



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN EÓLICA
EMPLEANDO EL GENERADOR
SÍNCRONO DE IMANES
PERMANENTES

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

PRESENTA

Daniel Alejandro Parada Ortega

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rubén Tapia Olvera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para Lupita:

*Gracias por siempre iluminar
mi camino y nunca dejarme caer
ante las más difíciles adversidades.*

Agradecimientos

*A mis padres **Alejandro y Evangelina**, que siempre me han apoyado para poder alcanzar mis sueños; siempre cuidándome y brindándome todo su amor y cariño.*

*A mi hermano **Enrique**, por el apoyo que me brinda día con día y por nunca dejarme solo.*

*A mis padrinos **Luis, Fernando, Miriam, Estela y Leonor** porque gracias a sus consejos, hoy, soy una mejor persona. Gracias por el apoyo brindado en todo momento.*

*A mi asesor, **Dr. Rubén Tapia Olvera** que en todo momento me apoyó y aconsejó de la mejor manera. Gracias por confiar en mí y hacerme ver mis capacidades y carencias para ser un mejor profesional. Gracias por ser un buen amigo.*

*A mis amigos **Nelly y Ernesto**, que nunca me han dejado solo y siempre están incondicionalmente*

*Al **Dr. Daniel Guillén Aparicio** que siempre me tendió la mano, que más allá de un profesor, es un amigo. Gracias.*

*A mis sinodales, **Dr. Juan Ramón Rodríguez, Dr. Luis Miguel Castro y Dr. Gonzalo Sandoval**, por tomarse el tiempo de revisar mi trabajo y hacerme las observaciones necesarias para mejorarlo.*

*A mis compañeros **Luis Martínez, Elías Arias y Jesús Sánchez** por esos buenos momentos en el laboratorio y hacer más amena mi estadía en el Departamento de Energía Eléctrica.*

A la UNAM, por ser mi alma máter y permitirme formarme profesionalmente durante estos años.

Resumen

El incremento de la energía eólica como fuente de generación se debe al desarrollo de la tecnología en los convertidores de potencia en las últimas décadas, sin embargo, la interconexión con la red eléctrica no es sencilla, se requiere hacer estudios y análisis previos para asegurar una operación confiable del sistema y, de esa manera, entregar la energía de manera satisfactoria.

El presente trabajo de tesis realiza un estudio de un sistema de generación eólica empleando el generador síncrono de imanes permanentes cuando se presentan disturbios en las velocidades de entrada de la turbina debidas al comportamiento del viento. Este tipo de máquina presenta un buen funcionamiento frente a velocidades variables del viento. Además, el generador síncrono de imanes permanentes no cuenta con excitación en el rotor de corriente directa, lo que disminuye las pérdidas y aumenta la eficiencia de la máquina. Para la extracción de la energía del viento, se realiza un estudio de las ecuaciones matemáticas que relaciona la turbina eólica con la etapa mecánica y eléctrica del aerogenerador. En el análisis del sistema, se presenta un modelo matemático analizando diferentes estrategias de control e implementando la que se considera adecuada para la buena operación del sistema como se propone en la literatura. Asimismo, se presenta el modelo del convertidor back-to back, que presenta la configuración de un convertidor de fuente de voltaje entrelazado a otro convertidor de las mismas características mediante un capacitor en paralelo en ambos convertidores. En esta etapa, se implementan los controladores PI que actúan en diferentes variables para controlar el voltaje de corriente directa, la potencia activa, la potencia reactiva y las corrientes en eje directo y de cuadratura.

Finalmente, el sistema de generación propuesto se somete a perturbaciones de velocidad variable y se realiza el estudio de las variables de entrada y salida del sistema para poder observar el comportamiento que tiene bajo las condiciones a las que se plantea este trabajo.

Contenido

Resumen.....	I
Lista de Figuras.....	IV
Lista de tablas.....	VI
Lista de variables	VII
Acrónimos.....	X
CAPÍTULO I Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Motivación.....	4
1.3 Estado del arte.....	4
1.4 Planteamiento del problema.....	6
1.5 Objetivos.....	7
1.6 Organización de la tesis	7
CAPÍTULO II Modelado del aerogenerador	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Modelado de la turbina	9
2.3 Modelo del sistema mecánico del SGE	13
2.4 Modelado del sistema eléctrico del GSIP	16
CAPÍTULO III Back to Back.....	21
3.1 Introducción.....	21
3.2 Topologías de convertidores electrónicos del SGE	22
3.3 Convertidor Back-to-Back.....	22
3.4 Modelo del Back to Back.....	24
3.5 Esquemas típicos de control	26

CAPÍTULO IV Estudio de un sistema máquina bus infinito	31
4.1 Introducción	31
4.2 Descripción del sistema	32
4.3 Resultados	33
4.4 Conclusiones	44
Aportaciones.....	46
Trabajos futuros	47
Referencias	48
Anexo A	52
Anexo B	53

Lista de Figuras

Figura 1.1	Capacidad instalada de energía eólica	10
Figura 2.1	Comportamiento del viento	18
Figura 2.2	Curvas de coeficiente de potencia en función de λ y β	20
Figura 2.3	Diagrama de dos masas	21
Figura 2.4	Diagrama de una masa	22
Figura 2.5	Configuraciones típicas de GSIP: a) superficiales, b) interiores	24
Figura 2.6	Circuito equivalente del generador síncrono	25
Figura 2.7	Circuitos equivalentes: a) eje d , b) eje q	26
Figura 2.8	Comportamiento del par mecánico y par eléctrico	27
Figura 3.1	Esquema del convertidor BTB	30
Figura 3.2	Diagrama equivalente del BTB	31
Figura 3.3	Esquema del BTB con etapas de control	33
Figura 3.4	Esquema de control lado generador	34
Figura 3.5	Esquema de control lado red	35
Figura 3.6	Voltaje de CD	35
Figura 4.1	Sistema de generación eólica con GSIP	38
Figura 4.2	Potencia mecánica, caso I	39

Figura 4.3	Corriente en eje d del GSIP, caso I	39
Figura 4.4	Corriente en eje q del GSIP, caso I	40
Figura 4.5	Voltaje en eje d del GSIP, caso I	40
Figura 4.6	Voltaje en eje q del GSIP, caso I	40
Figura 4.7	Corrientes abc en el GSIP, caso I	41
Figura 4.8	Voltajes abc en el GSIP, caso I	41
Figura 4.9	Potencia activa, caso I	42
Figura 4.10	Potencia reactiva, caso I	42
Figura 4.11	Voltaje en el BTB, caso I	43
Figura 4.12	Potencia mecánica, caso II	43
Figura 4.13	Corriente en eje d del GSIP, caso II	44
Figura 4.14	Corriente en eje q del GSIP, caso II	44
Figura 4.15	Voltaje en eje d del GSIP, caso II	45
Figura 4.16	Voltaje en eje q del GSIP, caso II	45
Figura 4.17	Corrientes abc en el GSIP, caso II	46
Figura 4.18	Voltajes abc en el GSIP, caso II	46
Figura 4.19	Potencia activa, caso II	47
Figura 4.20	Potencia reactiva, caso II	47
Figura 4.20	Voltaje en el BTB, caso II	48

Lista de tablas

Tabla 2.1	Valores de los coeficientes del rotor	12
Tabla 2.2	Parámetros del GSIP	20
Tabla 3.1	Comparación de topologías del BTB	22
Tabla A.1	Parámetros del Back to Back	29

Lista de variables

V_v	Velocidad del viento
λ	Relación entre la velocidad angular del rotor y la velocidad del viento
ω_l	Velocidad angular del rotor
R	Largo de las aspas
v	Velocidad del viento
P_m	Potencia mecánica
T_m	Par mecánico
p	Pares de polos
C_p	Coefficiente de potencia
P_T	Potencia total de la turbina
P_{viento}	Potencia del viento
β	Ángulo de inclinación de las aspas
J_m	Inercia de la turbina
B_m	Coefficiente de amortiguamiento del lado turbina
K_m	Coefficiente de pérdidas por fricción del lado turbina
ω_m	Velocidad rotacional

T_e	Par eléctrico
B_g	Coeficiente de amortiguamiento del lado generador
K_g	Coeficiente de pérdidas por fricción del lado generador
J_g	Inercia del generador
J_{eq}	Inercia equivalente
K_{fem}	Fuerza electromotriz
N_c	Constante de construcción
E	Voltaje trifásico
φ	Flujo magnético
L_{aa}	Auto-inductancias
V_a	Voltaje en terminales
R_s	Resistencia por fase
r_s	Resistencia en el estator
i_d	Corriente eje d
i_q	Corriente eje q
V_d	Voltaje en eje d
V_q	Voltaje en eje q
L_q	Inductancia en eje d

L_d	Inductancia en eje q
k	Flujo del imán permanente
I_a	Corriente en fase a
R_T	Resistencia equivalente
L_T	Inductancia equivalente
V_{Sa}	Voltaje de la fuente en la fase a
V_T	Voltaje en terminales
L_s	Inductancia por fase
V_{CD}	Voltaje en CD
C	Capacitancia
R_{CD}	Resistencia de CD
S	Potencia aparente

Acrónimos

GSIP	Generador Síncrono de Imanes Permanentes
DFIG	Double Field Induction Generator
WECS	Wind Energy Converter System
BTB	Back to Back
SGE	Sistema de Generación Eólica
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
MSIP	Máquina Síncrona de Imanes Permanentes
COC	Control Orientado a Campo
CPO	Control de Par Óptimo
SPMP	Seguimiento de Punto Máximo de Potencia
THD	Total Harmonic Distortion
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
VSC	Voltage Source Converter
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
PLL	Phase Locked Loop
PI	Proportional Integral

CAPÍTULO I

Introducción

1.1 Introducción

La eficiencia energética de los últimos años junto al interés por las energías renovables está experimentando un crecimiento extraordinario en el mundo debido a que las actividades relacionadas con el desarrollo humano son más sofisticadas y éstas conllevan una gran demanda de energía eléctrica.

Considerando que las principales fuentes de energía eléctrica que se utilizan son del tipo no renovable y asociado al hecho de que los recursos de petróleo se están agotando, se prevé que la búsqueda de nuevas propuestas para la generación de energía eléctrica en el mundo mediante fuentes de energía renovables tenga un alto desarrollo; visión que conlleva a realizar estudios que permitan obtener la máxima eficiencia posible dentro del proceso de producción y transformación de energía [1-4].

En concreto, la energía eólica es de las energías limpias más conocidas y aprovechadas hasta el momento, además; es una de las fuentes energéticas más baratas y compite en rentabilidad con otras fuentes tradicionales lo que permite diversificar las fuentes de energía. De hecho, esta tecnología está adquiriendo un protagonismo asombroso, convirtiéndose en una de las tecnologías que más energía aporta al sistema eléctrico en muchos países como se muestra en la Figura 1.1, donde se muestra la capacidad instalada de energía eólica en países desarrollados en el 2017 [5]. Además, se observa la notable diferencia entre México con países de primer mundo.

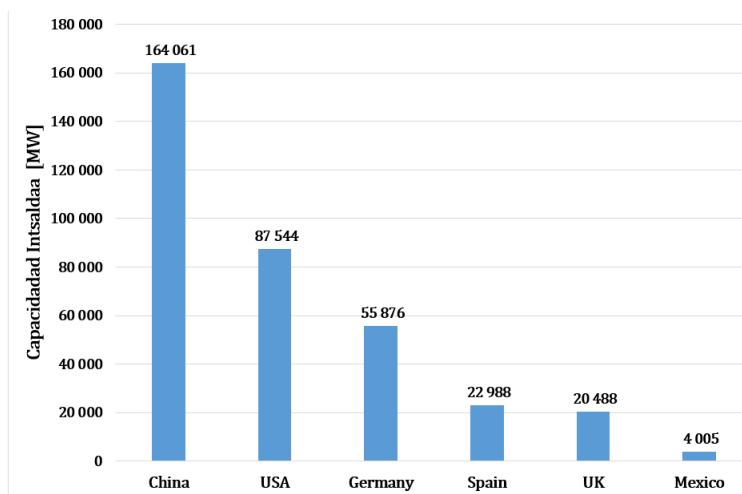


Figura 1.1: Capacidad instalada de energía eólica en 2017.

Debido al aumento de la penetración de la energía eólica en el sistema eléctrico, es lógico pensar que los parques eólicos puedan influir en el comportamiento del sistema eléctrico no solo en el rango de potencia de megawatts [MW], sino también en el caso de pequeños generadores de varios kilowatts [kW]. Las turbinas eólicas se utilizan como fuente primaria para sistemas de respaldo o como fuente secundaria que sólo se active en los picos de demanda [2].

Por ello, la necesidad de obtener modelos equivalentes de generadores eólicos que representen el comportamiento de un parque eólico, y por consiguiente, estudiarlos y analizarlos para poder disminuir el tiempo de simulación sin perder información sobre la respuesta conjunta de los aerogeneradores; de esa

manera se pueden conocer diferentes comportamientos en las redes eléctricas [3].

Aunado a lo anterior, el conocimiento de las diferentes topologías existentes en aerogeneradores y las ventajas que presentan una de la otra es primordial para realizar sistemas más eficientes. En la actualidad, la topología de turbina eólica de velocidad variable es la más utilizada.

Para reducir el alcance de los impactos que los efectos transitorios pueden provocar en el sistema, los operadores del sistema eléctrico en cada país han establecido diferentes requisitos para conectarse a la red eléctrica. Para cumplir con las exigencias técnicas establecidas, los sistemas eléctricos de generación no convencionales han evolucionado en el uso de convertidores de potencia utilizando diferentes esquemas de control lineal y no lineal [6].

Sin embargo, el sistema con Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP) no es fácil de controlar, ya que es un sistema multi-variable no lineal y su rendimiento puede verse muy afectado por las variaciones de los parámetros en el tiempo de ejecución. Por lo tanto, es deseable contar con un controlador de alto rendimiento que tiene un algoritmo simple, respuesta rápida, alta precisión y robustez contra los parámetros del generador y las variaciones de par de carga [7].

Además, hoy en día, la implementación de los GSIP se ha desarrollado de manera exponencial ya que proporciona un alto rendimiento en comparación de los Generadores de Inducción Doblemente Alimentados (DFIG), por sus siglas en inglés, que es una de las competencias directas para la aplicación de Sistemas de Conversión de Energía Eólica (WECS), por sus siglas en inglés; y que son los que dominan el mercado [1]. Asimismo, los GSIP, muestran una mayor confiabilidad debido a la carencia de elementos mecánicos y, por otro lado, el comportamiento de los imanes permanentes está avanzando gracias al desarrollo e investigación de materiales superconductores que se verá reflejado en la disminución del precio de los mismos materiales magnéticos y de los convertidores de potencia [1-2].

1.2 Motivación

En la actualidad, el problema del cambio climático y la densidad de población que acecha a todo el mundo ha incrementado en los últimos años de forma exponencial; es por ello por lo que las soluciones y avances tecnológicos deben estar a la altura de las circunstancias. Para combatir el cambio climático, existen muchas formas de generar energía eléctrica a través de fuentes renovables o alternativas como lo es el sol, el viento, la biomasa, la nuclear, la hidroeléctrica.

Actualmente, y gracias al avance de la tecnología en la electrónica de potencia, se puede explotar más la energía eólica y hacer los aerogeneradores más eficientes. Aunado a lo anterior, se pueden realizar varios tipos de control para aprovechar al máximo tanto la energía de viento como la energía de los generadores y de ese modo, aumentar la eficiencia ante perturbaciones y disturbios que puedan ocurrir en la red y estabilizarlos de manera que, la calidad de la energía, no se vean afectados [2][6].

La confiabilidad de la turbina eólica de velocidad variable se puede mejorar significativamente utilizando un GSIP basado en un accionamiento directo. Los GSIP tiene las siguientes características principales: (a) rango de velocidad de funcionamiento completo; (b) no cuenta con escobillas; (c) convertidor electrónico de potencia a gran escala; (d) cuenta con un completo control de activos y potencia reactiva [8]. Por lo tanto, se obtienen mejoras respecto a otros esquemas de aerogeneradores con otro tipo de máquina eléctrica.

1.3 Estado del arte

En los últimos años, los SGE se han convertido en una fuente importante de energía eléctrica en el mundo debido al incremento del precio de los combustibles fósiles. Se ha explotado con ayuda de las nuevas tecnologías, que hacen la extracción del viento más óptima. Con la ayuda de la electrónica de potencia, que juega un papel primordial, se hacen estudios para examinar y

adaptar estrategias de control que entreguen mejor rendimiento y, por lo tanto, mejores resultados.

En la actualidad, para la generación de energía eléctrica mediante turbinas eólicas la topología de los DFIG es muy utilizada, ya que, por su configuración, el convertidor admite operar a una fracción de la potencia nominal de la turbina y consiguientemente el costo y las pérdidas son menores si se compara con topologías que utilizan un convertidor de potencia nominal. También se ha trabajado en la generación de energía eólica con la ayuda de una turbina eólica conectada a través de máquinas eléctricas como el Generador de Inducción de jaula de Ardilla (SCIG), por sus siglas en inglés.

Los GSIP, se emplean principalmente en los SGE de baja potencia en el orden de kW, ya que está limitada a las propiedades de los materiales magnéticos, sin embargo, en la actualidad se empiezan a construir de potencias que alcanzan el orden de MW, esto se logra empleando materiales con una alta densidad de flujo magnético [1]. Hoy en día, existen topologías que ofrecen una mejor confiabilidad, menor mantenimiento y un rendimiento más eficiente para la generación de energía eólica. Una de ellas es la Máquina Síncrona de Imanes Permanentes (MSIP), que ha ido creciendo de manera considerable, ya que, los precios de los imanes están cayendo, lo que hace que estos generadores sean más populares con la posibilidad de accionar el generador en una amplia gama de velocidades y manteniendo una buena eficiencia [2] [7] [9] [10].

Un problema que se presenta en los SGE es el mantener la generación constante ante cambios que se producen cuando el sistema se expone a perturbaciones, por ejemplo, en el comportamiento del viento. Se han realizado numerosos estudios relacionados con las diversas estrategias de control, precisamente para mejorar el rendimiento del sistema cuando hay alta penetración de este tipo de energía a una red o micro-red [11].

Como se menciona en [8], las estrategias de control más utilizadas son las PID, que permiten maximizar la eficiencia basándose en la electrónica de potencia. Existen técnicas de control para el ángulo de disparo en el rectificador, que tiene

como entrada un PI, el cual es generado con el error con la potencia de referencia y este, se encuentra asociado a los cambios de velocidad de la turbina.

Otra estrategia, es el Control Orientado a Campo (COC), basado en el Control de Par Óptimo (CPO) y utilizando el método de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia (SPMP), el sistema puede operar a una velocidad de viento variable de una manera óptima como se menciona en [11]. Además, la simulación para el uso de control de orden fraccional es una nueva contribución en los estudios para controlar los sistemas de conversión de energía eólica conectados a la red y que como resultado se muestra una mejor calidad en la potencia y por ende los armónicos en la corriente de salida y la distorsión armónica total (TDH), por sus siglas en inglés, como se muestra y plantea en [12].

Con el desarrollo de la nueva forma de control digital, se pueden realizar algoritmos de control avanzados y de alto rendimiento. Con lo anterior, existen varias tendencias para poder actuar en próximas investigaciones. El desarrollo de esquemas de control más avanzado como el control predictivo del modelo de control infinito, el control H_∞ y el control de modo deslizante, como se menciona en [11][13].

1.4 Planteamiento del problema

Para realizar el estudio de un sistema de generación empleado el GSIP, se debe conocer el comportamiento de las variables de interés del GSIP con el propósito de satisfacer los requerimientos del sistema y se requiere definir las ventajas y restricciones de operación. Hay que considerar que se pueden presentar disturbios durante la operación; por ello, este trabajo estudia el comportamiento del GSIP ante la variación del viento.

1.5 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de un sistema eólico con el empleo de un GSIP, enfocándose en el modelado de la máquina eléctrica y describiendo las variables de interés que interactúan, además, hacer un análisis de la respuesta que tiene el sistema ante variaciones de viento. También, se describen las estrategias de control y el convertidor Back to Back (BTB) que se usan típicamente en los Sistemas de Generación Eólica (SEG) empleando GSIP.

1.6 Organización de la tesis

Este trabajo se encuentra estructurado en 4 capítulos, los temas se exponen de la siguiente manera:

- **Capítulo 1:** Se introduce a los sistemas de generación eólica, puntualizando el uso del GSIP
- **Capítulo 2:** Se muestra el modelado de la turbina eólica, del sistema mecánico y del GSIP
- **Capítulo 3:** Se presentan las topologías típicas de los convertidores de potencia y se realiza el modelado y esquema que se utiliza en el presente trabajo. Además, se describen algunas estrategias de control.
- **Capítulo 4:** Se describe el sistema que se emplea en el trabajo y se muestran los resultados obtenidos

CAPÍTULO II

Modelado del aerogenerador

2.1 Introducción

Actualmente, los GSIP han comenzado a tener un mayor impacto en los sistemas de generación de energía eléctrica; a medida que avanza la tecnología, se logran construir materiales magnéticos de alta densidad y su costo es más accesible en los mercados, lo que conlleva a aumentar la eficiencia y bajar el costo en sistemas de generación eólica con GSIP. Aunado a lo anterior y a las características que presenta dicho generador, posee una gran aceptación en la industria. La finalidad de desarrollar un modelo de un aerogenerador con GSIP es representar el comportamiento y el impacto que éste tiene en la red.

2.2 Modelado de la turbina

El rotor eólico es el elemento del aerogenerador que extrae la energía cinética del viento y la convierte en energía mecánica, es un sistema aerodinámico bastante complejo, por ello, cuando el principal interés del análisis de la dinámica del aerogenerador es su comportamiento eléctrico se utiliza un modelo simplificado del rotor.

Una de las características importantes son las variaciones de potencia que intervienen en el comportamiento, ocasionadas por el movimiento del aire. La energía almacenada en el viento está en una forma de energía de baja calidad. Muchos factores influyen en el comportamiento de la velocidad del viento [2]. El perfil de la velocidad del viento se representa con la Figura 2.1 (a). El modelo de viento está dado por una representación de la serie de Fourier del viento que tiene como una señal que consiste en una suma de varios armónicos [14]. La expresión se define como:

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (2.1)$$

Donde: A es el valor promedio de la velocidad del viento, a_k es la amplitud armónica del orden de k y ω_k es el pulso armónico del orden de k .

Para uno de los casos de estudio del trabajo, se toma una muestra de 5 segundos del perfil del viento y la curva se muestra en la Figura 2.1(b).

Así mismo, otro parámetro fundamental es el comportamiento de la velocidad de la punta, la cual se define como [15]:

$$\lambda = R \frac{\omega_l}{v} \quad (2.2)$$

Donde: R es el largo de las aspas en metros; ω_l es la velocidad angular del rotor y v es la velocidad del viento en m/s.

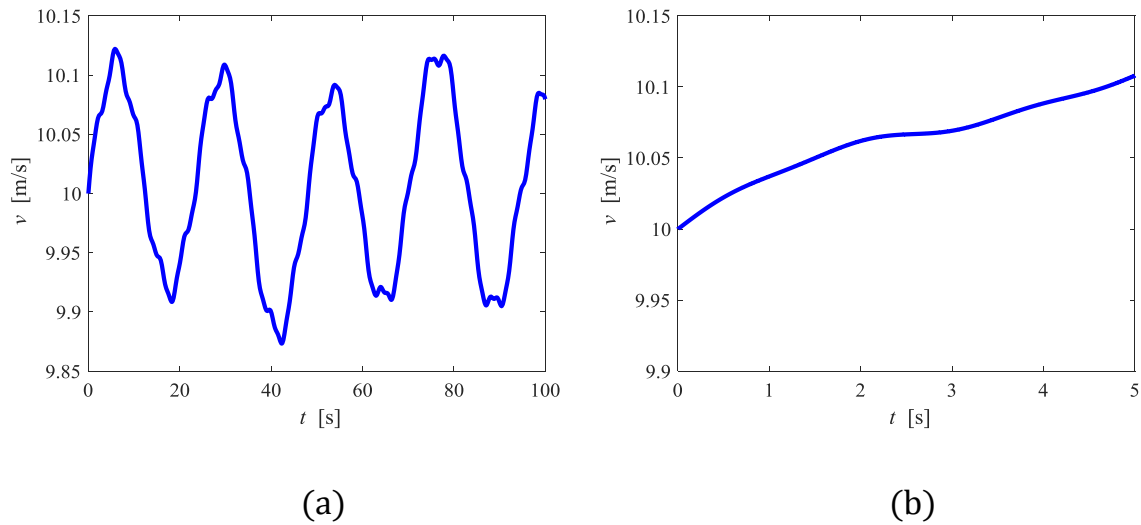


Figura 2.1 Muestra el comportamiento del viento

El modelo del rotor se define por la relación algebraica que existe entre la velocidad del viento y la potencia mecánica extraída del viento por el rotor; o bien, por la relación que existe entre la velocidad del viento y el par mecánico desarrollado por el rotor. Dichas ecuaciones se muestran a continuación [16] [17].

$$P_m = 0.5 C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (2.3)$$

$$T_m = \frac{(0.5 C_p(\lambda, \theta) \rho \pi R^3 v^2)}{\lambda} \quad (2.4)$$

Donde: ρ es la densidad del aire en kg/m^3 ; y C_p es el coeficiente de potencia de la turbina, que se denomina como la relación adimensional entre la potencia mecánica entregada por la turbina y la potencia del viento como se muestra a continuación:

$$C_p = \frac{P_T}{P_{viento}} \quad (2.5)$$

Donde: P_T es la potencia mecánica entregada por la turbina; P_{viento} es la potencia del viento, pero el valor de C_p está en función de dos parámetros. Uno de ellos es el ángulo de inclinación de las aspas del rotor, representado por β , el otro es la relación entre el radio del rotor, la velocidad angular del rotor y la velocidad del viento, también conocida como velocidad específica, representada por λ .

Las curvas de potencia se determinan a través de formulaciones analíticas y análisis computacional, realizados para diferentes tipos de turbinas, que dan un comportamiento aproximado de la turbina. Ya que las curvas son muy similares es posible llegar a una sola expresión de la siguiente forma:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\beta'} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-C_5 \frac{1}{\beta'}} + C_6 \lambda \quad (2.6)$$

Se tiene que

$$\frac{1}{\beta'} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (2.7)$$

Donde: los coeficientes C_1 - C_6 dependen del tipo de rotor.

Para cada valor de λ existe un máximo C_p esto es para mantener un nivel de generación máxima. A esa generación máxima se le denomina punto de máxima potencia [1] [16] [17]. A continuación, en la Figura 2.2 se muestran las curvas de C_p para diferentes valores de λ . Los parámetros se encuentran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores de los coeficientes del rotor			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Coeficiente 1	C_1	0.5176	-
Coeficiente 2	C_2	116	-
Coeficiente 3	C_3	0.4	-
Coeficiente 4	C_4	5	-
Coeficiente 5	C_5	21	-
Coeficiente 6	C_6	0.0068	-

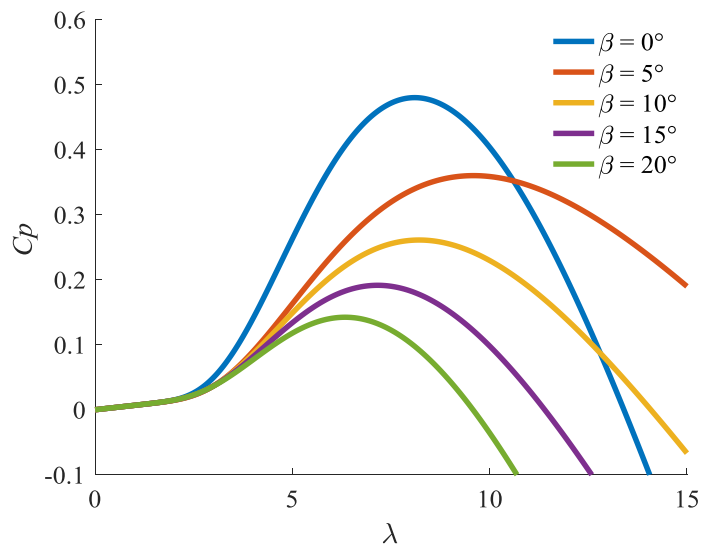


Figura 2.2 Curvas de Coeficiente de potencia en función de λ y β

En la Figura 2.2, se muestra que conforme el ángulo β crece, hay un decremento en el C_p , que posteriormente se refleja en la potencia mecánica y el par mecánico como se observa en (2.6) y (2.7).

2.3 Modelo del sistema mecánico del SGE

Es el elemento que permite transmitir la potencia mecánica del rotor eólico al generador eléctrico mediante el rotor eólico, el eje de transmisión y el generador eléctrico. Esta conexión es de vital importancia para que el análisis y la obtención del modelo dinámico permita una respuesta completa y óptima del sistema de generación eólica. Por esa razón, se consideran el rotor eólico, el eje de transmisión y el generador eléctrico.

El modelo mecánico que es utilizado típicamente para el análisis de estabilidad de un GSIP es representado mediante un modelo de dos masas. Dado que, el número de pares de polos está directamente relacionado con la rigidez y sabiendo que, entre mayor sea el número de polos, menor es la rigidez del eje de transmisión; se considera que, el funcionamiento del generador se ve perjudicado. Por lo anterior, para representar la dinámica del eje se utiliza el modelo simplificado de dos masas como se muestra en la Figura 2.3[2] [14].

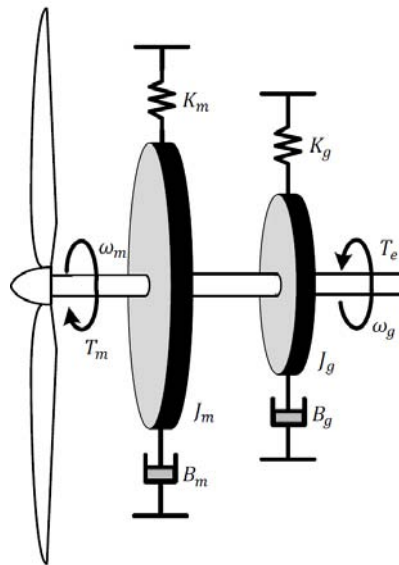


Figura 2.3 Diagrama de dos masas

Las ecuaciones que representan el sistema de dos masas (2.8) y (2.9) se obtienen a partir de la Figura 2.3.

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - K_m \omega_m - B_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.8)$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_m - T_e - K_g \omega_g - B_g \frac{d\omega_g}{dt} \quad (2.9)$$

Donde: del lado de la turbina, J_m es la inercia de la turbina, B_m es el coeficiente de amortiguamiento, K_m es el coeficiente de pérdidas por fricción. Así mismo, del lado del generador T_e es el par eléctrico, ω_m es la velocidad rotacional, J_g es la inercia, B_g y K_g son el coeficiente de amortiguamiento y el coeficiente de pérdidas por fricción, respectivamente.

Sin embargo, en otros estudios sobre estabilidad de la tensión de corta duración, las oscilaciones del eje de transmisión pueden ser despreciables ya que éstas serán absorbidas por el sistema de control del convertidor de frecuencia, por eso, la dinámica del eje se ve afectada con menor magnitud debido al desacoplamiento del convertidor. Aunado a lo anterior, y conociendo que para los sistemas de baja potencia no hay caja multiplicadora, las velocidades de la turbina y generador eléctrico son iguales; por lo tanto, también es posible realizar un análisis con el modelo simplificado de una masa, como se muestra en la Figura 2.4. Por consiguiente, el modelo se reduce a la siguiente expresión:

$$J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - K \omega_m - B \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.10)$$

Donde: $J_{eq} = J_m + J_g$, $K = K_m + K_g$, $B = B_m + B_g$.

Modelo del aerogenerador

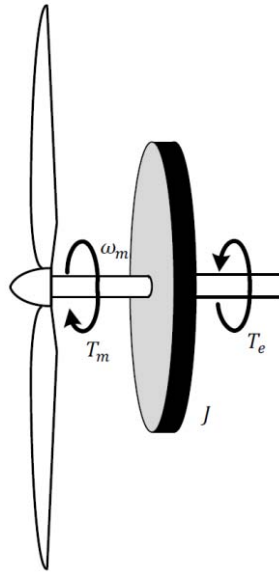


Figura. 2.4 Diagrama de una masa

Si se considera que en los sistemas actuales de generación eólica los coeficientes de amortiguamiento y los de fricción son mucho menores a la inercia y a la diferencia del par equivalente [1-3] [14], la expresión (2.10) se reduce a:

$$T_m - T_e = J_{eq} \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.11)$$

El modelo de una masa, que es representada por (2.11), es con la que se abordan los casos de estudio del presente trabajo.

2.4 Modelado del sistema eléctrico del GSIP

El generador eléctrico es el elemento del aerogenerador que transforma la potencia mecánica del rotor en potencia eléctrica. En la topología de un GSIP, permite operar en una amplia gama de velocidades y produce una potencia eléctrica altamente eficiente o confiable a un nivel constante.

En la configuración típica en los GSIP, el rotor está conformado por imanes de alta densidad de energía; donde el campo se produce por medio de flujos constantes. En los GSIP, una de las clasificaciones se muestra en la Figura 2.5, que es de acuerdo con la ubicación de sus imanes: superficiales (a) e interiores (b). La diferencia radica en los valores que toma la inductancia del sistema ya que el amplio número de polos en los imanes superficiales permite que gire a velocidades bajas. La mayoría de estas máquinas, son de polos salientes debido a su alta manejabilidad para adaptarse como generadores [28].

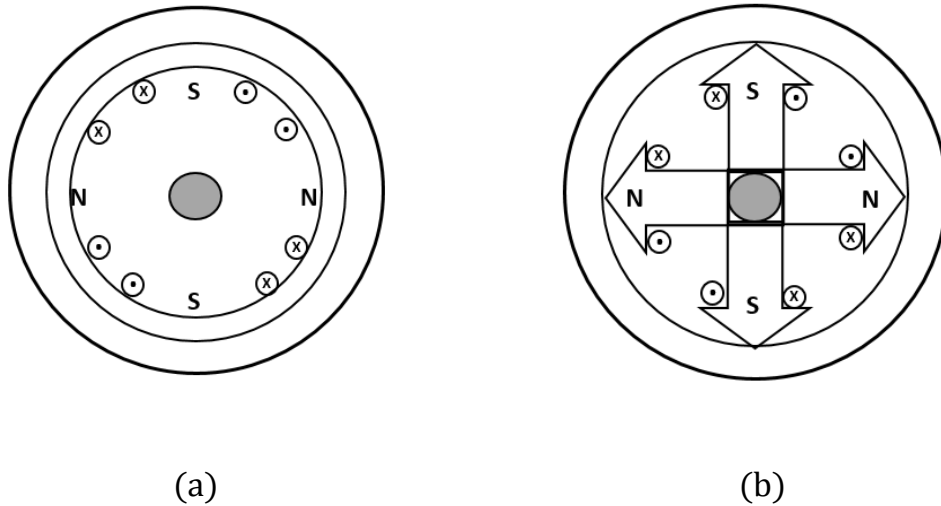


Figura 2.5 Configuraciones típicas de GSIP

Para iniciar un desarrollo del modelo del GSIP, se toma como referencia el voltaje trifásico generado por el campo magnético giratorio que depende del flujo magnético, de la constante de construcción y de la velocidad mecánica angular, tal y como se muestra en (2.12).

Modelo del aerogenerador

$$\begin{aligned}E_A &= N_c \varphi \omega_m \sin(\omega_e t) \\E_B &= N_c \varphi \omega_m \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \\E_C &= N_c \varphi \omega_m \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\tag{2.12}$$

Donde: N_c y φ dependen del generador; por lo tanto, se establece la constante de la fuerza electromotriz K_{fem} , que relaciona ambos parámetros

$$K_{fem} = N_c \varphi \tag{2.13}$$

Sustituyendo (2.13) en (2.12) se tiene:

$$\begin{aligned}E_A &= K_{fem} \omega_m \sin(\omega_e t) \\E_B &= K_{fem} \omega_m \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \\E_C &= K_{fem} \omega_m \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\tag{2.14}$$

Los voltajes anteriores, son los que se producen en cada fase del generador, pero los voltajes en terminales son V_a, V_b, V_c . Los cuáles se producen por la diferencia que se presenta a causa de las auto-inductancias (L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}) y las resistencias (R_s) que intervienen en cada fase. En la Figura 2.6 se muestra un circuito equivalente en coordenadas abc [1-3].

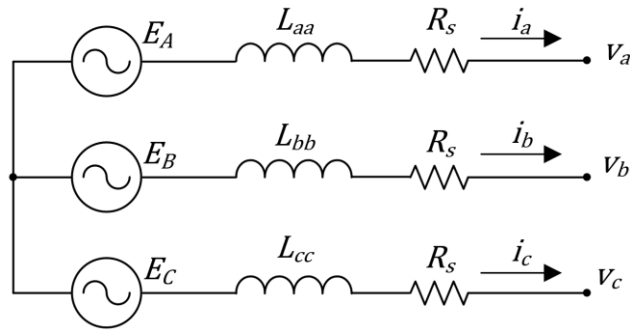


Figura 2.6 Muestra el circuito equivalente del generador síncrono

De acuerdo con [27], a través de la manipulación matemática, las inductancias propias y mutuas; al igual que las resistencias de cada fase, se puede obtener un modelo simplificado. Para el análisis del comportamiento del GSIP, se usa el sistema de referencia dq . Para poder desarrollar las ecuaciones del GSIP en el sistema antes mencionado es necesario hacer uso de la Transformada de Park (Anexo A), que ayuda a hacer un cambio de coordenadas de un sistema estacionario (abc) a un sistema de coordenadas giratorias (dq) como se muestra en la Figura 2.7.

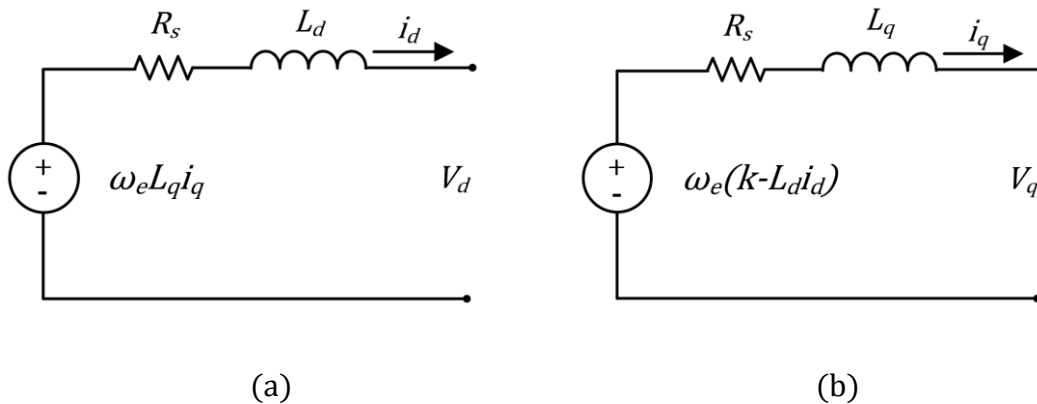


Figura 2.7. Circuitos equivalentes: eje directo (a) y eje de cuadratura (b)

El objetivo de esta transformada es convertir variables senoidalmente en el tiempo (abc) a valores constantes (dq) en régimen permanente. De este modo, se puede realizar un control más óptimo ya que, para dichos fines, resulta más sencillo manipular variables en coordenadas dq [4].

Las ecuaciones del GSIP en el marco de referencia del rotor dq se definen como:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} i_q \omega_e - \frac{V_d}{L_d} \quad (2.15)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} i_d \omega_e + \frac{k}{L_q} \omega_e - \frac{V_q}{L_q} \quad (2.16)$$

Donde: V_d y V_q son los voltajes en dq ; i_d e i_q son las corrientes; R_s es la resistencia en el estator; L_d y L_q son las inductancias; ω_e es la velocidad rotacional del generador; k es el flujo del imán permanente y; p es el número de pares de polos.

Mientras tanto, la ecuación del torque eléctrico está definido por la siguiente ecuación:

$$T_e = 1.5 p [k i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (2.17)$$

Se considera que la diferencia entre L_d y L_q es muy pequeña en este tipo de generadores; por lo tanto, la ecuación del par electromecánico puede determinarse como [15] [18]:

$$T_e = 1.5 p k i_q \quad (2.18)$$

A continuación, en la Figura 2.8 y, con ayuda de (2.11) y (2.18), se muestra el comportamiento del par eléctrico y del par mecánico de la máquina síncrona de imanes permanentes actuando como generador cuando se presenta una entrada variable como la que se muestra en la Figura 2.1(b).

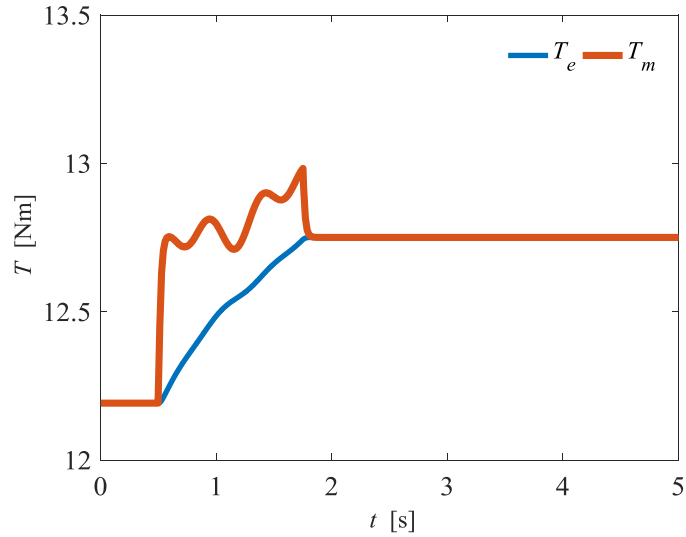


Figura 2.8. Comportamiento del par mecánico y par eléctrico

En la Figura 2.8, se tiene la condición donde el par mecánico T_m es entrada en el GSIP y es variante. En estas condiciones de operación, los valores de T_m tienden a estabilizarse en el valor de T_e , por lo tanto, son iguales.

Tabla 2.2: Parámetros del GSIP			
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Longitud de la pala	R	2.5	m
Resistencia de armadura	R_s	3.3	Omh
Inductancia del estator en eje q	L_q	41.56	mH
Inductancia del estator en eje d	L_d	41.56	mH
Flujo magnético del imán permanente	λ	0.4832	Wb
Pares de polos	p	3	
Coefficiente de inercia	J	0.5042	Kg m ²

Los parámetros que se muestran en la Tabla 2.2 se obtienen a partir de [6] para mostrar el comportamiento del GSIP de manera aislada.

CAPÍTULO III

Back to Back

3.1 Introducción

La electrónica de potencia, al ser una tecnología de conversión eficiente de energía eléctrica, juega un papel importante en los sistemas de energía eólica. Es un elemento esencial para integrar las unidades de energía eólica de velocidad variable para lograr una alta eficiencia y un alto rendimiento en los sistemas de potencia con el fin de satisfacer los actuales requisitos de conexión de parques eólicos a la red. Existen varias topologías de convertidores, los más usados con GSIP son los de alterna-alterna con una etapa intermedia de corriente continua que, por lo general, la diferencia radica en el convertidor que se conecta al estator [19].

3.2 Topologías de convertidores electrónicos del SGE

Hoy en día, la variedad que presentan las topologías para la interconexión de un aerogenerador a la red es muy variada y sofisticada gracias al avance tecnológico en el diseño de los componentes de los convertidores, los cuales, ayudan a mejorar el rendimiento y, por ende, el producto final, en este caso, la potencia entregada por el SGE es más eficiente.

A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta una comparación donde se muestran las topologías típicas con sus ventajas y desventajas para cada arreglo [20-21].

Topología	Ventajas	Desventajas
Convertidor con inversor de puente rectificador del lado generador	<ul style="list-style-type: none"> • Control continuo del ángulo de disparo del inversor • Costo menor y mayor capacidad de potencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento en la distorsión armónica • No permite un control del torque
Convertidor con puente rectificador de lado del generador y sistema CD intermedio	<ul style="list-style-type: none"> • Control de la tensión de CD • Control del torque • Reduce distorsión armónica 	<ul style="list-style-type: none"> • Rectificador no controlado
Convertidor Back to Back	<ul style="list-style-type: none"> • Regula el torque • Rectificador controlado • Control del flujo de potencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo

3.3 Convertidor Back-to-Back

El convertidor de potencia (BTB), basado en Convertidores de Fuente de Tensión (VSC), por sus siglas en inglés, es un método típicamente usado para procesar eficazmente el flujo de potencia en sistemas de Corriente Alterna (CA) interconectados, ya que permite controlar de manera independiente tanto el flujo bidireccional de potencia activa como de potencia reactiva, desde baja potencia hasta alta potencia.

Esta topología, tiene muchas prestaciones para la aplicación en aerogeneradores, debido a que los VSC pueden actuar como inversores o rectificadores, según sea la dirección del flujo de potencia. La bidireccionalidad que maneja y por ende, la explicación de la operación del BTB se manifiesta al considerar los VSC como convertidores desacoplados, en los cuales la amplitud, fase y frecuencia se pueden manejar de manera independiente haciendo que el rendimiento del sistema puede aumentar de manera considerable.

Estos convertidores son considerablemente muy utilizados en los GSIP, tienen un esquema de dos convertidores que comparten el bus de corriente directa (CD) a través de un capacitor, como se muestra en la Figura 3.1, el cual permite que ambos VSC se puedan controlar de manera independiente en cierto rango de potencia.

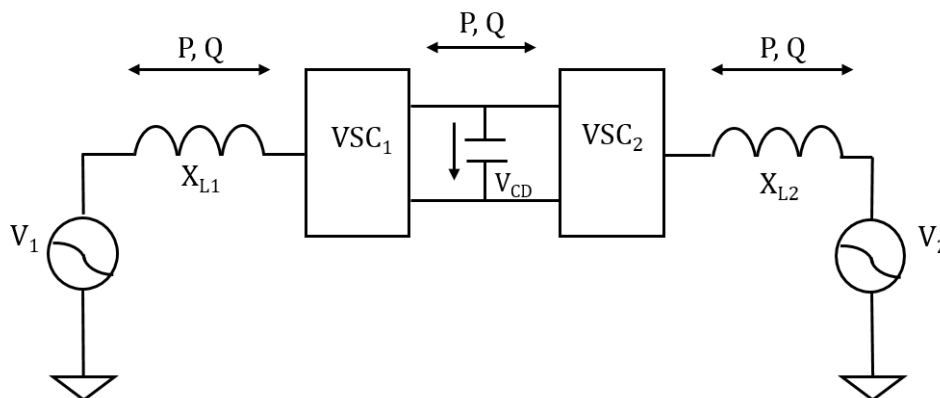


Figura 3.1 Esquema del convertidor Back to Back

El convertidor del lado del generador regula el torque electromagnético y por consecuencia, la distorsión de la corriente decrece. Por otro lado, el convertidor del lado derecho incluye la tensión continua, los controladores de potencia activa y reactiva.

Para su buen funcionamiento se emplean técnicas de Modulación Senoidal por Ancho de Pulso (SPWM), por sus siglas en inglés. Este tipo de rectificadores no se recomiendan para sistemas de baja potencia, ya que conlleva un alto costo de los rectificadores y no se aprovecharía todo su potencial. [22][23].

3.4 Modelo del Back to Back

Uno de los objetivos del convertidor BTB es regular el voltaje y la frecuencia. El controlador de voltaje de salida se utiliza para controlar la tensión de salida durante transitorios de carga o variación de viento. El controlador de voltaje de DC-link se usa para estabilizar la tensión del enlace de CD, además, el controlador no lineal de tensión continua mantiene la tensión en el capacitor con el valor de referencia. El esquema de control para GSIP basado en WECS está diseñado para satisfacer los requisitos de la red.

Las ecuaciones trifásicas de la fuente se representan como:

$$\frac{dI_{abc}}{dt} = \frac{1}{L_s + L_T} [-(R_s + R_T)I_{abc} + V_{Sabc} - V_T] \quad (3.1)$$

Donde: R_T y L_T son las inductancias equivalentes, V_{Sabc} es el voltaje en la red, V_T es el voltaje en terminales, I_{abc} son las corrientes en el marco de referencia abc . La dinámica del voltaje de corriente directa (V_{CD}) en el capacitor se puede definir como:

$$\frac{dV_{CD}}{dt} = \frac{1}{C} \left[-\frac{V_{CD}}{R_{CD}} + I_{abc}^T \frac{V_T}{R_{CD}} \right] \quad (3.2)$$

Donde: V_{DC} es el voltaje en el capacitor, C es la capacitancia del convertidor, R_{CD} es la resistencia de corriente directa.

A continuación, se muestra en la Figura 3.2 el diagrama de un BTB conectado al sistema de CA, con sus impedancias de acoplamiento.

Back to Back

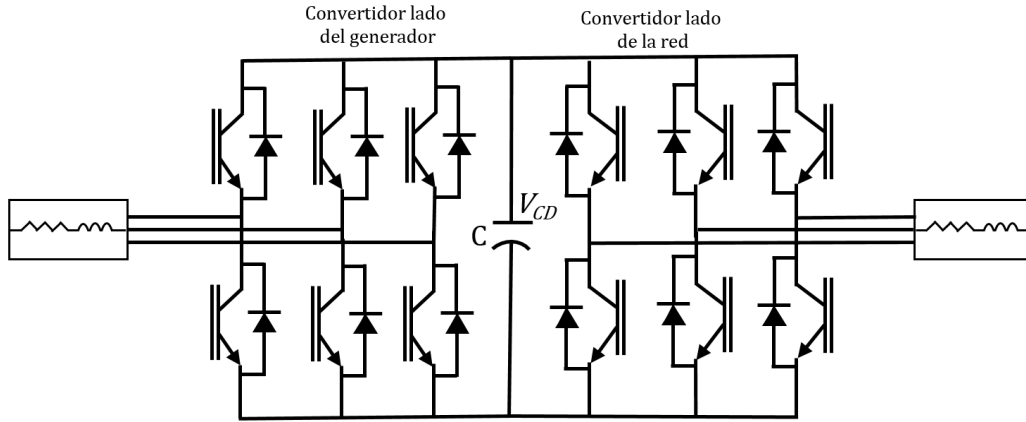


Figura 3.2 Diagrama equivalente del BTB

En [8],[18] se hace mención que para la implementación del lazo de retroalimentación del control, es necesario que las señales sean constantes. Esto se logra mediante la transformación Park y Clarke. Donde los objetivos principales son la reducción de tres variables a dos, transformándolas en señales invariante en el tiempo o en señales de CD. Finalmente, un modelo dq en las terminales del convertidor se puede describir como:

$$S = \frac{3}{2} [(V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) - j(V_{sq} i_{sq} - V_{sd} i_{sd})] \quad (3.3)$$

Se obtienen las ecuaciones de las potencias activa y reactiva mediante (3.3), las cuales se representan por:

$$P = \frac{3}{2} V_d i_d \quad (3.4)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V_q i_q \quad (3.5)$$

Donde: V_d y V_q son las componentes del sistema en dq del sistema de CA y no pueden ser contraladas por el sistema VSC, ya que son variables externas de la red.

Los voltajes de salida deben controlarse en términos de amplitud y frecuencia a través de un PLL (Phase-Locked Loop), por sus siglas en inglés. El PLL también se utiliza para sincronizar el convertidor con la frecuencia de la línea, así como para obtener el ángulo β , usado para calcular la transformación dq . En estado estacionario β está en fase con la fundamental de la fase A . Se utiliza únicamente un PLL, ya que ambos sistemas de CA operan a la frecuencia de línea [18] [24].

3.5 Esquemas típicos de control

Actualmente, existe diversas estrategias de control para GSIP, las cuales, dependen de los elementos que se desee controlar y obtener algún comportamiento bajo ciertas condiciones. Dichas estrategias, se aplican en el convertidor electrónico. Se puede controlar la potencia activa y reactiva, el ángulo de inclinación de las palas, el par del generador, en fin, hay múltiples parámetros donde se puede aplicar el control.

Existen unas más complejas que otras donde se requieren otro tipo de conocimientos, por ejemplo, las formas de control vectorial más usadas son: corrientes reactivas igual a cero, máximo torque por unidad de corriente y flujo constante donde para aplicar estas técnicas de control es necesario emplear procesadores digitales de señales para realizar los cálculos requeridos.

Para la aplicación del flujo de potencia en convertidores BTB, los objetivos de control se pueden clasificar en tres de la siguiente manera: a) regulación de potencia activa, b) regulación de potencia reactiva y c) regulación de la tensión en el bus de CD. Esta última es necesaria para mantener el balance de potencias entre los VSC's.

Back to Back

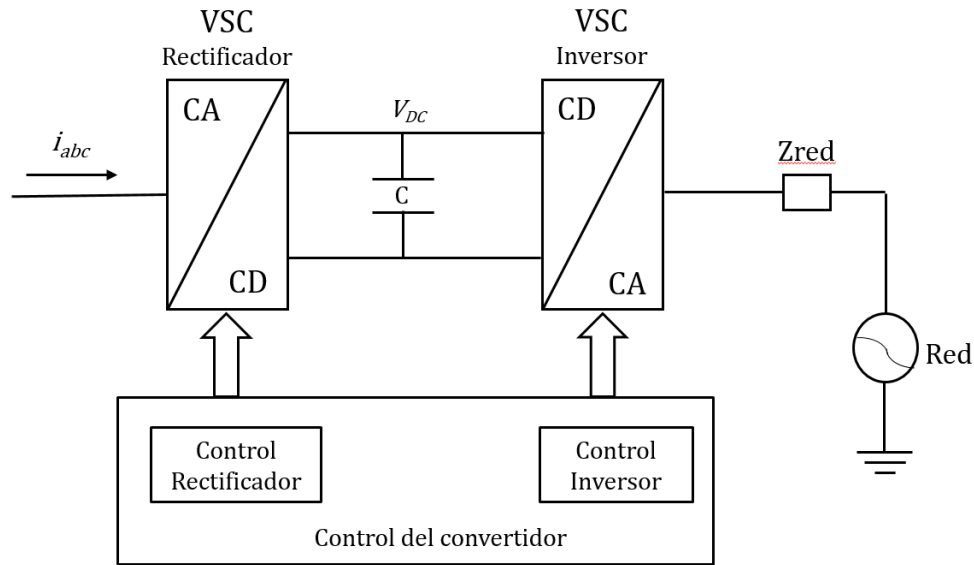


Figura 3.3 Esquema del BTB con etapas de control

Para una unidad de generación distribuida conectada a la red, la interfaz se controla de forma convencional como un VSC controlado por corriente, por lo tanto, los componentes de corriente en cuadratura directa del VSC se usan para proporcionar un control instantáneo del intercambio de potencia activa y reactiva entre el VSC y la red [8] [18]. Sin embargo, la naturaleza no lineal y el amplio rango de requisitos de operación del VSC imponen una considerable dificultad en el diseño de control.

El esquema de control que se muestra en la Figura 3.4, ejemplifica el control del lado del generador donde hay dos controles PI que regulan i_d e i_q . Se observa que el par eléctrico se puede controlar directamente mediante i_q .

Las salidas de los dos controladores de corriente son las referencias de voltaje del estator del eje d y q, que se envían al SPWM. El SPWM genera las señales de conmutación requeridas por el convertidor [8].

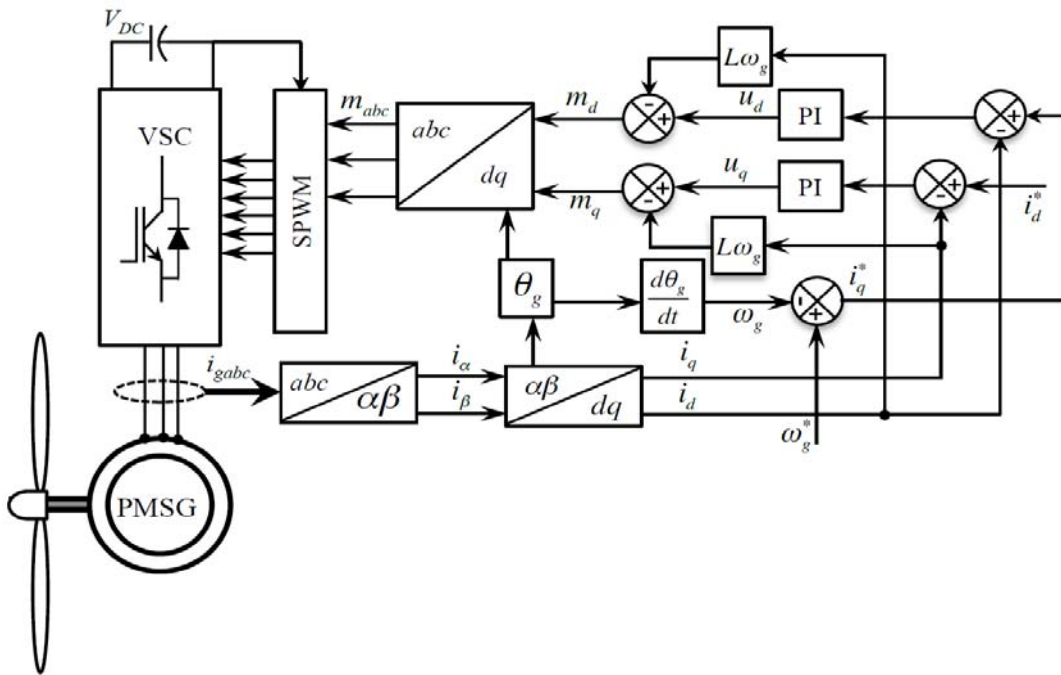


Figura 3.4 Esquema de control lado generador

Los controladores PI se usan para regular las corrientes en los circuitos internos de control, cuando se utiliza un control PI convencional, los parámetros deben ajustarse, y como se trata de una técnica lineal y los parámetros son fijos, el buen rendimiento del sistema solo puede asegurarse alrededor del punto de funcionamiento para el que se ajustan los parámetros. Sin embargo, se necesitan alternativas de ajuste para la complejidad de la red eléctrica que se tiene hoy en día [24][25].

En la Figura 3.5, se muestra el esquema de control lado red, donde la tarea principal es suministrar energía eléctrica confiable a los consumidores regulando las variables de salida del convertidor. Otra función de este esquema es controlar la constancia del V_{DC} mientras se controla la potencia activa y reactiva. Las señales de realimentación y de avance se transforman al marco dq y luego se procesan mediante compensadores para producir las señales de control. Estas señales de control se transforman en el marco abc y se envían al convertidor de lado de red.

Back to Back

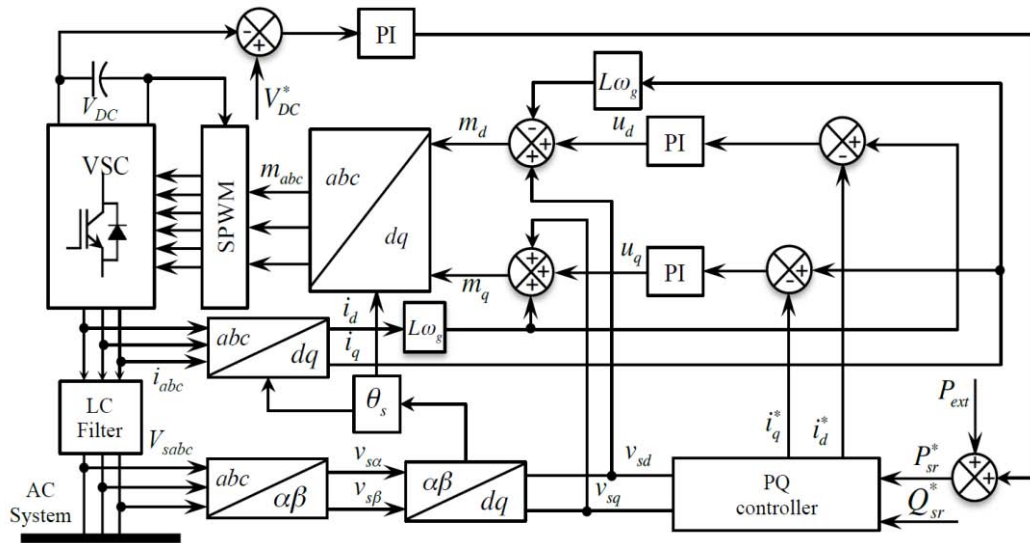


Figura 3.5 Esquema de control lado red

Para la conexión de lo estudiado en este capítulo, se muestra el voltaje de CD en el BTB. Con la ayuda de (3.2), se determina el comportamiento del voltaje en el convertidor. En la Figura 3.6 se observa el voltaje en el capacitor del BTB bajo una condición de viento constante (10 m/s). Los datos que se emplean en el convertidor se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros del Back to Back	
Parámetro	Valor
$k_{p1} = k_{p2}$	100.138
$k_{i1} = k_{i2}$	10.176
k_{pv}	10.138
k_{iv}	1.176
V_{CD_ref}	800

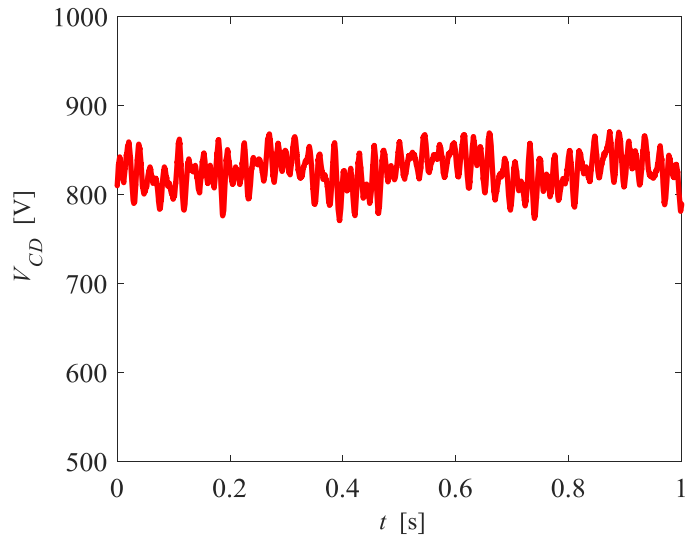


Figura 3.6 Voltaje de CD

En el convertidor electrónico se muestra un voltaje alrededor de los 800 [V] respecto con las condiciones iniciales del sistema y bajo condiciones de viento constante. Cabe resaltar que la señal se muestra con rizados, esto es debido a que la señal aún no es filtrada y teniendo en consideración lo mencionado en la Tabla 3.1, la distorsión presentada es significativamente más pequeña respecto a otro tipo de topologías de los convertidores electrónicos.

Considerando que hasta este punto se han estudiado y trabajado los modelos del GSIP y BTB, se tiene un primer acercamiento con las variables de interés. Por lo tanto, se continua a realizar el estudio del sistema con la interacción de las ecuaciones representativas de cada etapa del aerogenerador.

CAPÍTULO IV

Estudio de un sistema máquina bus infinito

4.1 Introducción

Comúnmente al realizar un estudio en media o alta tensión, se debe considerar una interconexión con un sistema de energía, en algunos casos los generadores síncronos se usan para alimentar cargas individuales que se conectan a un sistema de potencia conocido como "Bus Infinito". El bus infinito es una idealización de un sistema de potencia, el cual es tan grande que en él no varían ni el voltaje ni la frecuencia, siendo ideal la magnitud de las potencias activas o reactivas que se toman o suministran a él, de modo que sobre él no se puede causar ningún efecto.

4.2 Descripción del sistema

En el presente trabajo, se propone un sistema de generación eólica empleando el GSIP que se conecta a una barra bus infinito mediante un BTB considerando Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) ideales, por sus siglas en inglés. La finalidad del control en el BTB es mantener una tensión constante en la etapa de CD del BTB independientemente de la velocidad del viento o de las perturbaciones que puedan ocurrir en el sistema, por ello, se realiza el estudio del sistema bajo diversas condiciones, las cuáles se explican a continuación.

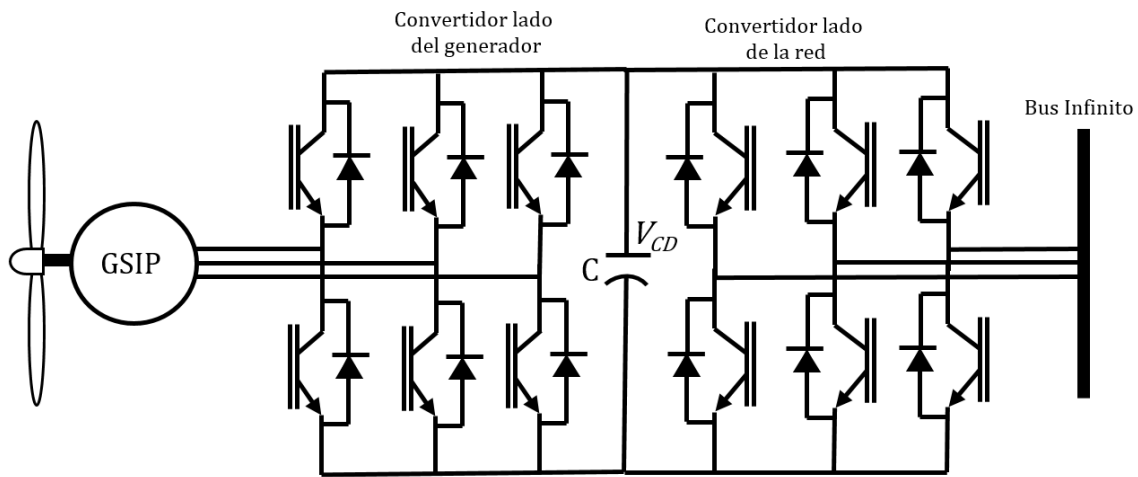


Figura 4.1 Sistema de generación eólica con GSIP

Inicialmente, el sistema se encuentra operando con una velocidad del viento constante de 10 m/s. Con los parámetros mencionados en la Tabla 2.2 y Tabla 3.2 se pone en marcha el sistema de la Figura 4.1 y se somete a los Casos de estudio. Como se planteó a lo largo del trabajo, se busca hacer un estudio cuando existe una variación de viento en la entrada de la turbina y mostrar el impacto que tiene en la red.

4.3 Resultados

A continuación, se muestran los casos de estudio sobre los que se trabajaron y los resultados obtenidos; así como el análisis y la interpretación del comportamiento de los datos resultantes.

Caso I. Variación de la velocidad del viento a la entrada de la turbina en un intervalo de tiempo como rampa.

El sistema opera con una velocidad de viento constante de 10 m/s y se somete a una variación en 0.5 [s] de la velocidad del viento en forma de rampa hasta llegar a 10.2 m/s. El cambio de la velocidad se ve reflejado en la potencia mecánica en la entrada de la turbina como se muestra en la Figura 4.2.

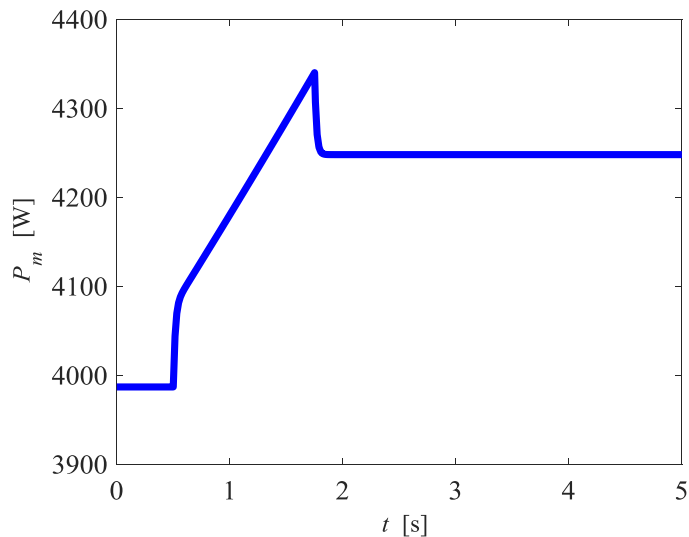


Figura 4.2 Potencia mecánica, caso I

A continuación, en las siguientes figuras, se muestran los parámetros del GSIP ante la perturbación.

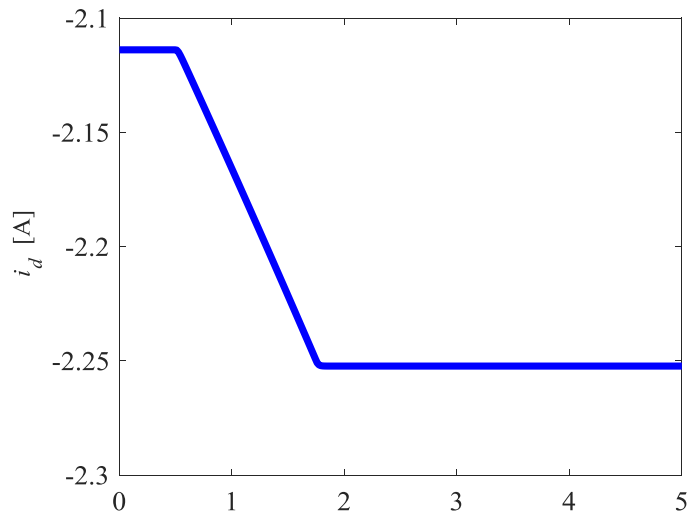


Figura 4.3 Corriente en eje d del GSIP

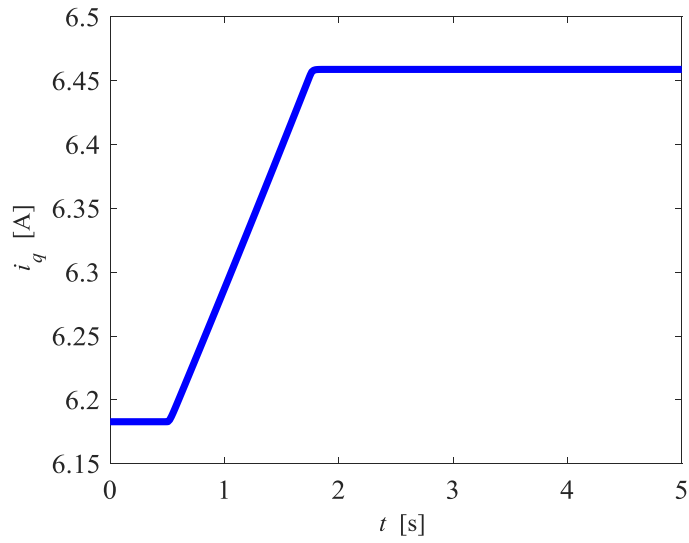


Figura 4.4 Corriente en eje q del GSIP, caso I

Estudio de un sistema máquina bus infinito

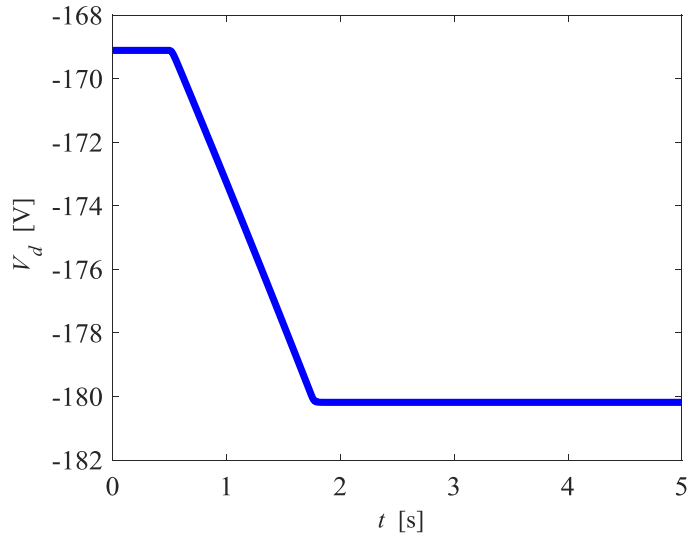


Figura 4.5 Voltaje en eje d del GSIP, caso I

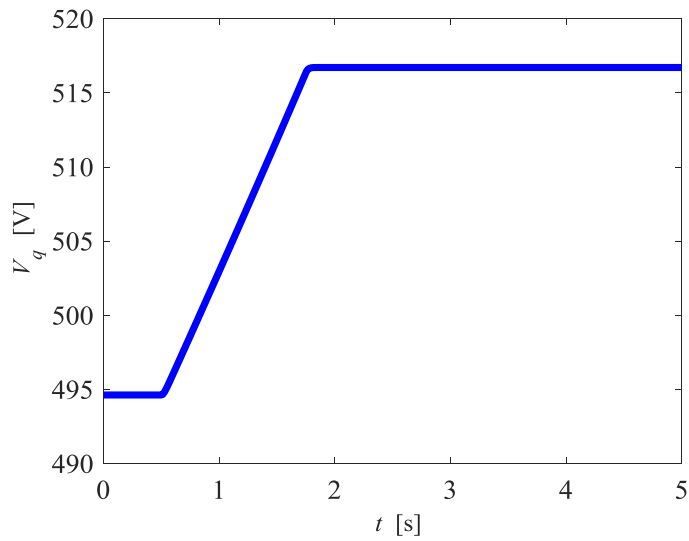


Figura 4.6 Voltaje en eje q del GSIP, caso I

Para hacer mediciones físicas, se requieren marcos de referencia donde las variables puedan ser cuantificables, es por ello, que se hace la transformación de dq a abc . Teniendo como resultados las corrientes y voltajes en el GSIP como se muestra a continuación:

Capítulo 4

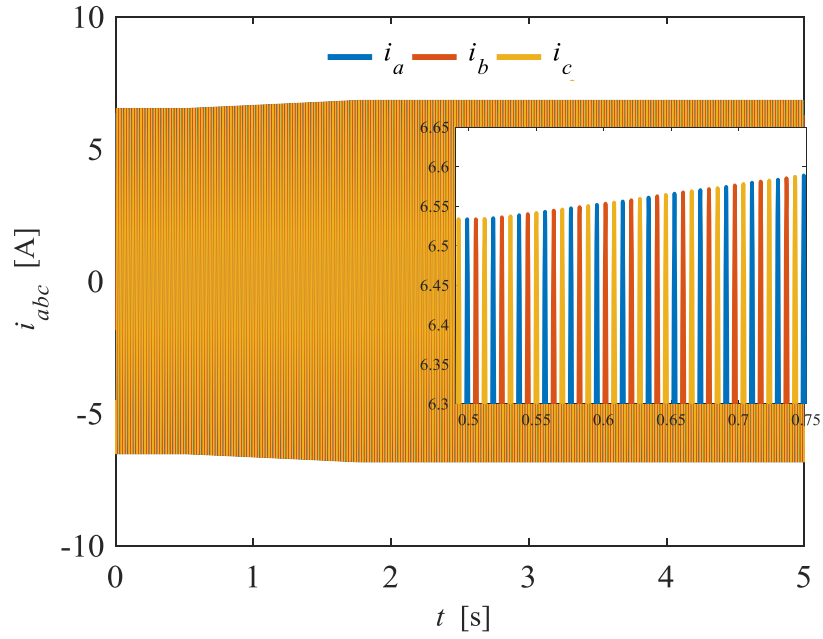


Figura 4.7 Corrientes abc en el GSIP, caso I

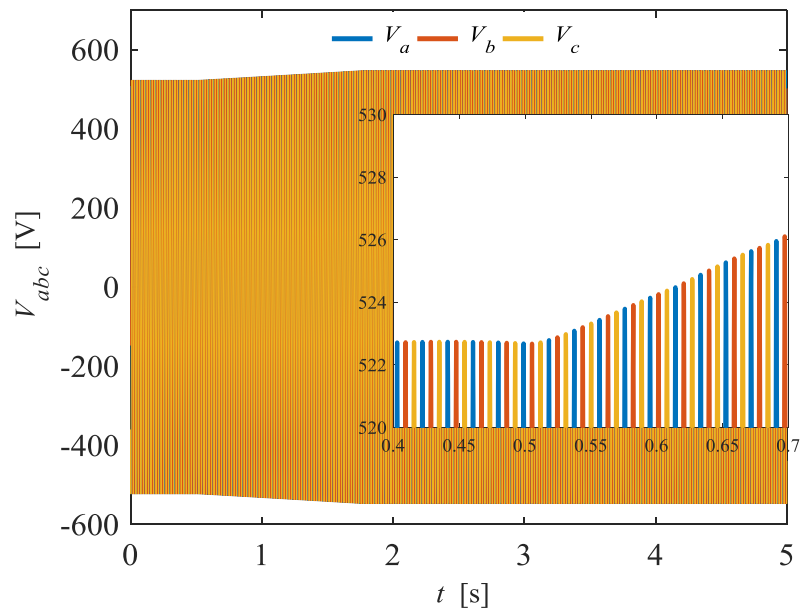


Figura 4.8 Voltajes abc en el GSIP, caso I

En el sistema de estudio, se muestra que la potencia reactiva es nula, las variaciones por conmutaciones son mínimas e imperceptibles. Por otra parte, la potencia activa aumenta en razón al incremento de la velocidad del viento de 3420 [W] a 3745 [W]. Lo anterior se muestra en la Figura 4.9 y 4.10.

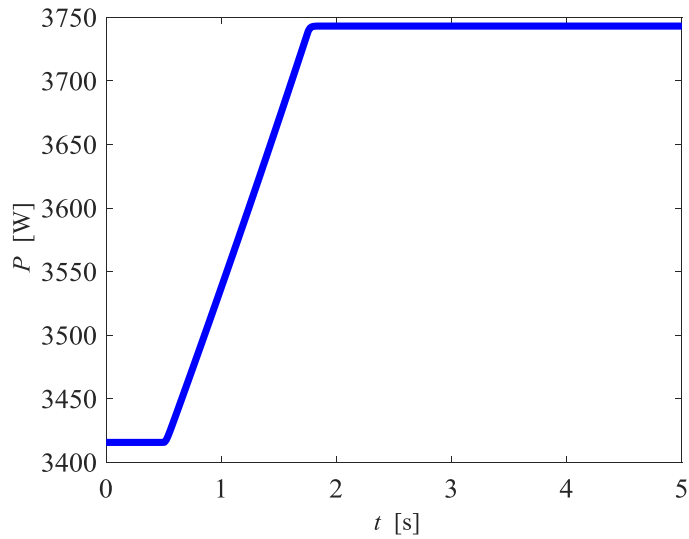


Figura 4.9 Potencia activa, caso I

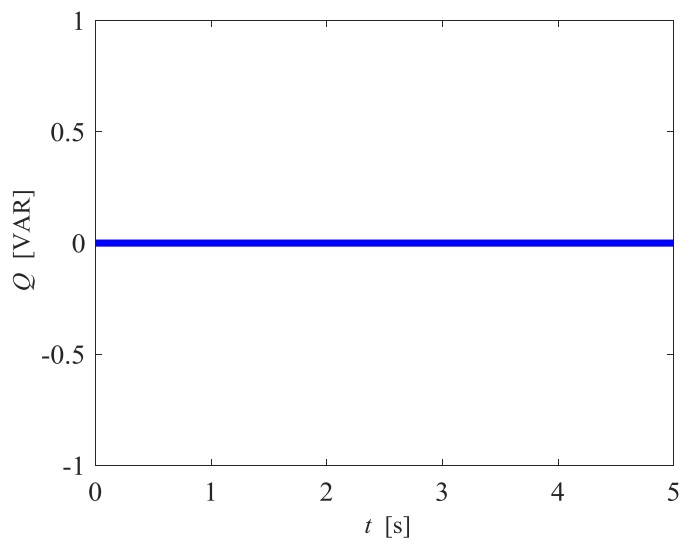


Figura 4.10 Potencia reactiva, caso I

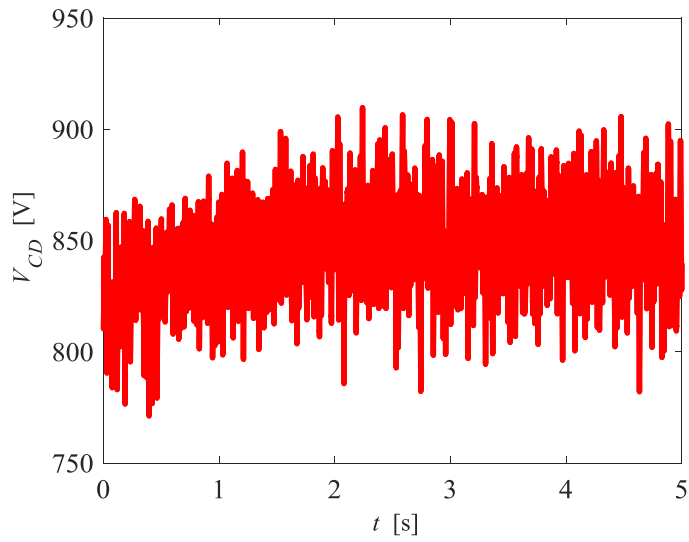


Figura 4.11 Voltaje en el BTB, caso I

En la figura 4.11, se muestra que el voltaje en el BTB oscila entre 800-850 [V], teniendo un rizo debido al proceso de conmutación.

El sistema se conecta a un bus infinito, por lo que el voltaje de CD tiende a estabilizarse debido al control del BTB, se tiene una oscilación debido a la entrada variable del viento, pero el control hace que se estabilice después de 1.6 [s].

Caso II. El sistema opera con una velocidad de viento constante de 10 m/s y se somete a una variación en la velocidad como se muestra en 2.1(b). Ahora, la perturbación se muestra en 0.5 [s].

Estudio de un sistema máquina bus infinito

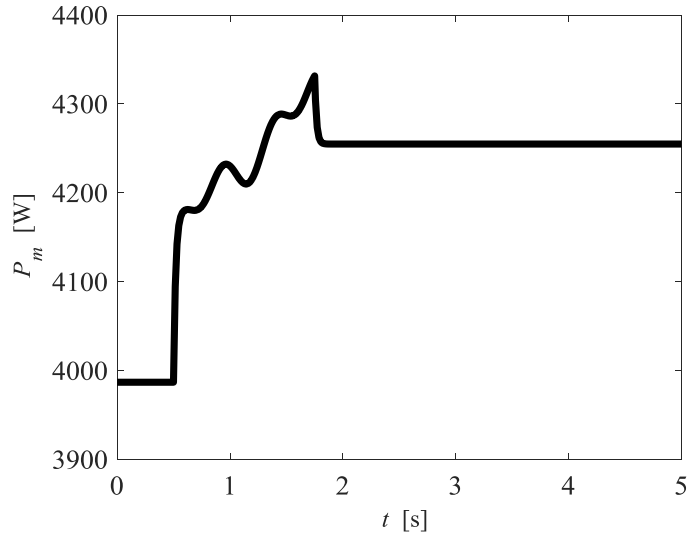


Figura 4.12 Potencia mecánica, caso II

A continuación, en las siguientes figuras, se muestran las corrientes y voltajes en dq del GSIP ante la perturbación del Caso II.

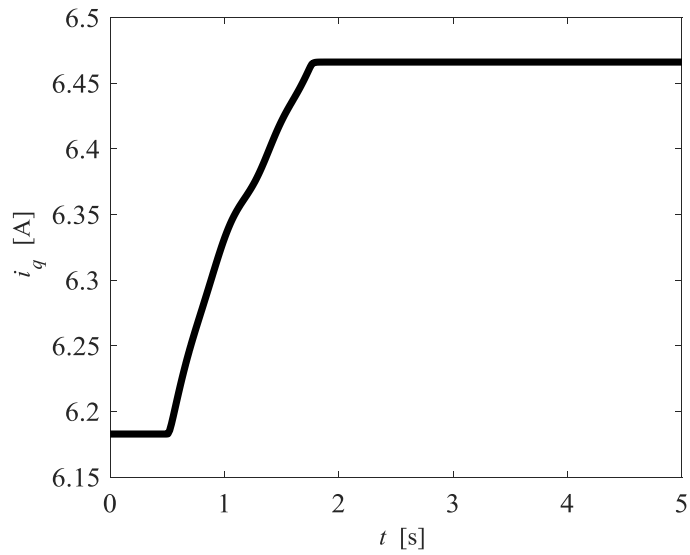


Figura 4.13 Corriente d en el GSIP, caso II

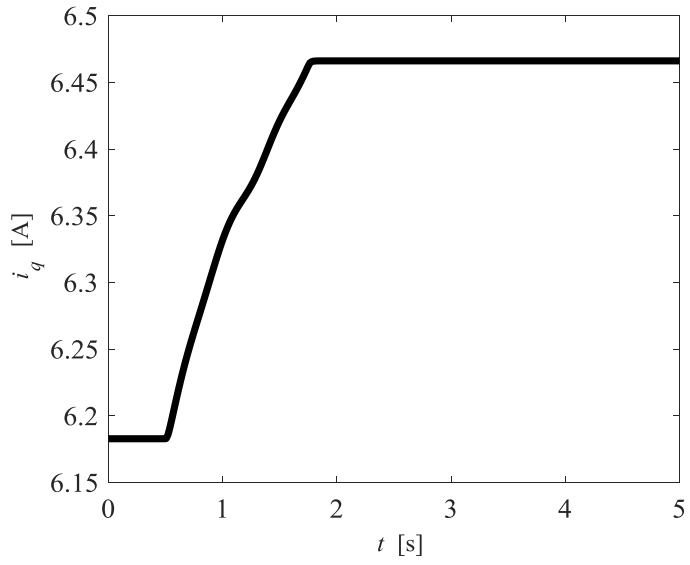


Figura 4.14 Corriente q en el GSIP, caso II

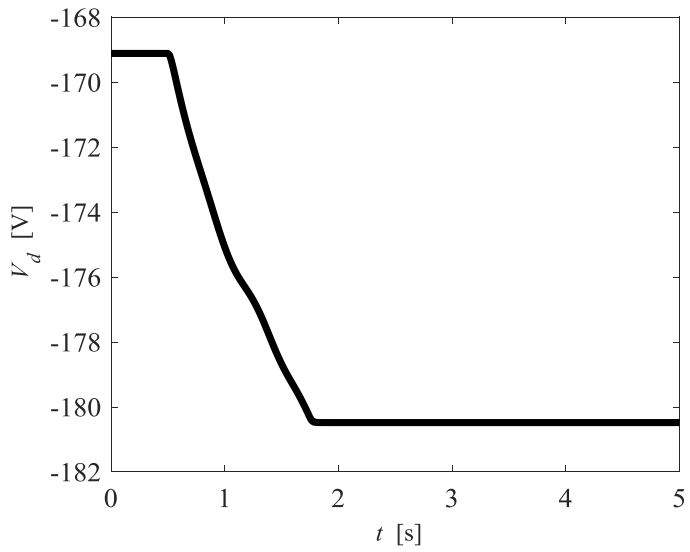


Figura 4.15 Voltaje d en el GSIP, caso II

Estudio de un sistema máquina bus infinito

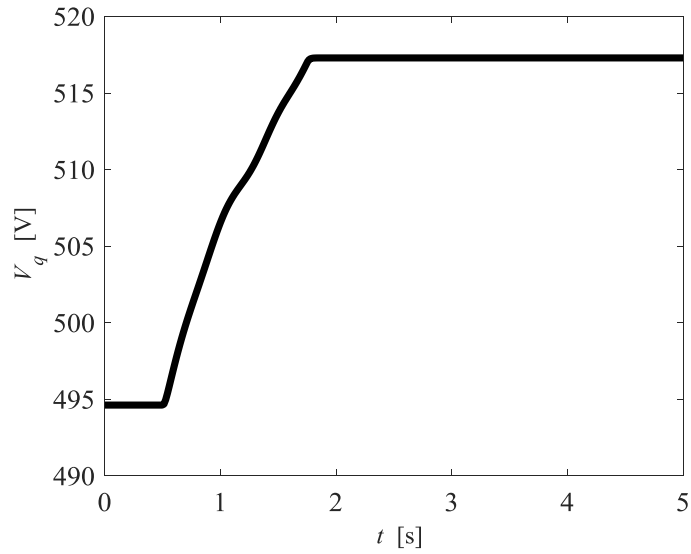


Figura 4.16 Voltaje q en el GSIP, caso II

Como ya se mencionó, se pasa del marco de referencia dq al marco de referencia abc .

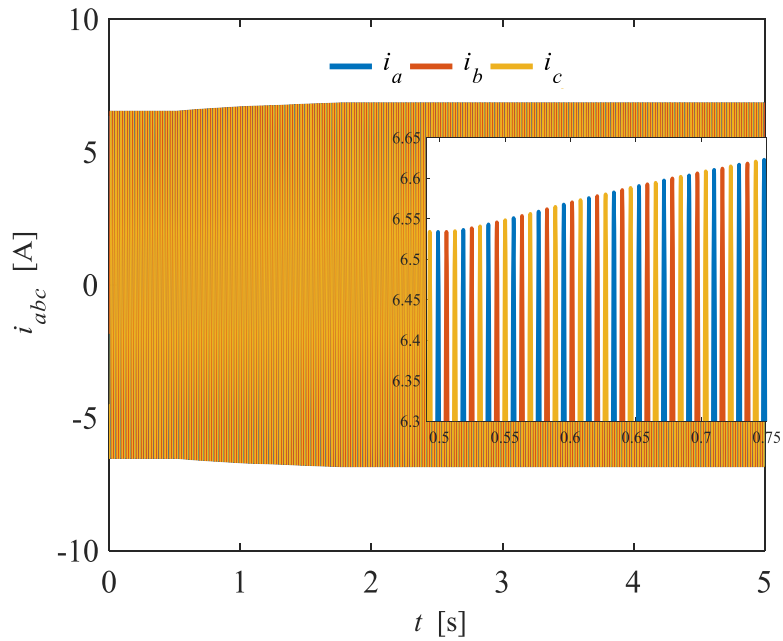


Figura 4.17 Corrientes abc en el GSIP, caso II

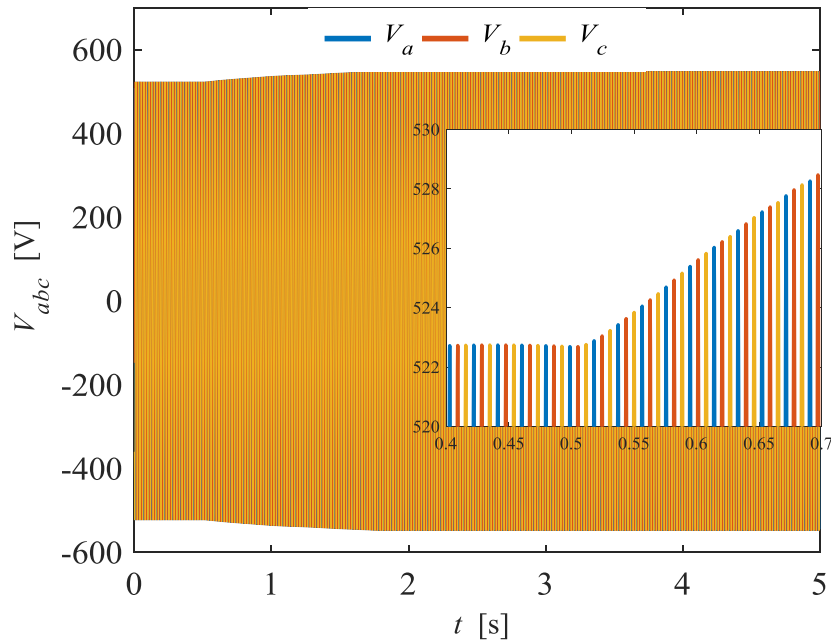


Figura 4.18 Voltajes abc en el GSIP, caso II

En el Caso II, se muestra que la potencia reactiva sigue siendo nula. Por otra parte, la potencia activa sigue creciendo en razón a la variación de la entrada mostrada velocidad. Lo anterior se muestra en la Figura 4.19 y Figura 4.20 donde se observa que la potencia activa pasa nuevamente de 3420 [W] a 3745 [W]. Sin embargo, se observa que, las variaciones durante el periodo del cambio entre 0.5 [s] y 1.6 [s] son muy similares respecto a las de la Figura 4.9. Entonces, se determina que el control propuesto cumple de manera general las condiciones de operación y hace que la potencia activa no tenga cambios bruscos en el sistema.

Estudio de un sistema máquina bus infinito

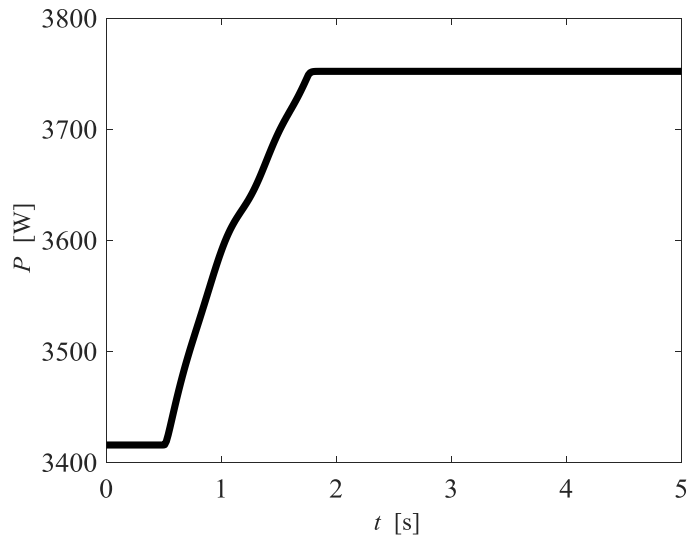


Figura 4.19 Potencia activa, caso II

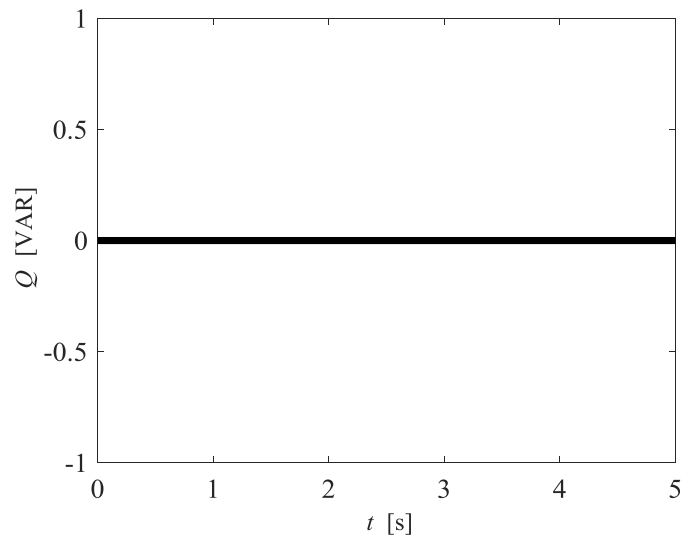


Figura 4.20 Potencia reactiva, caso II

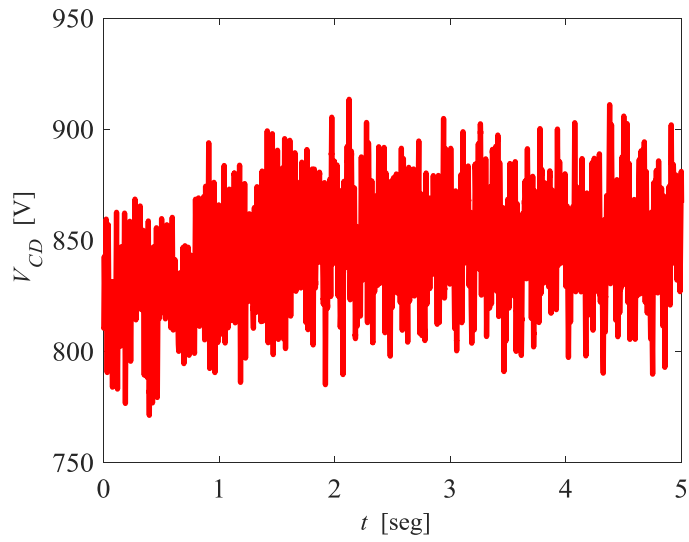


Figura 4.21 Voltaje en el BTB, caso II

En la Figura 4.21 se observa que cuando se presenta la variación en 0.5 [s], existe una perturbación en el V_{DC} pero después de 1.1 [s], el voltaje se mantiene estable en el valor que alcanza en ese instante de tiempo. Esto se debe a la sintonización de los controladores.

4.4 Conclusiones

La tendencia actual en los SGE para la incorporación a la red está incrementando de manera que avanza la tecnología. Con las máquinas eléctricas rotatorias existentes, se han desarrollado modelos equivalentes que permiten demostrar el comportamiento de los parámetros de interés, en particular, operando en modo generador. Un análisis de este tipo en el sistema físico es poco probable, por lo que la simulación es la base para conocer el desempeño de la red en condiciones normales y en presencia de perturbaciones para generar energía eléctrica que cumpla con las condiciones de interconexión que exige el código de red del país donde se requiera.

En este trabajo se ha desarrollado el modelo de un sistema eólico empleando el GSIP basado en el convertidor electrónico BTB y realizando estrategias de control tanto del lado de red, como en el lado del generador. Para el desarrollo del trabajo se abordaron los modelos de la turbina (modelo de una masa), el modelo del GSIP y los esquemas de control utilizados.

El aerogenerador está constituido por diversos elementos, que, en conjunto, tiene como finalidad generar energía eléctrica derivada del viento. Con el desarrollo matemático de cada uno de los sistemas que constituyen el SGE, se logró entender la relación e interacción que existen entre las variables de entrada y salida del sistema, asimismo, la importancia de cada una de ellas considerando el problema que se requiera solventar.

Durante el desarrollo de esta tesis, se ha expuesto la importancia de los esquemas de control asociados a los SGE para optimizar la operación de los aerogeneradores y poder realizar los objetivos que se requieren lograr. Se hizo un énfasis en los controladores PI, ya que muestran cierta facilidad para su desarrollo y entendimiento, tomando en cuenta que existen más estrategias de control y con mayor robustez para los SGE, sin embargo, los compensadores PI son de fácil implementación y otorga resultados confiables para el tipo de sistema que se trabajó.

Los resultados que se obtuvieron se pueden emplear en la planeación de SGE cuando existen condiciones de viento casi invariables, ya que, actualmente los GSIP se usan para generación de baja potencia, por lo tanto, bajo las condiciones donde se pueden implementar, el viento puede tener una mínima variación.

Aportaciones

Las principales aportaciones de este trabajo de tesis son:

- Se presenta el desarrollo matemático del GSIP y la interacción con la parte mecánica del aerogenerador.
- Se muestra un esquema típico de control del BTB con controladores PI, enfatizando las ventajas que presenta la topología del BTB para el sistema de generación eólica empleando el GSIP.
- Estudio y simulación de un sistema de generación eólica con el GSIP ante perturbaciones en la velocidad de entrada del generador.

Trabajos futuros

Con relación al trabajo desarrollado en la presente tesis, se proponen los siguientes temas como referencia para investigaciones posteriores.

- Estudio y desarrollo de esquemas de control de ángulo para optimizar la potencia de entrada al generador.
- Implementación de controles con mayor robustez y así optimizar el convertidor electrónico, en este caso, BTB.
- Análisis y estudio de los sistemas de generación eólica cuando se presentan fallas en la conexión al sistema.
- Implementación física de los esquemas de control mediante dispositivos electrónicos.

Referencias

- [1] X. Yan et al., "Control strategy for wind power integration base on energy demand respond and distributed energy storage," in *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 2374-2377, 2017.
- [2] Y. Zhang, P. Wang, C. Zhang and S. Lei, "Wind energy prediction with LS-SVM based on Lorenz perturbation," in *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1724-1727, 2017.
- [3] Y. Pan, L. Shi and Y. Ni, "Modelling of multiple wind farms output correlation based on copula theory," in *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 2303-2308, 2017.
- [4] J. Martínez, G. Nájera, "Modelado y simulación de parques eólico-integrados a los sistemas eléctricos de potencia", Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2017.
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA)," Wind Energy," Recuperado de: <http://www.irena.org/wind>.
- [6] H. Keshta, A. Ali, E. Saied and F. Bendary, "Comparative performance of wind energy conversion system (WECS) with PI controller using heuristic optimisation algorithms," in *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 549-553, 10 2017.
- [7] H. Ye, Y. Tang, W. Pei and L. Kong, "Numerical stability analysis of PMSG-based wind energy conversion system: a simple example of drive system," in *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 955-960, 2017.
- [8] O. Aguilar, R. Tapia, J. M. Ramirez and A. Valderrabano, "Adaptive controller for PMSG wind turbine systems with back-to-back PWM converters", *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Dallas, TX, 2013, pp. 1-6.

- [8] D. Thakur and J. Jiang, "*Control of a PMSG Wind-Turbine under Asymmetrical Voltage Sags using Sliding Mode Approach*," in IEEE Power and Energy Technology Systems Journal.
- [9] J. Giera, M. Wing, "*Permanent Magnet Motor Technology*", Second edition, New York, Marcel Dekker, 2002.
- [10] Y. González, G. Rico, R. Tapia, D. Guillén, "*Integración de Sistemas Eólicos en Redes Eléctricas de Distribución*", FI-UNAM.
- [11] T. Mahmoud, Z. Y. Dong and J. Ma, "Integrated optimal active and reactive power control scheme for grid connected permanent magnet synchronous generator wind turbines," in *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 4, pp. 474-485, 4 2018.
- [12] Rui Melício, Victor M. F. Mendes and João P. S. Catalão (2011). "*Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Generator and Full-Power Converters: Modelling, Control and Simulation, Wind Turbines*," Dr. Ibrahim Al-Bahadly (Ed.), ISBN: 978-953-307-221-0.
- [13] R. Errouissi, A. Al-Durra and M. Debbouza, "*A Novel Design of PI Current Controller for PMSG-based Wind Turbine Considering Transient Performance Specifications and Control Saturation*," in IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [14] O. Elbeji, M. B. Hamed, L. Sbita, "*PMSG Wind Energy Conversion System: Modeling and control*", International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application, 2014, pp. 1-11.
- [15] O. Aguilar, R. Tapia, A. Valderrabano and H. Minor, "*Design and Performance Comparison of PI and Adaptive Current Controllers for a WECS*," in IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 5, pp. 1361-1368, May 2015.
- [16] H. Nian and Y. Zhou, "*Investigation of Open-Winding PMSG System With the Integration of Fully Controlled and Uncontrolled Converter*," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 429-439, Jan.-Feb. 2015.

- [17] V. R., R. P. and S. M. P., "*A Modified Active Power Control Scheme for Enhanced Operation of PMSG-Based WGs*," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 630-638, April 2018.
- [18] O. A. Mejía, R. T. Olvera and J. M. S. Solorio, "*Wind energy conversion system using PMSG controlled by B-spline network*," 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 1-5.
- [19] T. Ackerman, "*Wind Power in Power Systems*", 1st Ed, Stockholm, Sweden. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [20] V. Yaramasu, A. Dekka, M. J. Durán, S. Kouro and B. Wu, "*PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls*," in *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 6, pp. 956-968, 7 2017.
- [21] M. Arifujjaman, M. T. Iqbal and J. E. Quaicoe, "*Energy capture by a small wind-energy conversion system*". *Applied Energy*, Vol. 85 No. 1, pp. 41-51, 2008.
- [22] M. Chinchilla, S. Arnaltes and J. C. Burgos, "*Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid*," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 130-135, March 2006.
- [23] Z. Zhang, J. Rodríguez and R. Kennel, "*Advanced control strategies for direct-drive PMSG wind turbine systems: Direct predictive torque control approaches*," in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, no. 3, pp. 217-225, Sept. 2017.
- [24] J. R. R. Rodriguez, L. M. Castro, D. Granados-Lieberman, M. V. Rodriguez and N. M. Salgado-Herrera, "*PI tuning parameters in back-to-back converters applying active damping control for DC-voltage power port regulation*," 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, 2017, pp. 1-6.

- [25] A. D. Hansen, G. Michalke, "*Modelling and Control of Variable-speed Multipole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine*", Wiley Interscience, may.2008, pp. 1-18.
- [26] R. Errouissi, A. Al-Durra and M. Debbouza, "*A Novel Design of PI Current Controller for PMSG-based Wind Turbine Considering Transient Performance Specifications and Control Saturation*," in IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- [27] J. Grainger, W. Stevenson, "*Análisis de Sistemas de Potencia*", México, McGraw-Hill,1996.
- [28] T. Ackerman, "*Wind Power in Power Systems*", 1st Ed, Stockholm, Sweden. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [29] A. Yazdani, R. Iravani, "*Voltage-Sourced Converters in Power Systems*", New Jersey, John Wiley & Sons, 2010.
- [30] K.R.Padiyar, "*Power System Dynamics*", Second Edition, India, BS Publications,2008.
- [31] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", 1st Ed, Palo alto, California, McGraw-Hill, 1994.

Anexo A

Marco de referencia abc/dq

Se utiliza para la simplificación en el estudio de máquinas eléctricas aportando una implementación digital más sencilla. Las variables en el marco abc se pueden transformar de referencia a dq mediante la transformada de Park. El marco de referencia dq es utilizado en el análisis estático y dinámico de máquinas eléctricas.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{A.1}$$

El coeficiente $2/3$ se puede integrar arbitrariamente a la ecuación. Los valores que comúnmente se usan son $2/3$ ó $\sqrt{2/3}$. La principal ventaja de emplear $2/3$ es que la magnitud de los voltajes de las dos fases es igual a la del sistema trifásico después de la transformación.

Las dos variables dq después de la transformación contiene toda la información de las tres variables trifásicas, bajo la condición de que el sistema trifásico está balanceado. Asimismo, es posible regresar al marco de referencia original, esto se logra con la transformación inversa como se muestra a continuación

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad \text{A.2}$$

Anexo B

Marco de referencia $abc/\alpha\beta$

Como se menciona en el Anexo B, los marcos de referencia se utilizan para facilitar la simulación y hacer el control de las máquinas eléctricas. El estado estacionario de dos fases $\alpha\beta$ no rota en el espacio como en abc , entonces, la transformada puede conseguirse acomodando $\theta = 0$ en A.1, entonces se tiene:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{C.1}$$

De manera similar, a la transformación anterior, por medio de la inversa se puede regresar al arco de referencia original por medio de:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad \text{C.2}$$