

Instituto Tecnológico de Veracruz
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Autor:

Luis Rodrigo López Utrera



“Variadores de frecuencia, uso y aplicaciones”

Asesor Interno:

Dr. Felipe Rodríguez Valdés

Asesor Externo:

Ing. Horacio García García

ÍNDICE

Resumen	1
Introducción	1
Objetivo general	2
Objetivo específico	2
1 Variador de frecuencia	
1.1 ¿Qué es un variador de frecuencia?	3
1.2 ¿Cómo está conformado un variador de frecuencia?	3
1.3 ¿Cuáles son los beneficios de un variador de frecuencia?	4
1.4 Descripción del sistema de un variador de frecuencia	5
1.5 La operación de un variador de frecuencia	6
2 Elementos de estado sólido	
2.1 Electrónica de potencia	7
2.2 Dispositivos semiconductores de potencia	7
2.2.1 El diodo	7
2.2.2 El tiristor	8
2.2.3 Tiristor apagado por compuerta (GTO)	8
2.2.4 Transistor bipolar de unión (BJT)	9
2.2.5 Transistor MOSFET	9
2.2.6 Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT)	9
2.3 Convertidores electrónicos de potencia	9
2.4 El dispositivo ideal	10
2.5 Conmutación	11
3 Rectificadores	
3.1 ¿Qué es un rectificador?	12
3.2 Tipos de rectificadores	12
3.3 Diodos vs Tiristores	12
3.4 Rectificadores monofásicos	13
3.4.1 Rectificadores monofásicos de media onda	13
3.4.2 Rectificadores monofásicos de onda completa	14
3.5 Rectificadores trifásicos	15
3.5.1 Rectificadores trifásicos de media onda	15

3.5.2 Rectificadores trifásicos de onda completa	16
3.6 Rectificadores totalmente controlados	17
3.6.1 Rectificador trifásico totalmente controlado	18
4 Inversores	
4.1 Inversores	21
4.2 Tipos de inversores	21
4.3 IGBT's vs MOSFET	22
4.3.1 IGBT's	22
4.3.2 MOSFET	22
4.4 Inversores monofásicos	23
4.5 Inversores trifásicos en puente	25
4.6 Control de la tensión de un inversor	26
4.6.1 Modulación por un solo pulso	26
4.6.2 Modulación de impulsos múltiples	27
4.6.3 Modulación senoidal de los impulsos	28
5 Componentes extras	
5.1 Componentes en un variador	31
5.1.1 Variador de frecuencia	31
5.1.2 Filtro de entrada	31
5.1.3 Protecciones	32
5.1.4 El rectificador	32
5.1.5 El bus de CC	32
5.1.6 El circuito de precarga	32
5.1.6.1 Circuito Snubber	33
5.1.7 El circuito de frenado	33
5.1.8 Inversor	33
5.1.9 Filtro de salida	33
5.1.10 Control	33
6 Arranque y control de motores	
6.1 Introducción	35
6.2 Tipos de arranque	35
6.2.1 Arranque con autotransformador	35

6.2.2 Arranque a voltaje pleno	36
6.2.3 Arranque con resistencias	36
6.2.4 Arranque por conmutación estrella-delta	37
6.3 Control de velocidad para un motor de inducción	38
6.3.1 Control de velocidad mediante el cambio de la frecuencia	39
6.3.2 Control de velocidad mediante el cambio de voltaje de línea	40
6.3.3 Control de velocidad mediante el cambio de resistencia del rotor	40
6.4 Métodos de control	40
6.4.1 Control escalar	40
6.4.1.1 Control escalar con retroalimentación	41
6.4.2 Control vectorial	42
6.4.2.1 Control vectorial sin sensor	44
7 Aplicación del variador Hitachi SJ700	
7.1 Introducción	45
7.2 Datos del variador	45
7.3 Aplicación del variador de frecuencia	46
7.4 Programación	46
7.5 PLC	51
7.6 Pruebas	51
7.7 Ventajas	53
8 Conclusiones	57
9 Bibliografía	59

RESUMEN

Hoy en día la producción eficiente y de calidad es de gran importancia para la mayoría de las industrias a nivel mundial. La automatización es parte fundamental de esta producción, ya que ahorra tiempo de producción y su operación es relativamente sencilla, es por eso que las industrias día con día se van actualizando tecnológicamente y es más común ver variadores de frecuencia que controlan a los motores y bombas encargados de esta producción. En este trabajo, se muestran los resultados obtenidos al instalar un variador de frecuencia en una bomba de llenado, la cual es la responsable de realizar una prueba de llenado a los tubos de esta empresa, los resultados obtenidos reflejan mucha de las ventajas que conlleva tener variadores de frecuencia en los procesos industriales.

PALABRAS CLAVES: Variador de frecuencia, Motor de inducción, Electrónica de potencia.

ABSTRACT

Nowadays production efficiency and quality is of great importance for the majority of global industries. Automation is a fundamental part of this production, due to it saves production time and its operation is relatively easy, moreover, industries are technologically upgrading everyday and it's more common to see frequency converters that control engines and bombs responsible for this production. In this research, the results obtained are shown when a frequency converter is installed into a filling pump, which is responsible for realizing a filling test to the pipes of the company. The results obtained show the advantages that lead to have frequency converters in industrial processes.

KEY WORDS: Frequency converters, Induction motor, Power electronics

INTRODUCCIÓN

El principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas ha permanecido igual desde su invención (motores, generadores, transformadores, etcétera); pero los dispositivos que se encargan de controlar a estas máquinas son los que han sufrido cambios a lo largo de los años, y seguirán mejorando sus características, a estos dispositivos se les conoce como elementos de estado sólido.

Estos elementos de estado sólido, conforman la automatización de estas máquinas, en especial los motores, los cuales se usan en varios pasos de la producción de cualquier industria. Esta automatización permite a facilitar los procesos y evita la intervención del hombre, para así

¹ Maestro en ciencias con orientación en matemáticas por parte de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).
Ingeniero eléctrico por parte del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVER).

poder evitar accidentes. Estos elementos de estado sólido, conforman los llamados “variadores de frecuencia” tema el cual se verá en este trabajo.

La automatización de la que se mencionó, requiere el control rápido y preciso de gran variedad del proceso, como temperatura, presión, nivel, fuerza, par, velocidad, caudal, entre otros. Para la regulación de estas variables se pueden controlar mediante varios tipos de dispositivos, que a su vez son actuados por un motor. Para regular las variables del proceso se debe ajustar el par y la velocidad de estos motores, por lo que los variadores de frecuencia hacen esta labor.

Los variadores de frecuencia son un método el cual le permite a la industria la automatización de procesos para facilitar la producción, también permiten contribuir al ahorro de energía, ya que los mismos variadores cuentan con sistemas de control que permiten una mayor eficiencia tanto en los motores como en los motores que se controlan, por esto y otras características los variadores de frecuencia han tenido gran auge.

Ya que hoy en día es importante hacer conciencia con respecto al ahorro de energía, Tenaris TAMSA, ha optado por automatizar sus procesos tomando en cuenta este tema, es por eso que los variadores de frecuencia forma parte del equipo que conforma la planta de TAMSA.

OBJETIVO GENERAL

Conocer como está conformado un variador de frecuencia, como su principio de funcionamiento, y poder controlarlo mediante un PLC, para poder realizar un proceso dentro de la planta.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Conocer que es un variador de frecuencia
- Funcionamiento de las partes que conforman un variador de frecuencia
- El control mediante PLC
- Aplicaciones de estos variadores en la planta

1 VARIADOR DE FRECUENCIA

1.1 ¿QUÉ ES UN VARIADOR DE FRECUENCIA?

Un variador de frecuencia es un sistema que permite controlar la velocidad rotacional de un motor, mediante el control de la frecuencia de la energía suministrada al motor. Un variador de frecuencia puede ser llamado de varias maneras, inversor, drive, etcétera.

Los motores eléctricos se pueden dividir en dos: los de corriente alterna y los de corriente directa. Así como hay motores de dos tipos, también tenemos drives para motores de alterna y drives para motores de directa. Un drive controla la velocidad, torque, dirección y la potencia del motor.

1.2 ¿CÓMO ESTÁ CONFORMADO UN VARIADOR DE FRECUENCIA?

Cualquier variador de frecuencia, consta principalmente de tres etapas primordiales para la conversión de la energía. Estas etapas son la rectificación, la cual consiste en la conversión de corriente alterna a directa, la segunda etapa es la filtración, la cual se dedica a suavizar la señal de salida del rectificador, la cual es llevada a la tercera etapa que es la inversión, la cual convierte la corriente directa en corriente alterna.

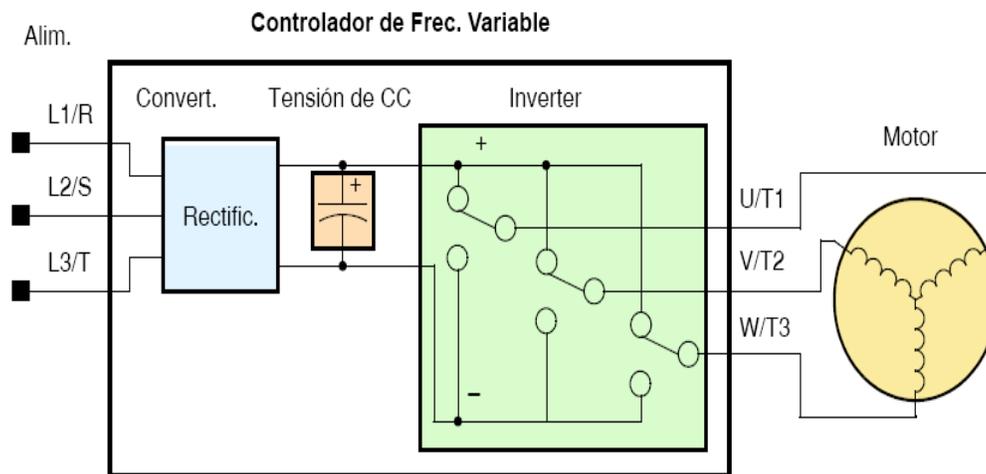


Imagen 1.1 Componentes generales de un variador de frecuencia

En la ilustración de puede observar, grosso modo, como está compuesto internamente un variador de frecuencia. Dependiendo del fabricante, la etapa rectificadora tanto como la inversora, pueden variar con respecto a los elementos de estado sólido que lo conforman.

En una manera más amplia de ver un variador de frecuencia, podemos ver la siguiente imagen, la cual es como internamente un variador estar conformado. En la imagen de arriba solo

se muestran las partes más características de un variador, pero se debe tener en cuenta que no son las únicas partes que conforman al variador, de hecho, este está compuesto por varios elementos que en la figura siguiente se ven.

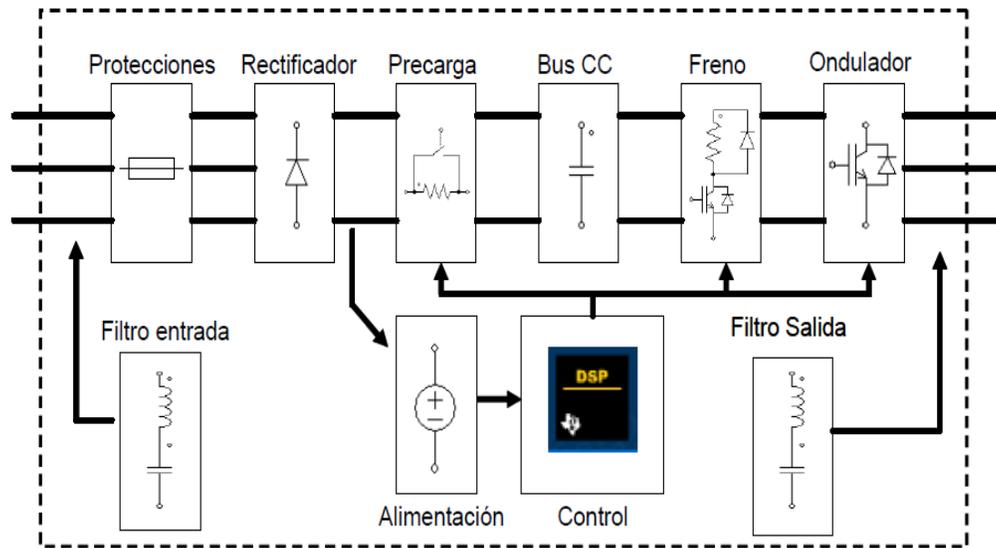


Imagen 1.2 Componentes específicos de un variador de frecuencia

Más adelante en este trabajo, se describirá cada parte que conforma al variador de frecuencia.

1.3 ¿CUÁLES SON LOS BENEFICIOS DE UNA VARIADOR DE FRECUENCIA?

Entre los beneficios que se obtienen al usar variadores de frecuencia en procesos industriales, tenemos que los más importantes son:

1. Ahorro de energía

Por ejemplo si se tiene un motor conectado a un variador, y este motor no necesita ser corrido a su velocidad máxima, entonces se pueden cortar costos en la tarifa de energía al controlar el motor con el drive. Este ahorro en la tarifa de energía, pueden llegar a pagar el variador en cuestión de meses, en pocas palabras la inversión se obtiene en poco tiempo.

2. Vida útil más larga y menos mantenimiento

Como se sabe, a la hora de arrancar los motores estos están sometidos a picos de corrientes que son 6 veces el valor de la corriente nominal. Usando los variadores de frecuencia, podemos evitar estos picos, ya que el variador va hacer que el motor llegue a su velocidad de

operación de una manera gradual, haciendo que el motor no se dañe tanto y evitando mantenimiento.

3. Procesos de control

Los variadores de frecuencia pueden ser programados para que corran el motor a una cierta velocidad, para que paren a cierta posición, o para que apliquen cierta cantidad de torque. La mayoría de los variadores utilizan el control de Volts/Hertz, lo cual significa que permiten un lazo abierto en su operación, pero no permiten una retroalimentación del mismo proceso.

Otros variadores usan otros métodos de control, o poseen entradas que les permite tener una retroalimentación. En un capítulo más adelante se verán algunos de los modos de control más comunes en los variadores de frecuencia.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA

Generalmente un sistema de cualquier variador de frecuencia consta de un motor, un controlador y de una interface.

1. Motor

Normalmente los motores que se hacen controlar con el variador, son motores trifásicos de inducción. Estos motores son los “favoritos” por la industria, debido a su precio con respecto a otros tipos de motores, y también a que pueden ser ocupados para realizar cualquier proceso.

Los motores monofásicos también pueden ser usados, pero los trifásicos son más preferidos con respecto a los monofásicos.

2. Controlador

Los controladores que conforman los variadores de frecuencia, son los elementos de estado sólido. Como se mencionó con anterioridad estos elementos son los encargados de primero convertir la corriente alterna en corriente directa, mediante el uso del rectificador, que puede ser ya sea a diodos o tiristores, o un arreglo de ambos.

Una vez convertida en corriente directa la corriente alterna, es convertida de nuevo en corriente alterna mediante el inversor. Esta sección puede que sea la más importante dentro de un variador de frecuencia ya que provee un mejor factor de potencia, tienen menor distorsión armónica.

Los elementos que conforman los inversores, han estado cambiando, comúnmente estos elementos son los IGBT's. Este tema se verá con más atención en capítulos siguientes.

3. Interface

La interfaz de operación es la que permite hacer poder arrancar y parar el motor, y también poder variar la velocidad. Otras interfaces de operación permiten el cambio de giro del motor (reversa), así como también el cambio entre modo manual como automático. Esta interfaz es comúnmente un panel en el mismo variador el cual nos permite modificar varios parámetros del motor.

También, estas interfaces constan de conexiones para comunicaciones, así como terminales para entradas y salidas (I/O), entre otros tipos de entradas.

1.5 LA OPERACIÓN DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA

En capítulos siguientes, se explicara con mayor atención la operación de un variador de frecuencia, en este apartado solo se verá una simple explicación, de cómo el variador y el motor se comportan cuando se echan a andar.

Cuando un motor se conecta al suministro de voltaje, se presenta una corriente de hasta 6 veces mayor que la corriente nominal. Mientras la carga acelera, el torque baja un poco para luego incrementarse hasta cierto valor, durante este tiempo la corriente que se presenta en el motor es sigue siendo demasiado grande.

Por el contrario, si se usa un variador de frecuencia, este aplicara una pequeña frecuencia y voltaje al motor. Por lo que arrancando el motor a una pequeña frecuencia, evita que grandes corrientes se presenten en el motor. Luego del arranque del variador, tanto la frecuencia como el voltaje son incrementados bajo una razón controlada. Si se hace una comparación del arranque a tensión plena y el arranque con un variador, podemos ver que el torque producido por el primer arranque llega a ser del 150%, mientras que por medio de un variador el torque llega a ser 50%.

Cuando se desea frenar el motor, la frecuencia y el voltaje suministrados al motor comienzan a desacelerar a cierta razón. Cuando la frecuencia se va aproximando a cero, el motor simplemente se apaga, cuando esto pasa una pequeña cantidad de torque se presenta y ayuda a desacelerar la carga un poco más rápido que si el motor fuera simplemente desconectado.

2 ELEMENTOS DE ESTADO SÓLIDO

2.1 ELECTRÓNICA DE POTENCIA

En la electrónica de potencia, como su nombre lo dice se combinan la potencia, la electrónica y el control, el control tiene que ver con las características de estado estable y dinámicas de sistemas de lazo cerrado, la potencia tiene que ver con el equipo que genera la energía eléctrica y la electrónica tiene que ver con los dispositivos y circuitos de estado sólido. La electrónica de potencia es la encargada del estudio de los elementos de estado sólido, por lo que todos los dispositivos que se conformen con estos elementos, la electrónica de potencia es la encargada de su estudio.

En pocas palabras, la electrónica de potencia se puede definir, como las aplicaciones de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica. Esta está basada en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia.

2.2 DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

La electrónica de potencia está basada en el empleo de dispositivos semiconductores que trabajan en conmutación, esto es, dispositivos que actúen como interruptores. Los dispositivos más empleados son los diodos, transistores de potencia y tiristores.

2.2.1 EL DIODO

El diodo está formado de dos terminales, el ánodo y el cátodo. El diodo es un dispositivo semiconductor diseñado para conducir corriente en un solo sentido. Los diodos están diseñados para conducir corriente desde su ánodo hacia su cátodo, y no al revés.

El principio de funcionamiento del diodo es sencillo, cuando se aplica una gran cantidad de voltaje en la dirección conductora, dará como resultado un gran flujo de corriente. Por el contrario si se aplica el voltaje en sentido contrario el flujo de corriente es mínimo (despreciable), pero si sigue aplicando un voltaje inverso, llegará un momento en que el diodo ceda y permitirá el flujo de corriente.

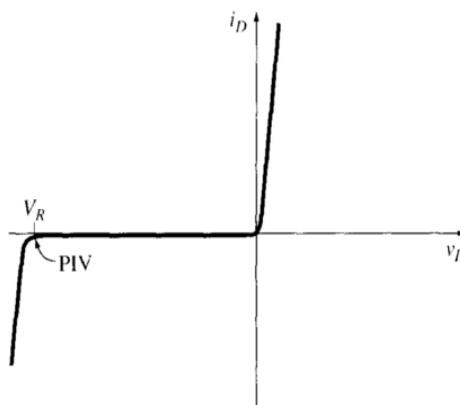


Imagen 2.1 Característica voltaje-corriente de un diodo

2.2.2 EL TIRISTOR

El tiristor, es un dispositivo semiconductor de potencia el cual se puede controlar, de ahí también su nombre SCR (Semiconductor Controlled Rectifiers) o simplemente tiristor. Los tiristores están compuestos de 4 capas semiconductoras. Está conformado por un ánodo, un cátodo y una compuerta.

Los tiristores tienen características similares a las de los diodos cuando funcionan con tensiones negativas. Pero en la región de polarización directa, estos tiristores difieren de los diodos, ya que se presentan tres regiones dentro de esta polarización: la de bloqueo inverso, bloqueo directo y la de conducción.

En la región de bloque inverso, el tiristor se comporta como diodo, bloqueando todo el flujo de corriente hasta que se alcanza el voltaje de ruptura, luego de que se haya alcanzado este voltaje, el tiristor entra en la etapa de conducción, actuando como un diodo común y corriente. Si se aplica una corriente en la compuerta del tiristor, se reducirá la tensión de ruptura directa, y por ende se elimina la región de bloque directo y el tiristor comienza a conducir. Una vez que está en conducción, si se retira la corriente en la compuerta, el tiristor seguirá conduciendo. Para apagarlo, si la corriente de ánodo es inferior a un valor llamado corriente de mantenimiento, el tiristor se apagará.

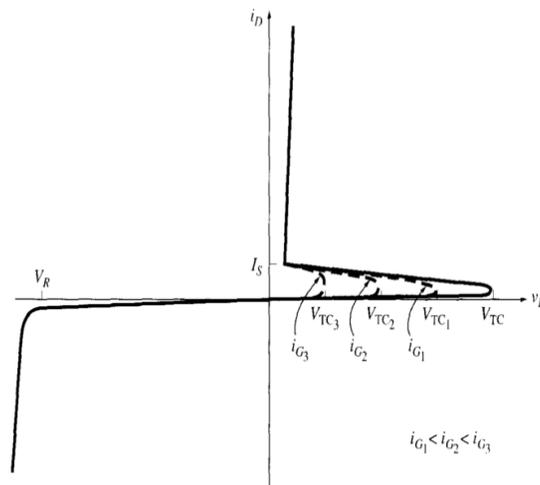


Imagen 2.2 Gráfica del comportamiento de un tiristor

2.2.3 TIRISTOR DE APAGADO POR PUERTA (GTO)

Este tiristor puede pasar al estado de conducción aplicando un pulso positivo de corriente en la compuerta, al igual que los tiristores convencionales, pero tienen una ventaja con respecto a los demás tiristores, que es que se puede apagar este tiristor mediante un pulso negativo de

corriente en su compuerta, el único inconveniente, es que este pulso debe ser excesivamente grande.

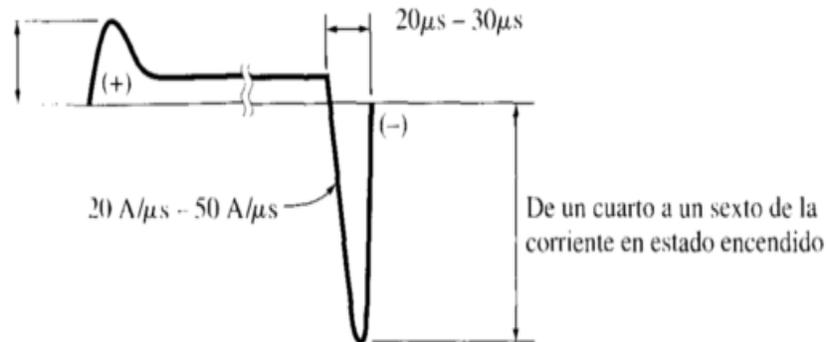


Imagen 2.3 Comportamiento del GTO

2.2.4 TRANSISTOR BIPOLAR DE UNIÓN (BJT)

Este dispositivo está compuesto de tres terminales, formado por dos uniones PN, gracias a esta composición permite usar al transistor como un amplificador de corriente. Los transistores se conforman de tres terminales, las cuales son llamadas, emisor, base y colector. Las terminales colector y emisor se conectan al circuito principal, mientras que la base se toma como electrodo de control, esto se hace para que puedan trabajar en conmutación, es decir, en las zonas de corte y saturación. El transistor es un dispositivo activo activado por corriente, la cual determinará el estado del transistor. Para que el transistor este en conducción la corriente de base debe ser suficientemente grande para llevar al transistor a la zona de saturación, si la corriente de base es cero, entonces el transistor permanece en estado OFF.

2.2.5 TRANSISTOR MOSFET

El transistor de potencia MOSFET (Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Transistor) es un transistor que conmuta muy rápidamente. Este transistor tiene muy poca capacidad de bloqueo por lo que internamente tiene un diodo en sentido inverso. A diferencia del BJT, el MOSFET es un dispositivo controlado por tensión.

2.2.6 TRANSISTOR BIPOLAR DE PUERTA AISLADA (IGBT)

Es un transistor híbrido entre el BJT y e MOSFET, su compuerta es como la de un MOSFET, lo que le da una gran impedancia de entrada y su encendido es por medio de tensión. Como el BJT, él IGBT tiene una caída de tensión.

2.3 CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

Los diversos tipos de convertidores que se usan, se pueden clasificar en función de los tipos de señales que utilizan. Estos convertidores son:

- **Conversión de CA a CC.-** la corriente alterna se transforma por medio de un rectificador en una señal unidireccional, que más tarde se filtra por medio de bobinas y capacitores para obtener una salida aplanada.
- **Conversión de CC a CC.-** se transforma una señal de CC a otra de CC de mayor o menor amplitud. Estos convertidores se les llaman recortadores.
- **Conversión de CC a CA.-** los convertidores que realizan esta operación son llamados inversores. La salida de estos inversores está formado por trozos de ondas rectangulares, que se utilizan para el control de velocidad de motores.
- **Conversión de CA a CA.-** esta conversión se puede realizar de tres maneras
 - **Conversión CA-CC-CA.-** conversión es por medio de un rectificador para convertir la CA a CC y luego hacer pasar la CC por medio de un inversor para obtener un CA.
 - **Conversión CA a CA por control de fase.-** se usa una tensión AC que se conmuta periódicamente una vez cada semiciclo, dando lugar a una CA controlada en fase de la misma frecuencia que la de entrada pero de menor amplitud.
 - **Conversión directa CA a CA.-** se obtiene una frecuencia variable a partir de trozos de una CA de entrada, estos convertidores se denominan cicloconvertidores.

En capítulos siguientes se verán con más detalle estos convertidores, los cuales son indispensables para entender el funcionamiento de un variador de frecuencia.

2.4 EL DISPOSITIVO IDEAL

Como se ha mencionado, los elementos de estado sólido se pueden clasificar en tres familias:

- Diodos
- Transistores
- Tiristores

Como se sabe, no todos estos elementos son perfectos, y por lo tanto presentan pérdidas a la hora de ser conmutados, eso es normal en cualquier dispositivo electrónico, pero se tiene que saber que es lo que debe hacer un dispositivo ideal, para de ahí partir y entender su funcionamiento. Las funciones principales que debe cumplir un dispositivo ideal son las siguientes:

- En el estado de apagado (OFF) no dejar pasar la corriente a través de ellos, bloqueando tanto las tensiones directas como inversas aplicadas
- En el estado encendido (ON) conducir las corrientes permitidas sin que se produzcan caídas de tensión apreciables
- La conmutación encendido-apagado (ON-OFF) o viceversa se debe producir instantáneamente al dar señal al electrodo de control
- La potencia necesaria para actuar (disparar) el interruptor es despreciable

2.5 CONMUTACIÓN

La necesidad de usar dispositivos semiconductores de potencia, está basada en su habilidad de manipular la gran cantidad de energía desde la entrada hasta la salida, con relativamente pérdidas pequeñas. La eficiencia juega un rol muy importante, al manejar grandes cantidades de energía, la cual casi siempre se encuentra disipándose, por lo que la conmutación juega un papel muy importante. Hay dos tipos de conmutación: la natural y la forzada.

La conmutación natural o también llamada conmutación en línea, es el tipo de conmutación que apaga a los semiconductores de potencia por el simple hecho de que cuando se trabaja con CA, la misma forma de onda pasará por cero cada semiciclo, lo que ocasionará que se produzca una desconexión.

Por el contrario cuando estos dispositivos están conectados a una señal de CC, se deben usar circuitos especiales para poder llevar esta corriente a cero, ya que como se sabe la CC es una señal continua que no pasa por cero de forma natural. Hay varios tipos de circuitos que sirven para apagar al dispositivo. Este punto se debe tener en cuenta para el funcionamiento de un variador, ya que en cierta etapa de la conversión de la energía se trabaja con CC.

3 RECTIFICADORES

3.1 ¿QUÉ ES UN RECTIFICADOR?

Como se vio en el capítulo anterior un rectificador es un dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica de CA a CC. Hay muchos circuitos de rectificación que producen varios grados de aplanamiento en su salida de CC.

3.2 TIPOS DE RECTIFICADORES

Existen varios tipos de rectificadores, y estos se pueden clasificar dependiendo el tipo de alimentación, los elementos que utiliza para realizar la rectificación, y si es de onda completa o media onda. En una breve clasificación, los rectificadores pueden ser clasificados en:

- **Por su tipo de alimentación:** en monofásicos y trifásicos
- **Por su onda de salida:** media onda y onda completa
- **Por los elementos que realizan la rectificación:** no controlados (diodos), semicontrolados (diodos y tiristores) y los totalmente controlados (tiristores)

3.3 DIODOS VS. TIRISTORES

Tanto los diodos como los tiristores presentan casi las mismas características, aunque el tiristor es el que tiene características que lo hacen especial. La primera diferencia que se puede apreciar en estos semiconductores es la cantidad de capas semiconductoras que poseen, el diodo tiene dos capas, mientras que el tiristor tiene 4 capas en su interior.

El diodo tiene dos terminales: el ánodo y el cátodo.

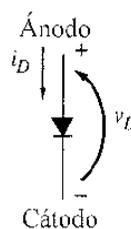


Imagen 3.1 Terminales del diodo

Mientras que los tiristores tiene 3 compuertas: ánodo, cátodo y compuerta.

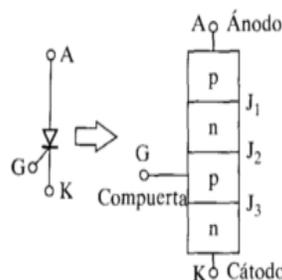


Imagen 3.2 Terminales del tiristor

Esta diferencia entre las terminales de estos dos elementos, es lo que hace que el tiristor sea especial. Como se sabe el diodo permite el paso de la corriente en una sola dirección, cuando esto pasa se dice que el diodo esta polarizado en directa, cuando no deja pasar una mínima corriente (es despreciable) se dice que esta polarizado en inversa. Estas mismas características las posee el tiristor.

Esta tercera terminal llamada compuerta, permite que el tiristor se pueda encender cuando se dese. Dependiendo de la compuerta de cada tiristor se podrá activar dicho elemento, ya que algunos necesitan un pulso de corriente y otros un pulso de voltaje. Una vez que se haya activado el tiristor, este actúa como un diodo común y corriente, se puede retirar el pulso en la compuerta, y el tiristor seguirá encendido, este se apagará solo y únicamente si su corriente baja hasta un nivel llamado corriente de mantenimiento.

Esta activación del tiristor, permite hacer llegar a la carga el valor de voltaje que se dese, puede ser mucho o poco. Es por eso que los tiristores son ocupados en los rectificadores, para así poder hacer llegar a la carga cierto voltaje, esto depende de la aplicación en la cual se este usando este rectificador.

El único inconveniente que se encuentra con los tiristores es que se necesita un circuito externo, el cual permita hacer la activación del tiristor, de ahí en fuera tiene la ventaja que se mencionó anteriormente.

3.4 RECTIFICADORES MONOFÁSICOS

3.4.1 EL RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA

Este rectificador está compuesto por una alimentación monofásica y un diodo. El diodo conduce durante el semiciclo positivo y bloquea el flujo de corriente durante el semiciclo negativo.

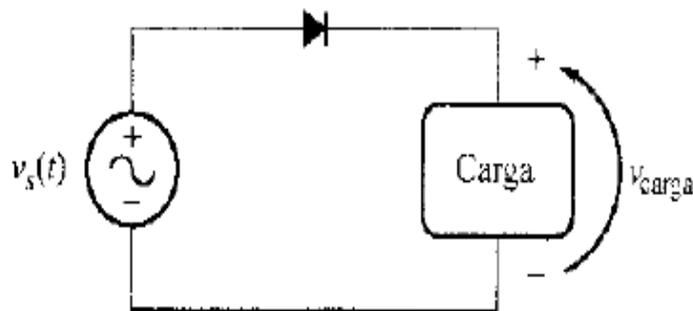


Imagen 3.3 Circuito de un rectificador monofásico de media onda

La forma de onda a la salida del rectificador se puede ver en la imagen siguiente. Como se puede ver solo en el semiciclo positivo, que es cuando el diodo conduce, se muestra este mismo semiciclo. Durante el semiciclo negativo el diodo no conduce, mostrando nada a la salida del rectificador.

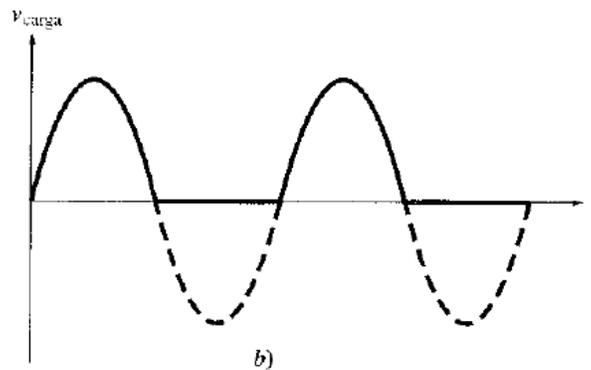


Imagen 3.4 Forma de onda de salida del rectificador monofásico

3.4.2 RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA

Este rectificador a comparación del anterior consta de cuatro diodos. El arreglo se muestra en la siguiente imagen.

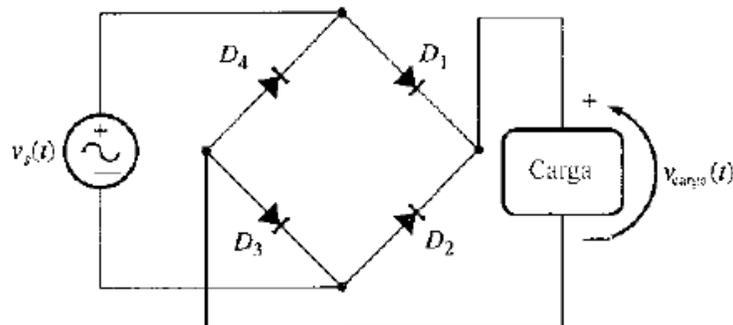


Imagen 3.5 Circuito de un rectificador monofásico de onda completa

Durante el semiciclo positivo los diodos D_1 y D_3 son los que conducen, mientras que los diodos D_2 y D_4 conducirán durante el semiciclo negativo. A comparación del rectificador de media onda, la salida de este rectificador es más plana, y como se ve en la imagen se reflejan los dos semiciclos rectificadas en la carga.

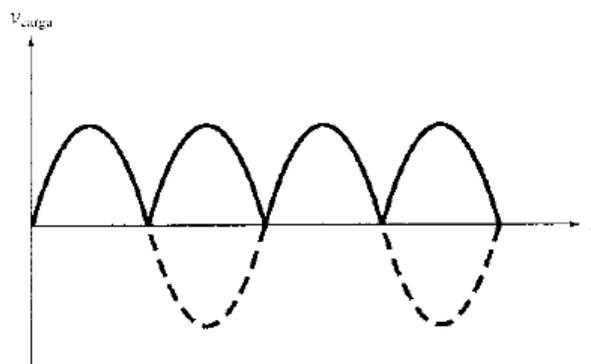


Imagen 3.6 Forma de onda de salida de un rectificador de onda completa

3.5 RECTIFICADORES TRIFÁSICOS

Estos tipos de rectificadores son los más usados, debido que para la generación de energía eléctrica, el sistema trifásico es el que se usa. El principio de funcionamiento de este tipo de rectificadores es muy similar a los monofásicos.

3.5.1 RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA

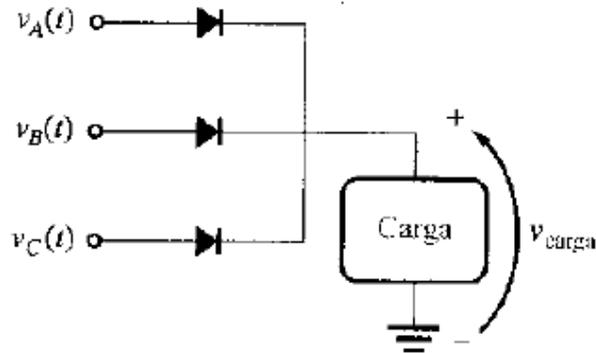


Imagen 3.7 Circuito de un rectificador trifásico de media onda

Como se puede ver en la imagen, se coloca un diodo por cada fase del suministro de alimentación, y la carga se conecta entre el punto común de los diodos (cátodos). El principio de funcionamiento de este rectificador es el siguiente: cada uno de los diodos comenzará a conducir cuando en su ánodo se presente el voltaje más positivo con respecto al cátodo (es decir que estén en polarización directa). En este rectificador cada diodo conduce por un lapso de 120° .

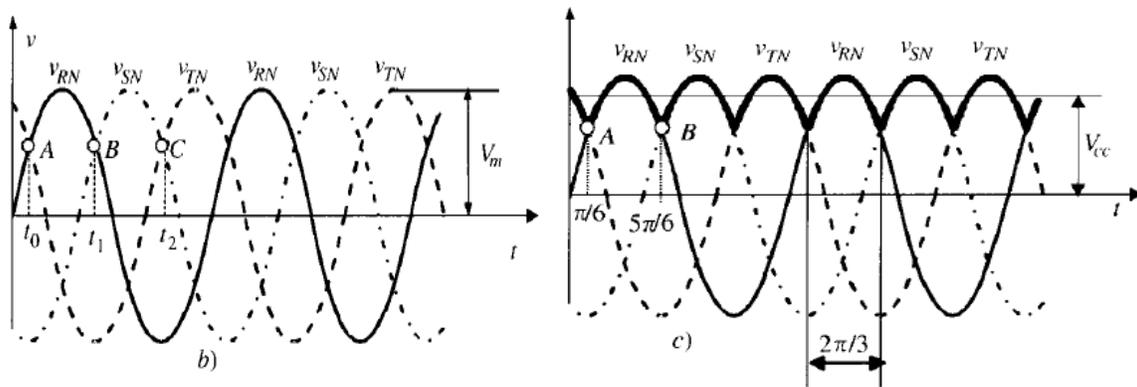


Imagen 3.8 Principio de operación de un rectificador trifásico

En la primera figura podemos observar la onda de los voltajes de entrada, cada uno de ellos desfasados 120° entre si. Y en la segunda imagen podemos ver la onda rectificada por los diodos, solo la parte en negro es la onda rectificada.

3.5.2 RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA

Este tipo de rectificador es el que la mayoría de los variadores de frecuencia contienen, debido a que su forma de onda de salida es la más plana, si se compara con los rectificadores antes mencionados. El arreglo de este rectificador es el siguiente.

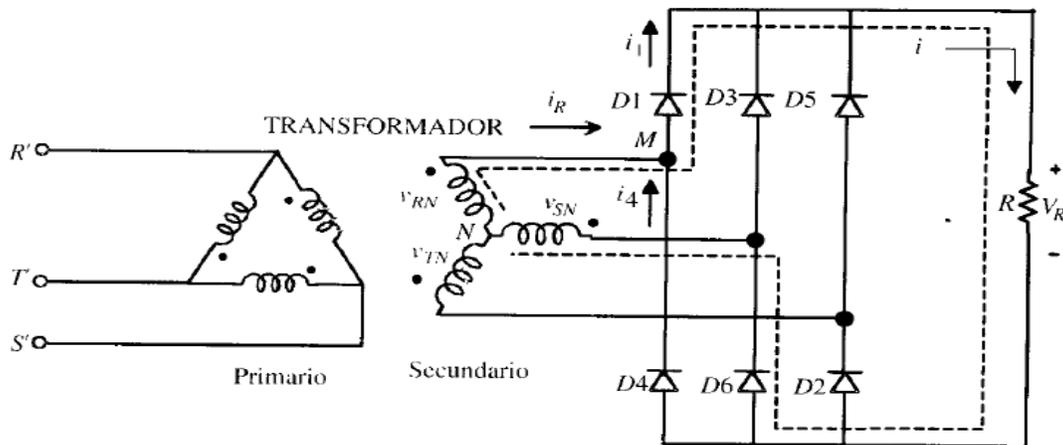


Imagen 3.9 Circuito de un rectificador trifásico de onda completa

Como se puede ver en cada fase del suministro de alimentación van conectados dos diodos, haciendo un total de 6 diodos, tres de estos diodos están conectados para que se polaricen en directa, mientras que los otros 3 en inversa. Un diodo llevará parte del semiciclo positivo a la carga, cuando se presente en su ánodo el voltaje más positivo, una vez en la carga, el voltaje regresa a por el diodo que en su ánodo se presente el voltaje más negativo, y así sucesivamente. En la onda rectificada podremos ver voltajes de línea y no de fase, para entender más este rectificador se muestra la onda de salida, así como el tiempo en que los diodos conducen.

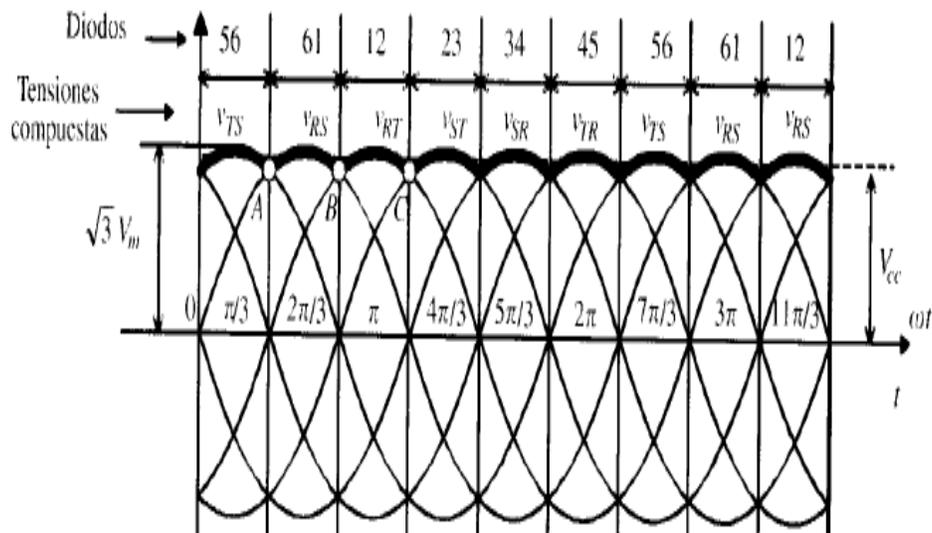


Imagen 3.10 Funcionamiento de los diodos en el rectificador trifásico

3.6 RECTIFICADORES TOTALMENTE CONTROLADOS

A diferencia de los rectificadores no controlados (a diodos), los rectificadores totalmente controlados están hechos a tiristores, que como sabemos a diferencia de los diodos, los tiristores tienen casi las mismas características, con la diferencia de que nosotros podemos hacer conducir al tiristor cuando queramos con el simple hecho de insertar una corriente en su compuerta. Gracias a que podemos hacer disparar el tiristor cuando se dese es por eso que se llaman rectificadores controlados, y a comparación de los diodos, con estos no se tiene un control en su activación, mientras que los tiristores si presentan esta característica.

El principio de funcionamiento de estos tipos de rectificadores es sencillo, y se puede explicar con un rectificador monofásico de media onda. Durante los semiciclos positivos, el tiristor tiene una polarización directa; si se le aplica un corriente a determinado ángulo α durante este semiciclo, el tiristor comenzará a conducir, hasta que el semiciclo negativo de la alimentación se presente en el ánodo del tiristor, haciendo que quede polarizado en inversa y no conduzca, hasta que se presente de nuevo el semiciclo positivo.

Este ángulo " α " es llamado ángulo de disparo, y se puede controlar mediante un circuito externo, este ángulo se aplica de forma síncrona en todos los semiciclos positivos. Se puede variar el ángulo de disparo a gusto, entre más pequeño sea el ángulo, se verá reflejado más voltaje en la carga, y viceversa.

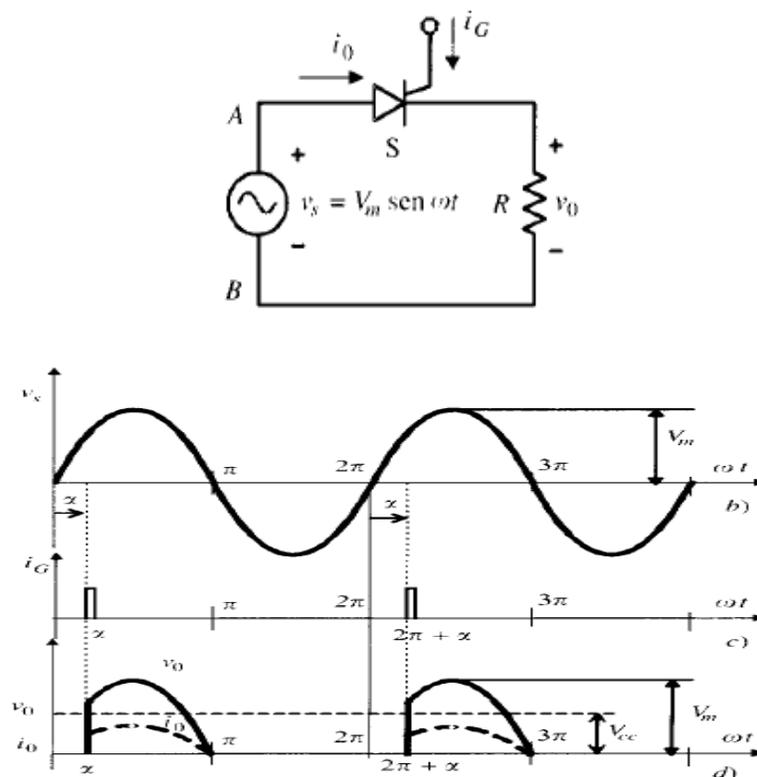


Imagen 3.11 Circuito y ondas de salida de un rectificador completamente controlado

Se debe de decir que la mayoría de los variadores de frecuencia que se encuentran en la industria, contienen rectificadores no controlados, ya que es más fácil controlarlos, ya que no se necesita de circuitos externos, así de que el voltaje en la carga siempre será el mismo, y no variará.

3.6.1 RECTIFICADOR TRIFÁSICO TOTALMENTE CONTROLADO

Este tipo de rectificador tiene el mismo principio de funcionamiento que el rectificador a diodos, cada uno de los tiristores comenzará a conducir cuando estos sean disparados y cuando en su ánodo se presente el voltaje más positivo y en su cátodo se presente el voltaje más negativo. Estos tiristores dejan de conducir cuando en otro tiristor se presenta el voltaje más positivo y el más negativo, y así sucesivamente hasta que se completa un ciclo. Como se ve este tipo de rectificadores trabaja con el mismo funcionamiento que los rectificadores a diodos.

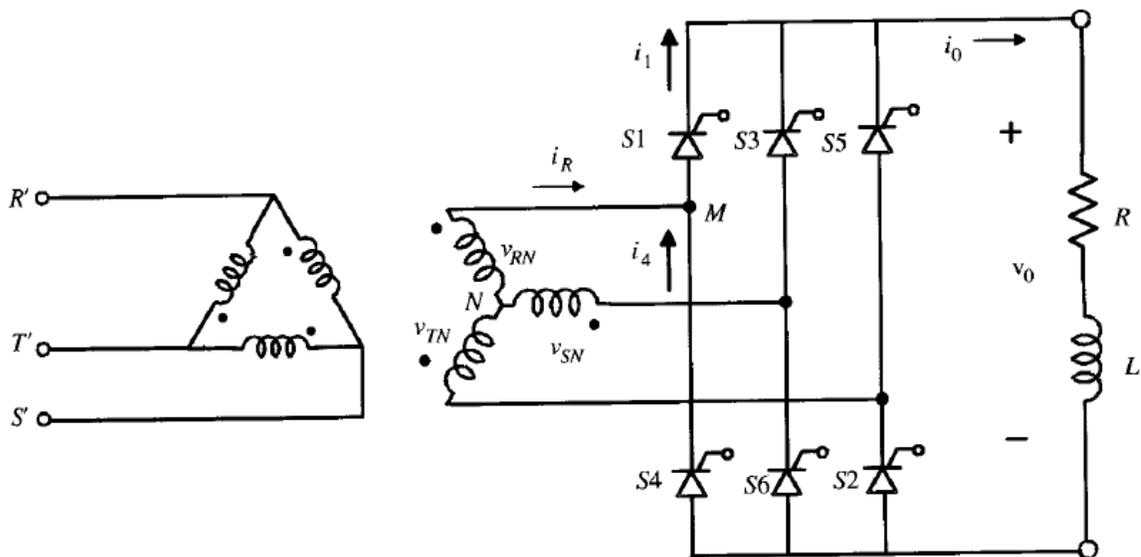


Imagen 3.12 Circuito de un rectificador trifásico totalmente controlado

Se muestra en la imagen un rectificador trifásico a tiristores que alimenta una carga resistiva inductiva. En este ejemplo los tiristores se van a disparar cada 60° , este periodo se va a tomar en cuenta desde el punto A, que es donde normalmente un rectificador a diodos comenzaría a conducir.

En la figura de abajo se ve gráficamente los disparos de los tiristores, como también que tiristores conducen cuando estos son disparados y por cuanto tiempo van a conducir. En este ejemplo se hizo un ángulo de disparo de 0° para que se pudiera ver que este rectificador puede actuar de la misma manera que uno a diodos. Los voltajes que se reflejan en la carga, al igual que el rectificador a diodos son los voltajes de líneas.

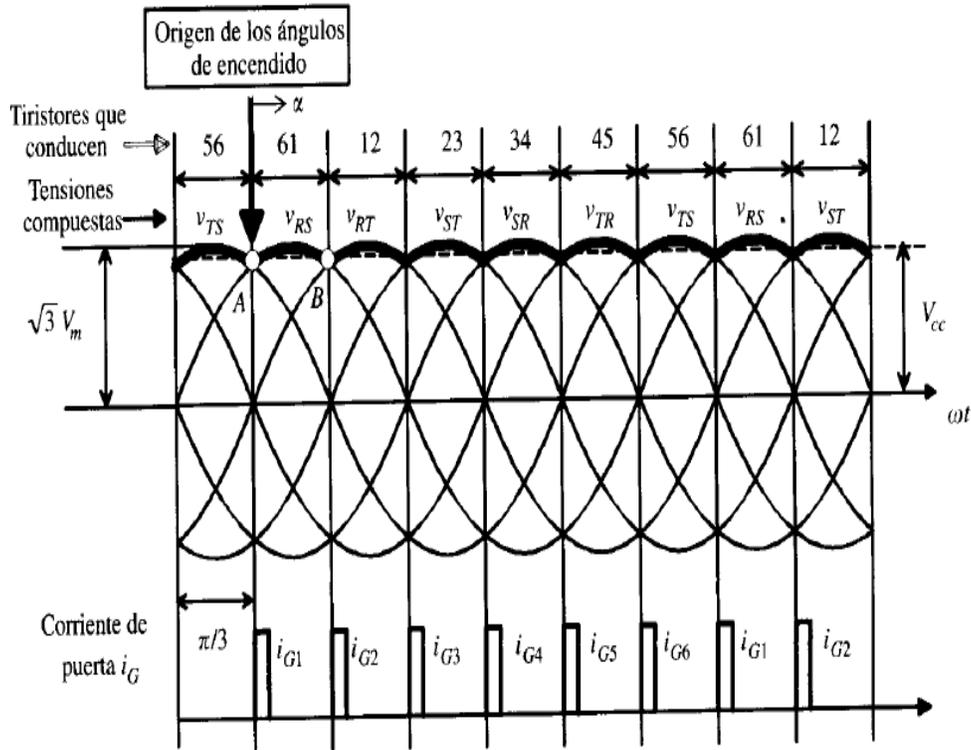


Imagen 3.13 Rectificador totalmente controlado con disparos en sus tiristores a 0 grados

Ahora bien, en la imagen siguiente veremos el mismo rectificador alimentando a la misma carga, pero ahora los tiristores serán disparados a 45° a partir del punto de referencia A. Como se puede ver en la imagen, a partir del punto A los tiristores 5 y 6, son los que conducen, y hasta que pasan los 45° se dispara el tiristor 1 haciendo que ahora los tiristores que conduzcan sean el 6 y 1, y así sucesivamente hasta que se completa un ciclo.

También se muestran las corrientes de los tiristores 1 y 4, y se puede ver que cada uno de estos tiristores conducen por un lapso de 120° , por lo que podemos decir que cada tiristor conduce por un lapso de 120° .

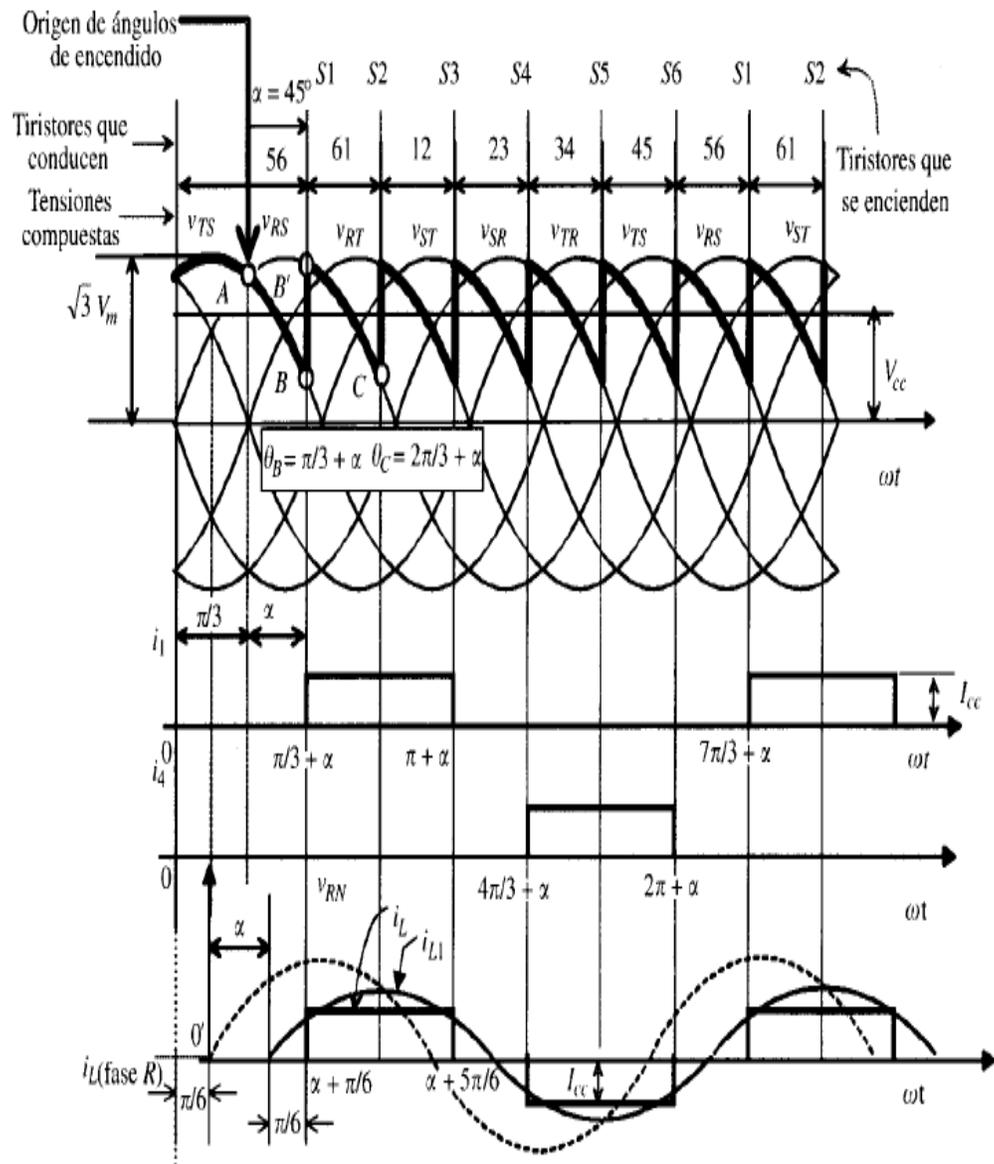


Imagen 3.14 Rectificador totalmente controlado con disparos en sus tiristores a 45 grados

4 INVERSORES

4.1 INVERSORES

Un inversor es un convertidor estático que tiene como propósito el de convertir energía eléctrica de una fuente de tensión o CC en una salida de CA de frecuencia variable. Con esta conversión se puede alimentar una carga de CA, regulando la tensión o frecuencia, o bien ambas.

La tensión obtenida a la salida del inversor tiene la forma de una onda periódica que esta formada por tramos rectangulares o escalonados procedentes de la tensión de CC, lo cual es suficiente para cargas de pequeña o mediana potencia. Si queremos utilizar un inversor para aplicaciones de potencia muy elevadas, es preciso mejorar la onda para que se acerque más a la forma sinusoidal, lo que se consigue utilizando técnicas de conmutación dentro de los interruptores estáticos.

Entre las aplicaciones en las cuales se usan los inversores tenemos que las principales son las siguientes:

- Accionamiento de motores de CA de velocidad ajustable
- Sistemas de ininterrumpida
- Dispositivos de CA que funcionan a partir de una batería
- Hornos de inducción

Este tipo de convertidores de la energía estáticas, es el que ha tenido un crecimiento más rápido.

4.2 TIPOS DE INVERSORES

Al igual que los rectificadores, los inversores se clasifican de acuerdo a varias características. Por ejemplo, por su tipo de conmutación, por su modulación, por su tipo de fuente (es decir, que tipo de fuente es a la que normalmente se van a someter, ya sea una sobrecorriente o un sobrevoltaje). Haciendo una clasificación tenemos que los inversores se dividen en:

- **Por su tipo de conmutación:** conmutación externa o autoconmutados
- **Por su fuente:** inversores de fuente de corriente, inversores de fuente de voltaje
- **Por su tipo de modulación:** modulación por ancho de pulso, modulación delta, modulación delta-sigma, etc.

Tenemos que tener en cuenta que los inversores pueden estar hechos con diferentes tipos de dispositivos semiconductores, los dispositivos más usados son los IGBT's y los MOSFET. Unos presentan ventajas contra otros, pero el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo.

4.3 IGBT'S VS. MOSFET

Estos son los dispositivos que se emplean en los inversores de los variadores de frecuencia, pero la polémica es: ¿Cuál de los dos se debe usar? Hay pequeñas diferencias que se presentan entre estos dos semiconductores, que hacen que tengan ventajas unos sobre otros.

4.3.1 IGBT'S

Este dispositivo semiconductor fue desarrollado a finales de los años 70's, este dispositivo es controlado mediante voltaje y puede ser encendido y apagado mediante el control de este voltaje en su compuerta, tiene una alta impedancia de entrada, su velocidad de conmutación es muy rápida y es apto para altas corrientes. Los IGBT's son aptos para aplicaciones en las cuales se trabaje con voltajes elevados.

Aunque posee todas estas características, el IGBT tiene ciertas limitaciones, estas limitaciones son las que se toman en cuenta para decidirse entre el IGBT o un MOSFET. Estas limitaciones son:

- Su velocidad de conmutación aunque es rápida, es mucho menor que la de los MOSFET
- Debido a su lenta velocidad de conmutación, el IGBT presenta pérdidas debido al efecto "corriente de cola"

Los IGBT's se utilizan debajo de ciertas condiciones, para su operación correcta, estas condiciones son:

- Con frecuencias bajas (menos de 20 Hz)
- Aplicaciones de alto voltaje (mayor de 1000 V)

4.3.2 MOSFET

El MOSFET, tiene casi las mismas características que su rival el IGBT, al igual que él, es un dispositivo que se controla mediante voltaje y puede ser tanto encendido como apagado mediante el control de este voltaje en su compuerta, es capaz de soportar altas corrientes, tiene una alta impedancia en su entrada y a diferencia del IGBT su velocidad de conmutación es mayor.

El MOSFET ha sido desde su desarrollo en dispositivo por excelencia en aplicaciones de bajo voltaje (menor de 300 V) y a su vez son capaces de ser usados en aplicaciones en donde la frecuencia sea demasiada alta.

Los MOSFET's son usados bajo condiciones las cuales les permiten una buena operación, estas son:

- Aplicaciones de alta frecuencia (mayor a 200 Hz)
- En aplicaciones donde la carga varié
- Aplicaciones de bajo voltaje (menor de 300V)

En la siguiente imagen se ve un comparativo en las zonas donde estos dispositivos trabajan normalmente.

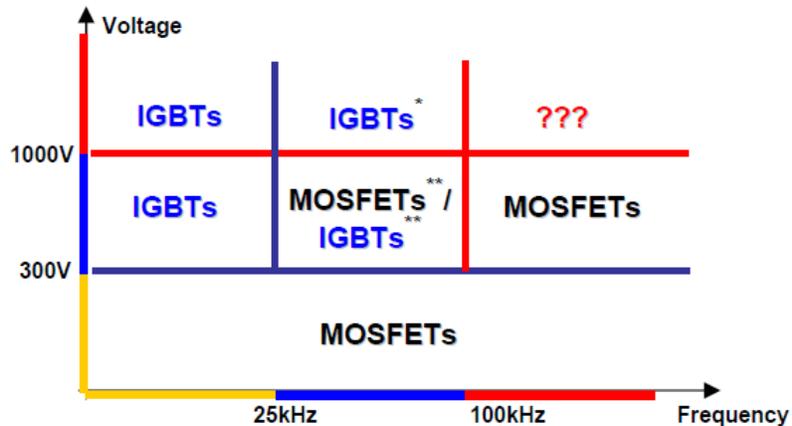


Imagen 4.1 Cuadro comparativo en las aplicaciones de los IGBT'S Y MOSFET'S

Como se puede ver, en aplicaciones de bajo voltaje los MOSFET's son los que dominan, mientras que en aplicaciones de altos voltajes los IGBT's son los más usados.

Como se puede ver estos dos dispositivos presentan características similares y es difícil decidir entre cual de los dos. Esta decisión dependerá de la aplicación a la cual se vayan a someter estos dispositivos. Normalmente los inversores de frecuencia que se fabrican, sus inversores están hechos con IGBT's ya el voltaje que se presenta a la entrada del inversor, varía de entre los 500 y 700 Volts.

4.4 INVERSORES MONOFÁSICOS

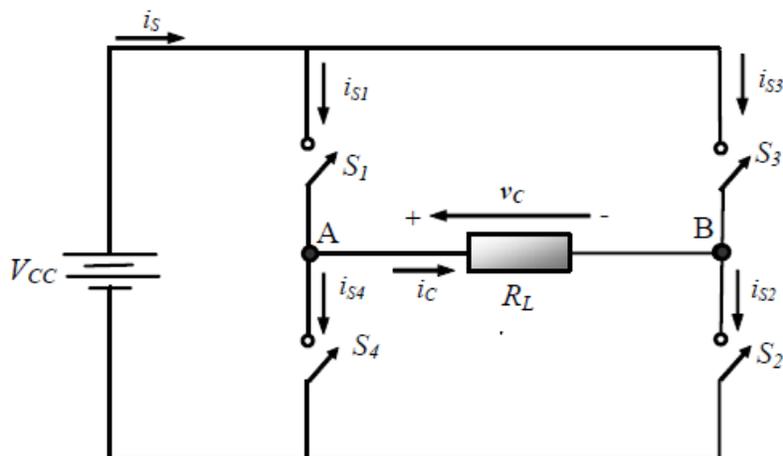


Imagen 4.2 Circuito de un inversor monofásico

El inversor monofásico de puente completo mostrado arriba, consta típicamente de 4 interruptores, que comúnmente son IGBT's y MOSFET's.

El circuito inversor actúa de la siguiente manera; el circuito de control activa a los interruptores para que estos se cierren y abran en determinado tiempo y siempre semuestre ya sea un voltaje positivo, negativo o cero en la carga que se esté alimentando. Los interruptores se activan y desactivan de la siguiente manera:

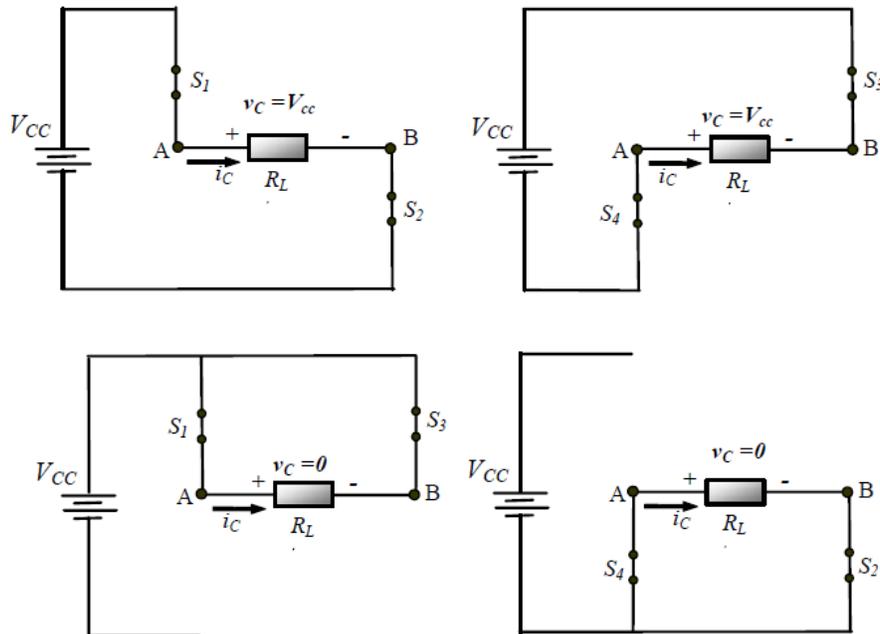


Imagen 4.3 Funcionamiento de un inversor monofásico

Como se ven en las imágenes se puede ver que en la carga siempre se presenta ya sea un voltaje positivo o negativo o un valor de cero. En la primera imagen, los interruptores S_1 y S_2 son los que se cerrarán haciendo que en la carga se presente un voltaje positivo, mientras que en la figura 2 ahora los interruptores S_3 y S_4 son los que se cierran para que se haga presente un voltaje negativo en la carga. Tanto en la figura 3 como en la 4, se puede ver que a la hora de cerrar los interruptores se cierra el circuito sin que se presente ningún voltaje en la carga. En la tabla siguiente se muestran los voltajes que se presentan en la carga cada vez que los interruptores se cierran.

Interruptores cerrados	Tensión de salida v_C
S_1 y S_2	$+ V_{cc}$
S_3 y S_4	$- V_{cc}$
S_1 y S_3	0
S_2 y S_4	0

Imagen 4.4 Relación del voltaje de salida y los interruptores cerrados en el inversor monofásico

4.5 INVERSOR TRIFÁSICO EN PUENTE

Este inversor produce una tensión alterna trifásica a partir de una alimentación de CC.

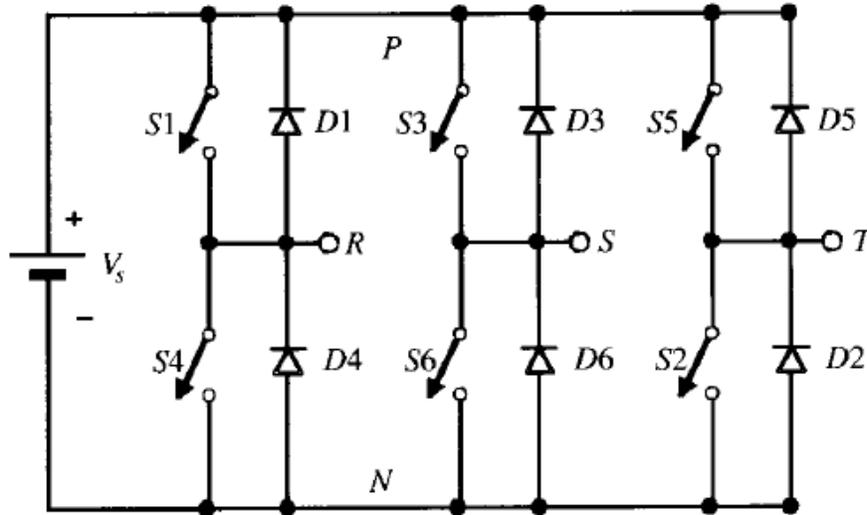


Imagen 4.5 Circuito de un inversor trifásico

Este inversor es esencialmente lo mismo que uno monofásico, solo que se le es añadido 2 ramas más. Cada interruptor es añadido a las terminales negativos y positivos de la fuente, dando lugar a la obtención de una tensión trifásica siempre que los impulsos de disparo de los interruptores se desfasen 120° entre sí y entren en conducción a determinado tiempo.

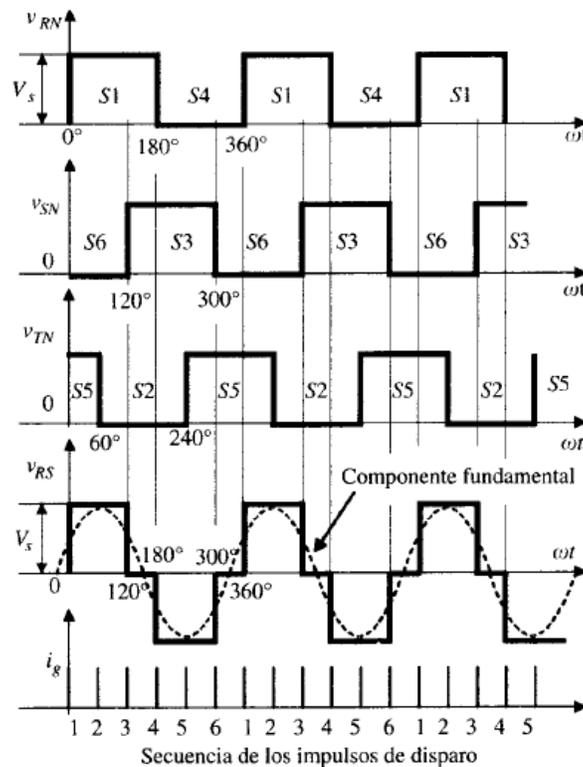


Imagen 4.6 Funcionamiento de un inversor trifásico

En la figura de arriba se muestran los disparos de cada interruptor para obtener un ciclo completo de la tensión de salida. El control de la frecuencia, tenemos que tener en cuenta que está definido por la frecuencia de disparo de los interruptores. Los voltajes V_{SN} , V_{TN} y V_{RN} tienen forma rectangular, y su voltaje máximo tanto como mínimo tienen el valor de la fuente de CC.

Ahora bien, en la figura se muestra la tensión de salida V_{RS} , pero para obtener estas tensiones compuestas de salida, lo único que se tiene que hacer es la siguiente resta, como se muestra:

$$V_{RS} = V_{RN} - V_{SN}$$

$$V_{ST} = V_{SN} - V_{TN}$$

$$V_{TR} = V_{TN} - V_{RN}$$

4.6 CONTROL DE LA TENSIÓN DE UN INVERSOR

En algunas aplicaciones industriales es indispensable tener un control en la salida de tensión del inversor, para así poder alimentar motores. Para esto se necesita variar tanto la frecuencia como el voltaje. Para poder hacer esto, se puede tener un control en la conmutación de los interruptores que conforman al inversor, esto es comúnmente llamado modulación por ancho de pulso (PWM Pulse Width-Modulation), esta modulación por ancho de pulsos se puede clasificar en:

4.6.1 MODULACIÓN POR UN SOLO PULSO

En este tipo de control se produce un pulso rectangular por semiciclo cuya anchura se puede modificar, haciendo modificar los disparos de los interruptores. Para poder realizar esta modulación se requiere de un circuito de control, en el cual se dispondrá de dos tensiones de control, una de las cuales es una referencia de forma rectangular con un valor pico V_R y frecuencia f , que es la misma que el inversor debe producir; esta onda tiene la misión de modular. Mientras que la otra tensión es la portadora y es una onda triangular, como se muestra en la imagen.

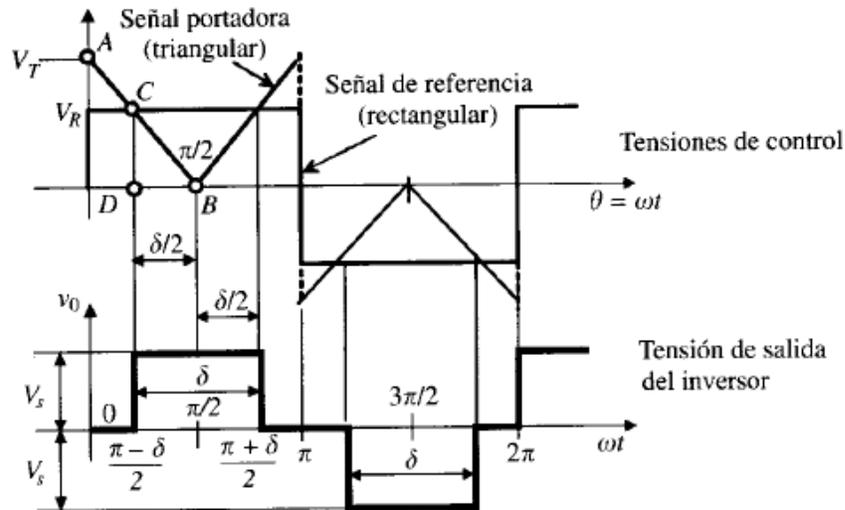


Imagen 4.7 Forma de onda con el inversor modulador a un solo pulso

Los interruptores se abrirán o cerrarán a la hora que estas dos ondas mencionadas se intercepten. Los dos parámetros de control que se usan en este tipo de modulación son:

$$\text{Índice de amplitud: } M = \frac{V_R}{V_T}$$

$$\text{Índice de frecuencia: } N = \frac{f_t}{f}$$

El índice de amplitud se emplea para ajustar la amplitud de la tensión que produce el inversor; mientras que el índice de frecuencia representa el número de impulsos rectangulares que contiene la onda en cada semiciclo.

4.6.2 MODULACIÓN DE IMPULSOS MÚLTIPLES

Una desventaja que presenta la modulación anterior es que se presenta un gran contenido armónico, para hacer una reducción de esto, se debe obtener varios impulsos en cada semiciclo, para poder hacer esto, es necesario aumentar la frecuencia de la onda portadora frente a la onda moduladora. En otras palabras el índice de frecuencia deberá ser mayor.

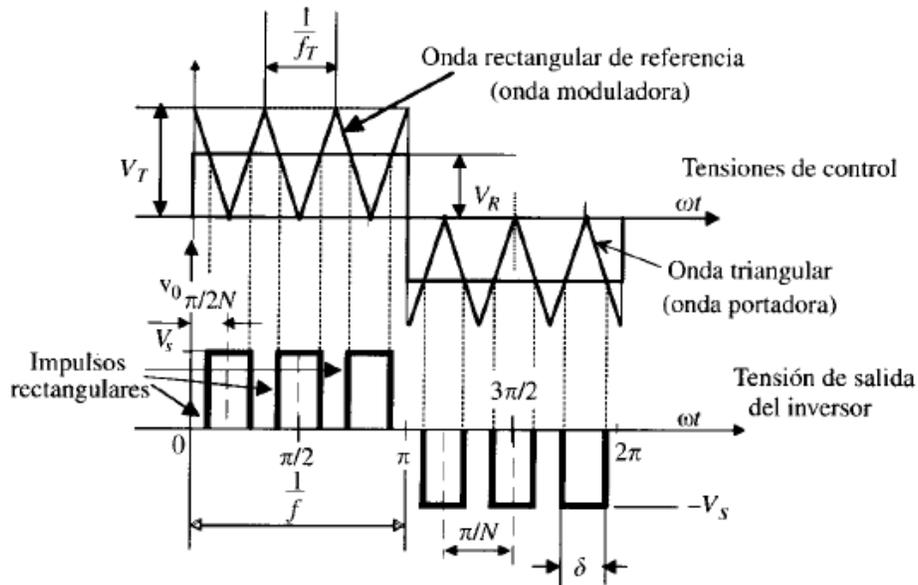


Imagen 4.8 Forma de onda con el inversor modulador de impulsos múltiples

El principio de funcionamiento sigue siendo el mismo, los interruptores van a cerrar y abrir cuando las dos ondas de control se intercepten como se muestra en la figura. A comparación de la primera modulación que se mencionó, se puede ver en la figura que este tipo de modulación nos permite obtener una onda más parecida a una onda senoidal, y que para que se parezca más a una, se deberá incrementar el índice de frecuencia de la onda portadora.

4.6.3 MODULACIÓN SENOIDAL DE LOS IMPULSOS

Este tipo de modulación es que la mayoría de los variadores de frecuencia utilizan, ya que tiene un contenido armónico mínimo. Este tipo de modulación utiliza varios impulsos en cada semiciclo, pero en vez de que el ancho sea igual en todos los picos, esta anchura se hace variar de forma senoidal, de tal modo que los impulsos más cercanos al pico de onda senoidal son más anchos y los cercanos al paso por cero son más angostos.

Esta onda portadora de forma senoidal, tiene cierto valor pico y una frecuencia que determinará la frecuencia que debe producir el inversor.

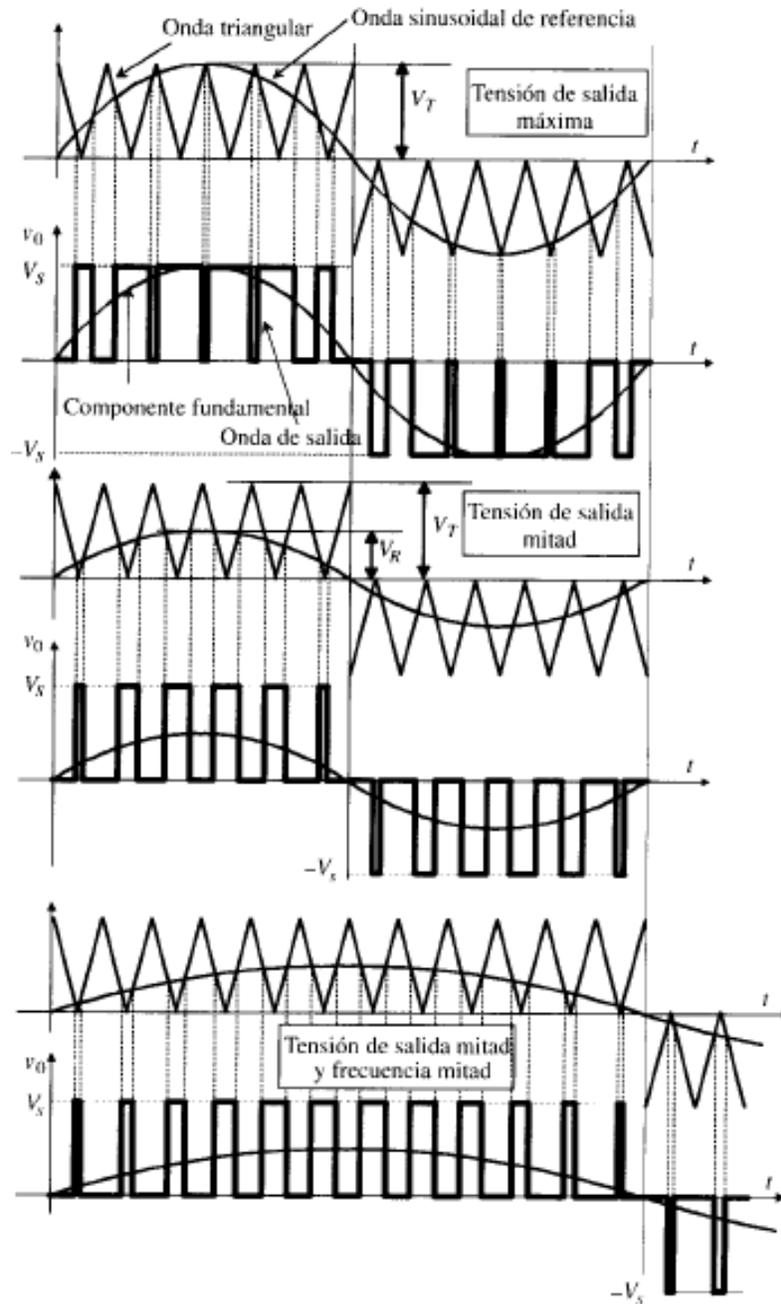


Imagen 4.9 Forma de onda con el inversor de modulación senoidal

En los dibujos mostrados se pueden apreciar varias configuraciones de este tipo de modulación, cada una de estas modulaciones tiene un índice de frecuencia de 6. En cada una de las configuraciones se mantiene el principio de funcionamiento, cada vez que se cruzan estas dos ondas de control se hacen disparar los interruptores.

En el caso de la primera imagen, podemos ver que el índice de frecuencia de la onda senoidal es de 1, y por ello la tensión de salida tiene pulsos anchos y la componente fundamental

de esta tensión representa la tensión más elevada que puede producir el inversor. En la segunda composición la onda senoidal se ha reducido a la mitad, por lo que al final del inversor se consigue una onda fundamental cuya amplitud es la mitad que en el caso anterior. En caso de la tercera imagen, se ha considerado una onda senoidal de amplitud mitad y de frecuencia mitad, y es por ello que los impulsos en cada semiciclo se han duplicado, dando lugar a una componente fundamental mitad de amplitud así como de frecuencia.

5 COMPONENTES EXTRAS

5.1 COMPONENTES EN UN VARIADOR

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, las partes principales de un variador es la rectificación y la inversión, pero esto no quiere decir que sean las únicas partes de un variador, de hecho al principio de este trabajo se mostró una imagen en la cual se pueden apreciar todas las partes que componen a un variador de frecuencia. Estas partes se detallaran en este capítulo.

5.1.1 Variador De Frecuencia

En sí un variador de frecuencia es un dispositivo diseñado para controlar la velocidad de un motor, convirtiendo para ello la tensión alterna de la red, de amplitud y frecuencias fijas, en una tensión alterna de amplitud y frecuencia variables.

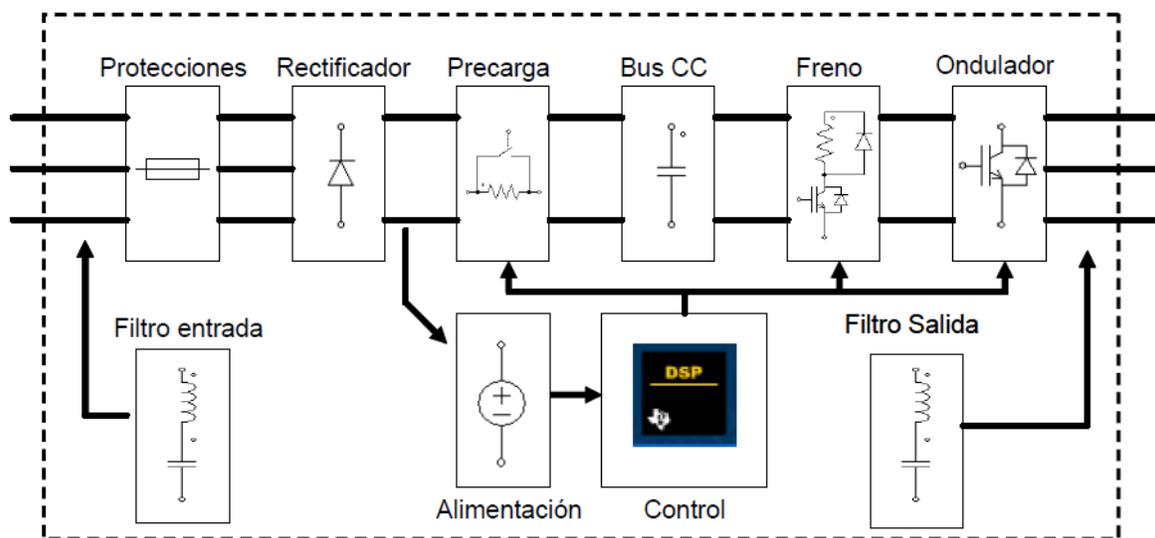


Imagen 5.1 Elementos de un variador de frecuencia

En esta figura se puede apreciar los componentes que integran al variador de frecuencia, esta topología es la que muchos fabricantes usan en sus variadores, puede haber modificaciones en cada parte de la composición pero esta topología es la que los fabricantes siguen.

5.1.2 FILTROS DE ENTRADA

La gran mayoría de los variadores de frecuencia incorporan por defecto un filtro de entrada que permite instalarlos sin más añadidos en entornos domésticos, comerciales o industriales. La función de estos filtros es la de reducir los armónicos de la corriente consumida por el rectificador que puede afectar negativamente a la instalación.

5.1.3 PROTECCIONES

Las protecciones de entrada del variador consisten generalmente en fusibles de protección contra sobrecorrientes y unos capacitores que protegen al equipo contra impulsos de tensión conducidos por la red. Algunos otros equipos incorporan protecciones contra fallo de fase, los cuales permiten detectar desequilibrio en la red de alimentación. Estos tipos de protecciones funcionan generalmente de acuerdo a un valor determinado, si alguna de las fases que alimenta al equipo cae por debajo de un valor previamente determinado, esta protección entrará en funcionamiento y marcará un error en el variador de frecuencia.

5.1.4 EL RECTIFICADOR

Como se mostró en capítulos anteriores el rectificador es un convertidor de energía eléctrica, el cual convierte la CA en CC. El rectificador es parte esencial de un variador de frecuencia. La salida de un rectificador no va conectada directamente a una carga resistiva como se mostró con anterioridad, la salida del rectificador va conectada al bus de CC, por lo que es correcto decir que la salida de un rectificador está conectado a un bus de CC, el cual esta compuesto ya puede ser por una inductancia en serie o un capacitor en paralelo, este punto se verá un poco más adelante.

5.1.5 EL BUS DE CC

El bus de CC tiene dos funciones, la primera es la de filtrar el rizado de la tensión de salida del rectificador, y la segunda es la de actuar como almacén de energía para desacoplar al inversor de la red. Normalmente, esta energía se almacena en forma de tensión mediante capacitores en paralelo para incrementar la capacidad total. Pero al usar capacitores demasiados grandes, aumentará los armónicos generados por el rectificador, por el cual se busca usar unos capacitores de baja capacidad para evitar este efecto. Otra manera de evitar estos armónicos es usar un circuito LC.

5.1.6 EL CIRCUITO DE PRECARGA

El circuito de precarga es indispensable para cualquier variador de frecuencia. Cuando se conecta el equipo a la red, la corriente de pico de los capacitores, inicialmente descargados, es tan elevada que fundiría los fusibles y podría dañar al rectificador.

El circuito de precarga es el encargado de limitar esta corriente de carga de forma que quede en valores aceptables que no dañen al rectificador ni al equipo. La forma más común que los fabricantes han optado por usar es la de conectar una resistencia en serie con los capacitores, que se cortocircuita una vez que los capacitores están cargados. A este circuito de precarga también se le es conocido como circuito snubber.

5.1.6.1 CIRCUITOS SNUBBER

Los circuitos snubber son circuitos de protección, los cuales pueden actuar cuando se presenta una alta derivada de tensión ($\frac{dv_{ak}}{dt}$) o una alta derivada de intensidad ($\frac{di}{dt}$). Es por esto que los circuitos snubber se pueden clasificar en dos:

- Snubber de apagado, el cual se encarga de minimizar grandes sobrecargas de voltajes
- Snubber de encendido, el cual minimiza grandes sobrecargas de corriente

5.1.7 EL CIRCUITO DE FRENADO

Los rectificadores que generalmente incorporan los variadores de frecuencia, trabajan únicamente en un cuadrante de manera que cuando el motor trabaja como freno o generador, la energía entregada por el se acumula en el bus de CC causando que la tensión del mismo aumente. Esta tensión no puede aumentar indefinidamente, ya que los capacitores tienen cierto límite. El circuito de frenado actúa por el umbral disipando la energía que no puede absorber el bus de CC sobre una resistencia. En pocas palabras este circuito es una protección contra el aumento de tensión.

5.1.8 EL INVERSOR

Como se describió en capítulos anteriores, este dispositivo hace la función inversa del rectificador, convirtiendo la señal de tensión de CC a una de CA. A partir de esta tensión se generarán en el motor unas corrientes senoidales que permitirán el control de la velocidad de giro del motor. Como se vio en el capítulo de los inversores, el control de la tensión para alimentar al motor es muy variado y tiene las ventajas de que con una elevada frecuencia de conmutación, más será el aprovechamiento de la energía, a su vez que se hace un óptimo uso del bus de CC.

Estas ventajas del inversor son parte gracias a los avances que se han presentado en los elementos de estado sólido que se usan en estos inversores.

5.1.9 FILTRO DE SALIDA

Los filtros de salida están diseñados para realizar tres funciones principales: la primera es filtrar la tensión para eliminar los armónicos de alta frecuencia; en segundo lugar, hay llamadas inductancias de línea que se instalan generalmente cuando la longitud de los cables es considerablemente larga. Y finalmente hay filtros que se instalan en los bornes del motor que se encargan de minimizar las sobretensiones y evitar el envejecimiento del dieléctrico.

5.1.10 CONTROL

El control, es lo que se puede decir el cerebro del equipo, es el que se encarga de realizar las funciones de control de velocidad y par, retroalimentación y adaptación de las variables analógicas del equipo, del control y protección de los elementos de potencia y también se encarga de las comunicaciones.

En el capítulo siguiente se tomará en cuenta los distintos tipos de control con los que los variadores de frecuencia operan.

6 ARRANQUE Y CONTROL DE MOTORES

6.1 INTRODUCCIÓN

Los motores de inducción no presentan problemas para su arranque, se puede echar a andar simplemente conectado el motor a la red, sin embargo, hay buenas razones para no hacerlo así, ya que la corriente de arranque requerida puede causar una caída en el voltaje del sistema de potencia. Esta corriente puede depender dependiendo de la potencia nominal del motor, normalmente el valor de la corriente de arranque es de hasta 6 veces el valor de la corriente nominal, es por eso que para evitar daños al equipo, tanto los arranques como el control son muy importantes para mantener el buen funcionamiento del motor.

Se debe tomar en cuenta que una vez arrancado el motor, se necesita un control el cual nos permita saber la rotación del motor, por lo que también se tomará los tipos de control que los variadores de frecuencia tienen internamente.

6.2 TIPOS DE ARRANQUE

Hay varios tipos de arranque para motores de inducción, hay desde arranques sencillos, hasta arrancadores sofisticados que presentan ciertas ventajas con respecto a los arranques que se usaban anteriormente. Es decir este arrancador sofisticado, es un arrancador suave, un variador de frecuencia.

6.2.1 ARRANQUE CON AUTOTRANSFORMADOR

Ya se mencionó arriba, que cuando se conecta el motor a la red de alimentación se presenta una corriente que es casi 6 veces mayor que la corriente nominal, para reducir esta corriente, se hace reducir el voltaje en terminales del motor durante el arranque, usando autotransformadores.

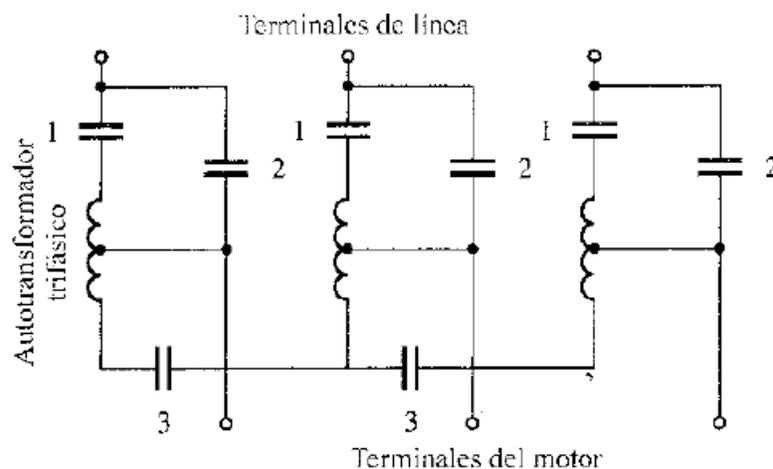


Imagen 6.1 Arranque por autotransformador de un motor

Durante el arranque los contactos 1 y 3 están cerrados y suministran un voltaje bajo al motor. Una vez que ha tomado la velocidad, se abren estos contactos y se cierran los contactos 2, que permiten la aplicación del voltaje pleno al motor.

6.2.2 ARRANQUE A VOLTAJE PLENO

La operación de este arranque es sencillo, cuando se presiona el botón de arranque, la bobina M se energiza y cierra los contactos normalmente abiertos M_1 , M_2 y M_3 , a la hora de cerrarse se aplica potencia al motor de inducción y este arranca. El contacto M_4 se cierra también cortocircuitando el interruptor de arranque y permitiendo que el motor siga girando hasta que se aprieta el botón de paro, el cual va a desenergizar la bobina.

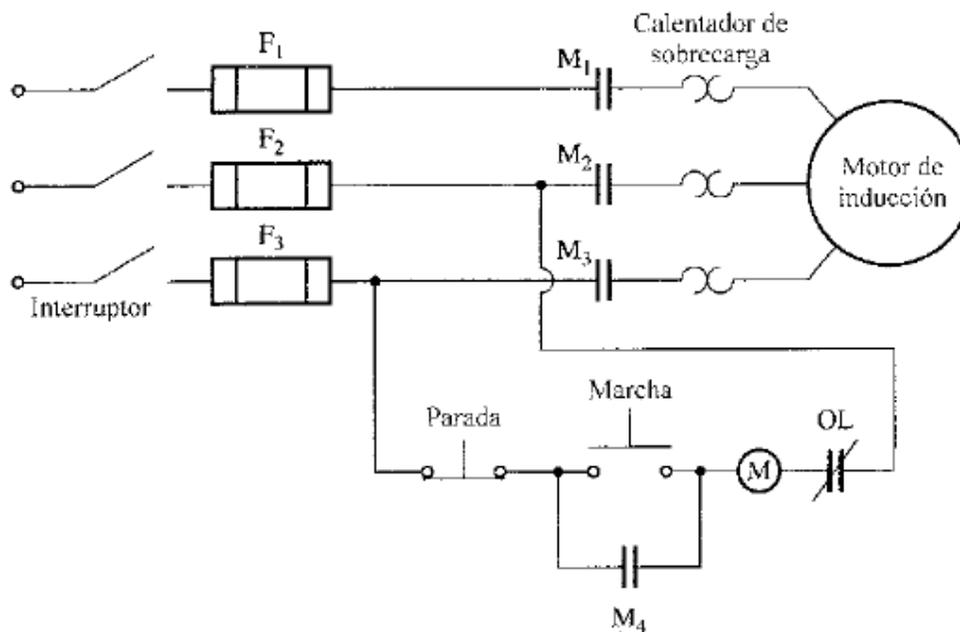


Imagen 6.2 Arranque a voltaje pleno de un motor

6.2.3 ARRANQUE CON RESISTENCIAS

Este tipo de arranque es similar al arranque a voltaje pleno, lo que hace que se diferencien ambos es que en este arranque, se usan resistencias las cuales reducen el flujo de corriente de arranque. El diagrama de este arranque se muestra a continuación.

Este diagrama es similar al anterior, en este diagrama podemos ver que los relevadores 1TD, 2TD y 3TD, son en sí relevadores de tiempo en atraso, es decir, que cuando se energizan, estos no cierran sus contactos inmediatamente, si no que pasa cierto tiempo para que esto pase.

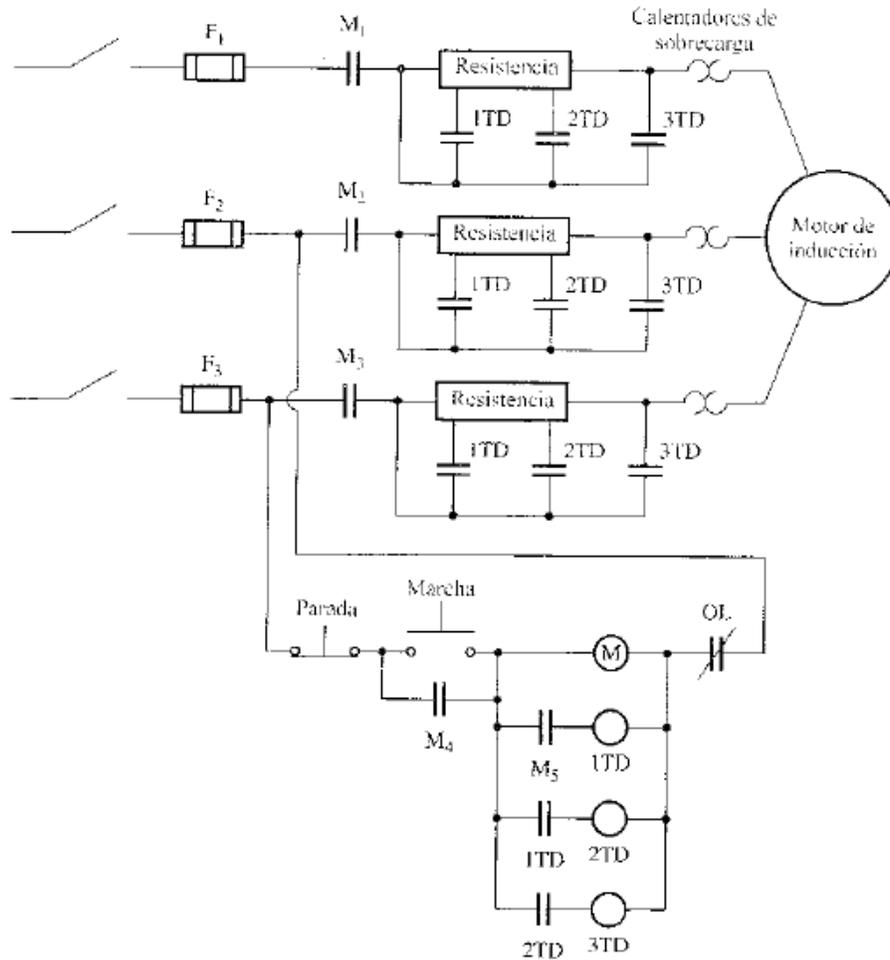


Imagen 6.3 Arranque por resistencias de un motor

El relevador 1TD, se energiza cuando los contactos de M se cierran, pero ya que este relevador es un timer, pasa cierto tiempo hasta que se cierran los contactos de 1TD. Durante este tiempo el motor acelera parcialmente y la corriente de arranque declina un poco. Pasado el tiempo se cierran los contactos de 1TD, haciendo que se cortocircuite parte de la resistencia, a su vez se energiza el relevador 2TD, luego del retardo del relevador 2TD, se vuelve a cortocircuitar parte de la resistencia y energizando el relevador 3TD, una vez que se cierran los contactos de 3TD, la resistencia queda fuera del circuito y el motor acelera.

6.2.4 ARRANQUE POR CONMUTACIÓN ESTRELLA-DELTA

Este tipo de arranque solo se puede hacer con motores que puedan operar con la conexión en estrella con la tensión en la red. Primero el motor se conecta en estrella en el arranque para luego pasar a la conexión delta cuando está en funcionamiento. Todo este cambio de conexiones se hace mediante contactores

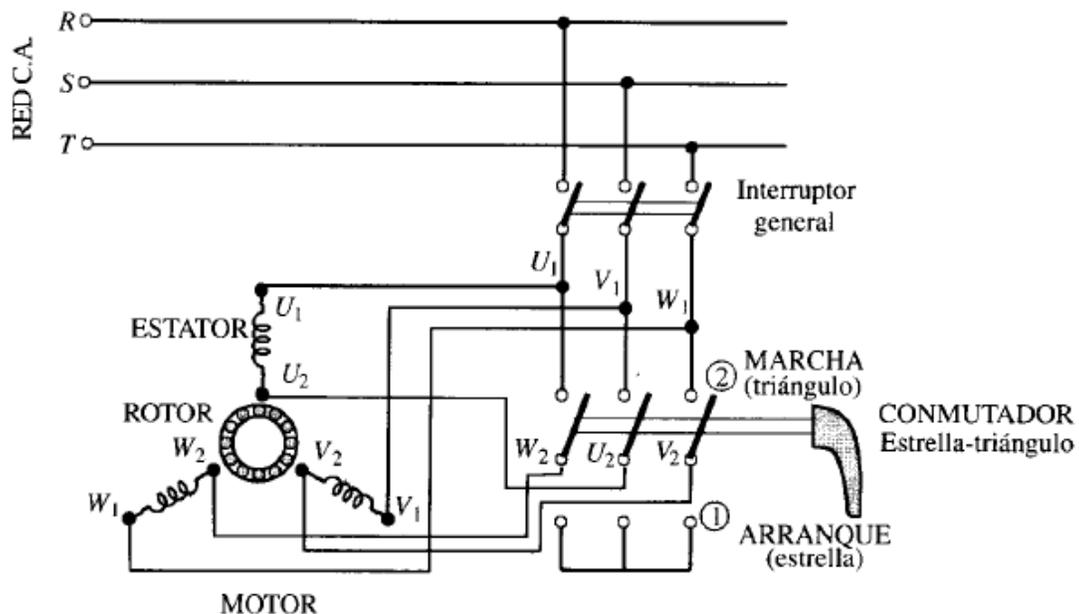


Imagen 6.4 Arranque por conmutación estrella-delta

El principio de operación de este arranque es el siguiente, en la imagen se puede apreciar un conmutador, el cual en la posición 1 se emplea para el arranque y conecta los devanados en estrella, haciendo que el estator reciba la alimentación por V₁, U₁ y W₁ y el conmutador puentea las terminales V₂, U₂ y W₂. Una vez que la máquina alcanza una velocidad estable el conmutador pasa a la posición 2 haciendo que la máquina quede en una conexión delta.

En este tipo de arranque la corriente de arranque en estrella es la tercera parte de la corriente de arranque en delta.

6.3 CONTROL DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR DE INDUCCIÓN

La velocidad sincrónica de un motor de inducción está dada por la fórmula de:

$$n = \frac{120 * f}{p}$$

Por lo que viendo esta fórmula está más que claro que para poder variar la velocidad en un motor de inducción se tiene que variar ya sea el número de polos del motor o la frecuencia eléctrica.

En la actualidad los variadores de frecuencia, como su nombre lo dice, hacen variar la frecuencia, ya que es una variable mucho más fácil de maniobrar que los polos de un motor, por lo que estos variadores emplean ciertos métodos de control que hacen variar la frecuencia.

6.3.1 CONTROL DE LA VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DE LA FRECUENCIA

Como se mostró en la fórmula anterior, el cambio de la frecuencia afectará directamente a la velocidad del motor. La velocidad síncrona del motor en condiciones nominales se le conoce como velocidad base, los variadores de frecuencia pueden controlar dicha velocidad desde un rango de 5%, o hasta el doble de esta velocidad.

Sin embargo, si se quiere trabajar con una frecuencia baja, es necesario hacer reducir el voltaje aplicado a las terminales del estator para tener una buena operación. Este voltaje deberá disminuir linealmente conforme a la frecuencia, esto se debe a que si se mantiene el voltaje constante y se hace variar la frecuencia, se presentarían en el motor, corrientes de magnetización demasiado altas; al hacer variar estas dos variables se contrarresta el efecto de estas corrientes.

Al hacer variar el voltaje y la frecuencia, el flujo en el motor permanece constante, lo que hace que se presente un siempre un par alto. En la imagen siguiente se ven las curvas características cuando la frecuencia está por debajo del valor nominal y el voltaje se hace variar linealmente con respecto a la frecuencia.

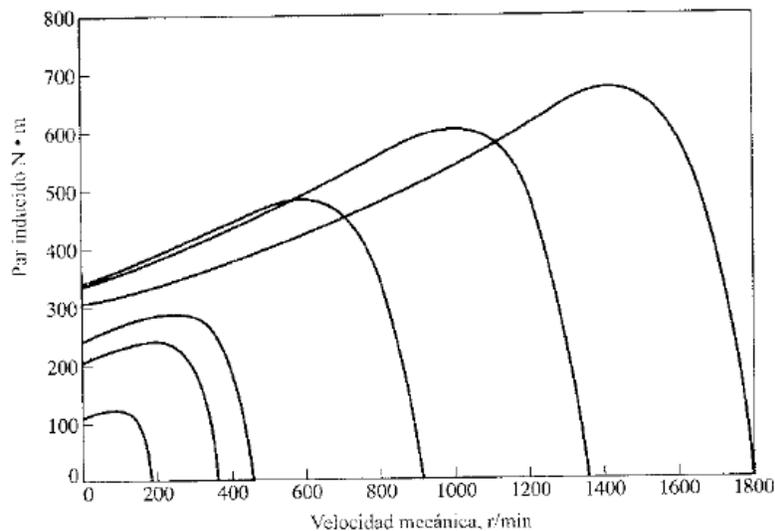


Imagen 6.5 Relación del par de un motor con su velocidad

Por el contrario, si se varía la frecuencia por encima del valor nominal, el voltaje que se aplica al estator permanece constante, en la imagen se muestra las curvas características al variar la frecuencia por encima de su valor nominal y el voltaje permanece lineal. Este tipo de control es el preferido por los variadores de frecuencia.

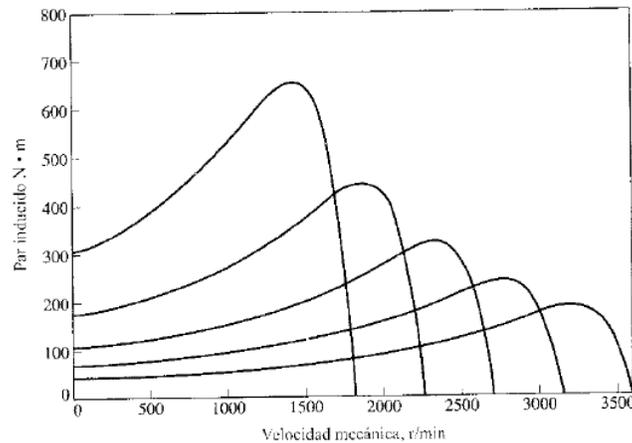


Imagen 6.6 Relación del par de un motor con una velocidad mayor a su velocidad nominal

6.3.2 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DE VOLTAJE DE LÍNEA

El par desarrollado por un motor de inducción es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, por lo que la velocidad del motor puede ser controlada en un cierto rango limitado, variando el voltaje de línea.

6.3.3 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DE RESISTENCIA DEL ROTOR

También es posible cambiar la curva par-velocidad, insertando resistencias extras en el circuito rotor de la máquina. Al insertar estas resistencias del rotor, variará la velocidad de operación del motor. Sin embargo, al insertar estas resistencias hace que baje la eficiencia de la máquina.

6.4 MÉTODOS DE CONTROL

El control como se sabe es una parte fundamental en cualquier proceso, por lo que en los variadores de frecuencia el control que tiene que tener dicho variador hacia el motor es indispensable para una eficiencia óptima. Comúnmente hay varios métodos de control que los variadores poseen en su interior. Entre los métodos de control que los variadores poseen hoy en día está el control escalar y el control vectorial.

6.4.1 CONTROL ESCALAR

Como se vio anteriormente la manera más sencilla para variar la velocidad de una máquina síncrona es mediante la variación de su frecuencia de alimentación que llega al estator, sin embargo tenemos que tener en cuenta que el flujo magnético del entrehierro es directamente proporcional a la f.e.m. e inversamente a la frecuencia. Por lo que si se hace variar la frecuencia el flujo magnético aumentará y se producirán corrientes de magnetización.

Es por eso que se debe mantener una relación voltaje/hertz para que no se produzcan estas corrientes y así no afectar al motor. Este control escalar recibe su nombre ya que controla la magnitud del flujo magnético.

Este control escalar mantiene constante esta relación y al mantener esta relación constante, no importa que tanto se varié la frecuencia por debajo del valor nominal de la frecuencia, al momento que se varié la frecuencia el voltaje también se modificará directamente proporcional, haciendo que el par que se presente en cualquier frecuencia de operación por debajo del valor nominal sea constante; haciendo que se tenga una buena regulación en la velocidad del motor.

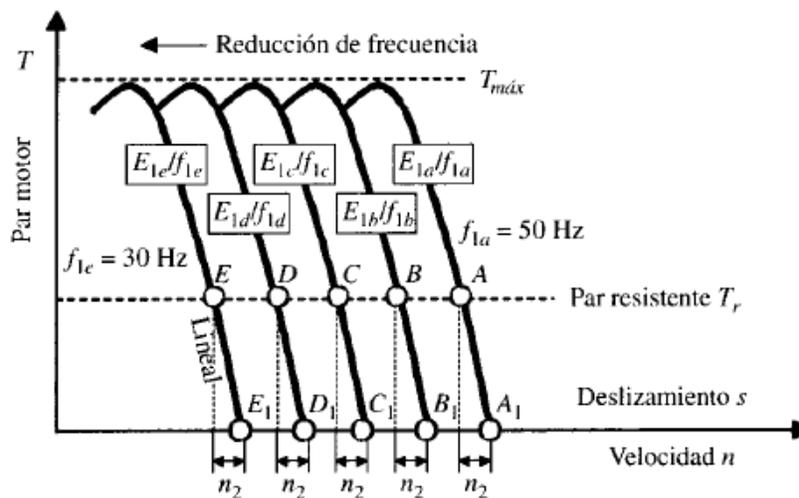


Imagen 6.7 Control escalar de un motor

Para poder llevar a cabo este control se necesita de dos convertidores electrónicos, un rectificador no controlado (o controlado) y un inversor de conmutación forzado, mencionado anteriormente el funcionamiento de un rectificador y de un inversor, sabemos que a la salida del inversor tenemos una tensión variable, así como su frecuencia. Por encima de sus valores nominales, este control no se puede realizar, no se puede llevar a cabo la relación volts/hertz, ya que obligaría a aumentar la tensión nominal. Haciendo esto tenemos que el flujo magnético disminuye, es decir, el par disminuye

6.4.1.1 CONTROL ESCALAR CON RETROALIMENTACIÓN

Cuando se necesita de un control más preciso de la velocidad, se emplea una retroalimentación que incorpore una medida de la velocidad del motor. En la figura siguiente se muestra un diagrama de un variador de frecuencia con su retroalimentación.

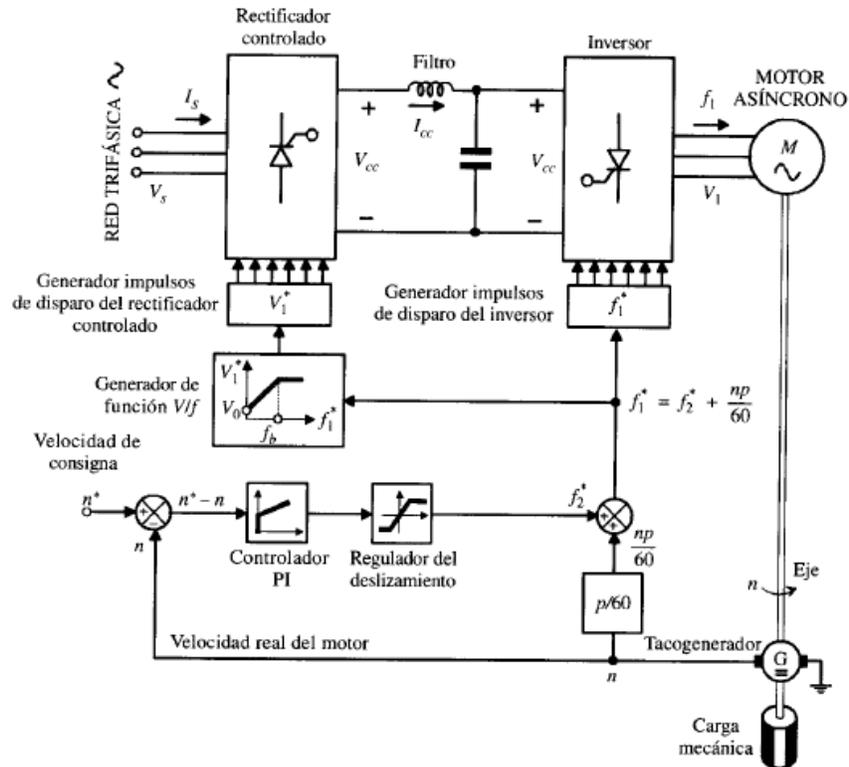


Imagen 6.8 Control escalar con retroalimentación

En este diagrama se puede observar que se fija una velocidad desde el exterior por medio de la tensión de referencia n^* ; el tacómetro produce una f.e.m. proporcional a la velocidad real de máquina (denominada n). Estas dos señales se restan y producen una tensión de error de velocidad que se hace pasar por un control PI, la parte proporcional de este control convierte los rpm a una frecuencia equivalente del circuito del rotor. Esta frecuencia es limitada a cierto valor el cual corresponde a la condición de par máximo. Luego en el sumador de frecuencias, se genera una frecuencia la cual debe producir el inversor que alimenta el motor. También de ese sumador se lleva una señal hacia un generador de funciones para producir la señal de referencia de de tensión que debe aplicarse a la máquina y que regula los disparos en el rectificador, haciendo que la máquina funciones bajo la relación de volts/hertz.

6.4.2 CONTROL VECTORIAL

Este tipo de control, es un sofisticado método para la regulación de la velocidad y que hoy en día los variadores de frecuencia poseen. En si el principio básico de un control vectorial es el de copiar el funcionamiento de un motor de CC. En un sistema de control vectorial de motores asíncronos hay que controlar en tiempo real la magnitud y fase de las corrientes de alimentación

del estator, en respuesta a cambios en las demandas de velocidad y de par requeridas por el accionamiento.

Hay dos tipos de control vectorial, estos controles son el control vectorial directo y el indirecto. El control vectorial directo incorpora dos transductores magnéticos en el entrehierro que permiten saber la posición y magnitud del flujo magnético. Y el control vectorial indirecto calcula la amplitud y orientación del flujo a partir de los parámetros del motor, mientras que la posición del rotor se mide mediante un encoder.

El control directo parece tener ciertas ventajas sobre el control indirecto, ya que incluye una medida directa del flujo y la situación de su fasor espacial en el motor, pero este no se puede aplicar en un sector industrial, por lo que en la industria se usa el control vectorial indirecto, el cual usa un encoder para medir la posición y velocidad del motor, mientras que se determina la posición del fasor usando los parámetros del motor, ya que es difícil poder saber la posición exacta del fasor debido a que los parámetros del motor varían constantemente, es necesario de unos procesadores digitales de señales (DSP)

Las funciones de este DSP en un control vectorial son diversas, entre las que destacan las siguientes:

- Procesar las señales obtenidas por el encoder para determinar la velocidad del rotor
- Estimar el valor de flujo
- Implementar los lazos de control de velocidad y corriente
- Producir las señales de disparo del inversor

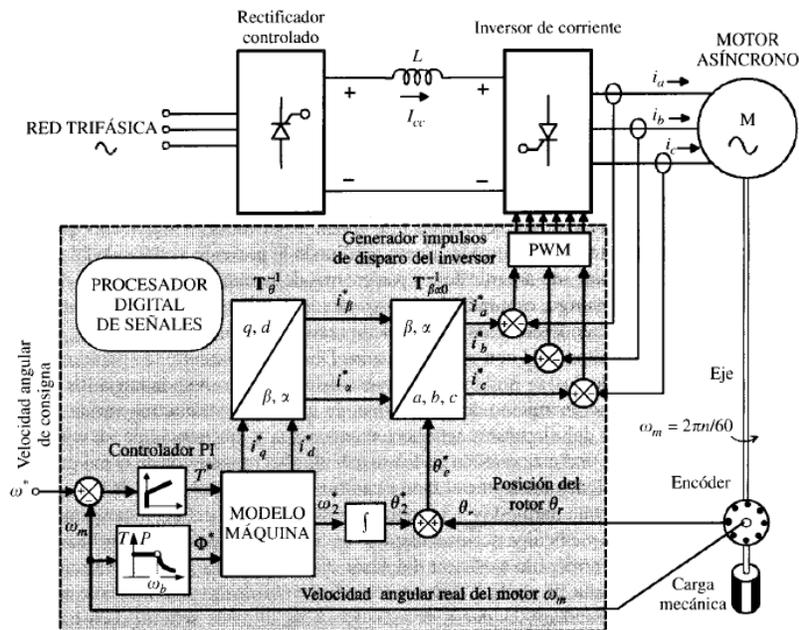


Imagen 6.9 Control vectorial

Se muestra el diagrama en donde se ve el control vectorial indirecto, como se puede observar, la suma del ángulo que forma el eje del rotor con una referencia fija del estator, que se obtiene del encoder, es vital para así poder localizar el fasor de flujo magnético.

6.4.2.1 CONTROL VECTORIAL SIN SENSOR (SENSORLESS VECTOR CONTROL)

Hoy en día el control para la velocidad de motores de inducción no incluyen ningún tipo de sensor que permita saber la posición del fasor espacial de flujo, y se estima la velocidad del motor tomando en cuenta las medidas de tensiones y corrientes del motor.

7 APLICACIÓN DEL INVERSOR HITACHI SJ700

7.1 INTRODUCCIÓN

El variador de frecuencia Hitachi de la serie SJ700, como se ha estado venido diciendo con anterioridad, tiene todos los componentes que se mencionaron en capítulos anteriores, el rectificador interno que se presenta en este variador es un rectificador a diodos, su bus de CD está constituido por un circuito de precarga hecho con un capacitor con su resistencia en paralelo conectado en paralelo al final del rectificador y a la entrada del inversor, su inversor es uno hecho a IGBT's, este variador posee varios modos de control, el control escalar, el control vectorial tanto con sensores como sin ellos.



Imagen 7.1 Variador de frecuencia Hitachi SJ700

7.2 DATOS DEL VARIADOR

SJ700-1500HFUF2	
150 KW	
200 HP	
Input:	50 Hz, 60 Hz 1 fase
	50 Hz, 60 Hz 380 V – 480 V 3 fases 286 A
Output:	0 – 400 Hz 380 V – 480 V 3 fases 260 A

La placa de datos presentada, corresponde a la placa de datos del variador Hitachi SJ700, como se puede ver este variador es capaz de soportar motores de alto caballaje. Y puede tener

una variación de la frecuencia casi 7 veces el valor de la frecuencia de entrada. Es por eso que este variador será ocupado en la prueba hidrostática.

7.3 APLICACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Este variador de frecuencia fue montado en un proceso, llamado “prueba hidrostática”, en el cual se les hace una prueba de presión a los tubos. En esta prueba los tubos son sometidos a una presión de 10000 psi por un tiempo de 5 segundos, si este no se cuartea, ni se deforma o presenta algún inconveniente, el tubo está listo para continuar con el proceso. El proceso es sencillo las bombas comenzarán a bombear agua hasta que el tubo este completamente lleno de agua, y la presión de 1000 psi sea alcanzada y mantenida por un tiempo de 5 segundos, una vez pasado estos 5 segundos, las bombas dejarán de bombear agua y empezará el tiempo de purga.

En sí, en este proceso no siempre se requiere que la bomba este trabajando a su capacidad nominal durante todo el tiempo, hay ciertas etapas de este proceso el cual no es necesario el pleno funcionamiento de la bomba, debido a que hay periodos de tiempo en el cual no se encuentra ningún tubo al cual se le aplicará a presión, o está siendo movido al punto el cual se le aplicara la presión, o simplemente cuando este la purga del agua del tubo activada. Es por eso que un variador de frecuencia es una buena opción para este tipo de procesos, los cuales su frecuencia varía con el tiempo.

Como se mencionó con anterioridad y tomando en cuenta las ventajas que nos ofrece un variador de frecuencia, podemos ver que durante todo el proceso no es necesario que la bomba este dando su máxima potencia, por lo que durante esta parte del proceso, a la bomba se le puede ir variando su potencia, haciendo modificar su frecuencia, dependiendo la etapa de esta parte del proceso. Para que así se tenga un ahorro en la energía y para que al motor no se le exija demasiado, con lo que ayudará a contribuir a su mantenimiento y a que se tenga una óptimo uso de la energía, sin que sea desperdiciada.

Otra ventaja que se presenta al montar un variador de frecuencia, es el tiempo de producción, debido a que el variador variará la frecuencia de la bomba, se le puede programar para que este haga que la bomba se vea exigida a producir más revoluciones por minuto que sus rpm's nominales, y así hacer que el proceso sea más rápido.

7.4 PROGRAMACIÓN

Una vez con los datos de cómo va a operar la bomba, lo que prosigue es programar al variador para que a la hora de que se conecte con la bomba, esta realice la operación indicada.

El variador Hitachi SJ700 presenta una manera fácil de programar sus parámetros. Este se presenta en la imagen abajo, y se puede ver que el variador está conformado principalmente por una HIM (Human Interface Module) y por sus terminales tanto de potencia como de control.



Imagen 7.2 Interfaz del variador de frecuencia Hitachi SJ700

En las terminales de potencia del variador irán tanto los cables de alimentación como los que van a la bomba. Y en la terminal de control, como su nombre lo dice van conectados los cables de control, los cuales harán la conexión entre el variador y el PLC. En la imagen se muestran los dos tipos de entradas.



A la
alimentación

A tierra

Al motor

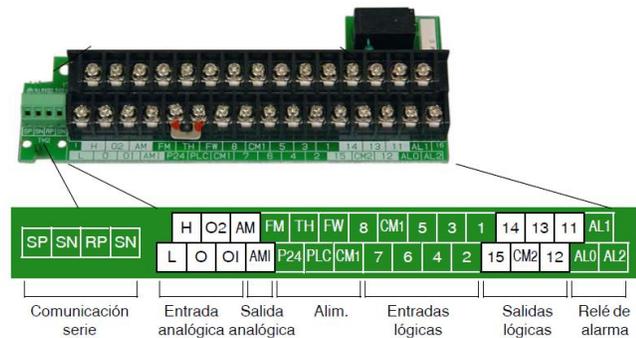


Imagen 7.3 Terminales de control del variador de frecuencia Hitachi SJ700

Una vez conectada la alimentación, el cableado del motor y también el control externo al variador como se mostró en los diagramas de arriba, la instalación del variador queda como se muestra en la imagen de abajo, ahora se procede con energizar el variador, para así poder cambiar los parámetros y “decirle” al variador a que frecuencia tiene que operar la bomba, así como que entradas de señal deberá obedecer para poder variar su velocidad. En esta aplicación, la señal de entrada que regirá la frecuencia de operación de la bomba, será una señal analógica, ya sea de 0 a 10 Volts, o de 4 a 20 mA. Esto es debido a que los sensores trabajan con estos rangos de valores, y es lo que el variador acepta en su entrada.

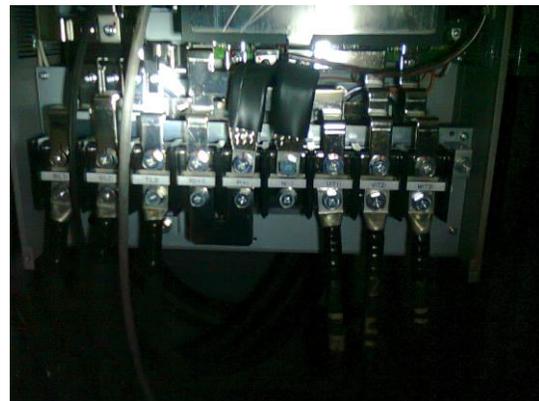
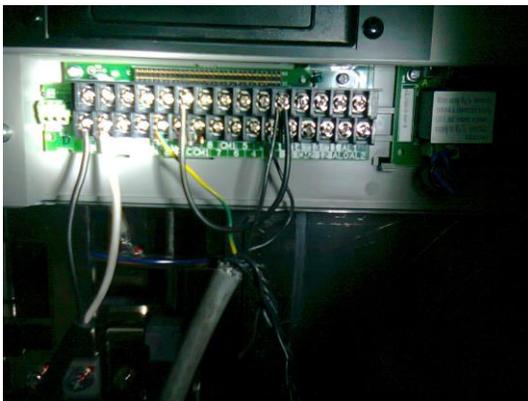


Imagen 7.4 Conexiones de las terminales de control y potencia del variador de frecuencia con el motor y con el control

El variador es amigable en el sentido de cambiar los parámetros, es decir, que los parámetros están agrupados, para que así se les pueda identificar más fácilmente.

Los parámetros que se van a cambiar en este variador son los siguientes: para que el variador pueda “reconocer” en este caso la bomba, necesitamos ingresar al variador, el número de polos de la bomba, la potencia de esta y la frecuencia de entrada a la que trabaja. El cambio de los parámetros se hace mediante el HIM, en el mismo display de este muestra los agrupamientos de los parámetros, por lo que se buscan estos parámetros antes mencionados y se les hace el cambio necesario.

Esta es la placa de datos de la bomba, la cual será arrancada mediante el variador.

Potencia	150 HP
Voltaje nominal	460 Volts
Frecuencia	60 Hz
RPM	1770
Corriente	170 A



Imagen 7.5 Bomba de llenado que operó bajo el mando del variador de frecuencia Hitachi SJ700

Con estos valores dados, el variador reconocerá la bomba, ahora que estén ingresados estos datos, ahora lo que falta por hacer es configurar el variador de frecuencia para que la bomba se pueda parar y arrancar mediante el PLC, y que su velocidad pueda variar por medio de entradas analógicas, igual mandadas por un PLC.

Una vez conocidos estos valores y visto el cableado que se tiene que hacer para este proceso en específico, se debe tomar en cuenta, durante la programación del variador, tanto la potencia de la bomba, así como su corriente nominal y su velocidad; ya que es de vital importancia respetar estos dos valores para no dañar la bomba, ya que se desea que la bomba gire a mayor velocidad que su velocidad nominal, esta estará forzada y no es algo recomendable de hacer, ya que puede llegar a dañarse. En si la programación es sencilla, se busca que parámetro cambiar y a que valor deseamos cambiarlo, en si para que el variador pudiera responder a las necesidades de esta parte del proceso se cambiaron los siguientes parámetros:

- **A001.-** este parámetro es el que nos indica de que manera vamos a hacer que el variador entre en el modo RUN, como se va a usar un medio externo para arrancar la bomba, este parámetro se cambió a 01
- **A002.-** nos indica como se va a variar la frecuencia, si por medio del mismo variador o por un medio externo, para ocupar el medio externo se ocupará el código 01
- **A003.-** es la frecuencia base a la que la bomba está diseñada a girar, la mayoría de las veces esta frecuencia es de 60 Hz
- **A005.-**este parámetro nos permitirá cambiar que tipo de entrada es la que vamos a darle al variador, ya sea una señal de voltaje o una de corriente.
- **A006.-** con este parámetro vamos a deshabilitar las señales de entradas negativas, las cuales sirven para cambiar el giro de rotación de la bomba, como en esta aplicación no es necesario que la bomba cambie de giro, se puso el código 03 para deshabilitar esta opción.
- **A011.-** es la velocidad inicial que la bomba producirá cuando el variador entre en modo RUN, se le programó una velocidad de 15 Hz
- **A012.-** es la velocidad máxima que la bomba va a alcanzar, en este proceso se requiere que la bomba suministre una gran cantidad de su potencia, por lo que este parámetro se puso con un valor de 70 Hz.
- **A013.-** es la cantidad mínima de la señal de entrada que hará que la bomba comience a girar, como es una señal de entrada que normalmente es de 0 a 10 Volts, en este punto se lo puso un 0%.
- **A014.-** es la cantidad máxima de la señal de entrada, en este parámetro se puso un porcentaje de 100%
- **A015.-** se le puso a este parámetro el código 00, para que la bomba “haga caso” a la señal de entrada que se le ve a insertar y así sea esta la que haga que su velocidad cambie.
- **C001.-** es la entrada digital número uno, esta entrada hará que el variador entre en modo RUN, es decir que el motor arranque, con el código 20
- **C002.-** el botón de paro, está dado por esta entrada, para que fuera posible, se le asignó el código 21.

- **C021.-** en este parámetro vamos a configurar las salidas del variador, en este caso esta salida nos dirá cuando el variador este encendido
- **C022.-** en esta salida, el variador nos mandará una señal cuando el variador presente alguna falla, ya sea sobrevoltaje, sobrecorriente, etcétera.

7.5 PLC

En esta aplicación como en la mayoría de las aplicaciones de esta planta, se usó el PLC de la marca Allen Bradley, el modelo Controllogix 5000, este tipo de PLC, es usado por su facilidad de programar, así como también el compacto tamaño que usa.



Imagen 7.6 PLC'S

Este PLC, es bastante complejo, tanto en su comunicación, como en sus tarjetas digitales y analógicas que se les pueden integrar, para hacerlo aun así más completo. En esta aplicación para hacer poder arrancar el variador, solo se necesita de dos entradas digitales, y de una entrada analógica, por lo que en sí resulta fácil la instalación de estas tarjetas. La lógica de este proceso, es algo compleja y la cual no puede salir de la empresa, por lo que solo esta parte del PLC es mencionada a grandes rasgos.

7.6 PRUEBAS

Una vez configurados los parámetros, cableado el variador y hecha la lógica del PLC, se prosiguió con la realización de pruebas, las cuales nos van a ayudar a ver las ventajas de un variador en un proceso de una industria. Estas pruebas se hicieron con un motor con la siguiente placa de datos:

Potencia	50 HP
Voltaje nominal	460 Volts
Frecuencia	60 Hz
RPM	1180
Corriente	62 A

Primero se realizaron pruebas al variador con este motor para ver como se iba a comportar el escalamiento de la velocidad cuando este se conectará a la bomba, mediante la señal analógica de voltaje, esta prueba fue hecha a una velocidad de 70 Hz, aunque también se comparó con una prueba que se tenía a 60 y a 65 Hz. La grafica muestra las tres pruebas a diferentes velocidades. La programación fue diferente a la que se le hizo a la bomba, ya que esta fue solo una prueba, y esto no quiere decir que la bomba iba a comenzar a girar a 15 Hz, esto fue para ver el comportamiento.



Imagen 7.7 Relación de la frecuencia de operación del variador y las rpm

Como se puede apreciar en la gráfica, es obvio que a mayor velocidad programada en el variador, las revoluciones dadas por el motor (bomba) serán mayores, esto es aceptable pero no en largos periodos de tiempo, ya que puede calentarse la bomba y fallar, pero si se hace una buena planeación y se decide a que tiempos se necesita que la bomba gire a su máximo, entonces se pueden evitar esas fallas y hacer que el proceso tenga un mejor rendimiento. En la gráfica se ve que la velocidad nominal del motor se alcanza a los 8 Volts, y que se incrementa en un 16% de su

velocidad nominal, por lo que pasaría lo mismo con la bomba cuando esté conectada, por lo que de su velocidad nominal de 1800 RPM's, tendría una velocidad de casi 2100 RPM's.

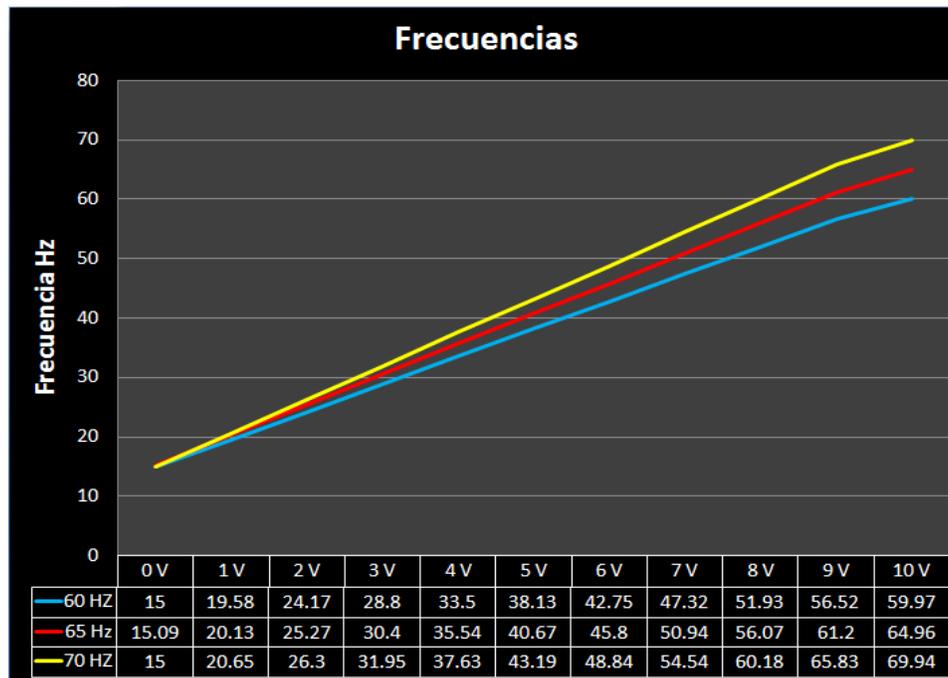


Imagen 7.8 Relación de la frecuencia de operación del variador y la frecuencia del motor

Con respecto a las frecuencias que se obtienen cada vez que se aumenta la señal de entrada, vemos que las tres graficas son parecidas, y podemos considerar que la configuración a 70 Hz, tiene un mejor escalamiento que las otras dos configuraciones, lo que quiere decir que la bomba podrá ir cambiando su velocidad de una manera más gradual que con una configuración de 60 o 65 Hz, y así no irá cambiando de velocidad tan drásticamente.

7.7 VENTAJAS

Una vez hecho la configuración, la programación y las pruebas, lo siguiente que se debe hacer es hacer la comparación de un antes y un después, para así poder ver las ventajas que se tuvo al instalar el variador del frecuencia.

La primera ventaja que se obtiene al instalar un variador de frecuencia, es la del ahorro de energía, ya que al arrancar un motor la corriente que se presenta es hasta casi 6 veces la corriente nominal, con un variador esta corriente excesiva es reducida, evitando desperdicio de energía en forma de calor. Para contribuir a esta ventaja, el variador también dispone de parámetros que lo ayudan a reducir esta corriente de arranque, al hacer que la rampa de aceleración no sea brusca si no que vaya incrementando de una manera suave.

Otra de las ventajas que se tuvo al instalar el variador de frecuencia fue el mejoramiento en el tiempo de ciclo de dicha parte del proceso. Al aumentar las revoluciones de la bomba, la velocidad del ciclo disminuye, esto debido al forzamiento que las bombas realizan, lo que conlleva a llegar a la presión deseada en un mínimo de tiempo, comparándolo con la velocidad nominal de las bombas, que normalmente es de 60 Hz.

Con este incremento en la velocidad se vieron que los resultados fueron favorables para la planta, primero se hicieron dos pruebas, una con la bomba girando a su velocidad nominal (60 Hz) y la segunda prueba fue con un incremento en su velocidad de 70 Hz. En las siguientes tablas se ven los tiempos de ciclo de esta parte del proceso.

Número de prueba	Tiempo de ciclo
1	36 seg
2	36 seg
3	39 seg
4	36 seg
5	39 seg
6	36 seg
7	36 seg
8	36 seg
9	36 seg
10	39 seg

Tabla 7.1 Resultados de la prueba de 60 Hz

Observando la tabla de arriba, podemos ver que el tiempo de ciclo tiene un promedio de 37 segundos, que en si es un buen tiempo de ciclo, pero que con la instalación del variador se quería mejorar, en la siguiente tabla se puede ver las pruebas hechas con el incremento de 70 Hz.

Número de prueba	Tiempo de ciclo
1	34 seg
2	36 seg
3	34 seg
4	34 seg
5	34 seg
6	34 seg
7	34 seg
8	34 seg
9	34 seg
10	36 seg

Tabla 7.2 Resultados de la prueba de 70 Hz

El promedio del tiempo de ciclo bajo de 37 segundos a 34.5 segundos, lo que es equivalente al 7.3% del tiempo que con la prueba a 60 Hz, y lo que se puede también se le puede llamar un 7.3% más rápido que la prueba a 60 Hz. Por esta razón la ventaja al montar el variador de frecuencia, se ve reflejada, tanto en el ahorro de energía, como en el incremento en la producción y reducido mantenimiento que las bombas necesitarán.

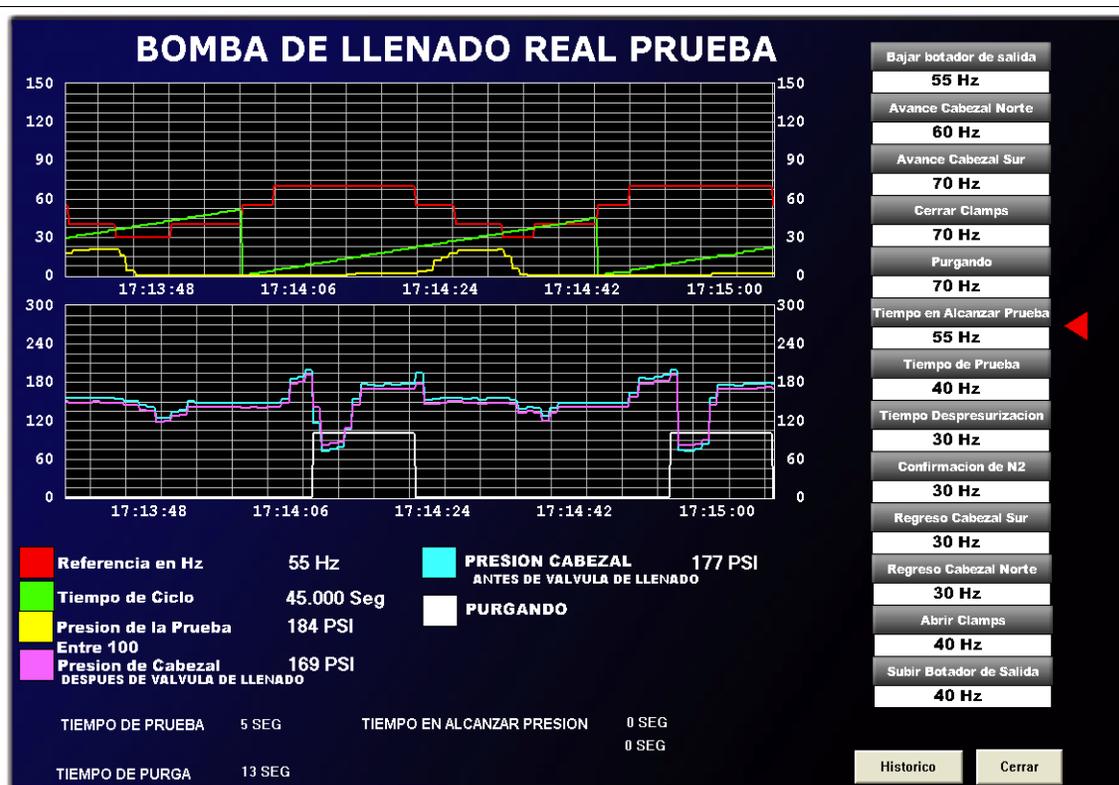


Imagen 7.9 Resultados reales de la bomba de llenado

En la imagen mostrada arriba, se puede apreciar con detalle las partes del proceso de la prueba hidrostática y la frecuencia a la cual la bomba fue programada para poder contribuir al ahorro de energía. También se puede apreciar gráficos que nos permiten ver los valores de la frecuencia a la que gira la bomba, el tiempo de ciclo del proceso, la presión de la prueba (recordar que esta debe llegar a las 10000 Psi), y las presiones de los cabezales antes y después de la válvula de llenado. Estos cabezales son los que impulsan al tubo para que sea colocado y se le sea posible inyectar la presión requerida para cumplir con la prueba. Los tiempos de ciertas partes del proceso también son visibles y nos sirven para el monitoreo de la prueba.

Aunque en la imagen aparece un tiempo de ciclo de 45 segundos, esto no quiere decir que fue una desventaja el haber instalado el variador, de hecho se vio que con el variador el tiempo de ciclo fue disminuido casi 3 segundos, esos 45 segundos que se ven, se debe a que hubo interferencia en la transición del tubo hasta la prueba, o que algunas de las bombas presentó una falla u otro inconveniente, que como en cualquier proceso industrial se presentan.

Visto todos los resultados, vemos que la instalación del variador de frecuencia fue una buena propuesta para incrementar la velocidad del proceso y a su vez para contribuir al ahorro de energía, puede que se presente de vez en cuando, como se vio en la gráfica tiempos de ciclo demasiados altos debido a inconvenientes de las máquinas o programación, pero se debe tener en mente que esta instalación contribuyo a la disminución del tiempo de ciclo.

8 CONCLUSIONES

Durante los 6 meses de duración de la residencia profesional en Tenaris TAMSA, se pudo ampliar conocimientos y reafirmar los adquiridos durante el tiempo en que se estuvo en la escuela. Este proyecto acerca de variadores de frecuencia, incluye tanto parte de la ingeniería eléctrica como de la ingeniería electrónica, lo que hace este proyecto muy completo y complejo.

Al principio del periodo de la residencia, se realizó el estudio de los componentes que integran a un variador de frecuencia, los principales son el rectificador y el inversor, aunque como se vio hay varios componentes que complementan a un variador y ayudan a que realice su trabajo, el bus de CC que es la carga que alimenta directamente el rectificador, el circuito de precarga, que es el encargado de proteger a este bus de CC, y otros componentes más. Una vez estudiado las partes que conforman a un variador, se pudo conocer el principio de funcionamiento de un variador de frecuencia, y el cual nos ayudó a entender aun mas como hace su trabajo y analizar posibles fallas en la operación del variador. Durante los últimos tres meses de la residencia se prosiguió con la realización de pruebas con los variadores de frecuencia, así como con su programación.

En este periodo de pruebas se comenzaron a ver las ventajas que presentan los variadores de frecuencia a comparación de los métodos convencionales de arranques para motores (arrancadores suaves, autotransformadores, arranque a tensión plena, etcétera) ya que la corriente que se produce al arranque de un motor se ve disminuida, lo que conlleva a un ahorro de energía, así también la variación de la frecuencia a la salida del variador, contribuye a que el motor o en este caso la bomba, no se vea forzada en aplicaciones donde no se requiera que se lleve su capacidad al máximo, es decir, hacer que en ciertos pasos del proceso su frecuencia varíe, por lo que lo hará el voltaje y la corriente, lo que lleva de nuevo a un ahorro de energía, o también se pude hacer que su frecuencia varíe (sea mayor a su frecuencia nominal) y haga que el motor se vea forzado a producir más rpm's que sus nominales, esto no es muy recomendable pero para ciertas aplicaciones puede que presente una ventaja a que la bomba opere con frecuencias nominales.

Una vez que se realizó tanto el estudio de los componentes de un variador, como la programación y las pruebas con el variador, la instalación del variador en una parte importante del proceso de producción se llevo a cabo. El variador se instaló en una bomba de 150 HP, la cual inyecta cierta presión a los tubos.

En esta prueba se volvieron a apreciar de nuevo las ventajas de los variadores, pero también se pudieron ver aún más ventajas, como se instaló en una parte de la producción, como se sabe, es muy importante la velocidad de la producción, es decir, más producción es igual a menor tiempo de los procesos, y eso fue lo que pasó a la hora de hacer una prueba estadística de un antes y un después de esa parte del proceso con el variador de frecuencia. Una vez montado el

variador e incrementando la frecuencia a la que la bomba gira, se vio que el tiempo de ciclo de esa parte del proceso fue más rápido, a diferencia que si la bomba trabajará con su frecuencia nominal, y como se mencionó antes esto es por ciertos lapsos de tiempo, ya que si se hace por largos lapsos, podemos producir un sobrecalentamiento en la bomba, y se puede dañar.

Un variador de frecuencia es muy usado hoy en día en las industrias, debido a las ventajas antes mencionadas, y a que hace aún más fácil la automatización de los procesos, durante este periodo de residencias se pudo ver físicamente estas ventajas de los variadores, por lo que se puede concluir que un variador de frecuencia es un dispositivo que ayudará a la rapidez de los procesos, la calidad de la producción y el mínimo mantenimiento posible a los motores que esté controle

9 BIBLIOGRAFÍA

- Fraile Mora, Jesús (2003). “Máquinas eléctricas”. Editorial Mc Graw Hill.
- J. Chapman, Stephen (2000). “Máquinas eléctricas”. Editorial Mc Graw Hill.
- H. Rashid, Muhammad (1995). “Electrónica de potencia”. Editorial Prentice Hall.
- Mohan, Ned (2009). “Electrónica de potencia”. Editorial Mc Graw Hill
- Teixido Miquel (2008). “Convertidores de frecuencia y técnicas de inmunización frente a perturbaciones”. En revista *Leonardo ENERGY*.