



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVO PARA GENERACIÓN
EÓLICA UTILIZANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN
DE DOBLE EXCITACIÓN.

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MENCIÓN ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

JONATHAN DAVID CÁRDENAS PARRA

PROFESOR GUÍA:
DORIS SÁEZ HUEICHAPAN
PROFESOR CO-GUÍA:
FELIPE VALENCIA ARROYAVE

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
PATRICIO MENDOZA ARAYA
CARLOS MUÑOZ POBLETE

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE LA TESIS
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: JONATHAN CÁRDENAS PARRA
FECHA: 22 DE AGOSTO DE 2016
PROF. GUÍA: DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVO PARA GENERACIÓN EÓLICA UTILIZANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DE DOBLE EXCITACIÓN.

En esta tesis se desarrollan y evalúan tres estrategias de control predictivo distintas en un generador de inducción de doble excitación (DFIG), que son: descentralizado, centralizado y distribuido. En la estrategia de control predictivo descentralizada el convertidor back-to-back es regulado mediante dos controladores predictivos, uno para el lado rotor y el otro para el lado red, y mediante un controlador PI que mantiene el balance del voltaje en el DC-link. En la estrategia de control predictivo centralizado todo el convertidor es regulado mediante un único controlador predictivo. Por último en la estrategia de control distribuido el sistema es regulado mediante dos controladores predictivos que comunican sus acciones de control. Para evaluar las estrategias de control planteadas se desarrolla un simulador que captura la dinámica de un generador doblemente alimentado mediante el uso del software Matlab–Simulink. Los controladores se programan de acuerdo a las estrategias de control implementadas y son aplicados en el simulador del generador. Se evalúa el desempeño de cada uno de estos, en base a los siguientes criterios de comparación: THD, error de seguimiento de las corrientes, error de seguimiento del voltaje de DC-Link, tiempo de ejecución del programa de cada controlador y frecuencia de switching. Se analiza también el desempeño de estas estrategias de control bajo condiciones de operación de estrés en la red, es decir, se somete el aerogenerador a una falla trifásica que implica una caída de la tensión de la red en un 70%. A partir de los resultados se concluye que es posible implementar las tres estrategias de control propuestas en el DFIG. Además se observa que el valor de la función de costos resulta ser mínimo en la estrategia de control centralizada seguida por la distribuida para presentar un menor desempeño en la estrategia de control descentralizada. En cuanto al error de seguimiento el voltaje del DC-Link es mejor para el caso centralizado, seguido por el distribuido, observándose el peor desempeño en el caso de descentralizado, con sobreniveles en torno al 4% cuando se cambia el punto de operación. Este resultado se debe a que en el caso centralizado el controlador encuentra un óptimo global, en cambio en el descentralizado los óptimos son locales. En general, los resultados de la estrategia de control distribuido son bastante similares a los obtenidos mediante la estrategia de control centralizado, con la diferencia de que se resuelve el problema de optimización dentro del tiempo de muestreo. Al analizar la distorsión armónica se observa que la frecuencia se encuentra distribuida a lo largo de todo el espectro lo que en aplicaciones reales complica el dimensionamiento de los filtros para armónicos y aumenta su costo, por lo que recientemente se han estudiado estrategias de control predictivo moduladas que utilizan una fase de modulación antes de conectarse a las compuertas de los IGBT's. Como consecuencia los armónicos se centran en torno a múltiplos de la frecuencia de la señal portadora. Por último al analizar el comportamiento de las estrategias propuestas en presencia de una caída de tensión en la red se producen sobrecorrientes en los enrollados del rotor que el convertidor lado rotor no es capaz de controlar. Además durante la contingencia es necesario utilizar un chopper para disipar el exceso de energía.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo que me han dado todos estos años, por su constancia y dedicación, en especial a mi madre que es y ha sido un pilar fundamental, por su amor y por ser el principal ejemplo de esfuerzo y perseverancia que he tenido en mi vida. A mis abuelos por su amor y cuidado, por estar siempre a mi lado, acompañándome en cada uno de los desafíos que nos propusimos como familia. A mi hermana por ser la persona con quien encontraba una distracción a la rutina universitaria y quien es también un factor fundamental en mi vida, a mi hermana menor que llegó a mover nuestro mundo. A mis tíos, Marisol, Hugo, Pato, Cochela y Eduardo que me acompañaron en todo este periodo, de quienes recibí siempre buenos consejos, mucho cuidado y una grata compañía. A Teresita por estar siempre a mi lado, por su paciencia y lealtad. A mis profesores que me guiaron en este desafío en el que he encontrado grandes satisfacciones y a todos aquellos con quien compartí este gran camino.

A CONICYT PFCHA/ Beca Nacional de Magíster Convocatoria 2013 22130961

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema	2
1.2	Hipótesis	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivos específicos	3
1.4	Nomenclatura empleada	4
2	Antecedentes	5
2.1	Generador eólico	5
2.1.1	Principio de funcionamiento	6
2.1.2	Componentes del aerogenerador	8
2.2	Estado del arte	13
2.2.1	Discusión	29
3	Modelación del sistema	31
3.1	Modelación del generador de inducción de doble excitación	31
3.2	Modelación del convertor back-to-back	35
4	Estrategias de control predictivo para un generador de inducción de doble excitación	39
4.1	Control predictivo	39
4.2	Diseño de las estrategias de control predictivo	41

4.2.1	Estrategia de control predictiva descentralizada	42
4.2.2	Estrategia de control predictivo centralizado	50
4.2.3	Estrategia de control predictivo distribuido	54
4.2.4	Discusión	59
5	Resultados	61
5.1	Voltaje del DC-Link	62
5.2	Corriente del rotor y de red	66
5.3	Función de Costos	69
5.4	Distorsión armónica	70
5.5	Tiempo de resolución del problema de optimización	72
5.5.1	Frecuencia del switching	74
5.6	Estrategias de control predictivo en presencia de una caída de la tensión trifásica de la red	75
5.6.1	Características de la caída de tensión.	75
5.6.2	Flujo del estator	77
5.6.3	Voltaje del rotor	78
5.6.4	Voltaje del DC-Link	79
5.6.5	Corriente de rotor y de red	80
5.6.6	Potencia activa o reactiva	82
5.6.7	Discusión	84
6	Conclusiones	86
	Bibliografía	88

Introducción

En los últimos diez años, la energía eólica se ha convertido en una de las fuentes de energía más dinámica, incrementando diez veces su capacidad instalada a nivel mundial y ascendiendo a un total de 90.500 MW a fines del año 2007 y 160.000 MW en el año 2010 [1]. Para mediados del siglo XXI, se estima que la energía eólica podrá cubrir hasta un 30 por ciento del consumo eléctrico mundial, según diferentes organizaciones del sector. Estos pronósticos se basan sobre todo en las tendencias en los grandes mercados de China e India que están utilizando cada vez más la energía eólica [1]. Se considera la energía eólica como renovable, ya que tiene su origen en procesos atmosféricos procedentes del sol, una fuente inagotable. No produce emisiones dañinas a la atmósfera, por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático. Además, las instalaciones son fácilmente reversibles y son compatibles con otros usos de suelo, como por ejemplo, la agricultura y la ganadería [1]. Los impactos que generan la instalación y operación de aerogeneradores y, en mayor nivel los parques eólicos, dicen relación con la emisión de ruido y el eventual impacto visual. Además, debido a la naturaleza variable del recurso primario de esta tecnología, es necesario controlar la inyección de potencia activa y reactiva para minimizar los efectos nocivos que se puede generar en la red [1]. Considerando la alta penetración de los parques eólicos en los sistemas eléctricos, se hace necesario contar con herramientas que permitan operar esta tecnología, para favorecer su integración a la matriz energética mundial. Una herramienta que ha tenido grandes avances las últimas tres décadas son los Modelos de Control Predictivo (MPC), siendo hoy día utilizados en procesos industriales, que van desde tracción vehicular hasta procesos térmicos. Este método ofrece varias ventajas en comparación a otros métodos de control, entre las cuales se encuentra su flexibilidad para ser aplicado en sistemas multivariable, como también la facilidad con la que se le agregan las restricciones y las no-linealidades del proceso, lo que permite disminuir los transientes y entregar un mejor producto a la red, tanto en potencia activa como reactiva. Esto sumado a que a medida que han pasado las décadas, las plataformas de control tales como los Digital Signal Processors (DSPs) o Field Programmable Gate Arrays (FPGAs), utilizadas en electrónica de potencia, específicamente en convertidores y rectificadores, se han vuelto más eficientes, en cuanto a capacidad y rapidez de cómputo. Este aumento ha hecho posible la implementación de nuevas y más complejas técnicas de control, por ejemplo control difuso, adaptativo, predictivo, entre otros [2]. Se han implementado en equipos de pequeña escala y con modelos de predicción fáciles de implementar como inversores y rectificadores, donde se aprovecha la naturaleza discreta del problema para encontrar la solución al problema de optimización, evaluando cada estado posible que se pueda dar en el sistema. En esta tesis se busca implementar tres estrategias

de control predictivas(Centralizada, descentralizada y distribuida), en equipos de generación eólica de gran escala, dónde se utilizará un DFIG para analizar nuevas formas de regular este aerogenerador que es ampliamente utilizado en la industria de generación eléctrica.

1.1. Planteamiento del problema

En esta tesis se estudia la implementación de estrategias en control predictivo que se han realizado en el campo de la electrónica de potencia en sistemas de aerogeneración de gran escala. Para esto se utiliza el generador más utilizado en la industria eólica que corresponde al generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). La finalidad es implementar y probar nuevas formas de regular el DFIG utilizando estrategias de control predictivo descentralizado, centralizado y distribuido para contribuir a que este tipo de tecnología siga ganando terreno tanto en la matriz energética nacional como internacional, sustituyendo generación convencional a partir de combustibles fósiles por energía limpia obtenida a partir de un recurso renovable como es el viento. Para lograr lo anterior, se construye un simulador en el software Matlab-Simulink de un generador de inducción de doble excitación que capture el comportamiento dinámico del sistema, que permita evaluar el desempeño de cada una tres estrategias de control predictivo propuestas. En la estrategia de control predictivo descentralizada el convertidor es regulado mediante dos controladores predictivos, uno para el lado rotor y el otro para el lado red, y mediante un controlador PI se mantiene el balance del voltaje en el DC-Link. En la estrategia de control predictivo centralizada todo el convertidor es regulado mediante un único controlador predictivo. Y por último en la estrategia de control distribuido el sistema es regulado mediante dos controladores predictivos que comunican sus acciones de control, para mantener balanceado el voltaje del DC-Link. Las estrategias antes mencionadas serán implementadas para controlar el convertidor back-to-back y a través de este operar el generador de inducción doblemente alimentado, sintetizando las corrientes de rotor y red de acuerdo al comportamiento deseado del sistema. Una vez implementadas las estrategias de control se establecerán criterios de comparación entre sí de forma tal de concluir respecto al desempeño de cada una, tales como: sobrenivel, tiempo de estabilización, error de seguimiento, THD.

1.2. Hipótesis

La regulación de un sistema puede ser abordada mediante diferentes enfoques o estrategias de control tales como estrategias descentralizadas, centralizadas y distribuidas. Cuando se implementa una estrategia de control centralizado se tiene un mejor desempeño en el control del sistema, ya que al regularlo el sistema es abordado en su totalidad, sin embargo necesita una mayor capacidad computacional y un tiempo de muestreo mayor para lograr resolver el problema de optimización. En cambio, en las estrategias de control descentralizado cada controlador regula su subsistema sin considerar como sus acciones de control afectan a los demás controladores, provocando que su rendimiento sea menor que al caso centralizado, pero demandando una menor capacidad computacional. A pesar de anterior, en la actualidad

estas se encuentran ampliamente implementadas para la regulación de equipos en la industria. De acuerdo a lo anterior la hipótesis de esta tesis es que al utilizar una estrategia de control predictivo distribuida se puede regular el sistema con las ventajas de una estrategia centralizada y descentralizada, atenuando las posibles desventajas que pueden presentarse, tales como requerir una capacidad de cálculo computacional elevada y que las acciones de control de un controlador afecten a los demás controladores, afectando el funcionamiento del sistema en su totalidad.

1.3. Objetivos

El propósito general que se desea alcanzar con el desarrollo de esta tesis es implementar estrategias de control predictivo en sistemas de generación eólica de gran escala, utilizando un generador inducción doblemente alimentado.

1.3.1. Objetivos específicos

Los objetivos de esta tesis son:

- Implementar un simulador que capture la dinámica de un generador doblemente alimentado mediante el uso del software Matlab-Simulink.
- Diseñar las estrategias de control predictivo, descentralizada, centralizada y distribuida y a su vez evaluar el rendimiento de cada estrategia y compararlo con los resultados obtenidos entre sí, en el generador de inducción doblemente alimentado.
- Evaluar el desempeño de las estrategias de control cuando se presenta una caída de tensión de la red trifásica.

1.4. Nomenclatura empleada

t	Tiempo [s]
\vec{V}	Velocidad [m/s]
u, v, w	Componentes en \hat{x} , \hat{y} y \hat{z} de la velocidad [m/s]
p	Presión [Pa]
ρ	Densidad [kg/m ³]
α	Ángulo de ataque
F_w	Fuerza de sustentación [N]
P_w	Potencia [kgm/s]
A	Área barrida por el aspa [m ²]
C_p	Coefficiente de potencia
R	Radio de la turbina [m]
i_s	Corriente del estator [A]
i_r	Corriente del rotor [A]
V_{dc}	Voltaje del DC-Link [V]
V_s	Voltaje del estator [V]
$i_{\alpha,\beta}^*$	Corriente de referencia de la parte real e imaginaria [A]
$i_{\alpha,\beta}^p$	Corriente predicha de la parte real e imaginaria [A]
$v_{o\alpha,o\beta}^*$	Voltaje de referencia [V]
$v_{o\alpha,o\beta}^p$	Voltaje predicho [V]
T_e^*	Torque de referencia [Nm]
T_e^p	Torque predicho [Nm]
$ \Psi_s ^*$	Flujo de referencia [Wb]
$ \Psi_s ^p$	Flujo predicho [Wb]
P^*	Potencia activa de referencia [W]
P^p	Potencia activa predicha [W]
Q^*	Potencia reactiva de referencia [VAr]
Q^p	Potencia reactiva predicha [VAr]
n_c	N.de conmutaciones
i	Corriente [A]
e	Voltaje de la red [V]
v	Voltaje generado en el inversor [V]
T_s	Periodo de muestreo [s]
R	Resistencia [Ω]
L	Inductancia [H]
ω	Frecuencia [Hz]
S_i	Señales de las compuertas

Antecedentes

A continuación se describe el generador de inducción doblemente alimentado que se va a analizar en el presente trabajo de tesis, que corresponde a un aerogenerador y se detalla su principio de funcionamiento y componentes. A su vez se presenta el estado del arte de las investigaciones y aplicaciones referentes a la estrategia de control a implementar. De forma general para introducir el concepto de aerogeneradores en el diagrama de la Figura 1 se observa un parque eólico típico, donde se pueden identificar un grupo de aerogeneradores que captan energía del viento para inyectarla a una red eléctrica.

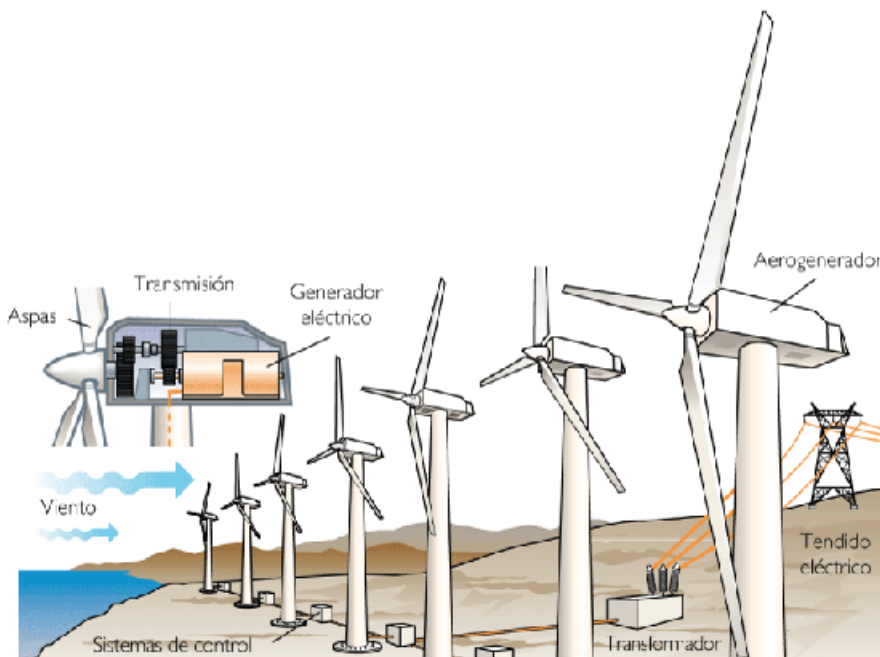


Figura 1: Diagrama general de un parque eólico. [35]

2.1. Generador eólico

Un generador eólico es un sistema electromecánico que capta la energía cinética del viento mediante la turbina y la transforma en energía mecánica rotacional. Esta última es transmitida desde el eje de baja velocidad al eje de alta velocidad del generador mediante

la caja multiplicadora, para luego ser transformada en energía eléctrica por el generador. El convertidor, que se encuentra conectado al generador, ajusta la frecuencia de las variables eléctricas a la frecuencia de la red eléctrica. Finalmente el transformador eleva el voltaje para inyectarlo en el sistema de transmisión. [3] Los generadores se clasifican en base a varios criterios como: tamaño, aplicación, conexión (operación en isla o conectado a la red), ubicación (en tierra o costa afuera), posición de la turbina (eje horizontal o vertical), velocidad de operación (fija o variable) y de acuerdo al generador que utiliza [4].

2.1.1. Principio de funcionamiento

El principio aerodinámico del aspa de una turbina puede ser explicado por medio del principio de Bernoulli, el cual establece que la presión y el cuadrado de la velocidad, para una misma línea de corriente, se relacionan de acuerdo a la Ec 2.1 [5].

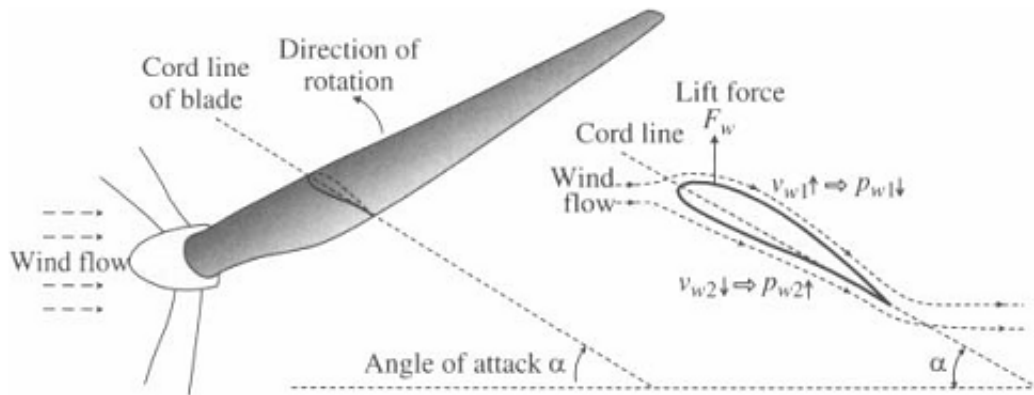


Figura 2: Principio de funcionamiento aerodinámico del aspa [4]

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = cte \quad (2.1)$$

Tal como se muestra en la Figura 2, cuando la masa de fluido en movimiento choca contra la parte superior del aspa de la turbina se produce un aumento de la velocidad (v_{w1}) y la presión en este punto disminuye (p_{w1}), en cambio en la parte baja del aspa el flujo de aire es frenado disminuyendo su velocidad (v_{w2}) y por tanto aumentando la presión (p_{w2}). Esta diferencia de presiones provoca una fuerza de sustentación neta sobre el aspa, y debido a que esta fuerza es aplicada a cierta distancia del eje de la turbina, produce torque el cual crea el movimiento rotacional de la turbina eólica.

Uno de los parámetros más importantes para controlar la fuerza de sustentación sobre el aspa es el ángulo de ataque (α), que es definido como el ángulo entre la dirección del viento (v_w) y la inclinación del aspa, como se observa en la Figura 2. La modificación de este ángulo permite cambiar la fuerza de sustentación (F_w).

La potencia (P_w) que genera una masa de aire fluyendo a una velocidad V_w , a través de un área A puede ser calculada por medio de la Ec 2.2:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av_w^3 \quad (2.2)$$

Donde ρ es la densidad en $[kg/m^3]$, A es el área barrida en $[m^2]$, y v_w es la velocidad del viento en m/s . La potencia del viento captada por el aspa y convertida en potencia mecánica puede ser calculada en base a la siguiente expresión Ec 2.3:

$$P_M = \frac{1}{2}\rho Av_w^3 C_p \quad (2.3)$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia.

Como se observa en la Ec 2.3 existen tres formas de incrementar la potencia captada por la turbina eólica, las cuales son: la velocidad del viento (v_w), coeficiente de potencia (C_p) y el área barrida (A). Dado que la velocidad del viento no se puede controlar, solo se puede incrementar posicionando el generador eólico en una zona donde exista un alto recurso eólico. Otra forma de lograr este cometido es diseñar la turbina con aspas más grandes para aumentar el área barrida. Dado que el área está dada por πR^2 , donde R es el radio de la turbina, un aumento de este tiene un efecto cuadrático sobre el área, es por esta razón que en los últimos años se han construido turbinas de radios más grandes. Por último, la potencia capturada se puede incrementar mejorando el coeficiente de potencia de las aspas mediante un mejor diseño aerodinámico. El aumento de la potencia capturada al llevar a cabo esta última medida resulta ser lineal [3].

El diseño aerodinámico de las aspas de una turbina se encuentra altamente relacionado con la energía del viento capturada por estas. Para velocidades del viento mayores al valor nominal el diseño debe considerar los medios para limitar la potencia y la velocidad de rotación de la turbina, de forma tal de mantener los esfuerzos mecánicos sobre los componentes (aspa, caja multiplicadora, etc) y la potencia generada dentro de los límites de seguridad. Las características de la potencia de una turbina eólica están definidas por la curva de potencia, la cual relaciona la potencia mecánica de la turbina con la velocidad del viento. Dicha curva es entregada por el fabricante.

Como se observa en la Figura 3 una curva de potencia típica posee cuatro zonas de operación características: la primera zona está definida para velocidades del viento menor a la velocidad de entrada (cut-in), donde la potencia generada es nula y el aerogenerador se encuentra fuera de servicio ya que la potencia generada no alcanza a compensar las pérdidas. La segunda zona de operación está definida para velocidades del viento que se encuentran entre la velocidad de entrada y la velocidad nominal, en este rango la turbina comienza a capturar potencia que se relaciona de forma cuadrática con la velocidad del viento hasta alcanzar el valor nominal. La tercera zona de operación esta definida para velocidades del viento entre

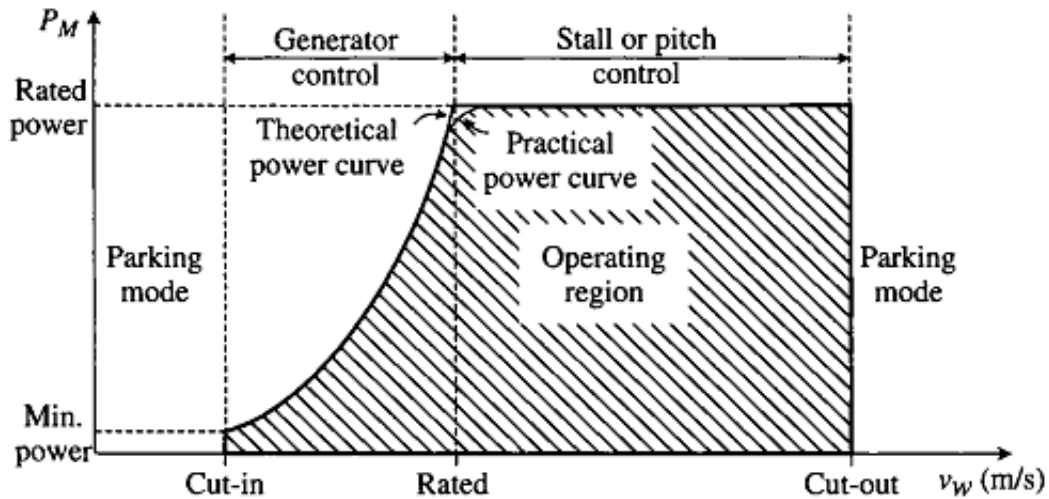


Figura 3: Curva de potencia mecánica versus velocidad del viento [4]

la velocidad nominal y la de salida (cut -out), dentro de esta zona el aerogenerador trabaja a potencia nominal. Para que esto se cumpla el aerogenerador debe ser controlado de forma tal de que en velocidades sobre la nominal las características aerodinámicas de las aspas se vuelvan menos favorables de forma tal de que la potencia se mantenga constante. La última zona de operación está definido para velocidades del viento mayores a la velocidad de salida, en este rango la potencia generada es nula debido a que la turbina debe ser detenida para evitar daños por cargas extremas sobre la estructura.

2.1.2. Componentes del aerogenerador

El aerogenerador está constituido por una serie de componentes que permiten captar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica, así como también asistir al sistema para lograr ciertos objetivos de control, confiabilidad y operación.

En la Figura 4, se muestran los principales componentes del aerogenerador, ya sea los mecánicos que son la turbina, la caja de engranajes y los mecanismos de orientación, como los eléctricos que son el generador y el convertidor ubicados en la góndola. Para un mejor entendimiento del proceso de conversión de energía, se detallan a continuación los elementos mencionados anteriormente.

Turbina

La turbina es el elemento más importante dentro un sistema de conversión eólico, está constituida por varias componentes que permiten captar la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica rotacional a través de sus aspas que se encuentran montadas

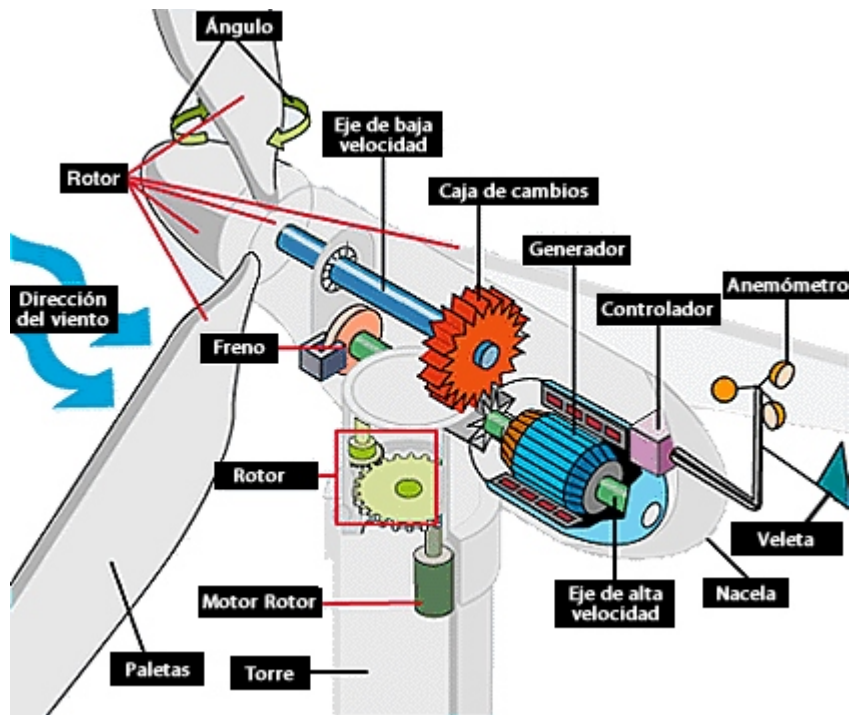


Figura 4: Componentes del aerogenerador [5]

sobre el buje del rotor. La turbina puede estar compuesta por una, dos, tres o más aspas, sin embargo el modelo de tres aspas es considerado el modelo estándar a utilizar en la industria eólica ya que optimiza la relación costo eficiencia. Lo anterior se basa en que un número mayor a tres aspas implica mayores costos de insumos materiales y por otro lado un número menor a tres aspas implica mayor ruido por las altas velocidades, distribución de cargas asimétricas y vibraciones no deseadas sobre los elementos mecánicos del sistema [4].

Caja de engranajes

La caja de engranajes o caja multiplicadora es el elemento mecánico que transforma la baja velocidad de rotación del eje del rotor en alta velocidad en el eje del generador eléctrico, con una eficiencia entre 95-98%. Está fabricada en base a una aleación de aluminio de alta calidad, hierro fundido y acero inoxidable. La vida útil de la caja de engranajes puede verse afectada por cambios repentinos en la velocidad y fuerza del viento porque requiere mantenimiento constante. La razón de conversión es un parámetro fundamental de la caja de engranajes ya que permite que la baja velocidad de la turbina coincida con la alta velocidad del generador, está definida como la razón entre las velocidades nominales del generador y la de la turbina en rpm [4].

Mecanismo de orientación de las aspas

El mecanismo de orientación de las aspas es un sistema, hidráulico o eléctrico, que permite la rotación de las aspas en torno a sus ejes longitudinales, cambiando el ángulo de ataque con respecto a la dirección del viento, para ajustar las características aerodinámicas de cada aspa entregando un grado control sobre la potencia captada tanto para mejorar la eficiencia del sistema como para proteger la turbina [7]. Cuando la velocidad del viento es menor que la nominal el mecanismo de control mantiene el ángulo de ataque de las aspas en el valor óptimo para maximizar la potencia capturada por la turbina. En cambio cuando la velocidad del viento supera el valor nominal, el mecanismo de control varía el ángulo de ataque para mantener la potencia generada dentro de los parámetros de diseño. En casos extremos cuando la velocidad del viento excede los límites de diseño de la turbina, las aspas son inclinadas completamente en la dirección del viento y se deja de capturar energía, para luego detener la turbina [4].

Freno del rotor

El freno del rotor es un mecanismo compuesto por discos de freno hidráulicos y electromecánicos. Se utiliza para detener la turbina durante fuertes ráfagas de viento de forma de evitar daños sobre el sistema, y para bloquear la turbina cuando se realizan trabajos de mantenimiento. Este mecanismo se encuentra generalmente en el eje de alta velocidad, entre la caja de engranajes y el generador. [4].

Mecanismo de orientación (Yaw Drive)

El mecanismo de orientación se utiliza para maximizar la energía captada desde el viento, orientando la turbina en dirección paralela a la dirección de este. Está compuesto por un motor eléctrico, engranajes de orientación, corona y rodamientos. Además posee una serie de frenos para fijar la turbina cuando se establece su posición óptima o durante mantenimientos [4].

Góndola o nacelle

La góndola es la parte posterior de la turbina, sirve de alojamiento a los componentes mecánicos y eléctricos del aerogenerador, dentro de los cuales destacan la caja multiplicadora, el generador, los sistemas de control y en algunos casos el convertidor y un transformador [7].

Torre

La torre es una estructura fabricada generalmente de acero montada sobre una base de concreto, cuya función es soportar la góndola y la turbina además de posicionar el generador a una altura necesaria para alcanzar mejores condiciones de viento y evitar la turbulencia generada por árboles y construcciones. La altura de la torre aumenta a medida que el radio de la turbina y la potencia nominal del aerogenerador aumentan [4]. Dentro de la torre se encuentran los cables eléctricos que conectan el generador con la red eléctrica permitiendo la inyección de energía hacia el sistema. En algunos casos el transformador se encuentra localizado en la góndola, por lo cual los cables se conectan directamente desde este a la subestación de poder del parque eólico. En otros casos, cuando se utilizan turbinas de varios megavatios, los convertidores se encuentran ubicados en la base de la torre por lo que en estos casos la función de los cables es conectar el generador ubicado en la parte alta de la estructura con la base donde se encuentra el convertidor [3]. La torre tiene además una escalera exterior que permite realizar mantenimiento a los componentes que se encuentran en altura.

Generador

El generador es el equipo encargado de convertir la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Dentro de la industria eólica se han utilizado distintos tipos de generadores tales como: el generador de inducción de jaula de ardilla, el generador sincrónico y el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)[3]. El generador de inducción de jaula de ardilla es un sistema simple y robusto, es relativamente económico y requiere poca mantención. Este tipo de generador fue uno de los más utilizados en los comienzos de la industria eólica, sin embargo debido a que opera a velocidad fija y consume reactivos, ha sido reemplazado por otros tipos de generadores [4]. El generador sincrónico es ampliamente utilizado en aplicaciones eólicas de velocidad variable, donde se encuentran bastantes topologías de generadores sincrónicos: los de imanes permanentes, de rotor bobinado, polos salientes y no salientes, entre otros. Estos tipos de generadores pueden ser construidos con un gran número de polos y por tanto operan a una baja velocidad, lo que permite que puedan ser conectados directamente al eje de la turbina, prescindiendo de una caja multiplicadora [4]. Por último, el DFIG es esencialmente un generador de inducción de rotor bobinado en el cual el rotor puede ser controlado por un dispositivo interno para lograr operar a velocidad variable. En la Figura 5 se puede observar un diagrama típico de este tipo de generador. El estator del generador es conectado a la red a través de un transformador, mientras el rotor es conectado a través de un convertidor de poder en configuración back-to-back, un filtro armónico y un transformador elevador. Este tipo de generador es una de las tecnologías más importantes en aplicaciones eólicas, cubriendo actualmente cerca del 50% del mercado de la industria, debido a que la capacidad nominal de este tipo de generador se encuentra normalmente desde unos kilowatts hasta unos megawatts, y los convertidores son dimensionados en torno al 30% de la potencia nominal del generador, lo que conlleva a que el equipo ocupe menos espacio y sea más económico [3].

El estator del generador entrega potencia desde la turbina eólica hacia la red, por lo

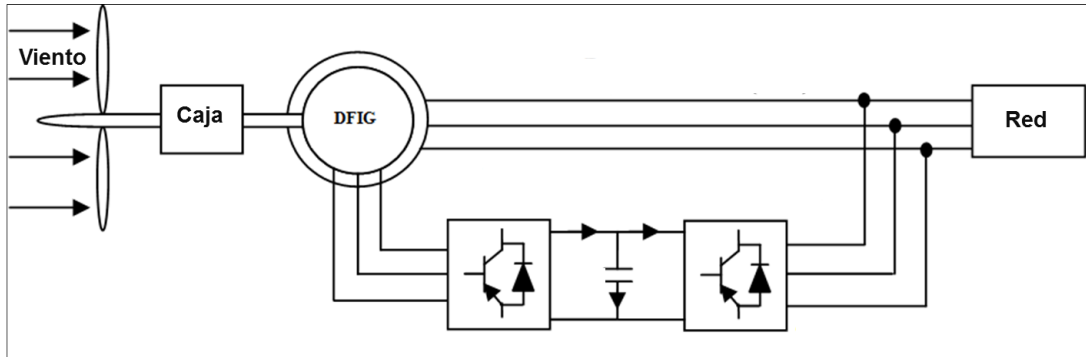


Figura 5: Diagrama simplificado de un generador de inducción doblemente alimentado [34].

tanto el flujo es unidireccional. Sin embargo, el flujo de potencia en el circuito del rotor es bidireccional dependiendo de las condiciones de operación, es decir, la potencia puede ser entregada desde el rotor hacia la red y viceversa a través del convertidor back-to-back.

Dado que la potencia máxima del rotor es aproximadamente del 30% de la potencia nominal del estator, la potencia nominal de los convertidores es reducida sustancialmente en comparación con otros sistemas de generación eólica cuyo convertidor está dimensionado a la capacidad nominal del generador. El costo de los convertidores de potencia y los filtros armónicos es sustancialmente menor que el de los sistemas de conversión eólica cuyo convertidor está dimensionado a la capacidad nominal del generador. Las pérdidas de potencia en el convertidor son también menores causando un mejoramiento global de la eficiencia. Además el sistema puede operar inyectando o absorbiendo potencia reactiva sin componentes adicionales [4]. Y cuando la velocidad del viento se encuentra por debajo de la velocidad nominal, un DFIG operando a velocidad variable puede capturar más energía del viento que un aerogenerador a velocidad fija de la misma capacidad.

Dependiendo de la velocidad angular del rotor (ω_r), existen tres modos de operación para el DFIG:

- El Modo Supersincrónico se produce cuando el generador opera sobre la velocidad sincrónica (ω_s), lo que provoca que el deslizamiento (s) sea negativo y por tanto la potencia mecánica (P_m) capturada por la turbina sea inyectada a la red a través del estator (P_s) y por el rotor (P_r) mediante el convertidor back-to-back. Despreciando las pérdidas, en este modo se cumple que: $P_m = |P_s| + |P_r|$
- El Modo Subsincrónico se produce cuando el generador opera bajo la velocidad sincrónica (ω_s), lo que provoca que el deslizamiento (s) sea positivo y por tanto inyecta la potencia activa que recibe del eje de la turbina y de la red a través del convertidor back-to-back hacia la red solo por el estator. Despreciando las pérdidas, en este modo se cumple que: $P_m = |P_s| - |P_r|$
- El Modo Sincrónico se produce cuando el generador opera a velocidad sincrónica (ω_s), es decir, $\omega_r = \omega_s$, lo que provoca que el deslizamiento sea cero y la potencia que circula por el rotor es cercana a cero.

Conversor

Dado que los sistemas de generación eólica producen energía a frecuencia variable, es necesario una etapa de conversión AC/AC para que el producto inyectado en el sistema eléctrico tenga una frecuencia fija e igual a la red eléctrica. Esta conversión se realiza mediante el uso de diferentes topologías de convertidor de poder, las cuales idealmente deben cumplir con que sean confiables, con costos de mantenimiento bajos, peso y tamaño reducido y bajas pérdidas [9]. La conversión AC/AC puede ser directa o indirecta. En el caso indirecto existe un enlace en corriente continua que conecta dos convertidores que realizan una etapa de conversión AC/DC y DC/AC, mientras en el caso directo no existe el enlace de corriente continua. La ventaja del método indirecto es que desacopla el generador de la red, ya que posee un componente de almacenamiento de energía en el DC-Link, permitiendo una mayor compensación cuando el sistema se encuentra desbalanceado y una mayor holgura al momento de inyectar o absorber reactivos. Su mayor inconveniente es la necesidad de un almacenamiento DC, que requiere de un mayor mantenimiento y lo hace más costoso [8]. La principal ventaja del método directo, donde se incluye el convertidor matricial, es que solo es necesaria una etapa de conversión, y por tanto no requiere de un almacenamiento de energía intermedio. Además, es más eficiente al tener menores pérdidas por switching y un mejor desempeño en contenido armónico que el convertidor back-to-back de dos niveles. Su mayor inconveniente se debe a que al carecer del sistema de almacenamiento de energía, es más complicado cumplir con Low-Voltage Ride-Through (LVRT) [8]. A continuación se presenta una revisión bibliográfica sobre la aplicación de controladores predictivos a convertidores de potencia, que resuelven el problema de optimización por enumeración explícita usando diferentes funciones de costos. Para luego pasar a las técnicas usadas para operar sistemas de generación eólico de gran escala.

2.2. Estado del arte

La estrategia de control predictivo ¹ (MPC por sus siglas en inglés) ha sido exitosamente aplicada en procesos de la industria química, donde las constantes de tiempo son lo suficientemente grandes para realizar todos los cálculos requeridos. En el ámbito de la electrónica de potencia las primeras aplicaciones de MPC se desarrollaron a partir de 1980, considerando sistemas de alta potencia con una baja frecuencia de switching [18]. El uso de una frecuencia de switching alta no fue posible debido a que el tiempo requerido para realizar los cálculos era demasiado alto. Sin embargo con el desarrollo de microprocesadores cada vez más rápidos y con mayor capacidad de cómputo el interés en aplicar el MPC en electrónica de potencia aumentó considerablemente. De esta forma y tal como se presenta en [19], se han desarrollado importantes avances aplicados a inversores, rectificadores y en la integración de fuentes renovables no convencionales a los sistemas eléctricos para resguardar la seguridad. En el trabajo mencionado se realiza un análisis de la distribución en relación a las aplicaciones y año de

¹El MPC se tratará en mayor profundidad en el capítulo 4.

publicación, tal como se muestra en el gráfico de la Figura 6, donde se tienen cuatro tipos de aplicaciones que son: convertidores conectados a la red, inversores conectados a una carga RL, inversores con filtro LC y máquinas. Se puede notar que la atención de la comunidad científica ha aumentado durante el periodo analizado para todas las categorías revisadas, y que además aplicaciones conectadas a la red son las que tienen la mayor atención sobre las demás.

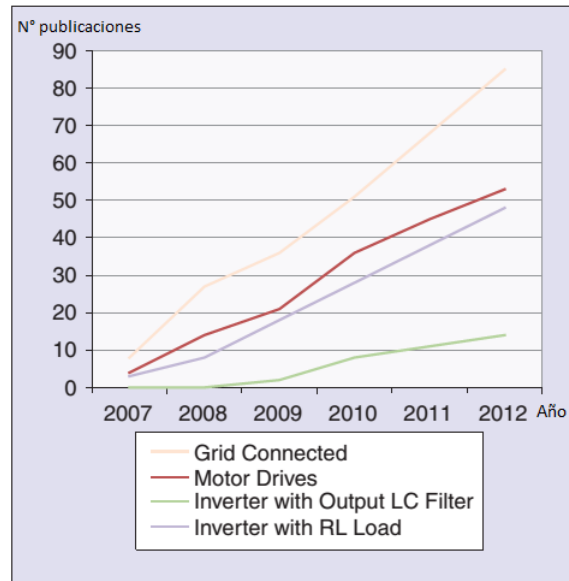


Figura 6: Distribución en relación a aplicaciones y año de publicación de las investigaciones donde se implementa MPC, [19].

Así como también se han estudiado diversas técnicas que permiten que generadores como el DFIG, puedan cumplir con los requerimientos impuestos por los operadores de red de los sistemas interconectados. Al respecto se presenta un listado de los estudios más significativos para la investigación desarrollada, pasando desde el uso de estrategias de control predictivas a inversores y rectificadores, sin el uso de un modulador hasta el uso de control predictivo modulado.

En [2] se presenta una clasificación de los algoritmos de control predictivo. Obteniéndose las siguientes dos categorías:

- Continuous Control Set MPC: En esta categoría un modulador genera los estados de conmutación de los IGBT del convertidor de potencia a partir de salidas continuas provenientes del controlador predictivo. Cabe señalar que cuando se resuelve el problema de optimización no se consideran los estados de conmutación de los semiconductores, es decir, se ignora su naturaleza discreta [2].
- Finite Control Set MPC: En esta categoría se saca un mayor partido a la naturaleza discreta del convertidor de potencia, ya que estos tienen un número limitado de estados

de conmutación. Por lo que la solución del problema de optimización se reduce a evaluar solo la predicción de los estados de conmutación posibles en la función de costos, solución que será aplicada en el siguiente periodo de muestreo. La principal ventaja de esta categoría es que las acciones de control son aplicadas directamente al convertidor sin la necesidad de usar una etapa de modulación [2], [19].

En la tabla 1 se presentan las variables más comunes que pueden ser incluidas en una función de costos y como esas variables están relacionadas con diferentes objetivos de control [2]. La función de costos más común corresponde al seguimiento que realiza una variable de una referencia, expresada como el error entre la variable predicha y el comportamiento deseado del sistema [3]. Por ejemplo, es posible implementar un controlador de corriente para un sistema trifásico utilizando la función de costos asociada a la corriente de la tabla 1. En cambio, se puede controlar una máquina eléctrica utilizando el torque, el flujo o la potencia activa y reactiva. Además, al controlar un sistema se busca mantener un compromiso entre el seguimiento de la referencia, el esfuerzo de control y otros objetivos que se requieran alcanzar, es necesario agregar estos requerimientos dentro de la función de costos por medio de las variables relacionadas, ponderadas por un factor de peso, que compensa la diferencia de magnitud entre variables y modifica la importancia de cada término de acuerdo a los requerimientos deseados para controlar el sistema [11].

En [3] y [4], se analizan las tecnologías de generadores eólicos actualmente fabricadas y las topologías de convertidores utilizados en la industria para integrar la generación eólica a los sistemas interconectados, a su vez se realiza una comparación de las tecnologías de generación eólica en cuanto a peso, radio del estator, costos, pérdidas, entre otros, concluyendo que el tipo de generador DFIG es ampliamente más competitivo en cuanto a peso, radio y costos en comparación con el generador de Jaula de Ardilla (SCIG) y el de Imanes Permanente (PMG), pero es superado en términos de pérdidas y ruido. Además presenta el método de control vectorial para DFIG, SCIG y PMG. Finalmente se analiza la conexión a la red de estos generadores considerando los armónicos y las fallas y/o desbalances de la red. Se concluye finalmente que, a pesar de que el DFIG es más económico, es necesario ocupar convertidores de mayor tamaño para cumplir con los requerimientos establecidos por el operador del sistema, perdiendo la ventaja comparativa de que la electrónica de potencia es dimensionada al 30 % de la potencia nominal. A pesar de lo anterior, este tipo de generador es ampliamente utilizado en la industria, razón por la cual será usado para implementar las tres estrategias de control predictivas en este trabajo de tesis.

En [9], [20] y [21], se realizaron trabajos de investigación en los cuales se implementa una estrategia de control predictivo con enumeración explícita o Finite Control Set MPC en un inversor de dos niveles conectado a la red. En estos se utiliza el modelo del sistema para predecir la carga y la corriente para cada estado de los switches del inversor y mediante una función de costos se encuentra la acción de control que minimiza el error. Luego esta acción se aplica en los switches respectivos que generan un voltaje tal que se logra controlar el sistema. El modelo discreto utilizado para predecir la corriente está dado por la Ec.2.4 que se deduce

Variable de Control	Función de costos	Nomenclatura	Descripción
Corriente	$g_i = i_\alpha^* - i_\alpha^p + i_\beta^* - i_\beta^p $	$i_{\alpha,\beta}^*$ $i_{\alpha,\beta}^p$	corriente de referencia corriente predicha
Voltaje	$g_v = v_{o\alpha}^* - v_{o\alpha}^p + v_{o\beta}^* - v_{o\beta}^p $	$v_{o\alpha,o\beta}^*$ $v_{o\alpha,o\beta}^p$	Voltaje de referencia Voltaje predicho
Torque	$g_T = T_e^* - T_e^p $	T_e^* T_e^p	Torque de referencia Torque predicho
Flujo	$g_\Psi = \Psi_s ^* - \Psi_s ^p $	$ \Psi_s ^*$ $ \Psi_s ^p$	Flujo de referencia Flujo predicho
Potencia activa	$g_P = P^* - P^p $ $P^p = v_{s\alpha}i_{s\alpha} + v_{s\beta}i_{s\beta}$	P^* P^p	Potencia activa de referencia Potencia activa predicha
Potencia reactiva	$g_Q = Q^* - Q^p $ $Q^p = v_{s\beta}i_{s\alpha} - v_{s\alpha}i_{s\beta}$	Q^* Q^p	Potencia reactiva de referencia Potencia reactiva predicha
Frecuencia del switch	$g_n = n_c$	n_c	N.de conmutaciones para alcanzar el prox. estado

Tabla 1: Funciones de costo reportadas en [2].

del modelo electrico interno de un inversor:

$$i(k+1) = \frac{1}{RT_s + L} [Li(k) + T_s v(k+1) - T_s e(k+1)] \quad (2.4)$$

Donde, i es la corriente que circula por el inversor, e es el voltaje de la red, v es el voltaje generado en el inversor, T_s es el periodo de muestreo, R y L son la resistencia y la inductancia del filtro respectivamente, que une el inversor con el sistema eléctrico. El voltaje de la red puede ser medido o estimado a partir de la Ec.2.5:

$$\hat{e}(k) = v(k) + \frac{L}{T_s} i(k-1) - \frac{RT_s + L}{T_s} i(k) \quad (2.5)$$

El modelo que predice el comportamiento de la corriente se evalúa en la función de costos dada por la Ec.2.6, para realizar una comparación entre los valores deseados del sistema dados por la referencia y los predichos por el modelo y así minimizar el error de forma de llevar a cabo un correcto seguimiento de las referencias. Además se utilizan los valores absolutos de

cada expresión para simplificar el problema y medir correctamente el error.

$$g = |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)| + |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)| \quad (2.6)$$

Donde:

- i_{α}^* e i_{β}^* corresponden a la parte real e imaginaria de la corriente de referencia.
- i_{α} e i_{β} corresponden a la parte real e imaginaria de la corriente predicha.

Se realiza además una comparación de esta estrategia con el método de control por Histéresis y un controlador PI utilizando modulación PWM. De este estudio se concluye que el método propuesto tiene un mejor desempeño en los transientes y que en régimen permanente se comporta de igual forma que las otras dos estrategias. Se concluye además que mediante esta estrategia de control propuesta se logra un mayor desacople entre las variables, es decir, se puede controlar una variable sin que las acciones de control necesarias para llevarla a cabo afecten a las demás variables del sistema controladas. Finalmente se desarrolla un análisis de espectro en frecuencia, a partir de lo cual se concluye que las frecuencias se distribuyen en todo el espectro al igual que en el método por histéresis lo que dificulta el dimensionado de filtros de contenido armónico. En [20] se implementa el mismo análisis que el descrito anteriormente, pero se adiciona un análisis de corto circuito en una fase y se evalúan los métodos de control cuando hay desbalances, concluyendo que el método es capaz de operar bajo perturbaciones y falla.

En [21] se aplica la misma estrategia de control predictivo implementado en [2], adicionándole un observador en la inductancia para mejorar el desempeño de esta estrategia en los casos en que se tenga una estimación errada de este parámetro. Esto debido a que en el trabajo se concluye que la calidad de la predicción de la corriente es altamente sensible a una sub o sobre estimación de la inductancia. En cambio un error en el valor de la resistencia no causa un impacto significativo en la calidad de la predicción de la corriente, razón por la cual se aplica un observador sólo para el primer parámetro. El observador está dado por la Ec.2.7, que se obtiene al despreñar la resistencia del modelo de carga del sistema conversor-filtro conectado a la red:

$$\hat{L} = \frac{v - e}{\Delta l} T_s \quad (2.7)$$

Donde, v es el voltaje generado en el inversor, e es la tensión de la red, T_s es el periodo de muestreo, $\Delta l = i(k) - i(k-1)$ es la diferencia de corriente del inversor. La implementación de este observador es consecuencia de que los parámetros del filtro son estimados en pruebas de laboratorio que tienen un error asociado. En caso de tomar un valor levemente distinto al real, en el modelo de predicción se obtienen resultados de menor calidad que un controlador PI.

En [22] se aplica un método de control predictivo a un conversor back-to-back, descrito en la Figura 7. Se controla tanto el inversor como el rectificador mediante controlador

predictivo y la regulación del voltaje del DC-Link se realiza mediante un controlador PI lineal.

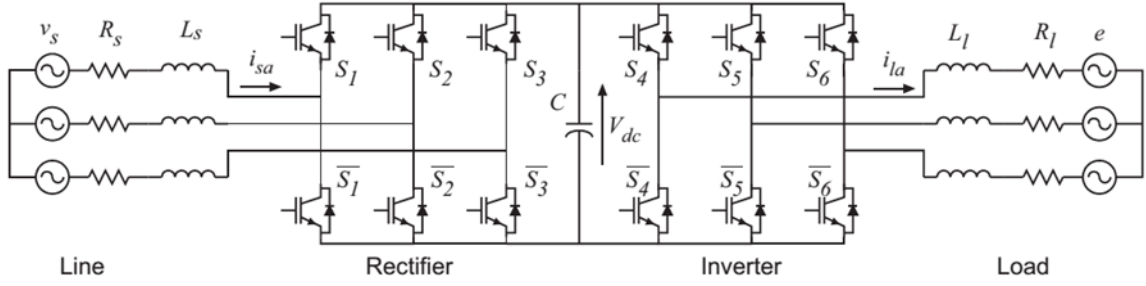


Figura 7: Modelo conversor AC/DC/AC. [22]

El objetivo del controlador predictivo del inversor es realizar el seguimiento de la referencia de la corriente de carga. Para lo que se utiliza la Ec.2.4 como modelo discreto de forma de obtener la corriente en el siguiente paso, la Ec.2.5 para estimar el voltaje de la red y la misma función de costos que en [9].

El objetivo del controlador predictivo para el rectificador es sintetizar la corriente sinusoidal de entrada i_s que se encuentra en fase con el voltaje v_s . Mientras un controlador PI regula el voltaje del condensador en base a la potencia (P_{in}) transferida por el controlador del rectificador.

En el rectificador se utiliza la siguiente función de costos:

$$g_{afe} = |Q_{in}^* - Q_{in}| + |P_{in}^* - P_{in}| \quad (2.8)$$

Donde: Q_{in}^* y P_{in}^* corresponden a la referencia de potencia activa y reactiva de entrada del sistema respectivamente y Q_{in} y P_{in} corresponden a la potencia activa y reactiva predicha por el modelo, que dependen del estado de conducción del rectificador.

Dado que se requiere que el voltaje y la corriente se encuentren en fase para maximizar la transferencia de potencia activa demandada por la carga (P_{load}) y para mantener el voltaje del DC-Link en un valor constante, es necesario que la potencia reactiva sea cero [13]. Además, P_{in}^* se puede descomponer en:

$$P_{in}^* = P_{load}^* + P_{DC}^* \quad (2.9)$$

Considerando lo anterior la función de costos queda expresada a partir de la Ec.2.10:

$$g_{afe} = |-Q_{in}| + |P_{load}^* + P_{DC}^* - P_{in}| \quad (2.10)$$

Como consecuencia de la Ec.2.10 el término P_{load}^* es el mas importante en régimen permanente, ya que en este caso P_{DC}^* es cercano a cero debido a que el voltaje del DC-Link se encuentra balanceado. En cambio el término P_{DC}^* es más relevante en los transientes ya que en estos casos se pierde el balance de voltaje en el enlace de continua [22].

En este método es necesario medir el voltaje del lado del rectificador. Además la corriente es predicha mediante la siguiente ecuación:

$$i_s(k+1) = \frac{1}{R_s T_s + L_s} [L_s i_s(k) + T_s v_{afe}(k+1) - T_s v_s(k+1)] \quad (2.11)$$

Donde, i_s es la corriente que circula por el rectificador, v_s es el voltaje de la fuente, v_{afe} es el voltaje generado en el rectificador que depende del estado de los switches, R_s es la resistencia del filtro que une el rectificador con la fuente, T_s es el tiempo de muestreo y L_s es la inductancia del filtro que une el rectificador con la fuente. Por tanto es posible calcular una potencia óptima a partir de las Ec.2.12 y Ec.2.13 variando los estados del convertor.

$$P_{in}(k+1) = Re\{v_s(k+1)i_s(k+1)\} \quad (2.12)$$

$$Q_{in}(k+1) = Re\{v_s(k+1)i_s(k+1)\} \quad (2.13)$$

La estrategia de control utilizada para el inversor consiste en un seguimiento de referencia de la corriente de carga, ya que la variable controlada es regulada directamente al seguir la referencia de esta corriente. En cambio la estrategia utilizada en el rectificador es de regulación ya que mantiene las variables P y Q en un valor dado, regulando la variable controlada en forma indirecta dado que la potencia activa y reactiva se pueden expresar en función de la corriente i_s de acuerdo a las ecuaciones 2.12 y 2.13.

En la Figura 8 se observa el esquema de control propuesto en [22], a partir del cual se logra controlar un convertor back-to-back. En esta estrategia se mide la corriente de carga (i_s) en el inversor, que luego se hace pasar por el modelo predictivo para obtener 8 valores posibles de corrientes que son aplicados en el inversor de acuerdo a las posiciones de los switches. Estos valores de corrientes son minimizados a partir de la función de costos de la Ec.2.8, para luego ser aplicados en las compuertas de los switch generando el voltaje que causa la corriente que minimiza el error con la referencia. Por el lado del rectificador (AFE), es necesario un controlador PI para mantener el valor del voltaje DC-Link constante y cuya salida entrega la potencia necesaria (P_{dc}^*) que se debe utilizar para lograr este balance. Luego se realiza una estimación de la potencia de la carga (P_{load}^*) a partir de la referencia de corriente del inversor y el voltaje de la red. Y con esto se calcula la potencia activa (P_{in}^*) que es aplicada en la función de costos. En esta estrategia de control predictivo, es necesario medir la corriente del lado del rectificador y el voltaje de la fuente opuesta, para así obtener los 8 valores de corriente, de acuerdo a los 8 posiciones factibles en un rectificador de 3 piernas, que serán minimizados con

la función de costos de la Ec.2.10. Con lo anterior se logra controlar un convertidor back-to-back a dos fuentes ideales trifásicas mediante dos controladores predictivos descentralizados y un controlador PI.

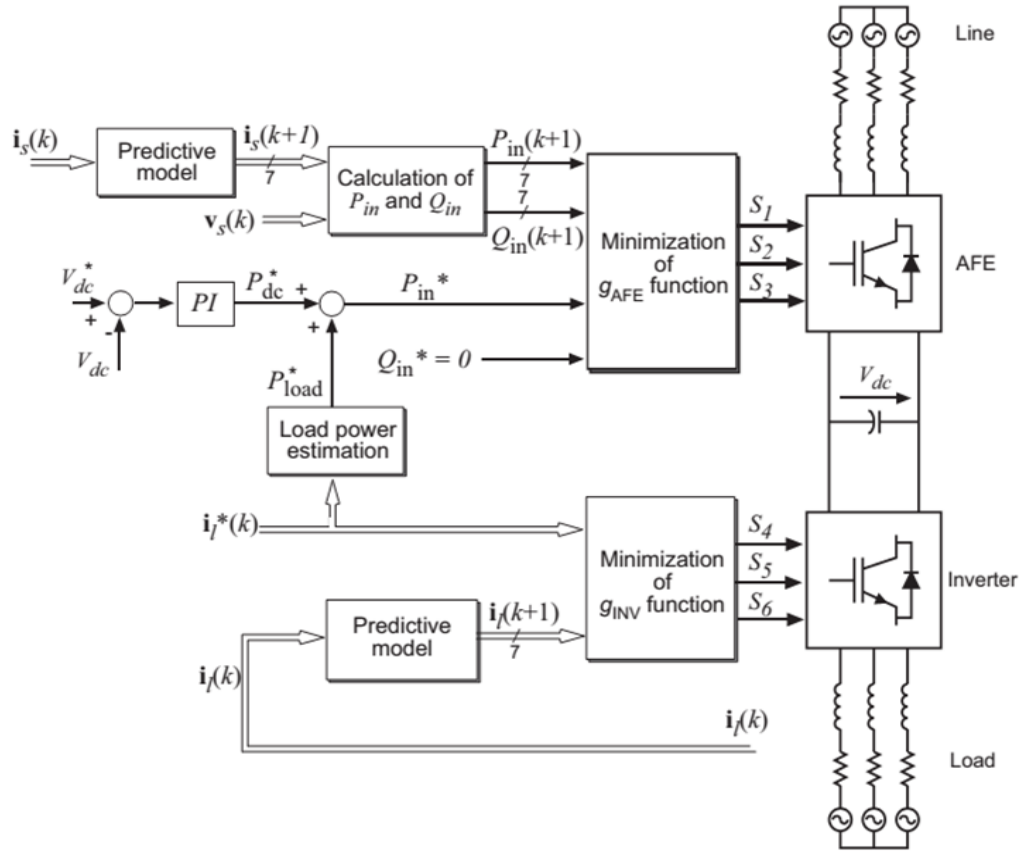


Figura 8: Esquema de control propuesto [22]

En [23] se presentan las distintas funciones de costos utilizadas para controlar un inversor, rectificador y una máquina. En este último caso la función de costos utilizada es:

$$g = |T_e^* - T_e| + A ||\psi_s^*| - |\psi_s|| \quad (2.14)$$

Donde T_e^* y ψ_s^* corresponden a la referencia del torque y el flujo del estator, T_e y ψ_s corresponden a los valores predichos del flujo del estator de una máquina eléctrica. Para el inversor y el rectificador, la estrategia de control utilizada es la misma que en [22]. Además se diseña un controlador predictivo de un inversor de 3 niveles NPC (Neutral Point Clamed), donde la función de costos a minimizar considera que las corrientes sigan la trayectoria deseada, que los condensadores se mantengan balanceados y que baje la frecuencia del switch.

En [24] se implementa el mismo controlador predictivo que en [9], y se comparan los

resultados con los obtenidos por la siguiente función de costos:

$$h(k) = |i_{e\alpha}(k+1)| + |i_{e\beta}(k+1)| \quad (2.15)$$

Donde se introduce un filtro $F(z)$ como factor de peso:

$$\begin{aligned} i_{e\alpha}(k) &= F(z)(i_{\alpha}^*(k) - \hat{i}_{\alpha}(k)) \\ i_{e\beta}(k) &= F(z)(i_{\beta}^*(k) - \hat{i}_{\beta}(k)) \end{aligned} \quad (2.16)$$

F corresponde a un filtro discreto. La motivación por la cual se utiliza esta función de costos es que al implementar un controlador predictivo en inversores los armónicos del espectro en frecuencia se distribuyen a lo largo de todo el ancho de banda, a diferencia de lo que ocurre al usar un controlador PI donde los armónicos se concentran en los múltiplos de la frecuencia portadora. Por lo que el filtro discreto F se toma como un filtro rechaza banda, centrado en cierta frecuencia f , que es elegida de acuerdo al espectro de frecuencia que se desee para las corrientes. En este trabajo se analizan frecuencias de 2 y 4 kHz, para las cuales se obtiene que el espectro en frecuencia se encuentra en torno a las frecuencias de la señal portadora utilizada para modular. De esta forma se logra mejorar el efecto de los armónicos e implícitamente disminuir la frecuencia de switching.

En [26] se aplica el mismo método utilizado en [9] y se compara con los resultados obtenidos al utilizar la siguiente función de costos de la Ecuación 2.17 que le agrega un tercer término que penaliza los cambios que ocurren en los swith del inversor, para disminuir la frecuencia del switching, ya que al ser alta esta frecuencia aumentan considerablemente las pérdidas producidas por la electrónica de potencia y en el extremo puede provocar que se quemem.

$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^p| + \lambda|v - v_{k-1}| \quad (2.17)$$

Esto permite disminuir el tiempo de muestreo manteniendo la frecuencia de switching dentro de los límites térmicos de los IGBT. El parámetro λ corresponde a un factor de peso que normaliza la magnitud del voltaje en comparación con la corriente y fija la importancia entre realizar un seguimiento de la corriente o limitar las transiciones de una iteración a otra. Además se compara esta estrategia con un controlador lineal, donde sólo se puede realizar un cambio de posición por cada cálculo. El desarrollo anterior se basa solamente en analizar la aplicación de estrategias de control predictivo a inversores, para luego compararlo con el rendimiento obtenido mediante controladores PI. Sin embargo, es necesario internalizar las restricciones impuestas por el sistema donde serán utilizados los inversores, tales como los sistemas de generación eólica, que no aborda este trabajo.

Con el objetivo de disminuir las exigencias computacionales en [25] se propone una estrategia de control predictivo simplificado, que sólo necesita un subconjunto de todos los vectores de voltaje para encontrar el óptimo. Para esto los autores notaron que en régimen permanente el voltaje que se debe aplicar en el convertidor se encuentra girando en sentido antihorario a velocidad sincrónica, como se muestra en la Figura 9. La estrategia MPC propuesta utiliza la información del vector de referencia del voltaje (V^*) para seleccionar un subconjunto de estados posibles del inversor (vectores) para encontrar el estado óptimo que minimiza el error entre la referencia y la variable predicha. El sector de la referencia del voltaje viene dado por su ángulo θ_{vref} que se obtiene a partir del ángulo de referencia de corriente θ_{iref} y del ángulo de desfase producido por la carga ϕ_1 . A partir de lo anterior, para un sector dado, el número de vectores del inversor posiblemente óptimos pueden ser reducidos desde 7 a 3, es decir, son necesarios 2 vectores activos adyacentes y un vector 0.

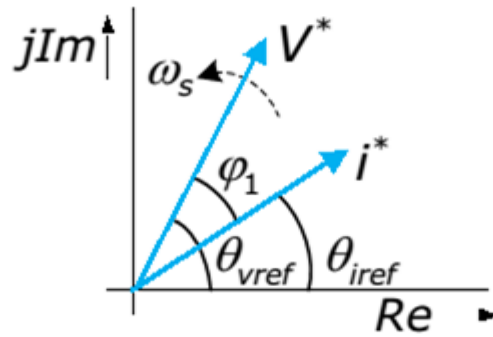


Figura 9: Determinación del ángulo óptimo para disminuir la cantidad de iteraciones del proceso. [25]

En la Figura 10, se muestra el diagrama de flujo de la estrategia propuesta, para el cual se divide previamente el plano Real-Imag. en 6 sectores de acuerdo a la posición de los interruptores, luego dentro del método se calcula el ángulo óptimo ψ_1 , necesario para seguir las referencias (θ_{iref} y θ_{vref}) y luego se debe encontrar el sector al que pertenece para elegir el vector que minimiza la función de costos. Cuando el sistema se encuentra en régimen permanente el número de transiciones de los switch se limita a una transición por periodo de cálculo, ya que el objetivo es disminuir los cálculos y de forma implícita la frecuencia del switching. En el caso de un transiente se permiten 2 transiciones, ya que en este caso prima el objetivo de realizar un buen seguimiento de las referencias. Se concluye que mediante este método se logra disminuir la cantidad de cálculos en cada iteración debido a que sólo se utiliza un subconjunto de estados posibles. Además, como el siguiente estado es adyacente al anterior se logra disminuir considerablemente la frecuencia de switching y como consecuencia de esto se disminuye la distorsión armónica de la corriente.

Lo anterior corresponde a una primera aproximación al control predictivo modulado, ya que utiliza la lógica de modulación SVM para reducir el número de vectores necesarios, encontrar el óptimo y disminuir la carga computacional de esta estrategia de control. El control predictivo modulado ha sido recientemente implementado como solución al alto ruido presente en las ondas del corriente y voltaje al utilizar controladores predictivos que se conectan directamente a la electrónica de potencia sin utilizar un modulador y por tanto

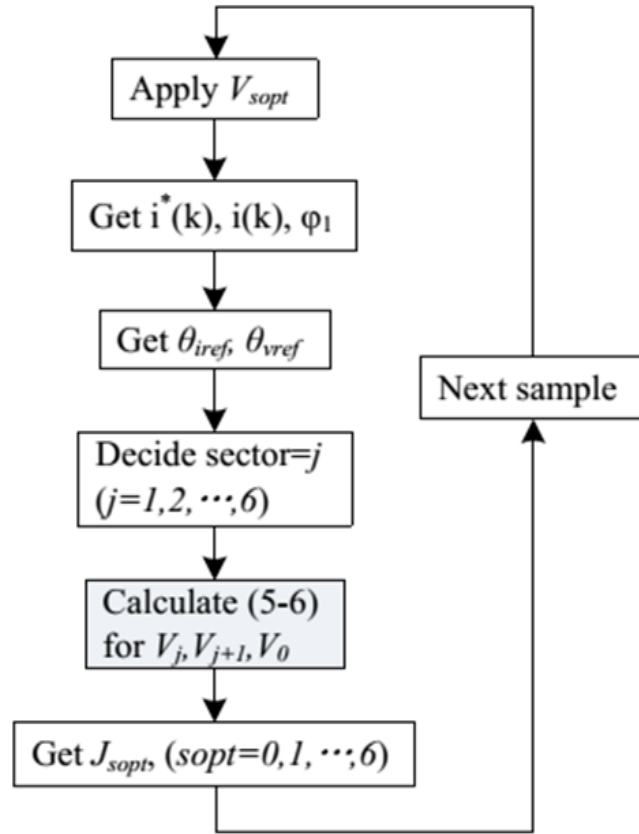


Figura 10: Diagrama de flujo del método propuesto. [25]

con un número limitado de estados. Esto provoca que el contenido armónico se distribuya a lo largo de todo el espectro de frecuencia, limitando superiormente el tiempo de muestreo que se utiliza inyectando a la red un producto con una baja distorsión armónica, es decir, a medida que aumenta el tiempo de muestreo se obtienen peores resultados en relación al contenido armónico por lo que en la práctica este tiempo no puede tomar un valor demasiado alto. En [33] se utiliza una estrategia de control predictivo modulada en un inversor de dos niveles que se conecta a un filtro RL. En esta se utiliza un modulador, que permite generar un número infinito de voltajes en las piernas del inversor. Para esto, los seis vectores activos del inversor al igual que en la modulación SVM, son transformados a coordenada $\alpha - \beta$ que definen un plano de acuerdo a la Figura 11.

Luego para cada voltaje deseado se selecciona el sector al que pertenece y se seleccionan los vectores adyacentes. Por ejemplo, para un voltaje ubicado en el sector I, los vectores adyacentes son v_1 y v_2 que corresponden al valor óptimo buscado. El siguiente paso es encontrar el ciclo de trabajo de la modulación SVM, que consiste en encontrar el tiempo en que debe ser aplicado v_1 (este tiempo está dado por d_1), v_2 (dado por d_2) y al tiempo asociado a voltaje

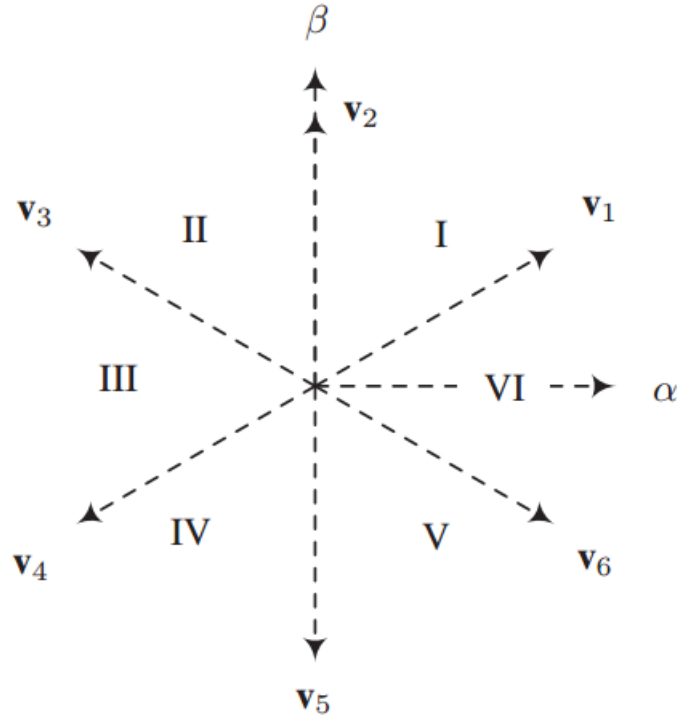


Figura 11: Vectores para un inversor de dos niveles. [33]

ceros. Luego se cumple que:

$$\begin{aligned}
 d_0 &= K/g_0 \\
 d_1 &= K/g_1 \\
 d_2 &= K/g_2 \\
 d_0 + d_1 + d_2 &= T_s
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Donde g_0 es la función de costos evaluada en el vector cero.
 g_1 es la función de costos evaluada en el vector 1.
 g_2 es la función de costos evaluada en el vector 2.

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior se obtiene que el ciclo de trabajo viene dado por la ecuación 2.19:

$$\begin{aligned}
 d_0 &= T_s g_1 g_2 / (g_0 g_1 + g_1 g_2 + g_0 g_2) \\
 d_1 &= T_s g_0 g_2 / (g_0 g_1 + g_1 g_2 + g_0 g_2) \\
 d_2 &= T_s g_0 g_1 / (g_0 g_1 + g_1 g_2 + g_0 g_2)
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

A partir de lo anterior se logra controlar un inversor mediante un controlador predictivo modulado que entrega los vectores óptimo y los tiempos asociados al ciclo de trabajo que son utilizados una segunda etapa, que corresponde a la modulación SVM. Como resultado se obtiene que los armónicos se concentran en múltiplos de la señal portadora. Además, al utilizar este tipo de controladores se disminuye el risado de las ondas de corriente y voltaje, lo que permite utilizar un tiempo de muestreo mayor a una estrategia predictiva que carece de modulador.

En el caso de aplicaciones de integración eólica, además del objetivo de realizar un buen seguimiento de las referencias y disminuir la frecuencia promedio de operación de los interruptores, es necesario cumplir con requerimientos de la regulación vigente ya que a medida que aumenta la penetración de parques eólicos en los sistemas eléctricos, en periodos de baja carga, el sistema se vuelve más vulnerable. Esto debido a que no hay suficientes máquinas convencionales que sean capaces de absorber las variaciones repentinas en la generación o la carga. Razón por la cual los operadores de sistemas eléctricos han establecido restricciones para la operación de este tipo de fuente energética variable, las cuales son mencionadas en [27], [30], [31] y [32]. A medida que la penetración eólica se vuelve mas significativa es necesario que los aerogeneradores se mantengan conectados a la red cuando ocurren situaciones que alteran su normal funcionamiento, especialmente cuando estas modifican la tensión donde estos generadores inyectan energía al sistema. Por lo que en Chile, China, EEUU y la Unión Europea (Dinamarca, Alemania, España, entre otros) se han formulado reglas que establecen que los parques eólicos deben permanecer conectados a la red bajo ciertas condiciones de la perturbación. Por ejemplo, en la Figura 12 si la caída de tensión es inferior al 15 % del nominal del generador, este puede desconectarse libremente. Sin embargo, si la caída no es tan severa en magnitud el generador eólico debe permanecer conectado durante un tiempo mínimo, que está dado por la Figura 12, que cuando la caída llega al 15 % debe permanecer desconectado por 625 [ms]. De esta forma apoyan al sistema en su recuperación en situaciones que puedan provocar un black-out.

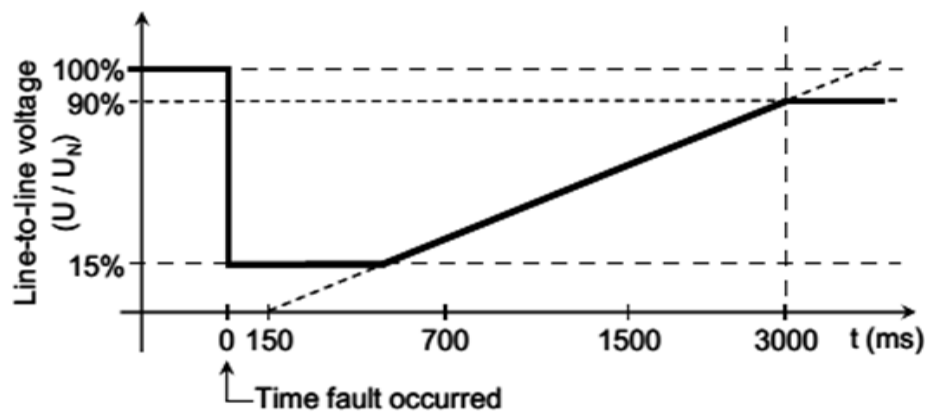


Figura 12: Curva de operación para la desconexión de una turbina eólica. [31], [32].

Además los parques eólicos deben participar en la regulación de tensión aportando reactivos cuando el sistema eléctrico lo requiera. Para hacer esto se debe inyectar potencia reactiva a la red de acuerdo a la curva de la Figura 13. Por ejemplo, de acuerdo a esta

figura si la caída de tensión es mayor o igual al 50 % del valor nominal, es necesario inyectar la totalidad de la potencia disponible de generador en forma de reactivos. Para corroborar lo anterior, en [31] se diseña una estrategia de control predictivo basado en la función de costos, para un convertidor de tres niveles NPC dada por la Ecuación 2.20 para evaluar el comportamiento de un inversor al aplicarle caídas de tensión en la red en distintas magnitudes. Comprobando que se cumple lo estipulado en la Figura 13.

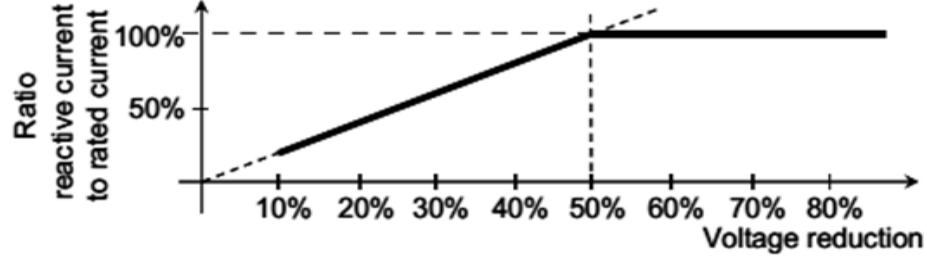


Figura 13: Curva de operación de la corriente en presencia de caídas de tensión. [31], [32].

$$f(i^*(k+1), i(k+1)) = |i_\alpha^*(k+1) - i_\alpha(k+1)| + |i_\beta^*(k+1) - i_\beta(k+1)| + \lambda_{DC} \cdot |v_p(k+1) + v_n(k-1)| \quad (2.20)$$

Donde:

- i_α e i_β son la componente real e imaginaria del vector corriente de la red.
- i_α^* e i_β^* son la componente real e imaginaria del vector referencia de corriente de la red.
- v_p y v_n son los voltajes de los condensadores del DC-Link del conversor NPC.

Los dos primeros términos de la ecuación 2.20 permiten el seguimiento de las referencias, y el tercer término mantiene balanceado el voltaje de los condensadores. Los resultados obtenidos al inducir una caída de tensión son corrientes simétricas, y los voltajes de los condensadores se mantienen según la referencia. Además durante la caída de tensión se obtienen potencias activas y reactivas oscilantes, pero que en promedio cumplen con los valores exigidos por los códigos de red. Cuando los sistemas eléctricos de potencia se encuentran en condición de falla generalmente ocurren desbalances en la red trifásica, los que provocan la aparición de oscilaciones de doble frecuencia en las señales. Este fenómeno induce pulsaciones de torque en las máquinas que se alimentan de la red, por lo que es necesario atenuar sus efectos nocivos [27]. En [32] se logra disminuir las oscilaciones de potencia activa, cambiando el método de cálculo de las referencias de corrientes propuesto en [31]. Al expresar la potencia

tanto activa como reactiva en coordenadas $d - q$, aparecen además de la potencia promedio, componentes sinusoidales asociadas por una parte al seno y por otra al coseno cuya frecuencia es el doble que la red. Esta relación está dada por la siguiente relación matricial:

$$\begin{bmatrix} P \\ P_{2c} \\ P_{2s} \\ Q \\ Q_{2c} \\ Q_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sdp} & v_{sqp} & v_{sdn} & v_{sqn} \\ v_{sdn} & v_{sqn} & v_{sdp} & v_{sqp} \\ v_{sqn} & -v_{sdn} & -v_{sqp} & v_{sdp} \\ v_{sqp} & -v_{sdp} & v_{sqn} & -v_{sdn} \\ v_{sqn} & -v_{sdn} & v_{sqp} & -v_{sdp} \\ -v_{sdn} & -v_{sqn} & v_{sdp} & -v_{sqp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \\ i_{dn} \\ i_{qn} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Donde:

P: Potencia activa fundamental inyectada a la red.

Q: Potencia reactiva fundamental inyectada a la red.

P_{2c} : Armónico de potencia activa de doble frecuencia asociado al coseno.

P_{2s} : Armónico de potencia activa de doble frecuencia asociado al seno.

Q_{2c} : Armónico de potencia reactiva de doble frecuencia asociado al coseno.

Q_{2s} : Armónico de potencia reactiva de doble frecuencia asociado al seno.

i_{dp} : Corriente del convertor de secuencia positiva en eje directo.

i_{dn} : Corriente del convertor de secuencia negativa en eje directo.

i_{qp} : Corriente del convertor de secuencia positiva en eje cuadratura.

i_{qn} : Corriente del convertor de secuencia negativa en eje cuadratura.

v_{sdp} : Voltaje de la red de secuencia positiva en eje directo.

v_{sdn} : Voltaje de la red de secuencia negativa en eje directo.

v_{sqp} : Voltaje de la red de secuencia positiva en eje cuadratura.

v_{sqn} : Voltaje de la red de secuencia negativa en eje cuadratura.

A partir de lo anterior se observa que existen seis parámetros que varían en el sistema, de los cuales es posible manipular solo cuatro, por lo que existen dos grados de libertad en este sistema.

Las referencias en [32] son calculadas de acuerdo las ecuaciones 2.22 y 2.23, de acuerdo a consignas de potencia y datos obtenidos de la operación del sistema eléctrico. Con la aplicación de estas estrategias solo se logra la disminución de las oscilaciones de potencia activa, sin incidir sobre la potencia reactiva.

$$\begin{bmatrix} i_{dp}^* \\ i_{qp}^* \\ i_{dn}^* \\ i_{qn}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sdp} & v_{sqp} & v_{sdn} & v_{sqn} \\ v_{sdn} & v_{sqn} & v_{sdp} & v_{sqp} \\ v_{sqn} & -v_{sdn} & -v_{sqp} & v_{sdp} \\ v_{sqp} & -v_{sdp} & v_{sqn} & -v_{sdn} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P^* \\ -\Delta P_{2c} \\ -\Delta P_{2s} \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dp}^* \\ i_{qp}^* \\ i_{dn}^* \\ i_{qn}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sdp} & v_{sqp} & v_{sdn} & v_{sqn} \\ v_{sdn} & v_{sqn} & v_{sdp} & v_{sqp} \\ v_{sqn} & -v_{sdn} & -v_{sqp} & v_{sdp} \\ v_{sqp} & -v_{sdp} & v_{sqn} & -v_{sdn} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P^* \\ 0 \\ 0 \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Con lo anterior se logra controlar el sistema en presencia de una caída de tensión en el sistema eléctrico utilizando controladores PI, de forma que cuando se presenta la perturbación se logra inyectar la cantidad necesaria de reactivos. Cabe destacar que, en las estrategias mencionadas en las ecuaciones 2.22 y 2.23 es necesario realizar una separación entre secuencia positiva y negativa. Una forma de lograrlo es utilizar un filtro de Notch el cual está dado por la siguiente función de transferencia:

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (2.24)$$

Este filtro tiene la propiedad de eliminar la frecuencia ω_0 de una señal, lo que en este caso corresponde a eliminar la componente en doble frecuencia de las señales en coordenadas $d - q$ y así lograr separar la secuencia positiva de la negativa, para luego operarlas de forma independientes. Otra forma de solucionar el problema mencionado es utilizando Delayed Signal Cancellation (DSC), lo cual permite separar la secuencia positiva de la negativa en coordenadas $\alpha - \beta$. El método viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$V_{\alpha\beta}^+ = \frac{V_{\alpha\beta} + j(V_{\alpha\beta}(t - T/4))}{2} \quad (2.25)$$

$$V_{\alpha\beta}^- = \frac{V_{\alpha\beta} - j(V_{\alpha\beta}(t - T/4))}{2} \quad (2.26)$$

Dónde:

T: periodo es el fundamental.

Con los métodos propuestos en [31] y [32] para calcular las referencias se logra satisfacer los requerimientos de los códigos de red o normas técnicas establecidas por cada país y disminuir las oscilaciones de potencia activa. En particular, el método de la ecuación 2.23 permite llegar a mejores resultados, ya que hay un mejor seguimiento de las referencias de potencia debido a que las oscilaciones son nulas. En cambio en el método propuesto en la ecuación 2.24, si bien las oscilaciones disminuyen en amplitud, no se anulan [28]. Debido a que cuando hay caída de tensión se producen sobrecorrientes y sobrevoltajes en los enrollados del rotor de la máquina DFIG [30], se presenta una investigación [27], que busca predecir la evolución de las variables eléctricas de manera de explicar estos fenómenos a través de un análisis teórico. En este caso se define que el flujo magnético de la maquina se divide en dos

componentes. La primera componente corresponde al “flujo forzado” que rota a velocidad sincrónica y está relacionado con el voltaje del estator. La segunda componente es el “flujo natural”, que solo aparece durante transientes debido a cambios en el voltaje. Para realizar el análisis se estudian 2 casos:

1. Cuando la caída de tensión es total.
2. Cuando la caída de tensión es parcial.

En el caso 1 solo existe flujo natural ya que como el flujo forzado es proporcional al voltaje del estator, este es cero. El flujo natural depende del estado magnético de la máquina y su amplitud decrece exponencialmente como una componente dc, lo que provoca sobrevoltajes en el rotor. En el caso 2 se presenta flujo natural y forzado, que es proporcional al voltaje del estator, provocando que los voltajes sean de menor amplitud que el caso 1. A partir de los casos analizados se concluye que el flujo natural provoca los sobrevoltajes en el rotor. Si el convertidor conectado al rotor no es capaz de trabajar con estos voltajes se originan sobrecorrientes en el estator y rotor del generador, perdiendo el control de la corriente. Para evitar esto el convertidor debe ser dimensionado de tal forma de generar un voltaje igual al máximo sobrevoltaje que puede aparecer. Sin embargo, esto implicaría dimensionar un convertidor a la potencia del generador. Lo que haría perder una ventaja comparativa del DFIG.

2.2.1. Discusión

En este capítulo se describieron las partes de un generador eólico, donde destaca la turbina que es la encargada de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, que permite hacer girar el rotor del generador eléctrico para producir electricidad. Otra de las componentes vitales en el aerogenerador es el convertidor que tiene una doble funcionalidad, ya que por un lado transforma la corriente y el voltaje producidos por el generador con una frecuencia variable a una corriente y voltaje con frecuencia fija dada por la red. Por otro lado, el convertidor es capaz de controlar el funcionamiento de generador eléctrico, por lo que al regular este dispositivo se logra operar el generador de acuerdo a como se desee. Además, en este capítulo se realiza una revisión bibliográfica sobre la aplicación de controladores predictivos en electrónica de potencia, en específico a inversores y rectificadores. En estas estrategias de control se resuelve el problema de optimización mediante enumeración explícita, para aplicar el óptimo en las compuertas de los IGBT del convertidor sin la necesidad de utilizar un modulador. Esto genera un mayor rizado en las ondas de corriente y voltaje, que a su vez provoca que las frecuencias se encuentran distribuidas a lo largo de todo el espectro afectando la calidad del producto que se inyecta a la red. Debido a este inconveniente, recientemente se está estudiando el control predictivo modulado, que soluciona dicho problema permitiendo utilizar un tiempo de muestreo mayor que al utilizar una estrategia predictiva convencional sin perjudicar los resultados. Esto se logra por el uso de un modulador y una etapa de modulación SVM. A partir de lo anterior, se observa que el

MPC se ha llevado a cabo en equipos de pequeña escala y con modelos de predicción fáciles de implementar como inversores y/o rectificadores, encontrando la solución al problema de optimización en un tiempo acotado. Sin embargo, no han sido implementadas estrategias de control predictivo en sistemas de gran escala, ya que se debe realizar un equilibrio entre el periodo de muestreo y la calidad de los resultados, ya que los modelos de predicción son más complicados y es necesario un tiempo mayor para alcanzar a resolver el problema de optimización. Por lo que la contribución de este trabajo es implementar nuevas formas de regular el DFIG, que es el aerogenerador mayormente utilizado a nivel mundial. Para lo cual se propone usar una estrategia de control predictivo descentralizado, centralizado y distribuido para contribuir a que este tipo de tecnología siga ganando terreno tanto en la matriz energética nacional como internacional, sustituyendo generación convencional a partir de combustibles fósiles por energía limpia obtenida a partir de un recurso renovable como es el viento.

Modelación del sistema

3.1. Modelación del generador de inducción de doble excitación

A continuación se presenta la modelación de la parte eléctrica del generador eólico, que está compuesta por el generador de inducción de doble alimentación (DFIG) y su convertor back-to-back.

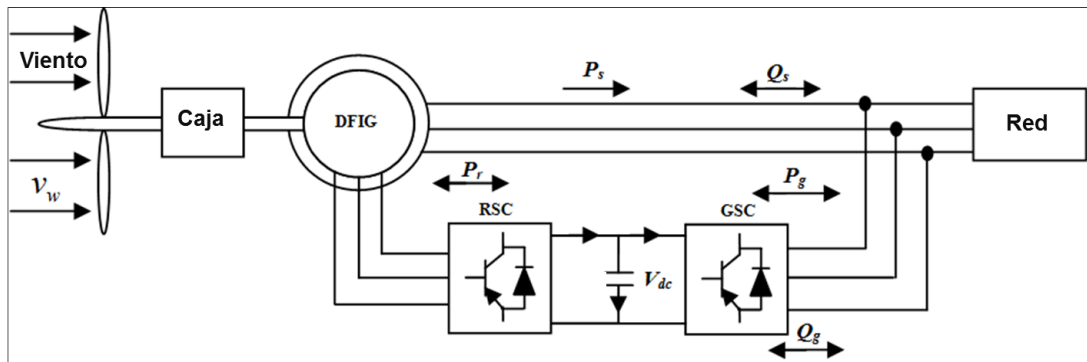


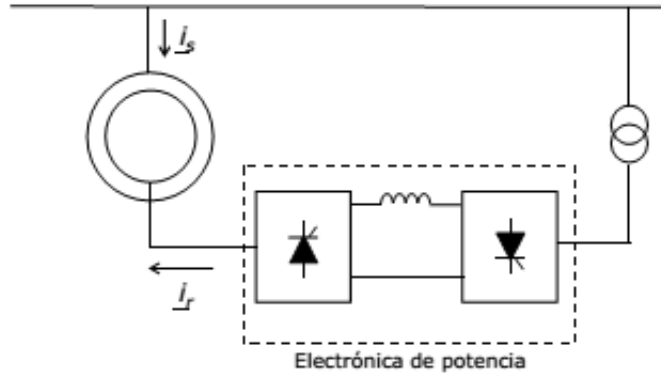
Figura 14: Esquema del generador de inducción doblemente alimentado [34].

El comportamiento dinámico de la máquina de inducción de doble excitación está definido en α y β por las ecuaciones 3.1 y 3.2, para estator y rotor respectivamente. En la Ec 3.1 se define la relación entre el voltaje (\bar{v}_s), la corriente (\bar{i}_s) y el flujo ($\bar{\psi}_s$) para el estator. Asimismo en la Ec 3.2 se define relación entre el voltaje (\bar{v}_r), la corriente (\bar{i}_r) y el flujo ($\bar{\psi}_r$) pero ahora para el rotor [10].

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \quad (3.1)$$

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} \quad (3.2)$$

Se asume que el sentido convencional de las corrientes circula hacia la máquina tanto para el caso rotor como estator, como se observa en la Figura 15.



Máquina de doble excitación controlada por tiristores conectados al rotor.

Figura 15: Máquina de doble excitación controlada por tiristores conectados al rotor [10]

Los flujos se calculan de acuerdo a las expresiones de la Ec 3.3 y Ec 3.4, donde las variables de estado son: la Corriente del rotor (\bar{i}_r) y el Flujo estator ($\bar{\psi}_s$).

$$\bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_o \bar{i}_r \quad (3.3)$$

Donde: $L_s = L_o + l_s$

$$\bar{\psi}_r = L_o \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (3.4)$$

Donde: $L_r = L_o + l_r$

A partir de la Ec 3.3 se obtiene que la corriente del estator se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\psi}_s - L_o \bar{i}_r}{L_s} \quad (3.5)$$

Reemplazando la Ec 3.5 en la Ec 3.4 se obtiene que el flujo del rotor está dado por la siguiente expresión:

$$\bar{\psi}_r = \frac{L_o}{L_s} \bar{\psi}_s + \left(L_r - \frac{L_o^2}{L_s} \right) \bar{i}_r \quad (3.6)$$

Luego reemplazando la Ec 3.5 en la Ec.3.1 se obtiene que la expresión que describe el comportamiento de la máquina en el lado del estator es la siguiente:

$$\bar{v}_s = \frac{R_s}{L_s} \bar{\psi}_s - \frac{R_s L_o}{L_s} \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \quad (3.7)$$

Reemplazando la 3.5 en la 3.2 se obtiene la expresión que describe el comportamiento del rotor, que es la Ec 3.8:

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{L_o}{L_s} \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + L_r \sigma \frac{d\bar{i}_r}{dt} \quad (3.8)$$

$$\text{Donde: } \sigma = \left(\frac{L_r L_s - L_o^2}{L_s L_r} \right)$$

Luego para pasar a coordenadas sincrónicas se debe tener en cuenta que los respectivos ejes están girando con velocidad ω_e con respecto al eje $\alpha - \beta$ del estator y a velocidad ω_{sl} con respecto al rotor, por lo que se define la variables variable θ_e , θ_r y θ_{sl} :

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (3.9)$$

$$\theta_r = \int \omega_r dt \quad (3.10)$$

$$\theta_r = \int (\omega_e - \omega_r) dt = \int \omega_{sl} dt \quad (3.11)$$

Para transformar las Ec.3.7 y Ec. 3.8 a coordenadas d-q se realiza lo siguiente:

$$\left[\bar{v}_s = \frac{R_s}{L_s} \bar{\psi}_s - \frac{R_s L_o}{L_s} \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \right] e^{-j\theta_e} \quad (3.12)$$

$$\left[\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r - \frac{L_o}{L_s} \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + L_r \sigma \frac{d\bar{i}_r}{dt} \right] e^{-j\theta_{sl}} \quad (3.13)$$

Obteniéndose:

$$\bar{v}_{sdq} = \frac{R_s}{L_s} \bar{\psi}_{sdq} - R_s \frac{L_o}{L_s} \bar{i}_{rdq} + \frac{d\bar{\psi}_{sdq}}{dt} + j\omega_e \bar{\psi}_{sdq} \quad (3.14)$$

$$\bar{v}_{rdq} = R_r \bar{i}_{rdq} - \sigma L_r \frac{d\bar{i}_{rdq}}{dt} + j\sigma L_r \omega_{sl} \bar{i}_{rdq} + \frac{L_o}{L_s} \frac{d\bar{\psi}_{sdq}}{dt} + j\omega_{sl} \frac{L_o}{L_s} \bar{\psi}_{sdq} \quad (3.15)$$

Separando las Ec. 3.14 y Ec. 3.15 en eje directo y cuadratura, despreciando las condiciones iniciales, y asumiendo que el sistema se orienta en el flujo del estator, es decir, $\bar{\psi}_{sq} = 0$ se obtiene que las ecuaciones dinámicas que modelan la máquina son:

$$v_{sd} = \frac{R_s}{L_s} \psi_{sd} - R_s \frac{L_o}{L_s} \bar{i}_{rd} + \frac{d\bar{\psi}_{sd}}{dt} \quad (3.16)$$

$$v_{sq} = \frac{R_s}{L_s} \psi_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \frac{R_s L_o}{L_s} i_{rq} + \omega_e \psi_{sd} \quad (3.17)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \sigma L_r i_{rq} + \frac{L_o}{L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} \quad (3.18)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_o}{L_s} \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_{sl} \frac{L_o}{L_s} \psi_{sd} \quad (3.19)$$

Cabe señalar que el análisis presentado anteriormente pretende orientar el controlador de forma de emular una máquina de corriente continua.

Con la finalidad de encontrar un modelo en variables de estado del sistema, la Ec.3.2 es ponderada por el término $e^{j\theta_r}$, que se utiliza para referir la dinámica del rotor a coordenadas del estator. Obteniéndose la Ec.3.20:

$$\bar{V}'_r = R_r \bar{i}'_r + \frac{d\bar{\psi}'_r}{dt} - j\omega_r \bar{\psi}'_r \quad (3.20)$$

Reemplazando la Ec.3.3 en la Ec.3.1 se obtiene el voltaje del estator (\bar{V}_s) en función de la corriente del estator (\bar{i}_s) y la del rotor (\bar{i}_r):

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + L_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + L_o \frac{d\bar{i}'_r}{dt} \quad (3.21)$$

Luego reemplazando la Ec. 3.4 en la Ec.3.20 se obtiene:

$$\bar{V}'_r = R_r \bar{i}'_r + L_o \frac{d\bar{i}_s}{dt} + L_r \frac{d\bar{i}'_r}{dt} - j\omega_r L_o \bar{i}_s - j\omega_r L_r \bar{i}'_r \quad (3.22)$$

Separando en parte real e imaginaria:

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_o \frac{di'_{r\alpha}}{dt} \quad (3.23)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_o \frac{di'_{r\beta}}{dt} \quad (3.24)$$

$$V'_{r\alpha} = R_r i'_{r\alpha} + L_o \frac{di_{s\alpha}}{dt} + L_r \frac{di'_{r\alpha}}{dt} + j\omega_r L_o i_{s\beta} + j\omega_r L_r i'_{r\beta} \quad (3.25)$$

$$V'_{r\beta} = R_r i'_{r\beta} + L_o \frac{di_{s\beta}}{dt} + L_r \frac{di'_{r\beta}}{dt} + j\omega_r L_o i_{s\alpha} + j\omega_r L_r i'_{r\alpha} \quad (3.26)$$

Las ecuaciones de estado de una máquina de doble excitación se pueden obtener a partir de las Ec.3.23 a Ec.3.26. Para encontrar los valores de estas ecuaciones se utiliza el software de procesamiento simbólico Mapple.

A partir de la solución encontrada el modelo en variable de estado es el siguiente:

$$\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad (3.27)$$

Donde:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, \vec{u} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix}, \quad A = \frac{1}{(L_o^2 - L_r L_s)} \cdot \begin{bmatrix} L_r R_s & -\omega_r L_o^2 & -L_o R_r & -\omega_r L_o L_r \\ \omega_r L_o^2 & L_r R_s & \omega_r L_o L_r & -L_o R_r \\ -L_o R_s & \omega_r L_s L_o & L_s R_r & \omega_r L_s L_r \\ -\omega_r L_s L_o & -L_o R_s & -\omega_r L_s L_r & L_s R_r \end{bmatrix},$$

$$B = \frac{1}{(L_o^2 - L_r L_s)} \cdot \begin{bmatrix} -L_r & 0 & L_o & 0 \\ 0 & -L_r & 0 & L_o \\ L_o & 0 & -L_s & 0 \\ 0 & L_o & 0 & -L_s \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

A partir de lo anterior se logra construir un modelo en variable de estado del DFIG que permite condensar toda la dinámica del funcionamiento del generador en sólo cuatro ecuaciones, facilitando su implementación. Para así enfocarse en evaluar las distintas estrategias de control.

3.2. Modelación del convertor back-to-back

El convertor back-to-back es el encargado de realizar la transformación AC/DC y DC/AC, para lo cual cuenta con un enlace de continua y dos convertidores, que dependiendo de la dirección del flujo se denominaran rectificador o inversor. De acuerdo a esto se tendrán tres sistemas correspondientes a los dos convertidores y el enlace de continua. Dado que la modelación de los convertidores es análoga se va a analizar solamente la del convertor front-end, que corresponde al convertor que se conecta a la red. La modelación del sistema utilizado se realizó de acuerdo al diagrama de la Figura 16, donde el convertor es modelado como una fuente de voltaje sinusoidal que se conecta a la red mediante un filtro RL [18].

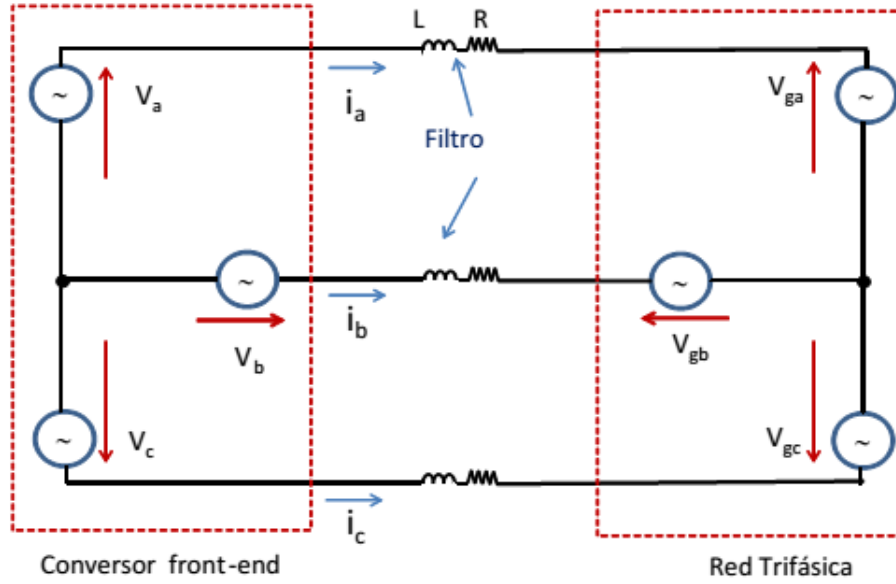


Figura 16: Representación del conversor front-end y la red. [10]

El modelo de la Figura 16 es representado en coordenadas $\alpha - \beta$ como sigue:

$$\bar{v} = R\bar{i} + L\frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{v}_g \quad (3.29)$$

Donde, el voltaje \bar{v} y la corriente \bar{i} de la red están dados por las siguientes expresiones:

$$\bar{v} = v_\alpha + jv_\beta \quad (3.30)$$

$$\bar{i} = i_\alpha + ji_\beta \quad (3.31)$$

La ecuación 3.29 permite obtener un modelo de predicción necesario para implementar los controladores predictivos que regularán esta parte del sistema.

En la Figura 17 se muestra el circuito del inversor utilizado para realizar el diseño. Los estados de los switches en el conversor están determinados por las señales de las compuertas

S_a , S_b y S_c como en la Ec.3.32:

$$\begin{aligned}
 S_a &= \begin{cases} 1, & \text{si } S_1 \text{ está cerrado y } S_4 \text{ si está abierto} \\ 0, & \text{si } S_1 \text{ está abierto y } S_4 \text{ si está cerrado} \end{cases} \\
 S_b &= \begin{cases} 1, & \text{si } S_2 \text{ está cerrado y } S_5 \text{ si está abierto} \\ 0, & \text{si } S_2 \text{ está abierto y } S_5 \text{ si está cerrado} \end{cases} \\
 S_c &= \begin{cases} 1, & \text{si } S_3 \text{ está cerrado y } S_6 \text{ si está abierto} \\ 0, & \text{si } S_3 \text{ está abierto y } S_6 \text{ si está cerrado} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

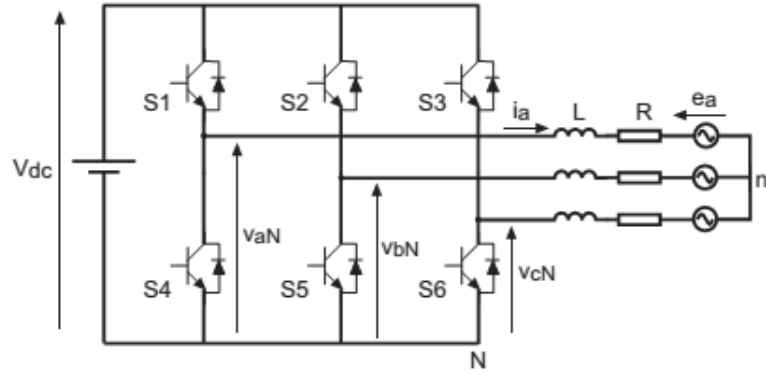


Figura 17: Circuito de un inversor trifásico [12].

Estos pueden ser expresados vectorialmente de acuerdo a la Ec.3.33:

$$S = \frac{2}{3}(S_a + mS_b + m^2S_c) \tag{3.33}$$

Donde: $m = e^{\frac{j2\pi}{s}}$

Estos estados son evaluados en una función de costos para encontrar el óptimo del problema, el cual minimiza dicha función. Por lo que el problema de optimización se resuelve por enumeración explícita.

El vector voltaje de la salida del inversor esta dado por:

$$v = \frac{2}{3}(v_{aN} + mv_{bN} + m^2v_{cN}) \tag{3.34}$$

Donde: v_{aN}, v_{bN}, v_{cN} corresponde a los voltajes de fase neutro generados por el inversor al aplicar la señal en las compuertas de los switch.

La ecuación 3.34 puede ser expresada a su vez como sigue:

$$v = V_{dc}S \quad (3.35)$$

Donde: V_{dc} corresponde al voltaje en el DC-Link

El enlace de continua es modelado de acuerdo a la expresión de la Ec.3.36 donde la diferencia entre la corriente continua proveniente del convertidor lado rotor (I_R) y la corriente proveniente del convertidor lado red (I_G) equivalen a la variación del voltaje en el DC-Link. Esta ecuación permite obtener un modelo de predicción para regular este voltaje.

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = I_R - I_G \quad (3.36)$$

A partir de lo anterior es posible modelar el comportamiento del convertidor back-to-back y con ello obtener los modelos de predicción necesarios para regular este convertidor y operar el generador de inducción doblemente alimentado dentro de sus puntos de operación, permitiendo implementar y evaluar las estrategias de control predictivo que son el motivo de esta tesis.

Estrategias de control predictivo para un generador de inducción de doble excitación

Una herramienta que ha tenido grandes avances las últimas tres décadas son los Modelos de Control Predictivo (MPC), siendo hoy día utilizados en procesos industriales, que van desde tracción vehicular hasta procesos térmicos. En el último tiempo se ha comenzado a utilizar MPC en electrónica de potencia como una forma de mejorar la regulación de estos dispositivos e implementar dichos controladores con una mayor simplicidad en comparación a los controladores PI. Además, las plataformas de control tales como los Digital Signal Processors (DSPs) o Field Programmable Gate Arrays (FPGAs), utilizadas en electrónica de potencia, específicamente en convertidores y rectificadores, se han vuelto más eficientes, en cuanto a capacidad y rapidez de cómputo. Este aumento ha hecho posible la implementación de estrategias de control predictivo con un desempeño cada vez mejor, al poder utilizar un tiempo de muestreo más pequeño. El siguiente paso es utilizar esta herramienta en un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), que corresponde un medio de generación de gran escala, para implementar y probar nuevas formas de regular el DFIG para contribuir a que este tipo de tecnología siga creciendo y reemplazando generación convencional que utiliza combustibles fósiles.

4.1. Control predictivo

El Modelo de Control Predictivo (MPC) se refiere a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control minimizando una función objetivo [12].

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia MPC se basa en el principio de funcionamiento ilustrado en la Figura 18, donde las salidas futuras para un horizonte N dado, llamado horizonte de predicción, se determinan en cada instante t utilizando el modelo del proceso. Estas predicciones de la salida $y(k+t|k)$ para $t = 1 \dots N$ dependen de los valores conocidos hasta el instante k (entradas y salidas conocidas) y de las señales de control $u(k+t|k)$, $t = 0 \dots N-1$, que han de ser calculadas y enviadas al sistema. Luego, la secuencia de señales de control futuras se calcula minimizando un criterio para mantener al proceso lo más cerca posible de la trayectoria de referencia $w(k+t)$. Este criterio toma normalmente la forma de una función cuadrática del error entre la salida predicha

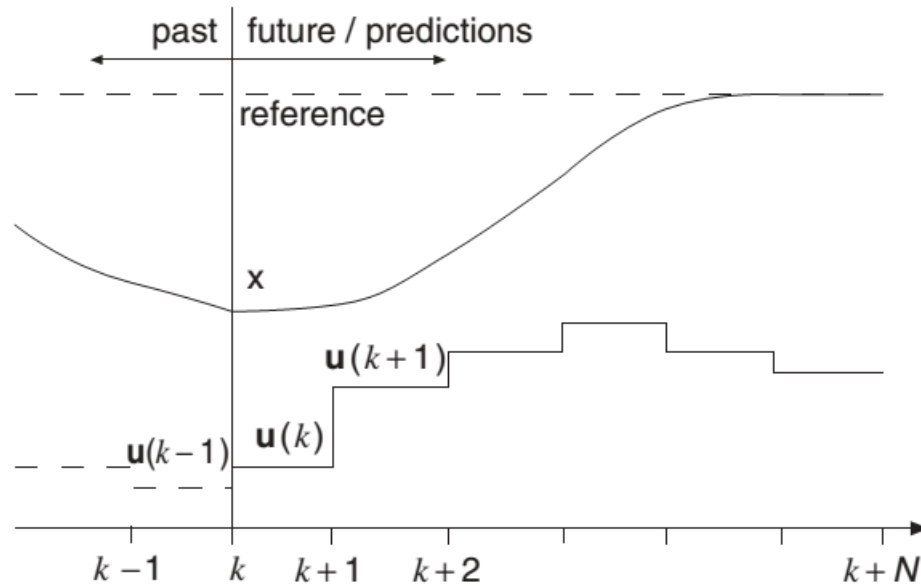


Figura 18: Principio de funcionamiento del MPC [11]

y la trayectoria de referencias futuras. En la mayor parte de los casos se incluye también el esfuerzo de control dentro de la función objetivo. La solución explícita se puede obtener cuando el criterio es cuadrático y el modelo lineal; en caso contrario se ha de utilizar un método numérico para buscar la solución. Por último, la señal de control $u(k|k)$ se envía al proceso, mientras que el resto de las señales calculadas no se consideran, debido a que el instante siguiente de muestreo $y(k+1)$ ya es conocido y los pasos anteriores se repiten con este nuevo valor. Por lo que $u(k+1|k+1)$ se calcula con información diferente y en principio sería también diferente de $u(k+1|k)$.

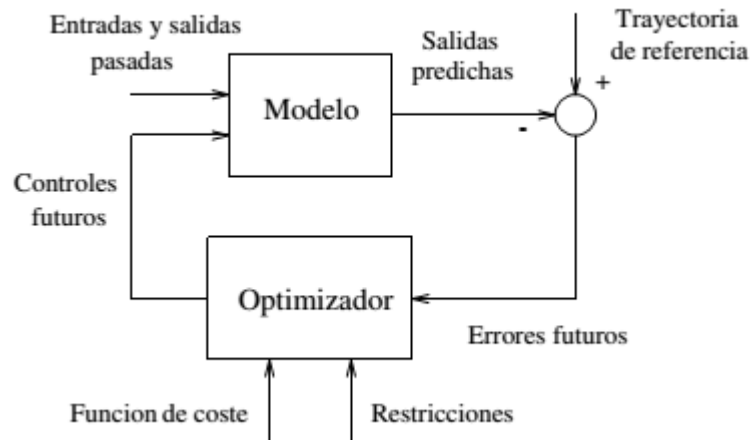


Figura 19: Estructura básica del MPC [11]

La Figura 19 muestra la estructura básica necesaria para implementar el control predictivo. Allí se utiliza un modelo para predecir la evolución de la salida o estado del proceso a partir de las señales de entrada y salidas conocidas. Las acciones de control futuras se

calculan con el optimizador, que considera la función del costo y las posibles restricciones. Por tanto el modelo de proceso juega un papel decisivo en el controlador ya que este debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para predecir de forma precisa la evolución del sistema. Y a su vez, debe ser suficientemente simple de implementar y entender.

La estrategia de control predictivo tiene importantes ventajas, entre las que se encuentran: puede ser aplicado a una gran variedad de sistemas, los casos multivariados pueden ser fácilmente abordados, los tiempos muertos pueden ser compensados, tiene una fácil inclusión de no linealidades al modelo, un tratamiento simple de las restricciones, entre otras.

No obstante, este tipo de controlador también tiene algunas desventajas como el gran número de cálculos que puede implicar en comparación con controladores clásicos, al ser utilizados en electrónica de potencia, ya que es necesario resolver el problema de optimización en cada periodo de muestreo, lo que puede llevar a que en algunos casos el tiempo de cálculo sea demasiado grande para aplicaciones en tiempo real.

4.2. Diseño de las estrategias de control predictivo

En esta tesis se estudia la implementación de las estrategias de control predictivo que se han realizado en el campo de la electrónica de potencia en sistemas de aerogeneración de gran escala. Para esto se utiliza el generador más utilizado en la industria eólica que corresponde al generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). La finalidad es implementar y probar nuevas formas de regular el DFIG utilizando estrategias de control predictivo descentralizado, centralizado y distribuido para contribuir a que este tipo de tecnología siga ganando terreno tanto en la matriz energética nacional como internacional, sustituyendo generación convencional a partir de combustibles fósiles por energía limpia obtenida a partir de un recurso renovable como es el viento. Las estrategias antes mencionadas serán implementadas para controlar el convertidor back-to-back y a través de este operar el generador de inducción doblemente alimentado, sintetizando las corrientes de rotor y red de acuerdo al comportamiento deseado del sistema.

Los supuestos utilizados para implementar estas estrategias de control son los siguientes:

- El aerogenerador se conecta a una barra infinita, por lo que este no es capaz de cambiar la frecuencia ni la tensión de la red.
- La operación del convertidor no produce pérdidas, lo cual es necesario para realizar el balance de energía en el convertidor, para así lograr mantener el voltaje del DC-Link en el valor deseado.
- El voltaje de la red es medido.
- El voltaje DC utilizado en ambos convertidores es medido desde el DC-Link.

- El convertor lado red reacciona de acuerdo a la potencia que recibe el convertor lado rotor, es decir, en el sistema de control del DC-Link, solo se manipula la corriente que va hacia el convertor lado red.

A continuación se detallan las estrategias de control predictivo que serán implementadas en este trabajo de tesis para un convertor back-to-back. En la estrategia de control predictivo descentralizada el convertor es regulado mediante dos controladores predictivos, uno para el lado rotor y el otro para el lado red, y mediante un controlador PI se mantiene el balance del voltaje en el DC-Link. En la estrategia de control predictivo centralizada todo el convertor es regulado mediante un único controlador predictivo. Y por último en la estrategia de control distribuido el sistema es regulado mediante dos controladores predictivos que comunican sus acciones de control, para mantener balanceado el voltaje del DC-Link. Se describen las funciones de costos y las ecuaciones de predicción utilizadas en cada caso, haciendo énfasis en sus principales diferencias y ventajas.

4.2.1. Estrategia de control predictiva descentralizada

La estrategia de control predictivo descentralizado es una técnica de control caracterizada por tener más de un controlador predictivo local en el sistema, allí cada controlador resuelve su problema de optimización de acuerdo a su función de costos sin intercambiar información con los otros reguladores, es decir, cada controlador toma decisiones locales sin considerar los efectos de sus acciones de control dentro del desempeño del sistema en su totalidad [14].

En la Figura 20 se muestra el esquema de la estrategia de control predictivo descentralizado donde el sistema, a modo de ejemplo y sin pérdida de generalidad es fraccionado en tres subsistemas. A partir de lo cual los controladores locales (MPC 1, MPC 2 y MPC 3) resuelven un problema de optimización para cada subsistema de forma independiente, a partir de las variables de entrada provenientes de cada subsistema y de las referencias (Referencia 1, Referencia 2 y Referencia 3) que contienen la información acerca del comportamiento deseado. El óptimo encontrado por cada controlador es válido solo para el subsistema al cual está asociado, y en vista de que estos están relacionados entre sí, cada solución local puede perjudicar el desempeño de los subsistemas contiguos.

En particular, al aplicar esta estrategia de control al convertor back-to-back, este es controlado mediante tres sistemas de control tal como se observa en la Figura 21, donde cada uno de estos subsistemas controla una parte local del sistema, logrando los diferentes objetivos necesarios para que el aerogenerador opere de forma correcta. Específicamente el Sistema de Control I (MPC 1) está encargado de controlar el convertor lado red (subsistema 1), cuya finalidad es sintetizar las corrientes de red. Este control se realiza en coordenadas $\alpha - \beta$ de forma coherente con lo reportado en la literatura. El Sistema de Control II permite controlar el convertor lado rotor (subsistema 2), donde se sintetizan las corrientes del rotor. Este control se realiza en coordenadas sincrónicas $d - q$, manteniendo la lógica de control de máquinas, logrando orientarse en el vector flujo del estator. Por último, el sistema de

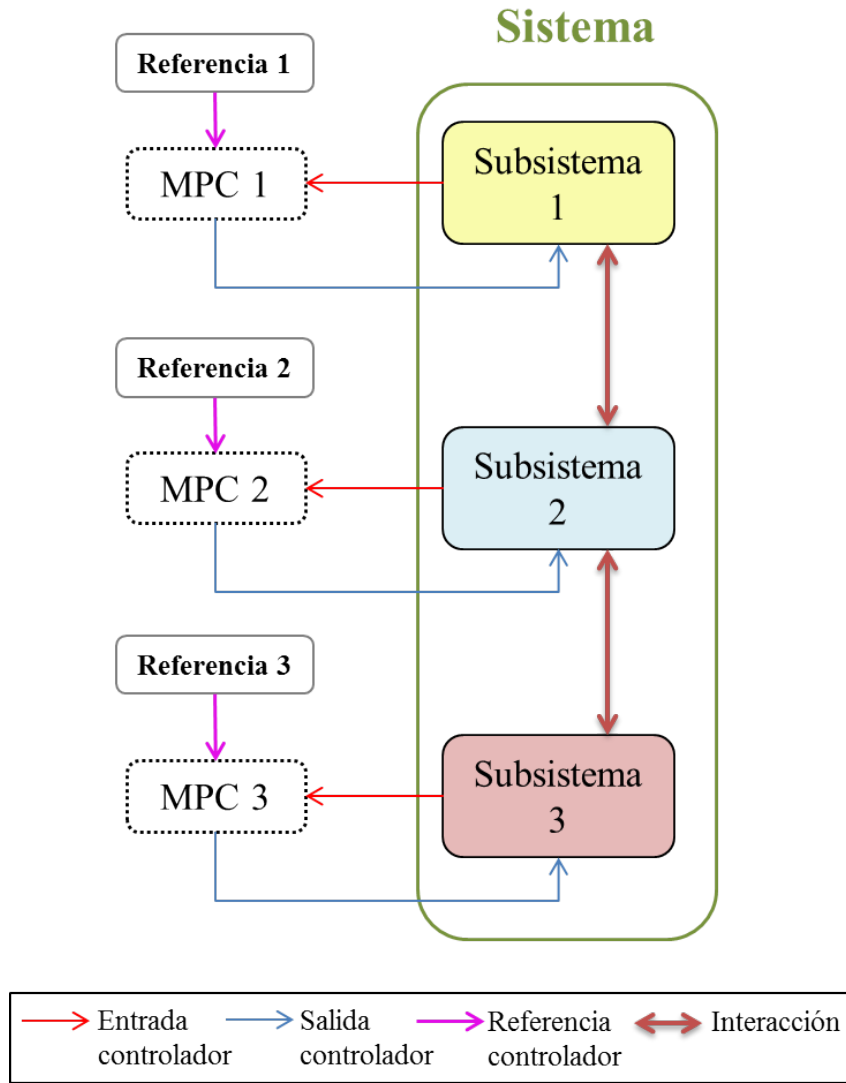


Figura 20: Esquema de la estrategia de control predictivo descentralizado

Control III mantiene el balance de voltaje en el enlace de corriente continua (subsistema 3). Lo cual se realiza mediante un controlador PI, que enlaza el sistema de control I con el II. El controlador PI es sintonizado mediante un modelo de pequeña señal a partir de un balance de potencia activa en el DC-Link y utilizando la técnica del lugar geométrico de las raíces (LGR).

A continuación se detalla el funcionamiento del sistema de control I.

Sistema de control I

El sistema de control I es la sección en la que se controla el convertidor lado red mediante una estrategia de control predictiva que permite generar corrientes de red sinusoidales

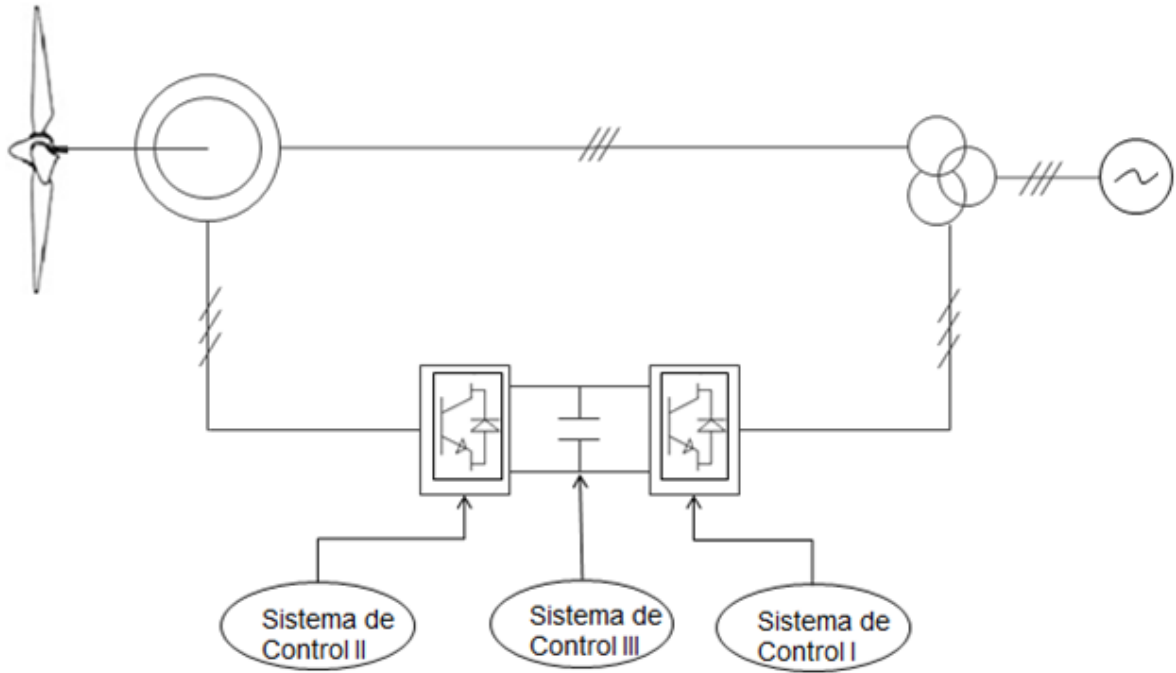


Figura 21: Diagrama de bloques de la estrategia de control predictiva descentralizada.

para maximizar la transferencia de energía desde o hacia la red, dependiendo del punto de operación a la que trabaja el DFIG. Además, mediante esta estrategia se logra controlar la cantidad de reactivos inyectados o absorbidos, para así aportar a la regulación de la tensión desfasando la corriente sintetizada del voltaje de la red.

A partir del diagrama de bloques de la Figura 22 se describe el funcionamiento de la estrategia de control aplicada al convertidor lado red. Allí la corriente de referencia (i^*) y de red (i) son utilizadas en la estrategia de control predictivo para obtener la posición óptima de los switch (S_{2a} , S_{2b} , S_{2c}) en los IGBT, que al ser aplicados al convertidor lado red generan tres voltajes fase-neutro (V_{an} , V_{bn} , V_{cn}). Los que posteriormente son aplicados al filtro lado red. En este diagrama la variable controlada es la corriente de red (i) en coordenadas $\alpha - \beta$ y la variable manipulada es la posición de los switches (S_{2a} , S_{2b} , S_{2c}).

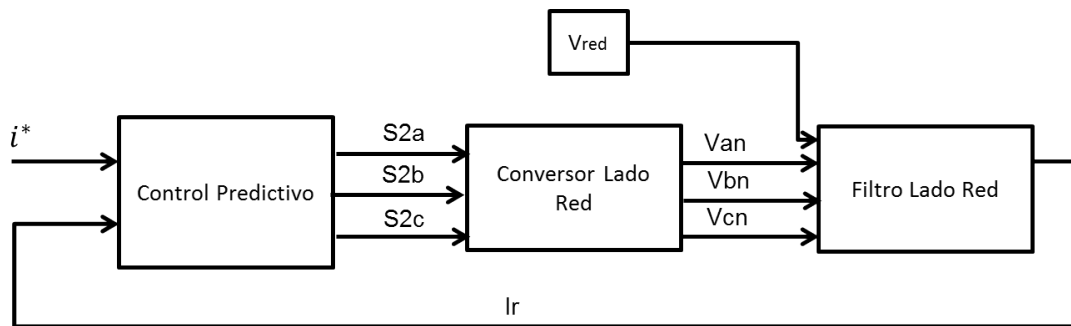


Figura 22: Diagrama de bloques para el convertidor lado red.

En la Figura 23 se esquematiza la operación del control predictivo sobre el convertor lado red. Allí se miden las señales de entrada y salida que corresponden a las corrientes de red (i), el voltaje del DC-Link (V_{dc}) y el voltaje de la red (V_{red}), que son evaluadas en el bloque: Modelo de predicción, elaborado en base a un modelo previo del sistema. Este bloque entrega el valor de 8 corrientes de red que son minimizadas en el bloque: Función de costos, de acuerdo a un criterio que representa el comportamiento deseado del sistema que es obtenido del bloque: Cálculo de referencia. El cálculo de las referencias es llevado a cabo a partir de la potencia activa y reactiva para obtener un factor de potencia dado, en este caso la potencia reactiva es cero. La función de costos de la Figura 23, está dada por la Ec.4.1. El objetivo de esta función es realizar un seguimiento de la referencia de corriente de red (i) calculando el error definido como la diferencia entre el valor de la referencia y el predicho tanto para la componente α como β utilizando una norma cuadrática, para así lograr corrientes de red sinusoidales.

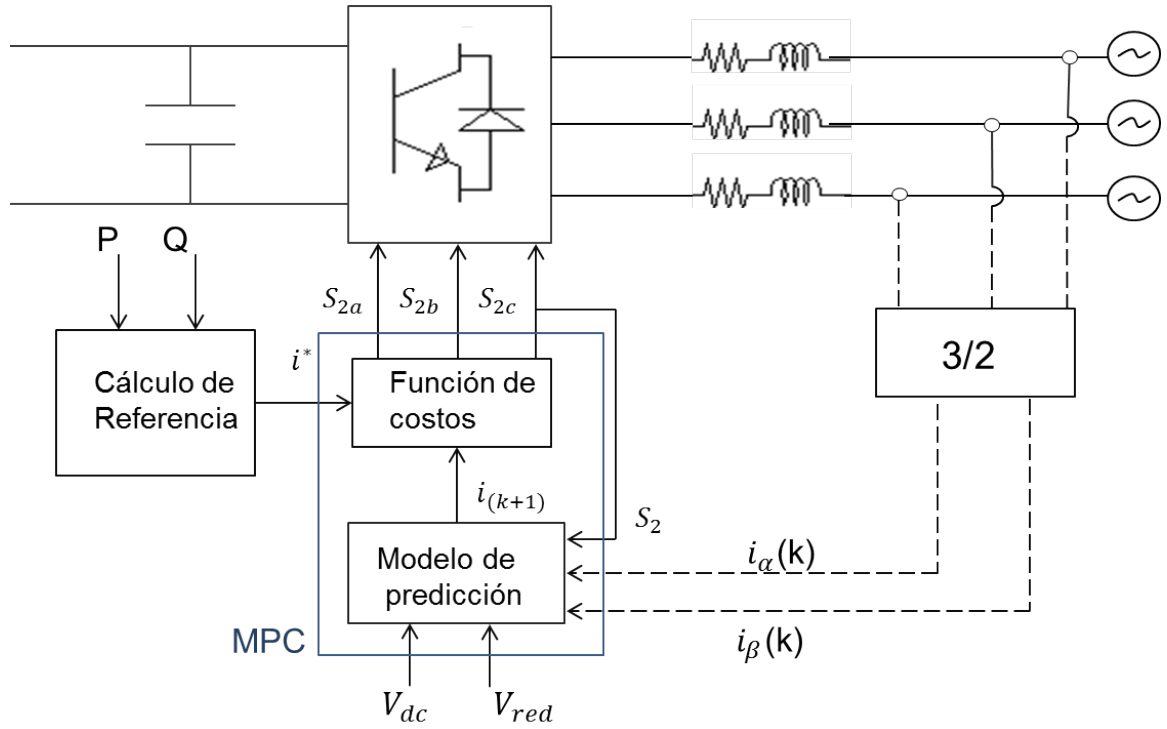


Figura 23: Esquema de control para el convertor lado red.

$$g = [i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)]^2 + [i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)]^2 \quad (4.1)$$

El modelo de predicción señalado en la Figura 23 está dado por la Ec.4.2 bajo el cual se evalúan las corrientes de red (i), el voltaje del DC-Link (V_{dc}) y el voltaje de la red (V_{red}) para obtener la corriente de red en el siguiente instante de tiempo. Esta ecuación se obtiene de la discretización del modelo dinámico del sistema compuesto por el convertor lado red y

el filtro de armónicos con el que DFIG se conecta a la red, dado por la Ec.4.3.

$$i_{\alpha\beta}(k+1) = \left[1 - \frac{T_s R}{L}\right] i_{\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L} [V_{dc}(k)S_2(k) - V_{red\alpha\beta}(k)] \quad (4.2)$$

Donde: $S_x(k) = \frac{2}{3}(S_a + mS_b + m^2S_c)$, $m = e^{\frac{j2\pi}{3}}$, $x = 1,2$

$$v_{\alpha\beta} = Ri_{\alpha\beta} + L\frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + V_{red\alpha\beta} \quad (4.3)$$

A partir de lo anterior se obtiene un modelo para la corriente de red en función de las variables: voltaje del DC-Link (V_{dc}), voltaje de la red (V_{red}) y corrientes de red (i) medidas en el instante k . Y de los parámetros de la resistencia (R) e inductancia (L) del filtro de red, tiempo de muestreo (t_s) y la posición de los switch de los IGBT.

Dado que las referencias de la Ec.4.1 están dadas para un instante de tiempo $k+1$, correspondiente a un tiempo futuro es necesario realizar una estimación de su comportamiento en $k+1$, por lo cual se utiliza una interpolación de segundo orden que viene dada por la Ec.4.4.

$$i^*(k+1) = 3i^*(k) - 3i^*(k-1) + i^*(k-2) \quad (4.4)$$

De acuerdo a la estrategia descrita es posible controlar el convertidor lado red y ajustar las variables controladas de acuerdo a las referencias, que establecen el comportamiento deseado del sistema. Para así lograr sintetizar una corriente de red sinusoidal que permita maximizar la transferencia energética en este tipo de aerogenerador. Para realizar lo anterior es necesario resolver el problema de optimización mediante enumeración explícita, que consiste en evaluar los 8 estados posibles del convertidor lado red y elegir el que minimize la función de costos.

A continuación se describe el funcionamiento del sistema de control II.

Sistema de control II

El sistema de control II es el encargado de controlar el convertidor lado rotor, mediante una estrategia de control predictiva que permite generar corrientes de rotor sinusoidales en fase con el voltaje del rotor para lograr un factor de potencia unitario y de esta forma maximizar la transferencia de la energía capturada por el DFIG.

En el diagrama de bloques de la Figura 24 se describe el funcionamiento de la estrategia de control aplicada al convertidor lado rotor. Allí la corriente de referencia (i^*) y de rotor (i_r) son utilizadas en la estrategia de control predictivo para obtener la posición óptima de los

switch (S_{1a} , S_{1b} , S_{1c}) en los IGBT, que al ser aplicados al convertor lado rotor generan tres voltajes fase-neutro (V_{an} , V_{bn} , V_{cn}) que posteriormente son aplicados al convertor filtro lado rotor. En este diagrama la variable controlada es la corriente de rotor (i_r) en coordenadas sincrónicas $d - q$ y la variable manipulada es la posición de los switches (S_{1a} , S_{1b} , S_{1c}). El DFIG corresponde a la planta del sistema y el convertor lado rotor es un actuador.

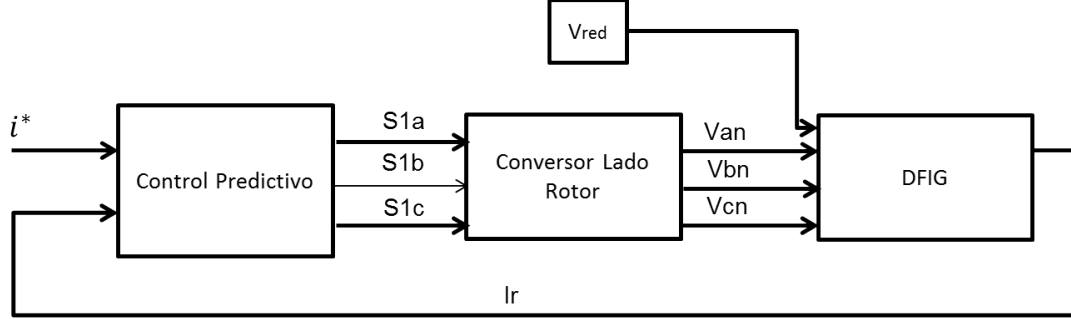


Figura 24: Diagrama de bloques para el convertor lado rotor.

En la Figura 25 se esquematiza la operación del sistema de control II aplicado sobre el convertor lado rotor. Se miden las corrientes de estator (i_s), del rotor (i_r), el voltaje del DC-Link (V_{dc}) y el voltaje del estator (V_s) para ser evaluadas en el bloque: Modelo de predicción, y entregar el valor predicho para 8 corrientes de rotor, que luego son minimizadas en el bloque: Función de costos.

La función de costos de la Figura 25, está dada por la Ec.4.5. El objetivo de esta función es realizar un seguimiento de la referencia de corriente de rotor (i_r) en coordenadas sincrónicas, calculando el error definido como la diferencia entre el valor de la referencia y el predicho tanto para la componente en eje directo como la del eje de cuadratura.

$$g = [i_{rd}^*(k+1) - i_{rd}(k+1)]^2 + [i_{rq}^*(k+1) - i_{rq}(k+1)]^2 \quad (4.5)$$

A partir de lo anterior la variable a optimizar es la corriente del rotor cuyo valor calculado por la evaluación de los 8 estados posibles del convertidor lado rotor. Estos valores son evaluados en la función de costos y el óptimo está dado por el que minimiza esta función.

El modelo de predicción señalado en la Figura 25, se obtiene luego de discretizar el modelo dinámico del convertor lado rotor conectado al rotor del DFIG, dado por las Ec.4.6 y Ec.4.7.

$$\frac{di_{rd}}{dt} = \frac{v_{rd}}{\sigma L_r} - \frac{R_r i_{rd}}{\sigma L_r} + \omega_{sl} i_{rq} - \frac{L_o}{\sigma L_r L_s} \frac{d\psi_{sd}}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = \frac{v_{rq}}{\sigma L_r} - \frac{R_r i_{rq}}{\sigma L_r} + \omega_{sl} i_{rd} - \frac{\omega_{sl} L_o}{\sigma L_r L_s} \psi_{sd} \quad (4.7)$$

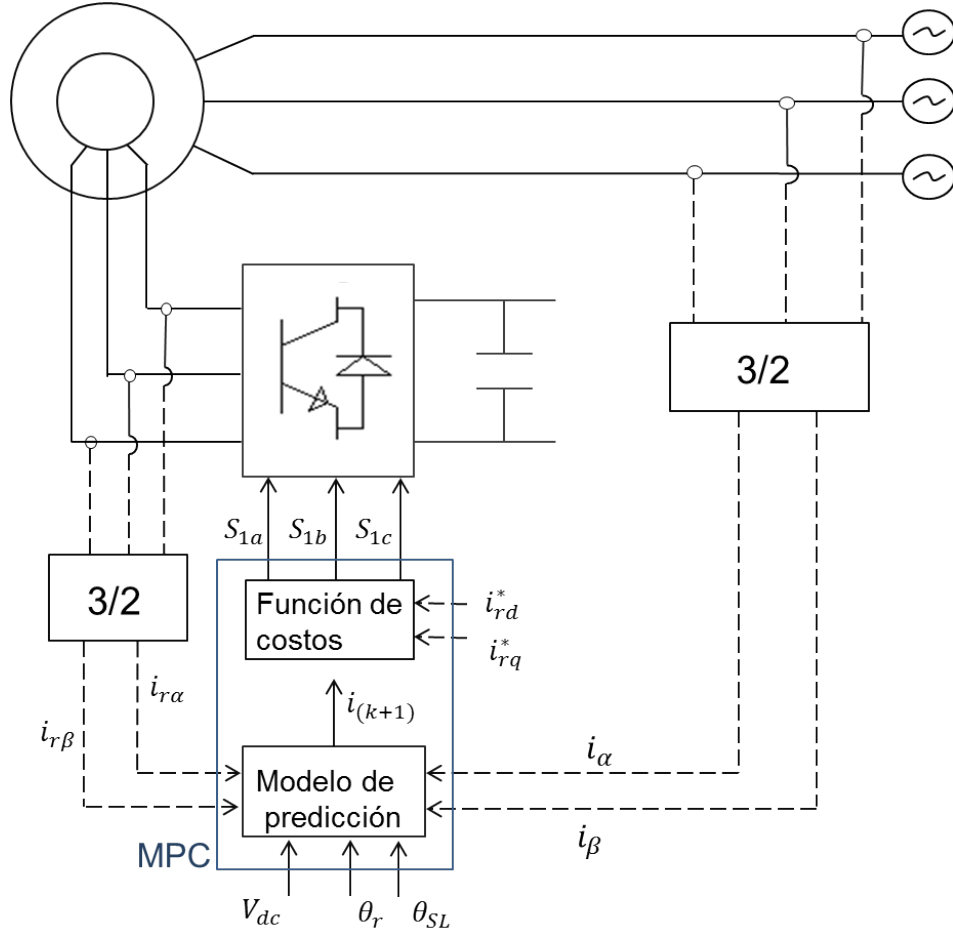


Figura 25: Esquema de control para el convertidor lado rotor.

Así el modelo de predicción en coordenadas $d - q$, queda dado por las Ec.4.8 y Ec.4.9, bajo el cual se evalúan las corrientes del rotor en el instante $k+1$ en el eje directo y cuadratura en función de las corrientes de rotor (i_r), el voltaje del DC-Link (V_{dc}), el voltaje del estator (V_s), la corriente del estator (i_s) y la corriente del rotor en el instante k .

$$\begin{aligned}
 i_{rd}(k+1) = & \left[1 - \frac{T_s R_r}{\sigma L_r} \right] i_{rd}(k) + \frac{T_s}{\sigma L_r} \operatorname{Re} \{ V_{dc}(k) S_1(k) e^{-j\theta_{SL}} \} \\
 & - \frac{T_s L_o}{\sigma L_s L_r} [v_{sd}(k) - R_s i_{sd}(k)] + T_s \omega_{sl} i_{rq}(k)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
 i_{rq}(k+1) = & \left[1 - \frac{T_s R_r}{\sigma L_r} \right] i_{rq}(k) + \frac{T_s}{\sigma L_r} \operatorname{Im} \{ V_{dc}(k) S_1(k) e^{-j\theta_{SL}} \} \\
 & - \frac{T_s \omega_{sl} L_o}{\sigma L_r} i_{sd}(k) - \frac{T_s \omega_{sl} i_{rd}(k)}{\sigma}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

A partir de lo anterior es posible regular el convertidor lado rotor mediante el uso de un

controlador predictivo aplicado al subsistema compuesto por el convertor lado rotor conectado al rotor del aerogenerador doblemente alimentado para lograr sintetizar las corrientes del rotor sinusoidales y en fase con el voltaje del rotor para maximizar la transferencia de energía capturada por las aspas del aerogenerador. Con esto se logra establecer un modelo para el segundo de los tres subsistemas que permiten controlar el convertor back-to-back, faltando solamente el tercer subsistema que regula el voltaje del DC-Link, cuyo funcionamiento se detalla a continuación.

Sistema de control III

El sistema de control III es el encargado de controlar el voltaje del DC-Link mediante un controlador lineal PI que permite balancear la cantidad de energía que entra al enlace de continua con la que sale, para lograr que este voltaje se mantenga en el valor deseado de acuerdo a la referencia (V_{dc}^*). En el diagrama de la Figura 26 se esquematiza la operación del controlador PI del enlace de corriente. Allí se mide el voltaje del DC-Link (V_{dc}) y el error con la referencia ($V_{dc}^* - V_{dc}$) ingresa al controlador PI, que entrega la potencia activa (P) con la que se calculan las referencias necesarias en el convertor back-to-back para mantener el balance en el voltaje. Este controlador PI es sintonizado mediante LGR con un coeficiente de amortiguamiento de 0,8 y una frecuencia natural de 20π , con lo que los polos del controlador son $-50,26 \pm 37,7j$.

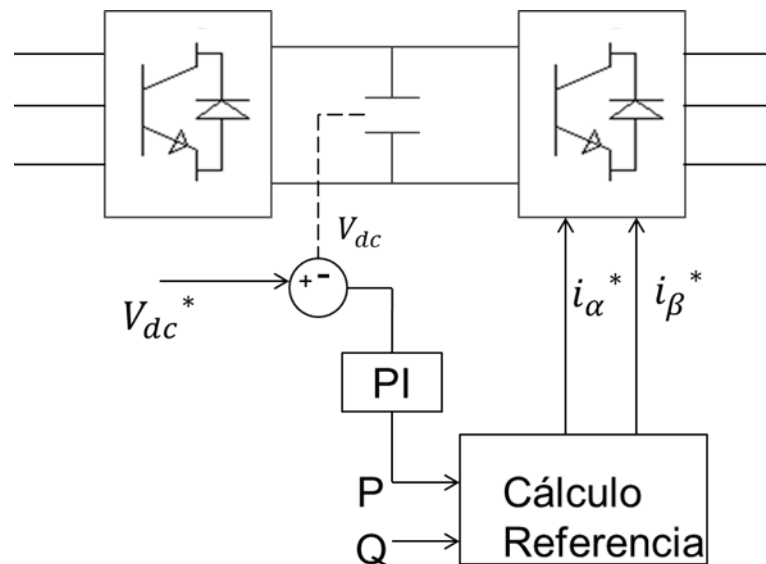


Figura 26: Esquema de control del DC-Link.

El bloque Cálculo de Referencia de la Figura 26 es implementado a partir del uso de la Ec. 4.10, donde a partir de la referencia de potencia activa (P^*) y reactiva (Q^*) y los valores del voltaje de la red en coordenadas sincrónicas para secuencia positiva y negativa, se logran las referencias de corrientes deseadas para el convertor lado red. La referencia de potencia

activa (P^*) es entregada por el controlador PI y la referencia de potencia reactiva (Q^*) se obtiene a partir del factor de potencia deseado.

$$\begin{bmatrix} i_{dp}^* \\ i_{qp}^* \\ i_{dn}^* \\ i_{qn}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sdp} & v_{sqp} & v_{sdn} & v_{sqn} \\ v_{sdn} & v_{sqn} & v_{sdp} & v_{sqp} \\ v_{sqn} & -v_{sdn} & -v_{sqp} & v_{sdp} \\ v_{sqp} & -v_{sdp} & v_{sqn} & -v_{sdn} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P^* \\ 0 \\ 0 \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Donde:

v_{sdp} : Voltaje de la red en eje directo en secuencia positiva.

v_{sqp} : Voltaje de la red en eje de cuadratura en secuencia positiva.

v_{sdn} : Voltaje de la red en eje directo en secuencia negativa.

v_{sqn} : Voltaje de la red en eje de cuadratura en secuencia negativa.

i_{dp}^* : Referencia de corriente de red en eje directo de secuencia positiva.

i_{qp}^* : Referencia de corriente de red en eje de cuadratura de secuencia positiva.

i_{dn}^* : Referencia de corriente de red en eje directo de secuencia negativa.

i_{qn}^* : Referencia de corriente de red en eje de cuadratura de secuencia negativa.

Con la metodología descrita anteriormente, es posible operar un aerogenerador doblemente alimentado controlando el convertidor back-to-back, con una estrategia de control descentralizada, fraccionando el sistema en tres subsistemas que son regulados de forma independiente. Un subsistema es controlado por un controlador PI y los otros dos mediante controladores predictivos, que resuelven el problema de optimización con enumeración explícita evaluando los 8 estados posibles en cada convertidor. Logrando sintetizar corrientes de red y de rotor sinusoidales que siguen las referencias y que permiten mantener el voltaje del DC-Link en el valor deseado.

4.2.2. Estrategia de control predictivo centralizado

La estrategia de control predictivo centralizado es una técnica de control óptima cuyo objetivo es regular los estados y/o salidas del sistema hacia los valores deseados, minimizando la función de costos dentro de una región factible [14]. Este esquema de control se caracteriza por el uso del modelo global para predecir el comportamiento del sistema y las acciones de control son la consecuencia de resolver un único problema de optimización. Por lo tanto, esta depende de la precisión del modelo completo del sistema y la disponibilidad de recursos computacionales lo suficientemente rápidos para encontrar la solución en un tiempo menor al periodo de muestreo utilizado [15].

En la Figura 27 se muestra el esquema de funcionamiento de esta estrategia de control, allí se tiene un único controlador (MPC) que calcula los valores predichos de las variables en función de los datos recopilados por el sistema, para luego minimizar estos valores de acuerdo a las referencias que representan los objetivos de control.

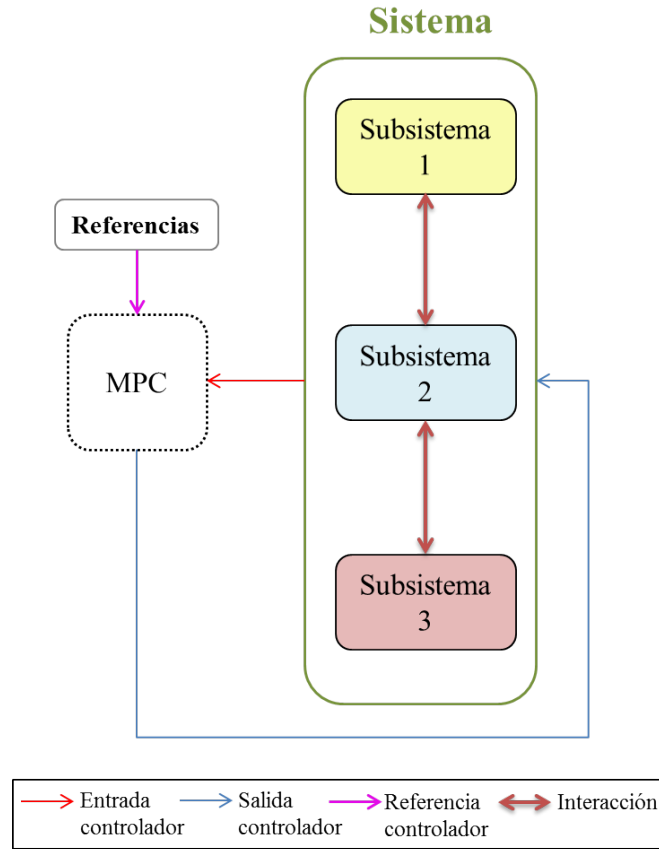


Figura 27: Esquema de la estrategia de control predictivo centralizado

A diferencia de la estrategia de control descentralizada, en este caso no es necesario dividir el sistema en tres subsistemas, ya que como se mencionó anteriormente este tipo de controlador predictivo utiliza un modelo global, cuya solución es un óptimo global [14].

En esta estrategia y tal como se observa en la Figura 28, el convertor back-to-back es controlado mediante un sistema de control predictivo centralizado que mantiene el balance del DC-Link y controla tanto el convertor lado red como el lado rotor de forma tal de lograr sintetizar sus corrientes respectivas. Para lograr esto en el bloque: Modelo de Predicción se implementan tres ecuaciones que son: Ec. 4.11, Ec. 4.12 y Ec. 4.13, las cuales predicen el comportamiento de la corriente de red, del rotor y el voltaje del DC-Link respectivamente.

La Ec.4.11 describe el modelo de predicción para la corriente de red en coordenadas $\alpha - \beta$ en el instante $(k+1)$, a partir de la corriente de red (i), el voltaje del DC-Link (V_{dc}), el voltaje de red (V_{red}) y la posición de los switch del convertor lado red (S_2) en el instante anterior(k).

Red :

$$i_{\alpha\beta}(k+1) = \left[1 - \frac{T_s R}{L}\right] i_{\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L} [V_{dc}(k)S_2(k) - V_{red\alpha\beta}(k)] \quad (4.11)$$

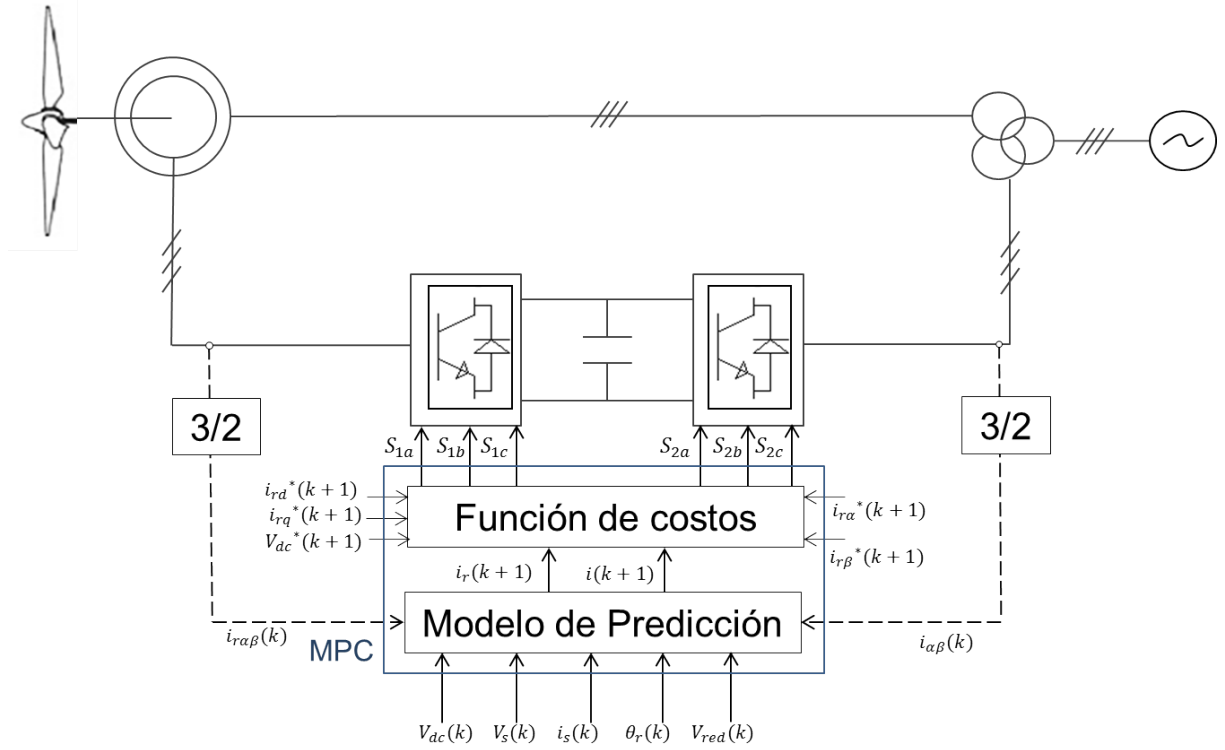


Figura 28: Esquema de control para el convertidor back-to-back para un controlador predictivo centralizado.

La Ec.4.12 describe el modelo de predicción para la corriente de rotor en coordenadas $\alpha - \beta$ en el instante $(k+1)$, a partir de la corriente de rotor (i_r), el voltaje del DC-Link (V_{dc}), el voltaje del estator (V_s), la corriente del estator (i_s) y la posición de los switch del convertidor lado rotor (S_1) en el instante anterior (k) .

Rotor :

$$i_{r\alpha\beta}(k+1) = \left[1 - \frac{T_s R_r}{\sigma L_r} \right] i_{r\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{\sigma L_r} V_{dc}(k) S_1(k) e^{j\theta_r} - \frac{T_s L_o}{\sigma L_s L_r} [v_{s\alpha\beta}(k) - R_s i_{s\alpha\beta}(k)] \quad (4.12)$$

Donde:

$$S_x(k) = \frac{2}{3}(S_a + m S_b + m^2 S_c), \quad m = e^{\frac{j2\pi}{3}}, \quad x = a, b, c$$

La Ec.4.13 describe el modelo de predicción para el voltaje del DC-Link en coordenadas naturales, en el instante $(k+1)$, a partir del voltaje del DC-Link (V_{dc}), las corrientes del rotor (i_r) y red (i) en coordenadas naturales y la posición de los switch del convertidor lado rotor

(S_1) y red (S_2).

DC - Link :

$$V_{dc}(k+1) = V_{dc}(k) + \frac{T_s}{C} \left[\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} (k) \cdot \begin{bmatrix} S_{1a} \\ S_{1b} \\ S_{1c} \end{bmatrix} (k) - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} (k) \cdot \begin{bmatrix} S_{2a} \\ S_{2b} \\ S_{3c} \end{bmatrix} (k) \right] \quad (4.13)$$

Para resolver el problema de optimización en base a enumeración explícita se necesita evaluar todos los estados posibles en el convertidor back-to-back. Dado que se este dispositivo está compuesto por 2 convertidores con 8 estados posibles cada uno, se deben evaluar en total 64 estados posibles. Entregando 64 corrientes de rotor, 64 corrientes de red y 64 voltajes posibles del DC-Link. Estos valores ingresan a la función de costos dada por la Ec.4.14, que se construye en base a las variables que se desea regular, por lo que está compuesta por el error de la corriente de rotor, la corriente de red, y el voltaje DC del convertidor, con el objetivo de lograr un seguimiento de referencia de las corrientes anteriormente nombradas y mantener el valor deseado del voltaje del DC-Link.

$$\begin{aligned} g = & \lambda_1 [i_{r\alpha}^*(k+1) - i_{r\alpha}(k+1)]^2 + [i_{r\beta}^*(k+1) - i_{r\beta}(k+1)]^2 \\ & + \lambda_2 [i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)]^2 + [i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)]^2 \\ & + \lambda_3 [V_{dc}^*(k+1) - V_{dc}(k+1)]^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Donde:

- $[i_{r\alpha}^*(k+1) - i_{r\alpha}(k+1)]^2 + [i_{r\beta}^*(k+1) - i_{r\beta}(k+1)]^2$: Corresponde a los términos de la función de costos asociados a la corriente del rotor, que cuantifica el error entre las corrientes deseada y predicha en los ejes α y β . Cuyo objetivo es lograr que la corriente de red siga la referencia y que a la vez sea sinusoidal.

- $[i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)]^2 + [i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)]^2$: Corresponde a los términos de la función de costos asociados a la corriente de red, que cuantifica el error entre las corrientes deseada y predicha en las componentes α y β . Cuyo objetivo es lograr que la corriente de red siga la referencia y que sea sinusoidal.

- $[V_{dc}^*(k+1) - V_{dc}(k+1)]^2$: Corresponde al término de la función de costos asociados al voltaje del DC-Link, que cuantifica el error entre el valor deseado y el predicho. Y que tiene por objetivo mantener su valor balanceado en un rango de operación seguro y a la vez que permita sintetizar las corrientes.

- λ_1, λ_2 y λ_3 : Son los factores de peso.

Los factores de peso se pueden sintonizar de forma tal de que se normalizen las variables presentes en la función de costos, en este caso no es necesario sintonizar estos factores, ya que las corrientes y el voltaje del DC-Link se encuentran en la misma magnitud. Además, el condensador utilizado en el simulador es lo suficientemente grande para desacoplar la dinámica del convertidor lado red de la del rotor.

A partir de la metodología descrita, es posible regular un convertor back-to-back, con una estrategia de control centralizada, mediante un único controlador predictivo que optimiza el funcionamiento del sistema en su totalidad. Por lo que la solución encontrada en cada periodo de muestreo es una solución global. A diferencia de la estrategia de control descentralizada donde cada solución encontrada luego de resolver el problema de optimización es de carácter local y por lo tanto globalmente no necesariamente la óptima. Cabe señalar que como en este caso, es necesario evaluar 64 estados cada vez que se resuelve el problema de optimización, esta estrategia requiere una mayor capacidad de cómputo y como consecuencia un tiempo de resolución más alto, que puede ser superior al periodo de muestreo y por tanto inaplicable en tiempo real.

4.2.3. Estrategia de control predictivo distribuido

Con el fin de implementar una estrategia de control predictivo en sistemas de gran escala o bien resolver el problema de optimización dentro del tiempo de muestreo se ha emigrado desde una configuración centralizada a una distribuida [16]. En la Figura 29 se muestra un esquema de la estrategia de control predictivo distribuido. En este se observa que el sistema es dividido en varios subsistemas donde cada uno posee un controlador predictivo local (MPC1, MPC2, MPC3) capaz de compartir información entre sí (línea punteada), con el fin de calcular sus propias acciones de control [15]. El objetivo principal de esta estrategia es lograr cierto grado de coordinación entre los subsistemas de modo que cada uno resuelva el problema de optimización local con sus variables, función de costos y restricciones relevantes [17]. Sin resolver el problema de optimización asociado a la estrategia de control centralizado y por tanto reduciendo la carga computacional asociada [16].

Mediante esta estrategia el convertor back-to-back es regulado por dos controladores predictivos, tal como se muestra en la Figura 30, donde uno se encarga de regular el convertor lado red, mientras que el otro el convertor lado rotor, y en conjunto mantienen el balance del DC-Link mediante la comunicación de sus acciones de control.

Tal como se muestra en el esquema de la Figura 31 la estrategia de control predictiva distribuida toma las variables de entrada y salida conocidas y la información que es transmitida desde el convertor lado red hacia el convertor lado rotor y viceversa, para evaluarlos en el modelo de predicción obteniéndose las corrientes de rotor y red predichas que serán evaluadas en la función de costos, cuyos valores óptimos serán aplicados al convertor back-to-back.

A continuación se explica con más detalles la implementación de la estrategia de control distribuida al convertor lado rotor y red.

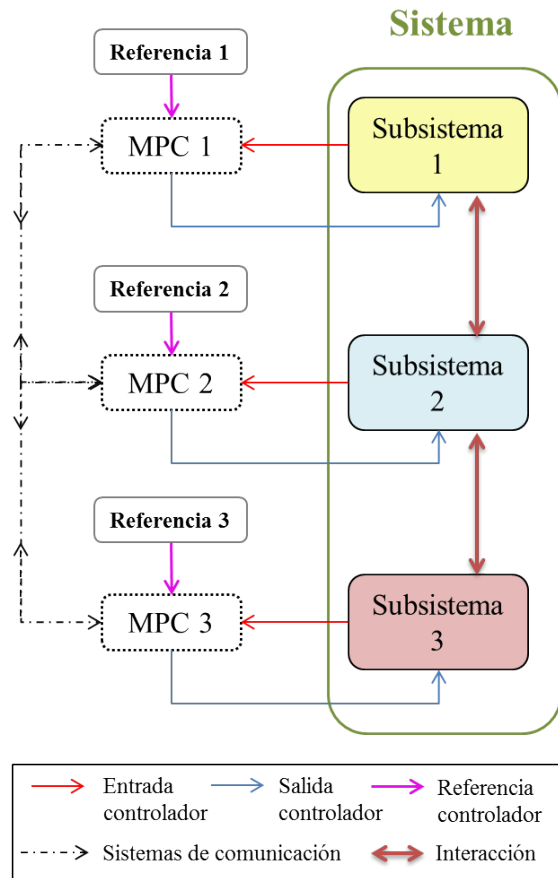


Figura 29: Esquema de la estrategia de control predictivo distribuido

Control Lado Rotor

El Control Lado Rotor es el encargado de controlar el convertor lado rotor, sintetizando las corrientes respectivas que permitan captar la mayor cantidad de energía capturada por la turbina del aerogenerador mediante una estrategia de control distribuida. Este se comunica e intercambia información de las acciones de control aplicadas con el Control Lado Red para mantener regulado el voltaje DC del convertor back-to-back.

En este controlador, tal como se observa en la Figura 31, se miden las corrientes de estator (i_s), del rotor (i_r), el voltaje del DC-Link (V_{dc}), el voltaje del estator (V_s) y la acción de control del convertor lado red (S_2), que ingresan al bloque: Modelo de Predicción. En este bloque se implementan las Ec. 4.15 y Ec. 4.16 que predicen el comportamiento de la corriente

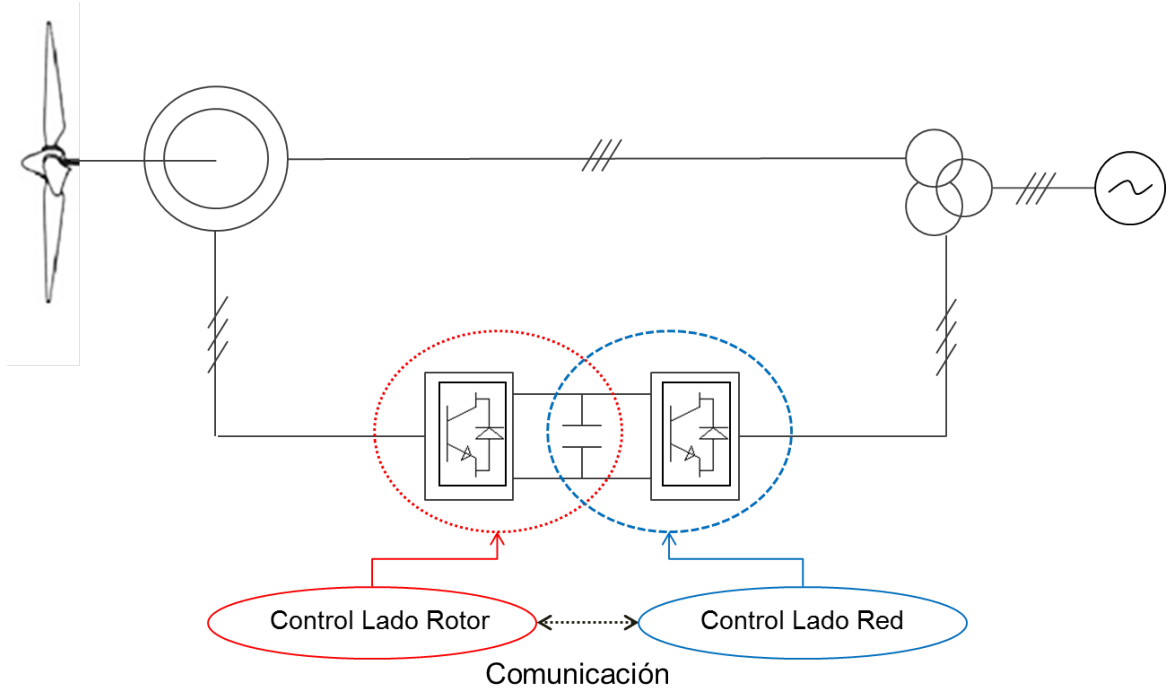


Figura 30: Diagrama de bloques de la estrategia de control predictivo distribuido

del rotor y del voltaje del DC-Link respectivamente.

Rotor :

$$i_{r_{\alpha\beta}}(k+1) = \left[1 - \frac{T_s R_r}{\sigma L_r}\right] i_{r_{\alpha\beta}}(k) + \frac{T_s}{\sigma L_r} V_{dc}(k) S_1(k) e^{j\theta_r} - \frac{T_s L_o}{\sigma L_s L_r} [v_{s_{\alpha\beta}}(k) - R_s i_{s_{\alpha\beta}}(k)] \quad (4.15)$$

Dc - Link :

$$V_{dc}(k+1) = V_{dc}(k) + \frac{T_s}{C} \left[\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} (k) \cdot \begin{bmatrix} S_{1a} \\ S_{1b} \\ S_{1c} \end{bmatrix} (k) - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} (k) \cdot \begin{bmatrix} S_{2a} \\ S_{2b} \\ S_{2c} \end{bmatrix} \right] \quad (4.16)$$

Donde: $\begin{bmatrix} S_{2a} \\ S_{2b} \\ S_{2c} \end{bmatrix}$ corresponde a las acciones de control enviadas desde el Control Lado

Red, las cuales son medidas y por tanto se pueden recibir. En cambio, $\begin{bmatrix} S_{1a} \\ S_{1b} \\ S_{1c} \end{bmatrix}$ corresponde

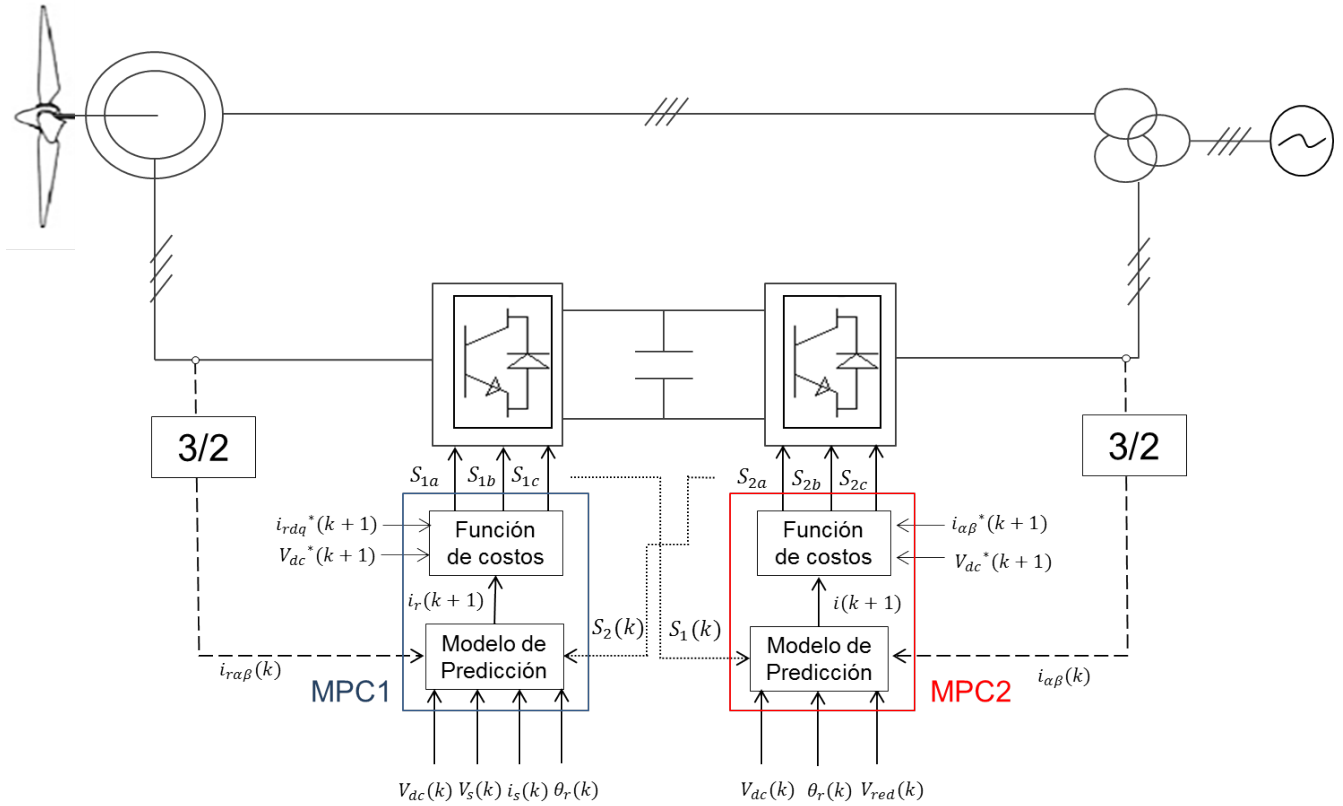


Figura 31: Esquema de control para el convertidor back-to-back para un controlador predictivo distribuido.

a una variable de optimización, por lo que se evalúan los estados posibles para encontrar la posición de los switch que minimize la función de costos asociada a este convertidor.

El bloque modelo de predicción entrega el valor para 8 corrientes de rotor, que luego son minimizadas en el bloque: Función de Costos de la Figura 31 que está definido de acuerdo a la Ec. 4.17, en la cual el objetivo de control es realizar un seguimiento de referencia de la corriente del rotor minimizando el error entre la referencia y los valores predichos, tanto para la coordenada α como para la coordenada β , y manteniendo el balance del voltaje del DC-Link.

$$g = \lambda_1 \left[[i_{r\alpha}^*(k+1) - i_{r\beta}(k+1)]^2 + [i_{r\alpha}^*(k+1) - i_{r\beta}(k+1)]^2 \right] + \lambda_2 [V_{dc}^*(k+1) - V_{dc}(k+1)]^2 \quad (4.17)$$

De acuerdo a la estrategia descrita es posible controlar el convertidor lado rotor y ajustar las variables controladas de forma tal de que realicen el seguimiento de las referencias logrando generar corrientes sinusoidales que permitan maximizar la transferencia de energía capturada por las aspas del aerogenerador, además de mantener regulado el voltaje DC del convertidor back-to-back gracias a la comunicación de las acciones de control entre el convertidor lado red y lado rotor.

Control Lado Red

El Control Lado Red es el encargado de controlar el convertidor lado red sintetizando la corriente respectiva para maximizar la transferencia de energía desde o hacia la red, dependiendo del punto de operación del aerogenerador de inducción doblemente alimentado, además de regular la cantidad de reactivos inyectados o absorbidos de forma de aportar a la regulación de la tensión.

Como se observa en la Figura 31, se esquematiza la operación del control predictivo sobre el convertidor lado red. Allí se miden las corrientes de red (i), el voltaje del DC-Link (V_{dc}), el voltaje de la red (V_{red}) y la acción de control del convertidor lado rotor (S_1) que ingresan al bloque: Modelo de predicción. En este bloque se implementan las Ec.4.18 y Ec.4.19 que predicen el comportamiento de la corriente de red y el voltaje del DC-Link respectivamente.

Red :

$$i_{\alpha\beta}(k+1) = \left[1 - \frac{T_s R}{L}\right] i_{\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L} [V_{dc}(k) S_2(k) - V_{red\alpha\beta}(k)] \quad (4.18)$$

Donde: $S_x(k) = \frac{2}{3}(S_a + mS_b + m^2S_c)$, $m = e^{\frac{j2\pi}{3}}$, $x = 1, 2$

DC - Link :

$$V_{dc}(k+1) = V_{dc}(k) + \frac{T_s}{C} \left[\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} (k) \cdot \overline{\begin{bmatrix} S_{1a} \\ S_{1b} \\ S_{1c} \end{bmatrix}} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} (k) \cdot \begin{bmatrix} S_{2a} \\ S_{2b} \\ S_{2c} \end{bmatrix} (k) \right] \quad (4.19)$$

Donde: $\overline{\begin{bmatrix} S_{1a} \\ S_{1b} \\ S_{1c} \end{bmatrix}}$ corresponde a las acciones de control enviadas desde el Control Lado

Rotor, las cuales son medidas y por tanto se pueden recibir. En cambio, $\begin{bmatrix} S_{2a} \\ S_{2b} \\ S_{2c} \end{bmatrix}$ corresponde a una variable de optimización, por lo que se evalúan los estados posibles para encontrar la posición de los switch que minimize la función de costos asociada a este convertidor..

El bloque: Modelo de predicción entrega el valor para 8 corrientes de red que luego son minimizadas en el bloque: Función de Costos de la Figura 31 que está definida de acuerdo a la Ec. 4.20, en la cual el objetivo de control es realizar un seguimiento de referencia de la corriente de red minimizando el error entre la referencia y los valores predichos, tanto para la

coordenada α como para la coordenada β y manteniendo el balance del voltaje del DC-Link

$$g = \lambda_3 \left[[i_\alpha^*(k+1) - i_\alpha(k+1)]^2 + [i_\beta^*(k+1) - i_\beta(k+1)]^2 \right] + \lambda_4 [V_{dc}^*(k+1) - V_{dc}(k+1)]^2 \quad (4.20)$$

Al igual que en la estrategia de control centralizada no es necesario sintonizar los factores de peso ya que las corrientes y el voltaje del DC-Link se encuentran en la misma magnitud y el condensador utilizado en el simulador es lo suficientemente grande para desacoplar la dinámica del convertidor lado red de la del rotor.

De acuerdo a la estrategia descrita, es posible controlar el convertidor lado red y ajustar las variables controladas de forma tal de realizar el seguimiento de referencias logrando sintetizar corrientes sinusoidales que permiten maximizar la transferencia de energía desde o hacia la red dependiendo del punto de operación del DFIG, además de mantener regulado el voltaje del DC-Link gracias a la comunicación de las acciones de control entre el rectificador y el inversor del convertidor back-to-back. Esta comunicación se puede realizar mediante el protocolo TCP o ETHERNET, a través de un cable físico o por fibra óptica. El primero tiene la ventaja de ser más económico pero está expuesto a la contaminación electromagnética de los circuitos. El segundo no tiene ninguno de estos problemas sin embargo su implementación tiene un mayor costo y posee restricciones técnicas adicionales como el radio de curvatura que se le puede aplicar.

Luego de desarrollar una estrategia de control predictiva distribuida en el convertidor back-to-back a partir de dos controladores predictivos, se pueden sintetizar corrientes de rotor y de red sinusoidales que maximizan la transferencia de energía desde lo capturado por la turbina hacia la red y además mantener balanceado el voltaje DC del enlace de continua de acuerdo al valor deseado. En el proceso de optimización de cada controlador se deben evaluar los 8 estados posibles por lo que el tiempo de resolución del problema se reduce considerablemente en comparación con la estrategia de control centralizado donde se deben evaluar 64 casos posibles. Por otro lado el tiempo de resolución es comparable con los tiempos de la estrategia de control descentralizada, donde también se evalúan 8 casos por cada controlador, pero los tiempos no son iguales porque además es necesario tomar en cuenta el tiempo necesario para realizar la comunicación. Cabe destacar que la variable de voltaje del DC-Link que se encuentra en la función de costos de cada convertidor varía en torno a sus propias variables, ya que la información que comparten es medida, por lo que no es una variable de optimización, por lo que cada convertidor optimiza de acuerdo a la posición de sus propios switch, considerando lo que realizó el convertidor adyacente.

4.2.4. Discusión

En este capítulo se formularon tres estrategias de control predictivo con la finalidad de regular el DFIG. Estas estrategias son la estrategia de control predictivo descentralizado,

centralizado y distribuido. En la estrategia de control predictivo descentralizada el convertidor es regulado mediante dos controladores predictivos, uno para el lado rotor y el otro para el lado red, y mediante un controlador PI se mantiene el balance del voltaje en el DC-Link. En este caso cada controlador regula su área de influencia sin importar lo que realizan los controladores adyacentes. Además, para encontrar el óptimo en cada tiempo de muestreo el convertidor lado rotor y red deben evaluar 8 los estados posible, por lo que esta estrategia no demanda un gasto computacional elevado. En la estrategia de control predictivo centralizada todo el convertidor es regulado mediante un único controlador predictivo, que resuelve el problema de optimización con 64 estados a evaluar, considerando todo el sistema, por lo que el óptimo encontrado es un óptimo global. A diferencia de la estrategia descentralizada y distribuida, esta necesita altos recursos computacionales, ya que en cada tiempo de muestreo se deben evaluar estados posibles. Y por último en la estrategia de control distribuido el sistema es regulado mediante dos controladores predictivos que comunican sus acciones de control, para mantener balanceado el voltaje del DC-Link. Por lo que el óptimo encontrado se ubica entre un mínimo local de la estrategia descentralizada y un mínimo global dado por la estrategia centralizada. Esta estrategia no necesita grandes recursos computacionales, ya que convertidor lado rotor y red evalúan 8 estados posibles cada uno. Además, como es necesario establecer la comunicación entre los 2 equipos, esta puede ser afectada por la interferencia electromagnética o por el medio de comunicación que se considere. A continuación se presentan los resultados donde se evalúa el desempeño de las tres estrategias de control predictivo descritas en este capítulo.

Resultados

Con el objetivo de evaluar las estrategias de control predictivo descritas en el capítulo anterior, se utiliza un aerogenerador de inducción de doble alimentación (DFIG) con los parámetros de la tabla 2. Este generador de dos polos tiene una potencia nominal de 1.5 [MW], que trabaja con un rango de velocidad de rotor desde 1200 a 1750 [rpm] y cuya velocidad nominal es de 1750 [rpm]. En este punto de operación es capaz de producir 8125 [kNm] de torque.[4]

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia nominal	1.5	MW
Voltaje nominal del estator	690	V[rms]
Frecuencia de la red	50	Hz
Velocidad nominal del rotor	1750	rpm
Rango de velocidad nominal del rotor	1200 – 1750	rpm
Deslizamiento nominal	-0,1667	
Número de pares de polos	2	
Torque nominal	8.185	kNm
R_s	2.65	mΩ
R_r	2.63	mΩ
L_{ls}	0.1687	mH
L_{lr}	0.1337	mH
L_m	5.4749	mH
R_{filtro}	0.1	Ω
L_{filtro}	1.2	mH
Capacitancia del DC link	130.73	mF

Tabla 2: Parámetros utilizados Simulador, tipo de generador DFIG.[4]

El modelo del DFIG y las estrategias de control son implementadas en el ambiente Matlab/Simulink con el método de solución de las ecuaciones diferenciales Runge-Kutta, ya que este método ofrece una mayor precisión y estabilidad que los demás métodos disponibles en el software utilizado. Además, se elige un paso fijo (Fixed-Step) por la naturaleza discreta del problema a abordar. Para esto se utiliza un PC de escritorio que posee un procesador Core i7-3770 a 3.4 Ghz, 16 GB de RAM, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 210 de 4 GB y Windows 7 de 64 bits.

La simulación consiste en evaluar las estrategias de control descentralizada, centralizada y distribuida en los diferentes modos de operación del DFIG, con la finalidad de probar los controladores en todo su rango de funcionamiento. Para conseguir lo anterior se hace operar el sistema de acuerdo a la Figura 32, donde al inicio, el sistema opera con una velocidad angular del rotor (ω_r) de 1500 [rpm] hasta los 30 [s], es decir, el aerogenerador opera a velocidad sincrónica y por tanto en modo sincrónico. Luego, ω_r aumenta hasta los 1750 [rpm], con ello este opera en modo supersincrónico hasta los 70 [s]. Posteriormente, se vuelve a operar en modo sincrónico, para después trabajar en modo subsincrónico entre los 110 y 150 [s] con una ω_r de 1250 [rpm]. Finalizando la operación en modo sincrónico. Esta trayectoria de funcionamiento es impuesta al aerogenerador para analizar el desempeño de cada una de las estrategias control propuestas en el presente trabajo de tesis. Además se establece que la referencia de corriente de rotor en el eje sincrónico directo es cero para maximizar la transferencia de energía desde o hacia la red, ya que de este modo la potencia reactiva [Q] que controla el convertidor lado rotor es cero y por tanto el voltaje y la corriente del rotor están desfasados en 90 °.

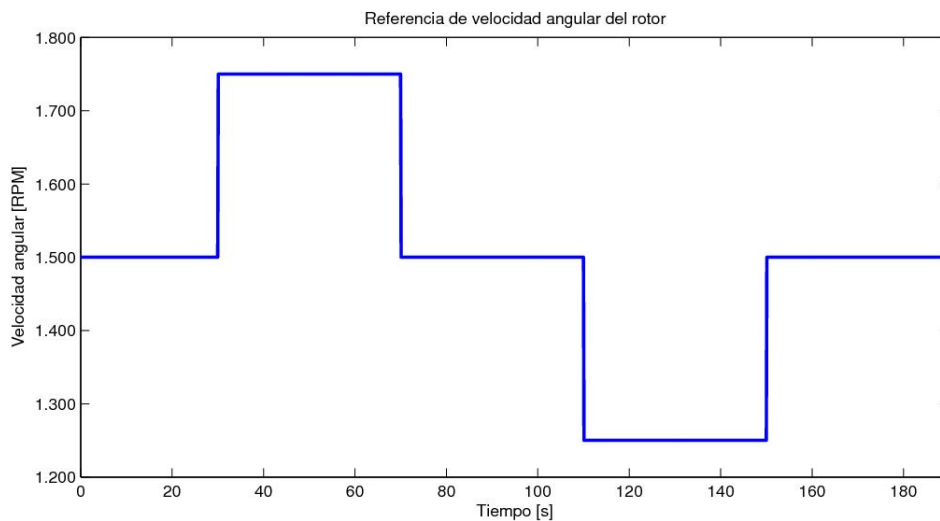


Figura 32: Referencia velocidad angular del rotor

A continuación se presentan los resultados obtenidos al regular el sistema de estudio, compuesto por el DFIG y el convertidor back-to-back, con el objetivo de evaluar el desempeño de cada estrategia de control. Esta evaluación se realiza en función de los siguientes indicadores: el error en la regulación del voltaje del DC-Link, el error de seguimiento de las corrientes de rotor y red, la función de costos asociada a la totalidad del sistema, la distorsión armónica, el tiempo de resolución del problema de optimización y la frecuencia de switching.

5.1. Voltaje del DC-Link

Uno de los puntos a comparar para evaluar el desempeño de cada estrategia de control al regular este tipo de aerogenerador, es cómo estas son capaces de realizar la regulación

del voltaje del enlace de continua al aplicar cambios en el punto de operación dada por la trayectoria de funcionamiento de la Figura 32.

En la Figura 33 se observa el comportamiento del voltaje del DC-Link al operar el sistema de acuerdo a la Figura 32 con la estrategia de control descentralizada. En este caso el voltaje es regulado mediante un controlador PI que se encarga de mantener balanceado la cantidad de energía que entra y sale del condensador del convertidor back-to-back de modo de mantener esta variable en torno a la referencia del voltaje DC fija a 1200 [V] durante todo el periodo de la simulación. De acuerdo al resultado que se observa en esta figura, el controlador es capaz de mantener el voltaje en torno al valor deseado para cada modo de operación del DFIG, produciéndose sobreniveles cada vez que se realiza un cambio en el modo de operación. Esto debido a que al cambiar el modo de operación cambia la magnitud y/o la dirección de la energía que fluye a través del condensador. El sobrenivel descrito anteriormente se puede observar en el zoom de la figura, cuya magnitud se encuentra entre los 40 a 50 [V], lo que equivale aproximadamente a un 5% de desviación de su valor deseado.

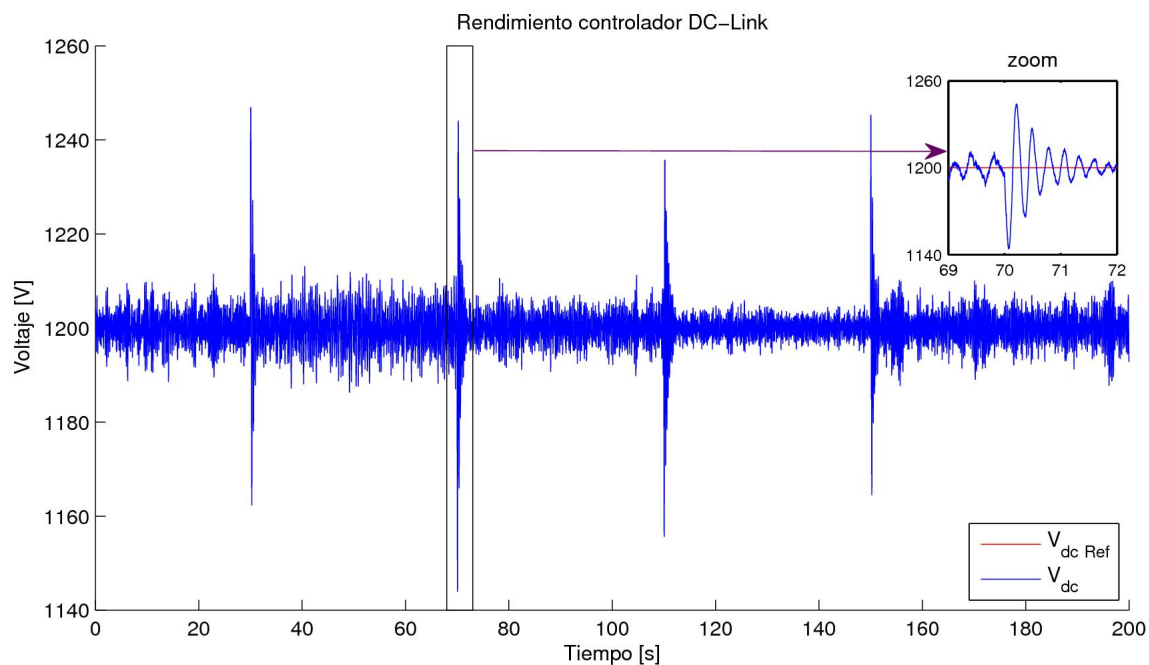


Figura 33: Voltaje del DC-Link operando el DFIG con la estrategia de control descentralizada

En la Figura 34 se observa el voltaje del DC-Link al operar el sistema de acuerdo a la Figura 32 con la estrategia de control centralizada. En este caso el voltaje del enlace de continua y el sistema en su totalidad es regulado mediante un único controlador predictivo que se encarga de mantener balanceada la cantidad de energía que entra y sale del condensador del convertidor back-to-back y de sintetizar las corrientes de rotor y de red. Como resultado se logra mantener el voltaje DC en torno al valor deseado dado por la referencia de 1200 [V] durante toda la simulación. En este caso no se producen sobreniveles al cambiar el punto de operación del sistema. Por lo que se logra un seguimiento bastante preciso de la referencia,

debido a que la desviación máxima con respecto a la referencia es de $0.6 [V]$ aproximadamente, lo que se puede observar en el zoom realizado a la Figura 34.

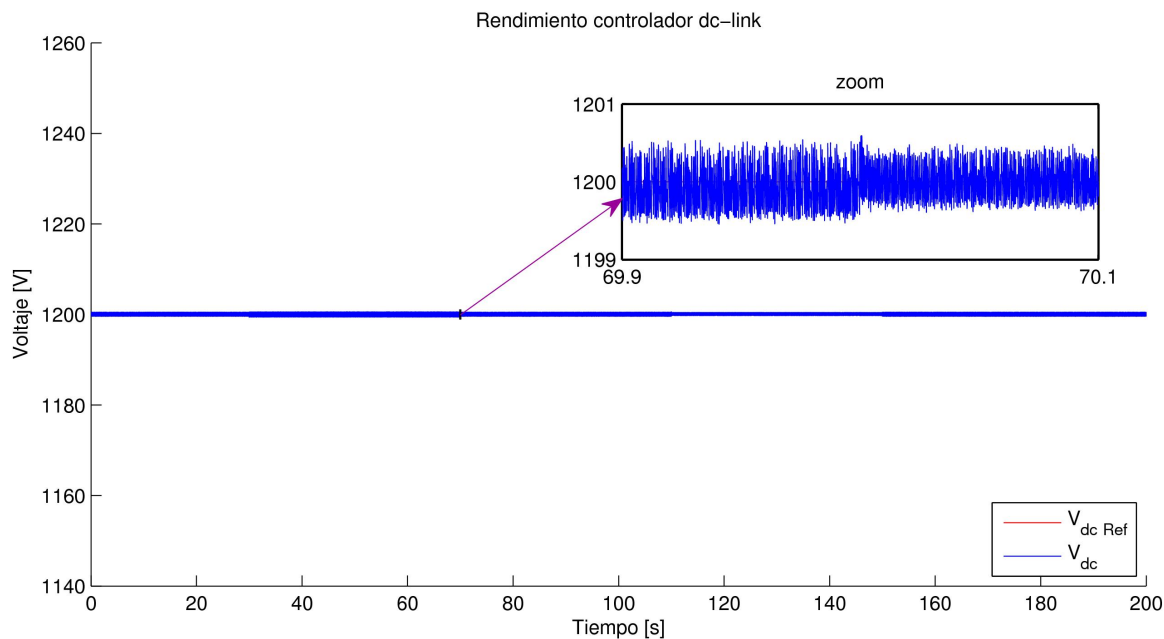


Figura 34: Voltaje del DC-Link operando el DFIG con la estrategia de control centralizada.

En la Figura 35 se observa el voltaje del DC-Link al operar el sistema de acuerdo a la Figura 32 con la estrategia de control distribuida. En este caso el voltaje del enlace de continua y el sistema son regulados por dos controladores predictivos que se encargan de sintetizar las corrientes de rotor y de red, además de mantener balanceada la cantidad de energía que fluye del condensador del convertidor back-to-back mediante el intercambio de la información de las acciones de control aplicadas. De esta forma se logra mantener el voltaje DC en torno al valor deseado dado por la referencia de $1200 [V]$ durante toda la simulación. En este caso, al igual que en el anterior, no se producen sobreniveles al cambiar el punto de operación del sistema. Por lo que se logra un seguimiento bastante preciso, ya que la desviación máxima de este voltaje de los $1200 [V]$ es de $0.7 [V]$ aproximadamente, como se observa en el zoom mostrado en la Figura 35.

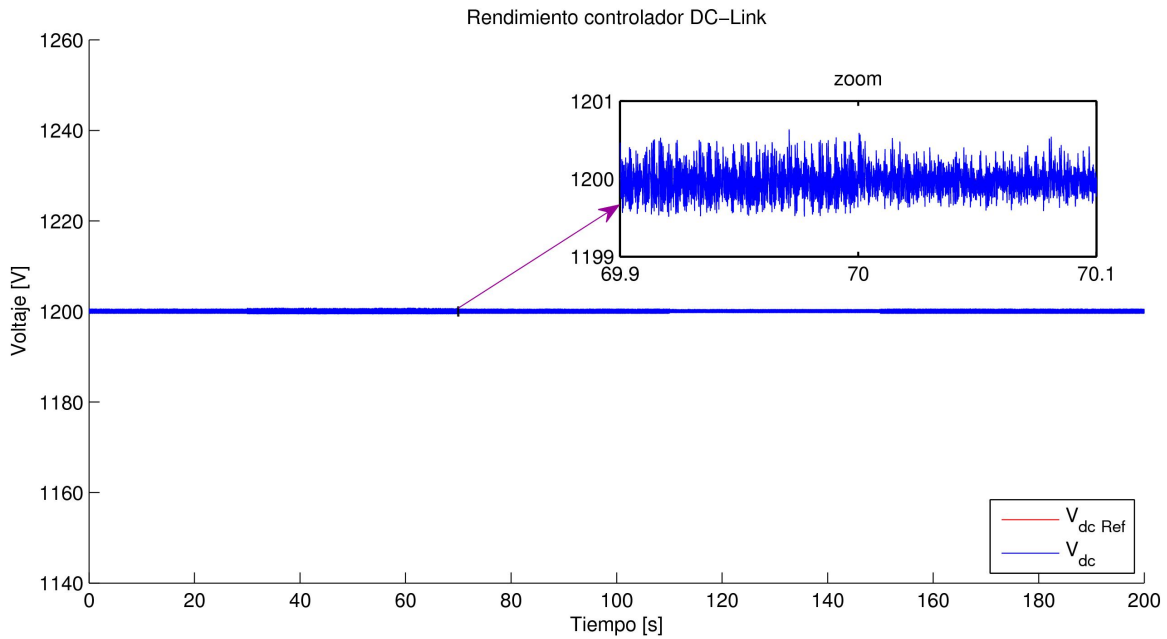


Figura 35: Voltaje del DC-Link operando el DFIG con la estrategia de control distribuida.

En la tabla 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de operar el sistema utilizando las tres estrategias de control predictivo abordadas en este trabajo de tesis. En esta tabla se observa el $Error_{RMSE}$, el Sobrenivel, el tiempo de estabilización y la desviación estándar para cada estrategia de control y para cada modo de operación del DFIG para el voltaje del DC-Link.

La información de la tabla 3 es obtenida de la siguiente forma:

- El $Error_{RMSE}$ se obtiene luego de realizar un cambio en el modo de operación y medirlo por 40 [s], tiempo que garantiza que el sistema haya alcanzado el régimen permanente. Este error es calculado de la siguiente forma: $Error_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}$.
- El sobrenivel es calculado por la máxima desviación que ocurre luego de cambiar el punto de operación.
- El tiempo de estabilización viene dado por el tiempo que transcurre desde que cambia el punto de operación del sistema a la máxima desviación del voltaje DC de la referencia que se encuentra dentro de la banda de $\pm 2\%$, es decir, es el valor máximo que se encuentre entre 1176 y 1224 [V].
- La desviación estándar (Std) se calcula desde el momento que se realiza un cambio en el modo de operación hasta que transcurren 40 [s]. La Std es calculada de la siguiente forma: $Std = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$.

Estrategia	Modo de operación	$Error_{RMSE}$ [V]	Sobrenivel [V]	Tiempo de estabilización [s]	Desviación estándar [V]
Descentralizado	Supersincrónico	5.0981	47 ~ 3.9 %	0.775	5.0974
	Sincrónico	3.5388	43.5 ~ 3.6 %	0.725	3.5384
	Subsincrónico	4.6646	44 ~ 3.7 %	0.731	4.6639
Distribuido	Supersincrónico	0.3656	—	—	0.2418
	Sincrónico	0.1795	—	—	0.1417
	Subsincrónico	0.2693	—	—	0.1949
Centralizado	Supersincrónico	0.3055	—	—	0.1901
	Sincrónico	0.131	—	—	0.0912
	Subsincrónico	0.2164	—	—	0.1433

Tabla 3: Voltaje del DC-Link

Al comparar los resultados de las estrategias de control predictivas propuestas en la tabla 3, se observa que el $Error_{RMSE}$ en caso descentralizado es de 1 orden de magnitud mayor en comparación a las estrategias de control centralizada y distribuida. Además, la estrategia centralizada presenta un $Error_{RMSE}$ levemente inferior a la distribuida. Por lo que la estrategia de control centralizada presenta un menor error al regular el voltaje del DC-Link. Por otro lado, las estrategias centralizada y distribuidas no poseen sobrenivel en comparación con la estrategia descentralizada, donde existen desviaciones entre un 3 % y 4 %, y por lo tanto tampoco hay tiempo de estabilización. Al analizar la desviación estándar se observa, que en la estrategia descentralizada los valores del voltaje del enlace de continua se encuentran a una mayor desviación del valor promedio que en las otras estrategias propuestas, siendo mayor en un orden de magnitud. Al comparar los resultados obtenidos por el controlador centralizado y los distribuidos, se observa que la desviación estándar es menor en la estrategia de control centralizada. Además se puede observar que el $Error_{RMSE}$ y Std es más alto en la operación en modo supersincrónico, luego en el subsincrónico y por último el sincrónico. Esto se debe a que en modo supersincrónico el aerogenerador se encuentra operando en el nominal, por lo que la cantidad de energía que llega al condensador desde el rotor es mayor a los otros dos puntos de operación, de forma tal que los controladores deben manejar una mayor cantidad de energía para lograr el balance. En cambio, el error en el modo sincrónico es el menor de todos, ya que en este punto de operación los flujos de energía son cercanos a cero, lo que disminuye las exigencias que debe afrontar el controlador.

5.2. Corriente del rotor y de red

Otro de los puntos a comparar para evaluar el desempeño que consigue cada estrategia de control al regular el DFIG, es el error de seguimiento de referencias al momento que el convertidor back-to-back sintetiza las corrientes de rotor y de red, de acuerdo a la trayectoria de funcionamiento de la Figura 32. Para lo cual se mide el error entre el valor deseado y el valor de la variable aplicada por el conversor lado rotor y red luego de resolver el problema de optimización de cada una de las estrategias propuestas. De acuerdo a lo anterior, en la Figura 36 se observa el desempeño en el seguimiento de referencia de las corrientes de rotor sinteti-

zadas al operar el sistema con la estrategia de control descentralizada (arriba), centralizada (medio) y distribuida (abajo) en RMS para todo el horizonte de simulación. Se observa que en las tres estrategias la corriente de rotor sigue la referencia sin presentarse sobreniveles al cambiar el punto de operación del DFIG, debido a que las referencias de la corriente de rotor no dependen del voltaje del DC-Link. Los resultados obtenidos son similares porque las referencias en los tres casos no dependen del voltaje del DC-Link, sino que del punto de operación en el cual trabaja este aerogenerador, además de que tienen un buen seguimiento de la referencia de la corriente del rotor.

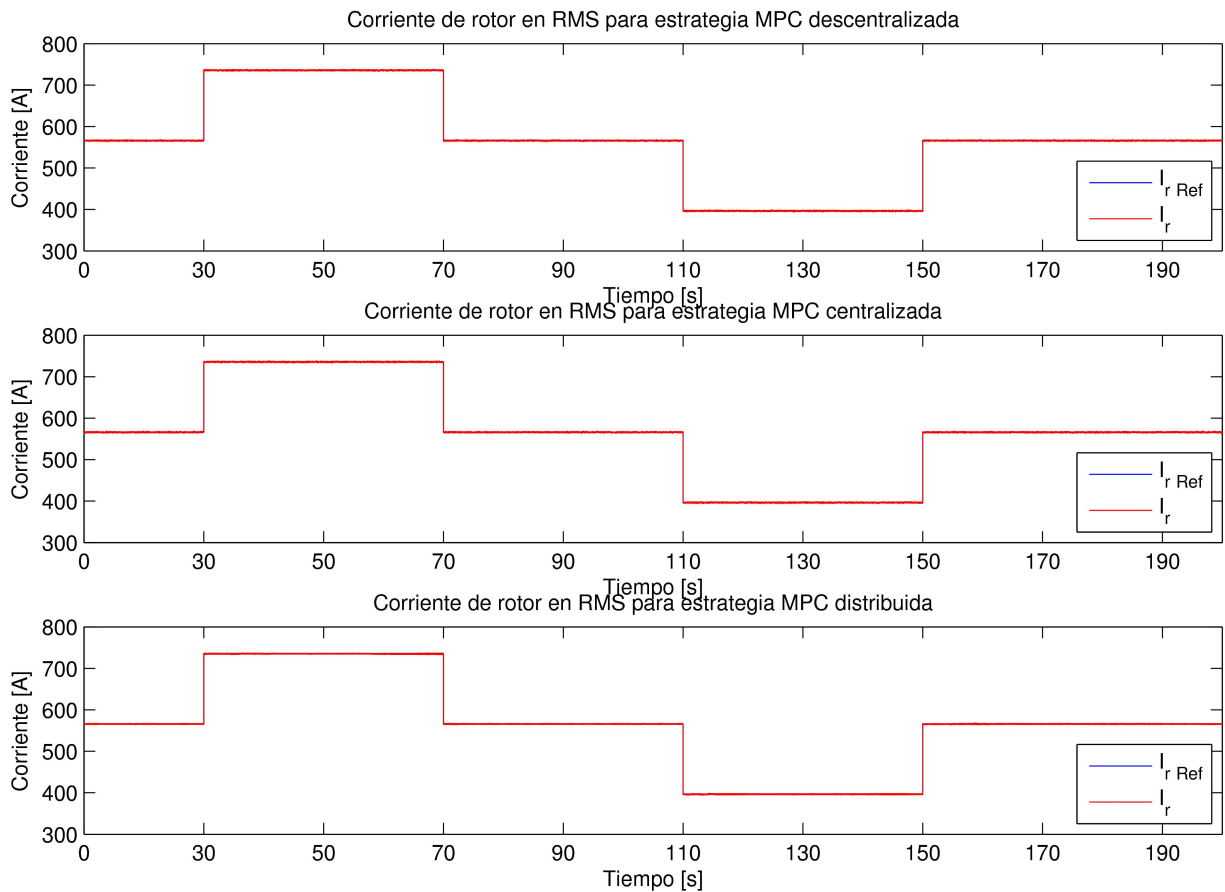


Figura 36: Seguimiento de referencia para la corriente del rotor en RMS

Del mismo modo, en la Figura 37 se observa el desempeño en el seguimiento de referencia de las corrientes de red sintetizadas al operar el sistema en RMS con la estrategia de control descentralizada (arriba), centralizada (medio) y distribuida (abajo) para todo el horizonte de simulación. Al igual que en la corriente de rotor, se observa que la corriente de red sigue la referencia en las tres estrategias propuestas. En particular al utilizar la estrategia descentralizada se observa que la corriente de red posee un mayor risado, debido a que las referencias de corriente de red se construyen a partir del voltaje del DC-Link medido y los sobreniveles causados al cambiar el punto de operación son transmitidas hacia esta referencia

de corriente.

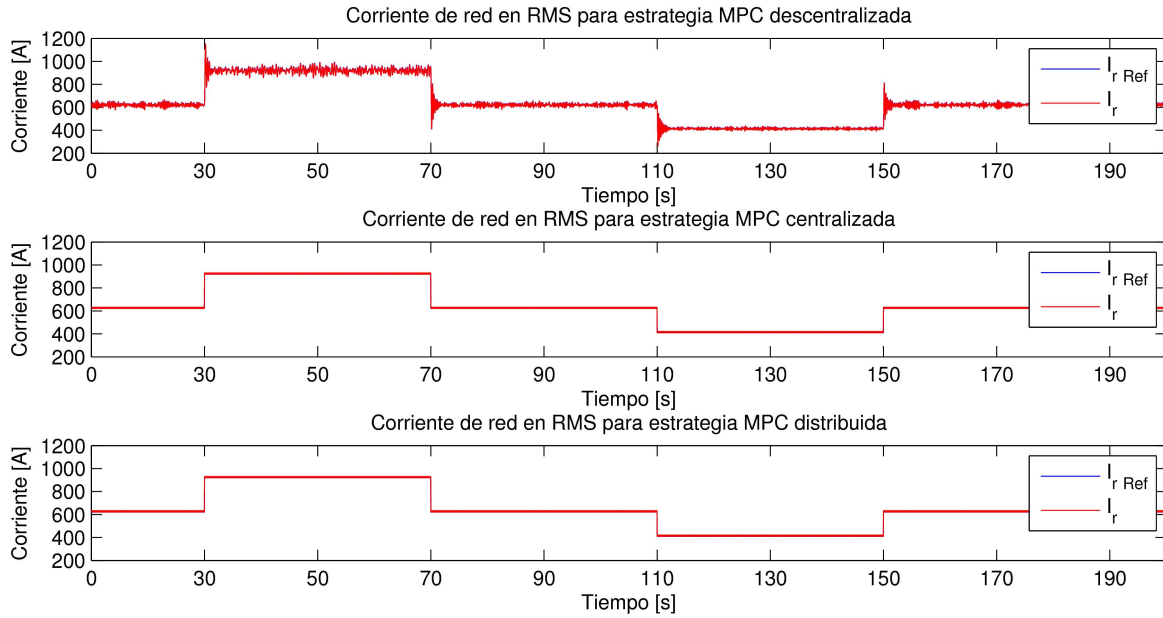


Figura 37: Seguimiento de referencia para la corriente de red en RMS

En la tabla 4 se resumen el error de seguimiento para la corriente de rotor y de red al operar el sistema en cada modo de operación con las estrategias de control propuestas. A partir de lo anterior, se puede notar que el $Error_{RMSE}$ es mayor en la corriente de red que en la corriente de rotor, debido a que la referencia de corriente de red incorpora una componente de alta frecuencia que provoca que sea más difícil realizar su seguimiento de referencia. Esto es producido porque la referencia de corriente de red es sintetizada a partir de la energía que es necesaria extraer del condensador del DC-Link para mantener balanceado dicho voltaje. Por tanto, las perturbaciones normales que ocurren en sistemas de generación eólica de esta escala son transmitidas desde el voltaje DC hacia las variables del filtro lado red. También se observa que tanto para la corriente del rotor como red no existen diferencias significativas al cambiar el modo de operación del DFIG. Sin embargo, existe un leve aumento en el error al trabajar en modo sincrónico debido a que en este punto de operación las fundamentales de las corrientes disminuyen en magnitud.

En la tabla 4 también se presenta el error relativo obtenido en la estrategia descentralizada y distribuida con respecto a la centralizada para la corriente de red y de rotor. Este error se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Error Relativo} = \frac{i - i_{centralizada}}{i_{centralizada}} \quad (5.1)$$

Donde: i corresponde a la estrategia descentralizada o distribuida según corresponda y $i_{centralizada}$ corresponde a la corriente para la estrategia centralizada.

Al analizar la estrategia descentralizada, el error relativo asociado a la corriente de rotor, en el caso supersincrónico y sincrónico es positivo, con magnitud de 7,73 % y 4,21 % respectivamente, por lo que la estrategia centralizada presenta un mejor desempeño. En cambio en el modo subsincrónico el error relativo es negativo con un valor de 7,71 % con lo cual es la estrategia descentralizada la que presenta el mejor desempeño. En el caso de la corriente de red se observa que la estrategia descentralizada presenta un mejor desempeño que la centralizada, ya que presenta valores entre un 1 % y 5 %, destacando su rendimiento en el modo sincrónico.

Estrategia	Modo Operación	$Error_{RMSE}$ $i_{rotor}[A]$	$Error_{RMSE}$ $i_{red}[A]$	Error i_{rotor} Relativo [%]	Error i_{red} Relativo [%]
Descentralizado	Supersincrónico	12.7015	14.1868	7,73	-1.11
	Sincrónico	12.6333	14.2223	4.21	-5.09
	Subsincrónico	11.0348	14.2004	-7.71	-2,35
Distribuido	Supersincrónico	12.2897	14.1270	4,24	-1.53
	Sincrónico	12.6230	15.8147	4,12	5.53
	Subsincrónico	12.4564	14.5958	4,18	0.37
Centralizado	Supersincrónico	11.7898	14.3458	—	—
	Sincrónico	12.1231	14.9854	—	—
	Subsincrónico	11.9564	14.5427	—	—

Tabla 4: Resumen del error para la corrientes del rotor y red.

Continuando con el análisis, en el caso de la estrategia de control distribuida, el error relativo de la corriente de rotor presenta valores positivos en torno al 4 %, por lo que la estrategia centralizada es la que tiene el mejor desempeño. Lo mismo en el caso del error en la corriente de red en los modos sincrónico y subsincrónico, en cambio en el modo supersincrónico es la estrategia de control distribuida la que presenta mejor rendimiento. A partir de lo anterior se observa que el error, tanto para la corriente de rotor como de red, en las estrategias propuestas es similar en magnitud por lo que cada una de las estrategias tiene un buen desempeño por sí misma. Distinto a lo obtenido en el caso analizado en la sección 5.1, donde las estrategias distribuida y centralizada tienen un rendimiento mucho mejor que la descentralizada, ya que al utilizar las primeras no se producen sobreniveles y la desviación respecto al punto de operación es mucho menor.

5.3. Función de Costos

Para analizar el funcionamiento de las estrategias de control predictivo propuestas se evalúa las tres variables de interés, que se miden en el convertidor back-to-back, en una única función de costos dada por la Ec.5.2, ya que de esta forma se pueden comparar las estrategias control bajo una misma escala. Esto debido a que las funciones de costos utilizadas en el

problema de optimización no son las mismas para cada estrategia.

$$\begin{aligned}
 J = & \sum_{k=0}^{t_{sim}} \left[[i_{r\alpha}^*(k+1) - i_{r\alpha}(k+1)]^2 + [i_{r\beta}^*(k+1) - i_{r\beta}(k+1)]^2 \right] \\
 & + [i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)]^2 + [i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)]^2 \\
 & + [V_{dc}^*(k+1) - V_{dc}(k+1)]^2
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Donde, el primer término corresponde a la corriente del rotor, el segundo a la corriente de red y el último término al voltaje del DC-Link. En la Tabla 5 se muestran los resultados de evaluar la función de costos dada por la Ec.5.2 para las estrategias de control descentralizada, centralizada y distribuida en la totalidad del tiempo de simulación (200 [s]).

Estrategia	J_{total}	J_{red}	J_{rotor}	J_{Vdc}
Descentralizado	1.43E+10	7.54E+09	6.06E+09	6.49E+08
Distribuido	1.35E+10	7.96E+09	5.54E+09	2.68E+06
Centralizado	1.33E+10	8.11E+09	5.18E+09	2.61E+06

Tabla 5: Resumen al evaluar la función de costos.

En esta tabla se entrega la información para la totalidad de la función de costos (J_{total}), es decir, al considerar el voltaje del DC-Link, la corriente de rotor y de red. Además, se entrega la información individualizando cada variable: Voltaje del DC-Link (J_{Vdc}), corriente de rotor (J_{rotor}) y corriente de red (J_{red}). A partir de los resultados se observa que J_{total} es mayor en la estrategia de control descentralizada en comparación a la estrategia de control centralizada y distribuida. Esto se debe a que la componente asociada al voltaje del enlace de continua (J_{Vdc}) es dos órdenes de magnitud más alto en comparación con las demás, ya que en la estrategia de control descentralizada se utiliza un controlador PI para regular este voltaje, lo cual provoca sobreniveles que abultan esta componente de la función de costos de la Ec.5.2. Además, se observa que al mirar el sistema como una totalidad en la estrategia de control centralizada la función de costos es menor en el horizonte de simulación que en los otros dos casos, según lo esperado.

Al analizar la función de costos asociada a cada variable controlada, se observa que la estrategia centralizada obtiene mejores resultados que la distribuida y descentralizada asociados al voltaje del DC-Link y la corriente del rotor. En cambio, para la corriente de red la estrategia de control descentralizada presenta un mejor desempeño en relación a la distribuida y en especial a la centralizada, debido a que en la estrategia centralizada y distribuida la referencia para esta corriente contiene componentes de alta frecuencia que son difíciles de seguir por el controlador.

5.4. Distorsión armónica

Al aplicar electrónica de potencia para el control de máquinas eléctricas se tiene la ventaja de lograr regularlas de una forma precisa y hacerlas trabajar en cualquiera de sus

puntos de operación, pero hay que pagar el precio de que misma electrónica de potencia distorsiona las ondas de corriente, ya que se agregan armónicos. La distorsión armónica (THD) se mide de la siguiente manera:

$$THD_F = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (5.3)$$

Para realizar el cálculo del THD se utilizaron 20 ciclos de cada corriente, ya que a medida se se utilizan más ciclos para hacer el cálculo este indicador disminuye hasta el punto en que se estabiliza y esto ocurre cuando se utilizan 20 ciclos. Además, se entregan los valores de THD promedio de todo el periodo de simulación, ya que que este depende de la magnitud de la fundamental y por tanto a medida que disminuye la fundamental se obtienen THD más altos.

Estrategia	THD corriente rotor [%]	THD corriente red [%]
Descentralizado	2.37	3.52
Distribuido	3.74	5.01
Centralizado	2.68	3.75

Tabla 6: THD para la corriente del rotor y de red al operar con cada una de las estrategias de control predictivo.

En la tabla 6 se muestra la distorsión armónica (THD) promedio para la corriente del rotor y la corriente de red, donde se observa que la distorsión armónica es mayor en la corriente de red, debido a que esta es contaminada por las perturbaciones que ocurren en el voltaje del DC-Link. Además, se observa que la estrategia de control predictivo descentralizada es la que produce una menor distorsión armónica, debido a que las corrientes son sintetizadas por controladores predictivos dedicados solo a esa tarea y el controlador PI utilizado restringe la operación del convertidor back-to-back. En cambio, en la estrategia de control centralizada y distribuida además de esta tarea deben mantener el balance del voltaje del enlace de continua, por lo que los controladores realizan un equilibrio entre los objetivos de control.

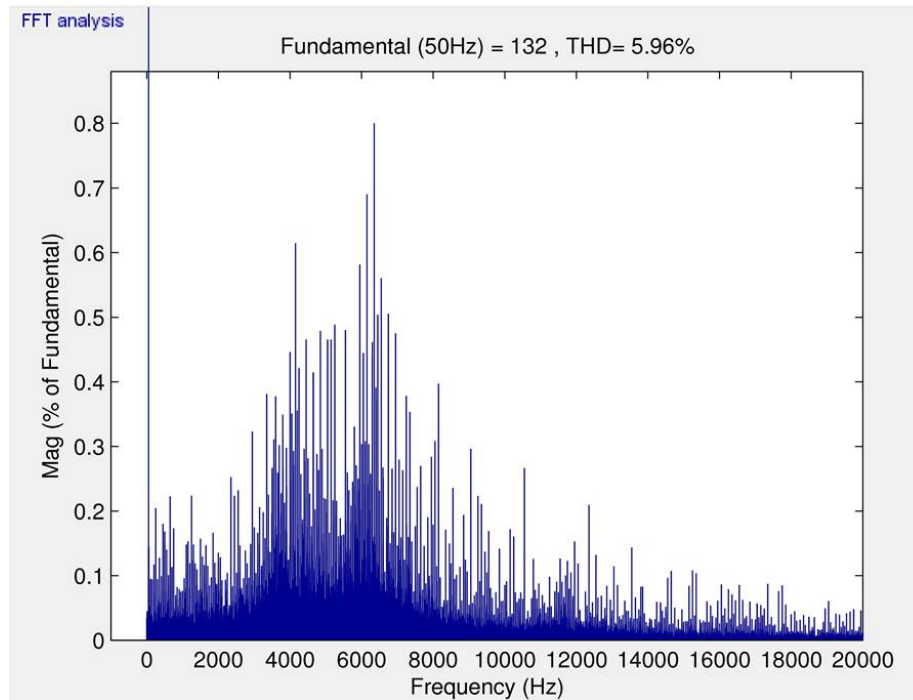


Figura 38: Espectro de frecuencia para la corriente de red operando con una estrategia de control distribuida en modo sincrónico

Uno de los inconvenientes de utilizar controladores predictivos es que el espectro de frecuencia de la variable controlada (corriente de rotor y de red), se encuentre distribuido a lo largo de todo el rango de frecuencias. En cambio, al utilizar controladores PI el espectro se encuentra centrado en ciertas frecuencias que son múltiplos de la frecuencia portadora del modulador. Como consecuencia de lo anterior se dificulta el uso de filtros de armónicos y aumenta el costo de los mismos. El fenómeno anterior se observa en la Figura 38 donde se tiene el espectro de frecuencia para la corriente de la red operando en modo sincrónico con la estrategia de control distribuido. En esta figura se grafica el porcentaje entre una frecuencia cualquiera con la fundamental en función de la frecuencia, donde la fundamental representa el 100 %. Además, en base a los resultados obtenidos en la tabla 6 este corresponde al peor caso, ya que se utiliza la estrategia de control distribuido en el punto de operación en el cual la fundamental alcanza su magnitud más baja, logrando un THD menor a 6 %.

5.5. Tiempo de resolución del problema de optimización

Al utilizar controladores predictivos es necesario resolver un problema de optimización a partir de una función de costos que internaliza los objetivos de control que se desean conseguir en el sistema. Para encontrar la solución a este problema se requiere de un tiempo de cálculo, que cobra bastante relevancia al aplicar estrategias de control predictivas en electrónica de potencia debido a que utilizan tiempos de muestreo del orden de los microsegundos. Y por tanto la solución debe ser encontrada antes de que se pase al siguiente periodo de muestreo.

Para tener una aproximación del tiempo de resolución se utiliza el comando Matlab tic-toc. Este comando mide el tiempo transcurrido desde que se ejecuta la instrucción tic hasta la instrucción toc. Este método brinda una cuota superior a este importante parámetro, ya que el computador no se encuentra exclusivamente resolviendo el problema de optimización, sino que también mantiene la interfaz gráfica de Windows, la conexión a la Internet, los archivos que se encuentran abiertos, entre otros.

En la Figura 39 se muestra el tiempo de resolución durante 0.5 [s] de la simulación del sistema utilizando la estrategia de control descentralizada, tanto para el controlador lado rotor (gráfica superior) como para el controlador lado red (gráfica inferior) mediante el método tic-toc. A partir de esta gráfica se observa que en promedio se alcanza a resolver el problema de optimización. En una aplicación real, en los casos reducidos en que no se logra resolver el problema se aplica el resultado de la optimización previa.

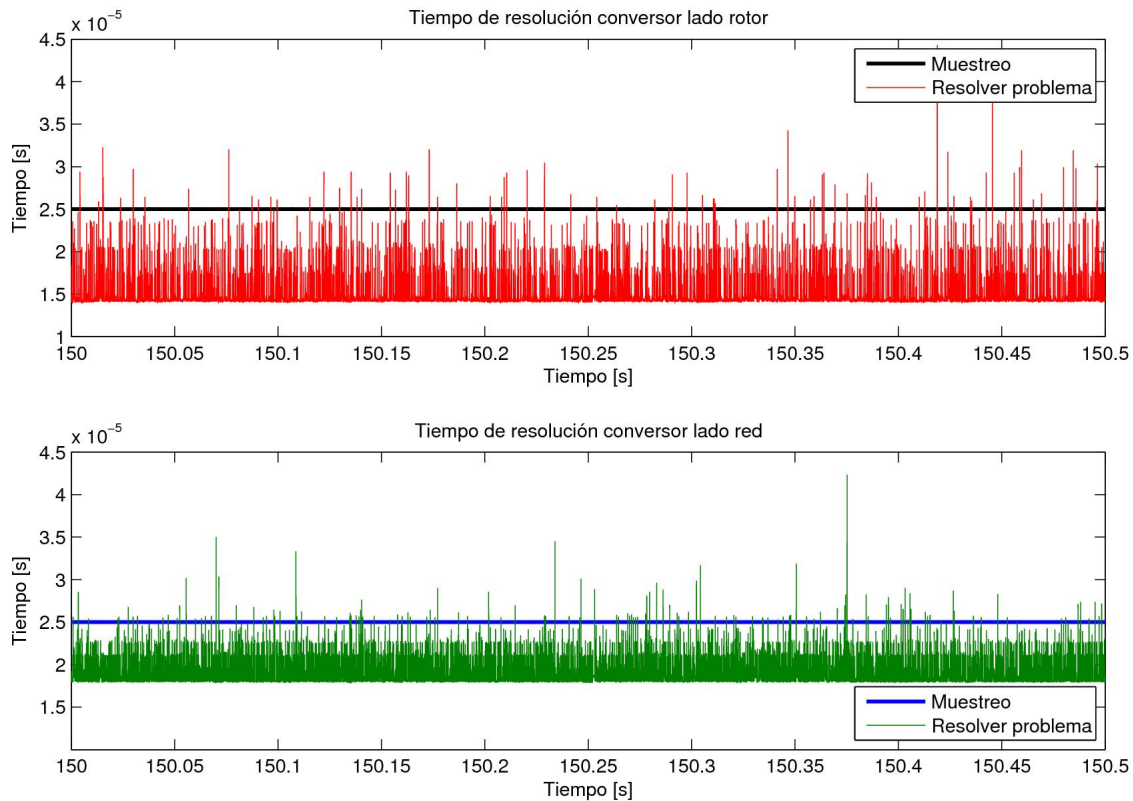


Figura 39: Tiempo de resolución del problema de optimización para la estrategia descentralizada.

En la tabla 7 se entregan los tiempos promedio de resolución del problema de optimización para cada estrategia de control predictiva. Se observa que al utilizar un tiempo de muestreo de 25 $[\mu\text{s}]$ se logra resolver el problema de optimización para la estrategia descentralizada y distribuida. En cambio, esto mismo no se logra en la estrategia centralizada, debido a que el controlador predictivo centralizado necesita evaluar 64 estados posibles para

Estrategia	Problema	Tiempo de resolución [μ s]
Descentralizado	Lado rotor	18.25
	Lado red	19.82
Distribuido	Lado rotor	22.32
	Lado red	24.87
Centralizado	Totalidad sistema	1000

Tabla 7: Tiempo de resolución del problema de optimización para cada estrategia de control predictiva.

encontrar el óptimo. En las otras estrategias cada controlador predictivo sólo debe evaluar 8 estados posibles.

5.5.1. Frecuencia del switching

A pesar de que la reducción de la frecuencia de switching no está entre los alcances del presente trabajo de tesis, se presenta su comportamiento al operar el sistema con cada una de las estrategias de control predictivo. La frecuencia de switching es calculada mediante el promedio del número de cambios de estado de cada pierna del convertidor lado rotor y red en un segundo de operación.

Estrategia	Convertidor	Frecuencia de switching [Hz]
Descentralizado	Lado rotor	8623
	Lado red	6660
Distribuido	Lado rotor	8072
	Lado red	6524
Centralizado	Lado rotor	8979
	Lado red	6346

Tabla 8: Frecuencia de switching

La tabla 8 se muestra la frecuencia de switching para cada estrategia de control predictiva. A partir de los datos obtenidos se concluye que independiente de la estrategia utilizada los valores se encuentran en torno a 8 [kHz] para el convertidor lado rotor y 6 [kHz] para el del lado red al usar un tiempo de muestreo de 25 microsegundos. Estos valores son altos para una aplicación real por el tamaño del aerogenerador utilizado, ya que con esa frecuencia de switching las pérdidas en el conversor back-to-back son muy altas, lo que provoca que buena parte de la energía capturada por las aspas se disipe por efecto Joule que puede llevar a que se queme el convertidor. Sin embargo, este resultado es coherente con reportado en la literatura [24]. Al no limitar las transiciones de los IGBT se obtiene una frecuencia de switching de 4 [kHz] al utilizar un tiempo de muestreo de 50 microsegundos y una frecuencia de 18 [kHz] al utilizar un tiempo de muestreo de 10 microsegundos.

5.6. Estrategias de control predictivo en presencia de una caída de la tensión trifásica de la red

5.6.1. Características de la caída de tensión.

El generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) es ampliamente utilizado en el mercado de la generación eólica, cubriendo el 50% de la capacidad instalada a nivel mundial. Esto debido a que el convertidor utilizado es dimensionado en torno al 30% de la capacidad nominal del generador, provocando que este sea más liviano, económico y produzca menores pérdidas. Sin embargo, los generadores eólicos basados en DFIG son bastante sensibles a perturbaciones en la red, especialmente a las caídas repentinas de la tensión que provocan sobrevoltajes y sobrecorrientes en las bobinas del rotor, que pueden incluso destruir el convertidor si no se agregan elementos de protección.

De acuerdo a lo estipulado en el artículo 3,7 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad Servicio (NTSyCS) del Ministerio de Energía de Chile, actualizada el 20 de enero de 2016 mediante la Resolución Exenta N 37°: “ *En caso de caídas de tensión en el sistema de transmisión, ya sea producto de cortocircuitos monofásicos, bifásicos, trifásicos u otros eventos, las unidades de un parque eólico o fotovoltaico deberán ser diseñadas de modo de asegurar que, a lo menos, se mantengan conectadas al sistema cuando la tensión fase–tierra en el punto de conexión a la red de las fases falladas varíe dentro de la zona achurada de la figura a continuación (zona de no–desconexión) y las tensiones en las fases no falladas no sobrepasen las tensiones máximas de servicio. Para estos efectos, la tensión deberá medirse en el lado de mayor tensión del punto de conexión a la red.* ”

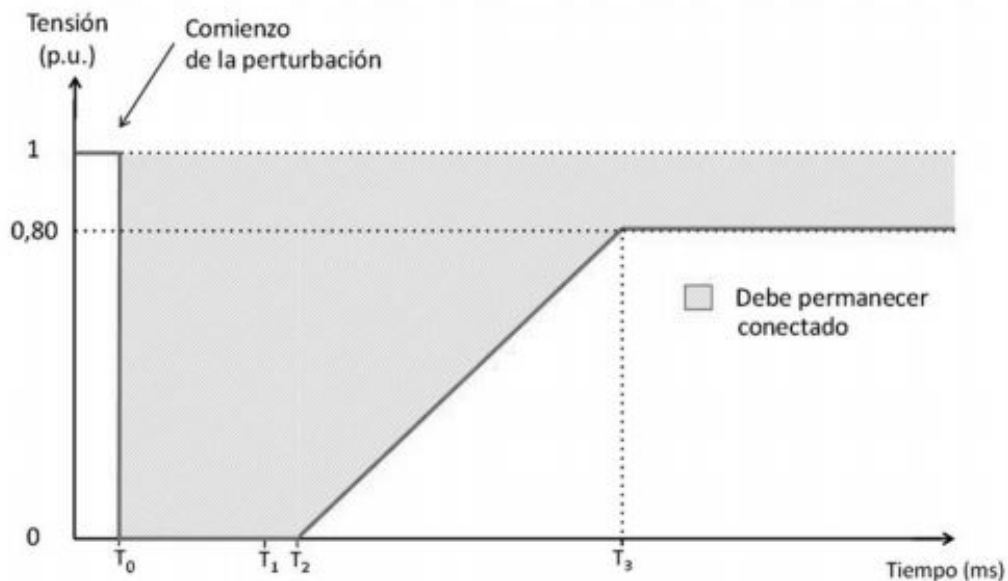


Figura 40: Exigencias impuestas por la norma técnica de calidad y seguridad del servicio

Siendo:

$T0 = 0[ms]$, Tiempo de inicio de la falla.

$T1 =$ Tiempo máximo de despeje de falla establecido en el Art. 5 – 45, según el nivel de tensión del Punto de Conexión.

$T2 = T1 + 20[ms]$

$T3 = 1000[ms]$

Adicionalmente, ante la ocurrencia de cualquier cortocircuito o evento en el sistema de transmisión que lleve en el punto de conexión a la red a caídas de tensión que excedan la banda muerta del control de tensión de $\pm 10\%$ de $\Delta U/U_{nom}$, el control de tensión deberá priorizar la inyección de corriente reactiva. El control de tensión del parque eólico o fotovoltaico deberá activarse dentro de los 20 ms de detectada la falla, suministrando corriente reactiva adicional (ΔI_r) en un monto igual al 2% de la corriente nominal (I_{nom}) por cada 1% de $\Delta U/U_{nom}$ en el punto de conexión a la red. El sistema de control del parque eólico o fotovoltaico deberá ser capaz de inyectar una corriente aparente de secuencia positiva de hasta 100% de la I_{nom} en caso de ser necesario. Esta acción del control de tensión deberá mantenerse hasta que la tensión medida en el lado de mayor tensión del punto de conexión a la red ingrese dentro de la banda muerta del regulador”

Con la finalidad de evaluar el desempeño de las estrategias de control propuestas frente a una caída en el voltaje de la red se realiza una simulación de prueba, de forma tal que la tensión de la red cae al 30% en todas sus fases. Esta perturbación tiene una duración de 0.3 [s], luego de lo cual la tensión de la red se restablece a los valores normales. De acuerdo al Anexo 3: Exigencias establecidas por la Norma Técnica de seguridad y Calidad de Servicio, en presencia de esta caída trifásica de la tensión, el DFIG debe mantenerse conectado a la red y apoyar con potencia reactiva al sistema.

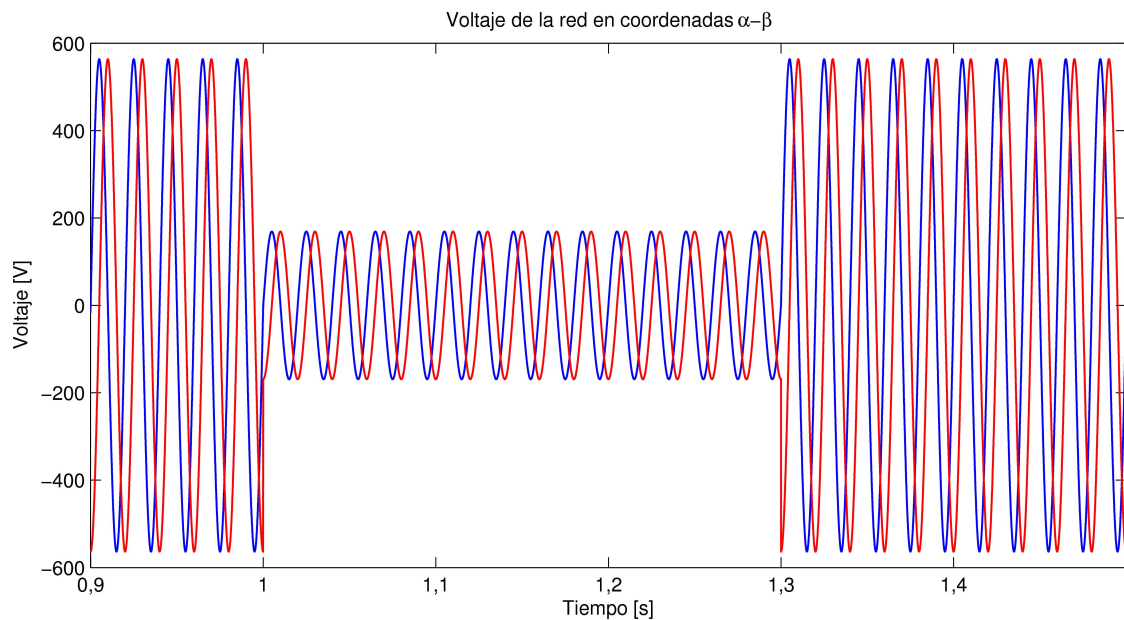


Figura 41: Voltaje de la red en presencia de una caída de tensión

En la Figura 41 se observa el voltaje aplicado al DFIG, en coordenadas $\alpha - \beta$ donde se

observa en color azul V_α y en color rojo V_β , apreciándose la caída de tensión al 30% del valor nominal a los 5 segundos, permaneciendo en este estado por 0.3 [s], para luego volver a su valor nominal. Con lo anterior se produce una caída de tensión trifásico que permite evaluar las estrategias de control propuestas bajo caídas repentinas en el voltaje de la red.

5.6.2. Flujo del estator

Una de las variables del DFIG que se ve afectada por una caída de la tensión en la red es el flujo del estator, que corresponde una variable de estado y por tanto no puede cambiar instantáneamente desde los valores cuando ocurre la caída de tensión (ψ_{s1}) hasta los valores que debe tomar de acuerdo a las nuevas condiciones del sistema (ψ_{s2}). Los valores nombrados anteriormente vienen dados por:

$$\vec{\psi}_s = \begin{cases} \vec{\psi}_{s1} = \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & \text{para } t < t_0 \\ \vec{\psi}_{s2} = \frac{V_2}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & \text{para } t \geq t_0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Donde: $V_1 > V_2$

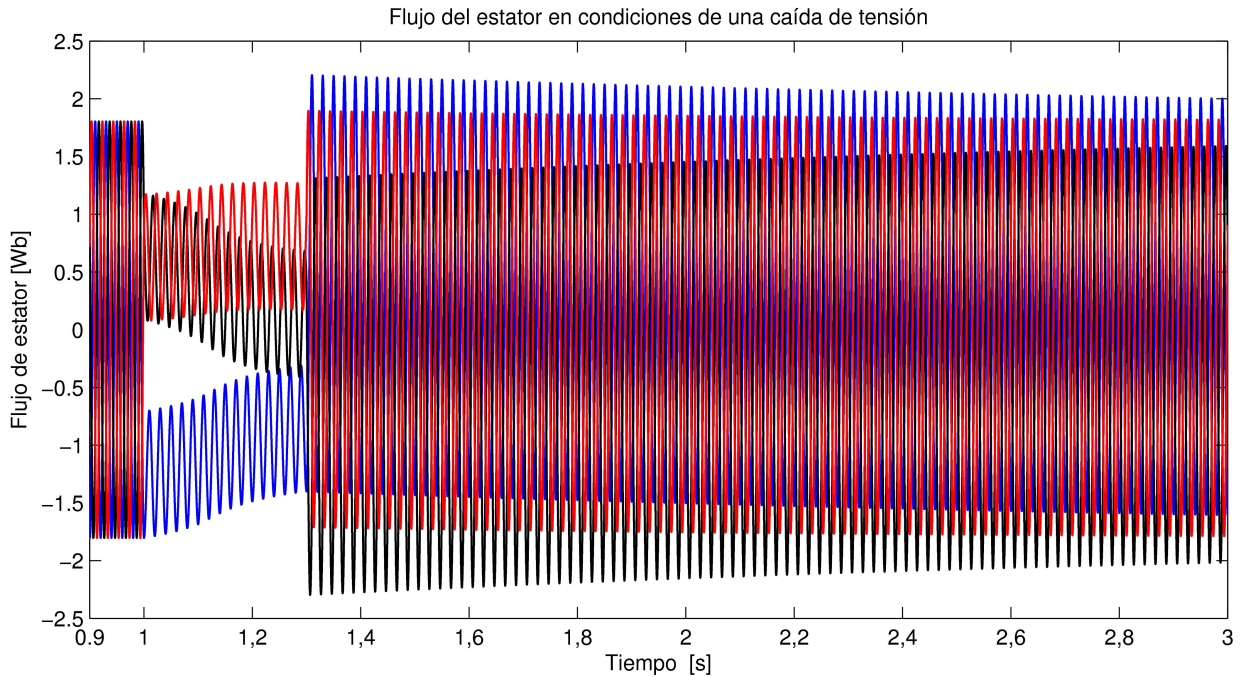


Figura 42: Flujo del estator en condiciones de caída de tensión

Lo dicho anteriormente se observa en la Figura 42, que muestra el flujo del estator en coordenadas naturales. Luego de aplicar la perturbación trifásica en el voltaje, este evoluciona desde los valores que posee en ese instante de tiempo a los valores de régimen permanente.

Esta evolución presenta una componente DC que decae exponencialmente de acuerdo a EC 5.4. Luego, al volver el voltaje al valor nominal este fenómeno se vuelve a repetir y el sistema se logra estabilizar en régimen permanente aproximadamente a los 10 [s], esto debido a que el τ del es aproximadamente 2 [s].

5.6.3. Voltaje del rotor

Otra de las variables del DFIG que se ve afectada por una caída de la tensión en la red es el voltaje del rotor, que también corresponde a una variable de estado y por tanto no puede cambiar instantáneamente desde los valores cuando ocurre la caída de tensión ($t = 5[s]$) hasta los valores que debe tomar de acuerdo a las nuevas condiciones del sistema.

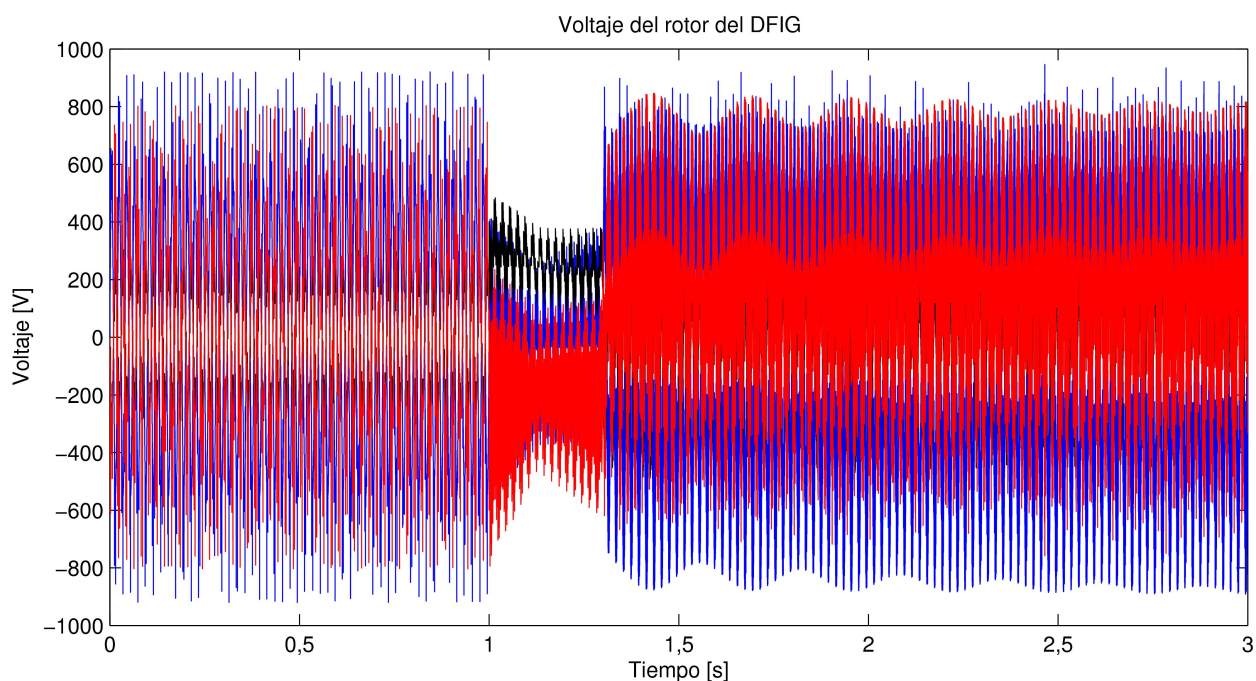


Figura 43: Voltaje del rotor durante la caída de tensión en la red.

En la Figura 43 se muestra el voltaje del rotor del DFIG conectado al convertidor lado rotor, donde se observa que durante la caída de tensión el voltaje del rotor disminuye en magnitud y aparecen componentes DC que decaen exponencialmente y realizan la transición entre los valores entre el comienzo de la caída de tensión y su posterior evolución, que provoca la aparición de sobrecorrientes en los enrollados del rotor.

5.6.4. Voltaje del DC-Link

De acuerdo a la Figura 13, al producirse la caída de tensión en la red eléctrica el aerogenerador debe dejar de inyectar potencia activa a la red y en su reemplazo debe inyectar potencia reactiva para apoyar al sistema con reactivos que permitan levantar la tensión. Para analizar lo anterior se hace operar el DFIG en modo supersincrónico, en su valor nominal, ya que en los otros puntos de operación evaluados el resultado es análogo en cuanto al comportamiento del sistema con la diferencia que en el caso sincrónico la potencia transferida por el convertidor back-to-back es cercana a cero y el modo subsincrónico la potencia va desde la red hacia el aerogenerador por medio del convertidor.

Dado que por un lado, el conversor lado red deja de retirar energía del DC-Link, ya que se encuentra desfasando la corriente de red del voltaje del mismo nombre para inyectar los reactivos exigidos por la normativa y por otro lado el conversor lado rotor se encuentra inyectando energía al condensador, por conservación de energía, esta va a tender a acumularse en el condensador y consecuentemente a provocar que el voltaje del DC-Link suba. Esto se observa en la Figura 44 que muestra el voltaje del DC-Link para el DFIG, siendo este regulado con la estrategia de control descentralizada, centralizada y distribuida en su valor nominal de operación. Luego de aparecer la caída de tensión en el tiempo 1 [s], el voltaje DC sube a hasta los 1500 [V], tensión que no supera debido a que al alcanzar este valor se activa un chopper ideal que quema el exceso de energía y de esta forma evita un deterioro en el convertidor back-to-back. Además se observa que una vez superada la perturbación el sistema vuelve a evacuar la energía hacia la red y el voltaje del enlace de continua vuelve a su valor de operación normal, que corresponde a 1200 [V]. Esta normalización va acompañada de las oscilaciones típicas de un controlador PI, cuyo sobrenivel máximo es de 122 [v] utilizando la estrategia descentralizada.

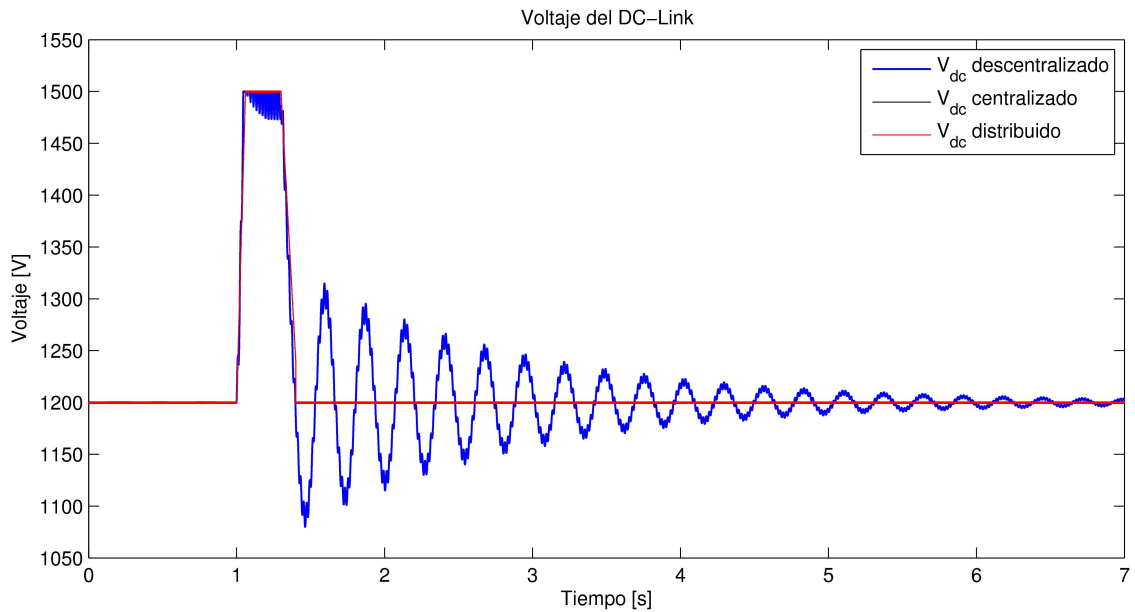


Figura 44: Voltaje del DC-Link operando con las estrategias de control predictivo durante la caída de tensión

En el caso de la estrategia de control centralizado y distribuido el comportamiento es similar, ya que el voltaje del DC-Link sube hasta que actúa el chopper para consumir el exceso de energía, pero a diferencia de la estrategia descentralizada, se evitan las oscilaciones en el voltaje del DC-Link provocadas por el controlador PI cuando la tensión del sistema vuelve a la normalidad.

5.6.5. Corriente de rotor y de red

La referencia de la corriente del rotor tiene la finalidad de maximizar la transferencia de energía desde la red o hacia el rotor, dependiendo del modo de operación del DFIG. Esto implica que el convertidor lado rotor impone que la potencia reactiva sea cero. Este objetivo no cambia al ocurrir la caída de tensión en la red, por lo que el flujo de energía va a seguir su dirección independiente de la perturbación en el voltaje de la red.

Lo anterior se observa en la Figura 45, donde las referencias de corriente del rotor no cambian con la ocurrencia de la caída trifásica del voltaje de la red. Sin embargo, una vez ocurrida se observa una componente DC tanto en la coordenada α como β que decae exponencialmente y provoca sobrecorrientes de rotor que el convertidor lado rotor no puede manipular y por tanto pierde el control de esta parte del sistema. Anterior a la falla trifásica, la corriente del rotor toma una amplitud máxima de 1600 [$A_{p,p}$], pero durante la perturbación esta puede llegar a los 3611 [$A_{p,p}$].

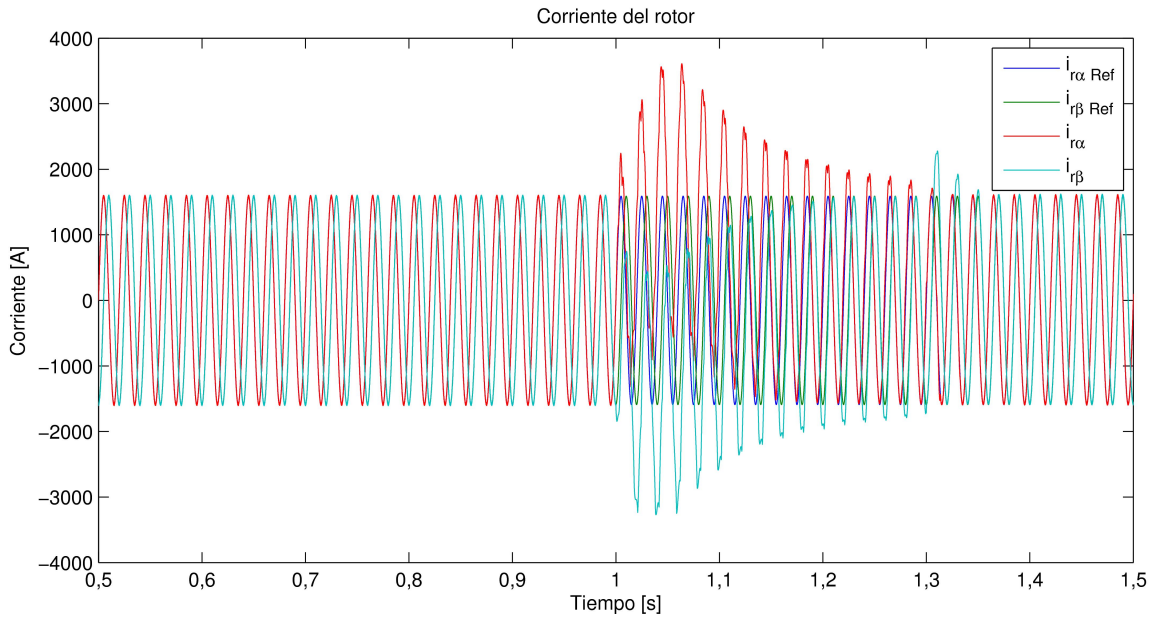


Figura 45: Corriente del rotor durante la caída de tensión en la red.

En cuanto a las referencias de corriente de red son generadas a partir de la Ec 2.23. Estas referencias se generan a partir de la potencia activa (P) y reactiva (Q) deseada y además de los valores del voltaje de la red medidos en coordenadas sincrónicas para la secuencia positiva y negativa con la finalidad de mantener el balance en el voltaje del DC-Link en torno a los 1200 [V] cuando el aerogenerador opera en ausencia de caídas de tensión, es decir, extraer la misma cantidad de energía que ingresa al sistema.

Cuando se presentan caídas de tensión en la red, las referencias generadas a partir de la Ec 2.23 tiene la peculiaridad de que siguen siendo válidas en estas circunstancias, ya que solo es necesario ajustar la potencia activa y reactiva deseadas a los valores impuestos por la normativa

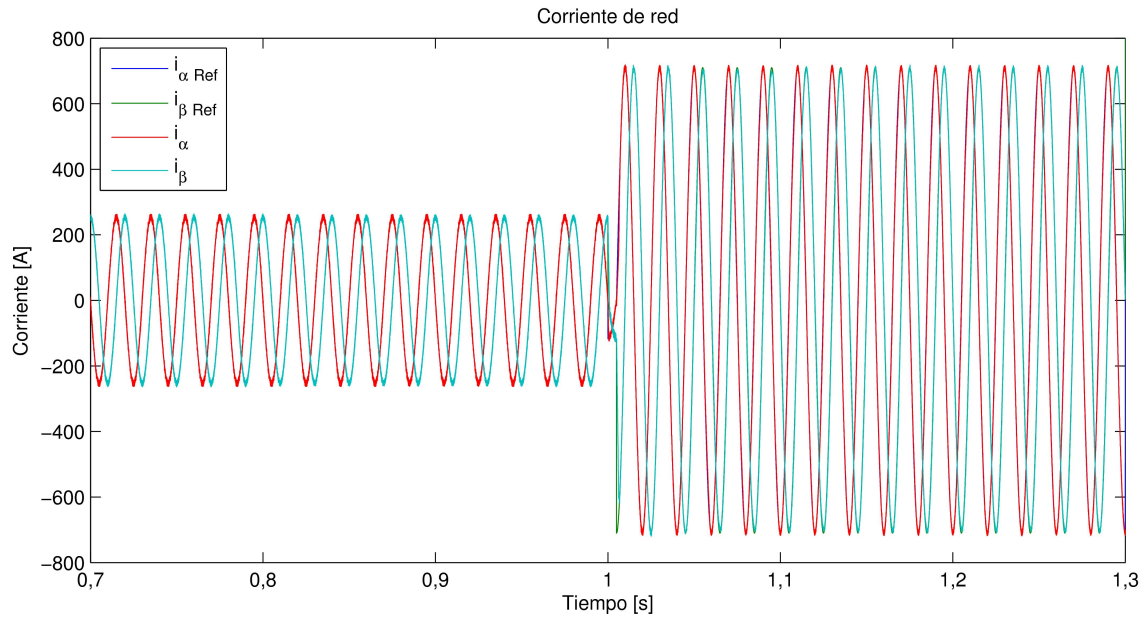


Figura 46: Corriente de red durante la caída de tensión en la red.

En la Figura 46 se observa la corriente de red generada por el convertidor lado red. En esta figura se destaca que antes del 1 [s] el sistema se encuentra operando normalmente, de tal forma que la potencia reactiva generada por este conversor es cero para maximizar la transferencia de energía hacia la red. Sin embargo, luego que ocurre la caída de tensión el objetivo de control del convertidor lado red cambia. Pasando de inyectar potencia activa a inyectar a la red potencia reactiva. Como consecuencia de los anterior la corriente de red se encuentra desfasada en 90° de la tensión de la red.

5.6.6. Potencia activa o reactiva

Para los parámetros de la caída de tensión simulada en operación normal solo se debe inyectar potencia activa al sistema y por tanto la potencia reactiva debe ser cero. En cambio, bajo la caída de la tensión en las tres fases solo se debe inyectar potencia reactiva al sistema para apoyar con reactivos, que permitan levantar la tensión o por lo menos que no siga cayendo para evitar un black-out y por ende la potencia activa debe ser cero. Lo anterior viene dado por la Figura 13 que establece la forma de operar en estos casos.

Lo anterior se puede observar en la Figura 47 y 48 que muestran la potencia activa y reactiva del convertidor lado red para las estrategia de control predictiva descentralizada, centralizada y distribuida. Antes de la perturbación sólo se inyecta potencia activa a la red, para luego durante la caída de voltaje solo inyectar potencia reactiva. Cuando la tensión vuelve a sus valores normales, la potencia reactiva nuevamente es cero y la potencia activa es controlada indirectamente por el controlador PI para regresar el voltaje del DC-Link a su valor deseado. En cambio, en la estrategia centralizada y distribuida la potencia activa

vuelve a valor de operación normal superada la perturbación sin oscilaciones.

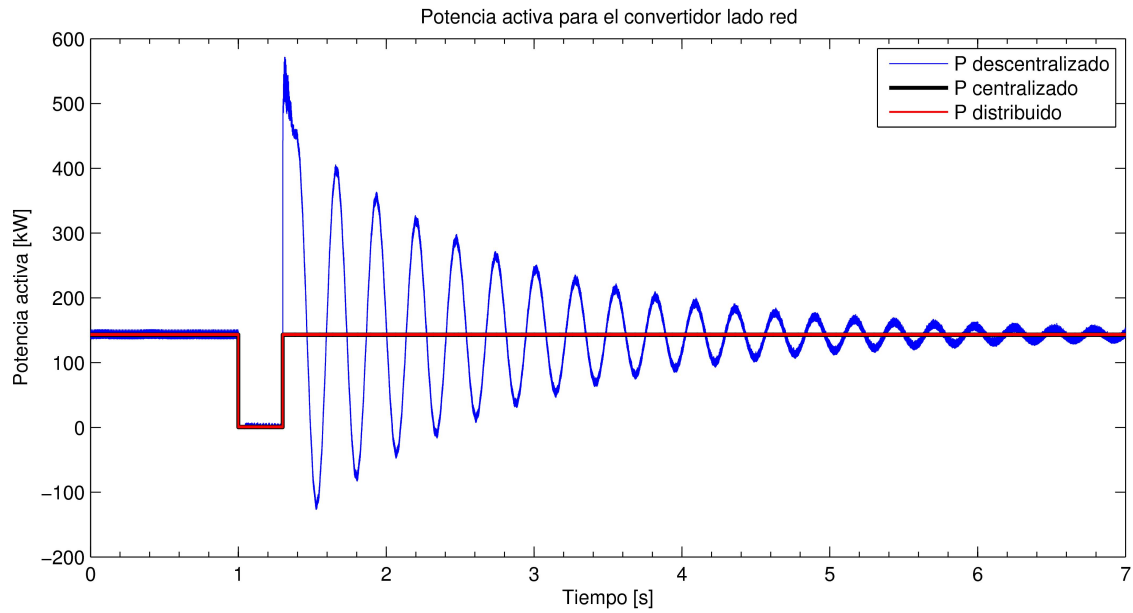


Figura 47: Potencia activa generada por el convertidor lado red durante la caída de tensión en la red.

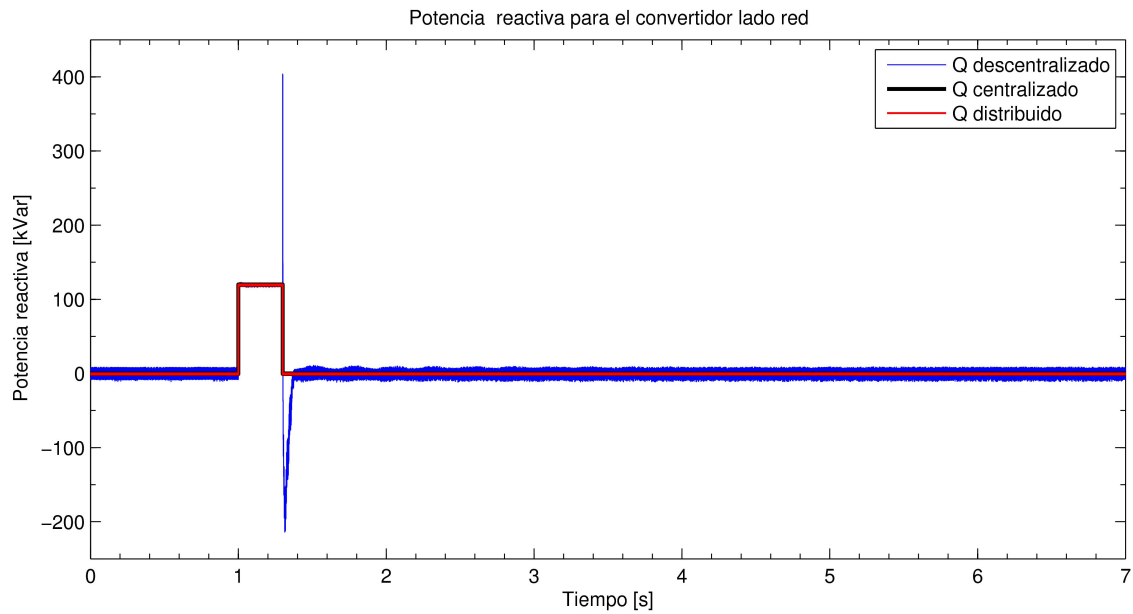


Figura 48: Potencia reactiva generada por el convertidor lado red durante la caída de tensión en la red.

Luego de evaluar el desempeño de las estrategias de control predictivas propuestas bajo condiciones de caída de tensión en la red, se observa que por sí solas no son capaces de man-

tener el voltaje del DC-Link en torno al valor deseado, dado que el objetivo del convertidor lado rotor no se encuentra en la misma línea que el convertidor lado red. Además, estas tampoco son capaces de mantener el control sobre las corrientes del rotor, ya que aparecen sobrecorrientes que son imposible de sintetizar con el tamaño del convertidor back-to-back utilizado en esta tecnología de aerogenerador. Por último, mediante el mecanismo utilizado para generar las referencias de las corrientes de red se logra cumplir con la normativa técnica que deben cumplir los generadores eólicos cuando se conectan a los sistemas interconectados.

5.6.7. Discusión

En este capítulo se evaluó la operación del DFIG con las tres estrategias de control predictivo propuestas, en función de distintos indicadores establecidos en el trabajo de investigación. Se observó que el simulador es capaz de mantener el sistema bajo control. En particular, en la evaluación del voltaje del DC-Link el controlador es capaz de mantener el voltaje en torno al valor deseado para los tres casos evaluados. Así mismo respecto a la corriente de rotor y de red se observó que estas siguen la referencia para las tres estrategias. De esta forma se evidencia que el simulador implementado captura la dinámica de un generador doblemente alimentado, ya que es capaz de funcionar en todo su rango de operación, es decir en modo supersincrónico, subsincrónico y sincrónico en consecuencia a lo reportado en [4]. Además de funcionar en sus 3 modos característicos, el simulador logra capturar el funcionamiento del DFIG cuando ocurren caídas de tensión en la red eléctrica de acuerdo a lo reportado en [27]. Al ocurrir esta perturbación en el voltaje del sistema eléctrico, aparecen componentes DC que decaen exponencialmente en el flujo de estator que provocan sobrevoltajes y sobrecorrientes en el rotor.

Al analizar el desempeño de la estrategia descentralizada, esta presenta el peor desempeño en cuanto al error al controlar el voltaje del DC-Link debido a que el controlador PI provoca sobreniveles en torno al 4% cuando se cambia el punto de operación. Además, al evaluar la función de costos obtiene el mayor error, ya que cada controlador optimiza en torno a su área de influencia y por ende cada controlador obtiene óptimos locales de solución. En cambio, esta estrategia tiene el tiempo de resolución menor ya que tanto el conversor lado rotor y red evalúan en sus 8 estados posibles. Al analizar la distorsión armónica se obtienen los mejores resultados con esta estrategia debido a mejor capacidad de regulación que entrega el controlador PI que regula el voltaje del condensador. En el caso de la estrategia centralizada, esta presenta el mejor desempeño al regular el voltaje del DC-Link y cuando se cambia el punto de operación no se producen sobreniveles. Además, al evaluar la función de costos obtiene el menor error, ya que es el único controlador obtiene un óptimo global como solución. En cambio, esta estrategia tiene el tiempo de resolución más alto ya que por cada vez que se resuelve el problema de optimización se evalúan en sus 64 estados posibles, haciendo inviable su aplicación en la realidad. Al analizar la distorsión armónica se obtienen los mejores resultados que con la estrategia distribuida, pero peores que con la descentralizada. Por último, en la estrategia distribuida, se presenta un desempeño levemente inferior al regular el voltaje del DC-Link y al evaluar la función de costos en relación a la estrategia centralizada. Al analizar la distorsión armónica se obtienen los peores resultados ya que en

este caso no se tiene el controlador PI y tampoco el óptimo encontrado es un óptimo global. El tiempo de resolución del problema de optimización es menor al tiempo de muestreo, por lo que se puede aplicar en tiempo real, pero mayor al necesario para resolver el problema en la estrategia descentralizada.

Cuando se presenta la caída de tensión en la red se produce un cambio en la magnitud del flujo del estator con la presencia de una componente DC que decae exponencialmente y a su vez este provoca que también aparezcan estas componentes DC en el voltaje del rotor que también decae exponencialmente. Estas componentes DC provocan sobrecorrientes en los enrollados del rotor que hacen que el convertidor lado rotor pierda la capacidad de regular esa corriente debido a que la electrónica de potencia utilizada en este convertidor está dimensionada en torno a un 30 % del la potencia nominal del DFIG. Esta sobrecorriente provoca una disminución de la vida útil del equipo o hasta que este se queme. Al seguir la operación que establece la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, el DFIG deja de inyectar potencia activa a la red y en su reemplazo aporta con potencia reactiva para apoyar al sistema con reactivos durante la contingencia. Dado que por el lado rotor le está llegando energía y no está saliendo por el lado red, por conservación de la energía el voltaje del DC-Link aumenta hasta alcanzar los 1500[V]. A esta tensión comienza a operar un chopper ideal para disipar el exceso de energía. Cabe destacar que esta operación se cumple para las tres estrategias evaluadas.

Conclusiones

En esta tesis se logra diseñar las estrategias de control predictivo descentralizada, centralizada y distribuida con sus respectivos modelos de predicción y funciones de costos, que fueron implementadas en un simulador mediante el uso del software Matlab-Simulink que captura la dinámica de un generador doblemente alimentado para todo el rango de operación, como para cuando ocurren caídas de tensión en la red que provocan la aparición de sobrevoltajes y sobrecorrientes en el rotor.

Se logró regular el generador de inducción doblemente alimentado mediante la implementación de las estrategias propuestas en el convertidor back-to-back, cumplimiento de los objetivos de control de mantener el voltaje del DC-Link balanceado y lograr un buen seguimiento de las corrientes de rotor y red planteados en el comienzo del trabajo.

Al comparar las estrategias de control predictivo descentralizada, centralizada y distribuida se obtuvo que las tres tienen comportamientos similares en cuanto al error de seguimiento de las referencias de corriente del rotor y red. En cambio, la estrategia centralizada y distribuida tienen un desempeño superior a la estrategia descentralizada al mantener balanceado el voltaje del DC-Link, ya que en las primeras no hay sobreniveles y por tanto tampoco un tiempo de estabilización asociado. Además, el error de seguimiento de esta variable es un orden de magnitud más bajo. En cuanto a la distorsión armónica se observa que las frecuencias provocadas por la distorsión en las ondas de corriente se encuentran distribuidas a lo largo de todo el espectro de frecuencias. Por último, se observó que para la estrategia de control predictivo descentralizada y distribuida es posible resolver el problema de optimización antes del periodo de muestreo y por tanto pueden ser implementadas en aplicaciones reales. En consecuencia de lo anterior, se observa que la estrategia de control centralizado y distribuido tienen un desempeño similar entre sí y superior a la descentralizada, con la diferencia de que la distribuida se encuentran los valores óptimos en un tiempo menor al tiempo de muestreo.

Luego de evaluar el desempeño de las las estrategias de control predictivas propuestas bajo condiciones de una caída trifásica de la tensión en la red, se observa que por sí solas no son capaces de mantener el voltaje del DC-Link en torno al valor deseado, dado que el objetivo del convertidor lado rotor no se encuentra en la misma línea que el convertidor lado red. Además, estas tampoco son capaces de mantener el control sobre las corrientes del rotor, ya que aparecen sobrecorrientes que son imposible de sintetizar con el tamaño del

convertidor back-to-back utilizado en esta tecnología de aerogenerador. Por último, mediante el mecanismo utilizado para generar las referencias de las corrientes de red se logra cumplir con la normativa técnica que deben cumplir los generadores eólicos cuando se conectan a los sistemas interconectados para la potencia activa y reactiva.

La caída de la tensión de la red provoca la aparición de componentes DC en el flujo de estator, en el voltaje del rotor, la corriente del estator y la corriente del rotor que decaen exponencialmente de acuerdo a la constante de tiempo de cada parte del sistema. Esto debido a que las variables nombradas son variables de estado y por tanto no pueden pasar de un valor a otro de forma instantánea. Esto provoca que el conversor lado rotor no sea capaz de manejar estas sobrecorrientes y pierda el control de esta durante la caída de tensión. Por lo que es necesario utilizar otros mecanismos y métodos para reducir los efectos nocivos que genera la presencia de huecos de tensión en el sistema eléctrico para no afectar negativamente la vida útil del convertidor back-to-back y del aerogenerador doblemente alimentado.

Trabajo futuro

Los siguientes puntos pueden considerarse para trabajos futuros en relación al tema tratado en esta tesis:

- Cambiar la lógica de control en cada estrategia, pasado desde el seguimiento de las referencias de las corrientes y voltajes a la regulación de la potencia activa y reactiva. Dado que las potencias son las variables de interés en un generador y estas se pueden expresar a partir de los voltajes y corriente del aerogenerador y el conversor back-to-back.
- Agregar un término a las funciones de costos para disminuir la frecuencia de switching con la que opera el DFIG, ya que en los resultados obtenidos este parámetro es muy elevados para una aplicación real. Lo anterior no fue modificado debido a que estaba fuera de los alcances de trabajo.
- Enlazar el objetivo del convertidor lado rotor con el lado red para balancear el voltaje de mejor manera el DC-Link cuando ocurre una caída de tensión en la red, de esta forma no se captura la totalidad de la energía que produce el generador.
- Implementar una estrategia de control predictiva modulada al sistema de estudio para el DFIG para enfocar el espectro de frecuencias en torno a múltiplos de la frecuencia portadora.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Energía, <http://antiguo.minenergia.cl>, 1998.
- [2] J. Rodriguez, M. Kazmierkowski, J. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. Young, C. Rojas., “State of Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol.9, pp. 1003 - 1016, May 2013.
- [3] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molina, J. Rodríguez, “Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks ”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.58, no.4, pp. 1081 - 1095, April 2011.
- [4] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro., “Power Conversion and control of Wind Energy Systems”, *IEEE*, 2011.
- [5] <https://hernanleon1002.files.wordpress.com/2014/11/turbina-eolica>
- [6] J. Anderson., “Fundamentals of Aerodynamics ”, Third Edition, McGraw Hill, 2001.
- [7] S. Heier, “ Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems” , Second Edition, Wiley, 2006.
- [8] R. Teadorescu, M. Liserre, P. Rodríguez, “ Converters for Photovoltaic and Wind Power systems” , *IEEE*, 2012.
- [9] J. Rodríguez, J. Pontt, C. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, U. Ammann, “Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.54,no.1, pp.495-503, Feb.2007.
- [10] R. Cárdenas, “Control Vectorial de Máquinas de Inducción de Doble Excitación ”, *DIE* 2012.
- [11] E. Camacho, C. Bordons, “ Model Predictive Control ”, Second Edition, Springer, 2004.
- [12] D. Limón, Tesis doctoral, “ Control Predictivo de Sistemas no Lineales con Restricciones de Estabilidad y Robustez ”, Sevilla, 2002.
- [13] J. Rodríguez, P. Cortés, “Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives”, John Wiley and Sons, Vol. 40, 2012.
- [14] F. Valencia, J. López, J. Espinoza, D. Sáez. “Dinamic Bargaining Approach to the DMPC Problem Theory ”, December, pendiente de publicación, 2013.
- [15] F. Valencia, Tesis doctoral, “Game Theory Based Distributed Model Predictive Control An Approach to Large-Scale Systems Control”, Medellín 2012.

- [16] F. Valencia, J. López, J. Espinoza, “Discrete Time Dynamic Bargaining Distributed Model Predictive Control for a Hydro Power Valley”, pendiente de publicación, 2013 .
- [17] F. Valencia, A. Núñez, J. López, C. Portilla, L. Cortés, J. Espinoza, B. De Schutte, “Congestion Management in Motorways and Urban Networks Through a Bargaining Game Based Coordination Mechanism”, Springer, pp. 1-40, 2015.
- [18] J. Holtz, S. Stadtfeld, “A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source”, International Power Electronics Conference, IPEC, Tokio, pp. 1665 - 1675 - 1983.
- [19] S. Vázquez, J. León , L. Franquelo, J. Rodríguez, H. Young, A. Márquez, P. Zanchetta, “ Model predictive control a review of Its applications in Power Electronics ”, IEEE, pp. 16 - 31 - March 2014.
- [20] A. Nachiappan, V. Malarselvam, “Application of Predictive Current Control to a Voltage Source Inverter”, ICAESMA 2012, International Conference on, IEEE, pp. 496-501, March 2012.
- [21] C. Cai-xue, X. Yun-xiang, “ A Simplified Model Predictive Current Control for Voltage Source Inverter”, Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference, pp. 3231-3236 , 2010.
- [22] J. Rodríguez, J. Pontt, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, “Predictive Power Control of an AC/DC/AC Converter”, IEEE IAS 2005 (Industry Applications Society, 40th Annual Meeting), Hong Kong, 2-6 Oct., 2005.
- [23] P. Cortés, J. Rodríguez, R. Vargas, U. Ammann, “Cost Function-Based Predictive Control for Power Converter”, Proc. 32nd annu, IEEE IECON, pp. 2268-2273, Nov. 2006.
- [24] P. Cortés, J. Rodríguez, D. Quevedo, C. Silva, “Predictive Current Control Strategy With Imposed Load Current Spectrum”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.23, no.2, pp.612-618, March 2008.
- [25] Y. Zhang, H. Lin, “Simplified Model Predictive Current Control Method of Voltage Source Inverter”, IEEE 8th International Conference on Power Electronics, Korea, 30 May - 3 Jun. 2011.
- [26] P. Cortés, L. Vattuone, J. Rodríguez, “Predictive Current Control With Reduction of Switching Frequency for Three Phase Voltage Source Inverter”, IEEE Trans. Ind. Electron., pp. 1817 - 1822, Jun. 2011.
- [27] J. López , P. Sanchis , X. Roboam and L. Marroyo, “Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips”, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 22, no. 3, pp.709 -717 2007.
- [28] R. Cárdenas, Apuntes curso EL 7033, “Control e Integración a la Red de Sistemas Eólicos de Generación”, DIE, 2013.
- [29] R. Cárdenas, Apuntes curso EL 7032: Electrónica de Potencia y Accionamiento, “Control Vectorial de Máquinas de Inducción de Doble Excitación” , DIE 2012.

- [30] R. Cárdenas, R. Peña, S. Alepuz, G. Asher, “Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.60, no.7, pp.2776-2798, Jul.2013.
- [31] S. Alepuz , S. Busquets-Monge , J. Bordonau , P. Cortés , J. Rodríguez and R. Vargas, “Predictive current control of grid-connected neutral-point-clamped converters to meet low voltage ride-through requirements”, Proc. Power Electron. Spec. Conf., pp.2423 - 2428, 2008.
- [32] S. Alepuz , S. Busquets-Monge , J. Bordonau , P. Cortés and S. Kouro, “Control Methods for Low Voltage Ride-Through Compliance in Grid-Connected NPC Converter Based Wind Power Systems Using Predictive Control”, Proc. IEEE Energy Convers.Congr. Exposition, 2009. ECCE 2009, pp.363 -369, 2009.
- [33] M. Rivera , F. Morales , C. Baier , J Muñoz , L. Tarisciotti, P. Zancheta and P. Wheeler, “A Modulated Model Predictive Control Scheme for a Two-Level Voltage Source Inverter”, Proc. Power Electron. Spec. Conf., pp.2423 - 2428, 2015.
- [34] M. Doumbia , K. Belmokhtar , K. Agbossou, “Wind Diesel Hybrid Power System with Hydrogen Storage ”, New Developments in Renewable Energy, InTech, DOI: 10.5772, 2013.
- [35] Ayaman soluciones, <https://ayamansoluciones.wordpress.com/energias-alternativas-piensa-en-verde/>, 2016.