

CAPITULO II

FUENTES DE CORRIENTES ARMÓNICOS

Existe un gran número de dispositivos que distorsionan el estado ideal de las redes eléctricas. Algunos de ellos han existido desde la formación de los sistemas de potencia, y otros son producto de la aplicación de dispositivos de electrónica de potencia utilizados para el control moderno de las redes eléctricas.

Los convertidores estáticos de potencia (CEP) presentan la categoría más grande de los dispositivos que producen armónicas en el sistema eléctrico de potencia. Los convertidores oscilan desde enormes subestaciones inversoras de 1000 MW para líneas HVDC (High Voltage DC) hasta rectificadores de 75 W encontrados en una televisión. Otras fuentes no lineales de armónicos incluyen dispositivos de arco tales como hornos de arco, impedancia magnetizante de transformadores y luces fluorescentes.

La corriente armónica ocasionada por las fuentes no lineales pueden ocasionar la distorsión armónica en el voltaje del sistema y problemas para otros dispositivos. El diodo es el elemento básico que describe el proceso de rectificación, las formas de onda de corriente y voltaje resultantes y la generación de armónicas. La característica importante del diodo, es su habilidad para discriminar entre los voltajes de directa e inversa. El diodo ideal es eléctricamente equivalente a un switch selectivo que es cerrado para voltajes en directa y abierto para voltajes en inversa.

Equipos que producen armónicos: convertidores electrónicos de potencia, equipos de computación, control de luminarias, ups, variadores estáticos de velocidad, plc's, control de motores, televisores, microondas, fax, fotocopiadoras, impresoras, etc.

Equipos con arqueo de electricidad: hornos de fundición, balastos electrónicos, equipos de soldadura eléctrica, sistemas de tracción eléctrica.

Equipos ferromagnéticos: transformadores operando cerca del nivel de saturación, balastos magnéticos.

✚ Rectificadores Monofásicos.

En rectificadores se toma la característica no-lineal de un diodo para convertir corriente alterna a corriente unidireccional pero pulsante.

Los rectificadores de media onda y onda completa son usados en equipo doméstico (tv, vcr's, radios, maquinas de coser, taladros, pc's, lámparas etc.)

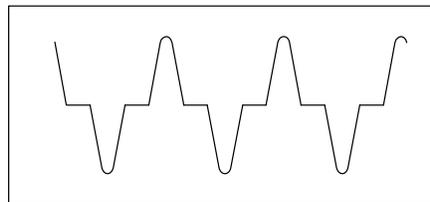


Fig. 2.1 Corriente demandada por los usuarios.

Los rectificadores de onda completa son muy comunes en pequeños equipos electrónicos (TVs, computadoras, stereos, etc). En el rectificador monofásico para corriente DC, los diodos actúan para cortar la mitad negativa de la onda sinusoidal, en el rectificador de onda completa de la figura 2.2, la corriente i_a fluye por los diodos 1 y 2 hacia la carga cuando el voltaje de la fuente está en su medio

ciclo positivo. Cuando se aplica el voltaje en inversa los diodos 3 y 4 conducen la corriente i_b a la carga y los diodos 1 y 2 no conducen (note sin embargo que la corriente a través de la carga esta siempre en la misma dirección).

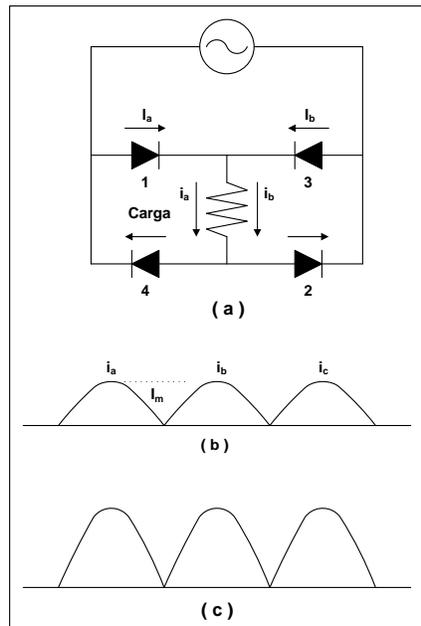


Fig.2.2 Rectificador 1 Φ de Onda Completa: (A) Diagrama del Circuito; (B) Corriente de Carga; (C) Voltaje de Carga.

Rectificador de media onda:

En la operación del rectificador de media onda el diodo experimenta un voltaje de directa cuando el voltaje de la fuente está en su ciclo positivo y conduce corriente a la carga resistiva durante el intervalo de (0° a 180°). Cuando el voltaje de la fuente está en su ciclo negativo de (180° a 360°) el diodo actúa como un switch abierto y no hay circulación de corriente hacia la carga.

En rectificadores de media onda de la figura 2.3, la corriente y el voltaje de carga son senoidales de medio ciclo, y la corriente directa demandada por la carga es aproximadamente el 30% del valor máximo de la corriente pulsante.

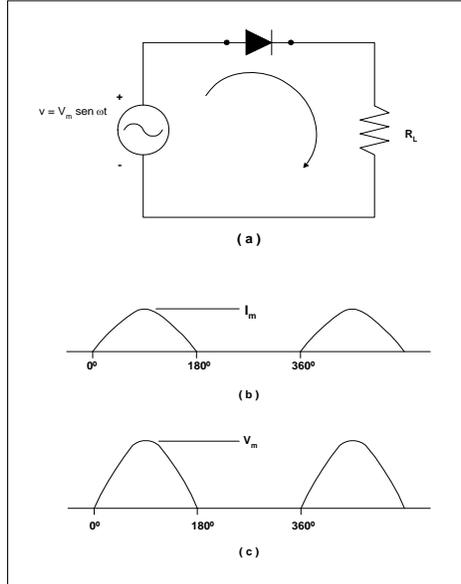


Fig. 2.3. Rectificador 1 Φ de Media Onda: (A) Diagrama del Circuito; (B) Corriente de Carga; (C) Voltaje de Carga

🔌 Convertidores Estáticos de Potencia.

Se considera el efecto de la inductancia del sistema, así como la reducción de las amplitudes de las armónicas de las amplitudes teóricas; también se describe el impacto del uso de los tiristores con la variación del ángulo de encendido para controlar el voltaje de salida del rectificador e inversor.

Efecto de la inductancia en el sistema. En el circuito del rectificador de la fig. 2.4 cuando la inductancia del sistema es incluida, el switcheo de corriente de un diodo a otro (llamado conmutación) no ocurre instantáneamente.

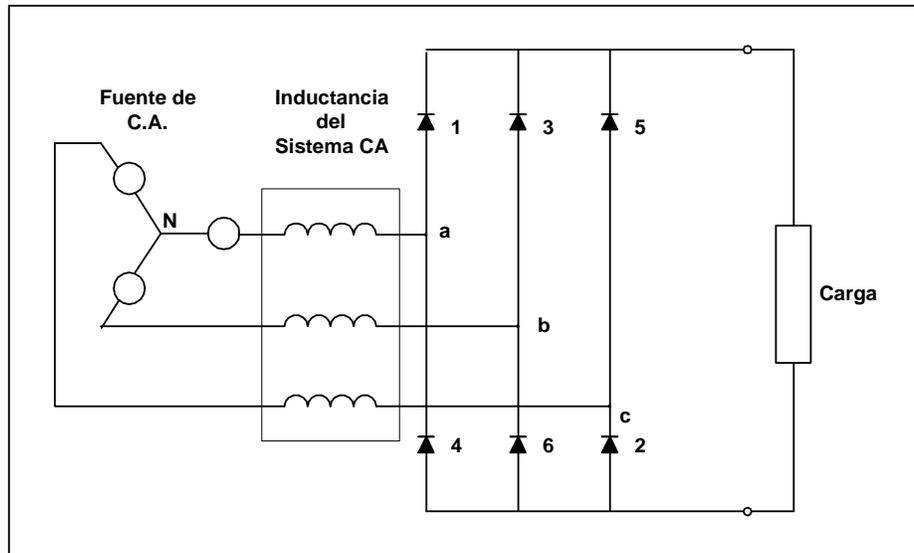


Fig. 2.4. Rectificador trifásico de seis pulsos con la inductancia del sistema de c.a.

Periodo de conmutación: En la fig. 2.4, la conmutación entre diodos es mostrada de manera gradual, en el punto donde el voltaje (línea a neutro) de la fase b empieza a ser más positivo que el voltaje (línea a neutro) de la fase a (indicado por la flecha) la corriente en el diodo 1 (corriente de la fase a) no puede cortar abruptamente sin un excesivo voltaje, $L di/dt$; además, la corriente del diodo 3 (corriente de la fase b) no puede incrementarse instantáneamente. La duración del período en el cual ambos diodos conducen es llamada período de conmutación y es denotado por una medida angular μ (ángulo de traslape).

Durante el período de conmutación hay un corto circuito entre fases (a y b) mientras está el corto circuito, el voltaje en el lado de CD es el promedio de voltaje de las dos fases de conducción. (I de carga = $I_{d1} + I_{d3}$ durante el período de conmutación). En la fig. 2.5, durante el período de conmutación se muestra que el voltaje de salida de C.D. es el promedio de los voltajes de las fases a y b, se nota que el efecto de traslape causa una reducción en el voltaje de C.D. entregado a la

carga, como lo muestran las áreas sombreadas, se nota también que la corriente del diodo 1 decrece y la del diodo 3 se incrementa por cantidades iguales, de manera que la suma de estas corrientes es igual a la corriente de carga (C.D.) durante el período de conmutación.

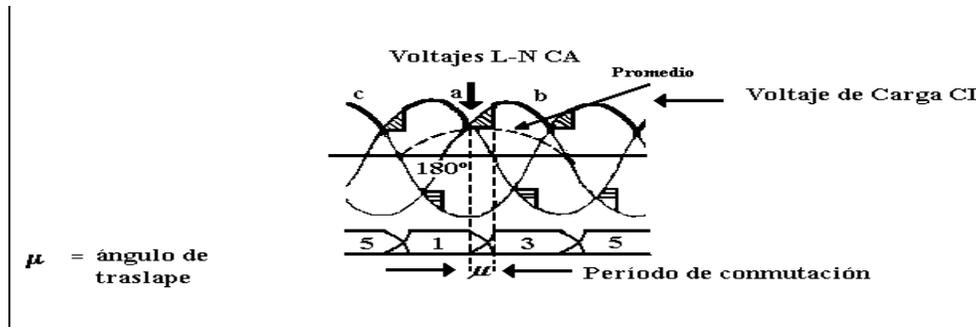


Fig. 2.5 Efecto Del Período De Conmutación En Voltaje De C.D. Aplicado A La Carga.

⚡ Notching o Ranura en la forma de onda de voltaje.

Es un disturbio repetitivo en la forma de onda de voltaje causada por el traslape en la conducción de la electrónica de potencia (rectificadores, inversores y controladores de velocidad).

El efecto de la inductancia del sistema en el lado de C.A. del puente causa un disturbio en los voltajes entre fases conocidas como notching. La fig. 2.6 muestra los notchings que ocurren cuando 2 fases son corto-circuitadas durante el período de conmutación, esto es mostrado por los intervalos de voltajes entre fases igual a cero, un notching es mostrado en V_{ba} para el tiempo que los diodos 1 y 3 conducen; un notching es mostrado en V_{ac} para el tiempo que los diodos 2 y 4 conducen.

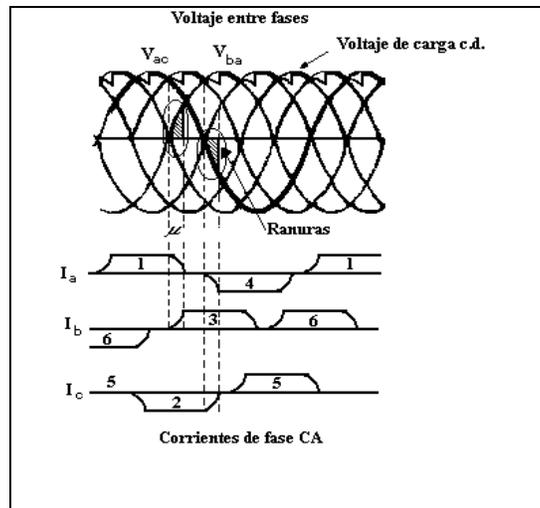


Fig. 2.6 Efecto del período de conmutación en los voltajes entre fases de CA.

El tiempo de conmutación (μs) es el ancho de la ranura o notching, la corriente demandada por cargas de gran capacidad (tales como controladores de velocidad grandes) tiene períodos de conmutación más largos (con inductancia de la fuente constante) y por lo tanto, producen ranuras más anchas. En la fig. 2.6 muestra que las corrientes de alterna por fase consisten de pulsos de corrientes positivos y negativos, separados por intervalos de corriente cero, pero note que los bordes son redondeados por el efecto de la inductancia del sistema.

La probabilidad en la existencia de problemas por Notching depende de:

1. -La robustez del sistema de C.A. (sistemas más robustos son menos afectados)
2. -Capacidad del rectificador estático (rectificadores de gran capacidad es más probable que ocasionen problemas).
3. -Presencia del equipo sensible en el mismo circuito.

✚ Uso de Tiristores

Un tiristor puede ser considerado como un diodo con conducción controlada. Igual que el diodo, el tiristor tiene un ánodo (A) y un cátodo (K), pero posee una tercera terminal, una compuerta o gate (G).

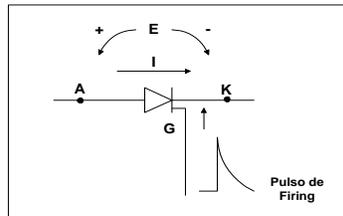


Fig. 2.7 Símbolo del tiristor y pulso de encendido.

Si la compuerta es conectada al cátodo, el tiristor no conducirá aunque el voltaje del ánodo sea positivo con respecto al cátodo. Bajo estas circunstancias se dice que el tiristor está bloqueado. Para iniciar la conducción, se deben cumplir dos condiciones: El tiristor debe estar en directa y un flujo de corriente debe penetrar en el gate durante unos cuantos segundos.

En la práctica, la corriente es inyectada por la aplicación de un corto pulso de voltaje positivo (pulso de encendido) en la compuerta. Tan pronto como se inicia la conducción la compuerta pierde toda la característica de control, parando la conducción sólo cuando la polaridad del voltaje esté en inversa, después la compuerta ejerce nuevamente el control, así el tiristor se comporta de la misma manera que el diodo excepto que el gate permite iniciar la conducción en ciertos tiempos predeterminados. A simple vista, esta característica tiene una insignificante ventaja, sin embargo, tiene una gran importancia ya que la conducción controlada del tiristor permite ajustar el voltaje de salida del rectificador y que la conducción sea iniciada de tal forma que el rectificador se comporte como

un inversor convirtiendo CD a CA. La fig. 2.8. Ilustra el efecto del uso de tiristores en lugar de diodos en el arreglo del puente, si el pulso de encendido al gate de cada tiristor es retardado por el mismo ángulo α , el voltaje de salida resultante es reducido (como se indica con la línea gruesa).

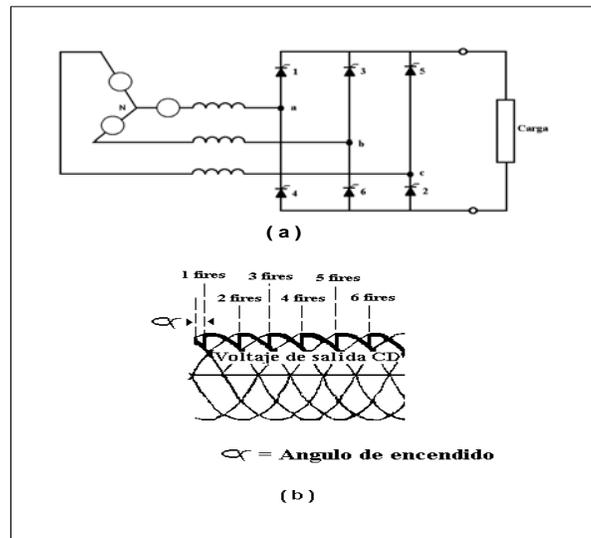


Fig.2.8 Rectificador trifásico de seis pulsos: A) Diagrama del circuito con tiristores; (B) Voltaje entre fases de C.A. mostrando el efecto de retardo del ángulo de encendido en el voltaje de C.D.

⚡ Armónicas en Sistemas de Corriente Alterna

Los convertidores estáticos de potencia inyectan armónicas hacia el sistema de CA, porque ellos demandan corrientes no senoidales (compuestas por una fundamental más componentes armónicas) de la fuente de alimentación CA. En la fig. 2.9 se ilustran las armónicas características generadas por la mayoría de los convertidores estáticos de potencia de hoy.

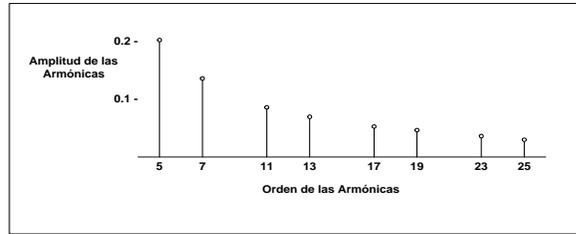


Fig. 2.9 Corrientes de armónicos característicos de un convertidor trifásico de seis pulsos.

Las armónicas características cumplen con la siguiente ecuación general:

$$h = kq \pm 1$$

Donde: h es el orden armónico,

k es un entero

q el número de pulsos

🚧 Curvas del Factor de Reducción.

La cantidad de los componentes armónicos de corriente reducidos puede ser estimada de curvas similares a las de la fig. 2.10 para $\mu = 30^\circ$, estas gráficas dan un factor de reducción en función del ángulo de traslape en la conmutación. Bajo condiciones de plena carga típicas, el ángulo de traslape es de 20° a 25° .

Tomando la 7ª armónica como ejemplo, se obtiene un factor de reducción del 0.75 para un traslape de 20° , por lo tanto, el valor práctico de la amplitud de la 7ª armónica es sólo el 75% del valor teórico de $1/7^{\text{th}}$. La contribución esperada de la corriente de 7ª armónica en un sistema es del 11% de la amplitud de la corriente

fundamental. A mayores grados de ángulo de traslape, las amplitudes de los armónicos dominantes tienden a disminuir, como se ilustra en la fig. 2.11.

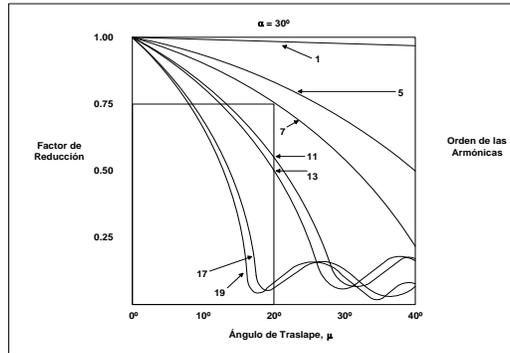


Fig. 2.10 Factores de reducción para una $\alpha = 30^\circ$.

Para $\alpha = 30^\circ$ y $\mu = 20^\circ$, la 7ª tiene un factor de reducción de 0.75, la 5ª un factor aproximado de 0.85.

Las amplitudes de los armónicos son mayores conforme α se aproxima a 90° .

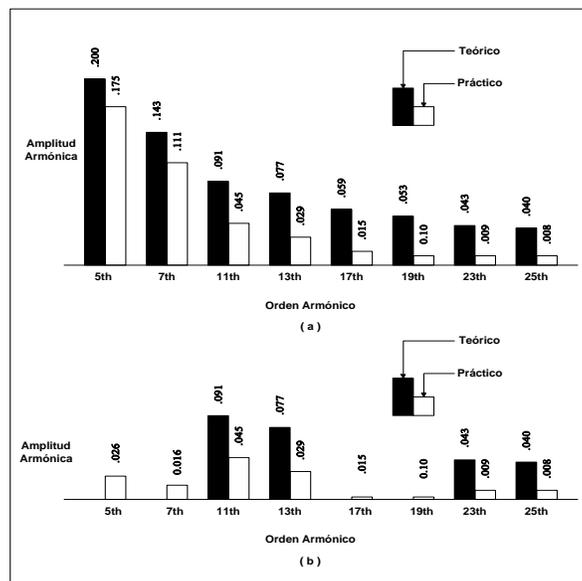


Fig. 2.11 corrientes armónicas teóricas y prácticas generadas por:
(A) Convertidor de 6 pulsos; (B) Convertidor de 12 pulsos.

🚧 Armónicas No Características

Hasta aquí sólo se han considerado las armónicas "características" que se producen bajo las condiciones "ideales" siguientes:

- 1) Pulsos de encendido en el puente igualmente espaciados.
- 2) Reactancia de conmutación balanceada entre fases.
- 3) Voltajes de bus de C.A. perfectamente balanceados.

Cualquier desbalance en el sistema o pulsos de encendido no uniformes originarán armónicas adicionales conocidas como "armónicas no características".

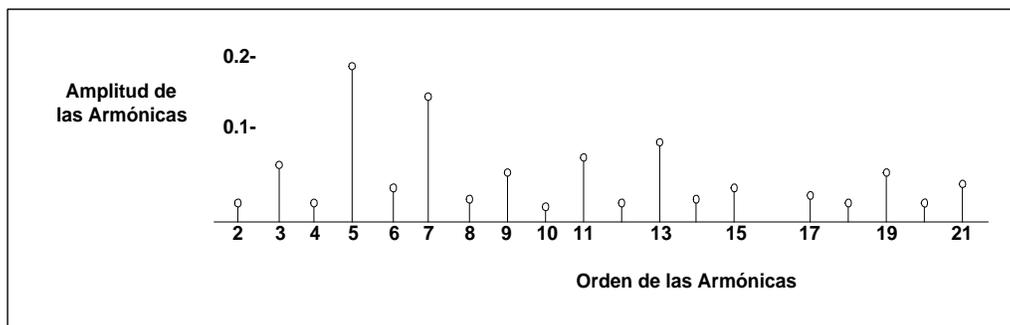


Fig. 2.12. Corrientes Armónicas No Características generadas por un convertidor trifásico de seis pulsos.

🚧 Convertidores de potencia de gran capacidad.

Las fuentes más grandes de armónicas son los convertidores como los utilizados en las industrias electroquímica y electrometalúrgica y controladores de velocidad de motores de gran capacidad usados en una gran variedad de aplicaciones industriales, estos CEP incluyen las estaciones convertidores de transmisión de corriente directa en alta tensión (HVDC), su potencia nominal se especifica en MW y generalmente tiene mucha más inductancia en el lado de C.D. que en el lado de C.A., por lo que la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor

actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de C.D. y como una fuente de corriente armónica en el lado de C.A.; más aún, con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son iguales en todas las fases.

Debido al problema potencial causado por estos equipos, se utilizan conexiones de transformadores con CEP'S multi-pulsos y filtros de armónicas.

Terminales HVDC:

Una aplicación común de los grandes convertidores estáticos de potencia es en los grandes sistemas de transmisión de corriente HVDC.

Por ejemplo, grandes grupos de sistemas utilizados en los E.U. y Canadá son conectados en HVDC para hacer más fácil la operación de todos los sistemas en sincronismos. En algunos casos la instalación del HVDC podría estar “espalda con espalda” con distancia pequeña o no, entre el rectificador y el inversor, ambos son convertidores de 6 o 12 pulsos.

La fig. 2.13, muestra un sistema de HVDC con dos CEP'S operados por tiristores, uno opera como rectificador y el otro como inversor, la corriente de CD fluye por la línea de transmisión (línea de 2 polos o bipolar), la potencia de DC puede ser cambiada rápidamente por el cambio en los ángulos de encendido de los tiristores de los CEP'S.

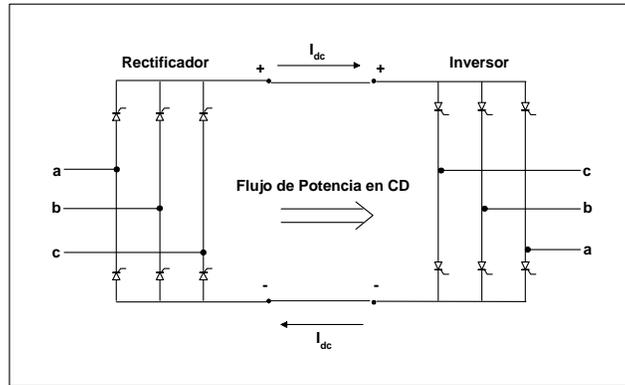


Fig. 2.13. Sistema simplificado de HVDC.

La dirección del flujo de potencia también puede ser inversa por ajuste en los ángulos de encendido de los tiristores de los CEP'S, donde el inversor opera como rectificador y el rectificador como inversor. La dirección del flujo de la corriente es la misma, sin embargo, el flujo de potencia es inverso.

Magnitudes típicas de un CEP de 12 pulsos es mostrado en la figura 2.14.

En una instalación HVDC con convertidores de 12 pulsos, los filtros de 5^a y 7^a armónicas pueden ser pequeños o eliminados.

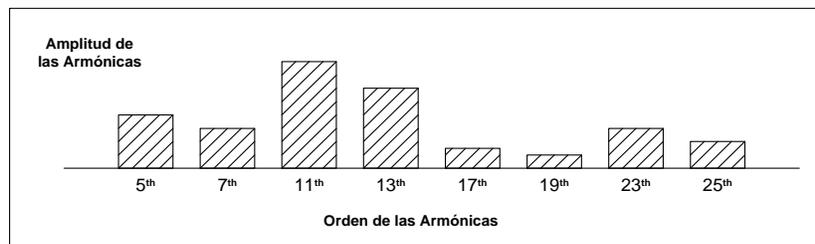


Fig. 2.14. Armónicas típicas en la corriente de alterna generados por un convertidor de 12 pulsos.

Una estación convertidora HVDC se muestra en la Fig. 2.15, usa un puente de 12 pulsos por polo, cada alimentación por un transformador convertidor y conectados en paralelo, filtros de armónicas son necesarios en ambos lados (de C.A. y C.D.),

un reactor de alisamiento ó de amortiguamiento es también insertado en serie con la línea de C.D. en cada terminal.

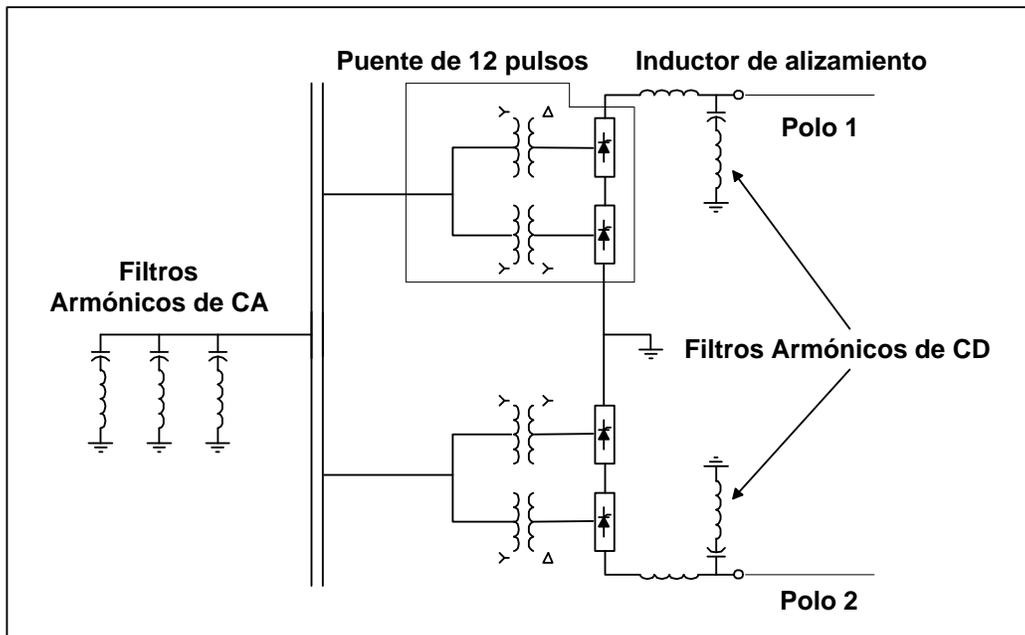


FIG. 2.15. Estación convertidora de HVDC con filtros tanto en C.A. como en C.D.

La estación convertidora HVDC controla grandes cantidades de potencia y cada puente de 12 pulsos está compuesto por muchos tiristores, conectados en combinaciones serie y paralelo para obtener el voltaje y corriente requeridos. Los grupos de tiristores, asociados con amortiguadores y circuitos de protección, son llamados "válvulas", cada estación convertidora podría contener algunos cientos de tiristores individuales.

Los transformadores de convertidores son especialmente diseñados para llevar niveles significativos de corriente armónica. Las armónicas generadas por los convertidores de 6 pulsos, en particular la 5^a y 7^a, circulan entre los dos transformadores, sin penetrar al resto del sistema de potencia de C.A. las

impedancias de los transformadores deben ser perfectamente balanceadas para reducir las armónicas no características y así mantener la simetría del puente de 12 pulsos.

Los filtros de CA consisten de circuitos individuales serie inductivo/capacitivo sintonizados a la frecuencia adecuada, frecuentemente, se requieren filtros para 5^a, 7^a, 11^{va}, y 13^{va} armónica. En adición, un filtro paso altas puede ser usado para filtrar armónicas de alta frecuencia. Un filtro de 12^{ava} armónica puede ser usado para minimizar los voltajes armónicos en el sistema de C.D.

Para minimizar armónicas se diseñan convertidores estáticos de potencia de 12 pulsos ó mayores. Estos arreglos de muchos pulsos ayudan a limitar las armónicas de menor orden, especialmente la 5^a y la 7^a, lo cual de otra manera tendrían grandes magnitudes.

Convertidores de Potencia de Mediana Capacidad.

El número de convertidores de mediana capacidad (de decenas de miles de kW) está creciendo rápidamente en la industria. Las primeras aplicaciones se basan en el control de velocidad para motores de C.D, que aún representa el mayor mercado para este tipo de convertidores. Sin embargo, el énfasis se está inclinando hacia la utilización de inversores y motores de inducción. Más aún, el uso de transistores de potencia y de tiristores GTO (gate turn off) gradualmente están ganando adeptos en el área de control de motores de C.A.

Muchos usuarios de motores eléctricos saben que los controladores de velocidad a base de convertidores estáticos de potencia proveen alta eficiencia, un control

de velocidad más precisa y menor mantenimiento que otros tipos de controladores de velocidad.

Por lo anterior, los controladores estáticos son ampliamente usados para todos los tipos de motores industriales, el uso principal de tales convertidores es como controladores de velocidad de motores de CA y de C.D.

Aunque prácticamente toda la energía eléctrica producida comercialmente es generada, transmitida y distribuida en potencia de alterna, una buena porción de esta energía es utilizada en la forma de CD.

Motores de CD son usados por todas partes en la industria para muchas aplicaciones especiales y son preferidos sobre los de CA cuando la carga del motor requiere de un alto par. Los motores de CD operan a relativa baja velocidad, tales como laminadoras, grúas, perforadoras, propulsores de barcos y locomotoras eléctricas. En todas estas aplicaciones el control de la velocidad es muy importante.

Controladores de Motores de CA.

Los controladores de velocidad de motores de C.A. son también usados en la industria, de hecho, los motores de inducción trifásicos son los más frecuentemente utilizados. Mientras los motores de C.D. se prefieren cuando se requieren bajas velocidades y altos pares, los motores de C.A. se emplean en aplicaciones de alta velocidad tales como bombas, ventiladores y compresores. Estos motores de inducción típicamente operan a velocidades de 1200, 1800, 3600 r.p.m. y mayores, los motores de C.A. son generalmente más robustos, requieren menos mantenimiento y son más baratos que los motores de C.D.

La velocidad del motor de C.A. es usualmente controlada por el ajuste del voltaje y la frecuencia, esto puede ser realizado con un controlador de C.A. de voltaje ajustable y frecuencia ajustable.

En la figura 2.16, el voltaje ajustable es suministrado por el rectificador, mientras la frecuencia ajustable por la sección inversora, el inversor es capaz de generar su propia frecuencia porque es un inversor de conmutación forzada, los elementos necesarios para la conmutación están incluidos dentro del mismo inversor.

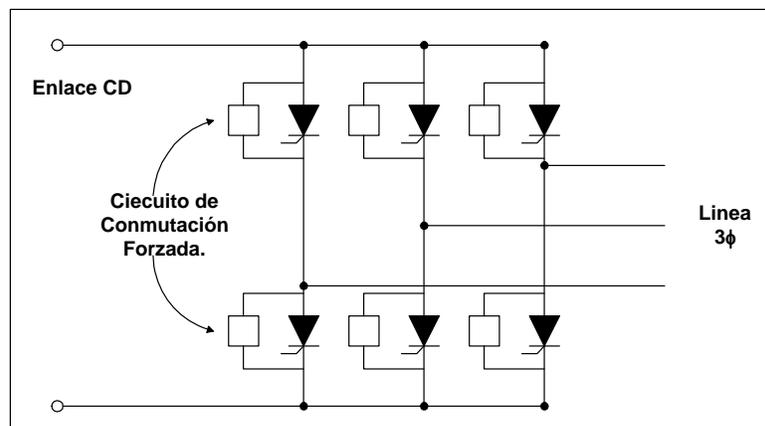


Fig. 2.16. Frecuencia ajustable suministrada por un inversor de conmutación forzada.

El inversor periódicamente switchea el voltaje de entrada de CD, en pulsos positivos y negativos a través de las líneas de carga del motor trifásico. Cuando el voltaje de C.D. incrementa ó decrementa, el voltaje de onda cuadrada suministrado al motor incrementará ó disminuirá también.

El controlador trifásico para motor de CD es un rectificador a base de tiristores de 6 pulsos, frecuentemente usado en maquinaria industrial donde un alto par es requerido.

Un típico controlador monofásico para motores de CD consiste de un rectificador monofásico de onda completa a base de tiristores, estos controladores son empleados en trenes eléctricos para controlar los motores de tracción de CD.

Las armónicas generadas por los controladores trifásicos para motores de CD y CA son las armónicas características de convertidores de 6 pulsos (5^a, 7^a, 11^{ava}, 13^{ava} Etc.) Las armónicas generadas por el controlador monofásico consiste de todas las armónicas impares (incluyendo los impares múltiplos de 3), 1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,....

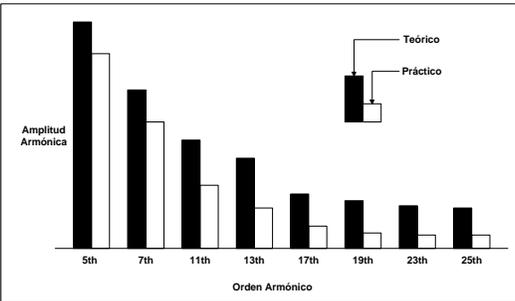


Fig. 2.17. Amplitudes de corrientes armónicas teóricas y prácticas.

Las armónicas inyectadas al sistema eléctrico de potencia por la locomotora eléctrica son similares a las producidas por el rectificador monofásico, como se muestra en la fig. 2.18, todas las armónicas impares están presentes y la tercera es la de mayor amplitud. A diferencia del convertidor trifásico de seis pulsos, el convertidor monofásico produce armónicas que incluye los múltiplos de tres.

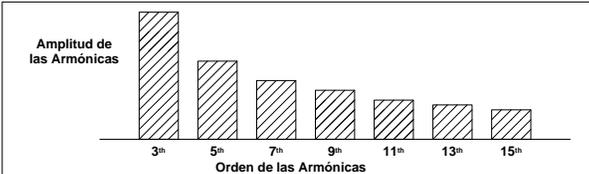


Fig. 2.18. Corrientes armónicas inyectadas al sistema por los controladores de las locomotoras eléctricas

Los armónicos generados por los controladores con enlace de CD son las mismas que en el rectificador de 6 pulsos. Las corrientes de línea de alterna son compuestas predominantemente con 5^a, 7^a, 11^{va}, 13^{va} armónica y armónicas de orden mayor; esto es, todas las impares excepto los múltiplos de tres.

Todos los controladores con enlace de CD con adecuados reactores de amortiguamiento generan armónicas características de un convertidor estático de seis pulsos.

Convertidores de pequeña capacidad y otras fuentes de armónicos.

Aparatos de consumidores: convertidores de potencia pequeños son usados en todos los equipos electrónicos de consumidores. Muchos de estos convertidores de baja potencia son monofásicos, rectificadores de onda completa.

La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadores personales, máquinas copadoras, fax, circuitos de control para máquinas herramientas y circuitería para equipos de sonido y tv's, generalmente se alimentan por un rectificador y una alta capacitancia suavizante. Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo y por lo tanto producen niveles considerables de corriente directa y armónicas de orden par.

La fig. 2.19 muestra la corriente demandada por la tv. La corriente distorsionada tiene la 3^a armónica como componente dominante.

Estudios han demostrado que la cantidad de distorsión armónica en los sistemas de potencia es importante durante períodos pico de televisión o durante eventos especiales televisados, tales como finales de fut-bol, etc.



Fig. 2.19. Corriente de línea para una fuente de potencia en modo switcheo.

Las lámparas fluorescentes son otro tipo de carga que genera armónicas, estas armónicas son generadas por el efecto de los balastos y los dispositivos no lineales y electrónicos que utilizan para su funcionamiento.

🚧 Equipos con núcleo magnético.

Transformadores:

Antes del incremento de los convertidores estáticos de potencia, las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia fueron primariamente debido a la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia. Cuando un voltaje senoidal es aplicado al devanado primario del transformador una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Ésta corriente conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador y así, inducir un voltaje en el lado secundario. La relación entre el voltaje aplicado y la corriente de excitación es extremadamente no lineal.

La corriente de excitación demandada por el transformador (fig. 2.20) no es senoidal y contiene muchas armónicas. La forma de onda de la corriente de

excitación es rica en 3ª armónica, la cual alcanza el 50% de la corriente de frecuencia fundamental, la 5ª, 7ª y 9ª están presentes a un menor grado.

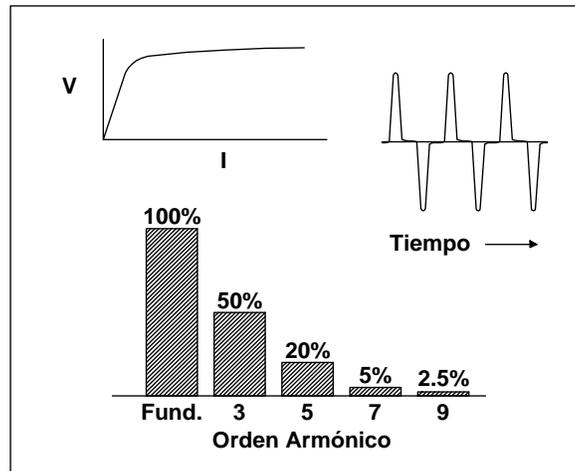


Fig. 2.20. Corriente de excitación no senoidal de un transformador y su contenido armónico

Afortunadamente, los transformadores son diseñados para operar cerca de la rodilla de la curva de saturación, donde la corriente de excitación es del 1% o 2% de la corriente a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos,

Durante el sobrevoltaje por efecto ferranti, altas corrientes armónicas aparecen en la corriente de excitación hasta que el sobrevoltaje sostenido se reduce por el cierre del interruptor de carga.

Transformadores estrella- estrella y delta- estrella.

En sistemas de distribución se usan transformadores estrella- estrella para minimizar las fallas monofásicas, también tienen la ventaja de minimizar el efecto de ferro-resonancia causado por la fusión de un fusible en el lado de alto voltaje.

La corriente de excitación de ésta conexión fluye al sistema de potencia y puede causar distorsión de voltaje significativo en la onda de voltaje del lado secundario. En contraste con la conexión delta-estrella, tiene una trayectoria de baja impedancia para la 3ª armónica de la corriente de excitación representada por el devanado delta, dando como resultado un voltaje secundario no distorsionado. En la práctica las plantas industriales usan transformadores delta-estrella, lo cual elimina el problema de voltaje secundario distorsionado.

✚ Corrientes de Inrush o Energización para un Transformador.

La corriente de excitación de un transformador es una corriente periódica continua la figura 2.21 muestra la corriente de inrush o de energización del transformador, que podría ser de 8 o hasta 12 veces la corriente a plena carga y hasta por un segundo, después de ese tiempo la corriente de excitación decae a su valor normal de 1% ó 2% de la corriente a plena carga.

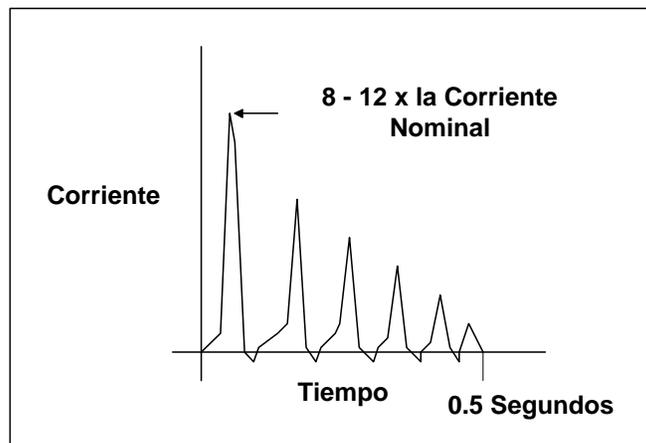


Fig.2.21. Corriente de Inrush de un Transformador que alcanza de 8- a- 12 veces la corriente de plena carga

La. Corriente de inrush contiene armónicas pares e impares con la 2ª armónica dominante, pero como no es una corriente de excitación continúa, no representa un problema armónico.

En transformadores de mediana y gran capacidad son protegidos por el relevador diferencial (figura 2.22) éste esquema compara la corriente primaria con la secundaria del transformador y es sensible a fallas internas del transformador.

Ya que la corriente de inrush tiene una gran cantidad de 2ª armónica y otras armónicas, un filtro para restringir la 2ª armónica es usado por muchos relevadores diferenciales.

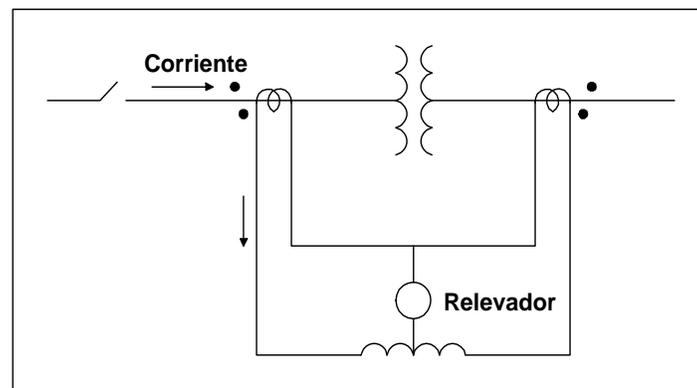


Fig.2.22 Esquema típico de la protección diferencial para la mayoría de transformadores de media y gran potencia.

🚧 Motores y Generadores.

En adición a los transformadores, hay un gran número de equipo con núcleo magnético que genera armónicas como los motores y generadores. Similar al transformador, un motor requiere de corriente de excitación (que contiene 3ª armónica) del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo.

La comparación se muestra en la fig. 2.23, así, las armónicas generadas son menores. El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de

armónicos, los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo 5ª y 7ª corrientes de armónicos, aunque éstas son menores que las corrientes armónicas producidas por los convertidores estáticos, los controladores de velocidad de motores de gran capacidad (30,000 HP y mayores) pueden causar efectos armónicos en el sistema de potencia.

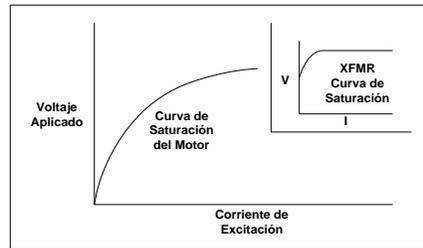


Fig. 2.23. Curva típica de saturación de un motor comparada con una curva de saturación de un transformador.

Los armónicos que se producen en un generador de CA son porque, el voltaje inducido en el estator es ligeramente distorsionado y contiene una componente dominante de 3ª armónica; esto causa que corriente de 3ª armónica fluya cuando el generador opera bajo carga.

Bajo la mayoría de condiciones de operación, las armónicas causadas por motores y generadores no son significativas en comparación con la producción armónica total en el sistema de potencia. En casos raros, podría haber un problema cuando una frecuencia armónica de una máquina rotatoria de gran capacidad excita a un circuito resonante en el sistema de potencia.

⚡ Dispositivos de Arco.

El sistema de potencia está “lleno” dispositivos de arco, tales como; hornos de arco eléctrico, soldadoras de arco y lámparas fluorescentes.

Todos estos equipos tienen un comportamiento no-lineal, los dispositivos de arco actúan parecido a un gap en serie con una reactancia que limita la corriente a un valor determinado. El voltaje a través del gap es parecido a una onda cuadrada y éste produce una corriente distorsionada con numerosas componentes armónicas.

De todos los dispositivos de arco del sistema de potencia, la mayor producción de armónicas, probablemente es de cargas de alumbrado, las cuales son conectadas en toda la red, sin embargo, hornos de arco causan los más severos problemas porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un lugar (existen hornos de arco de hasta 250 MW).

En un horno de arco eléctrico de CA, como el mostrado en la fig. 2.24, donde el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía. Para arrancar el proceso, tres electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente son acercados al horno, haciendo contacto con el acero, los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco, la trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa, así exhibe una acción de rectificación débil entre los dos elementos distintos. Ésta simple acción de rectificación de fase produce las armónicas en la corriente de fase.

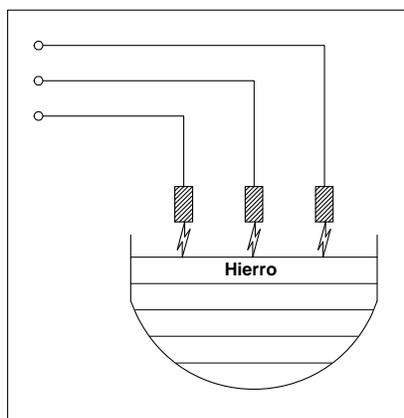


Fig. 2.24. Horno de arco mostrando que los electrodos están arriba hasta que los arcos son establecidos entre cada electrodo y el acero.

Una corriente muy grande típicamente en decenas de kilo amperes fluye a través de los electrodos y la chatarra de acero, la corriente es limitada por las reactancias de los cables de alimentación al horno y el transformador de horno. En la etapa inicial de fundición, la trayectoria de arco es errática, el resultado de las variaciones del voltaje de arco produce todas las armónicas dominantes por la acción rectificadora.

El horno es alimentado desde un transformador construido especialmente con un devanado conectado en delta, por las características monofásicas del arco, todas las armónicas son producidas, incluyendo pares y triples.

La fig. 2.25 muestra un espectro de frecuencia típico de corriente del horno de arco durante el período inicial cuando la chatarra está siendo fundida, la 2ª y 3ª son dominantes, cada una con el 25% de la magnitud de corriente fundamental.

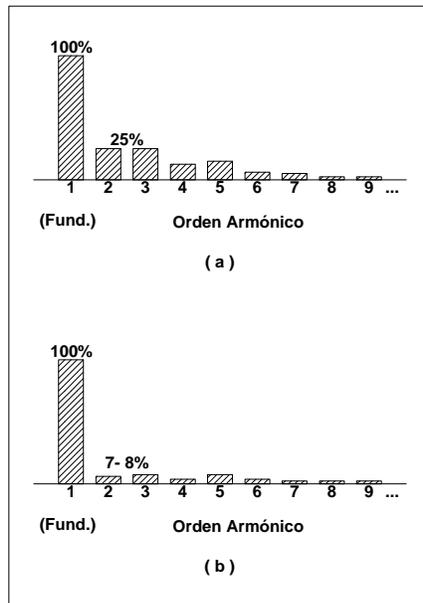


Fig. 2.25. Armónicas típicas producidas durante la operación del horno de arco:

- (a) durante el período inicial de fundición dónde la 2ª y 3ª corrientes armónicas son dominantes; (b) durante el período de refinación dónde la 2ª y 3ª armónicas son dominantes, pero reducidas a un 7-8%.

Durante el período más largo que es cuando la chatarra está siendo refinada, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable. El inciso b de la Fig. 2.25 muestra el contenido armónico de la corriente del horno durante el período de refinación. Aunque la 2ª y 3ª armónicas predominan, sus magnitudes son reducidas al 7% u 8% de la magnitud de corriente fundamental.

✚ Aluminado Fluorescente:

En alumbrado fluorescente, la corriente es limitada por un balastro que consiste de conductores devanados sobre un núcleo de hierro.

La corriente demandada por la lámpara fluorescente se ilustra en la fig. 2.26 las armónicas generadas incluyen una fuerte componente de 3ª armónica, porque el

balastro es un dispositivo ferro magnético que requiere corriente de excitación que contiene 3ª armónica.

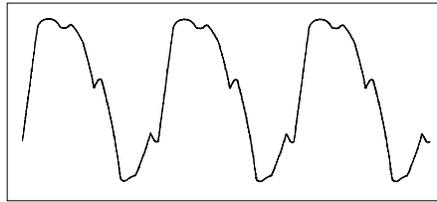


Fig. 2.26. Corriente demandada por una lámpara fluorescente.

⚡ **Compensadores Estáticos de VARS (CEV'S O SVC'S):**

El uso primario de un controlador de voltaje en el sistema de potencia es el compensador de potencia reactiva (var) o svc. el svc controla el voltaje por el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema, el svc usa reactores y capacitores controlados o switcheados con tiristores, el svc puede cambiar la magnitud y dirección del flujo de var's muy rápidamente (en medio ciclo cuando mucho) en respuesta a las necesidades de carga.

Hay dos aplicaciones generales del SVC.

El 1º: en cargas industriales que varían rápida y significativamente, tales como hornos de arco eléctrico, un SVC es usado para suministrar potencia reactiva local a la carga, esto reduce el flicker e incrementa la eficiencia del horno.

La 2ª aplicación es en los sistemas de potencia, donde el SVC opera continuamente para regular el voltaje y mejorar la capacidad de transferencia de potencia a través del sistema de transmisión. El SVC podría también ser switcheadado inmediatamente después de una falla en el sistema para ayudar a mantener la estabilidad suministrando potencia reactiva y tener un mejor soporte de voltaje.

El diseño más común consiste de capacitores en derivación con un reactor controlado por tiristores conectado en paralelo, como se muestra en la fig. 2.27.

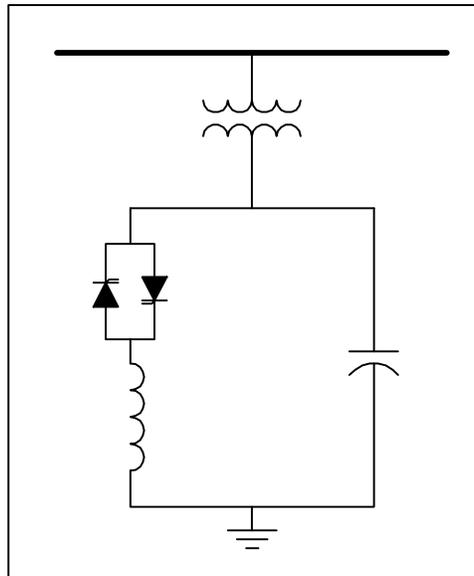


Fig. 2.27. Configuración típica de un compensador estático de VAR'S.

La fig.2.28, ilustra un ejemplo de una aplicación industrial donde se tiene un horno de 100 MVA'S y un SVC conectado al primario del transformador o al bus de distribución principal. El SVC consiste de un reactor en derivación controlado por tiristores y filtros LC en derivación. Los filtros son sintonizados para eliminar la 2^a, 3^a, 4^a y 5^a armónicas. En algunas aplicaciones es también necesario instalar un filtro paso altas para eliminar armónicas de mayor orden.

El filtro de 3^a armónica debe ser aterrizado para permitir el flujo de corriente de 3^a armónica o secuencia cero, sin embargo, los reactores controlados por tiristores son conectados en delta y los otros filtros y capacitores son conectados en estrella flotante.

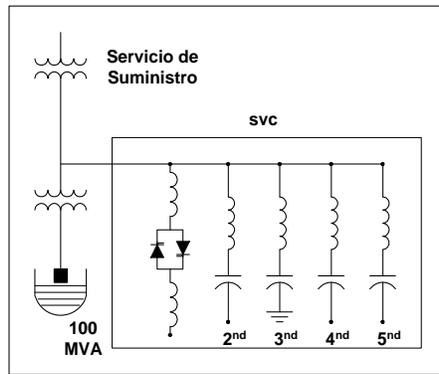


Fig. 2.28. Compensador estático de var's en una aplicación industrial como es el horno de arco eléctrico.

El propósito del SVC en la Fig. 2.28 es para suministrar continuamente cualquier potencia reactiva requerida por el horno (ésta no deberá suministrarse por la empresa suministradora), estos vars son suministrados por los capacitores fijos en los filtros, la caída de voltaje a lo largo del alimentador es mínima y reduce problemas de flicker (fluctuaciones de voltaje) que podrían ocurrir en los circuitos adyacentes al horno.

Suponiendo que los filtros suministran 100 MVAR fijos de potencia reactiva, pero en un instante el horno sólo requiere 60 MVAR, el exceso (40 MVAR) de potencia reactiva generada deberá ser absorbido por el reactor controlado por tiristores, en realidad, el reactor puede absorber solo el nivel de potencia reactiva que esté dentro de su capacidad. Esto se realiza por el control de fase por medio de los tiristores, modulando la corriente del reactor.

Los pulsos de corriente en el reactor controlado por tiristores deben ser centrados alrededor de los cruces por cero del voltaje, puesto que la carga es casi inductiva

pura, por lo tanto, los pulsos de corriente en los tiristores son simétricos alrededor del cruce por cero del voltaje.

Por ejemplo, los tiristores podrían ser “encendidos” donde el voltaje V es máximo, como se muestra en la figura 2.29, ocurre conducción plena y el reactor absorbe los máximos var's, desafortunadamente, el control de fase de los tiristores genera armónicas que son características de un convertidor estático.

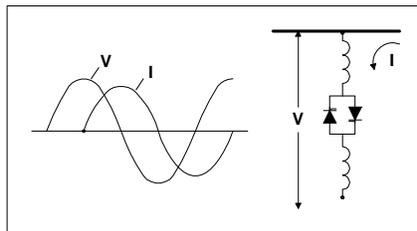


Fig. 2.29. Corriente de encendido de los tiristores coincidiendo con el voltaje máximo.

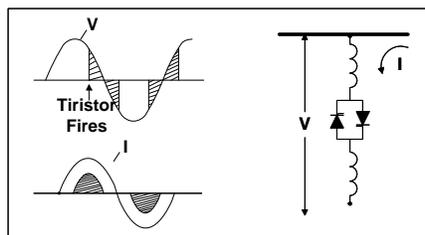


Fig. 2.30. Resultado del retardo en el encendido y sólo porciones de voltaje se aplican al reactor y por eso los pulsos de corriente son cortos.

En la Fig. 2.30, la 3^a, 5^a y 7^a y otras armónicas características de un convertidor de seis pulsos del reactor controlado por tiristores son agregadas a las armónicas pares e impares del horno de arco. El arreglo del filtro debe ser bien diseñado para mitigar las armónicas generadas por el horno y el SVC.

Otra aplicación importante de un SVC es en el sistema de una empresa suministradora. Un SVC podría ser instalado en puntos estratégicos del sistema para regular el voltaje, como se ilustra en la Fig. 2.31.

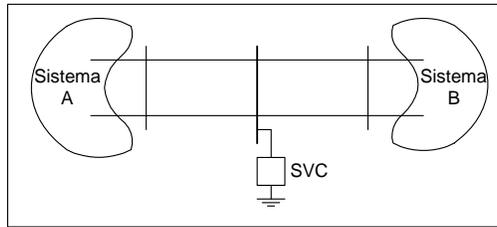


Fig. 2.31. Aplicación típica de un svc en una empresa suministradora.

El SVC aplicado en la empresa suministradora (fig. 2.32) es similar al usado en sistemas industriales, excepto que podría haber capacitores switchados por tiristores o interruptores, separados de los filtros. El SVC monitorea el voltaje del sistema, suministrando vars cuando el voltaje es bajo y absorbiendo cuando es alto. Nuevamente el suministro o absorción de vars se realiza por el control de fase de los tiristores del reactor. Filtros para la 5^a, 7^a, 11^{va} y 13^{va} armónicas pueden ser instalados. Las corrientes de 3^a armónica generadas por la modulación de corriente son confinadas en la conexión delta del reactor trifásico.

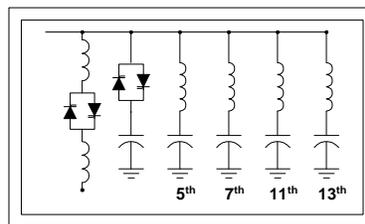


Fig. 2.32. Configuración típica de un svc de una empresa suministradora.