

Actuadores para motores DC.

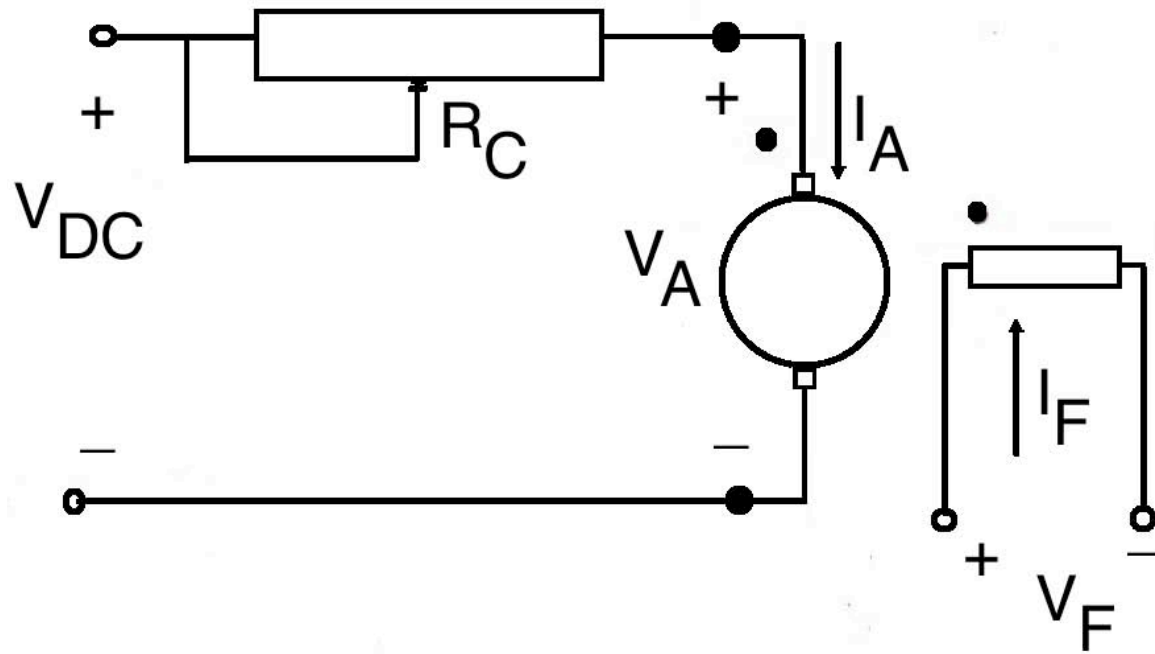
El control de los motores DC se puede implementar de las siguientes formas:

I.- Tecnologías no electrónicas.

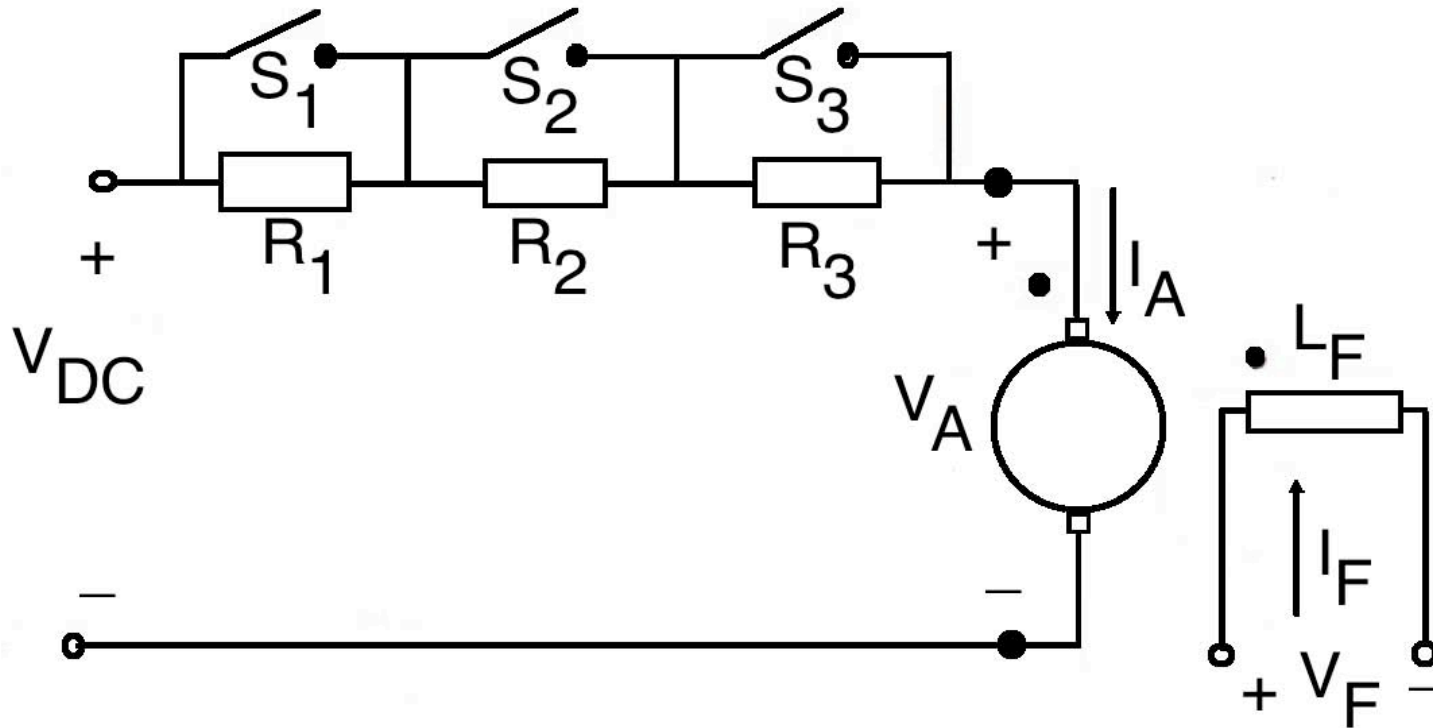
1.-Control por resistencias externas (control disipativo).

El control es totalmente disipativo, la potencia proporcionada por la fuente al motor se regula aumentando o disminuyendo la potencia disipada en la resistencia variable externa.

a.-Control manual directo.



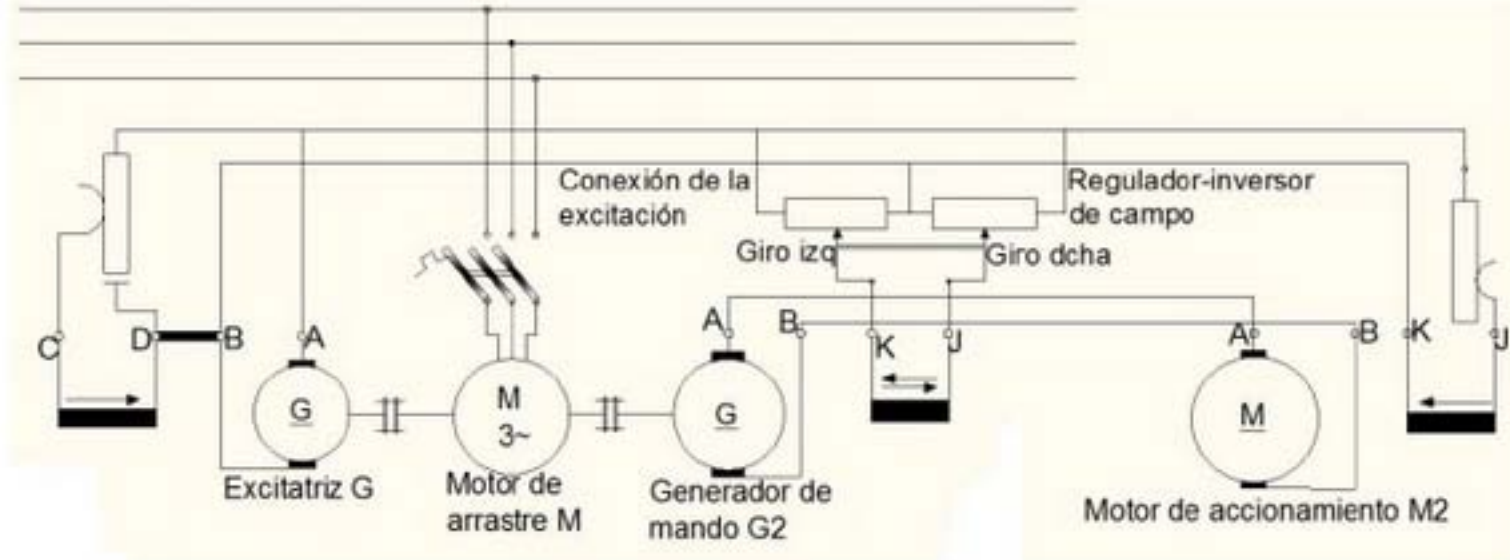
b.-Sistemas electromecánicos con contactores.



Control electromecánico con tres etapas de resistencia externa.

El número de pasos en el control es limitado, el sistema es principalmente aplicable al control de la corriente de arranque.

2.-Sistemas electromecánicos con máquinas auxiliares.



Sistema patentado por Harry Ward Leonard en 1891.

Se puede lograr control continuo de la velocidad; el sistema es costoso y complicado, emplea 4 máquinas eléctricas, su eficiencia energética es relativamente baja y es difícil de integrar en un sistema de control automático.

Las tecnologías no electrónicas no tienen aplicación en nuevos diseños y solo tienen interés histórico (“piezas de museo”).

II.- Tecnologías electrónicas:

- 1.- Control de voltaje con conversores AC/DC de conmutación natural.
- 2.- Control de voltaje con conversores DC/DC o AC/DC/DC.

Control de voltaje con conversores AC/DC de conmutación natural.

Los conversores AC/DC de conmutación natural se implementan con tiristores (SCRs) cuyo disparo está sincronizado con la línea AC.

Su velocidad de respuesta está limitada por este factor, que introduce un retardo variable entre el instante en que el controlador toma la decisión de cambiar la tensión aplicada a la armadura y el momento en el cual se puede aplicar la nueva secuencia de señales de disparo a los SCRs.

Adicionalmente la tensión de salida tarda en estabilizarse en el nuevo valor deseado un ciclo completo de la línea, lo que operando a 60Hz, representa un retardo de 16,6ms.

Los convertidores AC/DC tipo puente trifásico son los más usados en estas aplicaciones. En estos convertidores el máximo tiempo muerto desde la toma de decisión hasta que se puede aplicar la primera señal de disparo correspondiente al nuevo valor de tensión de armadura (el tiempo muerto de retardo o “delay time”) es un sexto del tiempo de ciclo de la línea, esto es 2,77ms, a partir de lo cual cada 2,77ms cambiará en secuencia el estado de un SCR, y el último ajuste para alcanzar el valor de salida deseado ocurre al concluir el ciclo de línea de 16,6ms de duración.

Esta velocidad de respuesta es adecuada para controlar motores DC de campo bobinado de alta potencia, usados en aplicaciones en las cuales las constantes de tiempo electromecánicas son comparativamente largas, pero resulta insuficiente para aplicaciones mecatrónicas de alto rendimiento, que usualmente se implementan con motores de potencias medias o bajas en sistemas con constantes de tiempo electromecánicas comparativamente cortas.

Por esta razón la tecnología de control de máquinas DC con conversores AC/DC con tiristores, que antes controlaba la mayor parte del mercado, se ha convertido en una tecnología “de nicho”, dedicada principalmente al segmento de mas alta potencia.

Dado que la potencia necesaria para energizar el circuito de campo de una máquina DC es mucho menor que la potencia de armadura, es común que en estas aplicaciones se empleen convertidores AC/DC tipo puente monofásico, completamente controlados si se requiere entrar en la zona de sobre-velocidad por reducción de campo, y no controlados en caso de que no se requiera operar a sobre-velocidad.

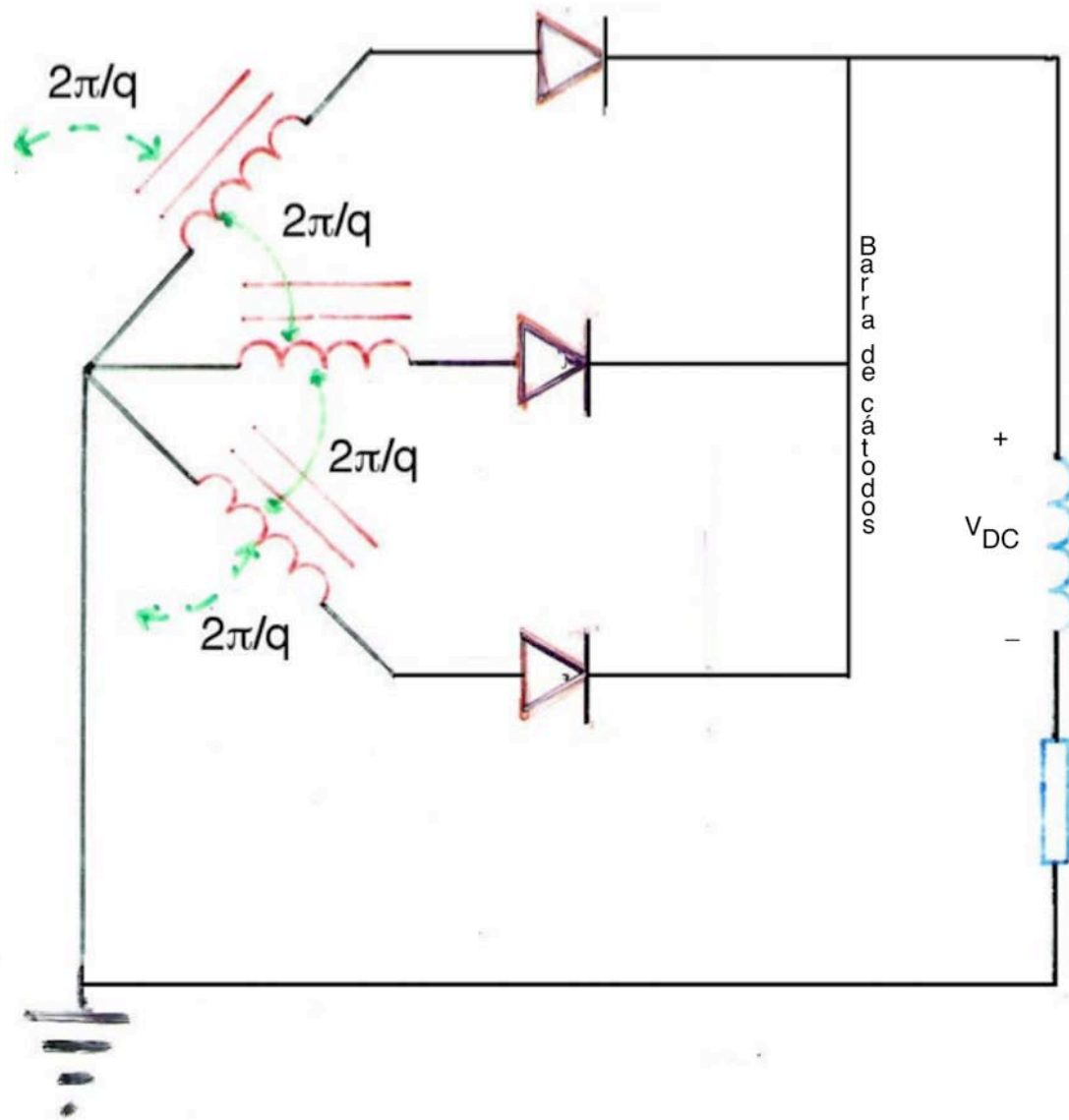
Circuitos conversores AC/DC DC de conmutación natural.

Son circuitos conversores cuya entrada está conectada a un sistema AC sinusoidal, usualmente de amplitud y frecuencia constante, y su salida es una tensión cuyo componente principal (idealmente el único, sin rizado) es una tensión DC.

Los conversores AC/DC de conmutación natural se pueden clasificar:

I.- Por la topología:

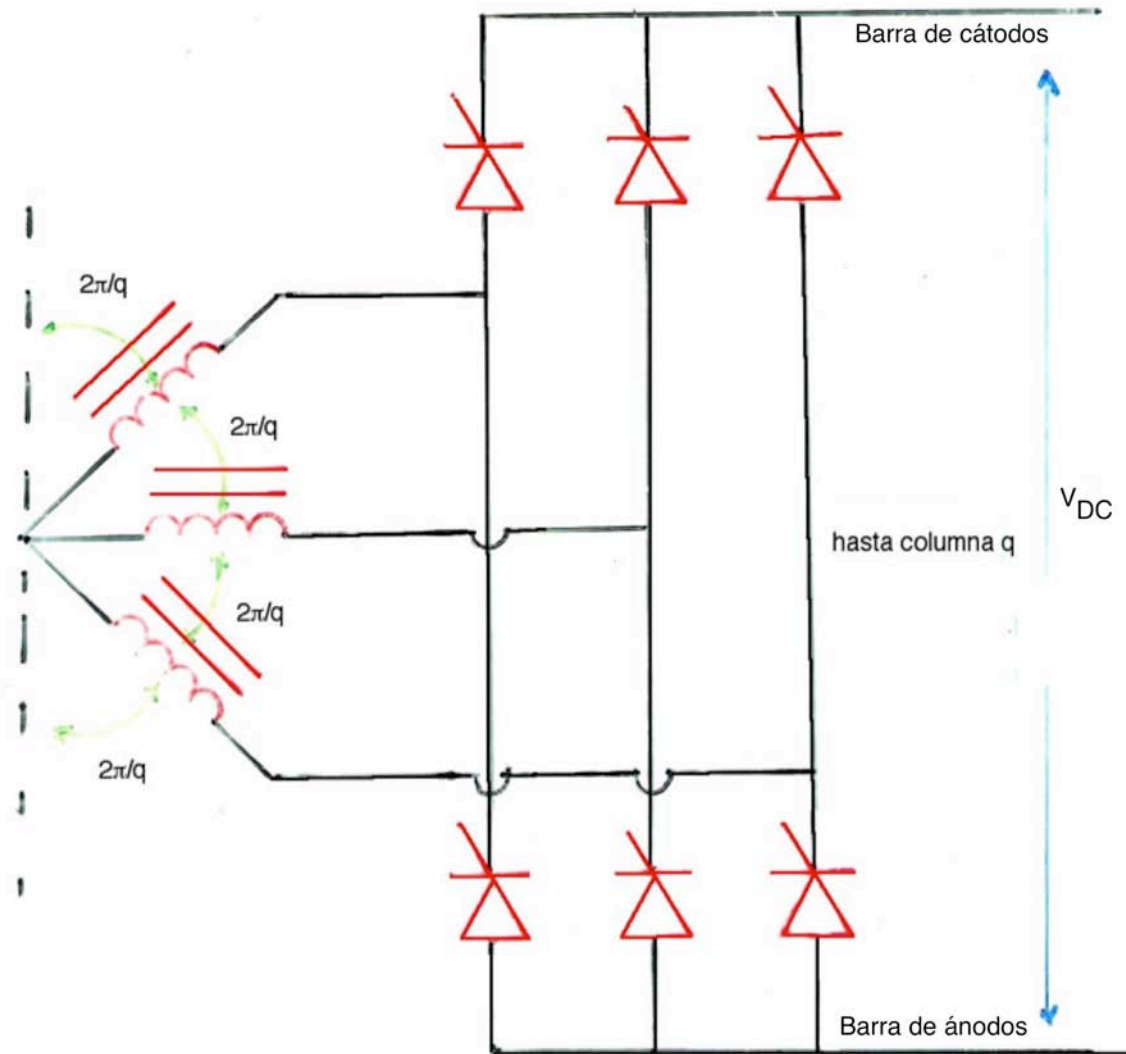
- 1-Convertidores toma central.
 - a.- De barra de cátodo.
 - b.- De barra de ánodo.



Convertidor AC/DC q-fásico de toma central con barra de catodos

En ambos tipos se emplea un solo SRC en cada fase y la corriente en las fases es monopolar pulsante, con contenido DC significativo. Esto puede causar problemas de saturación en el núcleo magnético si no se emplean transformadores con configuraciones especiales, usualmente mas costosas.

2- Conversores puente.



Convertor AC/DC puente q-fásico.

En esta configuración se requieren dos SCRs por fase, pero la corriente en las fases es bipolar pulsante, sin componente DC, lo que aprovecha mejor el rango de magnetización del material del núcleo, por lo que son los preferidos en aplicaciones industriales de potencia.

Adicionalmente esta configuración puede ser conectada directamente a la alimentación trifásica si los niveles de tensión son adecuados, lo que representa una ventaja adicional.

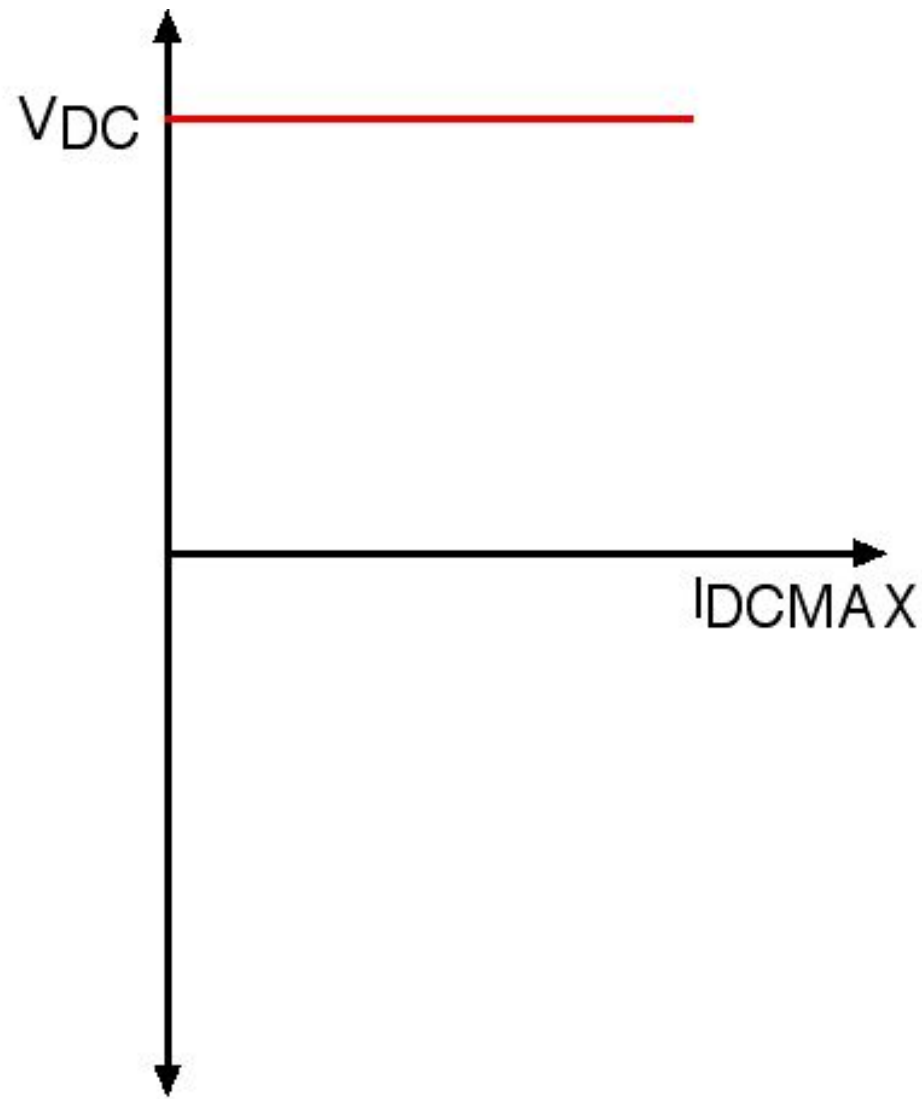
II.- Por la capacidad de control:

1.- Conversores no controlados.

La matriz de conmutación esta formada por diodos.

La tensión de salida tiene un valor constante que solo depende de la tensión de entrada.

Estos conversores, los mas baratos de implementar, obviamente no pueden ser usados para controlar en velocidad a un motor DC, pero son empleados para alimentar el circuito de campo de los motores DC de campo bobinado cuando no se desea controlar la corriente de campo.



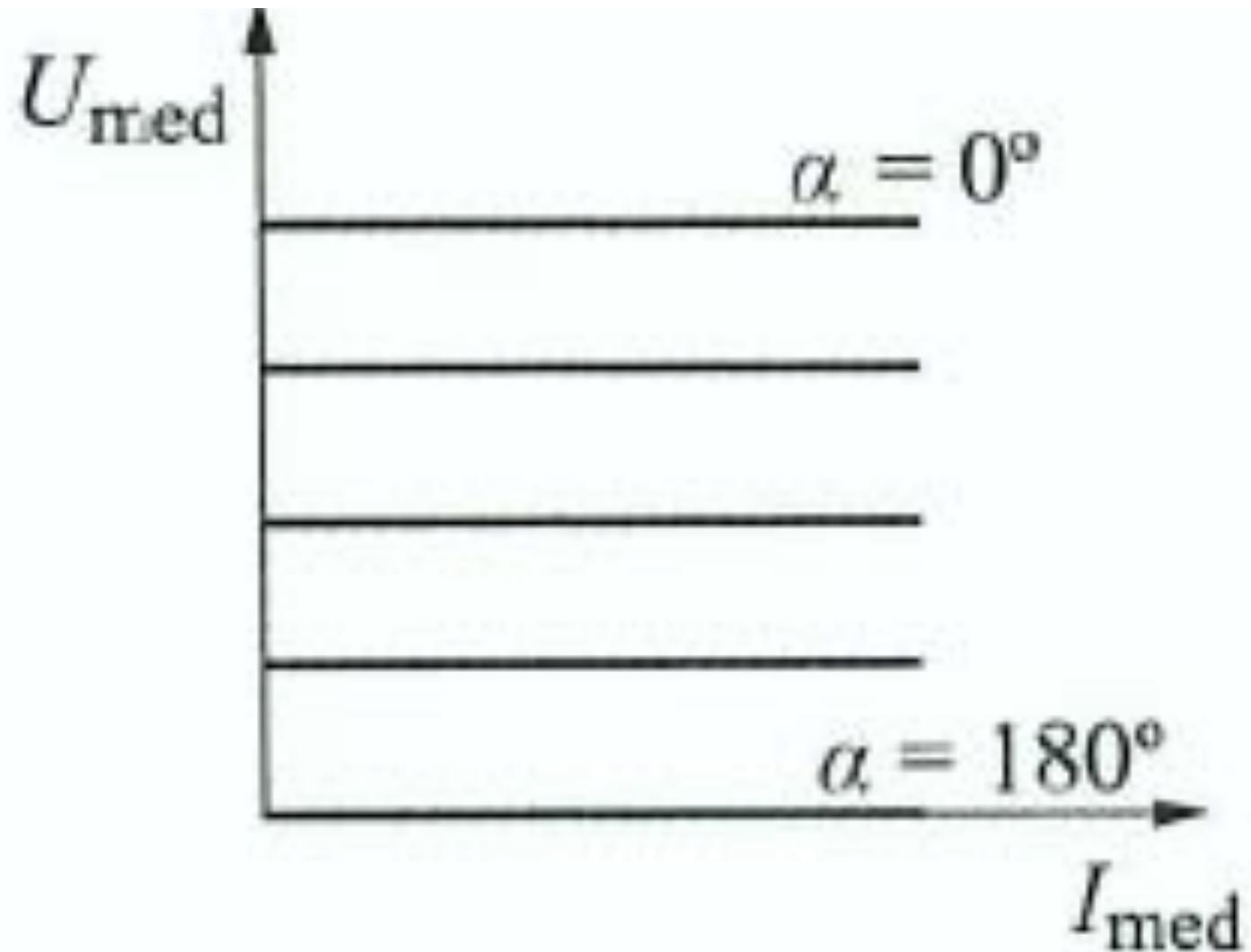
Características ideales voltaje/corriente de salida de un conversor no controlado

2.- Conversores semi-controlados.

La matriz de conmutación esta formada por una combinación de diodos y tiristores.

La tensión de salida depende de la tensión de entrada, de la topología del conversor y de la acción del sistema de control (retardo de encendido).

El conversor únicamente puede operar como rectificador en el primer cuadrante de tensión, ya que los diodos impiden que la polaridad de salida se invierta.



Características ideales voltaje/corriente de un conversor AC/DC de conmutación natural semicontrolado.

Dado que la entrada en conducción de los tiristores depende de la aplicación de señales de disparo, en principio es posible bloquear la operación del convertidor por una acción del control, bloqueando el disparo de los tiristores, si se detecta una condición de sobre corriente.

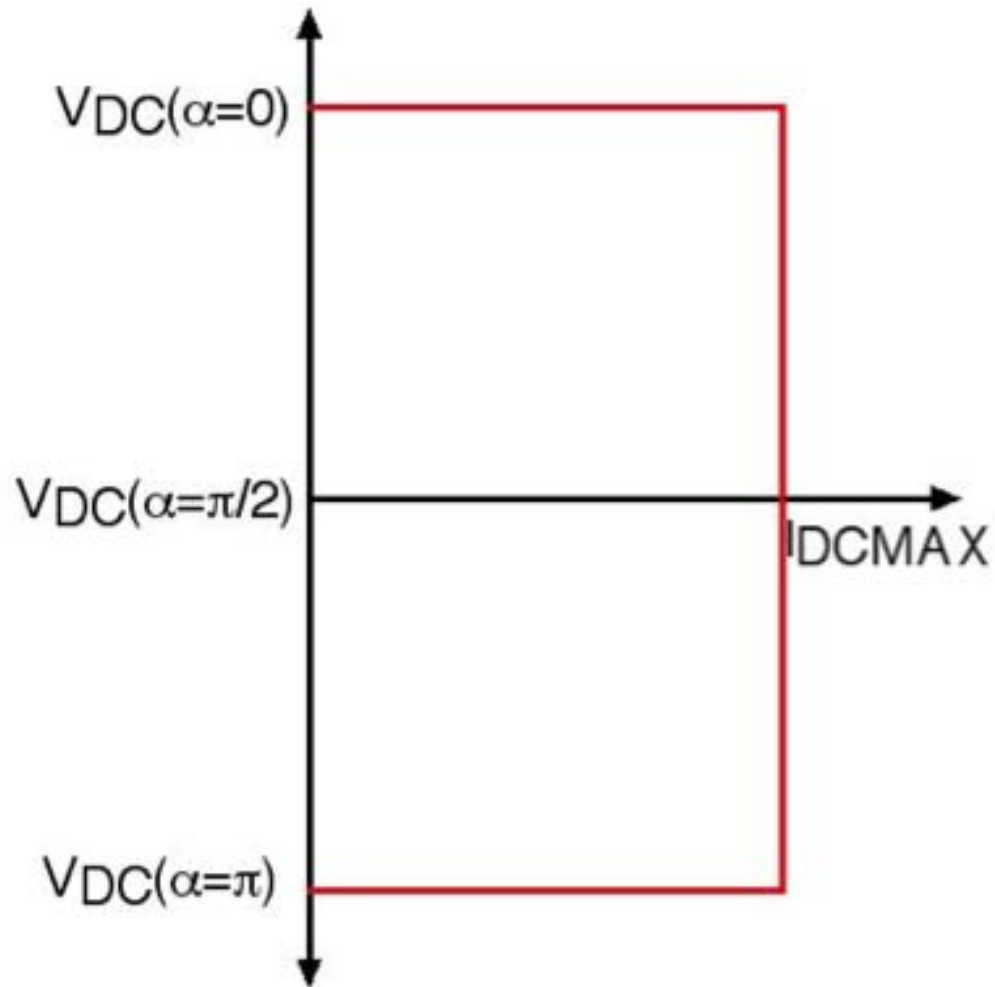
Esta configuración, posiblemente mas económica que la completamente controlada, se puede emplear cuando se requiere implementar un controlador para motores DC que deba actuar solo en el cuadrante motriz.

3.- Convertidores completamente controlados de conmutación natural.

La matriz de conmutación está formada únicamente por tiristores.

La tensión de salida depende de la tensión de entrada, de la topología del convertidor y de la acción del sistema de control (retardo de encendido).

Si la carga contiene fuentes de energía, el convertidor puede operar en dos cuadrantes de tensión (tensiones de salida positivas y negativas).



Características ideales voltaje/corriente de un conversor completamente controlado de conmutación natural.

En estas condiciones el conversor opera como rectificador, cuando genera tensión de salida positiva y transfiere energía de las líneas AC a las barras DC, y como inversor, cuando genera tensión de salida negativa y transfiere energía de las barras DC a las líneas AC.

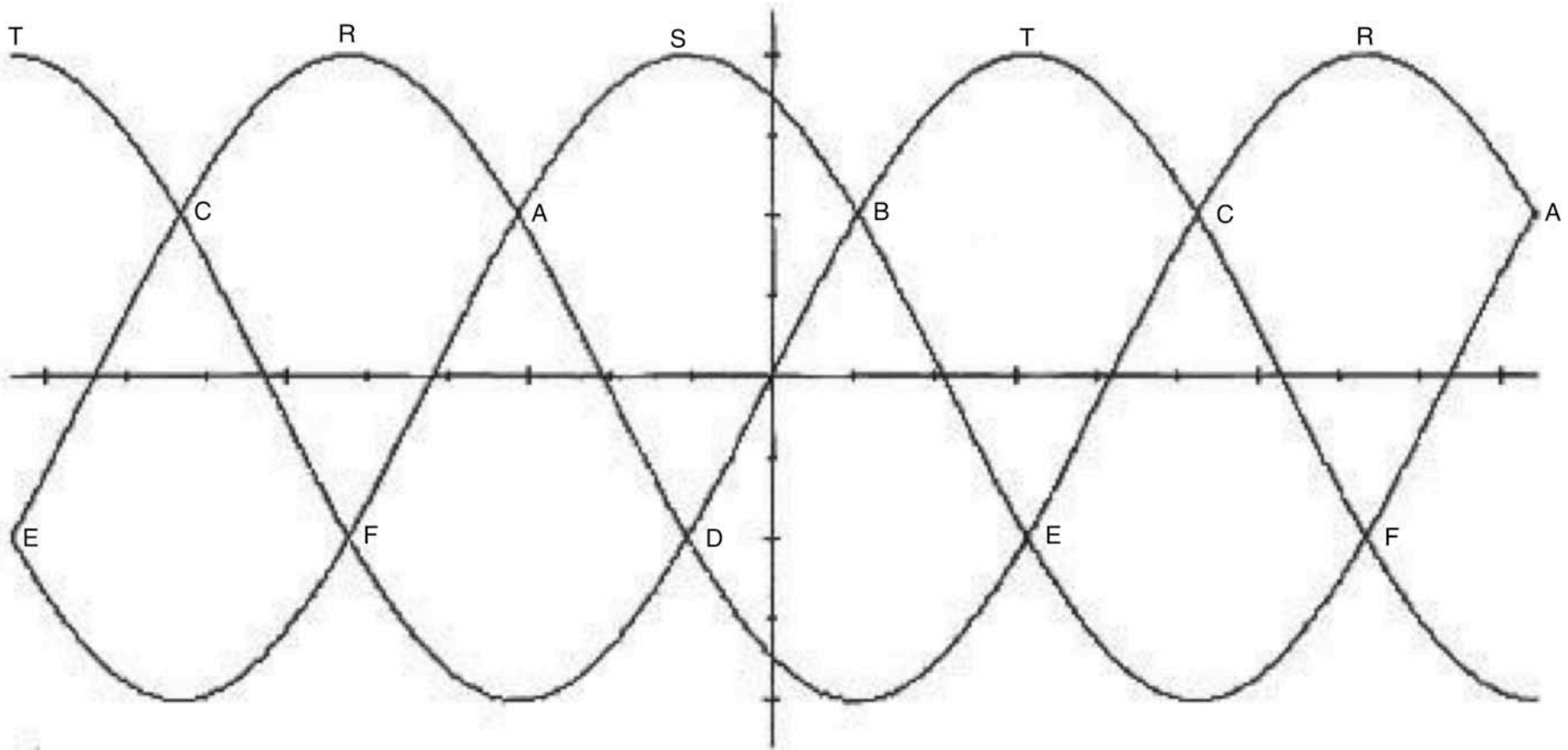
Dado que la entrada en conducción de los tiristores depende de la aplicación de señales de disparo, es posible bloquear la operación del conversor por una acción del control si se detecta una condición de sobre corriente.

Esta configuración se emplea cuando se requiere implementar un controlador para motores DC capaz de operar en los cuatro cuadrantes.

Puntos de conmutación natural.

Dada una matriz de conmutación cuya entrada es un sistema polifásico alterno, los puntos de conmutación naturales son los ángulos en los que la diferencia de tensión entre dos fases cambia de signo.

Si la matriz de conmutación esta formada solo por válvulas no controladas tipo diodos, el diodo asociado con la fase cuya tensión pasa a tener mayor módulo ("fase entrante") conmutara en apagado al diodo asociado con fase cuya tensión pasa a tener menor módulo ("fase saliente") en el punto de conmutación natural, y la corriente en la barra de salida pasará de la fase saliente a la fase entrante.

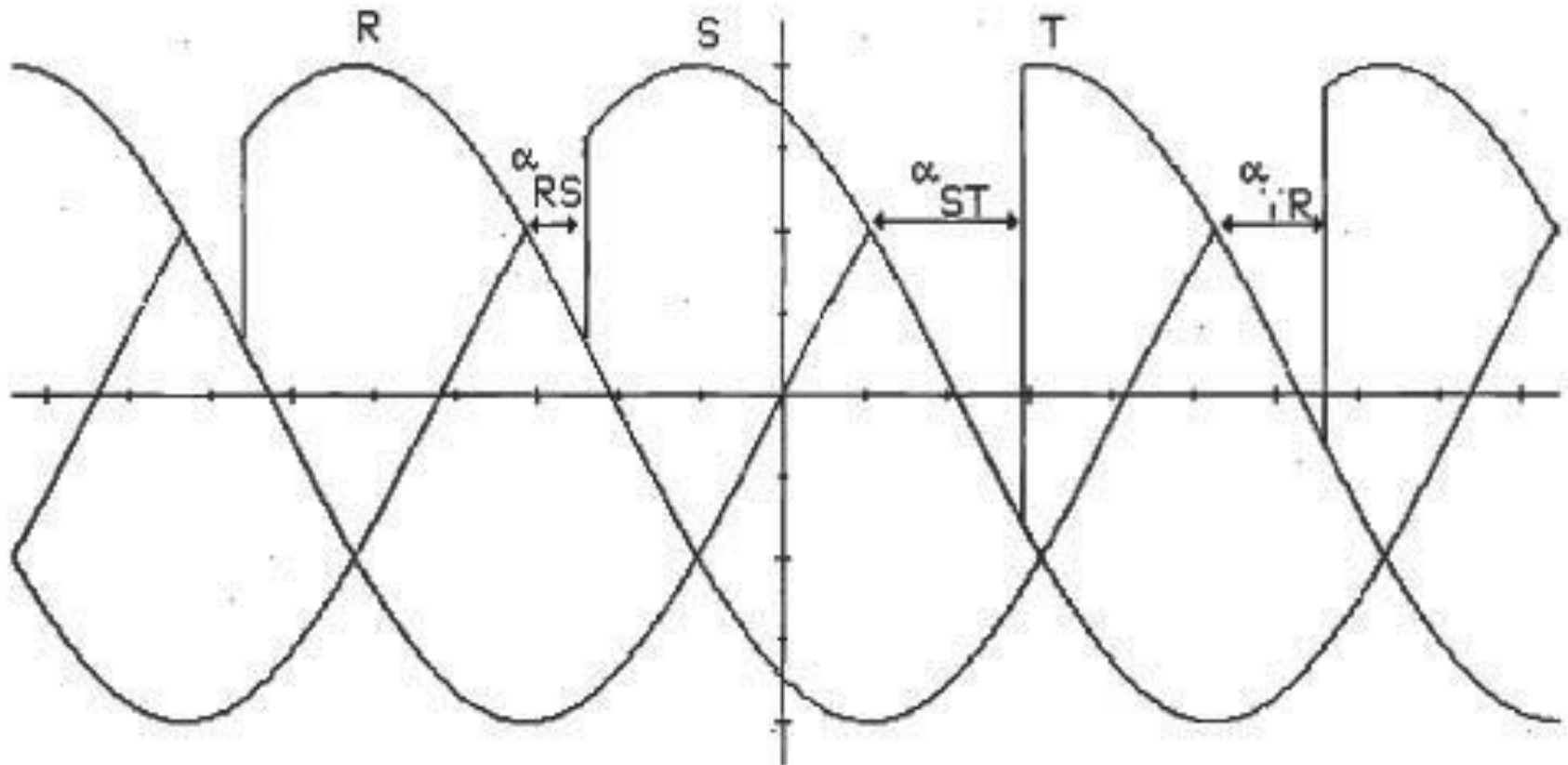


Sistema trifásico (R, S, T) mostrando los puntos de conmutación naturales A, B, y C de los diodos conectados a la “barra de cátodos”, y D, E y F) de los diodos conectados a la “barra de ánodos”, en un conversor AC/DC tipo puente trifásico.

Si las válvulas son del segundo tipo, controladas solo en encendido, tipo SCRs, la entrada en conducción se producirá cuando se cumpla la condición anterior y además se reciba el pulso de disparo, lo que puede ocurrir en el punto de conmutación natural (operación con cero retardo de encendido), o un tiempo después de este punto, operando con un retardo de encendido mayor que cero.

Por razones de simetría de la onda, es imposible operar con un retardo superior a π radianes, por lo tanto, desde el punto de vista del sistema de entrada, el rango del retardo de encendido posible es:

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$



Conversión AC-DC. Operación con retardos de encendido de los tiristores conectados a la barra de cátodo.

Por razones de simetría y para simplificar los sistemas de control, en estado estacionario los retardos de disparo de todos los SCRs se fijan en el mismo valor; durante las maniobras de cambio de la tensión de salida es posible que cada retardo tenga un valor diferente.

Hipótesis de análisis de los convertidores AC-DC por conmutación natural.

1-Los dispositivos son ideales, luego:

a-En el estado de conducción los conmutadores no producen caídas de tensión; en el de bloqueo sus corrientes de fuga son cero.

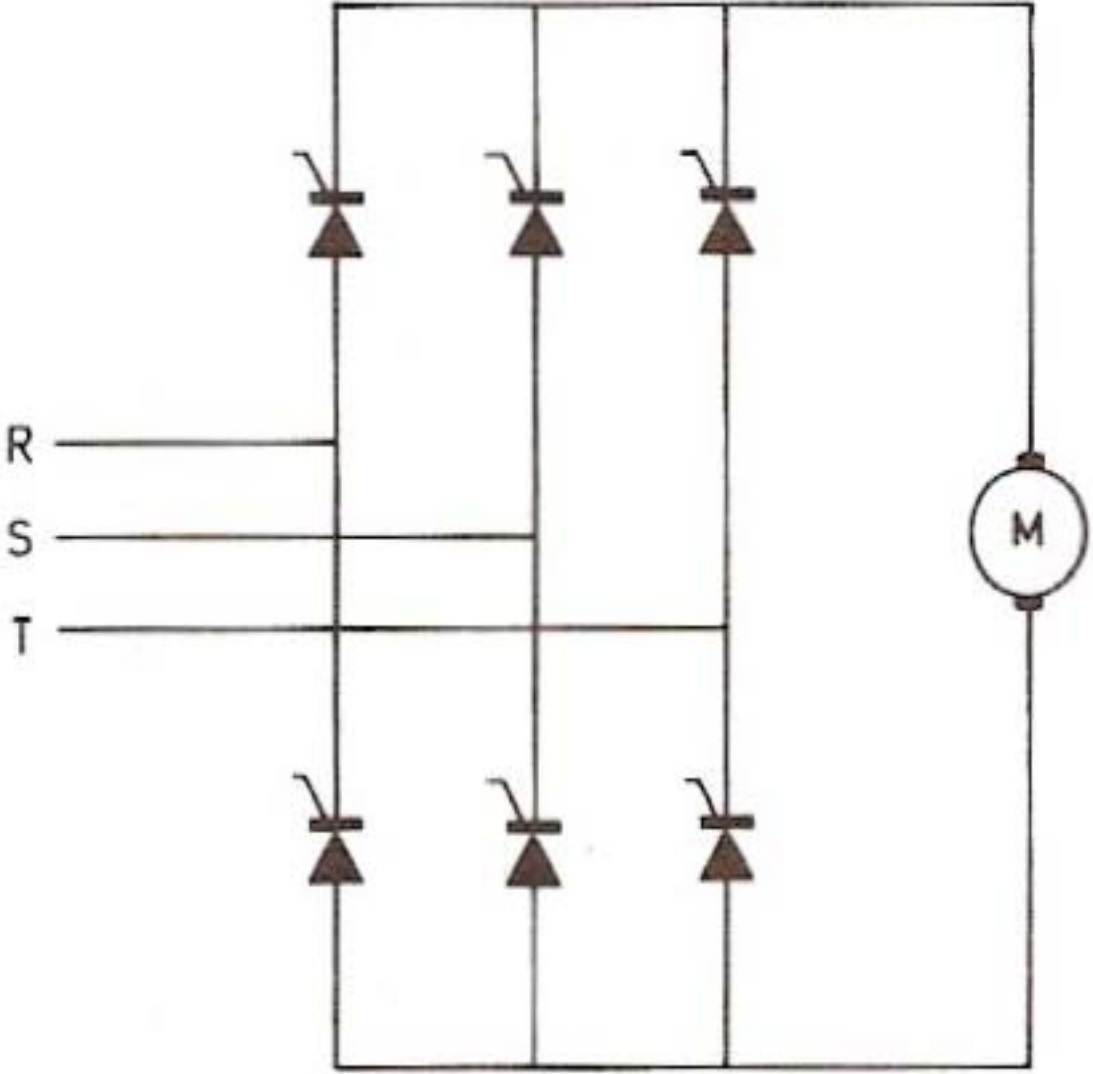
b-Los cambios de estado de los conmutadores se producen instantáneamente, una vez que se cumplen los requisitos necesarios.

2-La corriente DC es constante en cada ciclo o, por lo menos, no se hace cero en el intervalo de análisis.

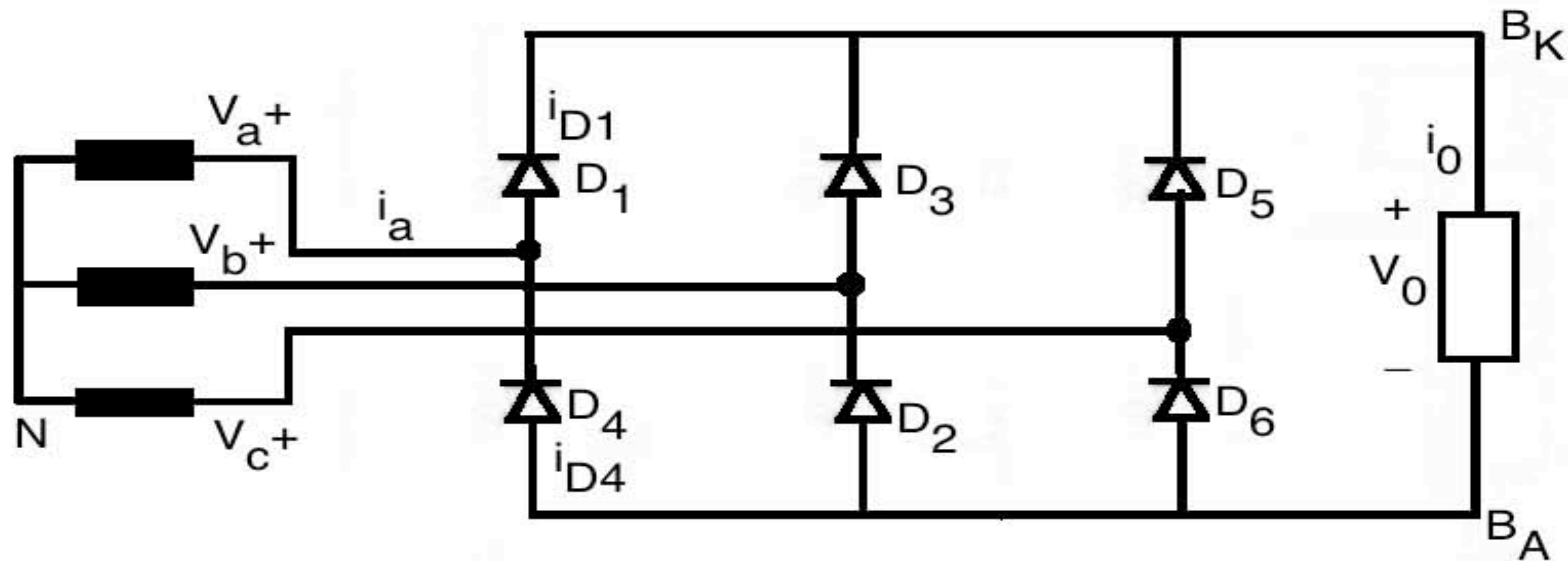
3-Dejando aparte la posible resistencia de carga, las resistencias presentes en el circuitos (incluyendo los transformadores de entrada) son despreciables.

4-La operación del circuito conversor no afecta al sistema AC; específicamente se considera que las tensiones de línea siempre son sinusoides puras, sin ninguna distorsión inducida por efecto de la acción del conversor.

Convertidor AC-DC puente trifásico o "puente de Graetz"

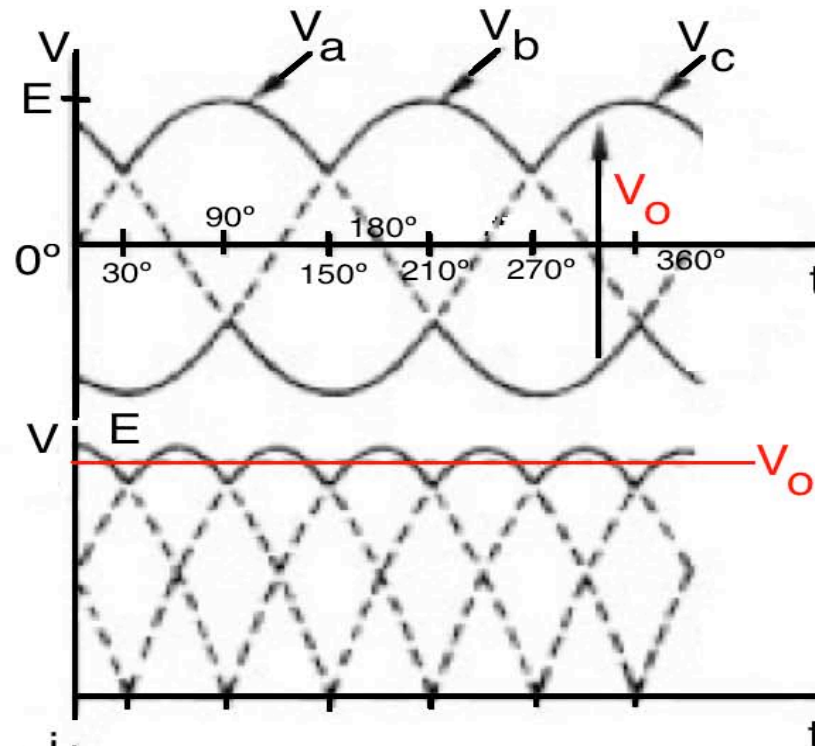


El análisis usualmente se empieza suponiendo que el puente está conectado a un transformador trifásico con toma central, y que el circuito inicialmente opera como rectificador no controlado, bien porque todos los conmutadores son diodos o, mas generalmente, porque los 6 tiristores se disparan con $\alpha=0$.

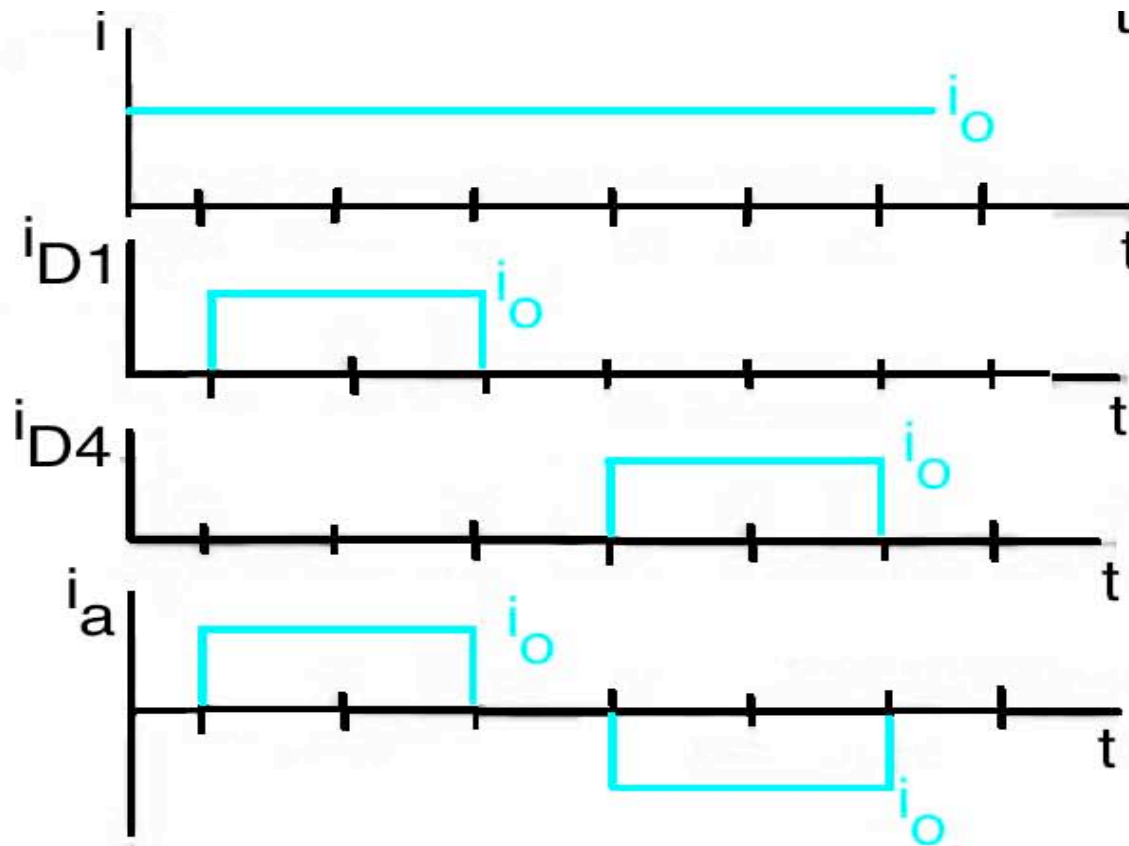


Convertidor puente $q=3$ no controlado.

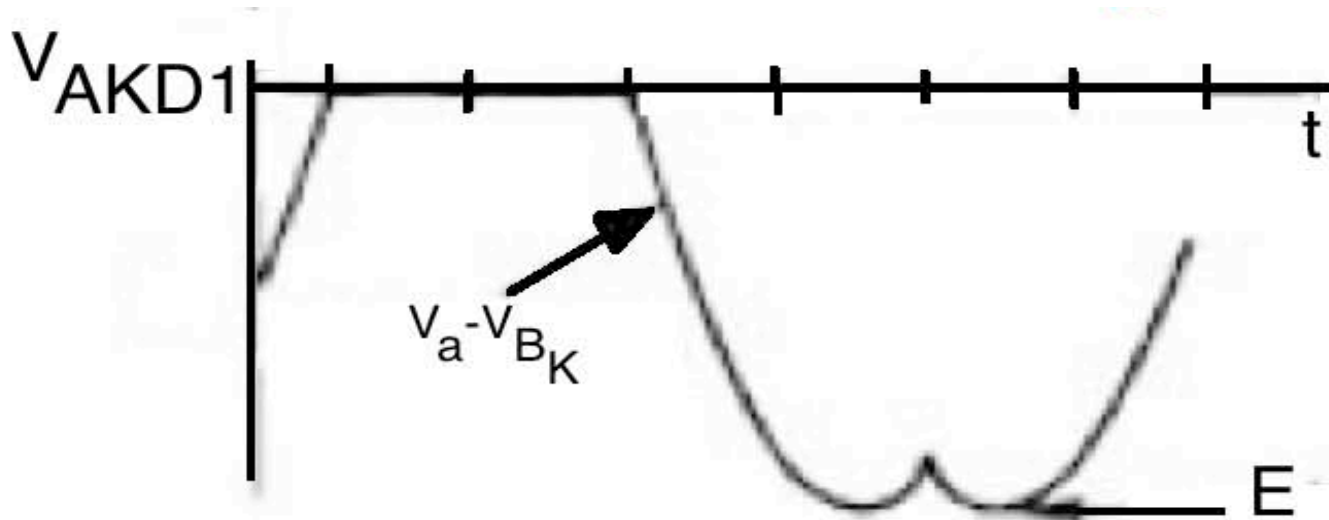
Si se conecta una punta de prueba de osciloscopio a la barra de cátodos (B_K), otra a la barra de ánodos, B_A , con la tierra de referencia de medición en el neutro N y, con una punta de pruebas diferencial, se mide la tensión de salida, V_o ($V_{BK}-V_{BA}$), se observa:



Si se colocan puntas de prueba de corriente en los conductores marcados como i_{D1} (corriente en el diodo 1), i_{D4} (corriente en el diodo 4), e i_a (corriente en la fase a del transformador), se observa:

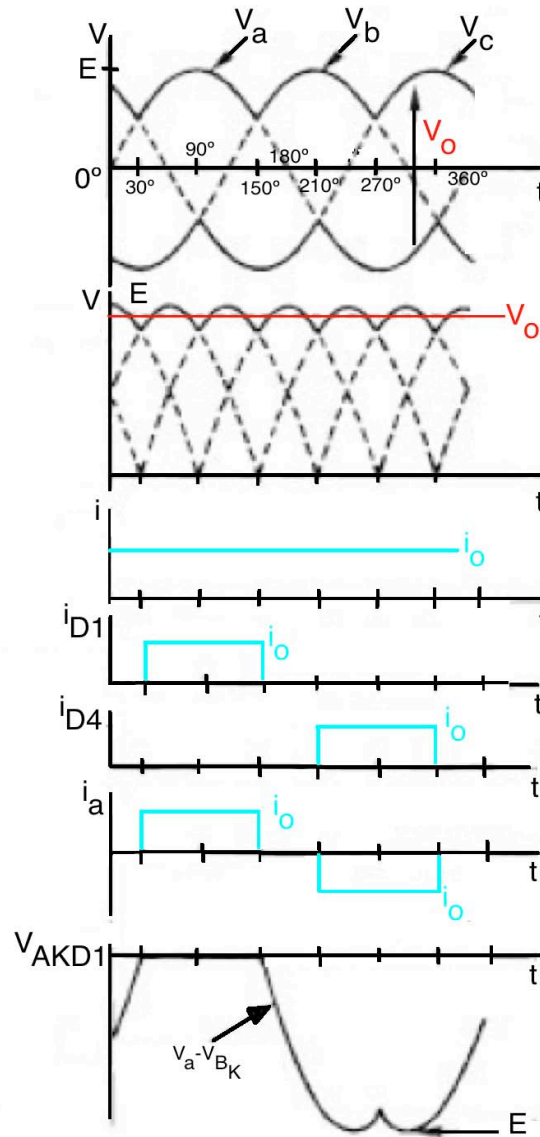


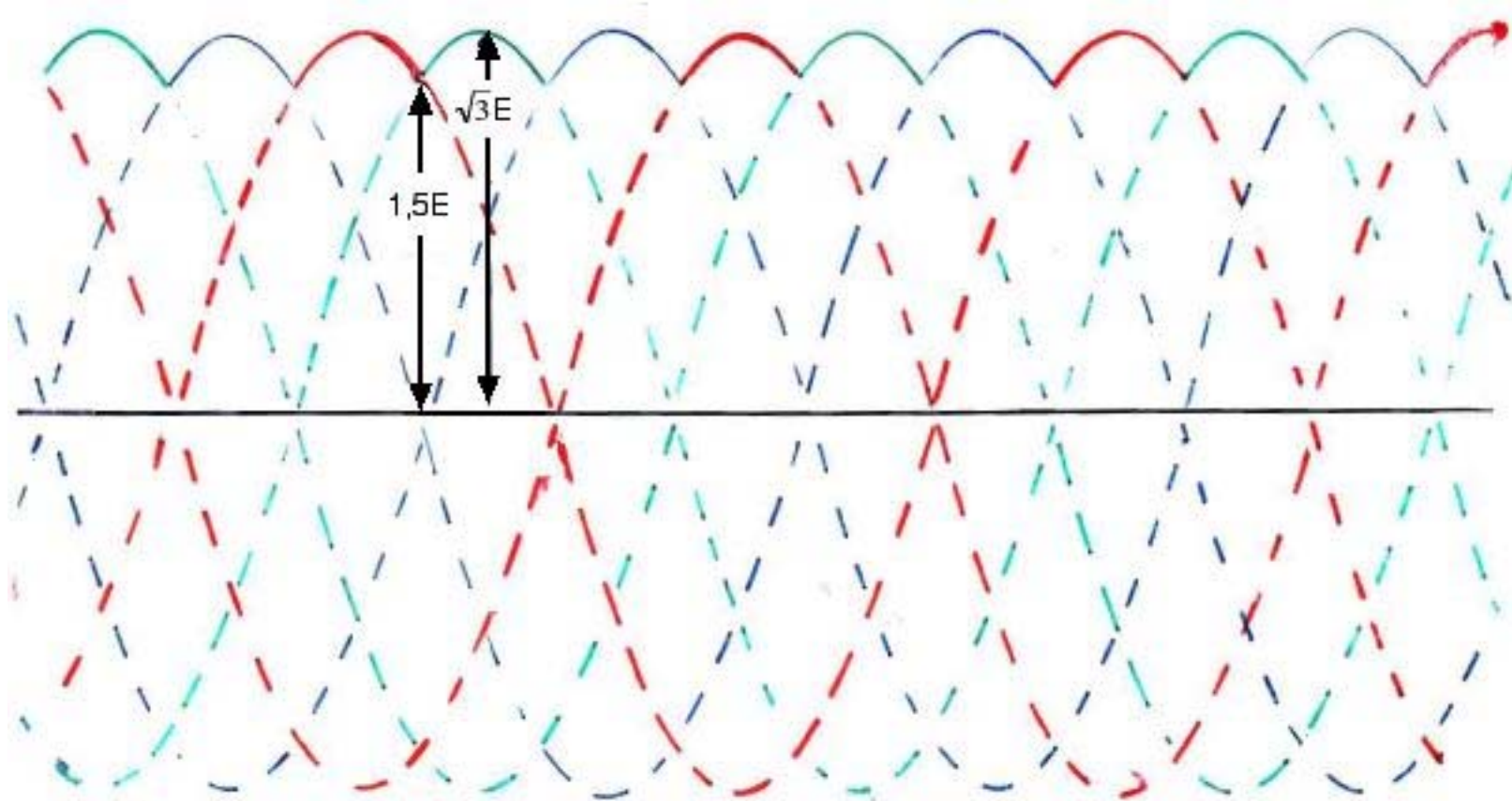
Y, si con otra punta de voltaje diferencial se mide la tensión AK del diodo D_1 , que es igual a $V_a - V_{BK}$, se tiene:



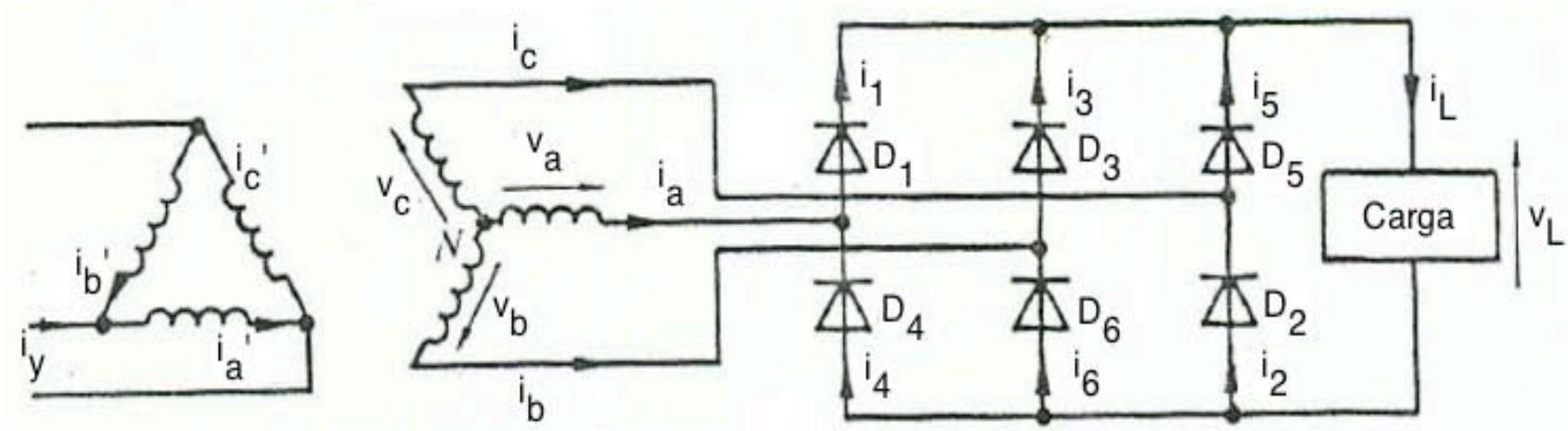
Esta tensión es la misma que deben soportar los diodos o SCRs en un conversor toma central alimentado con la misma tensión de línea

Y, en un sistema de adquisición de 8 canales se podría observar:

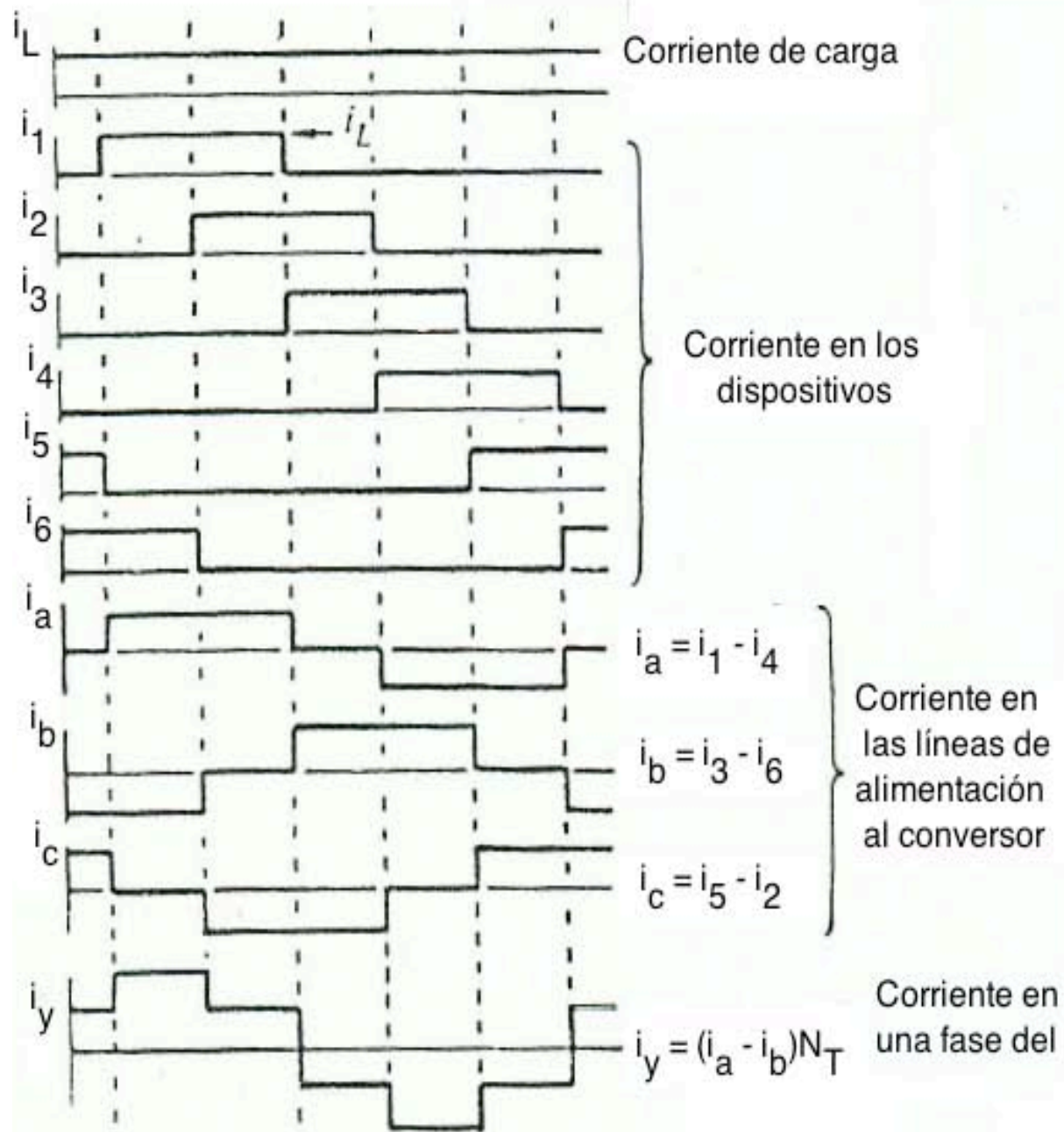




Detalle de la forma de onda de tensión barra-barra, mostrando los valores máximo (pico), $\sqrt{3}E$, y mínimo (valle), $1,5E$. El rizado es $0,232E$



Cada uno de los dispositivos conmutadores conduce durante 120° en cada ciclo de línea, cada pulso tiene una amplitud igual a la corriente de carga, i_L ; la corriente en cada una de las fases que alimenta al puente conversor está formada por un pulso positivo de duración 120° y amplitud i_L , uno negativo de la misma duración y amplitud $-i_L$, separados por intervalos de tiempo muerto de duración 60° .

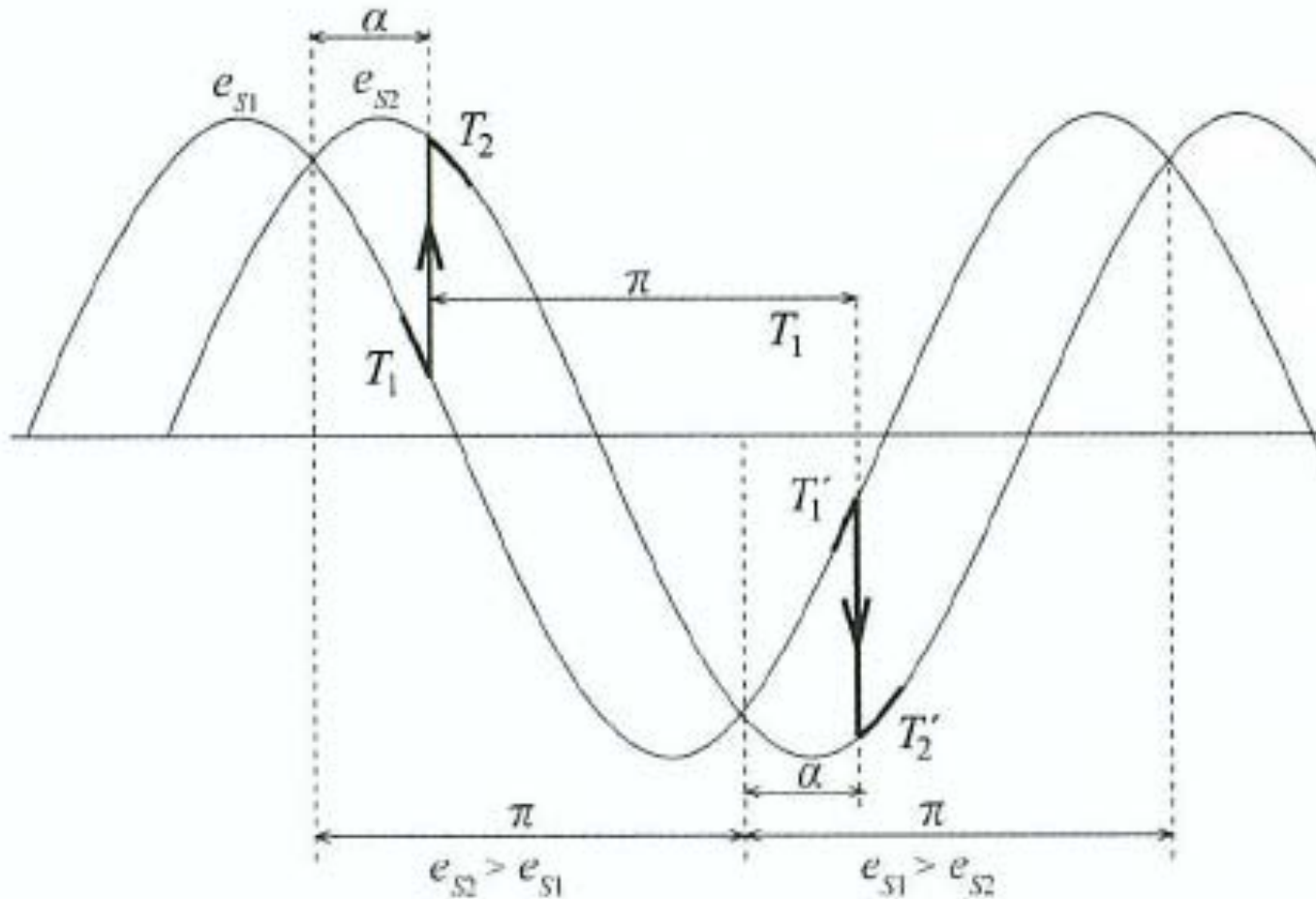


Si el transformador es del tipo Y-Y, la corriente en las líneas de entrada al primario tiene la misma forma que la corriente de salida en cada fase del secundario, multiplicada por la relación de transformación N_T .

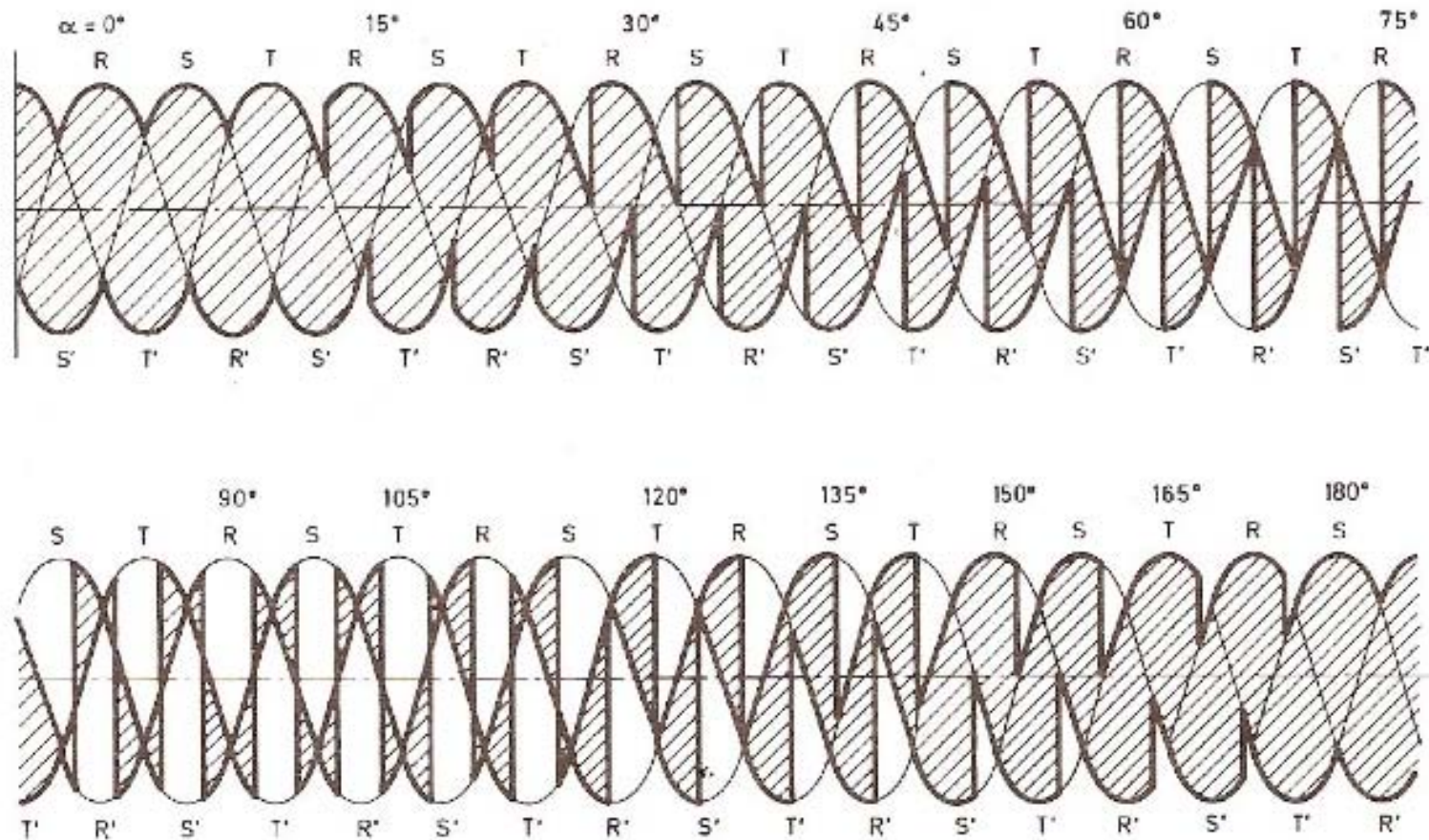
Si es Δ -Y, la corriente en cada línea de entrada al secundario es la suma algebraica de las corrientes de salida en dos de las fases del secundario, multiplicadas por la relación de transformación N_T .

Todas las corrientes en el primario y en el secundario son bipolares pulsantes, sin componente DC.

Analizando en detalle la operación del convertidor puente trifásico completamente controlado, resulta que el rango de conmutación entre dos fases para las parejas de dispositivos asociados es π radianes:



Y, barriendo en todo el rango de α :



Convertidor puente trifásico con carga inductiva.

Tensiones instantáneas de salida barra-neutro en un barrido secuencial del retardo de encendido en todo su rango, desde $\alpha = 0$ hasta $\alpha = \pi$

El área rayada muestra la tensión DC de salida barra-barra en cada caso.

De este experimento mental (que puede ser perfectamente realizado en el laboratorio) resultan las siguientes conclusiones:

1.- El convertidor puente opera como la conexión serie de dos convertidores toma central.

2.- La tensión inversa que deben bloquear los dispositivos electrónicos de control de potencia en el convertidor puente es igual a la que deben soportar los dispositivos en uno de los convertidores toma central.

3.- La tensión sobre la carga es el doble de la tensión que proporciona un convertidor toma central.

4.- En igualdad de corriente, la potencia entregada por el conversor puente es el doble de la entregada por cada uno de los conversores toma central o, para entregar la misma potencia, la corriente necesaria en el conversor puente es la mitad a la necesaria en un conversor toma central.

5.- Cuando se opera con $\alpha=0$, el rizado de voltaje en la salida de conversor puente es aproximadamente $0,232E$, mientras que en el conversor toma central es de $0,5E$.

6.- El intervalo de conducción de cada tiristor es de $\frac{2\pi}{3}$ radianes, esto es, un tercio del ciclo de línea.

7.- La corriente que circula en cada dispositivo electrónico de control de potencia en el convertidor puente es igual a la que circula por cada dispositivo electrónico de control de potencia en uno de los convertidores toma central.

8.-El inicio del pulso de corriente se retrasa con respecto a la referencia de voltaje en un ángulo igual al de retardo de encendido, α .

9.- Operando con una carga capaz de mantener continuidad en la corriente, el rango de variación del retardo de encendido α en radianes es:

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

10.- La corriente en cada una de las fases es efectivamente bipolar pulsante. En cada fase la corriente está formada por un pulso de corriente saliente ("positivo") que circula por el conmutador asociado a la barra de cátodos y uno entrante ("negativo") que circula por el conmutador asociado a la barra de ánodos. Cada pulso tiene una duración de $\frac{2\pi}{3}$ radianes y están separados entre si por dos tiempos muertos de $\frac{\pi}{6}$ radianes.

11.- Dado que la corriente en cada fase del transformador es bipolar simétrica, o presenta componente DC y por lo tanto no crea problemas de saturación en el núcleo magnético.

12.- Dado que no circula corriente por el neutro, esta conexión no es necesaria. El conversor puente puede ser conectado directamente a la línea trifásica.

Por supuesto el conversor puente requiere el doble de conmutadores electrónicos y el doble de circuitos de disparo si se emplean tiristores, pero la tensión de salida aplicada a la carga es el doble y, a igualdad de corrientes de cargas la potencia entregada es el doble; en general el balance de ventajas y desventajas decididamente resulta en que el conversor puente es la mejor configuración AC/DC para controlar motores DC.

Una de las formas mas simples de calcular la relación entre la tensión de salida y el ángulo de retardo de encendido, α , es partir de la relación en la configuración toma central.

En ese caso se tiene:

Tensión de salida barra-neutro, en operación controlada:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} V_{bn}(\tau) d\tau$$

Reemplazando los tres segmentos de conducción:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\frac{2\pi}{3} + \alpha}^{\frac{4\pi}{3} + \alpha} V_{rn}(\tau) d\tau + \int_{\frac{2\pi}{3} + \alpha}^{\frac{4\pi}{3} + \alpha} V_{sn}(\tau) d\tau + \int_{\frac{4\pi}{3} + \alpha}^{2\pi + \alpha} V_{tn}(\tau) d\tau \right]$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\frac{2\pi}{3} + \alpha}^{\frac{4\pi}{3} + \alpha} E_{sen}(\tau) d\tau + \int_{\frac{2\pi}{3} + \alpha}^{\frac{4\pi}{3} + \alpha} E_{sen}\left(\frac{2\pi}{3} + \tau\right) d\tau + \int_{\frac{4\pi}{3} + \alpha}^{2\pi + \alpha} E_{sen}\left(\frac{4\pi}{3} + \tau\right) d\tau \right]$$

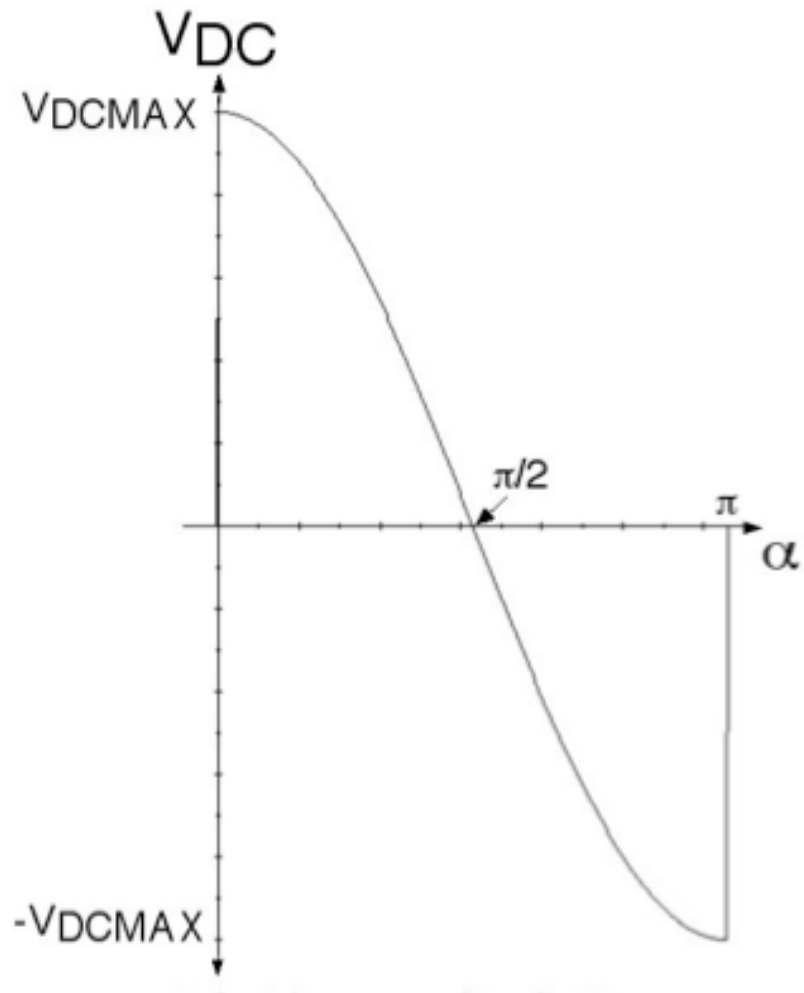
$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} E \sin(\tau) d\tau \right]$$

de donde:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E \cos \alpha$$

Luego, en igualdad de condiciones, el conversor puente q=3 equivalente produce una tensión promedio de salida dada por:

$$V_{dc} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E \cos \alpha \right) - \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} E \cos \alpha \right) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E \cos \alpha$$



Gráfica de la relación normalizada V_{DC} vs. retardo de encendido α , conversor AC/DC puente completamente controlado.

Operando a corriente constante I_{LM} , la potencia real máxima es:

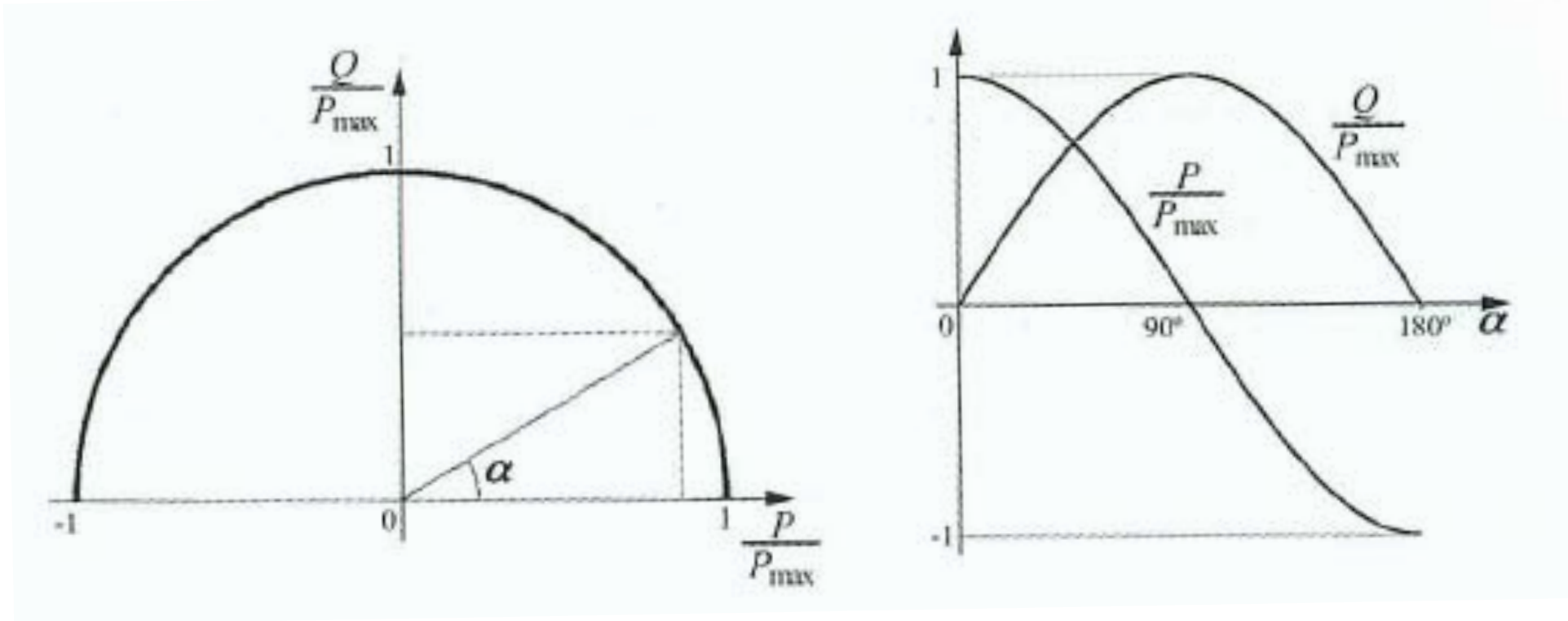
$$P_M = I_{LM} V_{DCMAX} = I_{LM} \frac{3\sqrt{3}E}{\pi}$$

y, en general, cuando se cambia la tensión cambiando el ángulo de retardo de encendido, se cumple:

$$P(\alpha) = P_M \cos \alpha$$

Y, despreciando el efecto de las armónicas de corriente, la potencia reactiva en la frecuencia fundamental resulta:

$$Q(\alpha) = P_M \text{sen} \alpha$$



**Conversor AC-DC completamente controlado.
Diagrama de potencias.**

Este diagrama evidencia uno de los inconvenientes de operar un conversor AC/DC controlado: el factor de potencia cambia en función del ángulo α , alcanzando valores que violan la normativa, lo que obliga a incluir correctores de factor de potencia en instalaciones conversoras AC/DC controladas de potencia significativa.