

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**FENOMENOS ELECTRICOS PRESENTADOS POR EL
USO DE CONVERTIDORES DE FRECUENCIA PARA
EL CONTROL DE MOTORES DE INDUCCION**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

JOHNNY JAVIER VASQUEZ YOVERA

**PROMOCIÓN
2000-I
LIMA – PERÚ
2005**

**FENÓMENOS ELÉCTRICOS PRESENTADOS POR EL
USO DE CONVERTIDORES DE FRECUENCIA PARA
EL CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN**

*Dedico este trabajo a:
Mis padres, ejemplo de lucha constante y a mi
esposa por su apoyo incondicional.*

SUMARIO

El presente trabajo describe los problemas no tan conocidos presentados por el uso de convertidores de frecuencia cada vez más veloces y más eficientes. Si bien es cierto que en los últimos años el desarrollo de los semiconductores de potencia y la rapidez de los microprocesadores han hecho que los convertidores de velocidad sean una solución para las diferentes aplicaciones de la industria y elemento básico para la automatización total, el uso cada vez más continuo de estos trae consigo fenómenos eléctricos que se están dando a conocer y que en este trabajo describimos y damos sugerencias de solución.

En el capítulo I se ofrece una visión general de la evolución de los convertidores de velocidad así como el principio de funcionamiento y control de los nuevos convertidores.

El capítulo II trata del problema de la reflexión de onda, su principio de generación y recomendaciones para su solución

En el capítulo III vemos el problema presentado en los rodamientos del motor, diferentes soluciones teóricas a este problema y un caso real.

El capítulo IV se describe los fenómenos de interferencia electromagnética, sus principios y técnicas de solución.

ÍNDICE

PRÓLOGO

CAPÍTULO I

VARIADORES DE VELOCIDAD

1.1 El motor de Corriente alterna asíncrono	3
1.1.1 El motor asíncrono de rotor bobinado	4
1.1.2 El motor asíncrono de rotor en corto circuito	5
1.2 Evolución de los métodos de regulación de velocidad	6
1.3 Clasificación de los variadores de velocidad electrónicos	11
1.3.1 Ciclo convertidores	11
1.3.2 Convertidores de frecuencia	15
a). Tipos de convertidores	16
1.4 Los convertidores de frecuencia tipo fuente de tensión	18
1.4.1 Generalidades	18
1.4.2 Clasificación de convertidores	18
1.4.3 Funcionamiento del convertidor	23
1.4.4 Método de regulación de tensión y frecuencia de salida	24

1.4.5 Funcionamiento del motor asíncrono con un convertidor	
tipo fuente de tensión	37
a). Control escalar	38
b). Control por orientación de campo	45
1.4.6 Ventajas del uso y aplicaciones de convertidores de frecuencia	48
1.4.7 Problemas presentados por el uso de convertidores de frecuencia	53

CAPITULO II

REFLEXIÓN DE ONDA DE TENSIÓN

2.1 Generación de sobre tensiones en los motores producidos por el convertidor de velocidad	55
2.2 Mediciones de tensión reflejada	59
2.3 Medidas para contrarrestar las sobretensiones	60

CAPITULO III

PROBLEMAS DE CORRIENTES EN LOS RODAMIENTOS DEL MOTOR

3.1 Introducción	61
3.2 Revisión general y teoría básica sobre corrientes en los rodajes	62
3.2.1 Corrientes de rodaje clásicas	62
3.2.2 Corrientes de rodaje debido al uso de convertidores	63
3.3 Modelamiento eléctrico del fenómeno	70
3.4 Medidas contra las corrientes de rodajes	80
3.4.1 Cables simétricos	81
3.4.2 Cable apantallado	81
3.4.3 Conexiones de unión de alta frecuencia	83

3.5 Medición de las corrientes de alta frecuencia en los rodajes	85
3.6 Caso real Prensa de Rodillos	87
3.6.1 Introducción	87
3.6.2 Corrientes de alta frecuencia en prensas de rodillos	89
3.6.3 Soluciones	91
CAPITULO IV	
EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA	
4.1 Introducción al ruido o emisión electromagnético (EMI)	97
4.2 Compatibilidad electromagnética	98
4.3 El convertidor de frecuencia como fuente de EMI .	99
4.4 El convertidor de frecuencia como receptor de interferencias	100
4.5 Soluciones para controlar EMI	102
4.5.1 Solución a emisiones	103
4.5.2 Emisiones conducidas	103
4.5.3 Emisiones irradiadas	104
CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	112

PRÓLOGO

El grado de desarrollo tecnológico alcanzado en la industria actual, no sería posible sin la presencia de una máquina muy antigua que realiza la conversión de energía eléctrica en movimiento en donde se requiere. Nos referimos al motor de corriente alterna que gracias a su simplicidad, robustez y a la ausencia de partes sometidas a fricción (salvo cojinetes y algunas veces anillos rozantes) que los hacen casi libre de mantenimiento, se empleen cada día más en los accionamientos electromecánicos industriales.

Pero es su afinidad con los controladores electrónicos que los hacen muy versátiles para el control de torque y velocidad. Gracias a esto se ubican en mejor posición que los motores de corriente continua, pues estos son más costosos y requieren de mayor mantenimiento (de las escobillas y anillos colectores).

Estos controladores se basan en la tecnología alcanzada con el rectificador controlado de silicio y sus diferentes variantes así como con los transistores

ondas de corriente alterna con tensión y frecuencia controladas (Convertidores de frecuencia).

Este mundo de los variadores de frecuencia es muy amplio y complejo y aun esta en desarrollo; es debido a esto que poco a poco se va conociendo fenómenos eléctricos que se presentan al utilizar estos convertidores y los efectos que estos fenómenos tienen en el resto de la instalación.

En este informe se hará un resumen de la historia del control de velocidad de los motores de inducción asíncronos, descripción y fundamentos teórico del funcionamiento de un convertidor de frecuencia moderno, las formas de regulación y control de tensión y frecuencia, fundamento teórico de los principales fenómenos eléctricos que se presentan al utilizar convertidores de frecuencia, los problemas que causan a la instalación y las formas prácticas de minimizar y evitar estos fenómenos.

CAPÍTULO I

CONVERTIDORES DE FRECUENCIA

Para poder entender el funcionamiento de los inversores frecuencia haremos un repaso del funcionamiento del motor asíncrono así como la historia de los controladores de velocidad.

1.1 El motor de corriente alterna asíncrono.

Es el convertidor electromecánico más usado. Empleado en solitario con un aparellaje de maniobra y conexión mínimo constituye el accionamiento más simple y suficientemente válido para diferentes cargas. El fundamento de este motor es la formación de un campo magnético giratorio en el entrehierro del motor. El campo lo genera el bobinado trifásico alimentado por la corriente alterna de la red, este campo es proporcional a la frecuencia de alimentación. El motor asíncrono tiene un rotor en el que se encuentra también un bobinado que en las aplicaciones clásicas de motor, no tiene ninguna fuente de alimentación o intensidad. Solamente el bobinado ha de estar cerrado. Siempre que haya retraso (deslizamiento) entre la velocidad

mecánica del rotor y el campo magnético del estator, se inducen corrientes en el rotor, y aparece un torque electromagnético. Cuando el deslizamiento es nulo no hay torque electromagnético, por eso este motor funciona a una velocidad ligeramente inferior a la del campo magnético, pero nunca se acerca a la misma. Los deslizamientos son pequeños y la variación de velocidad que originan es aceptable para una gran parte de accionamientos.

Existen dos tipos clásicos de motores de corriente alterna asíncronos los de jaula de ardilla y los de rotor bobinado que se diferencian por su construcción

1.1.1 El motor asíncrono de rotor bobinado

Es el primer motor que se desarrollo, dentro de la categoría de los asíncronos, pero hoy su empleo esta reservado a casos de arranques muy difíciles y a motores de potencia media y grande en los cuales se desea hacer una regulación de velocidad parcial.

El rotor de este motor lleva un bobinado aislado, trifásico, con el mismo número de polos que el del estator. Cada fase de este bobinado termina en un anillo rozante, sobre el que frotan una o varias escobillas de carbón que permiten la conexión de cada terminal a la fase de un reóstato trifásico estacionario. Mediante el reóstato cerramos el circuito, y además variamos la resistencia total de cada fase del mismo.

Este motor es más caro que el rotor en corto circuito y también sus costos de mantenimiento son mas altos, pero sin embargo sus prestaciones son más flexibles ya que se pueden modificar con el reóstato externo conectado a sus anillos.

1.1.2 El motor asíncrono de rotor en corto circuito

Se introdujo con posterioridad a los de rotor bobinado, acabados de ver, y actualmente su empleo esta muy expandido. Además con la aparición de convertidores de frecuencia cada más competitivos y con mejores prestaciones se han eliminado parte de las limitaciones en sus características. El rotor de este motor lleva un bobinado sin aislar, que esta constituido por una jaula conductora (aluminio, cobre, aleaciones de cobre según los casos), esta jaula mucho más robusta mecánicamente no esta aislada respecto del núcleo magnético del rotor en el que va montada. Aun así se inducen las intensidades necesarias para la formación del campo magnético asociado con el rotor que llevan finalmente a la obtención del torque electromagnético. En este tipo de motor se obtienen curvas características de torque velocidad fijas para cada tipo y potencia

Este motor es muy barato ya demás por debajo de cierta potencia se fabrica en serie, con lo que su costo es l más reducido de entre todos los convertidores electromecánicos de torque. Sus costos de mantenimiento son bajos. Por el contrario sus características no pueden modificarse en si,

solamente alimentándolo con convertidores de frecuencia se ha logrado que se alteren de acuerdo con el servicio.

Sin embargo, los fabricantes ofrecen variantes en las características, disponiendo en el rotor diversos tipos de jaula. No olvidemos que aunque se puedan elegir características diferentes en el momento de la adquisición estas permanecen inmutables después.

1.2 Evolución de los métodos de regulación de velocidad.

En principio del desarrollo electrotécnico los inventores e ingenieros pioneros en aquella temprana hora sintieron la necesidad de que los primeros motores pudieran regular su velocidad.

Existía la posibilidad de regular el motor de corriente continua con resistencias intercaladas en serie pero ya en 1896 Henry Ward Leonard advertía que esto era un despilfarro de energía y desarrolló el sistema conocido como grupo Ward Leonard que ha sido de aplicación universal hasta el comienzo de la década de los sesenta.

Este grupo estaba formado por un rectificador rotatorio (grupo motor corriente alterna conectado a la red , arrastrando una dínamo de corriente continua) el cual proporcionaba tensiones variables a un motor de corriente continua que arrastraba la máquina accionada.

Esta solución prescindía de la regulación por resistencias tan ineficiente como ya había notado Ward Leonard. Pero añadía dos máquinas rotativas

para la función de obtener corriente continua a partir de la red industrial de corriente alterna.

Poco a poco iban apareciendo soluciones para obtener velocidad regulable en escalones, lo cual para algunas aplicaciones es suficiente. Entre ellas sumaríamos las siguientes:

- Bobinado Dahlander para los motores asíncrono de cortocircuito. Se logran dos velocidades fijas en relación 1 a 2 con un solo bobinado no muy especial.
- Dos motores asíncronos de distintas polaridades montados en tandem. Se obtienen de 3 o 4 velocidades diferentes.
- Motores de bobinados independientes con tantas velocidad como bobinados tienen.

Dentro de la regulación continua surgieron grupos tales como los Kramer, o Scherbius, los cuales recurrían a 2 o 3 máquinas adicionales al propio motor de arrastre de corriente continua para lograrlo. Además una de esas máquinas era la conmutatriz o convertidor rotatorio corriente alterna corriente continua, que era muy cara y de mantenimiento muy engorroso.

El motor de colector (motor de corriente continua modificado) funcionando en redes de frecuencia menor ($16 \frac{2}{3}$ Hz en centro Europa) fue una solución para la regulación en locomotoras eléctricas. Su difusión fue tan importante para esta aplicación y hoy las redes ferroviarias de Suiza, Alemania, Austria y Noruega siguen con esta frecuencia.

Algo empezó a moverse con la aparición en 1928 de los rectificadores de mercurio controlados por rejilla aunque las aplicaciones no fueron muy extensas debido a la complejidad, alto costo y malas prestaciones de estos dispositivos. Por otro lado en esa época de gran recesión hubo un gran freno a la difusión de tecnología novedosas.

Las soluciones fueron complicadas hasta la aparición de los rectificadores de silicio controlado, SCR o tiristores. Los primeros pasos se dieron en la dirección de sustitución de los rectificadores rotativos convencionales por los de estado sólido con tiristores y por tanto durante bastante años la solución era los accionamientos a base de motor de corriente continua.

El control del disparo de los tiristores se basaban en electrónica analógica con amplificadores operacionales . Además otra de las ventajas era que el motor de corriente continua era de modelización muy sencilla. También el control directo del torque era muy simple pues se obtenía mediante al producto del flujo principal y la intensidad del inducido. Estas dos magnitudes se fuerzan fácilmente mediante los rectificadores de alimentación; así podemos decir que hay un control directo de torque motor.

Los atractivos para el empleo de motor asíncrono de corto circuito eran muy fuertes dado su bajo precio y su robustez, pero sus inconvenientes eran:

- Su sensibilidad a las alimentaciones por ondas no senoidales

- Su difícil control ya que en este motor el flujo es una magnitud derivada que depende de las intensidades y tensiones de cada fase, de la velocidad angular, y del tiempo transcurrido, ya que en una alimentación con convertidores el motor esta permanentemente en estado transitorio.

Para tratar de forzar el empleo del motor asíncrono de cortocircuito ya desde finales de los años sesentas se comercializaron soluciones con este tipo de motor, que era alimentado con un regulador de tensión de corriente alterna. Este dispositivo, da unas prestaciones modestas para regular la velocidad, ya que lo hace a base de aumentar el deslizamiento.

Esta aplicación quedo reducida a arrastre de bombas y de ventiladores, habiendo perdido su importancia. Actualmente subsiste para arrancadores estáticos de motores asíncronos.

Finalmente el advenimiento de los microprocesadores de alta velocidad y la aparición de semiconductores de potencia rápido (GTO, IGBT) ha hecho que los convertidores modernos de frecuencia para motores asíncronos de serie sean una realidad. En ellos tenemos presentaciones que han resuelto muy bien las limitaciones que presentaba el motor asíncrono alcanzando características como las siguientes:

- Alimentación con intensidad cuasi senoidal, mediante técnicas de onda pulsada con anchura modulada (Pulse Width Modulation PWM) en sus diversas variantes.

- Control directo del torque y velocidad sin tener que tomar una señal de velocidad. La toma de esta señal requiere el montaje de una dinamo tacométrica y esto, en un motor de serie es muy complicado y costoso.

En consecuencia asistimos a la comercialización de convertidores de frecuencia que empiezan a ser productos de serie aplicable también a motores asíncronos de fabricación serie.

A continuación resumimos las diferentes formas de regular la velocidad de un motor asíncrono de corriente alterna:

- Cambiar el numero de pares de polos. Motores de varios bobinados. Produce una regulación escalonada de velocidad, con pequeño numero de escalones.
- Cambio del deslizamiento. Método poco eficiente. Entre ellos encontramos los siguientes:

Cascadas rotóricas para los motores de anillos, en los que hay una eficiencia mejor gracias a la recuperación de energía en la cascada rotórica mediante un inversor

Variación de la tensión del estator Al ser alimentado con tensiones decrecientes el motor se desliza mas.

- Variación de la frecuencia y tensión de la alimentación que es el método actual.

1.3 Clasificación de los variadores de velocidad electrónicos

Dentro de los variadores de velocidad electrónicos tenemos dos tipos: los que utilizan circuito intermedio de corriente continua y producen tensión y frecuencia variables llamados convertidor de frecuencia y otros que convierten directamente tensión alterna en alterna con tensión y frecuencia variables llamados cicloconvertidores.

1.3.1 Cicloconvertidores

Este convertidor esta basado en el rectificador trifásico de onda completa o de Graetz. Esta constituido por una asociación de tres rectificadores.

Este convertidor tiene varias características peculiares, siendo la primera de ellas que es el único, en el cual hay una conversión energética directa de la potencia alterna en alterna de diferente frecuencia, cuando en los restantes convertidores hay un paso intermedio continua razón por la cual a veces se le llama convertidor directo.

En este convertidor la frecuencia de salida es inferior a la de entrada, y no requiere semiconductores de alta velocidad de conmutación por lo que esta constituido por tiristores.

Su campo de aplicación es en los accionamientos de alta potencia y baja velocidad, en los que precisamente se saca partido de que la frecuencia de salida es inferior a la entrada. Tiene capacidad de proporcionar una tensión y frecuencia de salida regulable con una tensión y frecuencia de entrada fijas.

Un esquema típico de un cicloconvertidor se muestra en la fig. 1.1:

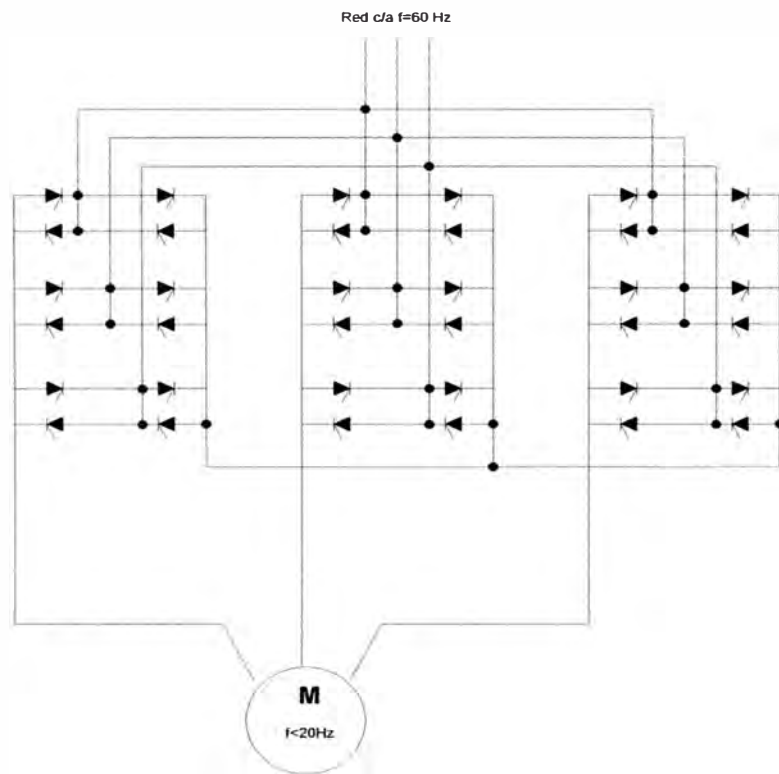


Fig 1.1 Esquema desarrollado de la parte de potencia de un cicloconvertidor

Se sabe que para un rectificador controlado la tensión en vacío esta dada por:

$$U_{D\alpha} = U_D \cdot \cos\alpha \quad (1.1)$$

Donde :

$U_{D\alpha}$ es la tensión en vacío del rectificador para un ángulo α en retraso del encendido.

U_D es la tensión en vacío del rectificador no controlado o del controlado con un ángulo $\alpha=0$.

Para una frecuencia de 50Hz se puede obtener una frecuencia de 50/3 Hz con la siguiente configuración:

t	α	$U_d \alpha$
0	90	0
$t/4$	45	$0.707U_d$
$t/2$	0	U_d
$3t/4$	45	0
t	90	$0.707U_d$
Para comba negativa		
t	90	0
$5t/4$	135	$-0.707U_d$
$3t/2$	180	$-U_d$
$7t/4$	135	$0.707U_d$
$2t$	90	0

Tabla 1.1 Parámetros de un cicloconvertidor para obtener una semionda negativa y positiva

La frecuencia total de la onda resultante esta dada por:

$$f_2 = 1/(2 \cdot t_2) \text{ Hz} \quad (1.2)$$

Así obtenemos la figura 1.2

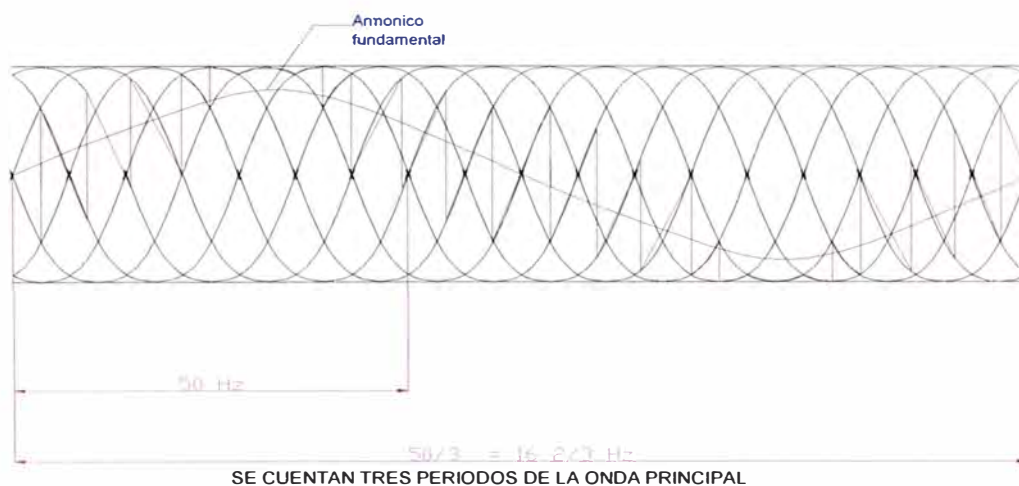


Fig. 1.2 Onda de tensión de una fase del cicloconvertidor. Frecuencia generada $16 \frac{2}{3}$ a partir de la red de 50HZ

Según la fórmula hay una limitación en el tiempo t_2 ya que no se pueden controlar los tiristores nada más que una vez por cada ciclo de la onda trifásica, así para una red de 50 Hz la máxima frecuencia de salida con un cicloconvertidor es 20 Hz y para una de 60 Hz es 24 Hz.

- **Aplicaciones**

Su empleo está recomendado para los casos en los que la frecuencia de salida está por debajo del 40 % de la de entrada. Por tanto su aplicación es para accionamientos de baja o de muy baja velocidad. Como sus configuraciones mínimas han de tener 36 tiristores, con todos los controles de puerta asociados, estamos ante un equipo caro.

Por otro lado como en las altas potencias la capacidad máxima de tensión/intensidad de los mayores tiristores fabricados no basta, se acude a la asociación de tiristores en serie o paralelo y su número total ha de ser múltiplo de 6 con lo que su número total se puede acercar a 36 mínimo para los cicloconvertidores.

Estos cicloconvertidores tienen un rendimiento mucho mayor a los convertidores de frecuencia con inversores puesto que tienen una sola etapa de conversión. Además estos equipos manejan altas corrientes haciendo de su rendimiento una ventaja.

Sus aplicaciones más interesantes están en el campo de accionamientos de muy baja velocidad, tales como grandes molinos de cemento, hornos rotatorios, cajas desbastadores de trenes de laminación.

1.3.2 Convertidores de frecuencia

Se denominan corrientemente convertidores de frecuencia, a los convertidores que modifican la tensión y frecuencia de entrada fijas, en frecuencia de tensión y salida variables para acomodarse a las que necesita en cada momento el motor del accionamiento.

Estos convertidores están formados por dos etapas en serie a saber:

- Rectificador, que transforma las magnitudes fijas de la red AC en tensión y / o intensidades continuas. La potencia en corriente continua aparece en el llamado circuito intermedio.

- Inversor, que modifica la potencia en corriente continua en magnitudes alternas regulables en el lado motor.

Rectificador, circuito intermedio de corriente continua e inversor están en serie y el conjunto de los tres constituye el convertidor de frecuencia como se muestra en la fig.1.3:

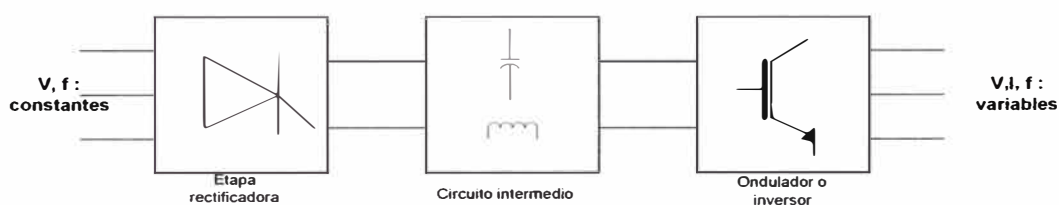


Fig.1.3 Vista en bloques del sistema de potencia de un convertidor

a Tipos de convertidores

Haya dos tipos de convertidores :convertidores tipo fuente de tensión y convertidores tipo fuente de corriente en el sentido de la fuente conectada a la entrada del convertidor, es una fuente de tensión constante o una fuente de corriente constante y cuya implementación se muestra en la fig 1.4.

Cuando el circuito intermedio funciona como fuente de tensión para el inversor se pone un condensador electroestático entre sus terminales (+) (-), su función es mantener el valor de la tensión, estamos ante un convertidor con circuito intermedio de tensión fig. 1.4 a).

Cuando el circuito intermedio funciona como fuente de intensidad para el inversor, se pone una inductancia en serie con una de sus ramas, su función

Circuito intermedio	De tensión continua ajustable			De tensión continua ajustable	
Tipo de Frenado recupera	Inversor con salida en bloques			Inversor con salida en pulsos	
	NO	NO	SI	NO	SI
Conexión					
Tensión de línea salida					
Intensidad de salida					
Tipo de motor	Asíncrono de serie potencia reducida			Asíncrono de serie	
Accionamiento de	Uno o varios motores			Uno o varios motores	
Regulación de velocidad	1:20			1:20	
Frec. max	400 Hz			400 Hz	

Fig. 1.5 Características de los diferentes tipos de convertidores

es mantener el valor de la intensidad, tenemos un convertidor con circuito intermedio de corriente fig. 1.4b)

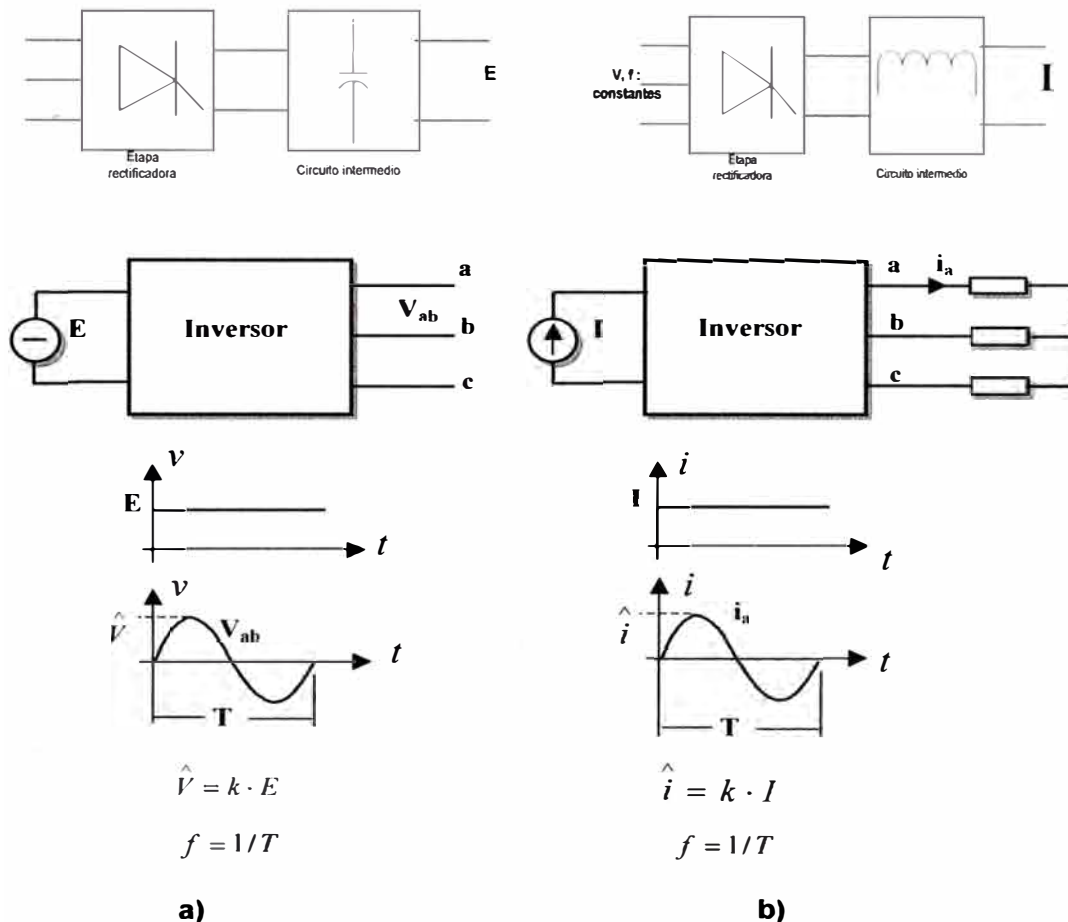


Fig.1.4 a) Conv. tipo fuente de tensión. b) Conv. tipo fuente de corriente

Los inversores tipo fuente de tensión usan generalmente tecnologías de IGBT o GTO mientras que para los inversores tipo fuente de corriente se emplean tecnologías como tiristores o GTO en aplicaciones de gran potencia (MW). Los inversores pueden ser monofásicos o multifásicos generando ondas de tensión o corriente bipolar y con la propiedad de que flujo de potencia sea en dos direcciones. Así con estos dos tipos de inversores tanto fuente de tensión como fuente de corriente podemos alimentar nuestra carga con frecuencia variable y variar su velocidad.

1.4 Los convertidores de frecuencia tipo fuente de tensión

De aquí en adelante cuando nos refiramos a un convertidor nos referiremos a un convertidor tipo fuente de tensión.

1.4.1 Generalidades

Como ya habíamos visto los inversores tienen tres bloques el rectificador, el circuito intermedio y el inversor, aquí hay dos etapas de conversión energética, por esto son menos eficientes que el cicloconvertidor.

A continuación veremos las distintas configuraciones de los convertidores.

1.4.2 Clasificación de convertidores

En la figura siguiente mostramos las distintas clases de convertidores tipo fuente de tensión.

En la figura anterior los tres primeros convertidores que aparecen, cada alternancia de la tensión de salida esta formada por bloques de duración temporal dada. La frecuencia de estos bloques da la de salida, y la tensión de salida se regula mediante la magnitud de la tensión en el circuito intermedio.

Estos tres convertidores son con circuito intermedio de tensión continua. La regulación de tensión estará dada por el:

- Rectificador controlado de entrada
- Rectificador no controlado de entrada, con un chopper en el circuito intermedio.

La primera de las configuraciones permite un funcionamiento en dos cuadrantes, pero la segunda sólo lo puede hacer en uno. Si deseamos un convertidor de frecuencia para los cuatro cuadrantes tendremos que adoptar la configuración de la tercera columna con un puente rectificador controlado doble en antiparalelo.

De las tres configuraciones la de la segunda columna, es la de menor consumo de potencia reactiva.

La etapa inversora esta formada siempre por un puente Graetz funcionando como inversor, el cual ha de estar formado por semiconductores controlables. En los inversores de tecnologías maduras estos eran siempre tiristores. Al menos que el motor accionado, sea síncrono estos inversores

han de tener conmutación propia ya que no disponen de red que suministre las f.e.m. para su conmutación.

En las configuraciones estudiadas en cada semiciclo se producen conmutaciones alternadas de la tensión continua disponible en el circuito intermedio sobre las tres fases de salida obteniéndose un sistema trifásico de ondas de tensión cuadradas.

Los inversores de este tipo al alimentar el motor de corriente alterna hacen que la forma de onda de la corriente absorbida no sea cuadrada y se aleje mucho de la forma de onda senoidal (presenta armónicos) por lo que el motor no funcionara adecuadamente presentando los efectos tales como:

- Mayores pérdidas de Joule y parásitas.
- Torque motor que presenta componentes pulsatorias adicionales
- Ruido y vibraciones

En consecuencia no se pueden usar los motores asíncronos definidos para el servicio convencional y tendrá que emplearse motores especiales. Es un avance, importante el poder contar con los motores convencionales, inclusive con su potencia rebajada. Sin embargo en la actualidad los convertidores presentados líneas abajo, generan intensidades con formas de onda cuasi senoidales y por lo tanto se pueden emplear motores convencionales con el ligero sobredimensionamiento (del orden del 5 %), margen que incluso en algunos casos ya está desapareciendo.

Para solucionar esto se emplean cada día más los convertidores con salida de **varios pulsos de tensión y de anchura modulada** por cada semionda. Estos están resumidos en las columnas 5 y 6 de la figura anterior. Con ello se logran las siguientes ventajas:

- Regulación de la tensión de salida variando la anchura de pulso. La tensión del circuito intermedio puede ser fija.
- Onda de tensión con bajo contenido en armónicos. De esta forma el motor asíncrono absorbe intensidades con forma de onda muy cercanas a las senoidales y podemos emplear los motores normalizados.

Se pueden tener un rectificador no controlado en la entrada con sus ventajas inherentes de bajo consumo de potencia reactiva y de menor costo. Sin embargo no pueden funcionar más en un solo cuadrante. Para lograr el funcionamiento en los cuatro es preciso poner en antiparalelo con el rectificador no controlado, un rectificador controlado como se ve en la 5ta columna de la figura 1.5. Este rectificador ha de llevar un transformador para acomodar las tensiones ya que debido al fenómeno del ángulo máximo en inversor, los rectificadores no podrían acoplarse.

Estos últimos convertidores son más complejos debido a que:

- El sistema de control ha de realizar tareas más laboriosas y frecuentes para dar ordenes de apagado y encendido varias veces por cada semionda de frecuencia fundamental
- Dispositivos electrónicos de conmutación rápida. Esto significa que se debe contar con:

Tiristores con dispositivos de conmutación

Semiconductores de más sencilla conmutación y que admiten altas frecuencias, tales como transistor de potencia. **GTO, IGBT, MOSFET.**

Todo lo dicho anteriormente es de suma importancia para los motores asíncronos de jaula de ardilla y en particular para los de fabricación en serie.

1.4.3 Funcionamiento del convertidor

En esta parte nos centraremos en la etapa propia inversora.

Esta etapa es un conmutador electrónico que comunica alternativamente la tensión continua del circuito intermedio sobre las fases del motor de corriente alterna conectado en su salida. La disposición común es un puente trifásico formado por semiconductores controlables como GTO, IGBT o MOSFET.

En la figura 1.6 presentamos la disposición de los semiconductores considerando al circuito intermedio como una fuente de tensión constante E :

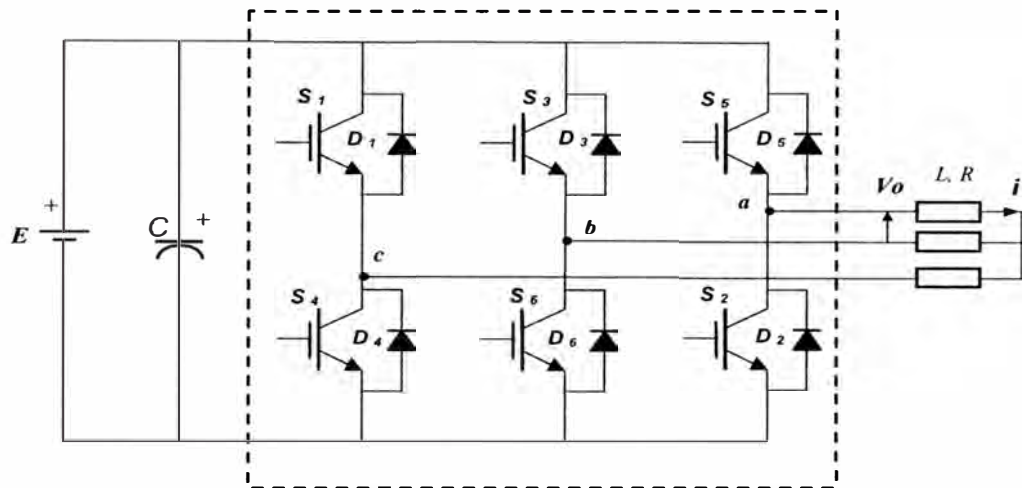


Fig. 1.6 Disposición de dispositivos en la parte inversora

1.4.4 Método de regulación de tensión y frecuencia de salida

La parte inversora actúa como un conmutador y va comunicando la tensión del circuito intermedio a las diversas ramas a través de sus semiconductores que responden a las ordenes de los dispositivos de control de encendido. Permanecen cerrados o abiertos durante unos lapsos temporales determinados en función de la frecuencia de salida y de la secuencia de fases necesaria para obtener un sistema trifásico balanceado.

Para obtener esto existen varias técnicas como variar el valor de la tensión del circuito intermedio, variación del ancho de la tensión de salida y tensión de salida pulsada que corresponde a los métodos PWM.

Técnicas PWM

Estas técnicas permiten el accionamiento de los semiconductores de potencia para tener control sobre la magnitud y frecuencia de la tensión de salida y además un control sobre el contenido armónico de la tensión y corriente. Los métodos de modulación se pueden dividir en realimentadas y no realimentadas.

Entre los métodos no realimentados se puede mencionar:

- La modulación senoidal natural SPWM (analógico).
- La modulación senoidal por muestreo regular simétrico y asimétrico (digital).
- La modulación por eliminación selectiva de armónicos. SHEPWM.
- La modulación por vector espacial SVPWM.
- La modulación por técnicas de Optimización.

Entre los métodos realimentados se puede mencionar:

- Control on/off de corriente.
- Control lineal de corriente.
- Control predictivo de corriente.

A continuación veremos algunos de ellos:

Control on/off de corriente

Si la fuente de tensión "E" tiene suficiente nivel, se puede implementar un lazo de control (realimentación) de corriente muy rápido el que mantendrá a la corriente de carga cerca del valor de referencia y en el caso de alimentar a un motor de inducción con esta fuente de corriente esta eliminará el circuito estático de la dinámica del control de velocidad. Para este fin se puede emplear PWM a frecuencia de conmutación constante o comparadores con banda de histéresis de corriente (on/off), este sistema de control, tiene la ventaja de presentar una rápida respuesta pero con frecuencia de conmutación variable ver figuras 1.7 ,1.8 y 1.9.

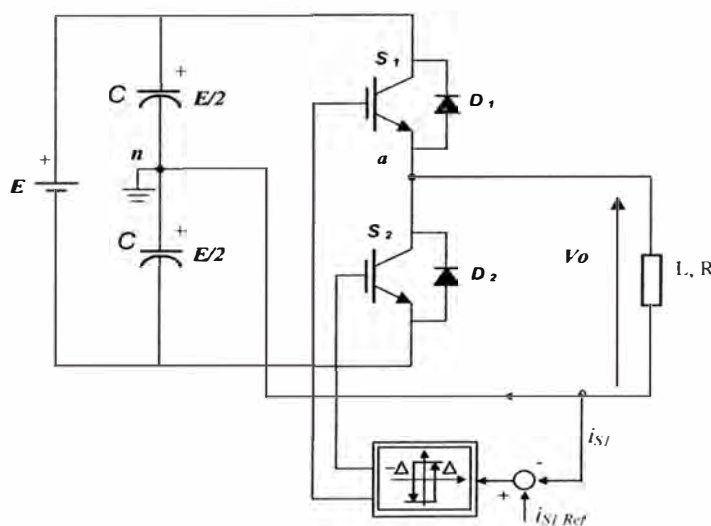


Fig. 1.7 Inversor monofásico con control de corriente on-off

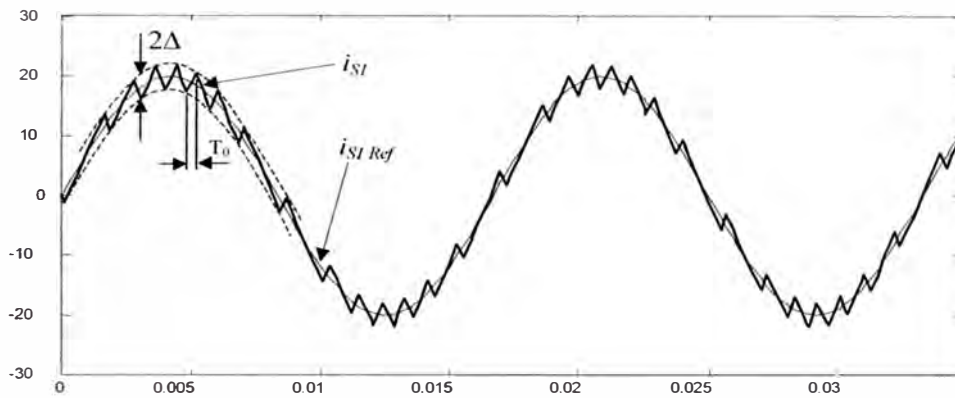


Fig. 1.8. Forma de onda de corriente obtenida en un inversor monofásico semipunte alimentando a una carga inductiva y control de corriente on-off

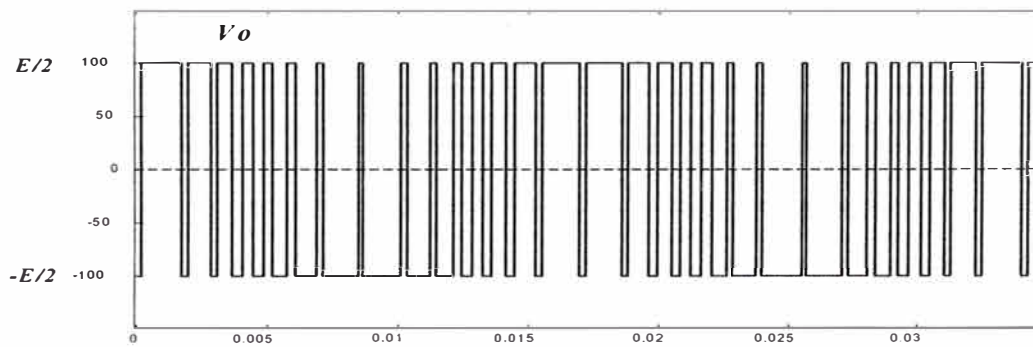


Fig. 1.9. Forma de onda de tensión aplicada a la carga inductiva producida por el control de corriente on-off

Modulación Senoidal (SPWM)

Cuando es necesario que la corriente presente muy baja distorsión como es el caso de las máquinas herramientas, el uso del modulador PWM en combinación con controladores de corriente lineales es preferible en lugar del control on-off de corriente.

En este caso son cuatro las señales de control empleadas para generar los pulsos como se muestra en la figura. Una de las señales es la portadora de tipo triangular de amplitud y frecuencia constante, múltiplo de la onda de tensión fundamental. Las otras tres señales de control corresponden a tres senoides de amplitud y frecuencia variable que representan a la tensión trifásica que se desea tener en la carga. Cada onda senoidal de control es comparada con la onda triangular a través de un circuito de electrónico de comparación de manera que cada onda senoidal genere en el cruce con la onda triangular las señales de control a aplicarse a las llaves correspondientes por cada fase, ver figuras 1.10 y 1.11.

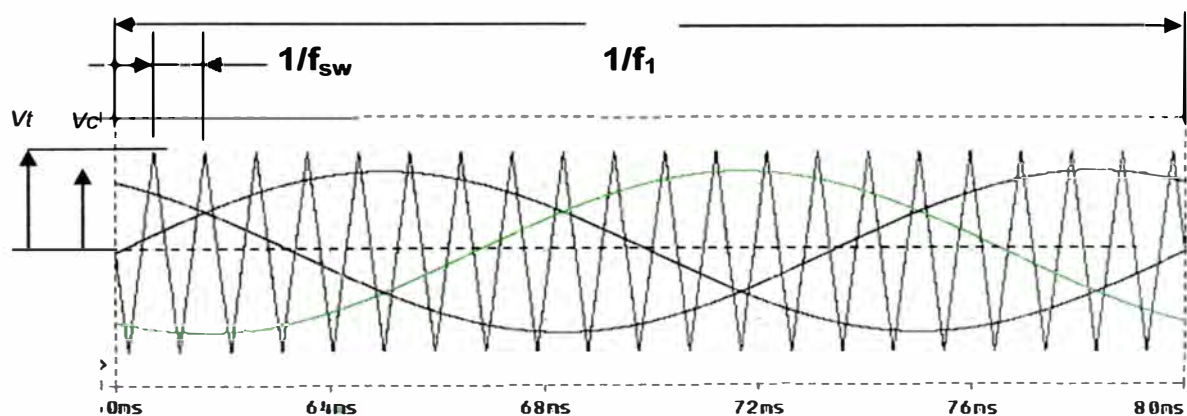


Fig 1.10. Señales de control de SPWM V_c : Señales de control para cada fase y señal triangular.

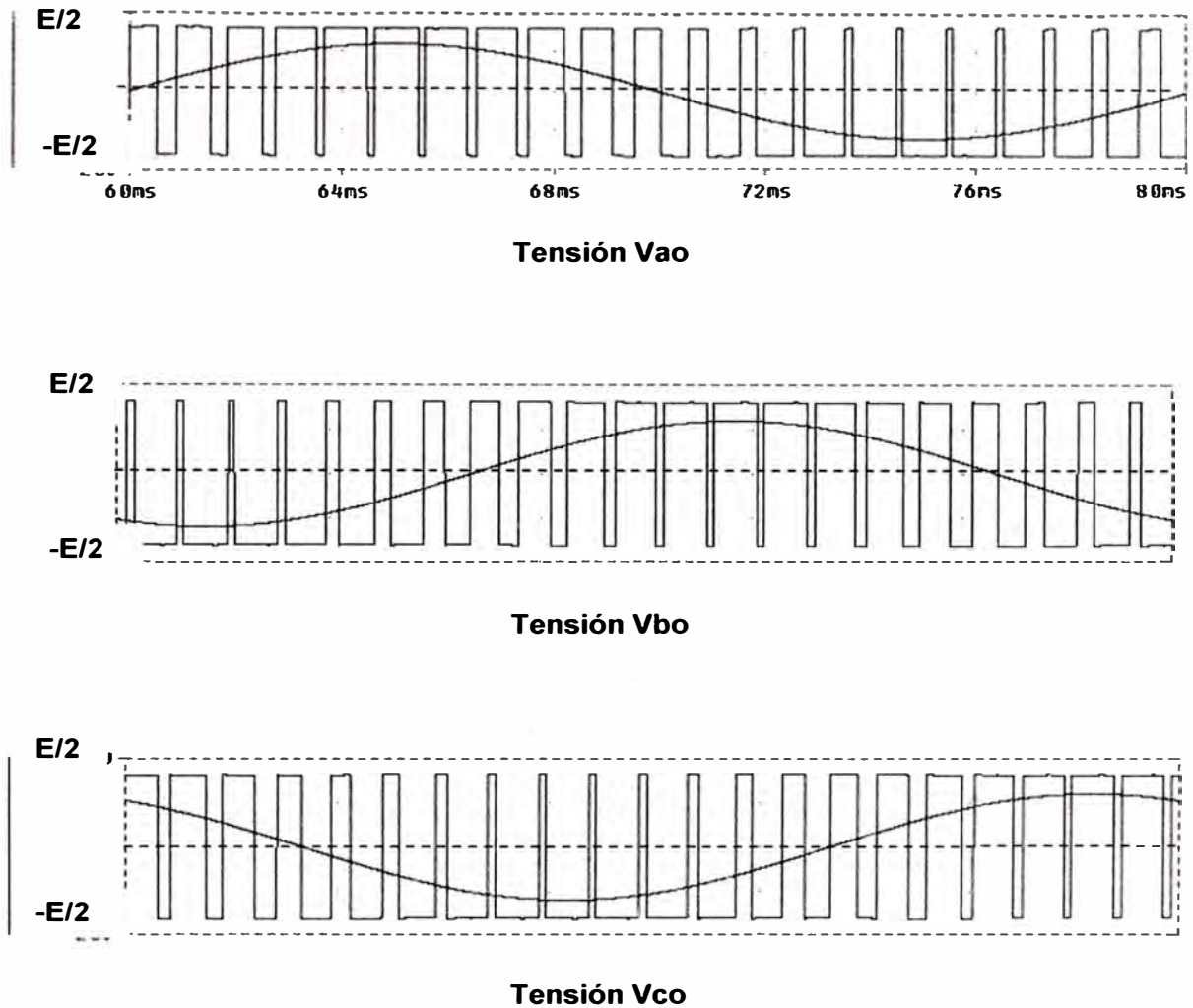


Fig. 1.11. Tensiones por fase del inversor Vao, Vbo y Vco

Se define como “ m_a ” a la relación entre la amplitud de la tensión de control senoidal y la amplitud de la onda triangular. De la misma forma se define a “ m_f ” a la relación entre las frecuencias de la onda triangular y la frecuencia de la onda senoidal.

$$m_a = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_t} \quad , \quad m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} \quad 1.3$$

donde:

$$0 \leq m_a \leq 1 \quad , \quad f_{sw} = 1/T_{sw} \quad , \quad f_1 = 1/T_1 \quad 1.4$$

Cuando la relación m_f es grande ($m_f \geq 9$) se puede establecer una relación entre las señales de control y la tensión de salida por fase del inversor

$$V_{ao1}(t) = \hat{V}_{ao1} \text{Sen } \omega_1 t \quad , \quad \text{donde} \quad \hat{V}_{ao1} = \left(\frac{E}{2 \cdot \hat{V}_t} \right) \cdot \hat{V}_c \quad 1.5$$

Se define al índice de modulación como la relación:

$$IM = \frac{\hat{V}_{ao1}}{E/2} \quad , \quad 0 \leq IM \leq 1 \quad 1.6$$

$$IM = \frac{\hat{V}_{ao1}}{E/2} = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_t} = m_a \quad 1.7$$

La máxima tensión que se puede obtener a la salida con este tipo de modulación se da para $m_a = 1$ es decir

$$\hat{V}_{ao1(\text{máx})} = \frac{E}{2} \quad 1.8$$

que corresponde a 78% de la tensión máxima que se obtiene con una onda cuadrada.

$$\hat{V}_{ao1(SPWM)} / \hat{V}_{ao1(\text{Seis pulsos})} = 0.78 \quad 1.9$$

El orden de los armónicos presentes en la tensión de salida es determinado por la siguiente relación:

$$n = i \cdot (m_f) \pm j \quad (1.10)$$

donde

si "i" es impar "j" sera par

si "i" es par "j" sera impar

Ejemplo

Si se emplea una onda triangular de 1021Hz y una onda de control senoidal de 50Hz se tendrá una relación para las frecuencias de $m_f = 21$ y que generará los siguientes ordenes de armónicos:

Los terminos armónicos pares no existirán en la tensión debido a la simetria de la onda de tensión. Los terminos impares multiples de tres aparecen solo en la tensión de fase del inversor pero no en la tensión de líneas ni en la tensión por fase de la carga, ver fig 1.12

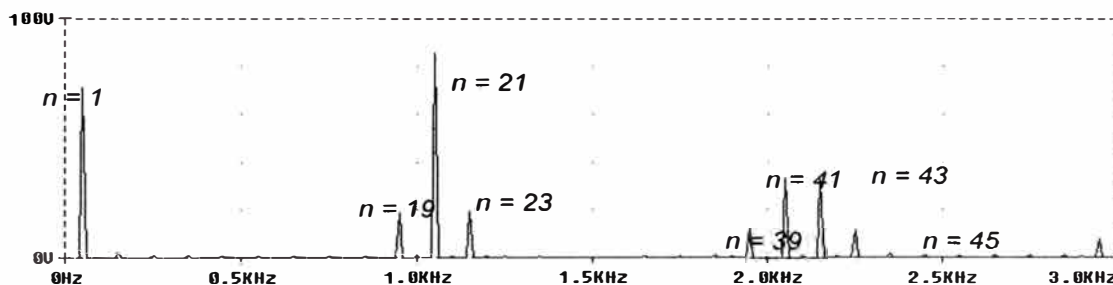


Fig. 1.12. Espectro armónico de la tensión por fase V_{ao} del inversor .

Notese que los armonico más altos son multiples de m_f

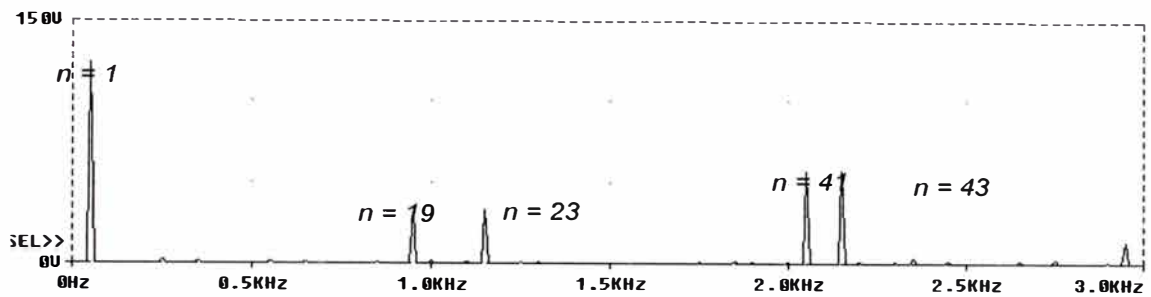


Fig. 1.13. Espectro armónico de la tensión de línea V_{ab} del inversor

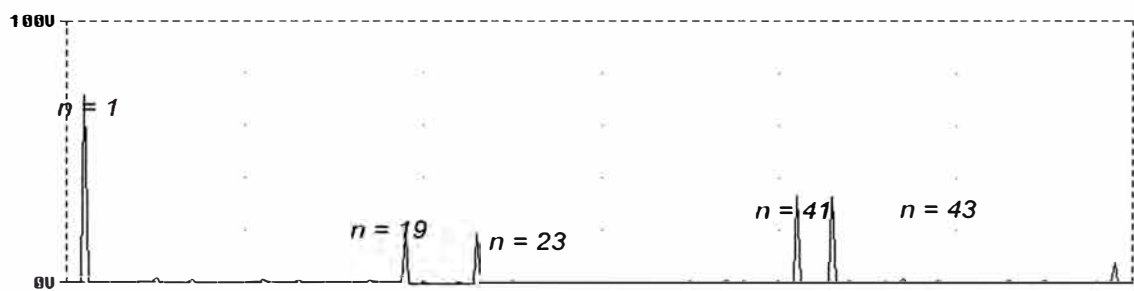


Fig. 1.14. Espectro armónico de la tensión por fase de la carga V_{an}



Fig. 1.15. Tensión de Línea V_{ab}

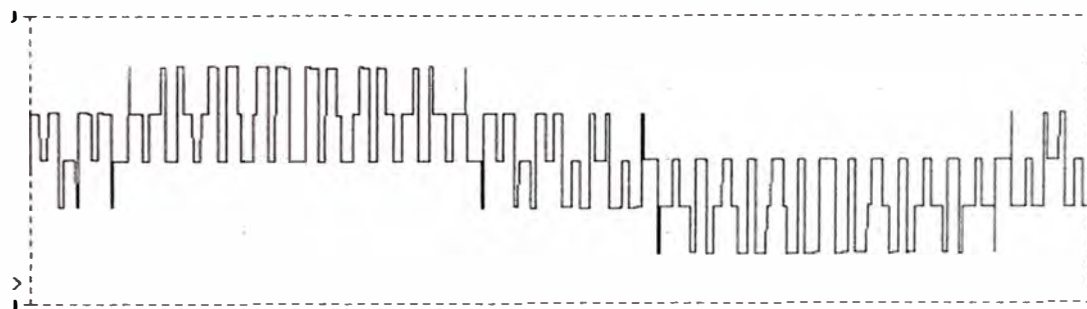


Fig. 1.16. Tensión por fase (V_{an}) en la carga

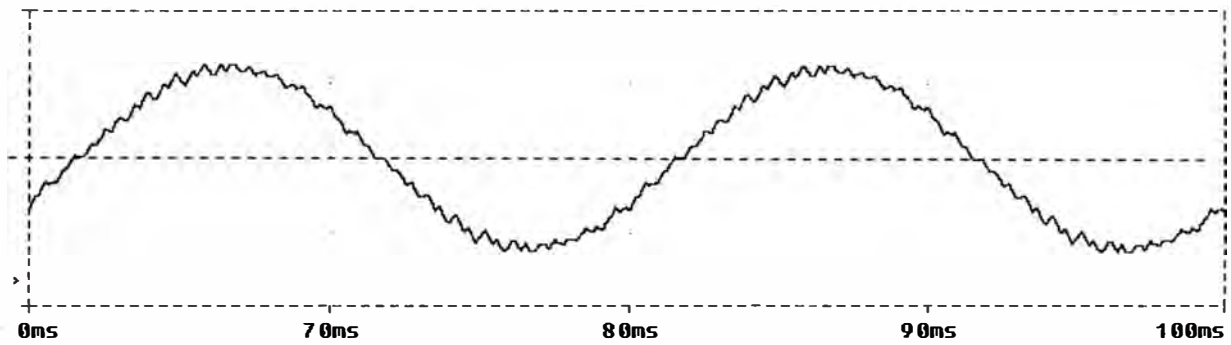


Fig. 1.17. Corriente por fase de la carga (i_a)

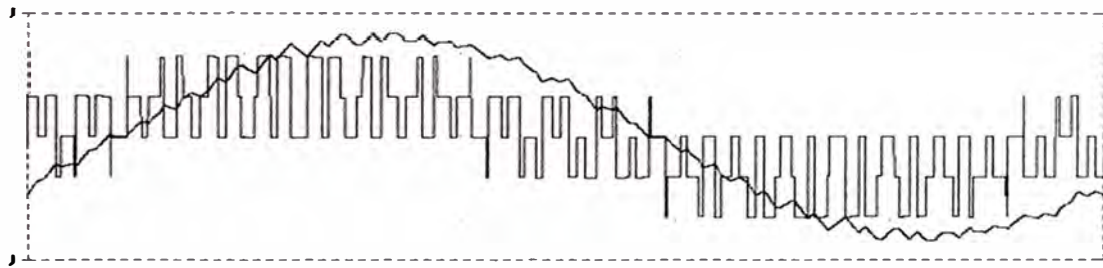


Fig. 1.18. Corriente " i_a " y tensión " V_{an} " por fase en la carga

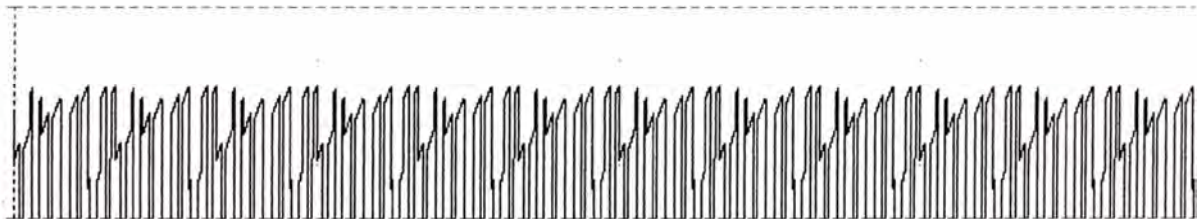
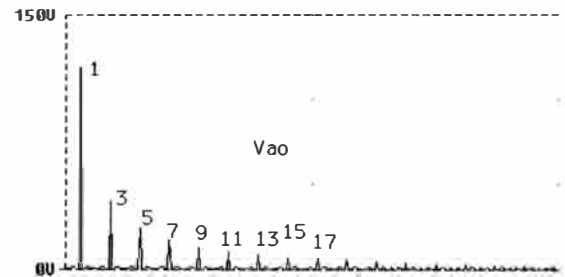
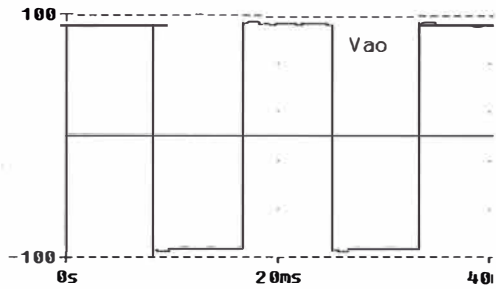


Fig. 1.19. Corriente de entrada (i_o) al inversor

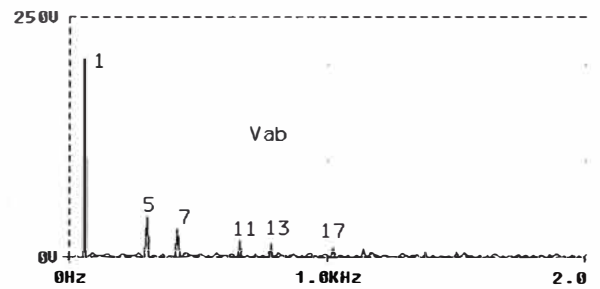
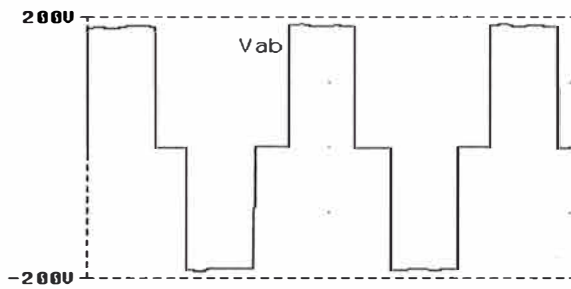
La componente fundamental de la corriente de entrada " i_o " se relaciona con la corriente de salida en la carga por la igualdad de las potencias:

$$i_o = \frac{3 \cdot V_{an} \cdot I_a \cdot \cos \phi}{E} \quad (1.11)$$

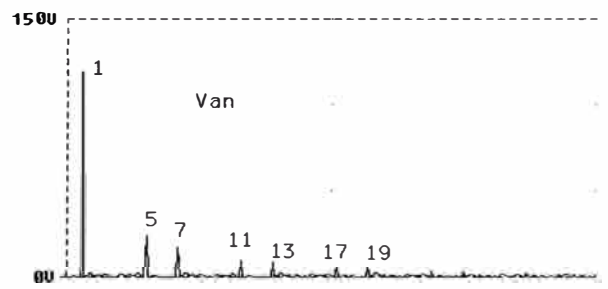
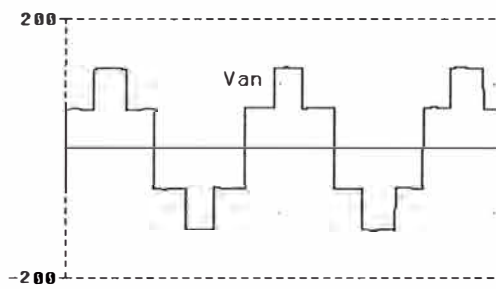
A continuación se mostraran las gráficas de operación del inversor generando onda cuadrada.



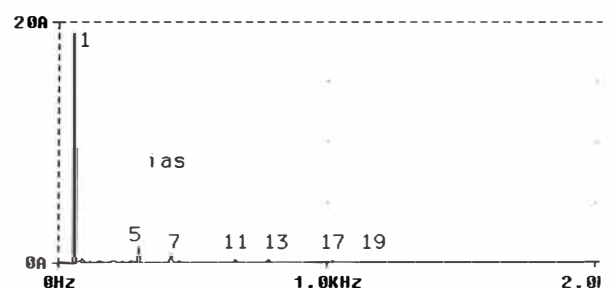
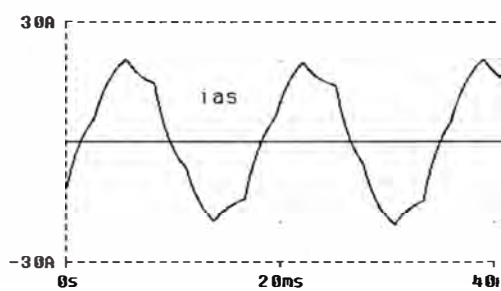
a)



b)



c)



d)

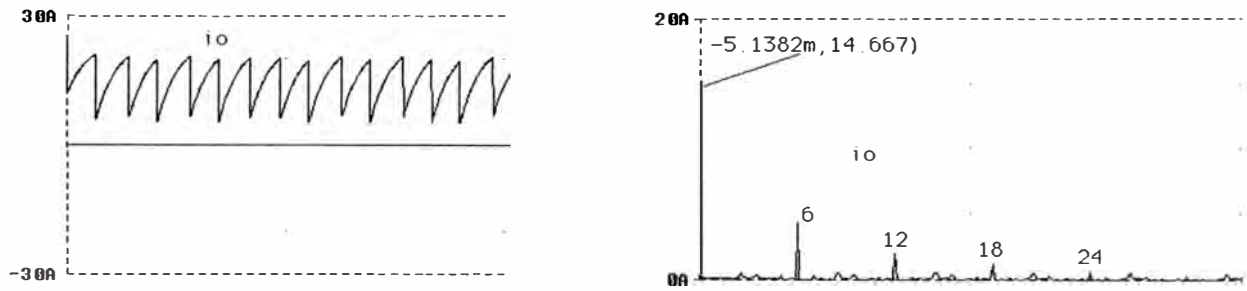
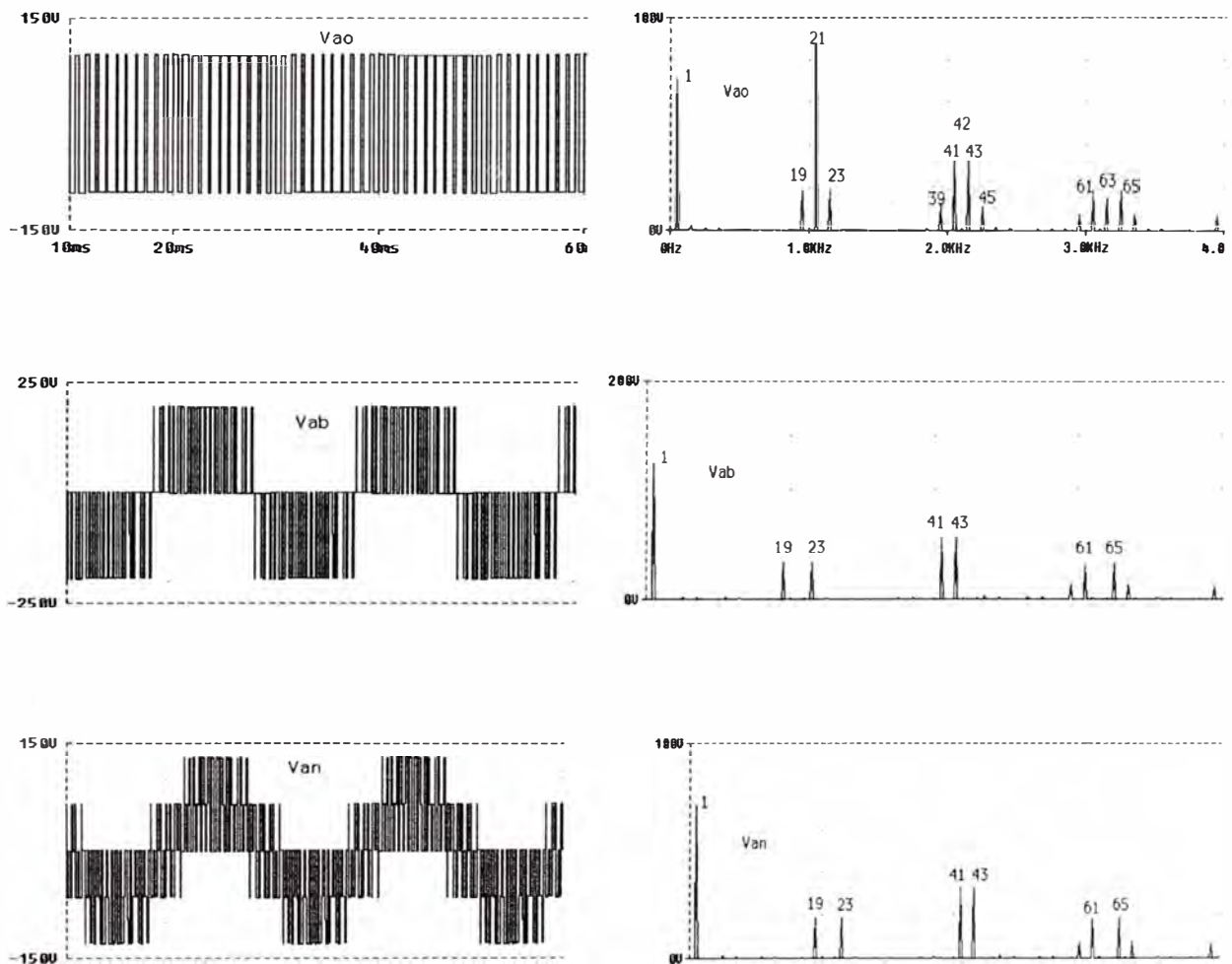


Fig. 1.20. Inversor de tensión de 6 pulsos con $f_l = 60$ Hz, (a) V_{ao} : tensión por fase del inversor, (b) V_{ab} : tensión de línea (c) V_{an} : tensión por fase de la carga, (d) i_{as} : corriente de línea, (e) i_o : corriente de entrada al inversor

A continuación se mostrarán las gráficas de operación del inversor con regulación PWM senoidal



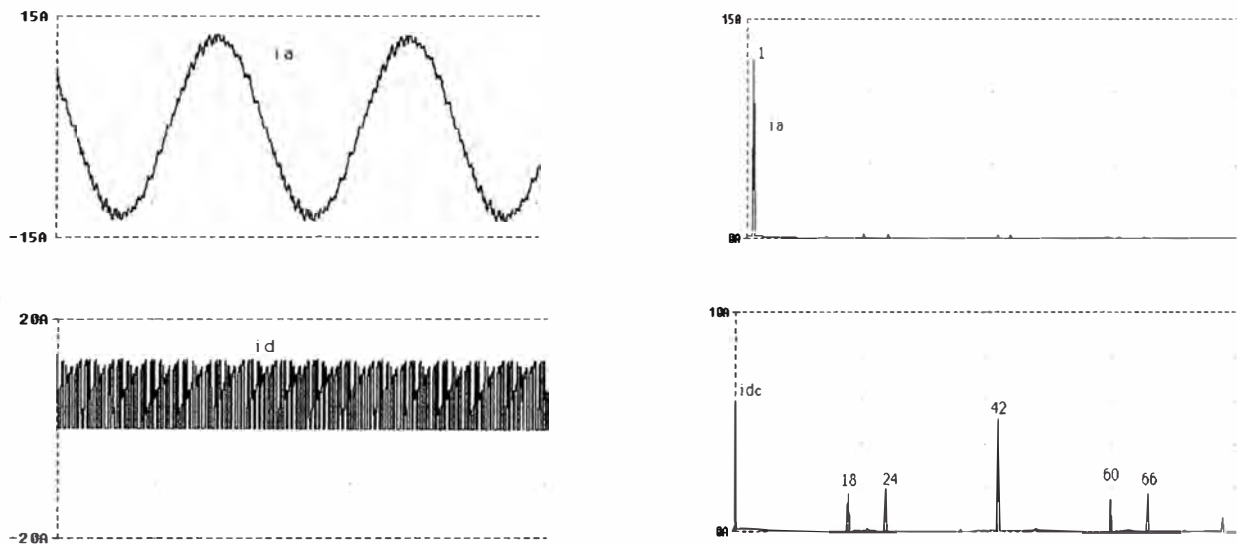


Fig. 1.21. Inversor de tensión con modulación senoidal natural de ancho de pulso (SPWM)

Para poder obtener las formas de onda mostradas en la figura 1.21 necesitamos dispositivos que sean capaces de conmutar a altas frecuencias. A continuación presentamos una tabla donde se encuentran las frecuencias normales de conmutación para los diferentes semiconductores:

Semiconductor	Frecuencia de pulsación(kHz)
MOSFET	25
Transistor de potencia	15
IGBT	2
GTO	0.5:1
Tiristor rápido	0.2:0.3
Tiristor normal	0.05 : 0.2

El semiconductor tiene unas pérdidas energéticas debidas al paso a conducción, al paso a bloqueo, el estado de bloqueo, en estado de conducción. De todas ellas, las debidas a las transiciones conducción bloqueo, son las más elevadas y crecen con la frecuencia de pulsación. Por tanto, no se debe de usar la capacidad de frecuencia de pulsación de un semiconductor determinado, nada más que en el valor que brinde los resultados óptimos para el conjunto convertidor - motor asincrono.

La frecuencia de pulsación esta relacionada con la maxima frecuencia de salida del variador, los casos mas frecuentes son:

Frecuencia maxima de red (50 a 60 Hz)

120% frecuencia de la red (60 a 72 Hz)

El caso mas comercial (100-120 Hz)

400Hz para aplicaciones especiales(accionamientos en la aviación)

1.4.5 Funcionamiento del motor asincrono con un convertidor tipo fuente de tension

En esta parte vamos a tratar al conjunto motor variador asi como las distintas formas de control que tenemos para asi poder cumplir con las exigencias de las aplicaciones.

En las siguientes líneas cuando se hable de un convertidor se habla de un convertidor tipo fuente de tensión con regulación PWM.

A diferencia del control de velocidad en el motor de corriente continua, en el motor de corriente alterna solo se tiene acceso a las variables eléctricas del

estator, la velocidad mecánica y solamente con cálculos diferenciales las variables del rotor y después de complejas ecuaciones diferenciales el flujo electromagnético y el torque electromagnético. Con estos cálculos se logra controlar y regular la tensión y frecuencia de salida del convertidor.

a) Control escalar

Para aprovechar al máximo el motor se trata de controlarlo de modo que el flujo se aproxime lo más posible al nominal para el que fue diseñado y construido.

Esto se consigue para las situaciones de régimen permanente. Un motor regulado con flujo constante e igual al nominal presenta unas curvas características como las de la figura 1.22:

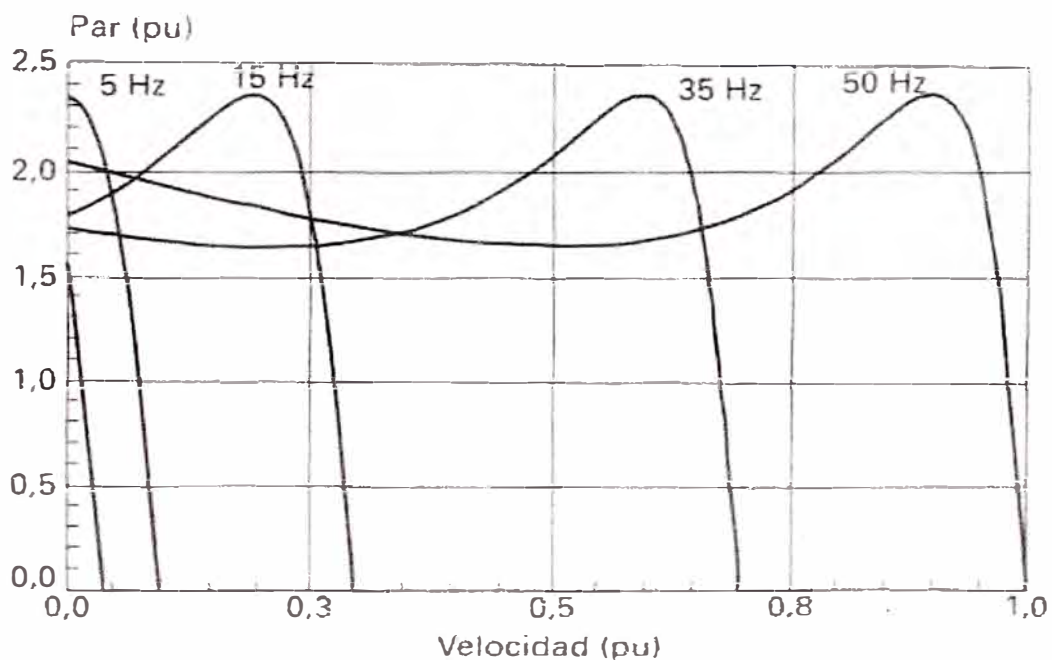


Fig. 1.22. Curvas de par velocidad de un motor asincrónico con flujo constante

La primera forma de lograr flujo constante de manera aproximada, es la de hacer que la tensión y la frecuencia varíen de forma proporcional.

Esto pues se supone que el flujo principal del motor es de variación senoidal con pulsación $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$, el valor eficaz de la f.em inducida sobre una fase que tiene $2 \cdot Z_1$ espiras y está bobinada con un factor de bobinado k_{b1} estará dado por la fórmula 1.12:

$$E_1 = 4.44 \cdot 2 \cdot Z_1 \cdot k_{b1} \cdot f_1 \cdot \Psi_{\max} \quad (1.12)$$

Obtendremos para el flujo

$$\Psi_{\max} = \frac{E_1}{f_1} (4.44 \cdot 2 \cdot Z_1 \cdot k_{b1}) \quad (1.13)$$

Vemos que el flujo máximo es proporcional al cociente (E_1 / f_1)

En los motores asincronos con valores pequeños de reactancia de dispersión estática, resulta aproximadamente:

$$U_1 = E_1 \quad (1.14)$$

Entonces cuando U_1 / f_1 es constante el motor funciona de forma aproximada con flujo constante, en régimen permanente. Este método de control se

puede emplear en casos de accionamientos con pocas prestaciones dinámicas, es decir con requisitos de regulación de baja velocidad.

Sin embargo esto es solo aproximado, y a medida que las frecuencias van bajando los flujos disminuyen también, por lo que las curvas torque velocidad obtenidas para el régimen permanente son las que se ven en la figura 1.23.

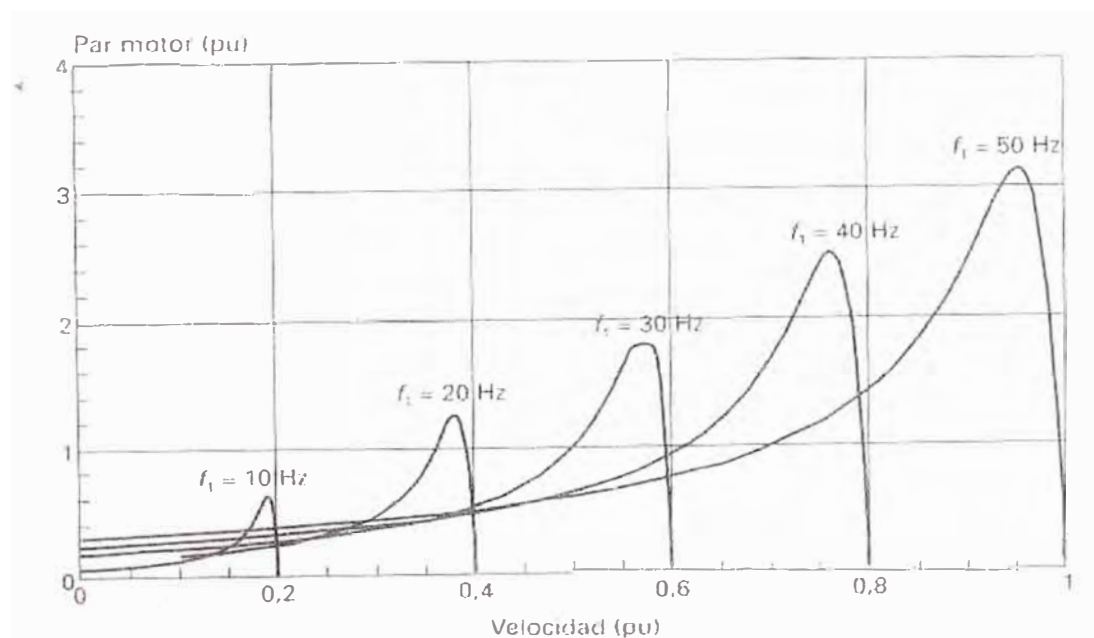


Fig. 1.23. Curvas de torque velocidad en régimen permanente para un motor asincrónico alimentado con tensión y frecuencia proporcionales

Para resolver este problema para bajas frecuencias se tiene que compensar la tensión ya no de forma proporcional a f y también compensar la caída $I \cdot R$

Con esto tendríamos una tensión de la forma

$$U = U_0 + kf_1 \quad (1.15)$$

Donde

U_0 = Tensión fija

K = constante

f_1 = frecuencia

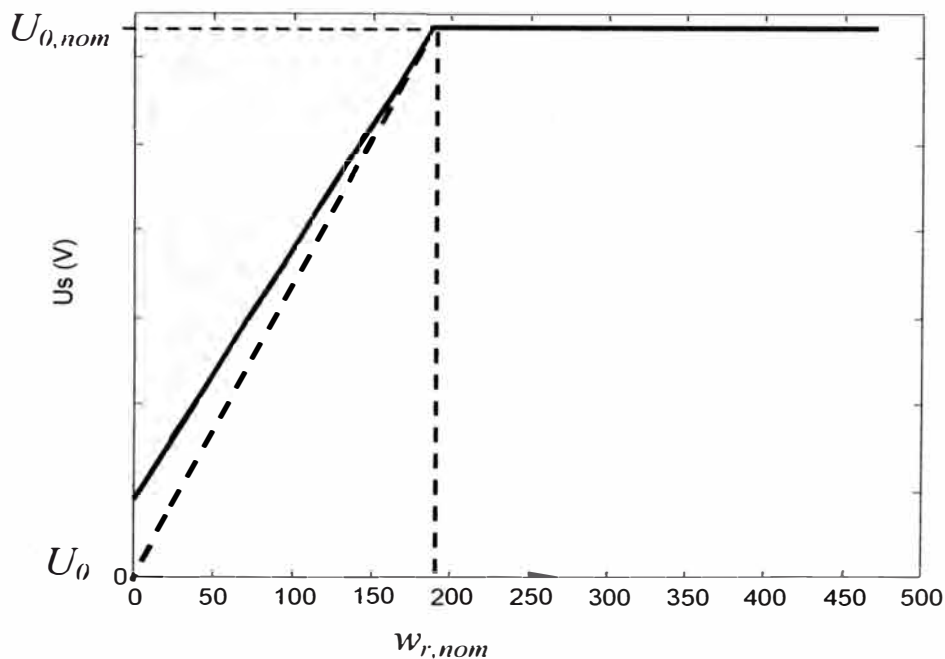


Fig. 1.24. Relación entre U y f para la regulación en frecuencias bajas

Cuando la relación anterior es utilizada en la expresión de torque, desarrollado para diferentes frecuencias de operación menores que la nominal se obtiene la misma característica T_e vs W_r que a frecuencia nominal pero desplazada en forma paralela como se muestra en la figura

1.25 en donde el torque máximo se mantiene constante e independiente de la frecuencia. Esta región de operación es llamada zona de torque constante.

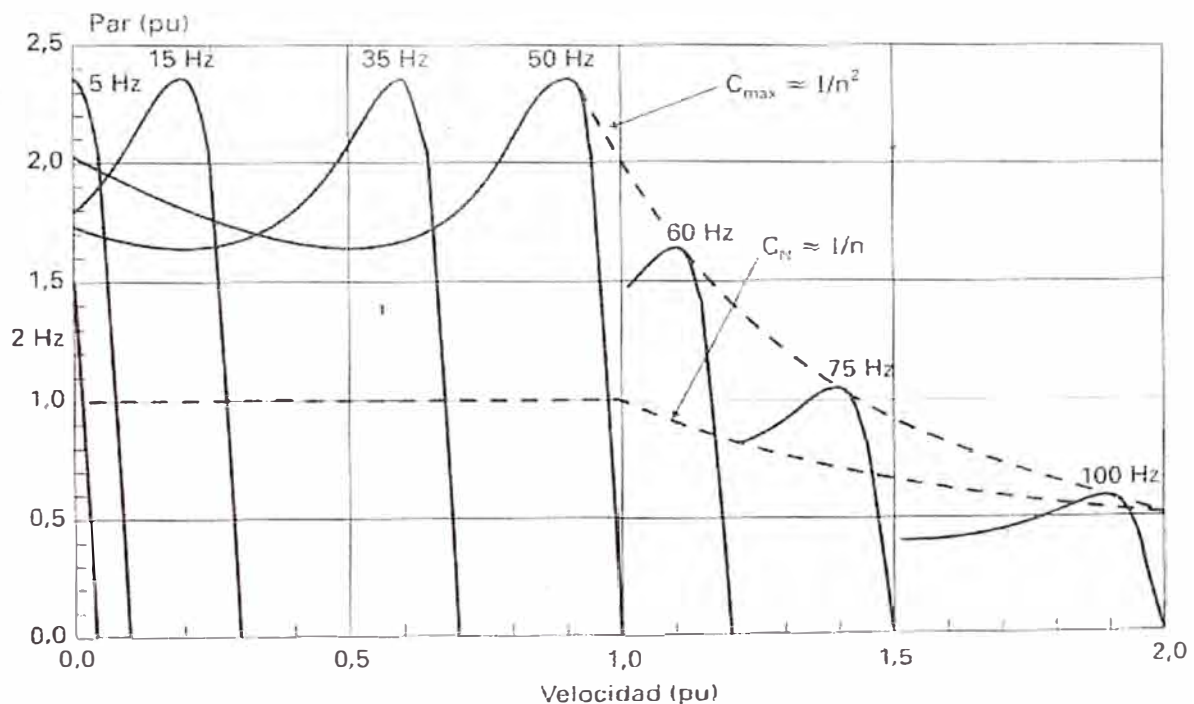


Fig. 1.25. Curvas torque velocidad para relación $U=U_0+kf_1$

El motor opera a torque constante hasta 60Hz, con un torque sin pulsaciones debido a la elevada frecuencia de los impulsos, incluso a frecuencias de inversor bajas. Por debajo de los 60 Hz, la caída de velocidad con la carga (deslizamiento) permanece constante. Si la frecuencia es mayor que 50 Hz, la tensión de alimentación debe permanecer constante para no tener problemas con el aislamiento del motor y el flujo magnético se debilita.

Por encima de 60Hz, el torque desciende en proporción inversa al aumento de velocidad y el motor trabaja a potencia constante hasta que se alcanza la intersección del punto $C = C_{max}$ porque el torque máximo desciende con el cuadrado de la velocidad.

Como regla general, el deslizamiento máximo S_{\max} corresponde de 2 a 3 veces al deslizamiento nominal.

En la figura se presenta la variación del torque de un motor a diferentes velocidades.

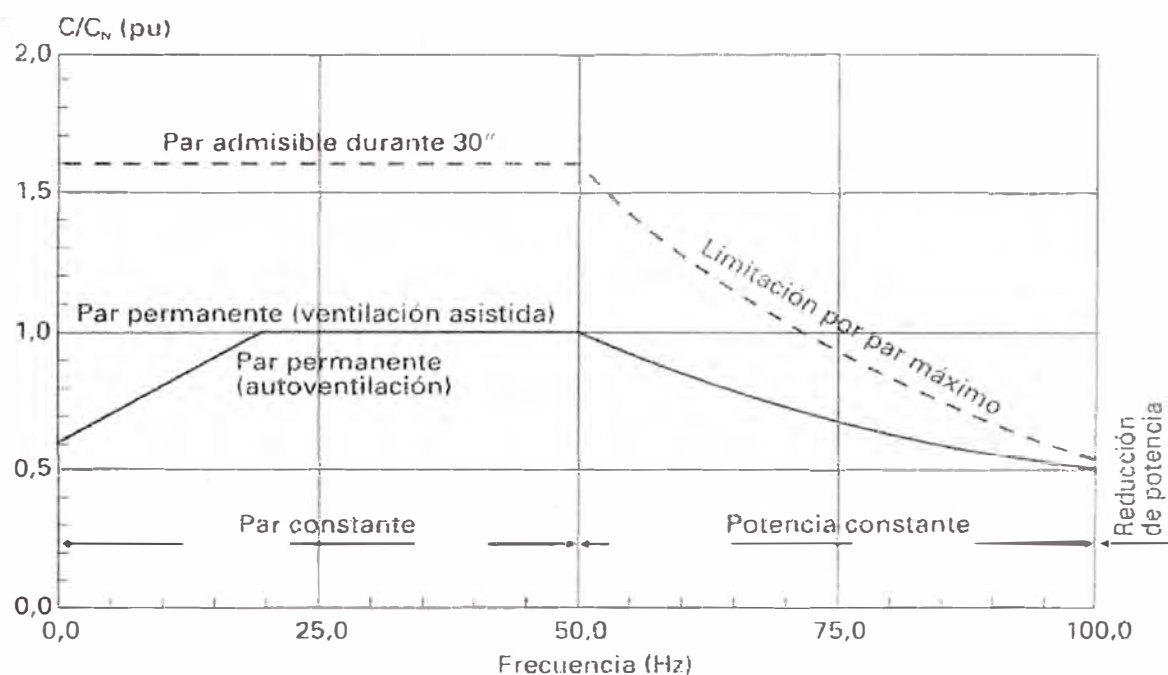


Fig. 1.26. Curvas de torque de un motor para diferentes frecuencias

Es posible trabajar desde 0 hasta la velocidad máxima torque constante y funcionamiento continuo si el motor tiene ventilación separada. En caso de motores autoventilados, el ventilador tiene poco efecto a bajas velocidades y ahí debe reducirse el torque continuo. La reducción del torque debe empezar por debajo del 30 % a 50 % de la velocidad nominal, según el tipo de motor. Por encima de los 60 Hz, es posible trabajar a potencia constante hasta la intersección de la curva del torque nominal con la del torque máximo.

Los convertidores PWM tienen gran reserva de sobrecarga durante tiempos cortos (línea de puntos en fig 1.27). La capacidad de sobrecarga de cada convertidor está determinada por la relación entre la corriente máxima de salida y la corriente nominal. Por ejemplo un pequeño inversor suministra 16.5 A en servicio continuo pero puede dar 30 A durante 30 s. Por tanto la capacidad de sobrecarga del variador es de 1.8 veces. Esta gran capacidad de sobrecarga es especialmente interesante en el caso de arranques difíciles y puntas de torque.

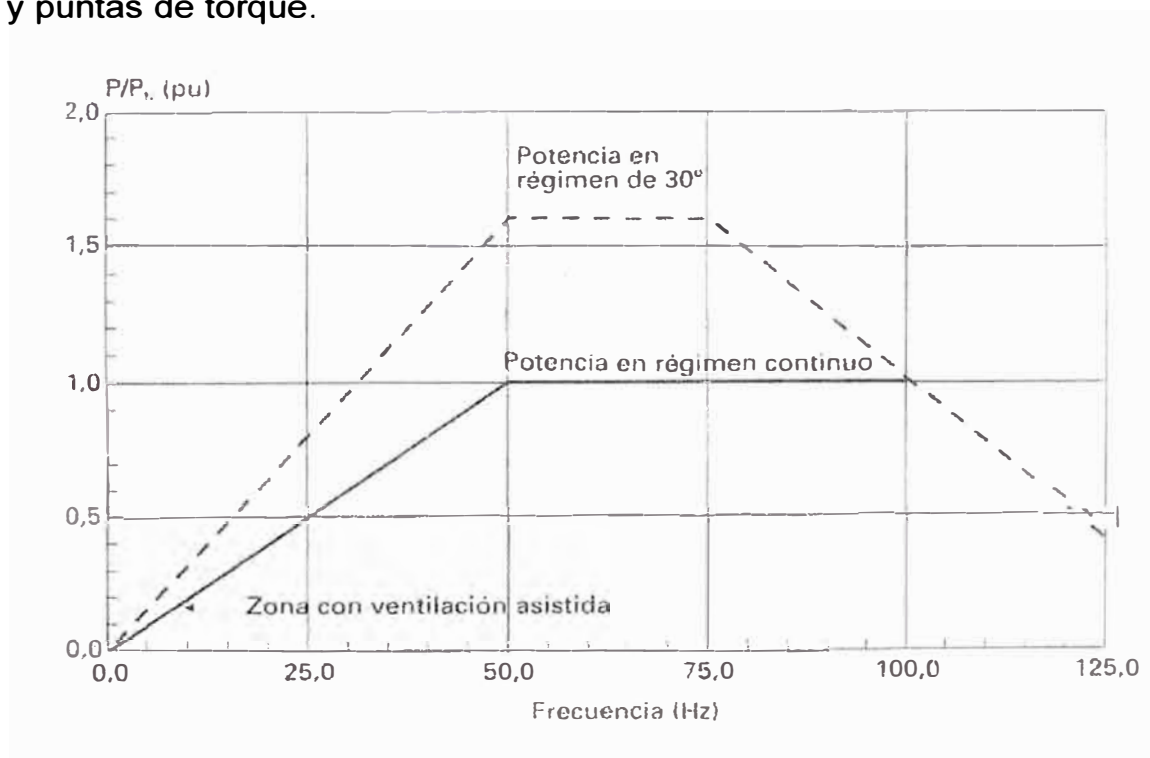


Fig. 1.27. Potencia en régimen continuo y en sobrecarga

Los motores asincrono de catalogo son autoventilados y su capacidad de disipación térmica es función de la velocidad. Al disminuir esta la intensidad ha de limitarse para no sobrepasar los límites de calentamiento.

b) Control por orientación de campo

Esta nueva metodología de control fue publicada en 1972 para el control de motores de corriente alterna (AC) y desarrollado 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 con la que se 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 esta en conocer la posición angular del flujo rotórico respecto al estator y que procesado por un algoritmo; calcula a partir de la corriente absorbida las componentes ortogonales que regulan el torque y el flujo. De esta forma el control por orientación de campo logra reproducir el control desacoplado entre torque y flujo que es inherente en los motores de corriente continua. Los controles de velocidad para motores de corriente alterna ofrecen una respuesta de torque mejorada en relación a los controles para motores de corriente continua debido a su reducido momento de inercia.

En la práctica se han desarrollado varios modelos denominados: Control vectorial de flujo, Control vectorial de campo, Control vectorial etc, la diferencia entre los distintos métodos radica en la manera de estimación del flujo.

La mayoría de los métodos de orientación de campo pueden ser considerados como métodos indirectos ya que controlan la corriente para obtener el flujo deseado. Los parámetros de retroalimentación son la corriente del motor y la velocidad o posición del rotor.

Recientemente se ha logrado mejorar la performance de operaciones sin sensor a bajas velocidades (sensor less) que es en donde se tenía problemas para el cálculo de parámetros. Esto debido a las nuevas técnicas de estimación de la velocidad y al desarrollo de los métodos directos de orientación de campo.

Método directo de Orientación de Campo

En este método la posición angular del flujo en donde la orientación es deseada es directamente medida usando bobinas de prueba o estimándola a partir de las medidas de las variables eléctricas de tensión y corriente en los terminales del motor, debido a que no es posible sensar directamente el flujo rotórico. En el caso donde la información de la amplitud del flujo esta disponible, un regulador de flujo puede emplearse para mejorar y reducir la sensibilidad a la variación de los parámetros de la máquina. El mayor de los problemas en muchos esquemas de control de orientación de campo directo es su inherente sensibilidad a las bajas velocidades donde la caída de tensión en la resistencia estática es un termino dominante y donde la integración de la señal de tensión se vuelve problemática.

En los métodos de control directo e indirecto de orientación de campo, la sensibilidad a la variación de parámetros depende de la razón L/R de la máquina, que con grandes valores, resulta en una gran sensibilidad.

Entre las características que presentan hoy en día esta tecnología de control vectorial con captador de velocidad tenemos :

- ◆ Amplio rango de control de velocidad (1:1000) con una precisión de $\pm 0.01\%$
- ◆ Operación a torque constante en el rango de 1.8- 1800 rpm.
- ◆ Alta capacidad de torque de arranque, del orden de 150% del valor nominal.

El control vectorial con captador de velocidad es utilizado donde se requiere de una alta respuesta dinámica inclusive a bajas velocidades y elevada precisión de velocidad como en: ascensores , accionamientos de posicionamiento, grúas con requisitos de posicionamiento.

También es utilizado para la regulación del torque de tipo vectorial con captador de velocidad como accionamiento de bobinadoras, accionamientos subordinados con regulación de tiro y accionamiento maestro-esclavo.

Entre los criterios para la utilización del captador de velocidad tenemos:

Si se requiere de máxima precisión de velocidad.

Si debe cumplir requisitos máximos de respuesta dinámica.

Si se exige regulación del torque en el margen de variación $> 1:10$

Si se exige mantener un torque definido y/o velocidad variable a velocidad aproximadamente en un 10% por debajo del torque nominal.

1.4.6 Ventajas del uso y aplicaciones de convertidores de frecuencia

La gran ventaja que trajo el uso de variadores es poder controlar la velocidad y torque de cualquier motor de inducción fabricado en serie.

La alimentación casi senoidal, mediante técnicas de onda pulsada con anchura modulada (Pulse Wide Modulation. PWM) y las técnicas de control hacen que se tenga un control directo del torque y velocidad, sin tener que tomar una señal real de velocidad. La toma de esta señal requiere el montaje de una dínamo tacométrica y esto en un motor de serie es muy complicado y costoso

Actualmente estos convertidores se fabrican en serie, siendo muy robustos ,y sencillos en su manejo y aplicación.

La aparición de estos convertidores ha revolucionado la industria mejorando la eficiencia de los diferentes procesos.

Para poder seleccionar un accionamiento concreto es preciso tener muchas consideraciones entre ellas:

Las técnicas de la máquina

- Campo de regulación de la velocidad
- Necesidad de que el frenado sea recuperativo
- Máquina accionada, en los aspectos de torque resistente y de inercia propia.
- Velocidad de respuesta ante los cambios de consigna
- Precisión de regulación
- Consumo de energía reactiva y armónicos de la red

Las del sistema

- Ver la eficiencia completa del sistema total desde la máquina accionada hasta la red de toma de potencia eléctrica.

Lás económicas

- Coste de inversión de todos los equipos que forman el accionamiento
- Precio de la energía eléctrica
- Vida estimada de los equipos
- Costes de mantenimiento

A continuación mencionaremos algunas de las más populares aplicaciones de los variadores:

- Accionamiento de bombas: en las cuales se puede obtener un gran ahorro de energía, encontrando el caudal óptimo con el uso de un variador.

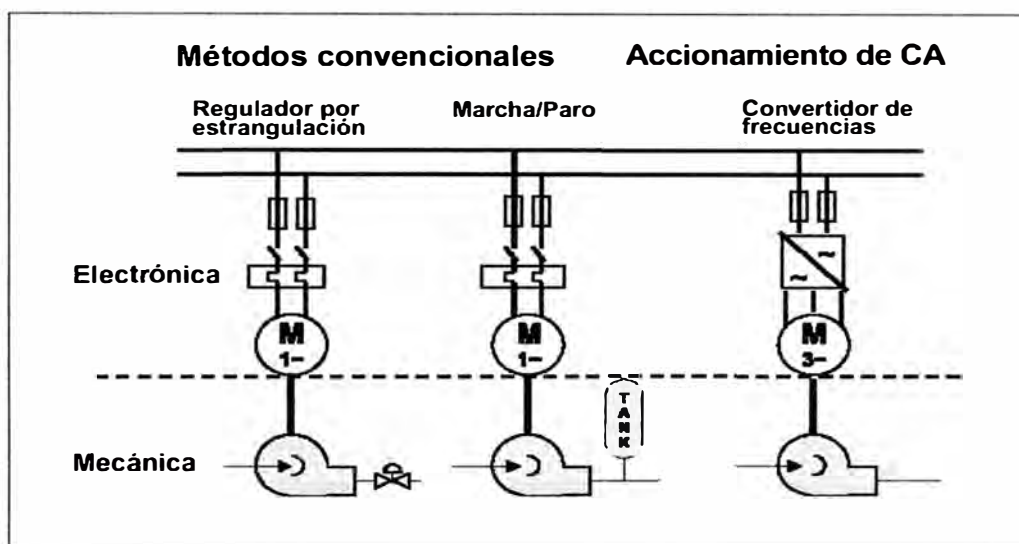


Fig.1.28. Aplicación de convertidores a bombas

- Accionamiento de ventiladores: en estos también se puede ahorrar energía pues la mayoría toma toda la energía y pero solo es utilizado parte del caudal.

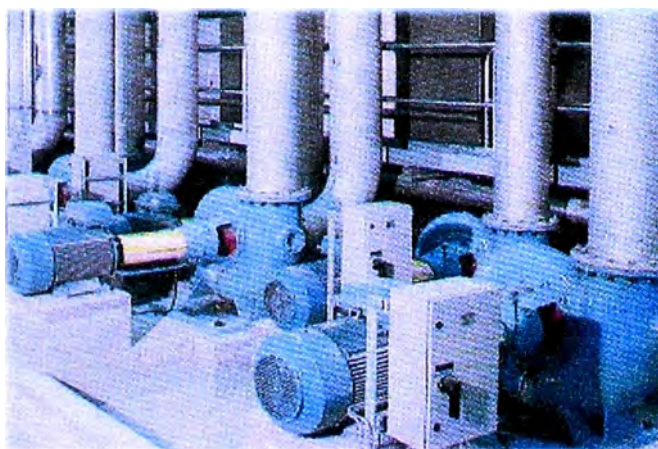


Fig.1.28. Aplicación de convertidores a ventiladores

- Accionamiento de grúas y elevadores: para tener un aumento de la fiabilidad y la disminución de gastos de mantenimiento. Esto pues se elimina el reductor y inercia adicional. Empleo si es posible de recuperación energética.

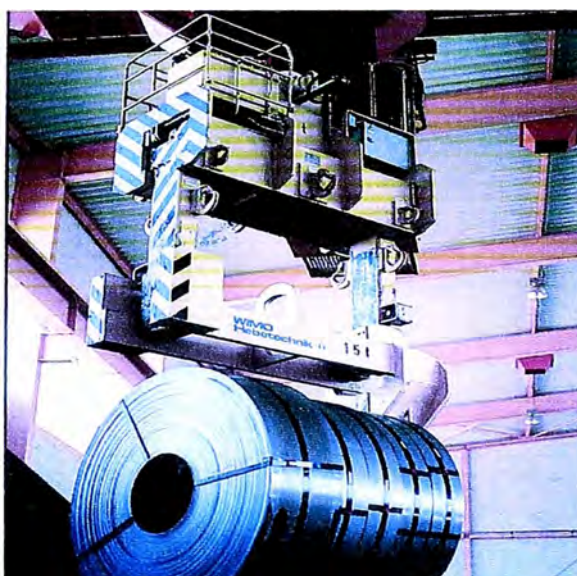


Fig.1.29. Aplicación de convertidores a grúas

- Accionamiento de prensas de rodillos : estas trituran clinker que es de donde se obtiene el cemento.

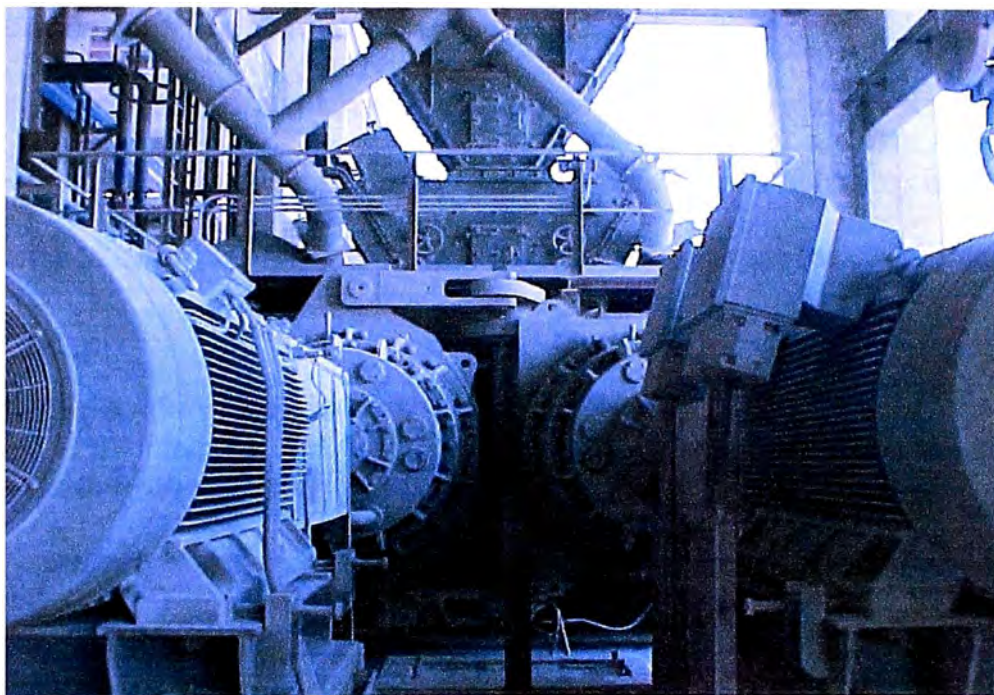


Fig.1.30. Aplicación de convertidores a prensas de rodillos en un sistema master esclavo

- Accionamiento de fajas transportadoras
- Accionamiento de vehículos eléctricos
- Accionamiento para propulsión de navios
- Control de posición , robots etc

1.4.7 Problemas presentados por el uso de convertidores de frecuencia

Entre los principales problemas tenemos:

- Consumo de energía reactiva: la parte rectificadora del variador para mantener la tensión continua constante en el circuito intermedio consume potencia reactiva que puede ser compensada de distintas formas como:
 - Empleo de diodo de circulación libre
 - Instalando un Chopper
 - Instalación de un banco de baterías controlado por tiristores etc
- Generación de armónicos de corriente y de tensión: que dependen del número de pulsos del variador y del tipo de variador. Estos pueden ser eliminados mediante filtros pasivos o activos.
- Perdida de aislamiento en los bobinados: debido muchas veces a la temperatura pues cuando se trabaja a velocidades muy bajas y el ventilador no cumple su función
- Ruido en los motores: cuando se usa variador se produce un ruido de naturaleza magnética debido a las altas pulsaciones del inversor.
- Reflexión de onda: este efecto se da al encontrar la onda aplicada impedancias diferentes, esta se onda se refleja y si la longitud del cable es muy grande la onda reflejada se puede superponer a la

lanzada y llegar casi al doble la tensión en bornes del motor. Esta sobretensión puede dañar el aislamiento de las espiras que están mas cerca de los terminales de línea de cada fase.

Este efecto tiene un capítulo aparte.

- Falla en rodamientos: debido a corrientes “parásitas “ que circulan entre motor hacia eje pasando por los rodamientos tierra y variador dañando los rodamientos, requiriendo los últimos, un cambio prematuro

Este tema se verá en detalle en este informe.

- Interferencia electromagnética: conocida también por su acrónimo de su término en ingles ElectroMagnetic Interference EMI.

La EMI producidas por variadores se transmite por:

- conducción a través de la red que son las armónicas descritas anteriormente
- Radiadas que influyen en equipos de comunicaciones alámbricos o inalámbricos

Para la radiación electromagnética es decisiva la configuración del circuito de alimentación. La EMI es directamente proporcional a la longitud del cable de conexión entre motor y convertidor y la frecuencia de pulsación del convertidor.

Este tema se verá con detalle en este informe.

CAPÍTULO II

REFLEXIÓN DE ONDA DE TENSIÓN

Una onda de voltaje viajando a través de una línea de transmisión es reflejada desde la transición de la impedancia de la línea y de la impedancia de la carga al final de la línea. Si no hay diferencia de impedancias no hay reflexión de onda

2.1 Generación de sobre tensiones en los motores producidos por el convertidor de velocidad

Normalmente la impedancia del motor es mayor que la impedancia del cable de conexión, la teoría de transmisión de ondas predice una reflexión de voltaje.

Las sobretensiones en el motor usando convertidores de velocidad es debido a la rapidez de pulsación del convertidor ($t_r = 0.1$ a $5\mu s$) y a la longitud del cable de conexión entre motor y convertidor.

El pulso de voltaje *PWM* viaja a través del cable a la mitad de la velocidad luz ($150m-200m \mu s$) y , si el pulso toma más tiempo de la tercera parte de la

rapidez de pulsación para viajar del convertidor al motor, se produce una reflexión completa y el voltaje en los bornes del motor se duplica, ver figura 2.1.

Consideremos una longitud finita de cable con una infinita dV/dt donde de voltaje (pulso) viajando de convertidor a motor. El motor representa una alta impedancia con respecto a la rapidez de los pulsos. El motor se comporta como un capacitor equivalente descargado. Al llegar la onda incidente la onda es reflejada (el capacitor carga). La onda incidente adicional reflejada dobla el voltaje entre terminales del motor ($2E$). Por tanto la línea es cargada en $2E$ mientras en la salida del inversor la salida es todavía E . Una vez una onda $-E$ (reflexión negativa) ahora viaja a través de inversor a motor y por lo tanto, finalmente, el voltaje de motor se convierte otra vez en E después de tres vueltas a lo largo del cable. Es por esto que se dice que, si los pulsos toman más de la tercera parte del tiempo del pulso para viajar del inversor al motor, el voltaje reflejado es $2E$ en los terminales del motor

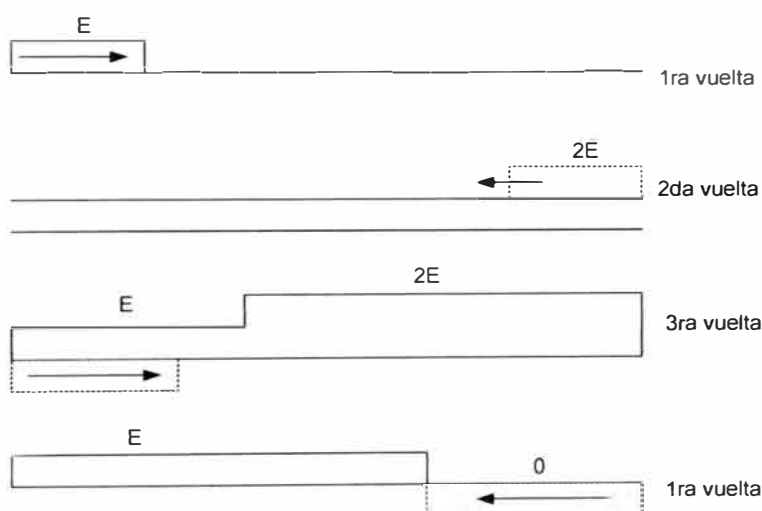


Fig. 2.1 Reflexión de la onda de tensión

Se puede calcular el voltaje línea línea pico ideal V_{LL} en los terminales del motor, valor que lo da la ecuación 2.1.

$$V_{LL} = \begin{cases} \frac{3.I_c.E}{U^*.t_r} \Gamma_m + E; & \text{para } t_{\text{viaje}} < t_r / 3 \\ E.\Gamma_m + E; & \text{para } t_{\text{viaje}} > t_r / 3 \end{cases} \quad (2.1)$$

donde Γ_m es el coeficiente de reflexión derivado de la teoría de línea transmisión:

$$\Gamma_m = \frac{Z_{\text{motor}} - Z_o}{Z_{\text{motor}} + Z_o} \quad (2.2)$$

donde Z_{motor} es la impedancia equivalente del motor y Z_o es la impedancia al impulso (surge) del cable(de la longitud del cable)

$$Z_o = \sqrt{\frac{Lc}{Cc}} \quad (2.3)$$

De las ecuaciones anteriores si queremos reducir las sobretensiones a casi cero:

$$\frac{3.I_c.E}{U^*.t_r} \Gamma_m \leq 0.2E \quad (2.4)$$

La ecuación anterior provee una condición para calcular la longitud crítica del cable l_c sobre el cual se produce la reflexión con doblaje de tensión.

Para esto tenemos:

$$\frac{3.l_c.E}{U^*.t_r} \Gamma_m = E \quad (2.5)$$

Entonces

$$l_c = \frac{U^*.t_r}{3.\Gamma_m} \quad (2.6)$$

donde

U^* = es la velocidad de propagación de los pulsos [m/us] que depende del tipo de cable y su recorrido.

Γ_m es cercano a 1 pues $Z_{motor} \gg Z_o$

Considerando $\Gamma_m = 0.8$

$$l_c = \frac{U^*.t_r}{2.4} [m] \quad (2.7)$$

que es la fórmula mas conocida.

Para la mayoría de inversores de IGBT la longitud crítica oscila entre 7 a 60m.

2.2 Mediciones de tensión reflejada

Para medir tensiones y poder observar las formas de onda es necesario un osciloscopio con puntas reductoras y un barrido de frecuencia de hasta 100MHz para los convertidores más modernos.

En la figura 2.2 mostramos la forma de onda de tensión en un convertidor con 690V de tensión de entrada

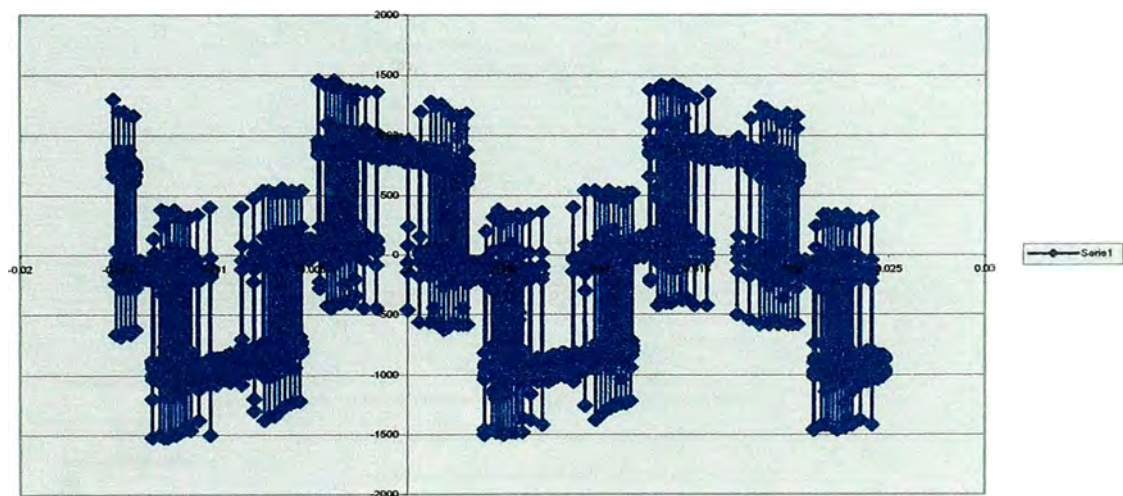


Fig 2.2 Forma de onda real medida en los bornes de un motor 690V con convertidor PWM

Se observa picos hasta de 1500V.

2.3 Medidas para contrarrestar las sobretensiones

En instalaciones donde no es posible reducir la longitud del cable una manera de solucionar las sobretensiones es reducir el coeficiente de reflexión del motor Γ_m o reducir el coeficiente del convertidor. Esto se realiza mediante añadiendo un filtro en los terminales del motor, como por ejemplo para reducir Z_m fig 2.3.

Otra manera es colocar un filtro pasa bajo en la salida del inversor, este aumentará tiempo de disparo del pulso de voltaje, aumentando así la longitud crítica del cable fig 2.4.

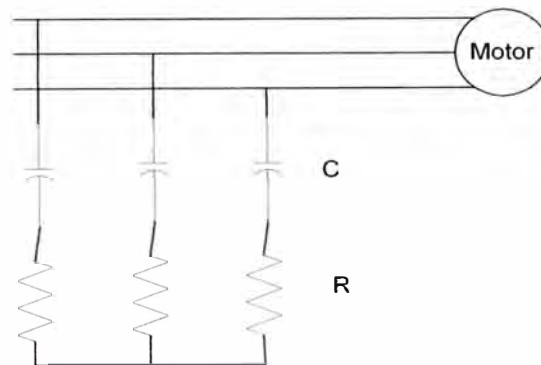


Fig. 2.3 Filtro para reducir impedancia en los bornes del motor

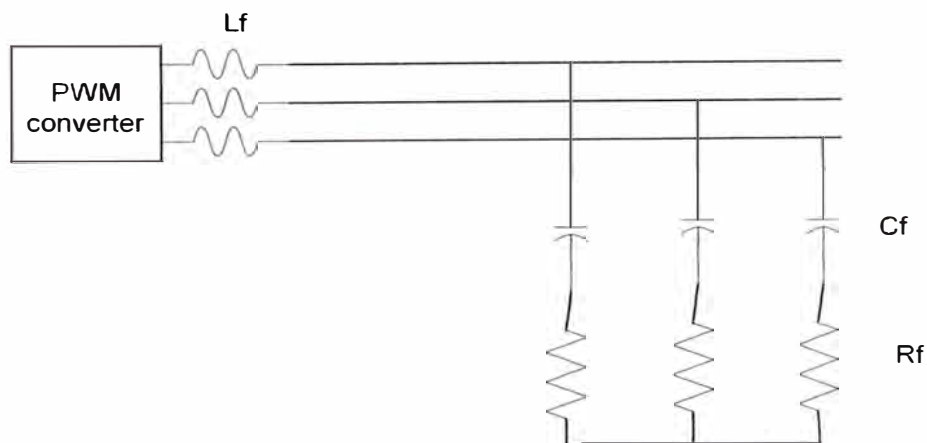


Fig 2.4 Filtro pasabajos para aumentas el tiempo de disparo de pulsos de tensión

CAPÍTULO III

PROBLEMAS DE CORRIENTES EN LOS RODAMIENTOS DEL MOTOR

3.1 Introducción

Algunas instalaciones nuevas de convertidores pueden presentar fallos en los rodamientos apenas unos meses después de su puesta en marcha. Los fallos pueden ser provocados por corrientes de alta frecuencia que circulan a través de los rodamientos del motor.

Aunque las corrientes de los rodamientos se han venido dando desde la invención de los motores eléctricos, la incidencia de los daños que provocan se ha incrementado durante los últimos años. Ello se debe a que los convertidores de frecuencia modernos con sus pulsos de tensión de rápido aumento y altas frecuencias de conmutación pueden provocar pulsos de corriente a través de los rodamientos cuya descarga repetida puede desgastar de forma gradual los anillos guía de los rodamientos.

Para evitar que se produzcan daños, es esencial proporcionar vías de conexión a tierra adecuadas y permitir que las corrientes de fuga vuelvan al chasis del convertidor sin tener que pasar a través de los rodamientos. La

magnitud de las corrientes puede reducirse empleando cables de conexión al motor simétricos o filtrando estas corrientes a la salida del convertidor.

Otra técnica es el correcto aislamiento en la construcción de los rodamientos del motor que interrumpa la ruta de la corriente de los rodamientos.

3.2 Revisión general y teoría básica sobre corrientes en los rodajes.

En los últimos años el interés por las corrientes de rodaje han tenido un incremento debido a la introducción de nuevos semiconductores de conmutación rápida que son usados en la moderna tecnología de convertidores.

Se verá a continuación la teoría sobre corriente de rodaje

3.2.1 Corrientes de rodaje clásicas

Las corrientes de rodaje en motores de inducción es un fenómeno conocido. Frecuentemente ellas son causadas por las asimetrías magnéticas en la ruta del flujo principal dentro de la maquina. Esta asimetría produce un flujo magnético alternante $\Delta\Phi$ el cual abarca el rotor ("flujo circular") y el cual induce una tensión dentro del bobinado, eje de motor, rodajes y carcasa del estator.

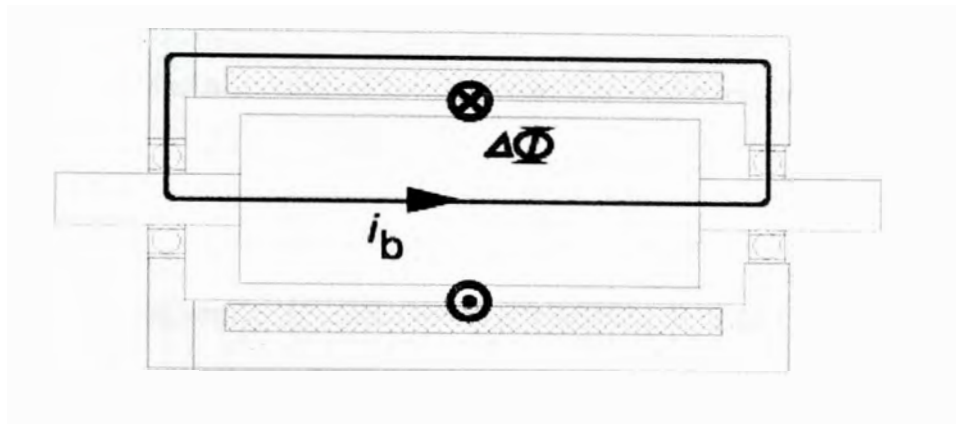


Fig.3.2. Corriente de rodajes clásicas debido a un flujo magnético alternante $\Delta\Phi$.

Dependiendo de los diferentes parámetros, este voltaje debería generar una corriente circular i_b la cual también podría pasar por los rodajes (ver fig. 3.2). Si el voltaje en las terminaciones del eje es suficientemente alto para vencer la impedancia de la capa de aceite del rodaje, resultará una corriente de rodaje circulante.

Las prácticas modernas en el diseño y fabricación de motores casi han eliminado las corrientes de los rodamientos de baja frecuencia inducidas por la asimetría del motor

3.2.2 Corrientes de rodaje debido al uso de convertidores

Los motores AC alimentados por un convertidor, reciben un voltaje de pulsos con una frecuencia fundamental variable, para poder tener un control ajustable de velocidad. Para este propósito una alta razón de conmutación de los pulsos del convertidor es demandada.

La ventaja de operación a alta frecuencia es la corriente sinusoidal característica, similar a la operación normal, con un menor ruido en el motor, se reduce la disipación de la energía y la variación del torque. Los modernos convertidores que emplean IGBT (IGBT – Transistor Bipolar de Puerta Aislado) son muy apropiados para este propósito. Debido a la alta velocidad de conmutación (típico 100ns) de estos dispositivos de potencia, es posible obtener frecuencia de conmutación de hasta 20kHz

La rapidez de conmutación finalmente resulta en un alto valor de du/dt arriba de $10kV/\mu s$ para la tensión. Las consecuencias de esto es que en una descomposición en frecuencia de los voltajes de salida obtenemos componentes armónicos los cuales están presentes en los terminales fase - fase del motor.

Otra consecuencia es el llamado voltaje de modo-común entre los terminales y tierra.

Los armónicos en un sistema simétrico trifásico causan pérdidas adicionales, rizado de torque y ruido.

Estos componentes están siendo minimizadas durante el desarrollo del convertidor en los últimos años

Los voltajes de modo común generan las corrientes de modo común. Las corrientes de los rodamientos de alta frecuencia son una consecuencia de la circulación de corriente de modo común en el circuito de modo común del sistema de accionamiento de CA.

Una fuente de alimentación sinusoidal trifásica típica está equilibrada y es simétrica en condiciones normales. Es decir, la suma de vectores de tensión de las tres fases siempre es igual a cero.

Por ello, es normal que el neutro esté en cero voltios. De todas formas, este no es el caso cuando se emplea una fuente de alimentación trifásica conmutada PWM, en la que una tensión de CC se convierte a una tensión trifásica. Aunque las componentes fundamentales de frecuencia, de las tensiones de salida son simétricas y equilibradas, es imposible obtener la suma las tensiones de salida de forma instantánea igual a cero, con dos posibles niveles de tensión de salida disponibles. La tensión resultante de punto neutro no es cero. Esta tensión puede definirse como una fuente de tensión de modo común. Puede medirse en el punto cero de cualquier carga, por ejemplo el punto estrella del bobinado del motor.

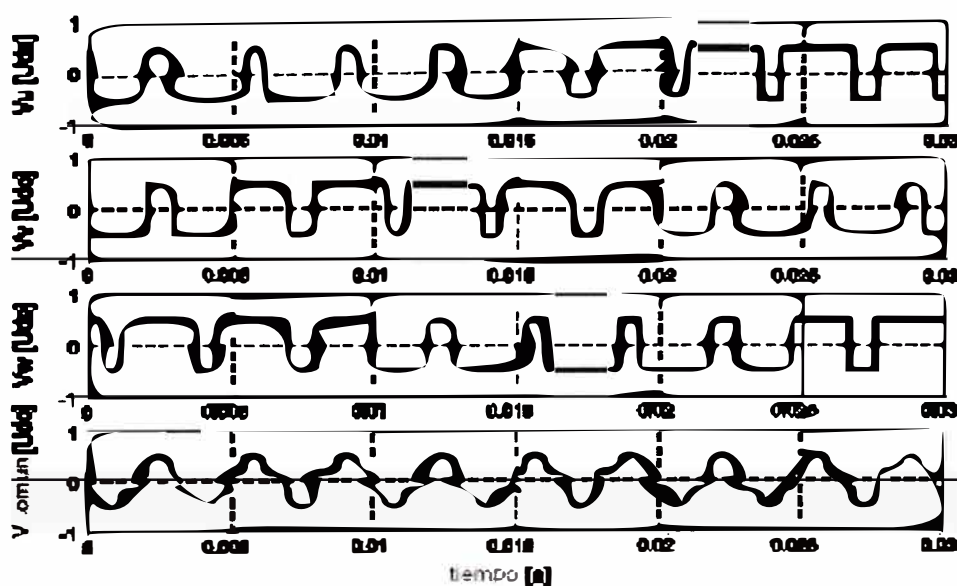


Fig.3.3 tensión de modo común causante de las corrientes de rodaje

La figura 3.3 muestra las tensiones de fase de una fuente de alimentación trifásica PWM típica y la media de las tres, o tensión en punto neutro, en un sistema de accionamiento de AC moderno.

La tensión neutra es claramente distinta de cero y su presencia puede definirse como una fuente de tensión de modo común. La tensión es proporcional a la tensión de bus de CC, y tiene una frecuencia igual a la frecuencia de conmutación del convertidor.

Siempre que se cambia una de las tres salidas del inversor de uno de los posibles potenciales a otro, se fuerza a una corriente proporcional a esta tensión a circular a tierra a través de las capacitancias de tierra de todos los componentes del circuito de salida. La corriente circula de vuelta a la fuente a través del conductor de tierra y las capacitancias de fuga del convertidor, que son externas al sistema trifásico. Este tipo de corriente, que circula por el sistema en un bucle que está cerrado externamente al sistema, se denomina intensidad de modo común, un ejemplo de esta se da en la figura 3.4.

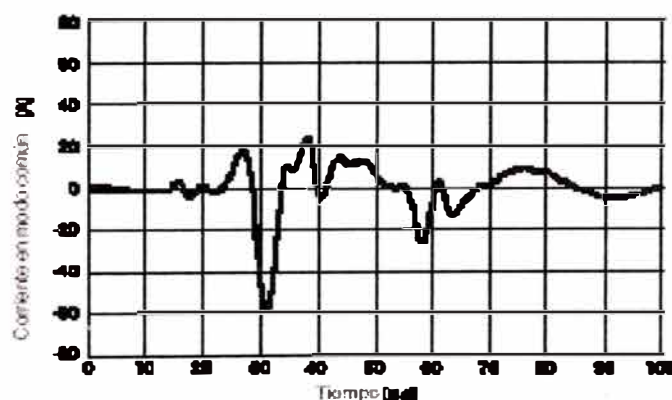


Fig.3.4 Un ejemplo de la intensidad de modo común en la salida del convertidor. El pulso es una superposición de diversas frecuencias debido a las distintas frecuencias naturales de las rutas paralelas a la tensión de bus de CC, y tiene una frecuencia igual a la frecuencia de conmutación del inversor

La fig. 3.5 muestra un sistema completo de un convertidor, el cual consiste de una etapa de poder, el circuito intermedio DC; inversor, cables de motor y maquina de carga. Del punto de vista teórico todo tiene que ser considerado como un sistema complejo de inductancia y capacitancias distribuidas.

La frecuencia alta de los voltajes de modo-común causan un flujo de corriente capacitiva a través de las capacitancias parásitas, el sistema de tierra, la malla de los cables y por partes del motor y del convertidor. En el motor, las capacidades entre bobinas, carcasa y rotor son parte de la ruta de modo-común.

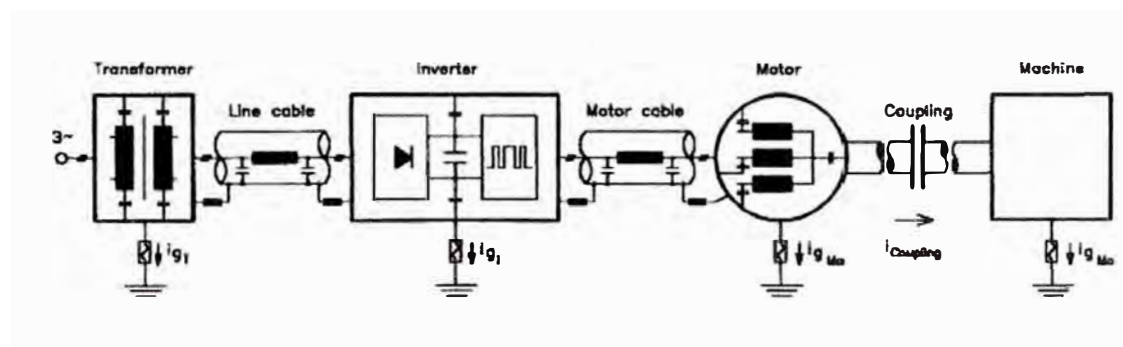


Fig. 3.5 Configuración general de un sistema convertidor

Es la corriente de modo común la que pasa a través de los rodamientos en forma de pulsos. Si la energía de estos pulsos es lo bastante elevada, se lleva a cabo la transferencia de metal del rodamiento y los rodillos guía al lubricante. Ello se conoce como maquinado de descarga eléctrica Fig.3.6 o EDM (electromagnetic discharging machining).

El efecto de un solo pulso es insignificante, pero una pequeña caída EDM es una discontinuidad que aglutina más pulsos y se convierte en una gran caída típica EDM. La frecuencia de conmutación de los accionamientos de CA

modernos es muy alta y el gran número de pulsos provoca una rápida acumulación del desgaste. Como resultado, es posible que tenga que sustituirse el rodamiento aunque no lleve demasiado tiempo en servicio.

La importancia del diseño del sistema se ha recalcado en los últimos años. Cada elemento individual implicado, como el motor, la caja de engranajes o el controlador del convertidor, son el producto de técnicas de fabricación sofisticadas y normalmente presentan un tiempo medio de vida entre fallos (MTBF) favorable. Sólo cuando se combinan estos componentes y se observa el sistema como un todo se hace evidente que se requieren ciertas prácticas para la instalación.

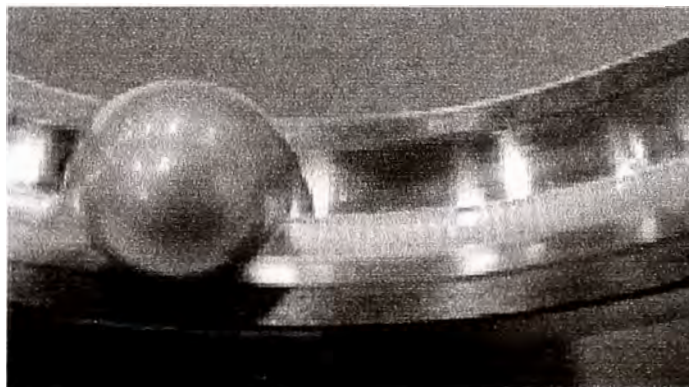


Fig 3.6. Las corrientes de los rodamientos pueden provocar "estrías de los rodamientos", un patrón rítmico en los anillos guía de los rodamientos.

La fuente de las corrientes de los rodamientos es la tensión que se induce en el rodamiento.

Esta tensión puede generarse de tres modos distintos. Los factores más importantes que definen el mecanismo relevante son el tamaño del motor y cómo se hallan conectados a tierra el chasis y el eje del motor. Juega un

papel importante la instalación eléctrica, es decir, el tipo de cable adecuado y las uniones adecuadas de los conductores protectores y del apantallamiento eléctrico.

En motores grandes, la tensión de alta frecuencia se induce entre los extremos del eje del motor por el flujo de alta frecuencia que circula alrededor del estator. El flujo lo causa una asimetría neta de corriente capacitativa que se transmite del bobinado hacia el chasis del estator a lo largo de la circunferencia del estator. La tensión entre los extremos del eje afecta a los rodamientos. Si es suficiente para superar la impedancia de la película de aceite de los rodamientos, una corriente que intenta compensar el flujo neto en el estator empieza a circular en el bucle formado por el eje, los rodamientos y el chasis del estator.

La fuga de corriente al chasis del estator tiene que circular de vuelta al convertidor, que es la fuente de esta corriente.

Cualquier ruta de vuelta contiene impedancia, y por ello la tensión del chasis del motor aumenta en comparación con el nivel de tierra de la fuente. Si el eje del motor se conecta a tierra a través de la maquinaria accionada, el incremento de la tensión del chasis del motor se aprecia por encima de los rodamientos. Si la tensión aumenta lo bastante para superar la impedancia de la película de aceite del rodamiento del extremo del convertidor, parte de la corriente podría circular a través del rodamiento del extremo del convertidor, el eje y la máquina accionada de vuelta al convertidor. Esta corriente de los rodamientos es de un tipo de conexión a tierra del eje.

En motores pequeños, la división de la tensión de modo común sobre las capacitancias de fuga internas del motor puede provocar tensiones en el eje lo bastante elevadas para crear pulsos de corriente de los rodamientos de alta frecuencia. Ello puede ocurrir si el eje no se conecta a tierra a través de la maquinaria accionada mientras que el chasis del motor se conecta a tierra en el modo estándar de protección.

3.3 Modelamiento eléctrico del fenómeno

Una capacitancia se crea siempre que dos componentes conductores están separados por un aislador. Por ejemplo, el hilo de fase de cable tiene capacitancia al hilo de puesta a tierra separado mediante aislamiento de PVC, por ejemplo, y el arrollamiento del bobinado del motor está aislado del chasis por una capa de barniz y por aislamiento de ranura, por lo que tiene un valor de capacitancia al chasis del motor. Las capacitancias dentro de un cable y especialmente dentro del motor son muy reducidas

En la figura 3.7 se muestra el circuito simplificado del sistema convertidor motor.

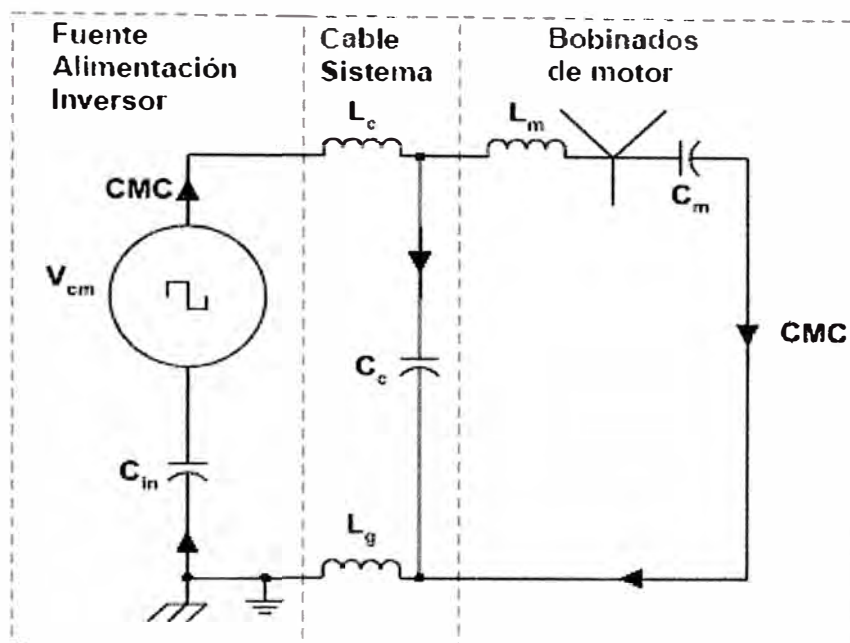


Fig.3.7 Bucle simplificado de la intensidad de modo común de un convertidor PWM y el motor de inducción.

La fuente de alimentación del inversor actúa como una fuente de tensión de modo común (V_{cm}). La intensidad de modo común (CMC) circula a través del cable de modo común y las inductancias de motor, L_c , L_m y a través de las capacitancias de fuga entre los bobinados del motor y el chasis del motor, combinadas para ser C_m . Desde el chasis del motor, la corriente pasa a través del circuito de tierra de la fábrica que tiene la inductancia L_g . La inductancia L_g también recibe alimentación de intensidad de modo común desde la capacitancia de cable de fuga C_c . El chasis del convertidor se conecta a tierra de fábrica y acopla la intensidad de modo común/corrientes de tierra a través del convertidor de fuga a las capacitancias de chasis, combinadas como C_{in} , de vuelta a la fuente de tensión de modo común.

El camino de vuelta de la corriente de fuga del chasis del motor de vuelta al chasis del convertidor consta del chasis del motor, el apantallamiento de cable o conductores PE y posiblemente de las piezas de aluminio o acero de la estructura del edificio de la fábrica. Todos estos elementos contienen inductancia. La circulación de la intensidad de modo común a través de esta inductancia provocará una caída de tensión que eleva el potencial del chasis del motor por encima del potencial de tierra de la fuente en el chasis del convertidor. Esta tensión del chasis del motor es una parte de la tensión de modo común del convertidor. La intensidad de modo común buscará una ruta con la menor impedancia. Si hay una gran cantidad de impedancia en las rutas previstas, como la conexión PE del chasis del motor, la tensión del chasis del motor hará que se desvíe una parte de la intensidad de modo común por una ruta no prevista a través del edificio. En las instalaciones prácticas existen diversas rutas paralelas. Muchas tienen un efecto menor sobre el valor de la intensidad de modo común o las corrientes de los rodamientos, pero pueden ser importantes para satisfacer los requisitos de EMC. Si el valor de esta inductancia es lo bastante elevado, la reactancia en el rango superior de las frecuencias de intensidad de modo común típicas, 50 kHz a 1 MHz, puede soportar caídas de tensión de más de 100 voltios entre el chasis del motor y el chasis del convertidor. Si, en tal caso, el eje del motor se conecta a través de un acoplamiento metálico a la caja de engranajes u otra maquinaria accionada que esté conectada a tierra sólidamente y cerca del mismo potencial de tierra que el chasis del convertidor, entonces es posible que parte de la intensidad de modo común

del convertidor circule a través de los rodamientos del motor, el eje y la maquinaria accionada de vuelta al convertidor como lo muestra la figura 3.8.

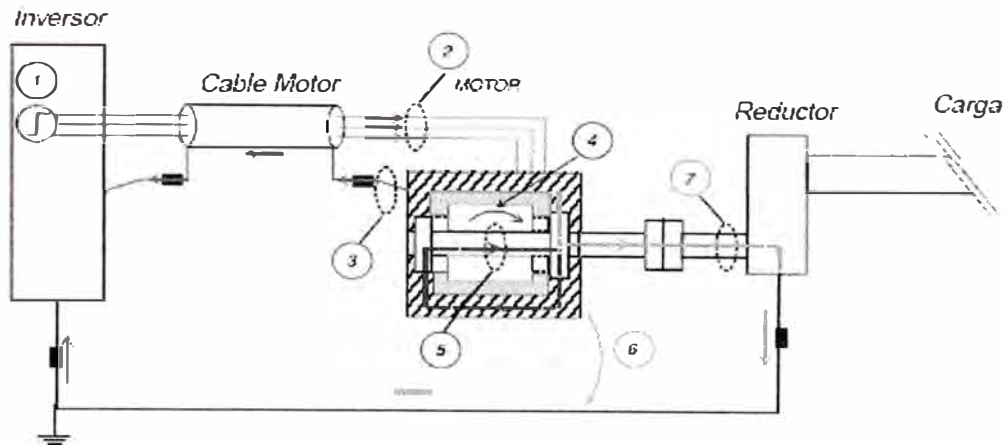


Fig. 3.8 Circuito de las corrientes circulantes

Transformador de modo común

La mayor proporción de la capacitancia de fuga del motor se forma entre los bobinados del estator y el chasis del motor.

Esta capacitancia se distribuye alrededor de la circunferencia y a lo largo del estator. A medida que la corriente pasa al estator por la espira, el contenido de alta frecuencia de la corriente que entra en la espira del estator es mayor que la corriente saliente.

Esta corriente neta produce un flujo magnético de alta frecuencia que circulará en las laminaciones del estator, induciendo una tensión axial en los extremos del eje. Si la tensión es lo suficientemente elevada, puede circular una corriente de circulación de alta frecuencia interna al motor a través del eje y ambos rodamientos. En este caso, el motor puede considerarse un transformador, en el que la intensidad de modo común que circula en el

chasis del estator actúa como primario e induce la corriente de circulación al circuito del rotor o secundario. Esta corriente de los rodamientos se considera la más dañina con valores de cresta típicos de 3 a 20 amperios dependiendo de la potencia nominal del motor, du/dt de los componentes de la etapa de potencia del accionamiento de CA y el nivel de tensión del enlace de CC. Una representación circuital de esto se muestra en la figura 3.9:

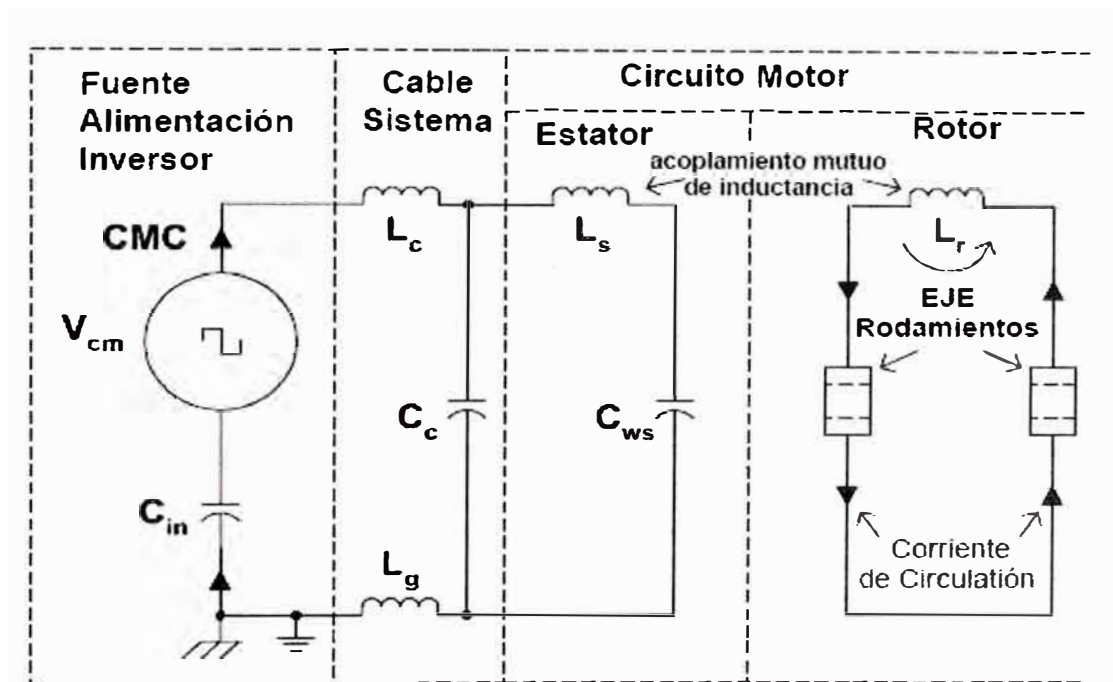


Fig. 3.9 La tensión en el eje axial de alta frecuencia puede considerarse una resultante del efecto de transformador, en el que la intensidad de modo común que circula en el chasis del estator actúa como un primario e induce la corriente de circulación hacia el circuito de rotor o secundario.

Otra versión de la corriente de los rodajes de circulación ocurre cuando la corriente, en lugar de circular completamente dentro del motor, circula a través del eje y rodajes, los rodamientos de la caja de engranajes o la maquinaria accionada y en un elemento estructural que es externo y común al motor y a la máquina accionada. El origen de la corriente es el mismo que

para la corriente circulando dentro del motor. Un ejemplo de esta corriente de los rodamientos de circulación “vagabunda” se muestra en la figura 3.10

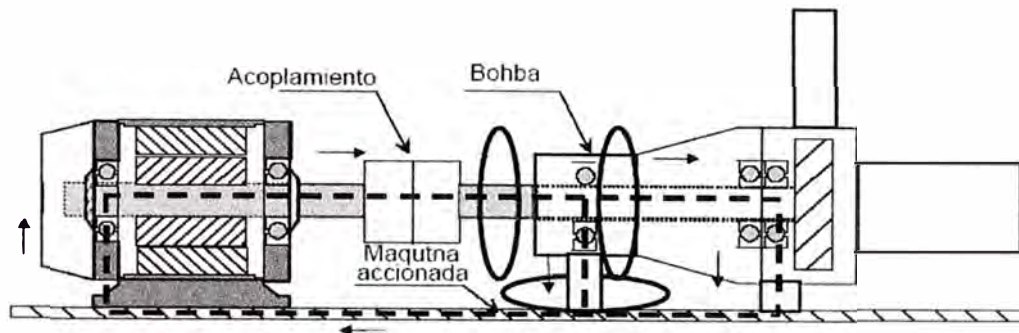


Fig.3.10 Corriente de los rodamientos de circulación “vagabunda”, donde el bucle de corriente es externo al motor.

Distribución de tensión capacitivo

También están presentes otras *capacitancias* de fuga en el motor, como la capacitancia entre los bobinados del estator y el rotor, o la que existe en el vacío de aire del motor entre el hierro del estator y el rotor. Incluso los rodamientos mismos pueden llegar a tener capacitancia de fuga.

La existencia de capacitancia entre los bobinados del estator y el rotor acopla de forma efectiva los bobinados del estator al hierro del rotor, que está también conectado al eje y a los anillos guía internos del rodamiento. Los cambios rápidos en la intensidad de modo común desde el convertidor pueden dar lugar a corrientes en la capacitancia alrededor de la circunferencia y a lo largo del motor, y además entre los bobinados del estator y el rotor hacia los rodamientos, esto se muestra en la fig. 3.11:

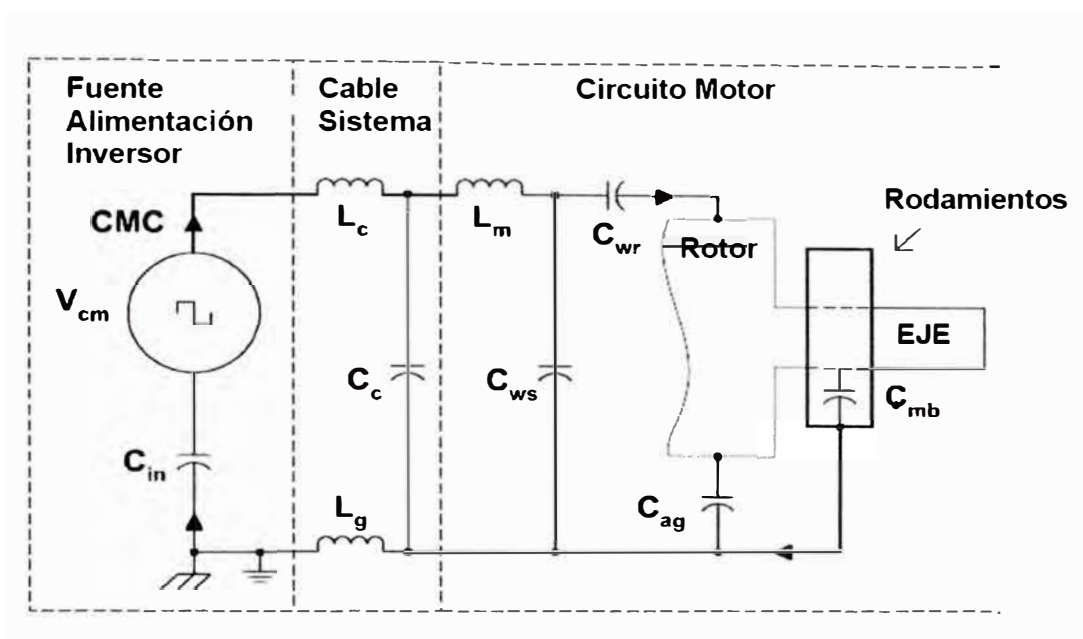


Figura 3.11: Bucle de modo común de un convertidor de velocidad variable, con capacitancias de fuga del estator, rotor y rodamiento.

La circulación de corriente hacia los rodapiés puede cambiar con rapidez, ya que ello depende del estado físico del rodamiento en un momento dado. Por ejemplo, la presencia de una capacitancia de fuga en los rodapiés sólo se mantiene mientras las bolas de los rodapiés están cubiertas de aceite o grasa y no son conductoras. Esta capacitancia, en la que la tensión del eje inducida aumenta, puede cortocircuitarse si la tensión de los rodapiés supera el umbral de su valor de transición conductiva o si un “punto elevado” en una bola atraviesa la película de aceite y entra en contacto con ambos anillos guía del rodamiento. A una velocidad muy baja, los rodapiés tienen contacto metálico ya que las bolas no se han elevado por encima de la película de aceite.

Generalmente, la impedancia de los rodapiés gobierna el nivel de tensión en el que los rodapiés empiezan a conducir. Esta impedancia es una función no lineal de la carga de los rodapiés, la temperatura, la velocidad

de rotación y el lubricante empleado, y la impedancia varía entre casos distintos.

Propiedades eléctricas de los rodamientos:

Las propiedades eléctricas de los rodamientos son complicados. Estas propiedades no son constantes pues dependen del modo operación y un lote de parámetros no lineales. En este tratado solo los factores más importantes son explicados.

Si una corriente peligrosa fluye a través de los rodajes, esta depende de la amplitud del voltaje inducido y las propiedades eléctricas de los rodamientos. En una baja velocidad rotacional ($n < 100$ rpm) la capa del lubricante dentro del rodamiento es desplazada por la fuerza de rodamiento F , y por tanto existe una conexión galvánica entre los elementos de rodadura y los aro del rodaje (ver fig. 3.13 a). Gracias a esto con pequeños voltajes de rodaje un flujo de corriente es posible. En altas velocidades rotacionales los elementos de rodadura quieren deslizarse sobre la capa del lubricante. Un flujo de corriente es posible solo después de alcanzar el voltaje de ruptura (ver fig. 3.13 b).

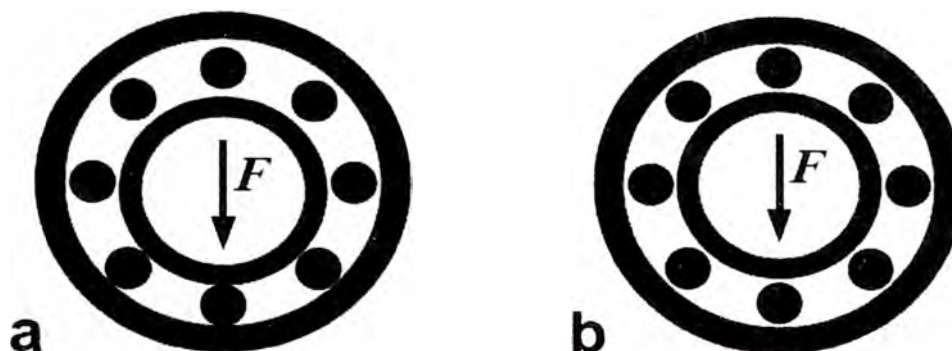


Fig 3.13. Propiedades eléctricas de situaciones en baja y alta velocidad rotacional.

a) El rodamiento a baja velocidad ($n < 100$ rpm); los elementos de rodadura desplazan la grasa a la superficie de contacto; entonces aros internos y externos son galvanicamente conectados vía (uno o más) elementos de rodadura

B: Los rodamientos con alta velocidad ($n \gg 100$ rpm): los elementos de rodaduras son deslizadas sobre una capa de lubricante; la capa de lubricante aísla el aro interno del rodaje del aro externo hasta el voltaje de ruptura es alcanzado.

En el caso de que la corriente fluya a través de los rodamientos, una alta densidad de corriente aparece en los puntos de contacto entre la superficie de los aros y los elementos de rodadura. Esto causa una soldadura de las superficies metálicas, el cual dañan los aros de los rodajes caracterizada por formaciones de cráteres. Esto hace que la fricción aumente y haya poca lubricación, con esto se tiene una falla de rodaje prematura.

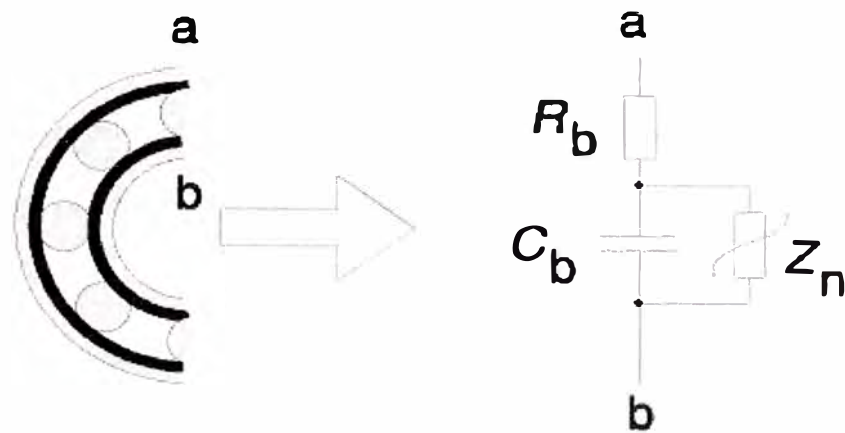


Fig. 3.14. Diagrama de circuito equivalente de un rodaje (una impedancia eléctrica no lineal).

En la teoría todos los rodajes pueden ser descritas como una impedancia no lineal Z_b , como se muestra en la fig. 3.14.

En serie va una resistencia R_b y una capacidad C_b el cual aparece en la capa lubricante. La impedancia no lineal Z_n simboliza las propiedades dieléctricas de la capa lubricante, su resistencia es alta con una intacta capa de lubricante, pero la resistencia disminuye repentinamente, cuando hay disrupción de la capa del lubricante.

3.4 Medidas contra las corrientes de rodajes

Existen tres enfoques para afectar a las corrientes de los rodamientos de alta frecuencia: un sistema de cableado y conexión a tierra correcta; la interrupción de los bucles de corriente de los rodamientos; y una amortiguación de la intensidad de modo común de alta frecuencia.

Todos estos factores contribuyen a reducir los pulsos de alta frecuencia de corriente que pasan a través de los rodamientos a un valor cerca de cero, o que amortiguan el valor de los pulsos a un nivel que no tiene efecto alguno sobre la vida de los rodamientos.

Deben tomarse distintas medidas para cada tipo de corriente de los rodamientos de alta frecuencia.

La base del dominio de las corrientes de los rodamientos de alta frecuencia radica en un sistema de cableado correcto. Las prácticas de conexión a tierra estándar para los equipos se han diseñado principalmente para proporcionar una conexión de impedancia lo suficientemente baja para proteger al personal y al equipo contra fallos de la frecuencia del sistema. Un convertidor de frecuencia puede conectarse a tierra eficazmente en las frecuencias elevadas de intensidad de modo común si la instalación sigue tres prácticas:

3.4.1 Cables simétricos

Se debe emplear solamente, para la conexión entre convertidor y motor cables simétricos multipolares. La disposición del conector a tierra (protección a tierra, PE) en el cable a motor tiene que ser simétrica para evitar las corrientes a frecuencia fundamental. La simetría del conductor PE se logra con un conductor alrededor de todas las conexiones de fase de un cable que contiene una disposición simétrica de tres conexiones de fase y tres conductores de tierra.

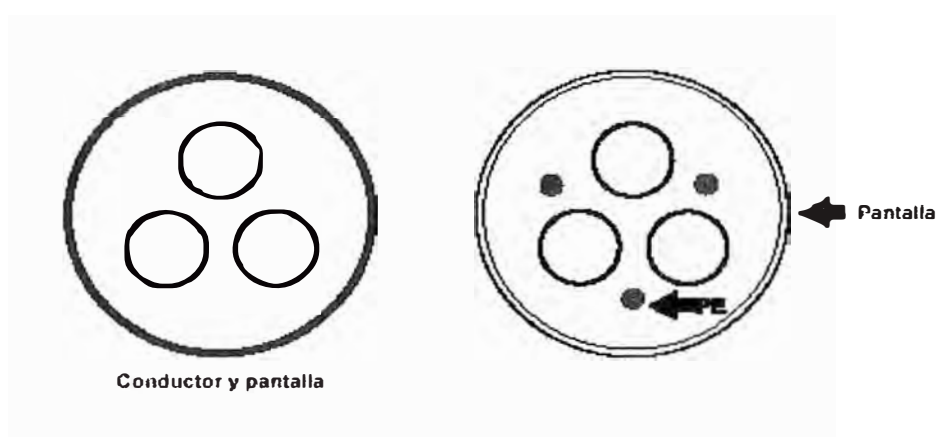


Fig. 3.15 Cable de motor recomendado con configuración de núcleos simétrica.

3.4.2 Cable apantallado.

Definir una ruta de impedancia corta y baja para que la intensidad de modo común vuelva al convertidor. El mejor modo, y el más sencillo, es emplear cables a motor apantallados. El apantallamiento debe ser continuo y de un buen material conductor, como cobre o aluminio, y las conexiones en ambos extremos tienen que efectuarse con una terminación de 360°.

Las figuras inferiores muestran terminaciones de 360° para prácticas de cableado europeas y americanas.

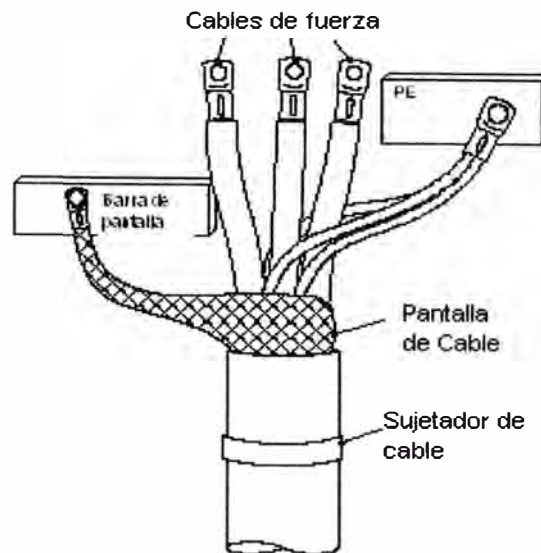


Fig. 3.16 Terminación de 360° correcta para práctica de cableado europea. El apantallamiento se conecta con un cable flexible lo más corto posible al terminal PE. Para efectuar una conexión de 360° de alta frecuencia entre el manguito EMC y el apantallamiento del cable, el aislamiento exterior del cable se retira.

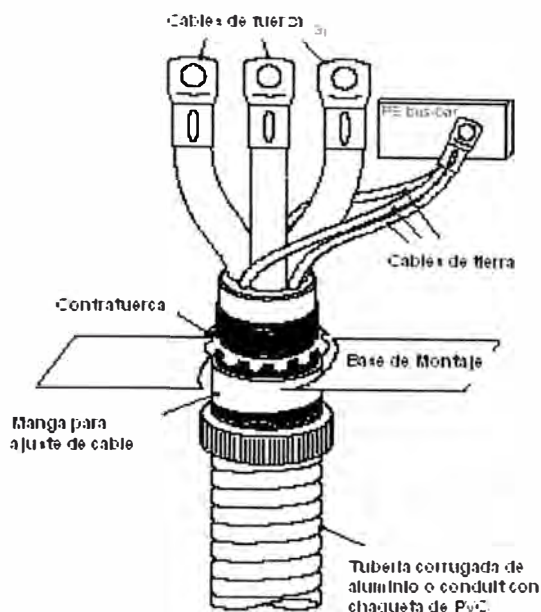


Fig. 3.17 Terminación de 360° correcta para práctica de cableado americana. Debería emplearse un pasa tapas aislado de conexión a tierra en ambos extremos del cable a motor para conectar eficazmente los cables de tierra a la armadura o conducto.

3.4.3 Conexiones de unión de alta frecuencia.

Añada conexiones de unión de alta frecuencia entre la instalación y los puntos de referencia de tierra conocidos para igualar el potencial de los elementos afectados, empleando cintas trenzadas de cobre de 50 - 100 mm de anchura; los conductores planos proporcionarán una ruta de inductancia menor que los cables redondos. Ello debe realizarse en los puntos en los que se sospecha que existe una discontinuidad entre el nivel de tierra del convertidor y el del motor. Además, es posible que sea necesario igualar el potencial entre los chasis y del motor y de la maquinaria accionada para puentear la ruta de corriente a través de los rodamientos de la máquina accionada y del motor.

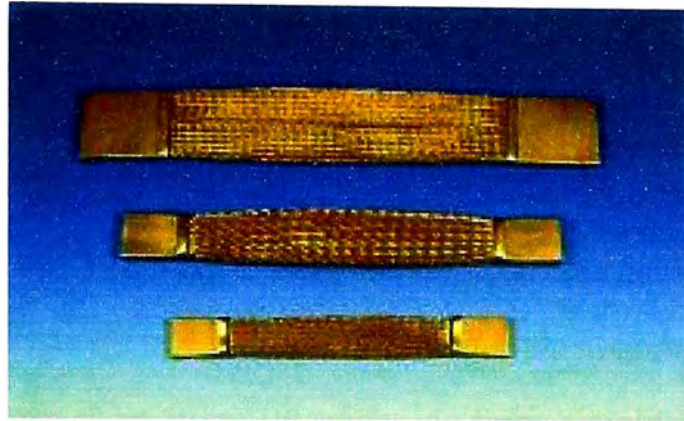


Fig 3.18 Cinta de unión de alta frecuencia

Soluciones adicionales: La interrupción de los bucles de corriente de los rodamientos se logra aislando la construcción de los rodamientos. La intensidad de modo común de alta frecuencia puede amortiguarse empleando filtros dedicados.

Además otra de las soluciones es tener a un mismo potencia estator, eje y accionamiento .Para esto se debe aterrizar con un cable que nos de la menor resistencia.

3.5 Medición de las corrientes de alta frecuencia en los rodajes

La monitorización del estado de los rodamientos debe llevarse a cabo con mediciones de vibración establecidas.

Es imposible medir las corrientes de los rodamientos directamente desde un motor estándar. Sin embargo, si se sospecha que existen corrientes de los rodamientos de alta frecuencia, pueden tomarse mediciones de campo para verificar la existencia de bucles de corriente que se sospecha que existen. El equipo de medición debe tener un ancho de banda amplio (mínimo 10kHz a 2 MHz) capaz de detectar valores de cresta de al menos 150 a 200A y valores RMS de por lo menos 10mA. El factor de cresta de las señales medidas no suele ser menor a 20. La corriente puede circular en lugares poco usuales, como los ejes en giro. Por ello, se requieren equipos y personal con experiencia. Se debe emplear un sensor flexible de corriente especialmente diseñado con núcleo de aire de tipo Rogowski con accesorios dedicados .

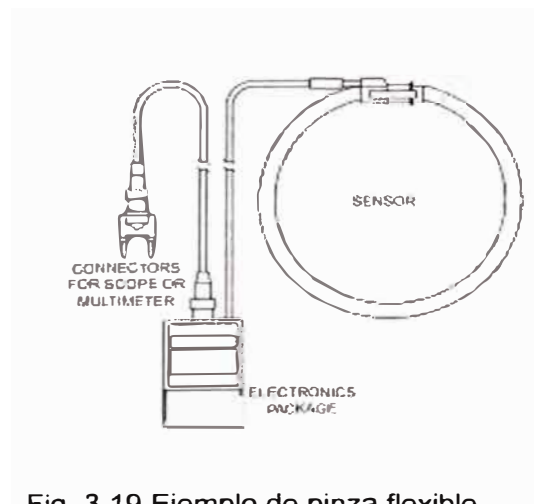


Fig. 3.19 Ejemplo de pinza flexible

Los puntos de medición más importantes están dentro del motor. Durante las mediciones, la velocidad del motor tiene que estar al menos a un 10% del valor nominal para que los rodamientos se levanten por encima de la película de aceite.

Como ejemplo, las mediciones básicas se muestran en la figura 3.20:

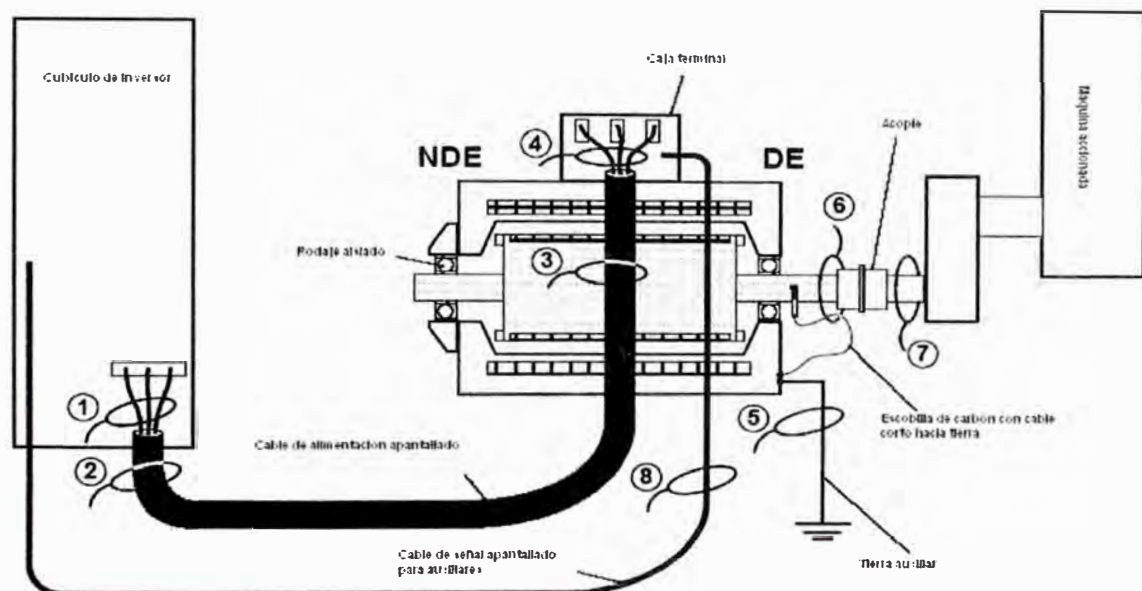


Fig. 3.20. Puntos donde se deben realizar las medidas

La figura inferior muestra ejemplos de ondas de tensión de corriente medidas. Los inversores GTO se emplearon principalmente en los años 80 y en la actualidad se emplean los inversores IGBT. Observe las diferencias en la escala en los gráficos del fig.3.21.

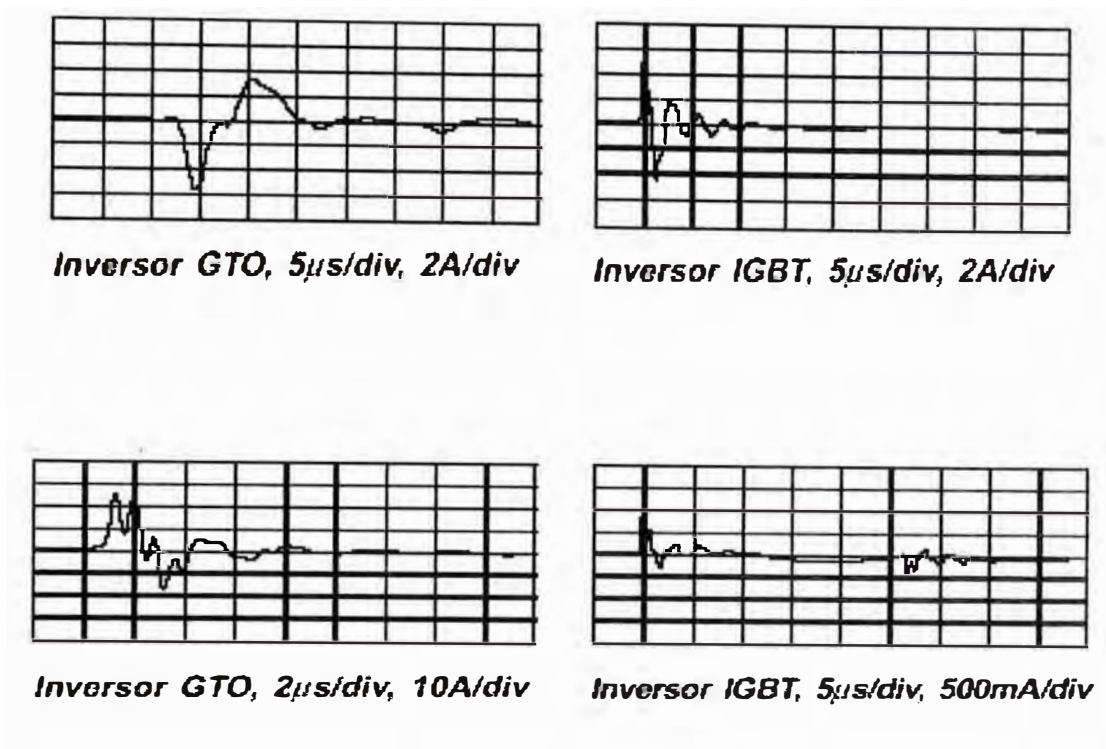


Fig. 3.21 Corrientes de circulación

3.6 Caso real prensa de rodillos

3.6.1 Introducción

La selección de equipos para la Ampliación de la Planta de Cementos Lima S. A. consideró el empleo de un nuevo método de molienda, mediante el empleo prensas de rodillos en vez de los molinos de bolas convencionales. Las prensas realizan la trituración por compresión, produciendo cizallamiento a través de los planos cristalinos del material, proceso totalmente diferente al de la molienda convencional, que realiza dicho trabajo por impacto y fricción, por lo que se genera un calentamiento adicional del producto. Además, la molienda convencional (con bolas) consume energía adicional para el

levantamiento de las bolas en el interior del molino y por la fricción de los elementos moledores entre sí, presentando también roturas de bolas y blindajes.

La principal ventaja de estos equipos, de nueva tecnología, está en el eficiente empleo de la energía utilizada para el proceso de molienda. Ello se traduce en un menor consumo de energía eléctrica del sistema de molienda (prensa y auxiliares). Se alcanza una reducción de alrededor de 35% (33% para crudo y 37% para cemento), respecto del sistema de molienda convencional (molino de bolas y auxiliares). Además del consecuente beneficio que ello representa, tanto en los aspectos económico, ecológico, como en el relativo a un mejor aprovechamiento de los recursos de los que dispone el país, favoreciendo la ampliación de la frontera eléctrica

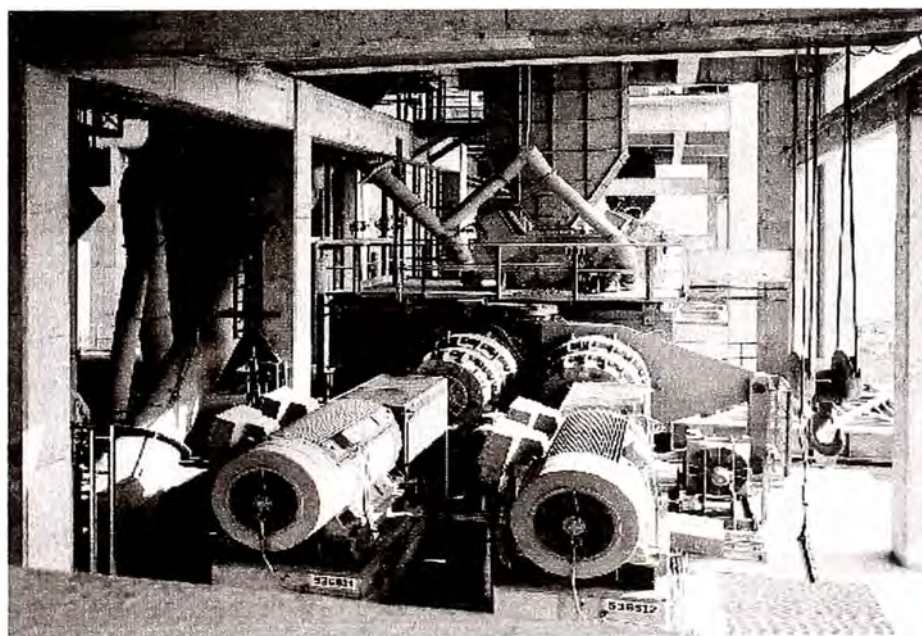


Fig. 3.22 Vista de prensas de rodillos

Como parte de los equipos considerados en la Primera Etapa de la Ampliación se adquirió tres (3) de estos equipos de las mismas características. Dos (2) prensas se destinaron para la molienda de clinker, las mismas que se podían utilizar para producir cemento (producto final) o harina de clinker (producto intermedio que requiere una molienda posterior para transformarlo en cemento), y una (1) para la molienda de caliza, es decir para la producción de harina cruda (o crudo) con que se alimenta el horno.

Posteriormente, para la Segunda Etapa de Ampliación, se adquirió otras tres (3) prensas más. En esta ocasión se destinaron dos (2) a la producción de crudo y una (1) a la molienda de clinker. Así, Cementos Lima posee al momento un total de seis (6) prensas de rodillos similares, empleándose tres (3) para la molienda de caliza y otras tantas, para la producción de cemento.

3.6.2 Corriente de alta frecuencia en prensas de rodillos

En Junio 2000 se detectó problemas de vibración en el reductor del rodillo fijo de la Prensa de Clinker 1.

En septiembre de! 2000 Krupp Polysius decidió reemplazar los rodajes cilíndricos del reductor con lo cual las medidas de vibración retornaron a sus valores normales.

Krupp Polysius decidió analizar los rodajes cambiados para encontrar la causa de los problemas. Del análisis se encontró algunas estrías en el aro externo del rodaje. Este rodaje pertenecía al lado que está mas cerca al motor.

Para un mejor análisis Krupp Polysius envió este rodaje al **Institut für technische schadenforschung – Alemania** el cual presentó un informe con fecha 5 de Febrero del 2001 en el cual se decía que en el rodaje hay pequeños cráteres de fusión y concluía que esos cráteres eran debido a corrientes parásitas que atravesaban el rodaje.

Krupp culpó a los convertidores de Siemens como la causa de estas corrientes y por consiguiente del daño a los rodajes.

En enero del 2002 se detectó problemas de vibración en el reductor del rodillo fijo la Prensa de Clinker 1 nuevamente debido a esto se revisó todas las prensas encontrándose problemas similares en las prensas de Crudo.

Debido a esto se decidió poner carbones en los ejes de las prensas para evitar que las corrientes parásitas generadas en el motor pasaran al reductor.

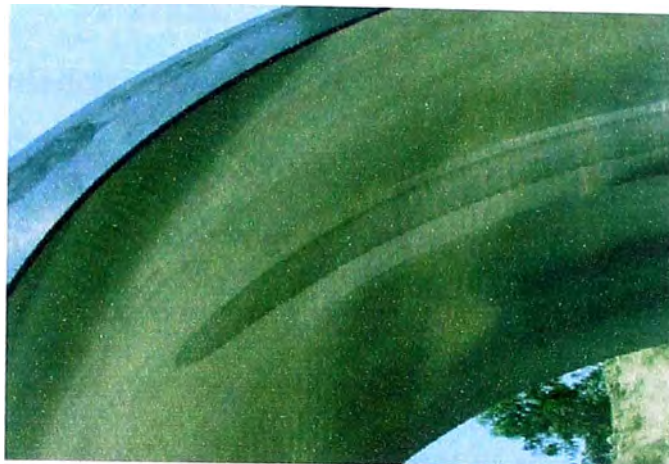


Fig 3.23 Aro exterior de rodaje dañado



Fig 3.24 Aro exterior de rodaje dañado

3.6.3 Soluciones

En el mes de marzo del 2002 se hizo pruebas en la Prensa de Rodillos de Crudo 2. Aquí se encontró que las corrientes parásitas se debían a un mal aterramiento del sistema pues este contaba en la actualidad con cables de 35 mm² con 7 conductores entre prensa, reductor y motor además cable de 70mm² con 9 conductores de variador hacia tierra.

Al ser las corrientes parásitas, corrientes de alta frecuencia debido al switching de los variadores Siemens, que cuentan con IGBT (12-15 kHz) el aislamiento de los rodajes no es resistivo puro sino un circuito RC.

El método de los carbones era bueno en caso de que el aterramiento del motor sea mejor que la del reductor.

Se realizaron mediciones la corriente que pasa por el eje del motor (Prensa de Crudo 2) y se encontró que con el original sistema de aterramiento las corrientes alcanzaban 46 A pico pico y 35 A rms siendo los picos los que causan las marcas en los rodajes.

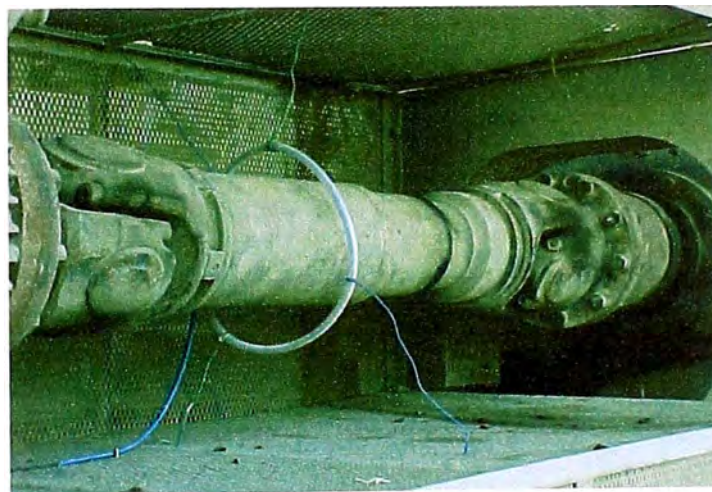


Fig.3.25 Medición de corrientes en eje de la prensa

Inicialmente se encontró la siguiente forma de onda con 45 A pico a pico y 35 A rms.

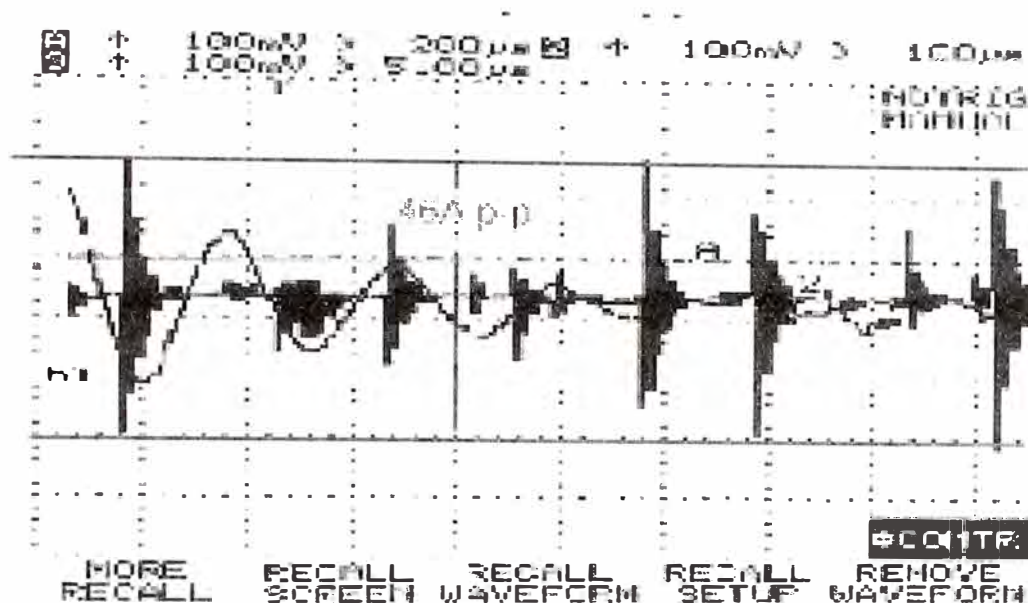


Fig.3.26 Formas de onda de la corriente del eje. Se ve que las corrientes llegan a 46 A p-p y 36 A rms, cada pico de corriente deja una marca en el rodaje

Se hicieron varias pruebas resultando que: uniendo el motor con el convertidor con dos cables de 70 mm² extraflexible (cable de soldar) uniendo la tierra al variador con dos cables extraflexibles de 70mm² y uniendo prensa con reductor con solo cable y reductor con motor con un solo cable se redujo los valores a 0.6 A pico y 0.4 A rms. En la fig.3.27 se muestra los cables a tierra del variador y en la fig. 3.28 la forma de onda tomada con osciloscopio después del aterramiento.

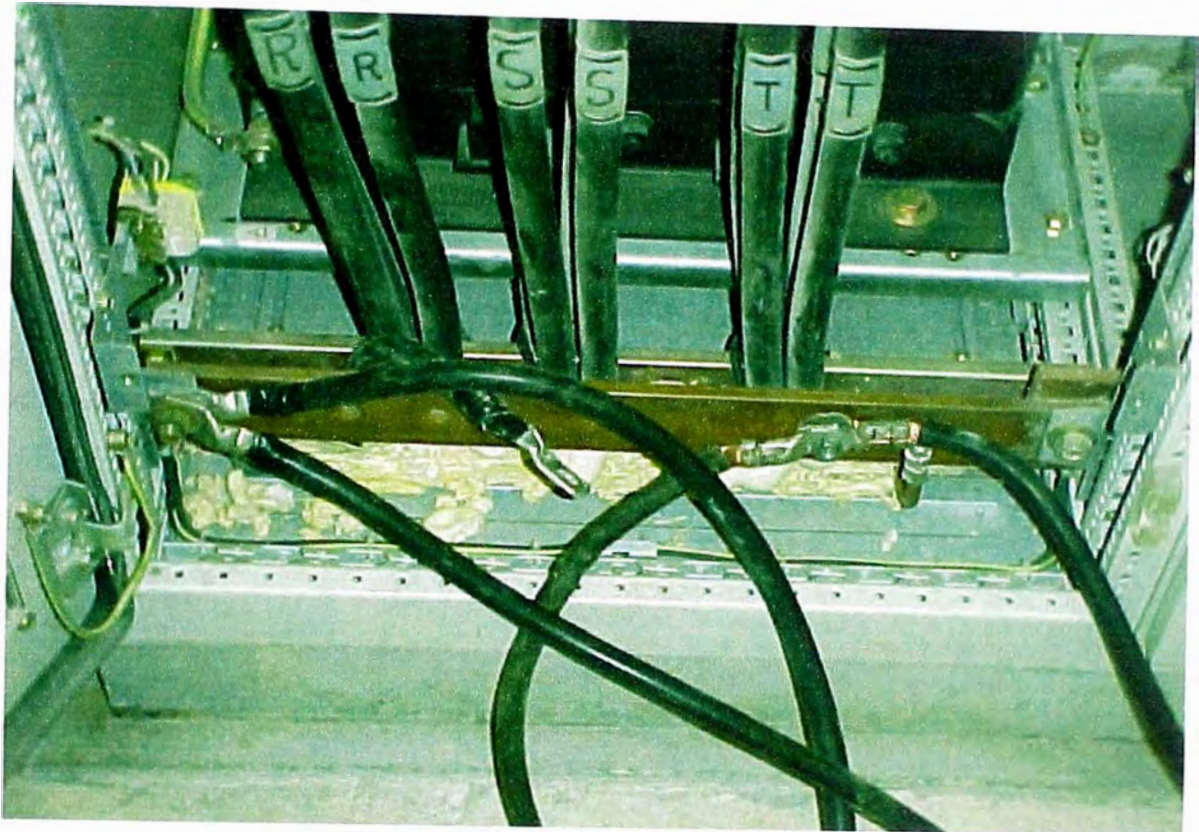
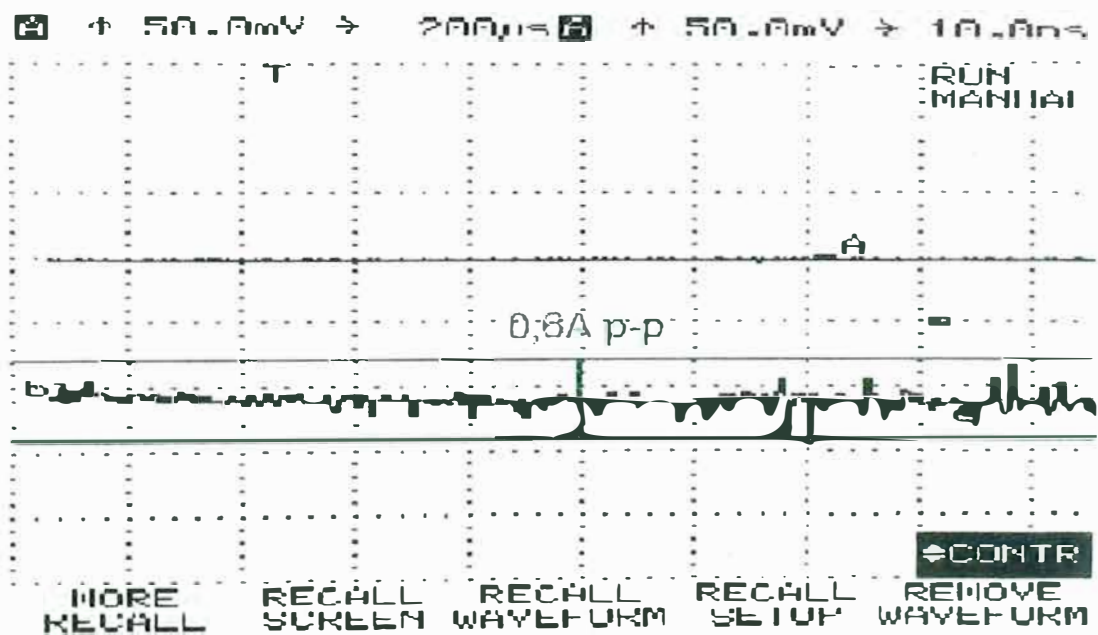


Fig. 3.27 Cables a tierra desde la tierra del variador



Shaft current 0,6A peak-peak, 0,4A rms

Fig. 3.28 Corriente en el eje después del aterramiento

Después de realizar el cableado al medir las corrientes en el eje se encontró la curva siguiente con 0.6 A pico a pico.

Con esta solución se procedió a realizar el aterramiento a las demás prensas

En la figura 3.29 se muestra la distribución del aterramiento recomendada por Siemens.

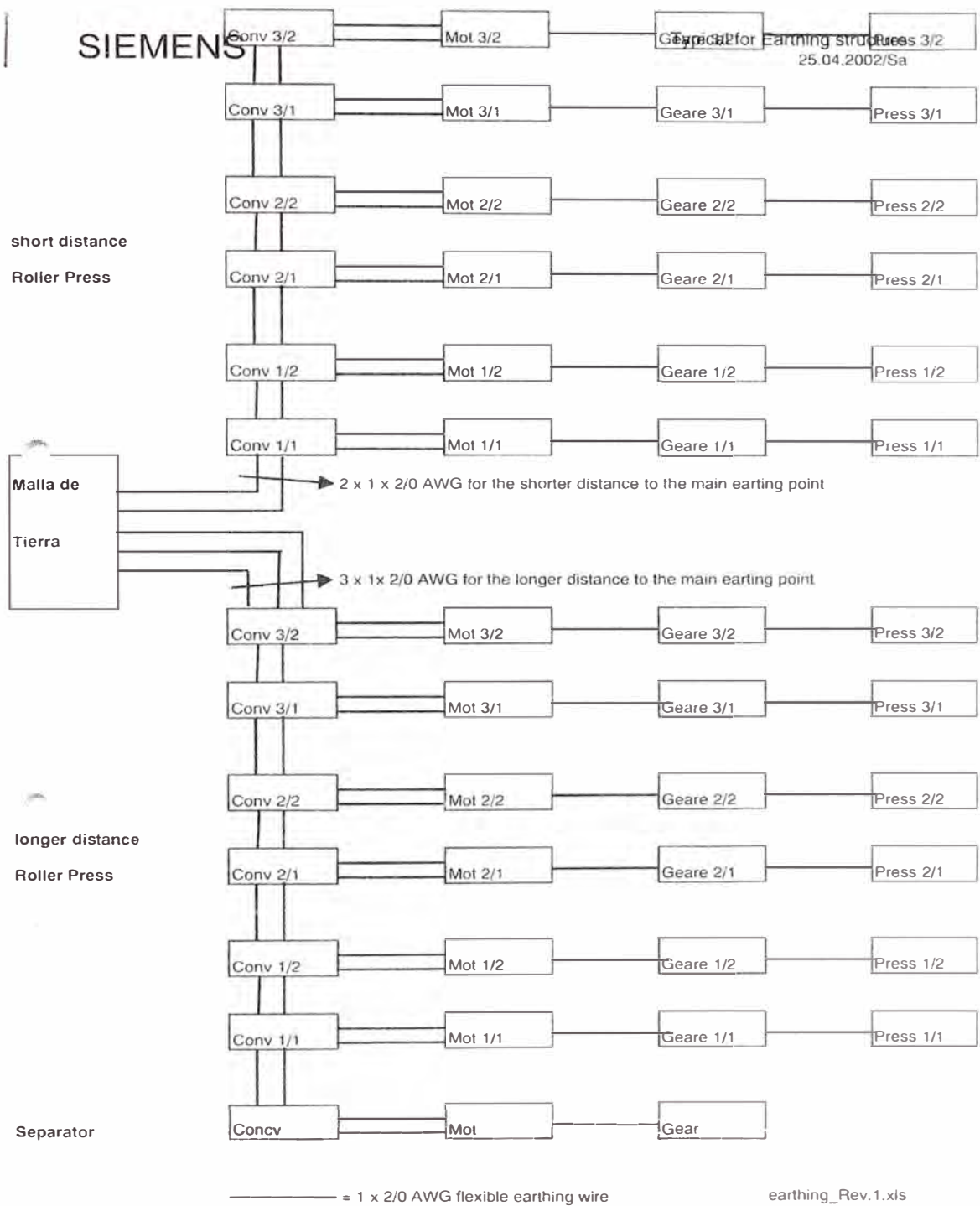


Fig. 3.29 Aterramiento recomendado por siemens para evitar corrientes de rodamientos

CAPÍTULO IV

EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA

4.1 Introducción

El ruido electromagnético de interferencia EMI esta definido como una señal eléctrica no deseada que produce efectos indeseables en un sistema de control, como los errores de comunicación, degradación del desempeño del equipo y funcionamiento defectuoso o poca operación.

Todos las unidades AC PWM tienen el potencial de causar EMI al adyacente equipo sensitivo, cuando grandes cantidades de unidades son ensambladas en una área concentrada de (6-10).

Sin embargo, las velocidades más rápidas de alternación de topologías nuevas del convertidor requieren un estudio actualizado de los nuevos problemas que EMI producen.

El EMI se transmite básicamente mediante dos mecanismos:

- Interferencias Electromagnéticas conducidas a través de la red como por ejemplo las corriente armónicas
- Interferencias Electromagnéticas radiadas, que influyen por ejemplo en equipos de comunicaciones

Cuando un equipo electrónico funciona dentro de un entorno electromagnético sin problemas y este tampoco interfiere con otro sistema o producto próximo (es decir no produce EMI) se dice que este equipo tiene compatibilidad electromagnética EMC.

4.2 Compatibilidad electromagnética EMC

La compatibilidad electromagnética EMC se define como "la capacidad de un aparato de trabajar correctamente en un medio ambiente electromagnético, sin causar a su vez perturbaciones electromagnéticas inadmisibles para otros aparatos, que se encuentren en el mismo medio".

En principio esto se refiere a que los aparatos no deben perturbarse mutuamente.

Dado que los convertidores de velocidad variable se describen como una fuente de interferencia, es natural que todas las piezas que estén en conexión eléctrica o aérea dentro del sistema de potencia formen parte del cumplimiento de la EMC.

Si entre dos equipos no hay compatibilidad electromagnética se puede reducir la emisión de interferencias del emisor o elevar la inmunidad del receptor. Los emisores son por lo general aparatos de la electrónica de potencia con una alta toma de corriente. Para reducir su emisión de interferencias es necesario colocar filtros complicados y costosos. Los receptores son sobre todo aparatos de mando y sensores incluyendo sus circuitos de evaluación. Es menos complicado elevar la resistencia a interferencias en aparatos de baja potencia. Por eso en aplicaciones

industriales resulta más económico elevar la inmunidad frente a las interferencias que reducir la emisión de ellas.

4.3 El convertidor de frecuencia como fuente de EMI.

Como lo hemos visto en capítulos anteriores los convertidores de frecuencia actuales emiten tensiones de modo común y corrientes de modo común. Estas pueden interferir al desviarse de su ruta correcta a otros equipos cercanos a la instalación.

En convertidores de gran potencia el manejo de grandes corrientes produce inducciones en otros sistemas. Además la corriente a la entrada del convertidor contiene armónicas, que ingresan a la red eléctrica.

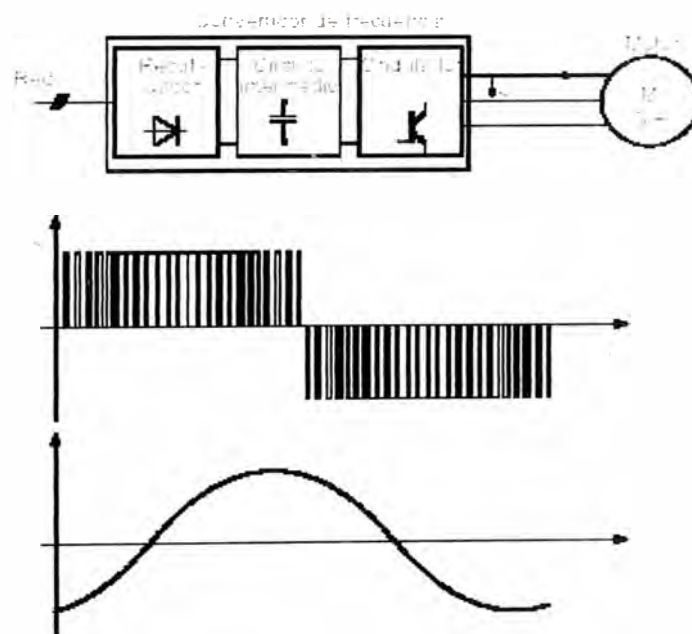


Fig 4.1 Circuito y formas de onda de un convertidor

Los convertidores tienen que ser montados en un **armario eléctrico** cerrado, para así también limitar la irradiación de radio interferencias. La radiación de radio interferencias las determina sobre todo la parte de control con su

microprocesador. Es comparable con la emisión de interferencias de un ordenador. Si en los alrededores inmediatos de los convertidores no se encuentra ninguna estación de radiodifusión, se puede prescindir de un armario inmune a las interferencias HF (alta frecuencia).

4.4 El convertidor de frecuencia como receptor de interferencias

Las interferencias pueden entrar en un equipo en forma galvánica, inductiva o capacitiva.

La figura 4.2 muestra una fuente de interferencias que a través de un acoplamiento capacitivo origina una corriente parásita I_s en el equipo. La magnitud de la capacitancia de acoplamiento C_k está determinada por el cableado y por el montaje mecánico.

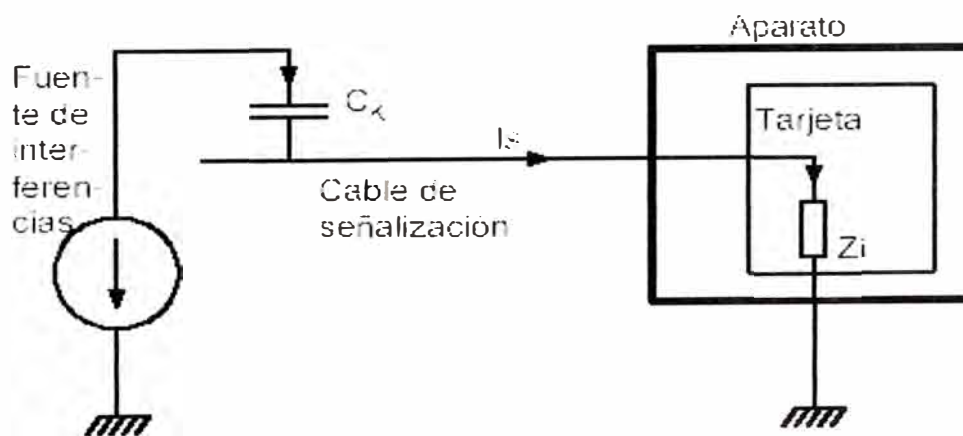


Fig.4.2 Acoplamiento capacitivo con cable de señalización sin pantalla

La corriente parásita I_s genera en la impedancia Z_i una caída de tensión.

Si la corriente parásita fluye a través de una tarjeta con componentes electrónicos rápidos (p.ej. microprocesadores), ya un pico de impulso de un margen de ms con una amplitud de pocos voltios puede producir perturbaciones.

La medida más efectiva para evitar acoplamientos es mantener siempre separados los cables de potencia de los cables de señalización.

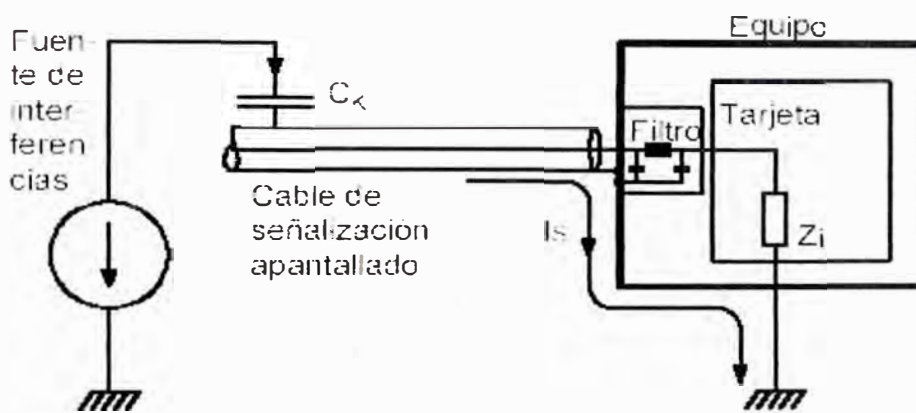


Fig.4.3 Elevación de la resistencia a interferencias mediante el apantallamiento del cable de señalización

Las entradas y salidas de la parte de control de algunos convertidores están equipadas con filtros que protegen la electrónica contra corrientes parásitas I_s . Los filtros alisan a la vez la señal útil.

En el caso de conductores de señalización con señales útiles de alta frecuencia, p.ej. taco digital, este alisamiento se vuelve indeseable.

Ya que debido a la funcionalidad, en este caso, no se debe aplicar un alisamiento, hay entonces que colocar cables de señalización con pantalla. La corriente parásita regresa así a la fuente a través de la pantalla y de la carcasa.

Se tiene que apantallar ambos extremos de los cables digitales de señalización es decir, conectar la pantalla al emisor y al receptor como se muestra en la fig. 4.3.

En los cables analógicos de señalización se pueden producir perturbaciones de baja frecuencia al apantallarlos en ambas terminales (bucles de zumbidos).

En este caso hay que conectar la pantalla solamente a la parte del convertidor. El otro extremo de la pantalla se debe poner a tierra por medio de un condensador (p.ej. 10 nF/100 V). Así (para señales de alta frecuencia) la pantalla se encuentra puesta a tierra en ambos extremos a través del condensador.

4.5 Soluciones para controlar emi

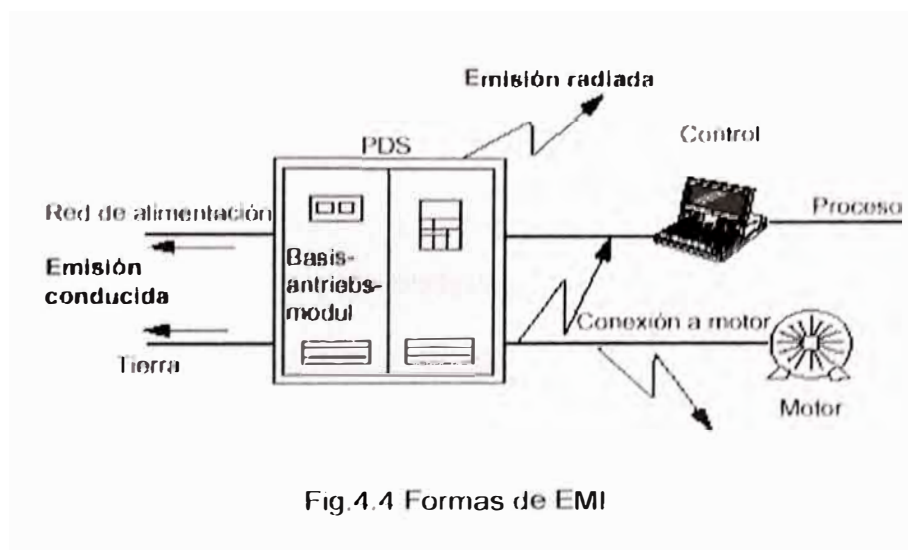
Las soluciones empleadas para lograr la inmunidad y los requisitos de emisiones radiadas y conducidas se describen en este capítulo.

Existen algunos principios básicos que deben respetarse al diseñar y emplear sistemas de accionamiento que incorporen productos de accionamiento de CA. Estos mismos principios se emplearon cuando estos productos se diseñaron y construyeron, momento en el que se dio gran consideración a aspectos como la estructura de la tarjeta de circuitos impresa, el diseño mecánico, el recorrido de los cables, las entradas de cable y otros puntos especiales.

Los productos de accionamiento son normalmente inmunes a la mayoría de perturbaciones, o se verían afectados por sus propias perturbaciones. En este contexto, sólo deben tratarse las emisiones.

4.5.1 Solución a emisiones

Las emisiones pueden dividirse en dos partes, la emisión conducida y la radiada. Las perturbaciones pueden emitirse de varios modos como muestra la figura 4.4:



4.5.2. Emisión conducida

Las perturbaciones conducidas pueden propagarse a otros equipos a través de todas las partes conductoras incluyendo el cableado, la conexión a tierra y el bastidor de metal de la protección.

Las emisiones conductoras pueden reducirse así:

- Mediante filtrado RFI para perturbaciones de alta frecuencia

- Empleando supresores de chispa en relés, contactores, válvulas, etc. para atenuar las chispas de conmutación
- Con anillos de ferrita en los puntos de conexión de potencia

4.5.3 Emisiones irradiadas

Para poder evitar las perturbaciones a través del aire, todas las piezas del Sistema de accionamiento de potencia deberían formar una **jaula de Faraday** contra las emisiones radiadas, como se muestra en las figuras 4.5 y 4.6. Algunos métodos para garantizar la continuidad de la jaula de Faraday son los siguientes:

Protección:

- La protección debe tener un acabado de superficie sin pintar y no corrosivo en cada punto en el que contacten otros paneles, puertas, etc.
- Deben emplearse siempre contactos entre metal con juntas conductoras en los casos en los que sea apropiado.
- Emplee paneles de instalación sin pintar, unidos a un punto de tierra común, asegurándose de que todos los elementos de metal separados estén unidos firmemente para disponer de un solo camino a tierra.

- Emplee juntas conductoras en las puertas y las cubiertas. Las cubiertas deberían fijarse a intervalos no superiores a 100 m en los puntos en los que pueda escapar la radiación.
- Separe la etapa radiativa, es decir, "sucia" de la "parte limpia" mediante cubiertas de metal y diseño.
- Deberían minimizarse los orificios en la protección.
- Emplee materiales con una buena atenuación, por ejemplo plástico con una capa conductora si no se puede emplear una protección de metal.

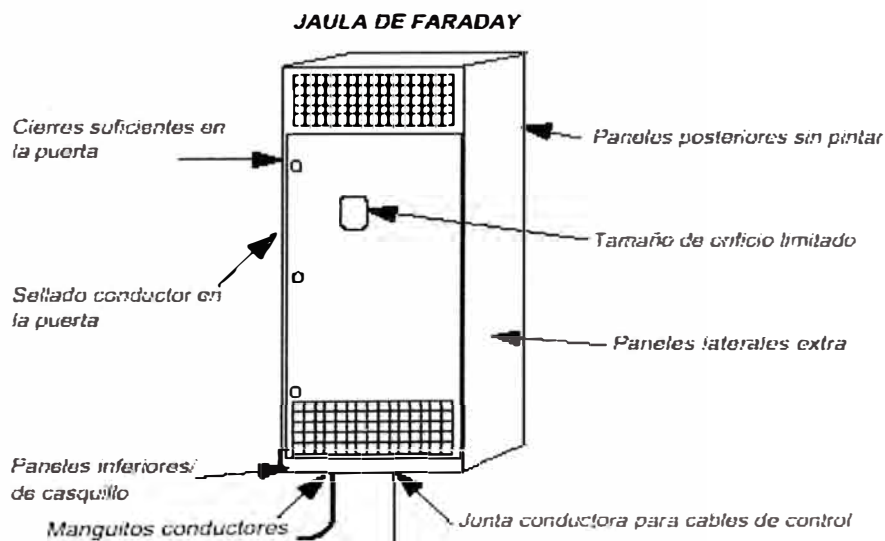


Fig. 4.5 Gabinete típico para convertidor

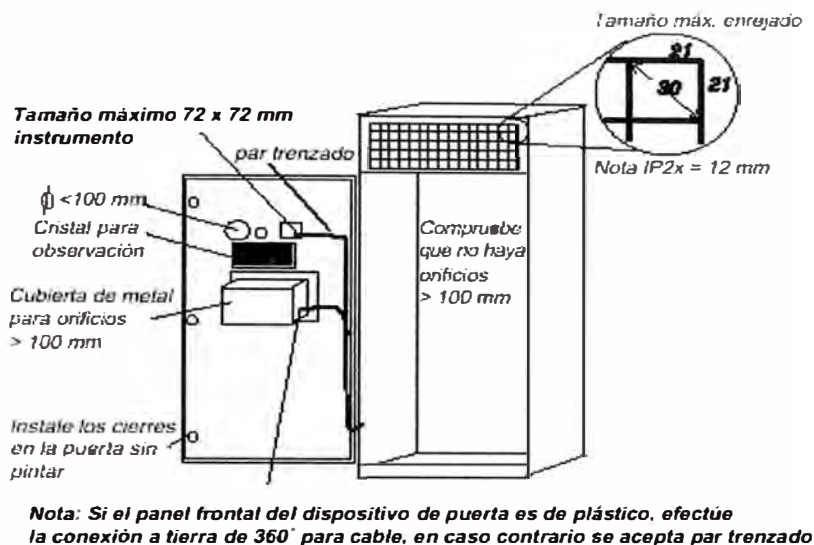


Fig.4.6 Vista interna de un gabinete interno

Cableado e hilos:

Las recomendaciones se muestran en la fig. 4.7, 4.8.

- Emplee entradas de cable de AF especiales para la conexión a tierra de alta frecuencia de los apantallamientos de cables de alimentación.
- Emplee juntas conductoras para conexión a tierra de AF del apantallamiento del cable de control.
- Emplee cables de control y alimentación apantallados. Véanse los manuales específicos para el producto.

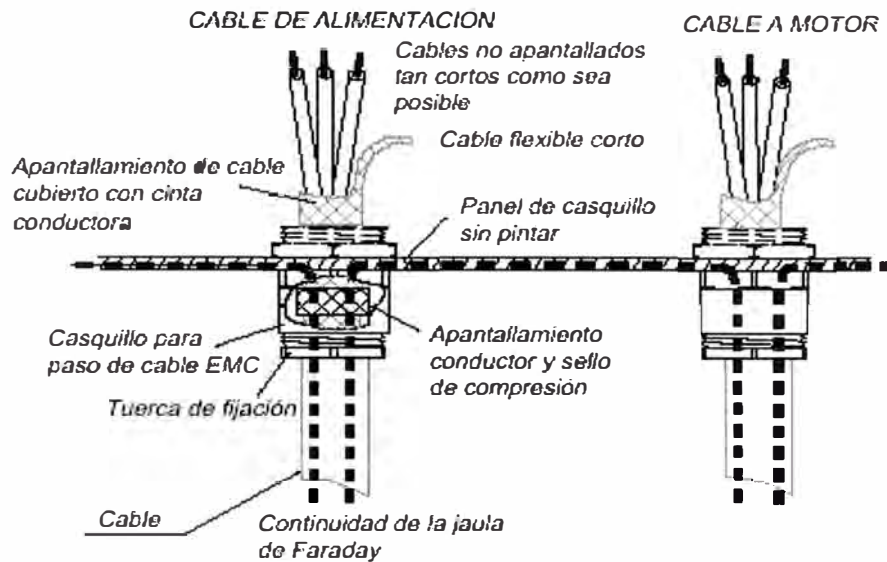


Fig.4.7 Forma de conexionado de cables

- Disponga los cables de control y alimentación por separado, fig. 4.9.
- Emplee pares apantallados para evitar las perturbaciones de modo común.

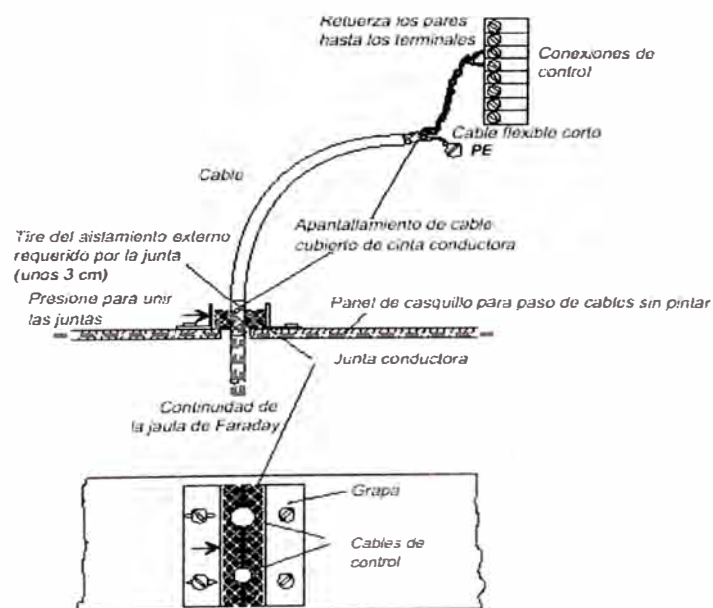


Fig. 4.8 Conexionado cable de control

- Emplee anillos de ferrita para las perturbaciones de modo común, si es necesario.
- Seleccione y coloque los cables internos de forma correcta.

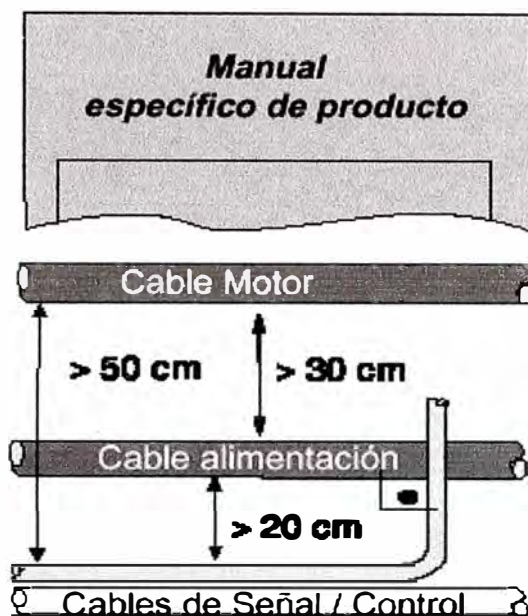


Fig. 4.9 Instalación de cables de control

Instalación:

- Los elementos auxiliares empleados con un convertidor deberían tener compatibilidad electromagnética para las Directivas EMC
- Selección e instalación de accesorios de conformidad con las instrucciones del fabricante.
- Conexión a tierra de 360° en el extremo del motor. Véanse los manuales específicos del producto.
- Métodos de cableado interno correctos.
- Debe prestarse una atención especial a la conexión a tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Msc. Ing. Rodolfo Moreno Martínez. Copias y apuntes de clase 2003.
- [2] José María Ascarraga. Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna. Mc. Graw Hill 1998.
- [3] Siemens. Bearing Currents. Catalogo Técnico 2000
- [4] ABB. Corriente en cojinetes. Guía Técnica 1999
- [5] G. Skibinski, Jpau, R.Sladky, J. Campbell. Geeration, Control d regulation of EMI from AC drives. IEEE 1997
- [6] Tecsup. Seminario Variadores de frecuencia.2001