

INTEGRACIÓN A LA RED DE GENERADORES EÓLICOS USANDO MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES Y CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO



HEDER PARRA RAMÍREZ

INTEGRACIÓN A LA RED DE GENERADORES EÓLICOS USANDO MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES Y CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO

HEDER PARRA RAMÍREZ

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Pereira, Noviembre de 2015
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Programa de Ingeniería Eléctrica.



II

INTEGRACIÓN A LA RED DE GENERADORES EÓLICOS USANDO MÁQUINA SÍNCRONA
DE IMANES PERMANENTES Y CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO
©HEDER PARRA RAMÍREZ

Director: Ph.D ALEJANDRO GARCÉS RUIZ

Pereira, Noviembre de 2015
Programa de Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
La Julita. Pereira(Colombia)
TEL: (+57)(6)3137122
www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

Agradecimientos

Primeramente gracias a Dios por guiarme cada día de mi vida, darme fortaleza para no desistir y por la oportunidad de culminar mi carrera de pregrado y hacer realidad este sueño anhelado.

También a mi madre Cecilia Ramírez Rojas y a mi hermano Yilmer Galarza Ramírez por su apoyo en todo momento y por infundir en mí la lucha y el deseo de salir adelante mediante la superación. A todos mis amigos y colegas que de alguna u otra manera también fueron de ayuda en este trabajo de grado.

A mi director de trabajo de grado Alejandro Garcés Ruiz, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación supo guiarme en todo este proceso investigativo y a la Universidad Tecnológica de Pereira, facultad de Ingeniería Eléctrica por brindarnos la oportunidad y el espacio para desarrollar y adquirir nuevos conocimientos.

Dedicado a la memoria de mi padre José Aníbal Parra Santanilla.

Resumen

En este trabajo de grado se lleva a cabo la investigación de los convertidores AC/AC para el control de los generadores eólicos y su adaptación a un sistema eléctrico de potencia. Inicialmente este trabajo de investigación muestra un estudio detallado del estado del arte de los modelos del convertidor AC/AC para el caso de los inversores de dos niveles como lo son la fuente inversora de voltaje (VSC) y la fuente inversora de corriente (CSC), en el modelo del CSC se implementara mediante modulación.

El trabajo relaciona todo un estudio de los modelos del convertidor matricial híbrido y las formas de modulación por ancho de pulsos PWM, para garantizar que sea eficaz a pesar de las posibles variaciones en los parámetros de los generadores eólicos. Ya que la modulación tiene como objetivo desarrollar nuevas metodologías que contribuyan al control de las variables de frecuencia y tensión para garantizar parámetros constantes en la carga que se va a conectar al sistema de generación eólica.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos	3
1.4. Estado del arte	4
1.5. Alcance	5
1.6. Estructura del trabajo de grado	5
2. Convertidores AC-AC para aplicaciones de generación eólica.	7
2.1. Generación Eólica	7
2.1.1. Curva de Potencia para el Generador Eólico	12
2.1.2. MPPT Maximum Power Point Tracking	14
2.2. Tipos de turbinas eólicas con sus respectivos generadores y convertidores. . .	15
2.2.1. Turbina eólica tipo D	19
2.3. Generador síncrono de Imanes Permanentes (PMSG).	20
2.3.1. Modelo del Generador PMSG en Régimen Permanente.	21
2.4. Convertidores AC/AC usados en turbinas eólicas tipo D.	23
2.5. Convertidor Matricial Híbrido AC/AC.	31
2.6. Aplicaciones del Convertidor AC/AC.	33
2.6.1. Aplicaciones del Controlador de Voltaje AC.	33
2.6.2. Aplicaciones del Convertidor Matricial.	33
3. Modulación y control del convertidor matricial híbrido.	35
3.1. Técnica de Modulación PWM.	35
3.1.1. Operación y Modulación PWM en el Convertidor CSC.	37

3.1.2. Portadora basada en técnicas PWM en CSC	39
3.2. Modulos IGBTs	44
3.3. Transformador Trifásico de 3 Núcleos	45
3.4. Control del Convertidor	47
3.5. Distorsión Armónica.	51
3.5.1. Definición de armónicas	51
3.5.2. Efectos asociados a la reducción de armónicos	52
3.5.3. Reactores de Línea	53
4. Resultado de las simulaciones	55
4.1. Convertidor matricial híbrido con fuente de Corriente (CSMC)	55
4.1.1. Modelo de la simulación.	59
4.1.2. Distorsion Armonica	66
5. Conclusiones	69
5.1. Futuros trabajos de investigación	70

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo de grado se analiza la operación del convertidor matricial híbrido para la integración de turbinas eólicas con máquinas síncronas de imanes permanentes; también se analiza el funcionamiento dinámico de los generadores, la modulación, control y su relación con la redes de distribución.

Así mismo se analizara el control del convertidor matricial híbrido para la integración al sistema de transmisión de generadores eólicos usando máquina síncrona de imanes permanentes y en efecto se realizara un estudio teórico que alcance el estado del arte, el cual se complementara con simulaciones el software PSIM basado en sistemas de prueba IEEE.

Principalmente este trabajo de grado se realiza como una necesidad por la tendencia creciente de la demanda que a su vez genera la necesidad de recurrir a nuevas tecnologías para abastecer la carencia de energía eléctrica en el país y por esta razón se hace necesario optar por generadores eólicos como una alternativa para mejorar la eficiencia del sistema eléctrico y además hacer aportes en conocimiento de este tipo de tecnologías debido a que en el país hay muchos recursos hídricos y poco se ha incluido de otras formas de generación con energías renovables.

1.1. Descripción del problema

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica se hace necesario, aprovechar de una manera más eficiente los recursos mediante el uso de energías renovables.

La generación eólica aprovecha la energía del viento mediante el uso de turbinas y generadores. En la actualidad la energía eólica se considera una fuente de energía muy importante porque no genera contaminación. Las turbinas eólicas poseen un conjunto de elementos que permiten integrar el generador a la red. Uno de los más importantes de estos elementos es el convertidor.

Un generador eólico debe ser integrado mediante un convertidor que sea eficiente y que a su vez cumpla con los requerimientos mínimos para garantizar que los parámetros de salida de éste sean confiables para llevarlos a los centros de consumo.

En la actualidad existen muchas topologías de convertidores pero se considera muy apropiado implementar el convertidor matricial híbrido debido a que éste posee una configuración de dispositivos tal que facilita el análisis para la conversión de corriente y voltaje, gracias a que permite un mejor control de los parámetros de salida.

Sin embargo, el convertidor matricial híbrido presenta algunos retos desde el punto de vista de la modulación y el control, estos retos son:

- Garantizar factor de potencia adecuado.
- Garantizar frecuencia y tensión constante.
- Formas de onda con bajo índice de armónicos.

Básicamente, el principal método a emplear es la modulación por ancho de pulsos PWM y una configuración de dispositivos de conmutación IGBT llamado convertidor matricial híbrido. La modulación de este tipo de convertidor, así como su control debe ser objeto de estudio debido a su complejidad y al cambio de paradigma respecto a la modulación en convertidores convencionales.

1.2. Justificación

Actualmente, la tendencia creciente de la demanda, genera la necesidad de recurrir a nuevas tecnologías para abastecer la carencia de energía eléctrica en el país y más en aquellos

lugares que no cuentan con disponibilidad de recursos hídricos.

Es por esta razón que se hace necesario optar por generadores eólicos como una alternativa para mejorar la eficiencia de los sistemas de generación y además de abarcar mayor conocimiento en este tipo de generación.

Dado que el país cuenta con bastantes recursos hídricos, poco se ha incluido en el desarrollo de los diferentes tipos de energías renovables, razón por la cual hay un desconocimiento en el área. Por éste motivo es que se hace necesario hacer todo un estudio acerca del tema y así contribuir un poco más a nuevas formas de generación, además es una gran ventaja para las épocas de sequía puesto que se puede hacer un uso más eficiente de la generación eólica.

Actualmente en el país, muchas tecnologías se están importando y poco se está investigando sobre ellas, por esta razón es importante que avancemos y amplíemos nuestros conocimientos. Pues es de gran importancia que conozcamos el funcionamiento, la operación y en control de los convertidores empleados en los generadores eólicos y en este caso del convertidor matricial híbrido.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Analizar la operación del convertidor matricial híbrido para la integración de turbinas eólicas con máquinas síncronas de imanes permanentes.

1.3.2. Específicos

- Estudiar el funcionamiento dinámico de los generadores eólicos.
- Entender la modulación y control de los convertidores matriciales híbridos.
- Analizar la dinámica de los generadores eólicos y su relación con la red a nivel de distribución.
- Implementar usando simulador PSIM el modelo propuesto.

1.4. Estado del arte

Desde la década de los 70 y los 80, la crisis del petróleo llevó a un cambio en la manera de pensar sobre la política energética. El interés en las energías alternativas creció y llevó a la creación de programas de investigación y de subvenciones (financiar) de estos mismos [1].

En Alemania y Dinamarca se desarrollaron los primeros aerogeneradores rentables económicamente, que llevaron a una revolución de la energía eólica, tanto en el aspecto industrial como en el tecnológico.

Una visión general de las topologías de convertidores dc-link que se utilizan para implementar un sistema de convertidores PWM CA-CA trifásicos, partiendo desde la fuente inversora de voltaje y la fuente rectificadora de corriente, también se emplean topologías de convertidor matricial indirecto (IMC) y las topologías del convertidor matricial convencional (directo) CMC [1].

La referencia [2] habla de la función primaria de una fuente inversora de tensión (VSI) está en convertir un voltaje de fijo en un voltaje trifásico AC con magnitud y frecuencia variable, también se hace un énfasis en los esquemas de modulación por ancho de pulsos (PWM) para inversores de alta potencia de dos niveles con conmutaciones (switching) de baja frecuencia (1kHz).

Se presenta en [3], un enfoque de los esquemas de modulación por ancho de pulsos para fuentes inversoras de voltaje de dos niveles. La frecuencia de conmutación del inversor se limita a unos pocos cientos de hertzios del manejo de alta potencia para unidades de media tensión.

En [4] se muestra el diseño de un sensor de control de campo orientado en montajes de aplicaciones de PMSG en aplicaciones de turbinas eólicas, realizado en una turbina eólica de 2,2 kW.

De acuerdo con [5] existe un modelo general de las variables de velocidad en turbinas eólicas en simulaciones de sistemas de potencia dinámicos se considera los siguientes parámetros.

- Modelado de velocidad del viento.
- Modelado del rotor.

- Modelado del generador /convertidor.
- Modelamiento del controlador de voltaje.
- Modelamiento de la protección del sistema.

1.5. Alcance

La investigación se centrará en el análisis y el control del convertidor matricial híbrido para la integración al sistema de transmisión de generadores eólicos usando máquina síncrona. Se realizará un estudio teórico que alcance el estado del arte el cual será complementado con simulaciones en PSIM sobre sistemas de prueba IEEE.

En ésta investigación se abordara la generación eólica como único interés de estudio, las otras formas de generación no se incluirán para este caso.

1.6. Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado está organizado de la siguiente forma: En el capítulo 1 introducción, se da una introducción del trabajo de grado, en el capítulo 2 se presentan los convertidores AC/AC para aplicaciones de generación eólica, se muestran las aplicaciones que tiene los convertidores en los generadores eólicos seguidamente en el capítulo 3 Modulación y control del convertidor matricial híbrido, se hace un estudio de todas las formas de modulación empleadas para el convertidor, posteriormente en el capítulo 4 resultados, se muestra los resultados obtenidos a través de todas las simulaciones y comparaciones con otros estudios realizados en esta área de generación eólica y finalmente en el capítulo 5 conclusiones, se concluye con base en los resultados obtenidos en el trabajo de grado.

Capítulo 2

Convertidores AC-AC para aplicaciones de generación eólica.

2.1. Generación Eólica

La energía eólica es una de las energías más antiguas que ha usado el hombre para algunas tareas, todo empezó como molinos de viento empleados para moler grano y luego se empleó para sistemas de bombeo. Se habla de los primeros molinos en medio oriente, Europa y Asia. Pero fue en el siglo XIV y XVII cuando importantes matemáticos como Gottfried Wilhelm Leibniz, Daniel Bernoulli, y el matemático Leonhard Euler que plantearon nuevos diseños y leyes básicas sobre la mecánica para ser aplicadas al diseño de las aspas. En el siglo XIX con la llegada de la electricidad se dio un gran paso para asignarle otro uso a los molinos de viento pues ya pasaron a ser simples molinos de grano o bombas de ser generadores de electricidad, por tal razón se comenzó a investigar para mejorar dicho modelo y hacerlo más eficiente [6].

La Generación eólica se define como la forma de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica debido a que los aerogeneradores producen electricidad mediante el uso de la fuerza del viento para impulsar un generador eléctrico. El viento pasa sobre las aspas y ejerce una fuerza de giro. Las aspas giratorias conectan con un eje interior de la góndola, que entra en un sistema de engranaje que aumenta la velocidad de rotación a lo que es apropiado para el generador, que utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica [7].

8CAPÍTULO 2. CONVERTIDORES AC-AC PARA APLICACIONES DE GENERACIÓN EÓLICA.

En las últimas décadas hasta la actualidad las turbinas eólicas se han ido desarrollando rápidamente, debido a que actualmente se encuentran en el mercado aerogeneradores comerciales con capacidad de potencia mayor a 5 MW. Adicionalmente hoy en día se cuenta con una gran ingeniería de control en los generadores, todo con el principal objetivo de que sean más eficientes y aprovechar al máximo la energía del viento, es por esto que hay control en el ángulo de las aspas, en la rotación de la góndola y control dependiendo de las velocidades del viento, así como de un control para el generador trifásico de imanes permanentes y de un sistema de control y conversión (DC/AC o AC/AC) que se encarga de que los parámetros voltaje y frecuencia a la salida de éste para que estén en los niveles de calidad exigidos para así poder conectar el sistema de generación eólica al sistema eléctrico [8].

Existen varios tipos de generadores que pueden ser utilizados, entre ellos están:

- **Generadores asíncronos (Inducción).**

Estos se dividen en dos subgrupos

- Generador de inducción jaula de ardilla (Generator squirrel cage induction SCIG)
- Generador de inducción con rotor bobinado (Wound rotor induction generator WRIG)
 - Generador de inducción doblemente alimentado (Doubly fed induction generator DFIG).

- **Generador síncrono de imanes permanentes.**

Al igual que los generadores asíncronos los síncronos también se dividen en dos grupos

- Generador síncrono de rotor bobinado (Wound rotor synchronous generator WRSG)
- Generador síncrono de imán permanente (Permanent magnet synchronous generator PMSG)

En cuanto a los generadores de inducción, este es el tipo más común empleado en las turbinas eólicas. Tiene varias ventajas como la robustez y simplicidad mecánica, y a medida que se produce en grandes series, también tiene un bajo costo. La principal desventaja es que el estator necesita una corriente de magnetización reactiva. El generador asíncrono no contiene imanes permanentes y no es excitado independientemente. Por lo tanto, tiene que recibir su corriente de excitación de otra fuente y consume potencia reactiva. La potencia reactiva puede ser suministrada por la red o por un sistema electrónico de potencia. El campo magnético del generador sólo se establece si está conectado a la red. En el caso de la excitación AC, el

campo magnético creado gira a una velocidad determinada conjuntamente por el número de polos en el arrollamiento, la frecuencia de la corriente y la velocidad síncrona. Por lo tanto, si el rotor gira a una velocidad que excede la velocidad síncrona, un campo eléctrico es inducido entre el rotor y el campo giratorio del estator por un movimiento relativo (deslizamiento), lo que provoca una corriente en los devanados del rotor. El rotor de un generador de inducción puede ser diseñado como rotor jaula de ardilla (SCIG) o como un rotor bobinado (WRIG) [9, 10, 11].

Generador de inducción jaula de ardilla (SCIG). Es una clase de generador muy empleado en turbinas eólicas tipo A, además es de simplicidad mecánica, construcción robusta, presenta una alta eficiencia y bajos requerimientos de mantenimiento pues se restringe solo a lubricación de los cojinetes [11]. Seguidamente el SCIG está conectado directamente a la red, y debido a pequeños cambios en el deslizamiento del generador de inducción, relacionados con el aumento de la carga o la variación de la velocidad del viento y corrientes nominales elevadas de hasta 8.7 veces el valor nominal, causan fluctuaciones en los parámetros (tensión, frecuencia) que son transmitidos directamente a la red, por esta razón se hace necesario emplear arrancadores suaves y también compensadores de energía reactiva, debido a que el SCIG consume potencia reactiva de la red para poder crear un campo magnético (corrientes de magnetización) y esto ocasiona que la generación tenga un bajo factor de potencia, y esto no es permitido en los sistemas eléctricos de potencia [9].

Generador de inducción con rotor bobinado (WRIG). Se diferencia del SCIG solo por la construcción del rotor [12]. En el caso de un WRIG, las características eléctricas del rotor pueden ser controladas desde el exterior, ya que está provisto de un bobinado trifásico con aislamiento muy similar al del estator, colocado en las ranuras de este y tiene el mismo número de polos que el estator [7]. Los devanados de rotor bobinado pueden ser conectados exteriormente a través de anillos colectores y escobillas por medio de equipos electrónicos de potencia que pueden o no requerir de anillos y escobillas. Mediante el uso de la electrónica de potencia, la potencia puede ser extraída o incluida en el circuito del rotor y alimentar en la salida del estator. La desventaja del generador de inducción de rotor bobinado es que es más costoso y de menor robustez que el SCIG [9]. Este devanado está normalmente conectado en estrella con los extremos del devanado adecuado a tres anillos colectores, lo que permite circuitos externos que se añaden al rotor, como lo es la resistencia variable para fines de control dinámico de velocidad variable y son empleados comúnmente en turbinas eólicas tipo B [7].

Generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). El DFIG consiste en un WRIG con los devanados del estator conectados directamente a la red trifásica de frecuencia constante y con los devanados del rotor montados a una fuente convertidora de tensión bidireccional IGBT back-to-back que actúa como variador de frecuencia. El término doblemente alimentado es debido a que la tensión en el estator se aplica a la red y la tensión en el rotor es inducida por el convertidor de potencia. Este sistema permite una operación de velocidad variable en un amplio pero específico rango. El convertidor compensa la diferencia entre la frecuencia mecánica y eléctrica, mediante la inyección de una corriente de rotor con una frecuencia variable. Tanto en el funcionamiento normal como en fallos, el comportamiento del generador, es regido por el convertidor de potencia y sus controladores [9].

La idea principal es que el convertidor en el lado del rotor controle la potencia activa y reactiva mediante el control con los componentes de la corriente del rotor, mientras que el convertidor del lado de la red controla la tensión DC-link y asegura un funcionamiento del convertidor con factor de potencia unitario (es decir, cero potencia reactiva) [9].

Generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). El generador síncrono de imanes permanentes se está empleando cada día más en sistemas de turbinas eólicas, este es un tipo de generador muy empleado en turbinas eólicas de tipo D, debido a su característica de autoexcitación, lo que permite una operación con alto factor de potencia y alta eficiencia. El generador de imanes permanentes es más eficiente que el generador de inducción, ya que la excitación es proporcionada sin ningún tipo de suministro de energía, es decir, que no necesita una corriente de magnetización reactiva, pues el estator de PMSGs posee bobinas, y el rotor está provisto de un sistema de polos de imán permanente y puede tener polos salientes o puede ser cilíndrica. Con polos salientes son más comunes en las máquinas de baja velocidad y pueden ser la versión más útil para un requerimiento de generadores eólicos. Sin embargo los materiales utilizados para la fabricación de imanes permanentes son costosos, al igual que su producción también es difícil, además de eso, el PMSG requiere un convertidor a escala completa con el fin de ajustar el voltaje y la frecuencia de generación a la frecuencia y tensión de transmisión. Sin embargo, la ventaja es que se puede generar potencia a cualquier velocidad con el fin de adaptarse a las condiciones actuales [9].

Hay diferentes topologías de generadores PMSG presentados en la literatura [9]. Los tipos más comunes son la máquina de flujo radial, la máquina de flujo axial y la máquina de flujo transversal [9]. Más sobre este tipo de generador se especifica en la sección 2.3 debido a que será el generador de interés a emplear en este trabajo. Ahora se realiza un breve análisis del

modelo de la turbina y algunos parámetros a tener en cuenta que son importantes para el estudio de los generadores eólicos. Para este caso se considera una turbina de eje horizontal como se muestra en la figura 2.1

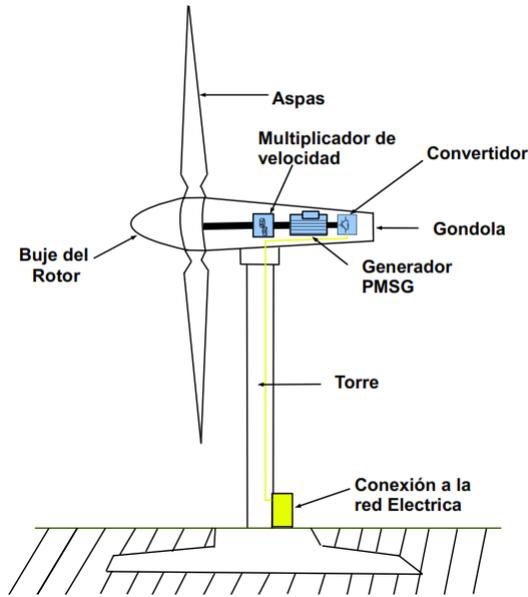


Figura 2.1: Generador eólico de eje horizontal

En la figura 2.1 el generador eólico de eje horizontal, las aspas o palas deben ser accionadas por la energía cinética del viento, por lo tanto, la energía del viento está dada por [13][14]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.1)$$

Pero la potencia desarrollada por el viento es la derivada de la energía así:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \quad (2.2)$$

Y el flujo dm/dt de masa puede expresarse en función de la densidad del aire ρ , el área transversal A perpendicular al volumen de control considerado y la velocidad del viento v como se muestra en la ecuación 2.3

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.3)$$

12CAPÍTULO 2. CONVERTIDORES AC-AC PARA APLICACIONES DE GENERACIÓN EÓLICA.

Finalmente obtenemos la potencia desarrollada por el viento en la superficie A , que es toda el área que abarcan las aspas o palas del generador eólico, como se muestra:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.4)$$

También debemos tener en cuenta la ley de Betz, la cual afirma que un aerogenerador solo puede convertir menos del 59 % de la energía cinética en energía mecánica. Y debido a que hay un cambio en la velocidad que llega a la turbina v_1 y también para la velocidad que sale de la turbina v_2 , se hace necesario introducir una variable adimensional a que relaciona las dos velocidades $a = v_2/v_1$ y que permite simplificar la ecuación de potencia, de la siguiente manera:[13][14]

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.5)$$

Donde C_p es un coeficiente de desempeño y representa la eficiencia de la extracción de la energía como se muestra en la figura 2.2. Este valor cambia de acuerdo con la velocidad del viento y a las acciones de control del ángulo de inclinación y la velocidad de rotación, también es de recordar que en el ángulo de inclinación cada generador debe tener un sistema de control que lo dirija de acuerdo con la dirección de la velocidad del viento y así extraer la máxima potencia de éste [13] [14].

En los parques eólicos en los que existen más de un generador se debe de considerar el efecto sombra, debido a que la velocidad con que entra el viento no es la misma con la que sale, por esta razón, si la ubicación de los generadores no es adecuada de tal modo que se considere este efecto, entonces la eficiencia de los generadores será mucho menor. [13]

2.1.1. Curva de Potencia para el Generador Eólico

Por otra parte los generadores eólicos poseen una curva de potencia en función de la velocidad del viento, la cual es característica de cada tipo generador. En la figura 2.3 se muestra la curva de potencia para el generador de 5,7 kW, construida a partir de la ecuación (2.5) como se puede notar en el gráfico, la potencia del generador eólico aumenta de manera proporcional a cubo de la velocidad del viento, a partir de 4 m/s el generador empieza a generar electricidad. Cuando la velocidad del viento esta entre 12 m/s el generador está operando a potencia nominal, para velocidades mayores el generador limita la potencia generada a su valor nominal, esto con el fin de evitar daños mecánicos y sobrecargas eléctricas y finalmente cuando las velocidades del viento son superiores a 24 m/s es decir, cuando alcanza una

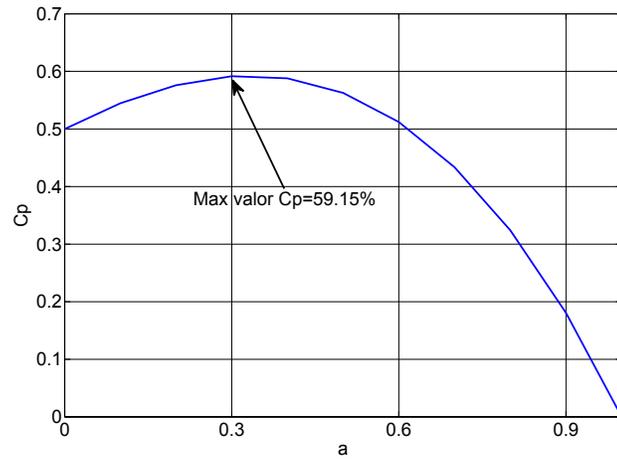


Figura 2.2: Curva del Coeficiente de desempeño

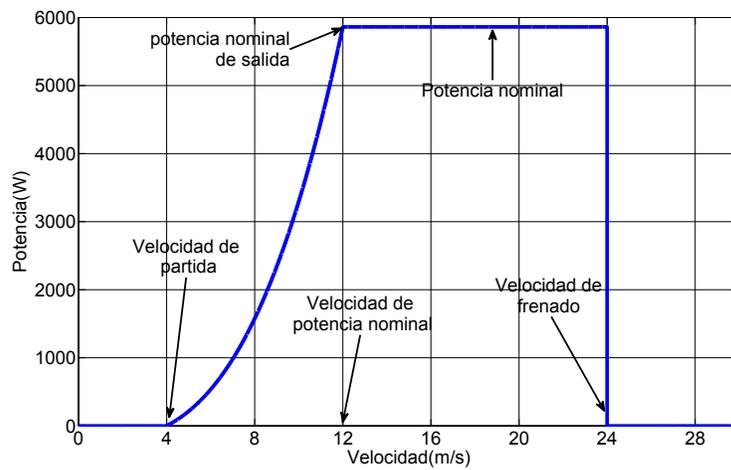


Figura 2.3: Curva de potencia generador eólico de 5,7kW

velocidad limite, existe una velocidad de frenado que se encarga de detener el rotor para velocidades de viento poco favorables para el generador eólico [15] [16]

2.1.2. MPPT Maximum Power Point Tracking

El Seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT*), es un método de control empleado para controlar la velocidad del rotor de la turbina eólica mediante el control del torque del generador [17]. Además le permite al sistema de control, monitorear mediante un anemómetro la velocidad del viento, una veleta para la dirección de éste, y así poder rotar la góndola, fuselaje o chasis del generador eólico gracias a una disposición de motores que lo posicionan en la dirección del viento, También las aspas del generador disponen de un sistema de posicionamiento que relaciona el pitch angle (ángulo de paso) que se encarga de modificar el ángulo de las aspas según sea la velocidad del viento para mejorar la eficiencia. Por consiguiente el *MPPT* es la manera más eficiente de obtener la mayor potencia en función de la velocidad (*rpm – rad/s*) y hacer que el sistema esté en un punto óptimo, también se considera que la velocidad angular ω es proporcional a la velocidad del viento v , es decir $\omega \propto v$.

Ahora bien, si $v \propto \omega$ en la ecuación 2.5, la expresión $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p$ se puede considerar una constante de potencia nominal y la velocidad del viento en términos de la velocidad angular, así:

$$v^3 = \left(\frac{\omega_{mecanico}}{\omega_{electrico}} \right)^3 \quad (2.6)$$

La figura 2.4 contiene el modelo del generador con cada una de las respectivas velocidades angulares. Finalmente la ecuación (2.5) en términos de la potencia nominal y la velocidad angular, queda de la siguiente manera:

$$P = P_{nom} \cdot \left(\frac{\omega_{mecanico}}{\omega_{electrico}} \right)^3 \quad (2.7)$$

Si hacemos una relación de velocidades angulares en la máquina para ω_{mec} tenemos:

$$\frac{\omega_{mec1}}{\omega_{mecnom}} = \frac{\omega_{mec2}}{\omega_{mecnom}} = \frac{\omega_{elec}}{\omega_{elecnom}} \quad (2.8)$$

Donde $\omega_{elec} = \eta \cdot \omega_{mec}$ y η es el número de pares de polos en la máquina.

2.2. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS CON SUS RESPECTIVOS GENERADORES Y CONVERTIDORES

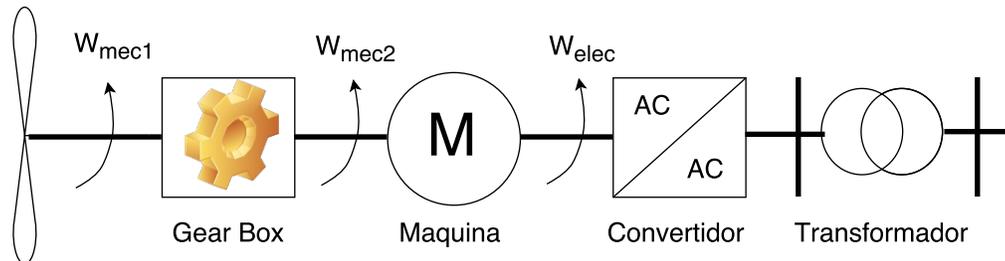


Figura 2.4: Modelo del Generador.

2.2. Tipos de turbinas eólicas con sus respectivos generadores y convertidores.

Las configuraciones de turbinas eólicas comúnmente aplicados se clasifican tanto por su capacidad para controlar la velocidad y por el tipo de control de potencia que utilizan. Como criterio principal, la aplicación de control de velocidad. De acuerdo con esto tenemos cuatro tipos dominantes de turbinas eólicas, como se ilustran en las figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 [9] [18].

- Tipo A: Turbina eólica de velocidad fija.
- Tipo B: Turbina eólica con velocidad variable limitada.
- Tipo C: Turbina eólica con generador de inducción doblemente alimentado.
- Tipo D: Turbina eólica con convertidor completo [19].

Turbina eólica tipo A. Principalmente este fue un concepto danés que surgió en los años 1980s y 1990s, de conectar directamente una turbina eólica a la red eléctrica. Se utiliza ampliamente en sistemas de turbinas eólicas rápidas [20]. Este tipo de configuración que se muestra en 2.5 indica que la turbina eólica de velocidad fija, junto con un generador de inducción asíncrono jaula de ardilla (SCIG), es conectado directamente a la red a través de un transformador. Desde el SCIG siempre se obtiene la potencia reactiva de la red, esta configuración utiliza un banco de capacitores para la compensación de potencia reactiva [9, 21].

Para hacer que la conexión a la red sea más adecuada, se hace uso de un arrancador suave que actúa como limitador de corriente, y debido a que está basado en tecnologías de

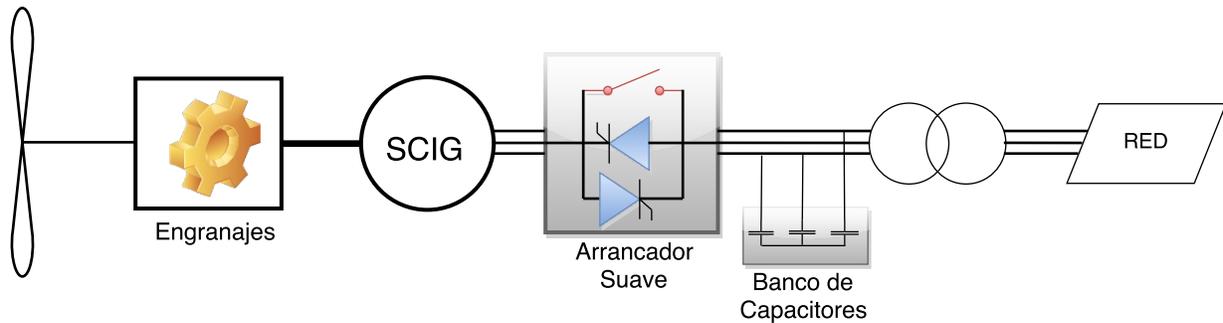


Figura 2.5: Turbina eólica tipo A.

tiristores, limita el valor eficaz de la corriente de entrada a un nivel por debajo de dos veces la corriente nominal del generador, debido a que la conexión al sistema de la red produce transitorios que son de corta duración pero con corrientes de inrush muy altas, lo que causa alteración tanto para la red como para el torque en la transmisión de la turbina eólica [20].

La velocidad en las turbinas tipo A esta fijada a la frecuencia de la red eléctrica. Para cambios bruscos en la velocidad del viento, la inercia mecánica de la transmisión limitara la tasa de cambio en la producción de electricidad [21]. Por otra parte, el arrancador suave además de que no requiere un dispositivo de sincronización, estas soluciones son atractivas debido a los costos y la confiabilidad. Algunos inconvenientes son:

- La turbina eólica tiene que operar a velocidad constante.
- Se requiere una red de energía rígida para permitir el funcionamiento estable.
- Puede requerir una construcción mecánica más costosa con el fin de absorber la alta tensión mecánica, ya que las ráfagas de viento pueden causar pulsaciones de par en el tren de transmisión [20].

Turbina eólica tipo B. La turbina eólica de la figura 2.6, muestra un esquema de una turbina eólica de velocidad variable limitada con la resistencia variable del rotor del generador conocida como optislip [22]. Este modelo emplea un generador de inducción de rotor bobinado y ha sido implementado desde la década de los 90s. El devanado del estator del generador está conectado directamente a la red a través de un convertidor de potencia y un transformador, mientras que el devanado del rotor se conecta en serie con una resistencia controlada [12].

2.2. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS CON SUS RESPECTIVOS GENERADORES Y CONVERTIDORES

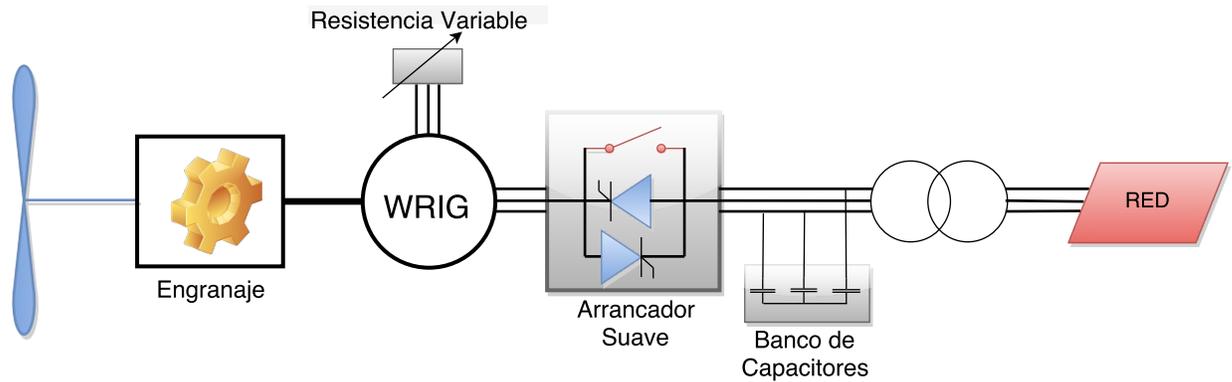


Figura 2.6: Turbina eólica tipo B.

La resistencia del rotor se puede cambiar y por lo tanto controlar el deslizamiento, De esta manera, la salida de potencia en el sistema también se controla [9]. Como en el modelo anterior, este modelo posee también un arrancador suave y la característica única de éste es que posee una resistencia adicional variable en el rotor, que puede ser cambiada por un convertidor controlado ópticamente montado en el eje del rotor y así la resistencia de rotor es controlable. Este acoplamiento óptico elimina la necesidad de costos en anillos deslizante y mantenimiento. La gama del control dinámico de la velocidad depende del tamaño de la resistencia variable del rotor. Por lo general, el rango de velocidad es de 0-10 % por encima de la velocidad de sincronismo [9].

La ventaja en comparación con el SCIG, es que esta configuración tiene una gama más amplia de velocidades superiores a la velocidad síncrona, por lo que es más adecuado, y algunas desventajas como:

- Parte de la energía esencial del rotor se disipa a través de la resistencia externa del rotor.
- Un arreglo por separado del banco de condensadores sigue siendo necesaria para la compensación de energía reactiva.
- Tiene menor eficiencia disminuyendo su viabilidad como un concepto rentable.
- Utiliza una caja de engranajes de etapas múltiples y por tanto es propenso a la ineficiencia y a los defectos mecánicos.

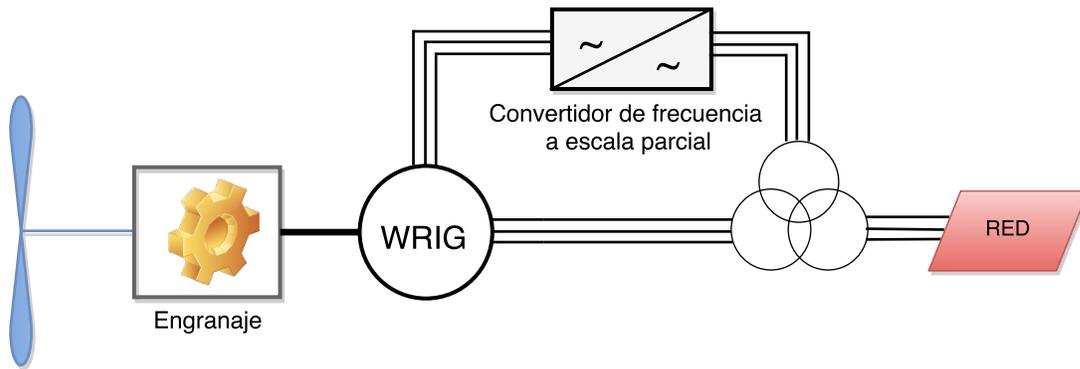


Figura 2.7: Turbina eólica tipo C.

Turbina eólica tipo C. Esta configuración también es conocida como generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), que corresponde a la turbina eólica de velocidad variable limitada con un generador de inducción de rotor bobinado (WRIG) y el convertidor de frecuencia a escala parcial realiza la compensación de potencia reactiva y la conexión a la red de manera más adecuada. Tiene una gama más amplia de control de velocidad dinámico en comparación con el OptiSlip, dependiendo del tamaño del convertidor de frecuencia [9]. Por lo general, el rango de velocidad comprende la velocidad de sincronismo entre -40% a $+30\%$. El convertidor de frecuencia más pequeño hace que este concepto sea más atractivo desde un punto de vista económico. Sus principales inconvenientes son el uso de anillos colectores y la protección en el caso de fallos en la red. [9]

El estator del generador DFIG está conectado a la red directamente, mientras que el rotor está conectado a la red por convertidores electrónicos a través de anillos deslizantes, como se ilustra en la figura 2.7. El generador puede entregar energía a la red en los dos modos de: velocidades súper síncronos y subsíncrono. El deslizamiento es variado con el flujo potencia que fluye a través del circuito electrónico de potencia. La ventaja es que sólo una parte de la producción de energía se alimenta a través del convertidor electrónico de potencia. Por lo tanto, la potencia nominal del sistema de convertidor electrónico de potencia puede ser menor que la potencia nominal de la turbina eólica. En general, la potencia nominal del convertidor puede ser de aproximadamente 30% de la potencia de la turbina, lo que permite una variación de la velocidad del rotor en el intervalo de aproximadamente $\pm 30\%$ de la velocidad nominal. Mediante el control de la potencia activa del convertidor, es posible variar la velocidad de rotación del generador, y por lo tanto la velocidad del rotor de la turbina eólica [20].

2.2. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS CON SUS RESPECTIVOS GENERADORES Y CONVERTIDORES

Cuando el generador funciona en modo súper-síncrono, la potencia se entregará desde el rotor y a través de los convertidores a la red, y cuando el generador funciona en modo de sub-sincrónica, el rotor va a absorber la energía de la red a través de los convertidores [7]. Emplea convertidor AC/AC basado en transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), y ofrece las siguientes ventajas [12]:

- Reduce el costo de inversión, porque el inversor es del 30 % de la potencia nominal del sistema.
- Mejora la eficiencia del sistema.
- El control del factor de potencia se puede implementar a un menor costo sin usar un banco de capacitores.
- Tiene un control completo de la potencia nominal activa y reactiva.

2.2.1. Turbina eólica tipo D

En esta sección hablaremos del tipo de turbina eólica que emplearemos como objeto de investigación en este trabajo. La turbina eólica tipo D, corresponde a la turbina completa de velocidad variable del viento, con el generador PMSG conectado a la red a través de un convertidor de frecuencia a gran escala. El convertidor de frecuencia realiza la compensación de potencia reactiva y la conexión a red de manera suave [9], el modelo completo de la turbina se puede ver en la figura 2.8.

Algunos sistemas de aerogeneradores de velocidad variable no tienen caja de engranajes, en estos casos, se utiliza un generador multipolar accionado directamente con un diámetro mayor [9].

También llamada turbina eólica con convertidor completo (por sus siglas en inglés FCWT), actualmente hay una alta gama de tecnologías en generadores eólicos que compiten por el mercado en esta industria en crecimiento y la FCWT es una de ellas. El generador se desacopla efectivamente de la red, mejorar la respuesta de fallo, permite que la turbina funcione en un amplio rango de velocidad, lo que mejora la extracción de la energía del viento. El convertidor interconecta la turbina a la red y tiene que manejar toda la producción del generador (a diferencia de una turbina DFIG donde el convertidor sólo se ocupa de 30 % a 40 % de la salida del generador y por lo tanto es más costoso y con pérdidas), también proporciona más capacidad para suministrar potencia reactiva a la red. El PMSG en sí no tiene devanados

del rotor, reduciendo las pérdidas de excitación y la reducción del tamaño de la unidad de generación con respecto a tecnologías competidoras pues no posee anillos colectores del rotor y reduce los requisitos de mantenimiento. Esta combinación de factores está impulsando la creciente inclusión de la FCWTs, especialmente para las plantas de energía eólica en alta mar [19].

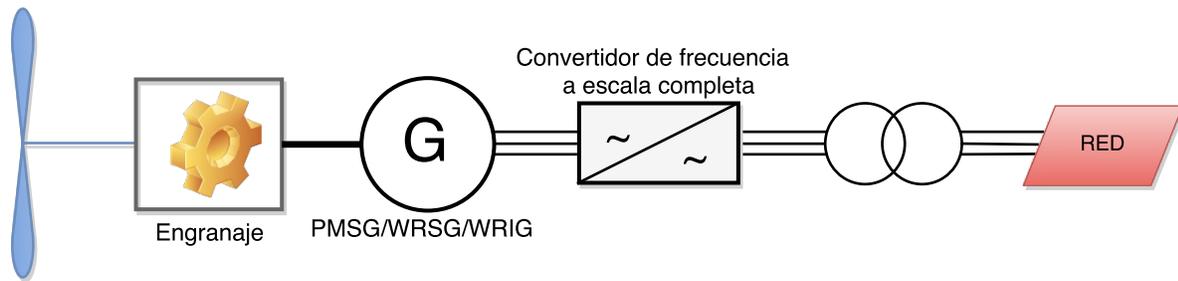


Figura 2.8: Turbina eólica tipo D.

2.3. Generador síncrono de Imanes Permanentes (PMSG).

En esta sección hablaremos del generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) y de su modelo a emplear. Un PMSG es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema de imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante.

Los PMSG, actualmente son una buena alternativa para la generación eólica, debido a las mejoras en las aleaciones de la remanencia magnética. El uso de imanes permanentes presenta las siguientes ventajas: son mucho más eficientes que los generadores de inducción, ya que la corriente de magnetización no es parte de la corriente del estator, otra gran ventaja es que se elimina los anillos deslizantes y las pérdidas en el rotor. La importancia de un sistema eólico de velocidad variable equipado con un PMSG radica en su capacidad para cumplir con los requisitos aerodinámicos en el rango de velocidades.

Para mantener la relación de velocidad en su grado óptimo, la velocidad del rotor de turbina eólica varía proporcional a la velocidad del viento. Esto proporciona independencia de velocidad del rotor de las condiciones de carga. Y una Amplia gama de velocidades

de funcionamiento, mayores que cero a la velocidad nominal, algo benéfica para efectos de control.

Otra ventaja es la regulación de voltaje que es manejado por el lado del convertidor, aparte de eso las alteraciones dinámicas de la red y la turbina eólica están aislados unos de otros y el PMSG no está en riesgo de perder sincronismo.

Por otra parte también existen algunas desventajas como alto costo de la máquina, desmagnetización de los imanes al exponerse a altas temperaturas y dificultad para manipularse debido a su gran tamaño [14].

2.3.1. Modelo del Generador PMSG en Régimen Permanente.

El PMSG puede ser descrito eléctricamente en régimen permanente usando el circuito equivalente del generador, figura 2.9, el modelo supone que la saturación es despreciada, las fem inducidas son sinusoidal, las corrientes de Foucault y las pérdidas por histéresis son insignificantes, además se considera que las bobinas de las tres fases son simétricas (las tres poseen iguales valores de R y L), también que las corrientes son balanceadas ($i_a=i_b=i_c=0$) y que no hay dinámica actual de campo. De esta manera, las ecuaciones de voltaje para la PMSG están dadas por [23, 19]

$$v_i = R_m \cdot i_i + L \cdot \frac{di_i}{dt} \quad (2.9)$$

Con subíndice $i=a,b,c$. Así para las tres fases tenemos:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = (R_m + L \frac{d}{dt}) \begin{bmatrix} i_{am} \\ i_{bm} \\ i_{cm} \end{bmatrix}$$

Donde v_a, v_b, v_c son los voltajes en el estator, L y R son las inductancia y la resistencia respectivamente [23].

Además los voltajes aplicados desde los terminales del estator de la máquina al convertidor son voltajes trifásicos balanceados, de tal manera que al simplificar el modelo y escribir la ecuación en términos de ω_{elec} y considerando el flujo magnético ϕ_m como $\phi_m=L\frac{di}{dt}$, y reescribiendo la ecuación 2.9, tenemos lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = (\phi_m \cdot \omega_{elec}) \begin{pmatrix} \cos(\omega_{elec} \cdot t) \\ \cos(\omega_{elec} \cdot t - 120) \\ \cos(\omega_{elec} \cdot t + 120) \end{pmatrix}$$

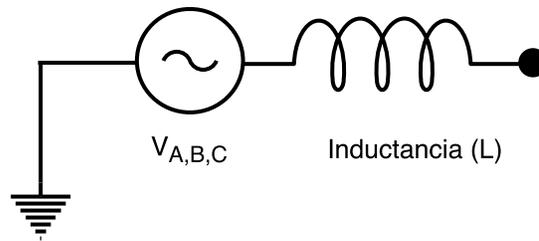


Figura 2.9: Modelo simplificado del generador síncrono

Definida la ecuación de los voltajes, podemos definir también la ecuación de potencia eléctrica que relaciona los voltajes junto con las corrientes, así:

$$P_{elec} = V_A \cdot I_A + V_B \cdot I_B + V_C \cdot I_C \quad (2.10)$$

Asumiendo un factor de potencia unitario, podemos definir las corrientes como:

$$I_A = I_m \cdot \cos(\omega_{elec} \cdot t) \quad (2.11)$$

$$I_B = I_m \cdot \cos(\omega_{elec} \cdot t - 120) \quad (2.12)$$

$$I_C = I_m \cdot \cos(\omega_{elec} \cdot t + 120) \quad (2.13)$$

Donde I_m es la corrientes de fase y finalmente definimos la ecuación de potencia de salida del sistema, de la siguiente manera:

$$P_{sal} = 3 \cdot V_{fase} \cdot I_m \quad (2.14)$$

2.4. Convertidores AC/AC usados en turbinas eólicas tipo D.

Existen varios tipos de convertidores de frecuencia tipo AC/AC como se puede apreciar en la figura 2.10.

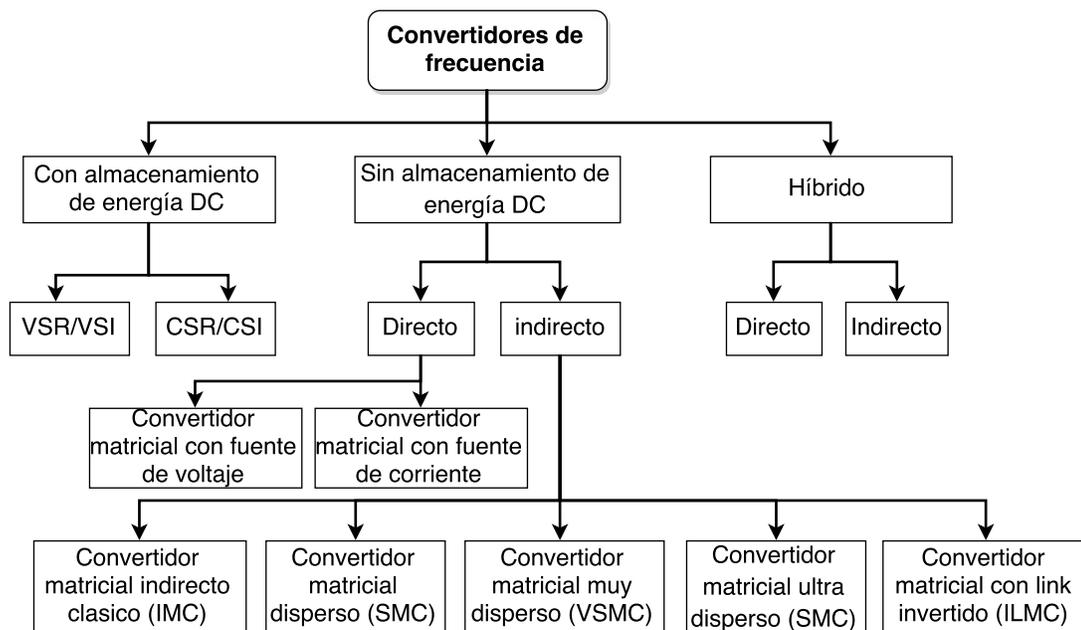


Figura 2.10: Tipos de convertidores de frecuencia AC/AC PWM

Entonces para este caso emplearemos convertidores de frecuencia sin almacenamiento de energía DC, con convertidor matricial con fuente de corriente e híbrido directo. Por esta razón solo se hace énfasis en este tipo de convertidores. [24] También conocidos como:

1. **Cicloconvertidores.**[25] En las aplicaciones industriales se utilizan dos formas de energía eléctrica: corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Usualmente, voltaje constante, frecuencia constante 3ϕ o 1ϕ AC. Sin embargo para diferentes aplicaciones, diferentes formas, magnitudes y/o frecuencias son necesarias. Los cicloconvertidores pueden ser monofásicos o trifásicos AC con magnitud y frecuencia variable. [26]

Tradicionalmente la conversión de corriente AC-AC utiliza interruptores semiconductores y se puede hacer en una etapa (es decir de AC-AC). Por lo general son de fase

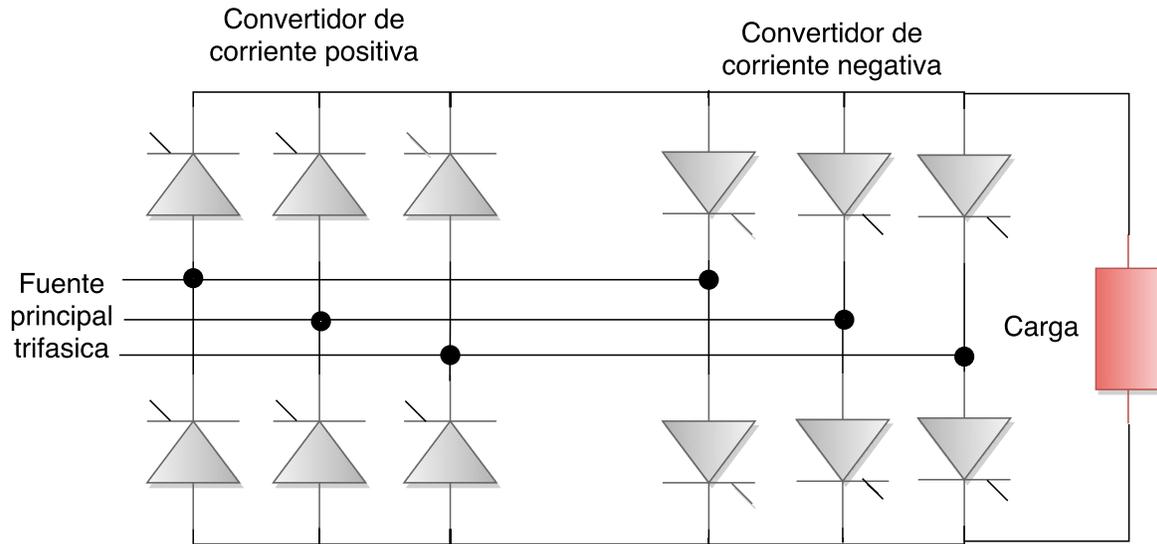


Figura 2.11: Cicloconvertidor 3ϕ a 1ϕ

controlada y el uso de tiristores es debido a su facilidad de conmutación de fase [25]. La figura 2.11 ilustra el modelo del cicloconvertidor de una sola fase, es decir para una carga monofásica, también los hay del tipo trifásico y para ello solo se debe de emplear tres de estos y desfasar las fuentes entre si 120° . Está conformado por un conjunto de semiconductores de fase controlada conectados en antiparalelo, de 6 pulsos, tres de estas unidades son necesarias para conducir en la carga, ya que son tiristores unidireccionales que permiten flujo de corriente en una sola dirección y la disposición en la que se encuentran es debido a que hay corrientes (+i, -i) y voltajes (+v). La salida del cicloconvertidor se modula para proporcionar alimentación de CA a una frecuencia generalmente inferior a la frecuencia de la fuente, además se tiene la facilidad para el control continuo tanto su frecuencia, salida y el voltaje, independientes uno del otro, y es capaz de operar con cargas de cualquier factor de potencia, incluyendo cargas regenerativas, en sus terminales de salida. Por lo tanto, la energía puede fluir ya sea desde la entrada al lado de salida, o viceversa. Siempre presenta retraso de potencia reactiva en el lado de la entrada, independientemente del factor de potencia de la carga [26, 27].

Tiene diferentes campos de aplicación:

- Control de velocidad y frecuencia variable para máquinas de corriente alterna.
- Frecuencia constante para fuentes de alimentación.
- Fuentes de potencia reactiva controlable para sistemas AC.

2. **Convertidor de frecuencia AC-AC híbrido.** Un convertidor híbrido es un sistema de conversión más complejo que consta de un convertidor de potencia principal que procesa la mayor parte de la potencia entregada a la carga interconectado con uno auxiliar, más versátil, el procesamiento de sólo una fracción de la potencia, con el propósito de mejorar la eficiencia del convertidor principal y/o mitigar algunos de sus inconvenientes [28].

La configuración híbrida es con el fin de obtener una ganancia de voltaje mayor a uno, es la combinación del convertidor de frecuencia AC-AC y pequeños elementos almacenadores de energía DC. Todos los convertidores de frecuencia híbridos incluyen un elemento de almacenamiento de energía DC, pero de pequeñas dimensiones. Las topologías son más complejas y las estrategias de modulación y de conmutación también son complejas, Por otra parte, este convertidor puede proporcionar el control reductor-elevador de la amplitud de la tensión de salida y puede operar con factores de potencia arbitrarios [24].

Es posible implementar un convertidor matricial híbrido de dos maneras diferentes: con convertidor matricial (MC) y con convertidor matricial indirecto (IMC). La primera solución es conectar un inversor de puente en H en serie con cada una de las salidas de MC como se muestra en la figura 2.12, esta topología permite un control de tensión de subida o de bajada. Esta solución tiene una seria desventaja relacionada con el elevado número de semiconductores de potencia y condensadores del circuito intermedio, para mejorar la ondulación de potencia (dos veces la frecuencia de salida) que es característico de un inversor monofásico, por otra parte, estas topologías de convertidores de nuevo tienen elementos de almacenamiento de energía (por ejemplo, condensadores electrolíticos) que reducen su tiempo de vida. La segunda solución está relacionada con IMC y resuelve los dos inconvenientes más importantes de la relación de transferencia de tensión del IMC igual a 0,866. Y consiste en la introducción de una alimentación de tensión auxiliar en la forma de un inversor de puente en H en el eslabón intermedio del IMC, con el fin de compensar el déficit de tensión. De esta manera, se obtiene un aumento del voltaje de salida. La estructura de un IMC híbrido con puente H se muestra en la figura 2.13, sin embargo, estas topologías de convertidores también tienen elementos de almacenamiento de energía y su construcción requiere un trabajo considerable [24].

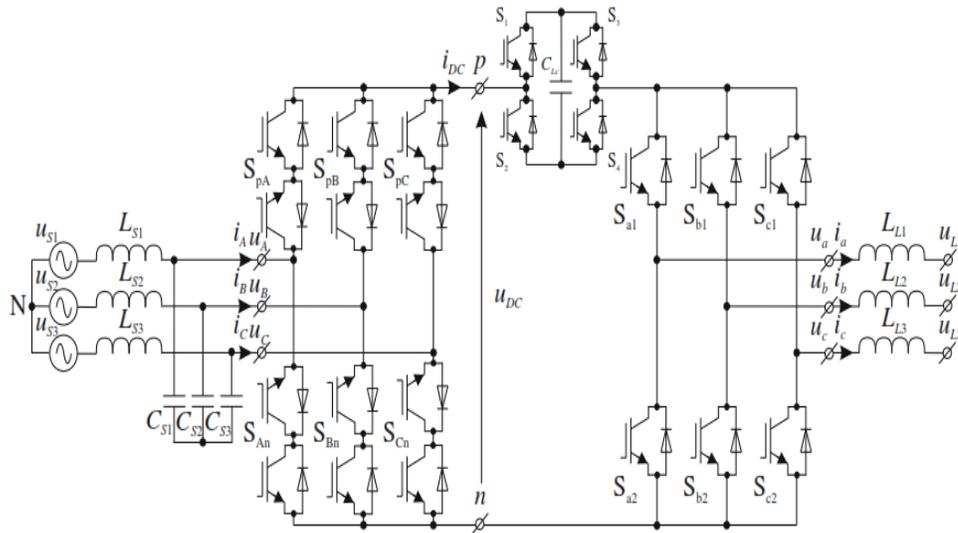


Figura 2.12: Convertidor de frecuencia AC-AC híbrido con MC [28]

3. **Convertidor de frecuencia AC-AC: convertidor matricial.** Como se mencionó anteriormente, los grupos de convertidores de frecuencia directos incluyen estructuras de convertidores matriciales (MC). El MC, dependiendo del tipo de fuente de alimentación (tensión o corriente), puede funcionar como un convertidor de matricial con fuente de tensión (VSMC) o un convertidor de matricial con fuente de corriente (CSMC) [24, 27].

Naturalmente la conmutación en los cicloconvertidores tiene limitaciones en el rango de salida de la frecuencia, factor de potencia de entrada, y la distorsión de formas de onda a la entrada y salida. Una conmutación forzada en un cicloconvertidor puede superar muchas de estas limitaciones. El convertidor matricial de CA-CA puede proporcionar un mayor rango de frecuencia de salida y baja distorsión de las corrientes de entrada y de salida. El convertidor matricial fue propuesto por primera vez a inicios de la década de 1980. Se compone de 9 interruptores bidireccionales que conectan las 3 fases de entrada a las 3 fases de salida directamente como se muestra en la Figura 2.14. Cualquier fase de entrada se puede conectar a cualquier fase de salida en cualquier momento dependiendo del control. Estos convertidores son generalmente controlados por PWM para producir 3-fase de voltaje variable a frecuencia variable.[25, 27]

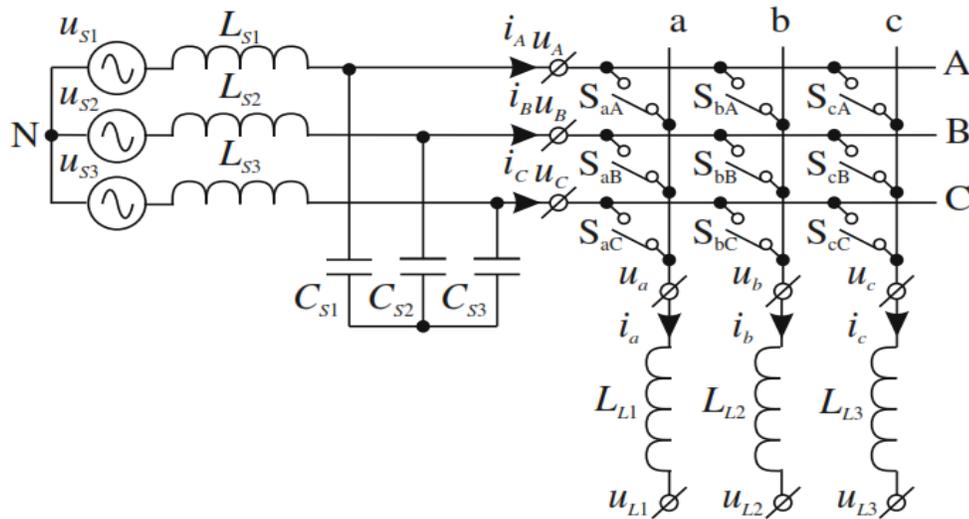


Figura 2.13: Convertidor de frecuencia AC-AC híbrido con IMC [28]

Generalmente, el convertidor de matricial es un convertidor de una sola etapa, que tiene una matriz de $m \times n$ interruptores de potencia bi-direccionales para conectar directamente a una fuente de voltaje de m -fases a una carga de n -fases[24].

4. **Convertidor de frecuencia AC-AC: convertidor matricial (MC) híbrido.** El rango limitado en el control de tensión en los MC (CMC o IMC) es una significativa desventaja en comparación con los convertidores con almacenamiento de energía ya sea de voltaje o de corriente. Por lo tanto la combinación de los MC y los VBBC (Convertidor back to back de voltaje) dan origen a los llamados MC híbridos ya que esta combinación supera la limitación antes mencionada. Sin embargo, estas nuevas topologías de convertidores requieren elementos de almacenamiento de energía (por ejemplo, condensadores) y suelen tener un número de componentes de gran tamaño. Si los switches del CMC se sustituyen por puentes H en cascada con condensadores a la salida, entonces tenemos una configuración del CMC híbrida (HMC). Esta configuración como se muestra en la figura 2.15 y permite aumentar o disminuir la operación del convertidor, y no se requiere de una fuente de alimentación externa para hacer que conmuten las celdas de switches pues es suficiente con un esquema de modulación

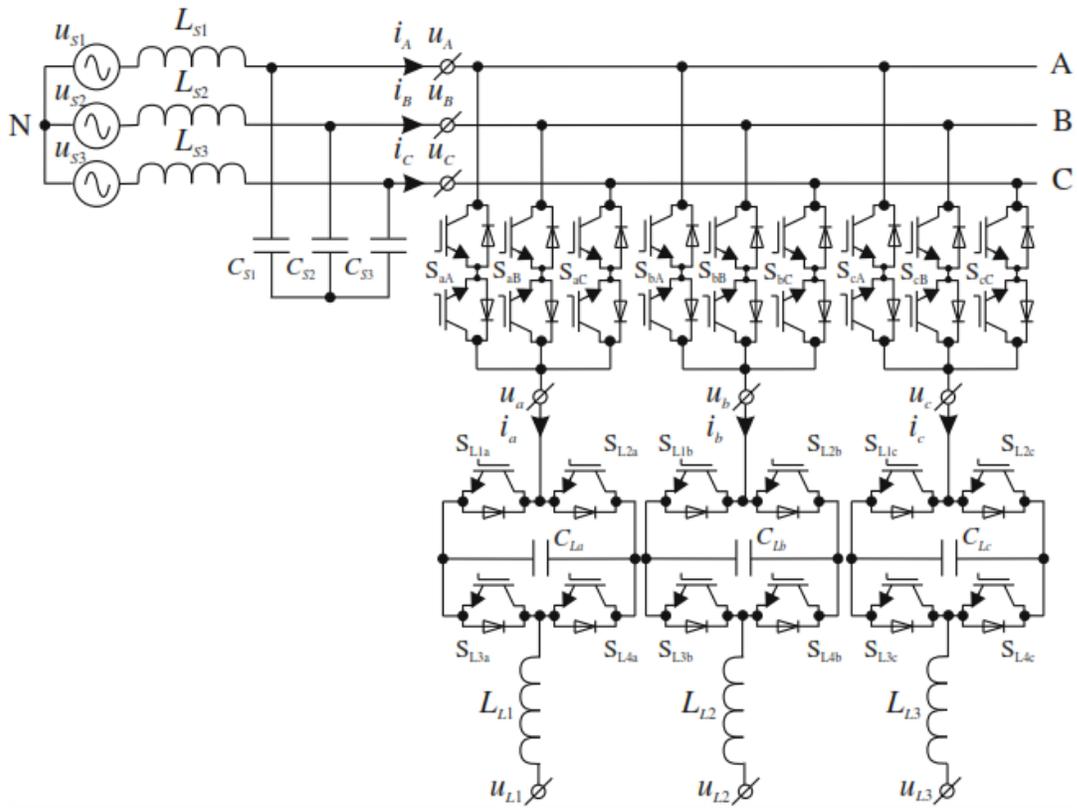


Figura 2.14: Circuito trifasico(3ϕ) simplificado del Convertidor matricial MC

adecuado, además, a diferencia de todas las topologías discutidas previamente en el HMC se puede controlar de acuerdo por el uso de al menos cinco semipuentes. [2].

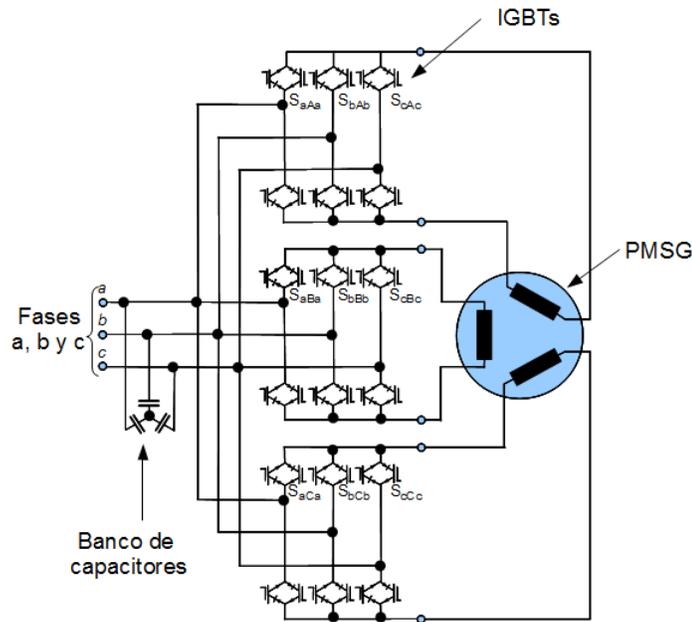


Figura 2.15: convertidor matricial híbrido

5. Convertidor matricial híbrido con fuente de corriente CSMC y de tensión VSMC.

Como se mencionó anteriormente, el MC depende de la fuente de alimentación (tensión o corriente) que utiliza un convertidor matricial con fuente de tensión (VSMC) o un convertidor matricial con fuente de corriente (CSMC) respectivamente. En el caso ideal, el convertidor matricial con fuente de corriente se compone de una entrada de corriente en el lado de entrada y una fuente de tensión en el lado de salida [2].

En la realización práctica del CSMC, el convertidor incluye nueve celdas de conmutación bidireccionales y tres condensadores de CA que se encuentran en el lado de la carga del convertidor. También incluye una fuente de corriente trifásica, una fuente ideal de tensión (U_{S1}, U_{S2}, U_{S3}) en serie con una impedancia R-L por fase. Figura 2.16 muestra la topología de un CSMC [2].

La relación entre las corrientes del lado de la fuente de convertidor, del lado de la carga y los voltajes es el objetivo principal de CSMC y es para controlar directamente la magnitud,

frecuencia y ángulo de fase de la corriente de carga. Por otra parte, indirectamente, se controla la tensión de salida. Es posible obtener una ganancia de voltaje mayor que uno. La ganancia de voltaje depende estrictamente de la carga. El CSMC también controla el ángulo de fase de las tensiones (U_A , U_B y U_C) en el lado de entrada de los conmutadores matriciales. De esta manera, es posible controlar el factor de potencia de la entrada [2].

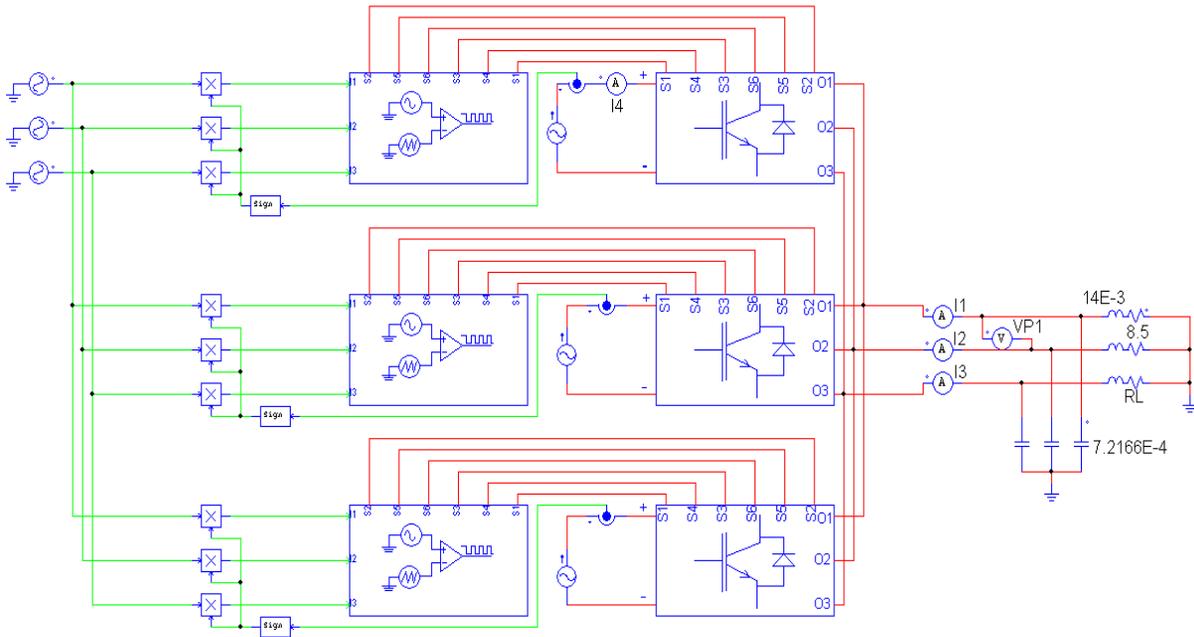


Figura 2.16: convertidor matricial híbrido VSMC y CSMC

En [24] la relación del convertidor en el lado de la fuente y en el lado del carga para la corriente y la tensión es:

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{aA}(t) & S_{bA}(t) & S_{cA}(t) \\ S_{aB}(t) & S_{bB}(t) & S_{cB}(t) \\ S_{aC}(t) & S_{bC}(t) & S_{cC}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{aA}(t) & S_{aB}(t) & S_{aC}(t) \\ S_{bA}(t) & S_{bB}(t) & S_{bC}(t) \\ S_{cA}(t) & S_{cB}(t) & S_{cC}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix}$$

Un inconveniente de CSMC es que la ganancia de tensión es dependiente de cambio de carga. En grandes cargas, las tensiones de salida pueden ser mucho más pequeño que las de entrada [2].

2.5. Convertidor Matricial Híbrido AC/AC.

En esta sección hablaremos sobre el tipo de convertidor a emplear y también se hace énfasis en el modelo del convertidor. El modelo a emplear será el convertidor AC-AC directo basado en convertidor matricial con fuente de corriente (CSMC) como lo ilustra la figura 2.17

El convertidor matricial híbrido es un convertidor de potencia AC-AC directo que puede operar con salida sinusoidal, voltaje de entrada y corrientes sin necesidad de componentes pasivos (resistencias, condensadores e inductancias) almacenadores de energía, lo que significa que son redes amigables y tienen un gran potencial para la reducción de peso y volumen [28].

La figura 2.17 muestra el diagrama esquemático de la topología del convertidor AC-AC propuesto. Se compone de tres módulos de convertidores con fuente de corriente, debemos aclarar que los módulos hacen referencia al conjunto de IGBTs en grupos de 6. En el lado del filtro LC los módulos están conectados en paralelo a lo que será la fuente AC debido a que allí se conectara el generador PMSG. En el lado de las fuentes de corrientes I_{AC} los módulos CSC son conectados a una carga trifásica además cada módulo CSC es controlado mediante tres fuente sinusoidal de voltaje de amplitud deseada, frecuencia y ángulo de fase, para producir una corriente AC controlada y las componentes de corriente AC están desfasadas 120° una con respecto a la otra. El documento [29] usan un transformador de 6 terminales y conexión delta, pero hay que aclarar que trabajan con corrientes DC en un lado de los módulos CSC y por esta razón no hay problemas con la saturación en el transformador. En nuestro caso no emplearemos este tipo de transformador ya que no se tiene corrientes DC sino AC en los módulos y hace que exista saturación en el transformador y para evitar inconvenientes mejor no se emplea [29].

La topología propuesta no tiene ningún problema de conexión, y en consecuencia, no requiere de la implementación de algoritmos de múltiples pasos para la conmutación, o el uso de elementos snubber (RC) para rectificar los problemas de conexión. La topología propuesta se basa en los módulos de conversión estándar que se han ido mejorando a través del paso de los años, tanto en el diseño de hardware como en la técnica de control. La topología propuesta

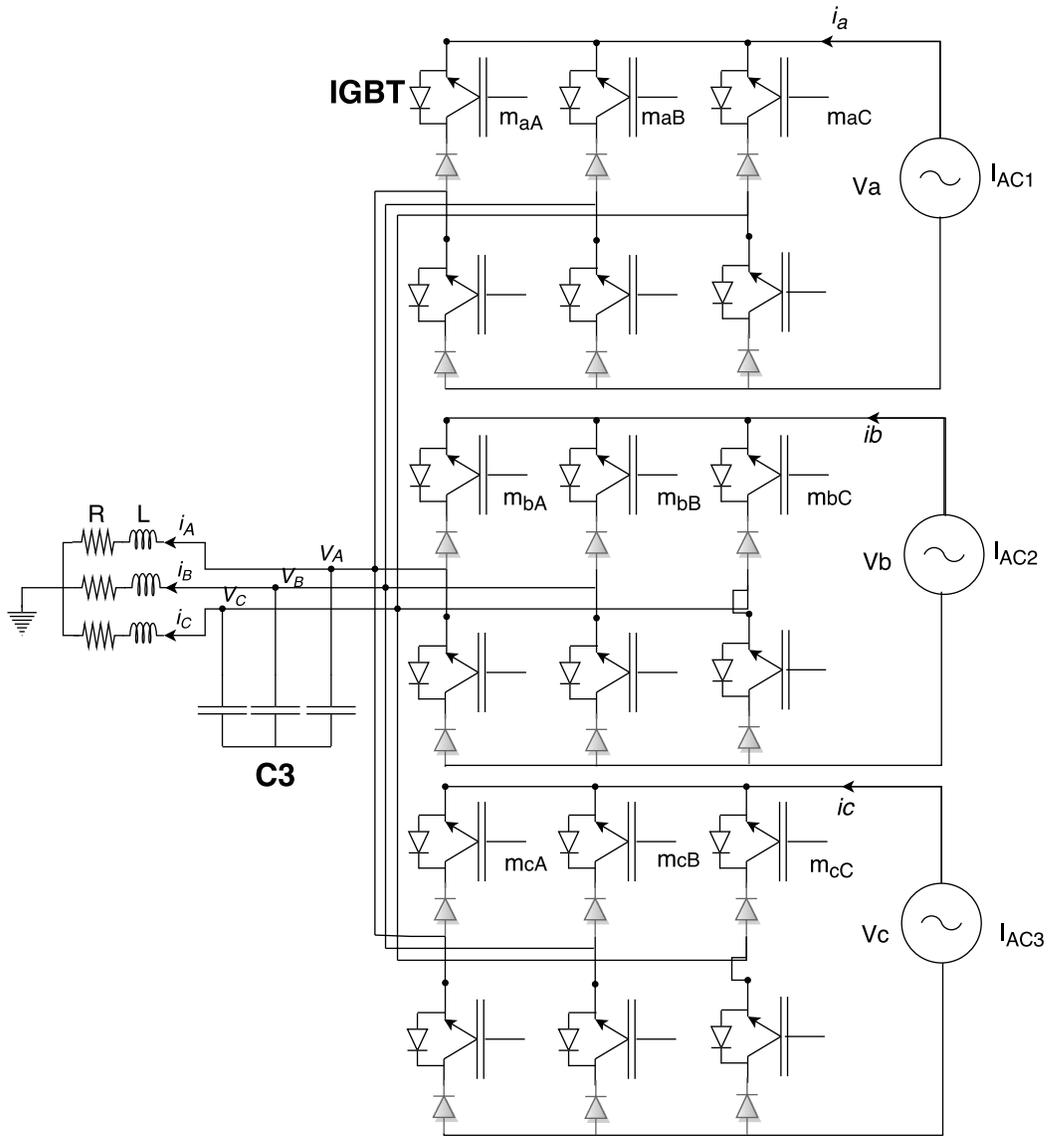


Figura 2.17: Convertidor matricial híbrido directo 3 ϕ con fuente de corriente CSMC [2, 29, 24]

proporciona un alto grado de controlabilidad debido a la disponibilidad de un elevado número de elementos de control. Lo que facilita y simplifica la implementación de sistemas de control en lazo cerrado para el flujo de potencia activa, reactiva y la conformación de la onda [29].

2.6. Aplicaciones del Convertidor AC/AC.

2.6.1. Aplicaciones del Controlador de Voltaje AC.

Los controladores de voltaje AC son usados ya sea para el control de los valores de voltaje rms o control de corrientes en iluminación, calefacción doméstica e industrial, control de velocidad de ventiladores, bombas o accionamiento de elevadores, arranque suave de motores de inducción, también en interruptores AC estáticos (on=off de control) en transformadores con cambio de tap, control de temperatura, estabilización de la velocidad de las unidades de motores de inducción de alta inercia, como la centrífuga, el condensador de conmutación de compensación de potencia reactiva estática, y así sucesivamente [27].

Los controladores de voltaje AC están siendo usados cada vez más para arrancadores suaves de motores de inducción, ya que tienen mayor ventaja sobre los arrancadores convencionales, tales como aceleración y desaceleración suave, facilidad en la implementación del control de corriente, protección monofásica u operación desequilibrada, disminuye el mantenimiento y las pérdidas y la ausencia de las corrientes de inrush [27].

2.6.2. Aplicaciones del Convertidor Matricial.

Las aplicaciones de los convertidores matriciales, actualmente es muy limitada, por las siguientes razones [27]:

- Poca disponibilidad de los switches monolíticos controlados capaces de funcionar a altas frecuencias.
- Implementación compleja de las leyes de control.
- Una limitación intrínseca de la relación de voltaje salida-entrada.
- La conmutación y protección de los switches.

Por otra parte las aplicaciones del convertidor matricial híbrido son similares a las del cicloconvertidor y se menciona a continuación.

- **Variadores de velocidad en unidades AC:** es adecuado para motores de inducción y motores síncronos. En motores síncronos están siendo empleados en el arranque a bajas velocidades y con alto torque en parada, y en mezcladores de cemento de alta capacidad sin engranajes (5MW) han sido las primeras aplicaciones de estas unidades [27].
- **Fuentes de alimentación de frecuencia constante.** Algunas aplicaciones, tales como aviones y buques de guerra necesitan una potencia de salida de frecuencia constante bien regulada de una fuente de alimentación de CA de frecuencia variable. Por ejemplo, en la conversión de energía de la aeronave, el generador conectado al motor que funciona a una velocidad variable de 10000 a 20000 rpm y proporciona una potencia de salida de frecuencia variable en un rango de 1200 a 2400 Hz, que se puede convertir a una frecuencia fija regulada con precisión para una potencia de salida a 400 Hz a través de un cicloconvertidor con un filtro adecuado colocado dentro de un bucle cerrado. Las tensiones de salida del cicloconvertidor son proporcionales a la frecuencia fija (400 Hz) del generador de tensión de referencia de onda sinusoidal en el circuito [27].
- **Generación de VAR estática.** Los cicloconvertidores con alta frecuencia (HF), ya sea un generador de HF o un arreglo LC oscilante, se pueden utilizar para la generación de potencia reactiva y control, en sustitución de condensadores sincrónicos o condensadores conmutados. Si el cicloconvertidor se controla para generar ondas de tensión de salida cuyos componentes deseados están en fase con las tensiones de la red correspondientes, la potencia reactiva se puede suministrar en cualquier dirección para sistemas de aire acondicionado por control de amplitud de los voltajes de salida. El cicloconvertidor absorberá corriente del sistema de corriente alterna cuando su tensión de salida es mayor que el de la tensión del sistema y viceversa [27].

Capítulo 3

Modulación y control del convertidor matricial híbrido.

En este capítulo se tratará los temas de modulación y control de convertidor AC/AC que se clasifican como convertidores con fuente de voltaje (VSC) y los convertidores con fuente de corriente (CSC). Los VSC se reservan para aplicaciones en baja y mediana potencia y los CSC se usan en sistemas de alta potencia.

Adicionalmente se debe considerar la técnica de modulación que activara los elementos de conmutación, que para este caso son IGBTs debido a que se desea controlar la forma de onda de la señal de salida AC, así como su nivel de tensión y frecuencia.

Las técnicas de modulación se pueden clasificar en escalares o PWM (Pulse Width Modulation), y vectoriales SVM (Space Vector Modulation). Entre las técnicas escalares se encuentran la técnica de modulación de onda cuadrada, técnica de modulación sinusoidal, técnica de modulación sinusoidal con tercer armónico, entre otras; divisibles a la vez con técnica de modulación basadas en portadora triangular.

3.1. Técnica de Modulación PWM.

Se emplea en inversores monofásicos o trifásicos. Su principio de funcionamiento se basa en la comparación de una señal de referencia y una señal portadora de forma triangular o diente de sierra (figura 3.1), donde S_1 es la señal sinusoidal de referencia, T_1 es la señal portadora y C_1 es el tren de pulsos generados. La comparación de las dos señales genera un tren

de pulsos de ancho específico según sea la frecuencia de la señal portadora que se utiliza en la conmutación del puente convertor.

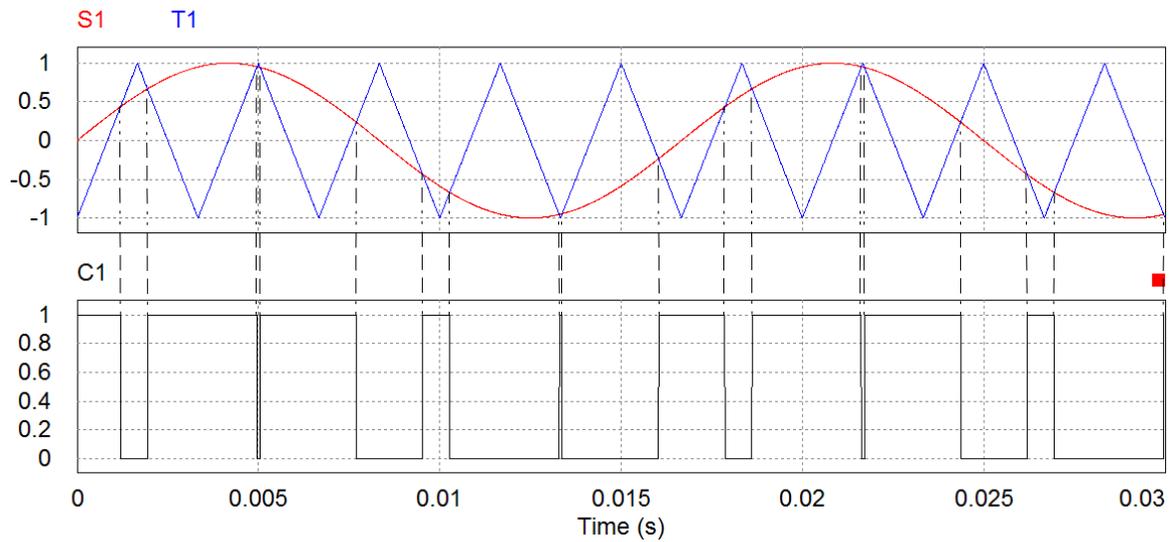


Figura 3.1: Modulación PWM

La relación que hay entre la amplitud de la señal portadora y la señal de referencia se llama índice de modulación y se representa por m_a , también se define A_r como la amplitud de la señal de referencia y A_c como la amplitud de la señal portadora. El índice de modulación es una relación que nos permite obtener tensiones variables a la salida del inversor y definimos la siguiente relación para el índice de modulación.

$$m_a = \frac{A_r}{A_c} \quad (3.1)$$

Así como existe una relación entre la amplitud, también existe una relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de la señal de referencia y esta se denomina índice de frecuencia y se representa por m_f , el índice de frecuencia indica la distorsión armónica de la señal de salida la cual es una medida del contenido armónico. Se define por la siguiente relación.

$$m_f = \frac{F_r}{F_c} \quad (3.2)$$

Donde F_r es la frecuencia de la señal de referencia y F_c es la frecuencia de la señal portadora. Las diferentes técnicas de modulación en cuanto a la variación de la señal de referencia y la secuencia de conmutación dan como resultado la modificación de la eficiencia de conversión, las pérdidas en la conmutación en el puente de IGBTs y puede hacer que la señal sea más apropiada, es decir, que no tenga un alto contenido de distorsión.

3.1.1. Operación y Modulación PWM en el Convertidor CSC.

El principal objetivo del este convertidor estático de potencia es producir una forma de onda de corriente sinusoidal AC a la salida desde una fuente de corriente AC. para la salida sinusoidal AC esta magnitud, frecuencia y fase deberían ser controlables, debido al hecho de que las corrientes de línea i_{0a} , i_{0b} y i_{0c} , fig 4.3 cuentan con un alto $\frac{di}{dt}$, un filtro capacitivo que debe ser conectado a los terminales de la salida del CSC en aplicaciones de carga inductiva. Así, las tensiones de carga casi sinusoidales se generan lo que justifica el uso de estas topologías con aplicaciones industriales de media tensión, donde se requieren formas de onda de tensión de alta calidad. Aunque se analice para el caso monofásico, puede de la misma manera analizarse como topología CSC trifásico ya que se desarrolla bajo principios similares, solo las aplicaciones trifásicas son de uso práctico y se analizan a continuación [27].

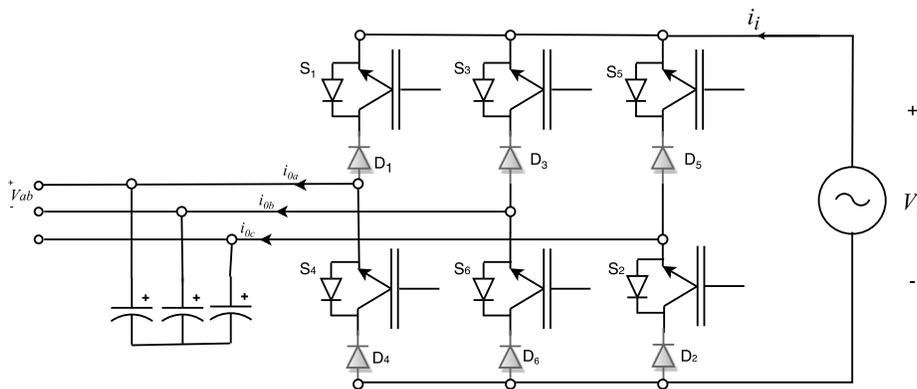


Figura 3.2: Convertidor con fuente de corriente monofásico.

38CAPÍTULO 3. MODULACIÓN Y CONTROL DEL CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO.

En un orden apropiado de conmutación de los interruptores de potencia de un CSC trifásico, siempre se deben cumplir dos limitaciones:

- El lado de corriente alterna principalmente es capacitivo, por lo tanto no puede ser cortocircuitado, esto implica que a lo sumo un interruptor de la parte superior (1, 3 o 5) y un interruptor de la parte inferior (4, 6 o 2) debe ser cerrado en cualquier momento.
- El lado de la fuente es de tipo fuente de corriente y por lo tanto no puede haber circuito abierto; por esta razón debe haber al menos un interruptor superior (1, 3 o 5) y un interruptor inferior (4, 6 o 2) cerrado en todo momento.

Lo anterior se puede resumir diciendo que en cualquier momento solo un interruptor de la parte superior y un interruptor de la parte inferior deben estar cerrados. Hay nueve estados validos en un CSC trifásico, los estados 7, 8 y 9 tabla 3.1 producen corrientes de línea AC nulas. En este caso, en que existan corrientes DC-link quedan libres a través de cualquiera de los interruptores S_1 y S_4 , interruptores S_3 y S_6 , interruptores S_5 y S_2 . Los estados restantes (del 1 al 6 en la tabla 3.1) producen corrientes AC desfasadas diferentes de cero, con el fin de generar un conjunto de formas de ondas de corrientes AC, el inversor debe de pasar de un estado a otro. Por lo tanto, las corrientes de linea resultantes consisten en valores discretos de corriente, que son i_i , 0 e $-i_i$. La selección de los estados es con el fin de generar las formas de onda, se realiza mediante la técnica de modulación que debe garantizar el uso de los estados validos [27].

Tabla 3.1: Estados de conmutación válidos para un CSC trifásico

Estado	Estado #	i_{0a}	i_{0b}	i_{0c}	Vector
1 y 2 on, 3,4,5 y 6 off	1	1		0	$I=1+j0.5$
2 y 3 on, 4,5,6 y 1 off	2	0		-	$I=j1.155$
3 y 4 on, 5,6,1 y 2 off	3	-		0	$I=-1+j0.5$
4 y 5 on, 6,1,3 y 4 off	4	-	0		$I=1-j0.5$
5 y 6 on, 1,2,3 y 4 off	5	0	-		$I=-j1.155$
6 y 1 on, 2,3,4 y 5 off	6		-	0	$I=1-j0.5$
1 y 4 on, 2,3,5 y 6 off	7	0	0	0	$I=0$
3 y 6 on, 1,2,3 y 4 off	8	0	0	0	$I=0$
5 y 6 on, 2,3,4 y 5 off	9	0	0	0	$I=0$

Existen varias técnicas de modulación que se ocupan de las necesidades especiales de los CSC y se puede implementar online. Estas técnicas se clasifican en tres categorías:

- La portadora.

- Eliminación selectiva de armónicos.

- Las técnicas basadas en el vector espacio.

Aunque son diferentes, generan señales de disparo que satisfacen las necesidades especiales de los CSC.

3.1.2. Portadora basada en técnicas PWM en CSC

Se ha demostrado que las técnicas PWM que eran desarrolladas para VSC trifásicos pueden ser empleados para CSC trifásicos. El circuito mostrado en la figura 3.3, obtiene un patrón de conmutación desarrollado para un CSC desde el patrón desarrollado para un VSC, como resultado la corriente de línea parece ser idéntica a la tensión de línea VSC para modulación de señales y portadora similar, está compuesto de un generador de pulsos de conmutación (etapa 1), un generador de pulsos de cortocircuito (etapa 3), un distribuidor de pulsos de cortocircuitos (etapa 2), un combinador de conmutación y pulsos de cortocircuito (etapa 4) [27]

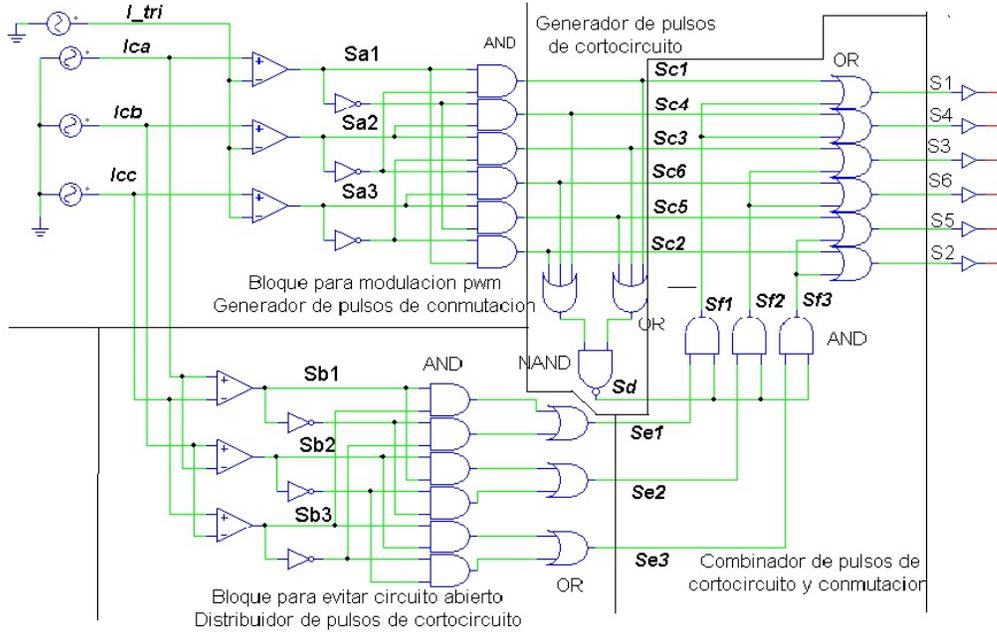


Figura 3.3: Control por etapas.

El circuito básicamente produce las señales de disparo $[S]_{1..,6} = [S_1...S_6]^T$ de acuerdo con la portadora i_Δ (ver tabla 3.2) y las tres señales de modulación $[i_c]_{a,b,c} = [i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}]^T$ (ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 respectivamente) por lo tanto, cualquier conjunto de señales de modulación que al combinarse resulta en una señal sinusoidal línea-línea, va a satisfacer el requerimiento para un patrón de corrientes sinusoidal de línea. Los ejemplos de un tipo de señales de modulación son las sinusoidales con inyección de tercer armónico, trapezoidal y formas de onda de banda muerta [27]

El modelo de las fuentes de modulación sinusoidales, así como sus parámetros son mostrados a continuación.

$$V = V_{max} \cdot \text{sen}(wt) \tag{3.3}$$

$$V = V_{max} \cdot \text{sen}(wt - 120^\circ) \tag{3.4}$$

$$V = V_{max} \cdot \text{sen}(wt + 120^\circ) \tag{3.5}$$

Así como una fuente triangular, cuyos parámetros son los mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros de las fuentes

Fuente	Valor Pico	Frecuencia	Angulo de Fase
Sinusoidal 1	0.5	60Hz	0°
Sinusoidal 2	0.5	60Hz	-120°
Sinusoidal 3	0.5	60Hz	120°
Triangular	2.0	10000Hz	-

La primer componente de esta etapa figura 3.3, es el generador de pulsos de conmutación donde las señales $[S_a]_{1,2,3}$ son generadas de acuerdo a:

$$[S_a]_{1,2,3} = \begin{cases} \text{Alto}=1 & \text{Si } [i_c]_{a,b,c} > V_c \\ \text{Bajo}=0 & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3.6)$$

Las salidas del generador de pulsos de conmutación son señales $[S_c]_{1..,6}$ que son básicamente las señales de disparo del CSC sin los pulsos de cortocircuito. Estos son necesarios para las corrientes libres del circuito intermedio i_i cuando se requiere corrientes de salida AC de valor cero. La tabla 3.3, muestra la tabla de verdad de $[S_c]_{1..,6}$ para todas las combinaciones de sus entradas $[S_a]_{1,2,3}$. Se puede observar claramente que a lo sumo un interruptor de la parte superior y uno de la parte inferior esta encendido y satisface la primera restricción de las señales de disparo como se ha indicado antes.

Tabla 3.3: Tabla de verdad para la etapa del generador de pulsos de conmutación de la figura 3.3

			Interruptores superiores			Interruptores inferiores		
S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{c1}	S_{c3}	S_{c5}	S_{c4}	S_{c6}	S_{c2}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Con el fin de satisfacer la segunda restricción, el pulso de cortocircuito ($S_d = 1$) es generado cuando ninguno de los interruptores principales ($S_{c1} = S_{c3} = S_{c5} = 0$) o ninguno de la parte inferior cambia ($S_{c4} = S_{c6} = S_{c2} = 0$) están cerrados. Entonces este pulso es

generado (usando compuerta OR) a solo una pierna, pata o terminal del CSC ya sea a los interruptores 1 y 4, 3 y 6 o 5 y 2, por medio de conmutación y combinador de pulsos de cortocircuito figura 3.3 Las señales generadas por el generador de pulsos de cortocircuito $[S_c]_{1,2,3}$ asegura que:

- Solo un terminal del CSC está en cortocircuito, como solo una de las señales esta en alto en cualquier tiempo.
- Haya una distribución uniforme de pulso de cortocircuito, como $[S_c]_{1,2,3}$ es alto para 120° en cada periodo. Esto asegura que las corrientes rms sean iguales en todos los terminales.

La figura 14.25 muestra las formas de onda pertinentes a una portadora triangular i_Δ y las señales de modulación sinusoidal $[i_c]_{a,b,c}$ se usa en combinación con el circuito generador de patrón de compuerta figura 3.3; esto es PWM en CSC. Se puede observar que algunas de las formas de onda (fig 14.25) son idénticos a los definidos en un VSI trifásico, donde se utiliza una técnica SPWM.

- El voltaje de línea de la carga figura 3.4 en el VSC es idéntica a la corriente de línea de la carga figura 3.5 en el CSC.

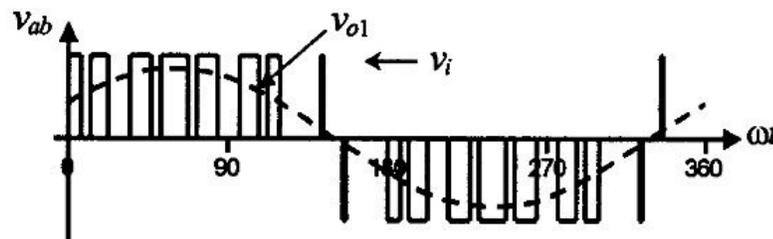


Figura 3.4: Voltaje de salida AC VSC.

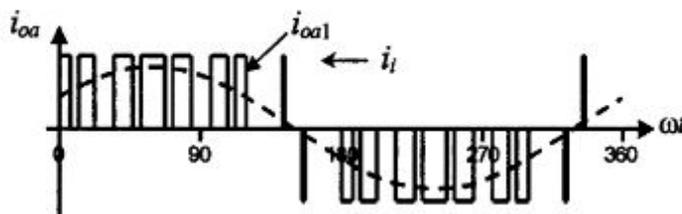


Figura 3.5: corriente de salida AC CSC.

- La corriente DC link figura 3.6 en el VSC es idéntica a la tensión DC link figura 3.7 en el CSC.

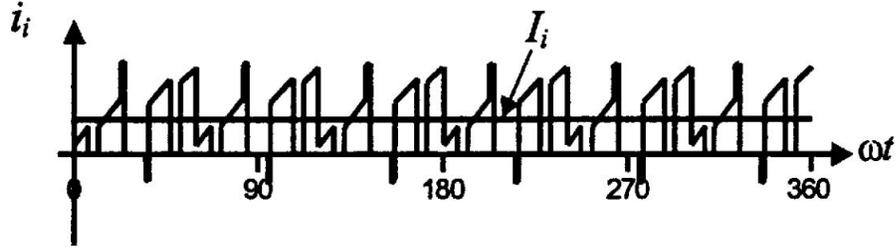


Figura 3.6: corriente de salida AC VSC.

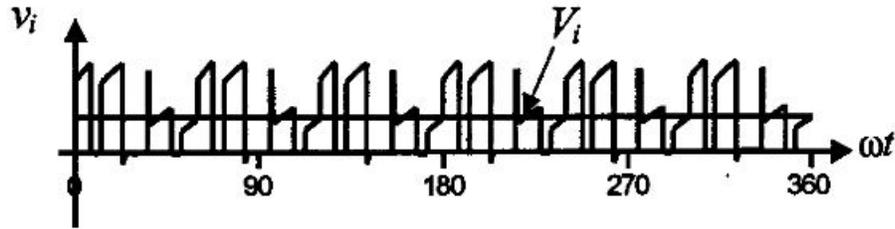


Figura 3.7: Voltaje de salida AC CSC.

Esto nos lleva al problema de la dualidad entre ambas topologías cuando se utilizan métodos de modulación similares. Por lo tanto, para el múltiplo impar de 3 valores normalizados de la frecuencia de la portadora m_f , los armónicos en la corriente de salida AC aparecen a frecuencias normalizadas f_h centradas alrededor de m_f y sus múltiplos, específicamente a

$$h = \ell m_f \pm K, \quad \ell = 1, 2, \dots \quad (3.7)$$

Donde $\ell = 1, 2, 5, \dots$ para $k = 2, 4, 6, \dots$ y $\ell = 2, 4, \dots$ para $k = 1, 5, 7, \dots$ de tal manera que h no es múltiplo de 3. Por consiguiente los armónicos serán $m_f \pm 2, m_f \pm 4, \dots, 2m_f \pm 1, 2m_f \pm 5, 3m_f \pm 2, 3m_f \pm 4, \dots, 4m_f \pm 1, 4m_f \pm 5, \dots$

Para voltajes de carga AC casi sinusoidales, los armónicos en el voltaje DC link están a frecuencias dadas por:

$$h = \ell m_f \pm k \pm 1, \quad \ell = 1, 2, \dots \quad (3.8)$$

Donde $\ell = 0, 2, 4$, para $k = 1, 5, 7, \dots$, y $\ell = 1, 3, 5, \dots$, para $k = 2, 4, 6, \dots$ de tal manera que $h = \ell \cdot m_f \pm k$ es positivo y no un múltiplo de 3. Por ejemplo, 3.8 muestra el sexto armónico $h = 6$, que se debe a $h = 1 * 9 - 2 - 1 = 6$.

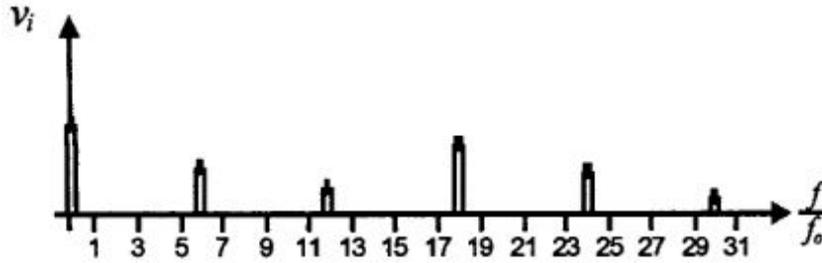


Figura 3.8: Sexto armónico.

Idénticas conclusiones se pueden extraer de la operación en valores pequeños y grandes de m_f de la misma manera como configuraciones de VSC trifásicos. Por lo tanto la amplitud máxima de la corriente fundamental de salida AC es

$$\hat{i}_{0a1} = \frac{\sqrt{3} \cdot i_1}{2} \quad (3.9)$$

Por lo tanto se puede escribir

$$\hat{i}_{0a1} = m_a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_1 \quad (3.10)$$

Para aumentar aún más el valor de la amplitud de la corriente de carga, el enfoque de sobremodulación puede ser utilizado. En esta región, la corriente de línea fundamentales varían en

$$\frac{\sqrt{3}}{2} i_1 < \hat{i}_{0a1} = \hat{i}_{0b1} = \hat{i}_{0c1} < \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \frac{i_1}{2} \quad (3.11)$$

A fin de probar el circuito generador de señales de compuerta (ver figura 3.3), conjunto sinusoidal con señales de modulación de inyección de tercer y noveno armónico se utilizan.

3.2. Módulos IGBTs

El módulo de la figura 3.9 corresponde a uno de los tres módulos que se emplearán según los en las quemas mostrados de las figuras 2.17 y 2.16.

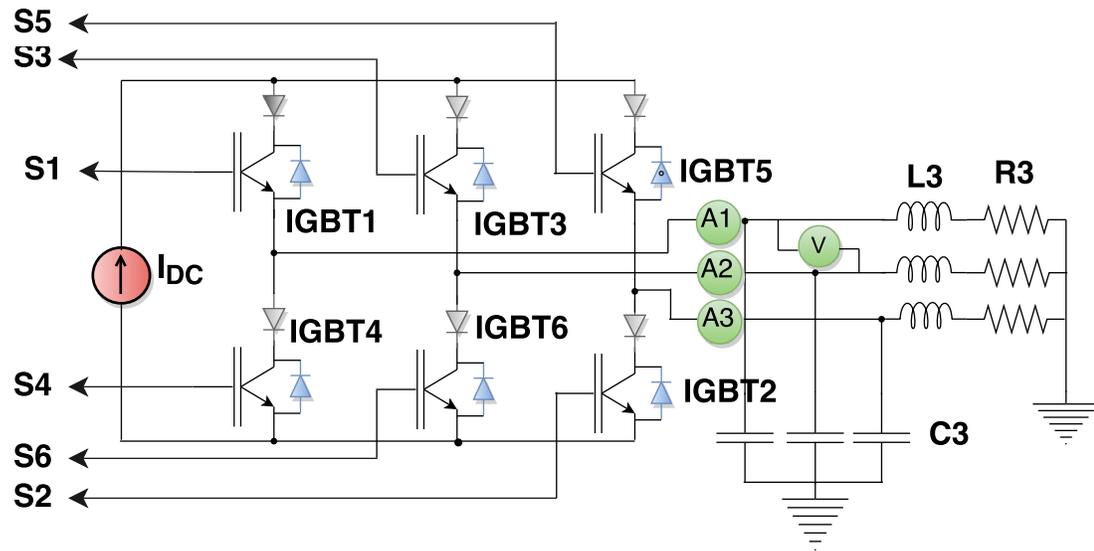


Figura 3.9: Modulo IGBTs CSC.

3.3. Transformador Trifásico de 3 Núcleos

los módulos compuestos por los IGBTs están conectados a la carga trifásica a través de un transformador trifásico de tres núcleos con devanados primario y secundario, y devanados secundarios conectados en delta [29].

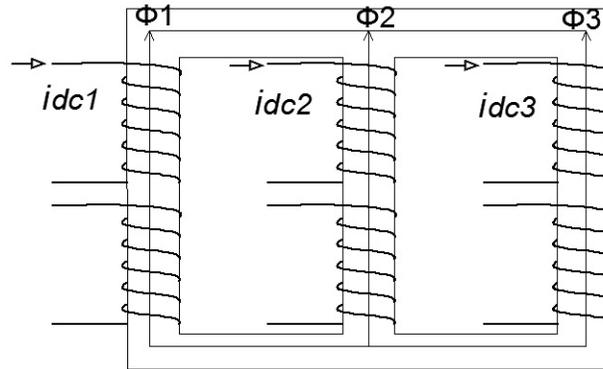


Figura 3.10: Transformador de tres núcleos.

Cada módulo se controla para producir una corriente continua regulada superpuesta por una corriente sinusoidal de amplitud frecuencia y ángulo de fase deseado. Los componentes de corriente continua aseguran corriente unidireccional en el lado de corriente continua. Las componentes de corriente alterna están desfasados por 120° con respecto a la otra. Los devanados primarios del transformador aseguran un bucle para las corrientes del lado de corriente continua y proporcionan suficiente inductancia para la regulación de los componentes de corriente continua de las corrientes del lado i_{dc} [29].

Los componentes de corriente continua no contribuyen a ningún flujo en el núcleo del transformador y, por tanto, no dan lugar a la saturación del núcleo. La razón de esto puede explicarse a la luz de la estructura del transformador trifásico de tres núcleos se muestra en la figura 3.10. Como las corrientes primarias i_{dc1} , i_{dc2} e i_{dc3} en la figura 2 ambas contienen componentes AC y DC, los flujos resultantes ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 estará integrado por dos componentes constantes y variables en el tiempo. Debido a la estructura de tres pares de bobinas y tres núcleos, $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$. Como las componentes variables en el tiempo de ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 constituyen un sistema equilibrado y así la suma de estos es cero, la suma de los componentes de flujo constante debe ser cero. Sabiendo que los componentes de flujo constantes son generados por componentes iguales y unidireccional de corriente continua DC, y son por lo tanto igual y unidireccionales, la única manera para que su suma sea cero es que cada componente de flujo constante sea igual a cero. Esto garantiza que no habrá ningún componente de flujo constante en el núcleo del transformador y, como resultado, el núcleo no se saturará, porque de suceder que el transformador se sature, se presentarían pérdidas de energía y causara baja eficiencia en el sistema de conversión [29].

En un principio no se había considerado emplear un transformador en el modelo del convertidor matricial híbrido, pero a razón de que la red y el conjunto de conmutación inciden en toda la red y hace que el factor de potencia (F_p) disminuya y además sea menos controlable en sus parámetros, por esta razón se da la necesidad de emplear este tipo de transformador. Su principal características es mitigar las componentes DC en el sistema (ver capítulo de resultados [4]).

3.4. Control del Convertidor

Las nueve señales de modulación correspondientes a los nueve terminales (gate G de los IGBTs) de los tres módulos de convertidores se pueden presentar en forma de una matriz. Como lo muestra la figura 4.6 que fue el modelo final implementado en PSIM. En la figura 3.11, [24] ilustra un diagrama general simplificado de control, el cual consta de un bloque de modulación por ancho de pulsos PWM para CSC, las corrientes de entrada $I_{a,b,c}$, además entrada para señales sinusoidales de control y finalmente las corrientes a la salida $I_{A,B,C}$ [29].

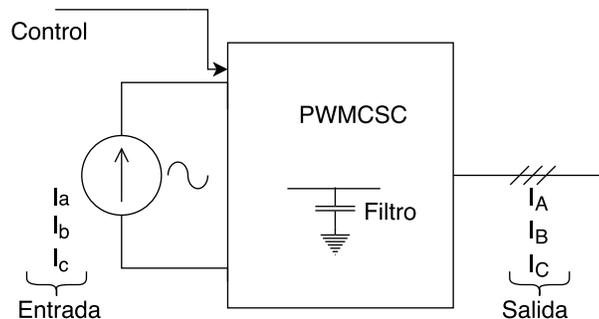


Figura 3.11: Diagrama simplificado control CSMC

Para la entrada de la señal de control, se debe crear con el bloque como lo ilustra la figura 3.12, [29], el cual es producto de dos señales que relacionan una señal deseada y que se obtiene mediante la implementación de fuentes sinusoidales con índice de modulación entre 0 y 1 para este caso el valor de la amplitud es de 0,8, la frecuencia de 60 Hz y desfasadas entre si 120° . Esto es solo para la fase A, para las otras es similar, solo hay que cambiar A por B y así también para C.

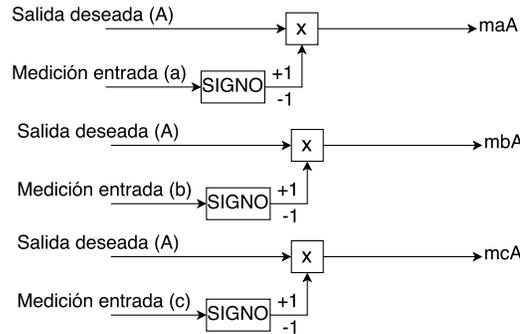


Figura 3.12: Generación de la señal de control

Seguidamente, tenemos un esquema que relaciona la señal de control antes mencionada, junto con las corrientes de entrada y salida como se presenta en la figura 3.13 . Este desarrollo se hace para la fase A, y para las demás fases es igual, solo hay que cambiar los subíndices.

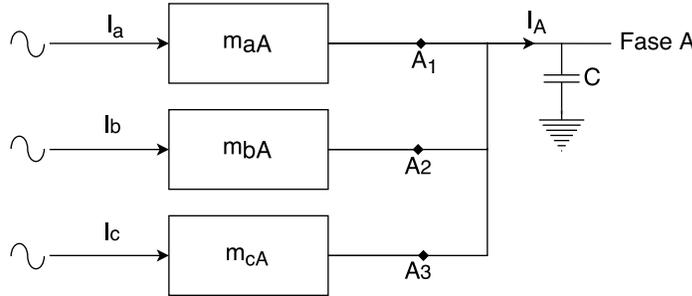


Figura 3.13: Relación para las corrientes de entrada y salida.

Planteando la ecuación que relaciona las corrientes de entrada, de salida y la señal de control, tenemos:

$$I_A = m_{aA} \cdot I_a + m_{bA} \cdot I_b + m_{cA} \cdot I_c \quad (3.12)$$

$$I_B = m_{aB} \cdot I_a + m_{bB} \cdot I_b + m_{cB} \cdot I_c \quad (3.13)$$

$$I_C = m_{aC} \cdot I_a + m_{bC} \cdot I_b + m_{cC} \cdot I_c \quad (3.14)$$

Escribiendo las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14 de manera matricial:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{aA} & m_{bA} & m_{cA} \\ m_{aB} & m_{bB} & m_{cB} \\ m_{aC} & m_{bC} & m_{cC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Control matricial y alimentación AC . En esta parte se reemplaza la fuente de corriente I_{DC} por una fuente de corriente I_{AC} con el mismo valor de amplitud y desfasadas 120° entre sí, debido a que el modelo del convertidor es AC-AC y tanto la entrada como la salida deben ser de tipo AC, además se adiciona un nuevo bloque para la modulación, que relaciona las señales de control sinusoidales desfasadas entre sí, un bloque multiplicador que toma las señales provenientes de las fuentes sinusoidales y la salida del bloque signo, enviándolas a un subcircuito de modulación, en donde se hace la respectiva modulación matricial y un bloque signo que recibe la señal AC del sensor de corriente de la nueva fuente I_{AC} , como lo ilustra a figura 3.14.

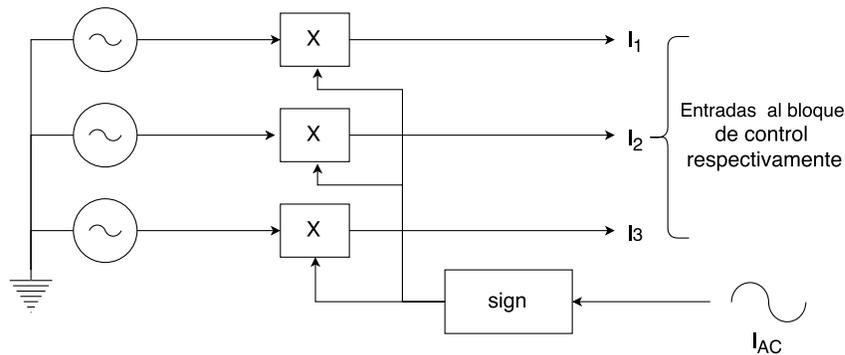


Figura 3.14: Bloque de control matricial.

Es necesario recordar la función signo para aclarar más a fondo el funcionamiento de este nuevo bloque en el CSC, como se menciona a continuación.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } x > 0 \\ 0, & \text{si } x = 0 \\ -1, & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Por lo tanto, si a la entrada del bloque signo, tiene una entrada positiva, la salida será de valor igual a uno 1, de igual manera si la entrada es negativa, en la salida será un valor igual

a -1 y si la entrada es cero, entonces la salida tiene un valor de 0 . Como la entrada al bloque signo es una señal sinusoidal con valores en el tiempo positivos y negativos, es decir ($x > 0$ y $x < 0$), entonces a la salida del bloque signo se producirá un tren de pulsos, debido a que la señal de entrada es de tipo sinusoidal periódica, figura 3.15.

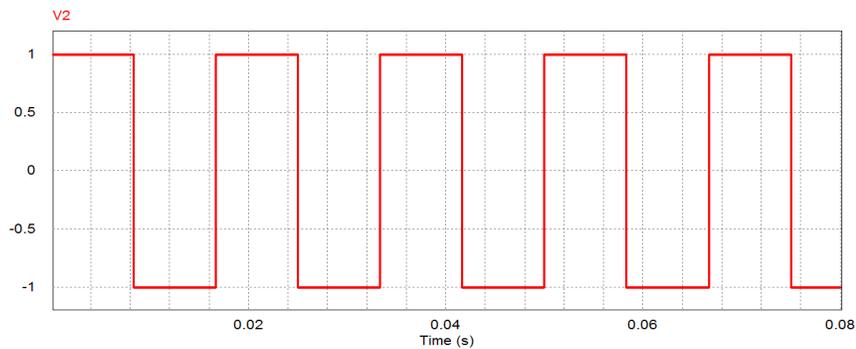


Figura 3.15: Tren de pulsos generado a la salida del bloque signo.

Después en el bloque multiplicador, donde llegan la señal del tren de pulsos, generado por el bloque signo y la señal sinusoidal de la fuente de modulación; pues recordemos que la modulación del convertidor se hace mediante una señal triangular y tres fuentes sinusoidales. Por esta razón al multiplicar el tren de pulsos y las fuentes sinusoidales, tenemos como resultado una nueva señal que contiene a la sinusoidal hasta donde el pulso cambia de 1 a -1 , es similar al traslape de dos señales, y de ahí en adelante se repite en cada intervalo de tiempo como se muestra la figura 3.16. Ahora bien, este es enviado a un comparador en donde se compara la señal descrita anteriormente con la señal triangular de alta frecuencia, y se obtiene un tren de pulsos de mayor frecuencia. A continuación se muestran las respectivas gráficas.

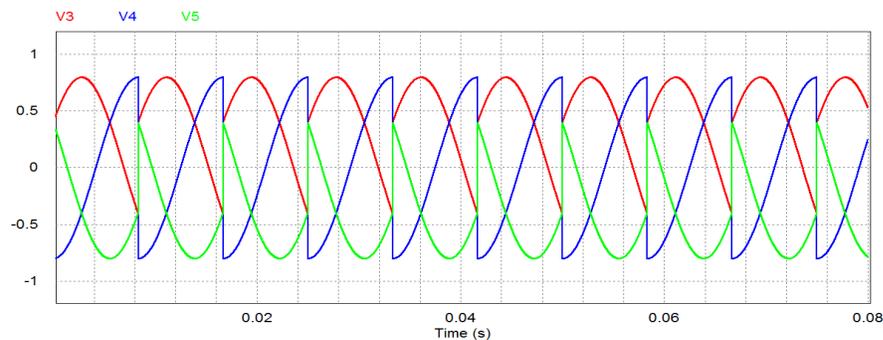


Figura 3.16: Traslape de la sinusoidal de modulación con la señal del salida del bloque signo.

3.5. Distorsión Armónica.

Cuando el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada.

La distorsión puede deberse a:

- Fenómenos transitorios tales como arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.
- Condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema

3.5.1. Definición de armónicas

Este concepto proviene del teorema de Fourier y define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones sinusoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones sinusoidales cuyas

frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original.

Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares.

La distorsión armónica total para la corriente y el voltaje está definido de la siguiente manera:

$$THD_{V_s} = \frac{V_h}{V_1} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (3.16)$$

Donde V_1 es el componente fundamental del voltaje y V_{rms} es el valor total del voltaje rms de la forma de onda.

$$THD_{I_s} = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (3.17)$$

Donde I_1 es el componente fundamental de la corriente y I_{rms} es el valor total rms de la forma de onda de la corriente.

En el simulador podemos usar la siguiente herramienta que nos ofrece, según se ilustra en la figura 3.17.

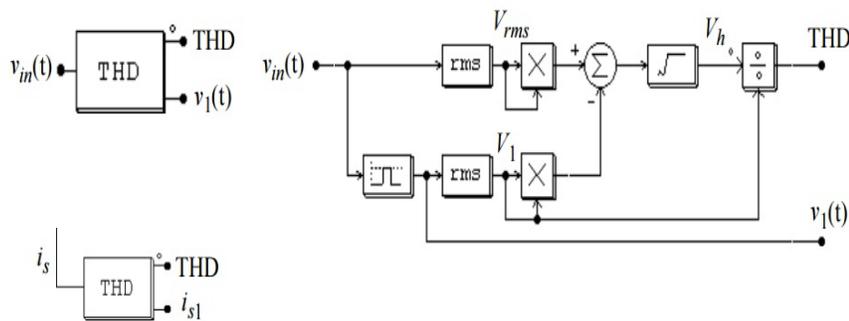


Figura 3.17: Bloque para medir la distorsión armónica total.

3.5.2. Efectos asociados a la reducción de armónicos

Con la reducción de armónicas se obtienen beneficios tales como:

- Elevación del factor de potencia
- Reducción de consumo de energía reactiva de las redes de C.F.E.
- Reducción de pérdidas producidas por efecto Joule I^2R
- Prolongar la vida de equipo electrónico
- Reducción de sobrecalentamientos en el cableado
- Reducción de pérdidas en transformadores
- Incremento en la eficiencia y prolongación de la vida de motores

3.5.3. Reactores de Línea

Los reactores de línea se diseñan para manejar corrientes distorsionantes considerando, tanto la corriente fundamental como la armónica y el efecto de las frecuencias que esto implica, instalándose entre la alimentación.

Para obtener la reducción del contenido armónico deseado, se debe instalar un reactor de línea cuya corriente nominal fundamental sea cercana a la de operación, ya que si se sobredimensiona, el THD que se conseguirá será muy por encima del calculado.

Capítulo 4

Resultado de las simulaciones

En este capítulo se muestran los resultados de las simulaciones del convertidor matricial híbrido, mediante el uso del simulador PSIM, las pruebas a realizar consisten en implementar un convertidor matricial híbrido, que es un arreglo de IGBTs, para realizar pruebas ante variaciones de velocidad del viento, debido a que cuando esto ocurre se presentan variaciones de frecuencia y voltaje en terminales del generador síncrono de imanes permanentes, por esta razón, se busca que los parámetros de salida en la carga o sistema de potencia al cual se conecte el generador, tengan los niveles de tensión y frecuencia exigidos.

Como primera instancia vamos a mostrar y a realizar una breve descripción del modelo a emplear, así como su respectiva conexión y los resultados obtenidos para cada caso.

4.1. Convertidor matricial híbrido con fuente de Corriente (CSMC)

El CSI de la figura 4.1 corresponde al inversor monofásico para la fase A, el cual muestra el subcircuito con los elementos de modulación y control, el arreglo de IGBTs y también la respectiva carga conectada.

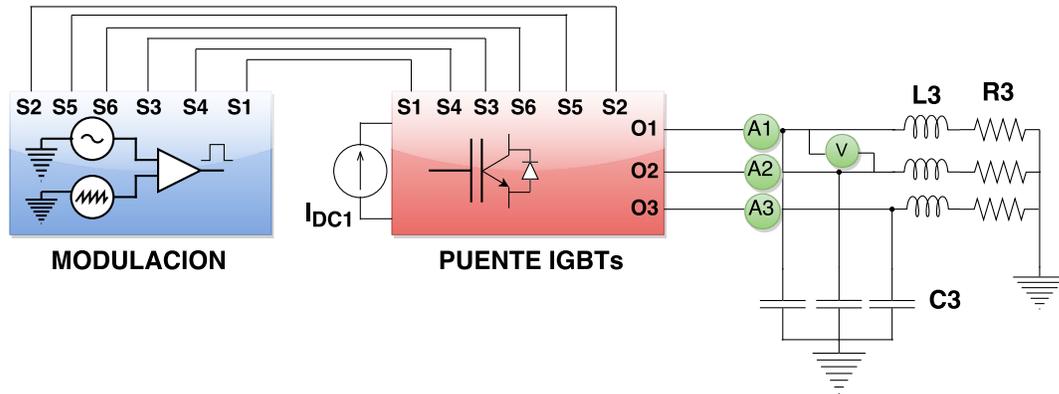


Figura 4.1: Inversor de corriente (CSI) monofásico.

De igual manera, las formas de ondas de la figura 4.2 pertenecen a las corrientes que salen del CSI y que conectan a los terminales de la carga, se puede apreciar que son corrientes del valor de los 100A.

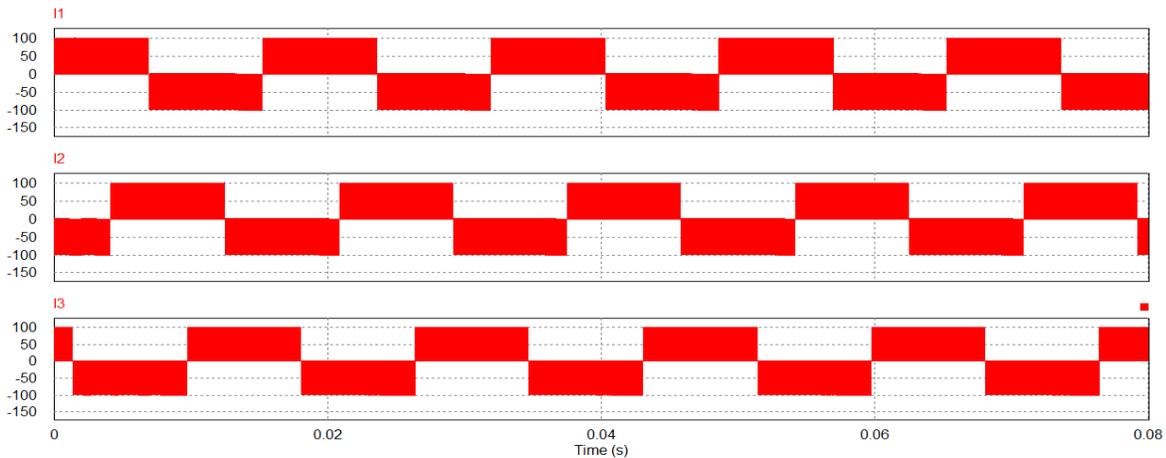


Figura 4.2: Forma de ondas corrientes (CSI) monofásico.

La figura 4.3 muestra el inversor completo, es decir el inversor trifásico. Este será el modelo completo para el CSI. Al igual que en la figura 4.1, este posee la misma disposición

4.1. CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO CON FUENTE DE CORRIENTE (CSMC)57

de elementos de control, los IGBTs y la carga conectada.

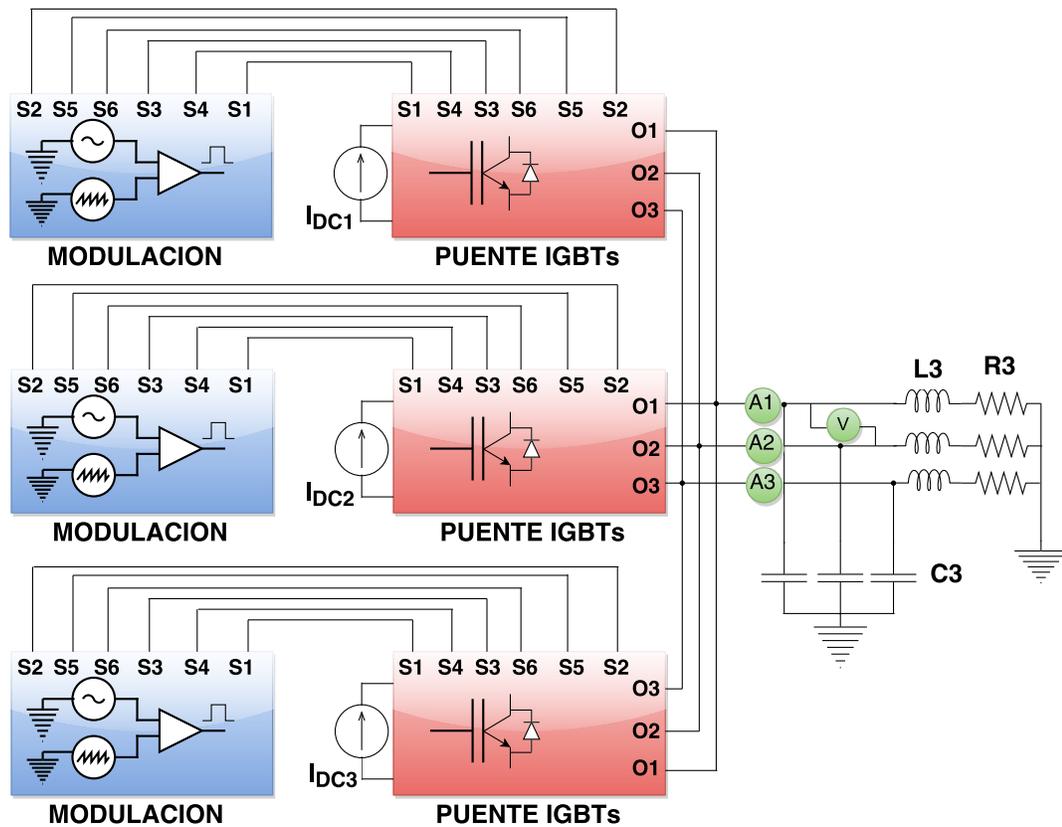


Figura 4.3: Inversor de corriente (CSI) trifásico.

Seguidamente la figura 4.4 corresponde a las formas de corrientes obtenidas en la salida del CSI trifásico, por lo tanto estas corrientes son trifásicas y se puede apreciar que su valor es tres veces el de las corrientes en el CSI monofásico pues estas son de 300A.

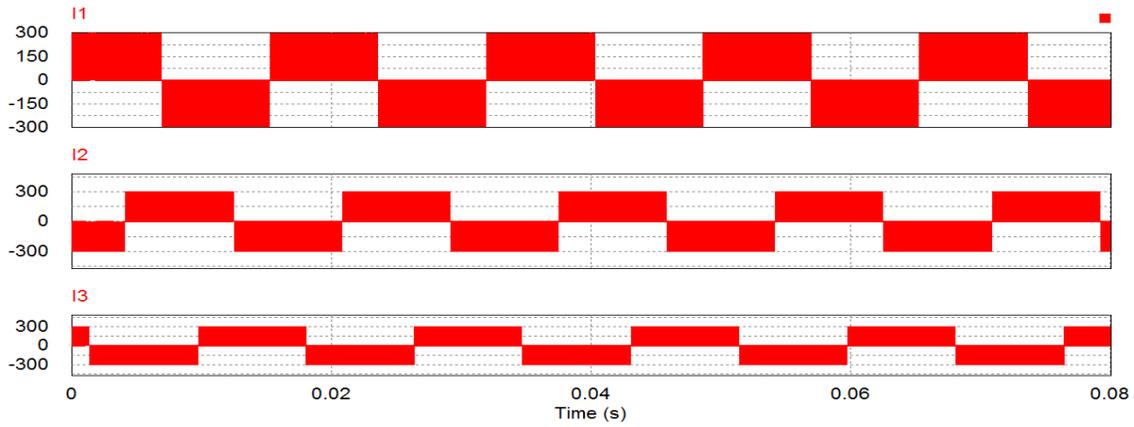


Figura 4.4: Formas de onda corrientes CSI trifásico.

Para la forma de onda del voltaje, se muestra en la 4.5, dicha onda tiene un valor de $4kV$ en la salida del convertidor cuando la señal se estabiliza.

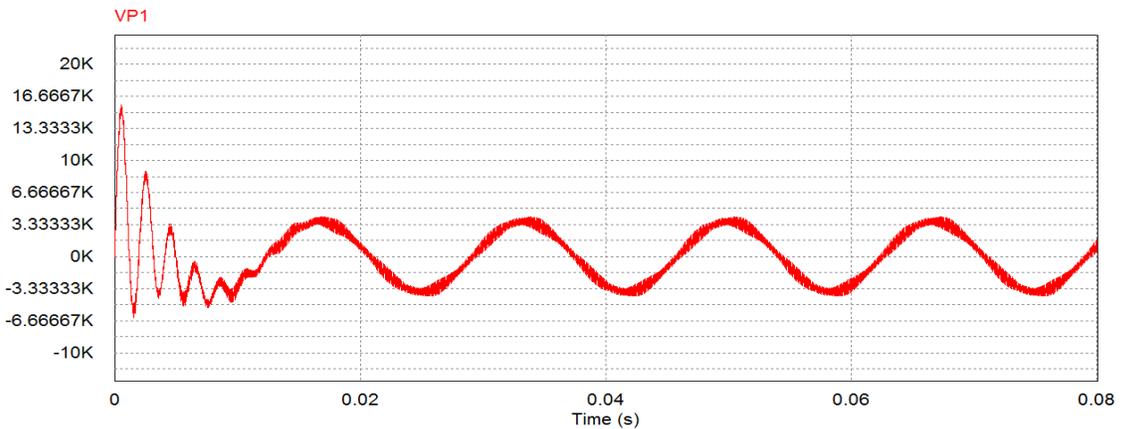


Figura 4.5: Forma de onda del voltaje CSI trifásico.

4.1. CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO CON FUENTE DE CORRIENTE (CSMC)59

4.1.1. Modelo de la simulación.

En esta sección emplearemos en convertidor matricial híbrido con fuente de corriente CSC. Correspondiente a la figura 4.6 Consta de un sistema de control para la modulación, un arreglo de IGBTs, un transformador y una fuente de corriente con los siguientes parámetros

Valores base de la carga

$$P_{base} = 5,7kW \quad (4.1)$$

$$I_{nom} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} = 17,5A \quad (4.2)$$

$$Z_{Base} = 8,5\Omega \quad (4.3)$$

- Índice de modulación $m_a = 0,85$
- Frecuencia de conmutación $f_{s\Delta} = 5kHz - 10kHz$
- Frecuencia de corte o resonancia $f_{c\omega} = 500Hz$
- Factor de potencia en la fuente unitario $f_p = 0,95$
- Factor de potencia en la carga $f_p = 0,85$ dependiente

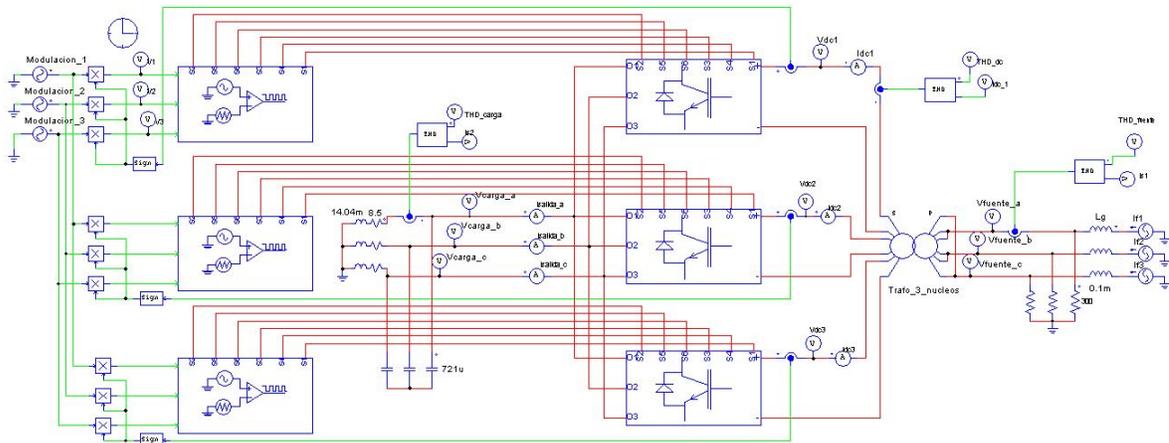


Figura 4.6: Convertidor matricial híbrido con fuente de corriente.

Para este sistema vamos a emplear un generador de $5,7kW$ con voltaje en terminales de $220V$ y frecuencia de $60Hz$, con los siguientes valores base, $P_{Base} = 5,7kW$, $V_{Base} = 220V$. El valor de la inductancia y la resistencia de la carga fueron tomados según la capacidad de la máquina síncrona según paper [30].

El valor del capacitor de compensación del nivel de tensión en la carga se calcula para una frecuencia de conmutación de $10kHz$ valor correspondiente a f_s y en base a está frecuencia calculamos la frecuencia de corte así:

$$f_c = 0,1 \cdot F_s \quad f_c = 1kHz \quad (4.4)$$

Con el valor de la frecuencia de corte, determinamos el valor del capacitor

$$2 \cdot \pi \cdot f_c = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (4.5)$$

Despejando el valor del capacitor tenemos que $C = 721,66\mu F$

Factor de potencia (FP) en el CSC para la entrada en la fuente I_{AC} y la salida en la carga

Se efectúa la medición del factor de potencia para diferentes valores de ángulos, sin embargo hay dos maneras de modelar la carga y hallar este valor:

1. modelando el circuito de la carga, figura 4.7.

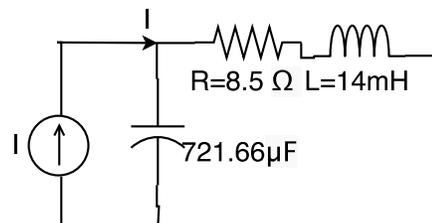


Figura 4.7: Circuito equivalente de la carga.

De manera fasorial para el capacitor y el inductor tenemos

$$Z_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad (4.6)$$

4.1. CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO CON FUENTE DE CORRIENTE (CSMC)61

$$Z_{RL} = R + (j * w * L) \quad (4.7)$$

Equivalente para los elementos en paralelo

$$Z_{eq} = \frac{(Z_C * Z_{RL})}{(Z_C + Z_{RL})} \quad (4.8)$$

Reemplazando los valores respectivamente, tenemos que $Z_{eq} = 1,5349 + j3,9650$, luego hallamos el ángulo θ

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{imag}(Z_{eq})}{\text{real}(Z_{eq})}\right) \quad (4.9)$$

El valor $\theta = 1,2014$ y el $FP = \cos(\theta)$ correspondiente es

$$FP = 0,3610 \quad (4.10)$$

- Mediante el simulador PSIM comparando las ondas de corriente y voltaje. Esta forma nos permite obtener el Fp de una manera sencilla, es simplemente tener las dos señales en un mismo screen y utilizar la herramienta que proporciona el simulador llamada Factor de potencia, como se puede apreciar en la figura 4.8, el factor de potencia se indica donde dice I_1 vs VP_1 cuyo valor es de 0,294919

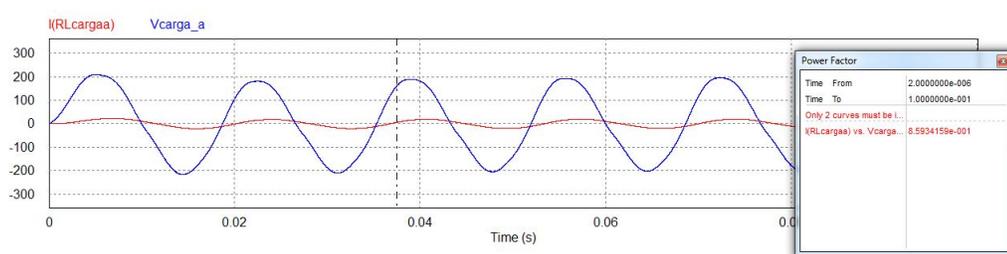


Figura 4.8: Medida del factor de potencia usando el simulador

Las formas de ondas mostradas a continuación hacen parte de las corrientes y voltaje en la carga para cada fase del sistema trifásico. La figura 4.9 corresponde a las corrientes en la fuente de alimentación del convertidor, en ella se puede apreciar que es una forma de onda con muy poca distorsión. En las fuentes del sistema se tiene una frecuencia de $60Hz$ y las

fuentes de modulación y/o control se manejaron frecuencias de 30 y 60 Hz.

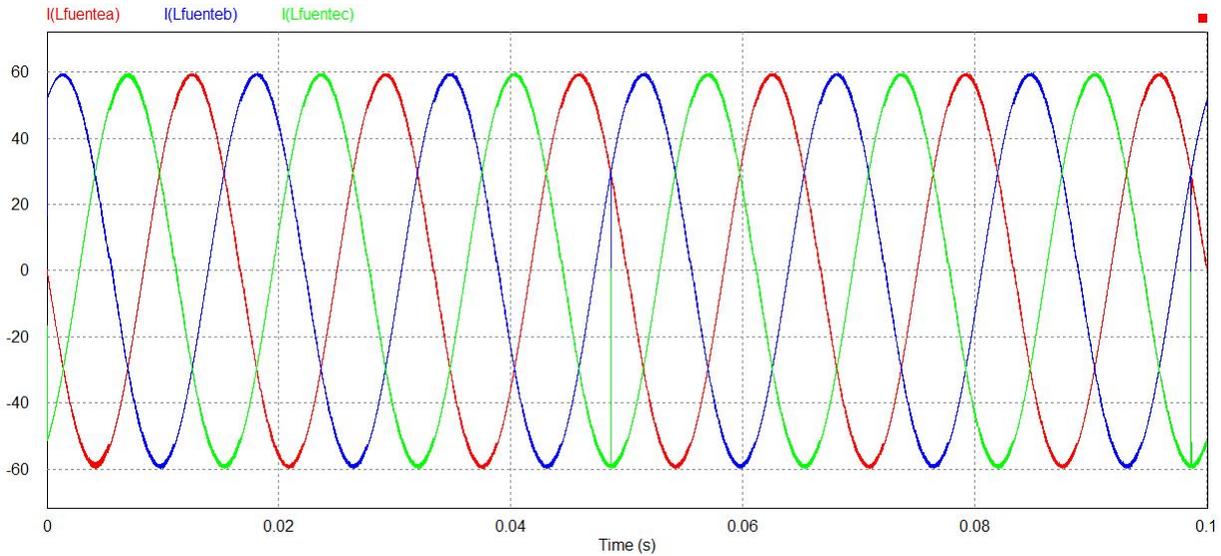


Figura 4.9: Corriente en la fuente de alimentación.

por otra parte la figura 4.9 muestra las formas de onda relacionadas con las corrientes DC y que gracias a la implementar transformador no representa problema para el sistema.

4.1. CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO CON FUENTE DE CORRIENTE (CSMC)63

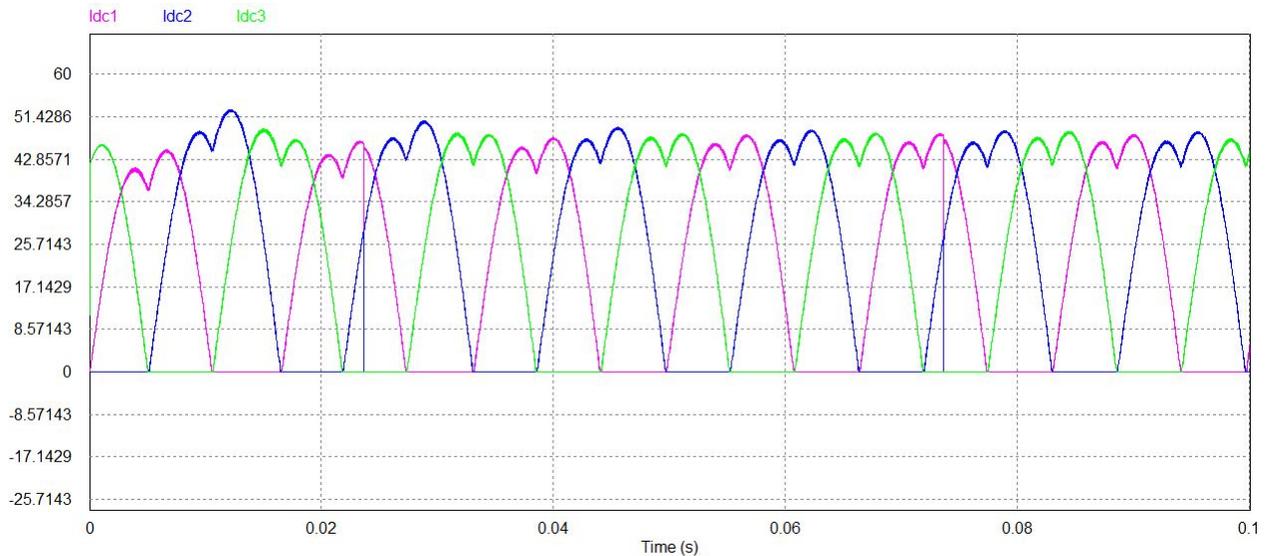


Figura 4.10: Corrientes en el secundario del transformador.

Las salida del convertidor matricial híbrido también posee corrientes moduladas a la salida como se aprecia en la figura 4.11.

Las figuras 4.12 y 4.13 que son los voltajes y las corrientes correspondientes a la carga y se puede apreciar que los valores obtenidos son adecuados para la operación normal de dicha carga.

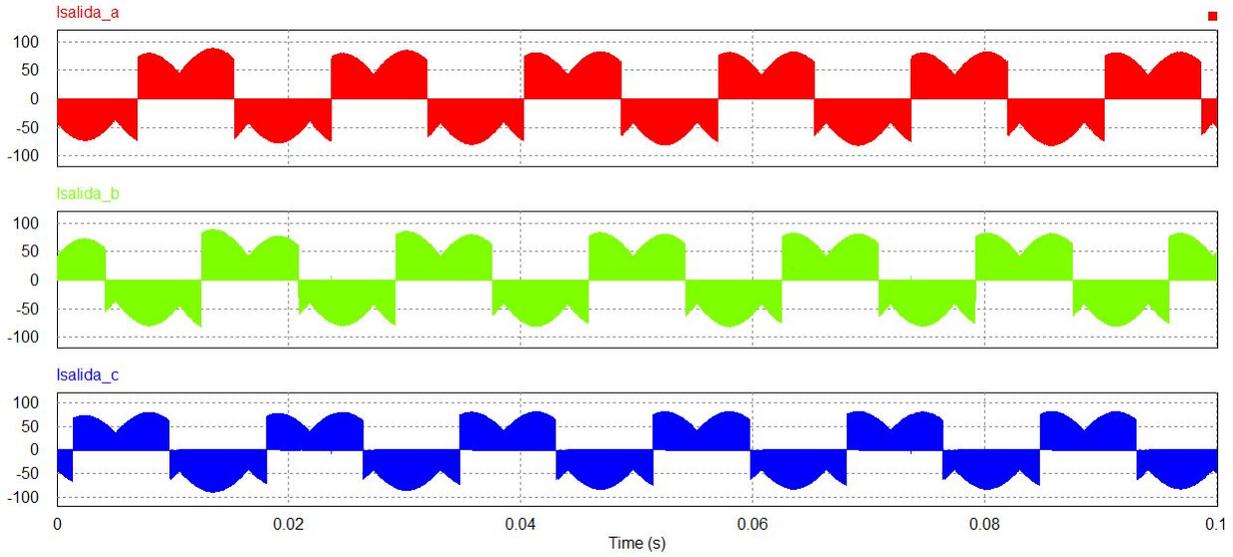


Figura 4.11: Corrientes en la salida del convertidor matricial híbrido.

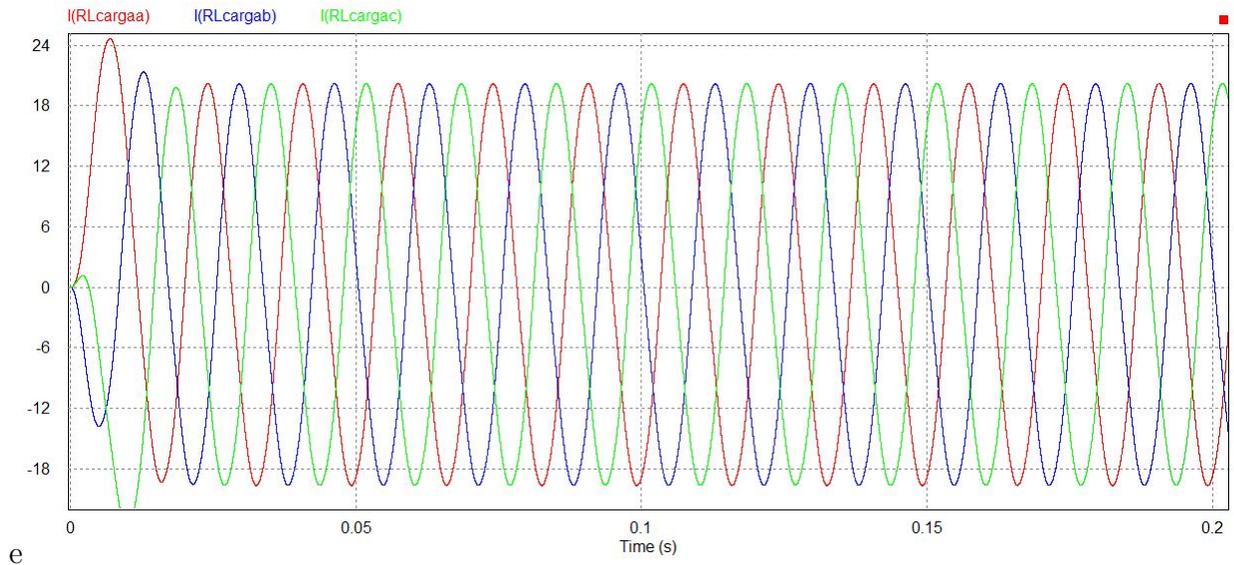


Figura 4.12: Formas de onda para la corriente en la carga.

4.1. CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO CON FUENTE DE CORRIENTE (CSMC)65

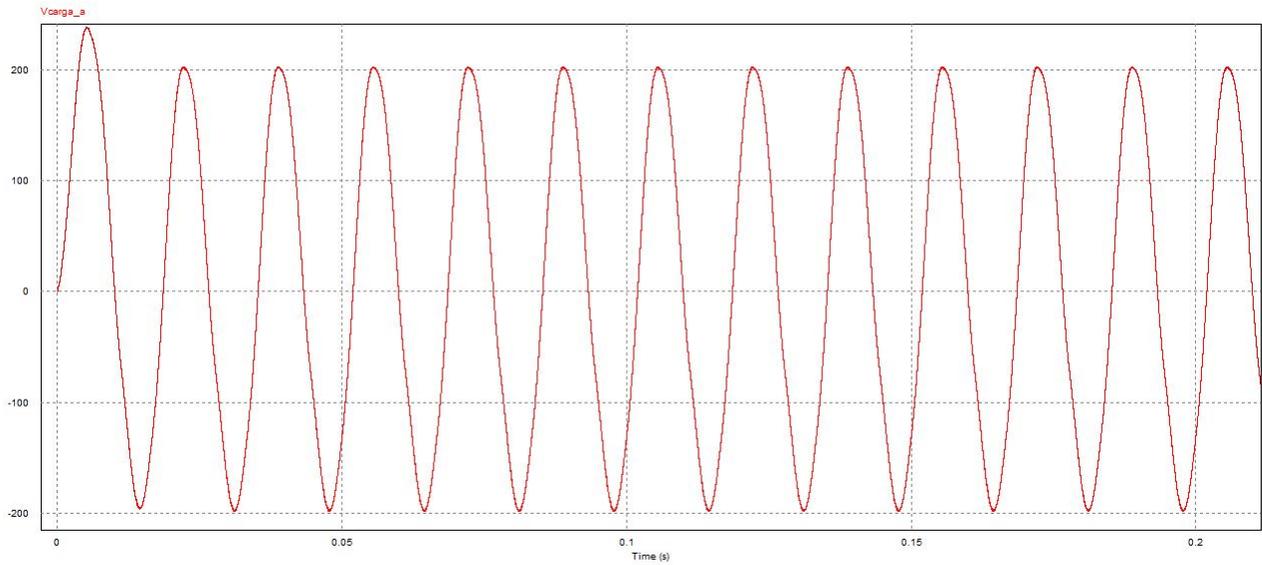


Figura 4.13: Formas de onda para el voltaje en la carga.

La potencia nominal del sistema según la capacidad que tiene el generador síncrono de imanes permanentes es coincidente con el valor arrojado por la simulación figura 4.14.

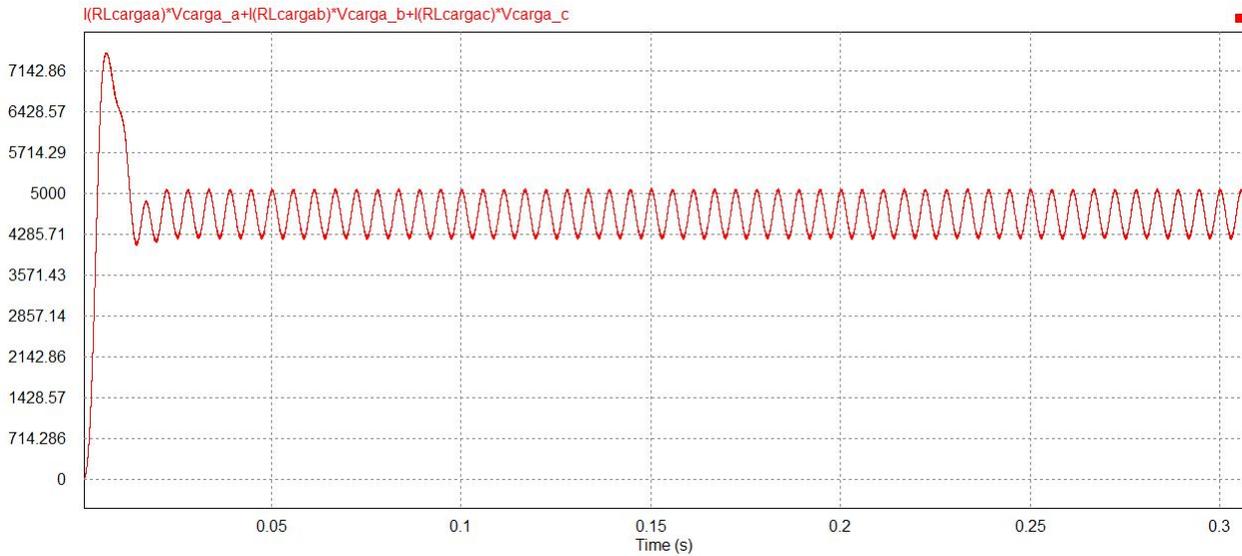


Figura 4.14: Forma de onda para la potencia en la carga.

4.1.2. Distorsion Armonica

para la figura 4.15, se realiza la comparación de la forma de onda de la corriente en la carga y la fundamental de la corriente para la distorsión armónica con el bloque mostrado en la figura 3.17 del capítulo anterior. Se observa que las señales tienen poca distorsión, significa que el convertidor en el lado de la carga puede garantizar parámetros adecuados en los niveles de tensión requeridos, teniendo en cuenta que en este caso el F_p lo impone el tipo de carga que se conecte.

4.1. CONVERTIDOR MATRICIAL HÍBRIDO CON FUENTE DE CORRIENTE (CSMC)67

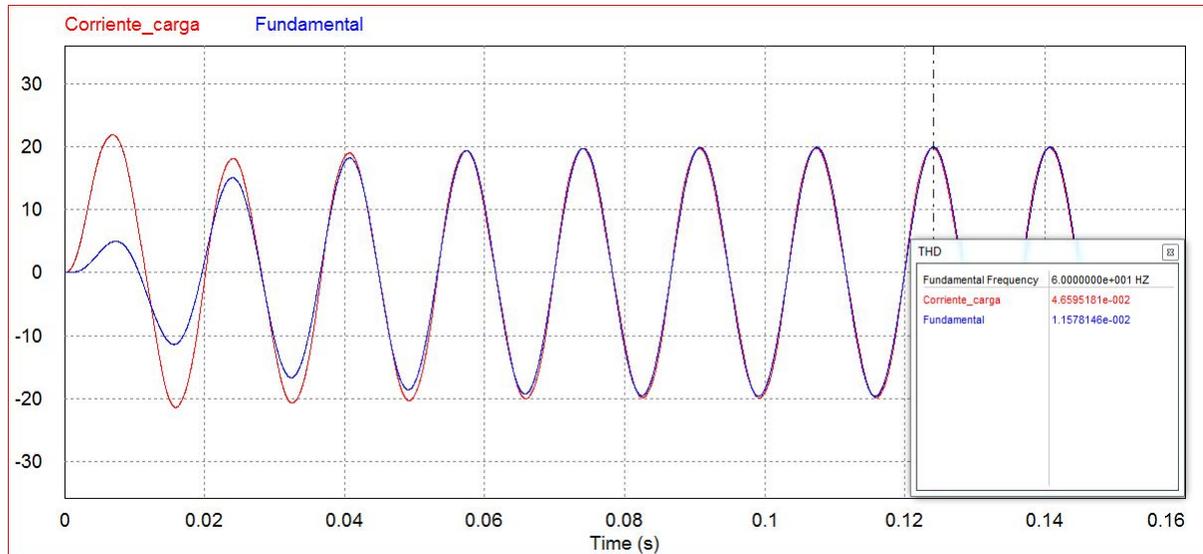


Figura 4.15: Distorsión armónica en la carga.

Las respectivas figuras 4.16 y 4.18 se muestra el valor del contenido armónico para el voltaje en la fuente y en la carga y se puede notar que dicho contenido armónico tiene valores de 0.5 para la fuente y de 0.2 para la carga.

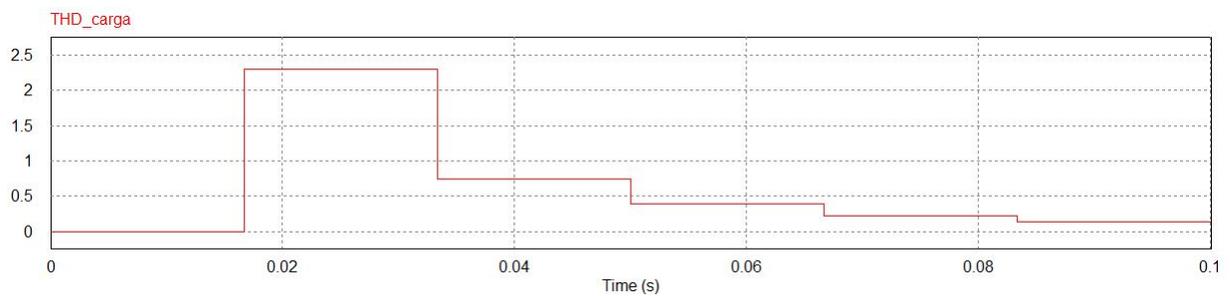


Figura 4.16: Medición del contenido armónico en la carga.

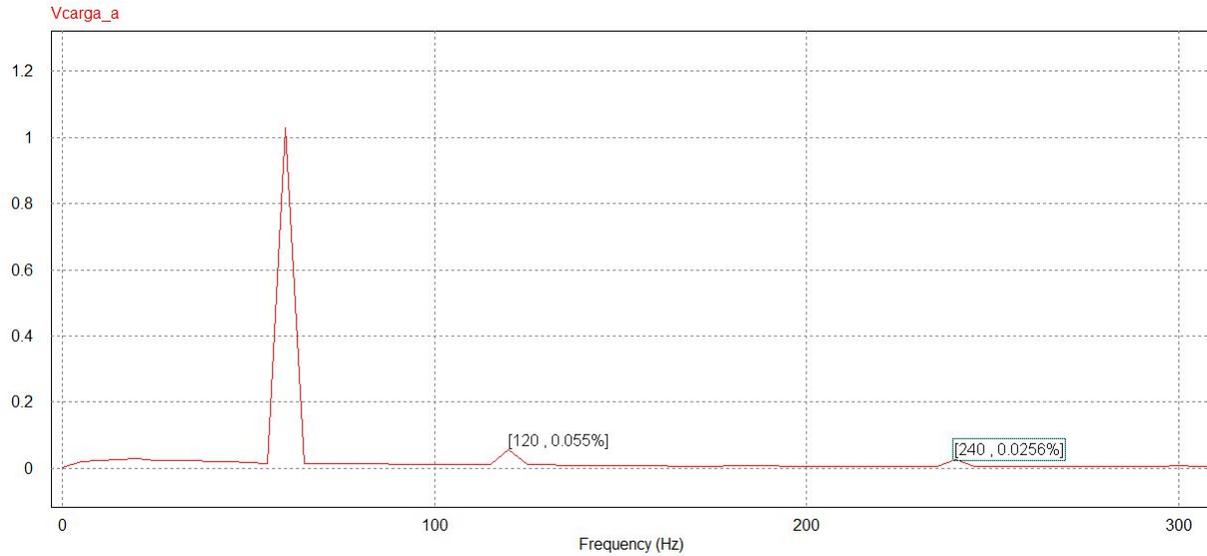


Figura 4.17: Medición del contenido armónico en la carga para el volyaje.

La figura anterior muestra el contenido armónico del voltaje en la carga, ya que si se varía la frecuencia en la modulación, la forma de onda de la corriente no se distorsiona, pero en el voltaje se aprecia una variación notable, y en especial para frecuencias bajas, debido a que el CSC es apto para frecuencias entre 10 y 20kHz

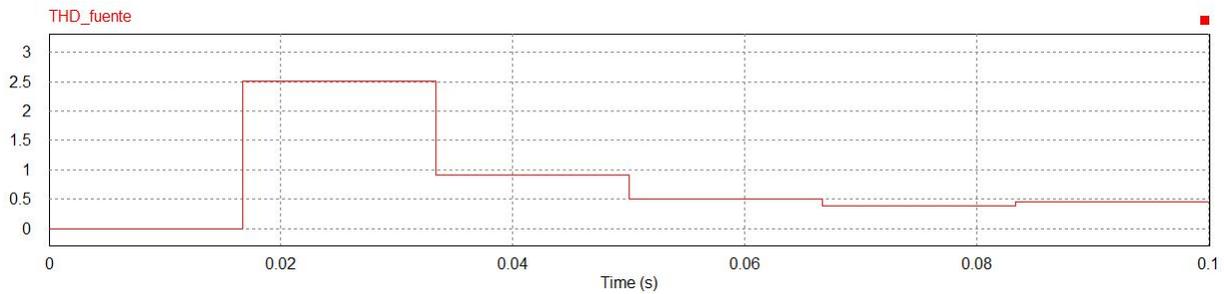


Figura 4.18: Medición del contenido armónico en la fuente.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se presentó un modelo del convertidor matricial con fuente de corriente AC/AC (current source matrix converter CSMC) en el cual se efectuaron simulaciones para verificar el comportamiento de los dispositivos ante parámetros de un generador síncrono.
- Se evidencia que ante variaciones de frecuencia para valores entre 50 y 70 Hz en la fuente, el sistema mantiene sus parámetros de salida, lo que indica que el convertidor funciona de manera adecuada.
- El esquema de modulación empleado, en comparación con lo que se muestra en documentos es adecuado pues permite obtener formas de onda similares en cuanto a parámetros en la carga.
- La implementación del transformador tiene parámetros ideales, debido a que no se requiere efectuar cambios en los niveles de tensión. Además proporciona facilidad para realizar la conexión entre las fuentes de corriente y los módulos IGBTs. Debido a que en el lado del secundario se producen corrientes continuas reguladas, estas no producen flujos magnéticos, lo que evita la saturación del transformador, se evitan las pérdidas de energía y mejora la eficiencia en el sistema.
- El modelo de compensadores estáticos en la carga (banco de capacitores), mejoran el contenido armónico presente en la carga.

5.1. Futuros trabajos de investigación

- Implementar el modelo del convertidor matricial híbrido para sistemas eólicos en los que se puedan hacer variación de los parámetros de la velocidad del viento.
- Evaluar el desempeño del modelo del convertidor considerando la velocidad del viento en algunas regiones de Colombia.
- Realizar simulaciones para un sistema robusto de generación eólica a mayor escala. Para determinar la factibilidad del convertidor en sistemas reales de potencia.

Bibliografía

- [1] A. L. R. J. F. Manwell, J. G. McGowan, *Wind Energy Explained.*, 2002.
- [2] J. Kolar, T. Friedli, J. Rodriguez, and P. Wheeler, “Review of three-phase pwm ac-ac converter topologies,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 11, pp. 4988–5006, Nov 2011.
- [3] B. Wu, *High power converters and AC drives.*,(chapter 6, *Two Level Voltage Source Inverter*), 2006.
- [4] M. O. Mora, “Sensorless vector control of pmsg for wind turbine applications,” Ph.D. dissertation, Master Thesis, Institute of Energy Technology Aalborg University, 2009.
- [5] J. Slootweg, S. de Haan, H. Polinder, and W. Kling, “General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 144–151, Feb 2003.
- [6] D.-i. Erich Hau, *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer, 2006.
- [7] J. E. p. C. M. H. olimpo Anlla Lara, Nick Jenkins, *Wind Energy Generation, Modelling and Control*. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 2009.
- [8] C. G. Sergio Dominguez, *El papel del control en el desarrollo tecnolo de las turbinas eas*.
- [9] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2005.
- [10] M. Lopez, J.-C. Vannier, and D. Sadarnac, “Sistemas de conversión de energía eólica control y diseño,” in *Asociation Chilienne de Contrôle Automatique*, 2007.

- [11] L. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines, risø-r-1205 (en), pitney bowes management services denmark, 2002,” ISBN 87-550-2743-1, Tech. Rep., 2002.
- [12] S. TRIPATHY, “Different generator topologies used in wind turbine applications.”
- [13] R. A. B. O. Alejandro GarcRuiz, Carlos Adrian Correa Florez, *Ansis y Operacion de Sistemas de Energia Eltrica*, 2014.
- [14] N. Madani, “Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine,” 2011.
- [15] F. Berrutti, “Modelado y control de turbinas de aerogeneradores de velocidad variable,” 2010.
- [16] T. Bakka and H. R. Karimi, *Multi-Objective Control Design with Pole Placement Constraints for Wind Turbine System*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [17] J. S. Thongam and M. Ouhrouche, *MPPT control methods in wind energy conversion systems*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [18] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind energy generation: modelling and control*. John Wiley & Sons, 2011.
- [19] M. Singh and S. Santoso, *Dynamic models for wind turbines and wind power plants*. National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [20] Z. Chen, J. Guerrero, and F. Blaabjerg, “A review of the state of the art of power electronics for wind turbines,” vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5200696>
- [21] H. Li and Z. Chen, “Overview of different wind generator systems and their comparisons,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123–138, 2008. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4469298>
- [22] M. Khadraoui and M. Elleuch, “Comparison between optislip and fixed speed wind energy conversion systems,” in *Systems, Signals and Devices, 2008. IEEE SSD 2008. 5th International Multi-Conference on*, 2008, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4632796>

- [23] C. H. De Angelo, “Control para minas de ca de imanes permanentes con fem arbitraria, sin sensores mecánicos,” Ph.D. dissertation, Facultad de Ingeniería, 2004.
- [24] P. Szczesniak, “Review of ac–ac frequency converters,” in *Three-phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*. Springer, 2013, pp. 17–86.
- [25] L. M. T. Burak Ozpineci, “Cycloconverters,” *Department of Electrical and Computer Engineering*.
- [26] A. Maamoun, “Development of cycloconverters,” in *Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 521–524.
- [27] M. H. Rashid, *Power electronics handbook: devices, circuits and applications*. Academic press, 2010.
- [28] C. Klumpner and C. Pitic, “Hybrid matrix converter topologies: an exploration of benefits,” in *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*. IEEE, 2008, pp. 2–8.
- [29] M. Kazerani, “A direct ac-ac converter based on current-source converter modules,” vol. 18, no. 5, pp. 1168–1175, 2003. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1224473>
- [30] K. Abdel-Latif, M. Eissa, S. Wasfy, O. Malik *et al.*, “Study of characteristics of wind turbine pmsg with reduced switches count converters,” in *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on*. IEEE, 2013, pp. 1–5.