



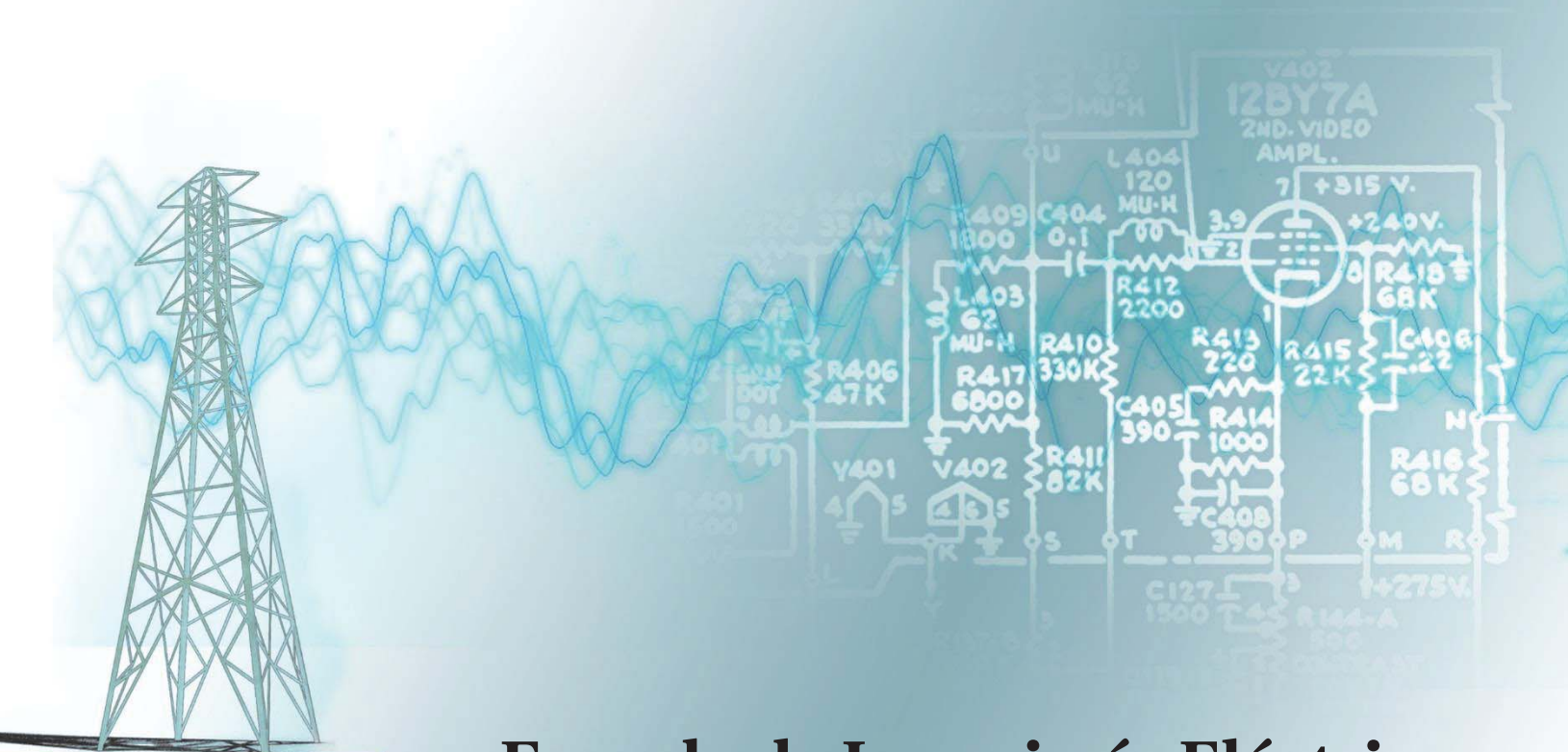
PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



José Daniel Robles Comigual

Modelación Simulación y Análisis del VDF SD 700 con frenado regenerativo

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Modelación Simulación y Análisis del VDF SD 700 con frenado regenerativo

José Daniel Robles Comigual

Informe Final para optar al título Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. René Sanhueza Robles

Profesor Guía

Sr. Domingo Ruiz Caballero

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 18 de julio de 2017

Agradecimientos

Agradezco a mi familia que está compuesta por: mis hermanos Alejandro Robles y Claudia Robles a mi madre María Comigual que fue la que me guio aconsejo en todo momento y que gracias a su gran esfuerzo me pudo dar educación.

Agradezco a mi polola Marion Carmona por estar conmigo en los momentos difíciles de la carrera, siempre con su sonrisa y optimismo.

Agradezco a mis profesores guías, Señor René Sanhueza y el señor Domingo Ruiz Caballero, que tuvieron la disposición de atender mis consultas.

Y no puedo terminar estos agradecimientos sin nombrar a mi grupo de compañeros de universidad, con los cuales fuimos formando lazos grandes de amistad ellos son : Daniel Veas , Eric Gonzales , Rogelio Loyola y Gabriel Cruz .

Resumen

En este trabajo de titulación se tiene como objetivo la modelación, simulación y análisis del variador SD 700 accionando un motor de inducción de 30 HP con rotor jaula de ardilla. Para ello se producirá el frenado del motor mediante el variador de frecuencia, llevando la energía producida desde el motor a la red, para ello se implementará el frenado regenerativo que brindará un frenado seguro.

Se estudiarán los diferentes componentes que forman parte del variador de frecuencia SD 700, además de sus etapas de funcionamiento y las limitantes que posee para poder regenerar a la red. El estudio del motor de inducción se hace necesario ya que es una de las piezas fundamentales para que se produzca la regeneración de energía, es por ello que se estudiará detalladamente su circuito y ecuaciones.

Para conocer como el variador de frecuencia acciona al motor de inducción a diferentes velocidades, se realiza el estudio del control escalar o también llamado voltaje frecuencia, el cual mediante la variación de la frecuencia y el voltaje aplicado produce los cambios en la velocidad de la máquina. Para poder regenerar la energía del frenado a la red, se hace el estudio del Sistema frontal activo (AFE) el cual utiliza control vectorial, es por ello que también se realizarán operaciones matemáticas para poder entender de mejor forma el funcionamiento de este control.

Además, se realizaran ensayos en laboratorio aplicando al motor de inducción diferentes frecuencias con el fin de poder obtener datos certeros y llevarlos a la simulación. Los ensayos que se realizaran serán en funcionamiento como motor y como generador en el cual se producirá el frenado.

Al ya haber realizados los ensayos en el laboratorio, se hace necesario la simulación, para ello se utiliza el programa Matlab el cual trae como complemento a Simulink, este es un programa que tiene un entorno gráfico y en el cual se encuentran bibliotecas de bloques que serán muy útiles al momento de la simulación.

Palabras claves: rectificador frente activo, variador de frecuencia, control escalar, control vectorial, frenado regenerativo.

Abstract

In this titration work the objective is the modeling, simulation and analysis of the inverter SD 700 Driving a 30 HP induction motor with rotor squirrel cage. This will cause the braking of the motor by the frequency inverter, sending the energy produced from the motor to the grid for this is implemented regenerative braking that will allow a safe braking.

We study the different components that are part of the frequency inverter SD 700, In addition to its operating stages and the limitations it has to regenerate the network. The study of the induction motor becomes necessary since it is one of the fundamental pieces for the regeneration of energy to occur, that is why his circuit and equations are studied in detail.

To know how the frequency inverter drives the induction motor at different speeds, the study of scalar control or also called frequency voltage, Which by means of the variation of the frequency and the applied voltage produces the changes in the speed of the machine. In order to regenerate the braking energy to the grid, the active front rectifier is studied, which uses vector control, which is why mathematical operations will also be performed to better understand the operation of this control.

In addition, laboratory tests applied to the induction motor are carried out at different frequencies in order to obtain accurate data and bring them to the simulation. The tests that are performed will be in operation as an engine and as a generator in which the braking will occur.

Having already performed the tests in the laboratory, it is necessary to simulate, for this is used the program Matlab which brings as a complement to Simulink, this is a program that has a graphical environment and in which are libraries of blocks that will be very useful at the time of the simulation.

Key words: active front rectifier, frequency inverter, scalar control, vector control, regenerative braking

Índice general

Introducción.....	1
1 Variador de Frecuencia SD 700	3
1.1 Conceptos básicos VDF	3
1.2 Diagrama de bloques VDF	4
1.3 Aplicaciones de los Variadores de frecuencia	5
1.3.1 Correas transportadoras	5
1.3.2 Ascensores y elevadores.....	5
1.3.3 Bombas y ventiladores centrífugos.....	6
1.4 Variador de frecuencia SD 700.....	6
1.4.1 Aplicaciones y herramientas específicas.....	7
1.4.2 Ahorro de energía	7
1.4.3 Circuito Variador de frecuencia SD 700	8
1.4.4 Etapas de funcionamiento del VDF SD 700	9
2 Motor de inducción y regeneración	12
2.1 Motor de inducción	12
2.1.1 Principio de funcionamiento	12
2.1.2 Campo magnético giratorio (C.M.G)	12
2.1.3 Deslizamiento del motor de inducción	13
2.1.4 Circuito equivalente y balance de potencias	13
2.1.5 Característica par-velocidad del motor de inducción.....	15
2.2 Regeneración.....	16
2.2.1 Motor de inducción actuando como generador.....	16
2.2.2 Regeneración de energía con variador de frecuencia SD 700	18
2.2.3 Regeneración a la red con configuración de puentes rectificadores a tiristores	20
2.2.4 Regeneración a la red con puente IGBT	21
2.2.5 Objetivos del sistema de unidad frontal activa (AFE)	23
2.2.6 Principio de operación de la unidad frontal activa (AFE)	24
2.2.7 Ventajas y desventajas de un rectificador frente activo	27
3 Control escalar y vectorial.....	28

3.1 Ensayos de rotor bloqueado y rotor libre.....	28
3.1.1 Ensayo rotor bloqueado.....	28
3.1.2 Ensayo rotor libre	29
3.2 Control escalar	30
3.2.1 Esquema del control escalar.....	32
3.3 Control vectorial	33
3.3.1 Principio de funcionamiento	34
3.3.2 Transformada de Park.....	34
3.3.3 Obtención de las ecuaciones dinámicas del sistema	35
4 Simulación y ensayos experimentales.....	38
4.1 Ensayo rotor bloqueado y rotor libre en laboratorio	38
4.1.1 Ensayo rotor bloqueado y cálculo de parámetros	38
4.1.2 Ensayo rotor libre y cálculo de parámetros.....	39
4.1.3 Simulación del motor de inducción en ambiente Simulink.....	42
4.2 Ensayos en laboratorio y simulación del variador de frecuencia SD 700	44
4.2.1 Ensayo variador de frecuencia SD 700-motor de inducción	44
4.2.2 Ensayo variador de frecuencia SD700 en modo regeneración.....	46
4.2.3 Simulación del variador de frecuencia SD 700 en modo motor y generador	50
4.3 Simulación variador de frecuencia con regeneración a la red.....	54
4.3.1 Funcionamiento del circuito de control del rectificador AFE	55
4.3.2 Simulación y resultados.....	56
4.4 Cálculo de potencia cedida y regenerada a la red.....	58
5 Evaluación económica	61
5.1 Variador de frecuencia SD 700 y SD700FR	61
5.2 Medidor Bidireccional.....	64
5.3 Tiempos de frenado v/s operación.....	66
Discusión y conclusiones.....	69
6 Bibliografía	71

Introducción

Antes de la llegada de los dispositivos de conmutación rápida, los motores de inducción no eran las máquinas más idóneas para realizar los diferentes trabajos, pero con la llegada de la electrónica de potencia y con los dispositivos semiconductores todo esto cambio.

El control de la velocidad y la precisión que proporciona un variador de frecuencia, lo hace fundamentales en las industrias actuales, además de poseer sistema de comunicación, permite poner en marcha el proceso, también permite la monitorización en tiempo real del funcionamiento del variador como del motor, indicando posibles fallos los cuales si no son muy graves se pueden solucionar desde un computador.

La minería es un área por donde se ha optado por la utilización de variadores de frecuencia en conjunto con motores de inducción, estos últimos por ser de gran robustez y el casi nulo mantenimiento. Para transportar gran cantidad de material, se hace necesario el control adecuado de varios motores, lo cuales en conjunto y con ayuda del accionamiento de los variadores de frecuencia pueden estar sincronizados.

El gran consumo de energía que presentan estas industrias las lleva a pensar en cómo poder reutilizar energía perdida en el proceso, como lo es la energía que se pierde al frenado, esta energía se pierde en forma de calor, por gran fricción que produce al momento de poder detener una carga de alta inercia, es por ello que existen variadores con freno regenerativo.

El frenado regenerativo ha estado presente desde la década del 60 donde se implementó en un prototipo de auto eléctrico el Amitron , el cual tenía la capacidad de guardar la energía del frenado en sus baterías, la desventaja que tenía este prototipo , es el gran peso de las baterías llegando a los 90 Kg , además del poco tiempo de uso.

En la actualidad se ha implementado en la minería, como lo es en la minera Los Pelambres que está situada a en la cordillera de los andes en la IV región, en la comuna de Salamanca, sobre los 2000 m.s.n.m, la planta concentradora se encuentra a cierta distancia menor de altura. Para producir la regeneración de energía a la red utilizan rectificadores frente activo que controlan accionamiento de la correa transportadora, las ventajas de este control a parte de devolver la energía a la red, es que se tiene un ajuste fino de velocidad y torque en los motores de inducción jaula de ardilla.

Además el frenado regenerativo está presente en muchas industrias, como lo son el transporte donde el poner en marcha y frenar se hace frecuente, es que en algunos países los vagones de metros disponen de frenado regenerativo, inyectando la energía a la red, también está presente en motos, ascensores etc. Todo proceso donde se pierda energía por medio del frenado puede ser recuperado.

1 Variador de Frecuencia SD 700

Un Variador de frecuencia, es un dispositivo electrónico que tiene como finalidad controlar la velocidad rotacional de los motores de corrientes alterna , el cual es alimentado con voltaje y frecuencia constantes y entrega al motor voltaje y frecuencia variable.

1.1 Conceptos básicos VDF

Los variadores de frecuencia (VDF), es un dispositivo que permite el control total de los motores de inducción, controlando el torque y la velocidad, también se les suele llamar variadores de velocidad.

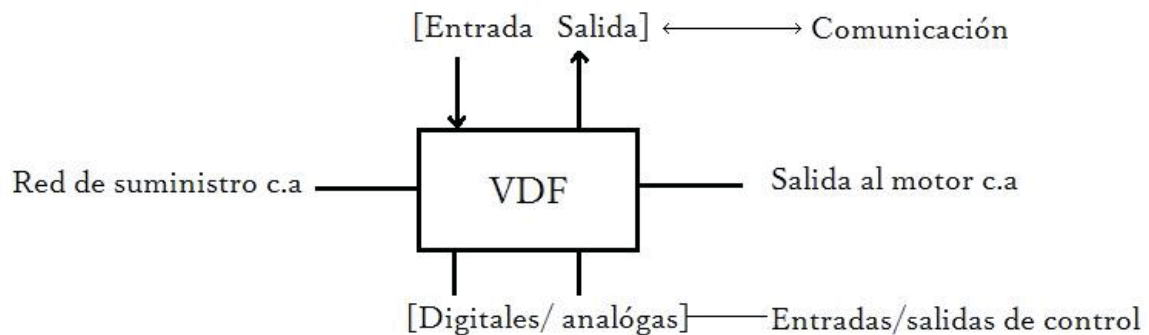


Figura 1-1: Entradas y salidas en un VDF.

- 1) Red de suministro c.a: Red de suministro, proporciona una tensión y frecuencia constante la cual es convertida a tensión y frecuencia variable, dependiendo de la necesidad de consumo del equipo se optara por una red monofásica o trifásica.
- 2) Entradas/ salidas de control: Las diferentes entradas y salidas de control pueden ser pulsadores, conmutadores, digitales o del tipo analógicas.
- 3) Comunicación: Estos equipos pueden integrarse a redes industriales, por lo que disponen de puertos de comunicación RS-232,RS-485, red LAN, Profibus o USB para computadores.

- 4) Salida al motor CA: La salida presenta tensión y frecuencia variables, generalmente de tres fases (R-S-T), para una conexión directa al motor.

1.2 Diagrama de bloques VDF

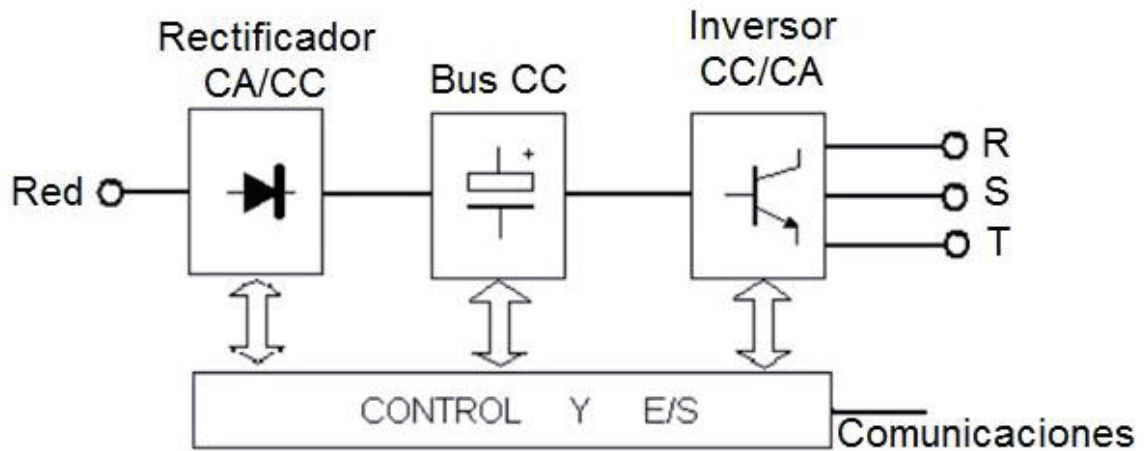


Figura 1-2: Diagrama de bloques VDF (fuente: <http://documentslide.com>)

- Rectificador CA/CC: transforma un voltaje alterno a uno cuasi constante. La forma de onda del voltaje a la salida, dependerá de la composición del rectificador ya sea a base de diodos, tiristores, IGBT etc.
- Bus CC: Está compuesto por condensadores de gran capacidad, dispuestos en serie o en paralelo, con el fin de filtrar y almacenar la señal de entrada y obtener una salida de tensión continua estable.
- Inversor CC/CA: Transforma la tensión del enlace continuo estable proporcionado por el bus CC a una tensión trifásica, con amplitud y frecuencia variable. Los elementos de conmutación que se usan generalmente son, tiristores (SCR), CMOS, transistores bipolares (BJT), IGBT, etc. La señal de salida se obtiene mediante modulación por ancho de pulso (PWM).
- Comunicación: Circuito de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación etc , y entradas y salidas , tanto analógicas como digitales. Además incluye el interfaz de comunicación con buses u otros dispositivos de control y usuario.

1.3 Aplicaciones de los Variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia se encuentran en distintas industrias como lo son la minería, industrias metalúrgicas, industrias de papel, extracción de petróleo y gas e industrias de agua entre otras. El control y robustez que presentan estos equipos, los hacen idóneos para implementarse en todas las industrias que necesiten procesos rápidos y con un menor costo de operación.

Algunos ejemplos donde se encuentran presentes los variadores de frecuencia son:

1.3.1 Correas transportadoras

El uso de los variadores de frecuencia en correas transportadoras es de suma importancia, si se desea controlar con exactitud la velocidad y el torque necesario requerido por la carga. El control de estas variables ayuda a evitar posibles golpes en el transporte de botellas y evita el derrame del material transportado.



Figura 1-3: Correa transportadora de botellas (fuente: <http://cervezartesana.es>)

1.3.2 Ascensores y elevadores

Proporciona partidas y paradas suaves, manteniendo una velocidad constante independiente la carga a transportar.

1.3.3 Bombas y ventiladores centrífugos

El accionamiento de bombas y ventiladores con variadores de frecuencia, proporcionan una presión constante en el líquido a transportar y volumen variable.



Figura 1-4: Bomba centrífuga (fuente: <https://www.logismarket.com>)

1.4 Variador de frecuencia SD 700

El variador utilizado para esta tesis es de la familia SD700 de la compañía Power Electronics. La familia de los variadores SD700, están disponibles desde 1.5 KW hasta los 2000KW, con un rango de tensiones que van desde los 230 VAC hasta los 690 VAC y pulsos en la rectificación de 6,12,18 y 24. Su diseño mecánico IP20 e IP54 los hacen ideales para todo tipo de aplicaciones industriales, siendo esta serie la más flexible y extensa. Toda esta serie tiene características comunes, como lo son un bajo dv/dt , diseño robusto y de fácil operación y con un control preciso del motor.



Figura 1-5: Variador de frecuencia SD700 (fuente: <http://power-electronics.com>)

1.4.1 Aplicaciones y herramientas específicas

- PowerCOMMS: Esta herramienta entrega información en tiempo real del variador de frecuencia y motor. Se instala en un computador de mando el cual es comunicado mediante Ethernet, que entregará información como: consumo del motor, tensión aplicada a los terminales del motor, tensión en el bus DC, temperatura de los IGBT, sobrecarga del motor etc. No sólo permite monitorear en tiempo real, si no que también permite configurar y poner en marcha múltiples variadores.
- PowerPLC: Permite crear nuevos Software según las necesidades de la industria como lo son: desatasque de machacadoras, bobinado de papel y cable gestión de grúas, control de múltiples motores etc.

1.4.2 Ahorro de energía

Los variadores de frecuencia producen un ahorro de energía modificando la curva característica del motor, según la carga y el proceso que se esté realizando. El método que utiliza para disminuir el consumo de energía, es modificando la frecuencia en los terminales del motor, provocando una disminución de la velocidad de giro del rotor.

Según la industria en la cual el variador de frecuencia se encuentre, producirá un ahorro de energía específico, que va ligado al tipo de carga que se esté accionando. En la figura 1-5 se muestran los distintos tipos de cargas que podemos encontrar en las diferentes industrias y la respuesta al Par y la potencia consumida en función de la velocidad del rotor.

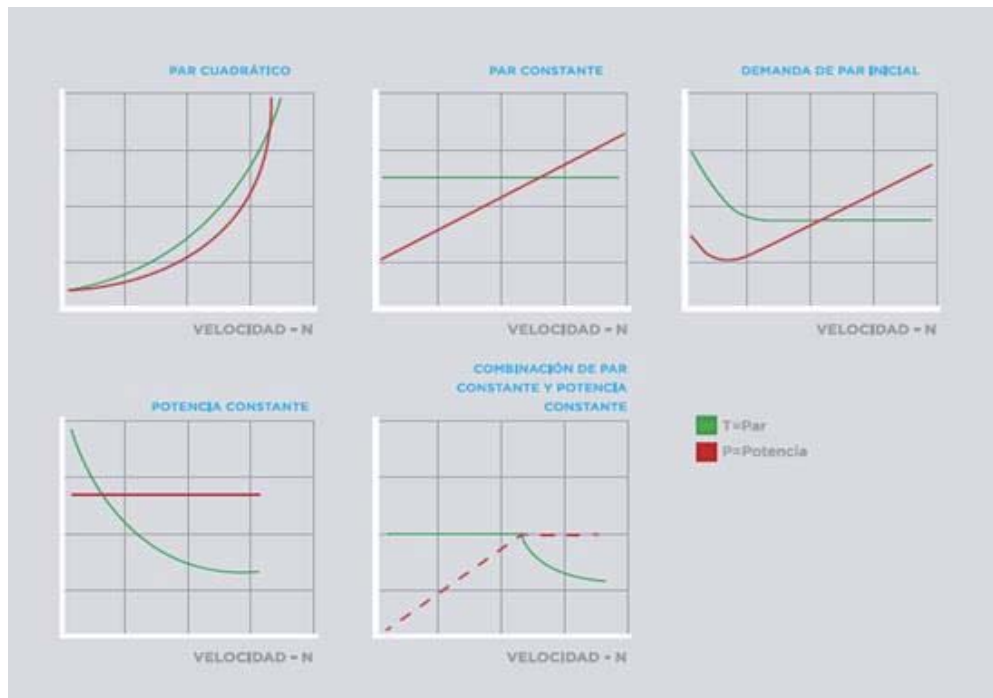


Figura 1-6 :Curvas par-potencia según el tipo de carga(fuente: : <http://power-electronics.com>)

- Par cuadrático: El tipo de carga más común es en aplicaciones como: movimiento de aire y agua los cuales usan ventiladores y bombas centrífugas.
- Par constante: Se considera par constante cuando el sistema está trabajando constantemente con volúmenes fijos, algunos ejemplos son: compresores de tornillo, alimentadores, cintas transportadoras.
- Demanda de par inicial: Similar al par constante, pero con un elevado torque a baja velocidad, algunos ejemplos son: Extrusoras, bombas de tornillo, molinos.
- Potencia constante: Corresponde al tipo de carga que se enrolla y el diámetro varía en el proceso, como lo es el bobinado de papel, rollos de cable.
- Par constante y combinación de potencia constante: Este es un caso especial que depende del dimensionamiento del sistema como bobinas y rollos de papel y cable.

1.4.3 Circuito Variador de frecuencia SD 700

El principio de funcionamiento del variador de frecuencia SD 700, es por modulación por ancho de pulso (PWM), la cual permite el control de la velocidad y giro del rotor en los motores de inducción. Las componentes principales por los cual está formado este variador son: un puente rectificador semicontrolado, bus CC, puente inversor, tarjeta de control y de potencia.

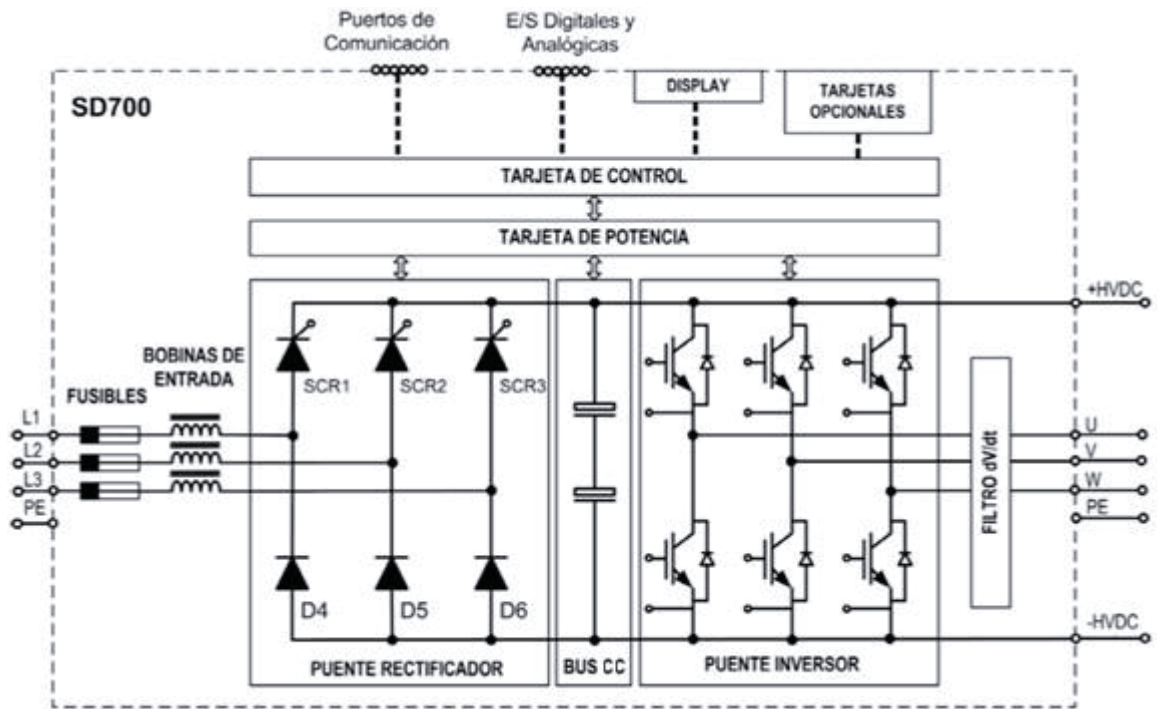


Figura 1-7 Circuito variador de frecuencia SD 700 (fuente : <http://power-electronics.com>)

En la entrada del variador, se encuentran filtros en serie que disminuyen la distorsión armónica de corriente, protegiendo al variador frente a las posibles distorsiones del sistema de abastecimiento.

El variador SD700 dispone de dos tarjetas, una de control y de potencia que se encargan de: el disparo de los tiristores en el puente rectificador, la gestión de carga suave, control del bus DC, el disparo de los IGBT en el puente inversor y el funcionamiento del motor.

En la salida del puente rectificador, se encuentra un filtro dv/dt , que es el que protege al motor de eventuales picos de voltaje, evitando la ruptura de los aislamiento del motor y en consecuencia llevándolo a la falla.

1.4.4 Etapas de funcionamiento del VDF SD 700

- ❖ Rectificador: El puente rectificador está formado por diodos y tiristores, por lo cual lleva el nombre de puente rectificador semicontrolado, el cual puede proporcionar una carga suave al bus CC. Este puente rectificador, toma una señal trifásica sinusoidal de tensión y la convierte a una tensión continua, la cual tiene 6 picos de voltajes que son producidos por los diodos y tiristores.

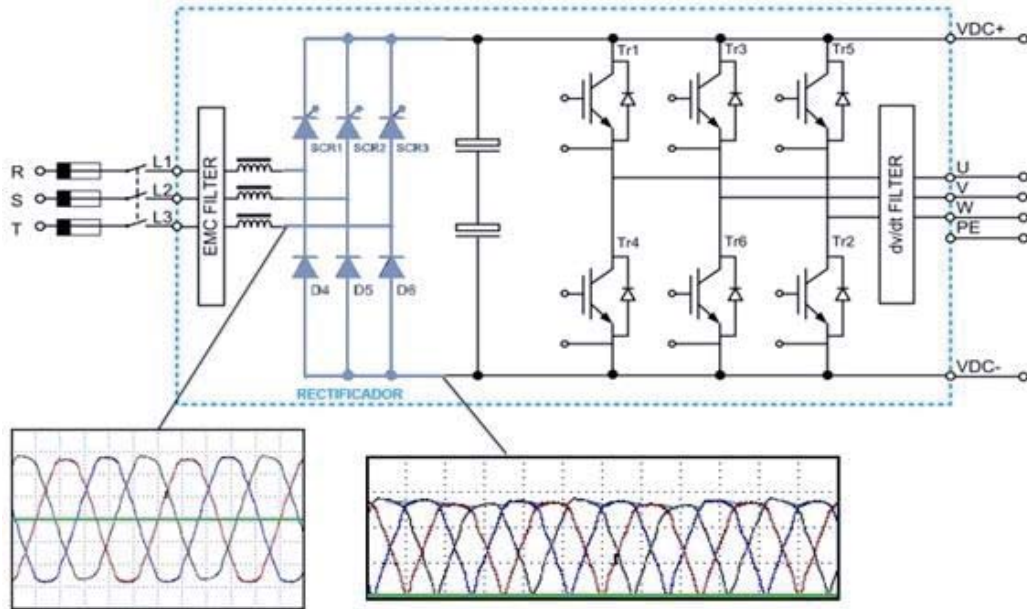


Figura 1-8: Forma de onda de voltaje en la entrada y salida del rectificador (fuente: : <http://power-electronics.com>)

- ❖ Bus CC: Toma la tensión proveniente del rectificador, la cual es almacenada y filtrada con condensadores de gran capacidad, para transformarla en una tensión estable y cuasi constante.

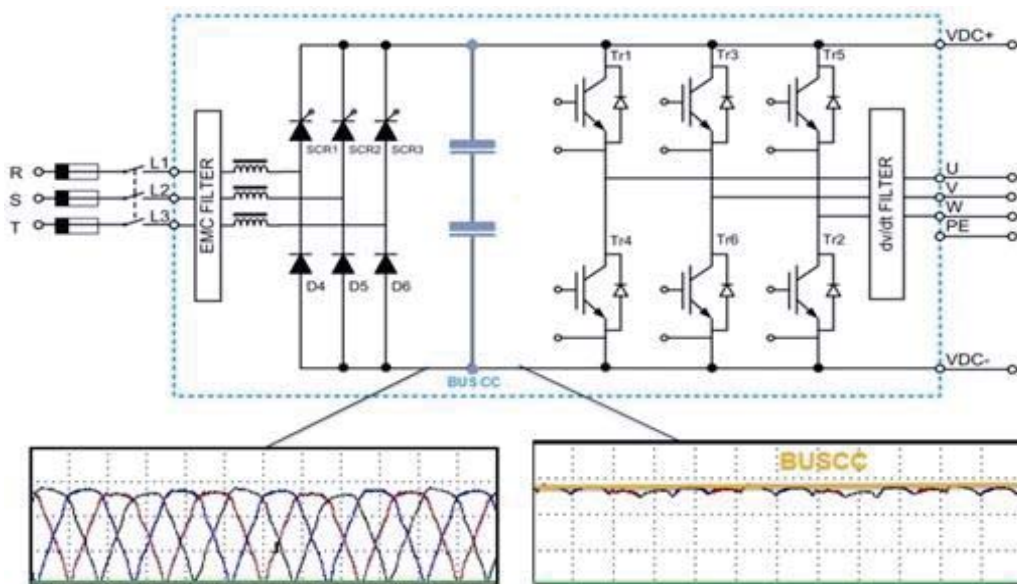


Figura 1-9: Forma de onda del Bus DC (fuente: : <http://power-electronics.com>)

- ❖ Inversor: El inversor está formado por transistores bipolares de puerta aislada o por sus siglas en ingles IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) , que mediante la modulación por ancho de pulso transforma la tensión que proporciona el Bus DC, en una señal sinusoidal trifásica con tensión y frecuencia variable. La tensión y frecuencia variables en los terminales del motor, permite un control en velocidad y torque, según las necesidades del proceso.

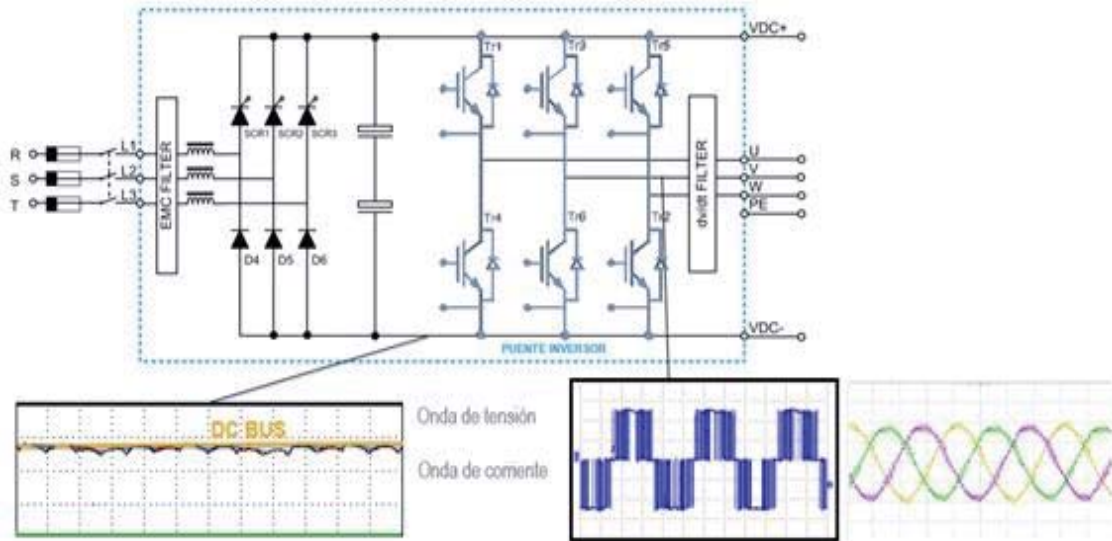


Figura 1-10: Forma de onda de la tensión y corriente a la salida del inversor (fuente: : <http://power-electronics.com>)

2 Motor de inducción y regeneración

2.1 Motor de inducción

El motor de inducción o también conocida como máquina asincrónica, lleva su nombre ya que nunca llega a la velocidad impuesta por la frecuencia de la red. Existe dos tipos de motores de inducción, lo de rotor bobinado y jaula de ardilla, para la presente tesis nos enfocaremos en el rotor jaula de ardilla, ya que es el que utilizaremos para los experimentos en laboratorio y simulación. La construcción robusta sobre todo en la construcción del rotor jaula de ardilla, da excelentes resultados de operación, ya que al no necesitar escobillas, casi no necesita mantenimiento.

2.1.1 Principio de funcionamiento

Al aplicar una tensión en los terminales del estator, se produce una fuerza magnetomotriz uniforme y giratoria, que induce una fuerza magnetomotriz de sentido opuesto en cada barra del rotor, esta hace circular una corriente produciendo el giro del rotor.

De acuerdo con la ley de Lenz, el voltaje, la corriente y el flujo generado por el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético estará en una dirección que se opone al movimiento relativo. De aquí que para satisfacer la ley de Lenz, los conductores deben desarrollar una fuerza mecánica. La dirección de la corriente en la barra del rotor que determina el flujo en sentido opuesto está determinada por la regla de la mano derecha.

2.1.2 Campo magnético giratorio (C.M.G)

Al alimentar los devanados del estator con 3 tensiones alternas sinusoidales y desfasadas 120° , circularán corrientes alternas que producirán en cada fase flujos magnéticos alternos sinusoidales estacionarios en el espacio y desfasados 120° eléctricos en el espacio.

La resultante de estos 3 campos magnéticos será un campo magnético giratorio (C.M.G.) de magnitud constante que gira en el espacio a una velocidad de sincronismo:

$$n_s = \frac{120 * f}{p} [rpm] \quad (2-1)$$

Donde n_s es la velocidad del sincronismo a la frecuencia de alimentación y p el número de polos.

Por efecto del C.M.G. del estator, en los conductores del rotor se inducen corrientes alternas que producen un nuevo campo magnético que interactúa con el campo magnético del estator, produciendo un torque electromagnético (par motor) el que permite la rotación del rotor.

2.1.3 Deslizamiento del motor de inducción

El deslizamiento de una máquina de inducción, se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor, por unidad de velocidad del campo:

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} 100\% \quad (2-2)$$

Con n_s la velocidad del sincronismo y n_r la velocidad mecánica del rotor. El deslizamiento indica que tan cerca se encuentra la máquina de la velocidad sincrónica. Si el rotor de la máquina gira a una velocidad mayor que la sincrónica, el deslizamiento se hace negativo y actúa como generador.

2.1.4 Circuito equivalente y balance de potencias

El circuito equivalente de la máquina de inducción en régimen permanente se presenta en la figura 2-1. Podemos notar que el circuito equivalente es muy similar al de un transformador, pero difiere ya que el rotor tiene sus barras cortocircuitadas. Las pérdidas que presenta son propias de los devanados del estator y rotor, además existen pérdidas propias del núcleo de hierro.

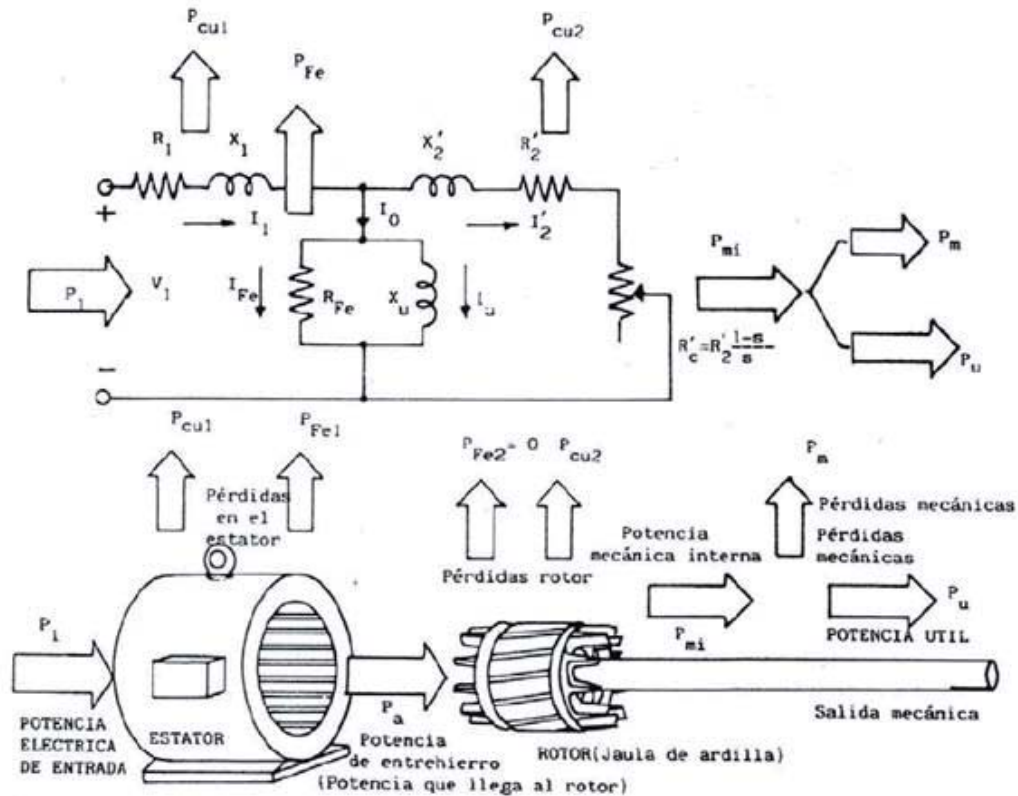


Figura 2-1: Circuito equivalente y distribución de potencias en el motor (fuente: Jesús Fraile Mora, quinta edición, pag 297)

Dónde:

X_1 y X_2 son la reactancia de dispersión del estator y rotor respectivamente.

R_1 y R_2 resistencia de cobre del estator y rotor.

X_u es la reactancia magnetizante.

R_{Fe} es la resistencia del hierro.

R_c es la resistencia de la carga.

P_1 = Potencia absorbida de la red eléctrica

P_{cu1} = Pérdidas en los conductores del estator

P_{cu2} = Pérdida en los conductores del rotor

P_{Fe} = Pérdidas en el hierro, suelen considerarse concentradas en el estator. En el rotor es muy baja

P_m = Pérdidas mecánicas: pérdidas rozamiento propio y con el aire más las pérdidas misceláneas.

P_g = Potencia que atraviesa el entrehierro de la máquina. La potencia que atraviesa el entrehierro es la que disipa en la resistencia total de la rama del rotor

P_{mi} = Potencia mecánica interna: atraviesa el entrehierro y produce trabajo.

$P_u = P_{mi} - P_m$ Potencia mecánica útil.

2.1.5 Característica par-velocidad del motor de inducción

En la figura 2-2 se prestan las característica de par-velocidad que tiene el motor de inducción en las diferentes regiones de operación. La información que entrega esta curva de par-velocidad es:

- ❖ El par del motor es cero cuando este se encuentra a la velocidad del sincronismo.
- ❖ La curva par-velocidad es aproximadamente lineal entre vacío y plena carga.
- ❖ El par de arranque tiene que ser superior al par nominal, para que el motor se ponga en movimiento.

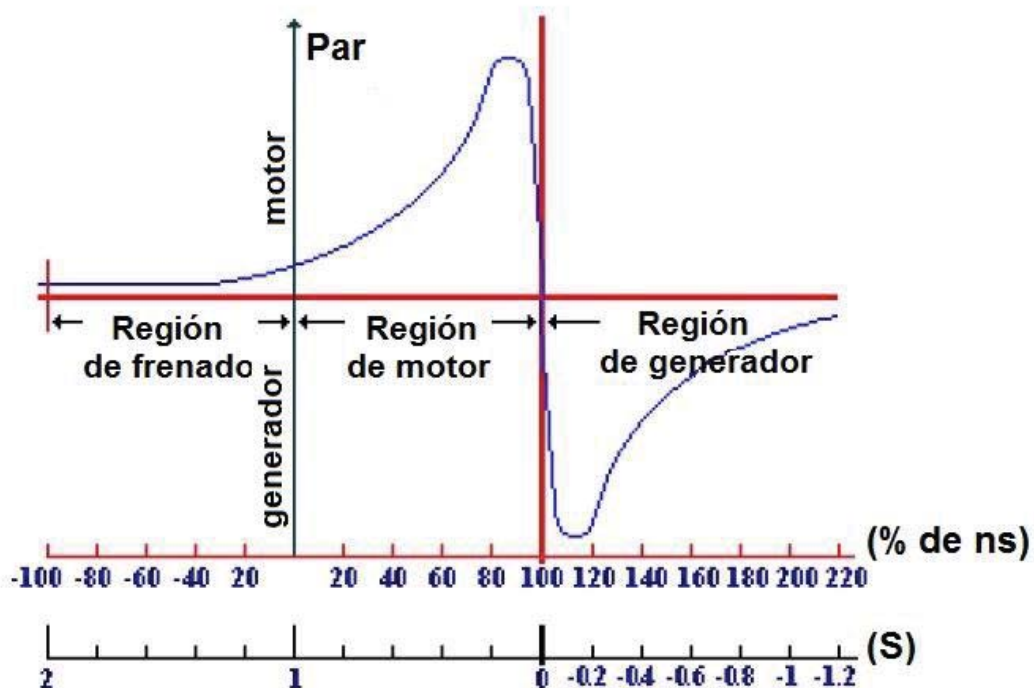


Figura 2-2: Curva característica par-velocidad del motor de inducción (fuente: <http://patricioconcha.ubb.cl>)

Tal como se muestra en la figura 2-2, existen tres regiones de operación las cuales son:

- Región de motor: La máquina se encuentra funcionando en modo motor cuando su deslizamiento esta entre 0 y 1, esto significa que el movimiento del campo es igual al del rotor, en el cual la velocidad del campo es mayor que la velocidad del rotor. Una vez que se alcanza el nivel de torque máximo, este se reduce con el aumento del deslizamiento debido a una reducción del flujo en el entrehierro.

- Región de frenado: En esta región la dirección del campo magnético giratorio es opuesta a la velocidad del rotor, para que suceda esto se intercambian dos fases del rotor produciendo un frenado rápido. El deslizamiento es mayor que 1.
- Región de generador: En esta región el deslizamiento es negativo, en el cual la velocidad del rotor es mayor que la velocidad de campo magnético giratorio, produciendo una inversión en la potencia, ahora desde el rotor a estator. Esta región se presenta generalmente con cargas con alta inercia.

2.2 Regeneración

Para comprender el proceso de regeneración, se estudia el motor de inducción actuando como generador de forma aislada, esto quiere decir sin conexión al variador de frecuencia, posteriormente se estudia el comportamiento funcionando con el variador de frecuencia SD 700. Ya que el variador de frecuencia SD700 no permite entregar la energía del frenado a la red, se presentan diferentes alternativas para solucionar este problema, dando a conocer el sistema utilizado para esta tesis, que es llamado rectificador frente activo.

2.2.1 Motor de inducción actuando como generador

Para que el motor pueda actuar como generador, se necesita que la velocidad del campo magnético giratorio sea menor que la velocidad del rotor, por lo cual como antes visto en la figura 2-2, este proceso sucede cuando existen deslizamientos negativos. En este caso, el sentido de rotación del flujo respecto al secundario de la maquina se invierte con relación al régimen del motor, lo que lleva consigo una inversión en el sentido de la f.e.m del rotor, que provoca a su vez una inversión en la corriente y en el par. En consecuencia el par desarrollado por la maquina asincrónica se convierte en par de frenado respecto al momento de rotación del motor primario. Al estar actuando como generador, el flujo de energía cambia, ya que el deslizamiento se hace negativo, ahora el flujo de energía va de rotor a estator. Para poder entender de mejor forma este comportamiento como generador, se da como ejemplo un motor de inducción acoplado desde el rotor por un motor diésel, quien proporcionara el movimiento del rotor.

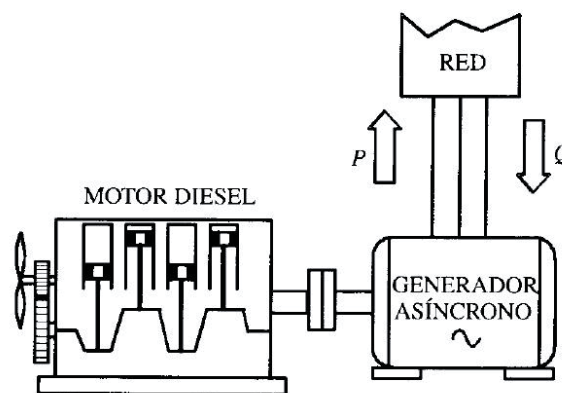


Figura 2-3: Motor a diésel impulsando a motor asíncrono (fuente : Maquinas electricas, Jesus Fraile Mora , Quinta edicion)

$$\text{Potencia mecánica interna : } P_{mi} = m1 \cdot r'2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1\right) \cdot (I2')^2 \quad (2-3)$$

$$\text{Potencia del entrehierro : } P_a = \left(\frac{P_{mi}}{1-s} - 1\right) \quad (2-4)$$

$$\text{Par electromagnético : } T = \left(\frac{P_a}{2\pi \cdot \frac{n1}{60}}\right) \quad (2-5)$$

Dado que el deslizamiento se hace negativo, la potencia mecánica interna también se torna negativa, por lo tanto la máquina absorbe potencia mecánica por el eje que es la suministrada por el motor diésel. Al tener una potencia mecánica interna negativa y reemplazada en la ecuación 2-4, nos queda una potencia del entrehierro negativa, por lo que el par electromagnético cambia de signo con respecto al comportamiento como motor, y en consecuencia el torque se torna negativo, transfiriendo energía de rotor a estator.

Para que la máquina de inducción pueda actuar como generador, necesita recibir desde la red potencia reactiva, como se muestra en la figura 2-3, esta potencia reactiva es necesaria para que la máquina de inducción, mantenga su campo magnético giratorio, ya que esta máquina no posee un circuito independiente de excitación, si no existiera un campo magnético giratorio, aunque el rotor gire, no se produciría transferencia de energía. La ventajas que presenta el generador de inducción es su sencillez, no necesita un circuito independiente para producir el campo magnético giratorio, además no necesita estar girando a la velocidad del sincronismo para regenerar, solo basta con su velocidad sea superior a la del sincronismo para que actúe como generador, mientras mayor sea el torque aplicado a su eje mayor será la potencia de salida en los terminales del estator.

En la figura 2.4 se resumen las conclusiones anteriores, señalando con flechas los sentidos de transferencia real de la energía. La máquina convierte energía mecánica en eléctrica. Cuando supere la velocidad de sincronismo, la máquina asincrónica se convertirá en generador, cediendo potencia activa al sistema eléctrica que se conecta.

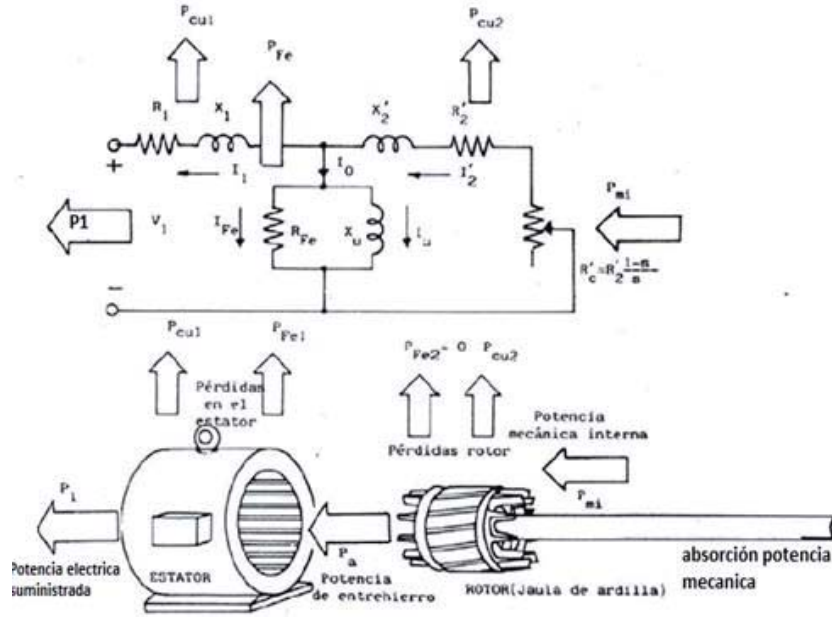


Figura 2-4: Circuito equivalente y balance de potencia en modo generador

2.2.2 Regeneración de energía con variador de frecuencia SD 700

En la figura 2-5 se muestra el variador de frecuencia SD 700 accionando un motor de inducción el cual está actuando como un motor.

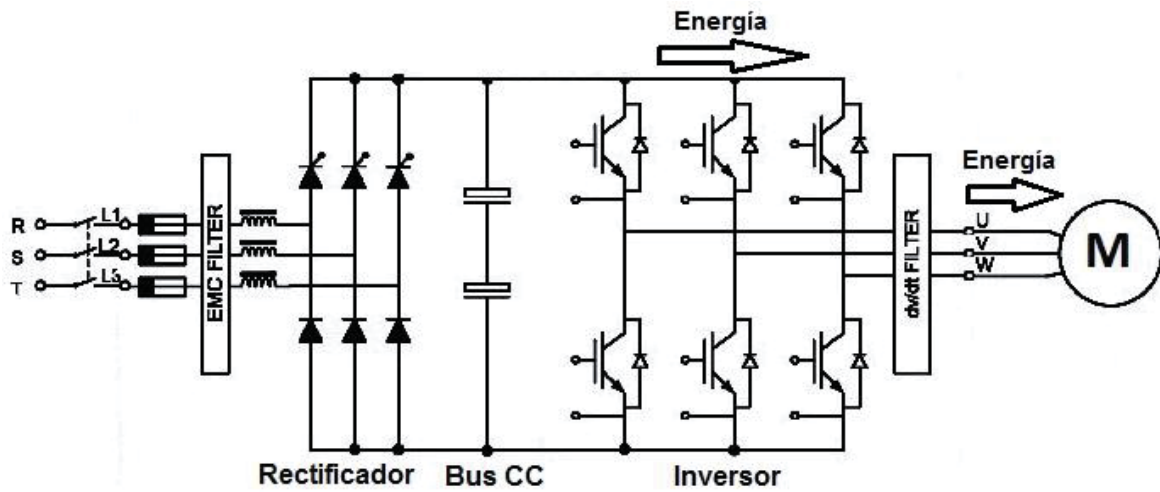


Figura 2-5: Variador SD 700 accionando motor de inducción

En el cual el flujo de energía proviene desde la red, pero para producir la regeneración de energía se tiene que producir ciertas condiciones como lo son:

- Cambios bruscos en la velocidad
- Rápida desaceleración
- Detenerse en un tiempo de rampa

Estos casos se pueden dar cuando se desea frenar el motor en un tiempo inferior al especificado, lo cual produce que el rotor siga su movimiento por la inercia propia de la carga, o cuando el motor actúa en contra de la gravedad como en el caso de grúas o elevadores.



Figura 2-6: El rotor sigue en movimiento por la inercia de la carga, produciendo la regeneración

Si se dan las condiciones antes mencionadas, se producirá la regeneración de energía como se muestra en la figura 2-7

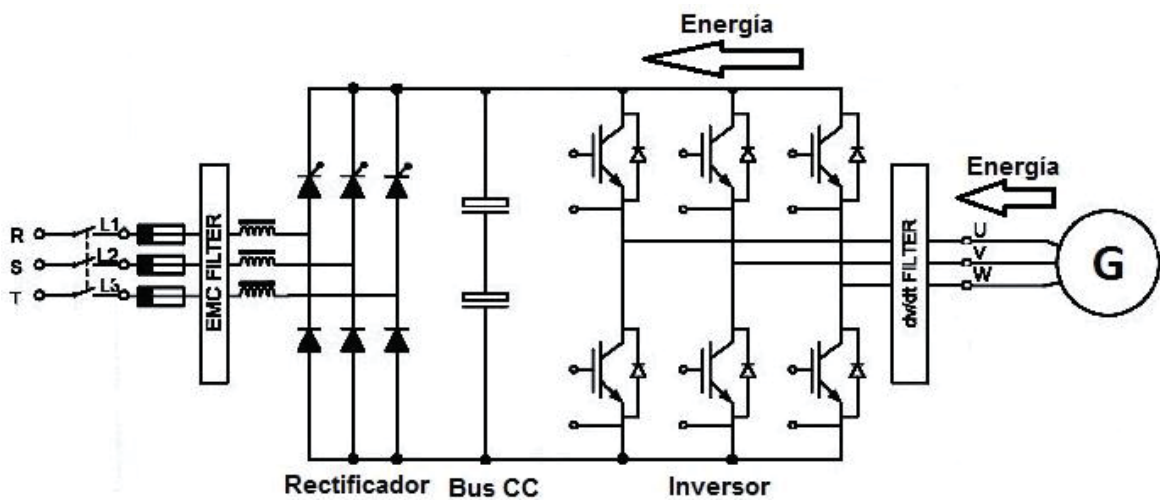


Figura 2-7: Máquina de inducción en modo motor

Esta energía proveniente del motor, es rectificadada por los diodos de circulación libre, que son lo que protegen a los IGBT cuando se produce la inversión de la corriente. Al ser rectificadada produce un aumento de tensión del bus DC, ya que al tener un puente rectificadador semicontrolado, no tiene la capacidad de poder entregar esa energía a la red, en consecuencia el condensador se carga hasta los 800 V , en el cual se produce la desconexión del motor de inducción, quedando libre.

2.2.3 Regeneración a la red con configuración de puentes rectificadores a tiristores

Como se mostró anteriormente en la figura 2-7, la composición del puente rectificadador a base de diodos y tiristores hace imposible la regeneración a la red, por lo cual el problema radica en poder cambiar el puente rectificadador por uno que pueda cumplir la tarea de rectificadad y entregar energía a la red. Para esto existen algunas opciones que se detallan a continuación.

Configuración antiparalela de puentes rectificadores a tiristores: El puente rectificadador semicontrolado, puede ser sustituido por dos rectificadores en antiparalelo, compuesto por tiristores, esta configuración permite procesar la energía entregada por el motor de inducción y entregarla a la red. Esté nuevo puente está formado por dos puentes de tiristores de 6 pulsos. El funcionamiento de este sistema es relativamente sencillo, el puente directo es el encargado de rectificadad la tensión entregada por la red , transformando de CA en CC , la cual es filtrada por el condensador y el puente inverso convierte la energía de CC a CA cuando se produce el frenado, entregando energía a la red.

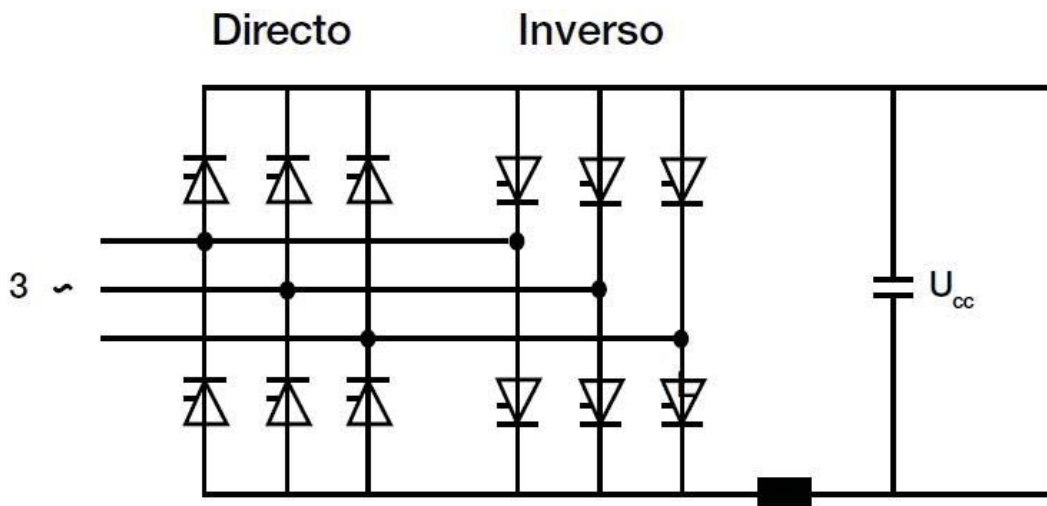


Figura 2-8: Diagrama lineal de una unidad de alimentación por tiristores antiparalela (fuente: <https://library.e.abb.com>)

En este circuito de puentes antiparalelo sólo funciona uno de los dos puentes mientras el otro permanece bloqueado. El ángulo de disparo de los tiristores es controlado constantemente para mantener una tensión en bus DC a un nivel deseado. La elección del puente directo e inverso y el control de la tensión en el bus DC, se basan en la determinación de la intensidad de alimentación, la tensión de la red y la tensión del bus DC.

Algunas de las ventajas de presenta este sistema son:

- Solución conocida
- Un costo menor que el que requeriría una solución a base de IGBT
- La tensión del bus DC se puede regular a un valor inferior que el de la red, lo cual se puede ser ventajoso en ciertas aplicaciones

Las desventajas que presenta son:

- La tensión de bus de CC siempre es inferior a la tensión de alimentación de CA para mantener un margen de conmutación. De este modo, la tensión alimentada al motor es más baja que la CA de entrada. Sin embargo, esto se puede solucionar utilizando un autotransformador elevador en la alimentación.
- Si la CA de alimentación desaparece se corre el riesgo de que se fundan los fusibles debido al fallo de conmutación de los tiristores.
- $\cos\phi$ varía con la carga.
- La distorsión armónica total es más alta que en las unidades IGBT regenerativas.

2.2.4 Regeneracion a la red con puente IGBT

Otras de las opciones que existen para poder utilizar la energía entregada por el motor de inducción y entregarla a la red, es la configuración con puente IGBT y con la cual se trabajara en esta tesis. Los variadores de frecuencia con frenado regenerativo, se basan en la tecnología “Active Fron End” (AFE) que significa unidad frontal activa, que sustituye el clásico puente rectificador semicontrolado, por un puente controlado a base de IGBT. Esta tecnología controla el flujo bidireccional de potencia, habilita la regeneración de energía a la red, controla el factor de desplazamiento y aumenta la tolerancia frente a caídas de tensión a la entrada.



Figura 2-9: Variador de frecuencia SD700FR con frenado regenerativo (fuente: <http://power-electronics.com>)

El circuito del inversor con frenado regenerativo en el cual nos basaremos, para poder adecuar el actual variador de frecuencia SD700, es el SD700FR de la misma familia de variadores de Power Electronics.

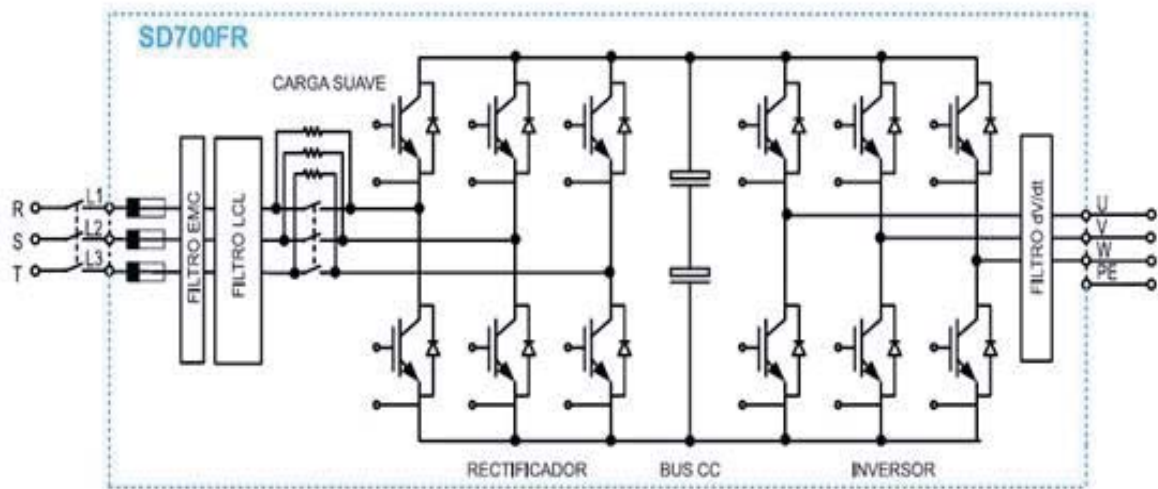


Figura 2-10: Variador de frecuencia SD700FR (fuente: : <http://power-electronics.com>)

Este variador de frecuencia SD700fr con tecnología active front active (AFE), sustituye el puente rectificador semicontrolado por un puente a base de IGBT, para así poder generar en la entrada una onda de corriente casi sinusoidal. La tecnología AFE reduce el THDi de forma eficiente, también ajusta el factor de desplazamiento a 1 y se mantiene bajo cualquier condición de carga.



Figura 2-11: Formas de onda de tensión y corriente, con distintos rectificadores (fuente: : <http://power-electronics.com>)

2.2.5 Objetivos del sistema de unidad frontal activa (AFE)

En las unidades de regeneración IGBT existen tres objetivos de regulación generales.

- El primer objetivo consiste en mantener un nivel de tensión en el bus DC estable, independiente del flujo de la potencia, de esta forma nos aseguramos que el inversor que alimenta a los motores de corriente alterna, puedan funcionar correctamente independiente el punto de funcionamiento gracias a una tensión en el bus DC estable. Para mantener un bus DC estable , se regula el ángulo de potencia entre los dos sistema de CA

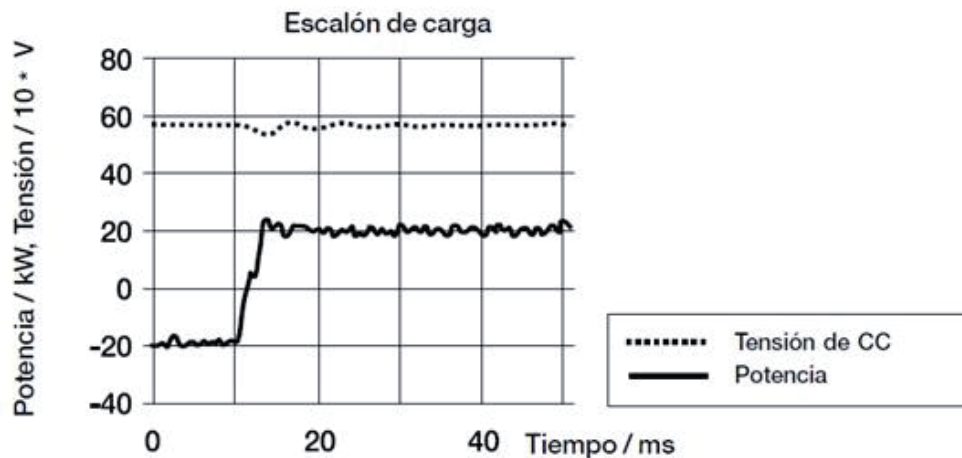


Figura 2-12: Tensión en el bus DC y potencia (fuente: <https://library.e.abb.com>)

- El segundo objetivo de regulación consiste en minimizar la intensidad de alimentación necesaria, para conseguir esto se varia la tensión de salida del puente a base de IGBT. En algunas aplicaciones se desea que el variador funcione como carga inductiva o capacitiva.
- El tercer objetivo de regulación es minimizar el contenido armónico de la intensidad de alimentación

2.2.6 Principio de operación de la unidad frontal activa (AFE)

La regeneración de energía con puente IGBT, se centra en los mismos principios que la transmisión de energía en una red de distribución de energía. En el cual se conectan entre si varios generadores y puntos de carga, se puede suponer que el punto de conexión la red, es un gran generador síncrono con frecuencia fija, en el cual el sistema IGBT es otro sistema de CA que está conectado mediante una reactancia al generador.

Para una tensión en el bus DC constante, los IGBT en el convertidor del lado de la red se conectan para producir tensiones PWM de tres fases en a, b y c en la entrada de los terminales. Cuando el bus CC cae por debajo del valor de referencia, los diodos que protegen a los IGBT, llevan al condensador corrientes que lo cargan, por lo tanto el bus CC vuelve al valor de referencia.

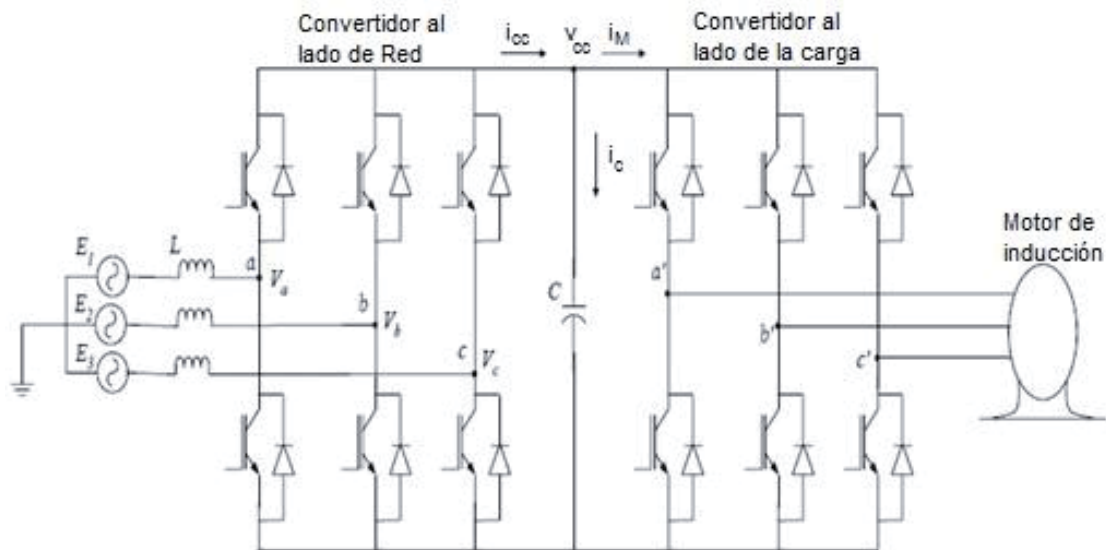


Figura 2-13: Circuito red-variador-motor

Para poder comprender de mejor forma el principio de regeneración a la red, se usa un circuito equivalente por fase del PWM de tensión producido por el convertidor de lado de la red, conectado mediante una impedancia a la red. Donde E_s es la tensión de la red, L representa la utilidad del sistema y las tensiones producidas por el convertidor del lado de la red con la letra V . Las ondas de tensión PWM producido por el convertidor del lado de la red, es construido mediante la tensión del bus CC. La magnitud y fase de la componente fundamental de V es controlado por el convertidor del lado de la red. El V_L de tensión, es $I_s \omega L$, donde ω es la frecuencia angular de la tensión de la red.

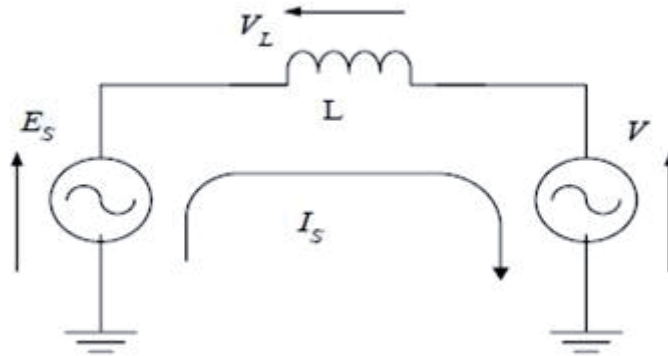


Figura 2-14: circuito equivalente monofásico red-convertidor lado red

Como se ilustra en la figura 2-15, para la operación de factor de desplazamiento unitario en el modo de rectificador del convertidor del lado de línea, el voltaje PWM V tiene que ser mayor que la tensión de alimentación (fasor E_s) en magnitud y en el cual forman un ángulo δ . Esto hace que E_s y la corriente de línea forme un ángulo ϕ de 0° . El δ se denomina ángulo de potencia, ya que controla el flujo de potencia entre las dos fuentes. El funcionamiento en modo regenerativo del convertidor del lado de red se muestra en la Figura 2-16. El fasor de corriente I_s ahora se invierte, causando reversión de $I_s \omega L$ fasor que es la caída de tensión en V_L . En la figura 2-17 se muestra el diagrama en modo motor a diferentes factores de desplazamiento, se aprecia que el ángulo de potencia va cambiando según la posición del vector V . La potencia activa P y la potencia reactiva Q , están dadas por las siguientes expresiones:

$$P = 3 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \cos \phi \quad (2-6)$$

$$Q = 3 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \sin \phi \quad (2-7)$$

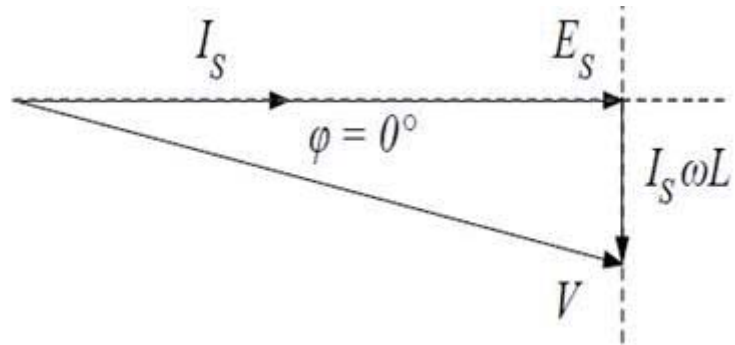


Figura 2-15: Factor de desplazamiento unitario funcionando como rectificador

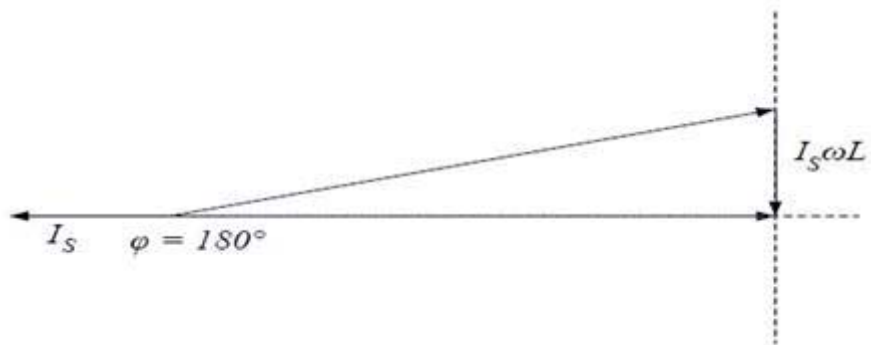


Figura 2-16: Factor de desplazamiento unitario en modo regenerativo

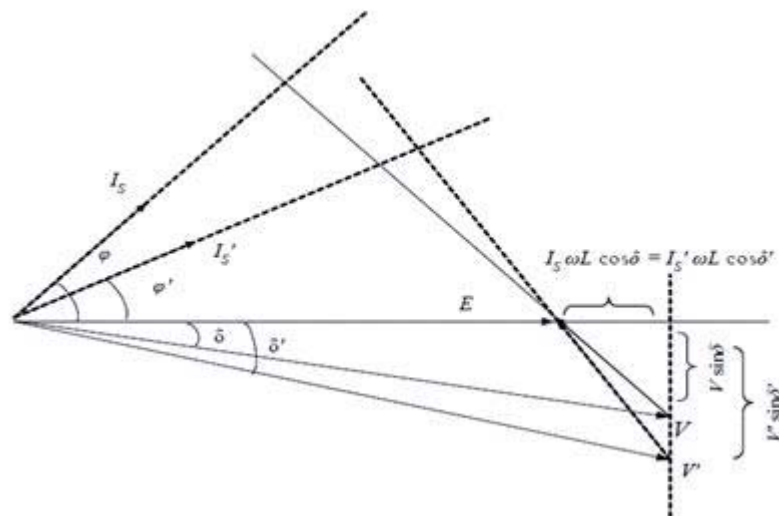


Figura 2-17: Funcionamiento en modo motor, con variación del ángulo de potencia

Las expresiones de potencia (2-6) y (2-7) , las podemos reescribir en términos de la tensión de la red, tensión producida por el convertidor del lado de la red y el ángulo de potencia.

De la figura 2-17 podemos obtener las siguientes expresiones.

$$I_s \cdot \omega \cdot L \cdot \cos \phi = V \cdot \sin \delta \quad (2-8)$$

$$I_s \cdot \omega \cdot L \cdot \sin \phi = V \cdot \cos \delta \quad (2-9)$$

Sustituyendo los valores de $I_s \cos \phi$ y de $I_s \sin \phi$ en las ecuaciones (2-6) y (2-7), obtenemos las ecuaciones 2-10 y 2-11, que indican que mediante la tensión creada por el convertido del lado de la red y el ángulo δ , se puede controlar la potencia activa y reactiva

$$P = \frac{3 \cdot E_s \cdot V \cdot \sin \delta}{\omega L} \quad (2-10)$$

$$Q = 3 \cdot E_s \left(\frac{V \cos \delta - E_s}{\omega l} \right) \quad (2-11)$$

2.2.7 Ventajas y desventajas de un rectificador frente activo

Las principales ventajas de una unidad de regeneración IGBT son:

- Pocos armónicos en la alimentación, tanto en el funcionamiento como motor o generador
- Rápida dinámica durante los cambios rápidos del flujo de potencia en la carga
- Posee la capacidad de elevar la tensión en el bus DC a niveles mayores que los que entrega la red, lo que puede usarse para compensar una red débil
- Posibilidad de regular el factor de potencia
- La tensión en el bus DC se mantiene constante durante el frenado.

Las desventajas que posee la unidad de regeneración IGBT son:

- Mayor costo en la compra de un variador con frenado regenerativo
- No se dispone de la capacidad de frenar durante fallos momentáneos en la red
- Armónicos en alta frecuencia debido a la frecuencia de conmutación que presentan los IGBT.

3 Control escalar y vectorial

En este capítulo se darán a conocer herramientas fundamentales, que servirán como ayuda al momento de realizar ensayos en laboratorio y posterior simulación. Se comienza con el estudio del cálculo de los parámetros del motor de inducción, ya que no se dispone de la ficha técnica de este motor, posteriormente se dará a conocer el control escalar que es el utilizado por el variador de frecuencia SD 700 y se finaliza con el control vectorial que es utilizado para el reacondicionamiento del variador SD 700 con el objetivo de entregar energía a la red.

3.1 Ensayos de rotor bloqueado y rotor libre

Para la presente tesis se utilizara un motor de inducción de 30 HP, 4 polos, 50Hz a 380 V. Estos son los datos que tenemos con respecto al motor a utilizar, al no tener la ficha técnica del motor de inducción se procede con el estudio de la obtención de los parámetros de esta máquina, todo esto con el fin de poder simularlo en ambiente Simulink, para ello se presenta el método de cómo obtener estos resultados, y en el capítulo 4 se pondrá en práctica los ensayos estudiados en este capítulo.

3.1.1 Ensayo rotor bloqueado

Para realizar este ensayo, se bloquea el rotor de la máquina, de tal forma que la velocidad del rotor sea igual a 0 y en consecuencia tendremos un deslizamiento igual a 1, por lo tanto no existe transformación de energía eléctrica a mecánica. Estando el rotor bloqueado se aplica gradualmente una tensión en los terminales, hasta llegar a una corriente nominal en el estator.

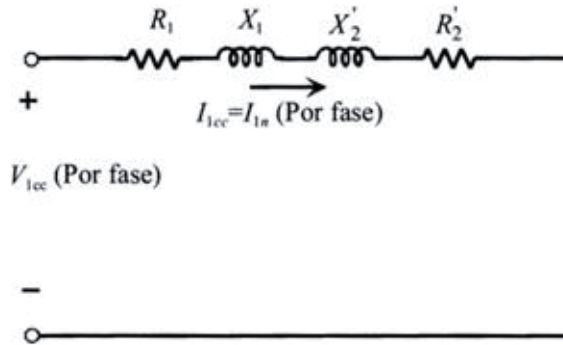


Figura 3-1: Circuito equivalente por fase de rotor bloqueado

Donde V_{1cc} es la tensión de cortocircuito, aplicada a los terminales del estator e $I_{1cc}=I_{1n}$ es la corriente nominal en el estator.

Para obtener las reactancia de dispersión y resistencia en el rotor y estator

$$R_t = \frac{V_{1cc} \cdot \cos \alpha}{I_{1n}} \quad (3-1)$$

$$X_t = \frac{V_{1cc} \cdot \sin \alpha}{I_{1n}} \quad (3-2)$$

Siendo R_t y X_t , las impedancias de línea totales y el ángulo entre V_{1cc} y I_{1n} el ángulo α° .

3.1.2 Ensayo rotor libre

Se deja girar el rotor sin carga mecánica acoplada a su eje. Al estar girando el rotor sin carga, alcanza una velocidad de giro cercana a la del sincronismo, por lo que su deslizamiento es prácticamente 0, y en consecuencia su resistencia de carga aumenta hasta hacerse mayor que la resistencia del núcleo.

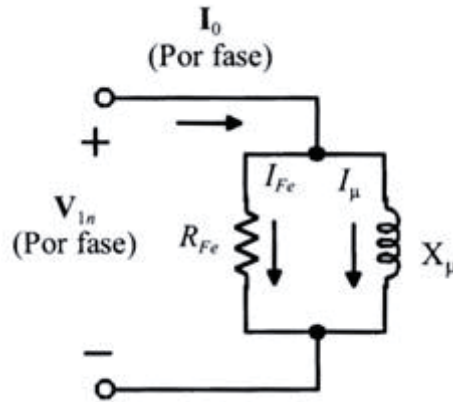


Figura 3-2: Circuito equivalente por fase de rotor libre

Donde V_{1n} es el voltaje nominal aplicado a los terminales del estator e I_0 la corriente de rotor libre que circula por el estator.

Para calcular la resistencia en el hierro y la reactancia magnetizante, se utilizan las ecuaciones (3-3) y (3-4).

$$R_{fe} = \left(\frac{V_{1n}}{I_0 \cdot \cos \lambda} \right) \quad (3-3)$$

$$X_u = \left(\frac{V_{1n}}{I_0 \cdot \sin \lambda} \right) \quad (3-4)$$

Donde el ángulo entre V_{1n} y I_0 es α° .

3.2 Control escalar

El variador de frecuencia SD 700 que accionara el motor de inducción, está usando el control escalar o llamado control voltaje –frecuencia para accionar al motor de inducción, es por ello que el estudio de este control se hace esencial para poder desarrollar las simulaciones de los ensayos que se realizaran en laboratorio, para ello debemos conocer el comportamiento del motor de inducción a diferentes frecuencias.

Hasta la llegada de los controladores de estado sólido, los motores de inducción no eran máquinas que fueran ampliamente utilizadas, ya que no se podía obtener un control exacto en la velocidad. El rango de operación nominal que tiene la máquina de inducción, es de menos el 5% del deslizamiento y el cambio en la velocidad es más o menos directamente proporcional a la carga sobre el eje del rotor. Si el deslizamiento fuera mayor, las pérdidas en el rotor aumentarían ya que están ligadas directamente con el deslizamiento del motor.

El control escalar lo que hace es aumentar o disminuir el voltaje y frecuencia, conjuntamente en los terminales del motor (estator), si este proceso no se cumple se satura el acero del núcleo del

motor de inducción, por lo cual fluirán corrientes de magnetización de gran intensidad. Cuando se alimenta la máquina de inducción con una fuente sinusoidal trifásica, se induce un flujo magnético que gira a la velocidad síncrona es decir a la frecuencia a la que se está alimentando. El flujo induce en el estator una tensión que tiene la siguiente expresión.

$$4,44 \cdot \phi \cdot Ee = fs \cdot Ne \tag{3-5}$$

Donde Ee es el voltaje inducido en estator, fs la frecuencia de las corrientes en el estator, Ne el número de vueltas de los enrollados y φ el flujo en el entrehierro. Al despreciar la caída de tensión en las bobinas del estator, se tiene que el voltaje inducido deber ser igual al aplicado (Ve), por lo tanto se desprende que el flujo en el núcleo del motor es:

$$\phi = \frac{Ve}{4,44 \cdot fs \cdot Ne} = K \cdot \frac{Ve}{fs} \tag{3-6}$$

La expresión de flujo de la ecuación (3-6), indica que la frecuencia del estator se encuentra en el denominador, entonces si la frecuencia disminuye y la tensión en el estator permanece constante, se produciría un incremento en el flujo del núcleo y un incremento de la corriente de magnetización. Si la tensión y frecuencia aplicada a los terminales del estator, varía linealmente, el flujo en el núcleo del motor permanecería constante evitando su saturación.

La figura 3-3 muestra la familia de curvas características de par-velocidad del motor de inducción, para velocidades menores a la nominal, la tensión varía linealmente en con la frecuencia de alimentación. Al aplicar frecuencia superiores a la nominal, la tensión en los terminales permanece constante en el valor nominal, cuanto mayor sea la frecuencia aplicada al estator menor será el flujo, puesto que la frecuencia se encuentra en el denominador. Al disminuir el flujo a frecuencias superiores a la nominal decae el torque producido por la máquina. En la figura 3-4 se muestra como se mantiene el flujo a velocidad menores a la nominal y disminuyendo a velocidades superiores a la nominal.

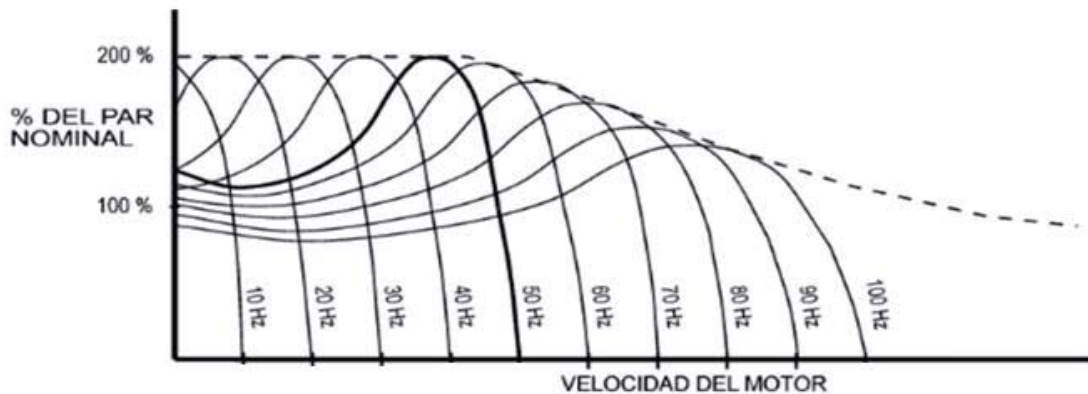


Figura 3-3: Familia de curvas par-velocidad, a distintas frecuencias

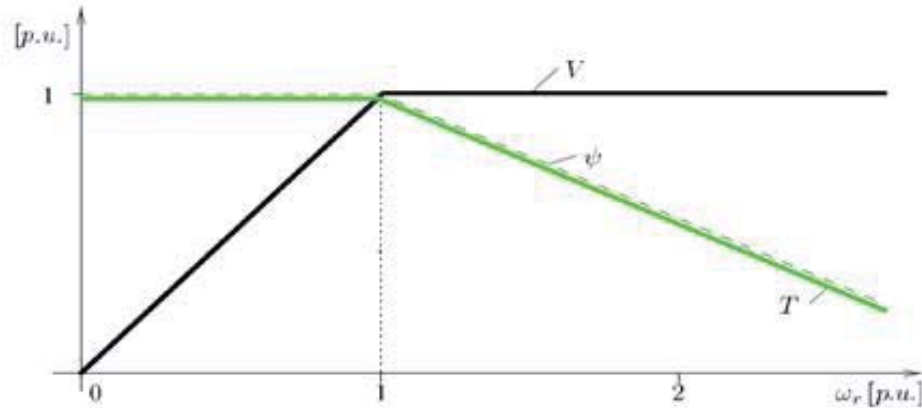


Figura 3-4: Curva V/f y flujo

3.2.1 Esquema del control escalar

En la figura 3-5 se muestra el esquema básico de un sistema de control escalar en lazo abierto, el cual es utilizado por el variador de frecuencia SD 700, ya que no posee una retroalimentación. En la práctica este sistema de control generalmente se implementa utilizando una curva V/f, la cual entrega la relación necesaria entre el voltaje y la frecuencia de entrada para mantener el flujo constante. Esta curva posee una compensación de voltaje para bajas frecuencias debido a que la caída de tensión, en la resistencia de los devanados del estator, ya no es despreciable frente a la caída en la inductancia de estos devanados. A esta compensación se le denomina compensación I·R y es necesaria para mantener el flujo constante en bajas velocidades.

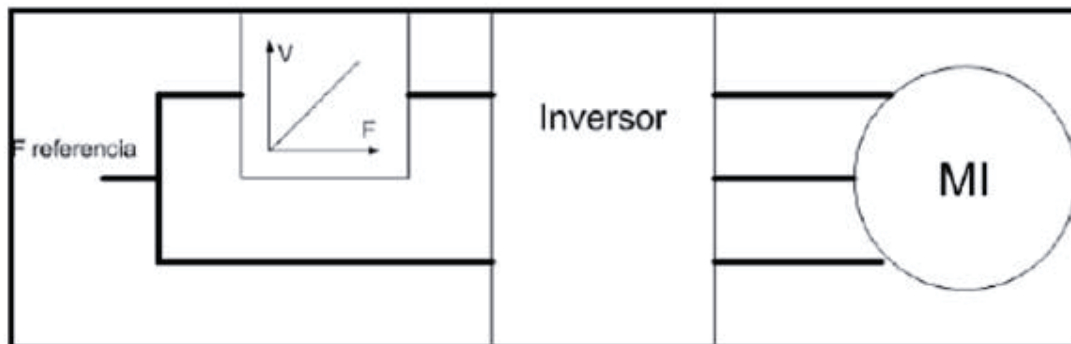


Figura 3-5: Esquema control escalar en lazo abierto

Si se desea un sistema de control de velocidad más preciso se debe realimentar la velocidad. En la figura 3-6 se muestra un sistema de control de velocidad realimentado, y controlado por frecuencia de deslizamiento. Donde la señal de velocidad del motor es restada de una referencia produciéndose así un error proporcional a la frecuencia de deslizamiento de la máquina. El controlador PI procesa este error intentando anularlo, es decir intenta hacer el deslizamiento igual a cero aumentando la frecuencia de operación de la máquina. Claro está que el

deslizamiento de la máquina nunca llega a cero, pero el error entre la referencia y la velocidad del motor sí.

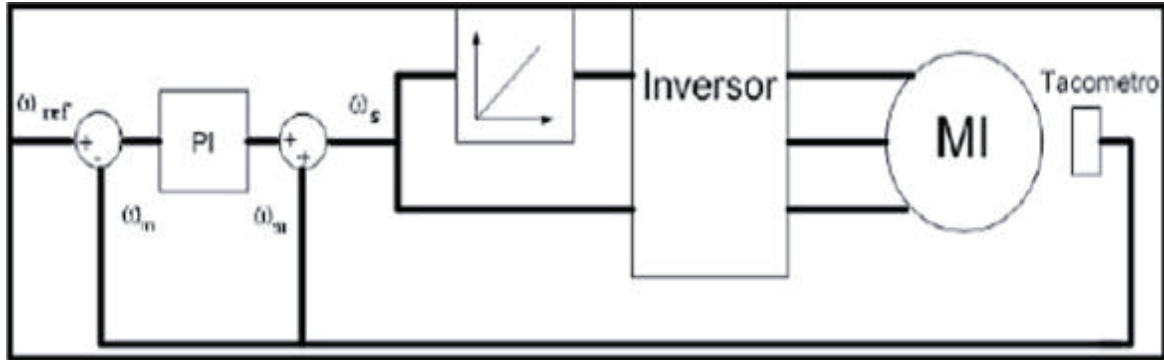


Figura 3-6: Esquema control escalar en lazo cerrado

3.3 Control vectorial

La imagen muestra el circuito desde la red hasta el motor de inducción. El convertidor del lado de la carga es accionado mediante el control escalar, que es con el cual el variador SD 700 presente en la universidad está funcionando, por el cual los ensayos en laboratorio y posterior simulación se harán con este control, posteriormente se reacondicionara el variador de frecuencia SD 700 solo en simulación, esto constara en sustituir el rectificador semicontrolado por uno a base de IGBT, este convertidor del lado de la red será accionado mediante control vectorial el cual tomara la energía proveniente de la carga, debido a su inercia y será procesada para ser regenerada a la red.

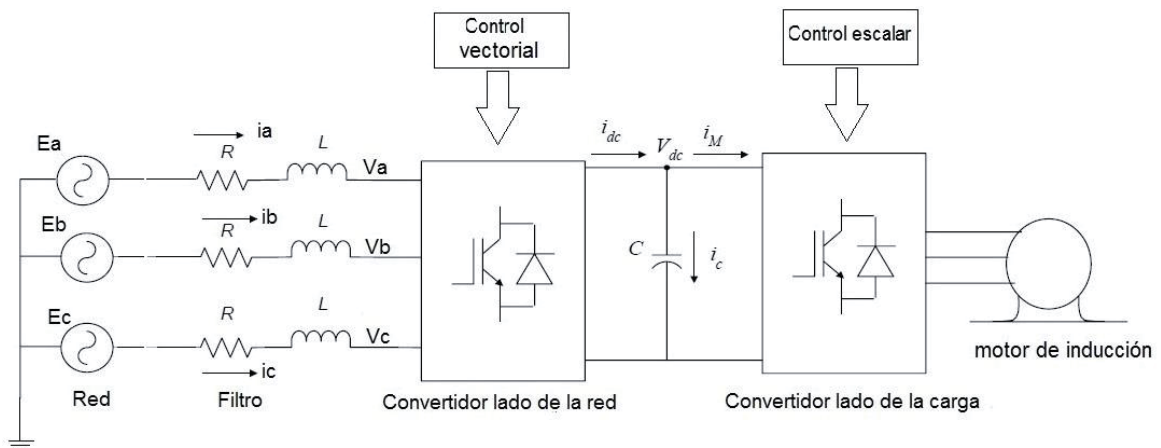


Figura 3-7: Circuito completo SD 700 reacondicionado desde la red a la carga

3.3.1 Principio de funcionamiento

Para que se produzca transferencia de energía entre dos los sistemas, se tienen que dar las siguientes situaciones. El flujo de potencia activa se da cuando existe un desfase entre las dos fuentes de voltaje, si el ángulo del tensión generado por el convertidor del lado de la red va en adelanto con respecto a la tensión de la red se dice que el convertidor entrega a la red energía activa o que el condensador está entregando energía a la parte alterna , en caso contrario si el ángulo del voltaje generado por el convertidor está en atraso con respecto a la red, se dice que la red proporciona energía activa al convertidor o visto de otro modo está funcionando en modo motor. Para el flujo de energía reactiva se necesita que uno de las dos fuentes tenga un amplitud distinta, si la amplitud de la red es mayor que la amplitud de los voltajes generador por el inversor del lado de la red, el inversor genera potencia activa capacitiva en caso contrario absorbe potencia activa inductiva.

3.3.2 Transformada de Park

La transformada de Park permite tratar a los elementos que depende de la velocidad angular como elementos estáticos. Para poder transformar un sistema trifásico rotatorio se hace la transformación al sistema de dos ejes estacionario ps qs , mediante la matriz c1 , este nuevo sistema tiene una respuesta muy lenta ya que los componentes involucrado son variables en el tiempo ,para ello se hace la transformada de Park con la matriz c2, si la velocidad de rotación es el mismo que el de la frecuencia angular de los parámetros variables en el tiempo , estos se convierten en cantidades invariantes, por lo tanto ahora el sistema puede ser suficientemente rápido.

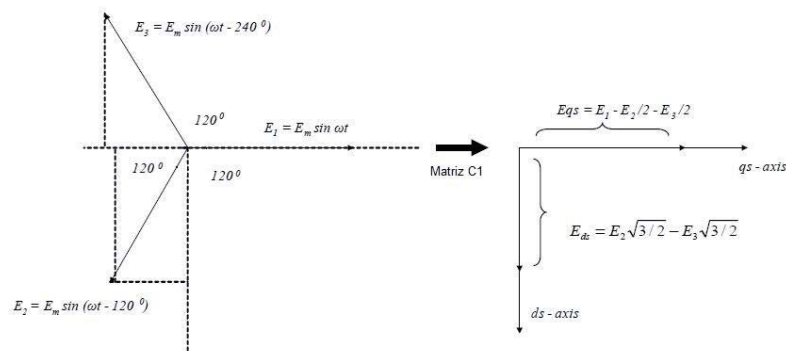


Figura 3-8: Transformación de un sistema trifásico a un nuevo marco de referencia de dos fases estático

Esta matriz C1, lo que hace es llevar un sistema de tres fases variante en el tiempo a un sistema equivalente de dos fases, a esta matriz se le conoce como la teoría d-q, tener en cuenta que los parámetros de ecuaciones Eqs y Eds son todavía variables en el tiempo. Para que este nuevo

marco de referencia E_q y E_d ya no sea variable en el tiempo, se hace rotar a la velocidad angular de los parámetros variables en el tiempo, con la matriz $C2$ o transformada de Park.

$$c1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

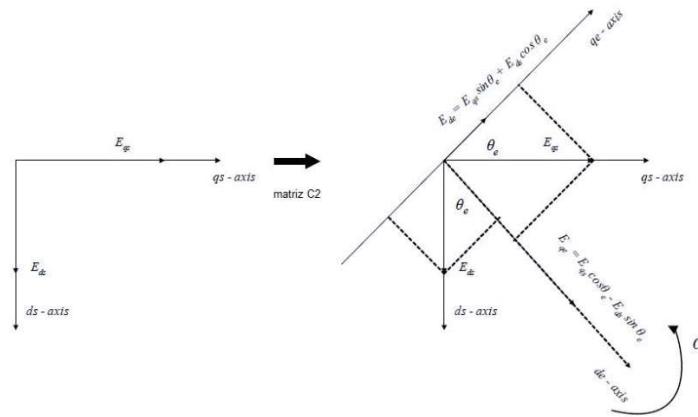


Figura 3-9: Marco de referencia estacionario a uno rotatorio mediante la transformada de Park

$$c2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

3.3.3 Obtención de las ecuaciones dinámicas del sistema

El modelo del sistema se obtiene mediante la rotación teórica de los marcos d-q. Las corrientes de línea se descomponen en componentes I_{qe} y I_{de} . La componente I_{qe} es utilizada para controlar el poder reactivo y la componente I_{de} se utiliza para controlar el voltaje del bus de corriente continua y también para suministrar potencia activa al motor.

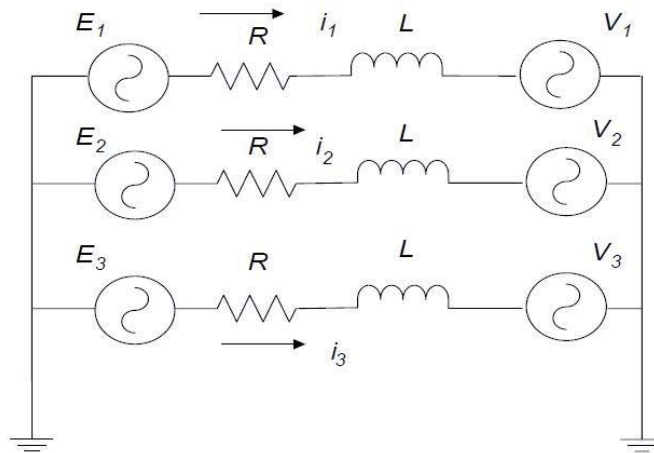


Figura 3-10: Circuito equivalente tensión red-filtro-tensión PWM

Mediante el circuito de la figura 3-9 podemos obtener las ecuaciones dinámicas del sistema

$$E1 = L \cdot \frac{di1}{dt} + R \cdot i1 + V1 \quad (3-9)$$

$$E2 = L \cdot \frac{di2}{dt} + R \cdot i2 + V2 \quad (3-10)$$

$$E3 = L \cdot \frac{di3}{dt} + R \cdot i3 + V3 \quad (3-11)$$

Para poder llevar estas ecuaciones a un marco giratorio, se aplican las matrices C1 y C2. Para ello se reescriben las ecuaciones anteriores en forma matricial

$$\begin{bmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

A continuación se hace la transformación a un marco de referencia estático qs y ds

$$c1 \begin{bmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \left(c1 \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} \right) + Rc1 \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} + c1 \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$$\begin{bmatrix} Eqs \\ Eds \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} iqs \\ ids \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} iqs \\ ids \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} vqs \\ vds \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

Después de obtener es las ecuaciones en un marco estático qs y ds, se aplica la matriz de Park, para poder llevar a este sistema a la velocidad del sincronismo.

$$c2 \cdot \begin{bmatrix} Eqs \\ Eds \end{bmatrix} = c2 \cdot L \frac{d}{dt} \left(c2^{-1} \begin{bmatrix} iqs \\ ids \end{bmatrix} \right) + R \cdot c2 \cdot \begin{bmatrix} iqs \\ ids \end{bmatrix} + c2 \cdot \begin{bmatrix} vqs \\ vds \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

$$Eqe = L \frac{diqe}{dt} + \omega \cdot L \cdot ide + R \cdot iqe + vqe \quad (3-16)$$

$$Ede = L \frac{dide}{dt} - \omega \cdot L \cdot iqe + R \cdot ide + vde \quad (3-17)$$

Reordenando las ecuaciones, finalmente tenemos Vqe y Vde que serán los voltajes que tendremos a la salida del inversor. Donde Uq y Ud son las caídas de tensión en la rama de acoplamiento.

$$Vqe = Eqe - \omega \cdot L \cdot ide - uq \quad (3-18)$$

$$Vde = Ede - \omega \cdot L \cdot iqe - ud \quad (3-19)$$

4 Simulación y ensayos experimentales

En este capítulo se realizarán los ensayos, para conocer los parámetros del motor de inducción, el uso del variador de frecuencia SD 700 accionando un motor de inducción de 30 HP y cómo se comporta ante la regeneración, además se modificará el circuito del SD 700 por uno que tenga la capacidad de poder regenerar la energía del frenado a la red. Después de realizar cada ensayo se procederá a su simulación en ambiente Simulink.

4.1 Ensayo rotor bloqueado y rotor libre en laboratorio

El motor de inducción para realizar estos ensayos, presenta una potencia nominal de 30 HP a 380 [V], dispone de 4 polos y funciona a una frecuencia nominal de 50 Hz, se desconoce los parámetros de esta máquina, por lo cual se procederá a realizar los ensayos de rotor bloqueado y rotor libre.

4.1.1 Ensayo rotor bloqueado y cálculo de parámetros

Para poder obtener los parámetros de la rama serie se bloquea el rotor y se energiza con un voltaje que se va regulando hasta llegar a una corriente nominal en el estator ($I_n=39$ [A]), en el ensayo realizado se llegó a una corriente 26,579 [A] ya que no se pudo exceder porque las protecciones de la fuente regulable era menor que la corriente nominal, pero con los valores obtenidos nos arrojan valores bastante cercanos a los que se obtendrían llegando a la I_n .

Tabla 4-1: Resultados ensayos rotor bloqueado

Fase	Vcc	Icc	P	F.P
R	44.769	26.579	502.6	0.43
S	44.807	26.56	519.3	0.43
T	44.693	26.491	507	0.44

Con los resultados obtenidos, podemos calcular la rama en serie del motor de inducción, las ecuaciones que utilizaremos son 3-1 y 3-2. Tomando los valores de la fase R se procede al cálculo:

Se tiene un voltaje en cortocircuito de 44,77[V], una corriente en cortocircuito de 26.58 [A], una potencia de 502.6 [watt] y un factor de potencia de 0.43

$$R_t = \frac{V_{cc} \cdot \cos \alpha}{I_{cc}} = \frac{44.77[v] \cdot 0.43}{26.58[A]} = 0.7243[\Omega] \quad (4-1)$$

$$\frac{R_t}{2} = R_1 = R_2' = 0.36215[\Omega] \quad (4-2)$$

$$X_t = \frac{V_{cc} \cdot \sin \alpha}{I_{cc}} = \frac{44.77[v] \cdot \sin 0.43}{26.58[A]} = 1.52489[\Omega] \quad (4-3)$$

$$\frac{X_t}{2} = X_1 = X_2' = 0.76035[\Omega] \quad (4-4)$$

$$X_1 = X_2' = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot L \quad (4-5)$$

$$L_1 = L_2' = 2,420278m[H] \quad (4-6)$$

4.1.2 Ensayo rotor libre y cálculo de parámetros

Para el ensayo de rotor libre, se accionó la máquina de corriente continua hasta llegar a la velocidad del sincronismo del motor de inducción (1500 rpm), se realizó de esta forma ya que como se muestra en la figura 4-1 el motor de inducción tiene acoplado en su eje un motor de corriente continua el cual producía un efecto de carga impidiendo poder llegar a una velocidad del sincronismo. Al accionar la maquina CC a la velocidad de sincronismo, se evitó pasar por el transitorio de la máquina de inducción, la cual produce corriente tres veces la nominal, luego de haber llegado a los 1500 rpm se accionó el motor de inducción conectándolo a un voltaje de línea 380 V a 50 Hz (fuente de tensión variable EIE), las mediciones se realizaron con el equipo Samte, que es el encargado de registrar los voltajes y corrientes, en los diferentes ensayos.



Figura 4-1: Motor de inducción (blanco) acoplado desde su eje a una máquina de CC



Figura 4-2: A los extremos se muestran dos fuentes de tensión regulable, la de la izquierda acciona al motor de inducción y en el de la derecha acciona el motor de CC, en el centro se encuentra el equipo Samte

Los resultados de las mediciones de rotor libre son:

Tabla 4-2: Ensayos rotor libre

Fase	V1n	I0	P	F.P
R	223.7	10.39	69.6	0.02
S	222.0	9.280	101.9	0.04
T	222.5	9.749	133	0.07

Para el cálculo de los parámetros, se tomó la fase R.

Con lo cual podemos calcular la resistencia en el hierro con la ecuación 3-3

$$R_{fe} = \frac{V1n}{I0 \cdot \cos \lambda} = \frac{223.7[v]}{10.39[A] \cdot 0.02} = 1073[\Omega] \quad (4-7)$$

El cálculo de la inductancia magnetizante se hace con la ecuación 3-4

$$X_u = \frac{V1n}{I0 \cdot \sin \lambda} = \frac{223.7}{10.39 \cdot \sin 88.85} = 21.5367[\Omega] \quad (4-8)$$

$$X_u = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_\mu = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot L_\mu \quad (4-9)$$

$$L_u = 68.5535m[H] \quad (4-10)$$

4.1.3 Simulación del motor de inducción en ambiente Simulink

Al obtener los parámetros de la máquina, se procede a realizar la simulación del motor de inducción conectado a una red trifásica con una tensión de línea 380 V a 50 Hz todo esto se realizará en ambiente Simulink, que ofrece un entorno de programación visual que funciona sobre el programa de cálculo Matlab. Para realizar la simulación se ingresan los parámetros en un modelo de máquina de inducción que ofrece Simulink

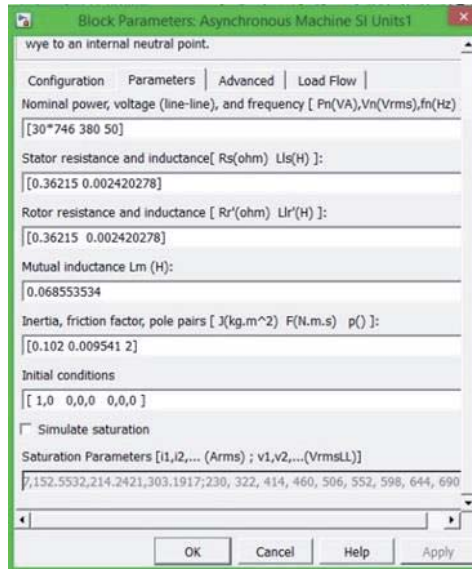


Figura 4-3: Bloque de parámetros de la máquina de inducción

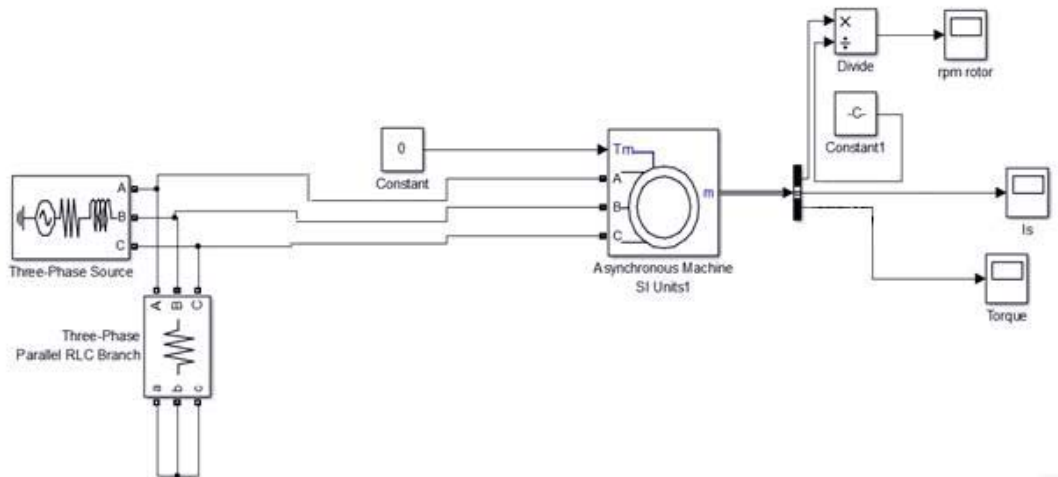


Figura 4-4: Simulación en ambiente Simulink red-motor de inducción

En la figura 4-4 se muestra la simulación de la máquina de inducción conectada a una tensión de línea de 380 [V] a 50 [Hz], el propósito de esta simulación es comprobar los resultados, antes obtenidos en laboratorio, para ello se correrá la simulación con torque cero, para comprobar los valores obtenidos cuando la maquina funciona como rotor libre.

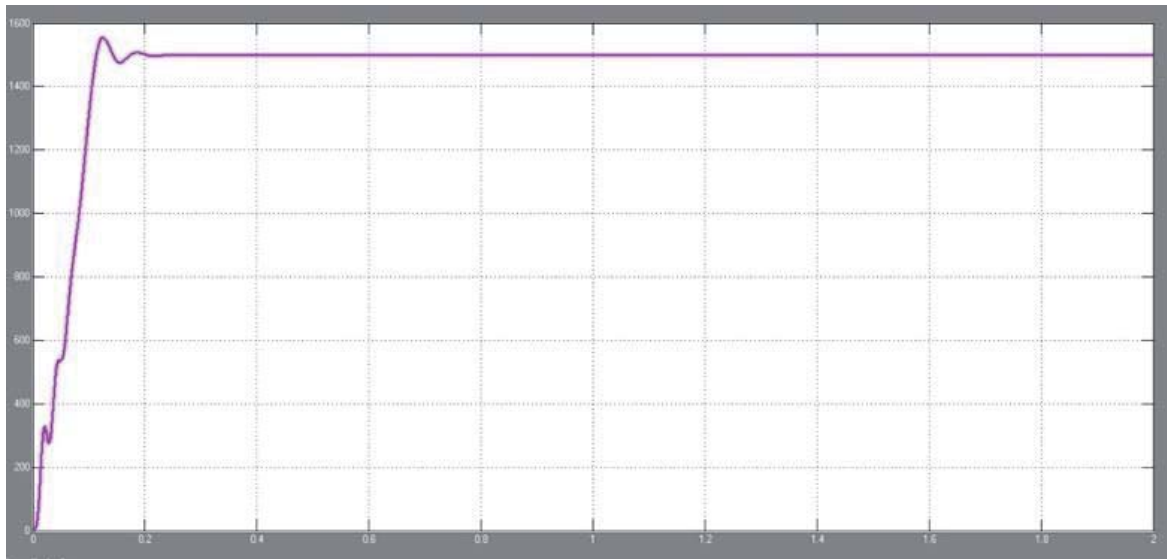


Figura 4-5: Velocidad del rotor

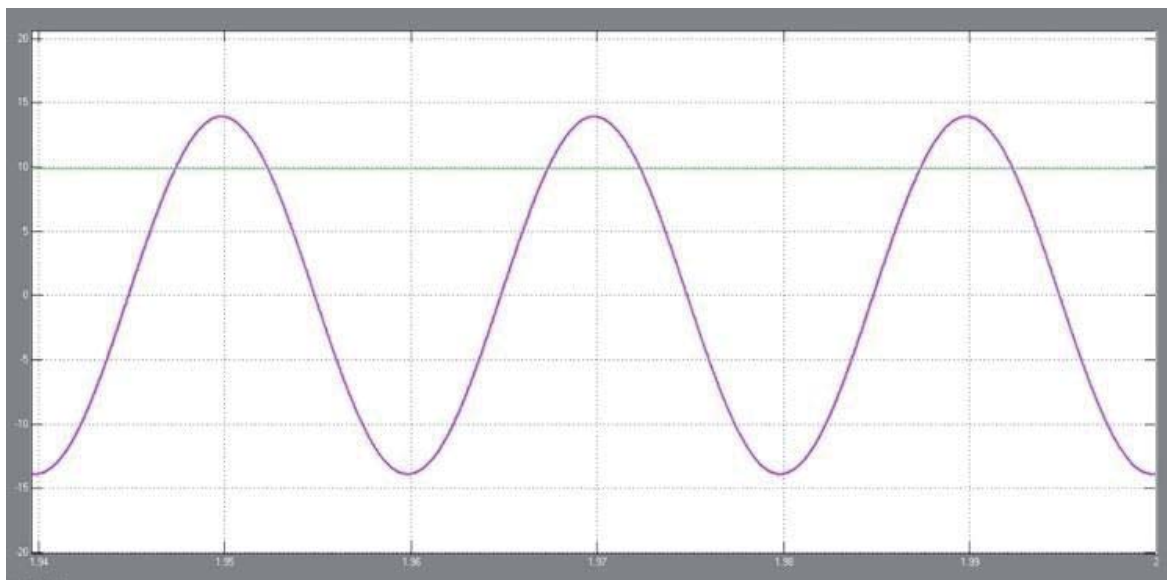


Figura 4-6: Forma de onda de la corriente en estator y su valor RMS

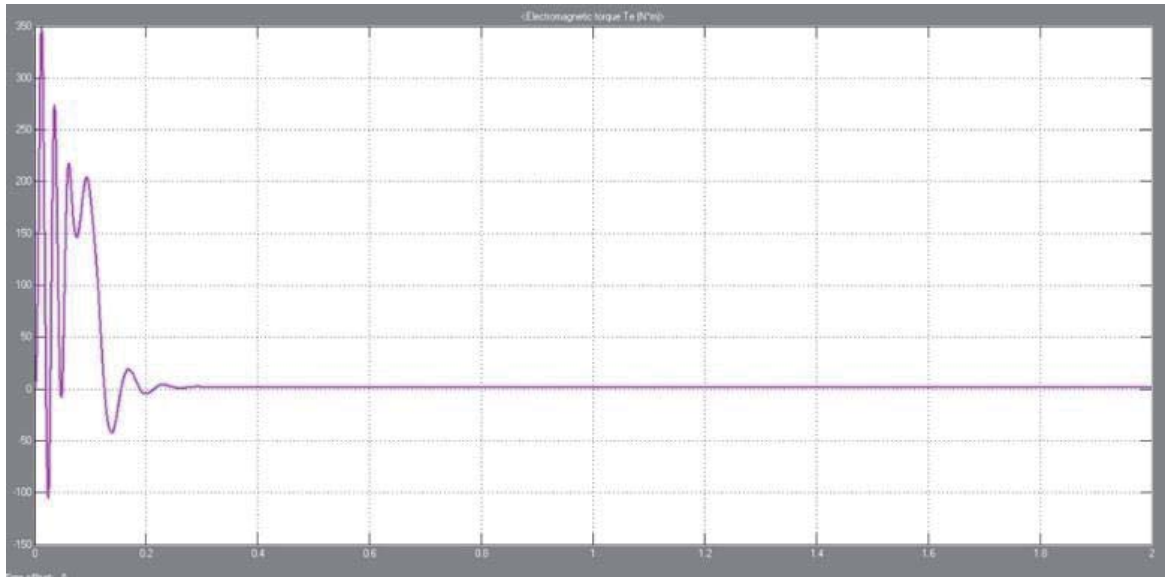


Figura 4-7 Forma de onda del torque

La figura 4-5 muestra que el motor a llegado a la velocidad síncrona impuesta por la red (1500 RPM) por lo cual es como si estuviera funcionando en rotor libre, la figura 4-6 da como resultado una corriente en estator de aproximadamente 10 [A] lo que comprueba la exactitud de los parámetros obtenidos anteriormente , y la figura 4-7 muestra el toque en estado estacionario es cero ya que no hay carga en el eje del motor.

4.2 Ensayos en laboratorio y simulación del variador de frecuencia SD 700

Para poder realizar la simulación del variador de frecuencia, necesitamos conocer su curva de voltaje-frecuencia, que es con la cual accionara el motor, para ello se accionara el motor de inducción de 30 HP a diferentes velocidades, en las que iremos midiendo los diferentes niveles de tensión, corriente y potencia en el estator de la máquina.

4.2.1 Ensayo variador de frecuencia SD 700-motor de inducción

Para la realización de este ensayo, se utilizó el equipo Samte que registro las tensiones y corrientes en los terminales del estator, además registro la potencia consumida por el motor y su factor de potencia. Con el display que presenta el variador de frecuencia, se fue regulando la velocidad del

estator, en intervalos de frecuencia de 10, para medir la velocidad en el rotor y calcular su deslizamiento, se utilizó un tacómetro.

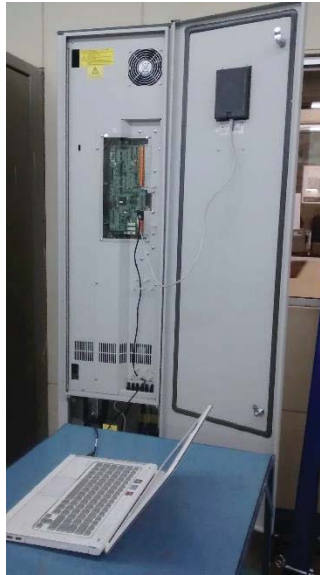


Figura 4-8: Variador de frecuencia SD 700 utilizado para el ensayo



Figura 4-9: Registro de la velocidad del rotor con un tacómetro digital

Cabe destacar que las mediciones que se realizaron fueron sin carga, sólo con el acoplamiento que presentaba en su eje con la máquina de corriente continua figura 4-1, el resultado de las mediciones fueron:

Tabla 4-3: Resultados ensayo variador de frecuencia-motor de inducción

Fest	V			I			P			f.p			nest	nrot
	R	S	T	R	S	T	R	S	T	R	S	T		
10	56.5	56.5	56.5	9.26	9.71	9.41	83.15	84	71	0.16	0.16	0.14	300	297
20	105.6	105.6	105.3	9.29	9.59	9.56	165.3	203	180	0.17	0.2	0.19	600	596
30	148.4	148	147.7	9.49	9.70	9.50	267	266	262	0.2	0.19	0.19	900	897
40	188	187	187	9.60	9.70	9.70	387	387	362	0.2	0.19	0.19	1200	1196
50	230	228	230	9.65	9.73	9.68	441	444	413	0.2	0.2	0.19	1500	1495

Con la tabla 4-3 ya podemos formar el control escalar, y conocer los valores de tensión corriente y consumo de potencia que presenta en funcionamiento como motor. Con el display que presenta el variador de frecuencia, nos indica que el voltaje en el bus DC se mantiene constante a 563 V

4.2.2 Ensayo variador de frecuencia SD700 en modo regeneración

Para llevar a cabo la regeneración de energía, se aplicó una rampa de desaceleración del 15 % esto significa que la velocidad ira bajando 15% de la velocidad nominal del motor en un segundo, esta rampa produce que el eje del rotor tenga una velocidad superior al campo magnético giratorio del estator. Para llevar a cabo la regeneración se utilizó el variador de frecuencia SD 700, motor de inducción 30 HP, 4 polos a 50 HZ, y un motor de corriente continua que funcionara como generador.

El variador de frecuencia acciona el motor de inducción, el cual tiene acoplado en su eje un motor de corriente continua que estará funcionando como generador, en los terminales del motor de corriente continua se conecta un panel de luces , las cuales si están todas encendidas consumen una potencia total de 9 kwatt.

En primer lugar se procedió a llevar al motor de inducción a una velocidad del 80 % de la nominal o a 40 Hz, después que se estabilizo en la frecuencia impuesta por el variador se aplicó una rampa de deceleración del 15 % . El ensayo se realizó con una ampolleta encendida, lo cual arrojo un error de sobre tensión en el bus dc. Para impedir que se dañen los condensadores del bus dc, se procede activar una protección, lo cual hace que los igbt dejen de funcionar (quedan abiertos), al dejar de funcionar no hay circulación de potencia reactiva para que el campo magnético giratorio

sigua funcionando como generador por lo cual ya no existe el flujo de energía activa por parte del generador de inducción.



Figura 4-10: Panel de ampollitas, con una encendida para llevar a cabo el frenado



Figura 4-11: El display del variador de frecuencia SD 700 arroja fallo de sobre tensión en el bus DC

El segundo ensayo se realizó estando todo el panel de luces encendidas, de la misma forma anterior se procedió a llevar al motor de inducción a una frecuencia de 40 HZ (80% de su velocidad nominal) y se aplicó una rampa de deceleración del 15%. En esta ocasión no se produjo alza de voltaje peligroso para producir la desconexión del motor, pero si se produjo regeneración la cual fue atenuada por la carga, ya que al tener una carga en este caso de 9 Kwatt produce un torque contrario en el eje del motor de inducción produciendo una desaceleración en el rotor, evitando que este produzca un deslizamiento negativo mucho mayor que al no estar conectada la carga en su totalidad.



Figura 4-12: Panel de ampolletas consumiendo 9K[watt]

Como conclusión a este ensayo se puede afirmar que la carga ayuda a que no se produzca alzas de voltaje excesivo en el bus cc, pero aun así se produce la regeneración. Para el caso en el cual se tenía solo una ampolleta encendida, la velocidad del rotor fue mucho mayor que la velocidad del campo magnético giratorio, produciendo la desconexión inmediata del variador de frecuencia por error de sobre voltaje, por consecuencia el valor de energía regenerada hasta el bus CC no se puede detectar por la rapidez con la cual sucede la desconexión, solo se aprecia el fenómeno.

Se presenta la siguiente tabla a rotor libre a diferentes frecuencias de funcionamiento y dos tipos de desaceleración

Tabla 4-4: Rampa de desaceleración del 10 %

Frecuencia	Rampa	Tensión R	Tensión Máxima
	Deceleración	Permanente	Bus DC
10 [Hz]	10[%]	96 [V]	580[V]
20 [Hz]	10[%]	176[V]	671[V]
30 [Hz]	10[%]	256[V]	812[V]
40 [Hz]	10[%]	332[V]	840[V]
50 [Hz]	10[%]	404[V]	842[V]

Tabla 4-5: Rampa de desaceleración del 15 %

Frecuencia	Rampa	Tensión R	Tensión Máxima
	Deceleración	Permanente	Bus DC
10 [Hz]	15[%]	96 [V]	610[V]
20 [Hz]	15[%]	176[V]	751[V]
30 [Hz]	15[%]	256[V]	850[V]
40 [Hz]	15[%]	332[V]	850[V]
50 [Hz]	15[%]	404[V]	850[V]

En la tabla 4-4 nos podemos dar cuenta que se produce regeneración ya que el bus dc bordea los 560 V en modo normal, pero alcanza niveles críticos pero sin ser accionado el comando que permite liberar el motor. En la tabla 4-5, de igual forma que para una deceleración del 10% se produce regeneración, pero para frecuencias superiores a 30 Hz se produce un alza de voltaje produciendo la liberación del motor. Este fenómeno se produce ya que al alcanzar mayor velocidad, cuesta más que se detenga el rotor por la inercia que este lleva al momento de disminuir la frecuencia del estator con una rampa de deceleración mucho mayor.

4.2.3 Simulación del variador de frecuencia SD 700 en modo motor y generador

Ya habiendo realizado los ensayos del variador de frecuencia, podemos saber su comportamiento en modo motor y generador. En la figura 4-13 se muestra el diagrama de bloques del circuito a simular, el convertidor del lado de la carga trabaja con control escalar, por lo cual se debe ingresar los valores de voltaje frecuencia obtenidos de los ensayos anteriores tabla 4-3

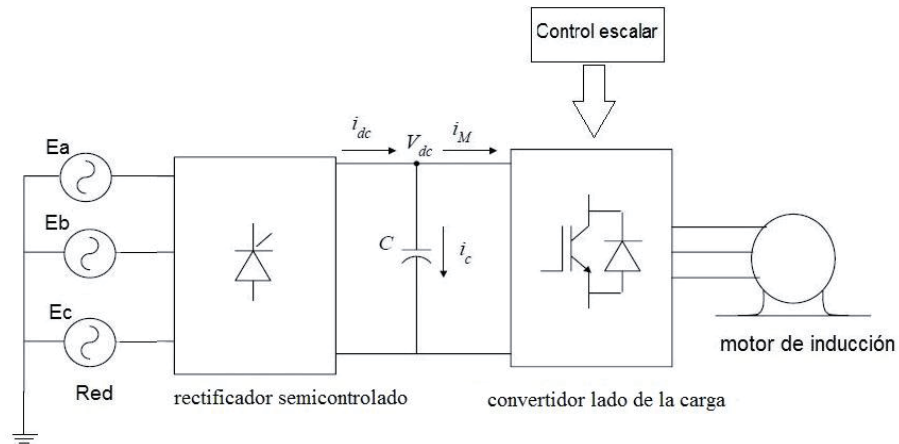


Figura 4-13: Diagrama de bloques variador SD700-motor de inducción

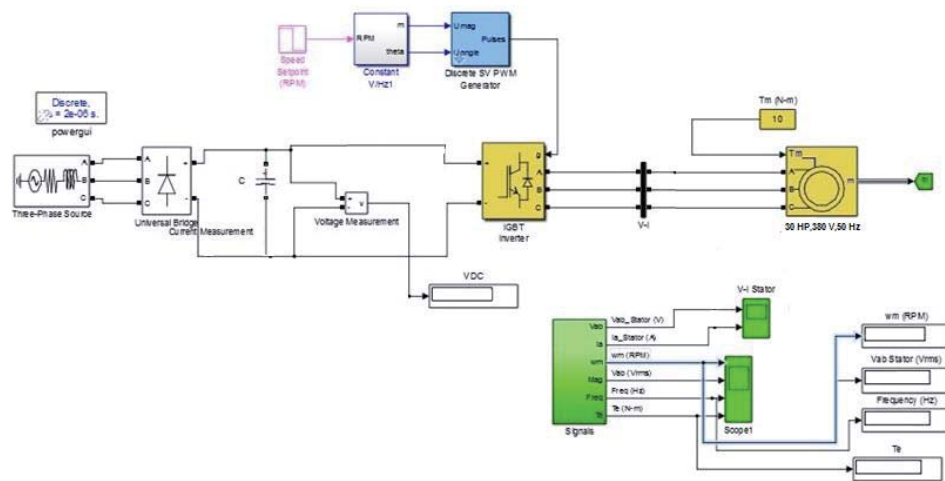


Figura 4-14: Circuito red-VDF SD700-motor de inducción

La tabla 4-15 se completa con los intervalos de frecuencia y voltajes que accionaron el motor de inducción, sabiendo que a una frecuencia de 50[hz] se tiene una velocidad sincrona de 1500[rpm], a una tensión de 398 [V] en los terminales del estator, este voltaje toma el valor de voltaje base. Estos valores de frecuencia se obtuvieron del display del variador de frecuencia, que corresponde a la frecuencia en el estator y los voltajes fueron obtenidos mediante el equipo sampte, los cuales corresponden al voltaje entregado por el variador de frecuencia SD 700 al motor de inducción.

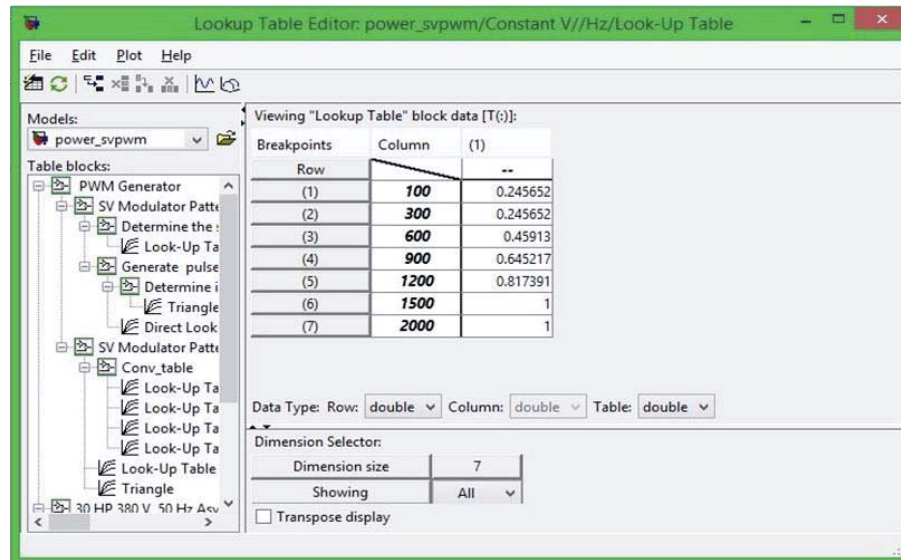


Figura 4-15: Tabla voltaje-frecuencia

Para comprobar la simulación con los valores obtenidos en los ensayos, se hace funcionar hasta las 1500 RPM a 50 Hz con un torque de 10[Nm]



Figura 4-16: forma de onda de: velocidad rotor, tensión en el estator (RMS), frecuencia, torque

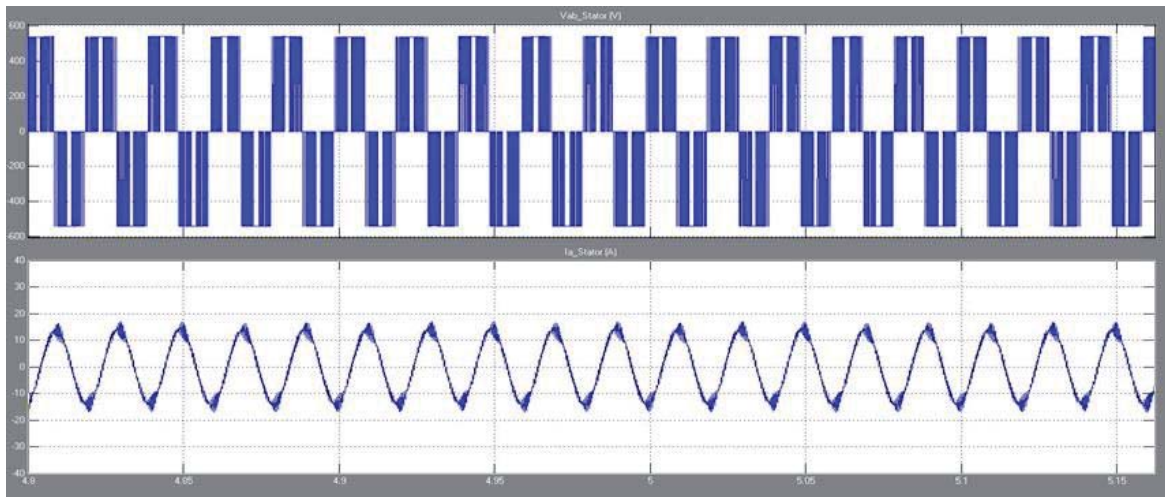


Figura 4-17: Forma de onda de voltaje y corriente en el estator

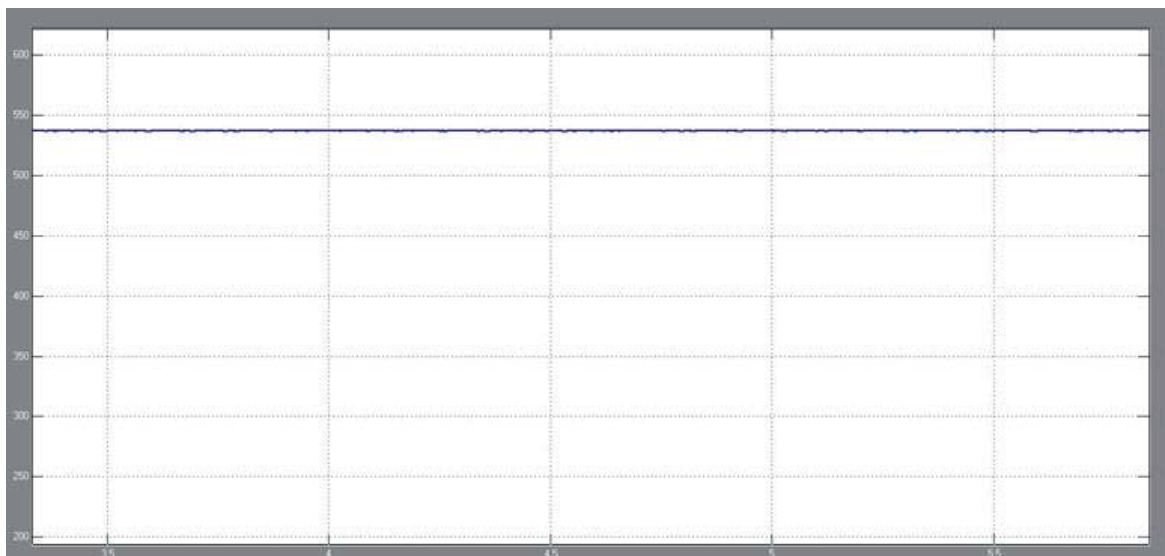


Figura 4-18: Tensión en el bus DC

De las figuras 4-16 ,4-17,4-18 podemos concluir que se llegan a los valores obtenidos en los ensayos en estado estacionario, por lo cual la simulación realizada representa la realidad.

Para provocar la regeneración, se bajara de forma brusca la frecuencia y el voltaje aplicado en los terminales del motor de inducción. Producto de la inercia del rotor, este tiende a seguir en movimiento, produciéndose un deslizamiento negativo, lo que implica una sobre tensión en el bus DC tal como se comprobó en los ensayos en laboratorio.

En la figura 4-19 se puede observar cómo se pasa del funcionamiento de motor a generador, en el cual se disminuye la frecuencia del estator, pero al no decaer en conjunto la velocidad del rotor

se produce un incremento de tensión en los terminales del estator y en consecuencia el torque se torna negativo.

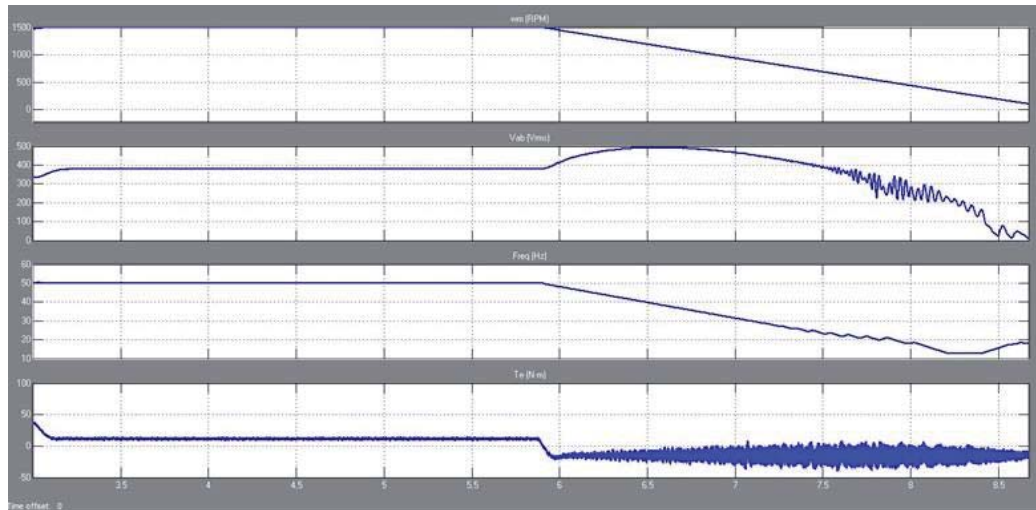


Figura 4-19 : forma de onda de velocidad rotor, tensión en el estator (RMS), frecuencia y torque

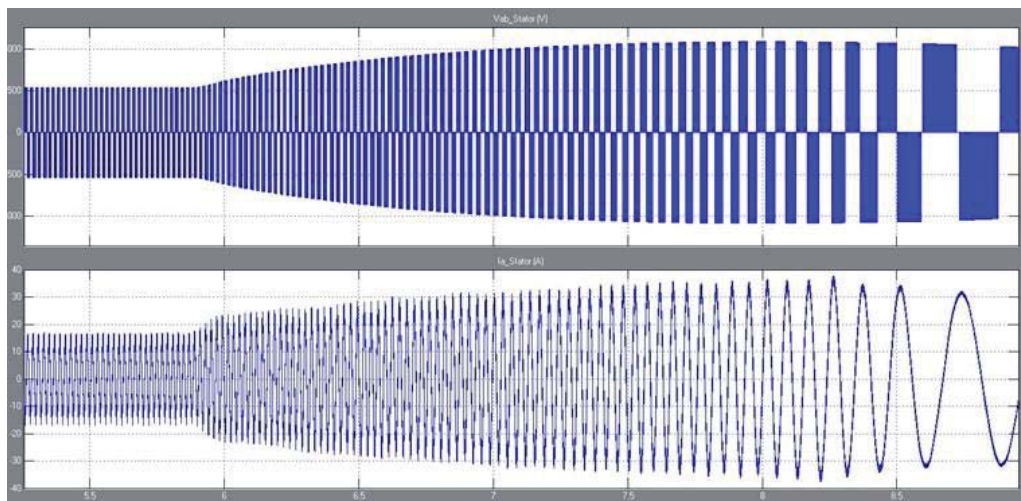


Figura 4-20: Forma de onda de voltaje y corriente en el estator



Figura 4-21: Tensión en el bus DC

En la figura 4-21 la tensión en el bus DC se eleva producto de la tensión que se genera en los terminales del estator, la cual es rectificadora por los diodos de protección que tienen los IGBT, los cuales forman un rectificador onda completa a base de diodos, este valor se torna peligroso superando los 800 V. Como medida de seguridad para el bus dc se libera el motor, esto puede ser muy peligroso si no se tienen frenos mecánicos que puedan frenar el rotor.

4.3 Simulación variador de frecuencia con regeneración a la red

Como en apartados anteriores se explicó, el variador SD 700 no permite regenerar a la red, el causante de esto es su puente rectificador semicontrolado, para ello se sustituirá el rectificador a base de diodos y tiristores por uno a base de IGBT con la tecnología AFE, este nuevo rectificador podrá entregar la energía que proporciona el motor actuando como generador y evitara las alzas de tensiones en lo terminales del bus DC y en consecuencia el rotor podrá ser frenado sin que produzca el error de la figura 4-11. En la figura 4-22 se muestra el diagrama de bloques a simular

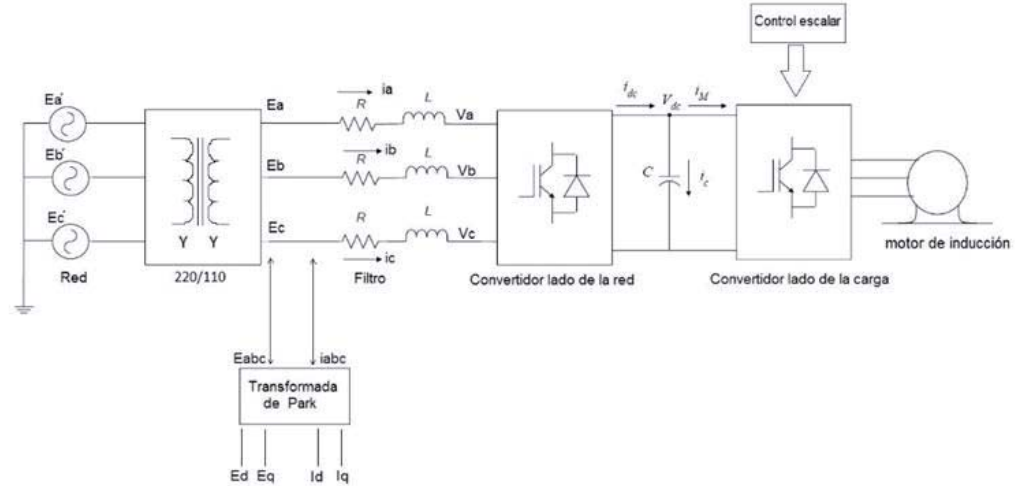


Figura 4-22: Diagrama de bloques variador de frecuencia con rectificador frente activo

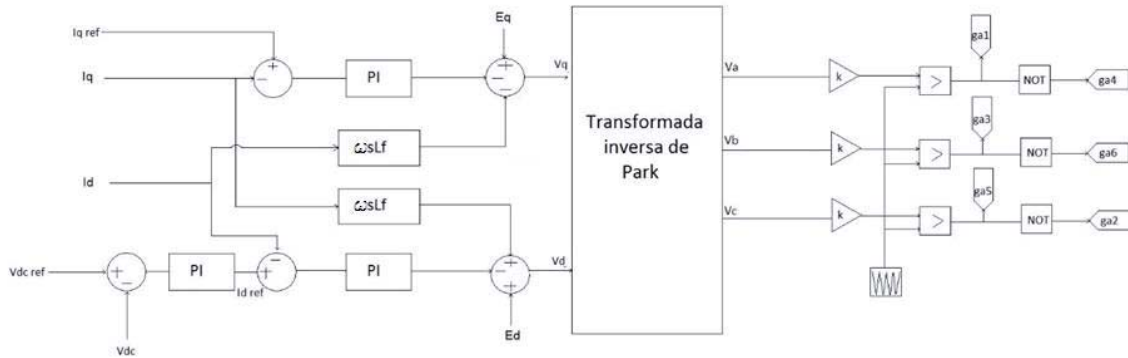


Figura 4-23: Circuito de control del rectificador frente activo

4.3.1 Funcionamiento del circuito de control del rectificador AFE

Para entender el funcionamiento de este control, es necesario visualizar la figura 4-23 en los cuales los valores de E_d , E_q , I_d e I_q , se obtienen a la salida del filtro visto desde el convertidor, mediante la transformada de Park. También se necesita estar midiendo continuamente el bus DC. Mediante las ecuaciones 3-18 y 3-19 del capítulo 3, se puede obtener los voltajes V_d y V_q , el voltaje v_{dc} ref es el sensor de voltaje que se tiene en el bus DC y mediante una referencia de voltaje dada, se obtiene un error el cual a la salida del PI se obtiene una corriente I_d ref que es restada con la corriente I_d de la línea, a la salida de este PI se obtiene u_d que es la caída de tensión en la rama de acoplamiento, al mismo punto de suma llegan E_q y $\omega s L f$. Para la obtención de V_q , primero se tiene una corriente I_q de referencia en este caso será 0, a la salida de PI obtengo u_q que es la caída de tensión del filtro para completar la suma entra E_q y $\omega s L f$. Al obtener ya los voltajes V_q e V_d se procede a aplicar la transformada inversa de Park la cual vuelve a convertir un sistema de dos ejes rotatorios a un sistema trifásico V_a V_b y V_c lo cuales mediante una portadora producen la conmutación de los IGBT a dos niveles.

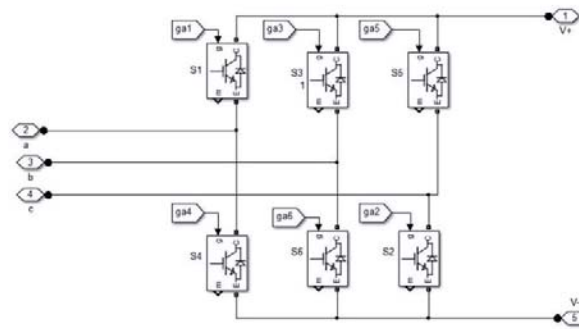


Figura 4-24: convertidor lado de la red con conmutación complementaria

4.3.2 Simulación y resultados

En primero lugar tenemos nuestro convertidor del lado de la red el cual se muestra en la figura 4-25, es el encargado de aplicar una rampa de deceleración con el fin de producir la regeneración.

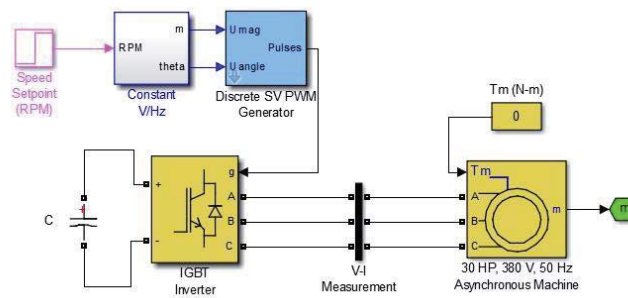


Figura 4-25: Convertidor del lado de la carga y motor de inducción

Al cambiar el rectificador semicontrolado por uno a base de IGBT, se podrá regenerar energía a la red. El valor de la resistencia e inductancia en el filtro es de 0.03 [Ω] y 3[mHy], en el cual se tiene una tensión en el secundario de 110 [V].

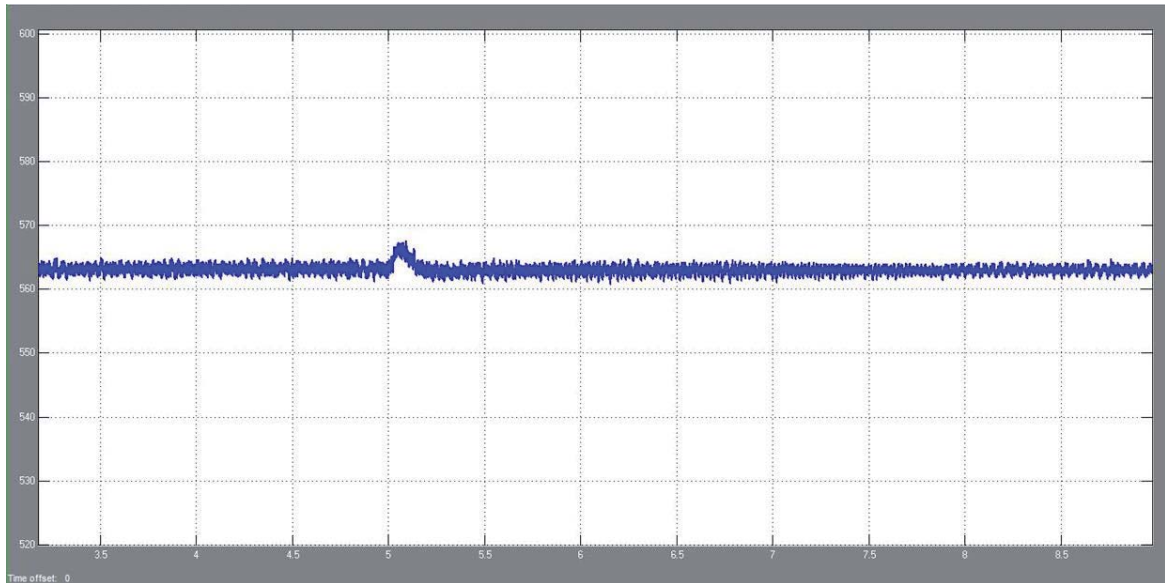


Figura 4-28: Tensión en bus DC antes y después de la regeneración

A diferencia de la figura 4-21 en el cual la tensión en el bu DC se incrementaba , ahora se mantiene constante figura 4-28 , gracias al control de la corriente I_{de} que es la responsable de mantener un bus DC estable y proporcionar potencia activa.

4.4 Cálculo de potencia cedida y regenerada a la red

Para este cálculo el motor está funcionando con 10 [Nm] y una inercia de 0.5. Para producir la regeneración se lleva desde los 1500 RPM a velocidad cero en un corto periodo de tiempo. En la figura 4-29 se muestra la corriente y el voltaje en la red, se puede notar que están casi en fase lo cual dará un factor de potencia unitario

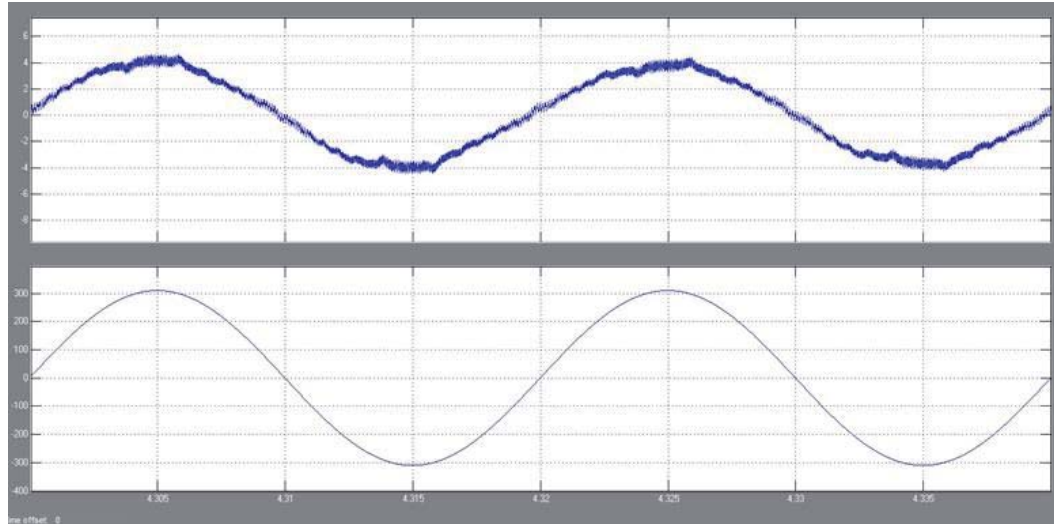


Figura 4-29: Forma de onda de corriente y voltaje en el primario del transformador

En la siguiente figura se muestra el voltaje a la salida del inversor y su ángulo, cabe recordar que el ángulo de referencia es de 0° , por lo cual se puede concluir que existe un flujo de potencia activa debido al desfase entre la fuente generada por el inversor y la red.

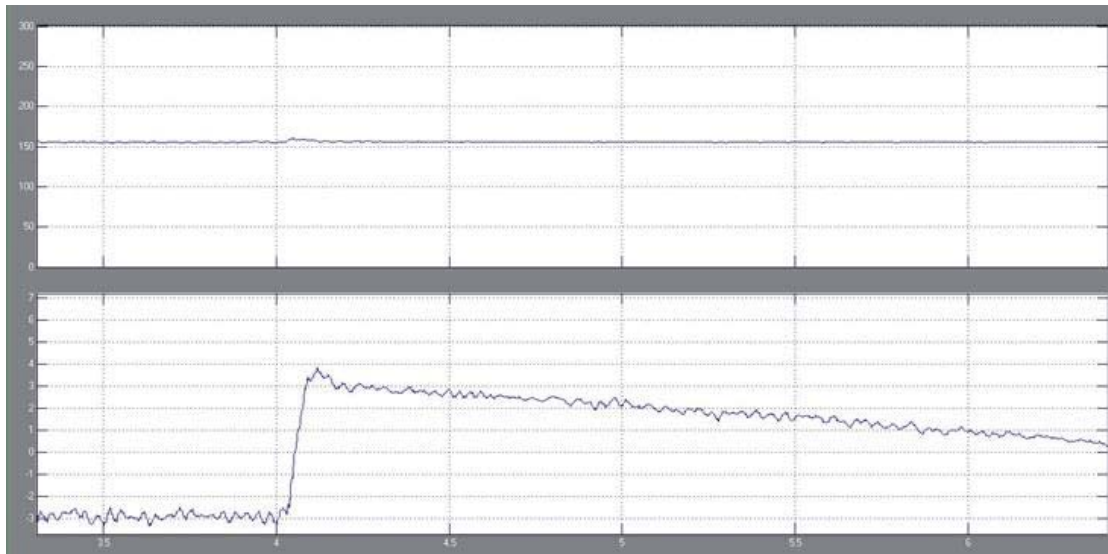


Figura 4-30: Tensión máxima producida por el inversor del lado de la red y ángulo de fase

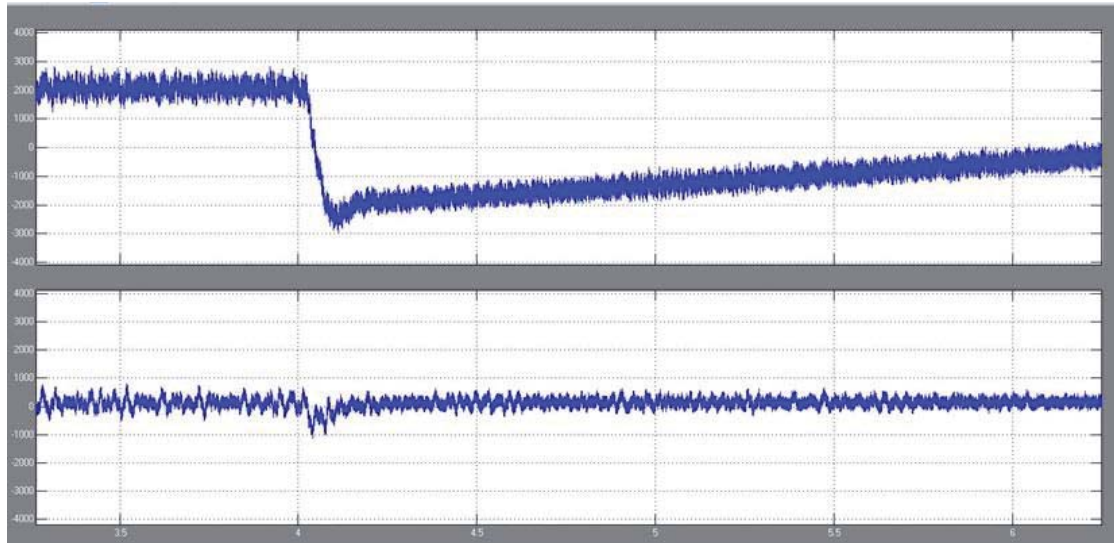


Figura 4-31: Potencia activa y reactiva en la red

El cálculo del consumo de potencia se efectuara para un tiempo de 20 [seg]

$$\text{Consumo de potencia en modo motor} = \frac{2000[\text{watt}] \cdot 20[\text{seg}]}{20[\text{seg}]} = 2000[\text{watt}] \quad (4-11)$$

$$\text{Potencia regenerada a la red} = \frac{2500[\text{watt}] \cdot 2[\text{seg}]}{2 \cdot 20[\text{seg}]} = 125[\text{watt}] \quad (4-12)$$

$$\frac{\text{Potencia regenerada a la red}}{\text{potencia consumida}} = \frac{2000[\text{watt}]}{125[\text{watt}]} \cdot 100\% = 6.25 \quad (4-13)$$

5 Evaluación económica

En este capítulo se dará a conocer el valor económico que presenta los variadores de frecuencia SD700 y SD 700FR de la empresa Power Electronics, también se explicará que se necesita para inyectar energía a la red y para finalizar se calculara el valor económico que presenta la regeneración.

5.1 Variador de frecuencia SD 700 y SD700FR

- El variador de frecuencia utilizado para los ensayos en el laboratorio y posterior simulación, es el SD 700 de la compañía Power Electronics y comercializado por la empresa AVI. El equipo donado a la universidad es un SD 700 de 6 pulsos a 400[V] CA, estos equipos se clasifican según su números de pulsos, potencias y tallas. Las tallas indican las dimensiones del equipo y su peso, aunque los equipos son bastante compactos para la función que desempeñaran, es preciso conocer sus dimensiones al momento de la instalación. Las tallas que se pueden encontrar en la gama de los SD 700 son 11, siendo talla 5 el variador de frecuencia utilizado para esta tesis.

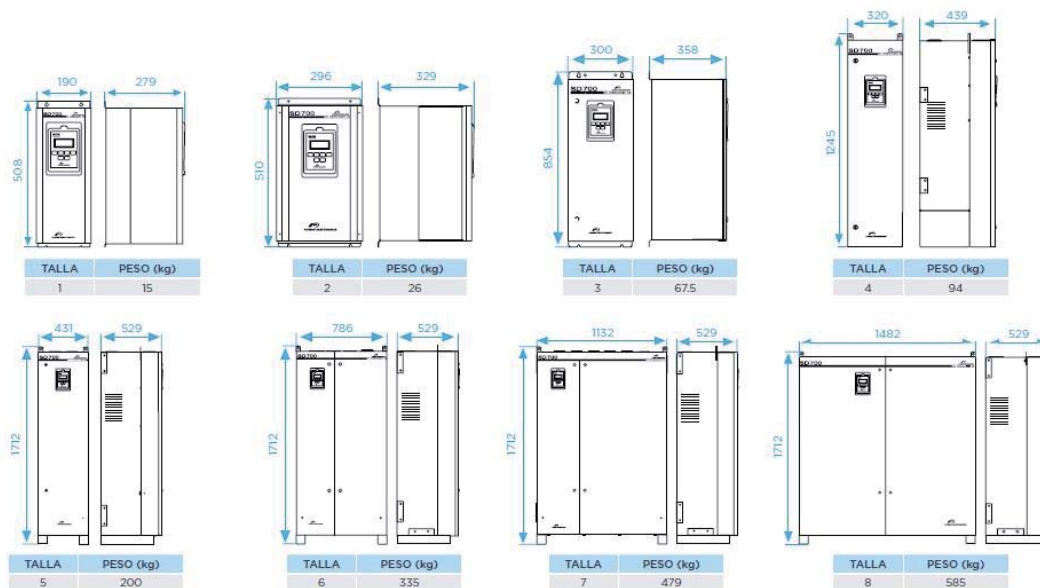


Figura 5-1 Tallas presentes en los variadores de frecuencia SD 700, del 1 al 8.

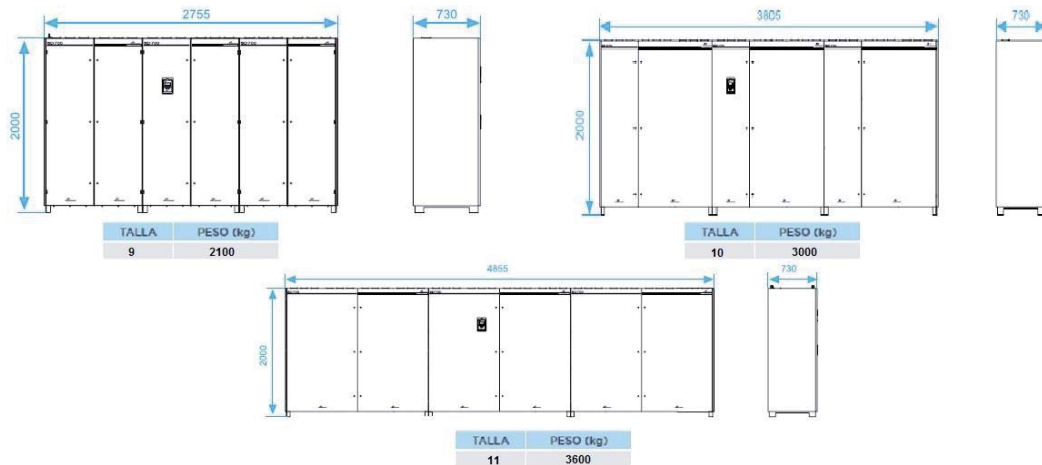


Figura 5-2 Tallas presentes en los variadores de frecuencia SD 700, del 9-11.

EL código del variador SD 700 que pertenece a la escuela de ingeniería eléctrica es SD 702105XY, el cual funcionando a carga nominal presenta una corriente de 263 [A] y una potencia 132 K[w].

RANGOS DE POTENCIA A 400VAC

TALLA	CÓDIGO	6 PULSOS			Temperatura de trabajo 40°C		
		CARGA PESADA			CARGA NORMAL		
		I(A) Nominal	Potencia motor (kW) a 400Vca	150% Sobrecarga (A)	I(A) Nominal	Potencia motor (kW) a 400Vca	120% Sobrecarga (A)
1	SD70006 5X Y	6	2,2	9	7,5	3	9
	SD70009 5X Y	9	4	14	11	5,5	14
	SD70012 5X Y	12	5,5	18	15	7,5	18
	SD70018 5X Y	18	7,5	27	23	11	27
	SD70024 5X Y	24	11	36	30	15	36
2	SD70032 5X Y	32	15	48	40	18,5	48
	SD70038 5X Y	38	18,5	57	48	22	57
	SD70048 5X Y	48	22	72	60	30	72
3	SD70060 5X Y	60	30	90	75	37	90
	SD70075 5X Y	75	37	113	94	45	113
	SD70090 5X Y	90	45	135	113	55	135
	SD70115 5X Y	115	55	173	144	75	173
4	SD70150 5X Y	150	75	225	188	90	225
	SD70170 5X Y	170	90	255	213	110	255
5	SD70210 5X Y	210	110	315	263	132	315
	SD70250 5X Y	250	132	375	313	160	375
	SD70275 5X Y	275	150	413	344	200	413
6	SD70330 5X Y	330	160	495	413	220	495
	SD70370 5X Y	370	200	555	463	250	555
	SD70460 5X Y	460	250	690	575	315	690
7	SD70580 5X Y	580	315	870	725	400	870
	SD70650 5X Y	650	355	975	813	450	975
	SD70720 5X Y	720	400	1080	900	500	1080
8	SD70840 5X Y	840	450	1260	1050	560	1260
	SD70925 5X Y	925	500	1388	1156	630	1388
	SD70990 5X Y	990	560	1485	1238	710	1485
9	SD71150 5X Y	1150	630	1725	1438	800	1725
	SD71260 5X Y	1260	710	1890	1575	900	1890
	SD71440 5X Y	1440	800	2160	1800	1000	2160
10	SD71580 5X Y	1580	900	2370	1975	1100	2370
	SD71800 5X Y	1800	1000	2700	2250	1200	2700
11	SD72200 5X Y	2200	1200	3300	2750	1500	3300
	SD72500 5X Y	2500	1400	3750	3100	1750	3750

Figura 5-3 Rango de potencias para 400 V CA a 6 pulsos.

El valor económico del variador de frecuencia SD 700 presente en la universidad es de 15000 €, este valor corresponde a la empresa AVI que es la que proporciono el variador de frecuencia.

- El variador SD700 perteneciente a la universidad, no presenta la cualidad de entregar energía a la red debido a la composición de su puente rectificador, es por ello que en el transcurso de esta tesis se reemplazó el rectificador semicontrolado a base de diodos y tiristores por uno a base de IGBT, este nuevo rectificador permite la bidireccionalidad de energía. Dentro de la familia de variadores de frecuencia que ofrece Power Electronics se encuentra el variador de frecuencia SD700 FR, basado en la robusta arquitectura del SD700 con un diseño IP54, este variador está equipado con frente activo, ideal para aplicaciones de bombeo, grúas, compresores de refrigeración, a cintas transportadoras con pendiente negativa. Para este tipo de variadores se encuentran 7 tallas.



Figura 5-4 Tallas Variadores de frecuencia SD700FR.

Los rangos de potencia para los 400 [V] CA son:

RANGOS DE POTENCIA A 400VAC							
TALLA	CÓDIGO	Temperatura de trabajo 50°C CARGA PESADA			Temperatura de trabajo 40°C CARGA NORMAL		
		I(A) Nominal	Potencia motor (kW) a 400Vca	150% Sobrecarga (A)	I(A) Nominal	Potencia motor (kW) a 400Vca	120% Sobrecarga (A)
5	SD7FR0210 5X Y	210	110	315	263	132	315
	SD7FR0250 5X Y	250	132	375	313	160	375
	SD7FR0275 5X Y	275	150	413	344	200	413
6	SD7FR0330 5X Y	330	160	495	413	220	495
	SD7FR0370 5X Y	370	200	555	463	250	555
	SD7FR0460 5X Y	460	250	690	575	315	690
7	SD7FR0580 5X Y	580	315	870	725	400	870
	SD7FR0650 5X Y	650	355	975	813	450	975
	SD7FR0720 5X Y	720	400	1080	900	500	1080
8	SD7FR0840 5X Y	840	450	1260	1050	560	1260
	SD7FR0925 5X Y	925	500	1388	1156	630	1388
	SD7FR0990 5X Y	990	560	1485	1238	710	1485
9	SD7FR1150 5X Y	1150	630	1725	1438	800	1725
	SD7FR1260 5X Y	1260	710	1890	1575	900	1890
	SD7FR1440 5X Y	1440	800	2160	1800	1000	2160
10	SD7FR1580 5X Y	1580	900	2370	1975	1100	2370
	SD7FR1800 5X Y	1800	1000	2700	2250	1200	2700
11	SD7FR2200 5X Y	2200	1200	3300	2750	1500	3300
	SD7FR2500 5X Y	2500	1400	3750	3100	1750	3750

Figura 5-5: Tabla de potencias a 400 [V] CA

El valor económico de un variador de frecuencia con frenado regenerativo, específicamente el SD7FR0210 5X Y es de 23000 €. Este valor de comercialización corresponde a la empresa AVI.

5.2 Medidor Bidireccional

Para poder enviar energía a la red es necesario tener un medidor bidireccional, este medidor cuenta tanto la energía que se consume desde la red como aquella que se inyecta, generando dos cifras. Para poder conectarse a la red de suministro es necesario un instalador eléctrico autorizado por la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC). En la figura se muestra un medidor bidireccional autorizado por la SEC para ser utilizado en instalaciones de generación eléctrica que se conecten a las redes de distribución eléctrica, conforme a la ley 20.571. El valor comercial de este medidor es de US\$434,48 IVA incluido, disponible en la página de aquotosolar.cl.



Figura 5-6 Medidor bidireccional trifásico (fuente: www.aquitosolar.cl)

En la figura 5-7 se muestra el procedimiento de conexión, todo este proceso esta disponible en la página del SEC, también se pueden encontrar los formularios en las páginas de las empresas de distribución.

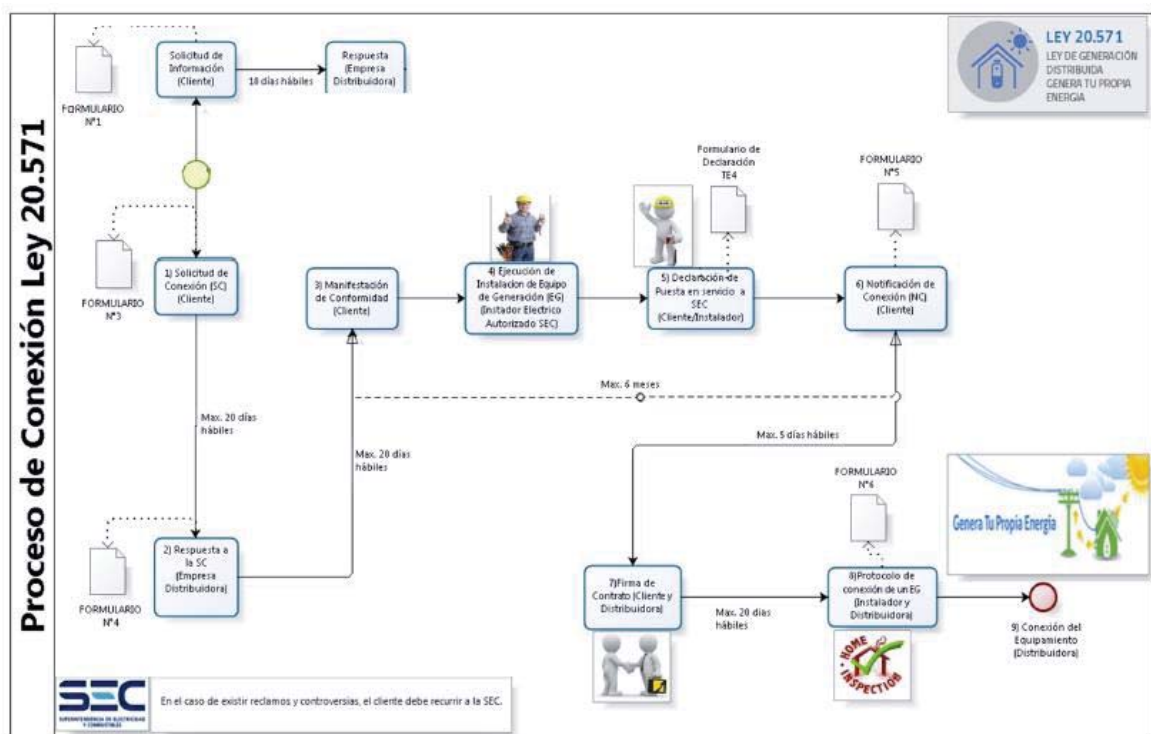



Figura 5-7: Procedimiento de conexión (fuente: www.sec.cl)

A continuación se muestra los valores asociados a la conexión para la empresa Chilectra, estos valores pueden ser distintos para otras zonas del país.



Ley 20.571: Costos de Conexión (Chilectra - Abril 2015):
SOLICITUDES DE PROYECTOS ASOCIADOS A GENERACIÓN DISTRIBUIDA - NET BILLING

1.- Estudios Técnicos: Costos publicados por Chilectra; Área Típica 1; Incluye IVA.

a) Solicitud de Información (al presentar Formulario 1)	UF	0,691
b) Solicitud de Conexión (al presentar Formulario 3), cuando el Equipo de Generación > Capacidad Instalada Permitida:		
• Con presentación de Formulario 1 Previo	UF	0,949
• Sin presentación de Formulario 1 Previo	UF	1,589
2.- Trabajos de Empalme:		
Empalmes monofásicos		
a) Cambio de medidor a bidireccional (no incluye equipo de medida)	UF	0,462
b) Cambio de medidor a bidireccional (incluye equipo de medida)	UF	2,720
3.- Puesta en Servicio:		
a) Supervisión puesta en servicio Equipo de Generación	UF	0,469

Figura 5-8 Costos de conexión (fuente: www.sec.cl)

5.3 Tiempos de frenado v/s operación

Para poder cuantificar la energía que proporciona el frenado v/s el de operación, se hará un breve análisis, suponiendo un tiempo de operación y frenado durante 1 hora, cabe mencionar que se trabajara con un motor de 30 HP y una inercia de 0.7 en el eje, este valor de inercia será superior al del cap. 4.4 con el objetivo de acentuar lo regenerado.

Para este ejemplo se supondrá que diariamente se acciona el variador de frecuencia de esta forma:

- Se acciona cada 10 min con una pausa de 5 min durante una hora.
- Consumo en modo motor 2000 [watt]
- Tiempo del frenado 2.2 [seg]
- Peak de regeneración 4000[watt]

Mediante la simulación en ambiente Simulink, se obtiene la potencia activa en funcionamiento como motor hasta el tiempo 4.2 [seg]

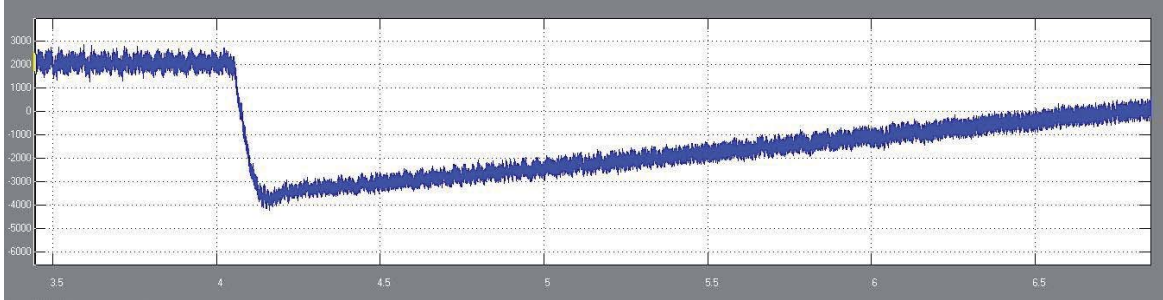


Figura 5-9: Potencia activa en funcionamiento como motor y generador.

Desde la página web de Chilquinta (empresa de distribución) se obtuvieron las tarifas de suministro eléctrico para la comuna de Valparaíso sector plan con:

- Energía base (\$/KWh) 151.913

La tarifa de generación para la comuna de Valparaíso sector plan es de:

- Energía inyectada (\$/KWh) 88.256

El valor de generación es menor que el de consumo debido a que se cobra el uso de la infraestructura de la distribución de energía.

Energía utilizada en KWh en funcionamiento como motor.

$$\left(\frac{2000[\text{watt}] \cdot 10[\text{min}] \cdot 1[\text{h}]}{60[\text{min}]} \right) \cdot 4 = \frac{1333.333[\text{wh}]}{1000} = 1.333333[\text{kwh}] \quad (5-1)$$

El costo de esta energía en pesos chilenos es:

$$1.333333[\text{kwh}] \cdot \frac{151.913[\$]}{[\text{Kwh}]} = 202.55[\$] \quad (5-2)$$

Energía regenerada durante el frenado.

$$\left(\frac{4000[\text{watt}] \cdot 2.2[\text{seg}] \cdot 1[\text{h}]}{3600[\text{seg}] \cdot 2} \right) \cdot 4 = \frac{4.8889[\text{wh}]}{1000} = 0.0048889[\text{kwh}] \quad (5-3)$$

El costo de la energía regenerada en pesos chilenos es de:

$$0.0048889[\text{kwh}] \cdot \frac{88.256[\$]}{[\text{Kwh}]} = 0.431473[\$] \quad (5-4)$$

Como conclusión a este ejemplo, se puede notar que el retorno económico es muy poco, pero no hay que olvidar que esta simulación está hecha desde la base de la experimentación en el laboratorio, donde los ensayos fueron realizados en vacío, por lo cual la regeneración depende solo de la inercia del eje y de su velocidad. Con los ensayos realizados anteriormente nos podemos dar cuenta que la regeneración de energía dependerá de: la carga en el eje, su velocidad, la pendiente, tiempos de frenado y de su rampa de desaceleración, por lo cual este sistema de recuperación de energía está destinado a principalmente a mineras que hacen usos de correas transportadoras, donde existe gran movimiento de material y pendientes que hacen propicio el uso de variadores de frecuencia con frenador regenerativo.

Discusión y conclusiones

En esta tesis se cumplieron los objetivos planteados, tanto para el estudio y simulación del variador de frecuencia SD700 y la posterior implementación para que pudiera regenerar. Para poder entender el fenómeno de la regeneración se inició con el estudio detallado del motor de inducción, mediante la información recopilada de libros y página web se comprendió el funcionamiento en modo generador, este estudio fue punto de partida para poder comprender el funcionamiento del variador de frecuencia y las alertas de sobretensión que se producían al detener el motor en un tiempo muy corto.

Ya sabiendo el comportamiento que tenía el motor de inducción en modo generador, se estudió el variador de frecuencia, para ello fue necesario el estudio del manual del VDF SD700, nos dimos cuenta que el motor de inducción era accionado mediante el control escalar o también conocido V/F, en el cual varía el voltaje y la frecuencia aplicado a los terminales del motor de inducción, para poder comprobar esto se realizaron ensayos en el laboratorio y en conjunto con el display que posee el variador de frecuencia se pudo observar esta configuración. Este tipo de control es de los más sencillos y ampliamente utilizados, ya que no necesita datos específicos del motor pero carece de precisión en la velocidad de su rotor, ya que solo controla la velocidad del C.M.G del estator.

Mediante ensayos en el laboratorio se acciono al motor de inducción a diferentes velocidades y se frenó con diferentes rampas de desaceleración, con este experimento se pudo concluir que la regeneración va en conjunto con la velocidad y el tiempo de desaceleración. A mayor velocidad y al ser aplicada una rampa de desaceleración mayor, instantáneamente entra en funcionamiento la protección de sobretensión el bus CC del variador de frecuencia. Con ayuda de electrónica de potencia y del manual del variador de frecuencia, se pudo entender el porqué de este fenómeno, esto sucederá cada vez que los niveles de tensión permitidos en el bus de CC sean superados, aplicando una desconexión para salvaguardar los condensadores.

Otros de los ensayos realizados fue el acoplar al eje del motor de inducción un motor de corriente continua que a su vez funcionaba como generador para encender un panel de luces, con este ejemplo sucedió algo que no esperábamos, al tener el panel de luces encendidas producto del funcionamiento del motor de inducción, se procedió a aplicar una rampa de desaceleración con el fin de producir la regeneración, o para nuestro caso que saltara la protección de sobre voltaje, pero no sucedió lo esperado ya que al tener un panel de luces conectado al generador de CC, el

eje del motor de inducción producía un torque contrario evitando la regeneración, esto nos hizo pensar en clásico funcionamiento de un dinamo que encendía una luz a una bicicleta, para que la ampollita se encendiera con mayor intensidad era necesario pedalear más, por ende se tenía que ejercer más fuerza. Caso contrario a este experimento sucedería para una carga como lo es el transporte de materiales pesados, estos le dan una alta inercia al eje del motor, impidiendo que se detenga rápidamente.

Concluido los ensayos y estudios del variador de frecuencia SD 700 se hizo necesario la implementación en ambiente Simulink de un nuevo puente rectificador, ya que el que posee el VDF SD700 no tiene la capacidad para entregar energía a la red y por consecuencia produciendo un alza de tensión en los condensadores. Para poder entregar esta energía a la red fue necesario cambiarlo por un puente rectificador compuestos por IGBT, que a su vez son comandados por el control vectorial.

Las simulaciones realizadas en ambiente Simulink para el variador de frecuencia SD 700 y el reacondicionamiento del mismo, fueron satisfactorias, debido a los datos obtenidos en el laboratorio y que posteriormente fueron ingresados al programa.

De los valores obtenidos de la simulación del variador de frecuencia reacondicionado para entregar la energía del frenado a la red podemos concluir que:

- Al implementar este nuevo rectificador a base de IGBT no se produjo la sobre tensión en los condensadores, manteniendo una tensión constante en el bus CC tanto en modo motor como en modo generador.
- Los valores obtenidos en potencia regenerada son muy pequeños en comparación al funcionamiento como motor, pero todo esto se debe a que las simulaciones están sin carga en el eje del motor, pero mediante nuevos valores en la inercia del eje, nos pudimos dar cuenta que aumenta la regeneración y el tiempo de en el cual permanece entregando energía.

Como conclusión final, con la implementación de este nuevo puente rectificador ayudo a que la energía que generalmente se pierde en forma de calor, fuera entregada a la red, si bien los valores de regeneración no fueron considerables, hay que tener presente que las simulaciones fueron de acuerdo a datos obtenidos en el laboratorio, con un motor que es pequeño en comparación con lo que puede accionar este variador.

6 Bibliografía

- [1] P. Electronics, «Manual SD700,» [En línea]. Available: <http://power-electronics.com/es/variador-de-velocidad/galeria-sd700/>.
- [2] S. J.Chapman, Máquinas Eléctricas ,Quinta edición, 2012.
- [3] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, 2003.
- [4] «conceptos basicos del variador de frecuencia,» [En línea]. Available: <https://renovablesconsaburum.files.wordpress.com/2015/09/prc3a1ctica-control-de-frecuencia-del-alternador.pdf>.
- [5] «conceptos regeneracion de energia mediante variadores de frecuencia,» [En línea]. Available: <http://arayaingenieria.blogspot.cl/2011/02/respuestas-sobre-variadores-de.html>.
- [6] «Regiones de funcionamiento del motor de induccion,» [En línea]. Available: <http://patricioconcha.ubb.cl/maquinas/paginas/mom.vel.materia.html>.
- [7] «tipos de freandos con electronica de potencia,» [En línea]. Available: https://library.e.abb.com/public/92546f2be5281d93c1256d280041534a/Technical_Guide_No_8_ES.pdf.
- [8] a. P. Pandit, *Modeling and Analysis of Active Front-End induction Motor Drive for Reactive Power Compensation*.
- [9] D. R. Caballero, «FACTS, Transformada de Park, esquema de control vectorial».
- [10] «principales aspectos regulatorios de la ley 20571,» [En línea]. Available: www.sec.cl.

[11 A. bueno, «Esquema de control vectorial para rectificadores activos trifásicos en sistema de potencia».

[12 D. M. Y. G. V. Alfonso Álzate, «Control de velocidad mediante relación voltaje-frecuencia».