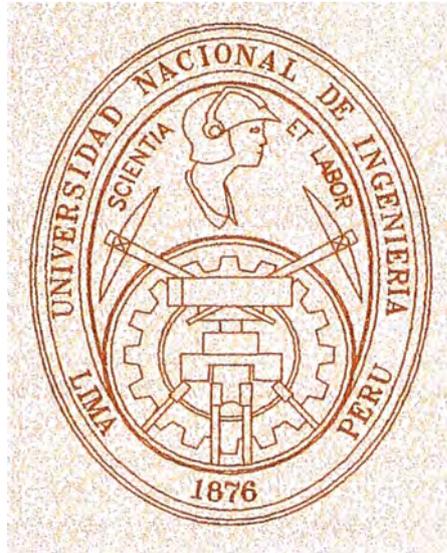


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CON ENTRADA
POR RECTIFICADOR ACTIVO PARA EL CONTROL DE
VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRICISTA

**PRESENTADO POR:
MELCHOR LUIS MEDINA CALDERÓN**

**PROMOCIÓN
1998-I
LIMA-PERÚ
2003**

**A LA MEMORIA DE MI PADRE
A MI MADRE, A MIS HERMANOS JUAN Y ROSA
A MIS FAMILIARES Y AMIGOS QUE SIEMPRE ME APOYAN**

**CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CON ENTRADA POR
RECTIFICADOR ACTIVO PARA EL CONTROL DE
VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN**

SUMARIO

El presente informe trata sobre una solución al problema que se presenta cuando se utilizan los Convertidores de Frecuencia para motores eléctricos en AC, ya que son causantes de la inyección de armónicos y generan distorsiones en las redes a las que se conectan, problema que se evita usando un nuevo Convertidor de Frecuencia con Entrada por Rectificador Activo, que además de obtener una forma de onda de corriente con muy baja distorsión, nos permite también controlar el factor de potencia, permitiendo la operación a factor de potencia unitario, excluyendo de esta forma el uso de Banco de Capacitores.

En el Capítulo I, se describen las características generales en cuanto a operación de los Variadores de Velocidad, indicando su forma constructiva, características de las variaciones del par cuando se varían la velocidad. Así como también las forma de onda que se generan por la operación de los dispositivos de potencia. En el Capítulo II se describen las características del Inversor Trifásico de tensión y sus modos de operación.

En el Capítulo III, se hace mención sobre el Control Vectorial que se aplica en este Variador, que consiste en una separar a la corriente del estator en una componente que regula el campo magnético y en otra en cuadratura que regula el par, de manera que se asemeja a lo que se

presenta en los motores de Corriente Continua (CC), permitiendo así un mejor control de la velocidad en los motores de Corriente Alterna (CA).

En el Capitulo IV, se describen las características principales, beneficios, Principio de Operación y algunas otras ventajas que se nos presenta cuando usamos el mencionado Convertidor de Frecuencia.

TABLA DE CONTENIDOS

PROLOGO	1
CAPÍTULO I	
VARIABLES DE VELOCIDAD AC	4
1.1. Introducción	4
CAPÍTULO II	
INVERSOR, CONTROL Y MODO DE OPERACIÓN	9
2.1. Inversores de Modulación de ancho de pulso.....	9
2.2. Modos de Operación.....	12
2.2.1. Operación como inversor y rectificador	13
2.2.2. Operación como compensador reactivo	14
CAPÍTULO III	
CONTROL VECTORIAL	18
3.1. Control por Orientación de Campo.....	18
3.2. Modelo Inverso	22
3.3. Esquema de Control por Orientación de Campo	24
CAPÍTULO IV	
CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CON ENTRADA POR RECTIFICADOR ACTIVO (ACTIVE FRONT END)	25
4.1. Características Principales del AFE.....	25

4.2.	Beneficios que trae el AFE versus la tecnología convencional	29
4.3.	Principio de operación del Rectificador Activo	31
4.4.	Compensación de Potencia Reactiva	33
4.5.	Alimentación Limpia.....	39
4.6.	Rango del Active Front End	41
4.7.	Ejemplo de Selección del AFE.....	42
	Corrección del Factor de Potencia.....	46
4.9.	Regeneración de Energía.....	49
4.10.	Picos de voltajes	50
4.11.	Filtros contra radio interferencias	51
4.12.	Respuesta Dinámica.....	52
4.13.	Control del AFE.....	54
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
	BIBLIOGRAFÍA	62

PRÓLOGO

El Control de Velocidad de motores eléctricos hoy en día vienen siendo utilizados en un amplio rango de potencias, las que van desde algunos vatios hasta algunos miles de kilovatios y en campos de aplicaciones que van desde la muy precisas como posicionamiento en robótica hasta aplicaciones de control de flujo en bombas.

La ventaja principal de los Variadores de Velocidad es que disminuyen los consumos de Energía Eléctrica en los procesos que controla, dando como resultado considerables disminuciones de costos de operación.

Anteriormente, los Variadores de Velocidad consistían de una combinación de motores de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC), los cuales eran usados como controladores rotativos por ejemplo el sistema Ward Leonard-Drive.

Los primeros Variadores de Velocidad Electrónicos utilizaban tiristores (SCR), rectificadores que controlan la tensión según el ángulo de disparo de la onda, y por lo tanto varían la velocidad de los motores de CC que se utilizaban en un inicio.

Estos Variadores tienen una muy sofisticada capacidad para el control de velocidad así como una rápida reacción ante variaciones de carga.

Sin embargo, los motores de CC ocupan mucho espacio, son costosos y requieren mantenimientos periódicos de las escobillas las cuales por su trabajo están expuestas a un elevado desgaste. En cambio los motores de inducción CA ocupan menos espacio, son de bajo costo, confiables, requieren poco mantenimiento y son comúnmente usados en todo el mundo. Estos motores requieren de controladores más complejos usualmente llamados inversores, que suelen estar conectados a través de un condensador (circuito intermedio) a un rectificador a diodos, tiristores o SCR's que a su vez se conecta a la red.

El uso de los rectificadores como la etapa de entrada al inversor (Passive Front End) trae como consecuencia inyección o generación de armónicas hacia la red principalmente de 5to y 7to orden.

Este Informe da a conocer a un nuevo tipo de variador que trae una serie de ventajas con respecto al sistema tradicional, antes mencionado dentro de las cuales resaltan la obtención del factor de potencia unitario o manejo de este a cualquier condición de carga a la que este sometido el motor de inducción, consiguiendo eliminar y/o controlar el consumo de Energía Reactiva ahorrando la colocación de bancos de capacitores, así como de obtener una mejora en cuanto a la calidad de energía por la baja distorsión de corriente absorbida generada, casi imperceptible.

Asimismo la caída de tensión que se presentan en el punto de conexión es regulada por el rectificador del equipo, no permitiendo salir de operación al mismo; la tensión del circuito intermedio de CC es mantenido constante y de esta forma la salida en donde se conecta el motor no es afectada.

CAPÍTULO I

VARIADORES DE VELOCIDAD AC

1.1. Introducción

Para entender cómo un Variador de Velocidad opera, es necesario conocer cómo trabaja un motor de inducción.

Un motor de inducción trabaja como un transformador. Cuando el estator es conectado a una fuente de alimentación trifásica se genera un campo magnético que gira a la frecuencia de la red o velocidad sincrónica.

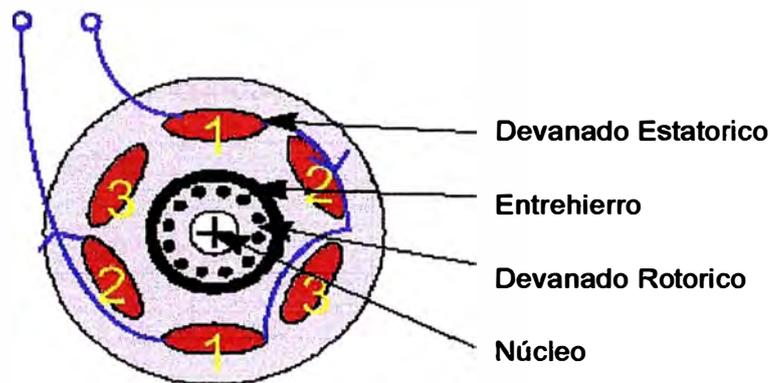


Figura 1.1. Motor de Inducción Simplificado (Sección Transversal)

Este campo fluye perpendicularmente a través del entrehierro (Air Gap) entre el estator y el rotor induciendo corrientes que fluyen en los bobinados del rotor. Esta corriente produce un campo magnético giratorio

que al reaccionar con el campo del estator genera una fuerza en el rotor trayendo consigo la rotación del rotor.

Si los bobinados se disponen en varios pares de polos, la frecuencia de alimentación del campo giratorio será menor que la frecuencia aplicada (por ejemplo para dos polos a 60Hz tendremos 3600rpm, pero para cuatro polos a 60Hz la velocidad será de 1800rpm).

Si el rotor girara a la misma velocidad del campo giratorio no habría campo magnético variable que indujera una corriente en el bobinado del rotor y por consiguiente ningún torque por interacción de la corriente con el campo giratorio.

En consecuencia el rotor deberá girar un poco más lento que el campo giratorio para mantener un torque en el eje o rotor.

Esta diferencia se conoce como deslizamiento (slip) tal como se muestra en la Figura 1.2.

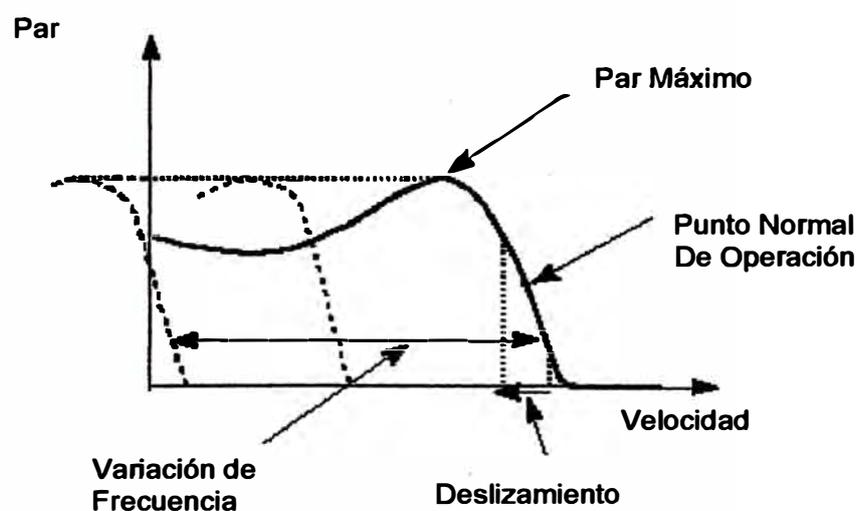


Figura 1.2. Característica del Par-Velocidad en un Motor de Inducción

De ahora en adelante la velocidad del motor depende de la frecuencia de alimentación, al igual que al arreglo de bobinados y en cierto grado del tipo de carga.

Por lo tanto para controlar la velocidad del motor es necesario controlar la frecuencia y la tensión de alimentación al motor.

Si la frecuencia es reducida, la tensión debería de disminuir en la misma proporción pues el flujo magnético debe ser mantenido evitando que sea muy alto pues el motor se podría saturar. Por tanto la tensión también debería ser controlada. Si la frecuencia es incrementada por encima de la nominal, la tensión aplicada también debería aumentar para mantener el flujo constante, pero como esto no es usualmente posible, se concluye que a velocidades mayores a la nominal tendremos menos par disponible, tal como se muestra en la Figura 1.3.

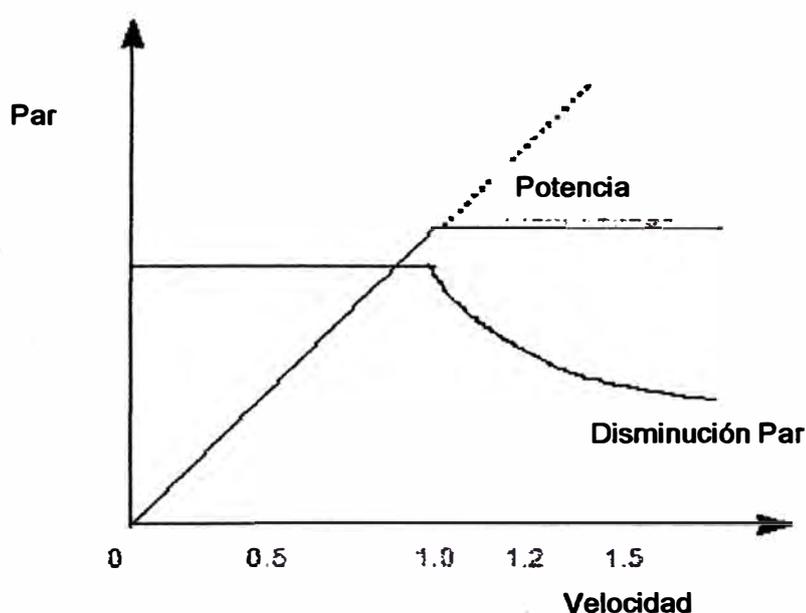


Figura 1.3. Reducción del Torque cuando el motor opera por encima de la velocidad nominal

Cuando operamos por encima de la velocidad nominal, decimos que estamos operando en la región de debilitamiento de campo.

Un convertidor electrónico que transforma la corriente continua CC a corriente alterna CA es conocido como inversor. Los controladores electrónicos de velocidad para motores CA usualmente convierten la alimentación CA a CC usando un rectificador, y después convierte lo anterior a una frecuencia variable y/o tensión variable CA usando un inversor tipo puente.

La conexión entre el rectificador e inversor es llamado Enlace en CC (DC link).

El diagrama de bloques de un Variador de Velocidad (a menudo llamado inversor) es mostrado en la Figura 1.4.

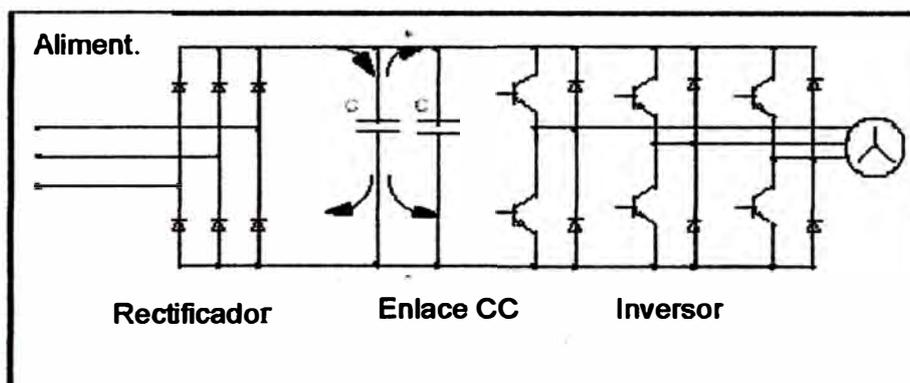


Figura 1.4. Diagrama de Bloques del Inversor

Véase que la alimentación, pueden ser monofásica (usualmente para bajas potencias) o trifásicos.

Los capacitores reducen el rizado de tensión en el circuito intermedio (especialmente en alimentación monofásico).

La tensión en el capacitor no es controlado en variadores convencionales y depende únicamente de la tensión de CA que se tenga en el suministro.

Esta tensión CC es convertida nuevamente a CA usando la modulación de ancho de pulso. La forma de onda deseada es obtenida por la operación Conducción - No conducción (On-Off) de los dispositivos de potencia autoconmutados como IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) a frecuencia constante (switching frequency). Variando los tiempos de On-Off del IGBT la corriente deseada puede ser generada, mientras que la tensión de salida se presentara como una serie de pulsos de ancho modulado como se muestra en la figura 1.5.

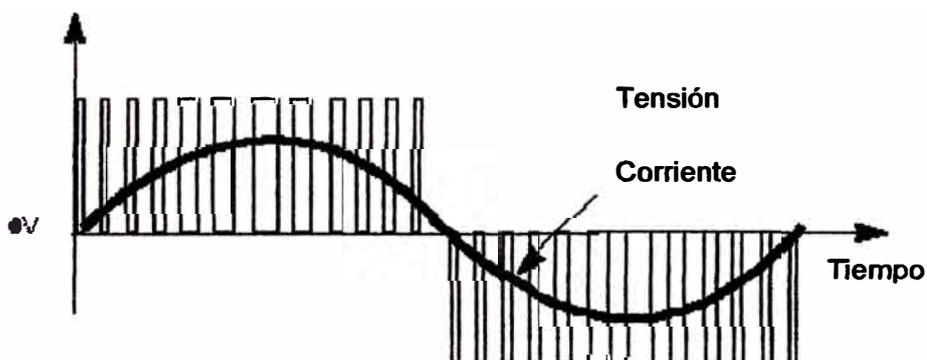


Figura 1.5. Modulación de ancho de pulso (Pulse With Modulation)

CAPÍTULO II

INVERSOR, CONTROL Y MODO DE OPERACIÓN

2.1. Inversores de Modulación de ancho de pulso

Los convertidores que transforman la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) son conocidos como inversores. La función de un inversor es cambiar la tensión de entrada en CC a una tensión simétrica de salida en CA, manteniendo la magnitud de la tensión de salida así como la frecuencia, fijas o variables. Si se modifica la tensión de entrada en CC y la ganancia del inversor se mantiene constante, es posible obtener una tensión variable de salida como sucede en el inversor de 6 pulsos. Por otra parte, si la tensión de CC es fijo y no es controlable, se puede obtener una tensión de salida variable si se varia la ganancia del inversor; esto por lo general se hace controlando la duración de la conducción de los dispositivos de potencia que conforman el inversor a través de una técnica llamada modulación de ancho de pulso (Pulse With Modulation, PWM) de donde se adopta el nombre de inversores PWM.

Entre los métodos PWM podemos mencionar al método senoidal de modulación el que consiste en comparar una onda de control senoidal con la frecuencia y amplitud de la tensión de salida deseada y una onda triangular de frecuencia múltiplo impar de la frecuencia fundamental de control.

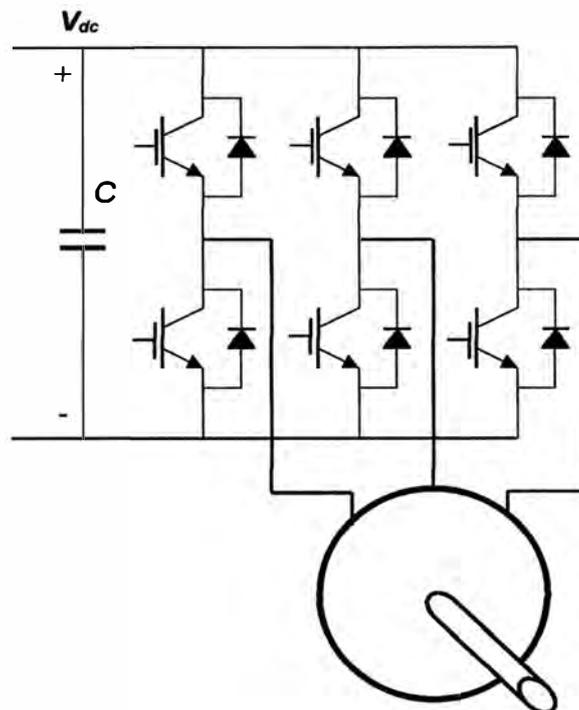


Figura 2.1. Inversor de Tensión

En los inversores ideales, las formas de onda de la tensión de salida deberían ser senoidales. Sin embargo, en los inversores reales no son senoidales con contenido de armónicos. Para aplicaciones de mediana y baja potencia, se pueden aceptar las tensiones con forma de onda de tipo cuadrada o casi cuadrada; para aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda senoidales con baja distorsión. Dada la disponibilidad de los dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, es posible minimizar o reducir significativamente el contenido armónico de la tensión de salida mediante las técnicas de modulación de ancho de pulso.

Los inversores son clasificados básicamente en dos tipos: El llamado inversor tipo fuente de tensión (Voltage Source Inverter, VSI) si la tensión de entrada se conserva constante (Figura 2.1), el otro tipo es el

alimentado por fuente de corriente o *inversor alimentado por corriente* (Current Source Inverter CSI) si la corriente de entrada se conserva constante y finalmente el *inversor enlazado en CC variable* si la tensión de entrada es controlable. Cada uno puede utilizar dispositivos con activación y desactivación controlada (es decir BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, GTO) o tiristores de conmutación forzada, según la aplicación. Estos inversores utilizan por lo general señales de control PWM, para producir una tensión de salida en CA.

Para el caso de inversor tipo fuente de tensión en la figura 2.2 se muestra la forma de onda PWM por fase

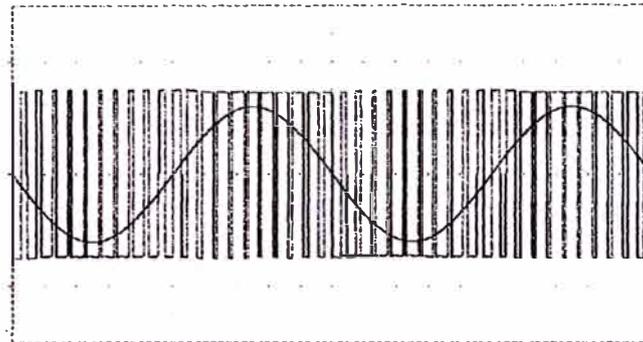


Figura 2.2. Modulación Senoidal del ancho de pulso



Figura 2.3. Tensión de Línea del Inversor (PWM)

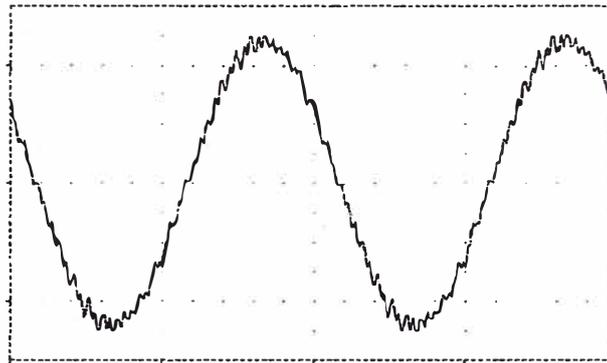


Figura 2.4. Corriente de Línea del Inversor

En la figura 2.3 se muestra la tensión de línea de carácter pulsada y en la 2.4 se muestra a la corriente cuya componente fundamental corresponde a la frecuencia de la componente fundamental de la tensión de línea y el rizado de alta frecuencia corresponde a la frecuencia de conmutación y sus múltiplos.

2.2. Modos de Operación

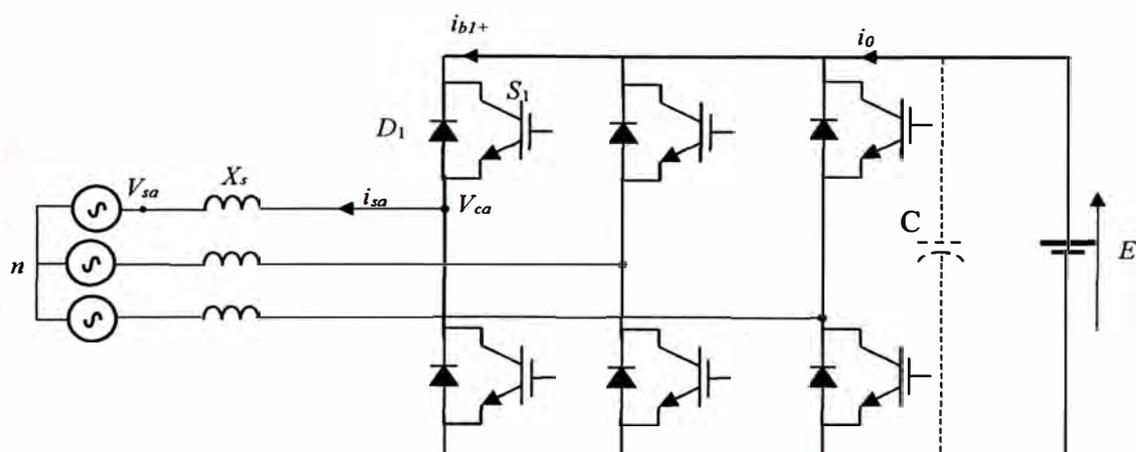


Figura 2.5. Inversor Trifásico de Tensión Conectado a la Red de Potencia

El inversor trifásico tipo de tensión (Voltage Source Converter – VSC) como se sabe, puede generar tensión trifásica controladas en amplitud, fase y frecuencia pudiendo por tanto ser considerado como una maquina síncrona pero sin momento de inercia, así como conectarse directamente a la red trifásica de potencia a través de tres reactancias o en forma aislada a través de un transformador trifásico. En esta situación el inversor puede ser accionado de manera que el flujo de potencia activa entre los lados CC y CA puede ser regulado en magnitud y dirección así como también regular la potencia reactiva en sus terminales de CA.

2.2.1. Operación como inversor y rectificador

En el primer caso cuando la corriente de lado CA del inversor (I_{sa}) esta en fase con la tensión de la red (V_{sa}) le corresponde a la fuente alterna consumir potencia activa la que estaría siendo entregada por la fuente E (operación como inversor). En el segundo caso cuando la corriente de lado CA del inversor (I_{sa}) esta en contrafase con la tensión de red (V_{sa}) le corresponde a la fuente alterna entregar potencia activa la que sería consumida por la fuente E (operación como rectificador).

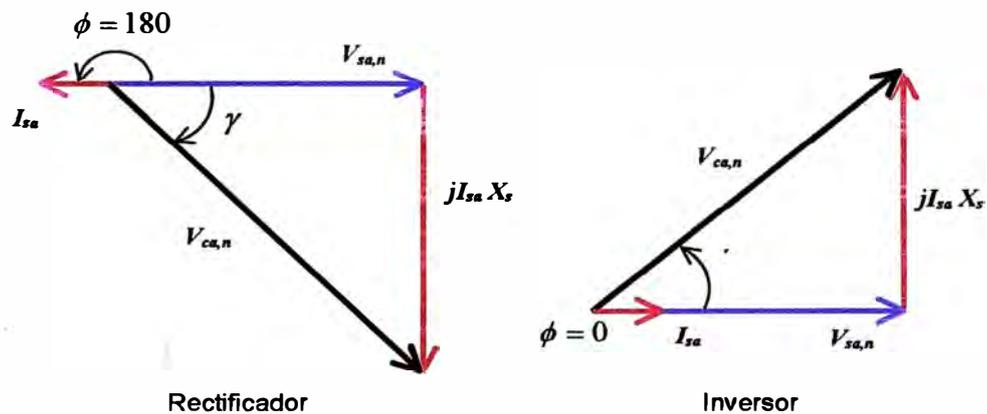


Figura 2.6. Diagramas Fasoriales de operación del Inversor como Rectificador e Inversor

En las figura 2.6 se muestran los diagramas fasoriales correspondientes que indican como la tensión del convertidor $V_{ca,n}$ debe ser regulada en magnitud y fase respecto de la tensión de la red $V_{sa,n}$ (obtenida a través de un circuito de sincronización) de manera de satisfacer los requerimientos de corriente I_{sa} .

2.2.2. Operación como compensador reactivo

En esta forma de operación el ángulo γ de fase entre la tensión del convertidor $V_{ca,n}$ y la tensión de la red $V_{sa,n}$ se mantiene en cero grados es decir en fase. Si en esta condición la magnitud de la tensión del convertidor se incrementa a valores mayores que la tensión de la red la corriente se adelantará 90 grados y el convertidor entregará potencia reactiva. Si por el contrario la tensión del convertidor se hace menor que la de la red la

corriente se atrasará 90 grados y el convertidor absorberá potencia reactiva.

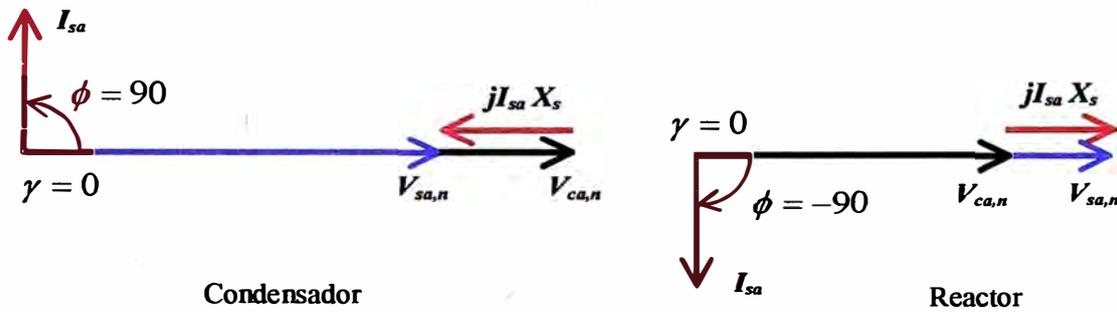


Figura 2.7. Diagrama fasorial de la operación como condensador y reactor.

En las figuras 2.8 y 2.9 se muestran los resultados de simulación de un inversor de seis pulsos conectado a un sistema de potencia donde el periodo de conducción de los semiconductores de potencia corresponde a $T = 1/60$, mientras que la amplitud $V_{ca,n}$ y el ángulo de fase γ fueron modificados para cada caso.

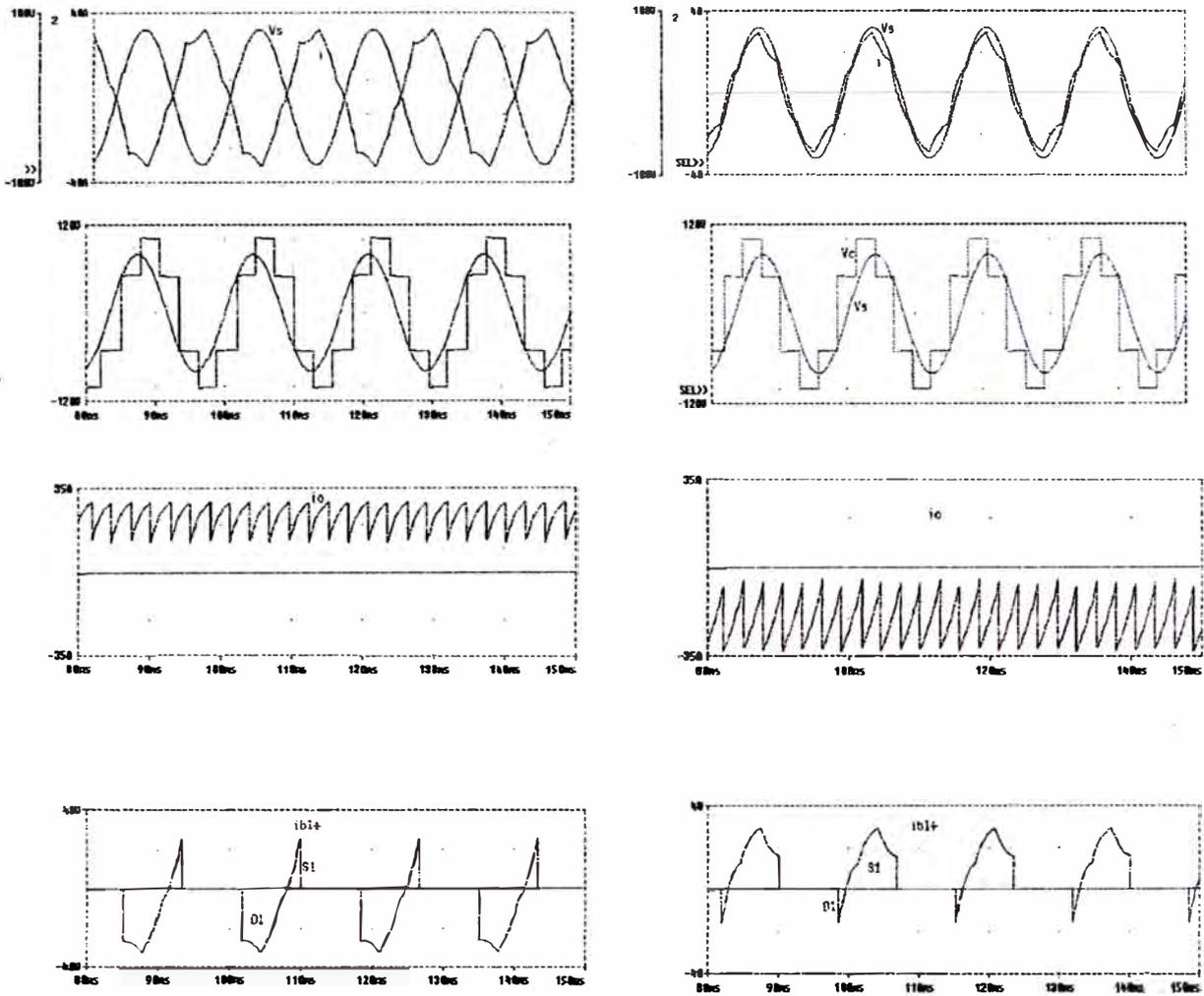


Figura 2.8. Operación como Rectificador e Inversor

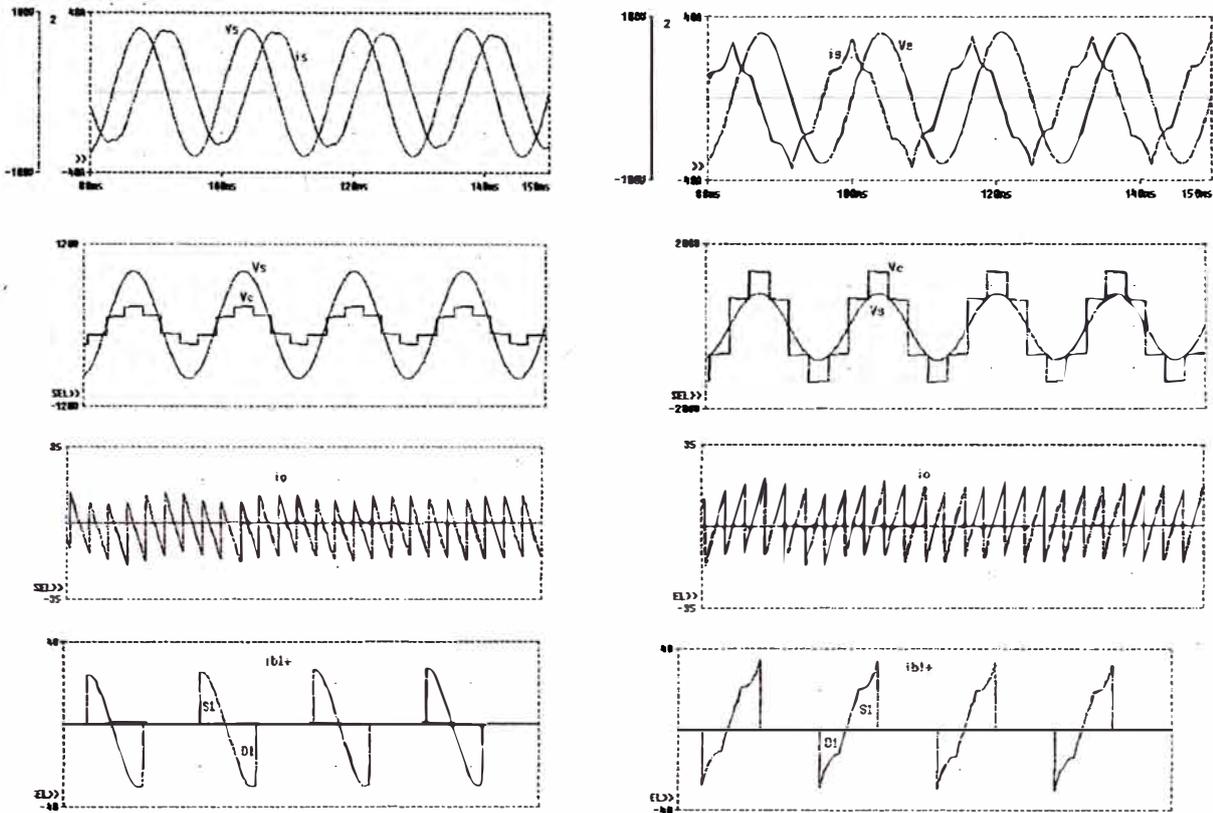


Figura 2.9. Operación como Condensador y Reactor

CAPÍTULO III CONTROL VECTORIAL

3.1. Control por Orientación de Campo

En una máquina de CC se tiene un bobinado de campo y otro de armadura tal como se muestra en la Figura 3.1. Por lo tanto, pueden controlarse independientemente la corriente de la armadura (par) y la corriente del campo (flujo).

El control independiente de las corrientes que producen el flujo y el par, permite obtener un desempeño óptimo, entre otros, par con velocidad cero, rápida respuesta a variaciones de carga, etc.

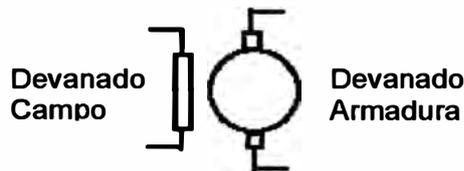


Figura 3.1. Máquina de CC

En una máquina de CA, la corriente que circula por el bobinado estatórico determina el par y el flujo, por lo tanto, resulta difícil controlar por separado el par y el flujo.

El control de la magnitud de la corriente no permite realizar una regulación independiente. Por ello, debe controlarse la magnitud y la fase de la corriente, es decir, el vector corriente.



Figura 3.2. Máquina de CA

Esta nueva metodología de control fue publicada en 1972 para el control de motores de corriente alterna (CA) y desarrollada por Blaschke. Conocida como Orientación de Campo (Field Orientation) esta técnica se deriva de la aplicación de la teoría de vectores espaciales al motor de inducción y que logra separar a la corriente del estator en una componente que regula el campo magnético y en otra en cuadratura que regula el torque electromagnético. La base para realizar esta separación está en conocer la posición angular del Flujo Rotórico respecto al estator que procesado por un algoritmo calcula a partir de las corrientes absorbidas las componentes ortogonales de corriente que regulan el par y el flujo. De esta forma el control por orientación de campo logra reproducir el control desacoplado entre par y flujo que es inherente en los motores de corriente continua (CC). Los controles de velocidad para motores de CA ofrecen una respuesta de par mejorada en relación a los controles para motores de CC debido a su reducido momento de inercia.

El sistema de control de velocidad cuando el motor es alimentado por fuente de corriente es apropiado para forzar a la fuerza magnetomotriz

del estator a situarse en cualquier posición e intensidad en el plano complejo y en forma independiente de la dinámica de la máquina.

Con esta condición el orden dinámico se reduce y el sistema queda caracterizado por una sola ecuación compleja y permite reducir el modelo del motor al mostrado en la Figura 3.3

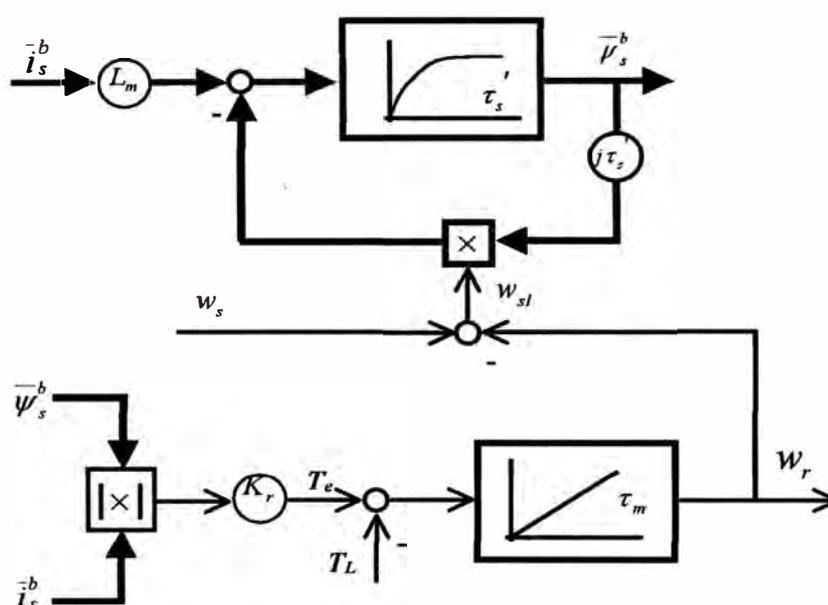


Figura 3.3 Sistema de Control de Velocidad alimentado Fuente de Corriente

Si la componente imaginaria del flujo rotórico es forzada a ser cero entonces esto equivale a hacer coincidir el nuevo sistema de referencia con el vector espacial del flujo rotórico como se muestra en la figura 3.4

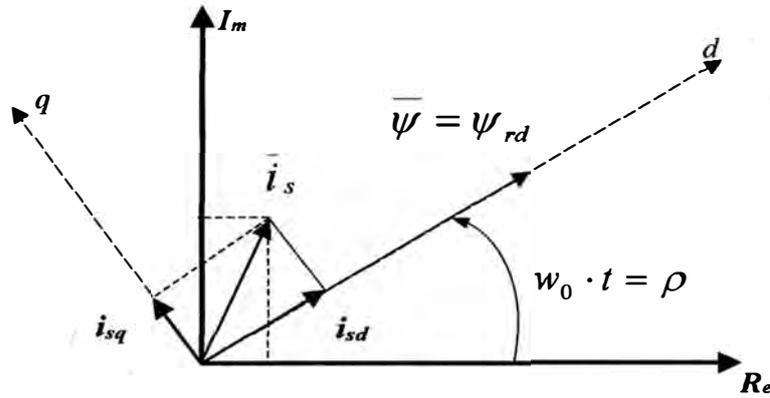


Figura 3.4 Sistema Coordinado con Orientación de Campo.

Con el Sistema de Control por Orientación el modelo del motor de inducción queda reducido al mostrado en la Figura 3.5 y las ecuaciones correspondientes son las indicadas por las relaciones 3.1 y 3.4 de donde se observa que el flujo es controlado por la componente directa de la corriente i_{sd} y el par desarrollado es controlado por la componente en cuadratura i_{sq} de la corriente del estator en el nuevo sistema de referencia (Figura 3.4).

La relación 3.2 es importante porque de ella depende la ubicación del nuevo sistema coordinado que permite el desacoplo de el flujo y par

$$\tau_r' \cdot \frac{d}{dt} \psi_{rd} + \psi_{rd} = L_m i_{sd} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$w_{sl} = \frac{L_m}{\tau_r'} \cdot i_{sq} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} \cdot i_{sq} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$T_e = k_r \cdot \psi_{rd} \cdot i_{sq} \dots \dots \dots (3.4)$$

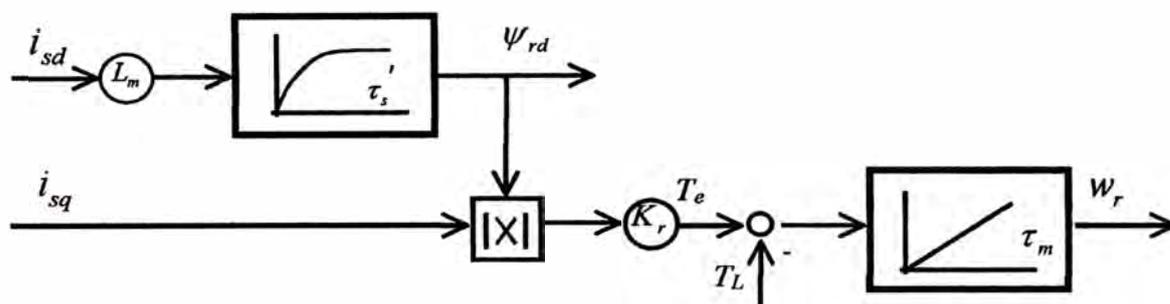


Figura 3.5 Modelo del Motor de Inducción en Sistema Coordinado Orientado con el Flujo Rotórico.

3.2. Modelo Inverso

A partir de las relaciones anteriores se puede establecer un diagrama inverso del cual se establecerá el control por orientación de campo

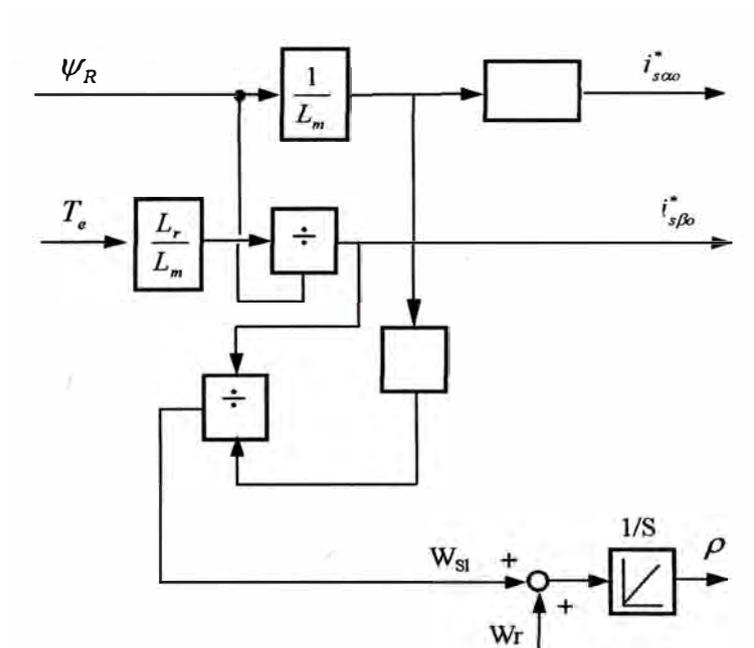


Figura 3.6. Modelo Inverso

A partir del modelo del inverso se aprecia que el flujo será controlado a través de la corriente $i_{s\alpha}^*$ y el par será controlado por la corriente $i_{s\beta}^*$ en forma independiente una de la otra. De esta forma se obtiene un control del motor de inducción semejante al de un motor de corriente continua debido a que el par y el flujo de rotación son controlados independientemente.

CAPÍTULO IV

CONVERTIDOR DE FRECUENCIA CON ENTRADA POR RECTIFICADOR ACTIVO (ACTIVE FRONT END)

La topología más usada o conocida en Variadores de Velocidad en corriente alterna es el Inversor por Modulación de Ancho de Pulsos (PWM)

Sin embargo, el rectificador a diodos con filtro por condensador C genera una gran distorsión de corriente y no presenta la capacidad de regenerar energía hacia la red.

El Convertidor de Frecuencia por Rectificador Activo (AFE) emplea una topología dual de convertidores PWM y a pesar de que esta topología tiene un costo mayor, y su control es complejo es ideal para accionamientos de motores CA en 4 cuadrantes.

4.1. Características Principales del AFE

El Convertidor con AFE se distingue por lo siguiente:

- Unidad de alimentación / devolución PWM con IGBTs
- Corrientes de red senoidal es sin armónicas típicas de la red y, por tanto, reacciones mínimas sobre la misma.
- AFE permite el control del factor de potencia de red, $\cos \phi$ ajustable o programable entre 1 y 0.8 ind./cap.
- Adecuado para los dos sentidos de la energía, es decir funcionamiento en régimen de alimentación y en régimen de devolución.

- Desconexión activa en casos de fallo de red, por lo que no se produce pérdida de estabilidad con actuación de fusible si falla la red en caso de devolución.
- Compensación de tensión baja de red mediante funcionamiento con elevación de tensión.
- Respuesta dinámica extremadamente alta del accionamiento AFE permite tener una alimentación limpia (libre de armónicas).
- AFE permite obtener el 100% de la capacidad del eje aunque haya caídas de voltaje. Continuidad de operación ilimitada.
- AFE permite una respuesta dinámica alta del variador.
- AFE es inherentemente para operación en 4 cuadrantes, con una transición suave entre motorización y regeneración. 100 % de capacidad regenerativa.
- No hay fallos de conmutación.

El proceso de rectificación puede contener diodos, tiristores, etc. (Figura 4.1) Estos módulos tienen distintas desventajas y limitaciones. Active Front End (Figura 4.2) elimina todas estas limitaciones.

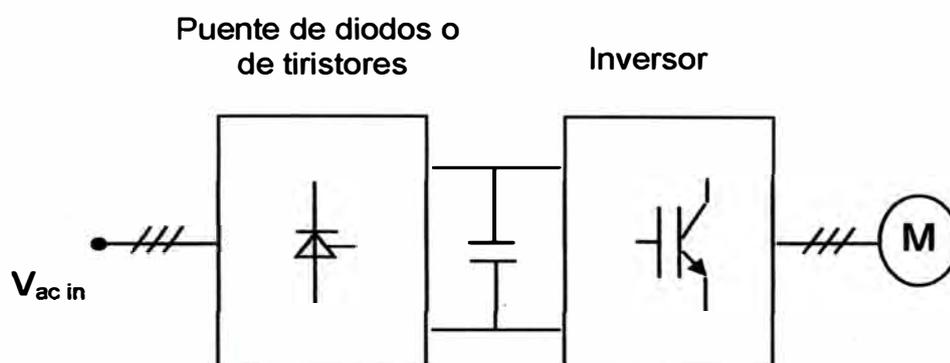


Fig. 4.1 Esquema Clásico

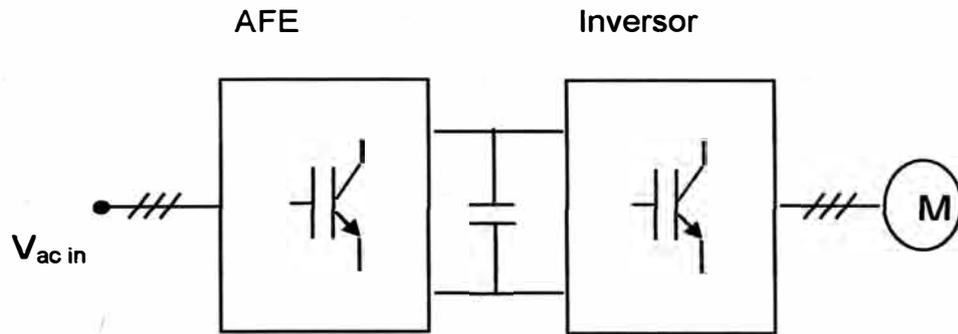


Fig. 4.2 Esquema propuesto usando AFE

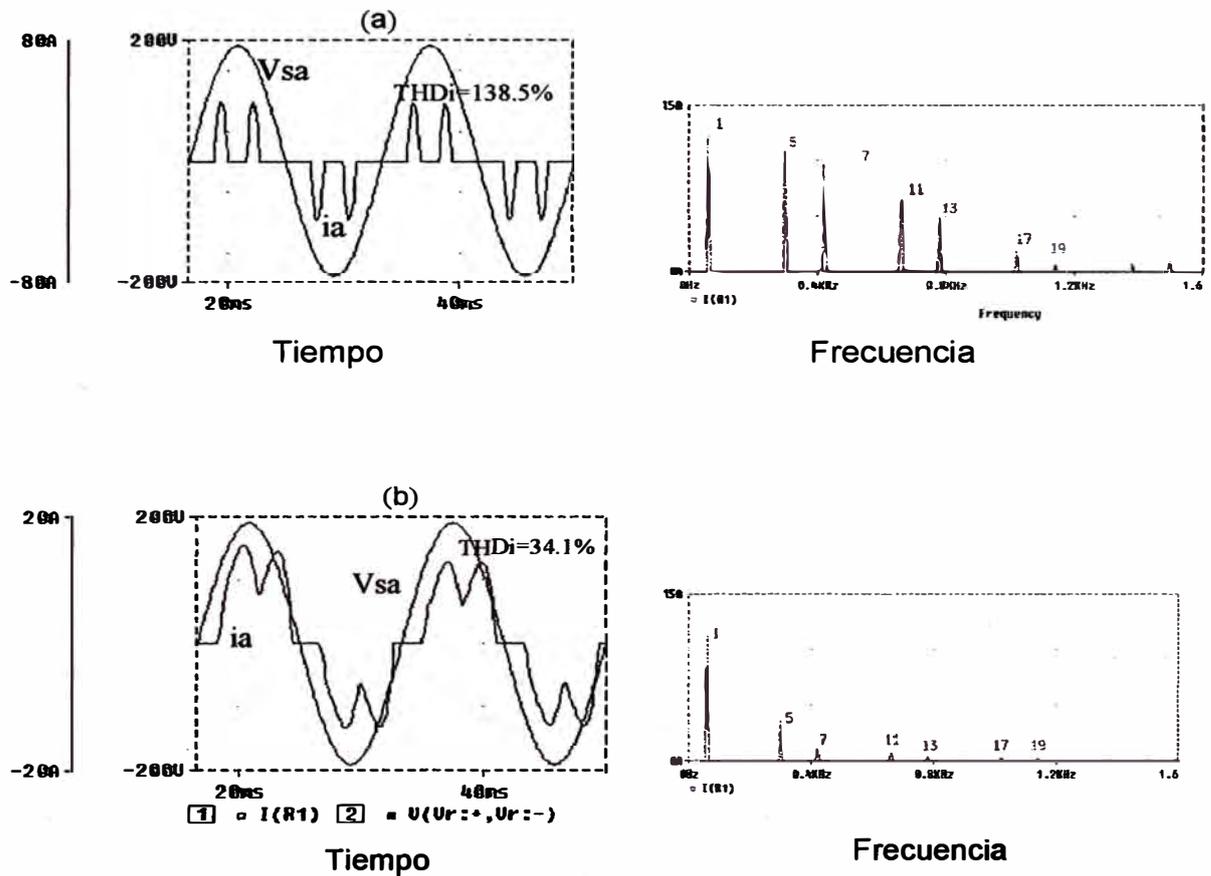


Fig. 4.3 Formas de ondas de tensión y corriente absorbida por los sistemas de control de velocidad Tradicionales.
 (a) Sin inductancia en la Línea
 (b) Con inductancia en la Línea

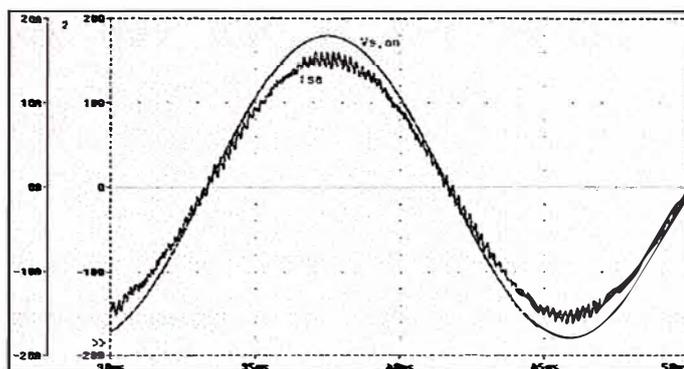


Fig. 4.4. Forma de Onda de tensión y corriente del AFE

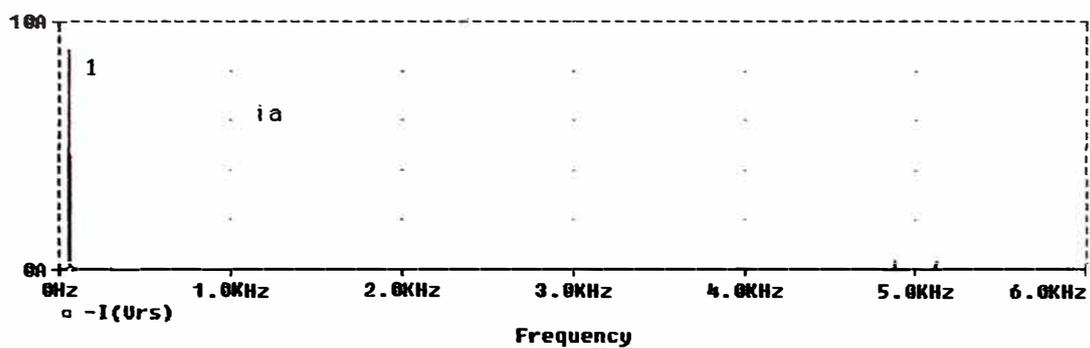


Fig. 4.5. Nivel de distorsión armónica del AFE

4.2. Beneficios que trae el AFE versus la tecnología convencional

Tecnología anterior	Active Front End
<p>Las Tensiones de Conmutación son problemas serios. Sus magnitudes y efectos dependen del diseño del variador y de las características de la alimentación.</p>	<p>Las Tensiones de Conmutación no son generadas.</p>
<p>Las Armónicas son generadas, su magnitud depende de la potencia, tensión y configuración del variador. Sistemas de alimentación débiles pueden causar muchos problemas.</p>	<p>Las Armónicas son prácticamente inexistentes, su nivel no es afectado por la calidad de la alimentación o por la carga</p>
<p>Tolerancia de Alimentación, las caídas de tensión se reflejan en el circuito de CC y en el funcionamiento del motor. La tolerancia de la alimentación comprometa la calidad de funcionamiento de la aplicación.</p>	<p>Las Caídas de Tensión son reguladas, la tensión del circuito intermedio de CC es mantenida constante y la salida del motor no es afectada. Alimentaciones débiles no afectan al variador.</p>
<p>Los Tiempos de Respuesta son limitados usando tecnología convencional debido a la limitación en la sincronización con la red principal.</p>	<p>Altamente Dinámico, efecto mínimo causado por picos de energía.</p>

<p>El Factor de Potencia es casi 1 para la fundamental nada más, las armónicas principales distorsionan el panorama. La tecnología de tiristores usada en algunos equipos de 4 cuadrantes puede resultar en un factor de potencia pobre, 0.85.</p>	<p>Factor de Potencia controlado usando el manejo de la corriente de entrada. El factor de potencia es electrónicamente controlado a valores seleccionados o dinámicos.</p>
<p>Es necesario el uso de equipos para compensar el factor de potencia y disminuir el contenido de armónicas.</p>	<p>El factor de potencia es controlado. No hay generación de armónicas. No es necesario el uso de equipos de corrección del factor de potencia.</p>
<p>Los componentes de potencia y tarjetas de control son un mix de tiristores (diodos) e IGBTs (transistores o GTOs). Se necesitan varios tipos de repuestos. Los componentes de potencia y tarjetas de control son un mix de tiristores (diodos) e IGBTs (transistores o GTOs). Se necesitan varios tipos de repuestos.</p>	<p>El AFE usa sólo IGBTs con eso se simplifica el requerimiento de partes de repuesto.</p>
<p>La Tensión de CC tiene un alto contenido de transcientes, de 300 Hz, que son vistos en el motor como transcientes de par (velocidad) en el eje del motor</p>	<p>El AFE es dinámico, la tensión de CC es mantenido estable con mínimos picos de voltaje resultando en un óptimo par (velocidad) en el eje del motor.</p>

Tabla 1. Comparación entre los Beneficios que trae el AFE y la tecnología convencional.

4.3. Principio de operación del Rectificador Activo

Elevación de la tensión.

Considere el siguiente circuito. Todos los componentes se consideran ideales.

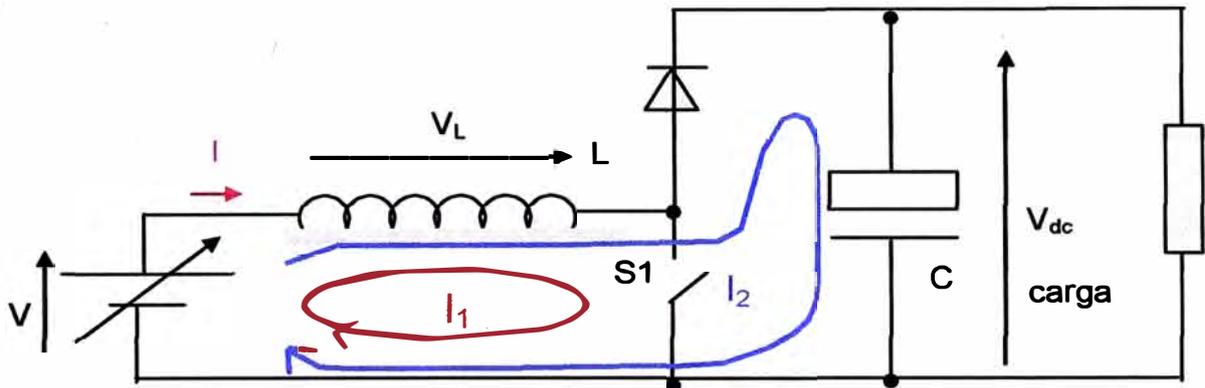


Fig.4.6 Esquema Principio Operación

- Inicialmente C se carga a la tensión V (pre-carga), I_2 .
- S1 cierra y la corriente I_1 aumenta. L guarda la energía.
- S1 abre, la energía en L es transferida a C por la corriente I_2 .
Debido al efecto inductivo $V_{dc} = V + V_L$
- Controlando la conmutación de S1 la tensión V_{dc} es mantenida constante, independientemente de la tensión V o la carga.
- Entre más rápido se conmute S1 mejor el control de V_{dc} y así es más "suave" la corriente I.

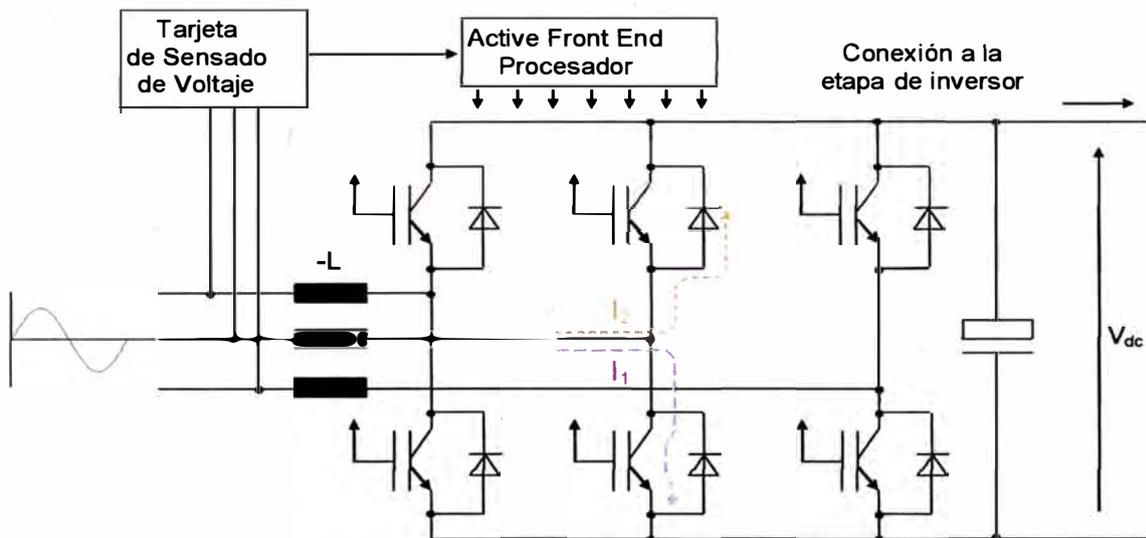


Fig. 4.7 El Active Front End es en efecto una fuente conmutada

Los IGBTs son conmutados de forma que la corriente sinusoidal es consumida de la red y el V_{dc} es constante.

La amplitud de la CA de entrada refleja la energía requerida por el circuito intermedio.

4.4. Compensación de Potencia Reactiva

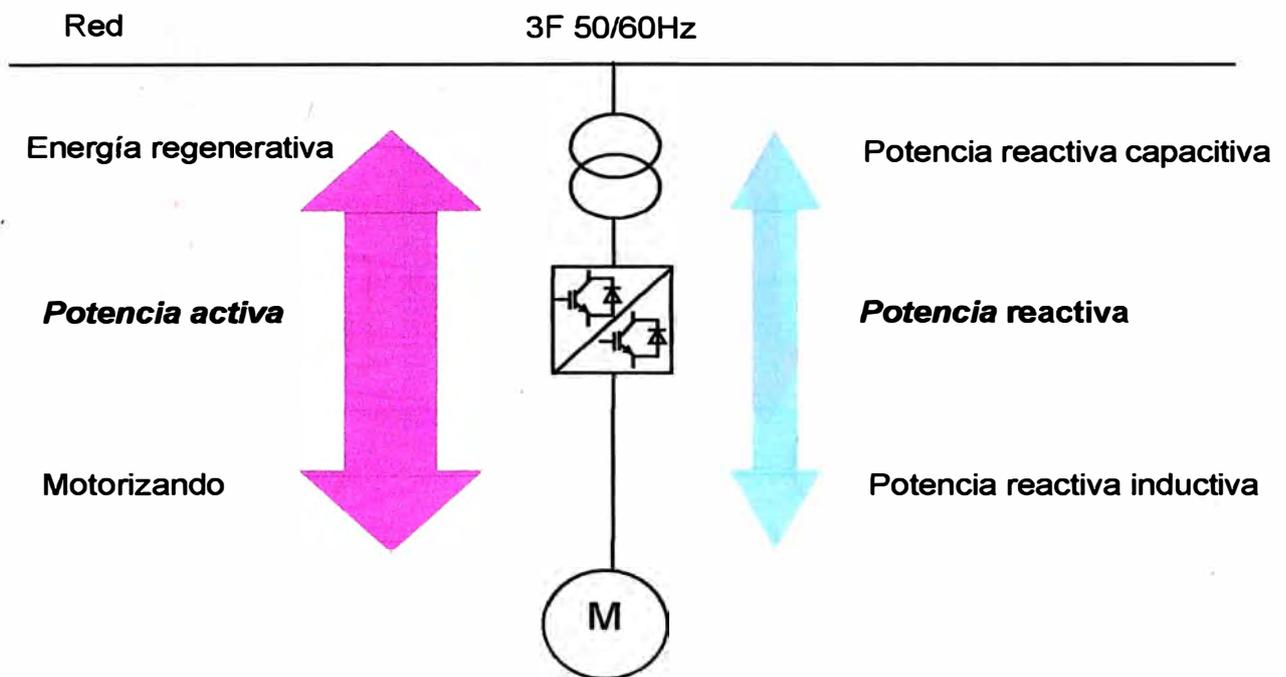


Figura.4.8. Uso del Variador para control de Potencia Reactiva

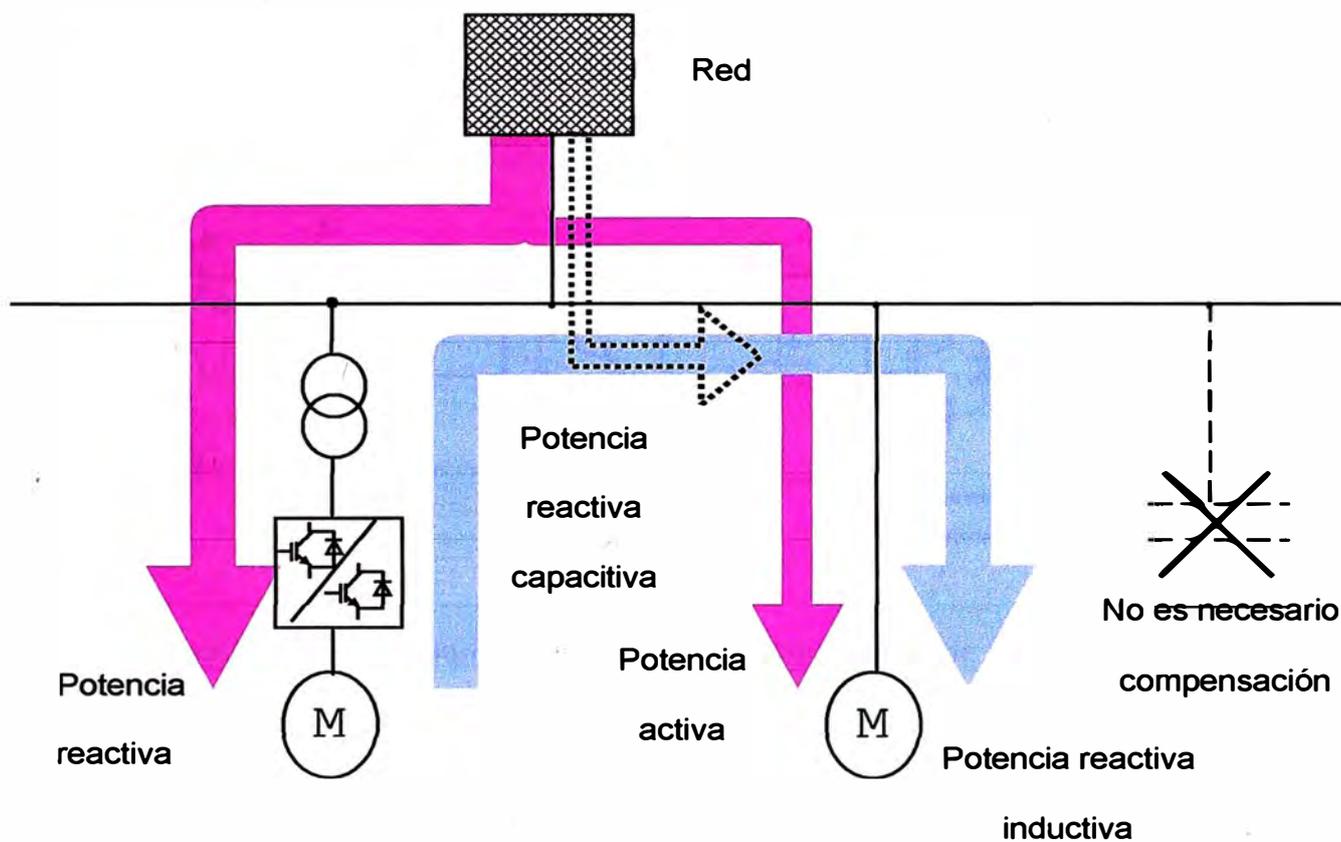


Figura.4.9 Control del Factor de Potencia

La función de compensación de factor de potencia está optimizada para cargas conectadas a la red, debido a que el requerimiento de potencia reactiva se controla en forma dinámica

Resultados de Simulación

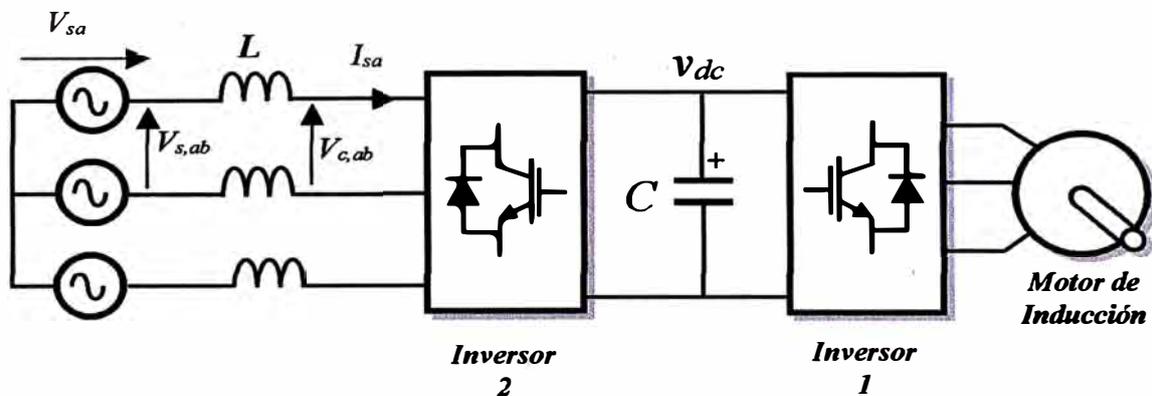


Figura 4.10. Esquema General (AFE+Convertidor de Frecuencia)

a) Operación a factor de potencia uno ($\cos \phi = 1$)

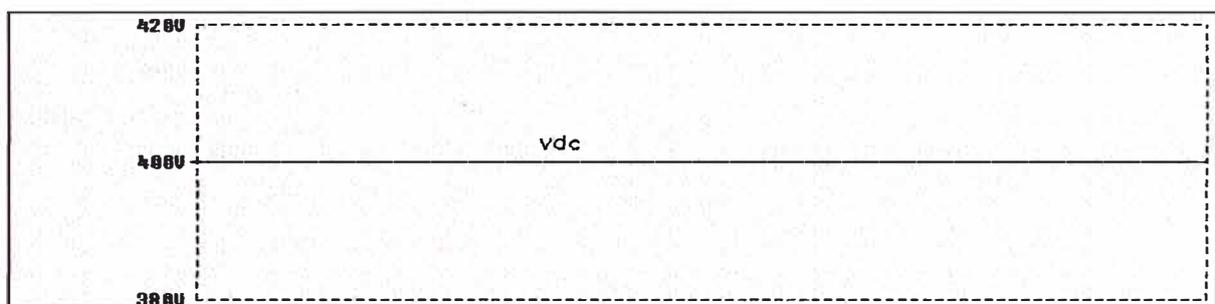


Figura 4.11. Tensión en el Condensador C de Enlace

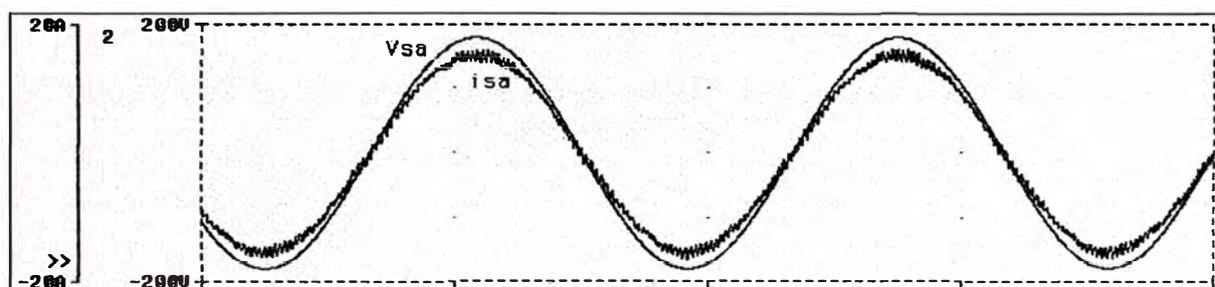


Figura 4.12. Tensión y corriente por fase en los terminales de conexión con la red del AFE

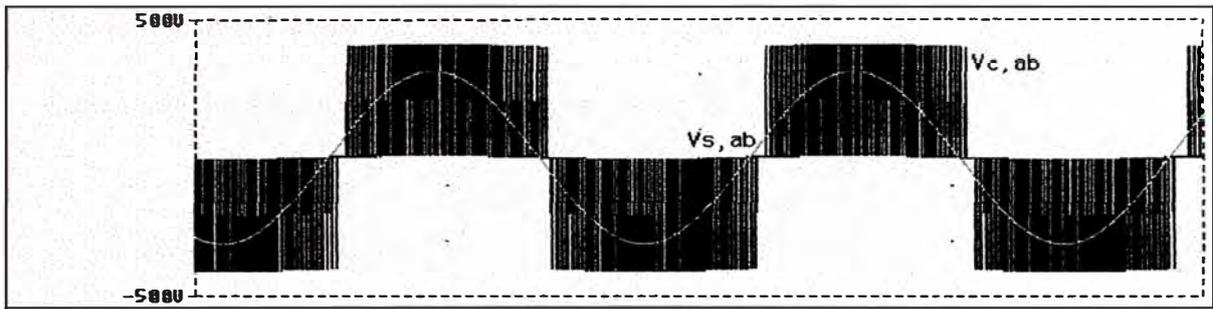


Figura 4.13. Tensión de línea $V_{s,ab}$ de la red y $V_{c,ab}$ en los terminales en CA del rectificador activo o AFE

b) Operación a factor de potencia cero ($\cos \phi = 0$)

Capacitivo hasta los 40ms y luego inductivo.

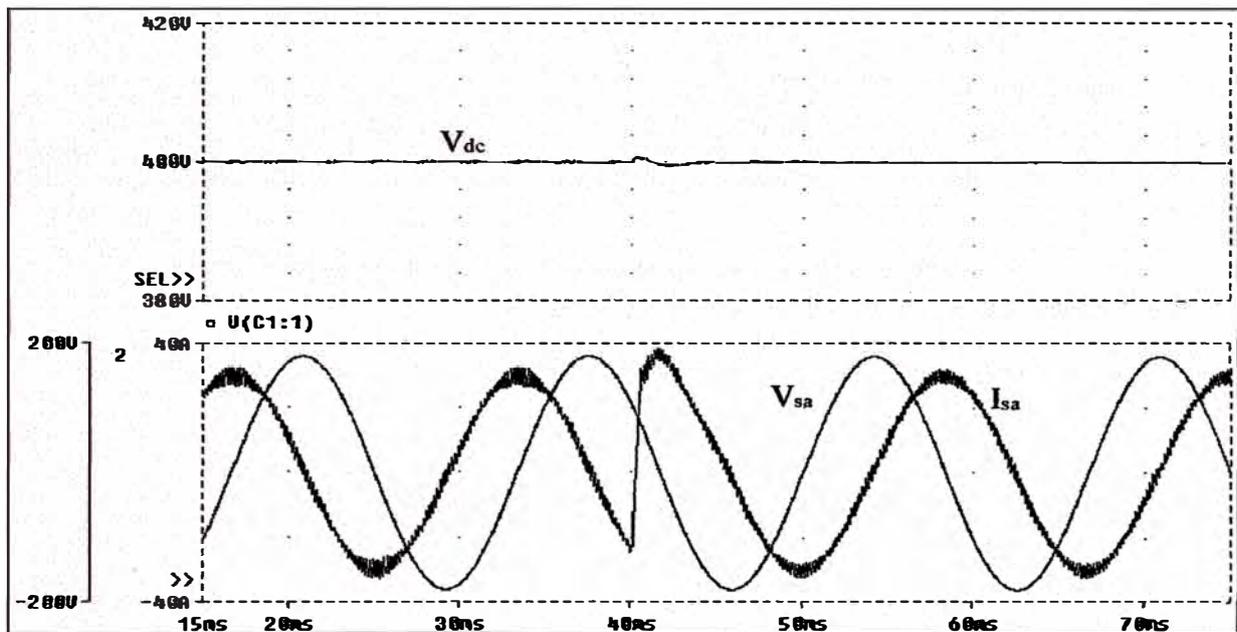
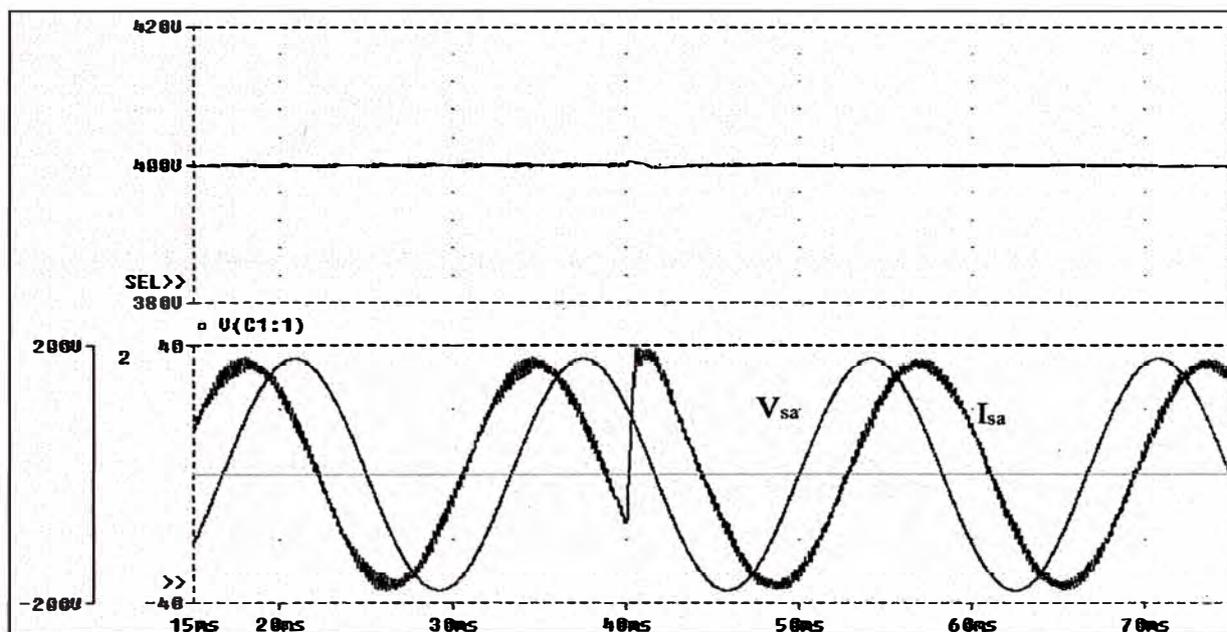


Figura 4.14. a) Tensión en el condensador b) Tensión y corriente en los terminales AC de AFE

c) Operación a factor de potencia ($\cos \phi = 0.447$.)

Capacitivo hasta los 40ms y luego inductivo.



**Figura 4.15.- a) Tensión en el condensador
b) Tensión y corriente en los terminales de AFE**

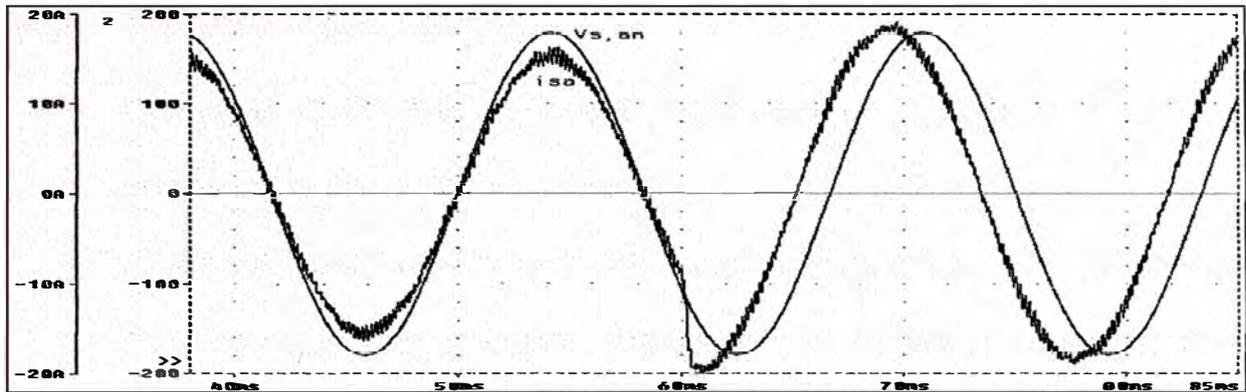


Figura 4.16. Respuesta Transitoria del cambio del f.d.p. presentado por el AFE



Figura 4.17. Diagrama Fasorial para la corrección del f.d.p.

$$i_p = 15.4A, \quad i_q = 10A, \quad \phi = 33^\circ, \quad \text{f.d.p.} = \cos \phi = 0.838 \text{ (cap.)}$$

$$i_{sa} = 18.36A$$

4.5. Alimentación Limpia

- El Active Front End consume solamente una corriente sinusoidal **limpia** de la alimentación principal.
- El Active Front End usa una conmutación rápida interna junto con un filtro especial que asegura una onda de corriente sinusoidal casi perfecta de la alimentación principal. Esto es **alimentación limpia**. Tal como se muestra en la Figura 4.18.

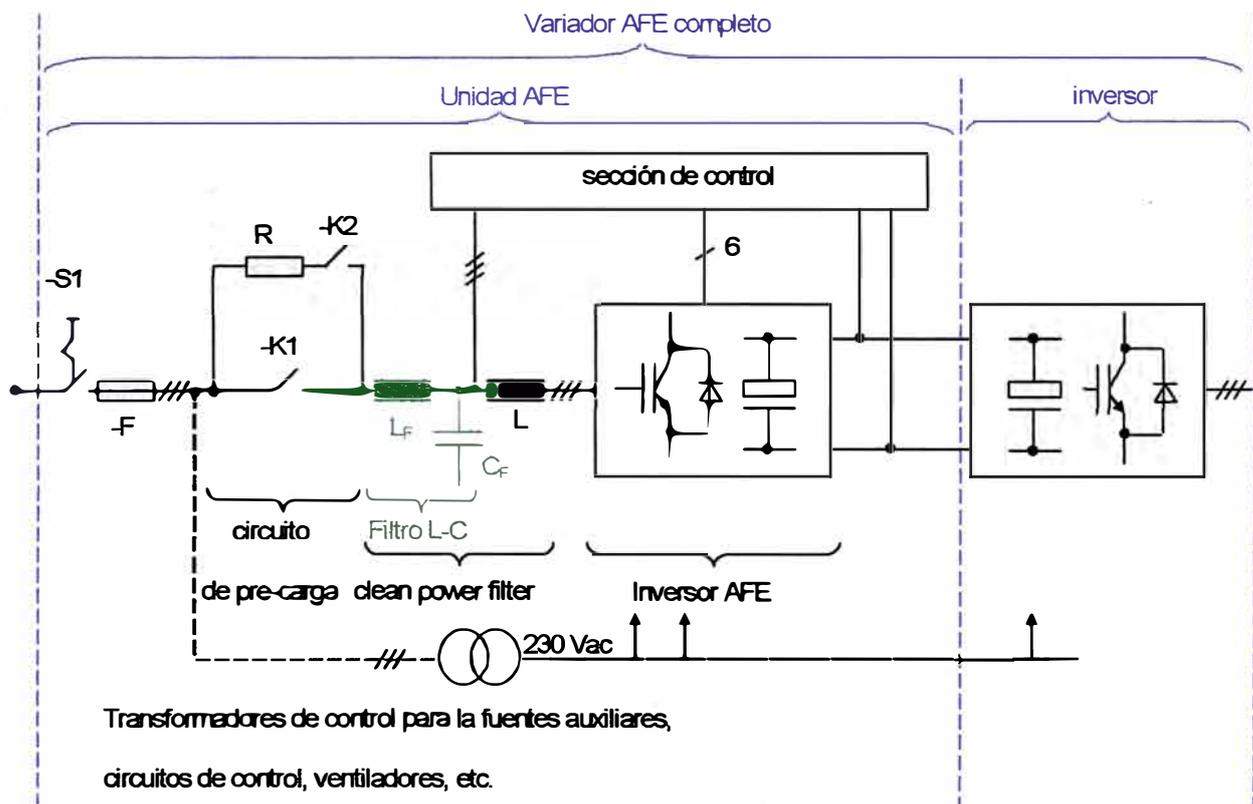


Figura 4.18. Esquema Active Front End

- Sólo con **potencia limpia** es posible tratar al Active Front End como una fuente sinusoidal.

Cumplen con todas la regulaciones sobre distorsión por armónicas inclusive en redes débiles

- Transformadores normales de distribución son usados sin factor K.
- No se necesitan transformadores con varios devanados (p.e. 12 pulsos).

4.6. Rango del Active Front End

Los AFE actualmente abarcan los siguientes intervalos de potencia

- 150 % de sobrecarga, gran tolerancia de tensión.

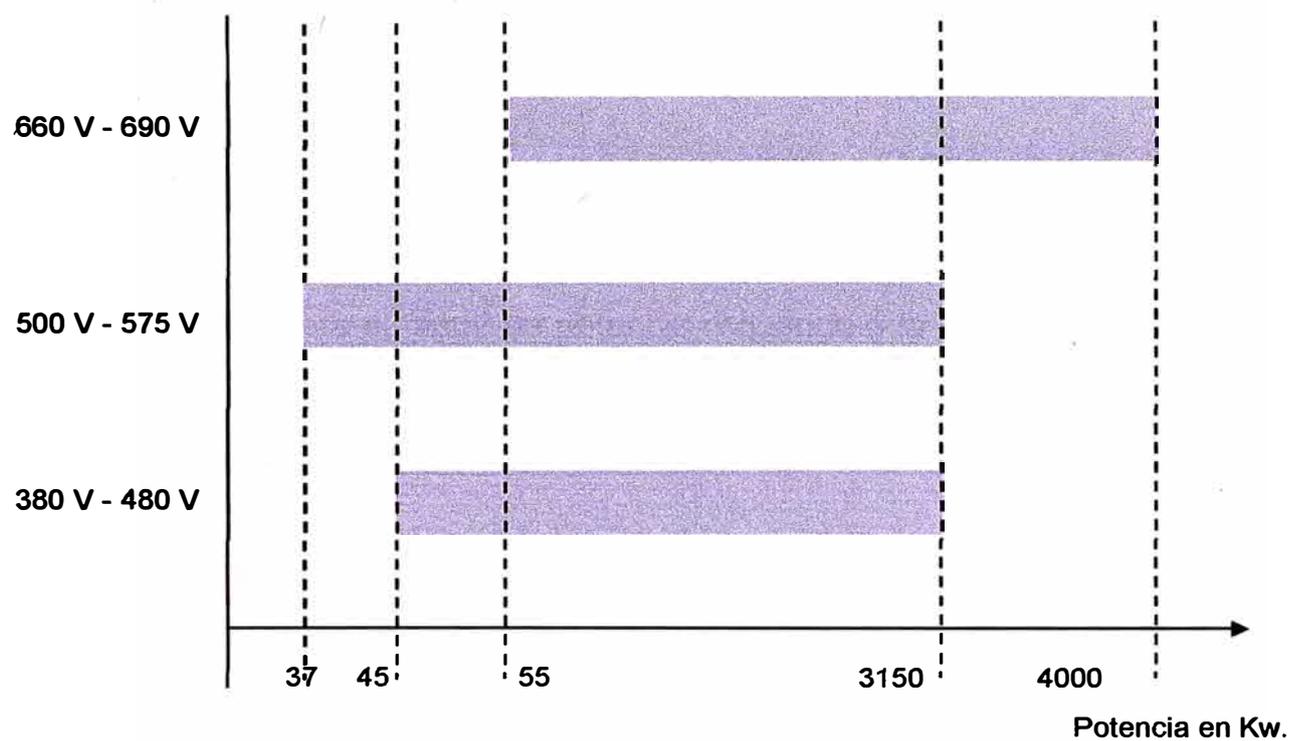


Fig. 4.19 Rango de Potencias del Active Front End

4.7. Ejemplo de Selección del AFE

Para la determinación de la potencia requerida por el AFE se toma en cuenta lo siguiente:

- Se considera la mínima tensión de red $V_{ac\ min}$ incluyendo el 100% de tolerancia del inversor.
- Se considera todos los motores conectados al AFE, su potencia P_{motx} y eficiencia η_{motx} y si están motorizando o regenerando.
- Se considera el factor de potencia requerido a la entrada del AFE, ya sea como factor de potencia o como KVAR.

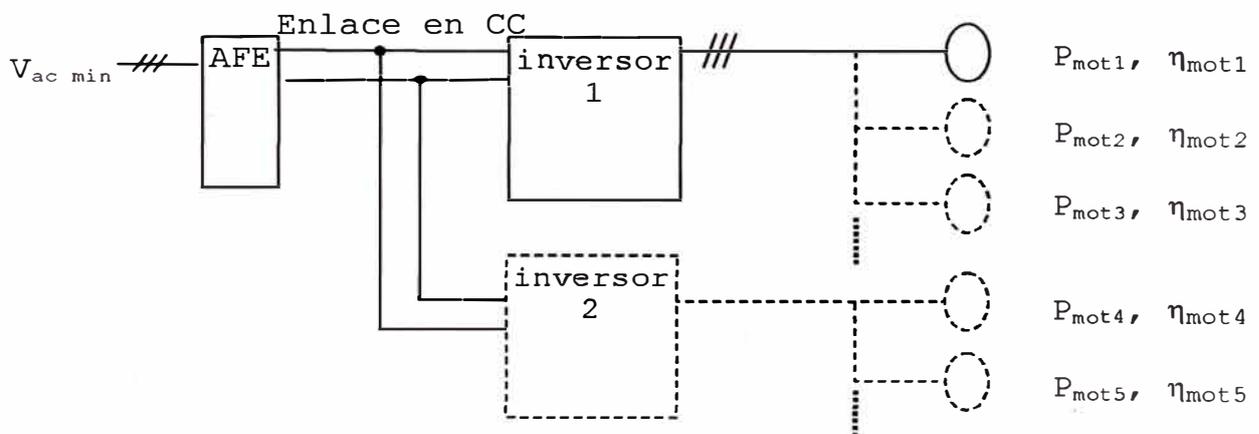


Fig. 4.20 Conexión Múltiple de Inversores

A la salida del bus de CC (DC-Link) se le pueden conectar uno o varios Inversores. La potencia máxima de los inversores puede ser el cuádruplo de la potencia nominal del inversor AFE. La suma de potencia efectiva tomada de la red no debe sobrepasar constantemente la potencia nominal del AFE.

Considere el factor de potencia requerido del circuito intermedio, por cada motor.

1. Si está motorizando

$$P_{reqx} = \frac{+P_{motx}}{\eta_{motx} \cdot 0,98}$$

Si está regenerando

$$P_{reqx} = -P_{motx} \cdot \eta_{motx} \cdot 0,98$$

2. Sumar los requerimientos individuales de potencia de los motores

$$P_{reqtotal} = \sum_{x=1}^{x=\infty} P_{reqx}$$

3. Calcule la corriente requerida por el AFE para dar un factor de potencia igual a 1.

Si $P_{reqtotal}$ es **positiva - motorizando**

$$I_{AFEp.f.1} = \frac{P_{reqtotal}}{\sqrt{3} \cdot V_{acmin} \cdot 0,98}$$

Si $P_{reqtotal}$ es **negativa - regenerando**

$$I_{AFEp.f.1} = \frac{P_{reqtotal} \cdot 0,98}{\sqrt{3} \cdot V_{acmin}}$$

4. Si se necesita la compensación del factor de potencia

Modo 1 - modo KVAR constante

$$I_{AFE} = \sqrt{\left(I_{AFEp.f.1}\right)^2 + \left(\frac{VAr}{\sqrt{3} \cdot V_{acmin}}\right)^2}$$

Modo 2 - modo **factor de potencia** constante

$$I_{AFE} = \frac{I_{AFEp.f.1}}{p.f.}; \quad 0,8 \leq p.f. \leq 1,0$$

Por ejemplo:

Requerido: Motor 110 KW, 4 polos, 400 V, bomba, alimentación es 415 V \pm 6 %

Detalles de catálogo del motor: 110 KW, 194 A, 400 V, $\eta=94,8$ %

Selección de variador: la corriente de fase 194 A requiere un variador de 110 KW.

Selección del AFE

1. Motorizando

$$P_{req1} = \frac{+P_{mot1}}{\eta_{mot1} \cdot 0,98} = \frac{+110kW}{94,8\% \cdot 0,98} = +118,4kW$$

2. Calculamos la potencia total requerida.

$$P_{reqtotal} = P_{req1} = +118,4kW$$

3. Calculando la corriente requerida por el AFE para f.d.p. unitario

$$I_{AFEp.f.1} = \frac{P_{reqtotal}}{\sqrt{3} \cdot V_{acmin} \cdot 0,98} = \frac{118,4kW}{\sqrt{3} \cdot (415V - 6\%) \cdot 0,98} = 178,8A$$

Buscar un AFE para una potencia nominal de **90 KW** con 186 A de capacidad.

Los requerimientos son cambiados por el cliente: requiere 105 KVAR de potencia reactiva.

4. Modo 1:

$$I_{AFE} = \sqrt{\left(I_{AFEp.f.1}\right)^2 + \left(\frac{VAr}{\sqrt{3} \cdot V_{acmin}}\right)^2} = \sqrt{(178,8A)^2 + \left(\frac{105kVAr}{\sqrt{3} \cdot (415V - 6\%)}\right)^2} = 236,9A$$

Buscar un AFE para una potencia nominal de **132 Kw.** con 260 A de capacidad.

4.8. Corrección del Factor de Potencia

Es estándar la función del Active Front End de compensar el factor de potencia.

El AFE opera en dos modos de corrección de factor de potencia.

1. Modo de KVAR constantes
2. Modo de factor de potencia constante En el modo **KVAR constantes** un %, de 0 a 100 %, de la capacidad de corriente del AFE es utilizada como corriente reactiva, reactivo o inductivo. La corriente reactiva es independiente de la corriente del motor.
 - En el modo **factor de potencia constante**, éste es puesto en un rango entre 1.0 y 0.8 reactivo o inductivo. La corriente reactiva es dependiente de la corriente del motor.
 - Los requerimientos de factor de potencia o de kVAR se pueden programar como valor fijo en un parámetro, o como variable que se puede cambiar vía puerto serial o entrada analógica

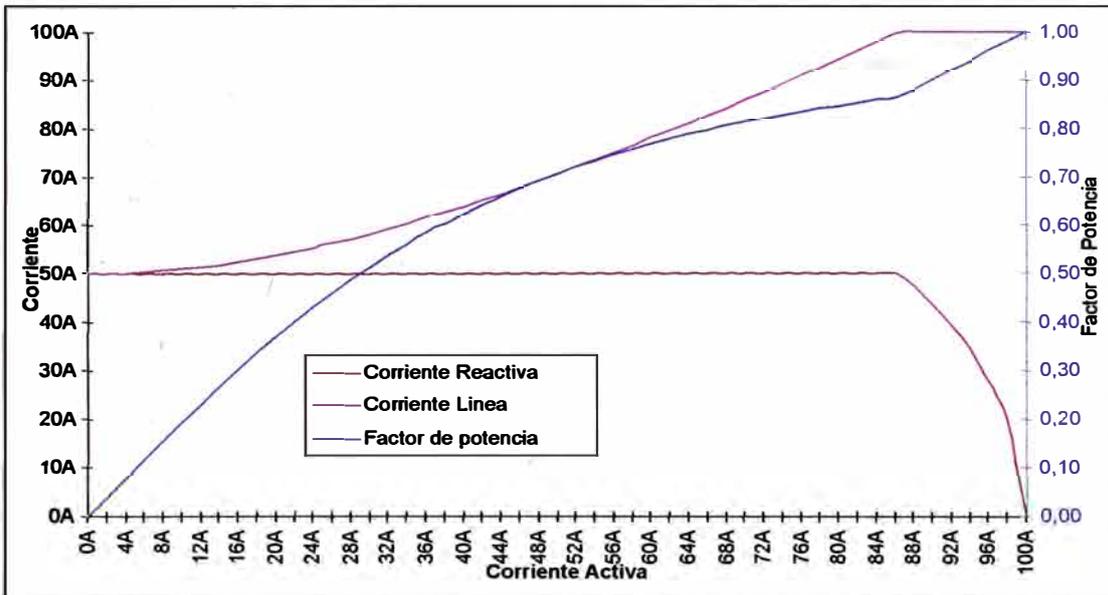


Fig. 4.21. AFE Modo KVAR constante.

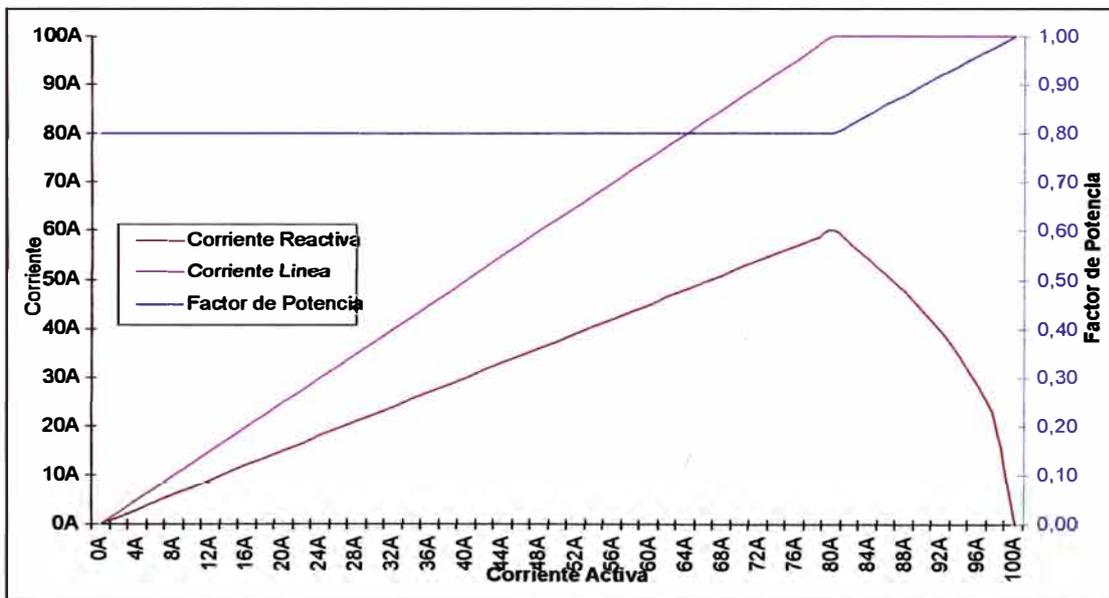


Fig. 4.22. AFE Modo factor de potencia constante.

- Si la combinación de las corrientes reactivas y activas es mayor al 100% de capacidad del AFE, se utilizan los 60 s de capacidad de sobrecarga.
- Luego de utilizar la capacidad de sobrecarga, entra a funcionar el **manejo de la corriente**.
- La corriente reactiva es reducida progresivamente para mantener la corriente activa del motor (Figuras 4.21 y 4.22)

4.9. Regeneración de Energía

- El AFE es inherentemente para uso en 4Q - continuamente.
- El AFE está libre de fallas de conmutación - no se queman los fusibles - inclusive con pérdidas parciales o totales de energía.
- El sistema libre de armónicas se cumple inclusive para el modo regenerativo.
- A pesar de estar regenerando, el factor de potencia se sigue controlando.
- Si cae la alimentación durante la regeneración, la energía devuelta a la red es mantenida la corriente aumenta a medida que el voltaje disminuye.
- El AFE es dimensionado de tal forma que no haya problemas a pesar de aumentos de voltaje debido a la regeneración en redes débiles.
- Limitación segura de la corriente si el AFE regenera en un cortocircuito.

4.10. Picos de voltajes

En tecnología convencional, los diodos y/o tiristores conmutan la tensión de entrada. "Conmutación" es en efecto un corto circuito momentáneo entre dos fases de entrada.

El efecto de este cortocircuito depende de:

- La capacidad de cortocircuito de la red
- La reactancia del equipo
- El diseño del variador

La magnitud de los picos está regulada por las normas internacionales.

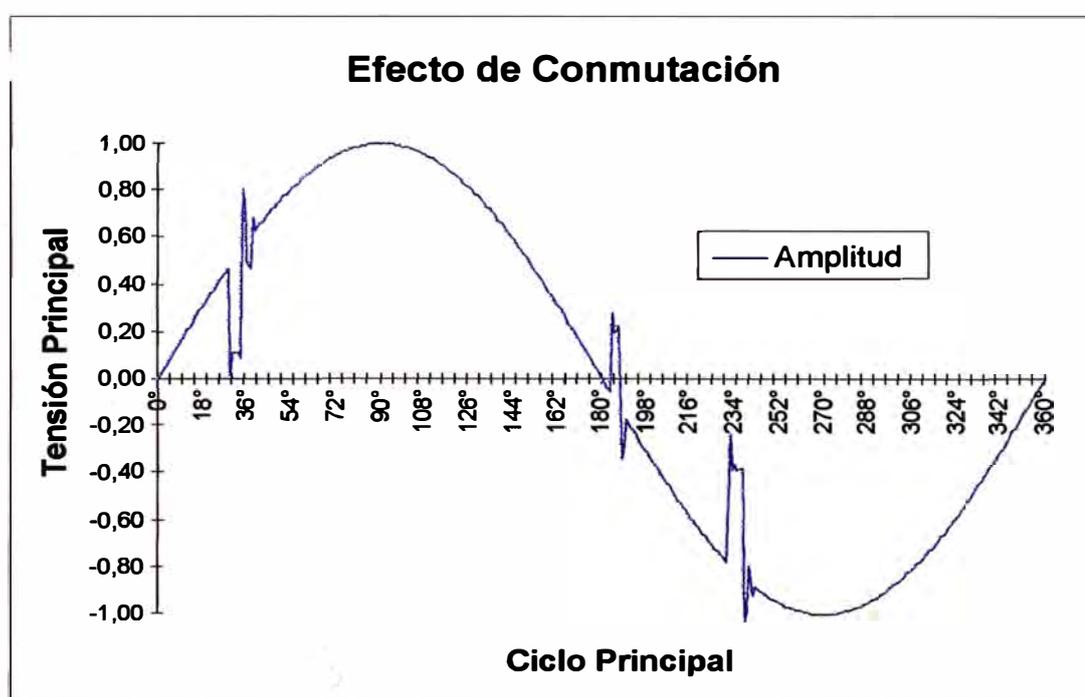


Fig. 4.23. El AFE no genera picos de tensión

4.11. Filtros contra radio interferencias

Los Active Front End son construidos para minimizar los efectos de la emisiones RFI.

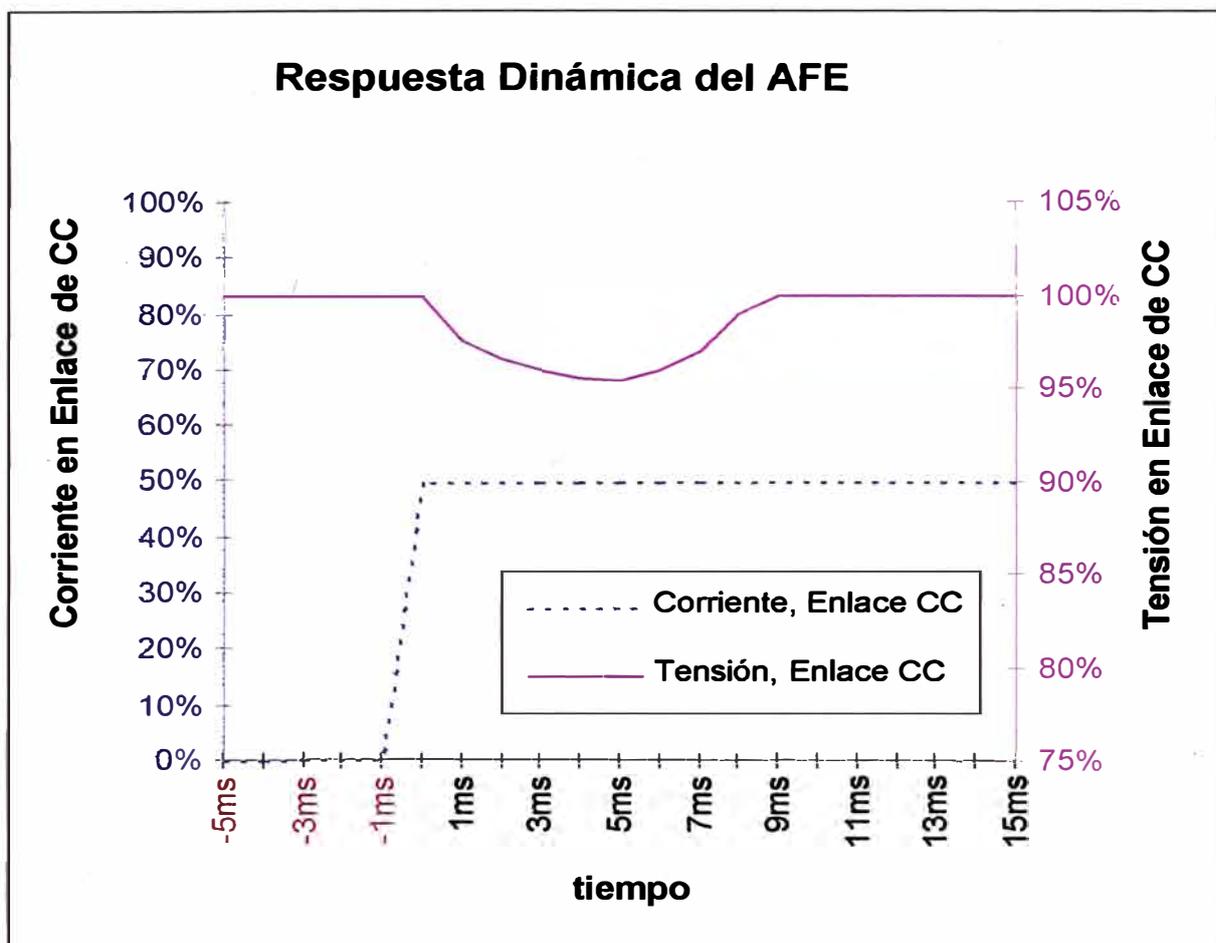
Para cumplir con estándares definidos de RFI, hay filtros RFI disponibles como opción estándar.

Los Active Front End son inmunes a interferencias radiadas externamente.

- El AFE puede elevar la tensión a partir de una red débil.
- El AFE puede seguir trabajando con el 5 % de la tensión nominal de una red, es decir con $20 V_{AC}$ a partir de una red de $400 V_{AC}$.
- La tensión del circuito intermedio se mantiene estable, las condiciones para el motor se mantienen sin cambio.
- Ya que el motor no sufre cambio, la corriente debe elevarse a medida que la tensión decaiga. Esto debe tomarse en cuenta cuando se selecciona un AFE.
- Si la tensión cae por debajo del 5% de tolerancia, la tensión de control debe ser suplido por medio de una UPS o una fuente estable.

4.12. Respuesta Dinámica

- El AFE tiene una respuesta dinámica muy rápida.
- Los cambios de carga rápidos en los motores de inducción son rápidamente acomodados por el AFE.
- El AFE puede soportar condiciones críticas como choques de carga en el rango de debilitamiento de campo.
- El AFE puede soportar regeneración de motores con cargas oscilantes.
- La rápida respuesta tiene como resultado pequeñísimas oscilaciones en la tensión en CC de enlace entre convertidores lo cual se traduce en rizados casi nulos en el bus de CC, mayor vida de capacitores y rizados mínimos en el par del motor.



4.13. Control del AFE

Recientemente muchos métodos para el control del AFE han sido propuestos, entre los que podemos mencionar al control por orientación de tensión (Voltage Oriented Control – VOC), el Control Directo de Potencia (Direct Power Control – DPC) y el Control por Orientación del Flujo Virtual, entre otros.

En la Figura 4.25 se muestra un esquema de control por corriente y que consiste en medir las corrientes instantáneas de cada fase y forzarlas a seguir a las corrientes de referencia $i_{a,ref}$; $i_{b,ref}$; $i_{c,ref}$ respectivamente generadas por el control. La amplitud de las corrientes de referencia $I_{máx}$ es obtenida del regulador que controla la tensión del condensador V_{dc} , mientras que las formas de onda de las corrientes de referencia son obtenidas multiplicando dicha amplitud $I_{máx}$ con la función seno que está sincronizada con la tensión de la red y con la fase si se desea. Finalmente estas corrientes de referencia creadas son comparadas con las corrientes reales respectivamente y si el error excede una magnitud máxima definida (Banda de histéresis) se accionaran los dispositivos de potencia correspondientes de cada fase (Figura 4.26) que conforman las fases de inversor (Generador PWM) para colocar a la corriente real dentro de la banda de error preestablecido.

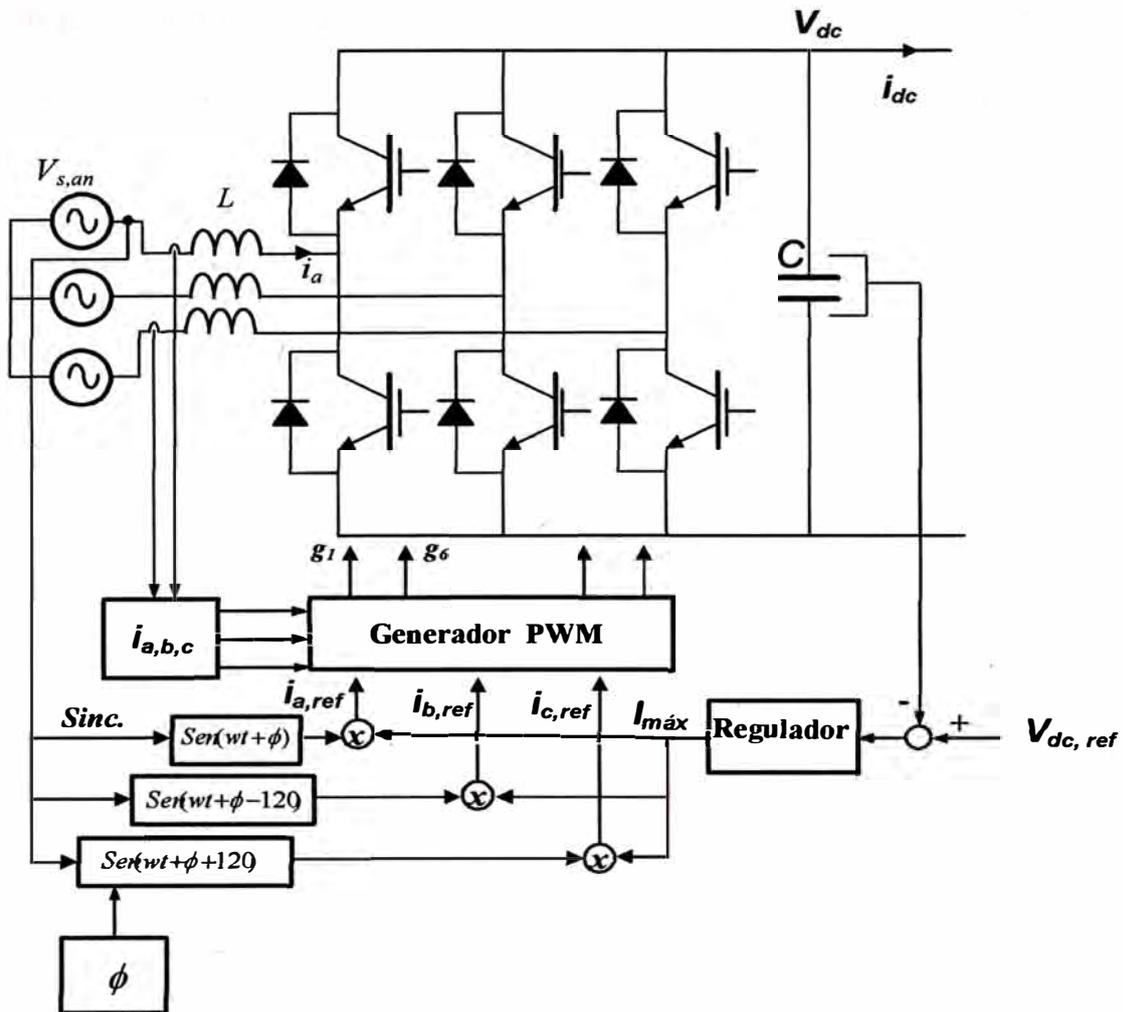


Figura 4.25. Esquema de control por corriente del AFE

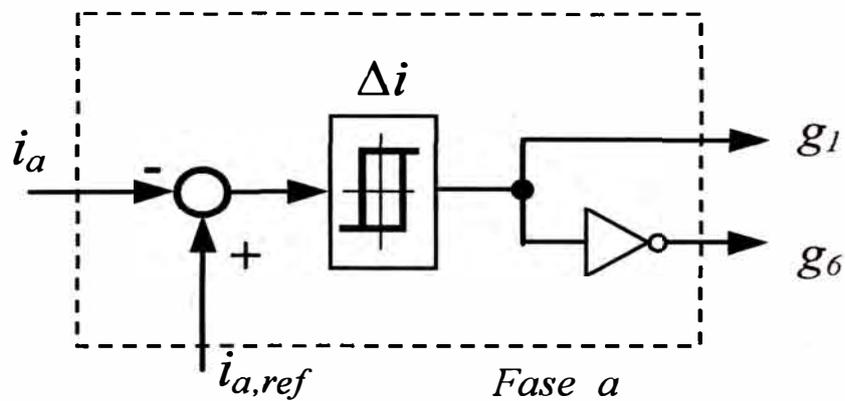


Figura 4.26. Control ON-OFF (Histéresis) de Corriente

Comparación entre el contenido de armónicos en la onda de corriente absorbida por el AFE frente a los inversores de 6 y 12 pulsos.

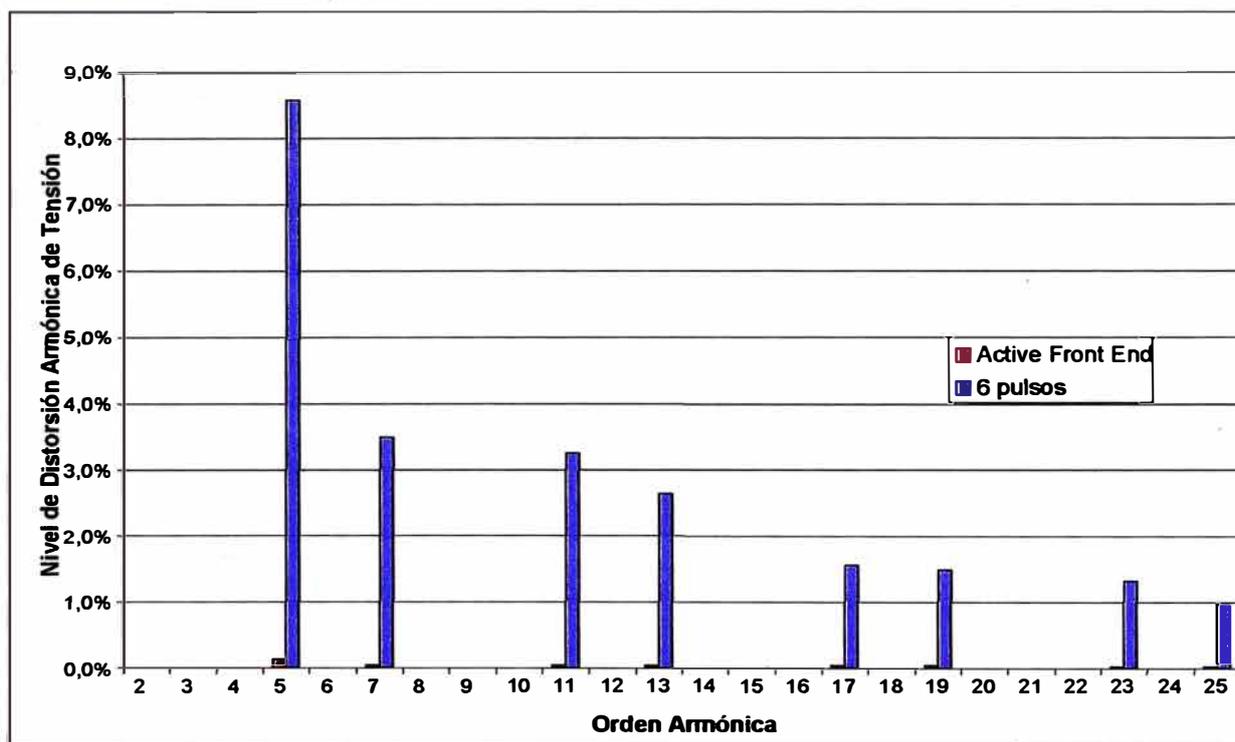


Figura 4.27. Comparación del Nivel de Distorsión de Armónicas entre el Sistema de 6 Pulsos Versus AFE

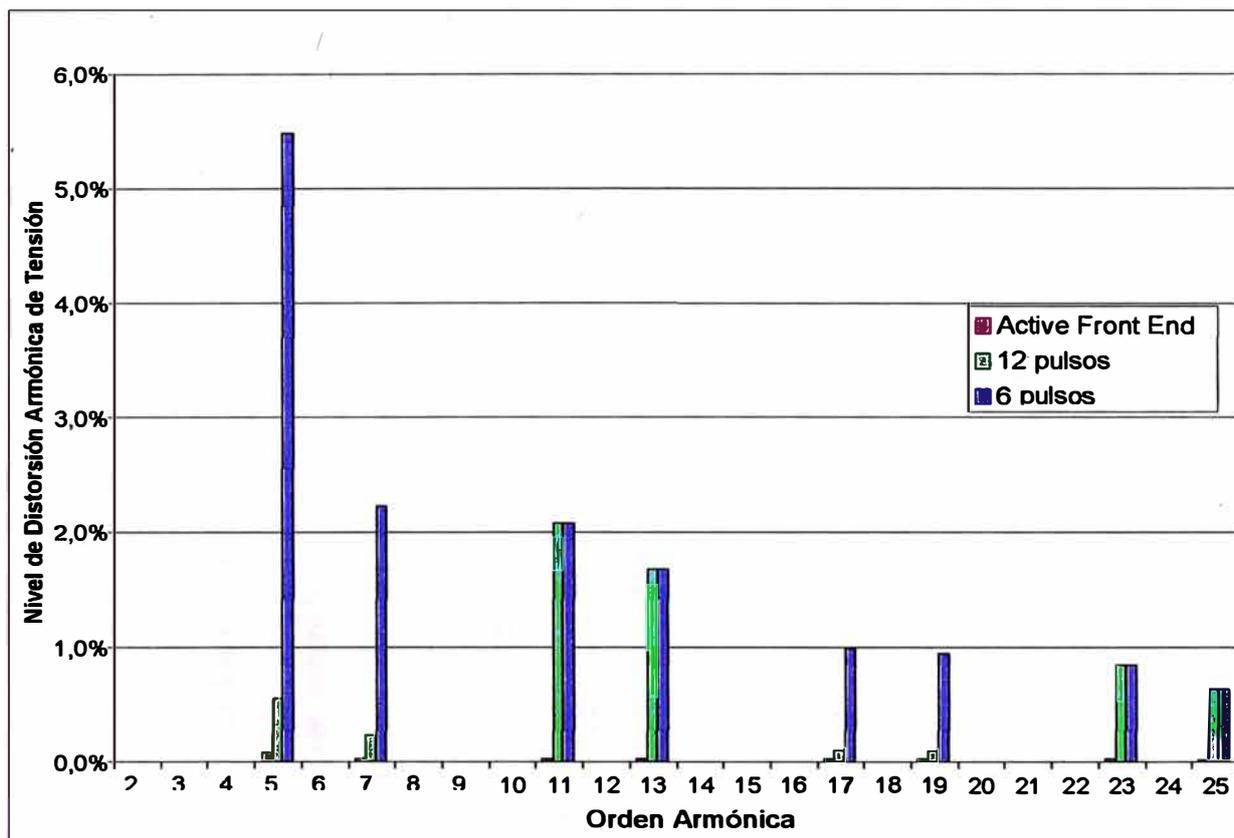


Fig. 4.28. Comparación de Niveles de Armónicas para Sistemas de 6 y 12 Pulsos Versus AFE

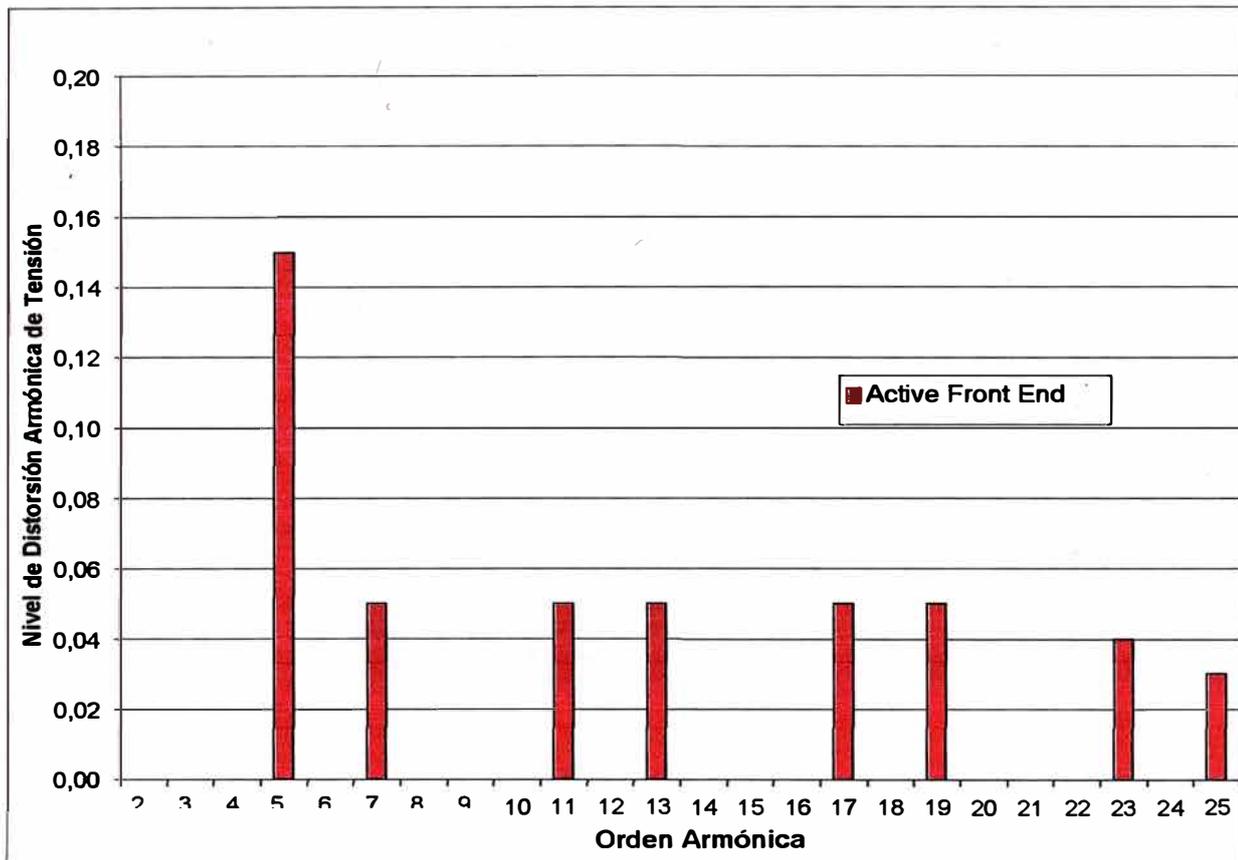


Fig. 4.29. Nivel de armónicas con el AFE

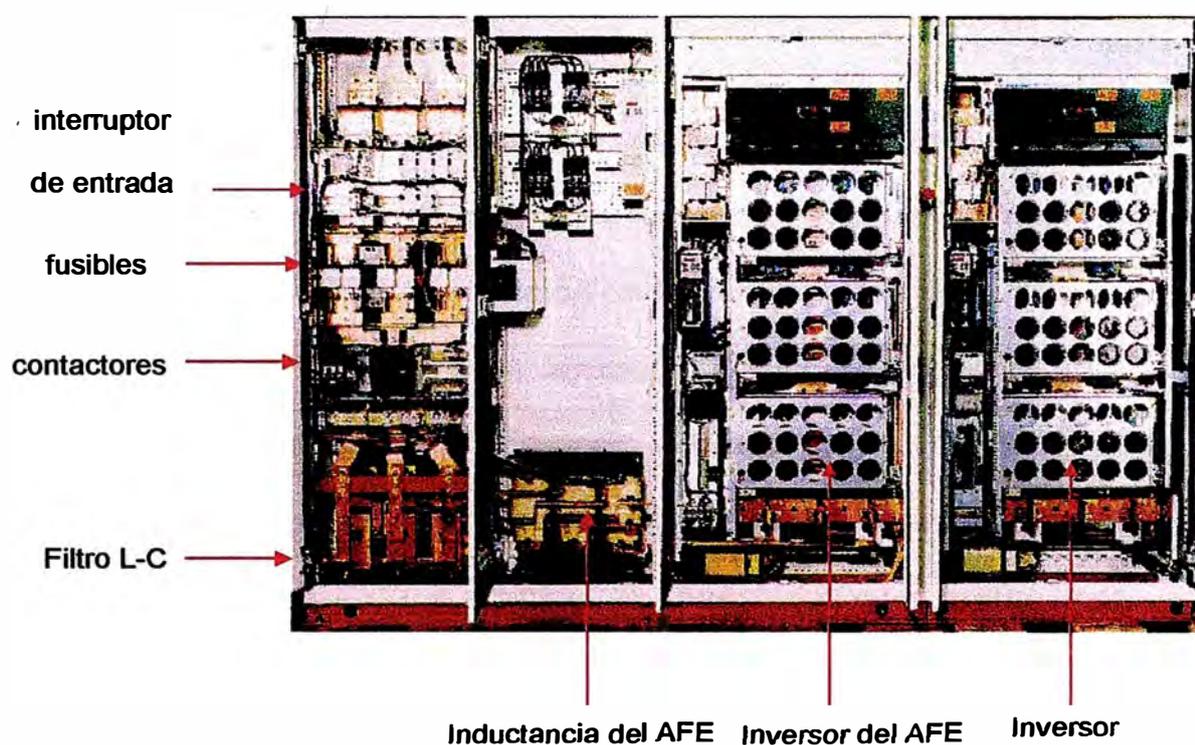


Figura 4.30. AFE típico con Inversor de Salida, Modelo de 400 KW. a 800 KW.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El empleo del Convertidor de Frecuencia con Entrada por Rectificador Activo (AFE) muestra ser interesante desde el punto de vista de la mejora de la Calidad de Energía por la baja distorsión de corriente, hoy en día se viene utilizando en Europa, donde la normatividad es más estricta en cuanto a suministro y distorsión en las redes eléctricas.
- La aplicación de los rectificadores AFE permite el control del factor de potencia permitiendo la operación a factor de potencia 1 para cualquier condición de carga a la que este sometido el motor de inducción, pudiendo compensar a los motores conectados en la misma línea.
- Las tensiones de conmutación no son generados, este era un problema serio con los variadores tradicionales, pues con la utilización de filtros adicionales de entrada esto queda "eliminado".
- Las características de armónicos generados y presentes dependen de los filtros Clean Power o elementos para bajar o desplazar los armónicos, utilizando bobinas de conmutación a la entrada esta distorsión mejora notablemente.
- Cuando se utilizan cargas con elevada inercia y estos deben parar en un corto tiempo, la carga se comporta como un elemento de generación elevando la tensión en el circuito intermedio, esta puede ser devuelta a la

red por un puente en antiparalelo a la rectificación o disipada en el circuito intermedio a través de resistencias de disipación.

- Comparativamente entre los inversores de seis, doce, dieciocho pulsos el comportamiento en distorsión armónica de corriente es notablemente menor en el AFE.
- Los tiempos de respuesta ante sobrecargas, subtensiones, sobretensiones son más rápidas con el AFE.
- En sistemas de elevada potencia, hoy en día se utilizan IGBT's de media tensión los cuales tienen una gran ventaja puesto que el control es menos complejo y más preciso, en otra tecnología IGCT el sistemas de control requiere elevadas corrientes y sistemas adicionales de protección, redes snuber.
- El control para media tensión se realiza por PWM multinivel para un mejor control y menor nivel de distorsión armónica.
- Para potencias mayores aún no se ha podido desarrollar los elementos de estado sólido capaz de conmutar a elevadas frecuencias como los IGBT's.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Power Electronics – Converters Applications and Design", Mohan/ Undeland / Robbins, Second Edition, John Wiley and Sons, 1995.
- [2] "Power Electronics" Muhamamad H. Rashid, Second Edition, Prentice Hall, 1995.
- [3] "Power Electronics and AC Drieves", Binal Bose,
- [4] W. Leonhard, "Control of Electrical Drives", Springer, 1996.
- [5] Boldea I, Nasar, S.A.: Electrical Drives, CRC Press, Boca Raton-Ann Arbor-London-Tokyo, 1999
- [6] V. Blasco and V. Kaura, "A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter", IEEE transactions on Power Electronics, Vol.12, No.1, pp.116-123, Jan. 1997.
- [7] Les Manz, "Applying Adjustable-Speed Drives to Three phase Induction NEMA Frame Motors", ", IEEE transactions on Industry Applications, Vol.33, No.2, pp.402-407, March/April 1997.
- [8] Rodolfo Moreno "Control Vectorial de 4 cuadrantes para motores de inducción con rectificador autoconmutado para la mejora del factor de potencia", CONIMERA, 1999
- [9] Catalogo Siemens DA65.10-2000 "Simovert Masterdrives Vector Control"
- [10] Martin Brown "Siemens Standar Drives"Congleton December 1997