

Hipótesis análisis simplificadoras iniciales

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.

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.

Circuitos conversores AC/DC con conmutación natural.

Definición.

Los conversores AC/DC con conmutación natural son circuitos conversores cuya matriz de conmutación está formada por un arreglo de conmutadores del primer y/o el segundo tipo (diodos y/o tiristores).

La corriente eléctrica siempre circula en una sola dirección.

Todos los conversores AC/DC permiten el flujo de energía eléctrica del puerto AC al puerto DC; los conversores AC/DC con conmutación natural completamente controlados permiten además el flujo de energía eléctrica del puerto DC al AC.

Cuando la energía fluye del puerto AC al puerto DC el conversor AC-DC está operando como rectificador (operación en modo rectificador).

Cuando la energía fluye del puerto DC al puerto AC el conversor AC-DC esta operando como inversor (operación en modo inversor).

Condiciones necesarias para que un conversor AC/DC completamente controlado pueda operar como Inversor, esto es, para que fluya energía del sistema DC al AC:

I.- El sistema AC debe ser activo, esto es, debe contener generadores independientes que determinen el sistema q-fásico de tensiones alternas.

II.- El sistema DC debe ser activo, esto es, contener fuentes independientes de energía DC (dinamos o baterías), o reactivo energizado, esto es, contener elementos reactivos que tengan energía almacenada.

Clasificación de los convertidores AC/DC con conmutación natural

I.- Por la topología:

1-Convertidores toma central.

a.- De barra de cátodo

b.- De barra de ánodo

2- Convertidores puente.

II.- Por la capacidad de control:

1.- Convertidores no controlados.

2.- Convertidores completamente controlados.

3.- Convertidores semi-controlados.

Conversores toma central.

Cada una de las líneas de entrada del puerto AC esta conectada a una fase de un sistema AC conectado en estrella.

La matriz de conmutación contiene una sola válvula conmutadora por cada línea de entrada.

La corriente en cada una de las fases del sistema AC de alimentación es unidireccional.

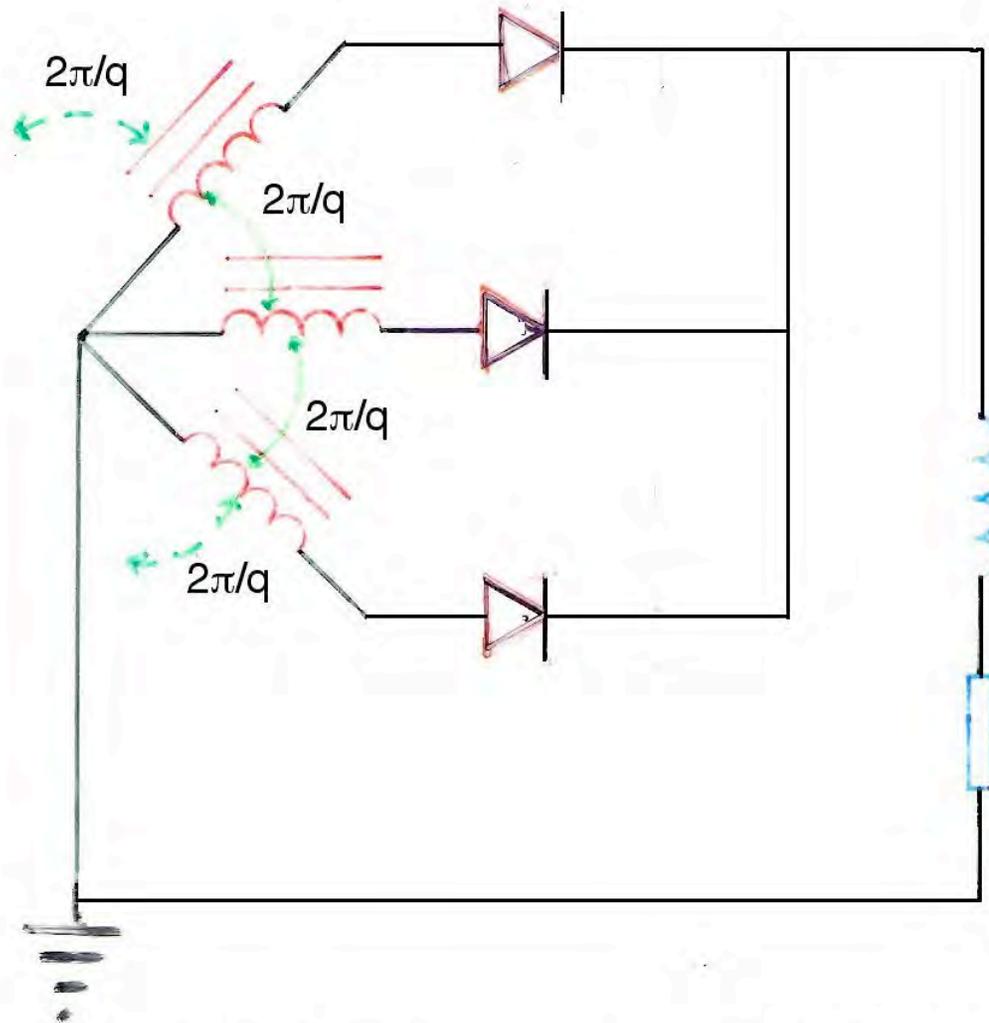
Conversores toma central de barra de cátodo.

Los cátodos de todas las válvulas conmutadoras están conectadas a la misma barra del puerto DC de salida (barra de cátodos).

La carga esta conectada entre la barra de cátodos y el neutro del sistema AC de alimentación.

La corriente sale del conversor por la barra de cátodos y regresa por la conexión de tierra (salida positiva).

La tensión en la carga está referida a la tierra del sistema AC.



Conversor AC/DC toma central de barra de cátodo q-fásico

Convertidores toma central de barra de ánodo.

Los ánodos de todas las válvulas conmutadoras están conectadas a la misma barra del puerto DC de salida (barra de ánodos).

La carga esta conectada entre el neutro del sistema AC de alimentación y la barra de ánodos.

La corriente sale del convertidor por la conexión de tierra y regresa por la barra de cátodos (salida negativa).

La tensión en la carga está referida a la tierra del sistema AC.

Conversores puente.

Cada una de las líneas de entrada del puerto AC esta conectada a una fase de un sistema AC.

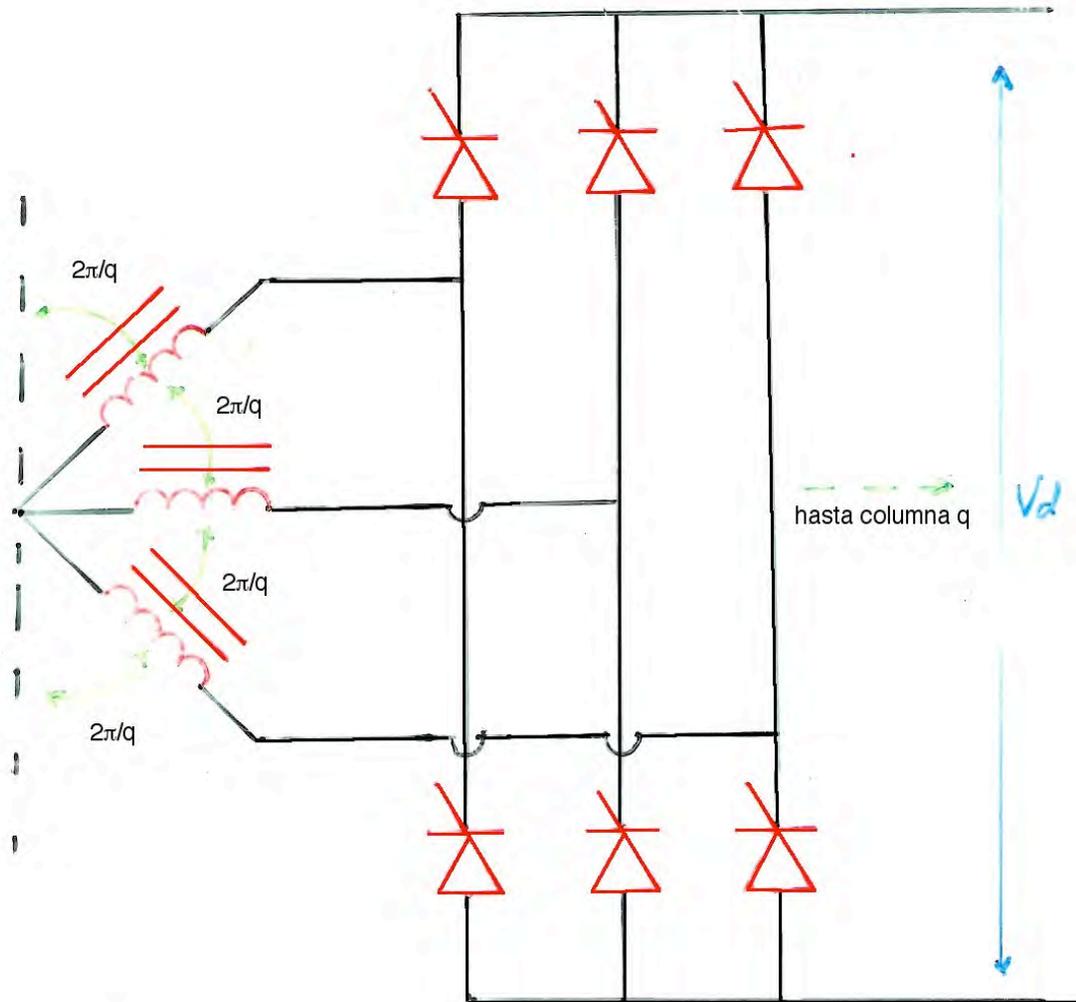
La matriz de conmutación contiene dos válvulas conmutadoras por cada línea de entrada.

Los ánodos de una válvula de cada línea de entrada están conectados a la barra de ánodos del puerto de salida.

Los cátodos de una válvula de cada línea de entrada están conectados a la barra de cátodos del puerto de salida.

La corriente en cada una de las líneas AC es bipolar.

La carga esta conectada entre la barra de cátodos y la barra de ánodos del puerto de salida y flota con respecto a la tierra del sistema AC.



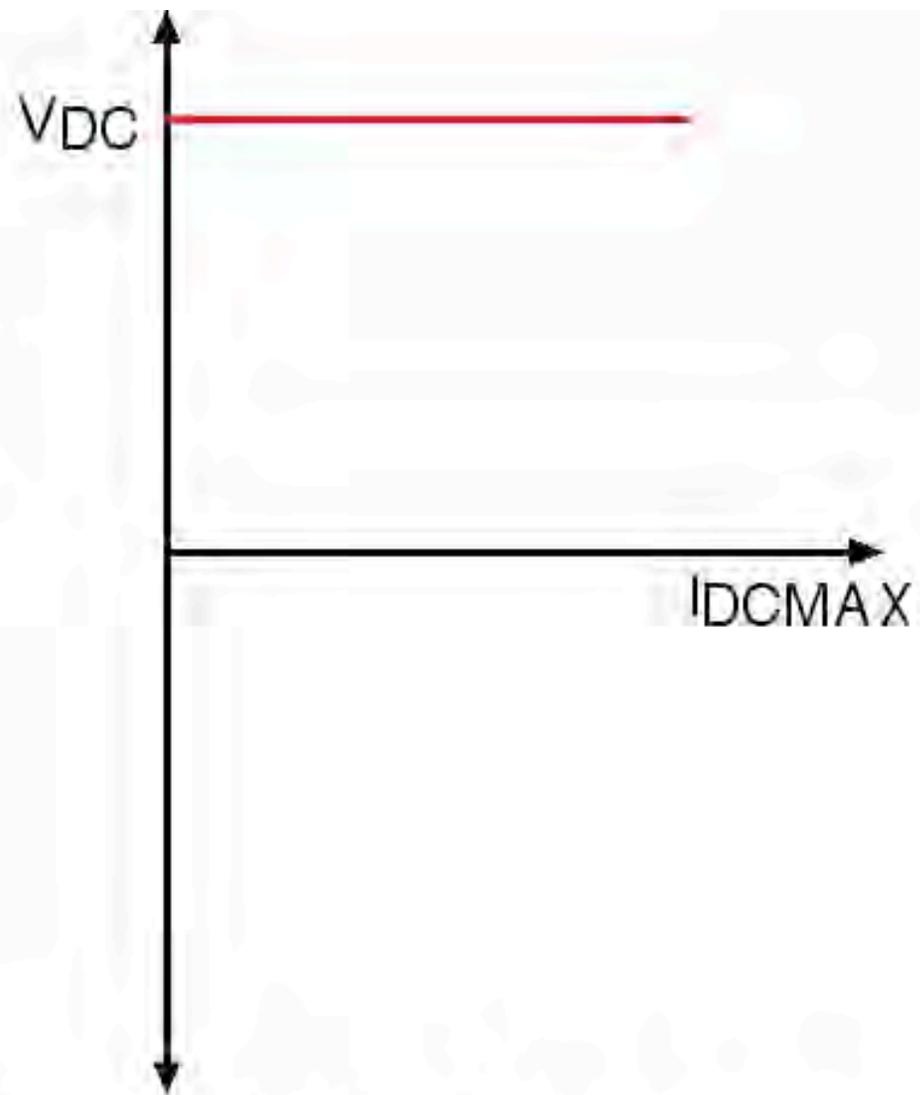
Conversor AC/DC puente q-fásico

Conversores no controlados.

La matriz de conmutación esta formada únicamente por conversores del primer tipo (diodos) y por lo tanto la tensión de salida depende exclusivamente de la tensión de entrada y de la topología del conversor.

El conversor opera a tensión de salida constante.

El conversor solo opera como rectificador.



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

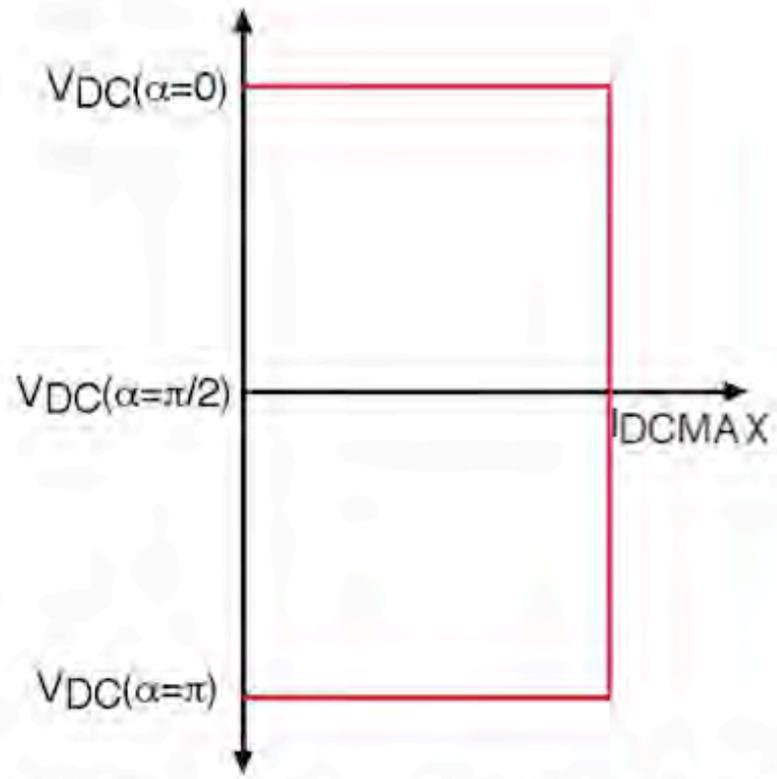
Convertidores completamente controlados.

La matriz de conmutación esta formada únicamente por convertidores del segundo tipo (tiristores).

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

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

En estas condiciones el conversor opera como rectificador, cuando genera tensión de salida positiva y como inversor, cuando genera tensión de salida negativa.



Características ideales voltaje/corriente de salida de un conversor completamente controlado

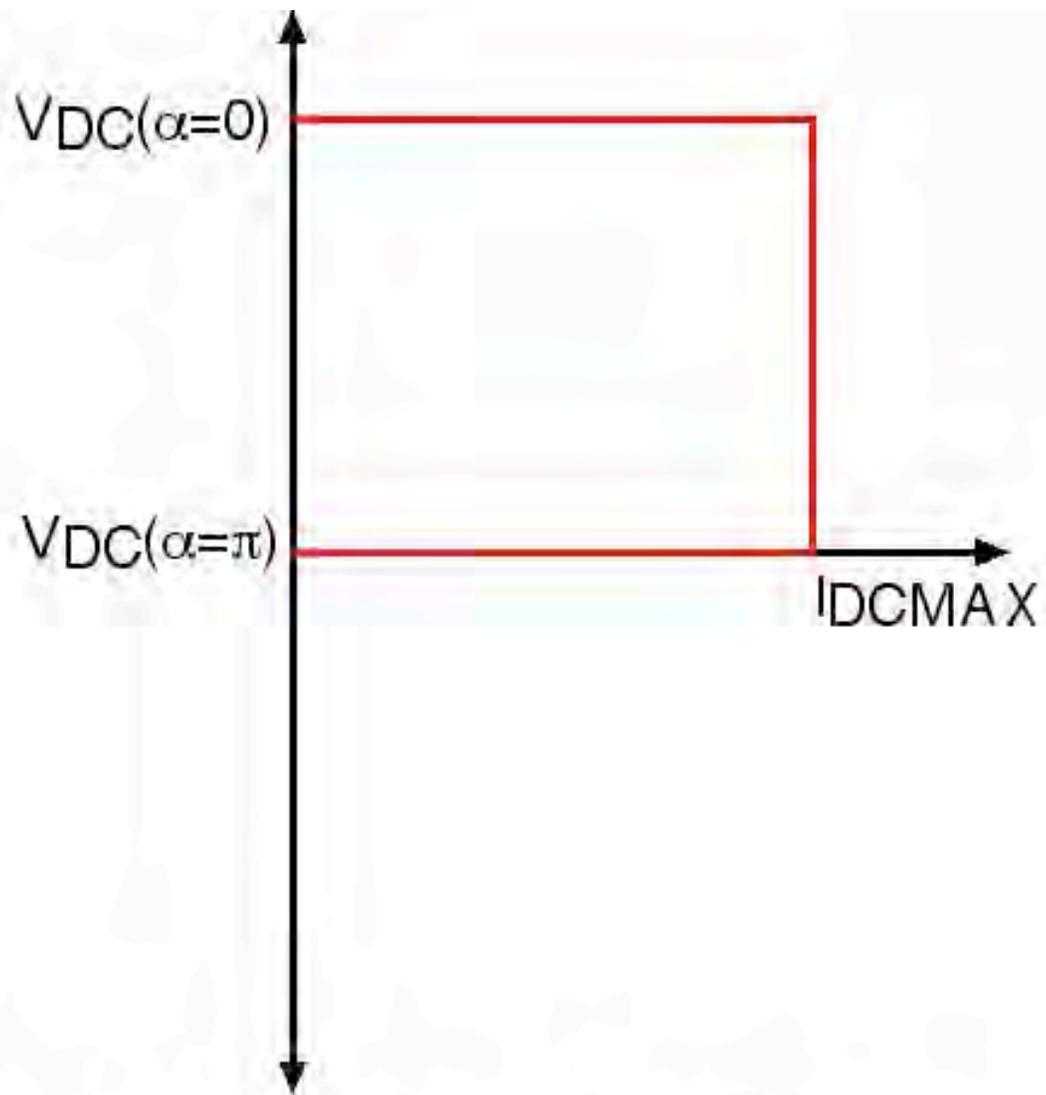
Conversores semi-controlados.

La matriz de conmutación esta formada por conversores del primer y del segundo tipo.

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

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

El conversor opera solamente como rectificador.



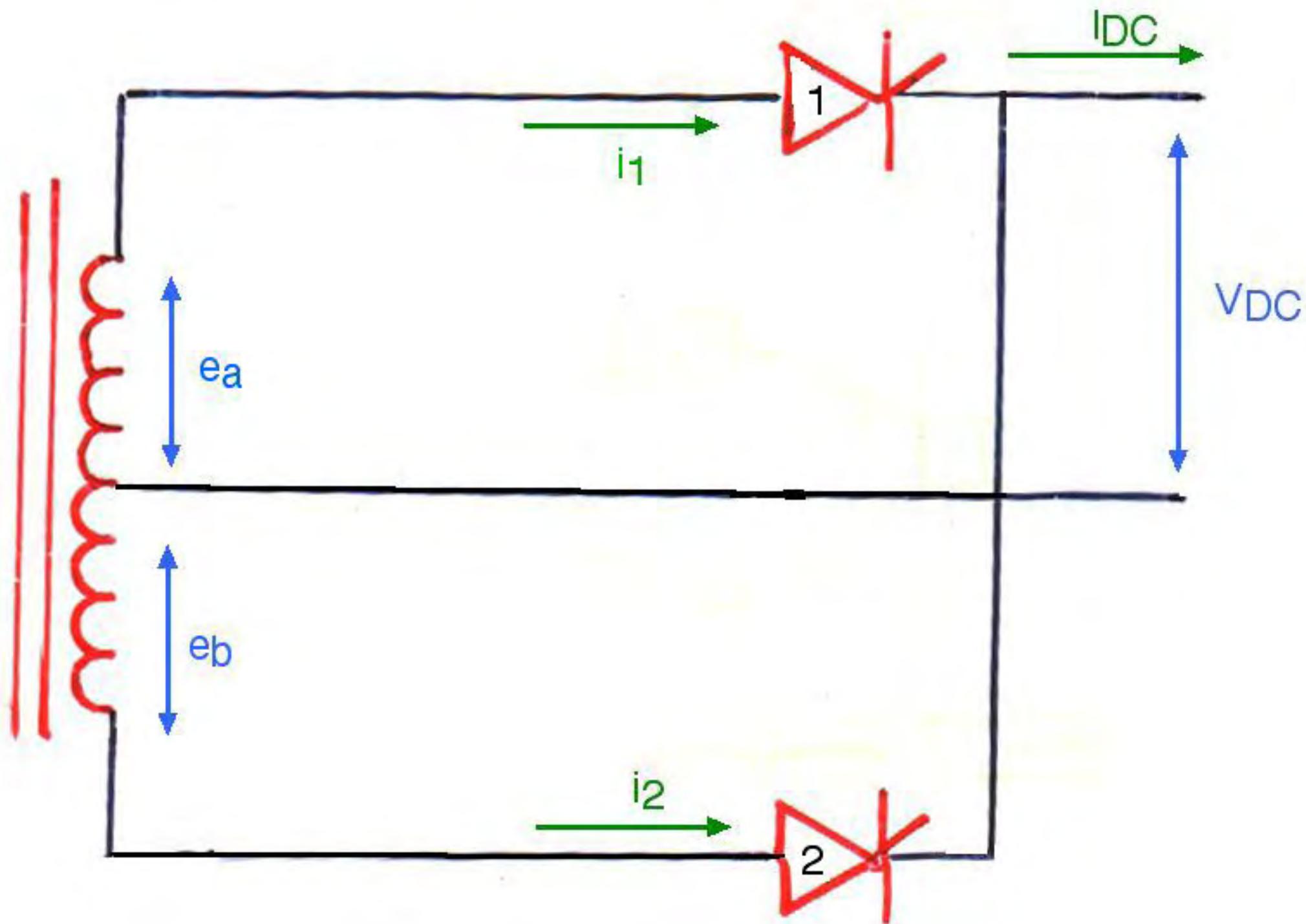
Características ideales voltaje/corriente de salida de un conversor semi controlado

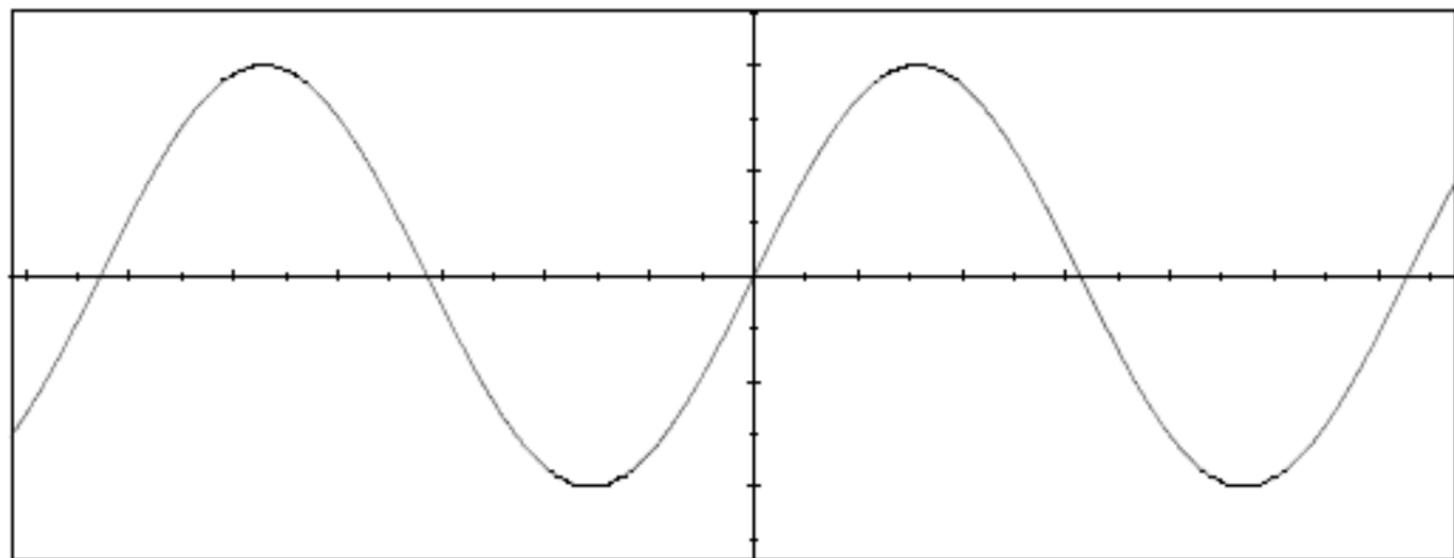
Análisis de circuitos conversores AC/DC con conmutación natural tipo toma central con cargas inductivas ideales.

Configuraciones no controlada y completamente controlada.

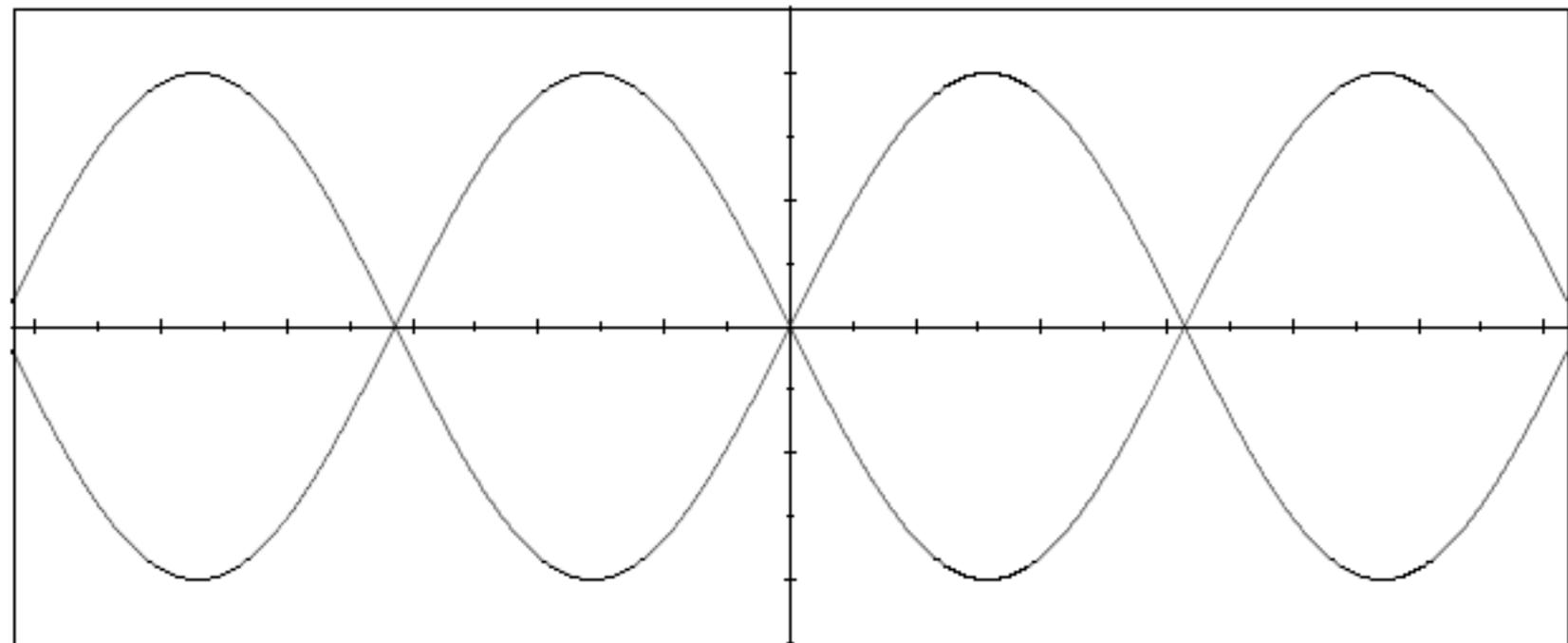
Circuitos conversores AC/DC con conmutación natural tipo toma central $q=2$ con cargas inductivas ideales.

Configuraciones no controlada y completamente controlada.

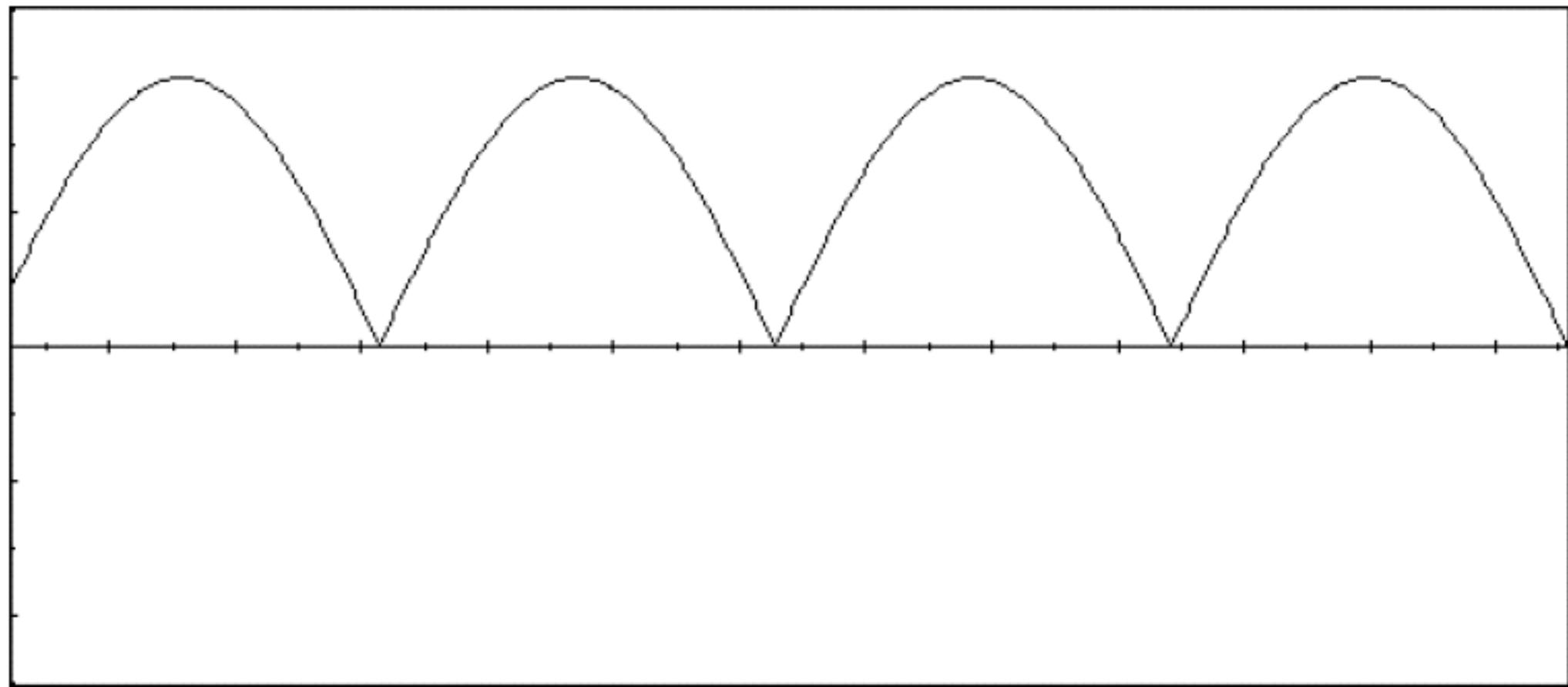




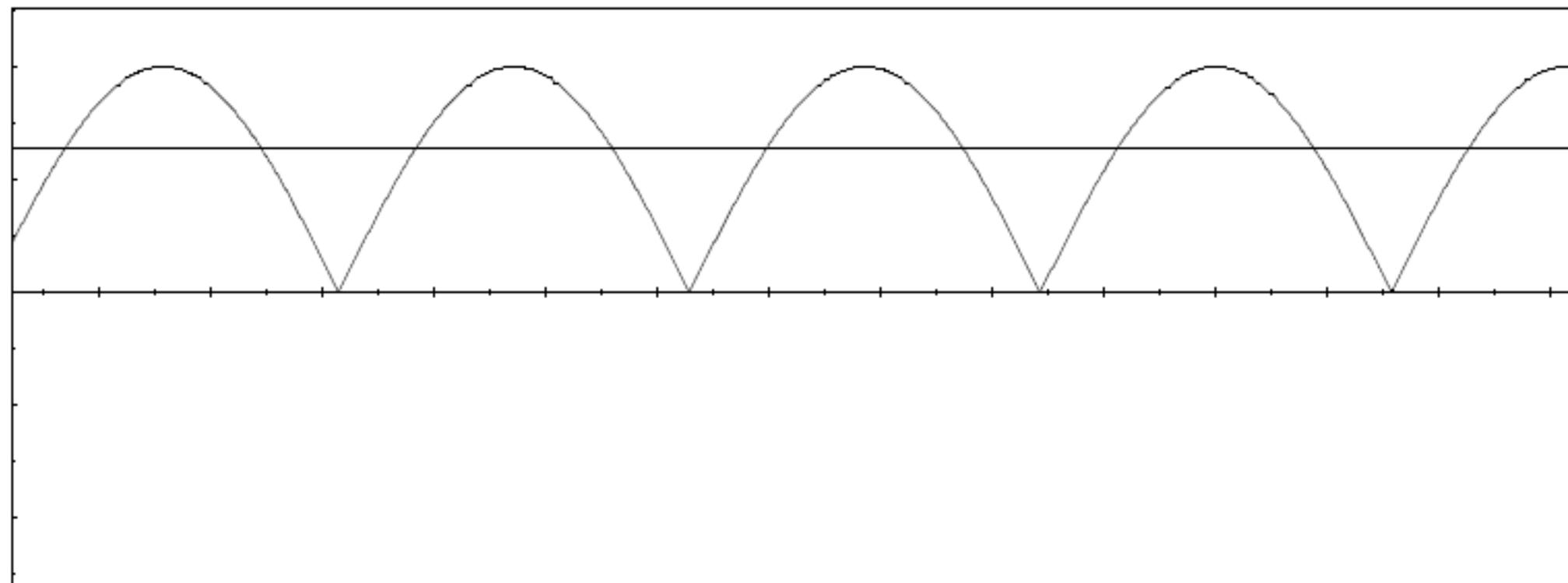
Convertor monofásico toma central, tensión de línea de alimentación al primario del transformador



Convertor monofásico toma central, formas de onda de tensión en los bobinados del secundario del transformador de entrada, referidas a la toma central.

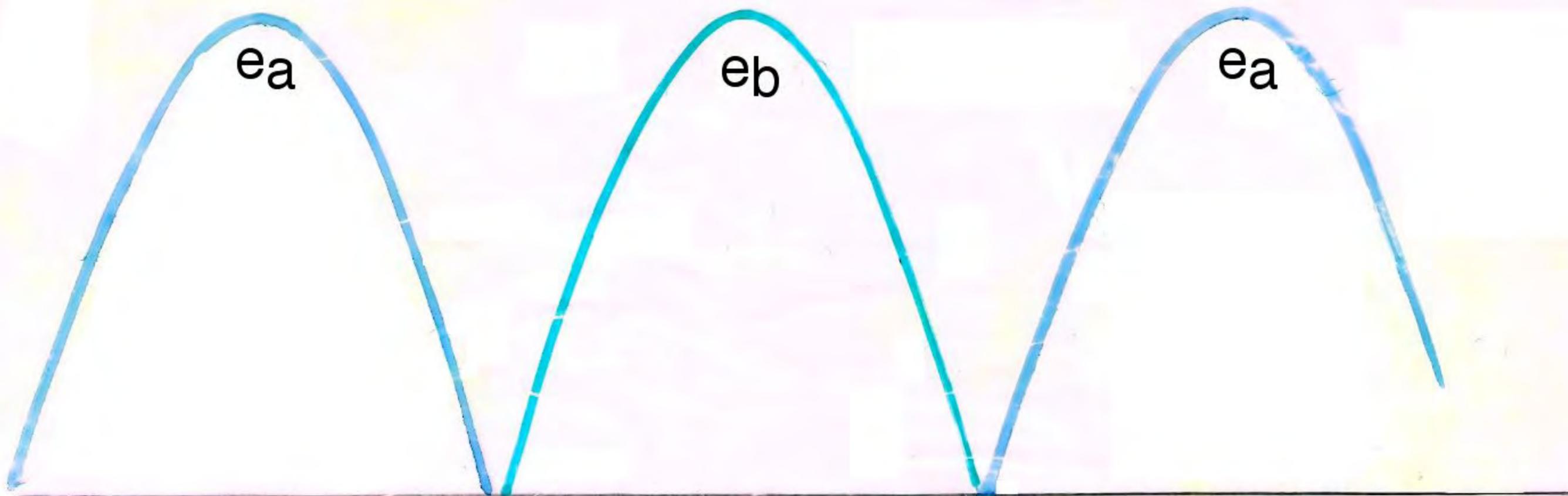


Tensión en la barra de salida, conversor monofásico toma central, con barra de cátodos $\alpha = 0$.

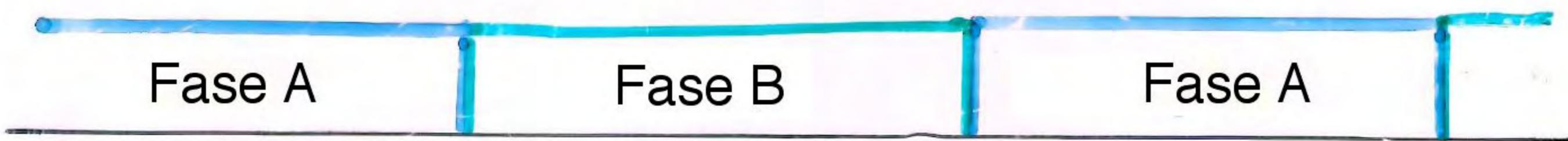


Tensión de salida “barra-neutro “, conversor AC/DC monofásico toma central, en configuración “barra de cátodos”, retardo de encendido $\alpha=0$.

La línea continua marca el valor promedio (“contenido dc”) de la tensión barra-neutro.



Convertidor toma central $q=2$
Tensión barra-neutro $\alpha=0$

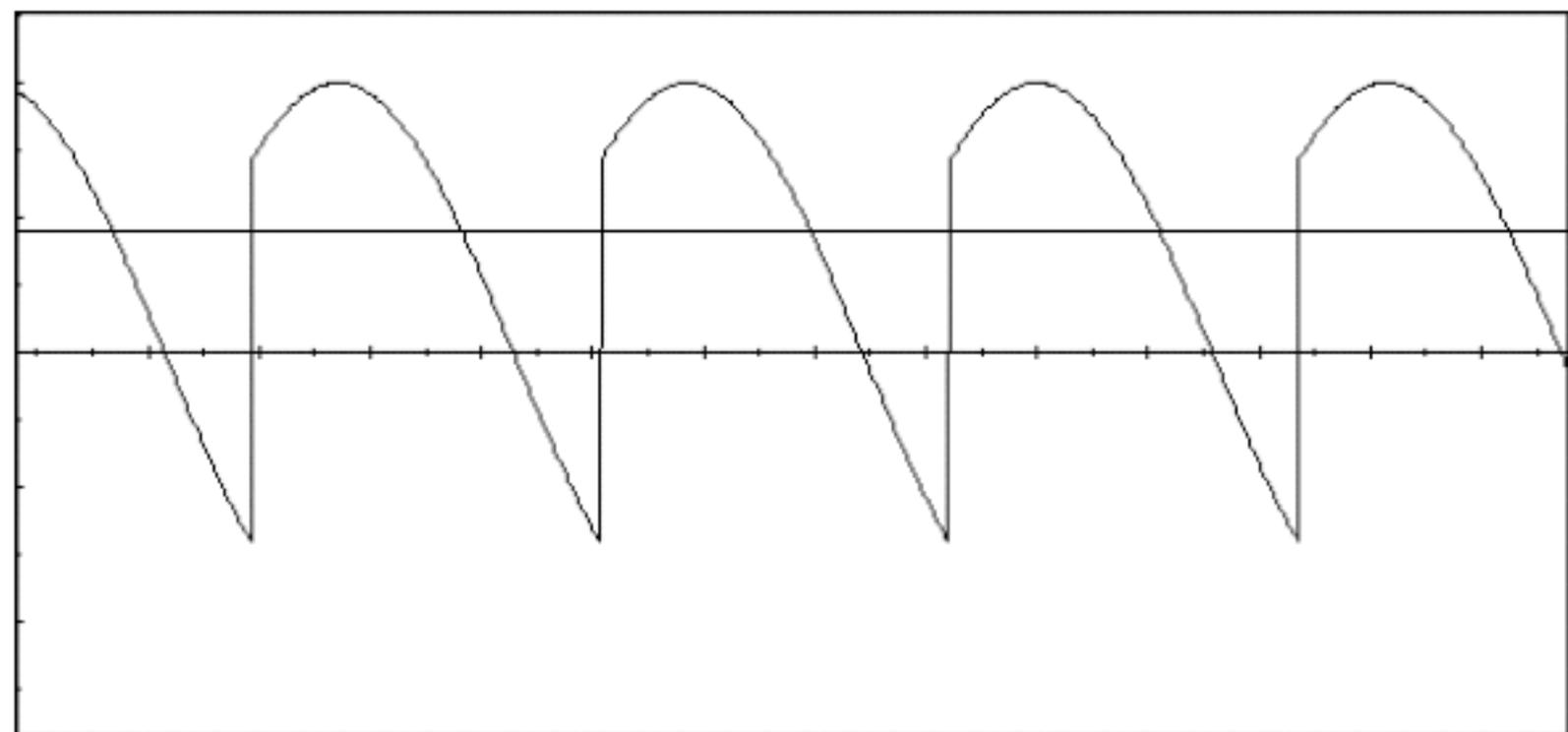


Convertidor toma central $q=2$
Corriente en la carga y en las fases.

Condiciones necesarias para que un conversor AC/DC completamente controlado pueda operar como Inversor (esto es, para que fluya energía del sistema DC al AC)

I.- El sistema AC debe ser activo, esto es, debe contener generadores independientes que determinen el sistema q-fásico de tensiones alternas.

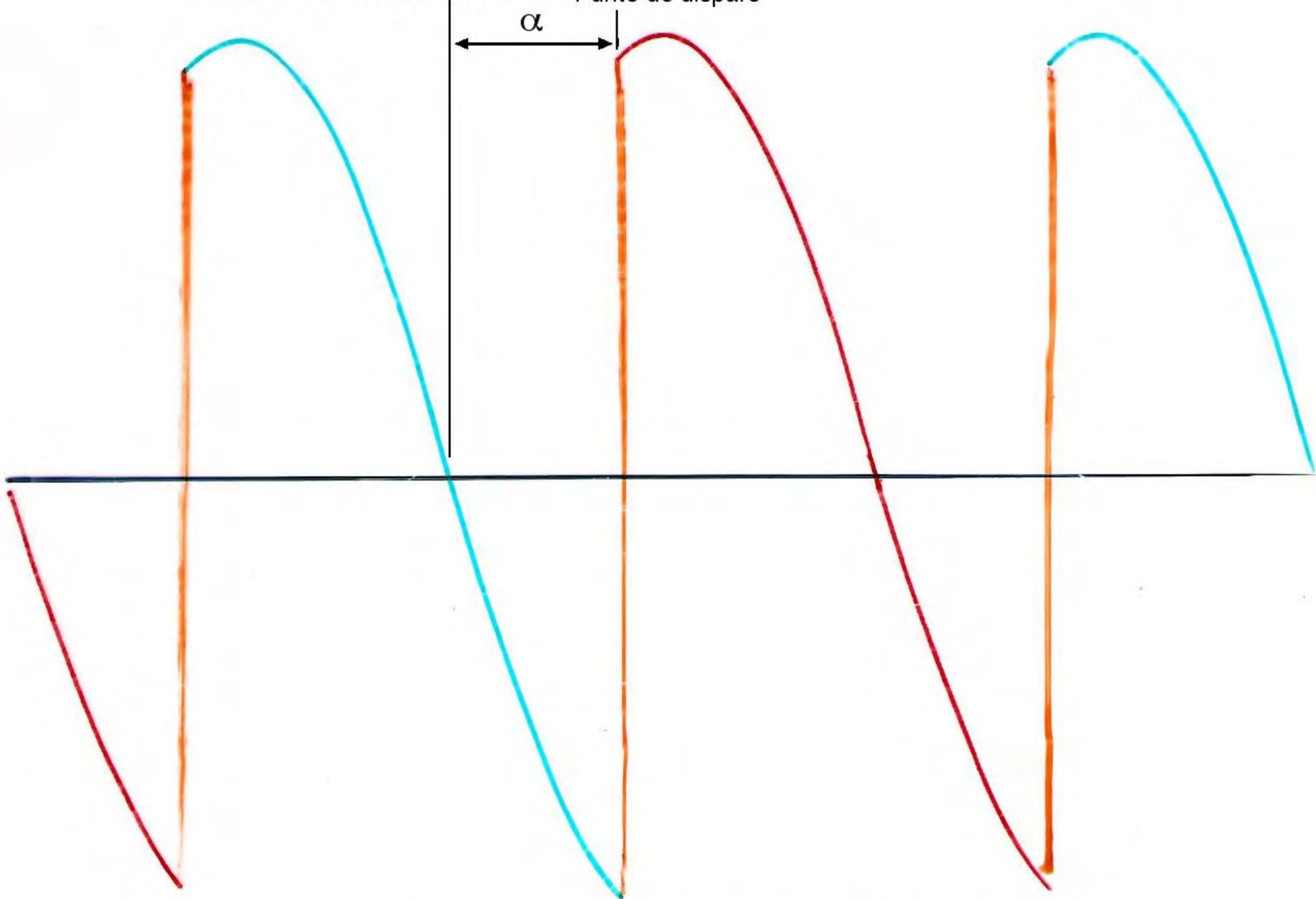
II.- El sistema DC debe ser activo, esto es, contener fuentes independientes de energía DC (dinamos o baterías), o reactivo energizado, esto es, contener elementos reactivos que tengan energía almacenada.



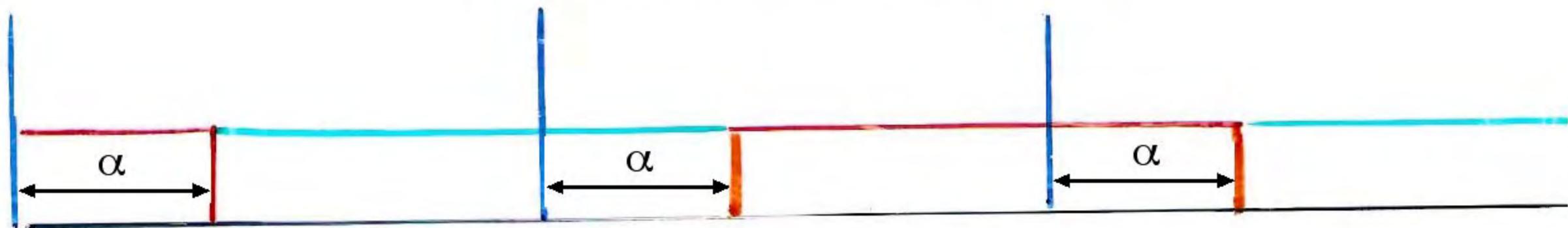
Tensión de salida “barra-neutro “, conversor AC/DC monofásico toma central, en configuración “barra de cátodos”, retardo de encendido $\alpha=\pi/4$.

La línea continua marca el valor promedio (“contenido dc”) de la tensión barra-neutro.

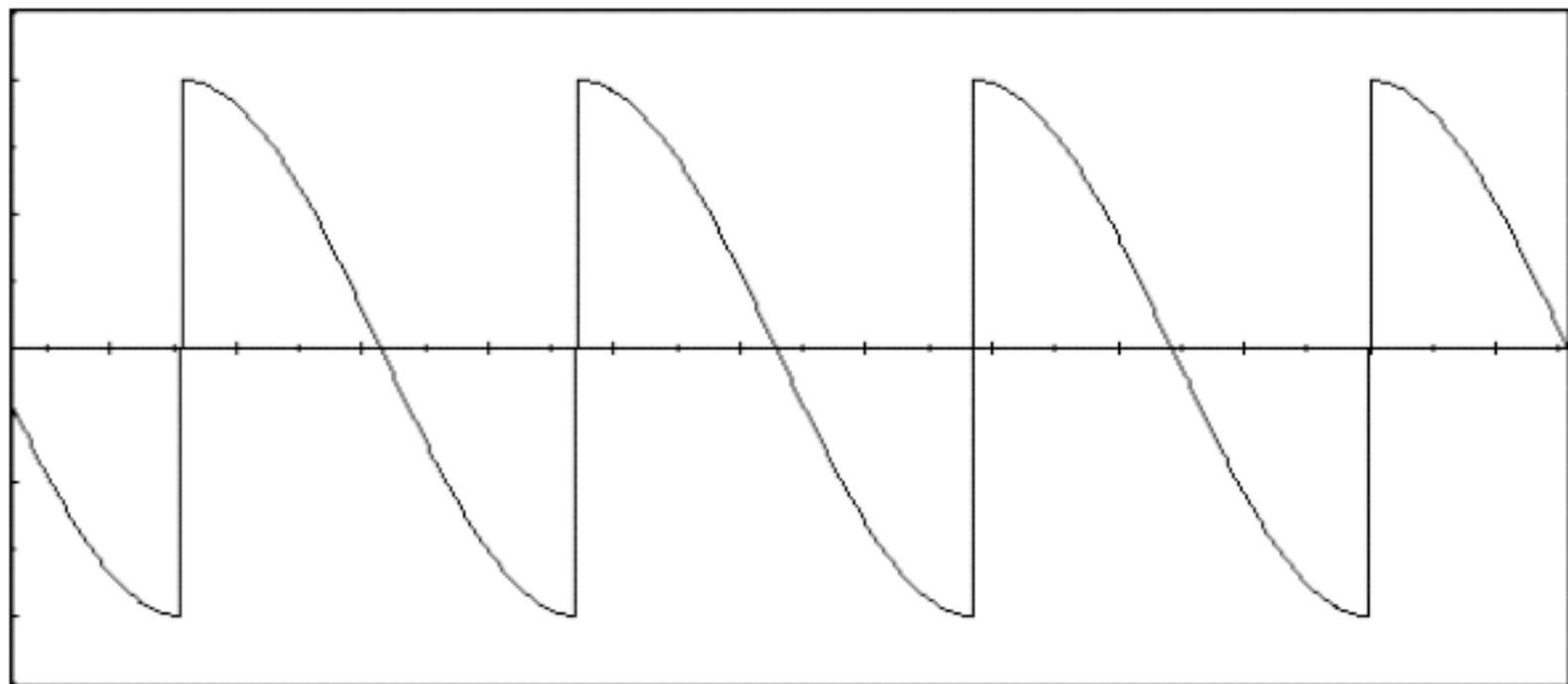
Punto conmutación natural Punto de disparo



Formas de onda de tensión $\alpha < \pi/2$

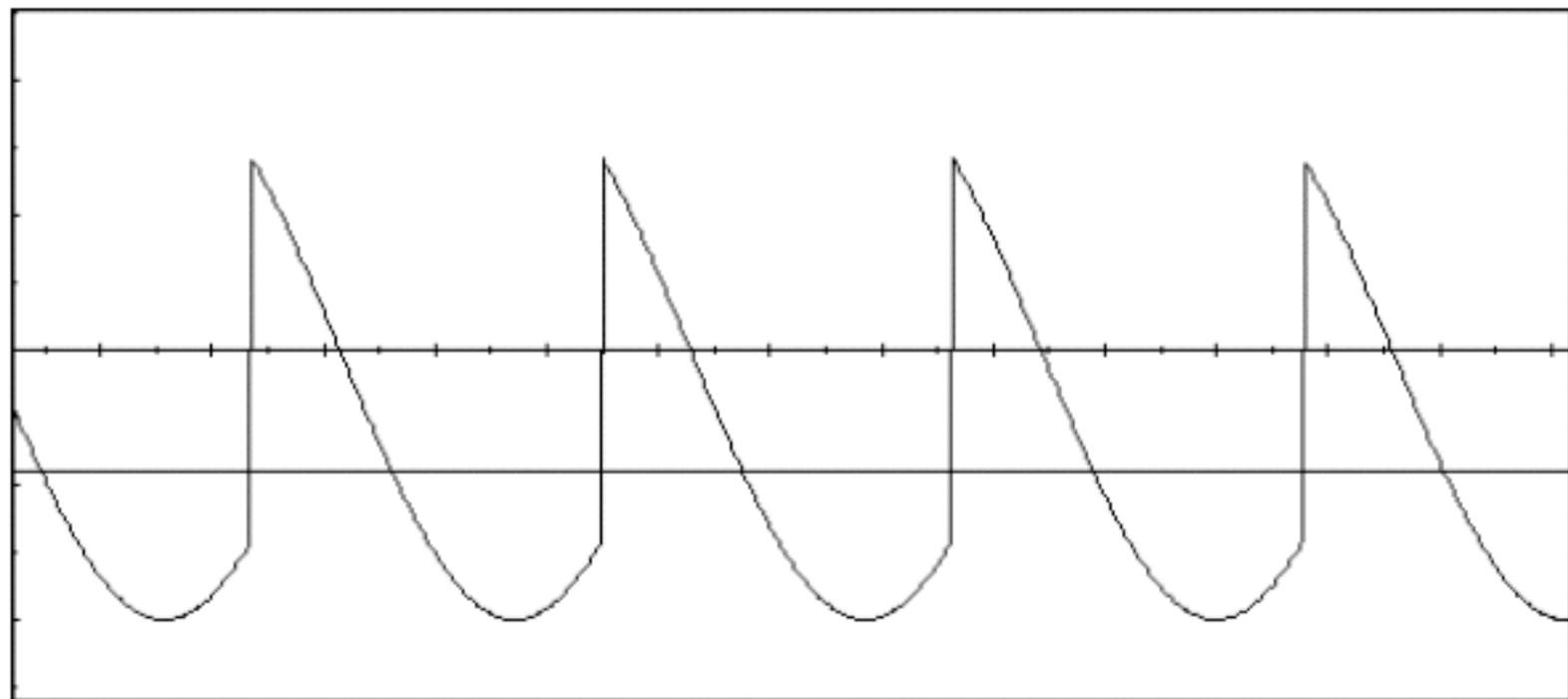


Formas de onda de corriente $\alpha < \pi/2$



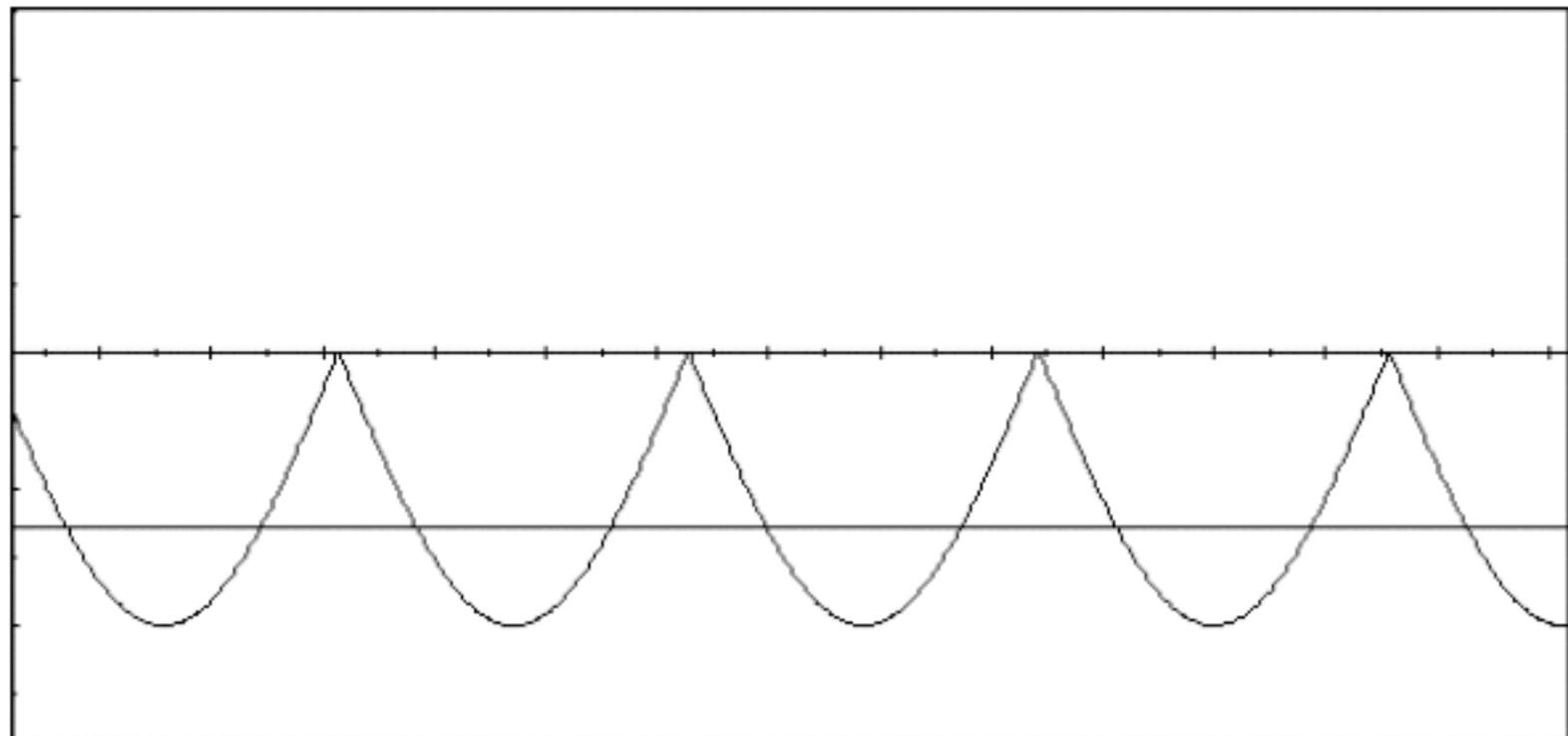
Tensión de salida “barra-neutro “, conversor AC/DC monofásico toma central, en configuración “barra de cátodos”, retardo de encendido $\alpha = \pi/2$.

La línea continua marca el valor promedio (“contenido dc”) de la tensión barra-neutro.



Tensión de salida “barra-neutro”, conversor AC/DC monofásico toma central, en configuración “barra de cátodos”, retardo de encendido $\alpha=3\pi/4$.

La línea continua marca el valor promedio (“contenido dc”) de la tensión barra-neutro.



Tensión de salida “barra-neutro”, conversor AC/DC monofásico toma central, en configuración “barra de cátodos”, retardo de encendido $\alpha = \pi$.

La línea continua marca el valor promedio (“contenido dc”) de la tensión barra-neutro.

La tensión barra-neutro es:

$$V_{bn} = E \sin \omega t$$

Para calcular la tensión promedio de salida, la ecuación a integrar es:

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} (E \sin \omega \tau) d\tau = \frac{2E}{\pi} \cos \alpha$$

Convertidor toma central, $q=2$, resumen de las características (promedio)

1- La tensión de salida promedio, V_{dc} es:

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

2-En el intervalo de control $0 \leq \alpha < \pi/2$ la tensión promedio es positiva y decrece monótonamente. En este intervalo la potencia promedio es positiva, lo que indica que la energía fluye del circuito AC al DC y el convertidor está operando como rectificador.

3-Para $\alpha = \pi/2$ la tensión de salida promedio se anula.

4-En el intervalo de control $\pi/2 < \alpha < \pi$ la tensión de salida promedio es negativa y su módulo crece monótonamente. En este intervalo la potencia promedio es negativa, lo que indica que la energía fluye del circuito DC al AC, y el convertidor está operando como inversor sincrónico.

5-La frecuencia de rizado en la tensión DC, f_r , es el doble de la frecuencia de línea, f_l .

$$f_r = 2f_l$$

Conversor toma central, $q=2$, resumen de las características (instantáneas)

1-Para $\alpha = 0$ la salida alcanza un valor máximo positivo, V_{dcmax} , dado por:

$$V_{dcmax} = \frac{2E}{\pi}$$

2-La tensión instantánea es negativa para $0 \leq \omega\tau \leq \alpha$.

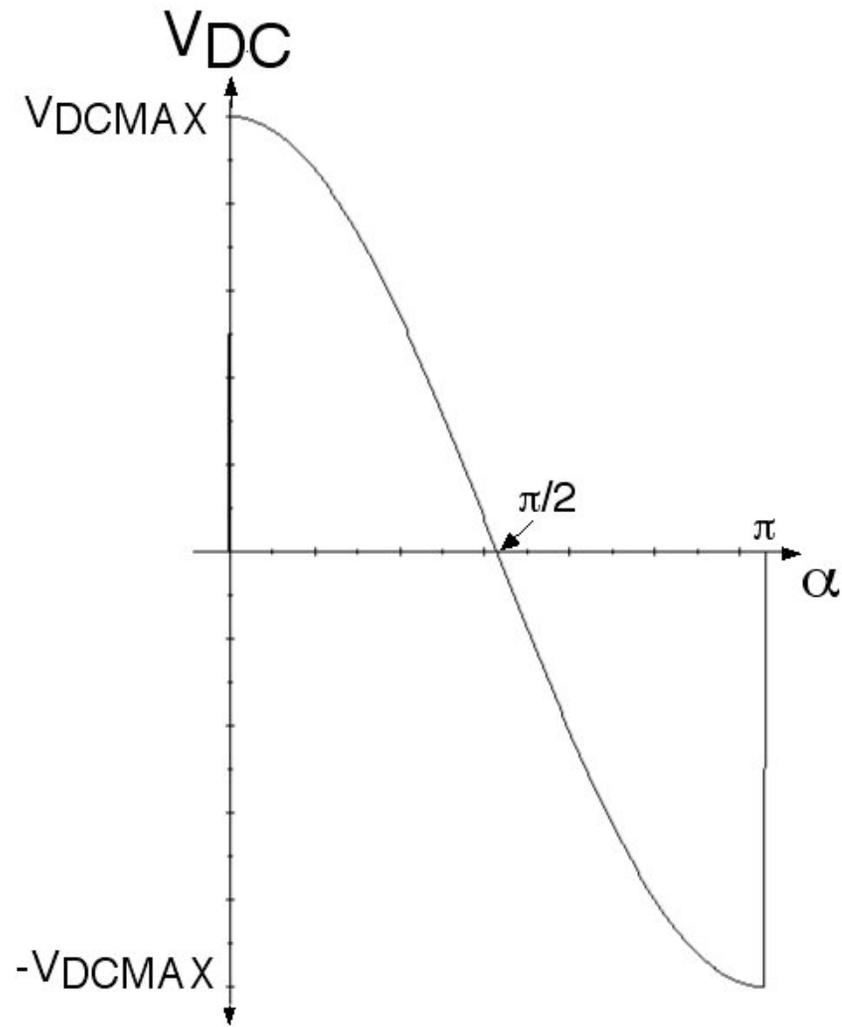
3-Para $\alpha = \pi/2$ la tensión instantánea barre todo el rango posible, desde $+E$ hasta $-E$.

4-Para $\alpha = \pi$ la tensión de salida instantánea alcanza un valor negativo máximo igual a $-V_{dcmax}$.

5-En el intervalo de conducción τ ($\alpha \leq \tau \leq \pi + \alpha$) la corriente en el dispositivo de control y la fase que conduce es igual al valor de la corriente de carga, I_{DC} .

6-En el intervalo de no conducción, la corriente en el dispositivo de control y la fase que no conduce es igual a 0.

7- La tensión máxima (directa e inversa) que debe bloquear cada válvula rectificadora es $2E$.



Relación normalizada V_{DC} vs. α ,
Convertor completamente
controlado

Análisis de circuitos conversores AC/DC con conmutación natural tipo toma central con cargas inductivas ideales.

Configuraciones semicontroladas.

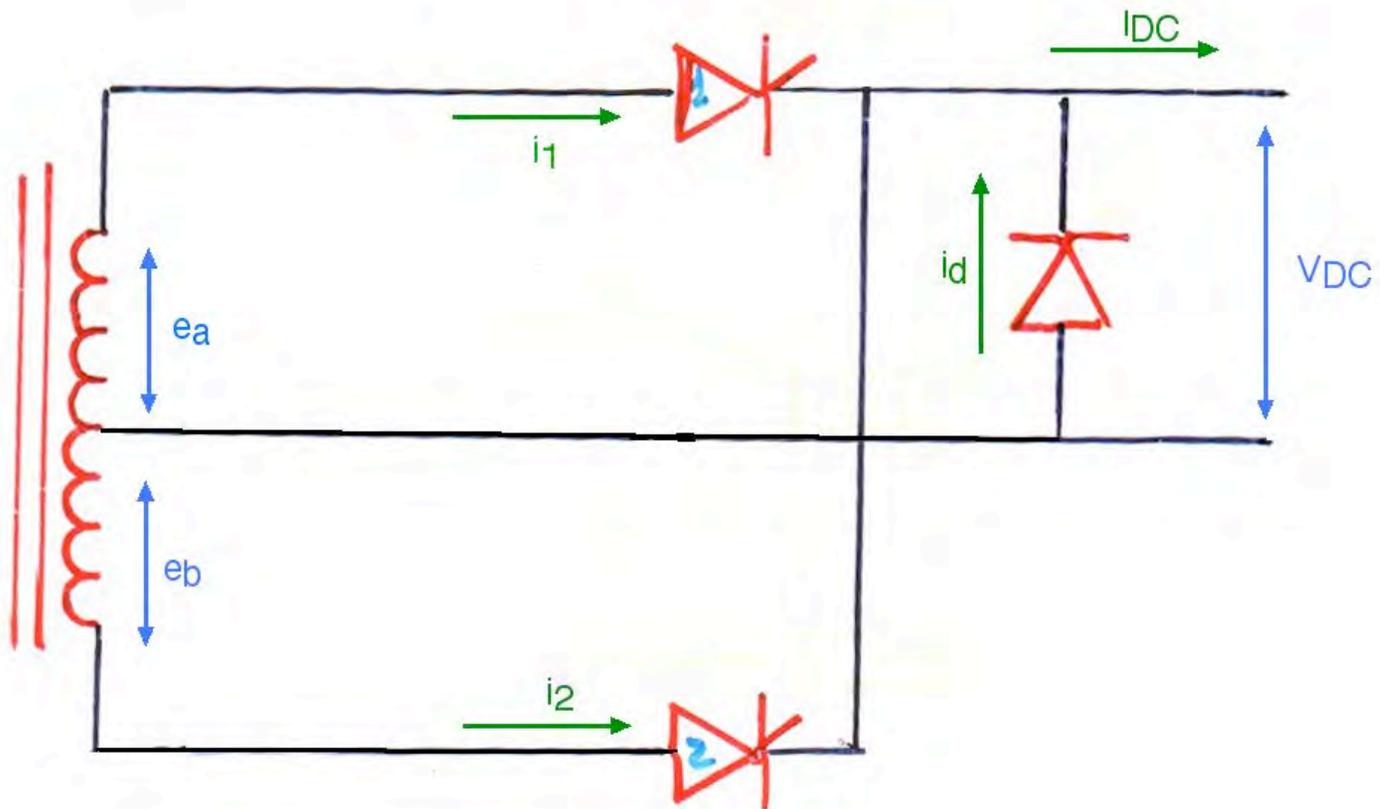
Estructura general de un conversor toma central semicontrolado.

En cada caso el conversor toma central semicontrolado se implementa colocando un diodo de libre conducción en antiparalelo en la salida del conversor toma central completamente controlado correspondiente.

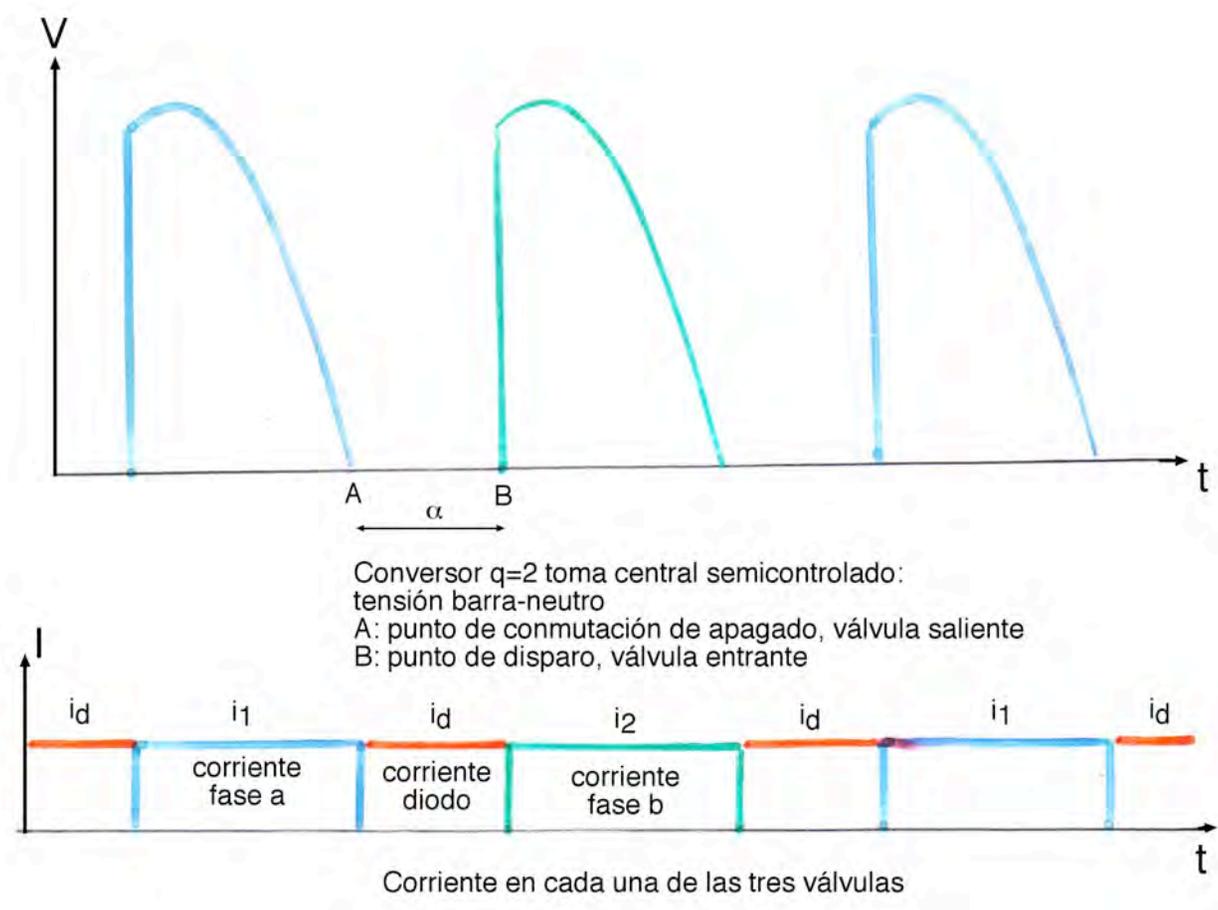
El diodo entra en conducción en el momento que la salida instantánea del conversor base cambia de signo, de forma que la tensión instantánea entregada por el conversor semicontrolado es siempre unipolar.

Circuitos conversores AC/DC con conmutación natural tipo toma central $q=2$ con cargas inductivas ideales.

Configuración semicontrolada.



Circuito conversor toma central $q=2$ semicontrolado.



Formas de onda en el convertor toma central $q=2$ semicontrolado

Tensión promedio de salida barra-neutro, V_{dc} .

$$V_{dc} = \frac{2E}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{\cos \alpha}{2} \right] = \frac{E}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

Características resaltantes.

1.- Para $\alpha=0$ la tensión de salida tiene un valor positivo igual a $\frac{2E}{\pi}$.

En este caso el diodo de libre conducción no interviene en la conducción. La salida es idéntica a la del convertidor toma central $q=2$ no controlado y a la del convertidor toma central $q=2$ completamente controlado con $\alpha=0$.

2.- Para $\alpha = \pi$ la tensión de salida es igual a cero, toda la corriente de carga existente circula por el diodo de libre conducción.

3.- En el intervalo $0 < \alpha < \pi$ la tensión de salida dc es siempre positiva, y también lo es la tensión instantánea. El conversor solo opera en el primer cuadrante.

4.- El ángulo de conducción de las válvulas principales es igual a $\pi - \alpha$.

5.- El ángulo de conducción del diodo auxiliar de libre conducción es igual a α (el ángulo de retardo de encendido del convertidor) en cada semiciclo de la línea. Cuando se alcanza el valor α , la conducción de corriente en el diodo es continua.

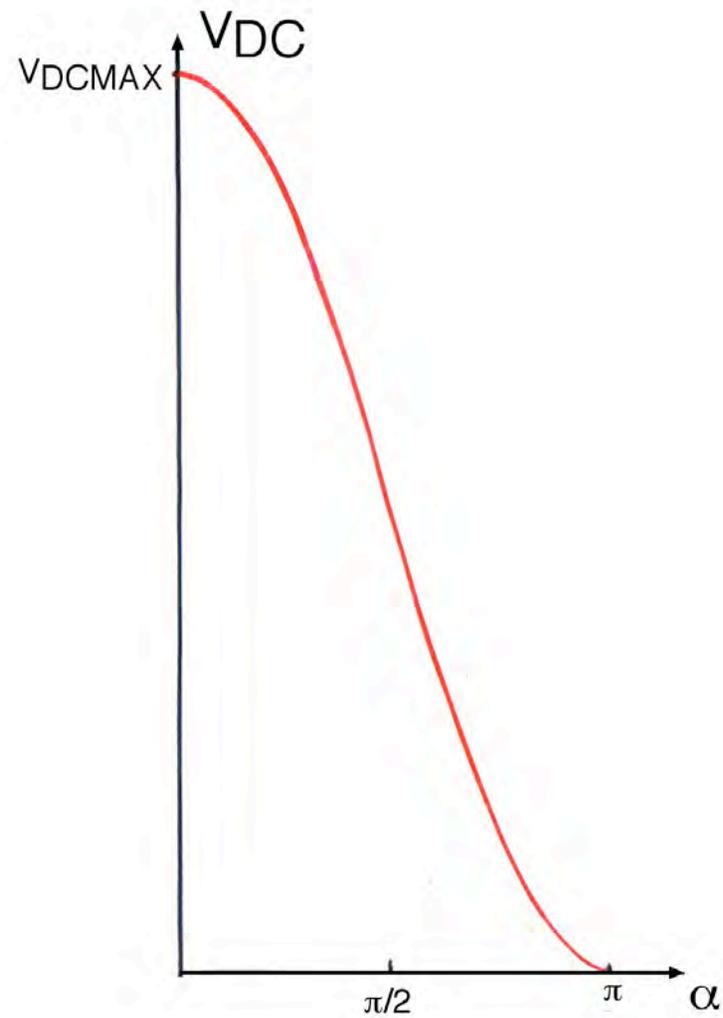
6.- La corriente r.m.s. en el diodo de libre conducción puede ser igual a la corriente DC en la carga.

Comparación con el conversor completamente controlado toma central de $q=2$.

1.- El retardo necesario para anular la salida se dobla (de $\pi/2$ a π radianes).

2.- la operación como inversor sincrónico, pasando energía del puerto DC al puerto AC no es posible.

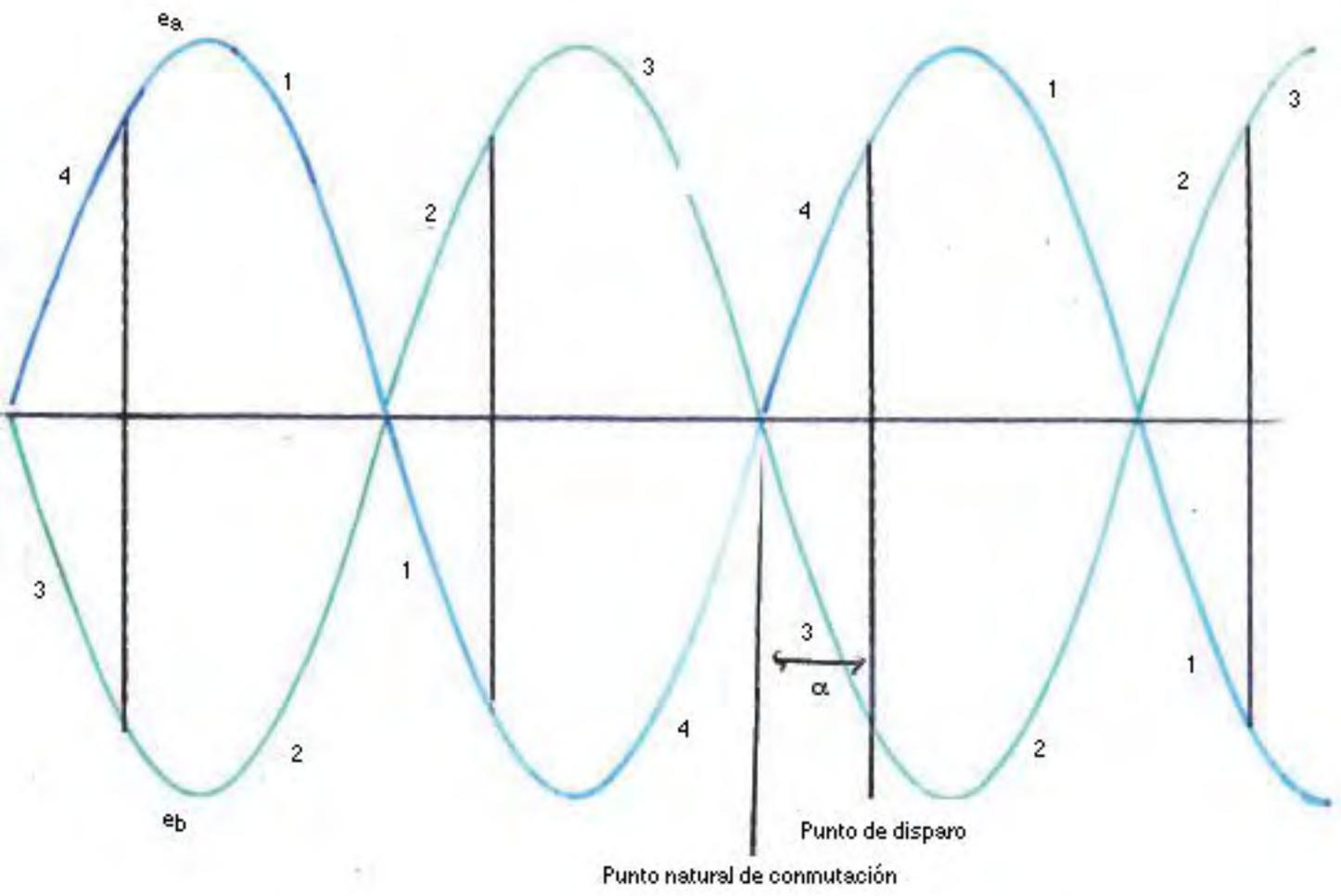
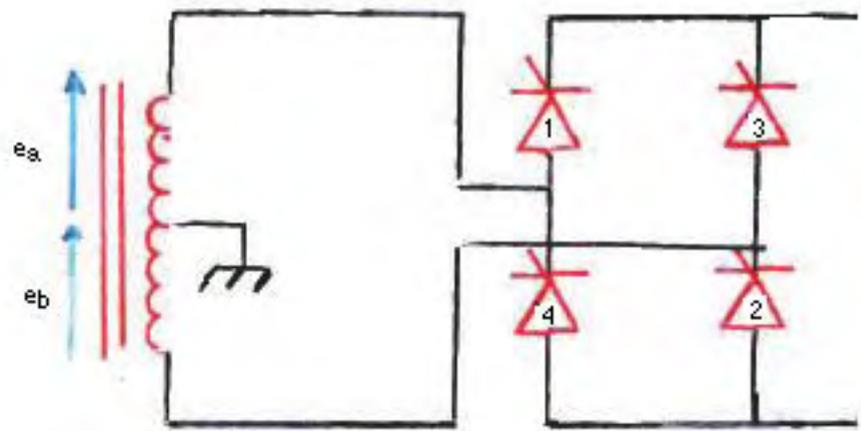
3.- El ángulo de conducción de las válvulas principales es variable y menor que π , salvo cuando el retardo de encendido α es 0.

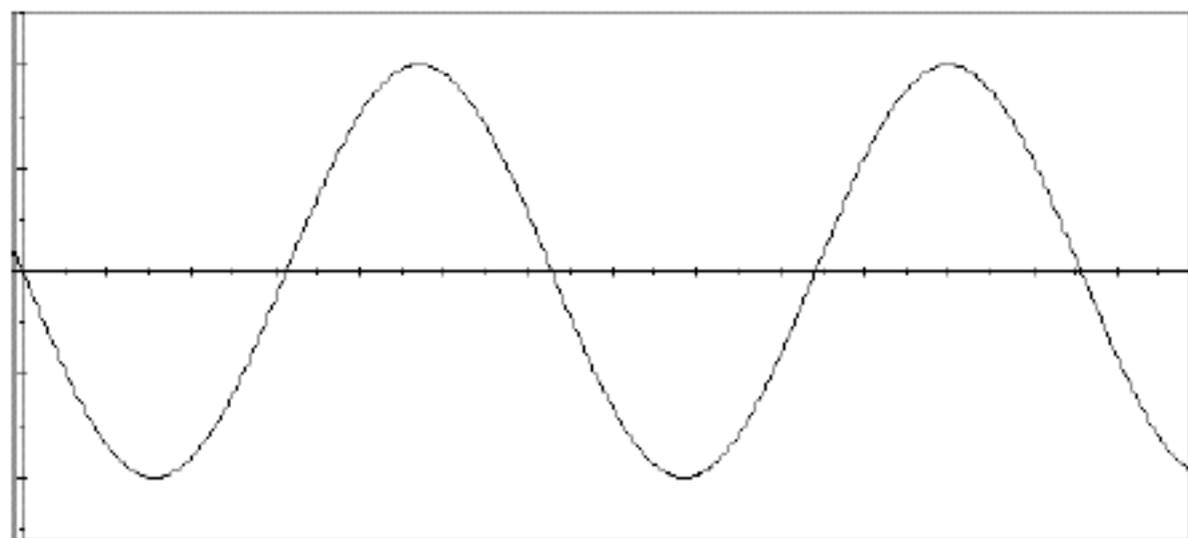
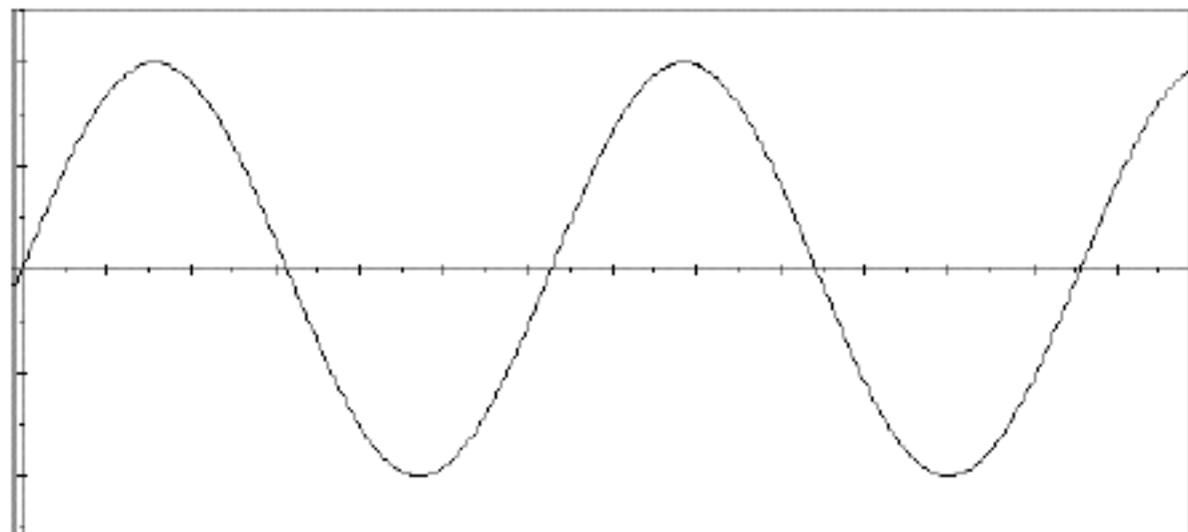


Relación tensión de salida DC vs ángulo de retardo de encendido α .

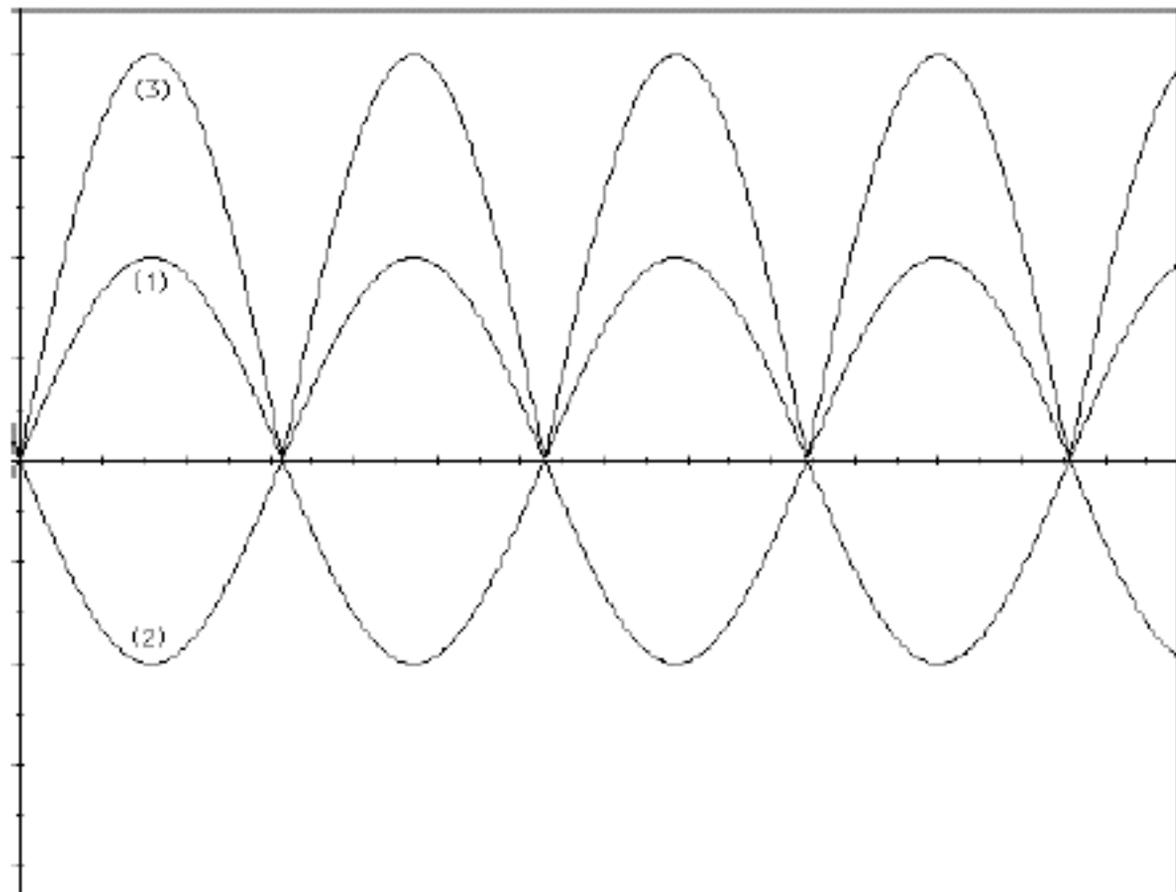
Circuitos conversores AC/DC con conmutación natural tipo puente $q=2$ con cargas inductivas ideales.

Configuraciones no controlada y completamente controlada.





Tensión de entrada en las columnas de un convertor puente monofásico, referidas al neutro de la línea de alimentación.

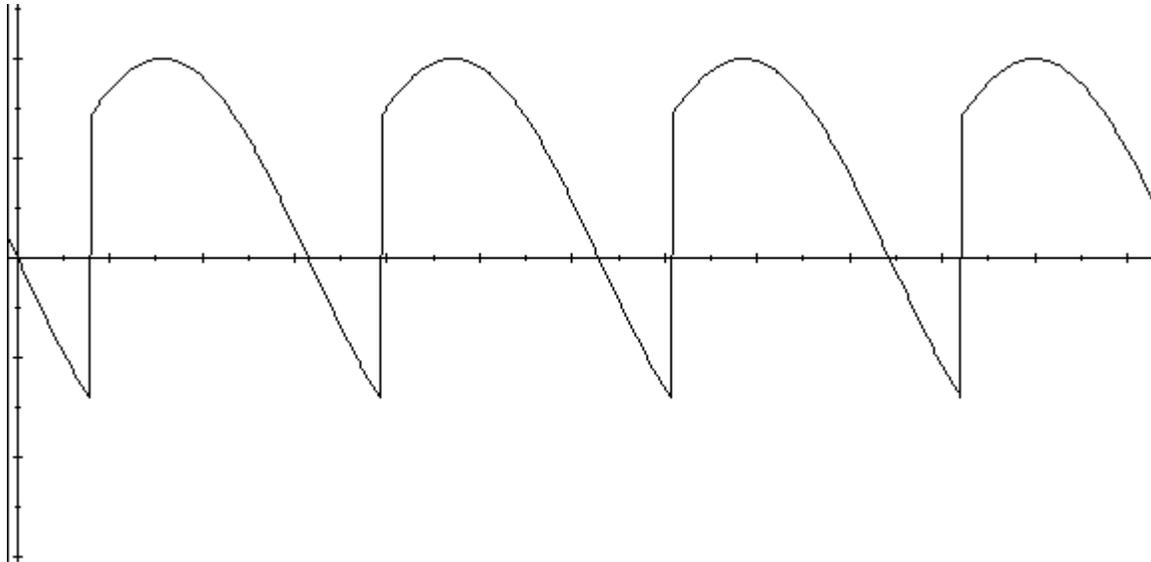


Tensiones en un conversor puente monofásico operando con ángulo de retardo de encendido $\alpha = 0$.

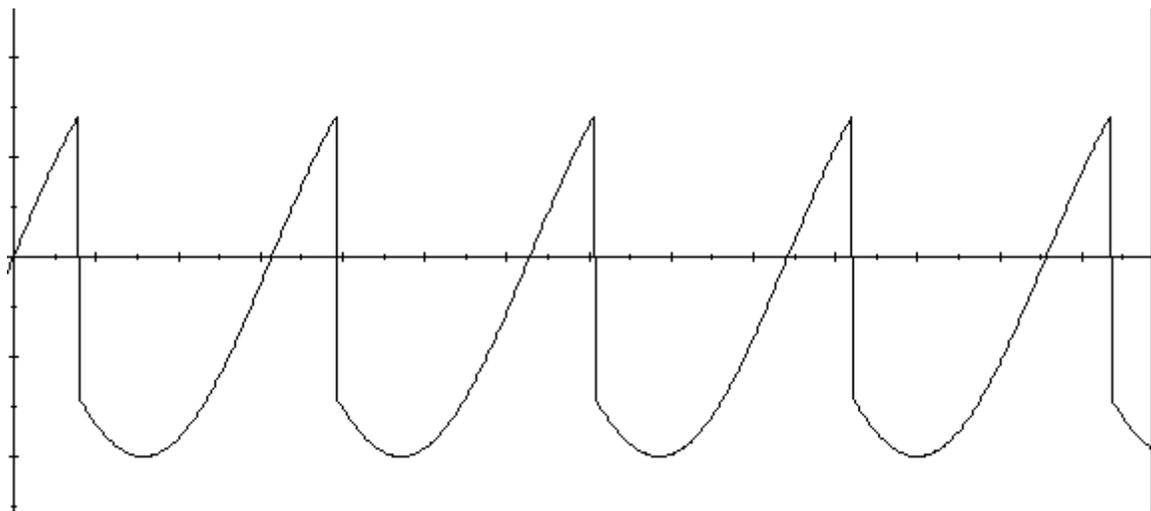
(1): Tensión de entrada en la columna 1-4

(2): Tensión de entrada en la columna 3-2

(3): Tensión de salida en las barras dc, tomando como referencia la barra de ánodos.



(1)



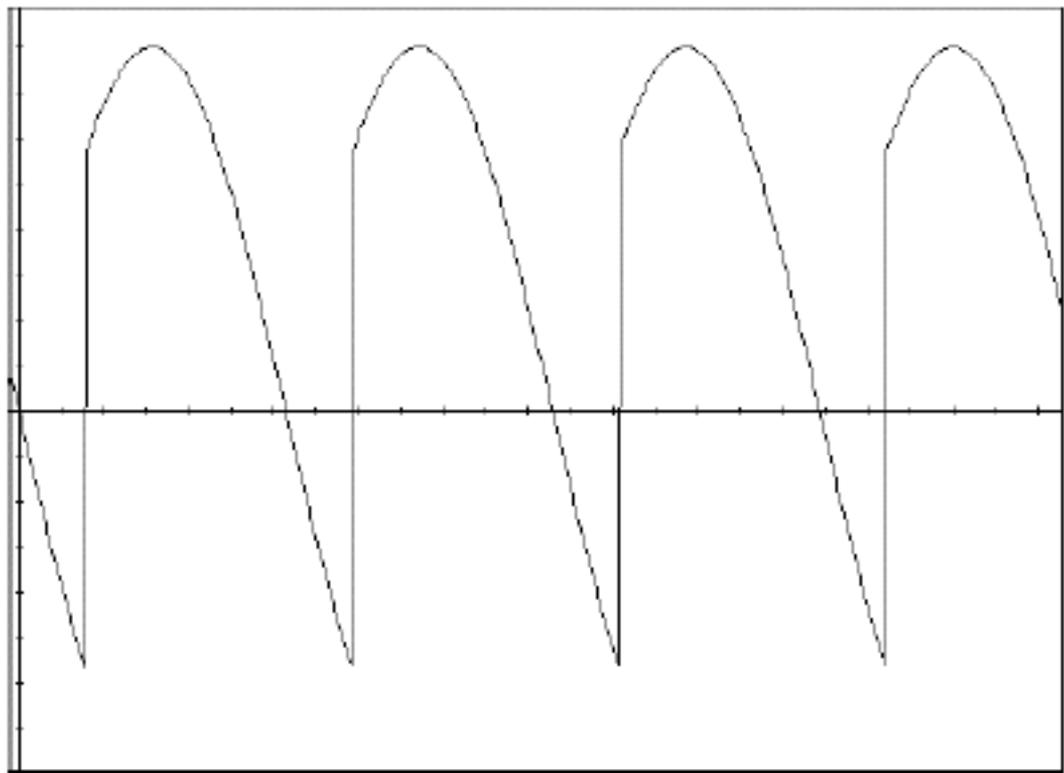
(2)

Tensiones en un conversor puente monofásico operando con ángulo de retardo de encendido

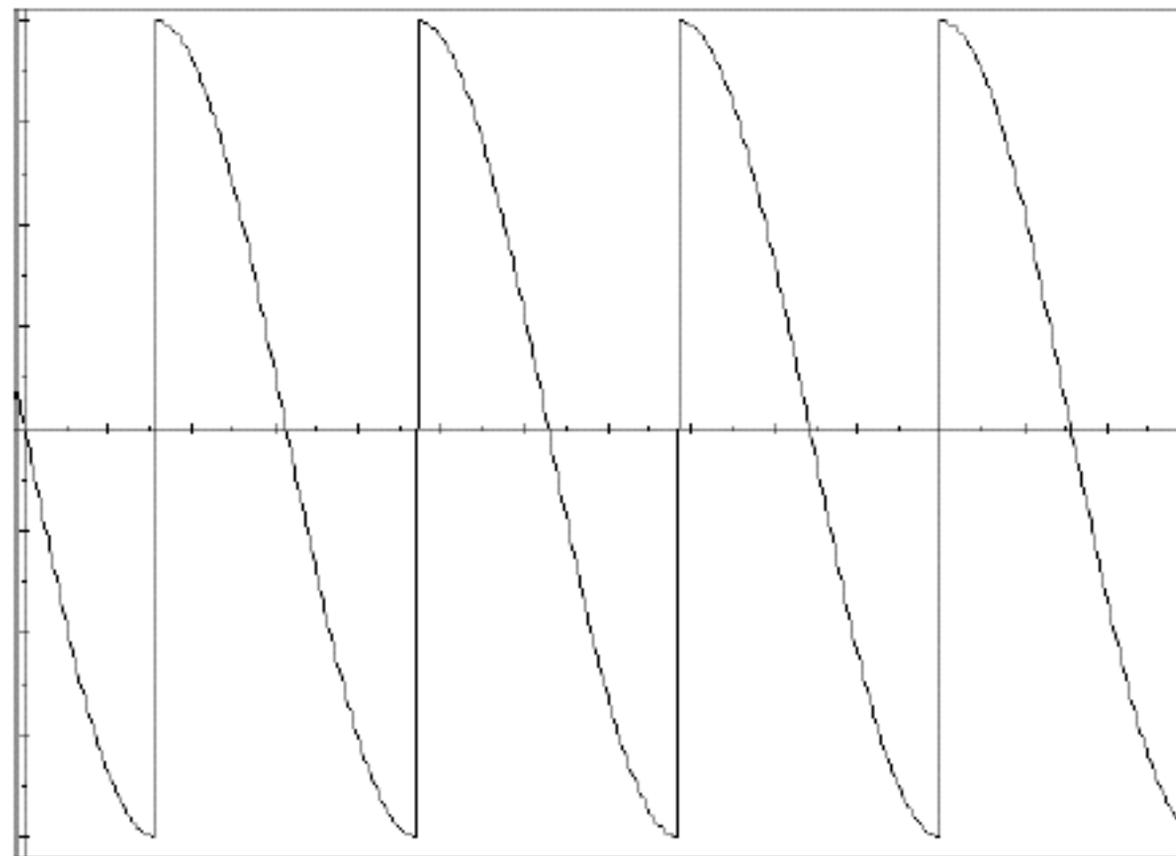
$$\alpha = \pi/4.$$

(1): Tensión barra cátodo a neutro de referencia del sistema AC de alimentación.

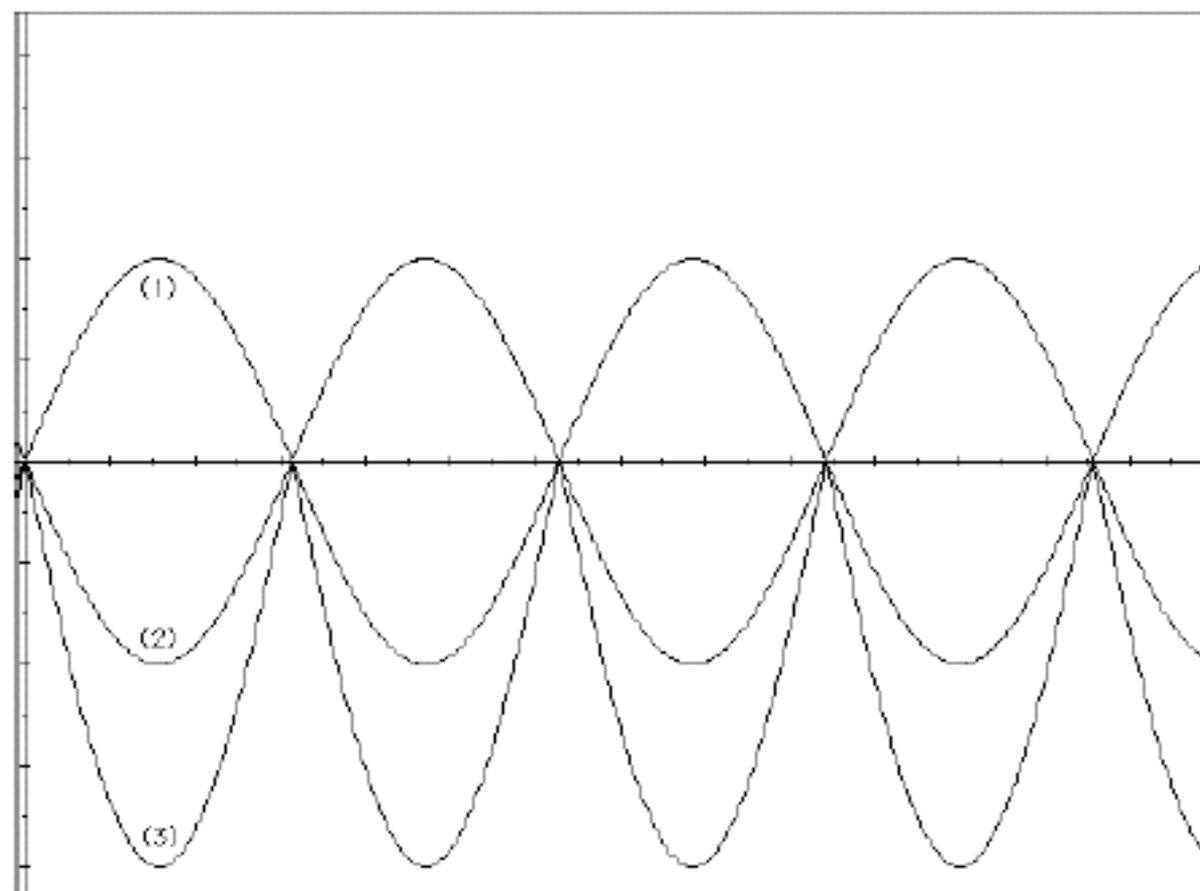
(2): Tensión barra cátodo a neutro de referencia del sistema AC de alimentación.



Tensión de salida barra-barra en un
convertor puente monofásico operando
con ángulo de retardo de encendido
 $\alpha = \pi/4$.



Tensión de salida barra-barra en un
convertor puente monofásico operando
con ángulo de retardo de encendido
 $\alpha = \pi/2$.



Tensiones en un conversor puente monofásico
operando con ángulo de retardo de encendido
 $\alpha = 2\pi$.

- (1): Tensión de entrada en la columna 1-4
- (2): Tensión de entrada en la columna 3-2
- (3): Tensión de salida en las barras dc, tomando como referencia la barra de cátodos.

Punto de conmutación natural

Punto de disparo

α

$i_{3,4}$

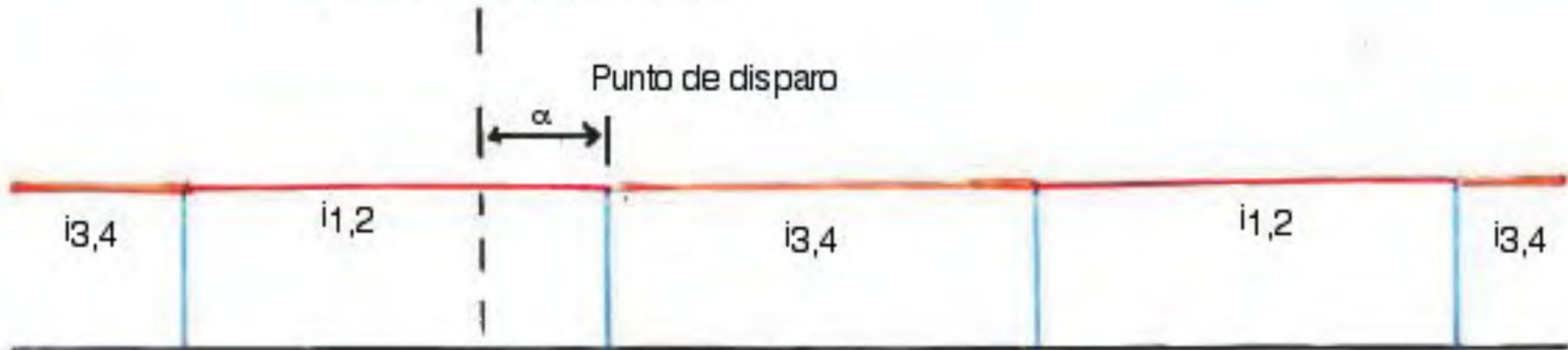
$i_{1,2}$

$i_{3,4}$

$i_{1,2}$

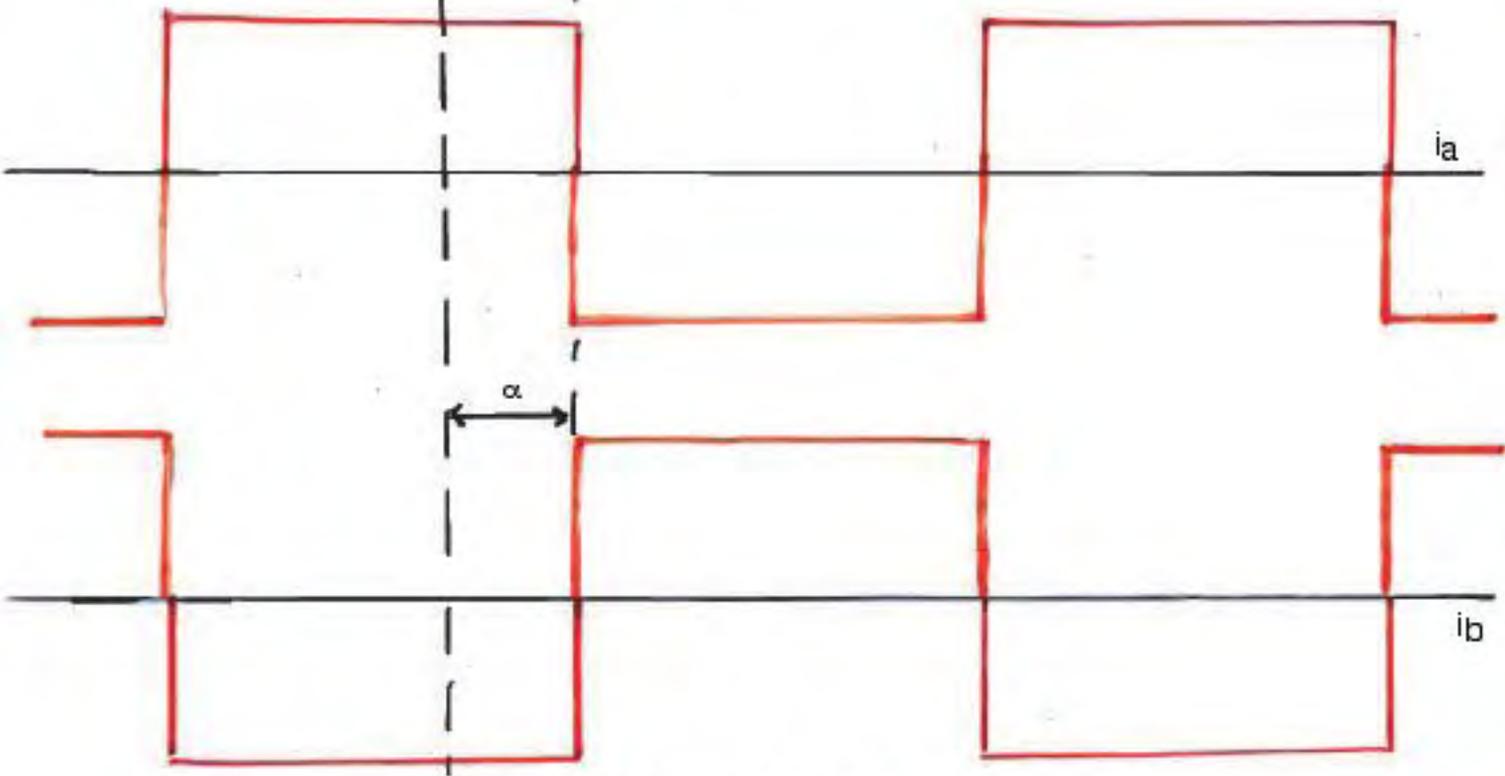
$i_{3,4}$

Corriente en las barras DC, y en los componentes



Punto de conmutación natural

Punto de disparo



Corrientes en las fases

Tensión de salida barra-barra

La tensión de salida DC, V_{dc} , es el promedio de la diferencia instantánea entre las tensiones instantáneas de la barra de cátodos V_{bc} y la barra de ánodos, V_{ba} .

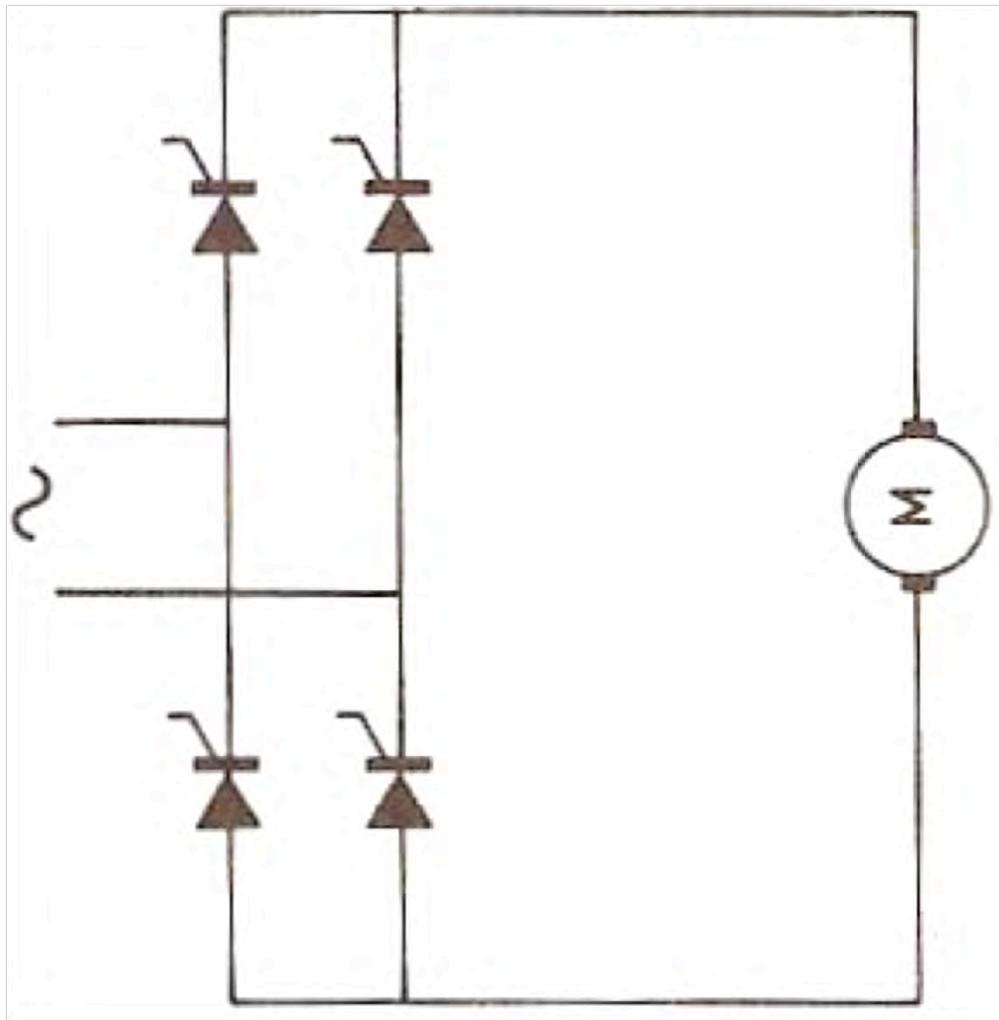
$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} (V_{bc}(\tau) - V_{ba}(\tau)) d\tau$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} (V_{bc}(\tau) - V_{ba}(\tau)) d\tau + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} (V_{ba}(\tau) - V_{bc}(\tau)) d\tau \right]$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} (E \sin \tau - (-E \sin \tau)) d\tau + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} (E \sin \tau - (-E \sin \tau)) d\tau \right]$$

Si el circuito conversor esta conectado a un secundario tipo toma central como se presentó en este análisis, cada barra estará conectada al extremo de una fase activa, con la referencia mutua en la toma central (punto de tierra), por lo tanto:

$$V_{dc} = \frac{4E}{\pi} \cos \alpha$$



Convertor AC/DC Puentes Monofásico completamente controlado

Si el circuito conversor esta conectado a una sola fase (situación usual en la práctica), el neutro virtual de referencia debe considerarse en el punto medio de la tensión de la línea, luego:

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

Un método de cálculo alternativo es reconocer que la configuración convertidor AC/DC puente es la combinación serie de dos convertidores AC/DC toma central de la misma q , uno conectado como barra de cátodos común y otro como barra de ánodos común, y que por lo tanto:

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

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

$$V_{dc} = \frac{2E}{\pi} - \left(-\frac{2E}{\pi} \right) = \frac{4E}{\pi}$$

Nótese que si el conversor no esta conectado a una toma central, el razonamiento es válido, pero considerando un neutro ficticio en la mitad de la tensión de línea, por lo que la salida, cuando el conversor esta conectado a una sola fase es:

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

Convertidor puente, $q=2$, resumen de las características, convertidor conectado directamente a una fase (promedio)

1- La tensión de salida promedio, V_{dc} es:

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

2-En el intervalo de control $0 \leq \alpha < \pi/2$ la tensión promedio es positiva y decrece monótonamente. En este intervalo la potencia promedio es positiva, lo que indica que la energía fluye del circuito AC al DC y el convertidor está operando como rectificador.

3-Para $\alpha = \pi/2$ la tensión de salida promedio se anula.

4-En el intervalo de control $\pi/2 < \alpha < \pi$ la tensión de salida promedio es negativa y su módulo crece monótonamente. En este intervalo la potencia promedio es negativa, lo que indica que la energía fluye del circuito DC al AC, y el convertidor está operando como inversor sincrónico.

5-La frecuencia de rizado en la tensión DC, f_r , es el doble de la frecuencia de línea, f_l .

$$f_r = 2f_l$$

Convertidor puente, $q=2$, resumen de las características (instantáneas)

1-Para $\alpha = 0$ la salida alcanza un valor máximo positivo, V_{dcmax} , dado por:

$$V_{dcmax} = \frac{2E}{\pi}$$

2-La tensión instantánea es negativa para $0 \leq \omega\tau \leq \alpha$.

3-Para $\alpha = \pi/2$ la tensión instantánea barre todo el rango posible, desde $+E$ hasta $-E$.

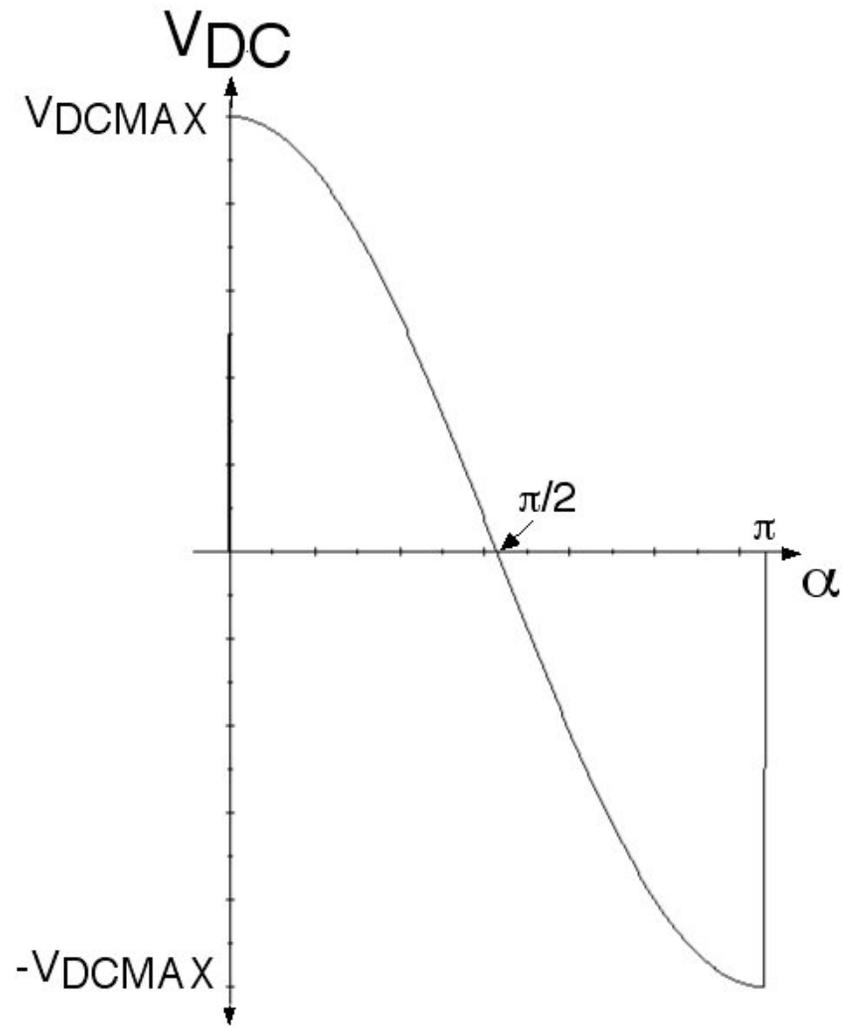
4-Para $\alpha = \pi$ la tensión de salida instantánea alcanza un valor negativo máximo igual a $-V_{dcmax}$.

5-En el intervalo de conducción τ ($\alpha \leq \tau \leq \pi + \alpha$) la corriente en los dispositivos de control que conducen es igual al valor de la corriente de carga, I_{DC} .

6-En el intervalo de no conducción, la corriente en los dispositivos de control que no conducen es igual a 0.

7-La corriente en las líneas de entrada es una onda cuadrada simétrica de amplitud I_{DC} .

8-La tensión máxima (directa e inversa) que debe bloquear cada válvula rectificadora es E .



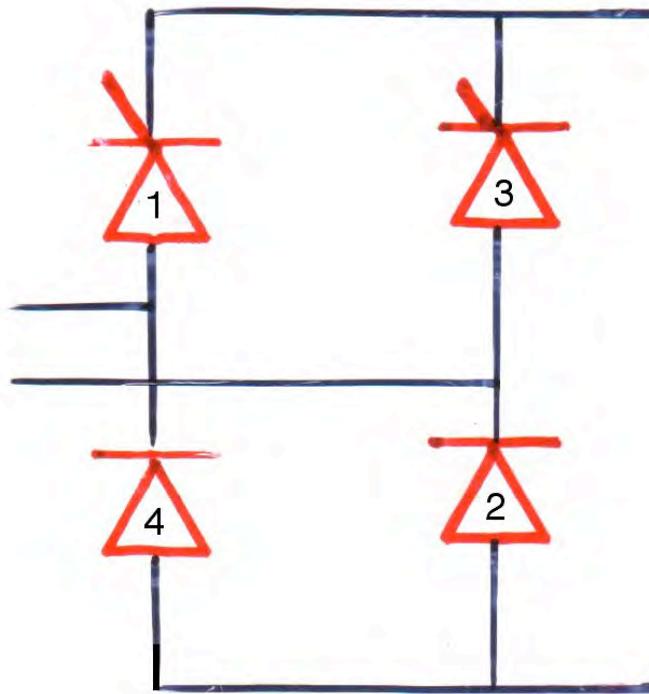
Relación normalizada V_{DC} vs. α ,
Convertor completamente
controlado

Circuitos conversores AC/DC con conmutación natural tipo puente $q=2$ con cargas inductivas ideales.

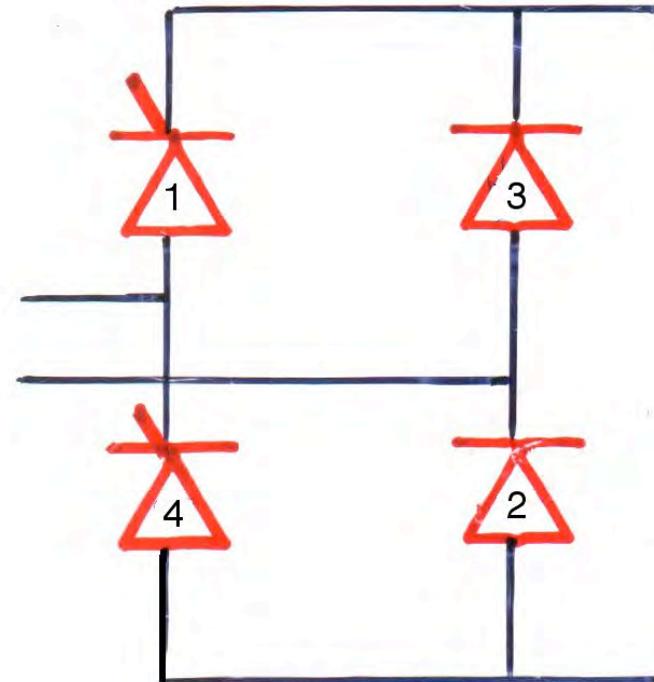
Configuración semicontrolada.

El caso $q=2$ es único por cuanto es posible definir dos configuraciones distintas para el conversor semicontrolado sin diodo de libre conducción:

- 1.- Configuración puente simétrico.
- 2.- Configuración puente simétrico.

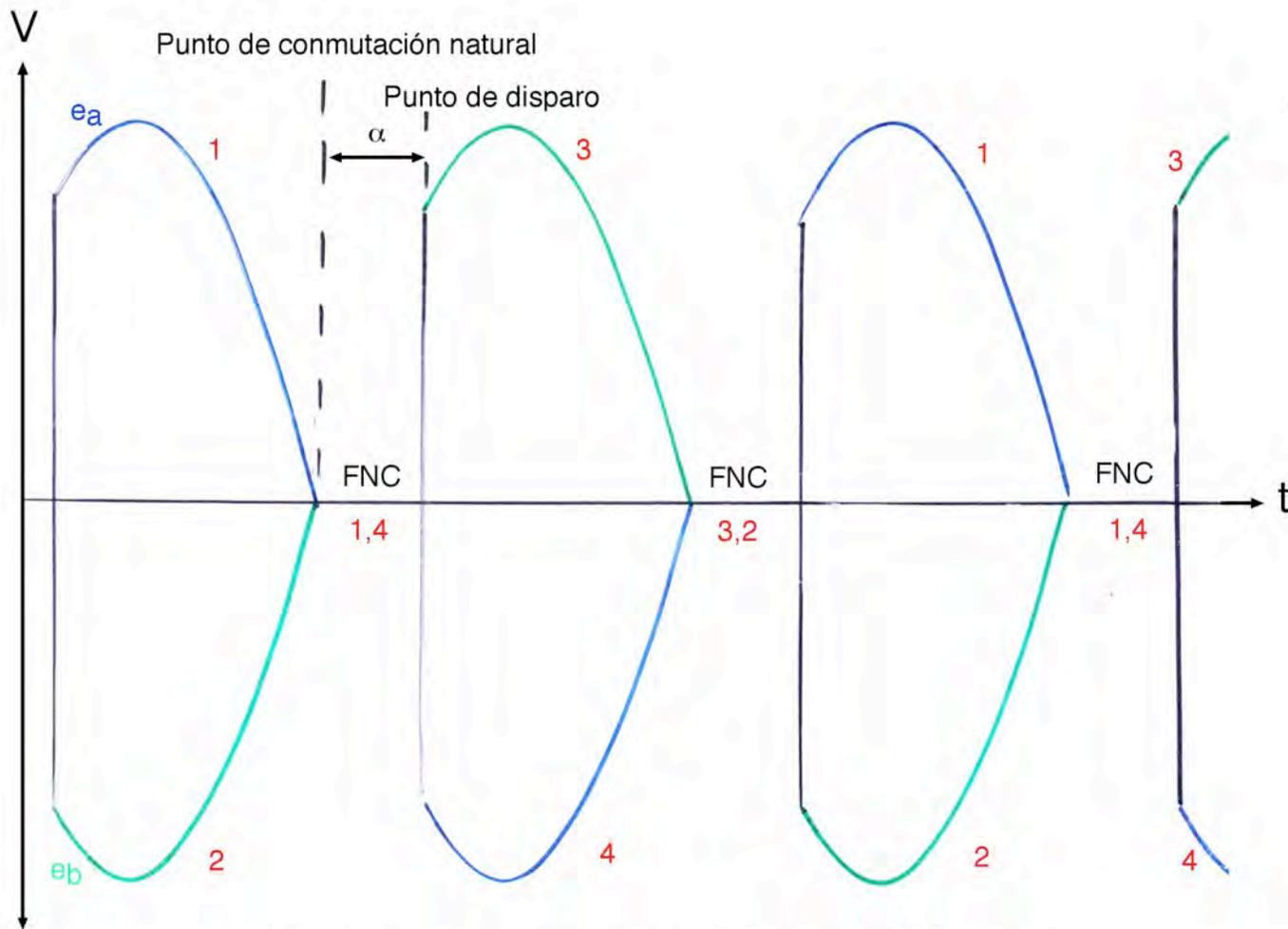


Simétrico

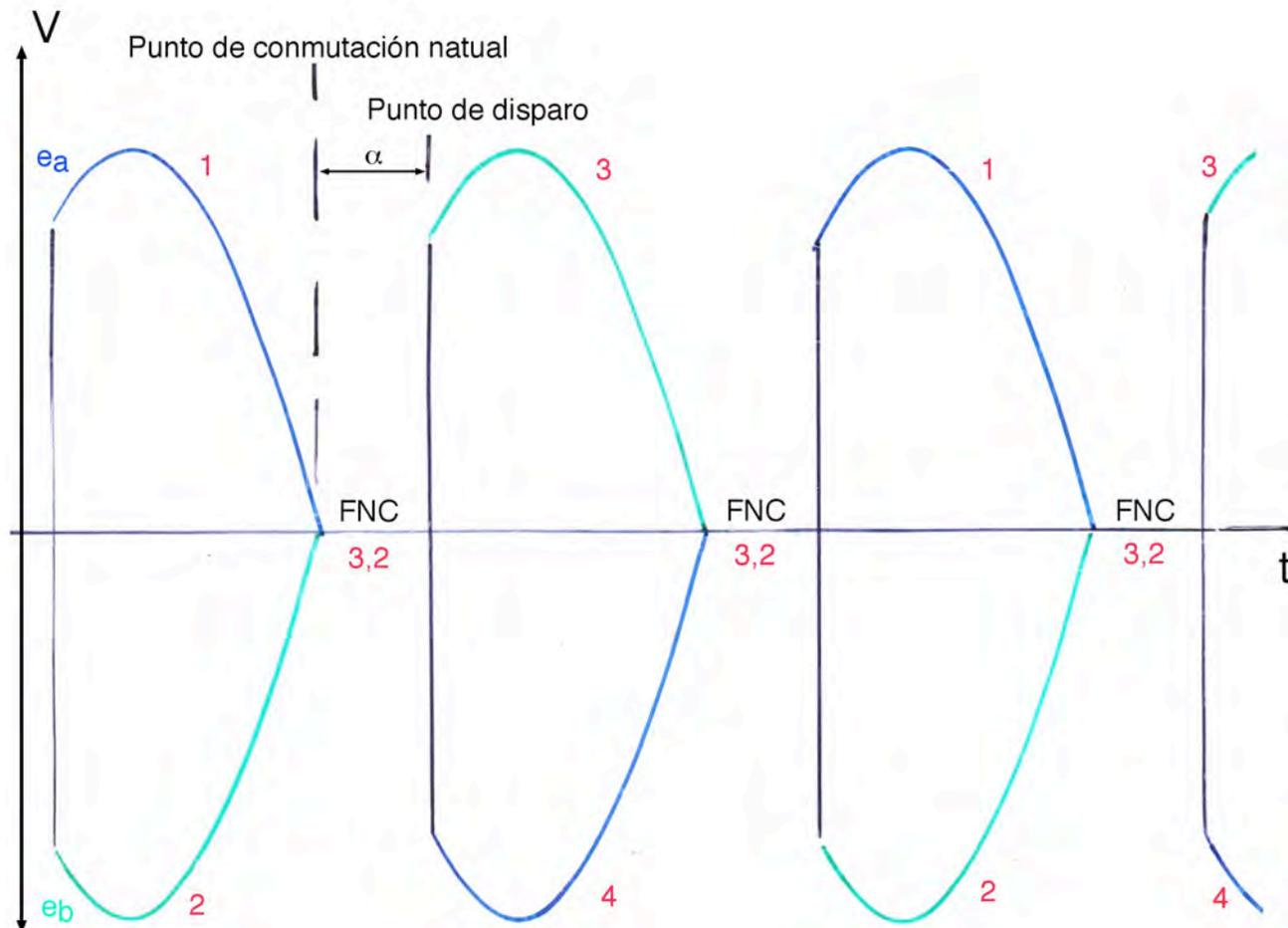


Asimétrico

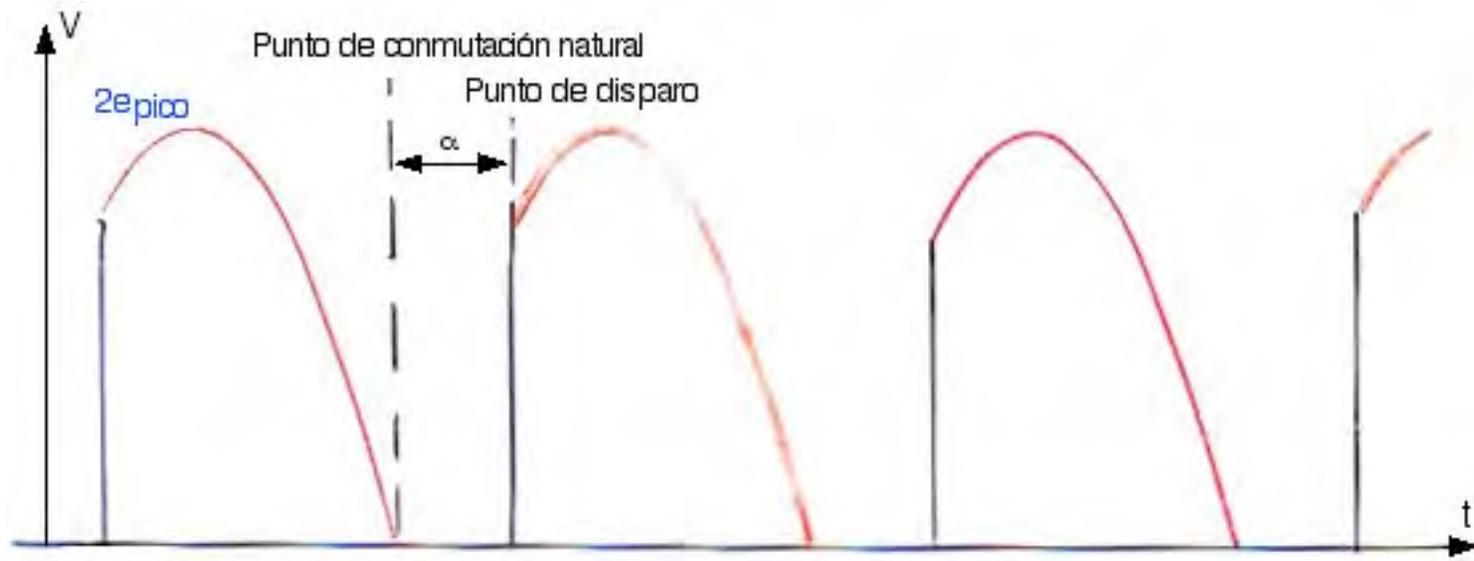
Convertidor puente $q=2$ semicontrolado.
Configuraciones simétrica (izquierda) y asimétrica
(derecha).



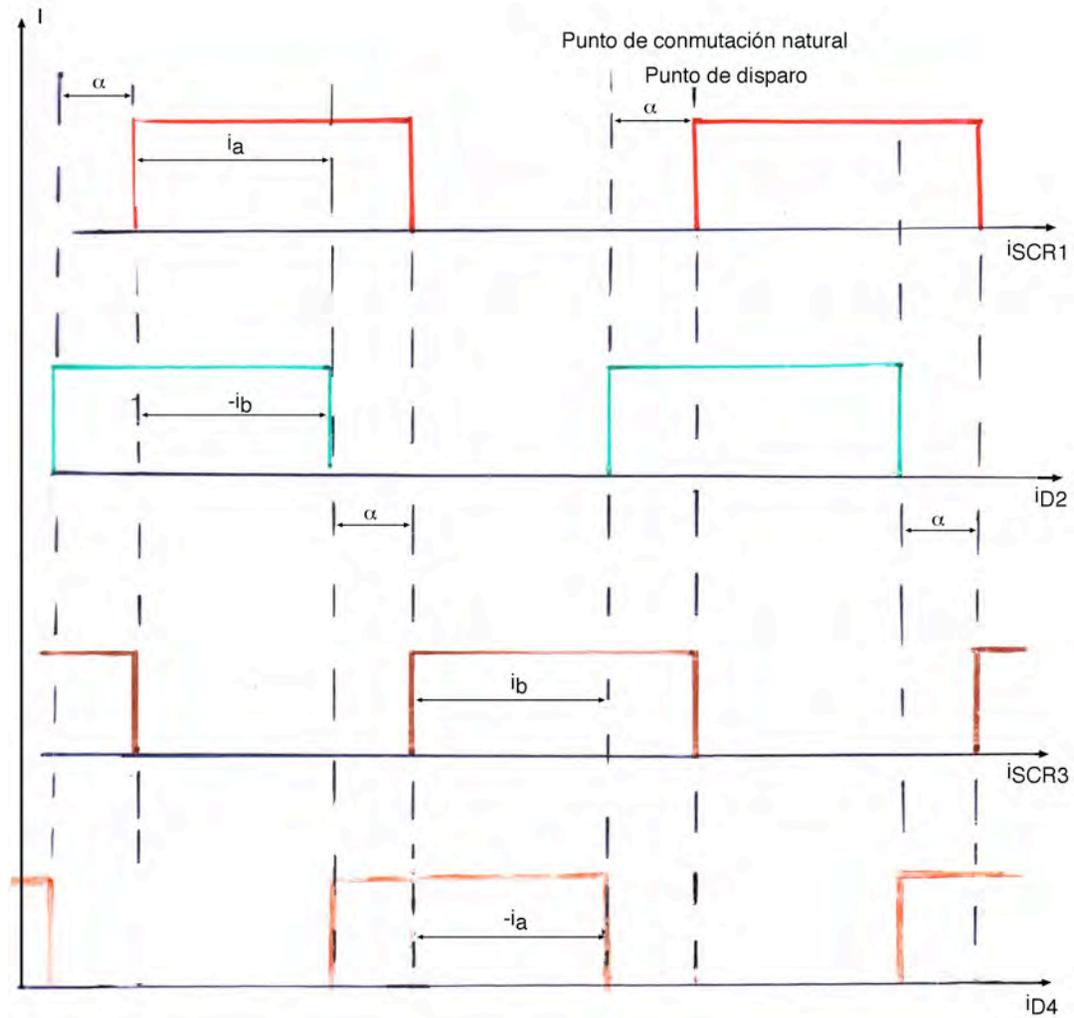
Tensiones barra-neutro, puente $q=2$ semicontrolado simétrico.
 Los números indican el dispositivo que realiza la conexión.
 El color indica la fase conectada a cada barra.
 FNC: fases no conectadas a las barras de salida.



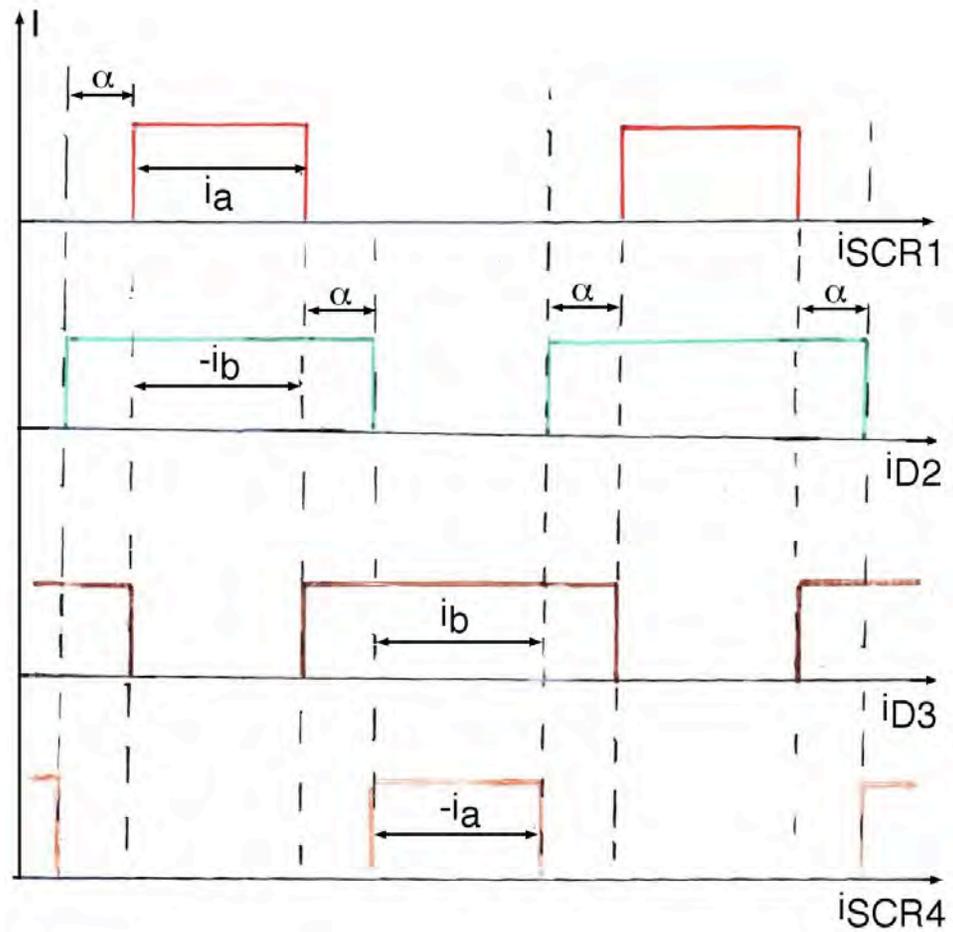
Tensión barra neutro, puente $q=2$ semicontrolado asimétrico
 Los números indican el dispositivo que realiza la conexión.
 El color indica la fase conectada a cada barra.
 FNC: fases no conectadas a las barras de salida.



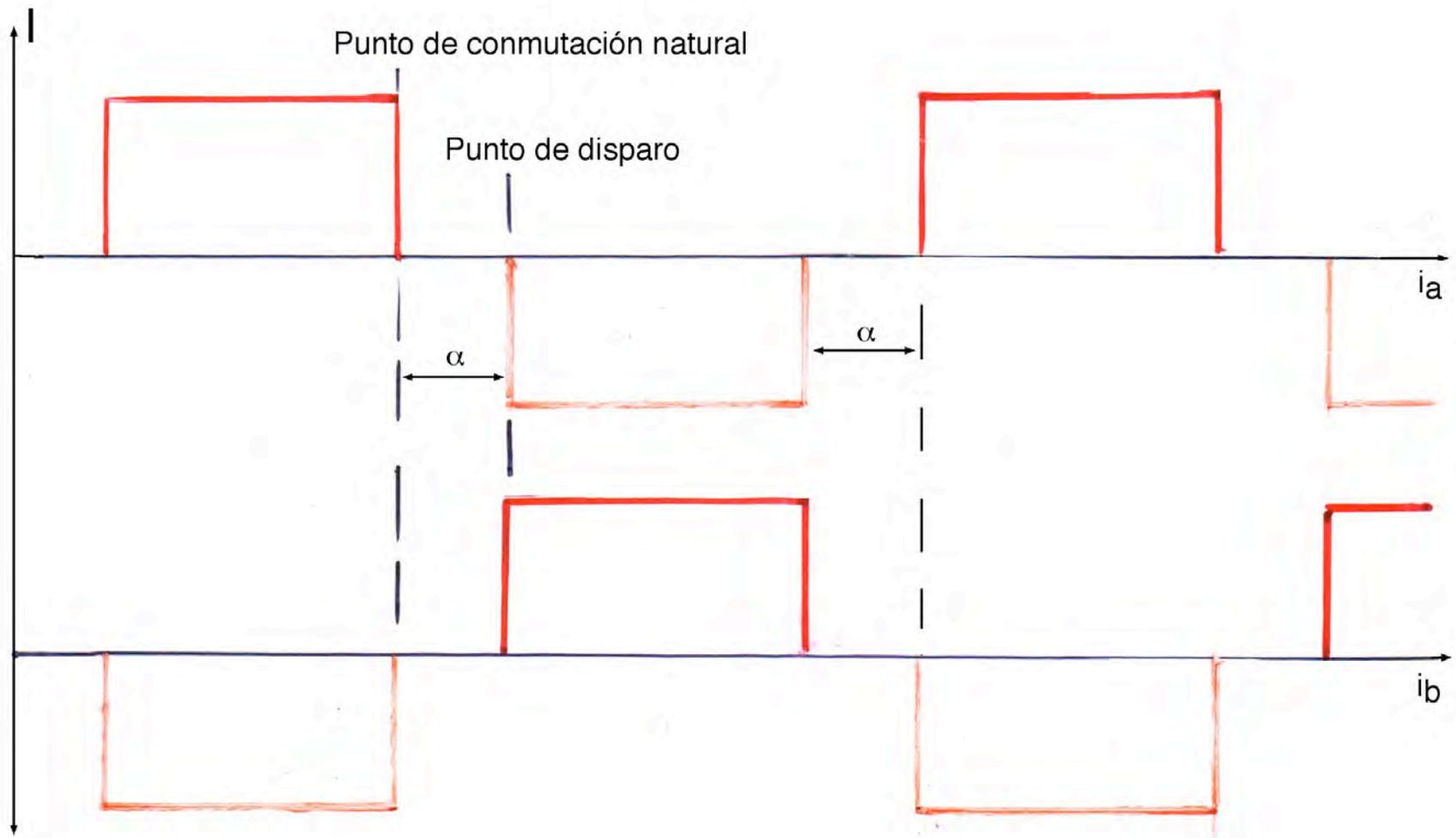
Tensión barra-barra (tensión de salida), puente $q=2$ semicontrolado simétrico.



Conversor puente q=2 semicontrolado simétrico. Corrientes en las fases y en los componentes. ■



Conversor puente $q=2$ semicontrolado asimétrico. Corrientes en las fases y en los componentes. ■



Conversor puente $q=2$ semicontrolado ambas configuraciones. Corrientes en las fases.

Tensión promedio de salida barra-neutro, V_{dc} , convertidor conectado a un secundario con toma central y fases de amplitud E :

$$V_{dc} = \frac{2E}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

Tensión promedio de salida barra-neutro, V_{dc} , convertidor conectado a una fase de amplitud E :

$$V_{dc} = \frac{E}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

Características resaltantes.

- 1.- Para $\alpha=0$ la tensión de salida tiene un valor positivo igual a $\frac{2E}{\pi}$ (convertidor conectado a una fase). La salida es idéntica a la del convertidor puente $q=2$ no controlado y a la del convertidor puente $q=2$ completamente controlado con $\alpha=0$.
- 2.- Para $\alpha = \pi$ la tensión de salida es igual a cero.

3.- En el intervalo $0 < \alpha < \pi$ la tensión de salida dc es siempre positiva, y también lo es la tensión instantánea. El conversor solo opera en el primer cuadrante.

4.- En la configuración simétrica el ángulo de conducción de las cuatro válvulas es siempre igual a π . En la configuración asimétrica el ángulo de conducción de las válvulas controladas es igual a $\pi - \alpha$ y las válvulas no controladas es igual a $\pi + \alpha$.

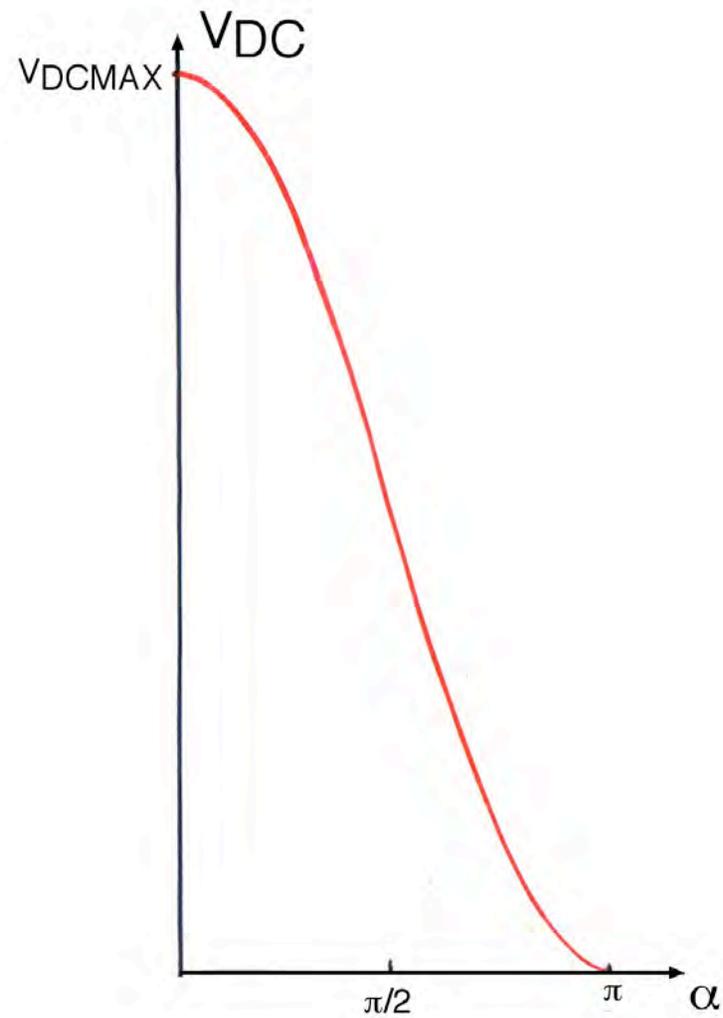
5.- En la configuración asimétrica la corriente r.m.s. en las válvulas no controladas puede ser igual a la corriente DC en la carga.

Comparación con el convertidor completamente controlado toma central de $q=2$.

- 1.- El retardo necesario para anular la salida se dobla (de $\pi/2$ a π radianes).
- 2.- la operación como inversor sincrónico, pasando energía del puerto DC al puerto AC no es posible.

3.- En la configuración asimétrica el ángulo de conducción de las válvulas controladas es variable y menor que π , salvo cuando el retardo de encendido α es 0.

4.- En la configuración asimétrica el ángulo de conducción de las válvulas no controladas es variable y mayor que π .



Relación tensión de salida DC vs ángulo de retardo de encendido α .