y la unidad G52-850kW está equipado con una turbina cuyas palas son conformadas por dos perfiles, el NACA 63XXX y FFA-W3.

Los principios de conservación dictan que será imposible extraer toda la energía del viento interceptado y la eficiencia con que una turbina de diseño específico lo hace depende del coeficiente de potencia, C_p . Este coeficiente tiene un calor máximo teórico de 0.593 y se conoce como el límite de Betz-Lancaster [6]. C_p es una función compleja de la distribución del flujo de aire sobre la superficie de las palas, y a su vez se relaciona con el ángulo de inclinación de la pala y la relación conocida como *razón de velocidad del punto de pala* y cuyo símbolo es λ . La función que describe el coeficiente de potencia es una superficie bicúbica y se muestra en la Figura 2.2.1.



Figura 2.2.1. Superficie bicúbica que representa al coeficiente de potencia C_p .

Según [14] y [15], C_p puede representarse empíricamente por:

$$\lambda = \frac{R_{tur}\omega_{tur}}{V_w}\dots\dots\dots(2.2.2)$$

De esta forma, la potencia que se extrae por la turbina del viento está dada por el coeficiente potencia, C_p la velocidad del viento, el radio del rotor y la densidad del aire en lo que es esencialmente una ley cubica:

El torque desarrollado se expresa como:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_{tur}}....(2.2.4).$$

La turbina del G52-850 es de paso variable lo que significa que es capaz de variar su ángulo de inclinación en función de la velocidad del viento para conseguir el máximo valor del coeficiente de potencia. En una turbina de paso variable este ajuste se realiza por el sistema de control para velocidades de viento por debajo de la nominal y se dice que el rotor funciona a máxima eficiencia. Al superar el umbral de velocidad nominal, el ángulo de inclinación se ajusta adquiriendo valores positivos cada vez mayores según aumenta la velocidad del viento, hasta llegar al valor máximo de pitch, correspondiendo a la velocidad de salida, cuando las palas se habrían puestas en la posición de *bandera*.



Figura 2.2.2. Característica de potencia extraída - velocidad del viento para turbinas con el pitch control.

En la mayoría de las investigaciones basta con representar el comportamiento mecánico de la turbina por las curvas C_p - λ - β como se muestra en la Figura 2.2.3 No obstante, en función de las especificaciones de los códigos de red, puede hacerse importante analizar el fenómeno conocido como el "*dynamic inflow phenomenon*" que da una correcta representación de los efectos oscilatorios, inducidos por turbulencia, en la construcción mecánica de la turbina y las excursiones de torque producidos en el árbol como se muestra en la Figura 2.2.4 [1], al trasladarse el punto de operación de un máximo a otro (del punto A al punto B por ejemplo) en las curvas de la Figura 2.2.3 a lo largo de la trayectoria roja que describe el estado óptimo de operación.



Figura 2.2.3. Seguimiento de ley óptimo del sistema de pitch control



Figura 2.2.4. Predicción de variación del torque mecánico durante el cambio del pitch.

2.2.2 Modelo del tren de potencia

El modelo del tren de potencia debe ser capaz de representar a las posibles oscilaciones torsionales en el eje de baja velocidad y como mínimo requiere del modelo de dos masas acopladas por un eje de rigidez finita [1] [16] [17] como se muestra en la Figura 2.3.1. Cambios bruscos en el estado de carga o del viento pueden ocasionar la sobre torsión transitoria del eje de baja velocidad que en última instancia puede repercutir negativamente sobre la caja de velocidad y los cojinetes de apoyo. Esto se debe a la gran inercia del sistema rotor en comparación con la inercia del generador.



Figura 2.2.1. Modelo de dos masas incorporando dos inercias y un acople elástico.

En [1, 16-17] se concluye que el modelo de dos masa con acoplamiento "blando" (rigidez finita) del tren de potencia arroja los siguientes ventajas sobre el modelo de parámetros concentrados:

- Predice correctamente las oscilaciones de voltaje, corriente de la máquina, potencias activas y reactivas y la velocidad de la turbina cuando el aerogenerador es sometido a una perturbación transitoria: la frecuencia de estas oscilaciones corresponde al primer modo natural de vibración del árbol de baja velocidad y suele a ser en el rango de 0.7 1.8Hz dependiendo de las propiedades y construcción mecánica del árbol.
- Predice un restablecimiento más lento del voltaje de la red después de que se haya limpiado la falla y además predice mayores demandas de compensación reactiva que el modelo de parámetros concentrados.

Utilizando un sistema CAD obtenemos el momento inercia del cubo del rotor respecto al eje longitudinal del mismo en base de los datos brindados por el fabricante.

$$J_{yy} = 7.91 * 10^7 Kg * mm^2$$
$$J_{yy} = 7.91 * 10^3 Kg * m^2$$

Utilizando la expresión para hallar el momento de inercia de un sistema discreto donde se considerará concentrada la masa de cada pala en su centro de gravedad.

$$J_T = J_{yy} + \sum r_{cg}^2 m$$

$$J_T = 7.91 * 10^3 Kg * m^2 + 3\left(\left(\frac{26.7m}{2}\right)^2 * 1900 Kg\right)$$

$$J_T = 7.91 * 10^3 Kg * m^2 + 3(178.2m^2 * 1900 Kg)$$

$$J_T = 7.91 * 10^3 Kg * m^2 + 1015.86 * 10^3 Kg * m^2$$

$$J_T = 1023.77 * 10^3 Kg * m^2$$

La inercia del generador según fabricante es $54Kg * m^2$

Se puede apreciar la diferencia enorme entre los dos valores de inercias y por tanto se justifica el empleo del modelo de dos masas.

Las ecuaciones que describen el modelo de dos masas del tren de potencia, referidas al lado del generador por la razón de multiplicación de la caja de velocidad, son las siguientes[18]:

$$T'_{tur} = J'_{tur} \frac{d\omega_{tur}}{dt} + D'_{eq} (\omega'_{tur} - \omega_{gen}) + K'_{eq} (\theta'_{tur} - \theta_{gen}) \dots \dots (2.3.1)$$
$$\omega_{tur} = \frac{d\theta'_{tur}}{dt} \dots \dots \dots \dots$$
$$-T_{gen} = J_{gen} \frac{d\omega_{gen}}{dt} + D_{eq} (\omega_{gen} - \omega'_{tur}) + K'_{eq} (\theta_{gen} - \theta'_{tur}) \dots \dots (2.3.2)$$
$$\omega_{gen} = \frac{d\theta_{gen}}{dt} \dots \dots \dots \dots (2.3.3)$$
$$\frac{1}{K'_{eq}} = \frac{1}{\left(\frac{K_{tur}}{G_{caja}^2}\right)} + \frac{1}{G_{caja}} \dots \dots \dots (2.3.4)$$
$$J'_{tur} = \frac{1}{G_{caja}^2} J_{tur} \dots \dots \dots (2.3.5)$$

2.3 Obtención de las ecuaciones y de la máquina

Relevancia del orden del modelo a utilizar.

El modelo de 1^{er} orden no considera transitorios ni en el estator ni en el rotor. El de 3^{er} orden considera a los transitorios asociados al estator solamente (y se utiliza en estudios de pequeña señal para la estabilidad como para estudiar el fenómeno de flicker) mientras que el modelo de 5^{to} orden toma en cuenta los transitorios tanto del rotor como del estator.

El modelo de 5^{to} orden incluye las características dinámicas de ancha banda y por tanto es imprescindible para el estudio del comportamiento de la interacción entre la maquina y los lazos de control de electrónica de potencia en régimen dinámica[19].

Aparece una estudio detallado de las transformaciones matemáticas aplicadas a las máquinas eléctricas y sistemas eléctricos en[20] y[10]. En [20] se explica que en el estudio de sistemas de potencia, se utilizan transformaciones matemáticas para desacoplar variables

y o facilitar la solución de ecuaciones diferenciales que contengan coeficientes dependientes del tiempo.

Según [9]el modelo dinámico de la máquina de inducción toma en cuenta los parámetros de acople variables en el tiempo debido a su variación en el espacio (coeficientes de acople entre el rotor y el estator). Por lo tanto el modelo se ve descrito por ecuaciones diferenciales con coeficientes dependientes del tiempo, los cuales son las inductancias variables.

Cuando se considera la maquina conectada a una fuente trifásica, se utiliza la teoría de representación en los ejes mutuamente desacoplados d - q, la cual permite eliminar los parámetros variables en el tiempo de la ecuaciones que describen al modelo. Luego esta teoría permite llevar a cabo el análisis de un sistema trifásico (*abc*) como si fuera un sistema bifásico equivalente (d - q). Es decir se lleva a cabo la siguiente transformación (*abc* $\rightarrow d - q$). Hay diferentes tipos de transformaciones que permiten llevar un sistema trifásico a uno bifásico equivalente (*abc* $\rightarrow d - q$) [10]. Estas son:

- Transformación de Park
- Transformación de Clark
- Transformación de Kron
- Transformación de Brereton
- Transformación de Krause-Thomas

En el modelado d - q de un sistema, es importante el concepto de *marco de referencia*. Un modelo d - q puede expresarse en varios marcos de referencia cada uno con su ventaja y desventaja. Así, un modelo d - q puede representarse en:

- Un marco de referencia estacionario
- Un marco de referencia rotatorio

El marco de referencia estacionario:

En este sistema de referencia, los ejes se representan como d^s - q^s , d^0 - q^0 o $\alpha\beta$ y está fijo en el estator.

El marco de referencia rotatorio:

Este marco puede estar girando a velocidad sincrónica ω_e , caso en el cual los ejes se llaman d^e - q^e o puede estar fijo en el rotor.



Figura 2.3.1. (a) Máquina trifásica de inducción con el efecto de acople mutuo entre estator y rotor, (b) máquina bifásica equivalente.

Se explica en [10] que bajo condiciones de desbalance es preferible modelar la máquina de inducción en el marco de referencia que gira a la velocidad del rotor. No obstante, se precisa en [9] que de interés especial es el modelo dinámico expresado en un marco de referencia sincrónico pues las variables sinusoidales en el marco d^s - q^s se manifiestan como cantidades de corriente continua en el marco d^e - q^e y además, se simplifica el estudio de la operación y control de los convertidores electrónicos [15, 21].

La transformación $(abc \rightarrow d^s - q^s)$ se realiza mediante las siguientes relaciones:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

La máquina de inducción en régimen dinámico se describe por las siguientes ecuaciones en el estator, en el marco d^s - q^s :

$$V_{qs}^{s} = R_{s}i_{qs}^{s} + \frac{d}{dt}\psi_{qs}^{s} \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2.4.1)$$
$$V_{ds}^{s} = R_{s}i_{ds}^{s} + \frac{d}{dt}\psi_{ds}^{s} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2.4.2)$$

A las ecuaciones (1) y (2) se las aplica las siguientes transformaciones para llevarlas al marco sincrónico:

Donde:

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad y \quad \omega_e = 2\pi 60 \ rad/sec$$

Las ecuaciones del estator en el marco sincrónico d^e - q^e son:

De manera semejante, el rotor se describe por las siguientes ecuaciones en el marco síncrono:

$$V_{qr}^{e} = R_{r}i_{qr}^{e} + \frac{d}{dt}\psi_{qr}^{e} + (\omega_{e} - \omega_{r})\psi_{dr} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (2.4.7)$$
$$V_{dr}^{e} = R_{r}i_{dr}^{e} + \frac{d}{dt}\psi_{dr}^{e} - (\omega_{e} - \omega_{r})\psi_{qr} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (2.4.8)$$

El marco de referencia fijo en el rotor se mueve a una velocidad de $(\omega_e - \omega_r)$ respecto al marco de referencia síncrono. En (2.4.7) y (2.4.8), si el rotor está estacionario, ω_r se hace cero.

El modelo en ejes desacoplados resultante de (2.4.5) - (2.4.6) y (2.4.7) - (2.4.8) se muestra a continuación.



Figura 2.3.2. Circuitos transitorios en ejes desacoplados (d - q).

Del modelo circuital de la Figura 2.4.2 las concatenaciones de flujo en términos de corriente son:

Ecuaciones (2.4.9) - (2.4.11) describen los flujos analizados en el eje q mientras que de la (2.4.12) - (2.4.14) se analiza el flujo en el eje d.

Cuando se combinan ecuaciones (2.4.9) - (2.4.14) con las ecuaciones de voltaje (2.4.5) - (2.4.8), surge el modelo transitorio de la máquina de inducción, el cual es un sistema de 4^{to} orden si se asume que la carga es de inercia infinita (ω_r = constante).

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \\ V_{dr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & \omega_e L_s & 0 & SL_m & \omega_e L_m & 0 \\ -\omega_e L_s & R_s + SL_s & 0 & -\omega_e L_m & SL_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + SL_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ SL_m & (\omega_e - \omega_r)L_m & 0 & R_{sr} + SL_r & (\omega_e - \omega_r)L_r & 0 \\ -(\omega_e - \omega_r)L_m & SL_m & 0 & -(\omega_e - \omega_r)L_r & R_{sr} + SL_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r + SL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{dr} \\ i_{or} \end{bmatrix}$$

A continuación se muestra la combinación de las ecuaciones para obtener el modelo transitorio de la maquina.

Sustituyendo para ψ_{qs}^e y ψ_{ds}^e en (3) da:

$$V_{qs}^{e} = R_{s}i_{qs}^{e} + \frac{d}{dt} [L_{ls}i_{qs} + L_{m}(i_{qs} + i_{qr})] + \omega_{e}[L_{ls}i_{ds} + L_{m}(i_{ds} + i_{dr})]$$

= $\left(R_{s} + \frac{d}{dt}L_{ls} + \frac{d}{dt}L_{m}\right)i_{qs} + (\omega_{e}L_{ls} + \omega_{e}L_{m})i_{ds} + \frac{d}{dt}L_{m}i_{qr} + \omega_{e}L_{m}i_{dr}$

En forma operacional,

$$V_{qs}^{e} = \left[(R_{s} + SL_{ls} + SL_{m}) \quad (\omega_{e}L_{ls} + \omega_{e}L_{m}) \quad SL_{m} \quad \omega_{e}L_{m} \right] \begin{bmatrix} l_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

Resultando en la ecuación de V_{as}^e

$$V_{qs}^{e} = \left[(R_{s} + SL_{s}) \quad \omega_{e}L_{s} \quad SL_{m} \quad \omega_{e}L_{m} \right] \begin{bmatrix} l_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

Donde: $L_{ls} + L_m = L_s$

De manera semejante se hacen las sustituciones para poder obtener la matriz que describe el modelo transitorio completo.

El torque electromagnético se expresa mediante:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})....(2.4.15)$$

Y la dinámica del rotor se expresa mediante la siguiente ecuación de movimiento:

$$T_e - T_m = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt}.$$
(2.4.16)

El modelo transitorio junto con la ecuación dinámica del rotor (relacionando el torque electromagnético con el torque mecánico y la aceleración del rotor) describe el modelo dinámico completo de 5^{to} orden.

2.4 Modelo de los convertidores

Los convertidores utilizados en el circuito del rotor de la máquina doblemente alimentada son puentes trifásicos con IGBTs operando a base de la modulación por ancho de pulso (PWM) y bajo control proporcional-integral (*PI*).

El convertidor de lado de red se encarga de mantener el voltaje en el enlace de corriente directa mientras que el convertidor de lado de máquina se responsabiliza para controlar la velocidad de la máquina[22]. El sistema de control de los convertidores manda una consigna para cambiar el ancho de pulso de una señal de referencia logrando así, el control

total de la magnitud y dirección de potencia intercambiada entre el circuito del rotor y la red eléctrica[23].

En [1] se concluye que para los modelos dinámicos de los aerogeneradores, es importante una adecuada representación de los convertidores para caracterizar correctamente a los transitorios que se producen en el rotor ante condiciones de falla en la red. Esto es importante para la determinación correcta del voltaje en el enlace de corriente directa entre los dos convertidores y también para el ordenamiento de la secuencia de operaciones que debe realizar el sistema de protección conocido como el *crowbar activo*.

Se reconoce que el modelo detallado del convertidor back-to-back es el basado en las funciones de conmutación [22-23] que es capaz de reflejar la dinámica de alta frecuencia que se tiene lugar producto a la elevada frecuencia de conmutación de los IGBTs.



Figura 2.4.1. Principio de operación de un VSC con control por PWM.

Cada una de las fases *abc* se caracteriza por dos funciones de conmutación: *FC1_a* y *FC2_a*, *FC1_b* y *FC2_b* y *FC1_c* y *FC2_c*. Utilizando las funciones de conmutación, *FC1_a,b,c*, los voltajes *Va0*, *Vb0* y *Vc0* se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

Mientras que los voltajes de línea se pueden derivar de la siguiente forma:

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} = \frac{\sqrt{3}V_d}{2} \sum_{1}^{\infty} A_n \sin n(\omega t + 30^\circ) \dots \dots (2.5.4)$$

$$V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} = \frac{\sqrt{3}V_d}{2} \sum_{1}^{\infty} A_n \sin n(\omega t - 90^\circ) \dots \dots (2.5.5)$$

$$V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} = \frac{\sqrt{3}V_d}{2} \sum_{1}^{\infty} A_n \sin n(\omega t + 150^\circ) \dots \dots (2.5.6)$$

Para determinar los voltajes de fase, se determina a V_{n0} primero como:

Luego, los voltajes de fase vienen dados por:

$$V_{an} = V_{a0} - V_{n0}$$
$$V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2.5.8)$$
$$V_{cn} = V_{c0} - V_{n0}$$

La razón de la amplitud de la señal de referencia (la senoidal en la Figura 2.5.1) a la amplitud de la señal portadora (la triangular en Figura 2.5.1) se conoce como el índice de modulación (M).

2.5 Modelado de las fallas

Un estudio detallado de las fallas se presentan en [24] y el modelado siguiente es a base de estos análisis.

• Falla trifásica simétrica

Una falla simétrica implica una igual reducción del voltaje *RMS* y posiblemente los saltos de ángulo de fase en cada una de las tres fases. Inmediatamente después del hueco simétrico, el fasor del voltaje de la red puede expresarse como

• Falla monofásico

Se supone las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero son iguales para simplificar la derivación del modelo. Después de una falla de este tipo, los voltajes de fase se pueden describir como:

Donde E_1 , $E_2 y E_3$ son los voltajes de fase de la red inmediatamente después del hueco, y $V y \phi$ son el voltaje residual y el salto del ángulo de fase en la primera fase, respectivamente.

• Falla bifásica a tierra

Los voltajes de la red pueden expresarse como se muestra a continuación, inmediatamente después de una falla bifásica a tierra.

• Falla bifásica

Considerando el peor caso de impedancia nula de los conductores, los voltajes de fase de la red se pueden determinar mediante:

$$E_{1} = \sqrt{2}E_{g,nom}\cos\left(\theta_{g} + \frac{\pi}{2}\right)$$
$$E_{2} = \sqrt{2}E_{g,nom}\cos\left(\theta_{g} + \frac{\pi}{2} - \pi\right)\dots\dots\dots\dots(2.6.4)$$
$$E_{3} = \sqrt{2}E_{g,nom}\cos\left(\theta_{g} + \frac{\pi}{2} - \pi\right)$$

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE LOS MODELOS

Se presenta el modelado del sistema en Simulink®TM con los resultados de las simulaciones.

Hay amplias posibilidades de modelar en el Simulink®TM a las ecuaciones presentadas en el capítulo anterior que describen los modelos. Principalmente los métodos son a través de bloques matemáticos simples, funciones de Matlab®TM y funciones de Simulink®TM. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desventajas principalmente en cuanto a la sencillez de representación, tiempo de simulación requerida y acceso a los diferentes niveles de los modelos. Las representaciones funcionales, Funciones-S y Funciones-M, son las más rápidas en cuanto al tiempo de ejecución pero es prácticamente imposible acceder a cualquier nivel del modelo y la programación es extensiva, todo esto a diferencia de la representación mediante bloques que si permite un acceso total.

Como se trata de sistemas altamente no lineales, es preciso tomar toda precaución para evitar el problema del "lazo algebraico" a la hora de construir los modelos ya que en muchos ellos, el cálculo de una variable tiene a la misma variable en su definición funcional. Esto se consigue a través de una correcta definición de los estados y variables independientes de los sistemas de ecuación y un ordenamiento correcto de las variables en los ficheros de inicialización de los modelos.

3.1 Construcción de los modelos

El modelo del generador doblemente alimentado se muestra en la Figura 3.1.1. Este modelo de 5to orden es una combinación de dos sub-modelos, o sea, la ecuación dinámica del rotor y el modelo transitorio de 4to orden.



Figura 3.1.1. Modelo del 5^{to} en Simulink de la DFIG.

A continuación en la Figura 3.1.2, se presenta el modelo de la turbina del G52-850. Este modelo es una combinación de dos representaciones del comportamiento aerodinámico del

rotor. Para velocidades comprendidas en el rango de $4 - 13 \text{ ms}^{-1}$, el fabricante proporciona una ley llamada "Optitip" que mantiene el rotor funcionando en la zona de máxima eficiencia aerodinámica. Entonces una lógica de conmutación sencilla detecta la transición de la velocidad del viento por encima del umbral superior de la ley Optitip y el modelo se conmuta para determinar el coeficiente de potencia C_p mediante una función empírica (véase el capítulo 2).







El siguiente modelo, Figura 3.1.3, es del tren de potencia representado por el modelo desarrollado en el capitulo anterior.





Figura 3.1.3. El modelo del tren de potencia.

Según el fabricante, el sistema se gobierna por un control *PI* el cual es montado en Simulink como muestra a continuación en la Figura 3.1.4. Este modelo utiliza la técnica del control vectorial con el eje q orientado mediante el sub-sistema PLL al voltaje del estator.



Figura 3.1.4. El sistema de control de los convertidores.



Figura 3.1.5. El modelo de la red eléctrica de Gibara.

El sistema de Gibara I se considera conectado al sistema a nivel de subtransmission.

3.2 Resultados de las simulaciones

3.2.1 Respuesta del modelo de la turbina a una rampa de viento

Al modelo de la turbina se le aplico una señal de rampa para simular un cambio de velocidad del viento. La Figura 3.2.1 a continuación muestra la respuesta del modelo de la turbina.



Figura 3.2.1. Respuesta del modelo de la turbina del G52 ante un estimulo rampa.

3.2.2 Respuesta del generador a condiciones de libre aceleración



Figura 3.2.2.1 Corrientes de la máquina DFIG al inicializarse según condiciones nominales.



Figura 3.2.2.2. La respuesta del torque electromagnético y velocidad del G52 al inicializarse.

3.2.3 Repuesta del sistema ante un hueco balanceado de tension



Figura 3.2.3.1. Hueco de tensión en la barra eólica del sistema eléctrico.



Figura 3.2.3.2. Respuesta del modelo eólico al hueco de tensión en la barra eólica.

.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

- 1 Mediante un estudio cuidadoso de los principios operacionales de un sistema eólico puede modelarse su comportamiento para diferentes objetivos, ya sea para el estudio de transitorios electromecánicos de diferentes rangos de tiempo o para un simple flujo de carga. En cualquier caso, Matlab cuenta con las herramientas necesarias para llevar a cabo dichas tareas
- 2 El modelo de 5to orden de la maquina DFIG junto con sus sub-sistemas adecuadamente modelados predice el comportamiento de estos sistemas en condiciones anormales, es decir, ante fallas en la de red con mayor precisión que los modelos de orden reducido.
- 3 La determinación del comportamiento correcto de los voltajes y corrientes transitorias permiterá un diseño óptimo de las leyes de control si se requiere proponer cambios a estas.

Recomendaciones.

- 1 Es importante determinar las potencialidades del sistema de Gibara I para participar en servicios de apoyo a la red, implementar su sistema de control según las condiciones actuales de operación del sistema atendiendo al estado de la configuración de sus sistemas de protección.
- 2 Explorar las posibilidades de mejoras en la respuesta ante fallas que arrojarían diferentes conceptos de control tal como el *control PI fraccionario*, el *control robusto* etc.

3 Para ganar en tiempo de simulacion, implementar los modelos en funciones S, sobre todo el modelo del convertidor electronico que alarga el tiempo de simulación porque cuenta con procesos dinámicos de ancha banda debido a su elevada frecuencia de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1. Akhmatov, V., Analysis of the Dynamic Behaviour of Power Systems With Large Amounts of Wind Power 2003, Thecnical University Of Denmark: Lingsby. p. 270.
- 2. John J. Grainger, W.D.S.J., *Análisis de Sistemas de Potencia*. 1996, Mexico: Mac Graw Hill. 731.
- 3. Ackerman, T., *Wind Power in Power Systems* 2005, Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 677.
- 4. R.Pena, J.C.C., G.M. Asher (1996) Doubly Fed Induction Generator Using Backto-Back PWM Converters and its Applications to Variable Speed Wind Energy Conversion.
- 5. S. MÜLLER, M.D., R I K W.DE DONCKER (2002) *DFIG Generator Systems for Wind Turbines*.
- 6. Tony Burton, D.S., Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. 2001, Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 609.
- 7. M. Tsili, C.P., S. Papathanassiou (2007) Grid Code Requirements for Large Wind Farms: A Review of Technical Regulations and Available Wind Turbine Technologies.
- 8. J. A. Fuentes, M.C., A. Molina, E. Gómez, F. Jiménez, *International Review of Grid Connection Requirements Related With Voltage Dips for Wind Farms*. 2006.
- 9. Bose, B.K., *Modern Power Electronics and AC Drives*. 2002, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. 691.
- Paul C. Krause, O.W., Scott D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. 2nd ed. Power Engineering, ed. M.E.E.-. Hawary. 2002, Piscataway, NJ: IEEE; Wiley-Interscience.
- 11. Joris Soens, K.d.B., Johan Driesen, Ronnie Belmans (2003) Doubly Fed Induction Machine: Operating Regions and Dynamic Simulation.
- 12. A. Dendouga, R.A., M. L. Bendaas, A. Chaiba (2007) *Decoupled Active and Reactive Power Control of a Doubly-Fed Induction Generator.*
- 13. MARIAN P. KAZMIERKOWSKI, R.K., FREDE BLAABJERG, *Control in Power Electronics*. 2002: Academic Press. 511.
- 14. A. Perdana, O.C., and J. Persson, *Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances*. 2004.
- 15. Joris Soens, J.D., R. Belmans (2003) A Comprehensive Model of a DFIG for Dynamic Simulations and Power System Studies.
- 16. Vladislav Akhmatov, H.K. (1999) Induction Generator Models in Dynamic Simulation Tools.
- 17. Akhmatov, V. (1999) Dynamic modelling of Windmills.

- 18. Florin Iov, A.D.H., Poul Sørensen, Frede Blaabjerg (2004) *Wind Turbine Blockset In Matlab/Simulink*. 108.
- 19. Zhixin Miao , L.F. (2008) The Art of Modeling And Simulation of Induction Generator in Wind Generation Applications Using High-Order Model.
- 20. Ong, C.-M., *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*. 1997, Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall PTR. 615.
- 21. Angel L. Trigo, S.J.C., José M. Maza (2005) *A Linear Time Model Of The Voltage* Source Converter for STATCOM Applications.
- 22. J. Morren, S.W.H.d.H., P. Bauer, J.T.G. Pierik, J. Bozelie (2001) Comparison of Complete and Reduced Order Models of DFIGs for Wind Power Applications.
- 23. P. S. Mayurappriyan, J.J., M. Ramkumar, K. Rajambal (2009) *Dynamic Modeling and Analysis of Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator.*
- 24. Petersson, A., *Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*. 2005, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.