

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y
Mecatrónica**



**“ANÁLISIS DE ARMÓNICOS GENERADOS POR EL ACCIONAMIENTO CON
CICLOCONVERTIDOR DE 12 PULSOS EN MOLINOS GEARLESS - MOTOR
SÍNCRONO DE 20 MW”**

Tesis presentada por el Bachiller:

Morote Collado, Pedro Raúl

para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor:

Ing. Chirinos Apaza, Luis Adrián

Arequipa - Perú

2019



Universidad Católica
de Santa María

AREQUIPA-PERÚ

(51 54) 382036 <http://www.ucsm.edu.pe> [facebook.com/ucsm.edu.pe/](https://www.facebook.com/ucsm.edu.pe/)

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

INFORME DICTAMINATORIO

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:

**“ANÁLISIS DE ARMÓNICOS GENERADOS POR EL
ACCIONAMIENTO CON CICLOCONVERTIDOR DE
12 PULSOS EN MOLINOS GEARLESS –MOTOR
SÍNCRONO DE 20MW”**

Presentado por el Bachiller:

MOROTE COLLADO PEDRO RAUL

Nuestro **DICTAMEN** es:

_____ *APROBADO*

OBSERVACIONES:

_____ *NINGUNA*

Arequipa, 19 de Noviembre 2019

_____ *[Signature]*
ING. LUIS CHIRINOS APAZA

_____ *[Signature]*
ING. VICTOR RIVERA ACOSTA
2398



DEDICATORIA

A DIOS, por todas las oportunidades otorgadas.

A mis padres, esposa e hijos.

Gracias a ellos cumpliré este gran objetivo.

Pedro Raúl Morote Collado

Bachiller en Ingeniería Mecánica Eléctrica

RESUMEN

Tradicionalmente, en la minería y procesos de molienda se han empleado motores eléctricos de media y baja velocidad para suministrar la potencia necesaria a los múltiples accionamientos allí existentes. Motores de rotor devanado (Europa) y máquinas síncronas (Estados Unidos) son comúnmente utilizados en este tipo de faenas, los cuales transmiten la potencia a molinos cilíndricos a través de un arreglo de engranajes y acoples.

La presencia de equipos basados en electrónica de potencia cuya operación es no lineal, instalados en los sistemas eléctricos, ha incrementado la presencia de distorsión en la señal de corriente y/o tensión eléctrica, originando problemas en la calidad de la energía eléctrica. Como un análisis a esta problemática, en esta tesis se desarrolla un análisis de los armónicos que se generan en la operación de los molinos gearless o sin piñón, los cuales usan para el arranque y variación de velocidad un cicloconvertidor de 12 pulsos para un motor síncrono de 20 MW, dicho análisis se realizará usando un programa de simulación (Matlab – Simulink) para poder obtener respuestas dinámicas y poder reconocer los armónicos más predominantes en la operación del molino.

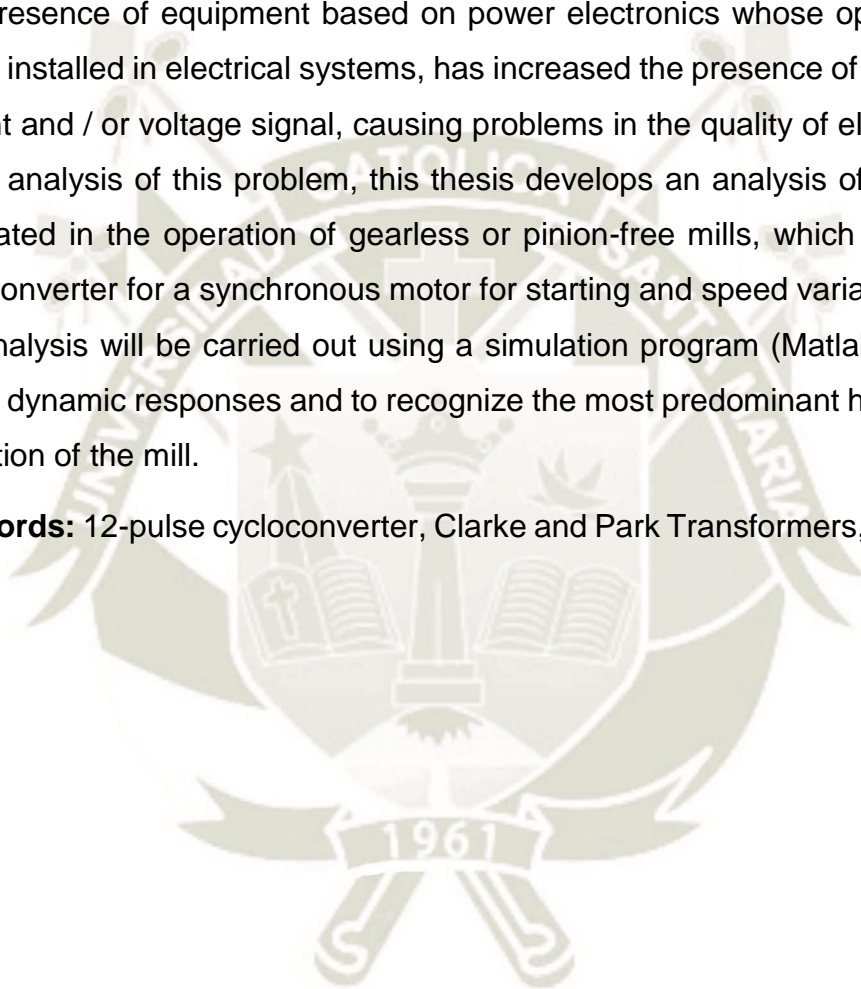
Palabras claves: Cicloconvertidor de 12 pulsos, Transformadas de Clarke y Park, Paquete de SCR.

ABSTRACT

Traditionally, in the mining and grinding processes, electric motors of medium and low speed have been used to supply the necessary power to the multiple drives there. Winding rotor motors (Europe) and synchronous machines (United States) are commonly used in this type of work, which transmit the power to cylindrical mills through an array of gears and couplings.

The presence of equipment based on power electronics whose operation is non-linear, installed in electrical systems, has increased the presence of distortion in the current and / or voltage signal, causing problems in the quality of electrical energy. As an analysis of this problem, this thesis develops an analysis of the harmonics generated in the operation of gearless or pinion-free mills, which use a 12-cycle cycloconverter for a synchronous motor for starting and speed variation. of 20 MW, this analysis will be carried out using a simulation program (Matlab - Simulink) to obtain dynamic responses and to recognize the most predominant harmonics in the operation of the mill.

Keywords: 12-pulse cycloconverter, Clarke and Park Transformers, SCR Package.



INTRODUCCIÓN

El accionamiento sin engranajes elimina todos los componentes mecánicos de un sistema de accionamiento convencional, tales como la corona, piñones, cajas reductoras, acoplamientos, eje de motor y rodamientos de motor. El molino se convierte en el rotor del motor sin engranajes al instalar los polos del rotor directamente en el cuerpo del molino (Espinoza Castañeda, 2015).

En 1969, ABB (entonces llamada Brown Boveri & Cie.) puso en marcha el primer GMD que había sido visto en el mundo, un motor sin engranajes de 6400 kW para un molino de bolas en Ciments Lambert-Lafarge en Le Havre, Normandía, Francia. Hoy en día este GMD continúa en operación arrojando un rendimiento muy eficiente en términos de costo efectivo y una comprobada fiabilidad a largo plazo. Y lo que es aún más importante, este GMD acciona un proceso de cemento en seco, y desde sus primeros días ha respondido satisfactoriamente al desafío de expansiones térmicas relacionadas con el alto calor generado por el proceso. ABB fue a su vez pionero en introducir los GMDs en el procesamiento de minerales. En 1985, ABB suministró el primer GMD en el mundo para accionar una planta de mineral en Bougainville, Nueva Guinea.

Posteriormente, ABB continuó con su incesante y pionera innovación al suministrar el primer GMD que accionaría un molino de bolas de doble cámara rotatoria, en Carlin, Nevada. Una vez más, ABB estuvo a la altura de un nuevo desafío enfrentando las altas temperaturas de proceso, en este caso se tienen 160 °C en la carcasa del molino.

Además, ABB ha sido siempre seleccionado para suministrar los accionamientos de molinos sin engranajes para los molinos AG, SAG y de bolas más grandes del mundo. Desde que inventó el GMD a finales de la década de 1960, ABB ha acumulado más de cuarenta años de experiencia adaptando soluciones GMD para las cada vez más demandas aplicaciones industriales de nuestros usuarios.

El motor sin engranaje (también conocido como motor wrap around o motor de anillo) es un motor síncrono de enorme tamaño. Los polos del motor son montados directamente en la brida de la carcasa del molino, lo que significa que la carcasa se convierte en el rotor. El estator del motor está instalado alrededor del cuerpo del molino.

El motor sin engranajes es alimentado por un cicloconvertidor. El cicloconvertidor es un convertidor estático de frecuencia conmutado por línea de alimentación en que la tensión de salida es formada por las ondas de voltaje principal de entrada, pero a una frecuencia mucho menor. Para la aplicación de GMDs el cicloconvertidor tiene una frecuencia nominal de salida de aproximadamente de 5 Hz. El cicloconvertidor, el cual tiene un diseño sin fusibles, se conecta a la red de media tensión a través de tres transformadores especiales.

Adicionalmente, se requiere un pequeño convertidor de excitación, que es usado para suministrar la excitación al rotor del motor sin engranajes a través de los anillos deslizantes. Por lo general los desconectores de cuchilla (desconectores de desconexión manual sin carga) del estator y del circuito de rotor se instalan directamente junto al motor para hacer que dicha desconexión sea fácilmente visible antes de entrar al motor para fines de mantenimiento (Marín Álvarez, 2019).

Características inherentes:

- La solución sin engranajes elimina toda necesidad de una corona, piñones, acoplamientos, etc.
- El posicionamiento automático y «creeping» (marcha lenta) están incluidos automáticamente en el suministro, por lo que ya no se requiere de ningún tipo de motor o accionamiento adicional para operaciones de inspección o posicionamiento.
- En todo el sistema de accionamiento, incluyendo el motor sin engranajes no se requiere grasa u otro tipo de lubricación, por lo que tampoco se requieren los costos asociados, de suministros, aplicación y manejo de residuos, en su presupuesto de operación.
- El sistema GMD puede variar la velocidad automáticamente además de accionar el molino en ambas direcciones (Apaza, 2019).

Con estas características inherentes, el usuario durante toda la vida de la mina tiene la capacidad de optimizar el proceso de molienda aumentando su eficiencia y de reducir el tiempo de paradas al aumentar la vida útil de los revestimientos (liners), El accionamiento sin engranajes para molinos (Gevelverzorgingparkstad.nl, 2019).

INDICE

DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	vi
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE FIGURAS	xii
CAPITULO I	1
1. PROBLEMAS, OBJETIVOS E HIPOTESIS	2
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos Generales	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Justificación	4
1.4. Hipótesis	5
CAPITULO II	7
2. FUNDAMENTO TEORICO.....	8
2.1. Estado del Arte	8
2.2. Marco Teórico	10
2.2.1. Descripción del Molino en Estudio.....	10
2.2.2. Descripciones Técnicas del Motor	12
2.2.3. Carcasa del Motor	13
2.2.4. Paquete Magnético.....	15
2.2.5. Bobinado del Estator	16
2.2.6. Acuñaado de la Ranura.....	18
2.2.7. Polos	19
2.2.8. Ventilación y Refrigeración.....	21
2.2.9. Sensor de Entrehierro (AirGap).....	23
2.2.10. Anillos Rozantes y Escobillas	24
2.2.11. Sistema de Sellado.....	25
	viii

2.2.12. Máquina Síncrona.....	29
2.2.12.1. Introducción:.....	29
2.2.12.2. Principio Funcionamiento	33
2.2.12.3. Tipos de Máquinas Síncronas:	37
2.2.12.4. Circuito equivalente	39
2.2.13. Principio de Funcionamiento del Cicloconvertidor	41
2.2.13.1. Cicloconvertidor Monofásico	41
2.2.13.2. Cicloconvertidor Trifásico (Carga Monofásica).....	43
2.2.13.3. CICLOCONVERTIDOR TRIFASICO – MONOFASICO (6 PULSOS).....	45
2.2.13.4. FORMAS DE ONDA DE UN CICLOCONVERTIDOR TRIFASICO	45
2.2.13.5. Cicloconvertidor Trifásico (Carga Trifásica).....	49
2.2.14. Modelamiento D-Q.....	58
2.2.15. Sincronización del Molino SAG.....	65
2.2.16. Armónicos Generados en el Accionamiento con Cicloconvertidor de 12 Pulsos del Motor Síncrono de 20 MW	70
2.2.16.1. ARMONICOS	71
2.2.16.2. ARMONICOS INYECTADOS A LA RED POR EL CICLOCONVERTIDOR	73
2.2.17. Filtros de Armónicos	77
2.2.17.1. Tipos de Filtros.....	78
2.2.17.2. Descripción de Algunos Filtros	79
2.2.18. ESTÁNDARES EN ARMÓNICOS.....	82
2.2.18.1. Norma Técnica IEEE519 de Calidad de Energía (Norma Internacional).....	83
CAPITULO III	86
3. MODELAMIENTO DINAMICO DEL MOTOR SINCRONO ACCIONADO POR CICLOCONVERTIDOR	87
3.1. Transformadas de Clarke y Park	87
3.2. Descripción Técnica del Cicloconvertidor	88
3.3. Diseño y Operación.....	88
3.4. Motor Síncrono	90

3.5. Convertidor Estático.....	91
3.6. Sección de Convertidor de Potencia	94
3.7. Cicloconvertidor de 12 Pulsos usando Matlab Simulink.....	95
3.8. Filtros de Armónicos empleados en Molinos Gearless	105
CONCLUSIONES.....	107
REFERENCIAS.....	109
ANEXOS	113



INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Datos Generales 1.....	27
Tabla N° 2 Datos Generales 2.....	27
Tabla N° 3 Parámetros eléctricos.....	28



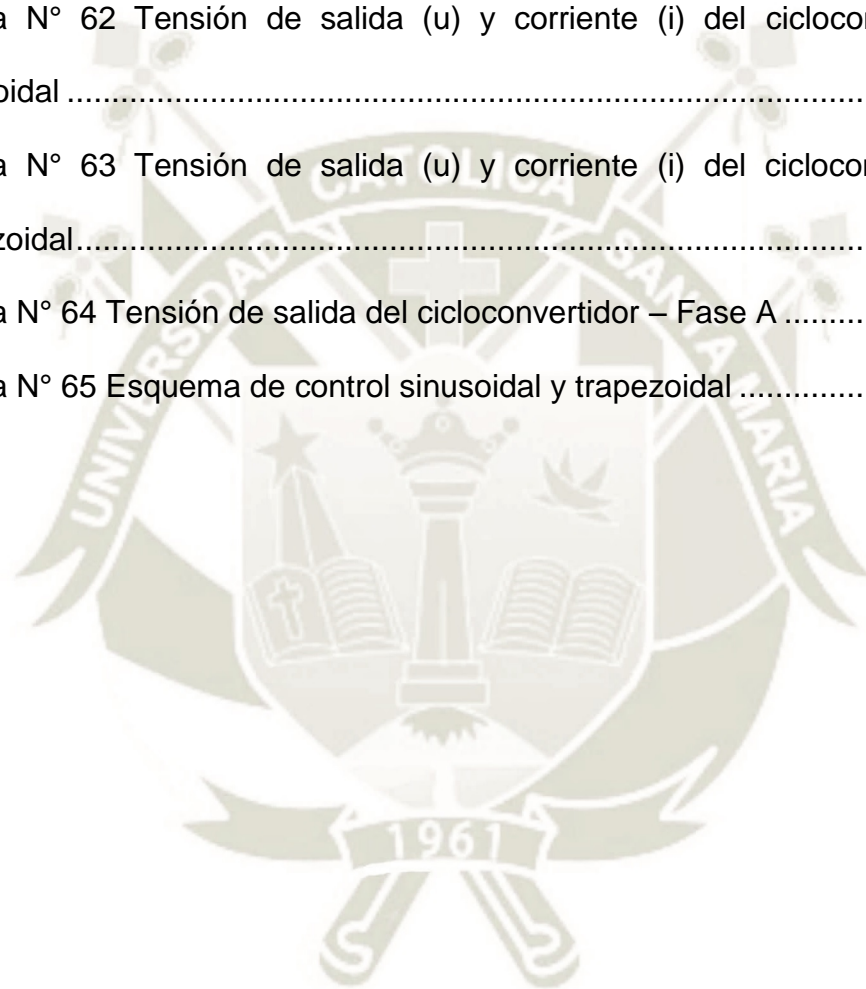
INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Diagrama eléctrico de la configuración y conexionado de un ciclo convertidor de 12 pulsos (obsérvese los puentes positivos y negativos).	4
Figura N° 2 Esquema visual del Molino SAG de 20 MW en estudio, el cual es accionado por un cicloconvertidor de 12 pulsos.....	12
Figura N° 3 Esquema general de sus partes.....	13
Figura N° 4 Carcasa del Estator.....	14
Figura N° 5 Polo Magnético del Molino	15
Figura N° 6 Núcleo Magnético del Estator	16
Figura N° 7 Bobinado del Estator.....	18
Figura N° 8 Esquema de la ranura acuñada	19
Figura N° 9 Esquema de la ranura acuñada	20
Figura N° 10 Caja de refrigeración	22
Figura N° 11 Sistema de medida del entrehierro.....	24
Figura N° 12 Anillos Rozantes y Porta escobillas.....	25
Figura N° 13 Sistema de sellado	26
Figura N° 14 Máquina Síncrona	30
Figura N° 15 Motor síncrono	31
Figura N° 16 Torque fasorial del motor síncrono.....	32
Figura N° 17 Gráfica de los ejes eléctricos que gobiernan la interacción electromagnética entre el estator y el rotor.	34
Figura N° 18 Gráfica de comportamiento del torque de la máquina síncrona en régimen generador como régimen motor.	35
Figura N° 19 Máquina síncrona con jaula de amortiguamiento.....	38

Figura N° 20 Gráfica del rotor de la máquina síncrona con jaula de amortiguamiento.	39
Figura N° 21 Circuito equivalente por fase en términos de dos componentes de la reactancia síncrona.	40
Figura N° 22 Circuito equivalente completo de la máquina síncrona de polos salientes.	41
Figura N° 23 Configuración de un cicloconvertidor monofásico –monofásico	42
Figura N° 24 Gráfica de las ondas de salida que alimentan a la carga producto del cicloconvertidor monofásico – monofásico	43
Figura N° 25 Cicloconvertidor trifásico – monofásico (3 pulsos)	44
Figura N° 26 Cicloconvertidor trifásico – monofásico (6 pulsos)	45
Figura N° 27 Carga monofásica de 3 pulsos con carga resistiva.	46
Figura N° 28 Formas de onda de un cicloconvertidor trifásico (carga monofásica) de 3 pulsos con carga inductiva.	47
Figura N° 29 Cicloconvertidor trifásico (carga monofásica).....	48
Figura N° 30 Cicloconvertidor trifásico (carga trifásica) de 3 pulsos	49
Figura N° 31 Cicloconvertidor trifásico (carga trifásica) de 6 pulsos	50
Figura N° 32 Cicloconvertidor trifásico (carga trifásica) de 12 pulsos	52
Figura N° 33 Formas de onda de un cicloconvertidor trifásico	53
Figura N° 34 Molino Gearless de gran potencia.....	54
Figura N° 35 Diagrama esquemático de una máquina sincrónica de polos salientes sin devanados amortiguadores.	58
Figura N° 36 Los polos del rotor son atraídos por los polos opuestos del estator. Sin carga los ejes de los polos coinciden.	65

Figura N° 37 Los polos del rotor son desplazados con respecto al eje de los polos del estator cuando el motor suministra potencia mecánica (molino con carga.....	67
Figura N° 38 Tipos y partes de molinos gearless	70
Figura N° 39 Curva distorsionada	71
Figura N° 40 Corriente inyectada a la red cicloconvertidor 6 pulsos	74
Figura N° 41 Corriente inyectada a la red cicloconvertidor 12 pulsos	75
Figura N° 42 Cicloconvertidor de 12 pulsos con 10 Hz	75
Figura N° 43 Patio de filtros	77
Figura N° 44 Tipos de Filtros.....	78
Figura N° 45 Filtro sintonizado simple.....	79
Figura N° 46 Filtro pasa altos de segundo orden	81
Figura N° 47 Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal.....	85
Figura N° 48 Niveles Referenciales de Distorsión Armónica (THD) en Sistemas Eléctricos.....	85
Figura N° 49 Modelo de un controlador de corriente de una PMSM implementado con transformadas de Park y Clarke.	88
Figura N° 50 Cicloconvertidor de 12 pulsos	89
Figura N° 51 Corriente y espectro de frecuencia	90
Figura N° 52 Cicloconvertidor de 12 pulsos que acciona motor síncrono trifásico	93
Figura N° 53 Cicloconvertidor de 12 pulsos – tensión salida	94
Figura N° 54 Cicloconvertidor de 12 Pulsos.....	95
Figura N° 55 Bloques de disparo para cada grupo de tiristores	96
Figura N° 56 Generación de pulsos positivos y negativos	97
Figura N° 57 Sistema de medición (System Measurements)	98
Figura N° 58 Vemos la gráfica resultante del proceso por cruce de fases.	99

Figura N° 59 Realizamos el análisis espectral de armónicos en la función FFT (Fourier from transformer).....	99
Figura N° 60 Las frecuencias más predominantes son las de 290 Hz y 430 HZ.	100
Figura N° 61 Cicloconvertidor de conmutación natural	101
Figura N° 62 Tensión de salida (u) y corriente (i) del cicloconvertidor modo sinusoidal	102
Figura N° 63 Tensión de salida (u) y corriente (i) del cicloconvertidor modo trapezoidal.....	103
Figura N° 64 Tensión de salida del cicloconvertidor – Fase A	104
Figura N° 65 Esquema de control sinusoidal y trapezoidal	105





1. PROBLEMAS, OBJETIVOS E HIPOTESIS

1.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad se ha acentuado con mayor severidad los efectos que producen las armónicas sobre los sistemas eléctricos y los dispositivos conectados a este, afectando principalmente a los parámetros de diseño como lo es la frecuencia y la tensión eléctrica, los cuales se ven modificados en la presencia de frecuencias armónicas.

El estudio del comportamiento de los sistemas eléctricos hasta hace algún tiempo se ha venido realizando a frecuencia fundamental, dejando a un lado el comportamiento que presenta el sistema en la presencia de armónicas.

Si no se realiza una acción para comprender y poder corregir los efectos producidos por la presencia de armónicas, el daño al cual se ven expuestos los dispositivos conectados al sistema se verá incrementado hasta la destrucción de los equipos; para nuestro caso solo nos enfocaremos a identificar las armónicas más perjudiciales que pueden afectar severamente las cargas cercanas al motor síncrono de 20 MW accionado por el ciclo convertidor de 12 pulsos, donde aguas arriba se ven los verdaderos efectos de las armónicas en el sistema eléctrico de nuestra planta.

1.2. Objetivos

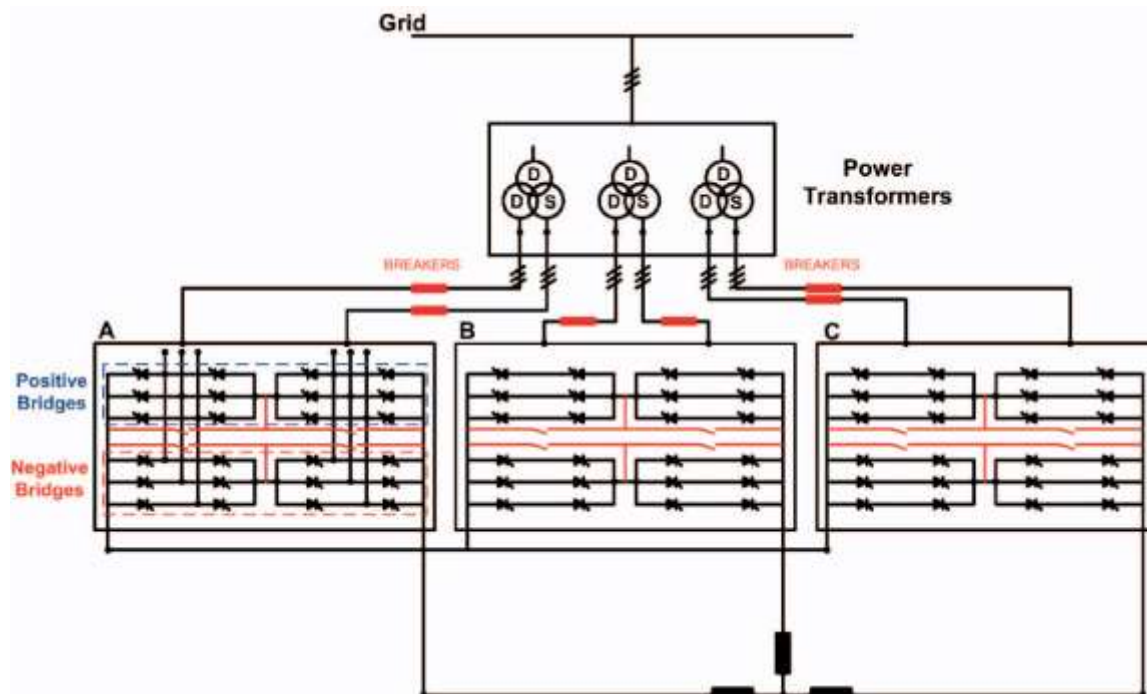
1.2.1. Objetivos Generales

Desarrollar un análisis dinámico del molino SAG (gearless, sin engranajes) motor síncrono de 20 MW y poder identificar las armónicas más predominantes que se generan por el convertidor estático (ciclo convertidor de 12 pulsos); el cual es el encargado del accionamiento del motor síncrono.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo dinámico del motor síncrono de 20 MW usando Matlab – Simulink; dicho modelo estará basado en un esquema de medición de tensión y corriente de alimentación al motor síncrono usando las Transformadas de Park.
- Implementar todo el control del motor síncrono; desde el control del ciclo convertidor de 12 pulsos y del sistema de excitación.
- Describir el origen de las armónicas, explicando el funcionamiento del motor síncrono en el arranque y regulación de velocidad y como se generan dichas armónicas por el convertidor estático o ciclo convertidor de 12 pulsos.
- Comprender el arranque, operación y variación de velocidad del motor síncrono de 20 MW usando un modelamiento dinámico del sistema usando Matlab – Simulink y tener un modelo para futuros trabajos de investigación.

Figura N° 1 Diagrama eléctrico de la configuración y conexión de un ciclo convertidor de 12 pulsos (obsérvese los puentes positivos y negativos).



Fuente: Morales, (2014).

1.3. Justificación

La implementación de filtros para reducir la distorsión armónica es una buena elección debido a que esto permite reducir los daños ocasionados a los aparatos y a la instalación; para lo cual se deben de sintonizar a la frecuencia de las armónicas más predominantes del sistema, realizando un análisis de las armónicas debido al ciclo convertidor de 12 pulsos que acciona al molino gearless.

El efecto dañino es ocasionado por las condiciones armónicas a las que se encuentran sujetos los dispositivos ya que no fueron diseñados para operar bajo condiciones de forma de onda no senoidales, lo cual repercute en que el tiempo de vida estimada para los equipos se vea reducido o pueda llegar a producirse un daño irreversible. La razón por la cual se deben utilizar filtros armónicos radica en mejorar los parámetros de alimentación de energía

eléctrica (calidad de energía), los cuales deben mantener la frecuencia y la tensión eléctrica constantes para un buen funcionamiento de los equipos instalados. Previo a esta ejecución de instalar filtros de armónicos se debe realizar un análisis que determine el grado de distorsión armónica para determinar si es necesaria la implementación de técnicas que las eliminen o las disminuyan hasta un porcentaje establecido por la norma nacional (CFE L0000-45, “Perturbaciones permisibles en la forma de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica”) e internacional (IEEE-519-1992, “Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems - Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia”).

Razón por la cual se propone el uso de filtros armónicos los cuales están formados por capacitores y reactores conectados en serie, en la conexión delta o estrella; estos circuitos proveen una baja impedancia para los armónicos y de esta forma eliminarlos o reducir la distorsión a valores establecidos; además el filtro actúa a la frecuencia fundamental (60 Hz) como un capacitor y produce energía reactiva, funcionando de la misma forma que un banco de capacitores convencional.

1.4. Hipótesis

Si el trabajo de investigación se realiza haciendo un modelamiento dinámico del arranque y sobre todo de la regulación de velocidad en el convertidor estático (cicloconvertidor de 12 pulsos), se puede lograr una precisión muy exacta de simulación en el Matlab – Simulink; se podrá detectar las armónicas más perjudiciales para el sistema eléctrico y una vez realizado esto se podrá calcular y sintonizar de forma apropiada los filtros de armónicos.

Logrando con esto una menor distorsión de tensión y corriente, obteniendo de esta forma una mejor calidad de energía. Y así compensar la energía reactiva que se suministra al motor, obteniendo un factor de potencia casi constante en todo momento.

Al tener este modelo dinámico de funcionamiento (arranque, operación y variación de velocidad) del motor síncrono de 20 MW implementado en Matlab- Simulink se puede a futuro lograr hacer trabajos de investigación basados en este mismo modelo.





2. FUNDAMENTO TEORICO

2.1. Estado del Arte

- **Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters – B. R. Pelly:**

En dicho libro que data desde los inicios de uso de los cicloconvertidores en el control de las maquinas eléctricas se explica el control y modelamiento del controlador electrónico. Dichos controles relacionados a los parámetros eléctricos de la maquina en el sistema referencial D-Q (Mañana Canteli, 2019).

- **Power Quality Analysis of a Three-Phase Cycloconverter under Variable Operating Conditions – Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo:**

El objetivo de este estudio es observar las correlaciones entre variables y condiciones de funcionamiento y parámetros de calidad de potencia para un sistema trifásico o monofásico del cicloconvertidor.

El cicloconvertidor es examinado en su forma más directa sin filtros de salida adicionales o elaborados métodos de control.

Condiciones de funcionamiento variables incluye frecuencia de entrada, frecuencia de salida y tamaño de carga resistiva. La calidad de energía de los parámetros de interés son el factor de potencia, la corriente de entrada distorsión armónica total (THD), tensión de salida THD, y eficiencia. El alcance del proyecto incluye análisis analíticos (Universitat de València, 2019).

- **Cicloconvertidores – Universidad Técnica de Oruro, Facultad Nacional de Ingeniería:**

En este documento se describe el principio básico de este convertidor para construir una onda de tensión alterna de frecuencia más baja de los sucesivos segmentos de las ondas de tensión de alta frecuencia de alimentación de corriente alterna por un acuerdo de cambio fue concebido y patentado en los Década de 1920.

Rectificadores de arco de mercurio controlado se utilizaron en estos transformadores instalados en Alemania en la década de 1930 para obtener 3-Hz monofásica de suministro de corriente alterna los motores de tracción de serie una trifásica de 50 Hz mediante el suministro de unos 18 tiratrones sincrónica 400-hp motor estaba en funcionamiento desde hace algunos años como una central eléctrica utilización comercial de estos sistemas esperó hasta que el SCR salió al mercado en la década de 1960. Con el desarrollo de grandes hoy es un convertidor madurado prácticos para su aplicación en gran potencia variable de baja velocidad variable de voltaje-frecuencia (VVVF) unidades de corriente alterna en el cemento y el acero trenes de laminación, así como en la variable-velocidad constante-frecuencia (VSCF) en los sistemas de aeronaves y buques de guerra. Un ciclo convertidor es un conversor de forma natural con conmutó la capacidad inherente de flujo de potencia bidireccional y está ahí ninguna limitación real de su tamaño a diferencia de un inversor con SCR elementos de conmutación (Ciclo Convertidores, 2019).

- **Diseño y Validación de un Cicloconvertidor Trifásico a Monofásico, Mediante Control Trapezoidal y Microcontroladores – Universidad Tecnológica de Bolívar, Edgard Mulford Garcia:**

En este trabajo se diseña y valida un cicloconvertidor trifásico a monofásico. Se pretende aportar sobre dos elementos:

Primero, sobre los algoritmos específicos que se implementan, y segundo, en la generación de un banco didáctico que puede servir de práctica en un laboratorio de electrónica. Todas las etapas del sistema propuesto se desarrollan, implementan y se prueban.

Este trabajo está dividido en tres capítulos. El primer capítulo presenta un estado del arte de convertidores electrónicos de frecuencia. El segundo capítulo presenta el diseño del cicloconvertidor, y el tercer capítulo se enfoca en los resultados y su respectivo análisis (Mulford García , 2008).

- **GMD User Meeting 2018 – El Nuevo Cicloconvertidor de 18 Pulsos para Molinos SAG de 25 MW a más, ABB, Reinhold A. Errath:**

La potencia y el diámetro de los molinos SAG se ha incrementado continuamente desde los últimos 50 años. ABB espera para los próximos años un aumento en el diámetro desde 42 hasta 44 pies y en potencia hasta 36 MW. El actual diseño del Cicloconvertidor puede cumplir con los requisitos de hoy en términos de potencia, operando a grandes alturas y con un máximo de 150% de par de arranque, pero ¿cuál será la mejor y más asequible manera de cubrir este incremento? de no sólo el incremento de la potencia es una preocupación, sino también los armónicos generados hacia la red y las fluctuaciones de tensión (motor).

Existen varias soluciones posibles para estos problemas, tenemos:

- Cicloconvertidor de 12 pulsos con tiristores conectados en paralelo con un motor de un solo bobinado trifásico.
- Dos Cicloconvertidores de 12 pulsos cada uno, independientes pero idénticos, con un solo motor de dos bobinados trifásicos.
- ACS 6000 multi motor con dos motores de un solo bobinado trifásico cada uno.
- Cicloconvertidor de 18 pulsos con un motor de un bobinado trifásico (Xulsman , 2015).

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Descripción del Molino en Estudio

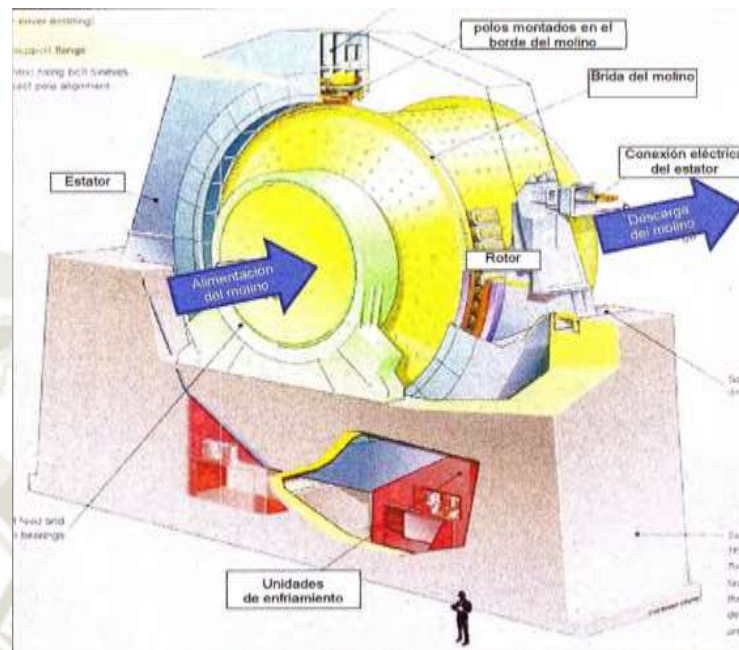
El molino SAG funciona mediante un motor de 20,000 kW sin engranajes con una transmisión de velocidad variable. El sistema de transmisión sin engranajes suministrará una velocidad infinitamente variable, desde 0 hasta 11.23 rpm, con capacidad total para avance gradual y movimiento paulatino.

- Un estator (carcaza, paquete magnético y bobinado de estator).
- Un rotor de polos salientes con anillos rozantes y escobillas.

- Un sistema de refrigeración y ventilación.
- Un sistema de sobrepresión.
- Un sistema de sellado.
- Un sistema de sensores de entrehierro y temperaturas.
- Un cicloconvertidor que alimenta al estator
- Un rectificador que alimenta al rotor.

El motor de Molino SAG (GMD) es fuerte y rígido; Diseñado para una máxima rigidez, opone masa y músculo en contra del torque y el calor para retener el control de concentricidad y precisión durante el proceso de molienda. Es sinónimo de bajo mantenimiento programado realizado durante el tiempo planificado de detención con el cual se logra mayor disponibilidad. El cicloconvertidor desde la década de los treinta solo se utiliza para suministro de máquinas síncronas con frecuencia variable desde la introducción de sistema de semiconductores en las áreas de ingeniería de control electrónico y potencia. En la figura se muestra un esquema referencial del molino SAG (Dugan & Brooks, 1999).

Figura N° 2 Esquema visual del Molino SAG de 20 MW en estudio, el cual es accionado por un cicloconvertidor de 12 pulsos.



Fuente: Ciclo Convertidores, (2019).

2.2.2. Descripciones Técnicas del Motor

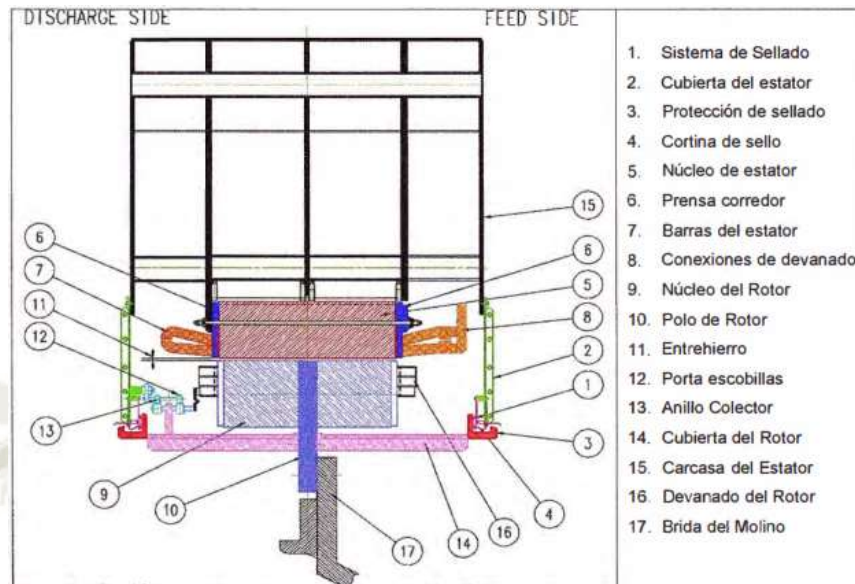
El motor trifásico síncrono, tipo WAZ 920/78/46 tiene un diseño envolvente. Está provisto de 46 unidades de polos acoplados directamente a la brida del molino. Posee un circuito cerrado de aire enfriado mediante intercambiadores de calor aire-agua (Mack Grady , 2000).

Estos intercambiadores de calor aire-agua están montados en diferentes cajas de refrigeración. La excitación al bobinado del rotor tiene lugar por medio de escobillas de carbón y anillos rozantes. Dentro de la carcasa del estator hay montadas seis resistencias de calefacción, que previenen de la condensación durante los periodos de parada (Mack Grady , 2000).

El cableado de señal para la instrumentación, así como el suministro de potencia para moto ventiladores, ventiladores de sobrepresión y resistencias de calefacción están direccionadas a cuatro cajas auxiliares situadas en la parte exterior de la carcasa. Todas las piezas

espaciadoras y aislantes en el estator y el bobinado son de material aislante clase F. (Mack Grady , 2000).

Figura N° 3 Esquema general de sus partes.



Fuente: Mack Grady, (2000).

A continuación, se explican las partes principales del motor (Carcasa de estator, Paquete magnético, Bobinado del estator, Acuña de la ranura, Polo, Ventilación y refrigeración, Sensor de entrehierro, Anillos rozantes y escobillas, Sistema de sellado), así como las especificaciones técnicas del motor (Mack Grady , 2000).

2.2.3. Carcasa del Motor

La carcasa del estator es totalmente soldada, consiste en cuartos y aloja el paquete magnético del estator. Su diseño es tal que todas las fuerzas que aparecen en un funcionamiento normal, en condiciones de cortocircuito o las debidas a cambios térmicos se transmiten de forma segura a las fundaciones.

Los componentes principales son:

- Cinco anillos de acero, uno actúa de soporte del paquete magnético, el del medio sirve de refuerzo y el tercero hace de soporte para las placas de presión del paquete. Los dos restantes (en ambos

extremos) proporcionan protección y soporte para las cubiertas del estator.

- Tubos de acero, dispuestos a lo largo de todo el diámetro de los anillos y soldados entre estos, actuando de elemento de unión de los anillos y repartiendo los esfuerzos de los bulones de presión del paquete.
- Dos placas de acero, soldadas en la parte inferior de los cuartos inferiores, sirven de soporte y fijación a las placas de fundación.
- Externamente, toda la estructura está cerrada con una envolvente de acero soldada a los anillos (Mack Grady , 2000).

Figura N° 4 Carcasa del Estator

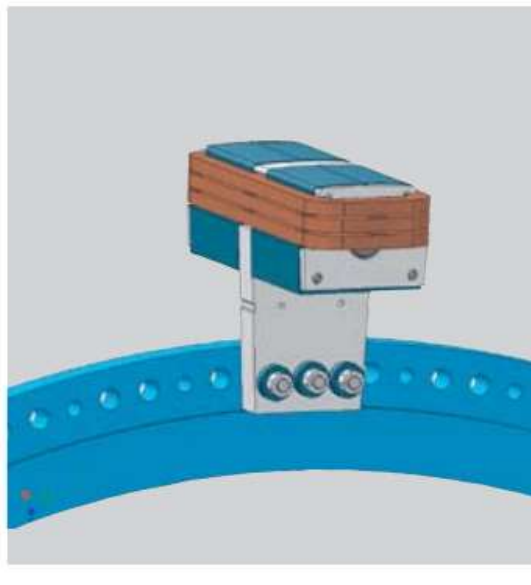


Fuente: Mack Grady, (2000).

2.2.4. Paquete Magnético

El paquete magnético del estator está diseñado para transmitir el flujo magnético creado por los polos con la mínima corriente y mínimas pérdidas. El paquete permite una ventilación de aire que circula a través de conductos que lo atraviesan, para asegurar la refrigeración del estator y el rotor (Jiménez Guzmán, 2015).

Figura N° 5 Polo Magnético del Molino



Fuente: Jiménez Guzmán, (2015).

Figura N° 6 Núcleo Magnético del Estator



Fuente: Jiménez Guzmán, (2015).

“El paquete del estator está formado por láminas (chapas magnéticas) dispuestas a lo largo del diámetro interior de los anillos centrales. Está formado por chapas de acero magnético de baja pérdida y con un espesor de 0.5 mm. Después del corte, las chapas magnéticas son esmaltadas por ambas caras” (Jiménez Guzmán, 2015).

2.2.5. Bobinado del Estator

El bobinado del estator está diseñado para soportar la corriente trifásica sinusoidal, proveniente del cicloconvertidor, que provoca el movimiento del rotor. “En cada ranura del paquete magnético se alojan dos barras del bobinado. La barra del fondo de la ranura se conoce como barra "de fondo" y la barra externa es la barra de alto (Jiménez Guzmán, 2015).

La barra formada debe tener un buen contacto con el paquete; primero para conseguir un perfecto asiento mecánico de la barra en la ranura, de forma que no se vea desplazada por el campo magnético y segundo, para prevenir diferencias entre el potencial de la barra y el paquete.

Diferencias de potencial llevan a descargas de efecto corona, las cuales, con el tiempo, acaban dañando el aislamiento (Jiménez Guzmán, 2015).

Las barras aisladas se insertan en las ranuras del paquete y van fijadas mediante cuñas de láminas de fibra de vidrio. El aislamiento está compuesto por materias primas de excelente calidad y tratado con el proceso Micadur. Las barras preformadas, que consisten en filamentos aislados, son aisladas con cinta continua de fibra de vidrio y mica de grado fino.

Tras el proceso de formación y compactación, se aplica al aislamiento principal las capas de protección contra el efecto corona, tanto a la parte de la ranura como a la de fuera. Las barras son entonces impregnadas en vacío con una resina sintética, compactadas con herramientas especialmente diseñadas y curadas en el horno Micadur. Las conexiones de las barras son también aisladas con cinta mica glass e impregnadas con resina (Jiménez Guzmán, 2015).

Un proceso de calor cura la resina sintética del aislamiento de las conexiones y los cordones. De esta forma se obtiene un fuerte asentamiento del bobinado, el cual es capaz de soportar todos los esfuerzos, incluso aquellos debidos a cortocircuitos en condiciones desfavorables. Para obtener un soporte y espaciado del bobinado, se usan cordones que se amarran a las cabezas de las barras y finalmente son inyectados con resina, lo cual, tras el proceso de curado, garantiza que el soporte espaciador sea firme y sólido. (Jiménez Guzmán, 2015).

El método de aislamiento, proporciona un aislamiento homogéneo sin inclusiones de aire caracterizado por bajas pérdidas dieléctricas, alta estabilidad térmica e insensibilidad ante la humedad, aceite u otros agentes contaminantes. Los materiales utilizados para el aislamiento cumplen con los requerimientos de clase F (Jiménez Guzmán, 2015).

La temperatura del bobinado del estator se monitorea mediante veinticuatro detectores dobles de temperatura tipo Pt-100 distribuidos uniformemente a lo largo de la periferia y alojados entre las barras de fondo y alto, a media altura (Jiménez Guzmán, 2015).

Figura N° 7 Bobinado del Estator

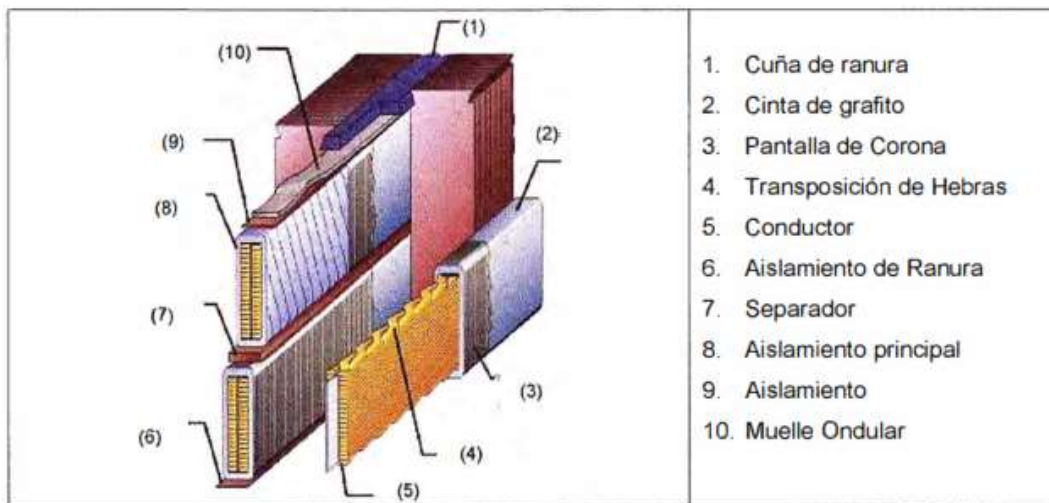


Fuente: Jiménez Guzmán, (2015).

2.2.6. Acuñado de la Ranura

Durante el funcionamiento, el bobinado es objeto de fuertes esfuerzos electrodinámicos. Si las barras no se ajustan firmemente en las ranuras, las fuerzas electromagnéticas pueden producir vibración en las barras, lo que lleva a un rápido deterioro del aislamiento. Por tanto, es muy importante tener un ajuste firme y un acuñado duradero (Madrigal, 1998).

Figura N° 8 Esquema de la ranura acuña



Fuente: Madrigal, (1998).

Entre barras de fondo y alto se inserta una tira intermedia aislante. Las ranuras se cierran finalmente con tiras de relleno, tiras onduladas tipo muelle y cuñas de ranura. La pretensión de las tiras onduladas tipo muelle varía en función del número de tiras de relleno (Madrigal, 1998).

2.2.7. Polos

El polo es una unidad compacta y básicamente consiste en:

- El cuerpo del polo está compuesto por una placa central y chapas cortadas de 3mm de espesor, apiladas y compactadas con presión mediante dos placas en los extremos y un bulón que la atraviesa va soldado a éstas últimas. Las pérdidas del polo se minimizan con este método.
- El bobinado polar se hace con pletinas de cobre aislado con vidrio de mica. Para compactarlo y evitar que haya aire entre las pletinas, se introduce el polo completo en el tanque de impregnación y tras este proceso se cura en el horno.
- El bobinado se aísla del hierro mediante cordones de fibra de vidrio impregnados con resina (Madrigal, 1998).

Figura N° 9 Esquema de la ranura acuña



Fuente: Madrigal, (1998).

Cada polo se fija a la brida del molino mediante 3 bulones de alta calidad pre templados. El bulón central conecta los polos a la brida durante el montaje. Los otros dos soportan todas las fuerzas, uniendo la placa central del polo y la brida del molino mediante dos casquillos excéntricos cada uno, de forma que esta unión permite ajustar la posición unos 5mm en todas las direcciones, sobre todo para ajustar el entrehierro (Madrigal, 1998).

2.2.8. Ventilación y Refrigeración

“Las pérdidas del motor (cobre, hierro, caudal de aire, etc.) son disipadas mediante aire refrigerado dirigido en lo posible a los lugares donde se produce el calentamiento”

“Las cajas de refrigeración están separadas de la carcasa. La conexión se realiza con juntas de goma elásticas unidas a la parte inferior de la carcasa”.

El movimiento del aire de refrigeración se consigue con ventiladores montados en las cajas de refrigeración y fluye de forma radial entre los polos, el entrehierro, el paquete magnético y el bobinado, para volver de nuevo a las cajas de refrigeración, donde se enfría al atravesar por el refrigerante.

La temperatura se monitorea en los siguientes puntos, para tener un control global de la ventilación y el sistema de refrigeración:

- 48 RTDs en el bobinado (24 funcionando+ 24 en espera).
- 4 RTDs en el lado de aire fría.
- 2 RTDs en el lado de aire caliente.
- 2 RTDs en la entrada de agua fría.
- 2 RTDs en la salida de agua caliente.
- 8 RTDs en paquete del estator.
- 8 RTDs en la carcasa (De la Rosa Francisco, 2016).

RTD = Resistance Temperature Detector

Figura N° 10 Caja de refrigeración



Fuente: De la Rosa Francisco, (2016).

El caudal de agua se chequea mediante dos caudalímetros (uno por cada caja de refrigeración) con indicador local de caudal y detector de caudal bajo. Posibles fugas de agua son también detectadas mediante dos sensores y dos detectores de humedad, situados estratégicamente en la carcasa.

El sistema de refrigeración se ha diseñado de tal forma que el agua está en la parte de abajo del motor, de forma que una posible fuga no afectaría directamente a la parte más sensible de la máquina: “El Bobinado” (De la Rosa Francisco, 2016).

2.2.9. Sensor de Entrehierro (AirGap)

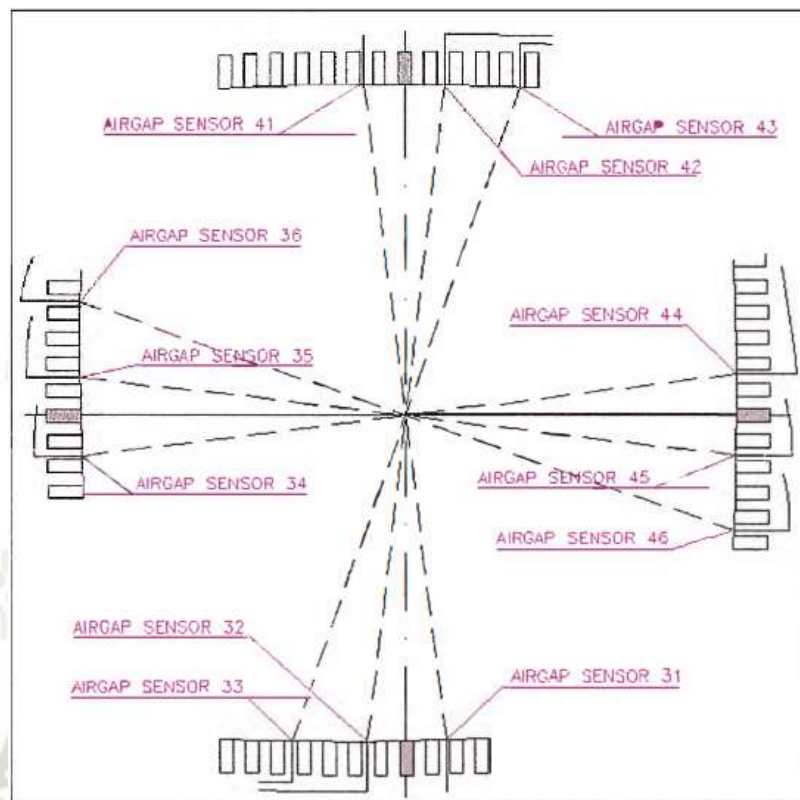
“El sistema de medida del entrehierro consiste en doce sensores instalados a lo largo del paquete magnético en las verticales y horizontales del mismo, como se indica en la figura”.

Las medidas se toman en esas posiciones, para tener valores de medidas de entrehierros en la horizontal y vertical, así como excentricidades. En cada posición vertical y horizontal se instalan tres sensores, a mitad de altura de paquete, con una configuración de pares diametralmente opuestos.

La razón de usar tres sensores en cada posición es para tener la redundancia necesaria en caso de que un sensor falle (falta de señal) y al mismo tiempo otro sensor quede entre dos polos.

En ese caso aun tendríamos un sensor que daría una señal válida del entrehierro incluso estando el molino parado. En caso de que un sensor falle (el propio sensor, el convertidor de señal o el cable de unión) no hay inconveniente en arrancar el molino, solamente hay una falta de redundancia en esa posición y el sensor debe ser reparado en la siguiente parada de mantenimiento (De la Rosa Francisco, 2016).

Figura N° 11 Sistema de medida del entrehierro



Fuente: De la Rosa Francisco, (2016).

2.2.10. Anillos Rozantes y Escobillas

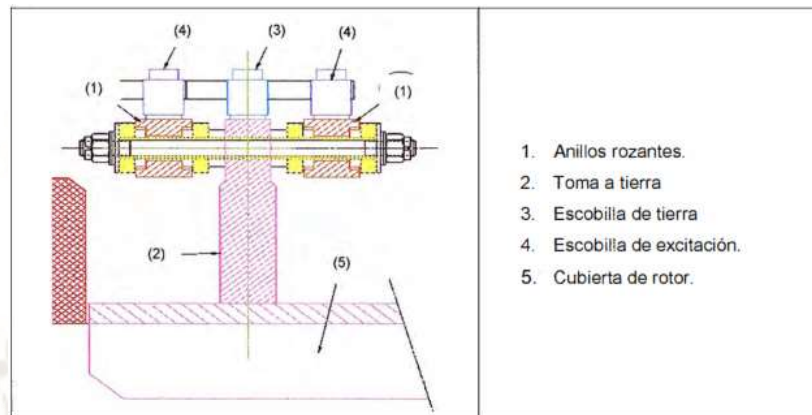
Los anillos rozantes permiten la transmisión de la corriente de excitación de la porta escobillas estático al bobinado del rotor en movimiento. Básicamente está compuesto por doce segmentos de cobre cada anillo, y son soportados en las cubiertas del rotor (Morales, 2014).

Todos los segmentos están conectados al siguiente mediante dos placas en ambos extremos y un pasador, para asegurar una transición suave de las escobillas en las juntas, de forma que tengan menor desgaste (Morales, 2014).

Atornillados a los anillos se utilizan dos bulones aislados para la conexión a los terminales del rotor. “Las escobillas se fijan al estator por medio de bulones aislados. Hay tres sets de porta escobillas, dos para la excitación del rotor (conteniendo diez escobillas y porta escobillas

cada una) y una para la toma a tierra (conteniendo dos escobillas y porta escobillas)” (Morales, 2014).

Figura N° 12 Anillos Rozantes y Porta escobillas



Fuente: Morales, (2014).

2.2.11. Sistema de Sellado

Para asegurar el grado de protección requerida, se provee un sistema de sellado entre el rotor y el estator. Las características principales son, en primer lugar, que sea axial, para mantener el funcionamiento bajo la relativa gran deformación que sufre el molino, en segundo lugar, que no se use grasa y, en tercer lugar, que se asegure la posición con un muelle para garantizar el sellado, aunque exista un movimiento axial del molino de ± 5 mm”

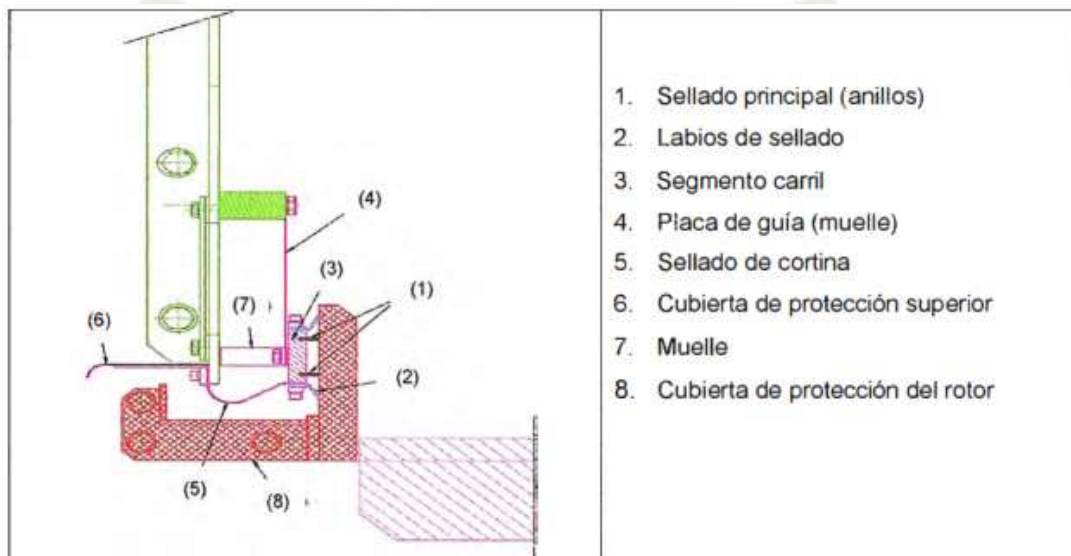
Los límites son alta presión para una larga vida, y baja presión para un sellado adecuado.

Según se muestra en la figura siguiente, la parte activa de este sistema son dos anillos principales (1) de una mezcla de bronce y teflón y recubiertos por una protección mecánica. La vida mínima estimada está en el orden de 16-20.000 horas de funcionamiento, dependiendo de las condiciones ambientales.

El sistema está monitoreado y salta una alarma cuando quedan 2.000 horas de funcionamiento antes de llegar a gastarse completamente (hay

un sensor en el segmento carril (3) que hace contacto con el rotor, el cual está conectado a tierra, cuando los anillos de sellado están casi desgastados). Esto permite hacer un planeamiento para trabajos de mantenimiento

Figura N° 13 Sistema de sellado



Fuente: Morales, (2014).

Para mantener la presión interna del motor por encima de la atmosférica, en ambos lados van fijados a la carcasa dos ventiladores de sobrepresión (4 en total). Este sistema asegura que, en caso de un fallo en el sistema de sellado, será el aire de dentro de la máquina el que salga fuera, evitando así la entrada al motor de partículas y la contaminación (Morales, 2014).

Especificaciones Técnicas

Tabla N° 1 Datos Generales 1

Datos	
Tipo de Maquina	WAZ 920/78/46
Clase de Aislamiento (Estator)	F
Clase de Temperatura	B
Estanqueidad	IP 55
Pintado	RAL 7030

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2 Datos Generales 2

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia Aparente Natural	21052	kVA
Potencia Natural	20000	kW
Tensión Nominal	4950	V
Intensidad Nominal	2470	A
Frecuencia Nominal	5.538	Hz
Par (Arranque)		KNm
Par (Nominal)		KNm
Numero de Polos	46	
Numero de Fases	3	
Conexión	Y	
Velocidad Nominal	9.23	RPM
Clase de Aislamiento del Rotor	F	
Tensión Nominal de Excitación	478	V
Intensidad Nominal de Excitación	547	A
Estándares	NEMA	
Dirección de Rotación	Both	

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3 Parámetros eléctricos

MOTOR SINCRONO	
Potencia	: 20.142 MW
Factor Potencia	: 0.97
Tension Nominal	: 4950 V
Corriente Nominal	: 2470 A
Corriente Excitación	: 547 A
Tension Excitación	: 478 V
Rango de Velocidad	: 0 11.23 RPM
Velocidad Nominal	: 9.23 RPM
Velocidad Creep	: 0.3 RPM
Velocidad Inching	: 0.92 RPM
Frecuencia	: 0 6.738 Hz
CICLOCONVERTIDOR	
Entrada	Fases : 6 x 3 - fases
	Tension por fase : 1606 V
	Corriente (RMS) : 2123 A
	Frecuencia : 60 Hz
Potencia Aparente : 6 x 5905 kVA	
Salida	Fases : 3 - fases
	Tension : 0 4950 V
	Corriente (RMS) : 2470 A
	Frecuencia : 0 5.538 6.736 Hz
Potencia Aparente : 21177 kVA	

Fuente: Elaboración propia

2.2.12. Máquina Síncrona

2.2.12.1. Introducción:

Hoy en día existen numerosas aplicaciones industriales que requieren transformar grandes cantidades de energía eléctrica y mecánica, tales como bombas, tracción, control industrial, etc.

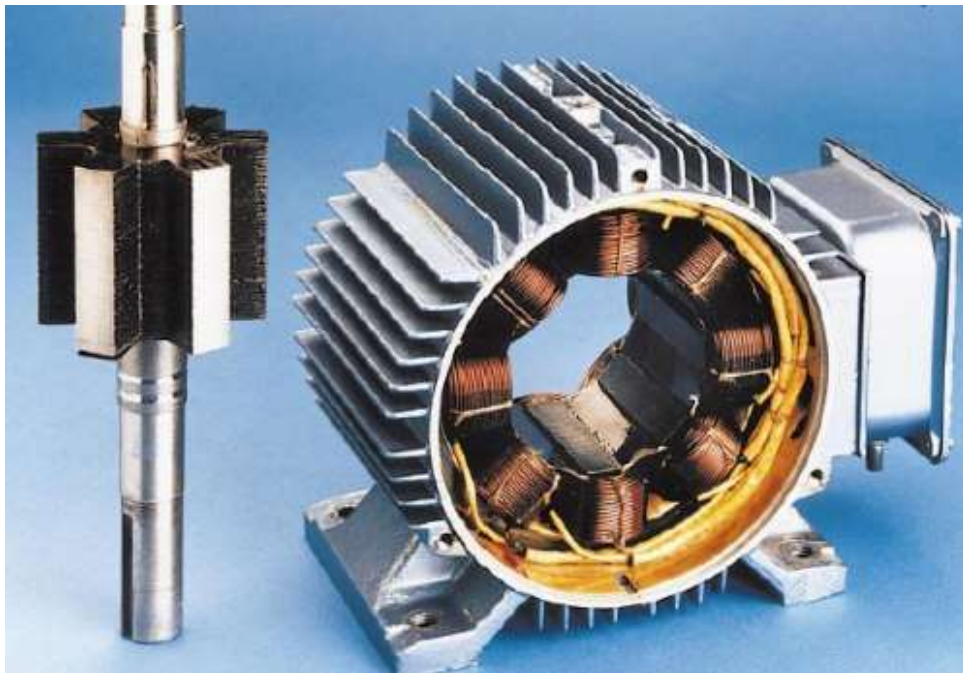
Para satisfacer esta necesidad, las máquinas de corriente continua y de inducción han sido las alternativas más comúnmente utilizadas.

Sin embargo, la creciente demanda por máquinas y accionamientos capaces de operar a mayores niveles de potencia y especialmente los procesos de conversión de energía primaria (petróleo, carbón, gas natural, etc.) han limitado el desempeño de las máquinas eléctricas tradicionales.

Debido a esas limitantes, la máquina síncrona es en la actualidad la más ampliamente utilizada para convertir grandes cantidades de energía eléctrica y mecánica.

Básicamente, la máquina síncrona es de una pieza giratoria denominada rotor o campo, cuya bobina se excita mediante la inyección de una corriente continua, y una pieza fija denominada estator o armadura por cuyas bobinas circula corriente alterna (Dante, 1992).

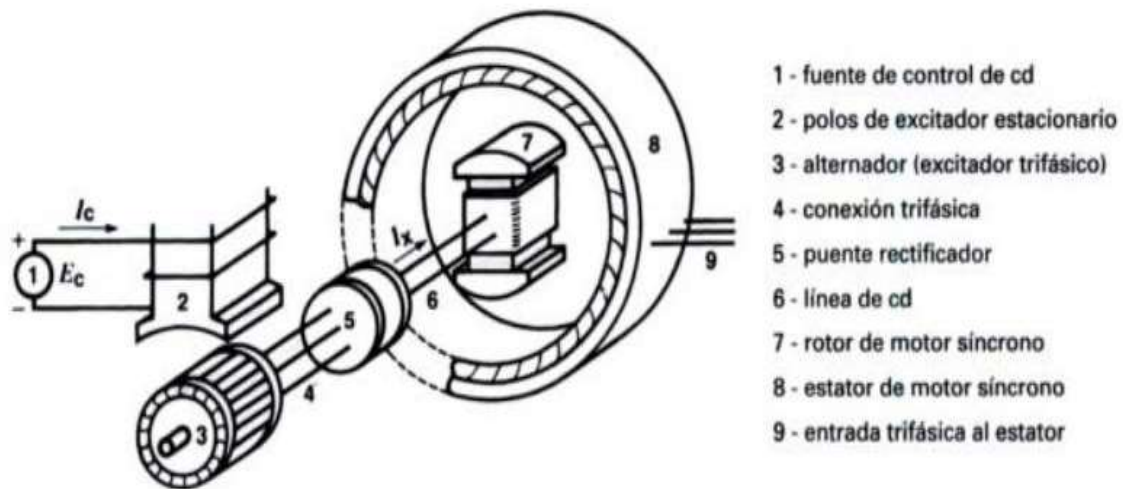
Figura N° 14 Máquina Síncrona



Fuente: Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos, (2002)

Las corrientes alternas que circulan por los devanados del estator producen un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la maquina con la frecuencia angular de las corrientes de armadura. El rotor debe girar a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator para que el torque eléctrico medio pueda ser diferente de cero (Tirado Pérez, 2019).

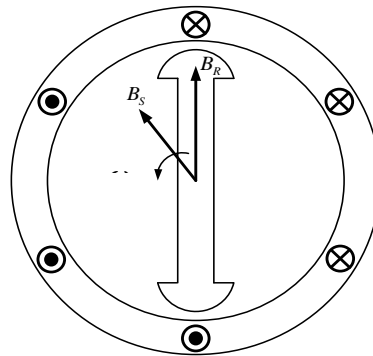
Figura N° 15 Motor síncrono



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2002)

El rotor debe de girar a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido en el estator para que el torque eléctrico medio pueda ser diferente de cero. Si las velocidades angulares del campo magnético rotatorio y del rotor de la máquina síncrona son diferentes, el torque eléctrico medio es nulo. Por esta razón a esta máquina se la denomina síncrona; el rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia del campo magnético rotatorio del estator durante la operación en régimen permanente (Tirado Pérez, 2019).

Figura N° 16 Torque fasorial del motor síncrono



$$T_{ind} = k \cdot B_R \cdot B_S$$

Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002)

A continuación se explica en resumen el principio de funcionamiento de la máquina síncrona:

ESTATOR= Devanado trifásico distribuido alimentado con un sistema trifásico de tensiones



CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO (B_s)



ROTOR= Devanado alimentado con corriente continua que crea un campo magnético fijo (B_r)



INTERACCIÓN ROTOR - ESTATOR



PAR MOTOR Y GIRO DE LA MÁQUINA

Dada su característica reversibilidad, la maquina sincrónica se utiliza como elemento motriz o como generador.

Y como resultado de lo anterior, cada día se incrementa el número de aplicaciones en la que puede ser utilizada, en especial por las ventajas que presentan las herramientas de control modernas mediante fuentes electrónicas de frecuencia y tensión variable aplicables a este tipo de máquina (Tirado Pérez, 2019).

2.2.12.2. Principio Funcionamiento

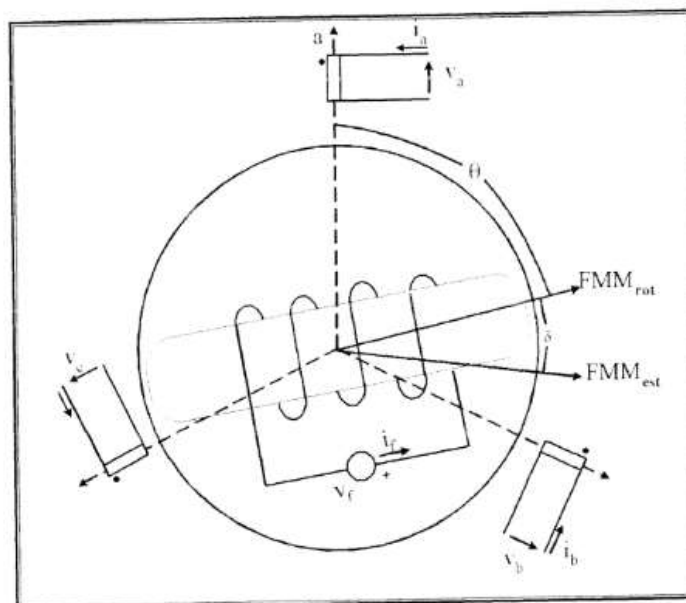
La estructura básica de una maquina síncrona se muestra en el siguiente gráfico. Tal como se puede ver, este tipo de convertidor electromecánico de energía consta de una pieza llamada rotor o campo, la cual a su vez cuenta con una bobina que se excita mediante corriente continua. Hay dos métodos comunes para suministrar la corriente continua necesaria:

- Suministrando potencia CC desde una fuente externa de CC, por medio de rozamiento y escobillas.
- Suministrando potencia CC desde una fuente de CC especial, montado directamente en el eje del generador síncrono.

Por otro lado, el campo magnético rotatorio producido por las corrientes alternas que circulan por el estator gira en el entrehierro con la frecuencia angular de las mismas.

De esta forma se obtienen dos campos magnéticos rotatorios que giran a la misma velocidad, uno producido por el rotor y otro por el estator. La interacción de ambos da origen a un toque eléctrico medio distinto a cero y el proceso de conversión de energía toma lugar (Rodríguez Pozueta, 2019)

Figura N° 17 Gráfica de los ejes eléctricos que gobiernan la interacción electromagnética entre el estator y el rotor.



Fuente: Rodríguez Pozueta, Miguel Ángel, (2019)

La condición para lograr torque diferente de cero se obtiene cuando la velocidad del campo magnético rotatorio y el rotor son iguales.

La expresión que evalúa la magnitud del toque producido por la maquina está dado por la expresión:

$$T = K * FMM_{estator} * FMM_{rotor} * \text{sen}(\delta)$$

Donde:

K es constante de proporcionalidad que depende de la geometría de la máquina y de la disposición física de las bobinas

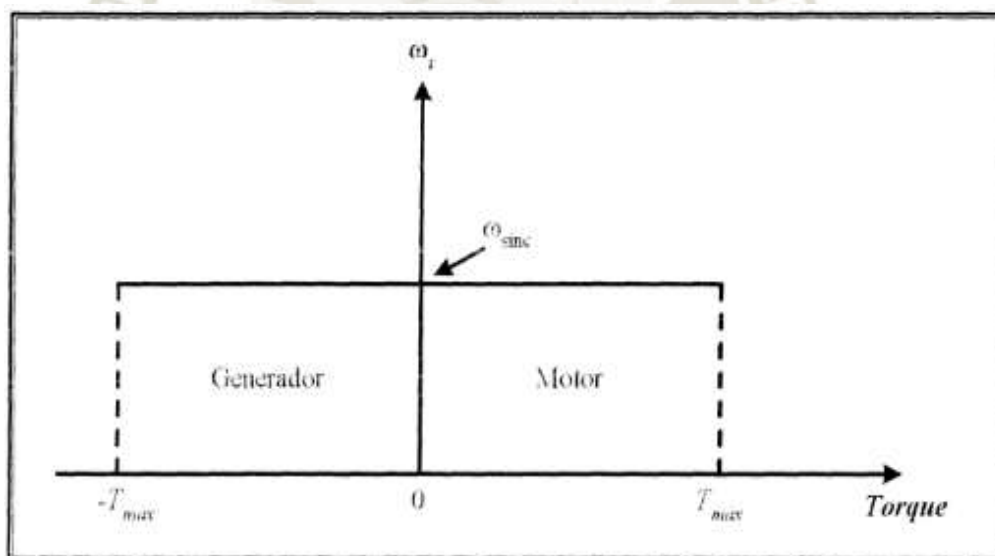
FMM es la amplitud de la distribución sinusoidal de la fuerza magneto motriz del estator y del rotor

δ es el ángulo entre las amplitudes de las dos fuerzas magneto motrices, conocido generalmente como ángulo de carga

Considerando que las amplitudes de las fuerzas magneto motrices son constantes, la condición de torque constante se dará cuando el ángulo de carga no varíe en el tiempo.

Debido al alto rendimiento que es obtener con este tipo de máquinas, su uso como elemento generador de energía se ha masificado. La figura siguiente ilustra la característica torque velocidad de una maquina sincrónica, operando como motor y como generador. En ella se apreciar que la maquina siempre gira a la velocidad de sincronismo, independiente del torque generado y del modo de operación de la misma.

Figura N° 18 Gráfica de comportamiento del torque de la máquina síncrona en régimen generador como régimen motor.



Fuente: Dugan & Brooks, (1999).

Su principal inconveniente para su uso como motor es que no desarrolla torque de arranque, pero si se incluye en el rotor de la maquina un devanado auxiliar de jaula de ardilla es posible obtener torque de aceleración como motor de inducción hasta una velocidad cercana a la de sincronismo, y excitar en el momento apropiado la bobina del campo, con la finalidad de sincronizar la maquina a la red

mediante los torques transitorios adicionales que se obtienen durante este proceso.

Si la fuente de alimentación puede reducir la frecuencia angular de las tensiones o corrientes de armadura a valores muy bajos, la máquina es capaz de sincronizarse a esa red y posteriormente ser acelerada a la par que se incrementa paulatinamente la frecuencia de la fuente.

Como la construcción de fuentes de gran potencia controladas en frecuencia es hoy día factible mediante puentes inversores con esta máquina ha incrementado notablemente su importancia como accionamiento industrial, e incluso ha llegado a desplazar, en muchas aplicaciones, a las máquinas de corriente continua (Dugan & Brooks, 1999).

Durante la operación de la máquina sincrónica en la velocidad mecánica del rotor es igual a la velocidad angular del campo magnético rotatorio producido por el estator. La expresión que cuantifica la velocidad síncrona de la máquina está dada por:

$$\omega_{sincronismo} = \frac{2 * \pi * f}{p}$$

Donde:

El ω es la velocidad de sincronismo

La f es la frecuencia de las corrientes por el estator

El p es el número de pares de polos

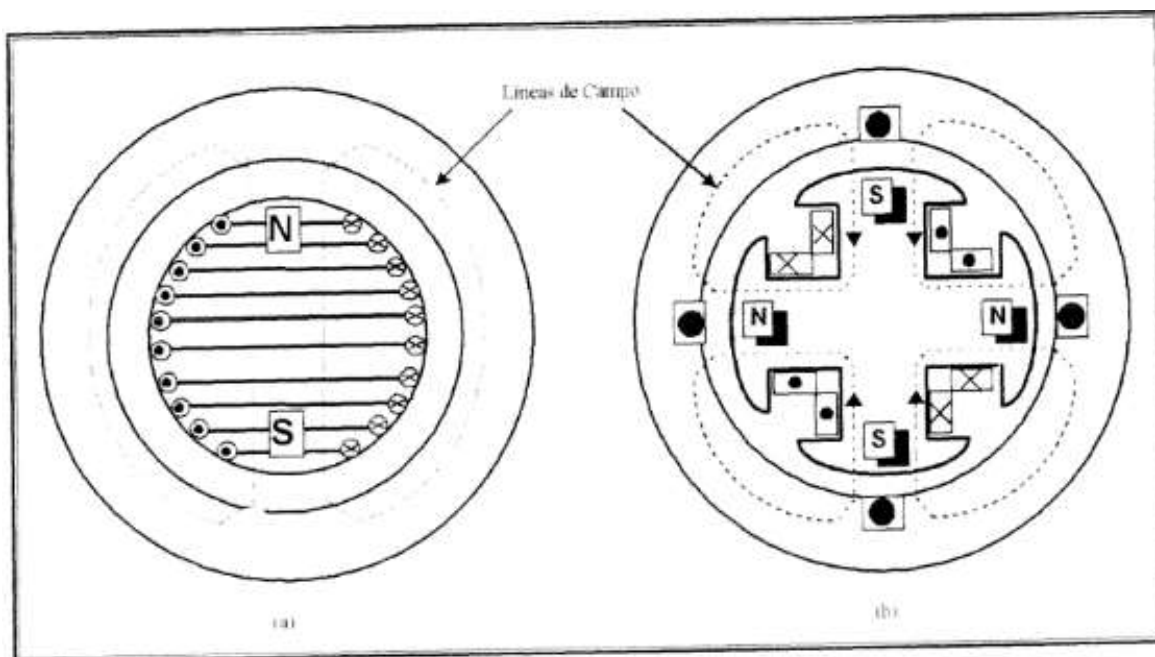
2.2.12.3. Tipos de Máquinas Síncronas:

Existen dos tipos diferentes de máquinas síncronas: de polos salientes y máquina síncrona de rotor cilíndrico. La figura proporciona una vista de la transversal de ambos tipos de construcción.

Los rotores de polos no salientes (o rotor cilíndrico) se usan normalmente para rotores de dos y cuatro polos, mientras que los de polos salientes se utilizan normalmente en rotores de cuatro o más polos. Como el rotor está sujeto a cambios en los campos magnéticos, se construye de láminas delgadas para reducir pérdidas por corriente parásitas (Rodríguez Pozueta, 2019).

La máquina de polos salientes es usada en aplicaciones de baja velocidad (menores a 300 rpm). Como generador, es empleada en turbinas hidráulicas en centrales hidroeléctricas; como motor, se usa ampliamente en molinos semiautógenos en procesos de molienda de minerales. En cambio, las máquinas de rotor cilíndrico son usadas típicamente a velocidad que fluctúan entre los 1800 y 3600 rpm. Son utilizadas principalmente acopladas a turbinas de vapor o gas en centrales eléctricas térmicas o en centrales nucleares (Rodríguez Pozueta, 2019).

Figura N° 19 Máquina síncrona con jaula de amortiguamiento.



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2003).

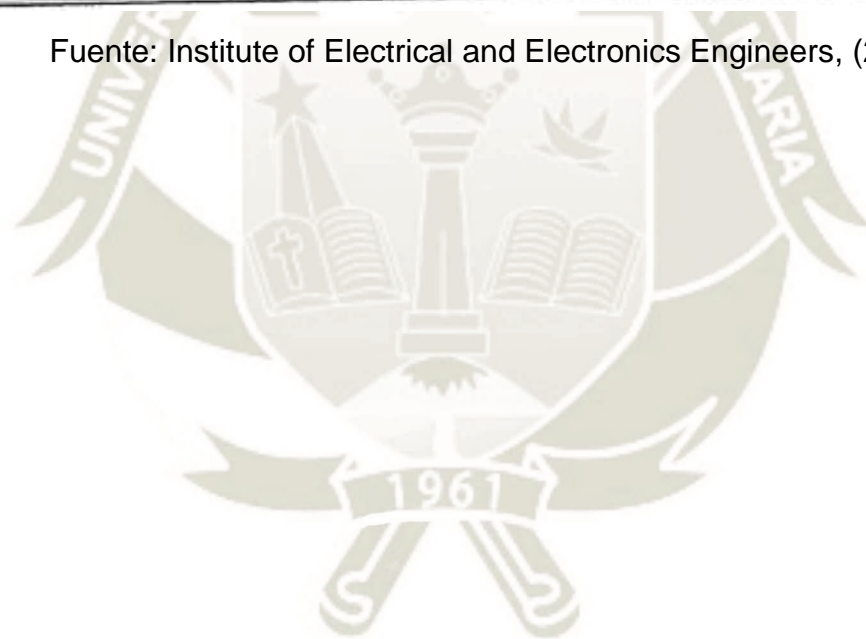
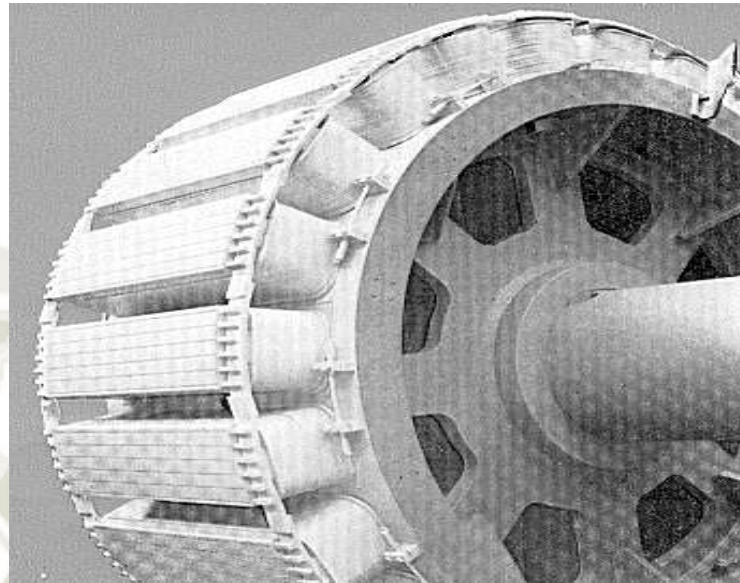


Figura N° 20 Gráfica del rotor de la máquina síncrona con jaula de amortiguamiento.



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2003).

2.2.12.4. Circuito equivalente

La máquina síncrona puede ser analizada desde el punto de vista eléctrico mediante sus circuitos equivalentes. Este estudio puede ser realizado tomando en cuenta solo una fase, ya que los dos restantes se comportan de forma análoga.

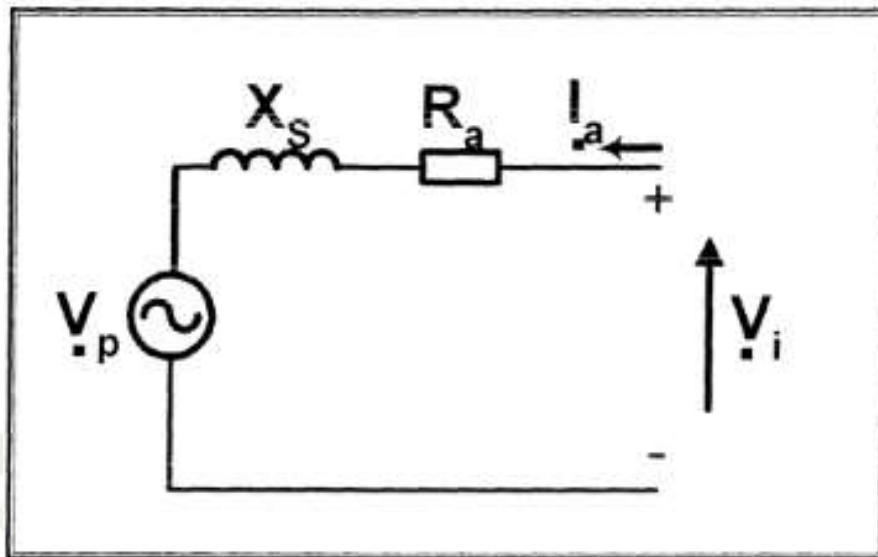
Circuito equivalente por fase en términos de la reactancia síncrona.

El circuito simplificado por fase que se muestra, toma en cuenta la tensión que el rotor induce sobre el estator y se representa por V_p . La reactancia síncrona viene dada por X_s .

Internamente existe una tensión, que es la responsable del movimiento y resultante del efecto de campo en el entrehierro.

El modelo expuesto lo denota como V_i Por último, se tiene R_a , que es la resistencia del estator. De todas formas, la caída de tensión en esta resistencia es generalmente despreciada en máquinas grandes (Jiménez Guzmán, 2015).

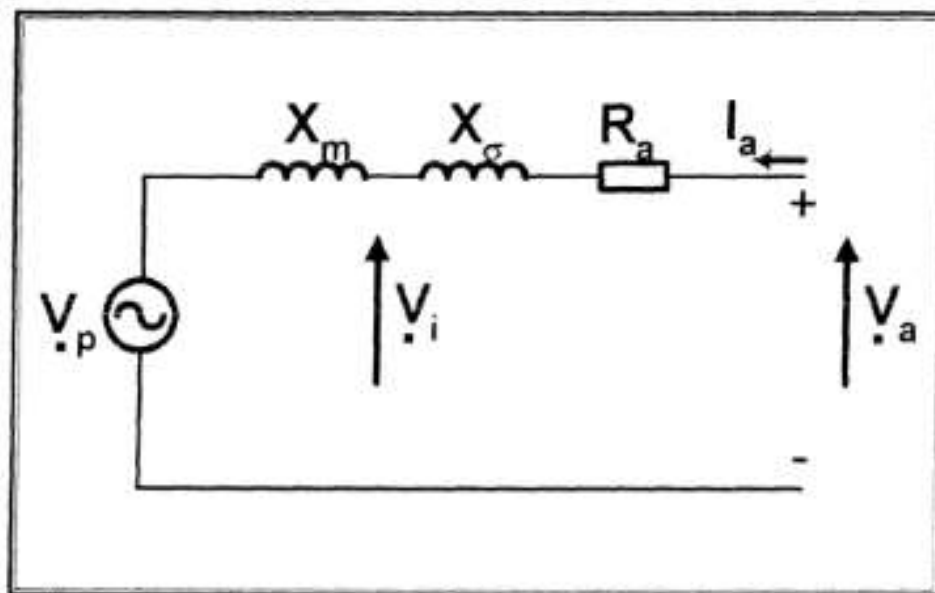
Figura N° 21 Circuito equivalente por fase en términos de dos componentes de la reactancia síncrona.



Fuente: Jiménez Guzmán, (2015).

Si se toma en cuenta los componentes de la reactancia síncrona por separado en el circuito equivalente, entonces se tendrá un esquema en el que se podrá observar el efecto de reactancia X_d , la cual se define como la reactancia de dispersión del estator. Existe además otra componente, que es la que corresponde a la reactancia de reacción de armadura X_m . La suma de ambas constituye la reactancia síncrona X_s . El voltaje V_1 corresponde ahora a la tensión de entrehierro, generado por el flujo en el entrehierro. Y la tensión V_a corresponde a el voltaje de terminales del estator fase – neutro (Dugan & Brooks, 1999).

Figura N° 22 Circuito equivalente completo de la máquina síncrona de polos salientes.



Fuente: Dugan & Brooks, (1999).

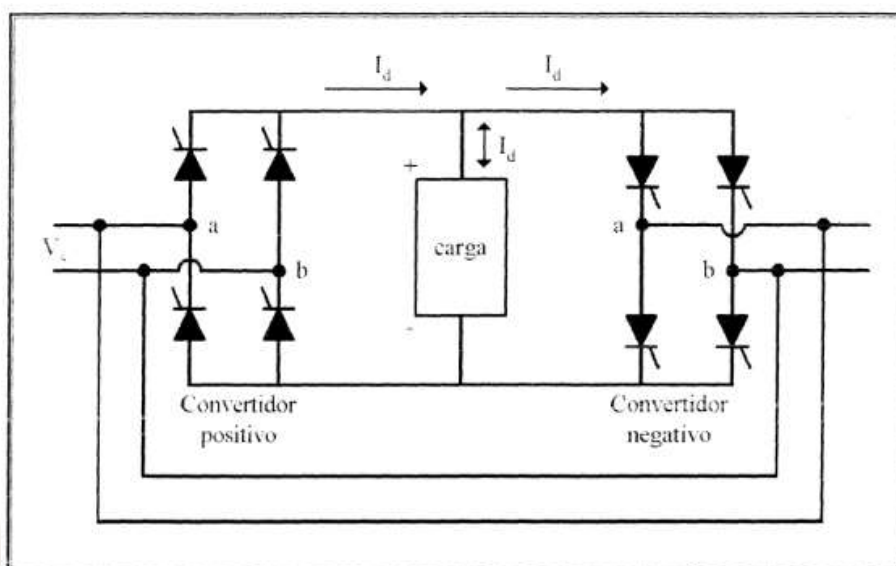
2.2.13. Principio de Funcionamiento del Cicloconvertidor

2.2.13.1. Cicloconvertidor Monofásico

Este convertidor consiste en la conexión de 2 rectificadores puente monofásico de onda completa en paralelo y opuestos entre sí. El diagrama de conexiones y la figura de las formas de onda en operación con carga resistiva.

El voltaje de entrada V , es una tensión alterna de una frecuencia f , tal como se aprecia en los gráficos. Para una mejor comprensión se asumirá que el ángulo disparo es de $\alpha = 0$, esto es, los tiristores actúan como diodos. Note que los ángulos de disparo corresponden a los tiristores del convertidor positivo y del convertidor negativo, respectivamente (Aguilar, 2012).

Figura N° 23 Configuración de un cicloconvertidor monofásico –monofásico

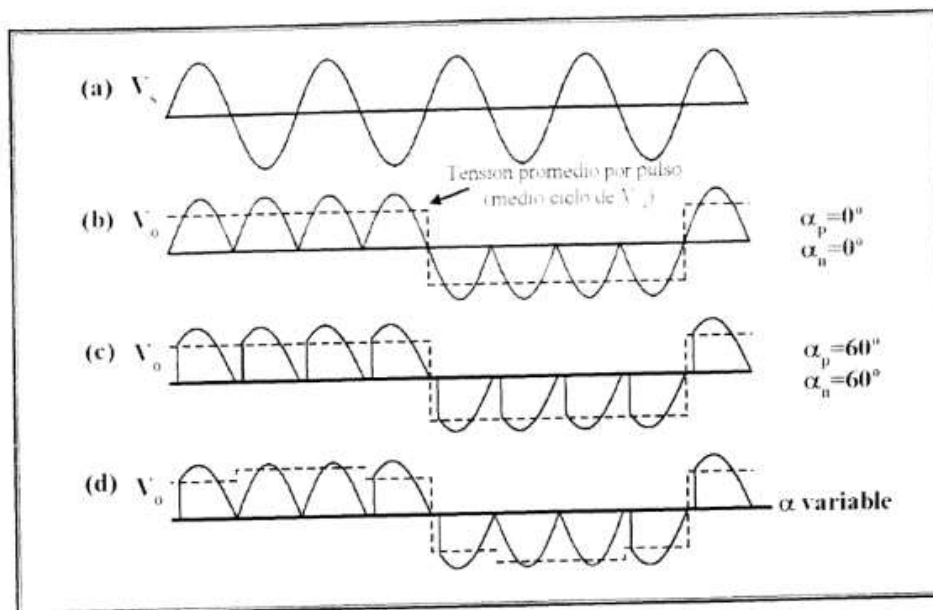


Fuente: Aguilar, (2012).

Considere la operación del cicloconvertidor a una frecuencia igual a $\frac{1}{4}$ de la frecuencia de entrada. Para los 2 primeros ciclos de V , opera el convertidor positivo suministrando corriente a la carga, rectificando el voltaje de entrada. De este modo, en la carga existen 4 pulsos positivos por cada periodo de la señal de voltaje, como se puede ver en el gráfico. En los próximos 2 ciclos, opera el convertidor negativo suministrando corriente a la carga en sentido opuesto. De este modo la frecuencia de salida del convertidor es 4 veces menor a la de entrada de la fuente.

La frecuencia de V_o puede ser cambiada variando el número de ciclos de operación de ambos convertidores. Una operación con un ángulo de disparo α constante provoca una onda de salida con un alto contenido armónico (Universitat de València, 2019).

**Figura N° 24 Gráfica de las ondas de salida que alimentan a la carga
producto del cicloconvertidor monofásico – monofásico**



Fuente: Universitat de València, (2019).

2.2.13.2. Cicloconvertidor Trifásico (Carga Monofásica)

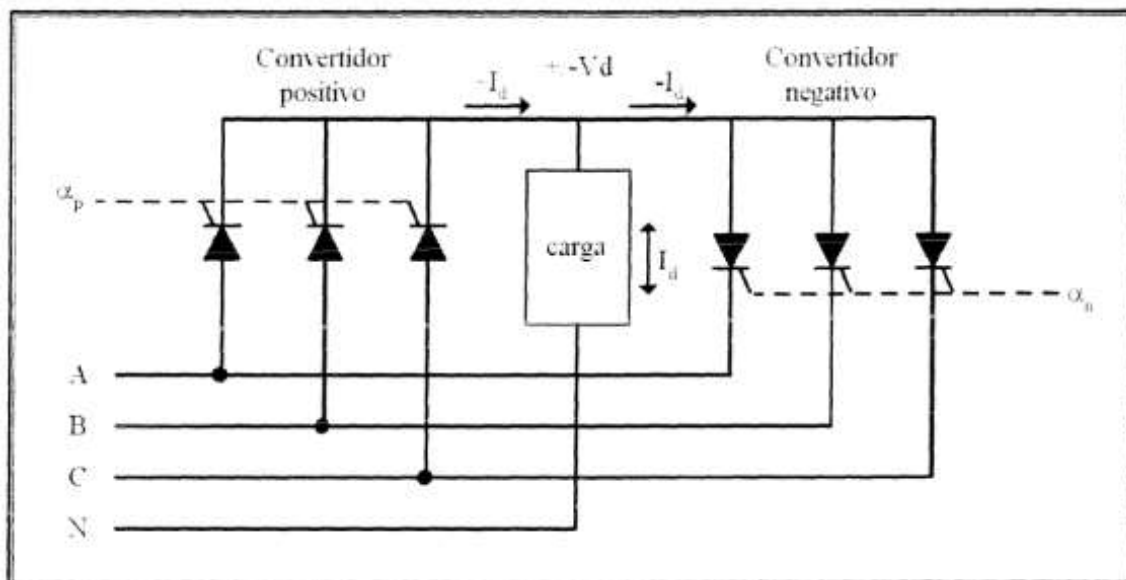
Estos cicloconvertidores son alimentados por una red trifásica y alimentan a una carga monofásica. En el gráfico adjunto se aprecia las formas de onda del cicloconvertidor de 3 pulsos operando con carga resistiva. Se puede apreciar que el ángulo de disparo es modulado sinusoidalmente sobre cada ciclo para generar un voltaje de salida de bajo contenido armónico.

La polaridad de las corrientes determina si es el convertidor positivo o el negativo quien suministra la potencia a la carga. Convencionalmente, el ángulo de disparo para el convertidor positivo es denominado α_p y su similar para el convertidor negativo es denominado α_n . Cuando la polaridad de la corriente cambia el convertidor que previamente estaba alimentando la carga se desconecta y el otro convertidor es habilitado. La carga requiere que siempre el voltaje fundamental sea continuo.

De este modo, durante la conmutación de la polaridad de la corriente, el voltaje medio suministrado a la carga por ambos convertidores debe ser el mismo.

Si no es así, conmutar de un convertidor a otro podría ocasionar sobre voltajes y sobrecorriente indeseados. Para prevenir este problema, los convertidores son forzados a producir el mismo voltaje promedio durante la conmutación (McAllister, 2019).

Figura N° 25 Cicloconvertidor trifásico – monofásico (3 pulsos)



Fuente: McAllister, (2019).

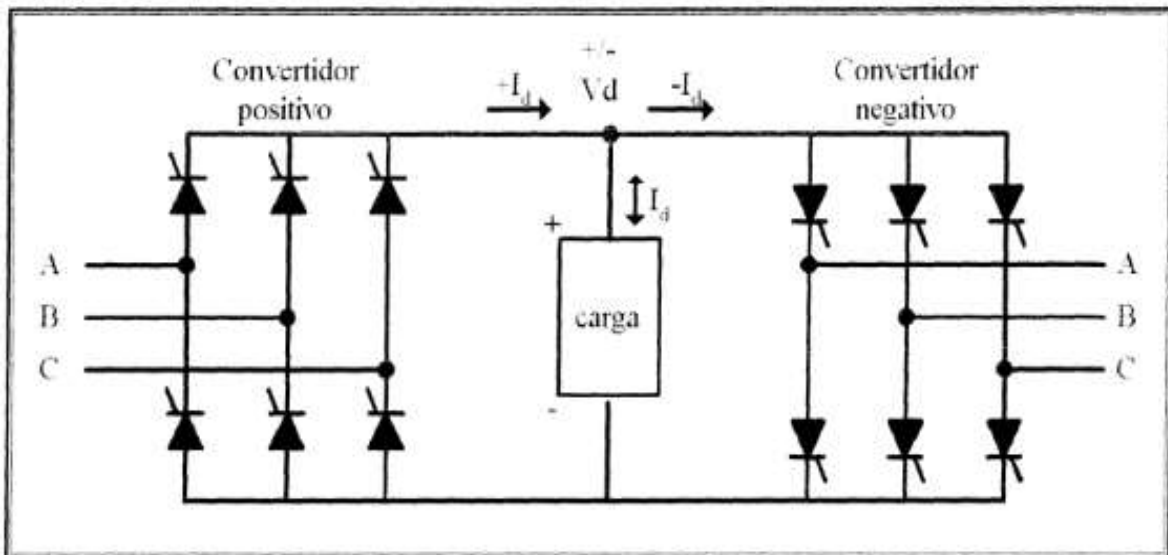
2.2.13.3. CICLOCONVERTIDOR TRIFASICO – MONOFASICO (6 PULSOS)

De este modo, es necesario que los ángulos de disparo satisfagan la siguiente relación:

$$\alpha_p + \alpha_n = \pi$$

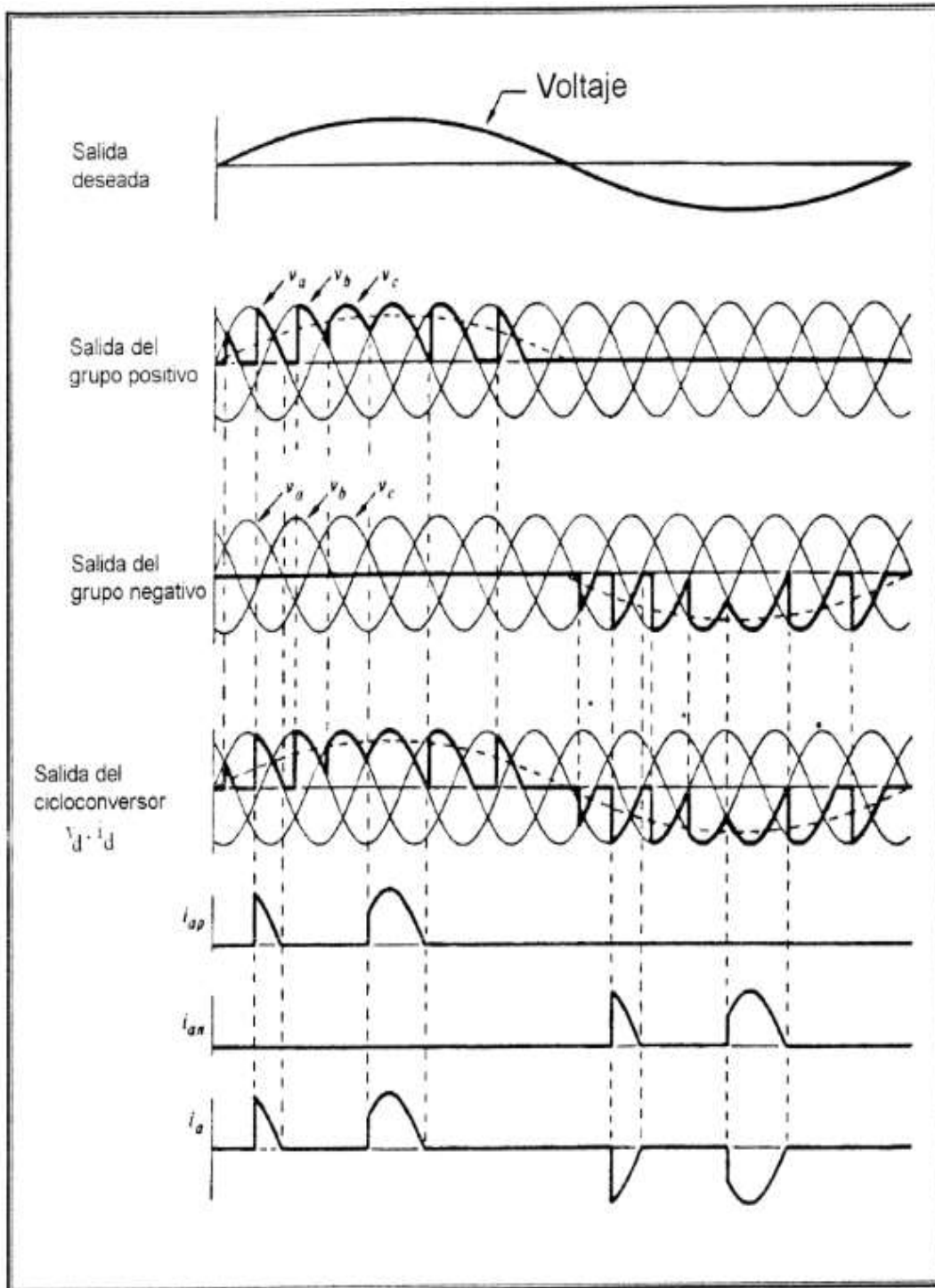
2.2.13.4. FORMAS DE ONDA DE UN CICLOCONVERTIDOR TRIFASICO

Figura N° 26 Cicloconvertidor trifásico – monofásico (6 pulsos)



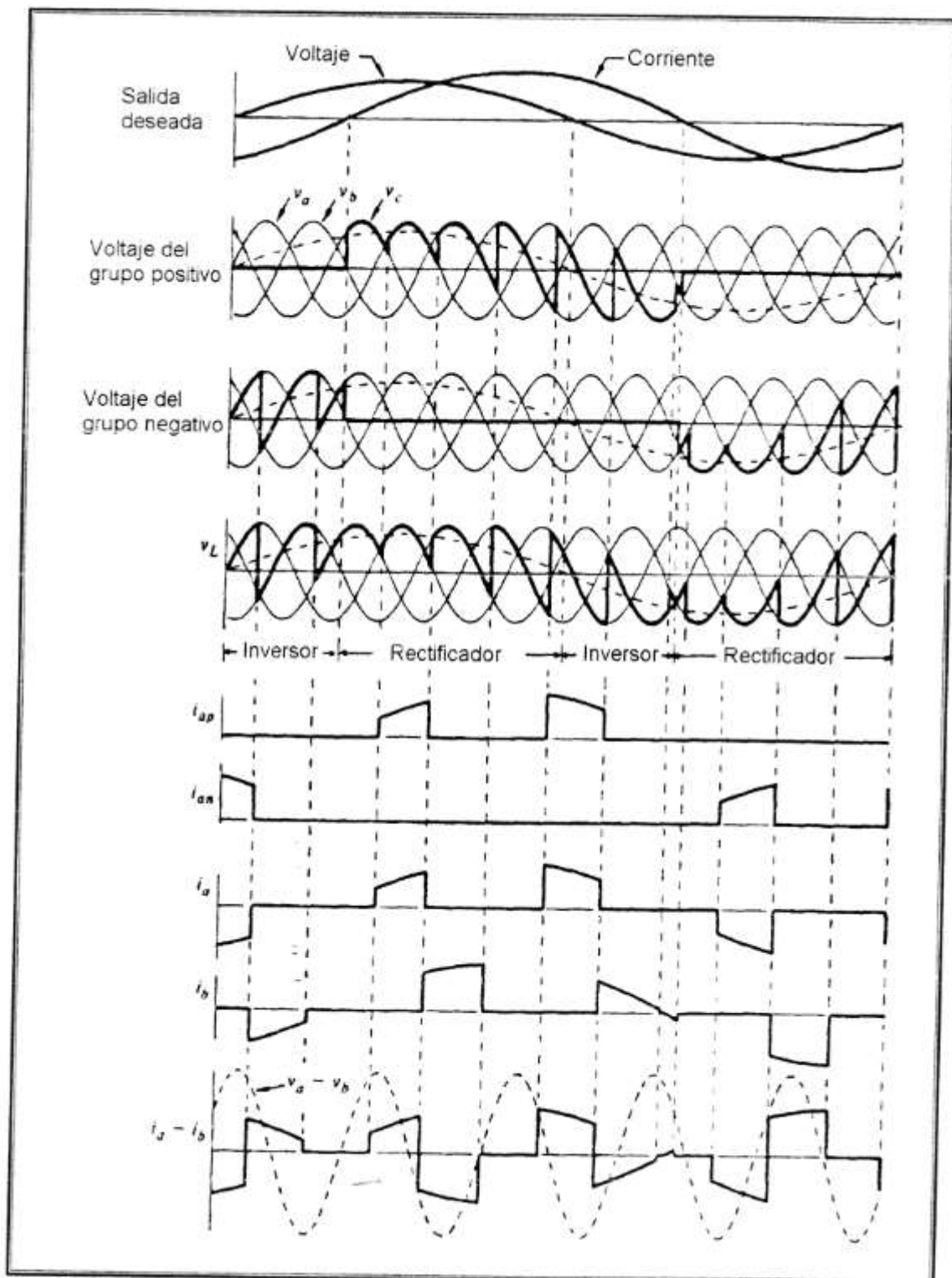
Fuente: McAllister, (2019).

Figura N° 27 Carga monofásica de 3 pulsos con carga resistiva.



Fuente: McAllister, (2019).

Figura N° 28 Formas de onda de un cicloconvertidor trifásico (carga monofásica) de 3 pulsos con carga inductiva.

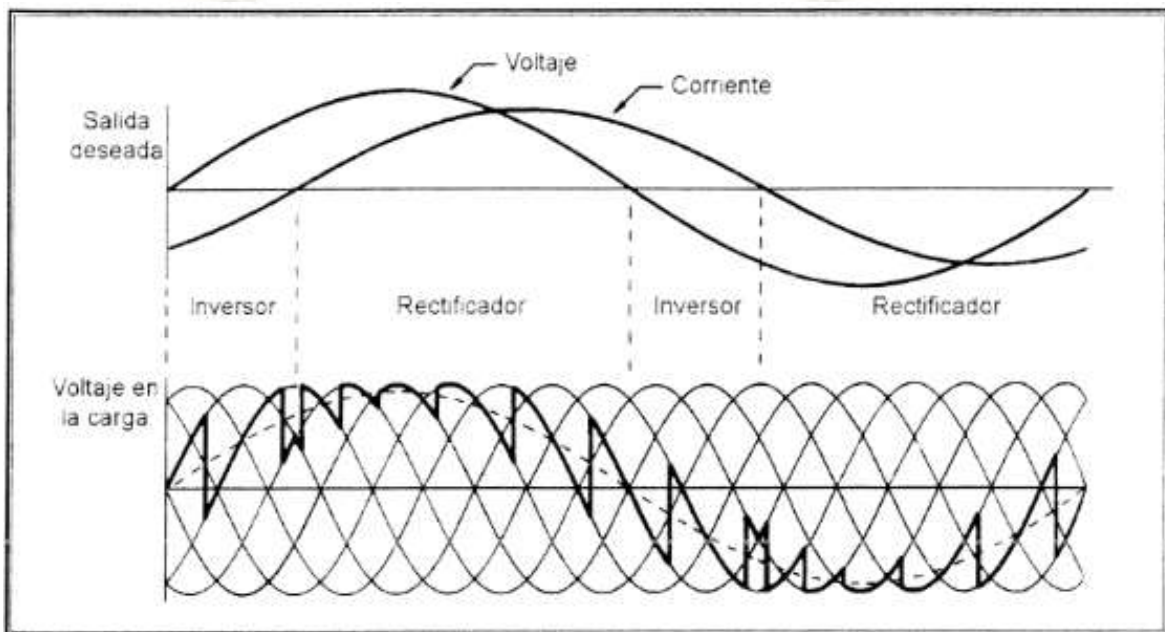


Fuente: McAllister, (2019).

La figura adjunta ilustra las formas de onda de un cicloconvertidor trifásico (carga monofásica) de 6 pulsos con una carga RL.

El principio de operación es básicamente igual que el de 3 pulsos.

**Figura N° 29 Cicloconvertidor trifásico (carga monofásica)
de 6 pulsos con una carga RL**

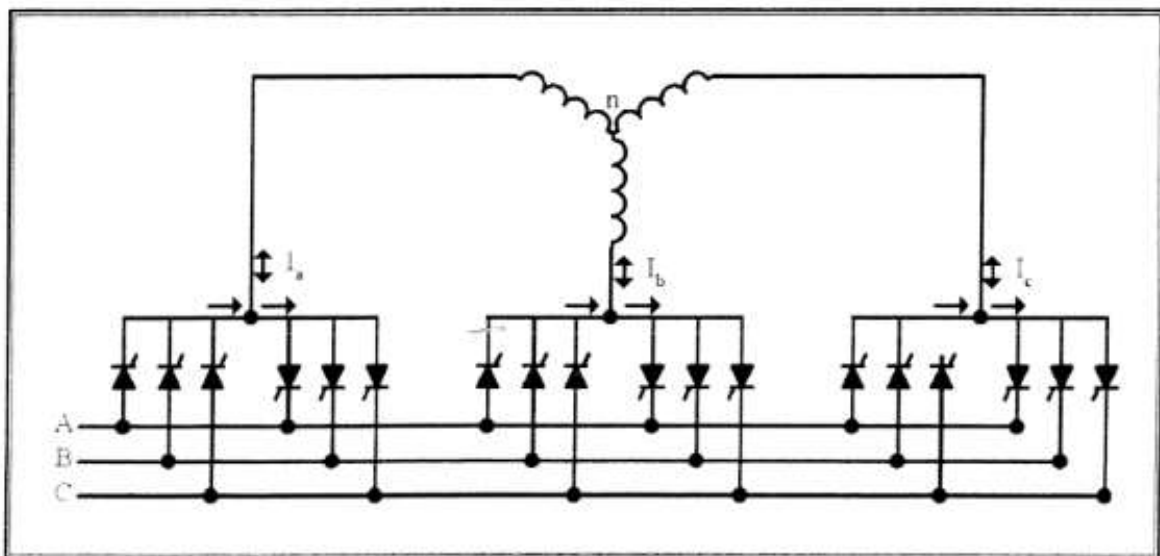


Fuente: McAllister, (2019).

2.2.13.5. Cicloconvertidor Trifásico (Carga Trifásica)

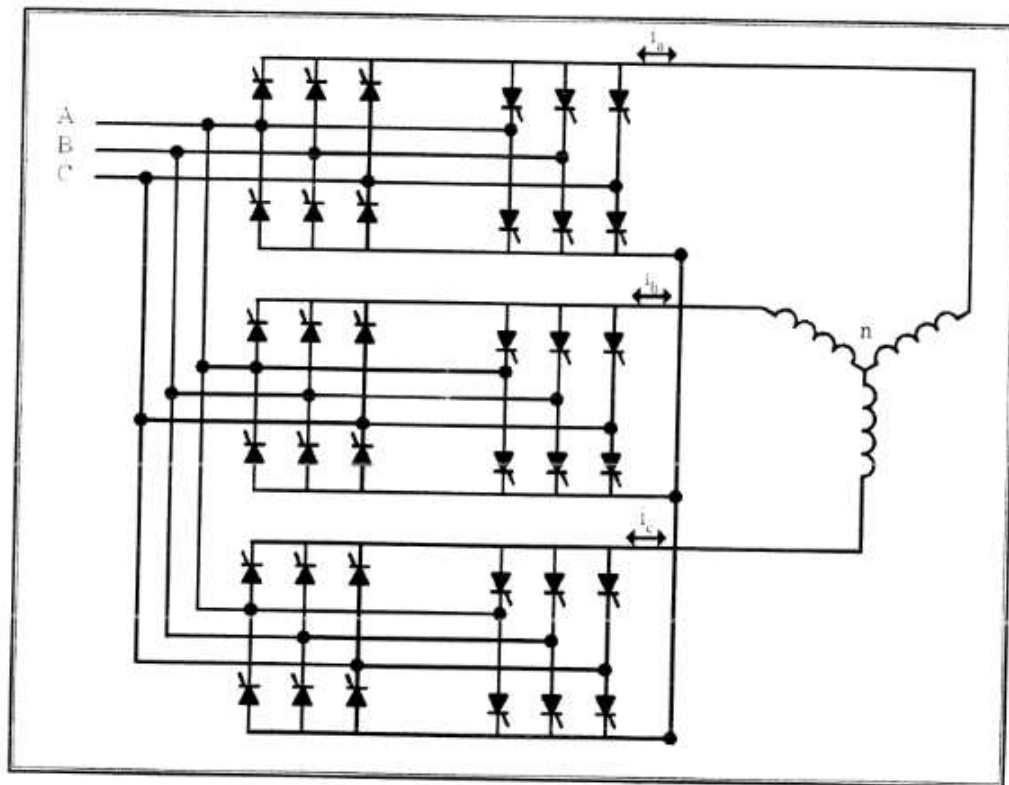
Si las salidas de un cicloconvertidor trifásico (carga monofásica) son conectadas en estrella o en delta y los voltajes de salida están desfasados 120 grados entre sí, el convertidor resultante es un convertidor trifásico para una carga trifásica; su disposición se muestra en la figura adjunta. Si los 3 convertidores conectados son de media onda, entonces el nuevo convertidor es denominado cicloconvertidor trifásico de 3 pulsos o cicloconvertidor de 18 tiristores. Por otro lado, si los tres convertidores conectados son de onda completa, entonces el nuevo convertidor es denominado cicloconvertidor de 6 pulsos o de 36 tiristores (Salazar, 2013).

Figura N° 30 Cicloconvertidor trifásico (carga trifásica) de 3 pulsos



Fuente: Salazar, (2013).

Figura N° 31 Cicloconvertidor trifásico (carga trifásica) de 6 pulsos



Fuente: Salazar, (2013).

Los Cicloconvertidores trifásicos son usualmente empleados en máquinas AC o motores síncronos, como así también en máquinas de inducción.

Puede además suministrar corriente “atrasada” con respecto al voltaje o con factor de potencia unitario, ya que una máquina síncrona puede consumir corriente con cualquier factor de potencia desde el convertidor. Esta característica de operación indica que el cicloconvertidor es el accionamiento más apropiado para este tipo de motores.

Modos de Operación

Existen básicamente 2 modos de operación de un cicloconvertidor. Cuando la corriente por la carga es positiva, el convertidor positivo provee el voltaje necesario y el convertidor negativo permanece deshabilitado. Al contrario, cuando la corriente por la carga es negativa, el convertidor negativo provee el voltaje necesario y el convertidor positivo es bloqueado. Esta operación es denominada operación en modo bloqueo (*blocked mode operation*) y los cicloconvertidores que emplean esta técnica se denominan cicloconvertidores sin corriente circulante.

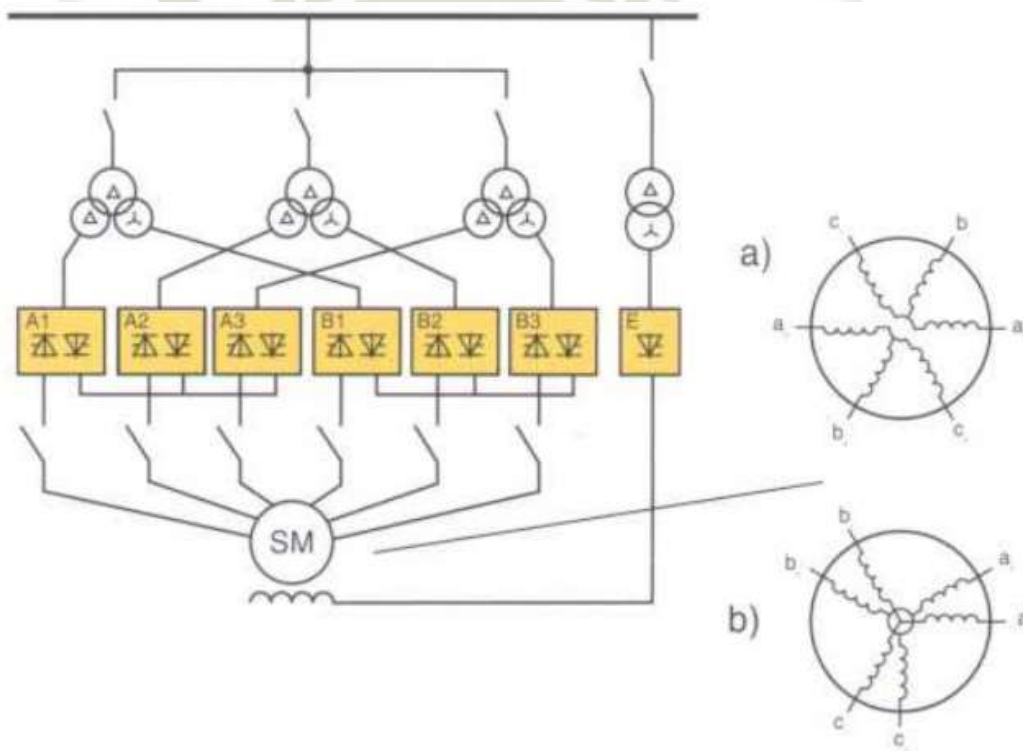
Sin embargo, si por alguna razón ambos convertidores son habilitados simultáneamente, la fuente de alimentación queda cortocircuitada. Para evitar este corte, se emplea una reactancia de interface (IGR, *Intergroup reactor*) entre ambos convertidores.

En vez de bloquear un convertidor durante la inversión de polaridad de la corriente, si ambos se encuentran conduciendo, se crea una corriente circulante entre ellos. Esta corriente es unidireccional debido a que los tiristores permiten el paso de la corriente solo en una dirección. De este modo, algunos cicloconvertidores permiten la circulación de esta corriente en cualquier instante de tiempo. Estos convertidores son denominados cicloconvertidores con corriente

circulante. La tendencia moderna es hacia el empleo de cicloconvertidores sin corriente circulante.

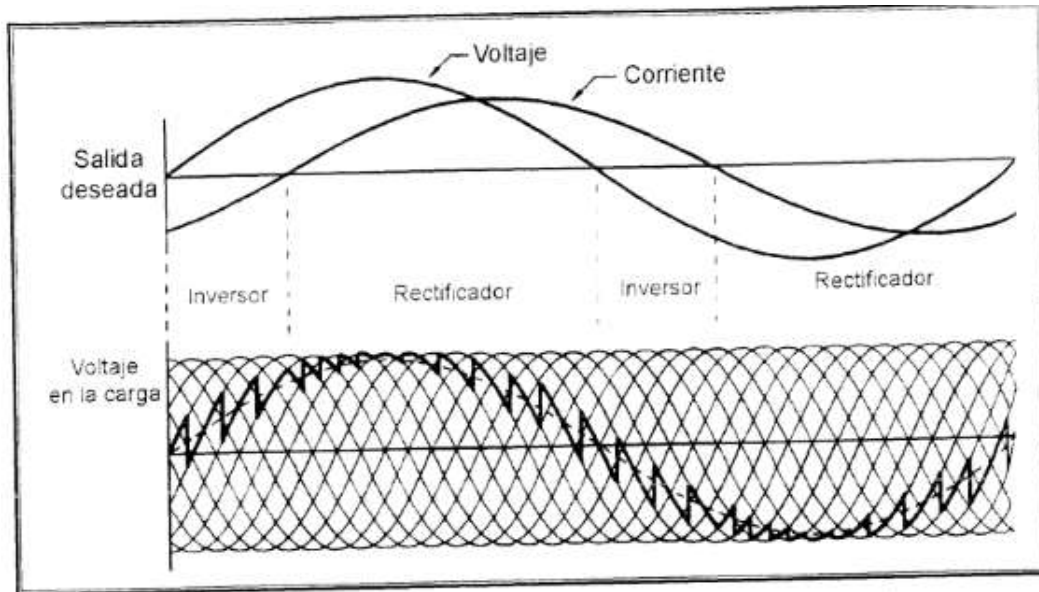
Con este modo de operación se ahorran las inductancias de interfaz y se reduce la corriente total absorbida de la red. Sin embargo, es necesario un adecuado control de paso por cero de la corriente para habilitar oportunamente la conducción del convertidor o grupo positivo/negativo (Ttica Gaspar, 2019).

Figura N° 32 Cicloconvertidor trifásico (carga trifásica) de 12 pulsos



Fuente: Ttica Gaspar, (2019).

**Figura N° 33 Formas de onda de un cicloconvertidor trifásico
(Carga trifásica) de 12 pulsos**



Fuente: Ttica Gaspar, (2019).

DIAGNOSTICO SITUACIONAL/ CONTEXTO ACTUAL.

A finales de los años sesenta surgió la idea de un accionamiento que prescindiera de engranajes y que permitiera además la posibilidad de un control de velocidad variable. La aparición de los tiristores y de sofisticados sistemas de control permitieron el diseño de un accionamiento libre de engranajes (gearless mill drive) acompañado de un cicloconvertidor y de un motor síncrono. El primer gearless drive en Europa fue desarrollado para un molino de cemento en 1969, el cual entregaba potencia de 6400 kW y 4900 kW a una velocidad de 15 rpm y 15.5 rpm, respectivamente.

La capacidad de operación del molino a velocidad variable permite realizar la molienda de un modo más eficiente, dependiendo de la dureza del material que se encuentra dentro del molino.

El primer gearless drive para la industria minera fue instalado en Noruega en 1979. Con una potencia nominal de 8100 kW, permite un rango de operación entre 10.5 rpm y 13.26 rpm (Salvatierra, 2018).

Figura N° 34 Molino Gearless de gran potencia



Fuente: Salvatierra, (2018).

Desde este punto se continuó con la instalación de los molinos gearless en todo el mundo, mejorando eficientemente la producción de las minas.

En la actualidad, la molienda SAG gearless, el casco del molino es el elemento rotativo de un gran motor síncrono de baja velocidad. Los polos del rotor del motor se encuentran adosados al contorno del molino y finalmente el rotor es rodeado por un estator. Tal como se puede ver en el gráfico anterior; el rotor se encuentra montado sobre el cuerpo del molino y el estator (una vez colocada en su posición final) envuelve al rotor. Esa configuración libre de engranajes se denomina Gearless Motor Drive (GMD).

El motor de anillo propiamente tal consiste de 14 segmentos individuales, cada uno con 4 polos. Estos segmentos son montados directamente sobre el tambor y conectados unos con otros mediante correas flexibles.

Así, el propio molino soporta el peso del rotor, el cual asciende aproximadamente 80 toneladas. No obstante, comparado con las

1500 toneladas que pesa el tambor cuando está lleno, el peso adicional que representa el rotor es despreciable.

Para calzar los 46 polos alrededor del tambor, se requiere que el diámetro del rotor sea de 8.85 m.

En este tipo de accionamiento se requiere un entrehierro o air gap relativamente grande debido a las expansiones mecánicas por efecto de la temperatura. A pesar que las temperaturas de las paredes del molino son considerablemente menores en la molienda húmeda que en la molienda seca, el entrehierro empleado es esta última asciende aproximadamente a 13 mm, principalmente por razones de seguridad.

Básicamente, el Gearless Drive System contiene dos elementos principales en su circuito de potencia:

- Motor síncrono, que se conforma con el anillo y el tambor de molienda correspondiente al rotor.
- El cicloconvertidor, elemento que controla el flujo de energía desde la red hasta el control. Asimismo, transforma la corriente de alimentación desde 50/60 Hz al rango de 0 – 6.738 Hz; de esta forma, se modifica la frecuencia, con lo cual se regula el torque y la velocidad del molino. En efecto, para lograr una velocidad nominal de giro del molino de 9.23 rpm, el cicloconvertidor debe convertir la frecuencia de la red en 0 – 6.738 Hz.
- Aceleración y desaceleración suaves y controladas.
- Detención suave y controlada, sin oscilación.
- Menos costos por mantenimiento.
- Operación a velocidades menores o superiores a la velocidad nominal.
- No existe golpe de corriente en la partida.
- Capacidad inherente de Inching.

- Capacidad de operación Creeping.
- Protección de carga congelada.

Con todo lo mencionado anteriormente, el dotar de sistemas más sofisticados e inteligentes a este tipo de proceso ha potenciado la confiabilidad operacional, lo que proporciona a su vez, mayor comodidad para el usuario. Actualmente el Gearless Drive tiene más de 2000 señales de monitoreo y alarmas que, luego de ser procesadas con algoritmos lógicos para diagnósticos, permiten la interacción con sistemas expertos que optimizan la operación de la planta mediante acciones correctivas, información al operador y documentación del proceso.

El sistema de excitación de un motor de anillo.

El sistema de excitación provee la corriente de excitación que necesita el motor de anillo. Consiste generalmente en un rectificador controlado de 12 pulsos con control de corriente que alimenta el devanado de excitación del motor síncrono a través de anillos.

ESTATOR TIPICO:

- 1 – Supresor de sobretensión
- 2 – Transformadores para medición de corriente
- 3 – Monitor de conducción
- 4 – Puente trifásico controlado
- 5 – Transformadores de medición de corriente
- 6 – Resistencia base – carga
- 7 – Switch de tiristores

8 – Relé de sobre corriente

9 – Detector de voltaje

10 – Carga conectada en paralelo al puente trifásico controlado

Debido a que el circuito es fuertemente inductivo, la reserva de energía necesaria para una buena respuesta dinámica en el control de corriente hace que el transformador de entrada del devanado de campo tenga una potencia cercana al doble de la potencia estacionaria de CC.

En operación normal la corriente de excitación debe ajustarse dinámicamente a las condiciones de carga del motor. Esto se realiza controlando indirectamente la corriente mediante la utilización de control de flujo.

La operación del circuito es similar a la de un rectificador trifásico controlado de 12 pulsos con carga resistiva e inductiva.

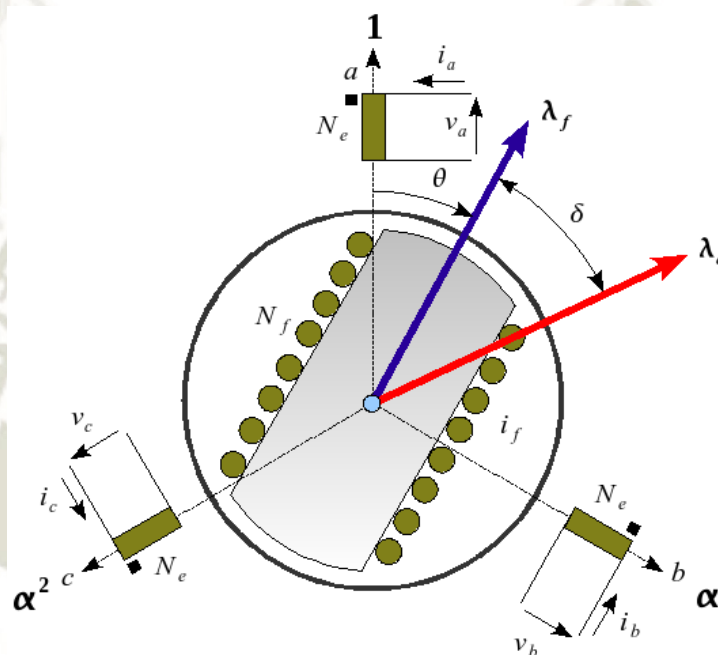
Cabe destacar el hecho de que, al hacer una carga altamente inductiva, se necesita una resistencia de drenaje en la salida de CC para asegurar el disparo de los tiristores. Se necesita también protección de sobre voltajes transitorios en el lado de CC debido a los fenómenos dinámicos de voltaje inducidos por el flujo del estator.

En la actualidad, debido a la necesidad de procesar la mayor cantidad de material posible, al bajo riesgo de pérdidas de producción, alta disponibilidad y por economía, es que han aumentado significativamente la instalación de Gearless para Molinos SAG hasta 38 pies. Ya se han hecho los estudios básicos de esfuerzo y rigidez para accionamientos Gearless para Molinos SAG de 40 y 44 pies, con lo que se reafirma el atractivo de este tipo de accionamiento (Salvatierra, 2018).

2.2.14. Modelamiento D-Q

En la figura se presenta el diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica de polos salientes sin devanados amortiguadores. Este convertidor posee cuatro bobinas, tres en el estator y un devanado de campo en el rotor (Alain, Bueno, & Amador, 2009).

Figura N° 35 Diagrama esquemático de una máquina síncrona de polos salientes sin devanados amortiguadores.



Fuente: (Alain, Bueno, & Amador, 2009).

Analizando el comportamiento de los ejes eléctricos de la máquina síncrona en el sistema de coordenadas correspondiente a las bobinas reales o físicas, se satisface el siguiente sistema de ecuaciones:

$$[v_{abc,f}] = [R_{abc,f}][i_{abc,f}] + \frac{d}{dt}[\lambda_{abc,f\partial}]$$

En los sistemas lineales, la relación entre las corrientes que circulan por las bobinas y los enlaces de flujo que las enlazan vienen dados por la relación:

$$[\lambda_{abc,f}(\theta, i)] = [L_{abc,f}(\theta)][i_{abc,f}]$$

Sustituyendo esta relación en la expresión anterior. Se obtiene el resultado siguiente:

$$\begin{aligned} [v_{abc,f}] &= [R_{abc,f}][i_{abc,f}] + [L_{abc,f}] \frac{d}{dt} [i_{abc,f}] + \dots \\ &\dots + \dot{\theta} \frac{d}{d\theta} [L_{abc,f}][i_{abc,f}] \\ &= [R_{abc,f}][i_{abc,f}] + [L_{abc,f}] p [i_{abc,f}] + \dots \\ &\dots + \dot{\theta} [\tau_{abc,f}][i_{abc,f}] \end{aligned}$$

El sistema de ecuaciones diferenciales anterior, representa el comportamiento dinámico de las bobinas de la máquina síncrona en coordenadas primitivas. Este sistema se puede expresar en forma canónica como:

$$p [i_{abc,f}] = [L_{abc,f}]^{-1} \{ [v_{abc,f}] - [[R_{abc,f}] + \dot{\theta} [\tau_{abc,f}]] [i_{abc,f}] \}$$

La matriz de inductancia depende de la posición relativa θ del rotor con respecto al estator, por esta razón la matriz de transición de estado también depende de la posición angular del rotor.

Si la velocidad de la máquina es constante, la posición angular del rotor es:

$$\theta = \theta_0 + \omega_m t$$

La solución del sistema puede obtenerse mediante métodos numéricos de integración, utilizando algoritmos tales como Euler, Runge – Kutta o Adams entre otros. El principal inconveniente que se presenta con esta formulación es la necesidad de evaluar e invertir la matriz de inductancias de la máquina en cada paso de integración, debido a la dependencia de esta matriz con la posición angular θ del rotor.

Los computadores y microprocesadores actuales son capaces de resolver este problema, aun cuando en el pasado estos cálculos representaban grandes dificultades por los requerimientos de memoria y velocidad. Por este motivo, durante varias décadas se desarrollaron transformaciones de coordenadas que simplifican el problema, aceleran notablemente los cálculos y permiten interpretar más fácilmente el comportamiento dinámico y estático de la máquina sincrónica.

Durante los períodos transitorios, la velocidad angular de la máquina cambia y la posición del rotor es una nueva variable de estado que debe ser evaluada para determinar su dependencia temporal. En este caso es necesario incorporar una ecuación adicional al sistema 4 para determinar el comportamiento dinámico del eje mecánico de la máquina.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(\frac{1}{2} [i_{abc,f}]^t [\tau_{abc,f}] [i_{abc,f}] - T_m - \alpha \dot{\theta} \right) \\ \dot{\theta} = \omega_m \end{cases}$$

Donde:

J es el momento de inercia del rotor,

T_m es el par mecánico resistente,

a es el coeficiente de fricción dinámica

El sistema de seis ecuaciones diferenciales formado por las cuatro ecuaciones del sistema 4 y las dos ecuaciones mecánicas representadas por la expresión anterior, definen el comportamiento

Dinámico y transitorio completo de la máquina síncrona de la figura superior.

Este sistema de ecuaciones diferenciales es no lineal y los coeficientes son variables en el tiempo, por este motivo es necesario recurrir a técnicas numéricas para evaluar el comportamiento de la máquina o simplificar el problema mediante la técnica de transformación de coordenadas.

En la matriz de inductancia de la máquina síncrona, se encuentra toda la información necesaria para determinar su comportamiento.

En la matriz de inductancia se resume la información sobre la disposición geométrica de las bobinas, sus acoplamientos, números de vueltas y reluctancias de los diferentes caminos magnéticos. Una vez conocida la matriz de inductancias se puede evaluar la matriz de par, calculando la derivada parcial de esta matriz con respecto a la posición angular del rotor. La matriz de inductancias de la máquina síncrona esquematizada en la figura posee la siguiente estructura:

$$\begin{bmatrix} L_{abc,f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ee}(\theta)] & [L_{er}(\theta)] \\ [L_{re}(\theta)] & L_f \end{bmatrix}$$

$$[L_{ee}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L_{ef}(\theta)] = [L_{fe}(\theta)]^t = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) \end{bmatrix},$$

Cada una de las inductancias de la máquina sincrónica se puede representar como una función del ángulo θ . Esta función es periódica porque se repite cada vez que el rotor realiza un giro completo. Esta propiedad permite representar estas funciones mediante expansiones en series de Fourier, con el ángulo θ como variable.

Si la pieza polar se diseña para producir una distribución sinusoidal del campo magnético en el entrehierro, es posible representar las inductancias de la máquina con un número reducido de los términos de la serie.

La expresión de la matriz de inductancias más simple consiste en considerar términos dependientes hasta en 2θ , para las inductancias estator-estator y términos en θ , para las inductancias estator-rotor. L_s es independiente de la posición θ del rotor debido a que el estator y de la inductancia del rotor L_r la máquina es aproximadamente lisa, si se desprecia el efecto de las ranuras. Si el rotor de la máquina es de polos salientes, el resto de las inductancias propias y mutuas dependen de la posición angular θ . Cuando la pieza polar del rotor se encuentra alineada con una de las bobinas del estator, el camino magnético posee la máxima permeancia. Si la pieza polar se encuentra en cuadratura con alguna de las bobinas, el entrehierro es mayor y disminuye la permeancia (Alain, Bueno, & Amador, 2009).

La variación de la permeancia depende del ángulo 2θ , porque una bobina alineada con el polo norte del rotor tiene el mismo camino magnético si el alineamiento ocurre con el polo sur. Estas inductancias se pueden representar aproximadamente mediante las siguientes funciones:

$$L_{aa}(\theta) = L_{1e} + M_{2e} \cos 2\theta + \dots$$

$$L_{bb}(\theta) = L_{1e} + M_{2e} \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \dots$$

$$L_{cc}(\theta) = L_{1e} + M_{2e} \cos 2(\theta - \frac{4\pi}{3}) + \dots$$

$$M_{ab}(\theta) = M_{ba}(\theta) = -M_{1e} - M_{2e} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{6}) + \dots$$

$$M_{ac}(\theta) = M_{ca}(\theta) = -M_{1e} - M_{2e} \cos 2(\theta - \frac{\pi}{6}) + \dots$$

$$L_d \equiv \frac{3}{2}(L_{1e} + M_{2e}); L_q \equiv \frac{3}{2}(L_{1e} - M_{2e}); L_{df} \equiv \sqrt{\frac{3}{2}}M_{ef}$$

$$L_{1e} = \frac{L_d + L_q}{3}; M_{2e} = \frac{L_d - L_q}{3}$$

La aproximación anterior se obtiene al despreciar la dispersión de las bobinas estatóricas. En la práctica la dispersión se puede incluir mediante una inductancia adicional completamente desacoplada.

En lo que se refiere a los acoplamientos mutuos estator-rotor, la funcionalidad de las inductancias es diferente porque al girar el rotor en p , la bobina del campo invierte su polaridad. Las inductancias del estator varían entre un valor máximo y un mínimo, siempre positivo respecto a la posición angular del rotor. Por otra parte, los acoplamientos mutuos estator-rotor varían entre unos los valores máximos positivo y negativo, cuya magnitud es idéntica. Las inductancias mutuas entre el estator y el rotor pueden ser aproximadas mediante las siguientes funciones:

$$M_{af}(\theta) = M_{fa}(\theta) = M_{ef} \cos \theta + \dots$$

$$M_{bf}(\theta) = M_{fb}(\theta) = M_{ef} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots$$

$$M_{cf}(\theta) = M_{fc}(\theta) = M_{ef} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots$$

Si el rotor de la máquina síncrona es liso, todas las inductancias del estator son independientes de la posición del rotor. En esta situación la matriz de inductancias se expresa de la siguiente forma:

$$[L_{ttc,f}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{le} & M_{le} & M_{le} & M_g \cos \theta \\ M_{le} & L_{le} & M_{le} & M_g \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{le} & M_{le} & L_{le} & M_g \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_g \cos \theta & M_g \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_g \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & L_f \end{bmatrix}$$

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales de una máquina síncrona de rotor liso en coordenadas primitivas, también requiere el uso de métodos numéricos, debido a la dependencia de las inductancias mutuas entre el estator y el campo, con la posición θ del rotor, tal como se observa en la matriz de inductancia.

Un modelo de la máquina síncrona de rotor liso o de polos salientes sin dependencia en la posición angular θ , se puede obtener mediante transformaciones del sistema de coordenadas.

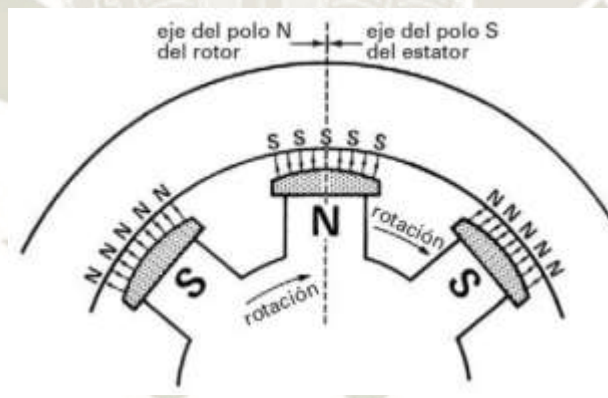
La transformación a vectores espaciales utilizada ampliamente en las máquinas de inducción, aun cuando mantiene la dependencia con la posición angular θ , el modelo del convertidor electromecánico en este sistema de coordenadas, simplifica esta dependencia y evita el cambio

del sistema de coordenadas para las operaciones de control con convertidores electrónicos de potencia (Alain, Bueno, & Amador, 2009).

2.2.15. Sincronización del Molino SAG

En cuanto el motor está funcionando cerca de la velocidad síncrona, el rotor es excitado con la corriente directa (440 V). Esto produce polos N y S alternos alrededor de la circunferencia del rotor. Si en este instante los polos quedan frente a los polos de polaridad opuesta en el estator, se crea una fuerte atracción magnética entre ellos. Esta atracción mutua mantiene juntos los polos del rotor y del estator, y el rotor es literalmente obligado a sincronizarse con el campo rotatorio. Por ello, el momento de torsión desarrollado en este instante se llama momento de torsión de ajuste a sincronismo (Duran, 2014).

Figura N° 36 Los polos del rotor son atraídos por los polos opuestos del estator. Sin carga los ejes de los polos coinciden.



Fuente: Duran, (2014).

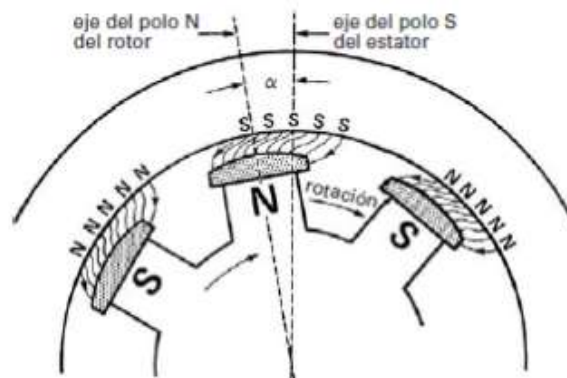
El par o momento de torsión de ajuste a sincronismo de un motor síncrono es poderoso, pero la corriente directa se debe aplicar en el instante correcto. Por ejemplo, si los polos emergentes N, S del rotor están opuestos a los polos N, S del estator, la repulsión magnética resultante producirá un violento choque mecánico.

El motor se desacelerará de inmediato y los sistemas de protección se activarán. En la práctica, los sistemas de sensores en los circuitos arrancadores de motores síncronos están diseñados para detectar el instante preciso en que se deberá aplicar la excitación. Entonces el motor se acelera automáticamente y se sincroniza con el campo rotatorio.

Básicamente, un motor síncrono gira a causa de la atracción magnética entre los polos del rotor y los polos opuestos del estator. Para invertir la dirección de rotación, simplemente se intercambian dos líneas cualesquiera conectadas al estator. Cuando un motor síncrono funciona sin carga, los polos del rotor están directamente opuestos a los del estator y sus ejes coinciden (Duran, 2014).

Sin embargo, si aplicamos una carga mecánica, los polos del rotor se retrasan un poco respecto a los polos del estator el ángulo de retraso es el ángulo de torque del motor, pero el rotor continúa girando. El ángulo mecánico α entre los polos se incrementa progresivamente conforme incrementamos la carga. No obstante, la atracción magnética mantiene el rotor ligado al campo rotatorio y el motor desarrolla un par o momento de torsión cada vez más conforme se incrementa el ángulo (Duran, 2014).

Figura N° 37 Los polos del rotor son desplazados con respecto al eje de los polos del estator cuando el motor suministra potencia mecánica (molino con carga



Fuente: Duran, (2014).

Pero existe un límite. Si la carga mecánica excede el par o momento de torsión crítico o límite del motor, los polos del rotor se apartan repentinamente de los polos del estator y el motor se detiene.

Un motor que sale de sincronización crea una perturbación importante en la línea, por lo que se activan de inmediato los sistemas de protección. Esto protege el motor porque tanto el devanado del rotor como el del estator se sobrecalientan rápidamente y la máquina deja de funcionar.

El par o momento de torsión crítico depende de la fuerza magneto motriz desarrollada por los polos del rotor y del estator.

La F.M.M de los polos del rotor depende de la excitación de cd, mientras que la del estator depende de la corriente alterna que fluye en los devanados.

El par o momento de torsión crítico generalmente es 1.5 a 2.5 veces el par o momento de torsión nominal a plena carga.

El ángulo mecánico entre los polos del rotor y del estator tiene una

relación directa con la corriente del estator. Conforme se incrementa el ángulo, la corriente aumenta. Esto es de esperarse porque un ángulo más grande corresponde a una carga mecánica más grande y la potencia incrementada sólo puede provenir de la fuente de c.a. trifásica.

Una vez descrito algunas definiciones acerca de la sincronización de motores síncronos, seguiremos con la segunda parte respecto a este punto que son la importancia de los cicloconvertidores tanto en el accionamiento como el control dinámico del molino SAG.

Los cicloconvertidores permiten controlar la velocidad y el par o momento de torsión variando el voltaje y la frecuencia de c.a.

Los cicloconvertidores pueden convertir directamente potencia de c.a. de alta frecuencia a baja frecuencia. Este cicloconvertidor de 12 pulsos se utiliza para controlar el molino SAG de 20 MW.

Utilizamos una fuente de 60 Hz, y tendremos varios valores de frecuencia en diferentes estados de marcha como, teniendo como frecuencia nominal salida del cicloconvertidor de 5.538 Hz.

Esta frecuencia tan baja permite controlar con precisión la forma de onda del voltaje de salida mediante la activación controlada por computadora de las compuertas de los tiristores.

Los tiristores son conmutados por línea, así que la complejidad de la electrónica que implica cada SCR permite mantener en sincronismo la frecuencia de la señal del estator con el movimiento del rotor.

El molino SAG de 20 MW tiene dos grupos de cicloconvertidores cada una de estos contiene tres configuraciones iguales de veinticuatro tiristores cada configuración. Cada cicloconvertidor produce una salida monofásica, que son integradas para obtener la salida trifásica que alimenta al estator.

El voltaje de salida a baja frecuencia se compone de segmentos seleccionados del voltaje de línea trifásico de 60 Hz. La activación de las compuertas de los SCRs determina los segmentos. El voltaje de salida

a baja frecuencia tiene la misma amplitud pico que el voltaje de línea trifásico; por consiguiente, tiene el mismo valor eficaz.

Durante el semi – ciclo positivo, los tiristores correspondientes se activan en secuencia, seguido de los tiristores correspondientes al semi – ciclo negativo, esto se logra mediante un “Lazo Cerrado de Control” que es diseñado con base a la experiencia adquirida por parte del fabricante.

Este software ha sido programado a fin de facilitar la solución de problemas y se implementaron características especialmente para fines de mantenimiento (Duran, 2014).



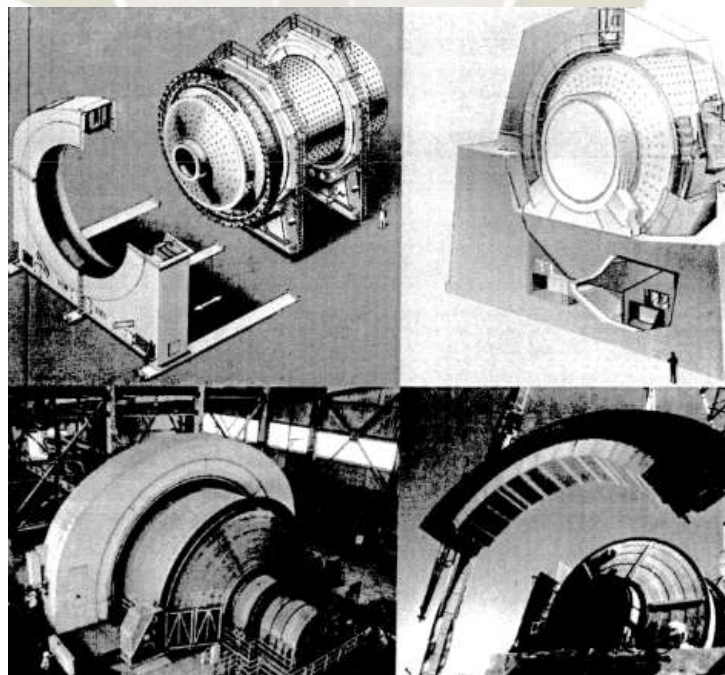
2.2.16. Armónicos Generados en el Accionamiento con Cicloconvertidor de 12 Pulsos del Motor Síncrono de 20 MW

El término Calidad de Energía Eléctrica se emplea para describir las variaciones de la tensión, corriente y frecuencia en el sistema eléctrico.

La creciente utilización de sistemas electrónicos para el control del flujo de potencia y el acondicionamiento de la misma, así como el empleo de cargas no lineales, contribuye a la contaminación del entorno eléctrico por aumento de los índices armónicos de tensión y corriente.

Por otra parte, la dependencia de muchas actividades sociales y económicas de la continuidad en el suministro de energía eléctrica, hace que fiabilidad de suministro y calidad de energía suministrada sea propiedades de gran importancia para la operación de los sistemas (Piolet, 2015).

Figura N° 38 Tipos y partes de molinos gearless



Fuente: Piolet, (2015).

2.2.16.1. ARMONICOS

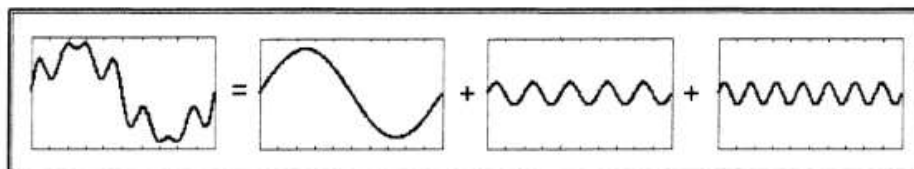
El problema con cargas no lineales es la forma no senoidal que la corriente adopta, producto de las diferentes ondas que a ellas se suman y que son originadas por las cargas no lineales. Esta deformación de las señales de tensión y corriente se expresa usualmente en términos de distorsión armónica.

La distorsión armónica describe la variación en estado estacionario en la forma de onda de la frecuencia fundamental.

Las armónicas son todas aquellas curvas senoidales que distorsionan la curva fundamental.

Las armónicas se hacen evidentes cuando una curva senoidal distorsionada se analiza matemáticamente. A través del Análisis de Fourier, una función periódica arbitraria puede ser dividida en varias curvas senoidales (Piolet, 2015).

Figura N° 39 Curva distorsionada



Fuente: Piolet, (2015).

El grafico anterior muestra como una curva distorsionada consiste en la frecuencia fundamental (60Hz), y en las armónicas que son las ondas superpuestas de 5ta (300 Hz) y 7ma (420 Hz) orden.

Los síntomas típicos de problemas de armónicas incluyen disparo en falso de fusibles, disparos inexplicables de interruptores, sobrecalentamiento de transformadores y de motores, funcionamiento defectuoso de impulsores, relevadores, computadoras, etc.

Además de las frecuencias enteras de armónicas, también existe una clase de armónicas que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, las cuales se llaman interarmónicas. Un ejemplo típico de cargas que producen interarmónicas son los cicloconvertidores. Debe notarse que en general la magnitud de las componentes interarmónicas presentes en las redes de bajo voltaje es despreciable.

Algunas armónicas se han distinguido por ser especialmente dañinas en los sistemas de distribución. Las armónicas de tercer orden y múltiplos de este (por ejemplo, las armónicas de orden 9, 15 y 21) reciben atención especial porque ellas retornan a través del neutro, dando origen a corrientes por el neutro con valores superiores a los de fase. Las armónicas de secuencia negativa (por ejemplo, las de orden 5, 11 y 17) tienen gran impacto sobre transformadores y motores porque su rotación se opone a la rotación de la fundamental.

Los equipos electrónicos como rectificadores, inversores, cicloconvertidores, etc., reciben el nombre de cargas no lineales, debido a su particular característica de consumir corrientes no sinusoidales al aplicársele alimentación senoidal, con lo cual produce una distorsión de las señales de tensión, que originan algunos efectos adversos, como son:

- Aumento de pérdidas, provocando que las maquinas operen a mayor temperatura y se calienten.
- Problemas de resonancia entre la parte inductiva y capacitiva de la red de alimentación.
- Recalentamiento de transformadores.
- Mal funcionamiento de los sistemas de control como PLC, medidores electrónicos, etc.
- Cargas excesivas de condensadores, llevándolos al mal funcionamiento y al envejecimiento prematuro.

- Altas corrientes en el conductor neutro.
- Bajo factor de potencia (Piolet, 2015).

2.2.16.2. ARMONICOS INYECTADOS A LA RED POR EL CICLOCONVERTIDOR

Las corrientes inyectadas a la red por un cicloconvertidor están compuestas por dos tipos de armónicas:

a) *Armónicas Características*

Son independientes de la configuración y del número de pulsos del cicloconvertidor. Las frecuencias de estas armónicas son dependientes de la frecuencia de salida y están dadas por la ecuación siguiente:

$$f_{ch} = f_i \pm 6nf_o , \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Donde:

f_i : Frecuencia de la red

f_o : Frecuencia de la salida

b) *Armónicas Dependientes del Circuito*

La frecuencia de estas armónicas depende del número de pulsos del cicloconvertidor y de la frecuencia de salida.

En un cicloconvertidor de 12 pulsos estas armónicas tienen frecuencias determinadas por la siguiente ecuación:

$$f_h = (12p \pm 1) * f_i \pm 6nf_o$$

Donde:

$$p = 1, 2, 3, \dots$$

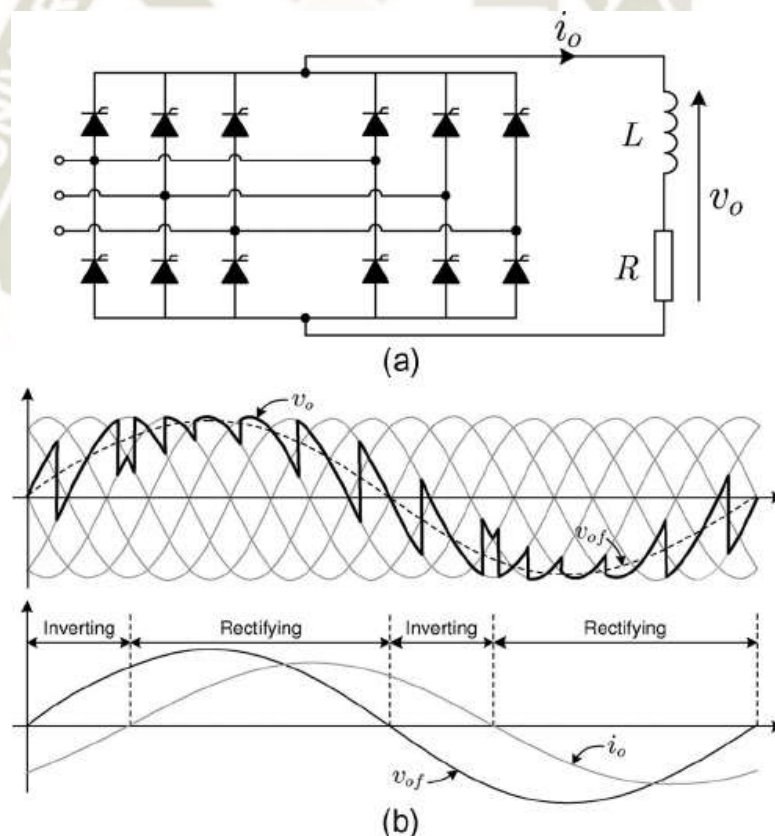
$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

La amplitud de las armónicas de corriente inyectadas a la red depende de:

- La razón de voltaje de salida ($r = V_o/V_o \text{ máx.}$)
- El ángulo de desplazamiento de la carga

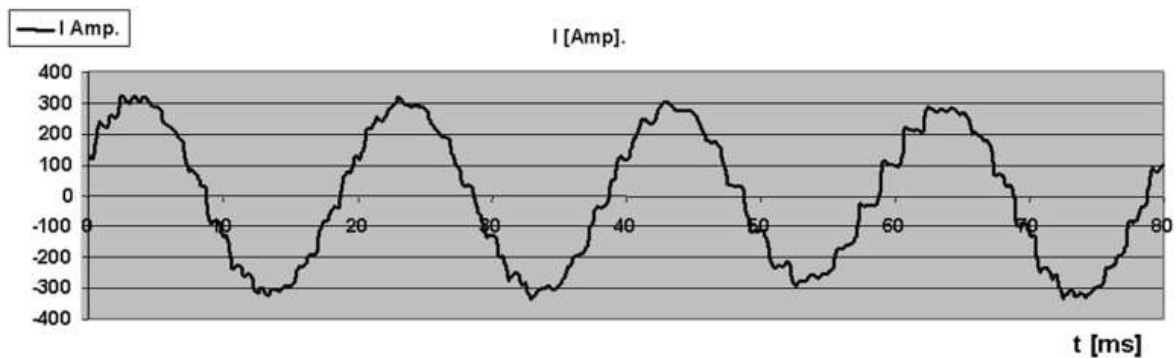
Los gráficos muestran las formas de onda de la corriente inyectada a la red por un cicloconvertidor de 6 y 12 pulsos, respectivamente (Fuentes de armónicas, 2019).

Figura N° 40 Corriente inyectada a la red cicloconvertidor 6 pulsos



Fuente: www.researchgate.net, (2019).

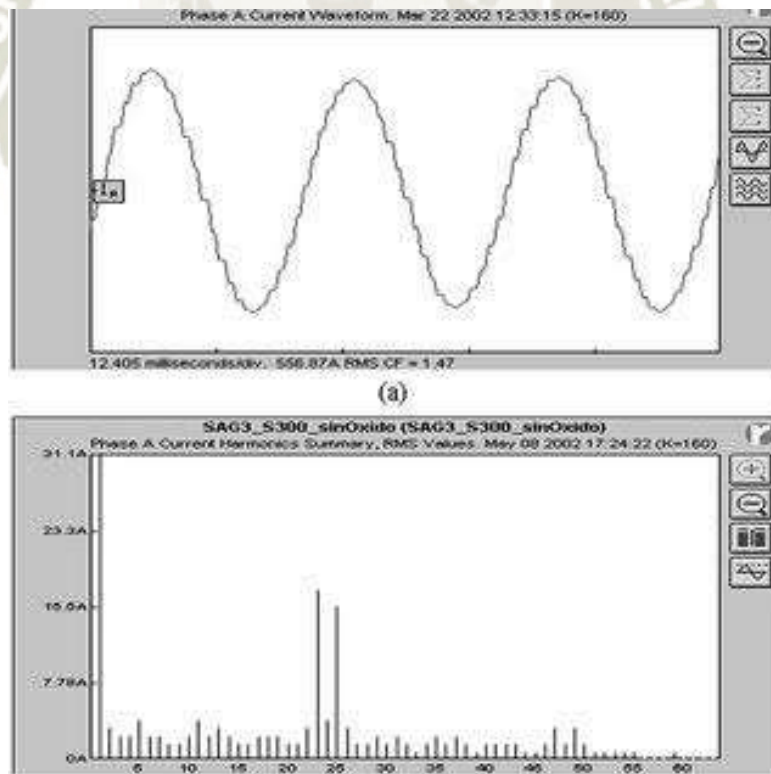
Figura N° 41 Corriente inyectada a la red cicloconvertidor 12 pulsos



Fuente: www.researchgate.net, (2019).

En la siguiente grafica se puede ver el espectro típico de la corriente de entrada de un cicloconvertidor de 12 pulsos con 10 Hz de frecuencia de salida.

Figura N° 42 Cicloconvertidor de 12 pulsos con 10 Hz



Fuente: www.researchgate.net, (2019).

Ejemplo de un Cicloconvertidor de 12 pulsos:

Un Cicloconvertidor de 12 pulsos, es alimentado desde una red trifásica de $f_i = 60 \text{ Hz}$ y genera, en el punto de trabajo nominal, una frecuencia de salida de $f_o = 0 - 6.738 \text{ Hz}$.

Las armónicas presentes en la corriente de entrada están determinadas por las ecuaciones anteriores. Sus correspondientes amplitudes han sido determinadas por el fabricante y se dan en la siguiente tabla.

Tabla N° 3 Armónicos para convertidor de 6 y 12 pulsos

Frecuencia	Hz	Orden	Amplitud
F1	60	1	562
F1 + 6Fo	100.428	1.78	16.86
F1 - 6Fo	19.572	0.22	16.86
F1 + 12Fo	140.856	2.57	5.62
F1 - 12Fo	20.856	0.57	562
11F1	660	11	11.24
11F1 + 6Fo	700.428	11.78	22.48
11F1 - 6Fo	619.572	10.22	22.48
11F1 + 12Fo	740.856	12.57	5.62
11F1 - 12Fo	579.144	9.43	5.62
13F1	780	13	11.24
13F1 + 6Fo	820.428	13.78	11.24
13F1 - 6Fo	739.572	12.22	11.24
13F1 + 12Fo	860.856	14.57	11.24
13F1 - 12Fo	699.144	11.43	11.24

Fuente: Rosales Padilla, (1995).

Se puede observar en la tabla que las armónicas generadas por el cicloconvertidor en las corrientes de entrada no son múltiplos enteros de frecuencia de red, a diferencia de lo que sucede con otros convertidores electrónicos (Rosales Padilla, 1995).

2.2.17. Filtros de Armónicos

Los filtros de armónicos presentan un camino de menor impedancia que la red para las frecuencias de las armónicas que se desea eliminar. De este modo, la corriente armónica I_n se va preferentemente por el filtro, tal como se observa en el gráfico adjunto. Esto se obtiene logrando que la impedancia total equivalente del sistema a esa frecuencia determinada sea menor.

Así mismo, la corriente armónica produce una caída de tensión menor en la impedancia de la red, lo que significa que la distorsión de tensión disminuye.

Los filtros se construyen de elementos pasivos R – L – C, es decir resistencias, inductancias y condensadores. Estos se diseñan de tal forma que la frecuencia de sintonización sea igual a la armónica que se desea eliminar (normalmente son las armónicas de orden 5, 7, 11 y 13), (Armónicos: origen, efectos y soluciones, 2019).

Figura N° 43 Patio de filtros

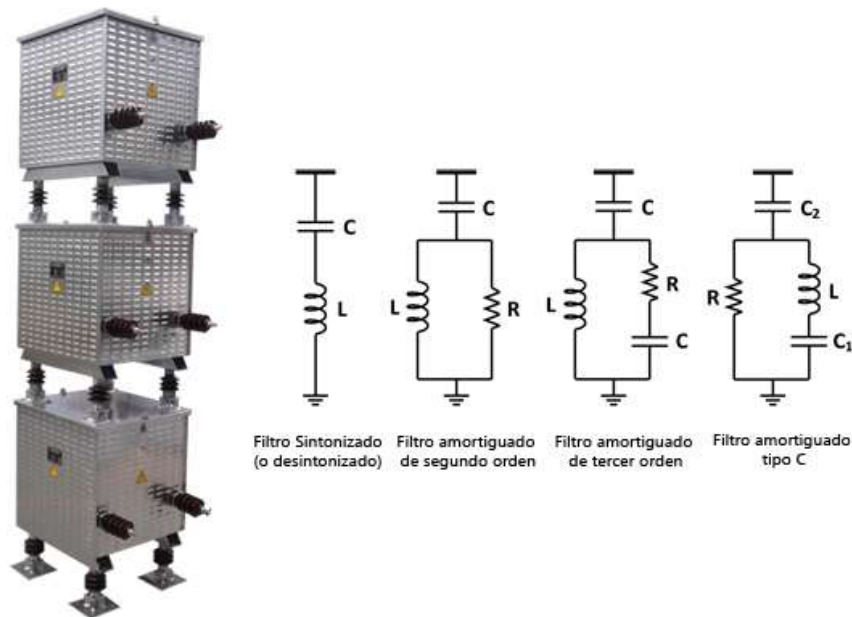


Fuente: Armónicos: origen, efectos y soluciones, (2019).

2.2.17.1. Tipos de Filtros

Existen una gran variedad de configuraciones de filtros que son utilizados para limitar la distorsión armónica. Entre las configuraciones están el filtro sintonizado simple y el filtro pasa – altos de segundo orden (Armónicos: origen, efectos y soluciones, 2019).

Figura N° 44 Tipos de Filtros



Fuente: www.dialnet.unirioja.es, (2019).

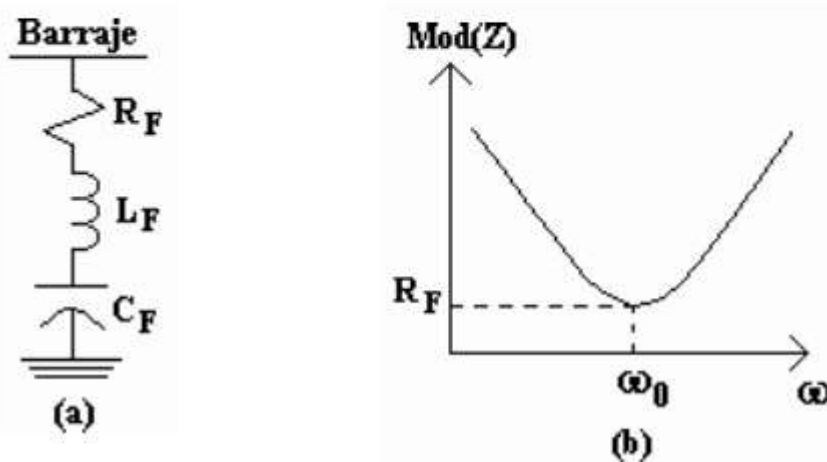
2.2.17.2. Descripción de Algunos Filtros

Filtro Sintonizado Simple

Este es el filtro más simple y consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor. Ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar (Armónicos: origen, efectos y soluciones, 2019).

Figura N° 45 Filtro sintonizado simple

$$Z = R_F + j \left(\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right)$$



Fuente: www.dialnet.unirioja.es, (2019).

Este filtro se utiliza para eliminar una frecuencia determinada, por lo tanto, la frecuencia de sintonía o de resonancia del filtro es aquella frecuencia que se desea eliminar. Luego, a esta frecuencia la impedancia del filtro es mínima.

El factor de calidad del filtro es el que determina la característica de impedancia y hace que esta sea más o menos estrecha o abrupta. En

el gráfico se ve el factor de calidad del filtro $Q_o = X_o/R$ y es alto (30 – 60).

Es utilizado en instalaciones con rectificadores, inversores PWM y hornos de arco en casos específicos.

Su principal ventaja es que proporciona una máxima atenuación para una armónica individual. Además, la frecuencia fundamental puede proporcionar la frecuencia reactiva requerida por la red. También tiene bajas pérdidas asociadas a la resistencia del inductor.

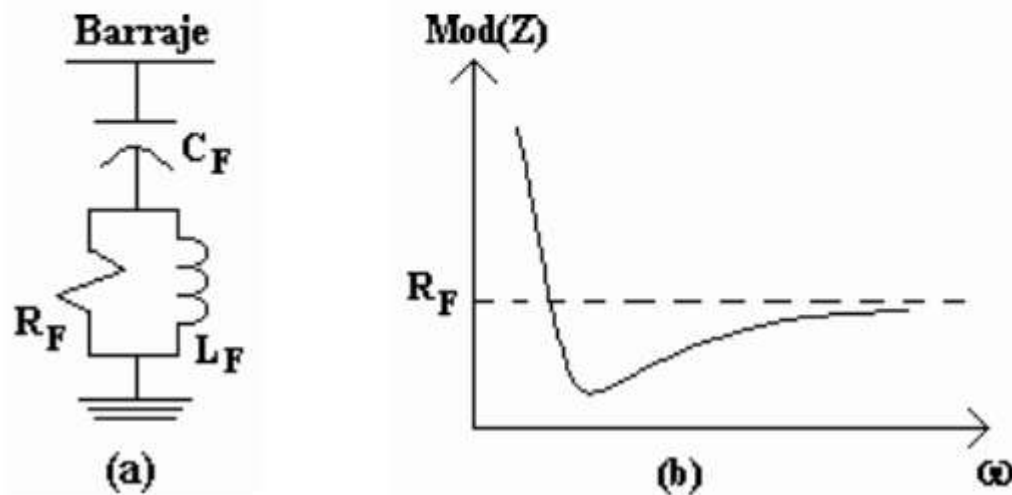
Sus desventajas son: vulnerabilidad a la desintonía debido a tolerancias de elementos con la temperatura y/o variaciones de frecuencia fundamental, e interacción con la red originando una resonancia paralela al igual que un banco de condensadores.

Filtros Pasa – Altos de Segundo Orden

De los filtros de característica amortiguada es el más común. La conexión de una resistencia en paralelo con el inductor le da un comportamiento amortiguado para un amplio rango de frecuencias (Cpe.cl/, 2019).

Figura N° 46 Filtro pasa altos de segundo orden

$$Z = \frac{1}{j\omega C_F} + \left(\frac{1}{R_F} + \frac{1}{j\omega L_F} \right)^{-1}$$



Fuente: www.dialnet.unirioja.es, (2019).

El filtro pasa – alto de segundo orden se usa cuando se desea eliminar un amplio rango de armónicas y se emplea especialmente cuando las armónicas no tienen una frecuencia fija, lo que sucede comúnmente en los cicloconvertidores u hornos de arco.

Presentan alta impedancia para frecuencias baja la sintonía y una baja impedancia para frecuencias superiores a la de sintonía.

En estos tipos de filtros el factor Q es bajo y se define como está a continuación: $Q = R/X_o$ (0.5 – 4).

Sus principales ventajas son que atenúan un amplio espectro de armónicas de acuerdo a la elección del valor de la resistencia y es muy robusto frente a desintonía, comparada con el filtro sintonizado simple.

Sus principales desventajas son que origina una frecuencia de resonancia paralela al interactuar con la red y presenta pérdidas adicionales debido a la resistencia (Vásquez, 2019).

APLICACIÓN DE FILTROS

Un cicloconvertidor inyecta gran cantidad de armónicas a la red en un amplio rango de frecuencias. Las corrientes armónicas tienen frecuencia variable, la que depende de la frecuencia de salida del cicloconvertidor. Vamos a ver el uso del filtro pasa – altos. A continuación, se muestra un banco de filtros para cicloconvertidores, empleado en una planta de mineral real (Cursos.cl, 2019).

2.2.18. ESTÁNDARES EN ARMÓNICOS

Existen varias organizaciones tanto nacionales como internacionales trabajando conjuntamente con ingenieros, fabricantes de equipos, y organizaciones investigativas para proponer las normas y pautas gobernantes, prácticas recomendadas y los límites de distorsión armónica.

El principal objetivo de las normas es proveer una guía común a todas las partes involucradas para trabajar juntas con el fin de asegurar la compatibilidad entre los equipos de uso final y los sistemas de distribución de energía eléctrica. A continuación nos centraremos en el análisis de las principales normas que gobiernan los límites de armónicos, entre las cuales tenemos:

- IEEE 519-1992: Norma técnica de calidad de energía.
- CFE L0000-45 :

Perturbaciones permisibles en la forma de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica.

2.2.18.1. Norma Técnica IEEE519 de Calidad de Energía (Norma Internacional)

La calidad de potencia eléctrica constituye en la actualidad un factor crucial para la competitividad de prácticamente, todos los sectores industriales y de servicios. Un problema de la calidad de potencia, se define como cualquier fenómeno de origen eléctrico que interrumpe el correcto funcionamiento de los sistemas y equipos eléctricos.

Uno de los fenómenos más relevantes, concerniente a la calidad de potencia son las armónicas, que son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

La aparición de corrientes y tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, y perjuicios económicos debido a la disminución de la productividad en el área industrial.

En la recomendación IEEE 519 encontramos las recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada de absorber corrientes armónicas. Los operadores de red de energía, tienen la responsabilidad de suministrar óptimo nivel de tensión y forma de onda. La norma hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producido por la fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión de tensión, es obligatorio para el

suministrador y el consumidor, resolver estos problemas. Por lo tanto, el propósito de esta norma es el de recomendar límites en a la distorsión armónica de acuerdo básicamente a dos criterios:

- Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
- Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

En la norma, por un lado, se recomiendan niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de la relación de corto circuito (SCR) y el orden de la armónica, por otro lado, también identifican niveles totales de distorsión armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan a la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD.

Figura N° 47 Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal

Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente: Norma IEEE Std. 519 (2014).

La norma establece también otros parámetros de la calidad de la energía eléctrica como los son los siguientes: Flicker de tensión; estos también tienen límites establecidos en la norma, como se ve a continuación.

Figura N° 48 Niveles Referenciales de Distorsión Armónica (THD) en Sistemas Eléctricos

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual de Tensión (%)	Distorsión total del voltaje THD (%)
Hasta 69 KV	3.0	5.0
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
138 KV y mas	1.0	1.5

Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.

Fuente: Norma IEEE Std. 519 (2014).



CAPITULO III

3. MODELAMIENTO DINAMICO DEL MOTOR SINCRONO ACCIONADO POR CICLOCONVERTIDOR

3.1. Transformadas de Clarke y Park

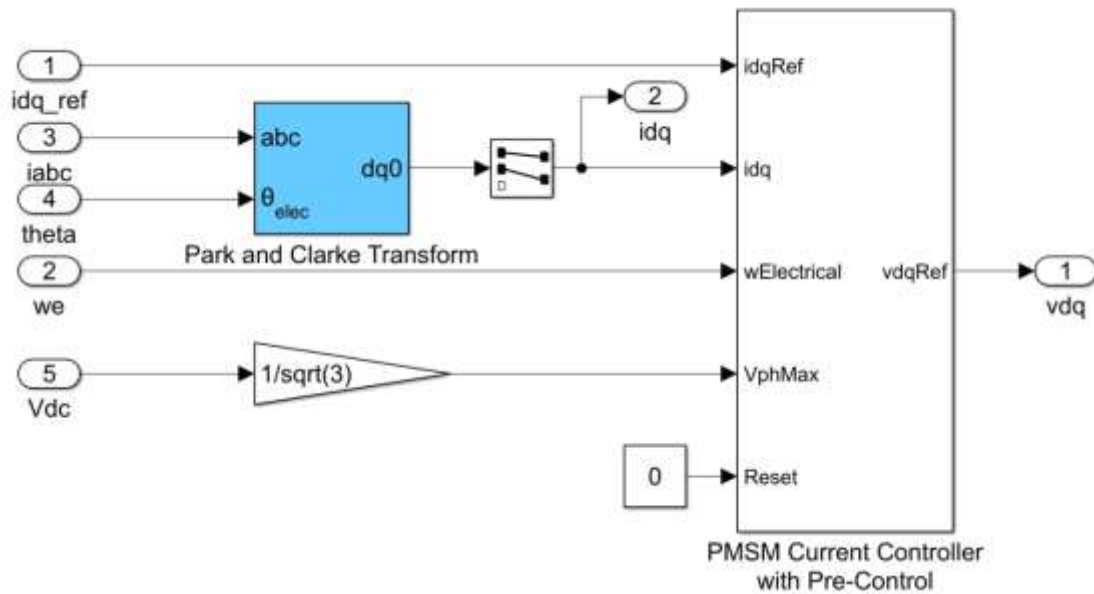
Las transformadas de Clarke y Park se utilizan habitualmente en el control de campo orientado de máquinas de CA de tres fases. La transformada de Clarke convierte las componentes del dominio del tiempo de un sistema de tres fases (de un marco abc) en dos componentes de un marco estacionario ortogonal ($\alpha\beta$). La transformada de Park convierte las dos componentes del marco $\alpha\beta$ a un marco de referencia rotatorio ortogonal (dq). Implementar estas dos transformadas de manera consecutiva simplifica los cálculos, al convertir la forma de onda de la corriente y la tensión de CA en señales de CC.

Un proceso eficiente para el desarrollo y la implementación del control de campo orientado incluye diseñar y probar los algoritmos de control en un entorno de simulación, así como generar código C o HDL para las pruebas en tiempo real y la implementación.

Los ingenieros de control de motores pueden utilizar Simulink para lo siguiente:

- Modelar y simular electrónica de potencia de inversores, así como diversos tipos de motores, tales como máquinas de tres fases síncronas y asíncronas.
- Diseñar y simular algoritmos de control de motores, lo que incluye implementaciones eficientes de las transformadas de Clarke y Park.
- Ejecutar simulaciones de lazo cerrado del motor, el inversor y el controlador para probar el rendimiento del sistema en escenarios de funcionamiento normal y anormal.
- Generar automáticamente código C optimizado para el procesador, ANSI o ISO y HDL para prototipado rápido, pruebas de tipo hardware-in-the-loop e implementación en producción (Transformadas de Clarke y Park – Matlab & Simulink, 2019).

**Figura N° 49 Modelo de un controlador de corriente de una PMSM
implementado con transformadas de Park y Clarke.**



Fuente : Transformadas de Clarke y Park – Matlab & Simulink, 2019).

3.2. Descripción Técnica del Cicloconvertidor

En esta sección se desarrollan los siguientes ítems: diseño, modelamiento y operación del motor, convertidor estático, sección de convertidor de potencia, descripción de componentes esenciales.

3.3. Diseño y Operación

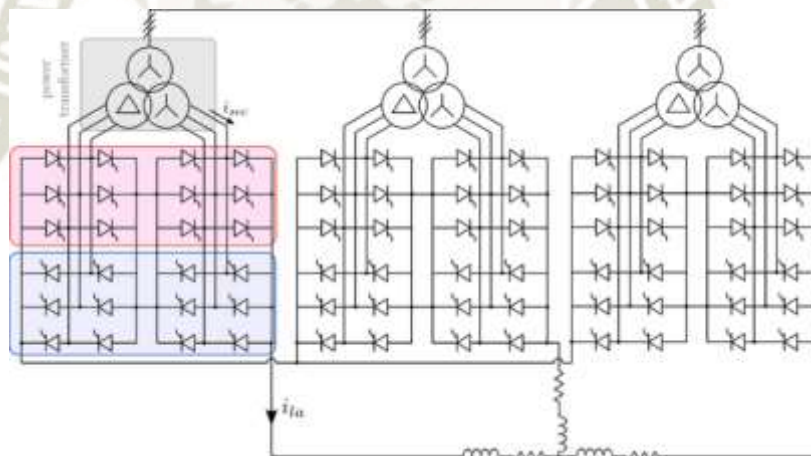
La figura siguiente muestra el diagrama de circuito de la sección de potencia (sistema de 12 pulsos) con el motor síncrono, el cicloconvertidor para suministro del estator con frecuencia variable y el rectificador controlable para el embobinado de excitación del motor.

Se indican sus partes a continuación:

- Interruptor de circuito
- Transformador del convertidor
- Cicloconvertidor de 12 pulsos
- Convertidor de excitación

- Maquina síncrona
- Puente trifásico conectado en anti paralelo
- Corriente de salida
- Tensión del cicloconvertidor
- Corriente de excitación
- Corrientes del estator
- Tensiones del estator
- Frecuencias de líneas
- Frecuencia del motor síncrono (Cursos.cl, 2019).

Figura N° 50 Cicloconvertidor de 12 pulsos

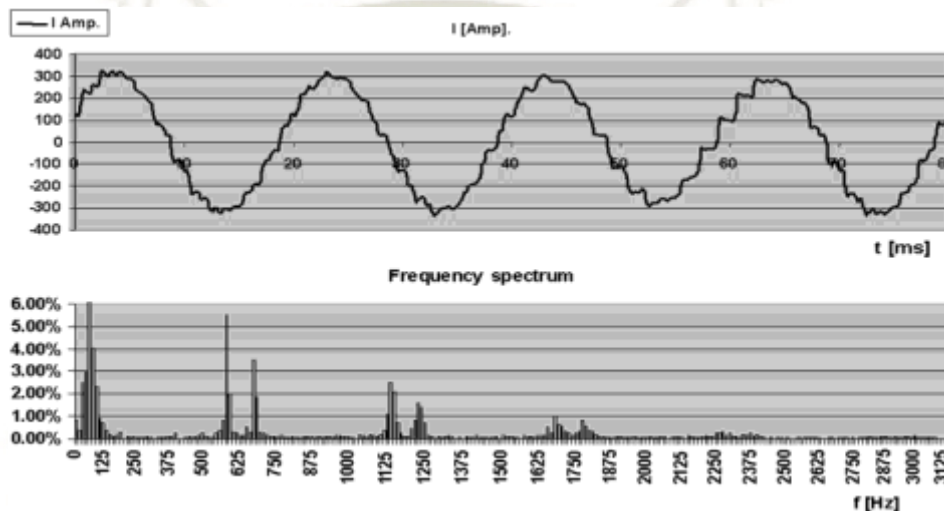


Fuente: Cursos.cl, (2019).

3.4. Motor Síncrono

El motor síncrono alimentado por el cicloconvertidor se usa como un accionamiento individual, que se opera exclusivamente como máquina autorregulada. Esto significa que la máquina síncrona establece su propia frecuencia de modo que las oscilaciones producidas al operar con un sistema de potencia con tensión y frecuencia constante no pueden ocurrir (Cursos.cl, 2019).

Figura N° 51 Corriente y espectro de frecuencia



Fuente: Dugan & Brooks, (1999).

De este modo, el embobinado amortiguador necesario para evitar estas oscilaciones del rotor ya no es necesarias. El embobinado sería incluso perjudicial ya que reduce en gran medida la reactancia de la máquina síncrona responsable de las corrientes armónicas, y por ello aumenta los armónicos del estator (Cursos.cl, 2019).

3.5. Convertidor Estático

Dentro del rango operativo con flujo constante de máquina, el motor síncrono requiere tensiones de estator UR, US, UT que se eleva en proporción con la frecuencia f_2 . El cicloconvertidor trifásico consiste en tres convertidores estáticos reversibles, conmutados en línea, conectados en estrella sin corriente circulante, como los que se emplean en sistemas de accionamiento d.c. como los convertidores son conmutados en línea, usan tiristores de líneas normales.

El cicloconvertidor produce las tensiones de estator de máquina directo desde las tensiones de línea de control de ángulo de fase. El ángulo de control de convertidor se controla de modo que las tensiones de salida del convertidor con un resultado característico sinusoidal. Tanto la frecuencia y la amplitud son ajustables.

Las frecuencias de salida f_2 están restringidas a frecuencias claramente por debajo de la frecuencia de líneas (dentro del rango $f_2 = 0$ a alrededor del 50% de la frecuencia de líneas), de modo que la velocidad máxima obtenible para un accionamiento, referida a la frecuencia de motores, se ubica aproximadamente a la mitad de la velocidad síncrona.

El voltaje de salida y corriente de salida están en fase, lo que corresponde a factor de potencia de $\cos \phi = 1$ para máquina síncrona.

El puente trifásico A suministra corriente I_+ para el positivo, y la corriente de Puente B en anti paralelo, para la media onda negativa de la corriente del estator. Para asegurar que la transferencia entre puentes A y B no significa una corriente circulante, se introduce un intervalo corto sin corriente en cada cambio de polaridad antes de que se libere el puente en anti paralelo.

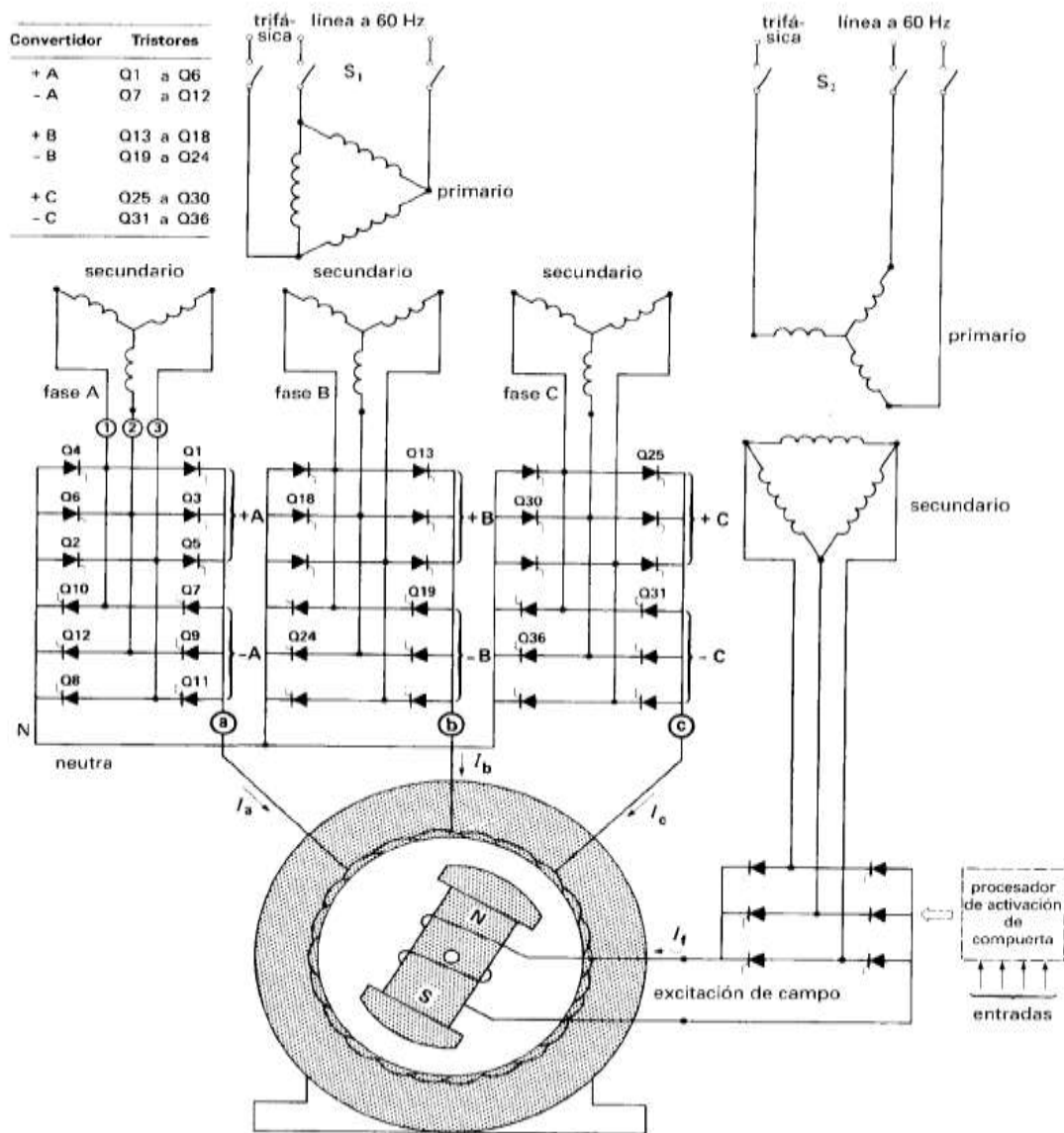
El cicloconvertidor puede operar como un convertidor estático reversible en cuatro cuadrantes, es decir, la tensión de salida del cicloconvertidor y la corriente pueden asumir ambas polaridades independientes de cada uno.

Esta polaridad es necesaria, por ejemplo, para el torque. No presentaría problemas el operar el sistema con cualquier factor dado de potencia de máquina. Para $\cos \phi_2 = 1$.

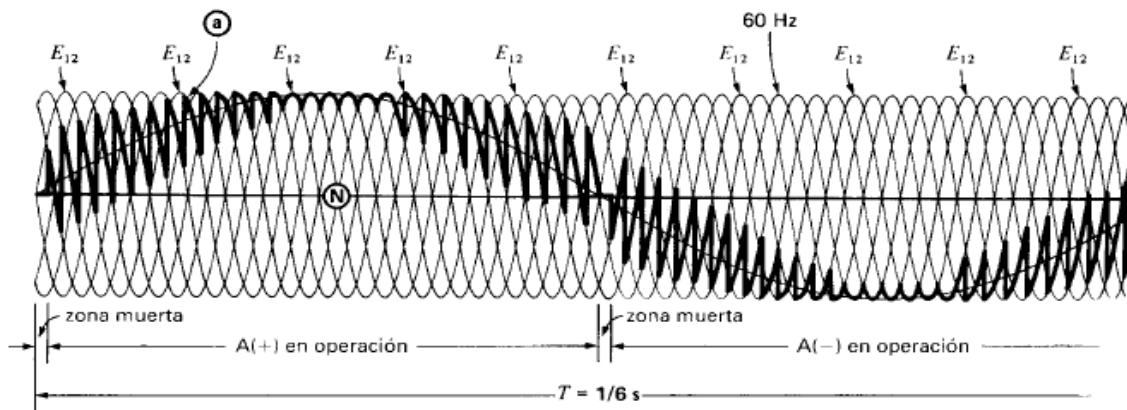
Durante operación como un motor (o $\cos \phi_2 = -1$ como generador en frenado). Sin embargo, el cicloconvertidor solo necesita entregar la potencia activa a la máquina síncrona y podría ser dimensionado para la potencia menor posible. El control del sistema obliga la operación de la máquina a un factor de potencia de $\cos \phi_2 = \pm 1$.

Para mejor uso de las características del sistema es útil controlar los tres convertidores reversibles a través de un controlador de corriente d/q, y así operar el cicloconvertidor como fuente de corriente trifásico en conexión en estrella. El equipo de control regula las tres corrientes del estator I_a , I_b , I_c y la corriente de excitación, es decir, de modo que las características del sistema completo se optimizan estática y dinámicamente en todo el rango de frecuencia (Rodríguez Pozueta, 2019).

Figura N° 52 Cicloconvertidor de 12 pulsos que acciona motor síncrono trifásico



Fuente: Dugan & Brooks, (1999).

Figura N° 53 Cicloconvertidor de 12 pulsos – tensión salida

Fuente: Dugan & Brooks, (1999).

3.6. Sección de Convertidor de Potencia

El elemento principal del convertidor, el tiristor, está contenido en una abrazadera entre dos elementos de enfriamiento. Los elementos de enfriamiento y el tiristor se montan uno sobre el otro para formar pilas. Un paquete de resortes se monta sobre la parte superior de cada pila y que determina la fuerza de la abrazadera que se exige sobre los tiristores dentro de la pila. Las pilas se montan uno al lado del otro en el centro del cubículo, lo que lo divide en una sección delantera y una sección trasera. La cañería se usa para distribuir el agua fría (entrada y salida) y para conectar el circuito de enfriamiento desionizado. Unidades de disparo de tiristores por gate (compuerta) en media tensión se instalan al lado derecho e izquierdo de cada tiristor.

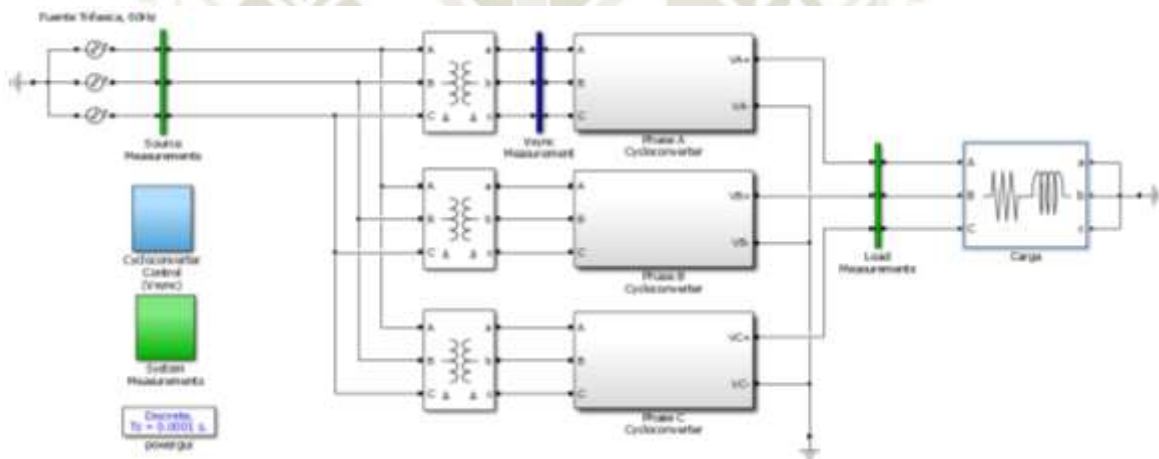
Los componentes de los circuitos snubber, incluyendo un capacitador y un resistor enfriado con agua. Los terminales de potencia y los transformadores de voltaje y corriente si se requieren, se sitúan en la parte trasera del gabinete (Dugan & Brooks, 1999).

3.7. Cicloconvertidor de 12 Pulsos usando Matlab Simulink.

Cabe resaltar que el modelo o tipo de configuración usado del cicloconvertidor es el de conmutación natural y su principal aplicación se encuentra en grandes motores síncronos y motores de rotor bobinado.

Se presenta a continuación un sistema eléctrico que se implementó en el programa MATLAB – SIMULINK, con lo cual se verán las armónicas generadas por el control electrónico del cicloconvertidor.

Figura N° 54 Cicloconvertidor de 12 Pulsos.

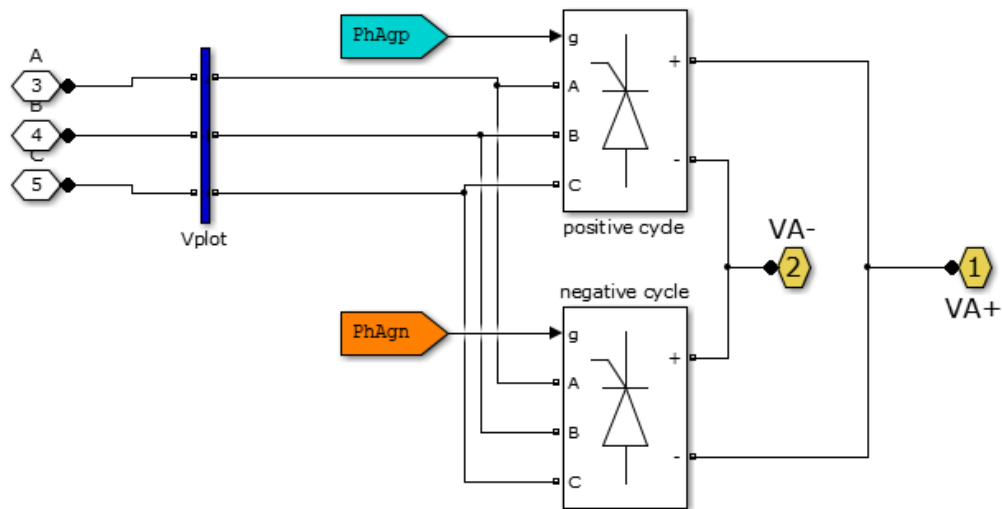


Fuente: Elaboración propia usando Matlab – Simulink.

Se implementaron bloques de disparo para cada uno de los grupos de tiristores que gobiernan el control electrónico de la maquina síncrona (régimen motor), cabe mencionar que las puertas de disparo “gate” tiene un sistema de disparo expuesto en adelante.

El bloque de disparo que genera la salida del convertidor esta implementado en el bloque “Cyclo Firing Control” pero se generan pulsos para el convertidor de los pulsos positivos y otro para los pulsos negativos.

Figura N° 55 Bloques de disparo para cada grupo de tiristores



Fuente: Elaboración propia usando Matlab – Simulink

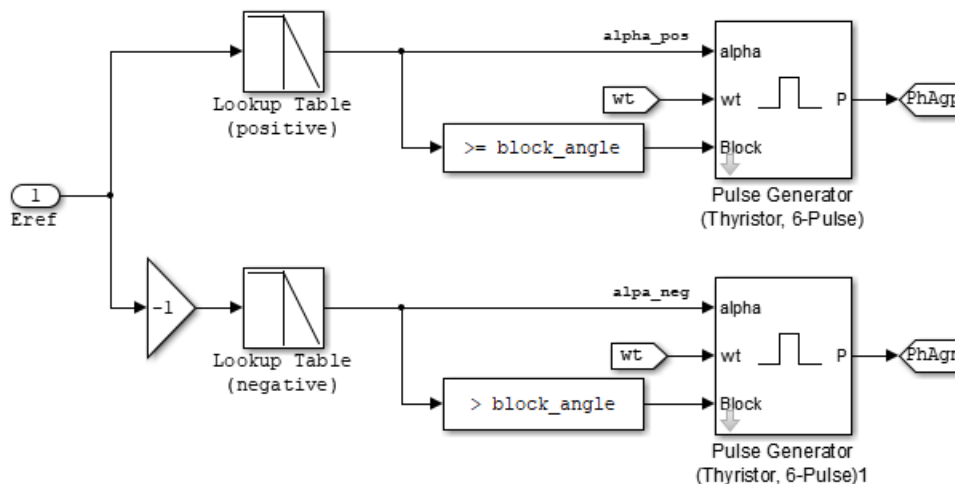
En la siguiente figura tenemos la tensión de referencia positiva y negativa. La señal de tensión ingresa al bloque Lockup table que es el encargado de hacer la comparación de fases entre las fases que alimentan al cicloconvertidor y así poder generar los pulsos.

Alpha es el angulo en el que se produce el cruce por fases.

Wt es la velocidad de la maquina o de las ondas senoidales.

Con estos 2 datos que ingresan al bloque Pulse generator se generan las señales de pulso.

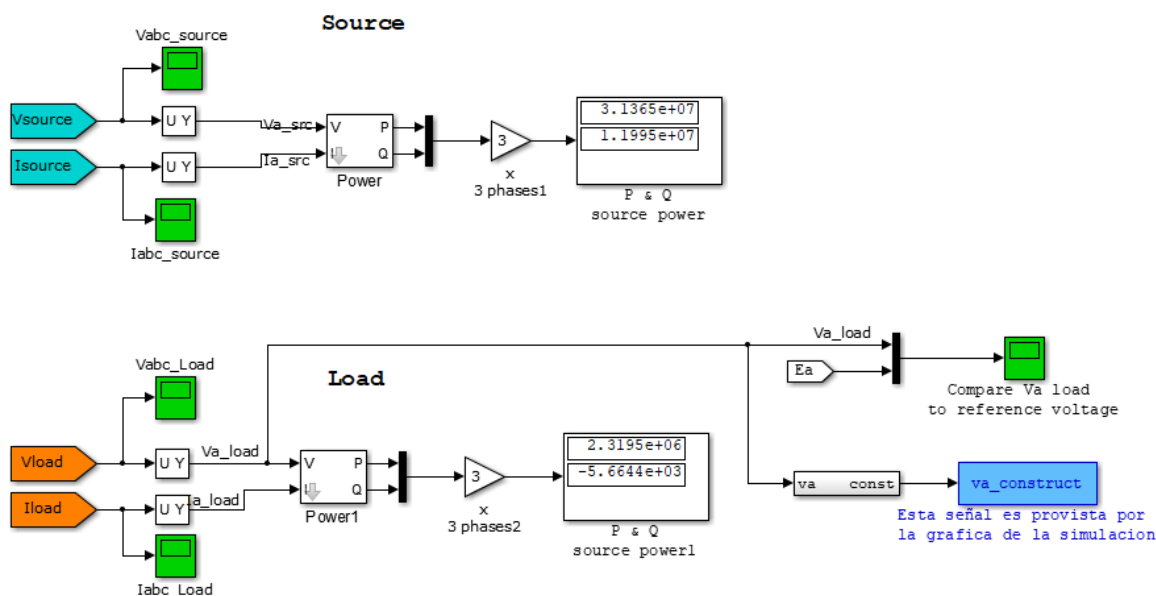
Figura N° 56 Generación de pulsos positivos y negativos



Fuente: Elaboración propia usando Matlab – Simulink

El sistema de medición está definido por el bloque “System Measurements”, con el cual se generará la gráfica de alimentación (tensión) del cicloconvertidor electrónico.

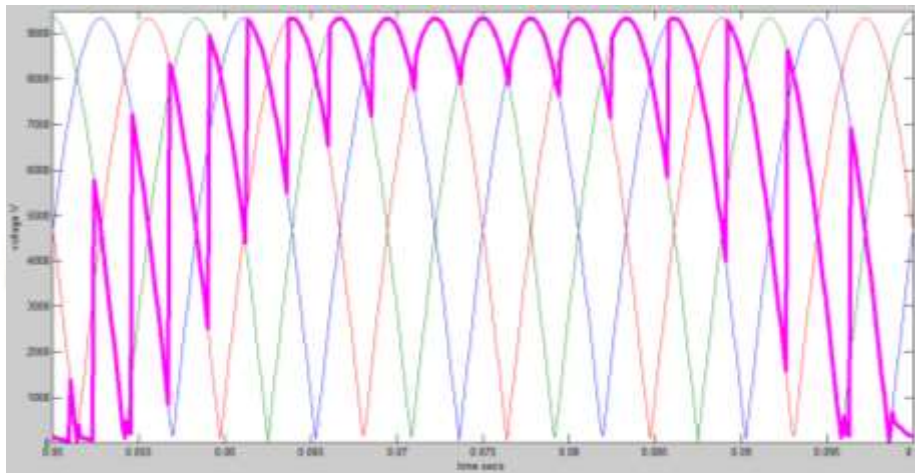
Figura N° 57 Sistema de medición (System Measurements)



Se realizó una comparación entre los valores de tensión de la fuente y los valores de carga. Para poder observar en el display la gráfica de como se genera la destrucción de la señal y los disparos basados en el cruce por fase para generar la señal en baja frecuencia del cicloconvertidor con que alimenta al Motor síncrono.

Se genera entonces, la señal de tensión de salida del cicloconvertidor para cada fase y salida del cicloconvertidor. Donde vemos la onda senoidal destruida e integrada en una salida con sus THD de armónicos. (Cruce de fases).

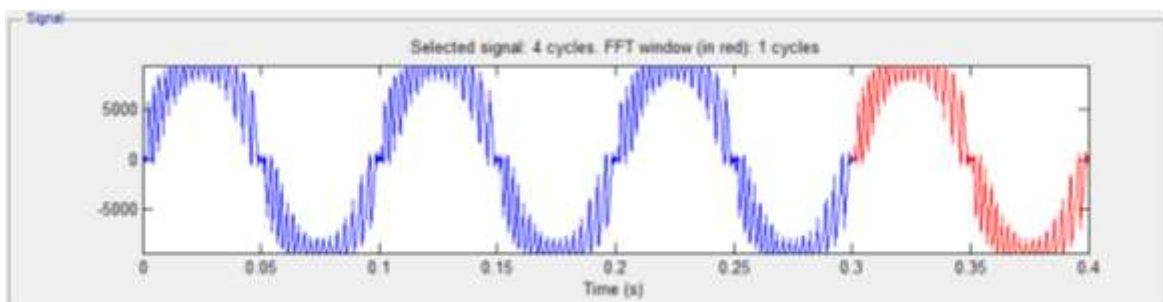
Figura N° 58 Vemos la gráfica resultante del proceso por cruce de fases.



Fuente: Elaboración propia usando Matlab - Simulink

Basándonos en la aplicación FFT, podemos discretizar las señales de tensión y sus armónicas; cabe mencionar que las armónicas más predominantes son las de orden entero (no interarmónicas). Las más predominantes son las de 290Hz y 430 Hz.

Figura N° 59 Realizamos el análisis espectral de armónicos en la función
FFT (Fourier from transformer).

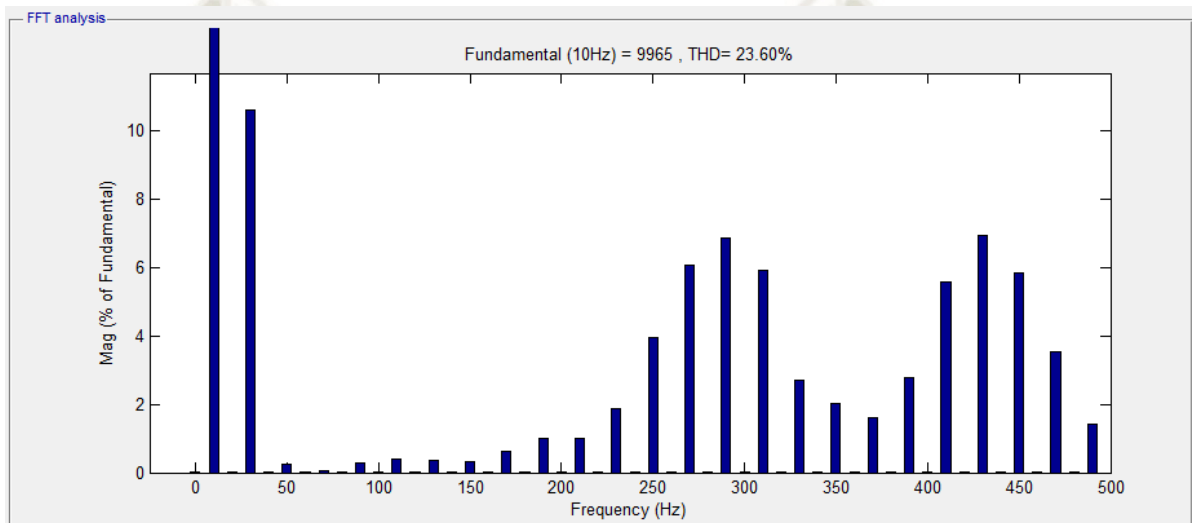


Fuente: Elaboración propia usando Matlab - Simulink

El THD general es de 23.60 % lo cual sobrepasa el límite de la norma IEEE Std. 519-1992 (Calidad de Energía), siendo el límite el 5 % por lo cual es necesario implementar filtros de armónicos en un futuro (Elaboración propia).

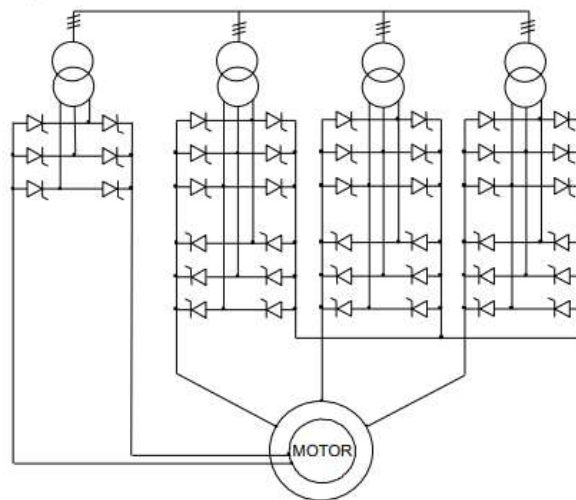
Figura N° 60 Las frecuencias más predominantes son las de 290 Hz y 430

HZ.



Fuente: Elaboración propia usando Matlab - Simulink

Figura N° 61 Cicloconvertidor de conmutación natural



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2002).

Las desventajas más significativas de este cicloconvertidor son:

- La frecuencia de salida está limitada a $1/3$ de la frecuencia de entrada.
- El factor de potencia es muy bajo e inductivo. Esto se acentúa cuando se trabaja a bajas tensiones de salida.
- El voltaje de salida y la corriente de entrada contienen armónicos no característicos y sub-armónicos de gran magnitud.

Investigaciones recientes están orientadas hacia el mejoramiento del impacto armónico utilizando 12 pulsos mediante diferentes tipos de control. También se estudia mejorar la eficiencia y el impacto armónico en máquinas de fases partidas.

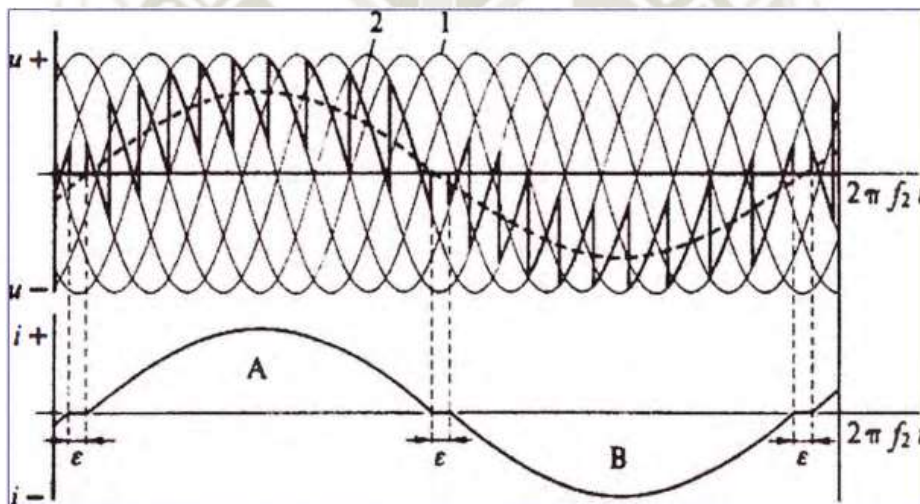
Se usan dos modelos diferentes de operación para controlar el rango completo de velocidad (es decir, rango de frecuencia) del accionamiento:

- Operación sinusoidal
- Operación trapezoidal

En la modalidad sinusoidal para el rango de velocidad más bajo, las tensiones de máquina, y por tanto las tensiones que se generan en el cicloconvertidores son bajas.

Los convertidores siempre operan con ángulos de disparo parciales y las tensiones de salida retienen su característica sinusoidal. Esta modalidad de operación es posible en tanto los convertidores no alcancen sus límites naturales de control a medida que aumentan las amplitudes de tensiones (rectificador e inversor en su posición final). Una limitación es la potencia reactiva relativamente alta necesaria para el control. A bajas velocidades, esto produce un factor de potencia bajo correspondiente en las líneas de alimentación (Salvatierra, 2018).

Figura N° 62 Tensión de salida (u) y corriente (i) del cicloconvertidor modo sinusoidal



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2002).

Para mejorar el factor de potencia, el modo trapezoidal se emplea en el rango de velocidad mayor, donde el cicloconvertidor también tiene que suministrar tensiones mayores de suministro.

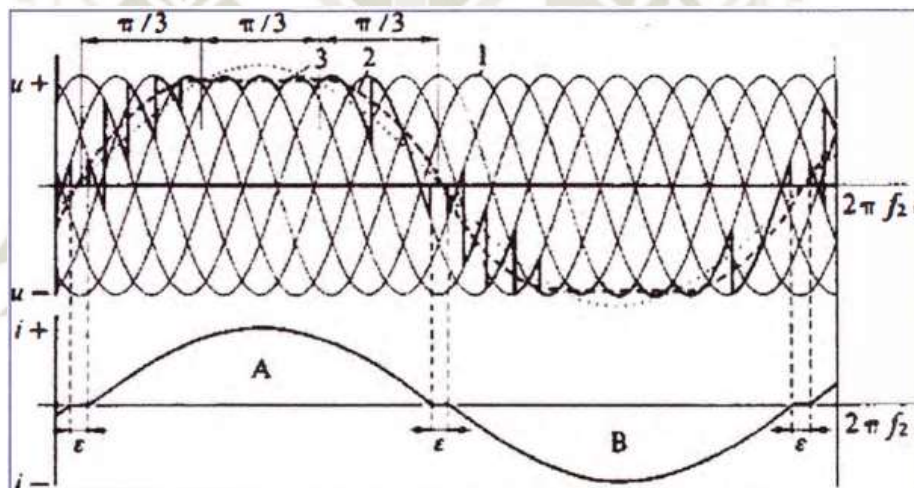
En el modo trapezoidal, los convertidores estáticos son operados en sus límites de disparo por la mayor longitud posible del ciclo de baja frecuencia $1/f$, es decir, durante la operación como motor con rectificador en su posición final y durante la operación como freno con inversor en su posición final.

El ángulo de control solo se desvía desde éste en el área donde cambia la polaridad de las tensiones de salida de convertidor. Estos tienen una característica casi trapezoidal.

Como no existe una conexión en estrella entre la máquina y el cicloconvertidor, las tensiones de máquina aun retienen la forma sinusoidal.

La diferencia entre los puntos de la estrella en una frecuencia tres veces la de la frecuencia de máquina.

Figura N° 63 Tensión de salida (u) y corriente (i) del cicloconvertidor modo trapezoidal



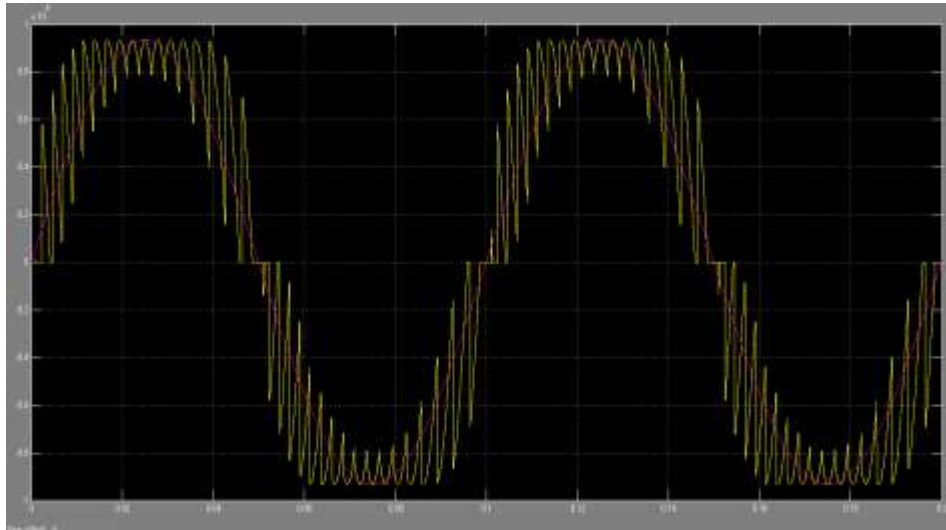
Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2002).

Mientras más tiempo se operen los convertidores con un ángulo de disparo completo durante un ciclo de frecuencia de máquina f_a , mejor será el factor de potencia de las líneas de alimentación.

El sistema modelado en Matlab – Simulink consta de módulos cicloconvertidores trifásicos a monofásicos dispuestos adecuadamente para implementar una arquitectura trifásica a trifásica. Cada módulo tiene un puente tiristor de ciclo positivo y negativo conectado en forma antiparalelo. Para evitar corrientes circulantes cuando un puente está conduciendo, el puente antiparalelo está bloqueado.

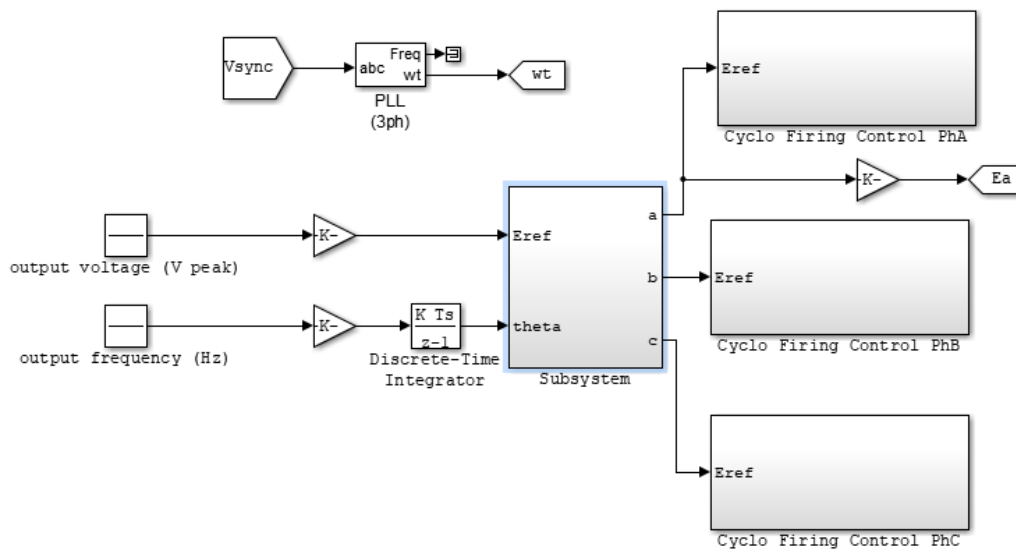
Existe una 'zona muerta' de 5 grados entre la conmutación de ciclo positivo y negativo. Las formas de onda de voltaje de salida se construyen modificando adecuadamente el ángulo de disparo de los puentes de tiristores (Ciclo Convertidores , 2019).

Figura N° 64 Tensión de salida del cicloconvertidor – Fase A



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2002).

**Figura N° 65 Esquema de control sinusoidal y trapezoidal
para el cicloconvertidor.**



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, (2002).

Comienza la simulación. Obsérvese los voltajes de carga del alcance 'Vabc_load' en el subsistema de mediciones del sistema y tener en cuenta que se ha construido una salida de 10Hz a partir de una entrada de 60Hz. Una secuencia de comandos de MATLAB® se ejecuta al finalizar la simulación para mostrar más claramente la construcción del voltaje de salida de la fase A, a partir de la entrada trifásica. Se puede ajustar la magnitud y frecuencia del voltaje de salida modificando 'Voltaje de salida (pico V)' y 'Frecuencia de salida (Hz)' respectivamente (Ciclo Convertidores , 2019).

3.8. Filtros de Armónicos empleados en Molinos Gearless

Cabe mencionar que los armónicos generados por el cicloconvertidor generan armónicos debidos a la distorsión armónica, dicha distorsión (THD) supera los niveles establecidos por las normas IEEE, por lo cual es necesario implementar filtros de armónicos y no generar problemas en el sistema interconectado.

Se puede destacar que los filtros comúnmente usados en estos casos son los “**Filtros amortiguados tipo C**”. El filtro tipo C ofrece un camino de baja impedancia a las componentes armónicas evitando que las mismas fluyan hacia la fuente de energía.

El inductor y el capacitor son elementos de sintonía utilizados para que el filtro entre en resonancia con la frecuencia de la fuente. Estos elementos actúan como camino prioritario para la señal de corriente de frecuencia fundamental amortiguando la señal a través del resistor (R). El capacitor C1 se diseña en función de la potencia reactiva nominal del sistema, siendo el elemento principal del filtro.

Para la sintonía del filtro tipo C, en esta etapa se relacionan varias ecuaciones necesarias para el dimensionamiento de los componentes del filtro, teniendo como objetivo variar la potencia reactiva del capacitor (C), considerando diferentes valores del factor de calidad y de la constante K (constante de ajuste necesaria para obtener valores prácticos de capacitores).

Observando los resultados obtenidos y utilizando las consideraciones previas (estudio de calidad de energía) se generan curvas que determinan la mejor sintonía del filtro tipo C para la aplicación.

CONCLUSIONES

CONCLUSION PRINCIPAL:

- Se realizó un análisis del modelo de la maquina síncrona con la facilidad de la maquina síncrona como bloque en el programa Matlab – Simulink, pero para la realización de un modelo de la operación del mismo usando como medio de regulación y accionamiento a 03 cicloconvertidores monofásicos, los cuales interconectados logran un cicloconvertidor trifásico el cual regula la velocidad del molino gearless (maquina síncrona) para lo cual se realizó un modelamiento del mismo en el programa mencionado anteriormente, poder analizar los armónicos generador por el accionamiento mediante el cicloconvertidor con lo cual se usó el bloque de análisis FFT (Análisis de Fourier) para así poder analizar las armónicas generadas por el equipo electrónico.

CONCLUSIONES ESPECIFICAS:

- Se pudo generar un modelo en Simulink – Matlab para un motor síncrono de 20 MW (características eléctricas) y también un modelo del controlador electrónico (el cual se encarga del arranque y de la regulación de velocidad) el cicloconvertidor de 12 pulsos.
- Se pudo implementó el control basado en las transformadas de Clark – Park y un control en espacio vectorial de los parámetros eléctricos de la maquina a baja frecuencia, y también un control escalar del sistema de excitación.
- Se pudo generar el accionamiento simulado de un molino gearless o motor síncrono de 20 MW para poder generar tensión a baja frecuencia con cierto contenido de armónicas generadas por el proceso de regulación de velocidad.
- Se pudo comprender las bondades de arranque de molinos de gran potencia despreciando los VSD y accionando un motor síncrono el cual es el mismo rotor del motor síncrono (gearless).

RECOMENDACIONES

- Se puede lograr una precisión muy exacta de simulación en el Matlab – Simulink; lo que nos permitirá detectar las armónicas más perjudiciales para el sistema eléctrico.
- Una vez detectado las armónicas generadas por el cicloconvertidor de 12 pulsos, se podrá calcular y sintonizar de forma apropiada los filtros de los armónicos.



REFERENCIAS

- Aguilar, J. (2012). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA II*. Jaén: <https://issuu.com/jaguilarpena>.
- Alain, A., Bueno, A., & Amador, J. (2009). Modelo dinámico de la máquina sincrónica de polos salientes en vectores espaciales y su aplicación al control directo de par. *Ingeniería Energética*, 26-35.
- Apaza, C. (2019). *Molienda de Bolas Preparando 0-Convertido*. <https://es.scribd.com/document/417101218/Molienda-de-Bolas-Preparando-0-Convertido-1>.
- Armónicos: origen, efectos y soluciones. (2019). <http://circuitor.es/es/productos/destacados/4622-armonicos-origen-efectos-y-soluciones>.
- Ciclo Convertidores . (2019). <https://www.coursehero.com/file/35704386/TEMA-7pdf/>.
- Cpe.cl/. (2019). *Filtros de Armónicas*. <http://www.cpe.cl/filtros.html>.
- Cursos.cl. (2019). https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495.
- Dante, K. (1992). *IEEE standard 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE,*
- De la Rosa Francisco, C. (2016). *Harmonics and power systems, published in 2006 by Taylor & Francis Group* .
- Dugan, R. C., & Brooks, D. L. (1999). *Using voltage sag and interruption indices in distribution planning” Winter Meeting Vol. 2, JanFeb, pp. 1164-1169* .

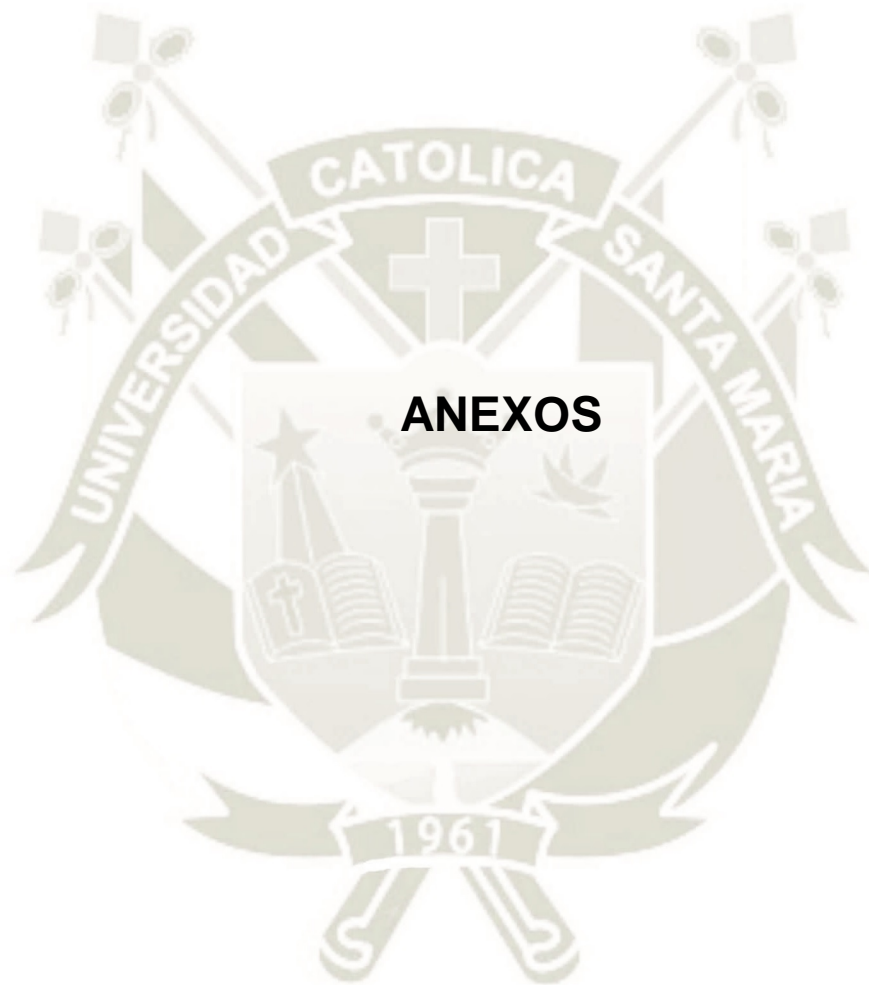
- Duran, R. (2014). *Motores sincronos*.
<https://es.slideshare.net/robertoduran338/motores-sincronos-33478759>.
- El accionamiento sin engranajes para molinos*. (2019).
https://library.e.abb.com/public/a935a0eb1ed95f6e8325779f002d3cc1/ABB_GMD_3BHS_490_275_spanish_LR.pdf.
- Espinoza Castañeda, D. J. (2015). *Abb Gmd 3bhs*.
<https://es.scribd.com/document/275633707/Abb-Gmd-3bhs-490-275-Spanish-Lr>.
- Fuentes de armónicas*. (2019).
<http://www2.elo.utfsm.cl/~ipd411/archivos/apuntes/papers-Capitulo3.pdf>.
- Gevelverzorgingparkstad.nl. (2019). *Molino mina rendimiento*.
https://www.gevelverzorgingparkstad.nl/2019_26918_molino_mina_rendimiento.html.
- IEEE. (2002). *IEEE standard 18–2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE*.
- IEEE. (2003). *IEEE standard 1531-2003, IEEE Guide for application and specification of harmonics filters, IEEE*.
- Jiménez Guzmán, M. (2015). *SEPI-ESIME-IPN, Calidad en el Suministro de Energía Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Distribución*.
- Mack Grady . (2000). *University of Texas at Austin, Understanding Power System Harmonics*.
- Madrigal, M. (1998). *Análisis Armónico en Sistemas Eléctricos, PGIIE-DIEE-Instituto Tecnológico de Morelia*.
- Mañana Canteli. (2019). *REGULACIÓN, CONTROL Y PROTECCIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS*.
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1986/course/section/2310/convertidores.pdf>.

- Marín Álvarez, A. (2019). *El accionamiento sin engranajes para molinos (GMD) Deja los engranajes*. <https://docplayer.es/28006848-El-accionamiento-sin-engranajes-para-molinos-gmd-deja-los-engranajes.html>.
- McAllister, W. (2019). *Los elementos de los circuitos*. <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/circuit-elements/a/ee-sign-convention>.
- Morales, C. (2014). *Maquinas eléctricas y sistemas de Potencia - Theodore Wildi*.
- Mulford García , E. E. (2008). *DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN CICLOCONVERTIDOR TRIFÁSICO A DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN CICLOCONVERTIDOR TRIFÁSICO A MICROCONTROLADORES*. . CARTAGENA DE INDIAS: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR .
- Piolet, F. (2015). *¿Qué son los armónicos y como nos afectan?* <http://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/>.
- Rodríguez Pozueta, M. A. (2019). *Circuitos de corriente alterna*. <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trif%C3%A1sica.pdf>.
- Rosales Padilla, O. (1995). *ESTUDIO DE SECUENCIAS ARMONICAS*. <http://eprints.uanl.mx/7617/1/1020115012.PDF>.
- Salazar, E. A. (2013). *Inversores y Cicloconvertidores*. <https://es.slideshare.net/wiwiwatecke/presentacin1-25651634>.
- Salvatierra, J. (2018). *Direccion Con Control*. <https://www.scribd.com/document/373802604/Direccion-Con-Control>.
- Tirado Pérez, S. R. (2019). *Maquinas Sincrónicas*. <https://www.monografias.com/trabajos93/maquinas-sincronicas/maquinas-sincronicas.shtml>.
- Ttica Gaspar, T. (2019). *CONVERSIONOR CICLO III*. <https://www.scribd.com/document/430127098/CICLO-CONVERSIONOR-III>.
- Universitat de València. (2019). *Cicloconvertidores*. <https://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP9-0506.pdf>.

Vásquez, R. (2019). *Calidad de Energía Filtrado de Armónicos*.
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=121>.

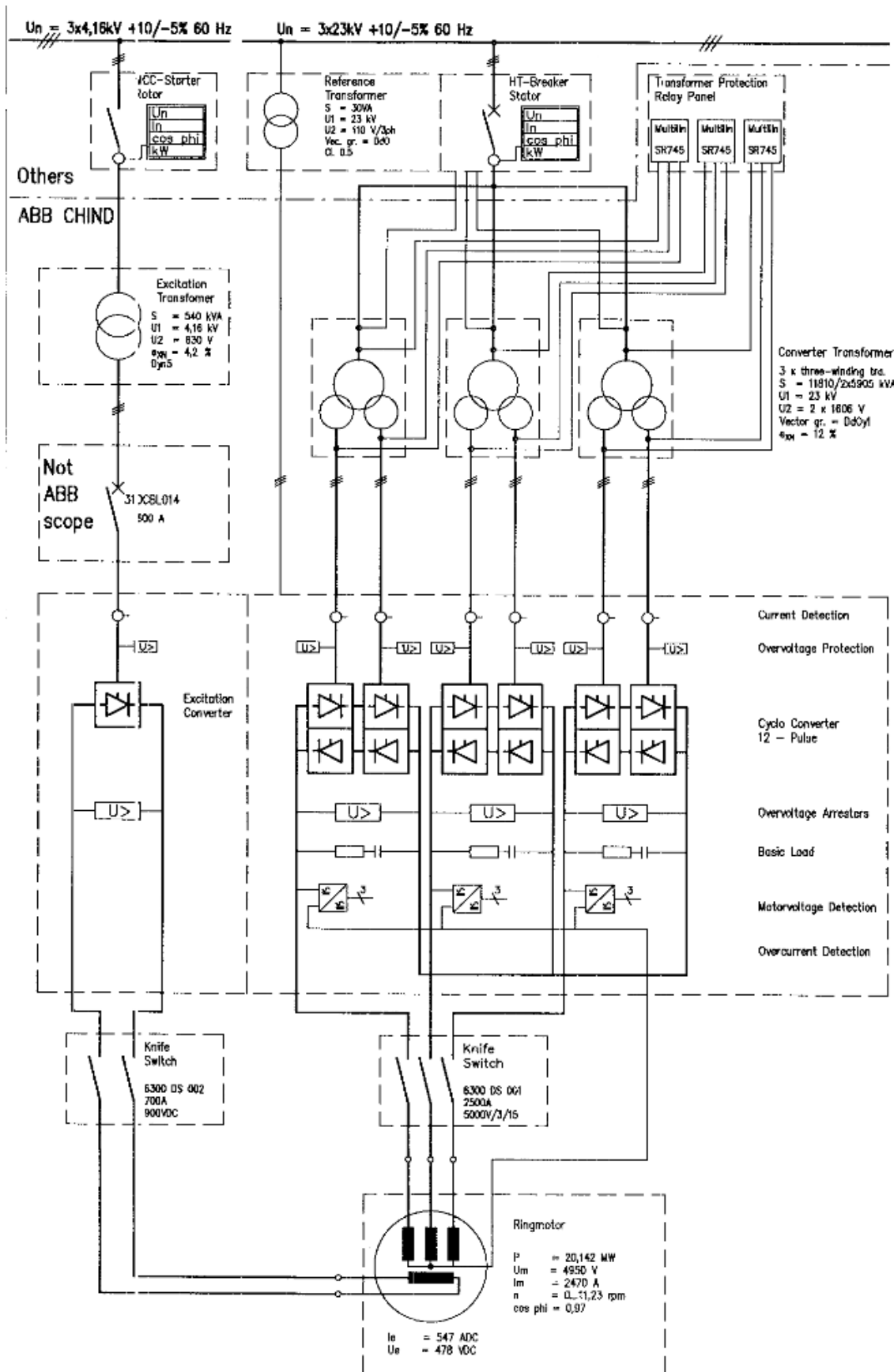
Xulsman . (2015). *El Nuevo Cicloconvertidor de 18 Pulsos Para Molinos SAG Superiores a 25 MW*. <https://www.scribd.com/document/335163169/10-El-Nuevo-Cicloconvertidor-de-18-Pulsos-Para-Molinos-SAG-Superiores-a-25-MW-esp>.

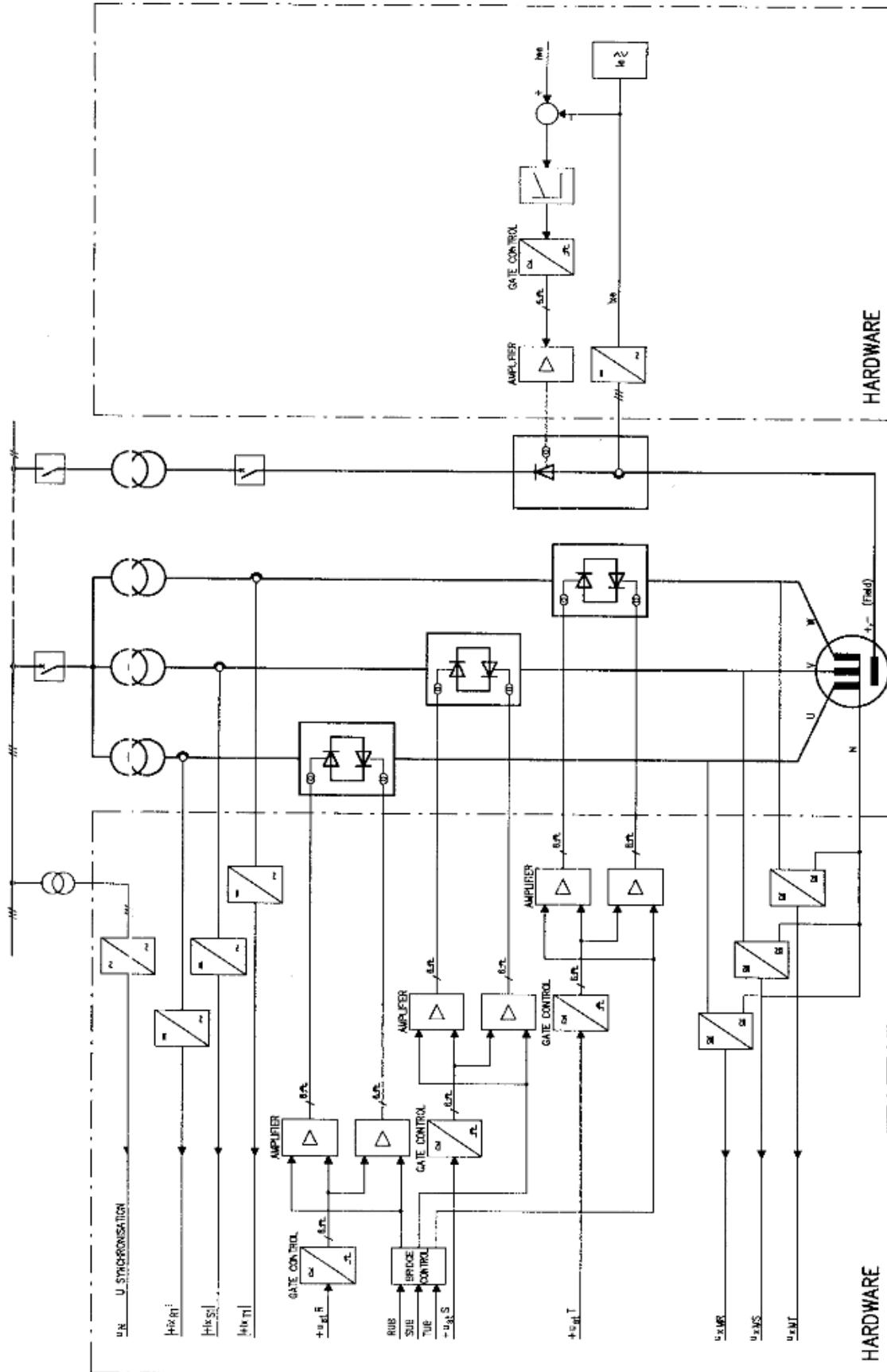




SPECIFICATION

<p>Motor</p> <ul style="list-style-type: none"> Type : WAZ 920/78/46 Power : 20,142 MW / cos phi : 0,97 Rated voltage : 4950 V Rated current : 2470 A Excitation current : 547 A Excitation voltage : 478 V Max current during start time : 3212 A for 30 s 10 times every hour Speed range : 0...11,23 rpm Rated Speed : 9,23 rpm Creep speed : 0,3 rpm Inching speed : 0,92 rpm Frequency : 0...6,738 Hz <p>Motor Accessories</p> <ul style="list-style-type: none"> Space heater : Pn= 12x1,2 kw / In= 18,0 A, 460 V / 3 ph Air gap probes : 9 , Capacitive Pt 100 : 9 x Stator (3/winding), 2 Water inlet, 2 Water outlet, 2 Hot Air left/right Pressure switch (Overpressure) : 2 Waterflow switch : 2 Water Leakage switch : 4 Motor fan : Pn = 8,6 kW/ In = 14,4 A, 460 V/ 3 ph, Powerfactor : 0,85; 4 pole Make up fan : Pn = 1,3 kW/ In = 2,4 A, 460 V/ 3 ph, Powerfactor : 0,81; 4 pole 	<p>Excitation Converter</p> <ul style="list-style-type: none"> Type : DCF501-1500-71-52 Catalogue (DC) [A] : 1'005 A (100% load / 40°C / 4.300m.o.s.l) Rated I DC (Custom) [A] : 587 A Rated I AC (Custom) [A] : 821 A Rated supply, AC [V] : 690 V Rated, DC [V] : 800 V Excitation converter fan : Pn = 1,2 kW/ In = 1,25 A, 460 VAC/ 3 ph/ 60 Hz <p>Stator Transformer</p> <ul style="list-style-type: none"> Quantity : 3 Type : Oil immersed, 3 ph Rated power : 11810/5905/5905 kVA Primary voltage : 23 kV Secondary voltage : 2 x 1606 V Vector group : Dd0y1 Off circuit taps : ±2,5 % / ±5 % Short circuit voltage : 16,5 % <p>Excitation Transformer</p> <ul style="list-style-type: none"> Quantity : 1 Type : dry - Typ transformer, 3 ph Rated power : 540 kVA Primary voltage : 4,16 kV Secondary voltage : 630 VAC Vector group : Dyn 5 Off circuit taps : ± 2,5%, ± 5% Short circuit voltage : 4,2 % <p>Auxiliary Voltage</p> <ul style="list-style-type: none"> MCC Supply : 3x480 V/ 60 Hz LPS Supply : 120 V AC/ 35 A/ 60 Hz/ 1 ph Central Voltage : 230 V AC/ 120 V/ 60 Hz/ 1 ph
<p>Cyclo Converter</p> <ul style="list-style-type: none"> Type : VERITHYR WX M Input Phases : 6 x 3-phase Voltage (per phase) : 1606 V Current (rms) : 2123 A Frequency : 60 Hz Apparent power : 6 x 5905 kVA Output Phases : 3-phase Voltage : 0...4950...4950 V Current (rms) : 2470 A Frequency : 0...5,538...6,738 Hz Apparent power : 21177 kVA Max. ambient temperature : 40°C 	





SOFTWARE

