

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL DE
AEROGENERADORES CON GENERADOR DE INDUCCIÓN
DOBLEMENTE ALIMENTADO
UTILIZANDO MATLAB**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

WILSON ANDRÉS VÁSQUEZ GUERRERO

wilson.vasquezg@hotmail.com

DIRECTOR: JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.

jjativa@yahho.com

Quito, marzo 2014

DECLARACIÓN

Yo, Wilson Andrés Vásquez Guerrero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

Wilson Andrés Vásquez Guerrero

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wilson Andrés Vásquez Guerrero, bajo mi supervisión.

Jesús Játiva Ibarra, Ph. D.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mi familia, por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida.

Agradezco de forma especial al Doctor Jesús Játiva, Director del Proyecto, por su amistad y ayuda para la culminación de este trabajo.

Agradezco además a Rommel Cruz, antiguo compañero de trabajo y amigo por sus sugerencias y criterios que sirvieron de aporte a este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres, Wilson y Fanny.

A mi hermana, Anita.

Wilson

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN	IX
PRESENTACIÓN.....	1
CAPÍTULO I	2
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.2 ALCANCE.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	3
1.4 CONCEPTOS SOBRE ENERGÍA EÓLICA.....	4
1.4.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA....	4
1.4.2 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y CONTROL	6
1.4.2.1 Aerogenerador de velocidad fija.....	6
1.4.2.2 Aerogenerador de velocidad variable con resistencia rotórica ajustable	6
1.4.2.3 Aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)	7
1.4.2.4 Aerogenerador de velocidad variable conectado a la red a través de un convertidor estático de frecuencia	8
1.4.3 REGIONES DE OPERACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE	9
1.4.4 PENETRACIÓN EÓLICA EN EL MUNDO	9
CAPÍTULO II	12
2 SISTEMA MECÁNICO Y DE CONTROL DE AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE	12
2.1 MODELO DEL VIENTO	12

2.2	MODELO DE LAS HÉLICES.....	16
2.2.1	LEY DE BETZ.....	17
2.2.2	APROXIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA A TRAVÉS DE UNA FUNCIÓN MATEMÁTICA.....	18
2.3	MODELO DEL ACOPLAMIENTO MECÁNICO.....	19
2.3.1	ANÁLISIS PREVIO.....	20
2.3.1.1	Momento de inercia.....	21
2.3.1.2	Coeficiente de rigidez torsional.....	21
2.3.1.3	Coeficiente de amortiguamiento.....	22
2.3.2	MODELO DE DOS MASAS.....	23
2.4	MODELO DEL CONTROL DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN.....	24
CAPÍTULO III.....		27
3	SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL DEL AEROGENERADOR CON DFIG.....	27
3.1	SISTEMA CON GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO.....	27
3.1.1	GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO....	28
3.1.1.1	Teoría de la máquina de inducción.....	28
3.1.1.1.1	Modos de operación.....	30
3.1.1.2	Análisis en estado estable.....	34
3.1.1.3	Flujo de potencia activa durante la operación en modos subsincrónico y supersincrónico.....	38
3.1.1.4	Límite del rango de velocidad del DFIG.....	39
3.1.1.5	Modelo dinámico de la máquina de inducción.....	41
3.1.1.5.1	Teoría sobre Marcos de Referencia.....	41
3.1.1.5.2	Ecuaciones de voltaje y torque en variables de máquina.....	44
3.1.1.5.3	Ecuaciones de voltaje y torque en variables del marco de referencia arbitrario.....	47
3.1.1.5.4	Sistema en por unidad.....	51
3.1.1.5.5	Ecuaciones para la simulación de la máquina de inducción en el marco de referencia arbitrario.....	52
3.1.2	CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FRECUENCIA.....	54

3.1.3	ENLACE DE VOLTAJE EN DC.....	57
3.1.4	FILTRO R-L	57
3.2	CONTROL DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FRECUENCIA.....	59
3.2.1	CONTROL EMPLEANDO MARCOS DE REFERENCIA	59
3.2.1.1	Marco de Referencia del Voltaje de la Red (MRVR)	59
3.2.1.2	Marco de Referencia del Flujo del Estator (MRFE)	60
3.2.2	CONTROL DEL CONVERTIDOR DEL LADO DEL ROTOR.....	60
3.2.2.1	ESTRATEGIA DE CONTROL PARA OPTIMIZAR EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL VIENTO.....	64
3.2.3	CONTROL DEL CONVERTIDOR CERCANO A LA RED ELÉCTRICA	66
3.3	INICIALIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL AEROGENERADOR CON DFIG	69
3.3.1	FLUJO DE POTENCIA DE LA RED ELÉCTRICA	70
3.3.2	CÁLCULO DE CONDICIONES EN ESTADO ESTABLE DEL DFIG71	
3.3.3	INICIALIZACIÓN DEL MODELO DE ACOPLAMIENTO MECÁNICO	72
3.3.4	INICIALIZACIÓN DEL MODELO AERODINÁMICO	73
	CAPÍTULO IV	75
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	75
4.1	VERIFICACIÓN DE LA INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA	75
4.2	DESEMPEÑO DEL SISTEMA BAJO VELOCIDADES DE VIENTO DETERMINÍSTICAS	78
4.3	DESEMPEÑO DEL SISTEMA BAJO VELOCIDADES DE VIENTO PROBABÍLISTICAS.....	84
4.4	COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTE FALLAS DE CORTOCIRCUITO 85	
	CAPÍTULO V	89
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1	CONCLUSIONES.....	89
5.2	RECOMENDACIONES.....	91
6	BIBLIOGRAFÍA	92

7 ANEXOS.....	95
ANEXO 1.....	95
ANEXO 2.....	98
ANEXO 3.....	100
ANEXO 4.....	101
ANEXO 5.....	103

RESUMEN

En este trabajo se presenta una modelación, la simulación y el control de un aerogenerador de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) conectado a una barra infinita a través de un transformador y una línea de transmisión.

Los modelos de los componentes aerodinámicos, mecánicos, eléctricos y de control del sistema son incorporados secuencialmente en un programa desarrollado en el software computacional Matlab para el análisis durante operación en estado estable y estado transitorio.

Se describe el proceso de inicialización de los componentes del sistema. Para resolver las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico del DFIG y de otros componentes del sistema se emplea el método Runge-Kutta de Cuarto Orden considerando un intervalo de análisis de 1 ms.

Los resultados obtenidos del comportamiento del aerogenerador con DFIG bajo velocidades de viento determinísticas y probabilísticas muestran que variaciones en la velocidad del viento provocan cambios en la potencia activa de generación, mientras que las estrategias de control del convertidor del lado del rotor se encargan de mantener la potencia reactiva constante. Por otra parte, las estrategias de control del convertidor cercano a la red eléctrica aseguran la operación del generador en estado estable con factor de potencia unitario y mantienen el voltaje del enlace en DC invariable. Cuando la velocidad del viento supera su valor nominal, el control del ángulo de inclinación cambia de modo pasivo a activo, limitando la velocidad del rotor y por ende la potencia activa inyectada a la red a sus valores nominales.

En estado transitorio, se observa la importancia de modelar el acoplamiento mecánico del aerogenerador como dos masas unidas a través de un eje flexible, a fin de amortiguar la desaceleración del generador durante la falla de cortocircuito a través de la variación del ángulo de inclinación.

PRESENTACIÓN

La simulación de aerogeneradores es fundamental para conocer su comportamiento e influencia en el sistema eléctrico de potencia del que forman parte. Para tal efecto, este trabajo se ha dividido en cinco capítulos que se detallan a continuación:

El Capítulo I comprende la introducción, objetivos, alcance, justificación y conceptos básicos concernientes a componentes de un aerogenerador, tipos de aerogeneradores, regiones de operación y penetración eólica en el mundo.

En el Capítulo II se describen los modelos matemáticos de los componentes aerodinámicos y mecánicos de un aerogenerador de velocidad variable: viento, hélices, acoplamiento mecánico y control del ángulo de inclinación.

En el Capítulo III se presenta la modelación del generador de inducción doblemente alimentado en estado estable y estado dinámico. También se describen la teoría del convertidor estático de frecuencia y las estrategias de control. Además, se detalla el proceso de inicialización de los componentes del sistema aerogenerador con DFIG y de la red eléctrica.

En el Capítulo IV se verifica la inicialización del sistema y se analiza el desempeño del sistema aerogenerador con DFIG ante cambios en la velocidad del viento y fallas de cortocircuito. Finalmente, se compara el modelo desarrollado en este estudio con el modelo básico de Matlab.

El Capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

La modelación y simulación de aerogeneradores han permitido analizar su comportamiento e influencia sobre el sistema eléctrico de potencia al cual están conectados, en especial cuando la penetración eólica es alta y está en riesgo la estabilidad del sistema.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos modelos matemáticos de los principales componentes de cada tipo de aerogenerador con el afán de conocer a fondo su funcionamiento, determinar sus limitaciones y obtener soluciones más cercanas a la realidad. En el presente estudio se adoptan modelos matemáticos para los componentes aerodinámicos, mecánicos, eléctricos y de control del aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), en conocimiento de que es el tipo de aerogenerador más utilizado en generación eólica a nivel mundial hasta la actualidad, por sus ventajas técnicas y económicas.

Estos modelos son incorporados en un programa realizado en el paquete computacional Matlab, para analizar el comportamiento del aerogenerador y su control en estado estable y transitorio, durante variaciones de viento y fallas de cortocircuito, mediante el trazado de las principales variables aerodinámicas, mecánicas y eléctricas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene como objetivo general realizar una modelación, la simulación y el control de un aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado mediante un programa desarrollado en el paquete computacional Matlab.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un modelo de los componentes aerodinámicos y mecánicos de un aerogenerador de velocidad variable: viento, hélices, acoplamiento mecánico y control del ángulo de inclinación.
- Implementar un modelo de los componentes eléctricos: generador de inducción doblemente alimentado, convertidor estático de frecuencia y control de aerogeneradores para operación en estado estable y estado transitorio.
- Comparar los resultados obtenidos con el modelo básico del software Simulink de Matlab.

1.2 ALCANCE

En el trabajo se implementa la modelación de los componentes aerodinámicos, mecánicos, eléctricos y de control del aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).

Se realiza un programa en el software computacional Matlab para la simulación del aerogenerador con DFIG empleando la modelación de sus componentes.

Se estudia el comportamiento del aerogenerador con DFIG durante operación en estado estable y estado transitorio ante cambios en la velocidad del viento y fallas de cortocircuito.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos de las simulaciones con el modelo básico del software Simulink de Matlab.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Debido a la creciente inclusión de centrales de energía eólica en el mundo en los últimos años y que los aerogeneradores con DFIG son ampliamente utilizados, se requiere estudiar un modelo de esta fuente alternativa de energía eléctrica para estudios eléctricos en estado estable y estado transitorio.

Mediante los resultados del estudio se puede observar su comportamiento en la entrega de potencia activa y potencia reactiva a la red, la relación entre la

producción de potencia activa y la velocidad del viento y los sistemas de control que permitan optimizar la entrega de potencia activa a diferentes velocidades del generador.

El desarrollo de un programa en Matlab permite disponer una herramienta propia para el estudio del comportamiento del aerogenerador con DFIG, cuyos resultados puedan ser comparados con el de otros programas que tengan modelos básicos en sus bibliotecas de software.

1.4 CONCEPTOS SOBRE ENERGÍA EÓLICA

1.4.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA

Un sistema de generación eólica tiene componentes aerodinámicos, mecánicos, eléctricos y de control que permiten el aprovechamiento de la energía cinética del viento para transformarla a energía mecánica y luego a energía eléctrica [1]. La Figura 1.1 muestra los principales componentes de los grupos antes mencionados.

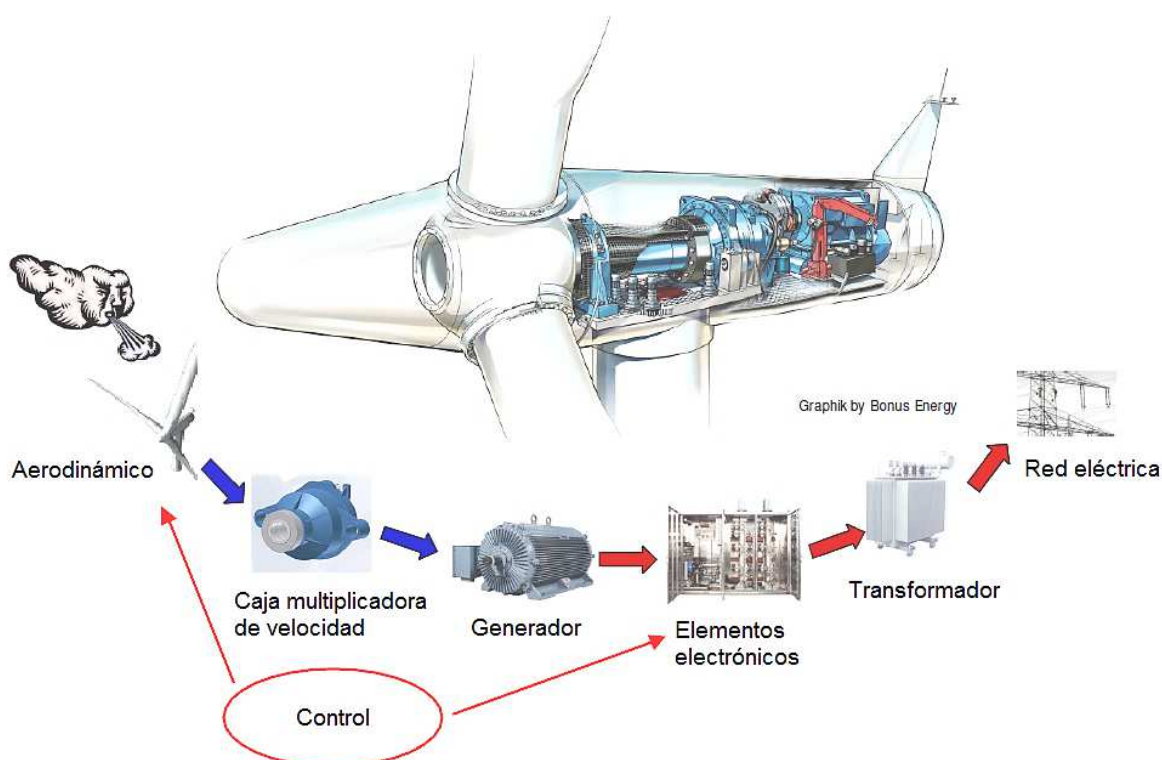


Figura 1.1 Principales componentes de un sistema de generación eólica [1]

Componentes aerodinámicos y mecánicos:

- Viento sobre las hélices
- Hélices
- Buje
- Góndola
- Torre
- Eje de baja velocidad
- Caja multiplicadora de velocidad
- Frenos de emergencia
- Servomotores

Componentes eléctricos:

- Tipos de generadores
 - ✓ Generador de inducción con rotor bobinado
 - ✓ Generador de inducción con rotor jaula de ardilla
 - ✓ Generador de inducción doblemente alimentado
 - ✓ Generador sincrónico de imanes permanentes
- Dispositivos electrónicos
 - ✓ Arrancador suave
 - ✓ Banco de capacitores
 - ✓ Convertidor estático de frecuencia
- Transformador
- Sistema de protecciones
- Red eléctrica

Sistema de control:

- Controlador del ángulo de inclinación de las hélices
- Controlador de giro de la góndola
- Controlador del convertidor estático de frecuencia

1.4.2 CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN Y CONTROL

Existen cuatro tipos de aerogeneradores que han predominado en el mundo [1], cuyas principales características de operación y control son explicadas a continuación.

1.4.2.1 Aerogenerador de velocidad fija

El aerogenerador de velocidad fija posee un generador de inducción con rotor jaula de ardilla acoplado a las hélices a través de una caja multiplicadora de velocidad. El aerogenerador de velocidad fija está conectado directamente a la red eléctrica, la misma que impone la frecuencia de generación. La potencia reactiva necesaria para mantener el campo magnético entre el estator y el rotor es proporcionada por un banco de capacitores o absorbida de la misma red eléctrica. La siguiente figura muestra el esquema de este aerogenerador:

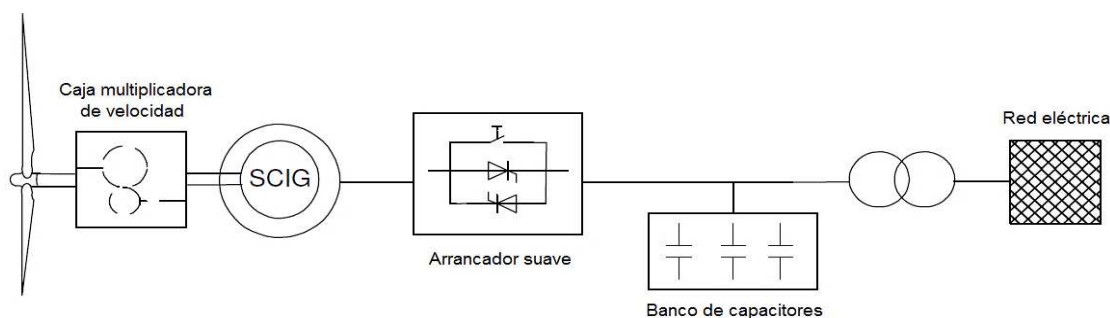


Figura 1.2 Aerogenerador de velocidad fija con generador de inducción con rotor jaula de ardilla [1]

Este tipo de aerogenerador es considerado de velocidad fija debido a que durante su operación el rango de variación del deslizamiento del generador es del 2 al 3%.

1.4.2.2 Aerogenerador de velocidad variable con resistencia rotórica ajustable

Este aerogenerador contiene los mismos componentes que el anterior, solo que ahora el rotor del generador de inducción es de tipo bobinado con una resistencia externa, como se aprecia en la Figura 1.3. El valor de dicha resistencia es controlada con equipos electrónicos para permitir que el rango de velocidad del generador se incremente hasta máximo un 10% por arriba de la velocidad sincrónica.

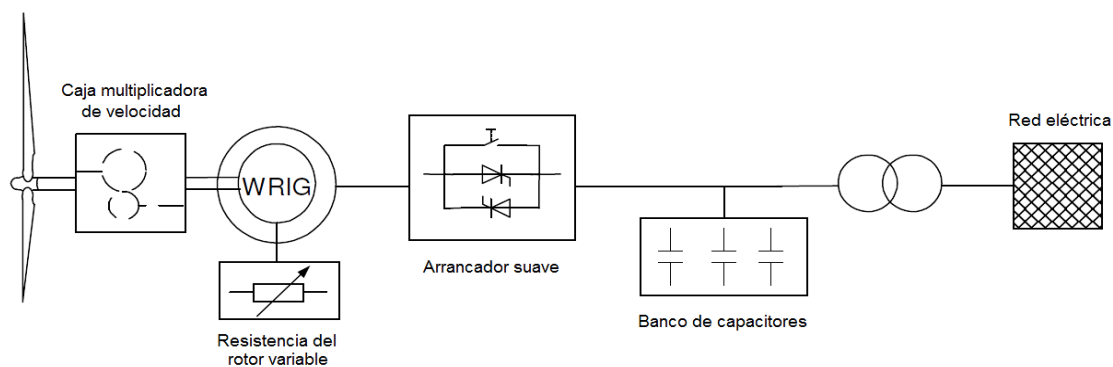


Figura 1.3 Aerogenerador de velocidad variable con generador de inducción rotor bobinado [1]

1.4.2.3 Aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)

Este aerogenerador está conectado directamente a la red eléctrica, puede operar a velocidad variable ya que posee un convertidor estático de frecuencia AC/DC/AC bidireccional, que suministra un voltaje de magnitud y frecuencia variable a los devanados trifásicos del rotor del generador de inducción, logrando ampliar así su rango de velocidad. En la Figura 1.4 se observa el esquema de este tipo de aerogenerador.

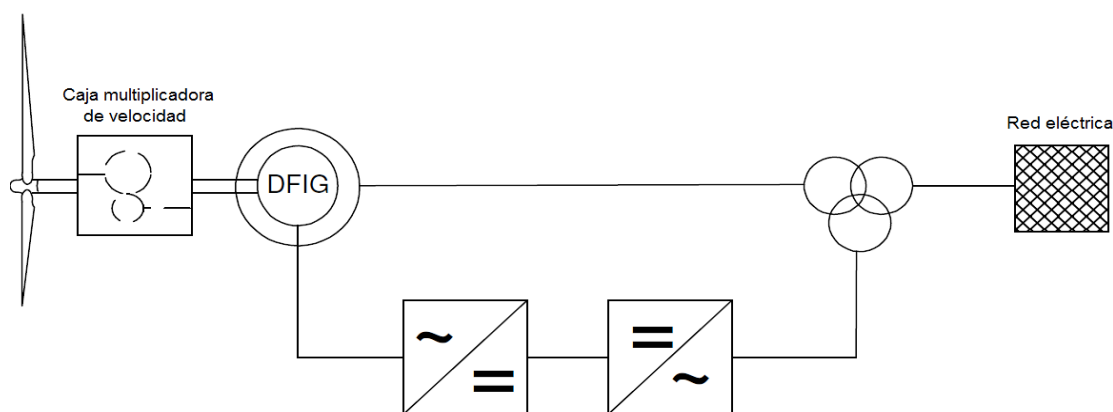


Figura 1.4 Aerogenerador con DFIG [1]

La capacidad del convertidor estático de frecuencia determina los límites de variación de la velocidad del rotor, aunque generalmente debido a aspectos económicos los convertidores usados para esta aplicación son diseñados con $1/3$ de la capacidad del generador [1], por lo que la velocidad del rotor puede variar aproximadamente $\pm 30\%$ respecto a la velocidad sincrónica.

1.4.2.4 Aerogenerador de velocidad variable conectado a la red a través de un convertidor estático de frecuencia

El generador puede ser de inducción con rotor jaula de ardilla o sincrónico, como se muestra en la Figura 1.5. Está acoplado a las hélices a través de una caja multiplicadora de velocidad y conectado a la red eléctrica por medio de un convertidor estático de frecuencia AC/DC/AC. Este último componente provee potencia reactiva, que para el caso en que el generador sea de inducción toma de la red eléctrica, además permite la operación a velocidad variable en ambos tipo de generadores. La capacidad del convertidor es la misma que la del generador, incrementándose su costo.

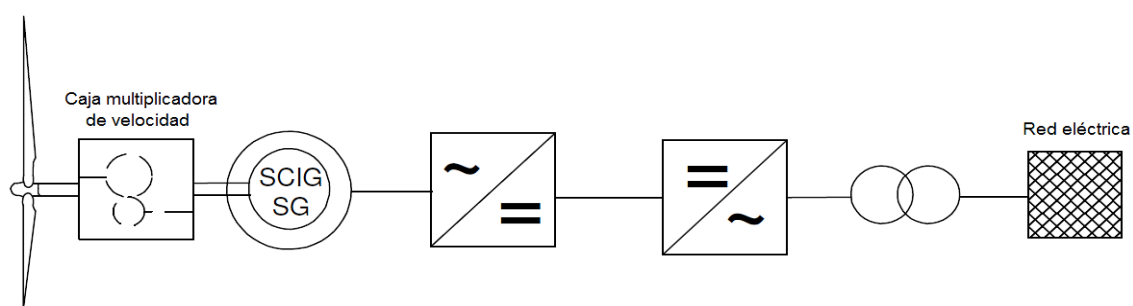


Figura 1.5 Aerogenerador de velocidad variable conectado a la red a través de un convertidor estático de frecuencia [1]

Si el generador es sincrónico multipolo se reduce la necesidad de la caja multiplicadora de velocidad. Para la creación del campo magnético en el rotor se puede utilizar imanes permanentes o una fuente de voltaje de corriente continua.

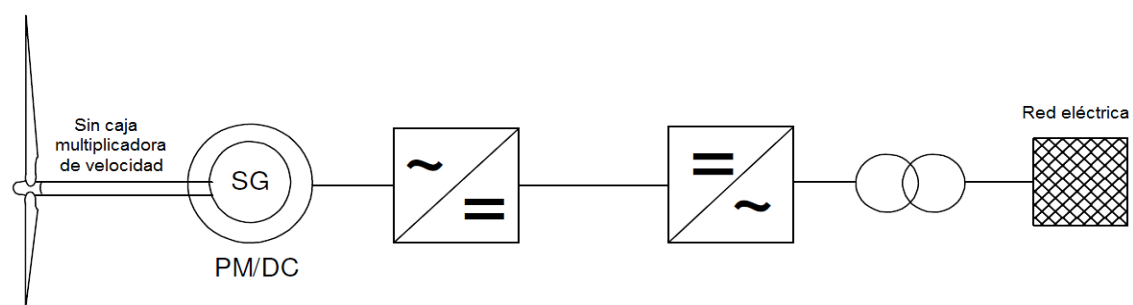


Figura 1.6 Aerogenerador de velocidad variable con generador sincrónico multipolo [1]

1.4.3 REGIONES DE OPERACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE

Las regiones de operación de un aerogenerador de velocidad variable con mecanismo de control de ángulo de inclinación se observan en la Figura 1.7.

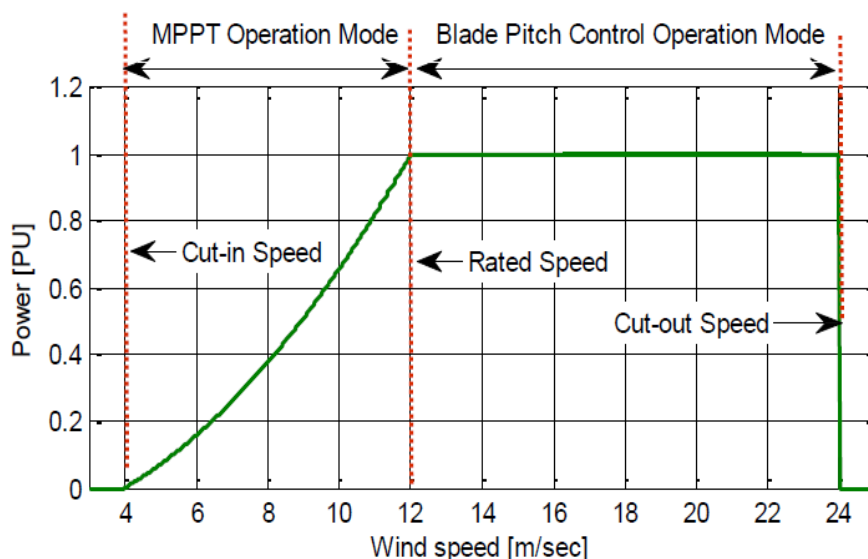


Figura 1.7 Curva de Potencia activa en función de la velocidad de viento de un aerogenerador de velocidad variable [2]

Las regiones de operación están determinadas de acuerdo a las siguientes velocidades del viento:

- Velocidad de viento mínima (Cut-in speed): Es la velocidad del viento a la cual el aerogenerador comienza a producir energía eléctrica.
- Velocidad de viento nominal (Rated speed): Es la velocidad del viento necesaria para que el aerogenerador opere a potencia nominal.
- Velocidad de viento máxima (Cut-out speed): Es la máxima velocidad del viento a la que el aerogenerador puede operar. Velocidades de viento más altas ponen en riesgo las partes mecánicas del aerogenerador, por lo que en estos casos se suele utilizar frenos para detener su operación.

1.4.4 PENETRACIÓN EÓLICA EN EL MUNDO

El viento es uno recursos renovables más abundantes en el mundo y la energía eólica es la mejor alternativa para la producción de energía eléctrica en el futuro,

debido a su bajo impacto al medio ambiente y al avanzado desarrollo tecnológico en los últimos años.

La Figura 1.8 muestra los países con centrales eólicas de mayor potencia instalada en el mundo hasta finales del año 2012.

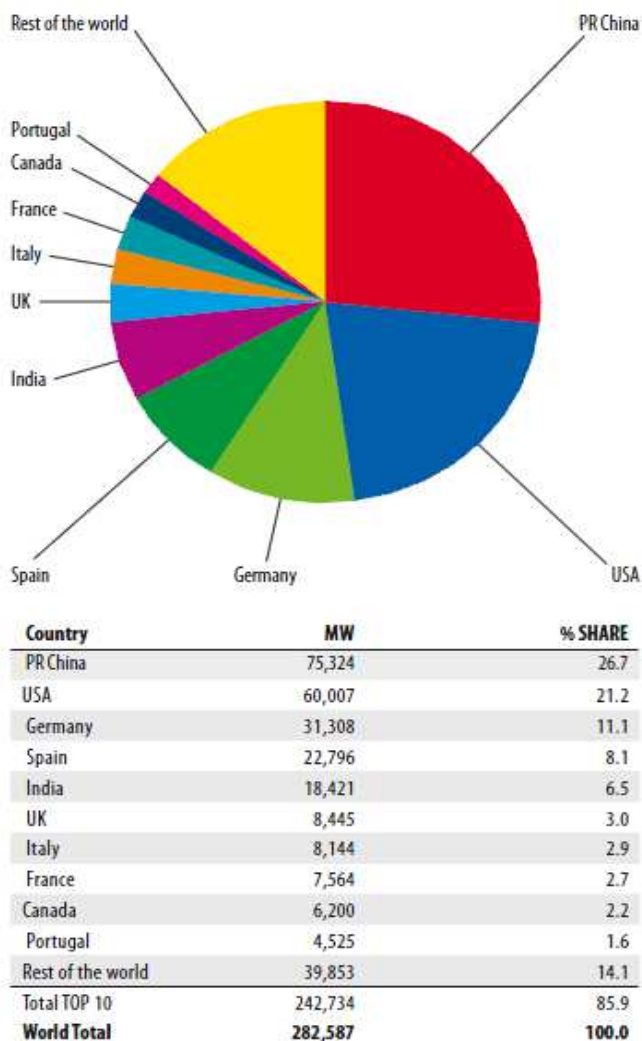


Figura 1.8 Potencia instalada acumulada hasta el año 2012 [3]

El aprovechamiento del recurso eólico en aguas poco profundas en los mares es una alternativa relativamente nueva y que ya ha sido implementado en algunos países como Inglaterra, Dinamarca, China, entre otros. En la Figura 1.9 se detallan los países con centrales eólicas instaladas en el mar en aguas poco profundas.

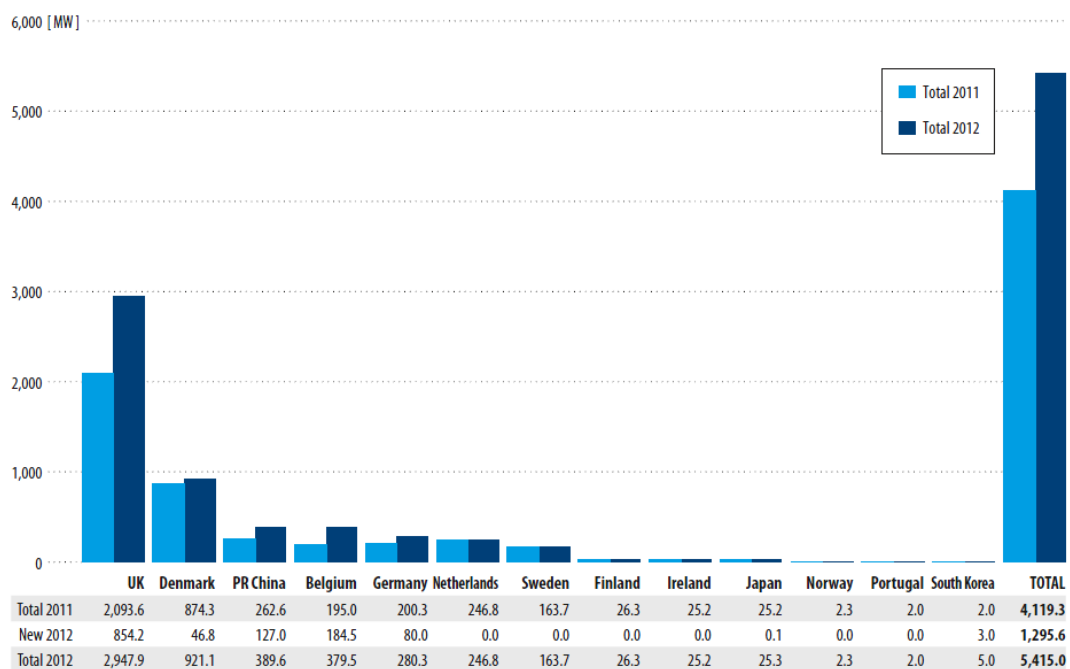


Figura 1.9 Potencia instalada acumulada de centrales eólicas en mares [3]

La ventaja a nivel del mar es que el viento es menos turbulento comparado con el existente en ciudades ubicadas a mayor altura, debido a la disminución en las variaciones de temperatura a diferentes altitudes de la atmósfera. En la actualidad, se han desarrollado aerogeneradores para centrales eólicas ubicadas en el mar con una potencia de hasta 8 MW, como se observa en la Figura 1.10. Los costos de este tipo de centrales son muy altos, aunque se espera que en el futuro disminuyan.



Figura 1.10 Aerogenerador marca Vestas de 8 MW y parque eólico en el mar

CAPÍTULO II

2 SISTEMA MECÁNICO Y DE CONTROL DE AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE

El aerogenerador de velocidad variable requiere para su simulación modelos matemáticos de los siguientes componentes: viento efectivo sobre las hélices, hélices, acoplamiento mecánico y control del ángulo de inclinación. Otros componentes como la torre, el buje, la góndola, etc, no serán considerados en el análisis por su muy poca relación con la red eléctrica [1].

2.1 MODELO DEL VIENTO

Desde el punto de vista macro meteorológico, el viento es el movimiento de masas de aire en la atmósfera originadas por diferencias de temperatura. Dichas diferencias de temperatura se producen debido a que el sol no calienta uniformemente el planeta Tierra.

En cualquier punto sobre la superficie terrestre, el viento es el resultado de la combinación de vientos geostróficos (vientos globales), que dependen de las condiciones macro-meteorológicas; y de los vientos locales, los mismo que varían según la localización geográfica del sitio, el clima, la altura, la rugosidad sobre la superficie de la tierra y los obstáculos en los alrededores [4].

La variabilidad del viento en el tiempo se clasifica en tres escalas [5]. La primera escala contempla las variaciones de viento de un año a otro e incluso décadas. La segunda escala abarca variaciones de viento en periodos de hasta un año, en donde es más fácil su predicción. Por último, la escala de tiempo más pequeña cubre variaciones de viento que van desde minutos a segundos, llamada turbulencia, la cual es de interés en este estudio.

Para caracterizar la componente longitudinal del viento, mostrada en la Figura 2.1, se emplea la distribución de la energía cinética del viento en el dominio de la

frecuencia, conocida como Espectro de Van Der Hoven mostrada, conforme se indica en la Figura 2.2.

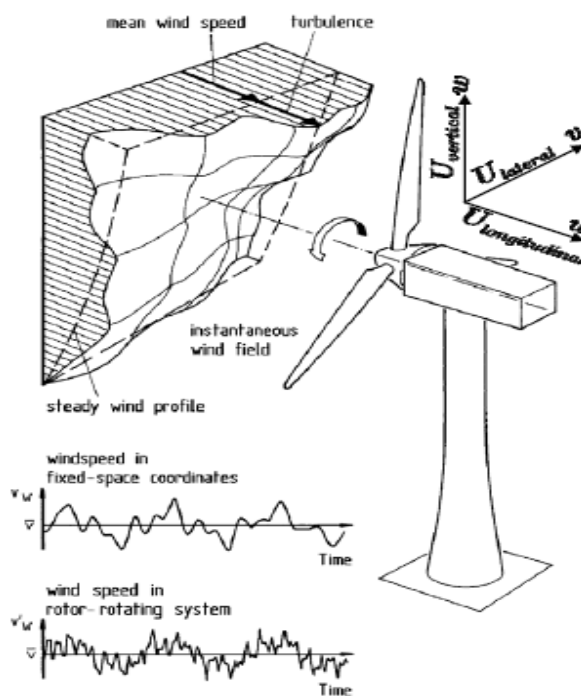


Figura 2.1 Componente longitudinal del viento [6]

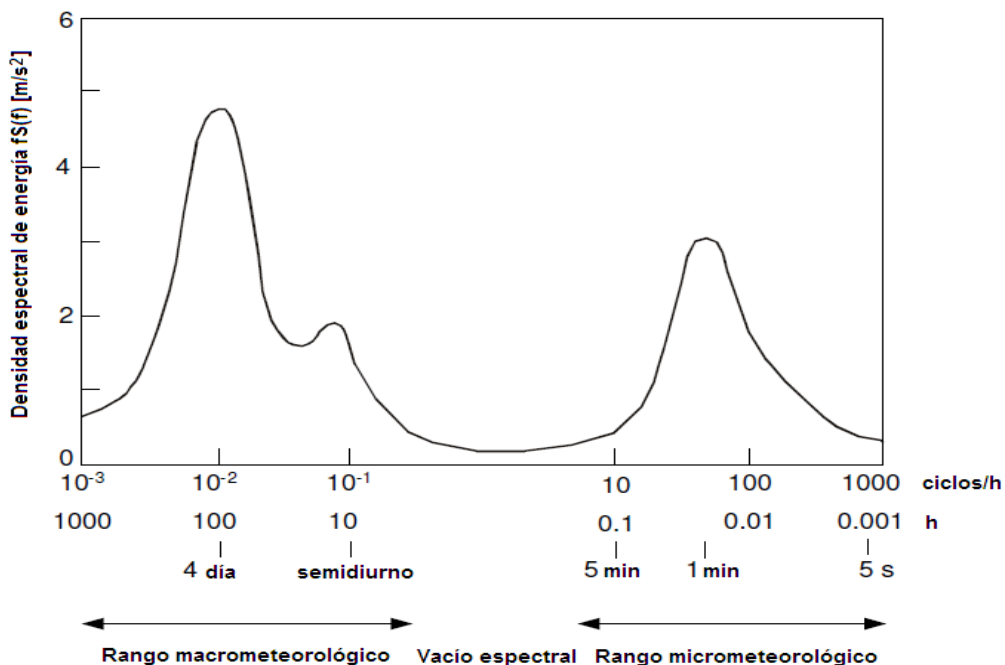


Figura 2.2 Espectro de la energía cinética del viento de Van Der Hoven [1]

En el presente trabajo se modela al viento como la suma de dos componentes: la velocidad media establecida por el viento geostrófico y la turbulencia relacionada

a las fluctuaciones irregulares del viento local [4]. La representación matemática de la turbulencia longitudinal se realiza mediante la función de densidad de energía de la turbulencia del viento $S(f)$, expresada matemáticamente con el modelo de Kaimal, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S(f) = \frac{\sigma^2 \cdot L_t}{2 \cdot v_m \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{L_t}{v_m} \cdot f\right)^{5/3}} \quad (2.1)$$

Donde:

f_t : Frecuencia de la turbulencia [Hz]

L_t : Longitud de la escala de la turbulencia [m]

σ^2 : Varianza

v_m : Velocidad media del viento a la altura del buje [m/s]

El valor de la longitud de la escala de la turbulencia L_t depende de la altura de la torre del aerogenerador. Para torres con alturas menores a 20 m, la longitud de escala es igual a:

$$L_t = 20 \cdot z \quad (2.2)$$

Siendo z la altura de la torre del aerogenerador en metros. Para torres cuya altura supera los 20 m, la longitud de escala de la turbulencia tiene un valor de 600 m.

Para simular las fluctuaciones del viento en el dominio del tiempo se emplea un generador de ruido blanco, seguido por un filtro que presente una densidad espectral de energía aproximada a la del modelo de Kaimal, representado por la función de transferencia $H_{Kaimal}(s)$ de la ecuación (2.3).

$$H_{Kaimal}(s) = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot L_t}{v_m} \cdot \frac{0,0182 \cdot c^2 \cdot s^2 + 1,3653 \cdot c \cdot s + 0,9846}{1,3463 \cdot c^2 \cdot s^2 + 3,7593 \cdot c \cdot s + 1}} \quad (2.3)$$

Donde:

$$c = \frac{4 \cdot L_t}{2 \cdot \pi \cdot v_m} \quad (2.4)$$

En un aerogenerador de tres hélices homogéneamente espaciadas, los componentes de la turbulencia que generan fluctuaciones en el torque de la turbina son los armónicos de tercer orden, con una frecuencia fundamental igual a la velocidad angular de la turbina [7]. El esquema de la velocidad equivalente del viento se presenta en la Figura 2.3.

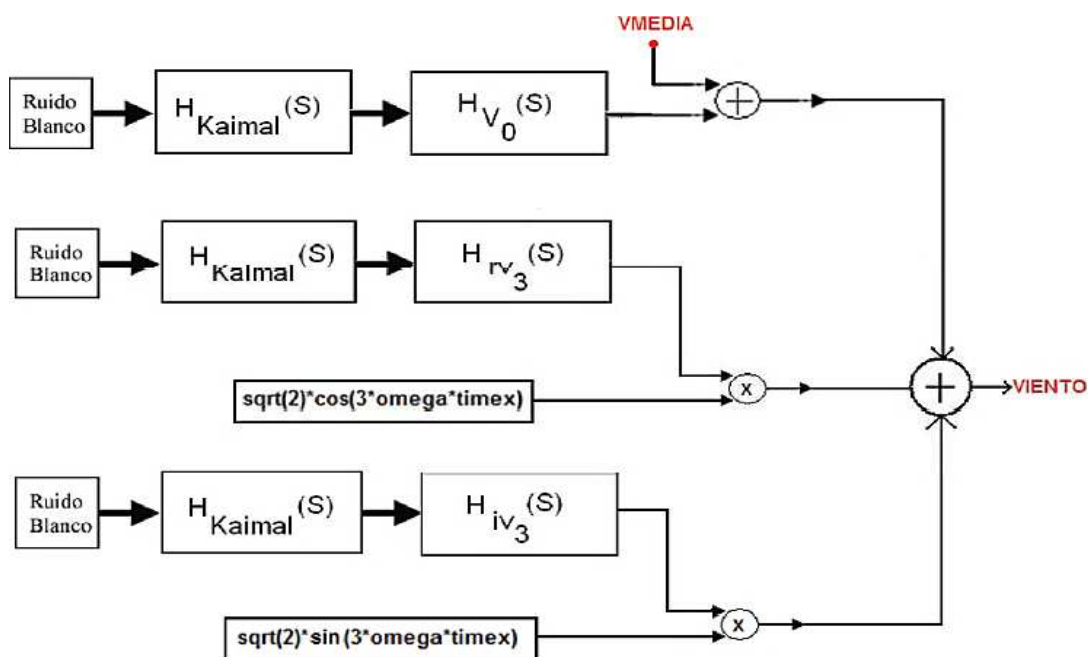


Figura 2.3 Esquema de la velocidad equivalente del viento [8]

La función H_{v0} se calcula aplicando la función de transferencia $H_{Kaimal}(s)$ como entrada a la siguiente expresión:

$$H_{v0}(s) = \frac{4,7869 \cdot d_{TF} \cdot s + 0,9904}{7,6823 \cdot d_{TF}^2 \cdot s^2 + 7,3518 \cdot d_{TF} \cdot s + 1} \quad (2.5)$$

Siendo:

$$d_{TF} = \frac{R}{v_m} \quad (2.6)$$

Donde R es el radio de las hélices en metros.

Las funciones H_{rv3} y H_{iv3} se obtienen aplicando la función de transferencia $H_{Kaimal}(s)$ como entrada a la siguiente expresión:

$$H_{rv3} = H_{iv3} = \frac{0,277 \cdot d_{TF} \cdot s + 0,0307}{0,369 \cdot d_{TF}^2 \cdot s^2 + 1,77 \cdot d_{TF} \cdot s + 1} \quad (2.7)$$

La velocidad equivalente del viento formulada en el dominio del tiempo se muestra a continuación [8]:

$$v_v(t) = v_{v,media} + V_0(t) + rV_3(t) \cdot \cos(3 \cdot \omega_t \cdot t) + iV_3(t) \cdot \sen(3 \cdot \omega_t \cdot t) \quad (2.8)$$

Para la modelación del viento se descomponen las funciones de transferencia detalladas anteriormente en fracciones parciales simples, luego aplicando la Transformada Inversa de Laplace se obtienen ecuaciones diferenciales de primer orden que son resueltas usando el método de Runge-Kutta de Cuarto Orden, explicado en el Anexo 2.

La Figura 2.4 muestra el esquema del modelo del viento, indicando las variables de entrada y salida.

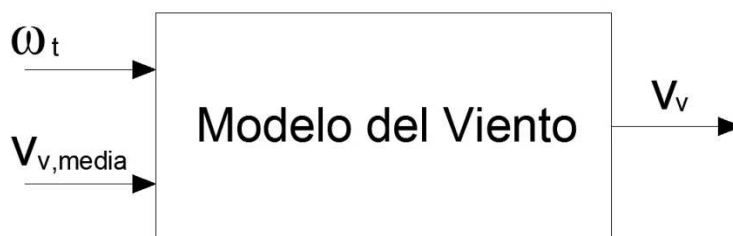


Figura 2.4 Esquema del modelo del viento

2.2 MODELO DE LAS HÉLICES

Las hélices son los componentes aerodinámicos que transforman la energía cinética proveniente del viento en energía mecánica, como se aprecia en la Figura 2.5. La energía del viento disponible está dada por la siguiente expresión:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_v^3 \cdot t \quad [J] \quad (2.9)$$

Siendo ρ densidad del aire en $[kg/m^3]$, A área de barrido de las hélices $[m^2]$, v_v velocidad del viento $[m/s]$ y t tiempo $[s]$.

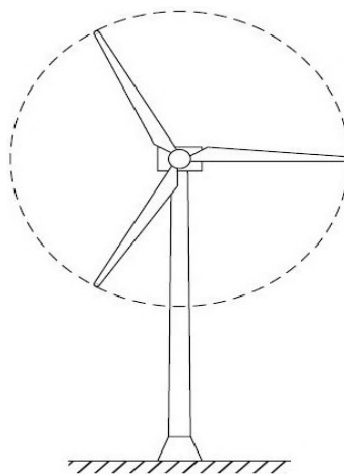


Figura 2.5 Aerogenerador de eje horizontal tripala [9]

2.2.1 LEY DE BETZ

Las hélices de un aerogenerador no son capaces de aprovechar toda la energía cinética del viento. La ley de Betz establece que máximo se puede transformar el 59,26% de la energía cinética del viento a energía mecánica útil, usando un aerogenerador cuya área de barrido forme un disco [10]. A este límite de aprovechamiento se lo conoce como Coeficiente de potencia y está definido como:

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} < 59,26\% \quad (2.10)$$

Donde P_t es la potencia mecánica de la turbina (hélices) y P_v es la potencia del viento.

La potencia mecánica de la turbina está determinada por la siguiente ecuación:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_v^3 \quad [W] \quad (2.11)$$

Siendo R el radio de las hélices $[m]$. La demostración de la Ley de Betz se desarrolla en el Anexo 1.

2.2.2 APROXIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA A TRAVÉS DE UNA FUNCIÓN MATEMÁTICA

El coeficiente de potencia C_p depende de los valores del ángulo de inclinación de las hélices β_i y de la velocidad específica λ . La velocidad específica se define como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la hélice v_t y la velocidad de viento v_v .

$$\lambda = \frac{v_t}{v_v} \quad (2.12)$$

La expresión matemática empleada para el cálculo aproximado de C_p [10] es la siguiente:

$$C_p = c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta_i - c_4 \right) \cdot e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \cdot \lambda \quad (2.13)$$

Siendo:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta_i} - \frac{0,035}{\beta_i^3 + 1} \quad (2.14)$$

$$\lambda = \frac{\omega_t \cdot R}{v_v} \quad [rad \text{ mec}] \quad (2.15)$$

Donde ω_t es la velocidad angular mecánica de la turbina en $[rad \text{ mec}/s]$ y los valores de las constantes c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 y c_6 son 0,5176; 116; 0,4; 5; 21 y 0,0068; respectivamente.

En la Figura 2.6 se muestra la variación del coeficiente de potencia C_p para distintos valores de λ y β_i . El coeficiente máximo de potencia $C_{p \text{ max}}$ calculado es 0,48 cuando la velocidad específica λ es 8,1.

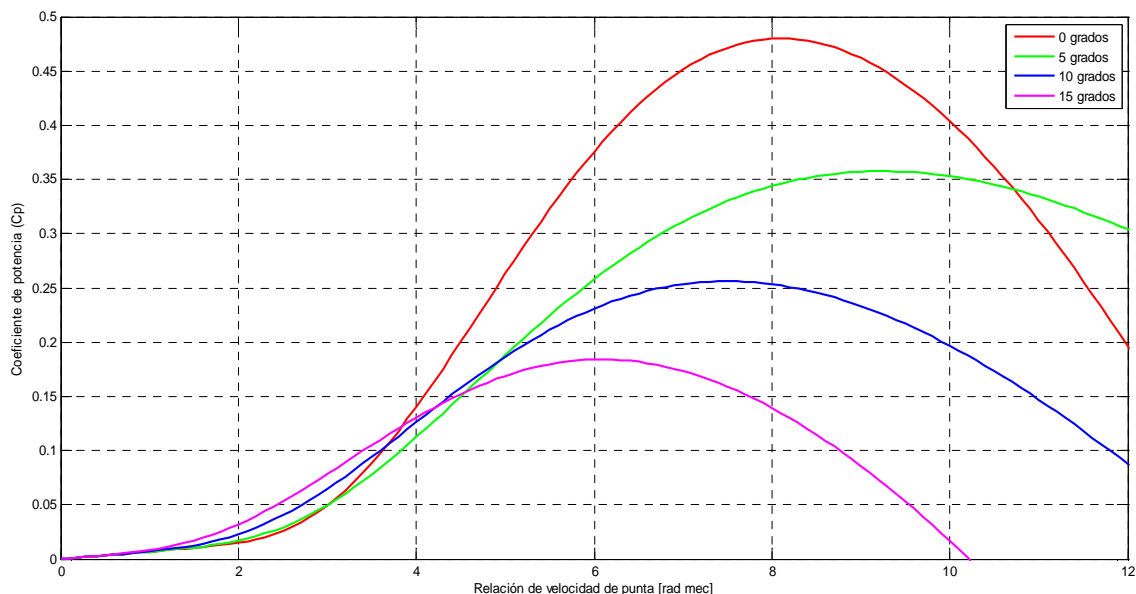


Figura 2.6 Coeficiente de potencia en función de la velocidad específica y el ángulo de inclinación de las hélices

El torque sobre la turbina está dado por las siguientes expresiones:

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad [N \cdot m] \quad (2.16)$$

$$T_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v_v^2}{\lambda} \quad [N \cdot m] \quad (2.17)$$

El esquema del modelo de las hélices con sus respectivas variables de entrada y salida se presenta en la Figura 2.7.

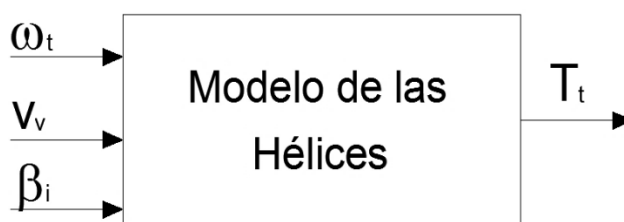


Figura 2.7 Esquema del modelo de las hélices

2.3 MODELO DEL ACOPLAMIENTO MECÁNICO

Las hélices de un aerogenerador de velocidad variable están acopladas a un eje de baja velocidad, transmitiéndole el torque provocado por el impacto del viento.

Para el acoplamiento mecánico entre el eje de baja velocidad y el eje del rotor del generador se emplea una caja multiplicadora de velocidad, la misma que se encarga de disminuir el torque y aumentar la velocidad de giro. En la Figura 2.8 se muestran los elementos del acoplamiento mecánico.

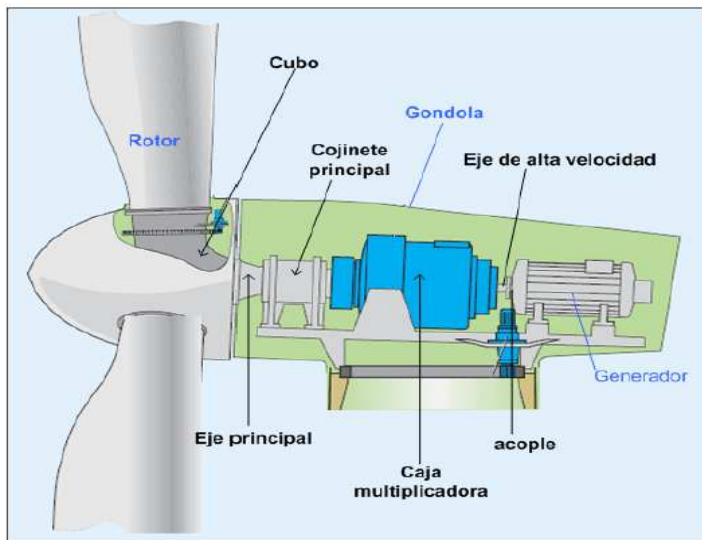


Figura 2.8 Elementos constitutivos del acoplamiento mecánico [10]

La caja multiplicadora de velocidad está constituida por una o varias parejas de engranajes de tipo epicicloidal o de ejes paralelos, como se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Tipos de engranajes utilizados en cajas multiplicadoras de velocidad [11]

2.3.1 ANÁLISIS PREVIO

El sistema mecánico de un aerogenerador de velocidad variable está definido por tres parámetros: momento de inercia J , coeficiente de rigidez torsional K y coeficiente de amortiguamiento D .

2.3.1.1 Momento de inercia

El momento de inercia de un cuerpo depende de cómo su masa está distribuida alrededor de un eje de rotación y generalmente viene dado en $[kg \cdot m^2]$. Las dos variables asociadas a la inercia son el torque neto T y la velocidad angular mecánica ω , relacionadas por la expresión (2.18).

$$T = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.18)$$

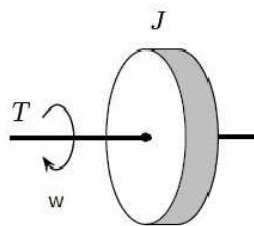


Figura 2.10 Momento de inercia

2.3.1.2 Coeficiente de rigidez torsional

Para el caso específico de aerogeneradores, el material con el que está construido el eje de baja velocidad no es totalmente rígido, dando lugar a lo que se conoce como coeficiente de rigidez torsional [10]. Cuando en uno de los extremos del eje se aplica un torque, el desplazamiento angular en ambos extremos no es el mismo, ocasionándose una deformación como se muestra en la figura 2.11.

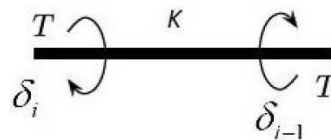


Figura 2.11 Coeficiente de rigidez torsional K [10]

El torque aplicado a una barra de área uniforme se expresa como:

$$T = K \cdot (\delta_i - \delta_{i-1}) \quad (2.19)$$

2.3.1.3 Coeficiente de amortiguamiento

Para transmitir el torque de la turbina a la caja multiplicadora de velocidad, durante el arranque, frenado, variaciones de la velocidad del viento y durante fallas de cortocircuito; el sistema de transmisión mecánica posee una junta de torsión y dos bridas metálicas como las mostradas en la Figura 2.12 que transmiten el torque del eje de baja velocidad a la caja multiplicadora.

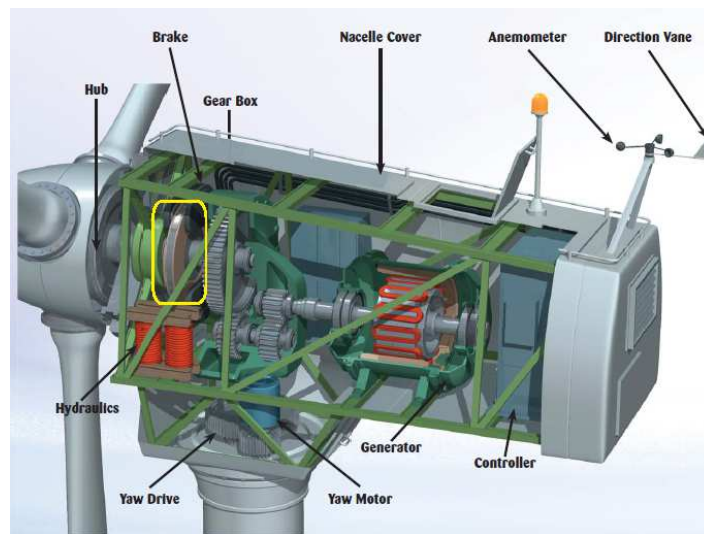


Figura 2.12 Junta de torsión y bridas del sistema de transmisión mecánica [12]

El coeficiente de amortiguamiento de estos componentes mecánicos depende principalmente del tipo de fuerza actuante, la temperatura y la histéresis del material [10].

Debido al giro de la turbina se produce un torque que se opone al movimiento y es proporcional al producto entre el coeficiente de amortiguamiento del material y la diferencia de las velocidades angulares en los extremos.

$$T = D \cdot (\omega_i - \omega_{i-1}) \quad (2.20)$$

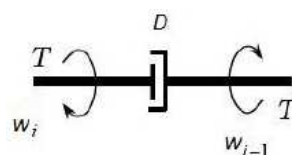


Figura 2.13 Coeficiente de amortiguamiento D [10]

2.3.2 MODELO DE DOS MASAS

Con el propósito de obtener respuestas más aproximadas del comportamiento del aerogenerador de velocidad variable durante variaciones de la velocidad del viento o eventos transitorios ocurridos en el sistema eléctrico de potencia del cual forma parte una central de generación eólica, se considera el modelo de dos masas cuyo esquema se observa en la Figura 2.14.

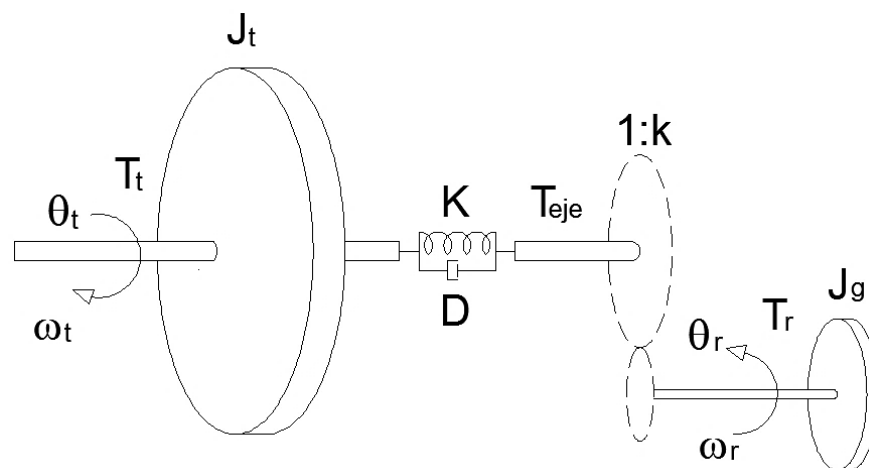


Figura 2.14 Esquema del modelo de dos masas

Este modelo considera a la inercia de la turbina J_t y a la inercia equivalente del generador J_g como dos masas conectadas a través de un eje flexible ubicado en el lado de baja velocidad, caracterizado por una rigidez K y un amortiguamiento D [1]. La caja multiplicadora de velocidad tiene una relación de cambio $1:k$, no se consideran pérdidas de potencia y se asume que el eje de alta velocidad es totalmente rígido.

El modelo de dos masas permite analizar el comportamiento de las partes mecánicas que interactúan con la red eléctrica y está compuesto por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \omega_t \quad [\text{rad/s}] \quad (2.21)$$

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_t - \frac{\omega_r}{k} \quad [\text{rad/s}] \quad (2.22)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{T_t - T_{eje}}{J_t} \quad [rad/s^2] \quad (2.23)$$

$$\theta_k = \theta_t - \frac{\theta_r}{k} \quad [rad] \quad (2.24)$$

$$T_{eje} = D \cdot \left(\omega_t - \frac{\omega_r}{k} \right) + K \cdot \theta_k \quad [N \cdot m] \quad (2.25)$$

$$T_r = \frac{T_{eje}}{k} \quad [N \cdot m] \quad (2.26)$$

Donde θ_t y θ_r son las posiciones angulares de la turbina y del rotor, respectivamente. Las variables de entrada y salida del modelo del acoplamiento mecánico se muestran en la Figura 2.15.



Figura 2.15 Esquema del modelo de acoplamiento mecánico

2.4 MODELO DEL CONTROL DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

Los aerogeneradores de velocidad variable poseen un sistema electromecánico compuesto por servomotores mostrado en la Figura 2.16, que ajustan el ángulo de inclinación de las hélices alrededor de su eje longitudinal.



Figura 2.16 Sistema electromecánico para el control del ángulo de las hélices [13]

Este mecanismo es activado cuando se requiere frenar aerodinámicamente el aerogenerador, en caso de una falla de cortocircuito y cuando la velocidad del viento sobrepasa su valor nominal. Para altas velocidades de viento el mecanismo de giro de las hélices permite regular tanto la velocidad del rotor como la potencia eléctrica entregada a la red, limitándolos a sus valores nominales. Operar en sobrecarga al aerogenerador es poner riesgo a sus componentes aerodinámicos, mecánicos y eléctricos.

La Figura 2.17 muestra el esquema del modelo del control del ángulo de inclinación de las hélices. Este modelo está constituido por un regulador de la velocidad del rotor ω_r , que a través de un controlador PI genera un ángulo de inclinación de referencia β_{ref} en grados mecánicos. La expresión que sirve para modelar el componente servo mecánico de inclinación del ángulo [14] está dada por la ecuación (2.27).

$$\frac{d\beta_i}{dt} = \frac{\beta_{ref} - \beta_i}{T_{servo}} \quad (2.27)$$

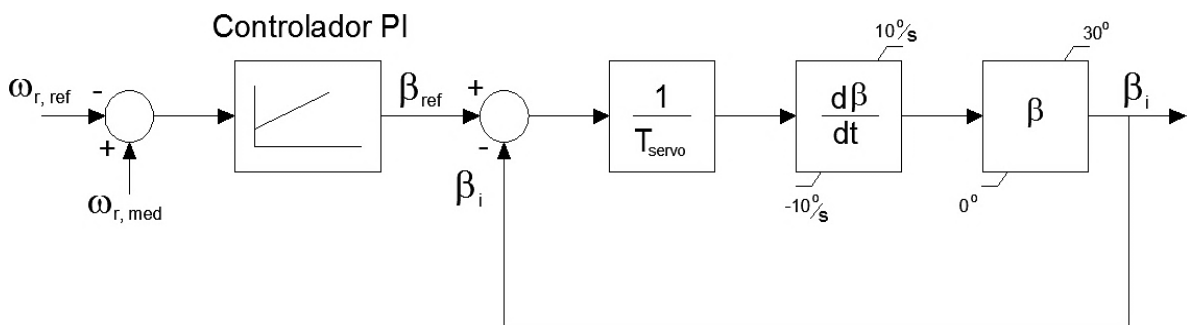


Figura 2.17 Modelo del control del ángulo de inclinación de las hélices

Si la velocidad del generador es mayor a su valor de referencia, el sistema de control incrementa el ángulo de inclinación β_i para disminuir el coeficiente de potencia C_p y de esta forma capturar menos potencia del viento. En este trabajo se considera una constante de tiempo servo mecánica T_{servo} de 0,1 s, una rapidez de cambio de $\pm 10^\circ/s$ y los valores mínimo y máximo del ángulo de inclinación son 0° y 30° , respectivamente. El bloque que sintetiza el modelo del control del ángulo de inclinación de las hélices se muestra en la Figura 2.18.

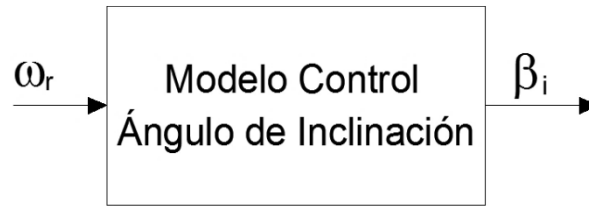


Figura 2.18 Esquema del modelo del control del ángulo de inclinación

Cuando el control del ángulo de inclinación está en modo pasivo se considera un ángulo de inclinación óptimo de 0° .

CAPÍTULO III

3 SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL DEL AEROGENERADOR CON DFIG

Las características principales del aerogenerador con generador de inducción doblemente alimentado es que puede operar a velocidad variable, y controlar la potencia activa y la potencia reactiva inyectada a la red eléctrica. Para ello, posee un convertidor estático de frecuencia cuya capacidad es una fracción de la capacidad del generador, permitiendo que el rango de velocidad del generador sea $\pm 30\%$ respecto a la velocidad sincrónica.

3.1 SISTEMA CON GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO

El esquema del aerogenerador con DFIG se muestra en la Figura 3.1. El estator del generador de inducción está conectado directamente a la red eléctrica, mientras que el rotor es alimentado a través de un convertidor estático de frecuencia AC/DC/AC con un voltaje de magnitud y frecuencia variable.

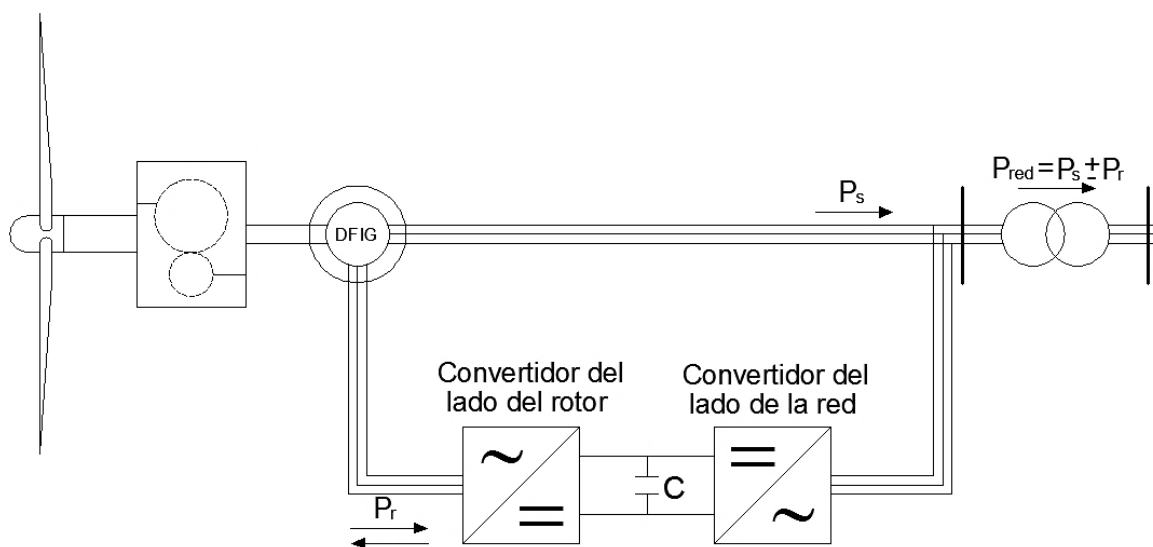


Figura 3.1 Esquema del aerogenerador con DFIG

La magnitud y el ángulo del voltaje del rotor establecen la operación en modo subsincrónico o supersincrónico del DFIG [1]. En modo supersincrónico el rotor entrega potencia activa a la red, mientras que en modo subsincrónico el rotor absorbe potencia activa de la red.

3.1.1 GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO

3.1.1.1 Teoría de la máquina de inducción

La máquina de inducción está constituida por un estator con devanados idénticos distribuidos y por un rotor tipo devanado o jaula de ardilla, separados por un entrehierro como se muestra en la Figura 3.2.

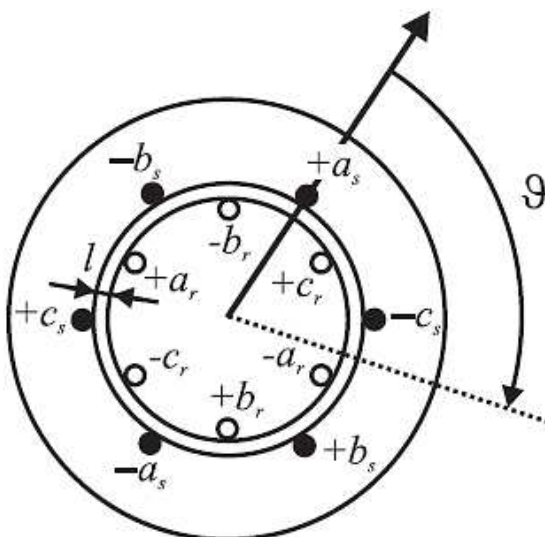


Figura 3.2 Distribución de los devanados del estator y del rotor de una máquina de inducción [2]

En la máquina de inducción, los terminales del estator están conectados a una fuente trifásica de voltaje mientras que los terminales del rotor están cortocircuitados. Si la máquina de inducción es utilizada como motor, los devanados del rotor son reemplazados por barras conductoras formando una estructura de jaula de ardilla.

Las corrientes que circulan en los devanados del estator producen un campo magnético giratorio en el entrehierro. Idealmente, la distribución del campo magnético en el entrehierro creada por el flujo de la corriente en un devanado es de forma cuadrada [2], como se observa en la Figura 3.3.

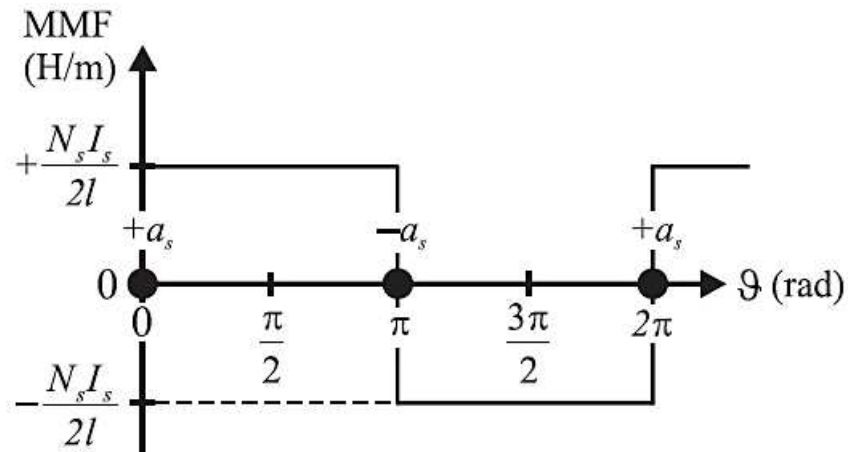


Figura 3.3 Distribución del campo magnético creado por el flujo de una corriente en DC I_s en los conductores del devanado de la fase a_s del estator [2]

El campo magnético giratorio creado por las corrientes del estator se muestra en la Figura 3.4.

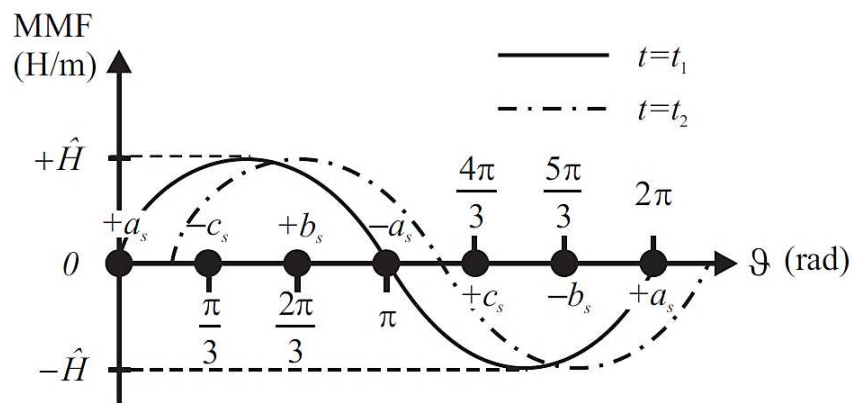


Figura 3.4 Campo magnético giratorio creado por el flujo de corrientes en los devanados del estator cuando es alimentado por una fuente de voltaje trifásica [2]

El campo magnético giratorio producido por las corrientes del estator gira a velocidad sincrónica ω_s . Dicha velocidad es determinada por el número de polos de la máquina y la frecuencia eléctrica de la red f_e . La expresión matemática de la velocidad sincrónica está dada por (3.2).

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_e \quad [\text{rad elec/s}] \quad (3.1)$$

$$\omega_s = \frac{2}{\text{polos}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_e \quad [\text{rad mec/s}] \quad (3.2)$$

La interacción electromagnética entre el estator y el rotor se da cuando la velocidad del campo magnético giratorio y la velocidad del rotor son diferentes, caso contrario no se originaría una inducción en los devanados del rotor. La velocidad con que el campo magnético giratorio corta los conductores del rotor se denomina deslizamiento y se determina por la expresión (3.3).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.3)$$

Donde ω_r es la velocidad angular del rotor en $[rad\ elec/s]$ o en $[rad\ mec/s]$.

3.1.1.1.1 Modos de operación

La máquina de inducción puede funcionar como: transformador, motor, freno electromagnético y generador [15].

a) Transformador

Cuando se alimenta al estator con un sistema trifásico de corrientes y el rotor se encuentra en reposo ($s = 1$) con sus devanados en circuito a abierto o cerrado, la máquina de inducción funciona como transformador. El campo magnético giratorio creado en el estator induce en el rotor una fuerza electromotriz E_r con la misma frecuencia de la red eléctrica.

b) Motor

El campo magnético giratorio originado en el estator induce una fuerza electromotriz (f.e.m) en los devanados del rotor que se encuentran cortocircuitados. Se origina un flujo magnético en el rotor debido a la circulación de corriente en sus devanados, que al interactuar con el flujo proveniente del estator generan un flujo resultante mostrado en la Figura 3.5. En los conductores del rotor se produce una fuerza resultante que da origen a un torque giratorio resultante sobre el eje, haciéndolo girar a una velocidad angular ω_r comprendida en el siguiente rango:

$$0 < \omega_r < \omega_s$$

En función del deslizamiento se tiene:

$$0 < s < 1$$

c) Freno electromagnético

Bajo las mismas condiciones anteriores y si por algún medio motriz externo se hace girar al rotor en sentido contrario al campo magnético giratorio, se produce el funcionamiento llamado freno electromagnético. En este modo de operación teóricamente la velocidad del rotor está entre:

$$-\infty < \omega_r < 0$$

Y su deslizamiento entre:

$$1 < s < \infty$$

d) Generador

La máquina de inducción funciona como generador cuando a través de algún medio motriz externo se hace girar al rotor con una velocidad mayor a la velocidad del campo magnético giratorio del estator, provocando que el deslizamiento sea negativo y que el sentido del flujo magnético resultante sea opuesto al sentido de giro del rotor, como se muestra en la Figura 3.5. Los sentidos de los voltajes y corrientes inducidas, además del torque giratorio sobre los conductores del rotor cambian. Esto significa que, en lugar de un par motor ahora se tendrá un par resistente, opuesto al par de la máquina motriz que mantiene a la velocidad del rotor por encima de la velocidad sincrónica. Bajo estas condiciones, la máquina de inducción en lugar de absorber energía eléctrica de la red, entrega la energía proveniente del par resistente o de frenado. Las condiciones en función de la velocidad del rotor y de deslizamiento para el funcionamiento como generador son las siguientes:

$$\omega_s < \omega_r < \infty$$

$$-\infty < s < 0$$

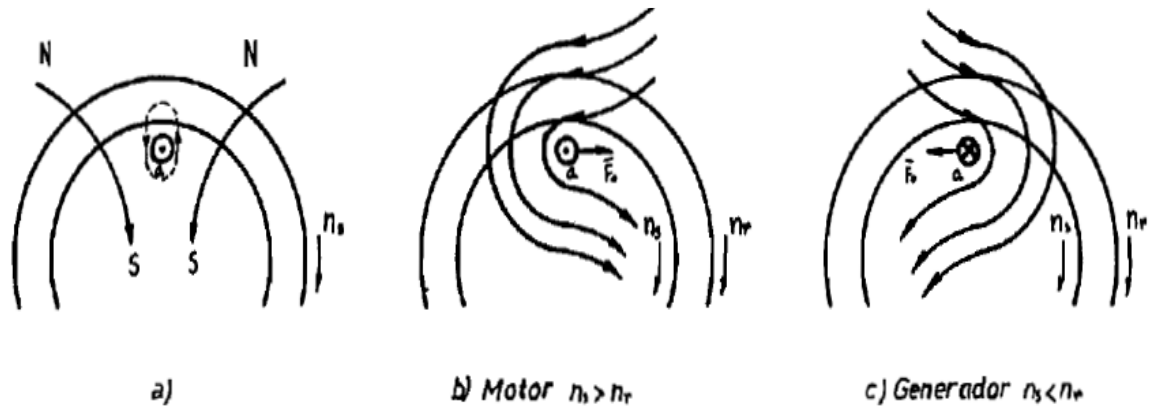


Figura 3.5 Principios de funcionamiento de la máquina de inducción [15]

La red eléctrica en la cual está incorporado un generador de inducción fija la frecuencia eléctrica y suministra la potencia reactiva necesaria para su excitación. Es importante mencionar que el generador de inducción puede funcionar independientemente, si se instala a los terminales del estator un banco de capacitores y la velocidad de giro es la adecuada. Para esta forma de operación es necesario un flujo remanente en el rotor o una corriente momentánea en el estator desde alguna fuente exterior, con el fin de autoexcitar a la máquina y lograr su operación en estado estable.

Debido al movimiento relativo del flujo magnético en los conductores del estator y rotor se induce un voltaje de frecuencia f_r , denominada frecuencia de deslizamiento del rotor expresada por la expresión (3.4).

$$f_r = s \cdot f_e \quad (3.4)$$

El principio de funcionamiento del generador de inducción doblemente alimentado es similar al de un generador sincrónico, en el cual el rotor es alimentado con corriente continua dando origen a un campo magnético fijo que gira a la velocidad del rotor [12]. El DFIG posee un convertidor estático de frecuencia AC/DC/AC que alimenta al rotor con un voltaje trifásico de frecuencia y magnitud variables, como se muestra en la Figura 3.6.

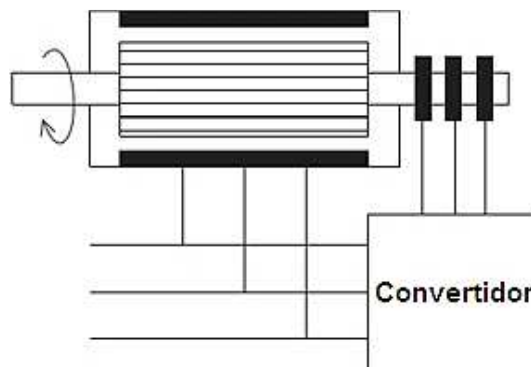


Figura 3.6 Generador de inducción doblemente alimentado [9]

En el DFIG las corrientes rotóricas producen un campo magnético que gira a una velocidad angular ω_2 respecto al rotor.

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_r \quad [\text{rad elec/s}] \quad (3.5)$$

El campo magnético del rotor que concatena a los devanados del estator no sólo gira por la acción de movimiento del rotor, sino también por las corrientes AC que circulan en sus devanados [16]. El deslizamiento se define como la velocidad relativa del campo magnético del estator respecto a la velocidad de giro del rotor.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_2}{\omega_s} \quad (3.6)$$

Por lo tanto, para que se produzca un torque no nulo para el funcionamiento del generador los campos magnéticos originados por las corrientes del estator y del rotor deben girar a una misma velocidad con respecto a un punto de referencia común [17], como lo indica la ecuación (3.7).

$$\omega_s = \omega_r + \omega_2 \quad (3.7)$$

De la ecuación anterior se deduce que la velocidad mecánica del rotor puede ser controlada a través de las frecuencias del voltaje suministrado por el convertidor estático de frecuencia [17].

El DFIG opera en modo subsincrónico (deslizamiento positivo) cuando los campos magnéticos generados por las bobinas del estator y rotor giran en el mismo

sentido. De acuerdo a la Figura 3.7, la velocidad sincrónica ω_s es mayor a ω_r , y ω_2 positivo. La velocidad mecánica del rotor respecto al estator está dada por:

$$\omega_r = \frac{2}{\text{polos}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (f_s - f_r) \quad (3.8)$$

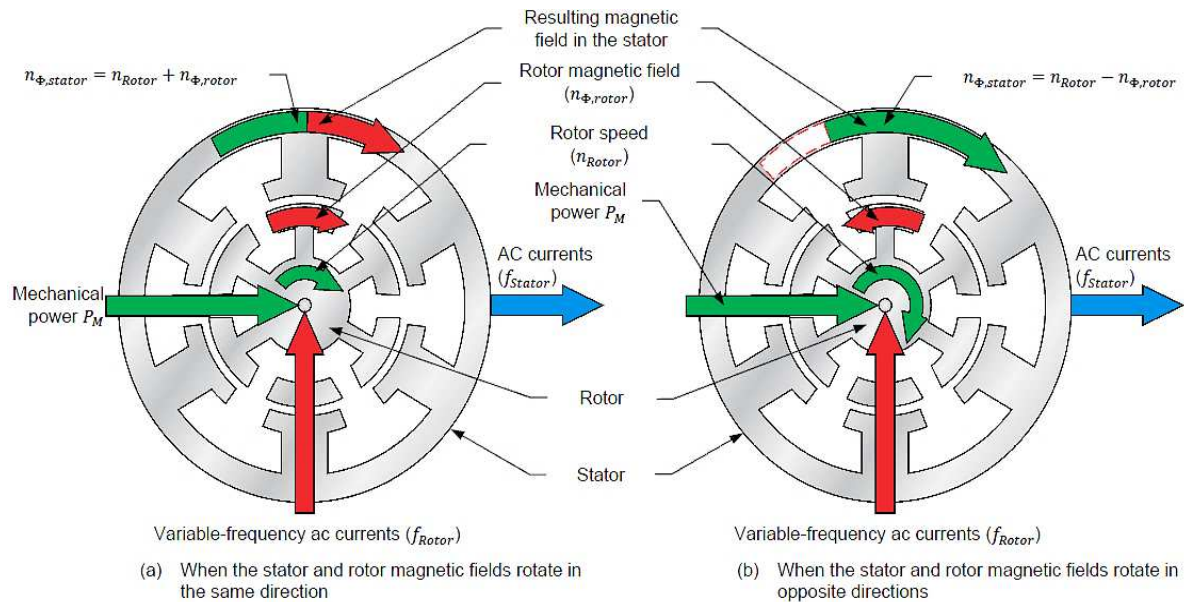


Figura 3.7 Interacción entre la velocidad del rotor y el campo magnético del rotor del DFIG [16]

En modo supersincrónico (deslizamiento negativo) los campos magnéticos generados giran en sentido opuesto, siendo ω_s menor a ω_r , y ω_2 negativo. En este caso la velocidad mecánica del rotor está dada por:

$$\omega_r = \frac{2}{\text{polos}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (f_s + f_r) \quad (3.9)$$

Por lo tanto, de acuerdo a las ecuaciones (3.8) y (3.9) la velocidad de giro del rotor depende exclusivamente de la frecuencia de la red y de la frecuencia de las corrientes del rotor, y no del torque mecánico que imponga el eje como es el caso de los otros tipos de generadores eléctricos [17].

3.1.1.2 Análisis en estado estable

El circuito equivalente monofásico del generador de inducción doblemente alimentado es presentando en la Figura 3.8. Los devanados del estator y del rotor

son alimentados con voltajes alternos trifásicos descritos por las siguientes expresiones [2]:

$$v_{a,s} = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \cos(\omega_e \cdot t) \quad (3.10)$$

$$v_{b,s} = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (3.11)$$

$$v_{c,s} = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (3.12)$$

$$v_{a,r} = \sqrt{2} \cdot V_r \cdot \cos(\omega_r \cdot t) \quad (3.13)$$

$$v_{b,r} = \sqrt{2} \cdot V_r \cdot \cos\left(\omega_r \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (3.14)$$

$$v_{c,r} = \sqrt{2} \cdot V_r \cdot \cos\left(\omega_r \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (3.15)$$

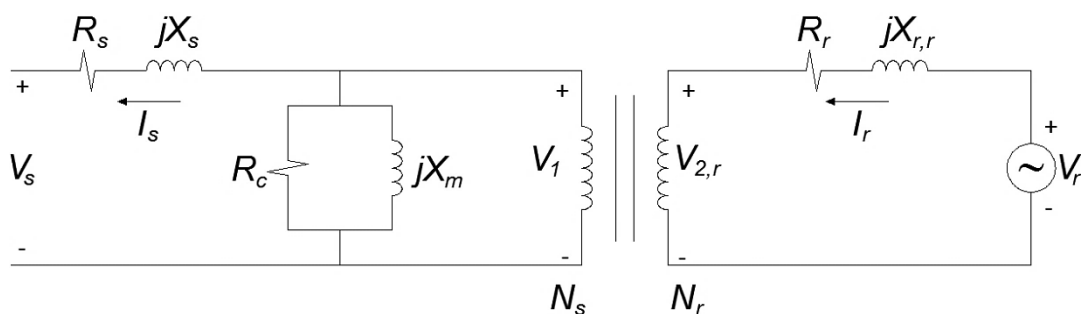


Figura 3.8 Circuito equivalente monofásico del DFIG

Donde:

V_s : Voltaje del estator

V_r : Voltaje del rotor

V_1 : Fuerza electromotriz inducida en los devanados del estator

$V_{2,r}$: Fuerza electromotriz inducida en los devanados del rotor

I_s : Corriente del estator

I_r : Corriente del rotor

R_s : Resistencia efectiva del estator

X_s : Reactancia de dispersión del estator

R_r : Resistencia efectiva del rotor

$X_{r,r}$: Reactancia de dispersión del rotor

R_c : Resistencia de pérdidas del núcleo

X_m : Reactancia de magnetización

N_s y N_r : Número de vueltas de los devanados del estator y rotor

Siendo:

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_s \quad (3.16)$$

$$X_{r,r} = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_r \quad (3.17)$$

$$X_m = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_m \quad (3.18)$$

La reactancia de dispersión del rotor $X_{r,r}$ se puede expresar en términos de la frecuencia sincrónica o de la red eléctrica, como se muestra a continuación:

$$X_{r,r} = s \cdot X_r \quad (3.19)$$

Además:

$$V_{2,r} = s \cdot V_2 \quad (3.20)$$

Los voltajes V_1 y V_2 están a frecuencia sincrónica y cumplen con la siguiente relación:

$$\frac{V_1}{s \cdot V_2} = \frac{N_s}{N_r} = a \quad (3.21)$$

Siendo a la relación de número de vueltas de los devanados del estator y rotor.

Del circuito equivalente se obtiene:

$$I_r = \frac{V_r - s \cdot V_2}{R_r + j \cdot s \cdot X_r} \quad (3.22)$$

La ecuación anterior se puede escribir como:

$$I_r = \frac{\frac{V_r}{s} - V_2}{\frac{R_r}{s} + j \cdot X_r} \quad (3.23)$$

Para obtener el circuito equivalente monofásico del DFIG con los parámetros y variables del rotor referidas al estator, se emplea la relación de vueltas a :

$$\frac{R'_r}{s} = a^2 \cdot \frac{R_r}{s} \tag{3.24}$$

$$X'_r = a^2 \cdot X_r \tag{3.25}$$

$$\frac{V'_r}{s} = a \cdot \frac{V_r}{s} \tag{3.26}$$

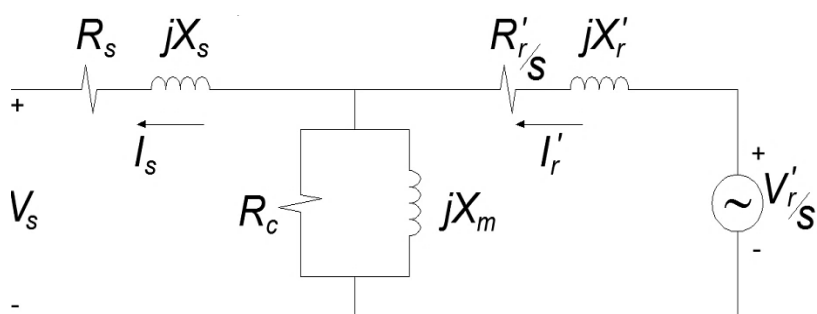


Figura 3.9 Circuito equivalente monofásico del DFIG con los parámetros y variables del rotor referidas al lado del estator

Los flujos de potencia activa en el generador de inducción doblemente alimentado despreciando las pérdidas en el núcleo, se presentan en la siguiente figura:

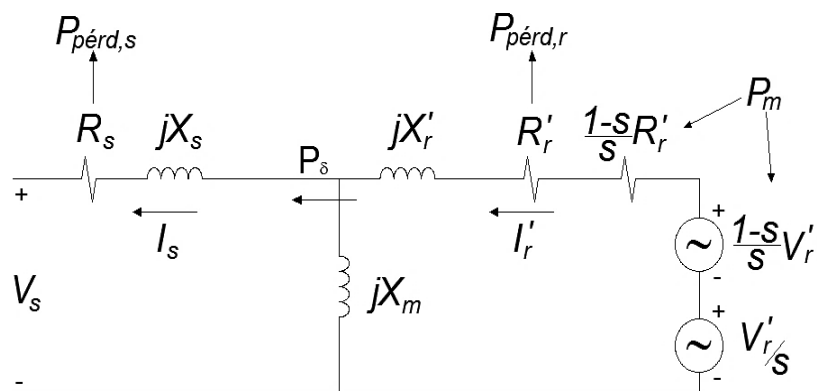


Figura 3.10 Flujos de potencia activa en el circuito equivalente monofásico del DFIG

La potencia mecánica P_m puede ser expresada como:

$$P_m = 3 \cdot \frac{1-s}{s} \cdot R'_r \cdot |I'_r|^2 - 3 \cdot \Re \left\{ \frac{1-s}{s} \cdot V'_r \cdot I'_r^* \right\} \tag{3.27}$$

La potencia transmitida desde el rotor al estator a través del entrehierro P_δ es:

$$P_{\delta} = P_m - P_{pérd,r} \quad (3.28)$$

$$P_{\delta} = P_m - 3 \cdot R_r' \cdot |I_r'|^2 \quad (3.29)$$

La potencia resultante en el estator sin considerar las pérdidas en el núcleo es:

$$P_s = P_{\delta} - P_{pérd,s} \quad (3.30)$$

$$P_s = P_{\delta} - 3 \cdot R_s \cdot |I_s|^2 \quad (3.31)$$

3.1.1.3 Flujo de potencia activa durante la operación en modos subsincrónico y supersincrónico

El DFIG puede operar en los modos subsincrónico y supersincrónico [18]. Durante operación subsincrónica, la velocidad del rotor es menor a la velocidad sincrónica, siendo el deslizamiento positivo. En este caso el rotor absorbe potencia activa de la red que fluye a través del convertidor, como se muestra en la Figura 3.11.

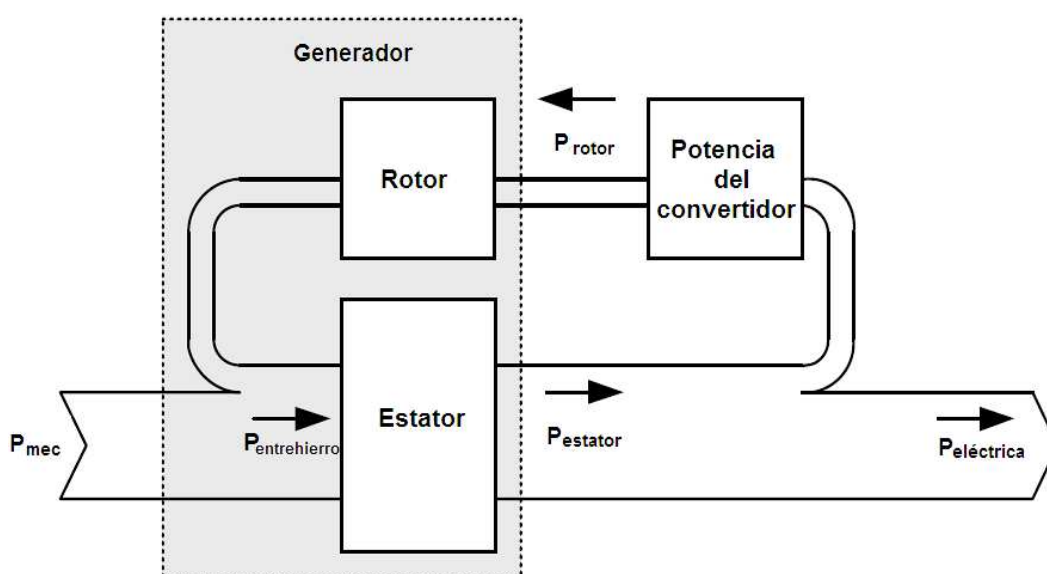


Figura 3.11 Operación subsincrónica [18]

Durante operación supersincrónica, la velocidad del rotor es mayor a la velocidad sincrónica, siendo el deslizamiento negativo. La potencia mecánica fluye en gran parte al estator y una pequeña fracción hacia el rotor como se observa en la Figura 3.12. El rotor entrega potencia activa a la red a través del convertidor.

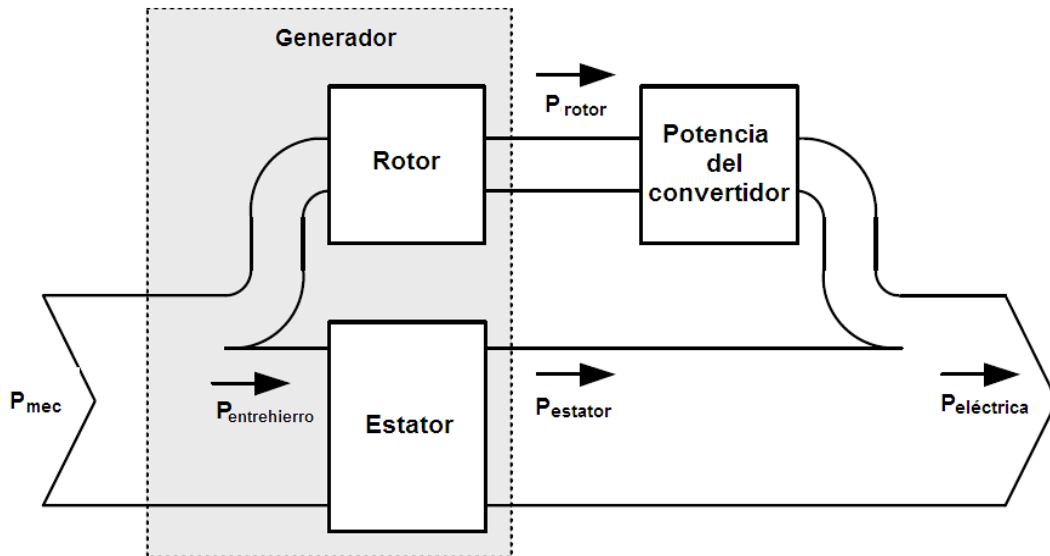


Figura 3.12 Operación supersincrónica [18]

3.1.1.4 Límite del rango de velocidad del DFIG

Con el propósito de maximizar la extracción de energía cinética proveniente del viento, la variación de la velocidad de giro de la turbina frente al cambio de velocidad del viento debería ser lineal [19], como se muestra en la Figura 3.13. Esto permite que la velocidad específica mantenga su valor óptimo.

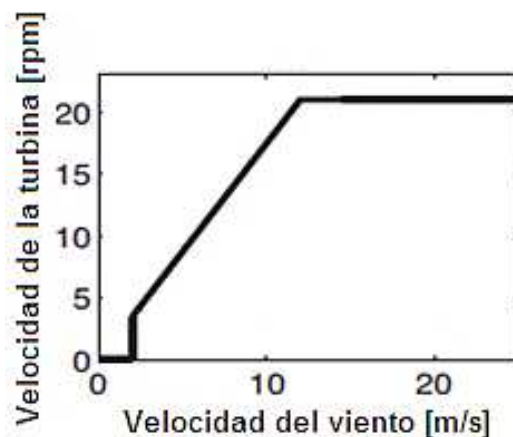


Figura 3.13 Perfil de la velocidad óptima de giro de la turbina [19]

Un factor que limita el rango de variación de la velocidad de giro del aerogenerador es el voltaje del rotor [19], el cual es provisto por el convertidor situado junto a él. Para entender esto se considera el circuito equivalente monofásico del DFIG en el que se desprecian las resistencias y reactancias de acuerdo a la figura 3.14.

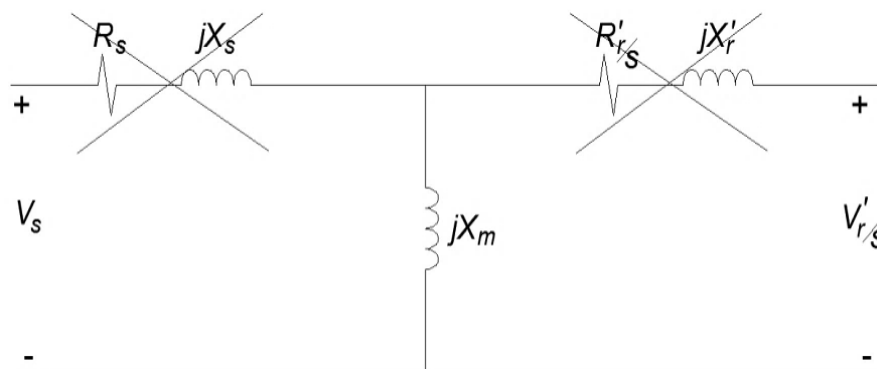


Figura 3.14 Circuito equivalente del DFIG despreciando resistencias y reactancias

De lo anterior se puede determinar que:

$$V_s = \frac{V'_r}{s} \quad (3.32)$$

Considerando la relación de transformación a , se tiene:

$$V_s = \frac{a \cdot V_r}{s} \quad (3.33)$$

Donde V_r es el voltaje en los terminales del rotor y su amplitud depende del voltaje del enlace en DC del convertidor estático de frecuencia como lo señala la ecuación (3.34). El uso de transistores tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de 1700 V limita el voltaje del enlace en DC a valores entre 1000 a 1400 V.

$$V_{AC} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \quad (3.34)$$

Por lo tanto, el máximo voltaje eficaz fase-neutro que el convertidor del lado del rotor puede suministrar está en el orden de $1000/(\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}) \approx 400 \text{ V}$ [19]. Considerando que el voltaje del estator V_s es fijado por el sistema eléctrico de potencia al cual está conectado el generador y que el valor de la relación de transformación a es constante, cuando el voltaje del rotor V_r alcance su máximo valor el generador deberá operar a velocidad constante a pesar de que la velocidad del viento sea variable, según la ecuación (3.33). Esta situación puede

ocurrir a bajas velocidades del viento, en donde el deslizamiento del generador y el voltaje del rotor tienen valores elevados.

Durante la operación del generador en estado estable, el voltaje del rotor es mantenido en un 25% por debajo del valor máximo, para ajustar la velocidad del rotor durante la presencia de ráfagas de viento. Por lo tanto, el valor máximo voltaje fase-neutro del rotor en estado estable es de 300 V aproximadamente. Si se considera un deslizamiento máximo $s = 0,3$ la relación de transformación está dada por:

$$a = \frac{s \cdot V_s}{V_r} = \frac{0,3 * 400}{300} = 0,4 \quad (3.35)$$

3.1.1.5 Modelo dinámico de la máquina de inducción

3.1.1.5.1 Teoría sobre Marcos de Referencia

Para disminuir la complejidad de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de máquinas eléctricas de corriente alterna provocada por la variabilidad de las inductancias en el tiempo, se realiza un cambio de variables [20]. Esta transformación consiste en la proyección de variables a los ejes de un marco de referencia que gira a una velocidad angular arbitraria ω . La transformación para las variables trifásicas de un circuito estacionario en un marco de referencia arbitrario se obtiene a través de siguiente expresión:

$$f_{qd0s} = K_s \cdot f_{abcs} \quad (3.36)$$

Donde f puede ser voltaje, corriente o enlace de flujo.

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}] \quad (3.37)$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (3.38)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

La transformación inversa se expresa como:

$$f_{abcs} = (K_s)^{-1} \cdot f_{qd0s} \quad (3.40)$$

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

La relación entre la velocidad angular ω y el desplazamiento angular θ del marco de referencia arbitrario es:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.42)$$

$$\theta = \int \omega \cdot dt \quad (3.43)$$

O en forma de integral definida:

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) \cdot d\xi + \theta(0) \quad (3.44)$$

Donde ξ es una variable auxiliar de integración. La Figura 3.15 muestra la representación gráfica del cambio de variables abc a qd0 para el caso de un circuito estacionario.

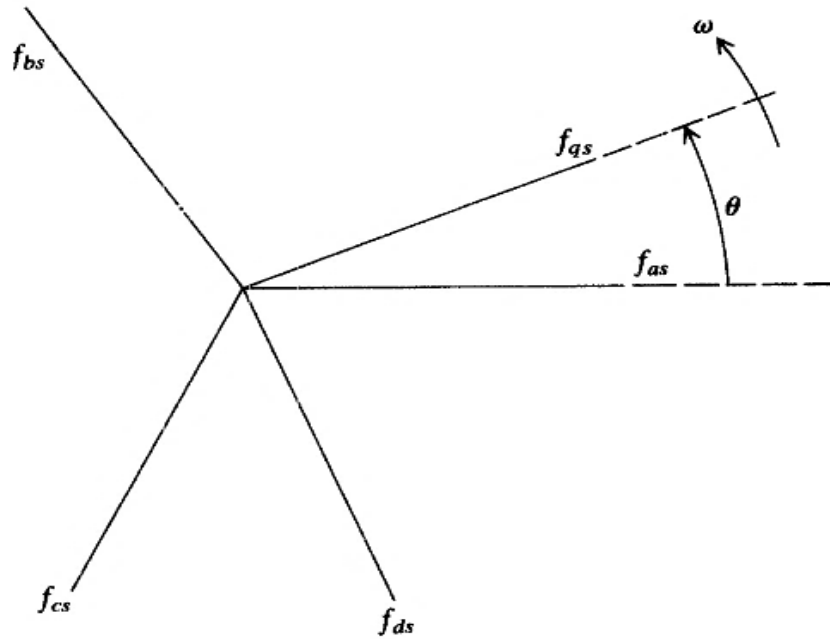


Figura 3.15 Transformación de variables de un circuito estacionario [20]

La ecuación (3.45) permite la transformación de las variables asociadas a los devanados del rotor de una máquina eléctrica de corriente alterna para un marco de referencia arbitrario.

$$f'_{qd0r} = K_r \cdot f'_{abcr} \quad (3.45)$$

Donde:

$$(f'_{qd0r})^T = [f'_{qr} \ f'_{dr} \ f'_{0r}] \quad (3.46)$$

$$(f'_{abcr})^T = [f'_{ar} \ f'_{br} \ f'_{cr}] \quad (3.47)$$

$$K_r = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos\left(\beta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \sin \beta & \sin\left(\beta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & \sin\left(\beta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (3.49)$$

Siendo θ_r definido como:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (3.50)$$

$$\theta_r = \int \omega_r \cdot dt \quad (3.51)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r \cdot (\xi) \cdot d\xi + \theta_r(0) \quad (3.52)$$

Las expresiones de la potencia total instantánea en variables abc y qd0 para circuitos estacionarios son:

$$P_{abcs} = v_{as} \cdot i_{as} + v_{bs} \cdot i_{bs} + v_{cs} \cdot i_{cs} \quad (3.53)$$

$$P_{qd0s} = P_{abcs} = \frac{3}{2} \cdot (v_{qs} \cdot i_{qs} + v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{0s} \cdot i_{0s}) \quad (3.54)$$

Las ecuaciones (3.53) y (3.54) también se aplican en el caso de circuitos giratorios.

3.1.1.5.2 Ecuaciones de voltaje y torque en variables de máquina

Las ecuaciones de voltaje en variables de máquina se muestran a continuación:

$$\mathbf{v}_{abcs} = \mathbf{r}_{abcs} \cdot \mathbf{i}_{abcs} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \quad (3.55)$$

$$\mathbf{v}_{abcr} = \mathbf{r}_{abcr} \cdot \mathbf{i}_{abcr} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \quad (3.56)$$

Los subíndices s y r indican que los parámetros y las variables están asociadas al estator y rotor, respectivamente. Las matrices \mathbf{r}_s y \mathbf{r}_r son diagonales. Considerando un sistema magnético lineal, los enlaces de flujo se expresan matricialmente como:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcs} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Donde:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} & -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} \\ -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} \\ -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} & -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2} \cdot L_{mr} & -\frac{1}{2} \cdot L_{mr} \\ -\frac{1}{2} \cdot L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2} \cdot L_{mr} \\ -\frac{1}{2} \cdot L_{mr} & -\frac{1}{2} \cdot L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Siendo L_{ls} y L_{ms} las inductancias de dispersión y magnetización de los devanados del estator y L_{lr} y L_{mr} para los devanados del rotor. La inductancia L_{sr} es la amplitud de la inductancia mutua entre los devanados del estator y rotor.

Es preferible referir las variables de máquina del lado del rotor al lado del estator, utilizando la relación del número de vueltas de los devanados, como se muestra en las ecuaciones (3.61), (3.62) y (3.63).

$$\mathbf{v}'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \cdot \mathbf{v}_{abcr} \quad (3.61)$$

$$\boldsymbol{\lambda}'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \cdot \boldsymbol{\lambda}_{abcr} \quad (3.62)$$

$$\mathbf{i}'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \mathbf{i}_{abcr} \quad (3.63)$$

La ecuación (3.64) muestra la relación entre la inductancia de magnetización y la inductancia mutua.

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} \cdot L_{sr} \quad (3.64)$$

Con lo cual se tiene que:

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \cdot \mathbf{L}_{sr} \quad (3.65)$$

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

La inductancia de magnetización del rotor se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 \cdot L_{ms} \quad (3.67)$$

Si se considera que:

$$\mathbf{L}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \cdot \mathbf{L}_r \quad (3.68)$$

De la ecuación (3.59) se obtiene:

$$\mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Refiriendo los enlaces de flujo del rotor al estator, la ecuación (3.57) se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

La expresión (3.71) muestra las ecuaciones de voltaje en variables de máquina referidas al estator.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abcs} \\ \mathbf{v}'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{d}{dt} \mathbf{L}_s & \frac{d}{dt} \mathbf{L}'_{sr} \\ \frac{d}{dt} (\mathbf{L}'_{sr})^T & r'_r + \frac{d}{dt} \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abcs} \\ \mathbf{i}'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Donde:

$$r'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \cdot r_r \quad (3.72)$$

El torque electromagnético en términos de variables de máquina se indica en la ecuación (3.73).

$$T_e = J \cdot \frac{2}{\text{polos}} \cdot \frac{d}{dt} \omega_r + T_L \quad (3.73)$$

Siendo J la inercia del generador en $[kg/m^2]$ y T_L el torque de la carga. El torque electromagnético es positivo cuando la máquina de inducción opera como motor y negativo cuando opera como generador [20].

3.1.1.5.3 Ecuaciones de voltaje y torque en variables del marco de referencia arbitrario

Empleando las transformaciones explicadas anteriormente se deducen las ecuaciones de voltaje en variables del marco de referencia arbitrario, las mismas que se presentan a continuación:

$$\mathbf{v}_{qd0s} = \mathbf{r}_s \cdot \mathbf{i}_{qd0s} + \omega \cdot \lambda_{dqs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qd0s} \quad (3.74)$$

$$\mathbf{v}'_{qd0r} = \mathbf{r}'_r \cdot \mathbf{i}'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{dqr} + \frac{d}{dt} \lambda'_{qd0r} \quad (3.75)$$

Donde:

$$(\lambda_{dq_s})^T = [\lambda_{ds} - \lambda_{qs} \ 0] \quad (3.76)$$

$$(\lambda'_{dqr})^T = [\lambda'_{dr} - \lambda'_{qr} \ 0] \quad (3.77)$$

Las ecuaciones de voltaje en variables del marco de referencia arbitrario en forma expandida son las siguientes:

$$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (3.78)$$

$$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (3.79)$$

$$v_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + \frac{d}{dt} \lambda_{0s} \quad (3.80)$$

$$v'_{qr} = r'_r \cdot i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda'_{qr} \quad (3.81)$$

$$v'_{dr} = r'_r \cdot i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda'_{dr} \quad (3.82)$$

$$v'_{0r} = r'_r \cdot i'_{0r} + \frac{d}{dt} \lambda'_{0r} \quad (3.83)$$

Al sustituir las ecuaciones (3.36) y (3.45) en las ecuaciones de enlaces de flujo en variables abc (3.70) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{L}_s \cdot (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_s \cdot \mathbf{L}'_{sr} \cdot (\mathbf{K}_r)^{-1} \\ \mathbf{K}_r \cdot (\mathbf{L}'_{sr})^T \cdot (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_r \cdot \mathbf{L}'_r \cdot (\mathbf{K}_r)^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{qd0s} \\ \mathbf{i}'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Si se considera la matriz de inductancias del estator dada en la ecuación (3.58), se puede formular la siguiente expresión:

$$\mathbf{K}_s \cdot \mathbf{L}_s \cdot (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Donde:

$$L_M = \frac{3}{2} \cdot L_{ms} \quad (3.86)$$

Conociendo que la matriz de inductancias del rotor referida al estator L'_r es similar a la matriz de inductancias L_s , se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{K}_r \cdot \mathbf{L}'_r \cdot (\mathbf{K}_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Se puede demostrar que:

$$\mathbf{K}_s \cdot \mathbf{L}'_{sr} \cdot (\mathbf{K}_r)^{-1} = \mathbf{K}_r \cdot (\mathbf{L}'_{sr})^T \cdot (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.85), (3.87) y (3.88) en las ecuaciones de enlaces de flujo y al expresarlas en forma expandida se tiene lo siguiente:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + L_M \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.89)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + L_M \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.90)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} \cdot i_{0s} \quad (3.91)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} \cdot i'_{qr} + L_M \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.92)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} \cdot i'_{dr} + L_M \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.93)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} \cdot i'_{0r} \quad (3.94)$$

Las ecuaciones de voltaje y enlaces de flujo dan origen al circuito equivalente de la máquina de inducción en los ejes qd0 mostrado en la Figura 3.16.

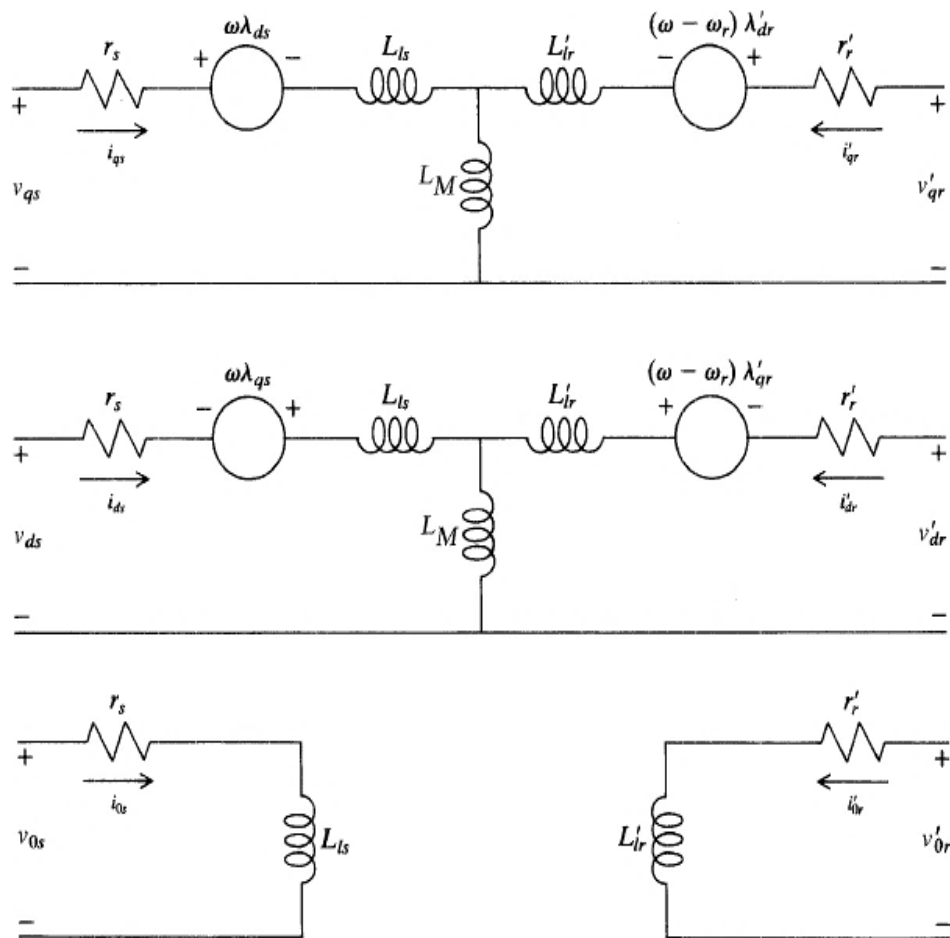


Figura 3.16 Circuito equivalente en los qd0 para una máquina de inducción trifásica [20]

Ya que los parámetros de la máquina de inducción en la mayoría de los casos están dados en ohmios o en por unidad, es necesario expresar las ecuaciones de voltaje y enlaces de flujo en términos de reactancias, como se muestra a continuación:

$$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \cdot \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d}{dt} \psi_{qs} \quad (3.95)$$

$$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \cdot \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d}{dt} \psi_{ds} \quad (3.96)$$

$$v_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d}{dt} \psi_{0s} \quad (3.97)$$

$$v'_{qr} = r'_r \cdot i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \cdot \psi'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d}{dt} \psi'_{qr} \quad (3.98)$$

$$v'_{dr} = r'_r \cdot i'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \cdot \psi'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d}{dt} \psi'_{dr} \quad (3.99)$$

$$v'_{0r} = r'_r \cdot i'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \cdot \frac{d}{dt} \psi'_{0r} \quad (3.100)$$

Donde ω_b es la velocidad angular base empleada para el cálculo de reactancias.

Los enlaces de flujo λ se transforman en enlaces de flujo por segundo ψ :

$$\psi_{qs} = X_{ls} \cdot i_{qs} + X_M \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.101)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} \cdot i_{ds} + X_M \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.102)$$

$$\psi_{0s} = X_{ls} \cdot i_{0s} \quad (3.103)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} \cdot i'_{qr} + X_M \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.104)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} \cdot i'_{dr} + X_M \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.105)$$

$$\psi'_{0r} = X'_{lr} \cdot i'_{0r} \quad (3.106)$$

La expresión del torque electromagnético T_e en función de las corrientes del estator y rotor en los ejes qd0 es:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\text{polos}}{2} \right) \cdot L_M \cdot (i_{qs} \cdot i'_{dr} - i_{ds} \cdot i'_{qr}) \quad (3.107)$$

Donde T_e es positivo cuando la máquina de inducción opera como motor.

3.1.1.5.4 Sistema en por unidad

El voltaje base para las variables abc $V_{B(abc)}$ es el valor eficaz del voltaje fase-neutro, mientras que el voltaje base para las variables $qd0$ es el valor pico de la señal sinusoidal $V_{B(qd0)} = \sqrt{2} \cdot V_{B(abc)}$ [20]. A partir de la expresión (3.108) se puede determinar la corriente base en amperios, para ello se considera como potencia base P_B la potencia total de la máquina de voltio-amperios.

$$P_B = 3 \cdot V_{B(abc)} \cdot I_{B(abc)} \quad (3.108)$$

O

$$P_B = \frac{3}{2} \cdot V_{B(qd0)} \cdot I_{B(qd0)} \quad (3.109)$$

La impedancia base en ohmios se obtiene a través de las siguientes expresiones:

$$Z_B = \frac{V_{B(abc)}}{I_{B(abc)}} \quad (3.110)$$

O

$$Z_B = \frac{V_{B(qd0)}}{I_{B(qd0)}} \quad (3.111)$$

Para cambiar al sistema en por unidad las ecuaciones (3.95) a (3.100) se dividen los voltajes, corrientes e impedancias para sus valores base correspondientes. Debido a que la unidad de medida para los enlaces de flujo por segundo es el voltio, se debe dividir para el voltaje base. El torque base se expresa como:

$$T_B = \frac{P_B}{\frac{2}{\text{polos}} \cdot \omega_b} \quad (3.112)$$

3.1.1.5.5 Ecuaciones para la simulación de la máquina de inducción en el marco de referencia arbitrario

Las ecuaciones que permiten la simulación de una máquina de inducción simétrica son las siguientes:

$$\frac{d}{dt} \psi_{qs} = \omega_b \cdot \left[v_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \cdot \psi_{ds} + \frac{r_s}{X_{ls}} \cdot (\psi_{mq} - \psi_{qs}) \right] \quad (3.113)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{ds} = \omega_b \cdot \left[v_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \cdot \psi_{qs} + \frac{r_s}{X_{ls}} \cdot (\psi_{md} - \psi_{ds}) \right] \quad (3.114)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{0s} = \omega_b \cdot \left[v_{0s} - \frac{r_s}{X_{ls}} \cdot \psi_{0s} \right] \quad (3.115)$$

$$\frac{d}{dt}\psi'_{qr} = \omega_b \cdot \left[v'_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \cdot \psi'_{dr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} \cdot (\psi_{mq} - \psi'_{qr}) \right] \quad (3.116)$$

$$\frac{d}{dt}\psi'_{dr} = \omega_b \cdot \left[v'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \cdot \psi'_{qr} + \frac{r'_r}{X'_{lr}} \cdot (\psi_{md} - \psi'_{dr}) \right] \quad (3.117)$$

$$\frac{d}{dt}\psi'_{0r} = \omega_b \cdot \left[v'_{0r} - \frac{r'_r}{X'_{lr}} \cdot \psi'_{0r} \right] \quad (3.118)$$

$$\psi_{mq} = X_{aq} \cdot \left(\frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{X'_{lr}} \right) \quad (3.119)$$

$$\psi_{md} = X_{ad} \cdot \left(\frac{\psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{X'_{lr}} \right) \quad (3.120)$$

$$X_{aq} = X_{ad} = \left(\frac{1}{X_M} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lr}} \right)^{-1} \quad (3.121)$$

Resolviendo las ecuaciones diferenciales anteriores en donde las variables de estado son los enlaces de flujo por segundo, se logra determinar las corrientes del estator y rotor con las siguientes expresiones:

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} \cdot (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \quad (3.122)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} \cdot (\psi_{ds} - \psi_{md}) \quad (3.123)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \cdot \psi_{0s} \quad (3.124)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{X'_{lr}} \cdot (\psi'_{qr} - \psi_{mq}) \quad (3.125)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{X'_{lr}} \cdot (\psi'_{dr} - \psi_{md}) \quad (3.126)$$

$$i'_{0r} = \frac{1}{X'_{lr}} \cdot \psi'_{0r} \quad (3.127)$$

La expresión del torque electromagnético en términos de corrientes y enlaces de flujo por segundo es:

$$T_e = \psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds} \quad (3.128)$$

Finalmente, para determinar la velocidad angular del rotor se resuelve la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{\omega_b}{2 \cdot H} \cdot (T_e - T_L) \quad (3.129)$$

En este trabajo el modelo del DFIG se realiza utilizando el marco de referencia sincrónico $\omega = \omega_s$. El esquema del modelo del generador de inducción doblemente alimentado con las variables de entrada y salida se muestra en la Figura 3.17.

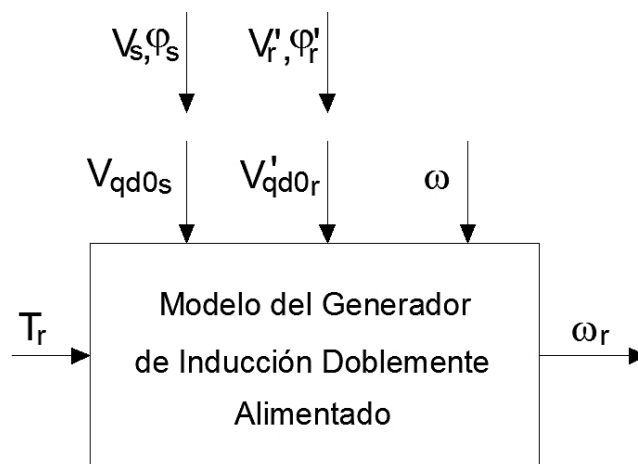


Figura 3.17 Esquema del modelo del DFIG

3.1.2 CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FRECUENCIA

El convertidor estático de frecuencia conecta al rotor del DFIG con la red eléctrica y permite el flujo bidireccional de potencia. El convertidor está constituido por transistores IGBTs controlados por modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM) y por diodos de protección, como se observa en la Figura 3.18. Para disminuir los armónicos producidos por el apagado y encendido de los IGBTs se tienen filtros R-L, ubicados en los extremos del convertidor del lado del rotor y del convertidor cercano a la red eléctrica [18].

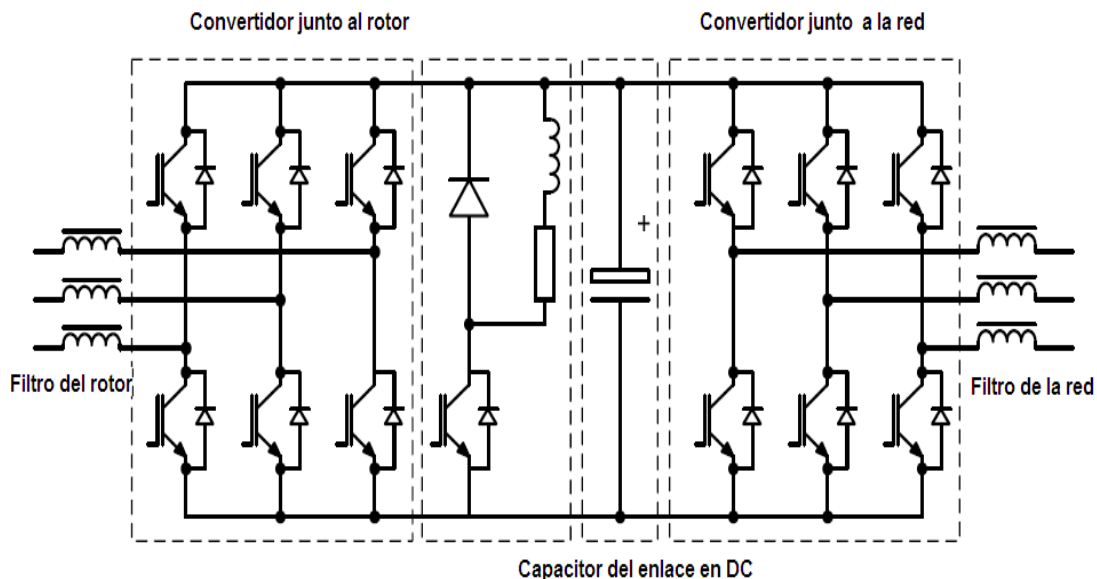


Figura 3.18 Convertidor estático de frecuencia [18]

El convertidor estático de frecuencia es modelado como una fuente voltaje controlada sin pérdidas, ya que son muy pequeñas en comparación con la potencia nominal del aerogenerador, como se muestra en la Figura 3.19.

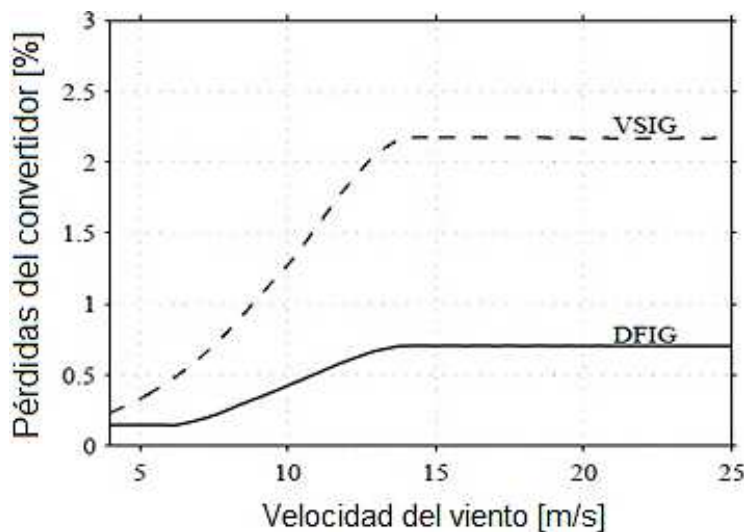


Figura 3.19 Pérdidas del convertidor estático de frecuencia del DFIG [9]

La relación entre voltajes de corriente continua DC y voltajes de corriente alterna AC del convertidor se describe en las ecuaciones (3.130) y (3.131) [21]:

$$V_{AC,r} = K_0 \cdot PWM_r \cdot V_{DC} \tag{3.130}$$

$$V_{AC,i} = K_0 \cdot PWM_i \cdot V_{DC} \tag{3.131}$$

Donde:

PWM_r : Parte real del factor de modulación de ancho de pulso.

PWM_i : Parte imaginaria del factor de modulación de ancho de pulso.

K_0 : Factor correspondiente al método de modulación sinusoidal, su valor es de $\sqrt{3}/(2\sqrt{2})$.

Para evitar que el convertidor estático de frecuencia controlado por modulación sinusoidal opere en la región de saturación, el factor de modulación PWM es limitado entre -1 a 1 [22], de acuerdo a la Figura 3.20

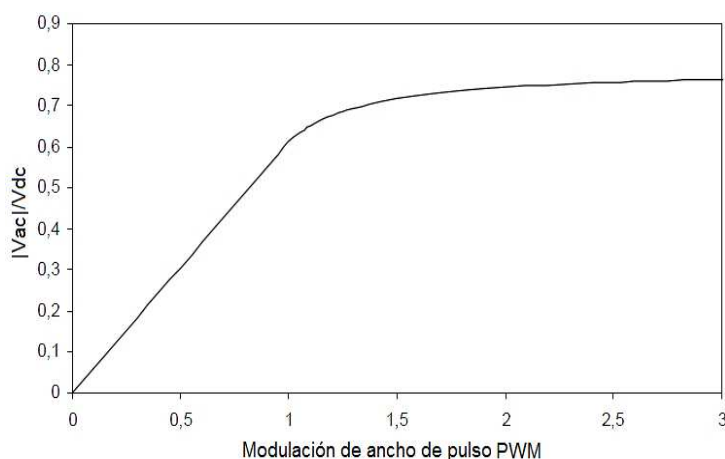


Figura 3.20 Característica de saturación del convertidor con modulación sinusoidal [21]

Las ecuaciones de voltajes (3.130) y (3.131) pueden expresarse en sus componentes de eje cuadratura y eje directo de la siguiente manera:

$$V_{AC,q} = K_0 \cdot PWM_q \cdot V_{DC} \quad (3.132)$$

$$V_{AC,d} = K_0 \cdot PWM_d \cdot V_{DC} \quad (3.133)$$

Tomando en cuenta el esquema del circuito equivalente monofásico del DFIG mostrado en la Figura 3.9 y despreciando las pérdidas de potencia en el núcleo y en los devanados del estator y rotor se obtiene la siguiente expresión:

$$P_r = -s \cdot P_s \quad (3.134)$$

La ecuación anterior indica que el rango de variación de velocidad del DFIG depende de la capacidad del convertidor estático de frecuencia. Debido a costos,

generalmente, la capacidad del convertidor es 1/3 de la capacidad del DFIG, consecuentemente el deslizamiento puede variar aproximadamente en $\pm 30\%$ respecto a la velocidad sincrónica.

3.1.3 ENLACE DE VOLTAJE EN DC

El enlace de voltaje en DC del convertidor estático de frecuencia está conformado principalmente por un capacitor almacenador de energía [18], de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E_C = \int P \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot C \cdot v_{dc}^2 \quad (3.135)$$

Siendo:

$$P = P_r - P_c \quad (3.136)$$

Donde P es el flujo de potencia neta en el capacitor, P_r es la potencia del rotor, P_c es la potencia del convertidor de lado de la red, C es la capacitancia y v_{dc} es el voltaje del capacitor.

Derivando la ecuación (3.135) se obtiene:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{P_r - P_c}{C \cdot v_{dc}} \quad (3.137)$$

Resolviendo la última expresión se puede determinar el valor del voltaje del enlace en DC.

3.1.4 FILTRO R-L

A la salida del convertidor del lado de la red eléctrica se tiene una resistencia e inductancia dispuestas en serie, conformando un filtro R-L. Las ecuaciones que permiten modelar el filtro R-L en componentes q y d se describen a continuación [18]:

$$v_{s,q} = R_f \cdot i_{g,q} + L_f \cdot \frac{di_{g,q}}{dt} + \omega_e \cdot L_f \cdot i_{g,d} + v_{c,q} \quad (3.138)$$

$$v_{s,d} = R_f \cdot i_{g,d} + L_f \cdot \frac{di_{g,d}}{dt} - \omega_e \cdot L_f \cdot i_{g,q} + v_{c,d} \quad (3.139)$$

Donde:

$v_{s,q}$: Componente en el eje de cuadratura del voltaje de la red

$v_{s,d}$: Componente en el eje directo del voltaje de la red

$v_{c,q}$: Componente en el eje de cuadratura del voltaje del convertidor

$v_{c,d}$: Componente en el eje directo del voltaje del convertidor

$i_{g,q}$: Componente en el eje de cuadratura de la corriente del convertidor

$i_{g,d}$: Componente en el eje directo de la corriente del convertidor

R_f : Resistencia del filtro R-L

L_f : Inductancia del filtro R-L

En la Figura 3.21 se observa el esquema del convertidor cercano a la red, el enlace de voltaje en DC y el filtro R-L, que van conectados a la misma barra que el estator del DFIG.

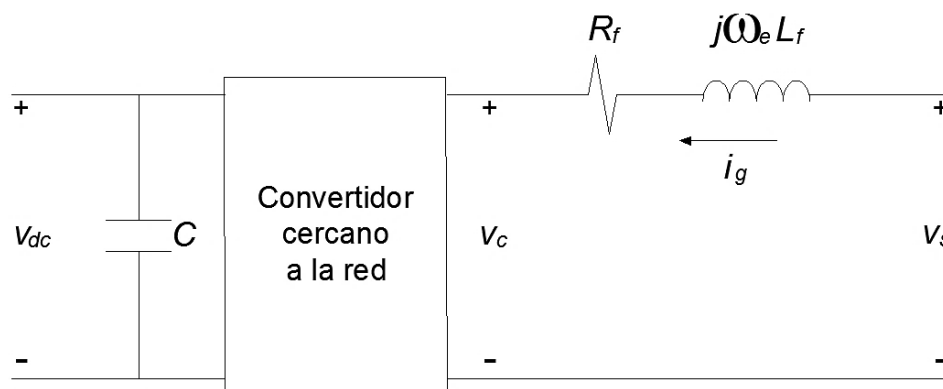


Figura 3.21 Convertidor cercano a la red eléctrica, enlace de voltaje en DC y filtro R-L

3.2 CONTROL DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FRECUENCIA

El convertidor estático de frecuencia además de permitir que el DFIG opere a velocidad variable, permite controlar la potencia activa y reactiva de generación. El control del convertidor de frecuencia comprende dos partes: control del convertidor del lado del rotor y control del convertidor cercano a la red eléctrica [23].

3.2.1 CONTROL EMPLEANDO MARCOS DE REFERENCIA

El control empleando marcos de referencia está basado en la técnica de control vectorial. Esta técnica consiste en la alineación de un vector correspondiente a una variable eléctrica con el eje de un marco de referencia específico [1]. En el presente estudio los marcos de referencia seleccionados giran a velocidad sincrónica ω_s , con lo cual todos los componentes de las variables en los ejes q y d son constantes, facilitándose el control [24].

3.2.1.1 Marco de Referencia del Voltaje de la Red (MRVR)

El vector del voltaje de la barra a la cual está conectado el estator \vec{v}_s es alineado con el eje directo del Marco de Referencia del Voltaje de la Red que gira a velocidad sincrónica ω_s . Consecuentemente, el vector voltaje \vec{v}_s tiene componente sólo en el eje directo.

$$v_{s,q}^s = 0 \quad (3.140)$$

$$v_{s,d}^s = |\vec{v}_s| \quad (3.141)$$

El superíndice s indica que el marco de referencia gira a velocidad sincrónica. Considerando lo anterior, las expresiones de las potencias activa y reactiva están dadas por (3.142) y (3.143).

$$P = \frac{3}{2} \cdot (v_{s,q} \cdot i_{conv,q} + v_{s,d} \cdot i_{conv,d}) = \frac{3}{2} \cdot v_{s,d} \cdot i_{conv,d} \quad (3.142)$$

$$Q = \frac{3}{2} \cdot (v_{s,d} \cdot i_{conv,q} - v_{s,q} \cdot i_{conv,d}) = \frac{3}{2} \cdot v_{s,d} \cdot i_{conv,q} \quad (3.143)$$

3.2.1.2 Marco de Referencia del Flujo del Estator (MRFE)

El vector correspondiente al enlace de flujo del estator $\vec{\lambda}_s$ está alineado con el eje directo del Marco de Referencia del Flujo del Estator que gira a velocidad sincrónica ω_s . El vector de los enlaces de flujo $\vec{\lambda}_s$ tiene componente sólo en el eje directo.

$$\lambda_{s,q}^s = 0 \quad (3.144)$$

$$\lambda_{s,d}^s = |\vec{\lambda}_s| \quad (3.145)$$

En la Figura 3.22 se aprecia los marcos de referencia antes mencionados.

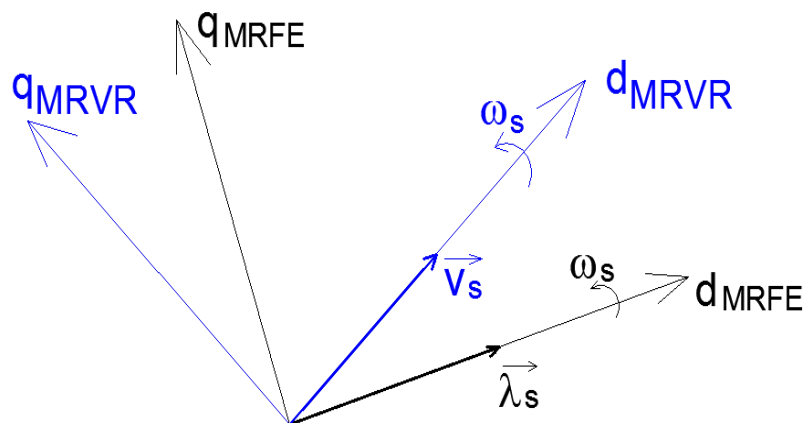


Figura 3.22 Marcos de referencia usados en el control del DFIG

3.2.2 CONTROL DEL CONVERTIDOR DEL LADO DEL ROTOR

El convertidor del lado del rotor le suministra un voltaje trifásico de magnitud y frecuencia variable. El control del voltaje del rotor en sus componentes q y d posibilita desacoplar el control de potencia activa y reactiva producida por el DFIG, para ello se emplea el Marco de Referencia del Flujo del Estator.

El vector de la corriente de magnetización \vec{i}_m es colineal con el vector de las concatenaciones de flujo del estator $\vec{\lambda}_s$, estando ambas variables relacionadas mediante la siguiente expresión:

$$\vec{\lambda}_s = L_m \cdot \vec{i}_m \quad (3.146)$$

Considerando que:

$$\vec{\lambda}_s = L_s \cdot \vec{i}_s + L_m \cdot \vec{i}_r \quad (3.147)$$

Reemplazando la ecuación (3.146) en (3.147) y despejando \vec{i}_m se obtiene:

$$\vec{i}_m = \frac{L_s}{L_m} \cdot \vec{i}_s + \vec{i}_r' \quad (3.148)$$

Al descomponer la ecuación anterior en sus componentes q y d da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$i_{m,q}^s = 0 = \frac{L_s}{L_m} \cdot i_{s,q}^s + i_{r,q}^s \quad (3.149)$$

$$i_{m,d}^s = \frac{L_s}{L_m} \cdot i_{s,d}^s + i_{r,d}^s \quad (3.150)$$

La expresión (3.146) puede ser escrita como:

$$\lambda_{s,d}^s = L_m \cdot i_{m,d}^s \quad (3.151)$$

Despejando $i_{s,q}^s$ e $i_{s,d}^s$ de las ecuaciones (3.149) y (3.150) se tiene:

$$i_{s,q}^s = -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{r,q}^s \quad (3.152)$$

$$i_{s,d}^s = \frac{L_m}{L_s} \cdot (i_{m,d}^s - i_{r,d}^s) \quad (3.153)$$

El voltaje del estator es definido por la ecuación (3.154).

$$\vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + j \cdot \omega_e \cdot \vec{\lambda}_s + \frac{d\vec{\lambda}_s}{dt} \quad (3.154)$$

Reemplazando la ecuación (3.151) en la expresión anterior

$$\vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + j \cdot \omega_e \cdot L_m \cdot i_{m,d}^s + L_m \cdot \frac{di_{m,d}^s}{dt} \quad (3.155)$$

Se considera que R_s es muy pequeña y que las concatenaciones del flujo del estator no varían, por lo cual la ecuación del voltaje (3.155) puede ser escrita de forma reducida como:

$$\vec{v}_s = j \cdot \omega_e \cdot L_m \cdot i_{m,d}^s \quad (3.156)$$

La última expresión señala que el vector voltaje del estator es perpendicular al vector de las concatenaciones de flujo del estator. Si se considera $\omega_e = 1$ pu y $v_{s,d}^s = 0$, la ecuación (3.15) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$v_{s,q}^s = L_m \cdot i_{m,d}^s \quad (3.157)$$

Las expresiones de las potencias activa y reactiva del estator se muestran en (3.158) y (3.159).

$$P_s = v_{s,q}^s \cdot i_{s,q}^s \quad (3.158)$$

$$Q_s = v_{s,q}^s \cdot i_{s,d}^s \quad (3.159)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones (3.152) y (3.153) en las expresiones anteriores, se obtiene:

$$P_s = -\frac{L_m}{L_s} \cdot v_{s,q}^s \cdot i_{r,q}^{\prime s} \quad (3.160)$$

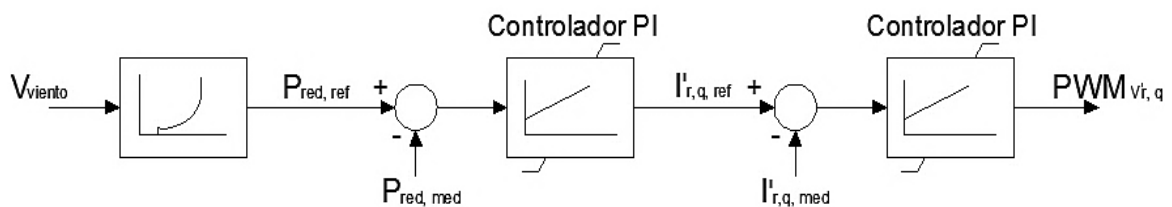
$$Q_s = \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{s,q}^s \cdot (i_{m,d}^s - i_{r,d}^{\prime s}) \quad (3.161)$$

Demostrándose así que las potencias P_s y Q_s dependen proporcionalmente de las corrientes rotóricas $i_{r,q}^{\prime s}$ e $i_{r,d}^{\prime s}$, respectivamente [18].

El esquema con los lazos de control del convertidor del lado del rotor se muestra en la Figura 3.23. La potencia inyectada a la red $P_{red,med}$ es ajustada a una

potencia de referencia $P_{red,ref}$, obtenida a través de una estrategia que optimiza el aprovechamiento de la energía cinética extraída del viento, dicha estrategia se explica más adelante. El error de las potencias pasa a través de un controlador PI de acción lenta que proporciona como salida la componente q de la corriente del rotor de referencia $i'_{r,q,ref}$, dicho valor es utilizado en el ajuste de la componente q de la corriente del rotor medida $i'_{r,q,med}$. El error entre las corrientes del rotor pasa por un controlador PI de acción rápida, obteniéndose la señal de control $PWM_{v'r,q}$. Por otra parte, el usuario establece un valor de referencia de la potencia reactiva $Q_{red,ref}$ inyectada a la red a través del estator, el mismo que se compara con el valor de la potencia reactiva medida $Q_{red,med}$. De igual manera al proceso anterior, el error obtenido pasa a través un controlador PI de acción lenta, cuya salida es la componente d de la corriente del rotor de referencia $i'_{r,d,ref}$. La componente d de la corriente del rotor medida $i'_{r,d,med}$ es ajustada al valor de la variable anterior, luego el error producido pasa por un controlador PI de acción rápida cuya salida finalmente es la señal de control $PWM_{v'r,d}$.

CONTROL DE POTENCIA ACTIVA



CONTROL DE POTENCIA REACTIVA

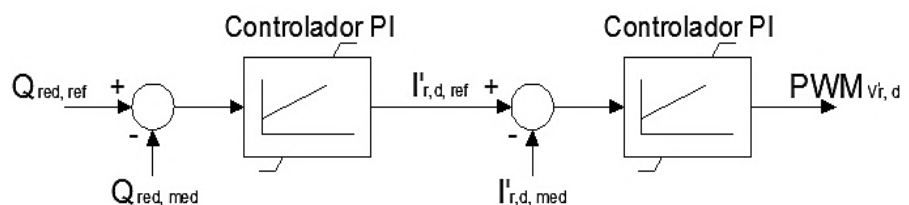


Figura 3.23 Lazos de control del convertidor del lado del rotor

3.2.2.1 ESTRATEGIA DE CONTROL PARA OPTIMIZAR EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL VIENTO

La presente estrategia de control permite optimizar el aprovechamiento de la energía cinética del viento y se basa en las curvas mostradas en la Figura 3.24, que relacionan la potencia mecánica con la velocidad del viento y la potencia eléctrica con la velocidad del rotor.

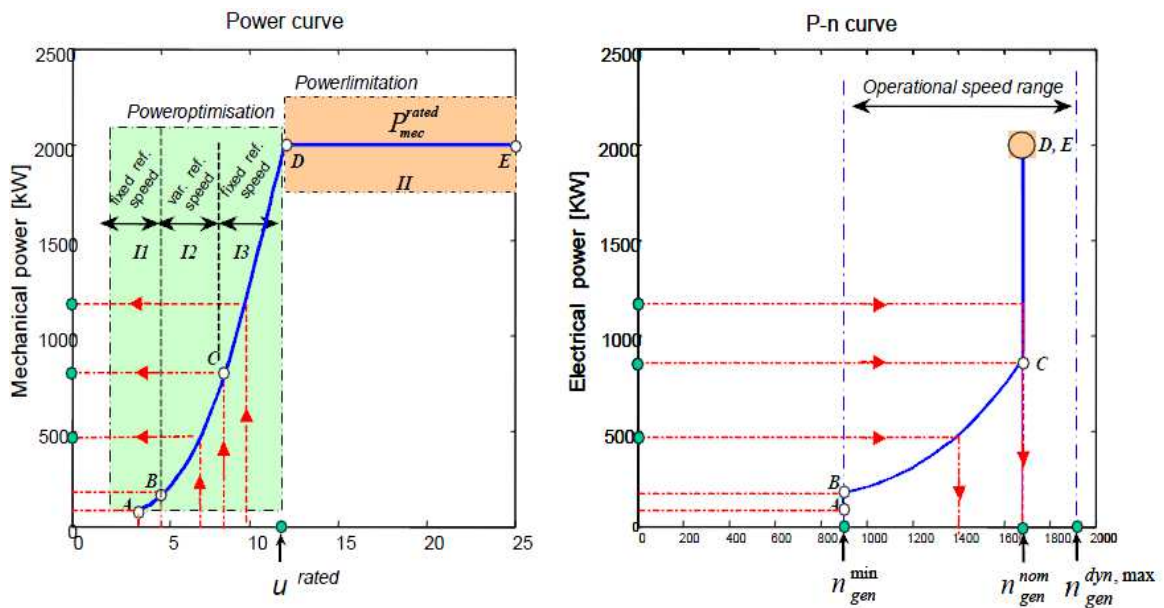


Figura 3.24 Curva de la Potencia mecánica en función de la velocidad del viento y Curva optimizada de la Potencia eléctrica en función de la velocidad del rotor [24]

Para obtener la curva optimizada de la Potencia Eléctrica en función de la velocidad del rotor se debe emplear el siguiente algoritmo [24]:

a) Operación a carga parcial con la velocidad de la turbina fijada a su valor mínimo (optimización de potencia zona A-B)

Cuando las velocidades del viento son pequeñas se ajusta la velocidad de la turbina ω_t a su valor mínimo $\omega_{t,min}$, determinando la velocidad específica λ de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{\omega_{t,min} \cdot R}{v_v} \quad (3.162)$$

Para determinar el coeficiente de potencia C_p se considera un ángulo de inclinación óptimo $\beta_i^{opt} = 0^\circ$. La potencia óptima es obtenida mediante la siguiente expresión:

$$P_t^{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \omega_{t,min}^3 \quad (3.163)$$

b) Operación a carga parcial con la velocidad de la turbina variable (optimización de potencia zona B-C)

Este caso ocurre cuando la velocidad de la turbina es menor que su velocidad nominal $\omega_{t,nom}$ y mayor a su velocidad mínima $\omega_{t,min}$. Para optimizar el aprovechamiento de la potencia extraída del viento se emplean los valores óptimos del ángulo de inclinación $\beta_i^{opt} = 0^\circ$ y de velocidad específica $\lambda^{opt} = 8,1$; luego se determina el valor del coeficiente de potencia máximo $C_{p,máx}$. La velocidad de la turbina y la potencia se determinan con las ecuaciones (3.164) y (3.165).

$$\omega_t = \frac{\lambda^{opt} \cdot v_v}{R} \quad (3.164)$$

$$P_t^{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{C_{p,máx}}{\lambda^{opt^3}} \cdot \omega_t^3 \quad (3.165)$$

c) Operación a carga parcial con la velocidad de la turbina establecida en su valor nominal (optimización de potencia zona C-D)

La velocidad de la turbina es establecida en su valor nominal $\omega_{t,nom}$. El procedimiento para calcular la potencia optimizada es igual al usado en la zona AB.

d) Operación a plena carga (limitación de potencia zona D-E)

Este caso ocurre cuando las velocidades del viento son mayores al valor nominal. La potencia generada se limita a su valor nominal al igual que la velocidad de la turbina.

3.2.3 CONTROL DEL CONVERTIDOR CERCANO A LA RED ELÉCTRICA

Las funciones de las estrategias de control del convertidor cercano a la red eléctrica son mantener el voltaje v_{dc} constante y asegurar un factor de potencia unitario durante la operación en modo subsincrónico y supersincrónico del DFIG. El control del convertidor cercano a la red emplea el Marco de Referencia del Voltaje de la Red [23]. Considerando las ecuaciones (3.140) y (3.141), las expresiones del modelo del filtro R-L (3.138) y (3.139) experimentan los siguientes cambios:

$$0 = R_f \cdot i_{g,q} + L_f \cdot \frac{di_{g,q}}{dt} + \omega_e \cdot L_f \cdot i_{g,d} + v_{c,q} \quad (3.166)$$

$$|\vec{v}_s| = R_f \cdot i_{g,d} + L_f \cdot \frac{di_{g,d}}{dt} - \omega_e \cdot L_f \cdot i_{g,q} + v_{c,d} \quad (3.167)$$

El esquema con los lazos de control del convertidor cercano a la red se presenta en la Figura 3.25. El voltaje medido $v_{dc,med}$ es ajustado a un voltaje de referencia $v_{dc,ref}$ que es establecido por el usuario. El error de los voltajes en DC pasa a través de un controlador PI de acción lenta que proporciona como salida la componente d de la corriente del convertidor $i_{conv,d,ref}$, dicha corriente es la referencia para el ajuste de la corriente del convertidor medida $i_{conv,d,med}$. El error entre las corrientes del convertidor pasa por un controlador PI de acción rápida, obteniéndose la señal de control $PWM_{V_{conv,d}}$. Por otra parte, el valor de la componente q de la corriente del convertidor de referencia $i_{conv,q,ref}$ es establecida en cero para asegurar que el factor de potencia del convertidor sea 1. La corriente medida $i_{conv,q,med}$ es ajustada al valor de 0 y el error que se genera pasa a través de un controlador PI de acción rápida, cuya salida es la señal de control $PWM_{V_{conv,q}}$.

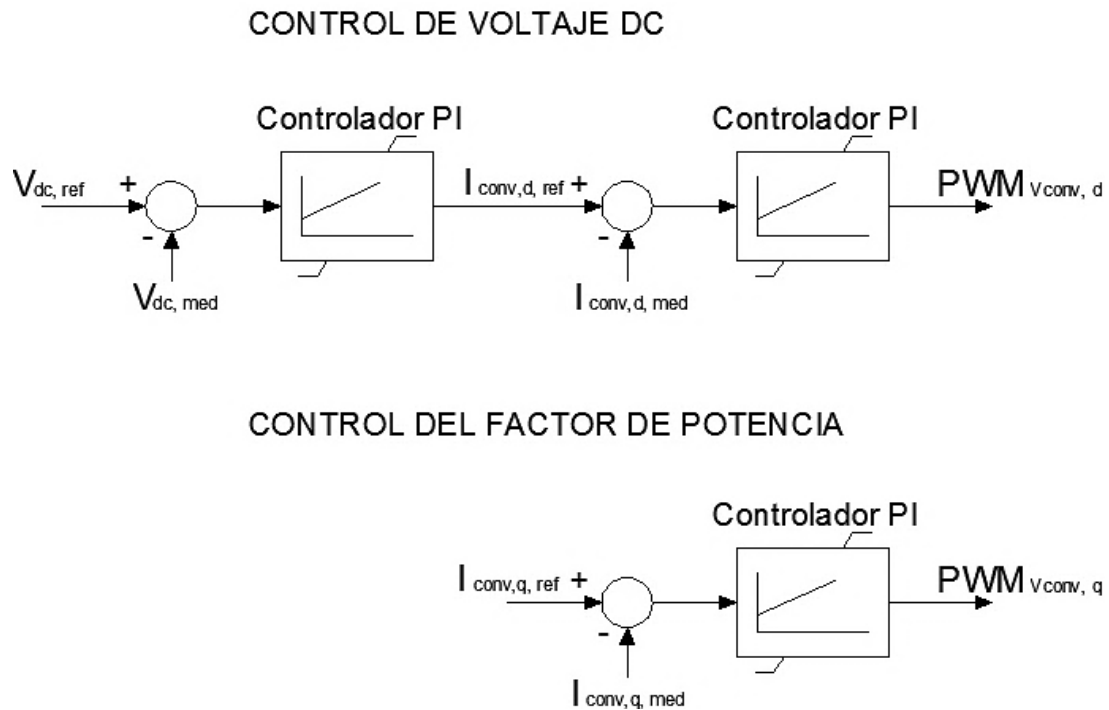


Figura 3.25 Lazos de control del convertidor ubicado cercano a la red eléctrica

Los parámetros de los controladores PI correspondientes al convertidor cercano a la red fueron determinados a través del método Prueba y Error; mientras que, los parámetros de los controladores PI pertenecientes al convertidor del lado del rotor son determinados en base a la respuesta del aerogenerador con DFIG bajo velocidades de viento determinísticas. Además, como se observa en la Figura 3.23 y Figura 3.25 las variables de salida de los controladores PI fueron limitadas en un rango comprendido entre -1 a 1 en p.u.

El diagrama de flujo de la Figura 3.26 muestra la secuencia de ejecución de los modelos de los componentes del sistema aerogenerador con DFIG implementada en el programa.

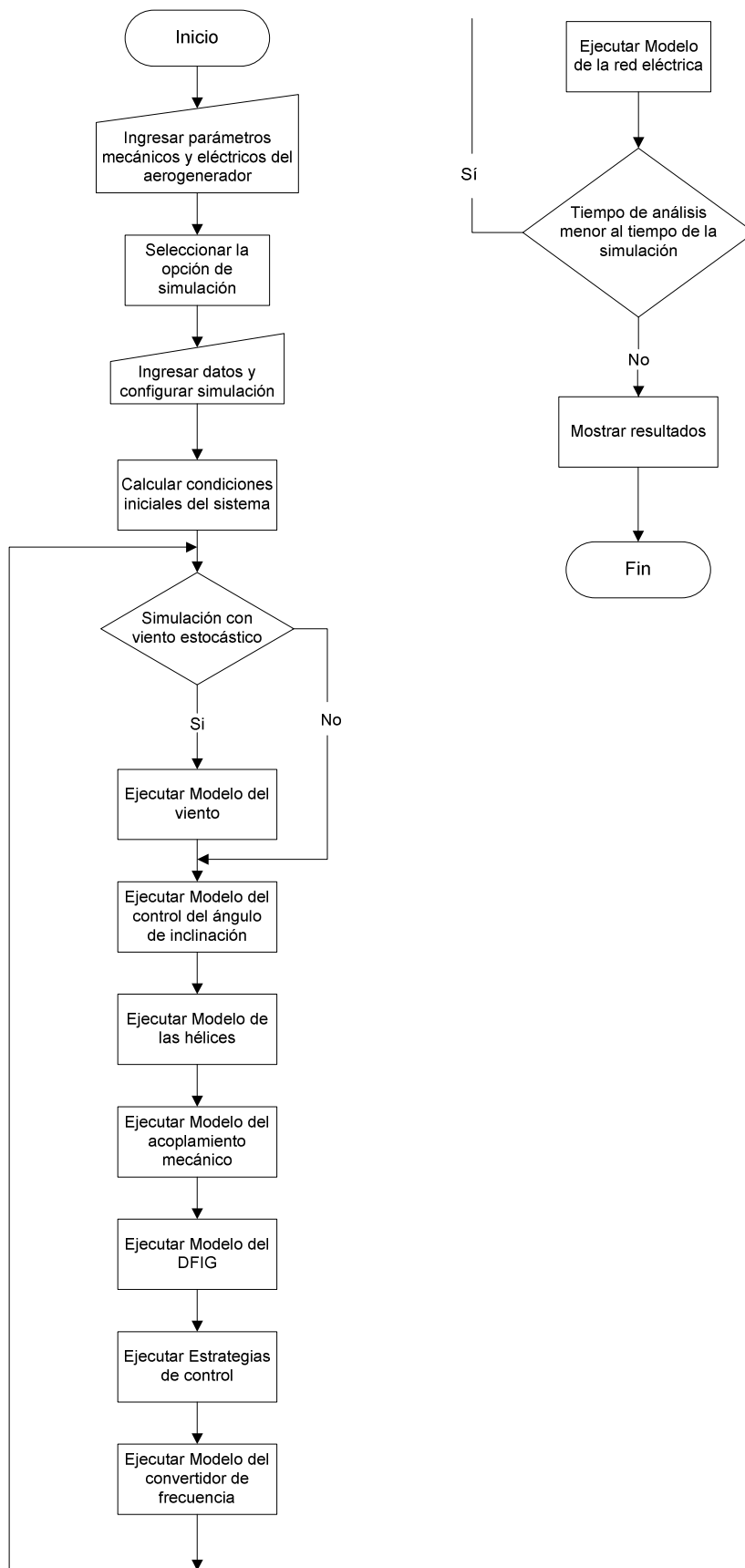


Figura 3.26 Diagrama de flujo del programa desarrollado

3.3 INICIALIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL AEROGENERADOR CON DFIG

Para evitar la presencia de transitorios eléctricos ficticios durante la simulación del aerogenerador con DFIG, todos los componentes deben ser inicializados correctamente [24]. La inicialización comienza con el flujo de potencia de la red eléctrica, el cual establece las condiciones en estado estable del sistema. Para ello es necesario ingresar como datos las potencias activa y reactiva de generación. Luego se procede a determinar las variables eléctricas internas del DFIG a través de la solución de ecuaciones no lineales deducidas del circuito equivalente monofásico. Finalmente, los modelos de los componentes mecánicos pueden ser inicializados.

La inicialización es un procedimiento sucesivo en donde las ecuaciones de los modelos de los componentes del aerogenerador con DFIG son resueltas estableciendo las derivadas a cero, usando los resultados del flujo de potencia y algunos datos de entrada de variables no eléctricas. Si la inicialización no es realizada correctamente las variables de estado no permanecen en el valor que fueron inicializadas, cambiando durante la simulación en estado estable. La Figura 3.27 muestra el sentido del proceso de inicialización de los componentes del aerogenerador con DFIG.

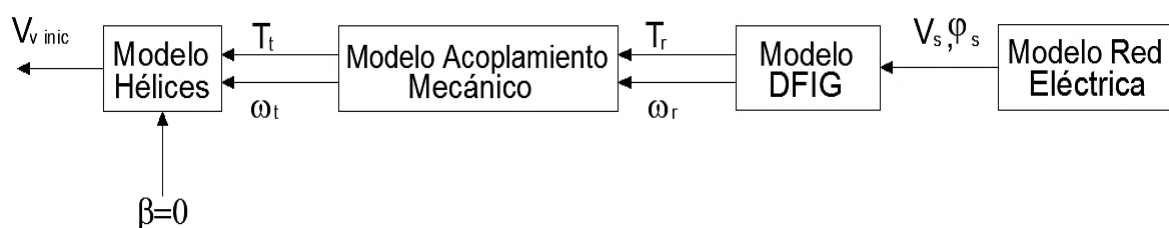


Figura 3.27 Esquema del proceso de inicialización del aerogenerador con DFIG

En la inicialización, el sentido de algunas variables es opuesto al sentido que tienen durante la operación en estado estable, dinámico y transitorio. Los modelos son inicializados uno tras otro comenzando por el modelo de la red eléctrica, modelo del DFIG, luego el modelo del acoplamiento mecánico, para seguir después con el modelo de las hélices y finalmente obtener la velocidad del viento inicial.

3.3.1 FLUJO DE POTENCIA DE LA RED ELÉCTRICA

En el presente estudio el aerogenerador con DFIG está conectado a una barra infinita a través de un transformador elevador de voltaje y una línea de transmisión como se observa en la Figura 3.28.

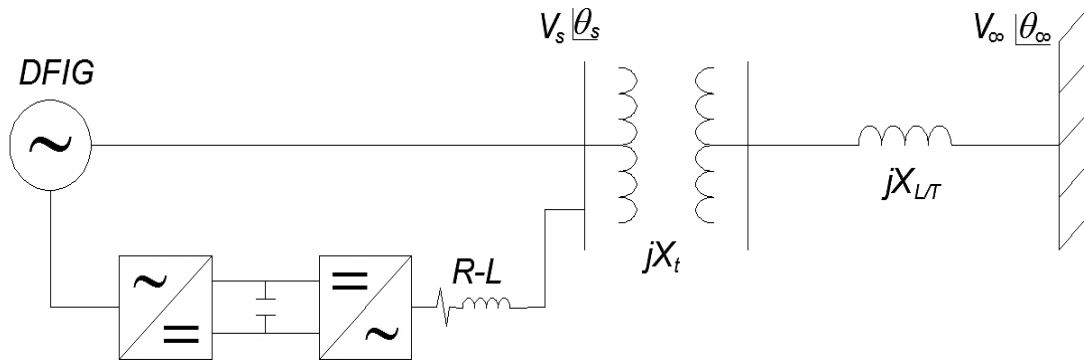


Figura 3.28 Esquema del DFIG conectado a la red eléctrica

Para resolver el flujo de potencia de la red eléctrica es necesario conocer como dato el voltaje de la barra infinita en magnitud V_∞ y en ángulo θ_∞ , y la potencia activa P_{red} y reactiva Q_{red} que el DFIG inyecta a la red. Las ecuaciones del flujo $S_{s\infty}$ se presentan a continuación:

$$S_{s\infty} = V_s \angle \theta_s \cdot \left[\frac{V_s \angle \theta_s - V_\infty \angle \theta_\infty}{j \cdot (X_t + X_{L/T})} \right]^* \quad (3.168)$$

$$P_{red} + j \cdot Q_{red} = \frac{V_s^2 - V_s \cdot V_\infty \angle \theta_{s\infty}}{-j \cdot (X_t + X_{L/T})} \quad (3.169)$$

$$P_{red} + j \cdot Q_{red} = j \cdot \frac{1}{(X_t + X_{L/T})} \cdot (V_s^2 - V_s \cdot V_\infty \angle \theta_{s\infty}) \quad (3.170)$$

$$P_{red} = \frac{1}{(X_t + X_{L/T})} \cdot V_s \cdot V_\infty \cdot \sin \theta_{s\infty} \quad (3.171)$$

$$Q_{red} = \frac{1}{(X_t + X_{L/T})} \cdot [V_s^2 - V_s \cdot V_\infty \cdot \cos \theta_{s\infty}] \quad (3.172)$$

Siendo $\theta_{s\infty} = \theta_s - \theta_\infty$. Resolviendo las ecuaciones (3.171) y (3.172) se obtienen las variables V_s y θ_s en la barra de generación.

3.3.2 CÁLCULO DE CONDICIONES EN ESTADO ESTABLE DEL DFIG

La Figura 3.29 muestra el circuito equivalente monofásico del DFIG sin considerar las pérdidas de potencia en el núcleo, al aplicar la ley de voltajes de Kirchhoff se deducen las ecuaciones (3.173) y (3.174).

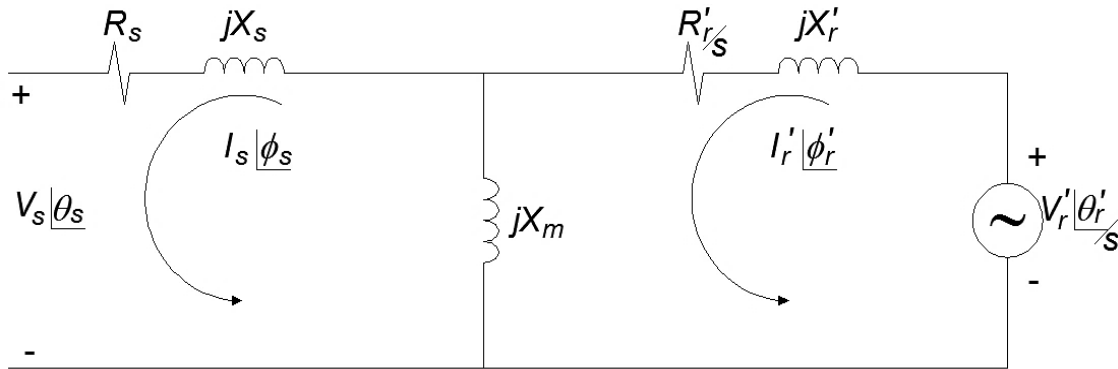


Figura 3.29 Circuito equivalente monofásico del DFIG despreciando las pérdidas en el núcleo

$$-V_s \angle \theta_s - j \cdot X_m \cdot (I_s \angle \phi_s + I'_r \angle \phi'_r) + (R_s + j \cdot X_s) \cdot I_s \angle \phi_s = 0 \quad (3.173)$$

$$V'_r \angle \theta'_r - I'_r \angle \phi'_r \cdot \left(\frac{R'_r}{s} + j \cdot X'_r \right) - j \cdot X_m \cdot I'_r \angle \phi'_r + j \cdot X_m \cdot I_s \angle \phi_s \quad (3.174)$$

Separando las partes real e imaginaria de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$V_s \cdot \cos \theta_s + R_s \cdot I_s \cdot \cos \phi_s - (X_s + X_m) \cdot I_s \cdot \sin \phi_s + X_m \cdot I'_r \cdot \sin \phi'_r = 0 \quad (3.175)$$

$$V_s \cdot \sin \theta_s + R_s \cdot I_s \cdot \sin \phi_s + (X_s + X_m) \cdot I_s \cdot \cos \phi_s - X_m \cdot I'_r \cdot \cos \phi'_r = 0 \quad (3.176)$$

$$V'_r \cdot \cos \theta'_r - s \cdot X_m \cdot I_s \cdot \sin \phi_s - R'_r \cdot I'_r \cdot \cos \phi'_r + s \cdot (X'_r + X_m) \cdot I'_r \cdot \sin \phi'_r = 0 \quad (3.177)$$

$$V'_r \cdot \sin \theta'_r + s \cdot X_m \cdot I_s \cdot \cos \phi_s - R'_r \cdot I'_r \cdot \sin \phi'_r - s \cdot (X'_r + X_m) \cdot I'_r \cdot \cos \phi'_r = 0 \quad (3.178)$$

Las expresiones correspondientes a la potencia que el DFIG inyecta a la red eléctrica son:

$$P_{red} - V_s \cdot I_s \cdot \cos \theta_s + V'_r \cdot I'_r \cdot \cos \theta'_r = 0 \quad (3.179)$$

$$Q_{red} - V_s \cdot I_s \cdot \sin \theta_s = 0 \quad (3.180)$$

La ecuación (3.181) considera que la potencia mecánica es la suma de la potencia que el estator y rotor inyectan a la red, más la potencia de pérdidas en los devanados.

$$P_m - V_s \cdot I_s \cdot \cos \theta_s - V_r' \cdot I_r' \cdot \cos \theta_r' - (R_s \cdot I_s^2 + R_r' \cdot I_r'^2) = 0 \quad (3.181)$$

Finalmente, con el propósito de tener una expresión matemática que relacione la potencia mecánica del generador y el deslizamiento se plantea la siguiente ecuación:

$$P_m = k_0 \cdot (1 - s)^7 \quad (3.182)$$

Para determinar las condiciones en estado estable del generador de inducción doblemente alimentado se resuelven las ecuaciones (3.175) a (3.181), cuyas incógnitas son: V_r' , θ_r' , I_r' , ϕ_r' , I_s , ϕ_s y s . Las condiciones iniciales seleccionadas para las variables son: 0,1; 0,1; 1; 0,1; 0,1; 1 y 0, respectivamente [25].

Al conocer las magnitudes y los ángulos de los voltajes del estator y del rotor se puede reemplazar en las ecuaciones diferenciales (3.113) a (3.120) igualadas a cero, para determinar las condiciones iniciales de los enlaces de flujo por segundo $\psi^{(0)}$, siendo éstas las variables de estado del modelo de la máquina de inducción.

3.3.3 INICIALIZACIÓN DEL MODELO DE ACOPLAMIENTO MECÁNICO

Las ecuaciones del modelo de acoplamiento mecánico están implementadas en unidades reales, es por ello que los datos del flujo de potencia deben ser cambiados del sistema en por unidad utilizando las siguientes expresiones:

$$P_r = P_{r,pu} \cdot S_b \quad [W] \quad (3.183)$$

$$\omega_r = \omega_{r,pu} \cdot \omega_b \quad [rad \text{ mec}/s] \quad (3.184)$$

Las condiciones iniciales se obtienen reemplazando las derivadas por cero en las ecuaciones del modelo.

$$\frac{d\theta_k}{dt} = 0 \quad (3.185)$$

$$\omega_t^{(0)} = \frac{\omega_r^{(0)}}{k} \quad (3.186)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = 0 \quad (3.187)$$

$$T_t^{(0)} = T_{eje}^{(0)} \quad (3.188)$$

$$T_{eje} = D \cdot 0 + K \cdot \theta_k \quad (3.189)$$

$$\theta_k^{(0)} = \frac{T_{eje}^{(0)}}{K} \quad (3.190)$$

$$T_{eje}^{(0)} = \frac{k \cdot P_r^{(0)}}{\omega_r^{(0)}} \quad (3.191)$$

Debido a que la derivada de la posición angular de la turbina θ_t no puede ser cero, se debe asignar un valor inicial apropiado.

3.3.4 INICIALIZACIÓN DEL MODELO AERODINÁMICO

Con los valores iniciales de la velocidad $\omega_t^{(0)}$ y del torque de la turbina $T_t^{(0)}$ se determina la velocidad del viento media para la condición de generación empleada en el flujo de potencia. Para ello se despeja la variable velocidad del viento media $v_{v,media}$ de la siguiente ecuación:

$$T_t^{(0)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_p^{(0)} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v_{v,media}^2}{\lambda^{(0)}} [N \cdot m] \quad (3.192)$$

En el esquema de la Figura 3.30 se muestran todos los modelos de los componentes del aerogenerador con DFIG y la red eléctrica con los sentidos de las principales variables de entrada y salida durante la operación normal del sistema.

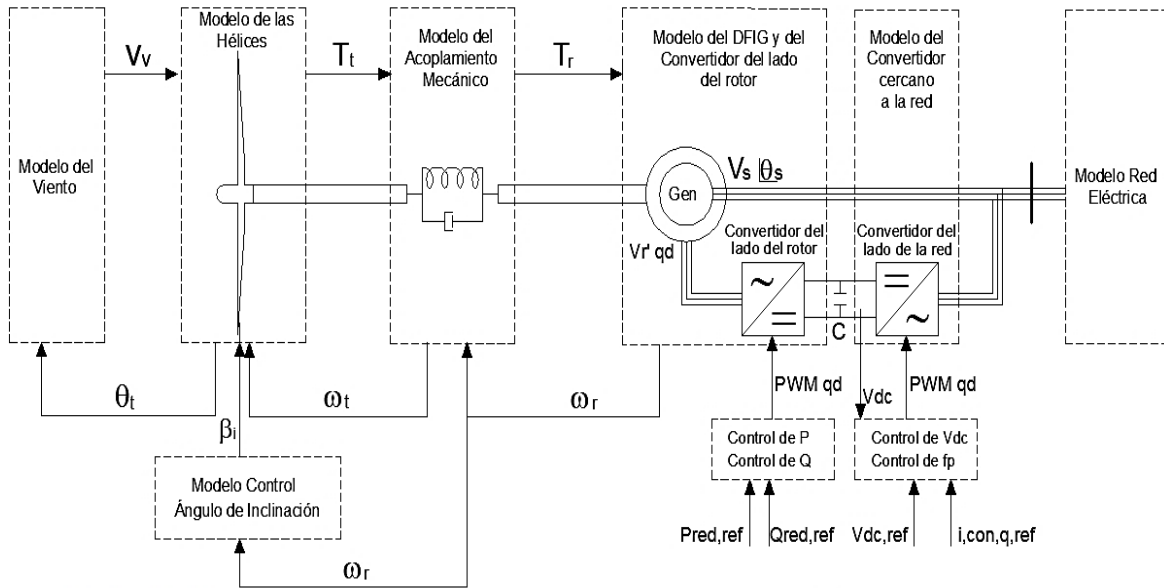


Figura 3.30 Sentido de las principales variables del aerogenerador con DFIG y de la red eléctrica durante operación normal

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de observar la respuesta de los componentes mecánicos, eléctricos y de control del aerogenerador con DFIG a través del programa realizado en Matlab, se emplean velocidades de viento determinísticas y probabilísticas incidentes sobre un aerogenerador de 2 MW, cuya información técnica se detalla en los Anexos. Además, se verifica la inicialización de los componentes y se compara el desempeño entre el modelo del aerogenerador realizado en este estudio con el modelo básico existente en la biblioteca de Matlab.

4.1 VERIFICACIÓN DE LA INICIALIZACIÓN DEL SISTEMA

Considerando que el aerogenerador con DFIG se encuentre operando a potencia nominal $P_{red} = 2 \text{ MW}$ y $Q_{red} = 0,6 \text{ MVar}$ y que el voltaje en la barra infinita sea $V_{\infty} \angle \theta_{\infty} = 1 \angle 0^{\circ}$ en p.u., el flujo de potencia $S_{s\infty}$ establece que el voltaje en la barra de generación sea $V_s \angle \theta_s = 1,037 \angle 22,9^{\circ}$ en p.u. Resolviendo el conjunto de ecuaciones no lineales (3.175) a (3.175), se obtienen como resultados principales el voltaje del rotor $V_r' \angle \theta_r' = 0,128 \angle 222,7^{\circ}$ y el deslizamiento $s = -0,998$ en p.u. Obteniéndose de tal manera los datos necesarios para la solución de las ecuaciones diferenciales del modelo del generador de inducción, estableciendo las derivadas a cero para determinar las condiciones iniciales. Luego se determina el valor del torque electromagnético T_e y considerando que durante la operación en estado estable del DFIG el torque electromagnético es igual al torque mecánico, y con el valor de la velocidad del rotor calculado a partir del deslizamiento $n_{r,nom} = 1979,743 \text{ rpm}$ se determina la potencia mecánica del generador $P_m = 2,029 \text{ MW}$.

Finalmente, se debe continuar con el procedimiento indicado para la inicialización de los modelos de acoplamiento mecánico y de las hélices considerando un

ángulo de inclinación $\beta_i = 0^0$. Los resultados del proceso de inicialización se observan en las Figura 4.1 y Figura 4.2.

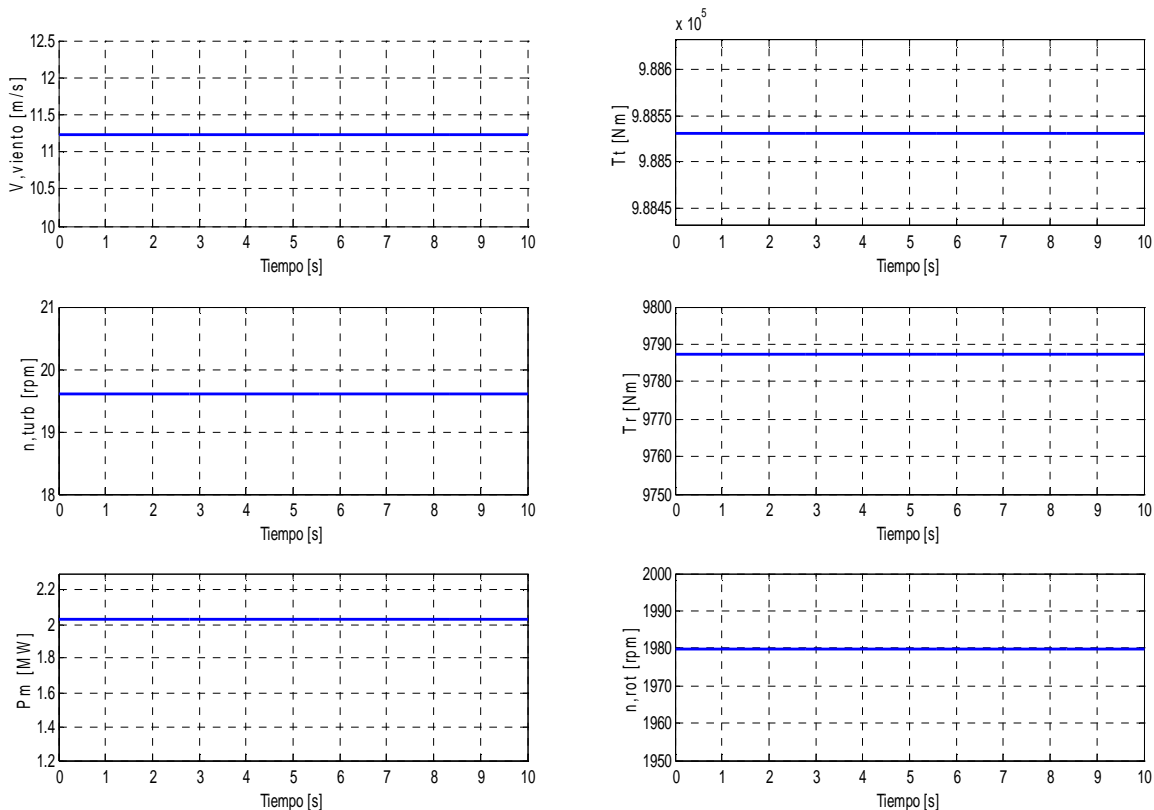


Figura 4.1 Resultados de la inicialización para $P_{red} = 2 MW$ y $Q_{red} = 0,6 MVar$

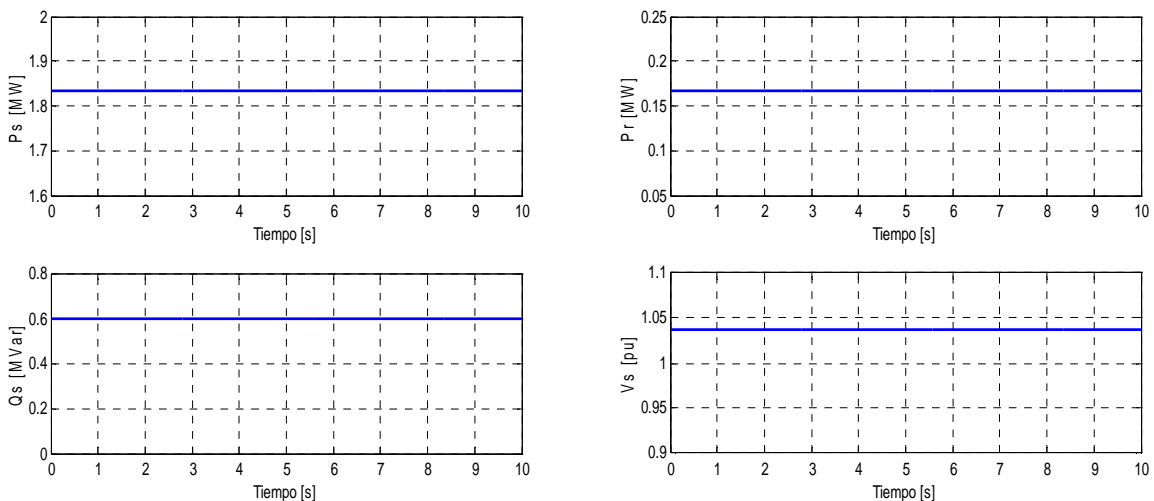


Figura 4.2 Resultados de la inicialización para $P_{red} = 2 MW$ y $Q_{red} = 0,6 MVar$

En el gráfico anterior se verifica que durante la operación en modo supersincrónico el DFIG entrega potencia activa a la red eléctrica a través del estator y del rotor.

Para analizar el comportamiento del DFIG operando en modo subsíncrono se consideran los siguientes valores de potencias de generación: $P_{red} = 0,35 \text{ MW}$ y $Q_{red} = 0,6 \text{ MVar}$. Del proceso de inicialización se obtienen los siguientes resultados: $V_s \angle \theta_s = 1,108 \angle 3,7^\circ$ en p.u., $V_r' \angle \theta_r' = 0,191 \angle 9^\circ$ en p.u., $s = 0,142$ en p.u., $n_r = 1544,533 \text{ rpm}$ y $P_m = 0,357 \text{ MW}$. Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

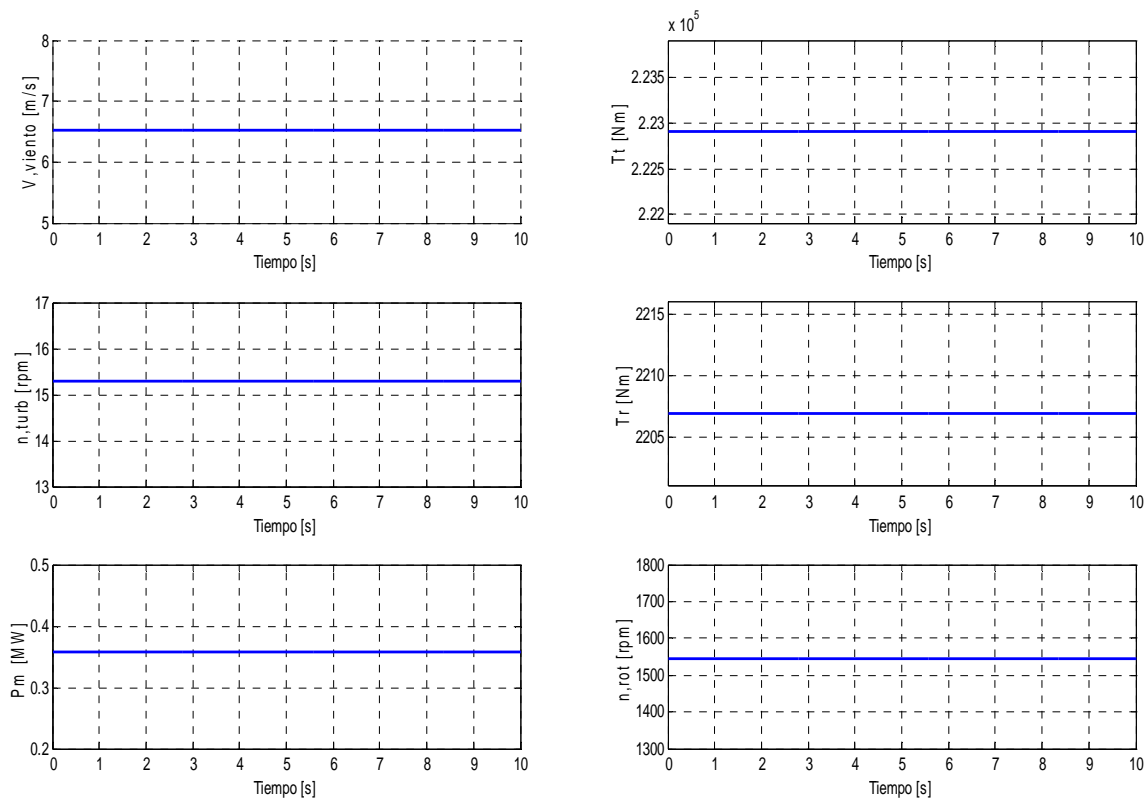


Figura 4.3 Resultados de la inicialización para $P_{red} = 0,35 \text{ MW}$ y $Q_{red} = 0,6 \text{ MVar}$

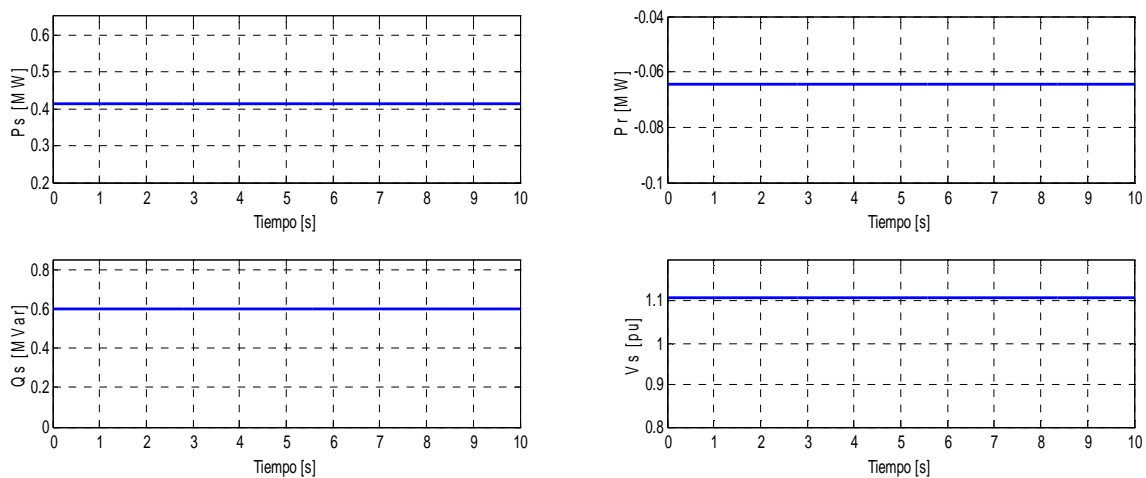


Figura 4.4 Resultados de la inicialización para $P_{red} = 0,35 \text{ MW}$ y $Q_{red} = 0,6 \text{ MVar}$

Debido a que el DFIG está operando en modo subsincrónico el deslizamiento es positivo, la velocidad del rotor es menor que la velocidad sincrónica y el rotor absorbe potencia activa de la red eléctrica.

4.2 DESEMPEÑO DEL SISTEMA BAJO VELOCIDADES DE VIENTO DETERMINÍSTICAS

En la Figura 4.5 se observa el comportamiento de las principales variables del aerogenerador con DFIG frente a incrementos en la velocidad del viento de 1 m/s, cada 15 segundos desde una velocidad inicial de 9,11 m/s hasta una velocidad final de 12,11 m/s. El control del ángulo de inclinación de las hélices permanece en modo pasivo hasta que la velocidad del viento supera su valor nominal (11,24 m/s), restringiendo la velocidad del rotor y la potencia eléctrica de salida a sus valores nominales 1980 rpm y 2 MW, respectivamente. El incremento del ángulo de inclinación afecta directamente al coeficiente de potencia, disminuyéndose el aprovechamiento de la energía cinética del viento. La estrategia de control del convertidor del lado del rotor permite que la potencia reactiva generada por el DFIG mantenga casi su mismo valor durante las variaciones de la velocidad del viento. De igual manera, la estrategia de control del convertidor cercano a la red eléctrica obliga al voltaje del enlace en DC a permanecer en casi su valor nominal $1300 V / (\sqrt{2} \cdot 690 V) = 1,33 p.u.$ Finalmente, se observa que el voltaje de la barra a la cual está conectado el DFIG disminuye debido a la variación en la potencia de generación.

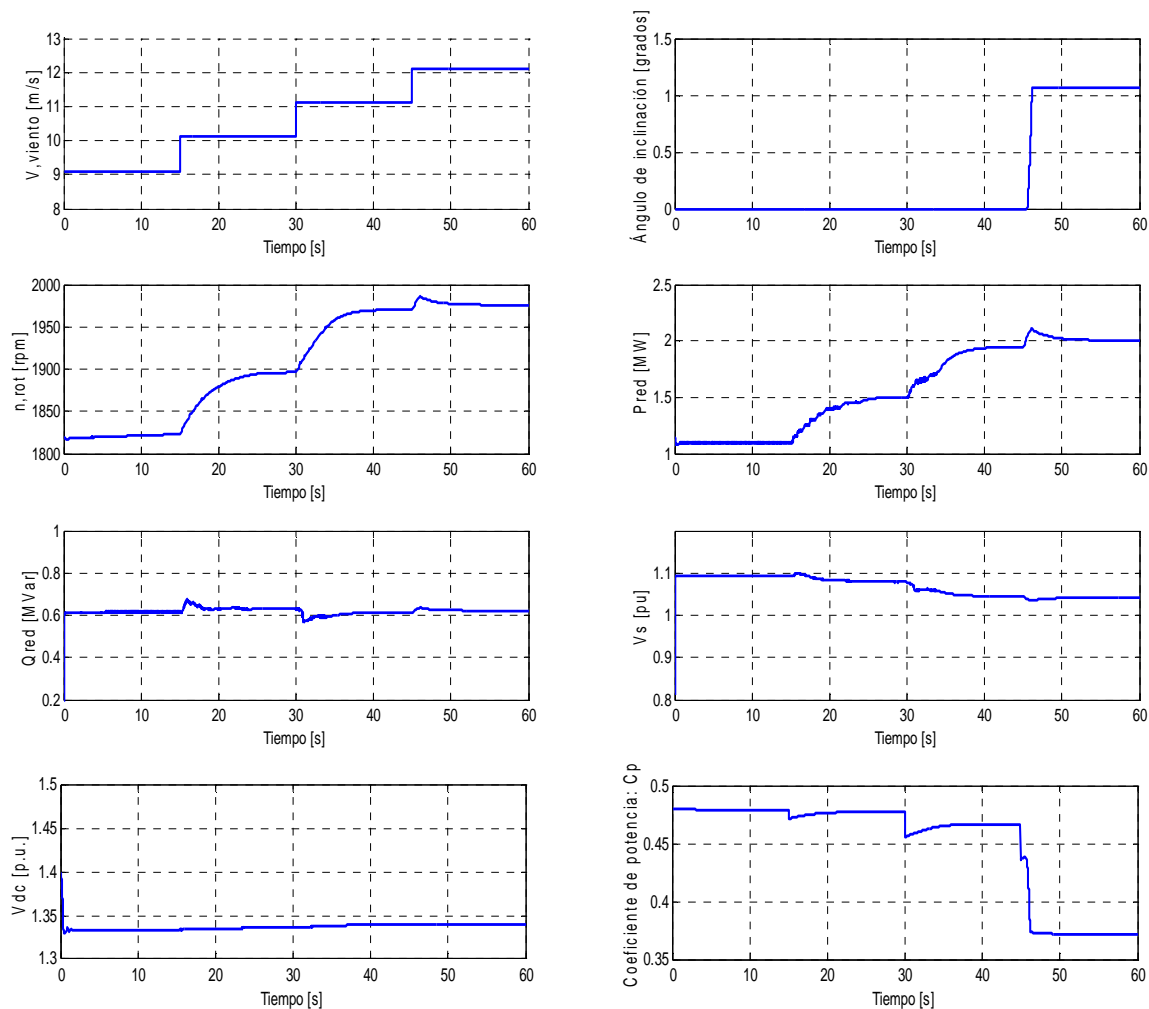


Figura 4.5 Respuesta del aerogenerador con DFIG: Velocidad del viento, ángulo de inclinación, velocidad del rotor, potencia activa, potencia reactiva, voltaje del estator, voltaje del enlace en DC y coeficiente de potencia para cambios en la velocidad del viento en pasos de 1 m/s desde 9,11 m/s hasta 12,11 m/s

Para ilustrar la operación del aerogenerador con DFIG en los modos subsincrónico y supersincrónico, al inicio de la simulación se considera una velocidad del rotor menor a la sincrónica de 1727 rpm ($s=0,04$ en p.u.). A los 15 s la velocidad del viento sufre un incremento de 1 m/s, lo cual provoca que la velocidad del rotor vaya incrementándose y supere la velocidad sincrónica (1800 rpm), consecuentemente el valor del deslizamiento pasa a ser negativo. Como se observa en la Figura 4.6, el cambio de modo de operación del DFIG de subsincrónico a supersincrónico produce una perturbación en la potencia reactiva, voltaje del estator y voltaje del enlace en DC; variables relacionadas directamente con el voltaje del rotor.

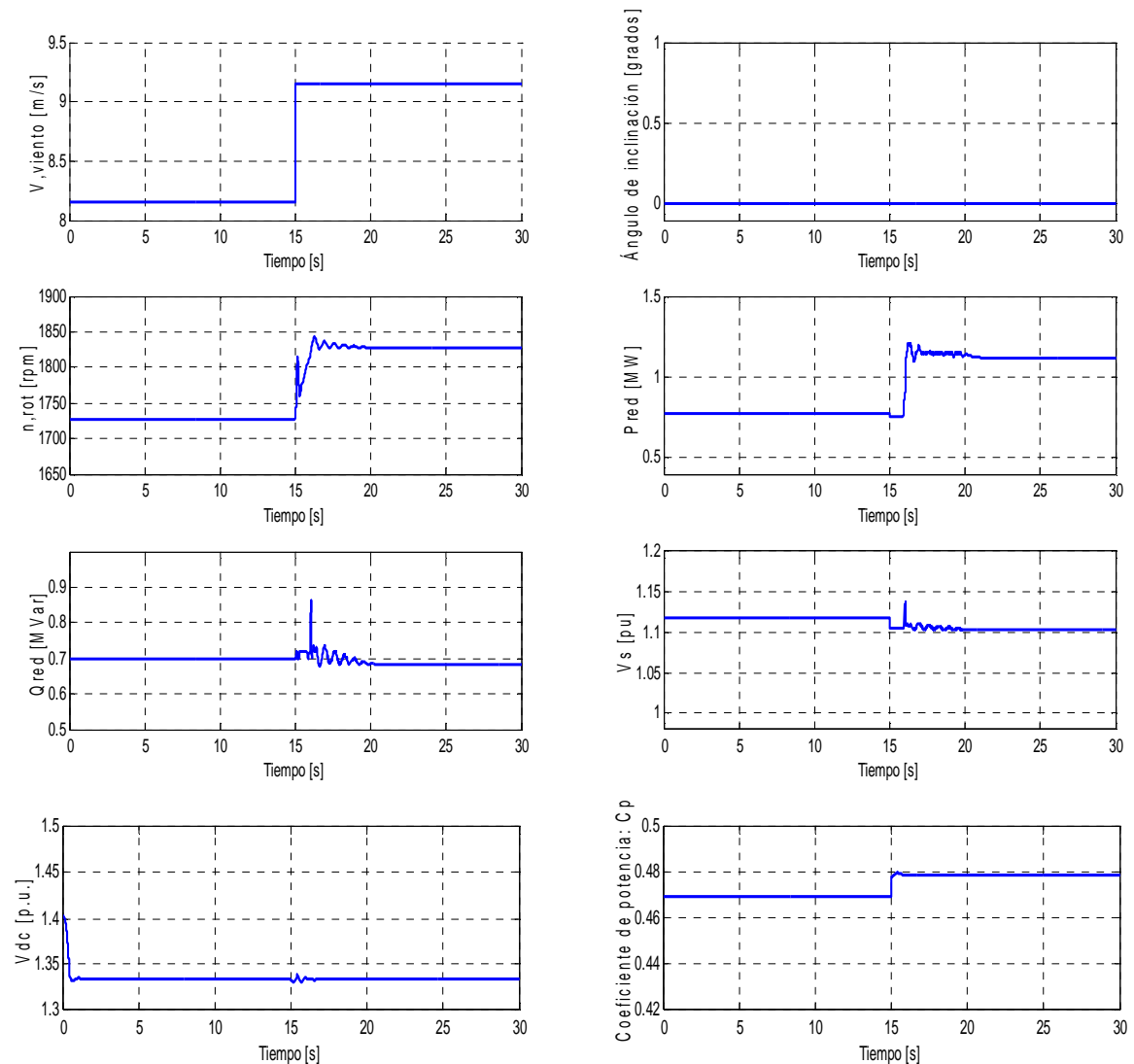


Figura 4.6 Respuesta del aerogenerador con DFIG: Velocidad del viento, ángulo de inclinación, velocidad del rotor, potencia activa, potencia reactiva, voltaje del estator, voltaje del enlace en DC y coeficiente de potencia cuando la velocidad del viento cambia de 8,15 m/s a 9,15 m/s

Para comparar el desempeño entre el modelo del sistema aerogenerador con DFIG realizado en este estudio con el existente en la biblioteca de Matlab mostrado en la Figura 4.7, se modificaron los parámetros mecánicos y eléctricos del bloque llamado Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator inicialmente empleado para simular una planta eólica de seis aerogeneradores de 1,5 MW de potencia nominal cada uno de ellos.

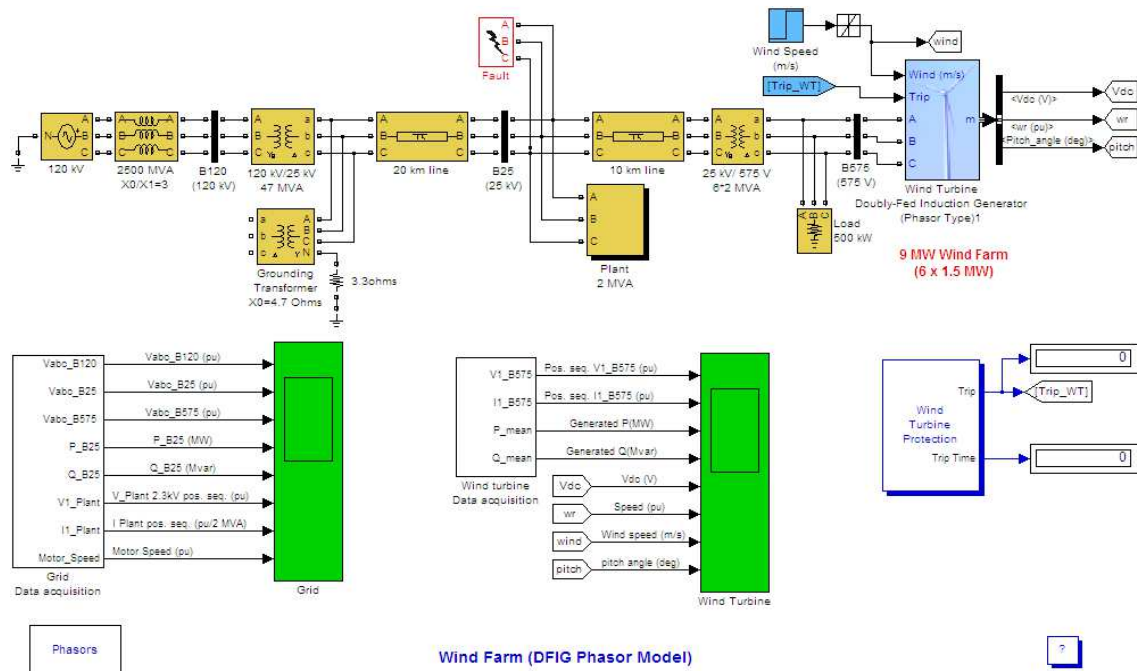


Figura 4.7 Modelo básico del aerogenerador con DFIG de Matlab

Las Figura 4.8 y Figura 4.9 muestran los resultados de las simulaciones correspondientes al programa realizado en el presente trabajo y al modelo básico de Matlab, respectivamente. Debido a que las condiciones iniciales del modelo básico de Matlab corresponden a la simulación de la planta eólica antes descrita, toma aproximadamente 6 s alcanzar el estado estable para las nuevas condiciones de generación 1,48 MW y 0,41 MVar. Esto sucede también en el programa desarrollado, ya que al inicio de la simulación se requiere un intervalo de tiempo para que el convertidor de frecuencia y las estrategias de control suministren al rotor un voltaje cercano al calculado en el proceso de inicialización.

La velocidad del viento experimenta un incremento instantáneo de 5 m/s luego de 15 s iniciada la simulación, provocando el incremento gradual de la velocidad del rotor y de la potencia activa entregada a la red eléctrica. Cuando ambas variables sobrepasan sus valores nominales 1980 rpm y 2 MW respectivamente, los controladores de velocidad y de potencia activa cambian de estado pasivo a activo. Para el caso del modelo básico del aerogenerador con DFIG de Matlab, se observa que los tiempos de regulación de la velocidad del rotor y de la potencia activa son aproximadamente 3 y 2 s respectivamente, y que el amortiguamiento del acoplamiento mecánico produce una oscilación en la velocidad transmitida al

eje del rotor del generador, incidiendo directamente sobre control del ángulo de inclinación de las hélices. Mientras, que en los gráficos obtenidos de las variables antes mencionadas con el programa desarrollado, se evidencia que los tiempos de regulación son aproximadamente 6 y 5 s respectivamente. El ángulo de inclinación resultante varía entre 13° y 14° para ambos modelos. El incremento de la velocidad del viento afecta también al voltaje del enlace en DC, experimentando una pequeña variación, que a través de las estrategias de control del convertidor cercano a la red eléctrica es corregida en un tiempo no mayor a 4 s en ambos modelos.

En relación a la potencia reactiva generada por el DFIG y considerando el gráfico resultante del programa desarrollado, durante el incremento de la velocidad del viento se produce un ligero incremento respecto al valor inicial, observándose que las estrategias de control del convertidor del lado del rotor tratan de reducir dicha variación. Considerando los mismos antecedentes para el modelo básico de Matlab, la variación de la potencia reactiva es corregida hasta regresar a su valor inicial, siendo las estrategias de control de este modelo más precisas que las del programa desarrollado.

El voltaje de la barra de generación disminuye de 1,04 a 1,01 en p.u para el primer caso, mientras que para el segundo cambia de 1,036 a 1,022 en p.u. Siendo estos resultados directamente dependientes de la regulación de la potencia reactiva que el generador inyecta a la red eléctrica.

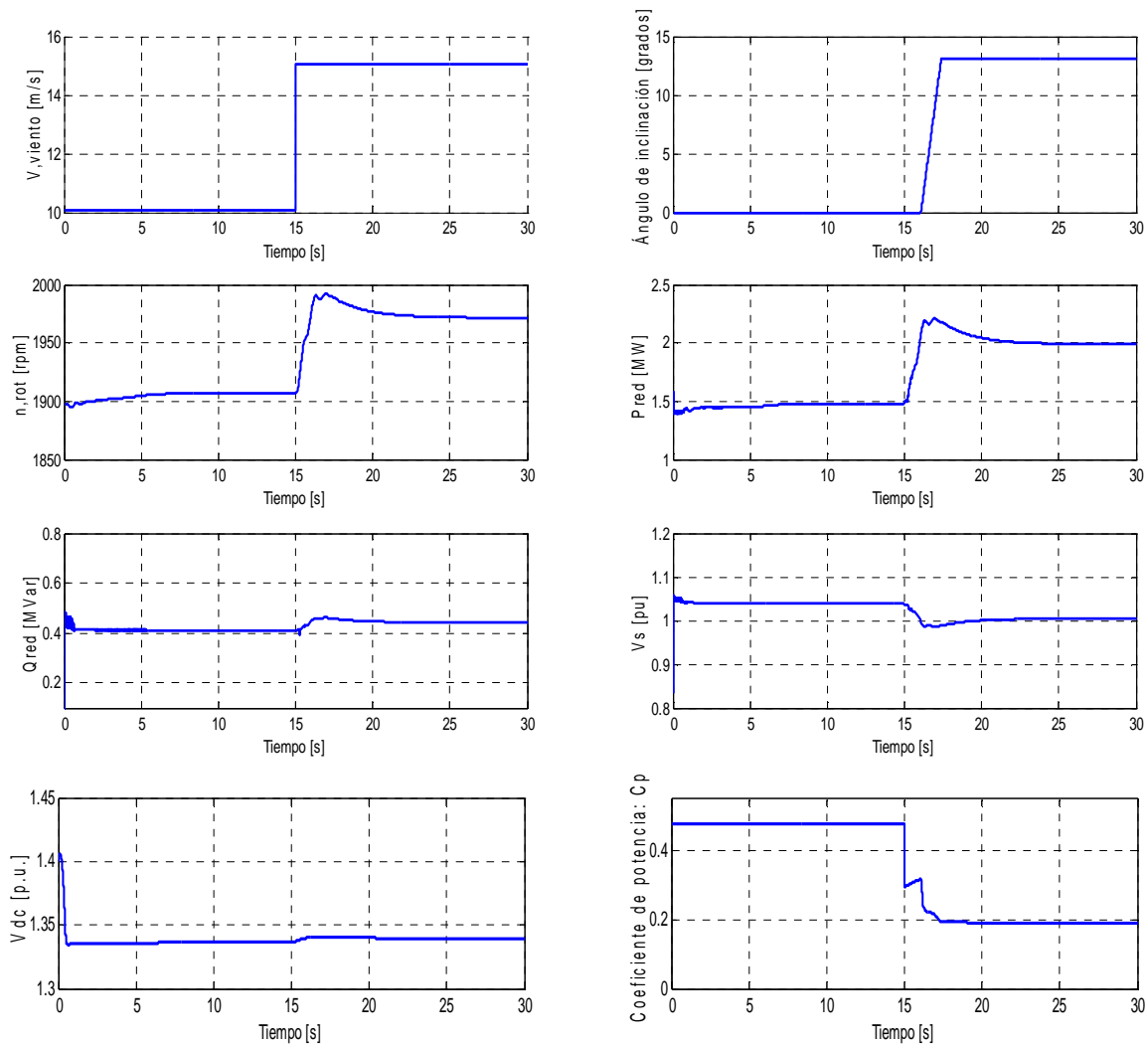


Figura 4.8 Respuesta del aerogenerador con DFIG: Velocidad del viento, ángulo de inclinación, velocidad del rotor, potencia activa, potencia reactiva, voltaje del estator, voltaje del enlace en DC y coeficiente de potencia cuando la velocidad del viento cambia de 10 m/s a 15 m/s

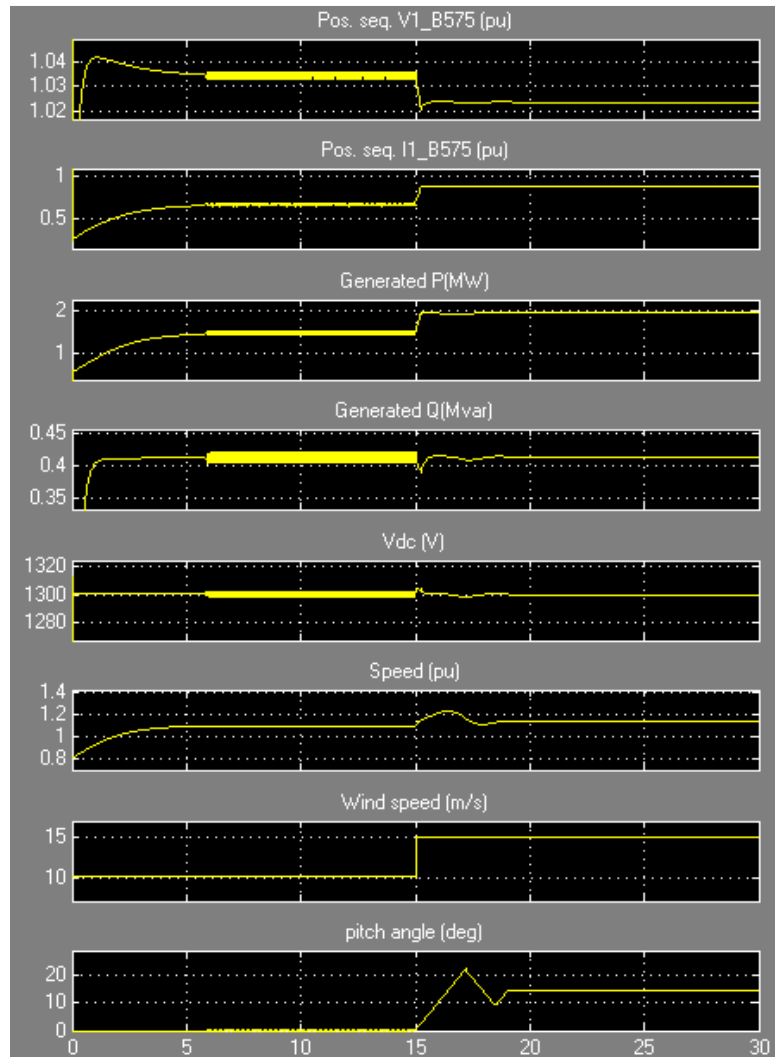


Figura 4.9 Respuesta del aerogenerador con DFIG: Voltaje del estator, corriente del generador, potencia activa, potencia reactiva, voltaje del enlace en DC, velocidad del rotor, velocidad del viento y ángulo de inclinación para un incremento en la velocidad del viento de 10 m/s a 15 m/s

4.3 DESEMPEÑO DEL SISTEMA BAJO VELOCIDADES DE VIENTO PROBABÍLISTICAS

En la Figura 4.10 se presenta la simulación del aerogenerador con DFIG operando a carga parcial, sujeto a un viento probabilístico con una velocidad promedio de 10,1 m/s. El control del ángulo de inclinación permanece en estado pasivo, ya que no se supera la velocidad nominal del rotor. La velocidad del rotor y la potencia activa siguen un comportamiento similar a las variaciones del viento, siendo ambas variables optimizadas al emplear la curva de la potencia activa en función de la velocidad del rotor mostrada en la parte de Anexos.

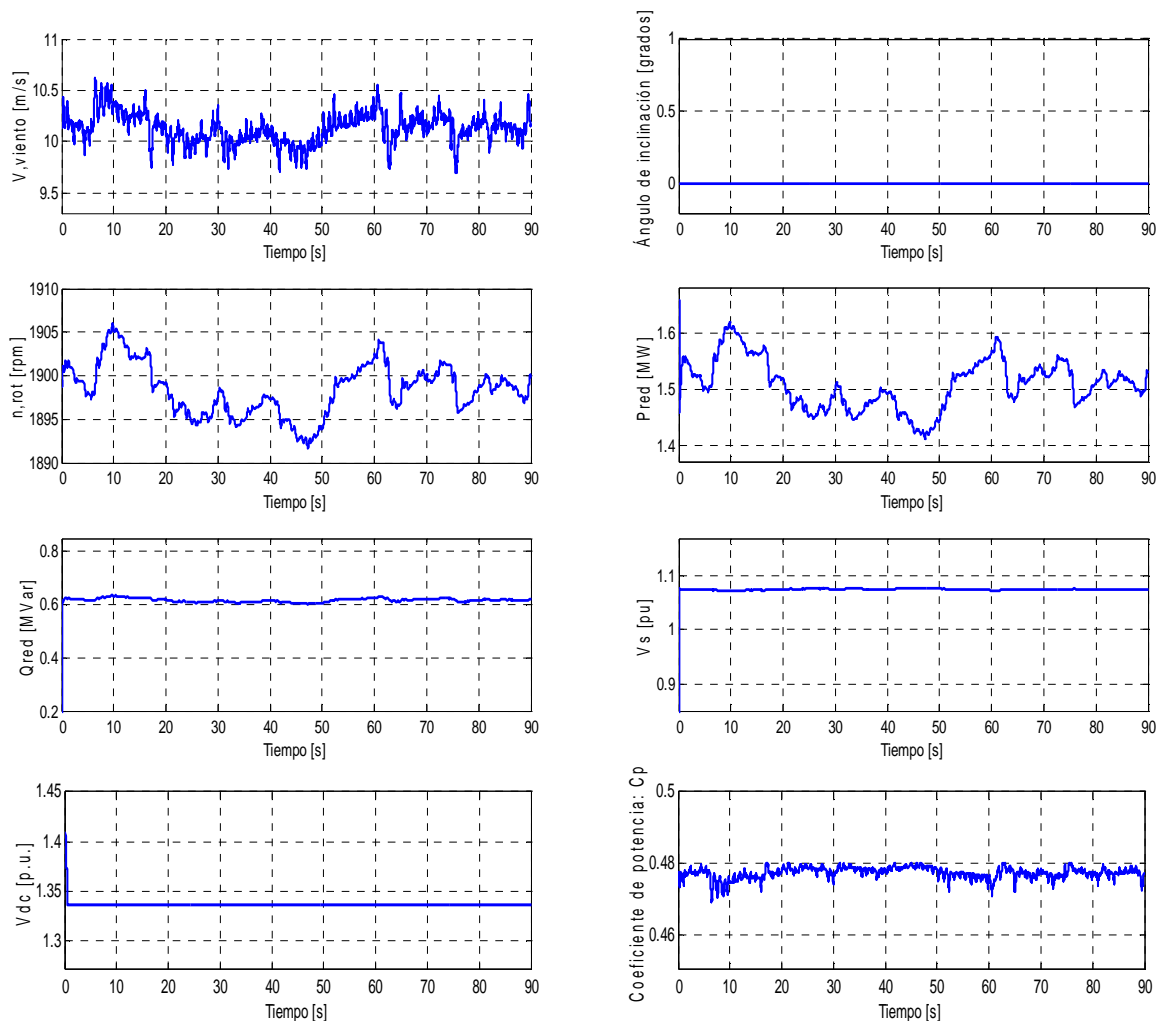


Figura 4.10 Respuesta del aerogenerador con DFIG: Velocidad del viento, ángulo de inclinación, velocidad del rotor, potencia activa, potencia reactiva, voltaje del estator, voltaje del enlace en DC y coeficiente de potencia bajo un viento probabilístico con velocidad media de 10,1 m/s

4.4 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTE FALLAS DE CORTOCIRCUITO

En la siguiente simulación se analiza el comportamiento del aerogenerador con DFIG ante una falla cortocircuito trifásico en la barra de generación, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 4.11. Durante la simulación se considera a la velocidad del viento constante, ya que el tiempo de duración de la perturbación (0,15 s) es pequeño en comparación con el tiempo de cambio de la velocidad del viento. El DFIG se encuentra operando a condiciones nominales 2 MW y 0,5 MVAR, las estrategias de control del generador son las empleadas durante su operación normal.

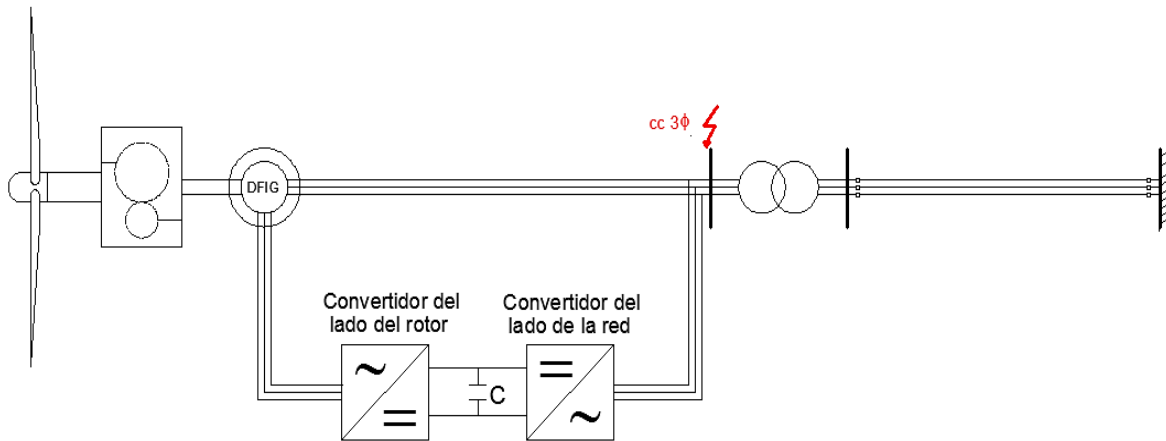


Figura 4.11 Aerogenerador con DFIG sometido a falla de cortocircuito trifásico en la barra de generación

Como se aprecia en la Figura 4.12, el voltaje de la barra de generación cae de 1,02 a 0 en p.u. a $t=10$ s, provocando que la potencia activa y la potencia reactiva disminuyan a cero durante la falla. Al existir únicamente torque mecánico se produce la aceleración del generador, incrementándose la velocidad del rotor. Cuando ésta sobrepasa su valor nominal, el control del ángulo de inclinación actúa para evitar la aceleración de la máquina. Luego que la falla de cortocircuito ha sido despejada a $t=10,15$ s, las estrategias de control y el convertidor estático de frecuencia se encargan de restablecer las condiciones de operación de estado estable.

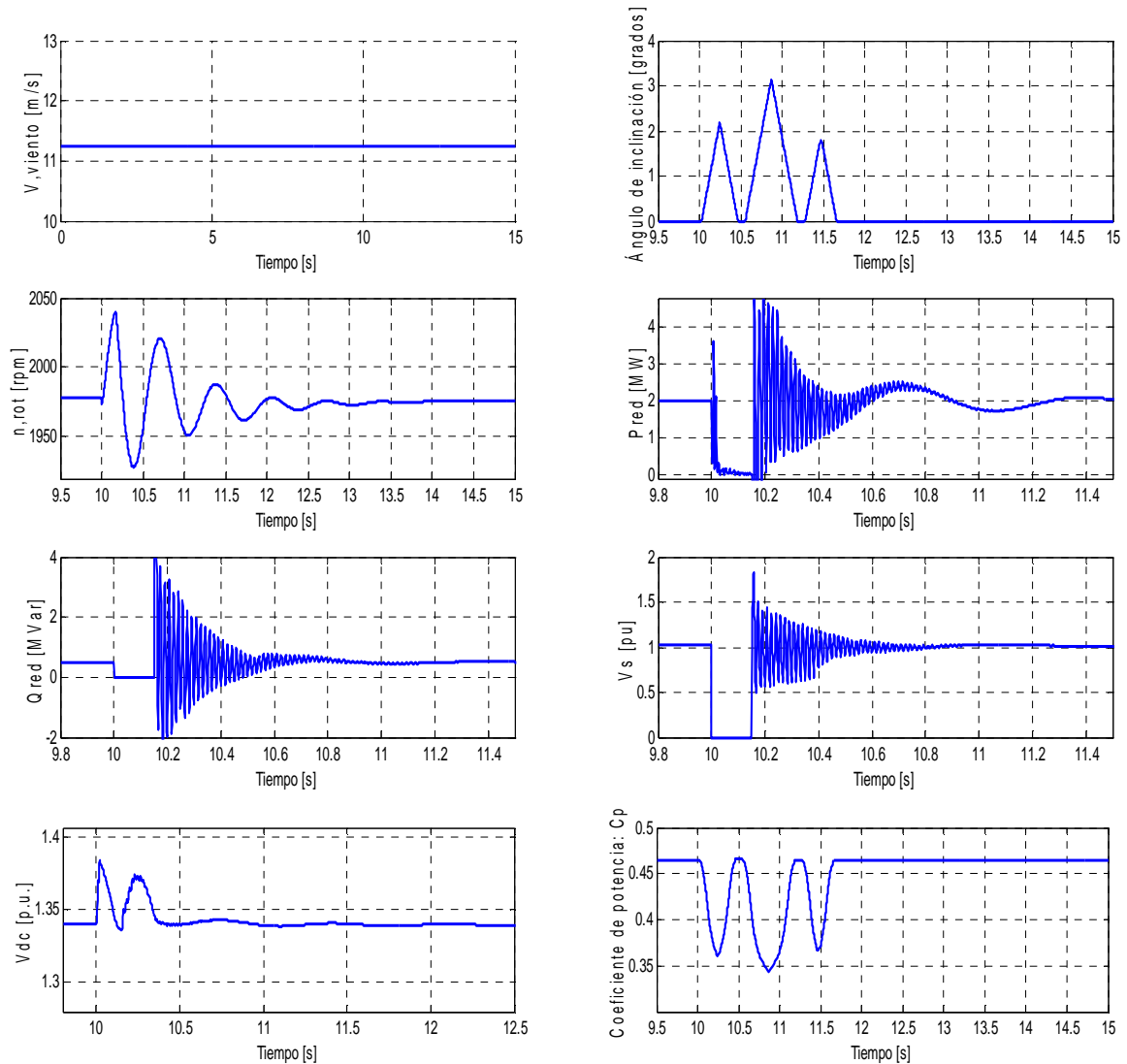


Figura 4.12 Falla de cortocircuito trifásico en la barra de generación: velocidad del viento, ángulo de inclinación, velocidad del rotor, potencia activa, potencia reactiva, voltaje del estator, voltaje del enlace en DC y coeficiente de potencia

Como se explicó anteriormente la falla de cortocircuito provoca la aceleración del DFIG, sometiendo a los componentes mecánicos a grandes esfuerzos. Es por ello, la importancia de modelar el acoplamiento mecánico del aerogenerador como dos masas unidas por un eje flexible, ya que esto permite conocer de manera más precisa el comportamiento del sistema durante eventos transitorios como se observa en la Figura 4.13.

La disminución del voltaje en los terminales del estator a 0 en p.u. durante la falla provoca que el torque electromagnético siga este mismo comportamiento. El incremento del ángulo de inclinación produce que el torque mecánico del rotor

disminuya, claro está; más lentamente que el torque electromagnético y de forma amortiguada por efecto de la constante de amortiguamiento D del modelo de dos masas; provocando también que la velocidad del rotor oscile hasta lograr estabilizarse.

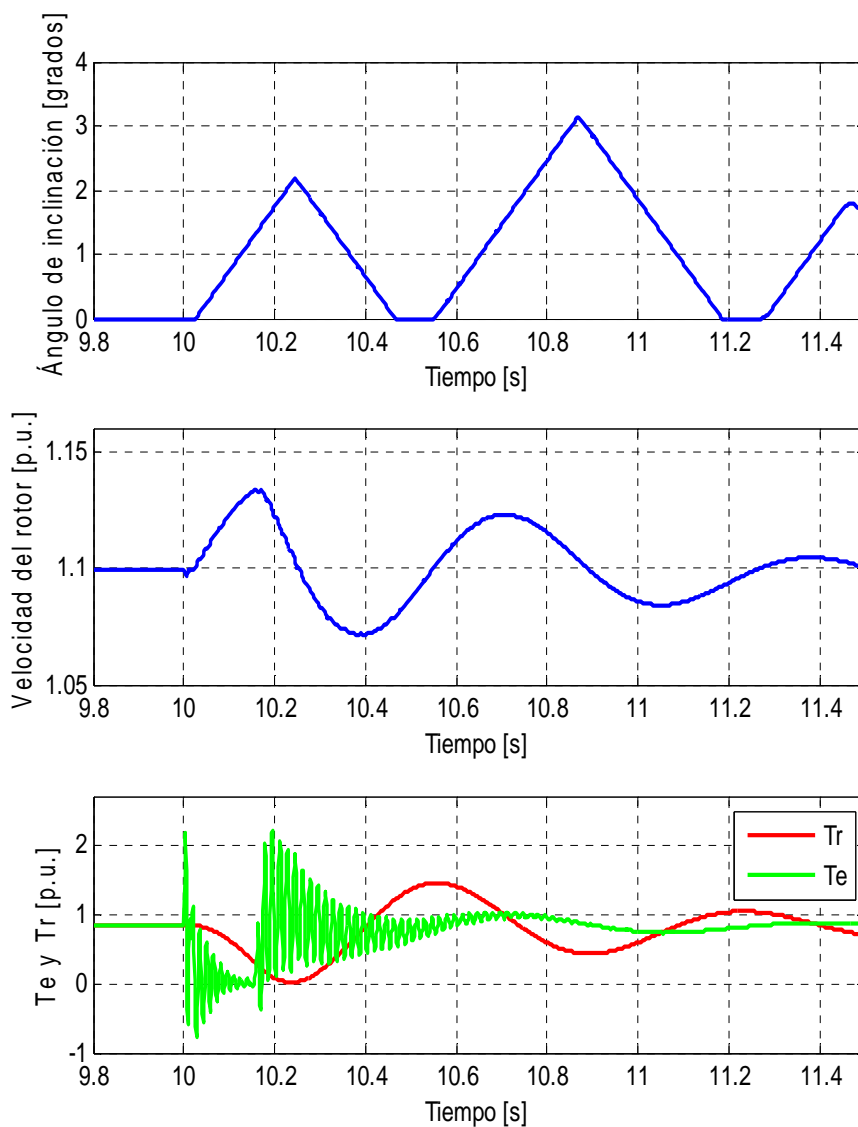


Figura 4.13 Falla de cortocircuito trifásico en la barra de generación: ángulo de inclinación, velocidad del rotor, torque electromagnético y torque del rotor

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El modelo implementado del sistema aerogenerador con DFIG presenta un buen desempeño cuando es sometido a velocidades de viento determinísticas y probabilísticas, logrando a través de las estrategias de control mantener casi constante la potencia reactiva y ajustar la potencia activa en presencia de cambios en la velocidad del viento.
- Se comprobó que la modelación del acoplamiento mecánico del aerogenerador con DFIG como dos masas unidas con eje un flexible en el lado de baja velocidad, permite conocer de manera más precisa el comportamiento de las variables asociadas a los componentes mecánicos durante estado estable y estado transitorio.
- El rango de variación del deslizamiento del generador de inducción doblemente alimentado durante los modos de operación subsincrónico y supersincrónico está determinado por la función matemática que relaciona la potencia mecánica del aerogenerador y el deslizamiento. Considerando el DFIG de 2 MW empleado en el presente estudio, el deslizamiento varía entre 0,24 y -0,1 en p.u. cuando la potencia del generador fluctúa entre 0,15 y 2 MW.
- El proceso de inicialización determina las condiciones iniciales de los componentes del sistema, luego durante la simulación, el convertidor estático de frecuencia y las estrategias de control permiten alcanzar la operación en estado estable del DFIG.

- El modelo desarrollado del aerogenerador con DFIG permite el control de la potencia reactiva de generación, ajustando su valor a la referencia establecida por el usuario; durante cambios en la velocidad del viento experimentó pequeñas variaciones. Mientras que el modelo básico del aerogenerador con DFIG existente en la biblioteca del software Matlab permite un control más preciso de esta variable.
- Ambos modelos implementados en el presente estudio, generador de inducción doblemente alimentado y estrategias de control, utilizan marcos de referencia que giran a velocidad sincrónica; mientras que en el software DigSILENT Power Factory se realiza el modelo del DFIG con el marco de referencia girando a la velocidad del rotor, y el modelo de las estrategias de control con el marco de referencia que gira a velocidad sincrónica. Esto permitió reducir la complejidad del programa desarrollado, ya que no fue necesario realizar transformaciones entre marcos de referencia que giran a distintas velocidades de los modelos en mención.
- Al efectuar la falla de cortocircuito trifásico en la barra de generación, se observó que el tiempo de respuesta de las variables asociadas a los componentes mecánicos del sistema es mayor en comparación con el de las variables correspondientes a los componentes eléctricos.
- Debido a la facilidad de control de la velocidad del rotor, potencia activa y potencia reactiva que posee el aerogenerador con DFIG, y que la capacidad del convertidor estático de frecuencia es generalmente $1/3$ de la capacidad del generador, este tipo de sistema de generación eólica presenta ventajas técnicas y económicas frente al aerogenerador de velocidad variable con generador sincrónico acoplado a la red a través de un convertidor de frecuencia de igual capacidad que el generador.

5.2 RECOMENDACIONES

- Añadir al modelo del control del ángulo de inclinación un bloque Gain Scheduling que permita ajustar la constante proporcional del controlador PI, para compensar las características aerodinámicas no lineales.
- Realizar en futuros trabajos la modelación del DFIG considerando que la falla de cortocircuito se presente en el lado de alto voltaje del transformador o en la línea de transmisión.
- Considerar como proyecto de titulación la construcción del modelo del sistema aerogenerador con DFIG empleando los bloques existentes en Simulink del software Matlab.
- Se recomienda para futuros trabajos de investigación optimizar el algoritmo del programa realizado, debido a que los tiempos de ejecución son extensos comparados con los del modelo básico existente en la librería de Matlab.
- Continuar con el desarrollo de proyectos de titulación relacionados con el análisis en estado estable, dinámico y transitorio de aerogeneradores de velocidad variable, debido al incremento de centrales eólicas en el mundo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Michalke, *Variable Speed Wind Turbines-Modelling, Control and, Impact on Power Systems*, Darmstadt, 2008.
- [2] G. Todeschini, *Wind Energy Conversion Systems Based on DFIG Technology Used as Active Filters: Steady State and Transient Analysis*, Massachusetts, 2010.
- [3] Klaus, Rave, «Global Wind Report Annual Market Update 2012,» 2013.
- [4] V. Mascarós, E. Quiles, E. García, F. Morant y A. Correcher, *Modelo de Viento en Aerogeneradores de Tres Palas para Aplicaciones de Control*, Valencia.
- [5] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N. Cutululis y E. Ceanga, «Wind Energy Conversion Systems,» de *Optimal Control for Wind Energy Systems* , 2008, pp. 9-27.
- [6] J. Mur-Amada y Á. Bayod-Rújula, «Variability of Wind and Wind Power,» de *Wind Power*, Zaragoza, 2010, pp. 289-320.
- [7] H. González Acevedo, *Diseño de un controlador LQR para una Turbina de Velocidad Variable*, Bucaramanga.
- [8] G. R. Calzolari y C. R. Saldaña, *Modelado de una turbina eólica de velocidad fija con ATP*.
- [9] A. Petersson, *Analysis, Modelling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines*, Goteborg, 2005.
- [10] D. Oroño, M. Sapio, G. Terzano y A. Vázquez, *Generación de Energía Eólica con Máquinas Eléctricas de Inducción Doblemente Alimentadas (DFIG)*, Montevideo, 2010.
- [11] G. Roobaert, *Hansen Gear Units for Wind Turbines*, 2009.

- [12] S. o. Lab-Volt, *Wind Turbine Technology*.
- [13] L. Y. Pao y K. Johnson, *A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms*, 2009.
- [14] L. Wang, C. Singh y A. Kusiak, *Wind Power Systems*, 2010.
- [15] E. Salazar, *Modelación digital de un generador de inducción acoplado a una barra infinita*, Quito, 1990.
- [16] S. Lab-Volt, *Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)*, Canadá, 2011.
- [17] D. A. Acuña Morales, *Opciones de Control de Potencia Activa y Reactiva en Aerogeneradores con Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG)*, Santiago de Chile, 2013.
- [18] A. Perdana, *Dynamic Models of Wind Turbines*, Goteborg, 2008.
- [19] D. Auguglia y R. Wamkeue, «Optimal Selection of Drive Components for Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Turbines,» de *Wind Turbines*, Canadá, 2011, pp. 573-591.
- [20] P. C. Krause, O. Wasynczuk y S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 2002.
- [21] DIgSILENT, *DIgSILENT Technical Documentation PWM Converter*, Alemania, 2007.
- [22] J. F. Monteiro Zúñiga, *Modelación Dinámica de Parques Eólicos para una Integración Masiva en el SIC*, Santiago de Chile, 2008.
- [23] H. Sun, Y. Ren, H. Li, Z. An, J. Liu y H. Liu, *DFIG Wind Power Generation Based on Back-to-back PWM Converter*, Changchun, 2012.

- [24] A. Hansen, F. Iov, P. Sorensen y N. Cutululis, *Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DlgSILENT*, Roskilde, 2007.
- [25] A. E. Feijóo Lorenzo y J. F. Medina Padrón, *Calculating Steady-State Operating Conditions for Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines*, 2010.
- [26] V. Akhmatov, *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power*, Lyngby, 2003.
- [27] J. Smajo y D. Vukadinovic, *Reference Value Choice of the Wind Turbine Active Power with Doubly-Fed Induction Generator*, Croacia.
- [28] G. Salcán, M. Valarezo y J. Urquizo, *Modelado de una Turbina Eólica de Velocidad Variable con Control de Ángulo de Calaje*, Guayaquil.
- [29] R. Saldaña, U. Miranda y R. Cariño, *Estudio del Potencial Eoloenergético en un sitio de interés ubicado en la zona costera norte de la península de Yucatán*, Morelos.

7 ANEXOS

ANEXO 1

Ley de Betz

La Ley de Betz señala que del total de la energía cinética del viento como máximo se puede convertir a energía mecánica útil el 59,26% empleando un aerogenerador cuya aérea de barrido forme un disco.

A continuación se demostrará dicha ley de forma práctica, empleando el razonamiento en el que se basó el físico alemán Albert Betz.

Se considera que la velocidad promedio del viento en el área de barrido de un aerogenerador está determinada por la siguiente ecuación:

$$\bar{v}_v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{A1.1})$$

Donde:

v_1 : Velocidad del viento antes de pasar a través del aerogenerador

v_2 : Velocidad del viento después de pasar a través del aerogenerador



Figura A1.1 Velocidades del viento antes y después de atravesar un aerogenerador

La masa de aire por segundo que pasa por la aérea de barrido de un aerogenerador es:

$$m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \quad (\text{A1.2})$$

De acuerdo a la Segunda Ley de Newton, la potencia extraída del viento se la puede expresar como:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 + v_2^2) \quad (\text{A1.3})$$

Sustituyendo la ecuación (A1.2) en (A1.3) tenemos:

$$P_v = \frac{\rho}{4} \cdot (v_1^2 + v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \cdot A \quad (\text{A1.4})$$

Llamamos a P_0 a la potencia total una corriente de viento que no ha traspasado el área de barrido de un aerogenerador y que está determinado por:

$$P_0 = \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot A \quad (\text{A1.5})$$

La relación entre la potencia extraída del viento y la potencia total del viento antes de pasar por el aerogenerador es:

$$\frac{P_v}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (\text{A1.6})$$

La Figura A1.2 es el resultado de graficar la relación P_v/P_0 en función de v_2/v_1 . En dicha curva se aprecia que el valor de la potencia máxima extraída del viento es 0,5926 veces la potencia total del viento.

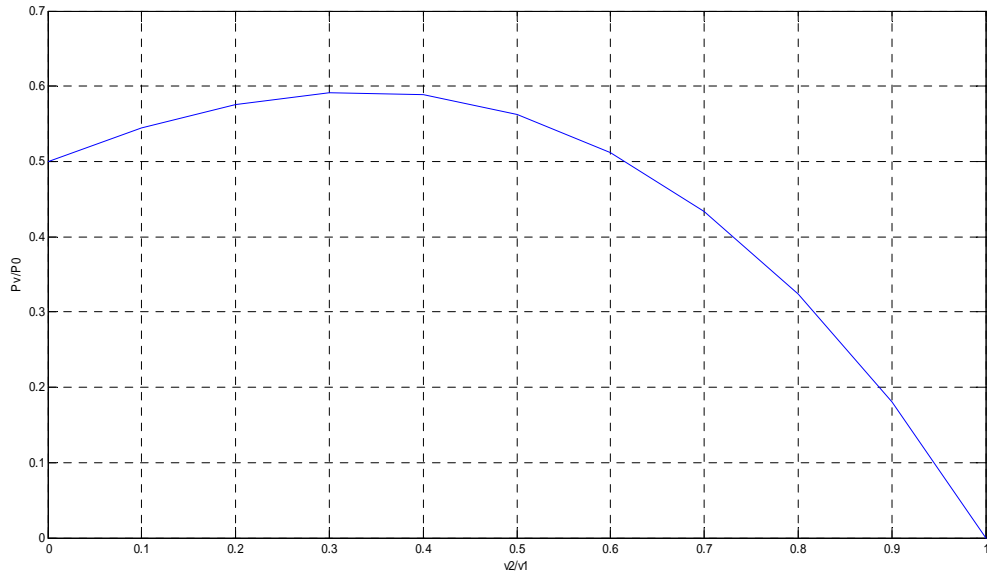


Figura A1.2 Relación de P_v/P_0 en función de v_2/v_1

ANEXO 2

Método de Runge-Kutta de cuarto orden

El método de Runge-Kutta de Cuarto Orden es un proceso iterativo para la solución de ecuaciones diferenciales. A continuación se presenta su modelo matemático.

Considerando la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y) \quad (\text{A2.1})$$

El valor inicial está dado por:

$$y(t_0) = y_0 \quad (\text{A2.2})$$

Partiendo del valor inicial de la variable, las pendientes en cada intervalo se calculan a través de las siguientes expresiones:

$$m_1 = f(t_i, y_i) \quad (\text{A2.3})$$

$$m_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2} \cdot h, y_i + \frac{1}{2} \cdot h \cdot m_1\right) \quad (\text{A2.4})$$

$$m_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2} \cdot h, y_i + \frac{1}{2} \cdot h \cdot m_2\right) \quad (\text{A2.5})$$

$$m_4 = f(t_i + h, y_i + h \cdot m_3) \quad (\text{A2.6})$$

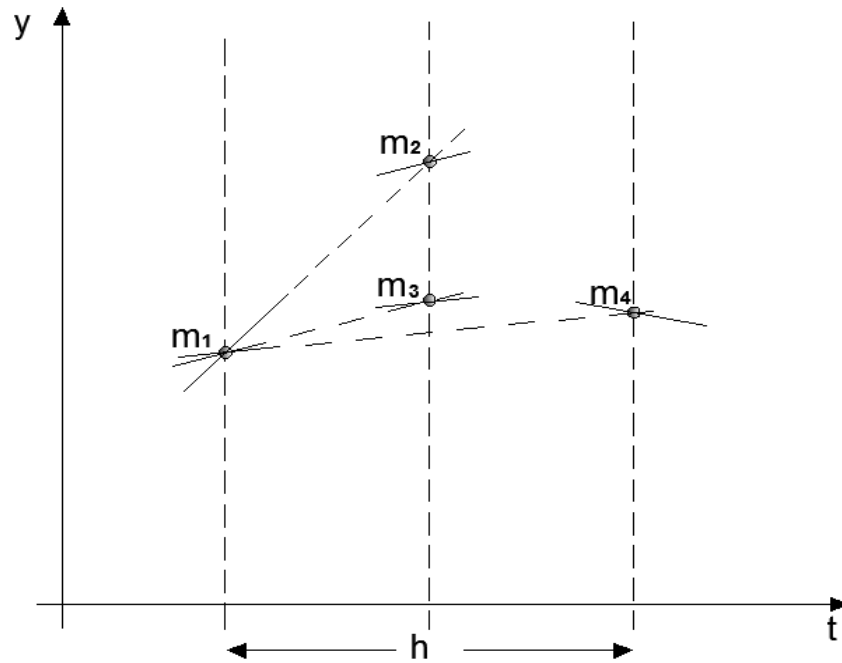


Figura A2.1 Método de Runge-Kutta de Cuarto Orden

Siendo h el intervalo de tiempo de análisis. La pendiente promedio se indica en la siguiente ecuación.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} \cdot (m_1 + 2 \cdot m_2 + 2 \cdot m_3 + m_4) \cdot h \quad (\text{A2.7})$$

ANEXO 3

Curva de la potencia mecánica en función del deslizamiento

La curva de la potencia mecánica del generador en función del deslizamiento se muestra en la siguiente figura:

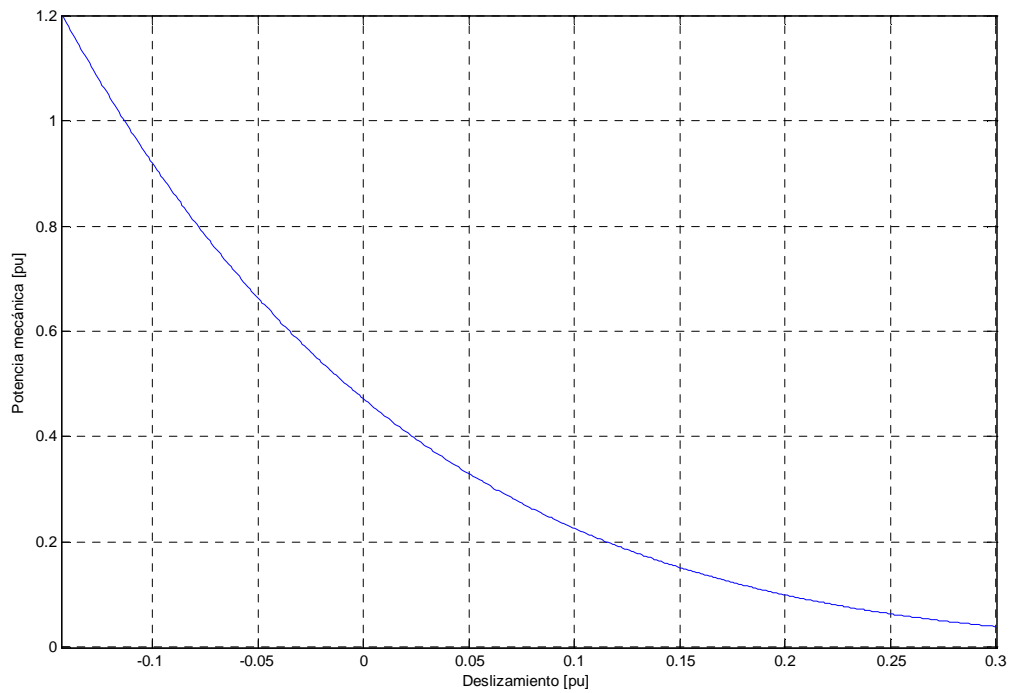


Figura A3.1 Potencia mecánica del generador en función del deslizamiento

ANEXO 4

Información técnica del aerogenerador con DFIG

Los datos de los componentes aerodinámicos, mecánicos y eléctricos del aerogenerador con DFIG y de la red eléctrica utilizados en la simulación se presentan en las siguientes tablas:

Tabla A4.1 Datos de los componentes eléctricos

Descripción	Valores	Unidades
Potencia aparente nominal (S_{nom})	2,21	MVA
Potencia activa nominal (P_{nom})	2	MW
Capacidad del convertidor de frecuencia ($S_{conv,nom}$)	0,9	MVA
Voltaje nominal (V_{nom})	690	V
Resistencia del estator (R_s)	0,0079	p.u.
Reactancia de dispersión del estator (X_s)	0,07937	p.u.
Reactancia de magnetización (X_m)	4,1039	p.u.
Resistencia del rotor referida al estator (R'_r)	0,0082	p.u.
Reactancia del rotor referida al estator (X'_r)	0,4	p.u.
Pares de polos	2	
Velocidad sincrónica (n_s)	1800	rpm
Velocidad nominal (n_{nom})	1980	rpm
Momento de inercia (J_g)	150,9	kg.m ²
Voltaje del enlace en DC (V_{dc})	1,3	kV
Capacitor del enlace en DC (C)	2200	μF
Resistencia del filtro R-L (R_f)	1	mΩ
Inductancia del filtro R-L (L_f)	2,5	mH
Reactancia del transformador (X_t)	0,1	p.u.
Reactancia de la línea de transmisión ($X_{L/T}$)	0,35	p.u.

Tabla A4.2 Datos de los componentes aerodinámicos y mecánicos

Descripción	Valores	Unidades
Radio de las hélices (R)	40	m
Densidad del aire (ρ)	1,225	kg.m ³
Ángulo de inclinación óptimo ($\beta_{i,opt}$)	0	grados
Relación de cambio de velocidad (k)	101	
Momento de inercia (J_t)	$8,6 * 10^6$	kg.m ²
Constante de rigidez (K)	$12 * 10^7$	N.m/rad
Constante de amortiguamiento (D)	$7,5 * 10^5$	N.m.s/rad
Constante servo mecánica (T_{servo})	0,1	s
Límites del ángulo de inclinación (β_i)	0 – 30	grados
Límite de rapidez de cambio del ángulo de inclinación ($d\beta_i/dt$)	± 10	grados/s

ANEXO 5

Manual de Usuario

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



Proyecto de titulación

Wilson Andrés Vásquez Guerrero

**Modelación, simulación y control de aerogeneradores con
generador de inducción doblemente alimentado utilizando Matlab**

Director: Jesús Játiva, Ph.D.



PARTE I

Introducción

El estudio del comportamiento de aerogeneradores incorporados en un sistema eléctrico de potencia se lo realiza en programas computacionales tales como Matlab, DigSILENT Power Factory, ATP, etc. Antes de la inclusión de una central de eólica se deben realizar estudios eléctricos para comprobar que los niveles de voltaje y la estabilidad del sistema no se serán afectados.

Los componentes aerodinámicos, mecánicos, eléctricos y de control del aerogenerador con DFIG son representados a través de modelos matemáticos que permiten analizar su comportamiento durante estado estable y estado transitorio. Para la solución de las ecuaciones diferenciales de los modelos matemáticos se emplea el método de Runge-Kutta de Cuarto Orden.

La simulación del aerogenerador con DFIG permite conocer su comportamiento durante la generación de potencia activa y reactiva ante cambios en la velocidad del viento durante estado estable. Además, cuando se produce una falla de cortocircuito en los terminales del generador se evalúa el desempeño del control de ángulo de inclinación como método de frenado de la máquina. El presente programa utiliza como plataforma de programación el software Matlab.

PARTE II

Requerimientos

El presente programa ha sido desarrollado en Matlab R2009a y por tal motivo para su ejecución se requiere tener instalada la versión básica de este software.

Para iniciar la simulación se debe disponer de la carpeta llamada Simulación de un aerogenerador con DFIG, la misma que contiene todos los archivos .m del código del programa.

Finalmente, el directorio de Matlab debe coincidir con el nombre de la carpeta antes mencionada.

Inicio de la simulación

Para iniciar el programa escriba en el prompt de la ventana de comandos de Matlab:

```
>> Iniciar_Aerogenerador_con_DFIG()
```

Inmediatamente se desplegará la ventana de inicio del programa, de acuerdo a la siguiente figura:



Figura A5.1 Ventana de inicio del programa

Ingreso de datos

Para ingresar los datos de los parámetros mecánicos y eléctricos del aerogenerador con DFIG presione el botón CONTINUAR ubicado en el extremo inferior derecho de la ventana de inicio del programa y aparecerá la siguiente ventana:

PARÁMETROS MECÁNICOS		PARÁMETROS ELÉCTRICOS	
Densidad del aire [kg/m ²]	<input type="text"/>	Potencia aparente nominal [MVA]	<input type="text"/>
Radio de las hélices [m]	<input type="text"/>	Potencia activa nominal [MW]	<input type="text"/>
Relación de cambio de velocidad	<input type="text"/>	Voltaje nominal de la barra de generación [V]	<input type="text"/>
Constante de rigidez [N.m/rad]	<input type="text"/>	Resistencia del estator [p.u.]	<input type="text"/>
Constante de amortiguamiento [N.m.s/rad]	<input type="text"/>	Reactancia del estator [p.u.]	<input type="text"/>
Momento de inercia de la turbina [kg.m ²]	<input type="text"/>	Reactancia de magnetización [p.u.]	<input type="text"/>
Constante servomecánica [s]	<input type="text"/>	Resistencia del rotor referida al estator [p.u.]	<input type="text"/>
Ángulo de inclinación máximo [grados]	<input type="text"/>	Reactancia del rotor referida al estator [p.u.]	<input type="text"/>
Ángulo de inclinación mínimo [grados]	<input type="text"/>	Número de polos	<input type="text"/>
		Frecuencia eléctrica [Hz]	<input type="text"/>
		Velocidad nominal del generador [rpm]	<input type="text"/>
		Momento de inercia del generador [kg.m ²]	<input type="text"/>
		Voltaje nominal del enlace en DC [kV]	<input type="text"/>
		Capacitancia del enlace en DC [mF]	<input type="text"/>
		Resistencia del filtro R-L [mili ohmios]	<input type="text"/>
		Inductancia del filtro R-L [mH]	<input type="text"/>
		Reactancia del transformador [p.u.]	<input type="text"/>
		Reactancia de la línea de transmisión [p.u.]	<input type="text"/>

OPCIONES DE SIMULACIÓN

Viento determinístico
 Viento probabilístico
 Falla de cortocircuito

Figura A5.2 Ventana para el ingreso de datos

Opciones de simulación

Seleccione una de las tres opciones disponibles de modo de simulación: Viento determinístico, Viento probabilístico y Falla de cortocircuito. Para continuar presione el botón CONTINUAR.

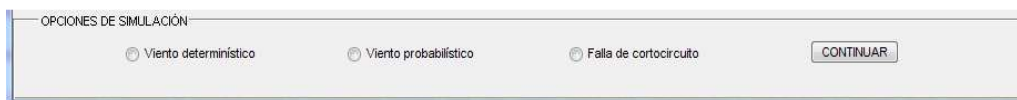


Figura A5.3 Selección del modo de simulación

- *Viento determinístico*: seleccionada esta opción aparecerá la siguiente ventana:

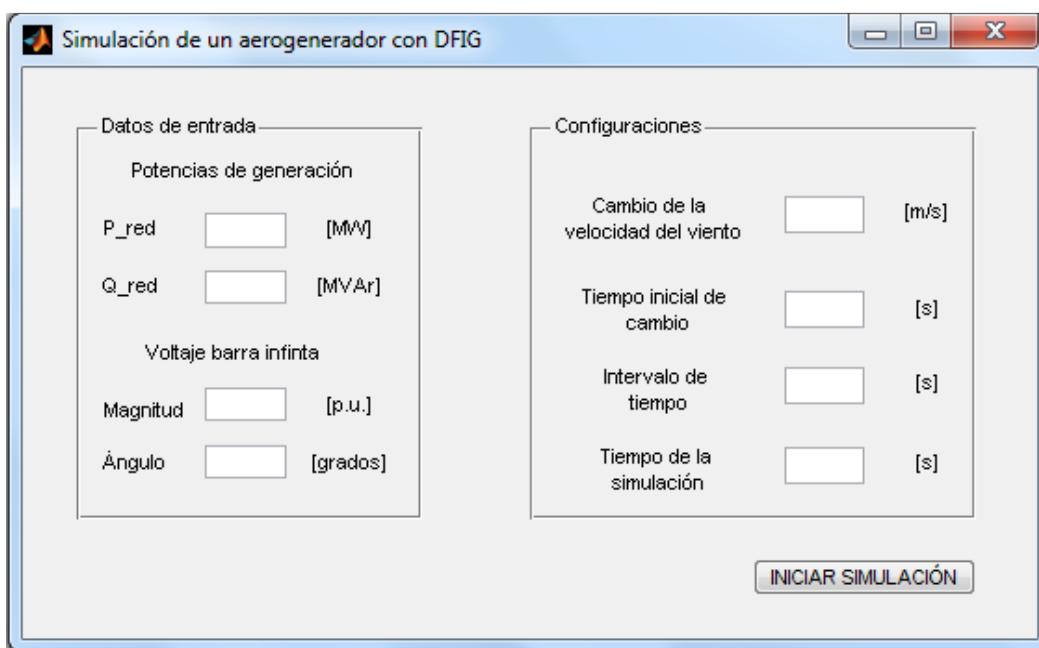


Figura A5.4 Ventana de configuración

Luego de llenar los Datos de entrada y la Configuración de la simulación presione el botón INICIAR SIMULACIÓN para correr el programa.

- *Viento probabilístico*: seleccionada esta opción aparecerá la siguiente ventana:

Figura A5.5 Ventana de configuración

Luego de llenar los Datos de entrada y la Configuración de la simulación presione el botón INICIAR SIMULACIÓN para correr el programa.

- *Falla de cortocircuito*: seleccionada esta opción aparecerá la siguiente ventana:

Figura A5.6 Ventana de configuración

Luego de llenar los Datos de entrada y la Configuración de la simulación presione el botón INICIAR SIMULACIÓN para correr el programa.

Mostrando resultados

Luego de haberse ejecutado la simulación y de acuerdo al modo seleccionado se desplegarán los gráficos de las variables más relevantes. A manera de ejemplo la siguiente figura muestra los resultados de la simulación considerando un viento probabilístico.

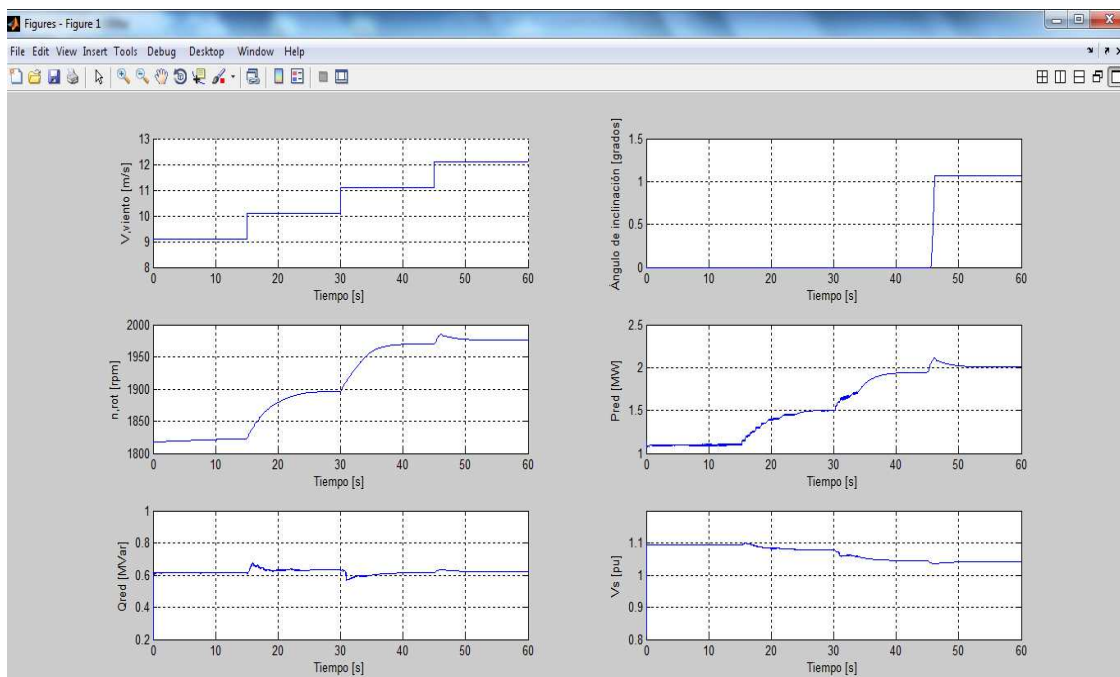


Figura A5.7 Ventana de resultados