

Características tensión-corriente

En este anexo se estudiará detenidamente el funcionamiento de las redes de alta impedancia propuestas. Para ello se determinará en primer lugar el número de modos de conducción posibles de cada topología para posteriormente obtener las ecuaciones de funcionamiento de cada uno de ellos. Una vez deducidas estas ecuaciones, se obtendrá la relación entre la corriente y la tensión que circula por cada RAI. A esta relación la hemos denominado “Característica tensión-corriente”(CTC).

1.1 Introducción.

Los armónicos de baja frecuencia de la corriente de entrada ($I_g(\omega t)$) en los reductores activos de armónicos basados en redes de alta impedancia (RAI), dependerán de la relación existente entre la tensión aplicada a la RAI y la corriente que por ella circula. Esta relación ha sido llamada característica tensión corriente (CTC). Para determinar esta característica, es necesario determinar la forma de onda que “alimenta” la red de alta impedancia a través del magnético compartido con el convertidor principal (Fig. 1-1), así como la tensión que como consecuencia del funcionamiento del RAA es aplicada a la salida de la misma. La tensión de alimentación dependerá del funcionamiento del convertidor CC/CC al que se encuentre acoplada. Por otra parte, la tensión de salida será la diferencia entre la tensión del condensador de almacenamiento (V_C) y la tensión de red rectificadas ($|V_g(\omega t)|$).

Tanto en el cálculo de las corrientes de entrada, como en la obtención de las características han sido realizadas las siguientes consideraciones:

- La tensión en el condensador de almacenamiento (V_C) puede considerarse constante en un semiciclo de la tensión de red.
- Todos los componentes se considerarán ideales, por lo que el rendimiento del convertidor será la unidad.

- Se adopta el criterio de cuasiestatismo para el estudio de los convertidores, las redes de alta impedancia y los RAA, es decir, la unión de los dos primeros.

Los convertidores CC/CC más utilizados (reductor, elevador, reductor-elevador, etc) tienen dos modos de funcionamiento MCC y MCD. El funcionamiento en MCD es ocasionado por el interruptor no controlado (diodo) que presentan estas topologías. Las RAI que serán estudiadas en este anexo son convertidores con dos o cuatro interruptores no controlados, por lo que aparecerán diferentes modos de funcionamiento que deberán ser identificados y analizados. Identificados, porque a priori no sabemos cuantos modos existirán y analizados porque necesitamos conocer su funcionamiento para determinar el valor de la corriente que por ellos circula.

El número de modos de funcionamiento dependerá de la cantidad de diodos que entren en conducción en cada tramo y del valor de la corriente en la bobina de filtro. Diremos que una RAI trabaja en MCC cuando la corriente en la bobina de filtro no presente “tramos” de valor nulo. Si solamente se anula en un punto no se considerará MCD.

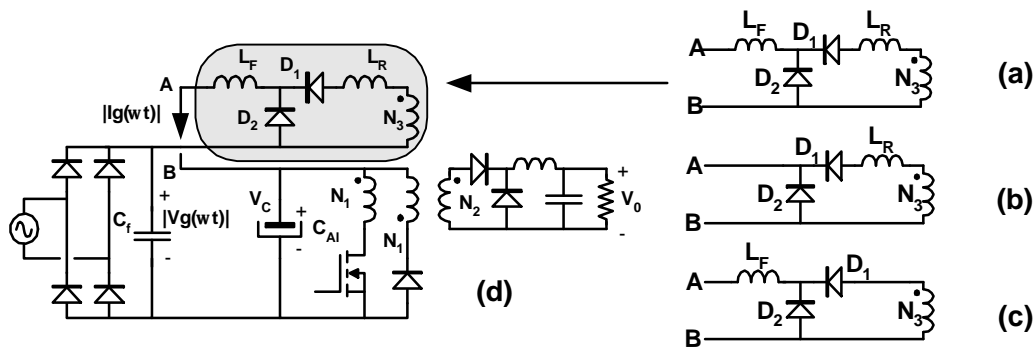


Fig. 1-1. (a)(b)(c) RAI con rectificador de media onda (d) Convertidor directo con corrector de armónicos del tipo (a).

El problema que aquí se plantea es obtener el número de modos de funcionamiento de cada topología para después poder analizarlos. Para determinar los posibles modos de conducción de cada una de las topologías a estudiar se seguirán las siguientes reglas:

- Los instantes en los que la tensión de alimentación¹ varía, son los candidatos para la entrada en conducción de un nuevo diodo (t_0 , dT_s y $(d_1+d_2)T_s$).
- Gracias a la existencia de las bobinas, los diodos sólo pueden dejar de conducir cuando la corriente que por ellos circula se anula.
- Los diodos entrarán en conducción cuando estén directamente polarizados. Para calcular la tensión de polarización se supondrán en conducción los diodos que estaban conduciendo en el instante inmediatamente anterior. Una vez calculada esta tensión, tenemos dos posibilidades: si los diodos abiertos están polarizados inversamente seguirán sin conducir. En caso contrario conducirán todos los diodos que quedan directamente polarizados y tendrá que recalcularse el valor de la tensión en el punto seleccionado para la polarización (debe recordarse que la entrada en conducción de uno de los diodos puede excluir a otros).

De acuerdo con el valor de la corriente en la bobina de filtro todas las topologías aquí estudiadas tienen al menos dos modos de conducción: MCC y MCD. Dentro de cada uno de estos modos de conducción podrán darse otros como consecuencia del número de diodos que conduzca en cada instante. Estos “submodos” podrán determinarse estudiando el comportamiento del convertidor en las transiciones de la tensión de alimentación.

¹ Señal que llega a la RAI a través del devanado compartido con el convertidor principal (N_3)

A continuación se obtendrán los modos de funcionamiento junto con sus ecuaciones correspondientes para todas las RAI derivadas de la familia reductora. En primer lugar se mostrará mediante una figura cómo debe situarse la red dentro de un convertidor CA/CC para que trabaje como RAA. De esta misma figura podrá obtenerse la forma de onda de tensión que alimentará la RAI. Una vez conocida la tensión de alimentación, se determinarán los modos de funcionamiento posibles. Finalmente, para cada uno de estos modos se obtendrán las ecuaciones que permitirán calcular la corriente que circula por la RAI.

Para cada modo de funcionamiento se han representado las corrientes más importantes junto a la tensión de alimentación. Además, para cada uno de los tramos en que se ha dividido un periodo de conmutación se ha dibujado su circuito equivalente. Todas las ecuaciones mostradas en este anexo han sido obtenidas a partir de estos circuitos.

1.2 Rectificador de media onda.

La tensión con que se “alimenta” la RAI dependerá de la topología en la que esté conectada. La Fig. 1-1 muestra las diferentes configuraciones de este tipo de RAI (a,b,c) así como un ejemplo de cómo debería colocarse en un convertidor directo.

En la Fig. 1-2 se muestra la representación más general de la topología aquí estudiada así como la forma de onda que la alimenta a través de N_3 . Los instantes “candidatos” para que un diodo entre en conducción son: $d_1 T_s$, $d_2 T_s$ y el inicio del ciclo (t_0). Se ha seleccionado esta forma de onda para que sea válida tanto para un convertidor directo como para uno de retroceso.

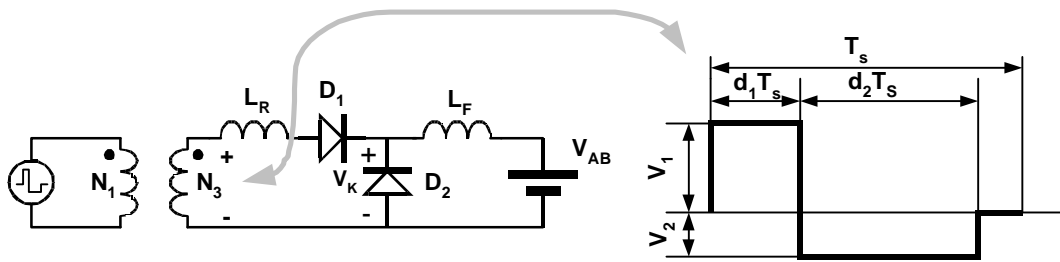


Fig. 1-2. V_{AB} tensión aplicada a la RAI, V_1 y V_2 tensión que alimenta la RAI.

1.2.1 Ecuaciones de funcionamiento.

Como ha sido mencionado en la introducción, antes de obtener las ecuaciones debemos conocer el número de modos de funcionamiento y bajo qué condiciones se dan. Para determinar si los diodos están directamente polarizados se calculará la tensión en los cátodos (V_K) en cada uno de los instantes “candidatos”, tanto en modo de conducción continuo como en modo de conducción discontinuo. A continuación se analizarán los posibles modos de conducción de esta topología de acuerdo con estos parámetros.

Instante t_0 con MCD.

Al estar trabajando en MCD la corriente inicial será nula. La tensión V_K , que vendrá dada por la expresión (1.1), es positiva y menor que V_1 . Por tanto, D_1 estará en conducción y D_2 abierto.

$$V_K = \frac{V_1 \cdot L_F + V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} \quad (1.1)$$

Instante t_0 con MCC.

La tensión media aplicada a la RAI proviene de una bobina (o devanado de transformador) en régimen permanente, por lo que su valor medio es nulo. Si no entra en conducción D_2 las dos

bobinas estarán en serie y su tensión media también deberá ser nula. La única tensión que permite esta configuración en MCC es $V_{AB}=0$. En estas condiciones ($V_{AB}=0$) nos encontraremos en el límite entre MCC y MCD. Por lo anteriormente expuesto se garantiza que si el convertidor se encuentra en MCC tendrá que conducir D_2 . En estas condiciones D_1 estará polarizado directamente, por lo que conducen los dos diodos siempre.

Instante dT_s en MCD.

Gracias a la tensión V_1 aplicada al circuito, D_1 se encuentra en conducción. En el instante dT_s cambiará la polaridad y el valor de la tensión de alimentación. Sin embargo D_1 no podrá abrirse hasta que la corriente que por él circula se anule. Si en estas condiciones calculamos V_K (1.2) comprobaremos que dependiendo del valor de la tensión V_{AB} y de la configuración de las bobinas seleccionadas, D_2 podrá conducir o no.

$$V_K = \frac{-V_2 \cdot L_F + V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} \quad (1.2)$$

Instante dT_s en MCC.

Como se demostró, si el convertidor trabaja en MCC conducirá siempre D_2 al comienzo de este intervalo.

De acuerdo con las condiciones deducidas, esta topología tiene tres posibles modos de funcionamiento. Las condiciones bajo las cuales se da cada uno de estos modos están resumidas en la Tabla 1-1.

MODO	CONDICIONES
1	$\frac{-V_2 \cdot L_F + V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} < 0$ MCD en L_F Conducen D1-D2
2	$\frac{-V_2 \cdot L_F + V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} > 0$ MCD en L_F Conduce D1
3	MCC en L_F Conducen D1-D2

Tabla 1-1. Modos de funcionamiento con rectificador de media onda.

1.2.1.1 Modo 1.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_2 < V_{AB} \frac{L_R}{L_F}$
- La bobina de filtro trabaja en modo de conducción discontinuo (MCD)

La Fig. 1-3 muestra la evolución de las principales formas de onda, así como los circuitos equivalentes para cada uno de los tramos en que se ha dividido el funcionamiento en este modo. De cada uno de estos intervalos puede deducirse una o más ecuaciones que permitirán calcular el valor de las variables que definen el funcionamiento de este modo. Tenemos tres incógnitas (I_1 , t_2 y t_3) por lo que necesitamos tres ecuaciones.

Intervalo t_0-t_1 ($t_1=dT_s$)

En este tramo el diodo D_2 se encuentra inversamente polarizado y por tanto las bobinas quedan conectadas en serie. El valor de la corriente I_1 vendrá expresado en (1.3).

$$I_1 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_F} t_1 \quad (1.3)$$

Intervalo t_1-t_2 ($t_2-t_1=tr_1$)

Sustituyendo en la ecuación (1.2) las condiciones de funcionamiento de este modo, se comprobará que ambos diodos conducen. De acuerdo con el circuito equivalente de este tramo, el valor de tr_1 podrá calcularse mediante (1.4).

$$I_1 = \frac{V_2}{L_R} tr_1 \quad (1.4)$$

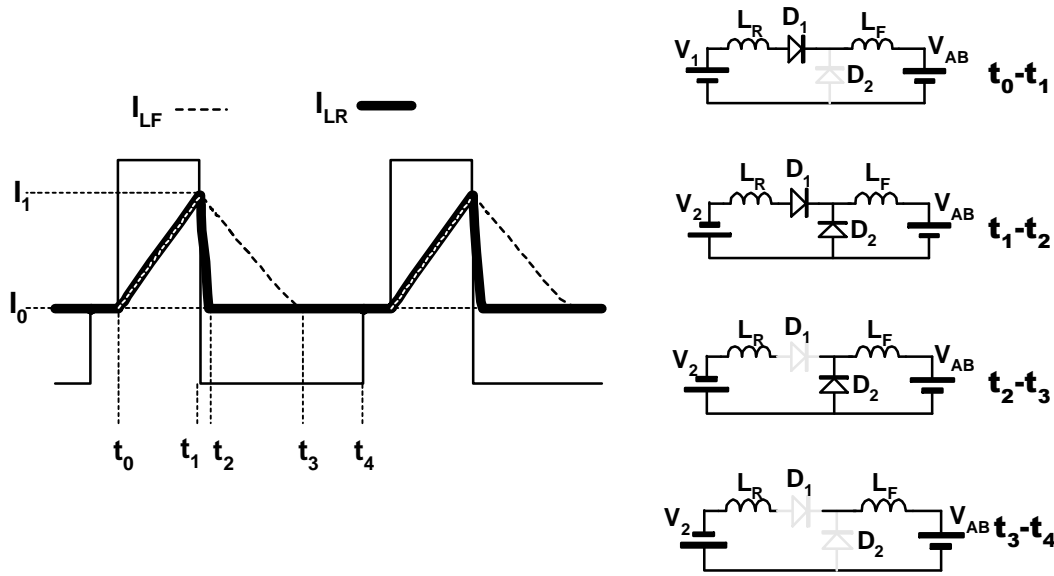


Fig. 1-3. MODO 1. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Intervalo $t_1-t_2-t_3$ ($t_3-t_1=tr_2$)

Cuando la corriente en L_R se anula, D_1 se abre y D_2 se mantiene en conducción. El periodo que D_2 permanece en conducción podrá obtenerse mediante (1.5).

$$I_1 = V_{AB} \frac{tr_2}{L_F} \quad (1.5)$$

1.2.1.2 Modo 2.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_2 < V_{AB} \frac{L_R}{L_F}$
- La bobina de filtro trabaja en modo de conducción discontinuo (MCD)

En la Fig. 1-4 aparecen representadas las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes en cada tramo de funcionamiento. Estos circuitos serán imprescindibles para la obtención de las ecuaciones de funcionamiento. Tenemos dos incógnitas (I_1 y t_2) por lo que necesitamos dos ecuaciones.

Intervalo t_0-t_1 ($t_1-t_0=dT_s$)

Este tramo es igual que para el Modo 1. Para calcular I_1 podrá utilizarse (1.3).

Intervalo t_1-t_2 ($t_2-t_1=tr$)

Sustituyendo en (1.2) las condiciones propias de este modo de funcionamiento, se puede comprobar que D_2 no entra en conducción. Durante todo el intervalo las dos bobinas permanecerán en serie. La duración de este tramo podrá calcularse mediante (1.6).

$$I_1 = \frac{V_2 + V_{AB}}{L_F + L_R} t_r \quad (1.6)$$

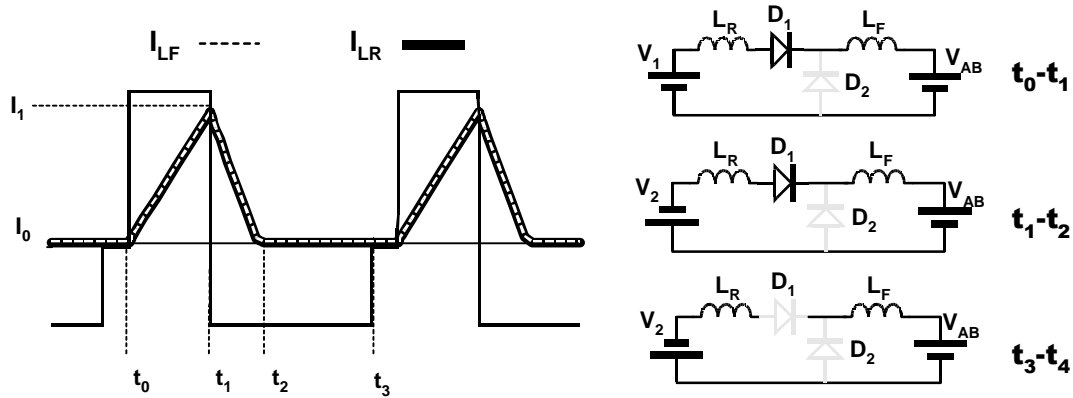


Fig. 1-4. MODO 2. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Este modo suele darse con bobinas de filtrado pequeñas, siendo un modo muy importante en las configuraciones donde la bobina de filtrado es de menor tamaño que la retrasadora. Los circuitos analizados considerando la bobina de filtro mucho más grande que la retrasadora, no tienen en cuenta este modo de funcionamiento.

1.2.1.3 Modo 3.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- La bobina de filtro trabaja en modo de conducción continuo (MCC)

En la Fig. 1-5 aparecen representadas las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes en cada tramo de funcionamiento. Estos circuitos serán imprescindibles para la obtención de las ecuaciones de funcionamiento. Tenemos 5 incógnitas (I_0 , I_1 , I_2 , t_1 y t_3) por lo que necesitamos cinco ecuaciones.

Intervalo t_0-t_1

En este modo de funcionamiento la bobina de filtro trabaja en MCC y la bobina retrasadora en MCD. Por tanto, al inicio del ciclo de trabajo la corriente en la bobina de filtro es mayor que la corriente en la bobina retrasadora. La diferencia entre estas dos corrientes circulará por D_2 . Este intervalo finalizará al igualarse las dos corrientes.

$$I_1 = I_0 - \frac{V_{AB}}{L_F} (t_1 - t_0) \quad (1.7)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{L_F} (t_1 - t_0) \quad (1.8)$$

Las ecuaciones (1.7) y (1.8) determinarán la evolución de las corrientes en este intervalo.

Intervalo t_1-t_2 ($t_2=dT_s$)

Cuando D2 deja de conducir las dos bobinas quedan en serie y alimentadas entre V1 y V_{AB}, obteniéndose (1.9).

$$I_2 = I_1 + \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_B} (t_2 - t_1) \quad (1.9)$$

Intervalo t₂-t₃

Durante este intervalo los dos diodos están en conducción, la corriente almacenada en la bobina retrasadora se descarga hacia V₂ mientras la bobina de filtro entrega energía a la salida. Este intervalo terminará cuando la bobina retrasadora esté totalmente descargada. Su duración podrá calcularse mediante (1.10).

$$I_2 = \frac{V_2}{L_R} (t_3 - t_2) \quad (1.10)$$

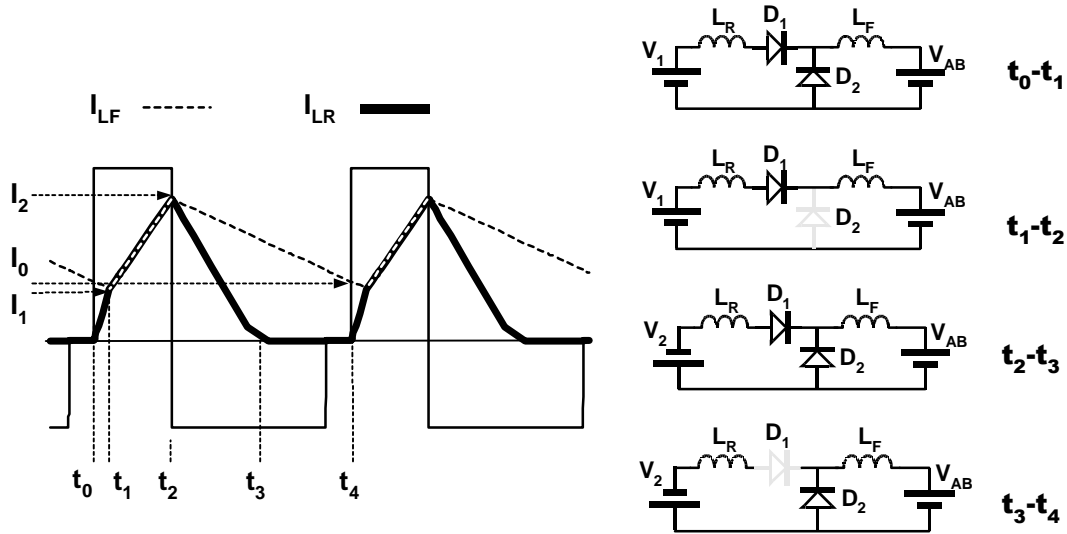


Fig. 1-5. MODO 3. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Intervalo t₃-t₄

Desde el instante en que cambia la tensión de entrada “t₂” la bobina de filtro se ha estado descargado a tensión constante (V_{AB}). Suponiendo un funcionamiento cuasiestacionario del convertidor la corriente al principio y al final del periodo de conmutación (T_s) será igual, obteniéndose (1.11).

$$I_2 - \frac{V_{AB}}{L_F} (t_4 - t_2) = I_0 \quad (1.11)$$

La solución al sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones (1.7) a (1.11) es mostrado en la expresión (1.12) donde son determinadas todas las corrientes indicadas en la Fig. 1-5 (I₀, I₁, I₂), así como los tiempos no coincidentes con periodos de conmutación (t₁, t₃).

$$I_0 = (V_1 \cdot d \cdot L_F - (L_F + L_R(1-d))V_{AB}) \frac{T_s}{L_R \cdot L_F}$$

$$I_1 = V_1 \frac{T_s}{L_R}$$

$$I_2 = (V_1 \cdot d - V_{AB}) \frac{T_S}{L_R} \quad (1.12)$$

$$t_3 - t_2 = I_2 \frac{L_R}{V_2}$$

$$t_1 = \frac{(V_1 \cdot d \cdot L_F - (L_F + L_R(1-d))V_{AB})}{L_R \cdot V_{AB} + V_1 \cdot L_F} T_S$$

Para el resto de las topologías sólo se plantearán los sistemas de ecuaciones, su resolución aparece en las hojas de cálculo utilizadas para los diseños.

1.2.2 Características Tensión-Corriente.

Aunque en el apartado anterior han sido planteadas las ecuaciones que rigen el funcionamiento de cada modo durante un periodo de conmutación, sería complejo utilizar estas expresiones para diseñar un RAA. Para estos diseños, será especialmente interesante determinar la corriente de entrada media y de pico. Mediante la primera podrá calcularse el contenido armónico de baja frecuencia y mediante la segunda podrán dimensionarse los magnéticos así como el estrés de corriente en los semiconductores del circuito. Obtener una función que asocie a cada tensión de entrada cualquiera de estos parámetros agilizará y simplificará los cálculos para el diseño de RAA. Por esta razón, se obtendrán las funciones $I_{media}(V_{AB})$ e $I_{pico}(V_{AB})$, que denominaremos: “Característica tensión-corriente media” y “Característica tensión-corriente de pico”.

Una vez estudiados los modos de funcionamiento podrá determinarse la corriente media y de pico que circula por la RAI en función de los siguientes parámetros:

- Ciclo de trabajo d
- Tensión aplicada a la RAI V_{AB}
- Tensiones de alimentación V_1 y V_2
- Bobina retrasadora L_R
- Bobina de filtro L_F

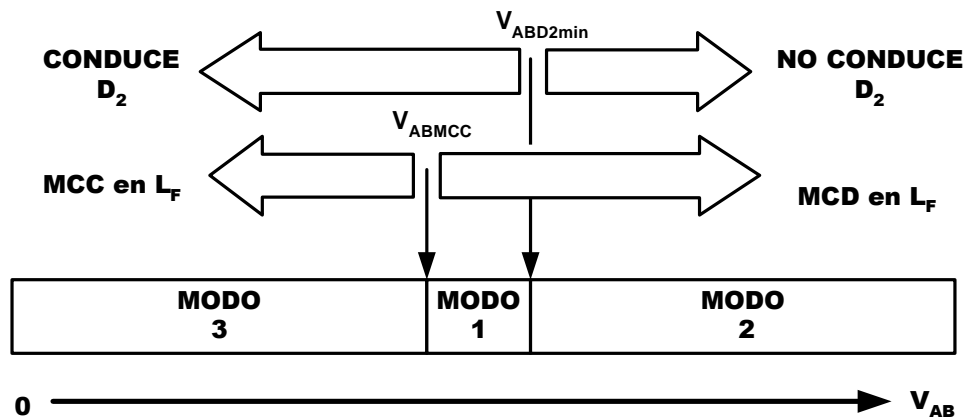


Fig. 1-6 Determinación del modo de funcionamiento en función de la tensión V_{AB}

La mayor parte de los parámetros anteriormente citados permanecerán constantes durante un periodo de conmutación. Al suponer la tensión en el condensador constante, también lo será el ciclo de trabajo y las tensiones que a través del magnético principal alimentarán la RAI. Por tanto la corriente de entrada solo dependerá de la tensión aplicada en los extremos A-B de la RAI.

En estas condiciones, para obtener el modo de funcionamiento deberá seguirse el esquema mostrado en Fig. 1-6. La tensión V_{AB} límite para el modo de conducción continua (MCC) podrá calcularse igualando “ t_1 ” a cero en (1.12), siendo su expresión la mostrada en (1.13). Por otra parte

el límite para la conducción de D_2 coincide con el límite propuesto para la división entre los dos primeros modos de funcionamiento. Los valores de V_{AB} límite “ V_{ABMCC} ” (límite entre el MCC y MCD) y “ $V_{ABD2min}$ ” (Tensión por debajo de la cual no conduce D_2) determinarán el modo de conducción (ver Fig. 1-6).

$$V_{ABMCC} = \frac{V_1 \cdot d}{1 + \frac{L_R}{L_F}(1-d)} \quad (1.13)$$

$$V_{ABD2min} = \frac{V_1 \cdot d}{1-d} \frac{L_F}{L_R} \quad (1.14)$$

Puede comprobarse, que la tensión límite para la conducción del diodo de libre circulación siempre será mayor o igual que la tensión límite entre el MCC y MCD de la RAI. Esta circunstancia permite determinar unívocamente el modo de funcionamiento conociendo la tensión aplicada a la RAI.

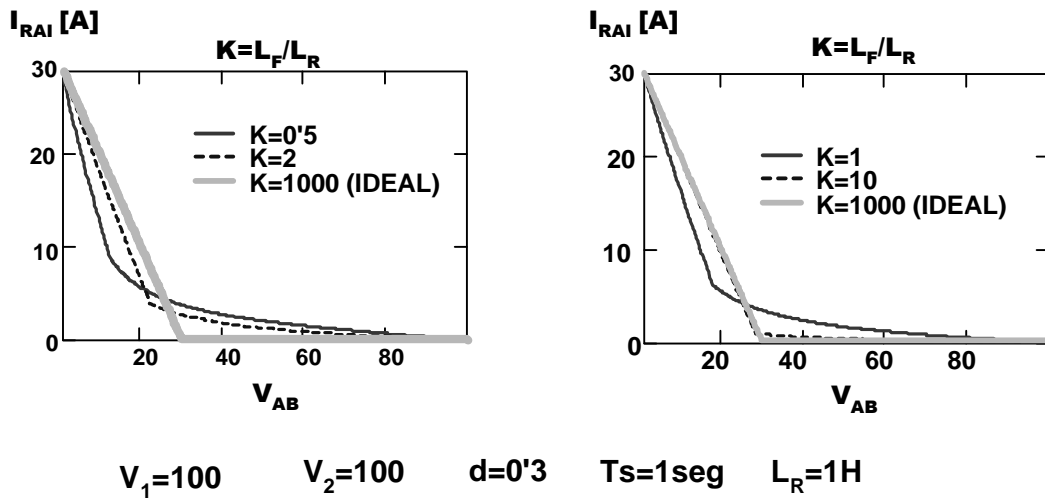


Fig. 1-7. Características Tensión-Corriente media para diferentes relaciones entre bobinas.

1.2.2.1 Características tensión-corriente con dos bobinas.

De las gráficas que aparecen en la Fig. 1-7, puede comprobarse que este tipo de topología presenta alta impedancia incluso cuando funciona en MCC. Esto hace que pueda utilizarse en todo el rango de tensiones $(0, V_1)$, y que además la corriente de pico máxima no difiera de la corriente media máxima (Fig. 1-8). Estas características son apropiadas para la aplicación a la que estará destinada la RAI, manteniendo el estrés de tensión y corriente dentro de un nivel aceptable.

Por otra parte, como puede observarse en la Fig. 1-7, con relaciones de bobinas $(K=L_F/L_R)$, no excesivamente grandes $(K=1, K=2)$ las características mostradas se asemejan bastante a la curva obtenida mediante el modelo “Resistencia sin pérdidas”.

Finalmente y como verificación de los cálculos realizados, podrá comprobarse que para valores de K grandes, la característica se aproxima fielmente al modelo “tensión-resistencia sin pérdidas”, con los valores mostrados a continuación:

- $V_S = V_1 \cdot d$ que en el ejemplo de la Fig. 1-7 valdrá $100 \times 0.3 = 30$ Voltios.
- $R_{SP} = L_R \cdot \frac{1}{T_S}$ que en el ejemplo valdrá 1Ω .

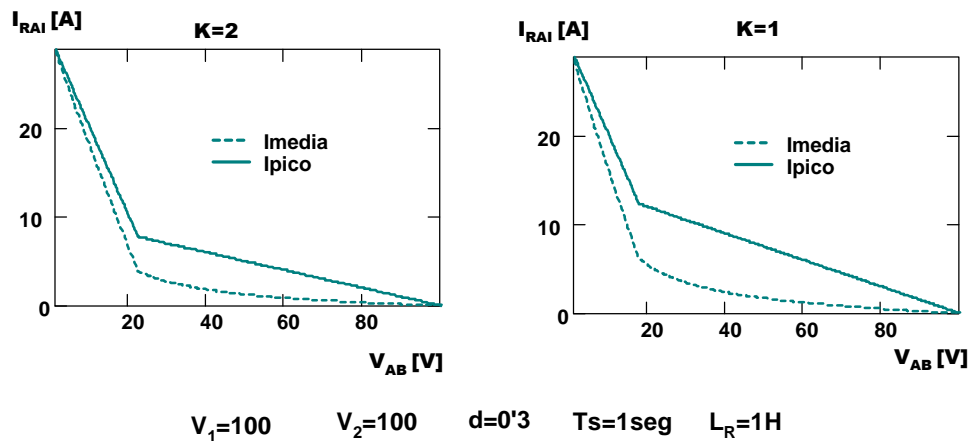


Fig. 1-8 . Corriente media y corriente de pico para diferentes relaciones de bobinas.

1.2.2.2 Características tensión-corriente si sólo existe bobina de filtro (L_F)

Esta configuración corresponde a un convertidor directo. La inductancia retrasadora (L_R) aunque no aparece en el esquema, estará presente a través de la inductancia de dispersión del transformador utilizado. Por tanto, aunque la impedancia de este convertidor en MCC se calcule de igual forma que en el ejemplo anterior, presentará un valor muy inferior. Así, para utilizar esta topología como RAI deberá restringirse su funcionamiento al MCD (Fig. 1-9). Como consecuencia de este tipo de funcionamiento, la corriente media máxima y la corriente de pico máxima son muy diferentes, esta situación penalizará en corriente al convertidor principal cuando sea utilizado como reductor activo de armónicos.

En la Fig. 1-9, puede comprobarse cómo al llegar la tensión aplicada a la RAI al límite para MCC (30 V en el ejemplo), la impedancia de esta descende rápidamente).

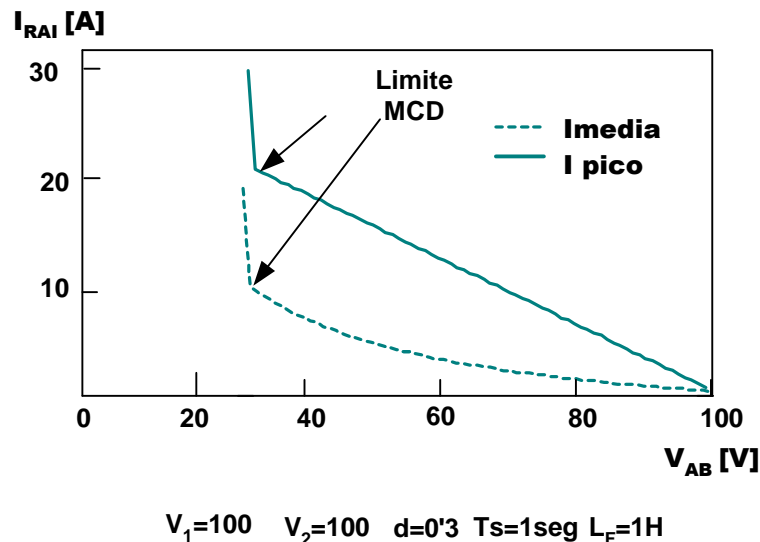


Fig. 1-9 . Característica tensión-corriente de un reductor en MCD.

1.2.2.3 Características tensión-corriente si sólo existe bobina retrasadora (L_R)

En el caso de que no exista bobina de filtro, se presenta un caso intermedio entre las dos topologías anteriormente estudiadas. Por una parte, y como consecuencia de trabajar con bobina retrasadora, la tensión mínima que podrá haber a la salida de la RAI manteniendo esta su condición

de alta impedancia será de 0 voltios. Sin embargo, al trabajar sólo con una bobina, estará obligado a trabajar en MCD y por tanto la corriente de pico máxima será superior a la corriente media máxima.

1.3 Rectificador de onda completa tipo (1) y señal simétrica.

Los convertidores CC/CC derivados de la familia “reductora” con varios interruptores (medio puente, puente completo y convertidor simétrico) presentan en el transformador tensiones simétricas. La Fig. 1-10 muestra las posibles configuraciones que puede presentar esta topología y cómo deben conectarse dentro de un convertidor en puente completo. Mientras la bobina de filtro situada a la salida del convertidor CC/CC trabaje en MCC, las señales que alimentarán la RAI a través del devanado N_3 serán similares a las mostradas en la Fig. 1-11.

1.3.1 Ecuaciones de funcionamiento.

Gracias a la simetría que presenta la tensión de alimentación (Fig. 1-11) podrá estudiarse el funcionamiento en el semiperiodo positivo y extrapolar los resultados obtenidos al semiciclo negativo. Dependiendo de la tensión aplicada a la RAI existirán diferentes modos de funcionamiento que deben ser identificados. Esto se realizará determinando el número de diodos que se encuentran en conducción tras las transiciones de la tensión de alimentación. En esta topología los diodos conducen dos a dos y la tensión que debe ser calculada para determinar su polarización es V_{XY} (Fig. 1-11). Es decir, la tensión de entrada al puente rectificador.

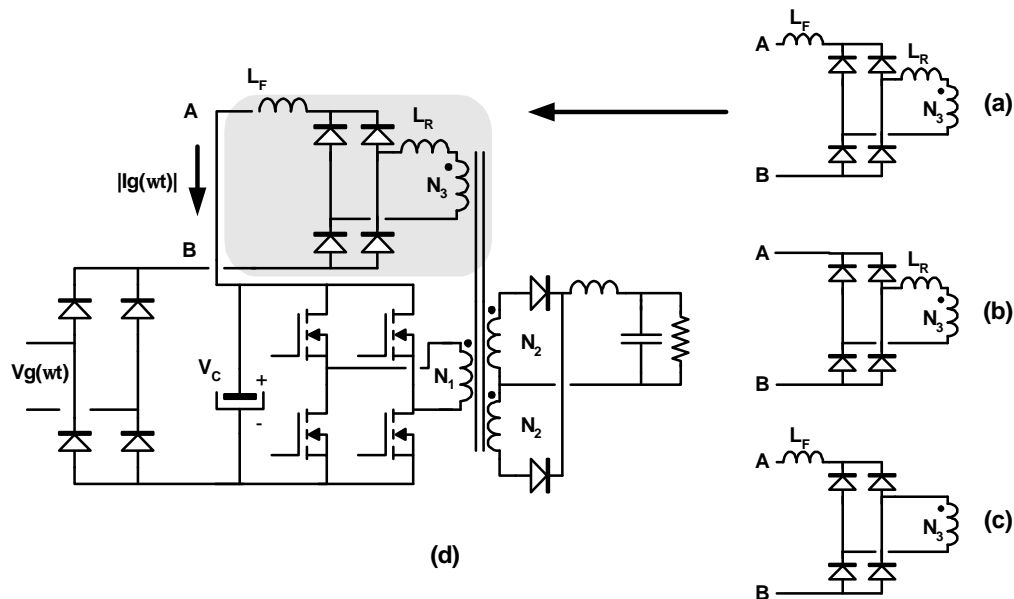


Fig. 1-10. Posibles configuraciones de la RAI (a, b y c) y ejemplo de utilización en un puente completo (d).

Instante t_0 con MCD.

Inicialmente todos los diodos se encuentran abiertos, por lo que $V_{XY}=V_1$. En estas condiciones conducirán D_1 y D_4 , quedando como tensión definitiva V_{XY} la mostrada en la expresión (1.15).

$$V_{XY} = \frac{V_1 \cdot L_F + V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} \quad (1.15)$$

Instante dT_s en MCD y MCC.

Inicialmente D_1 D_4 se encuentran en conducción. En el instante dT_s cambiará el valor de la tensión de alimentación. Sin embargo D_1 y D_4 no podrán abrirse hasta que la corriente que por ellos circula se anule. Si en estas condiciones calculamos V_{XY} (1.16) comprobaremos que siempre será positiva. Por tanto, D_2 y D_3 no conducirán.

$$V_{XY} = \frac{V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} \quad (1.16)$$

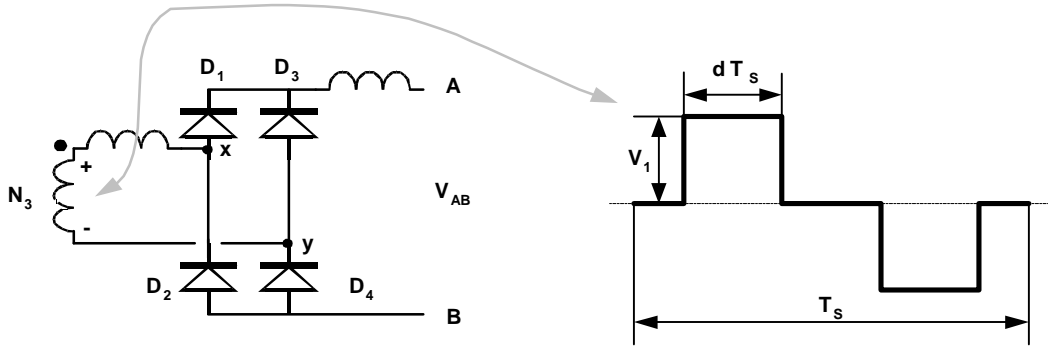


Fig. 1-11. Tensión en los extremos del devanado N_3

Instante t_0 con MCC.

A diferencia de lo que sucedía en la topología anterior, ésta puede permanecer en MCC aun cuando la tensión V_{AB} sea distinta de cero. De acuerdo con el sentido de la corriente en las bobinas (Fig. 1-12 (a)), al inicio del periodo de conmutación conducen obligatoriamente D_2 y D_3 . En estas condiciones V_{XY} (1.17) puede ser positiva o negativa. Si es negativa coincidirá con la polarización de los diodos que inicialmente se encuentran en conducción por lo que no cambiará nada. Si por el contrario es positiva, significará que conducen los cuatro diodos a la vez y que la tensión real en ese punto es nula (Fig. 1-12(b)).

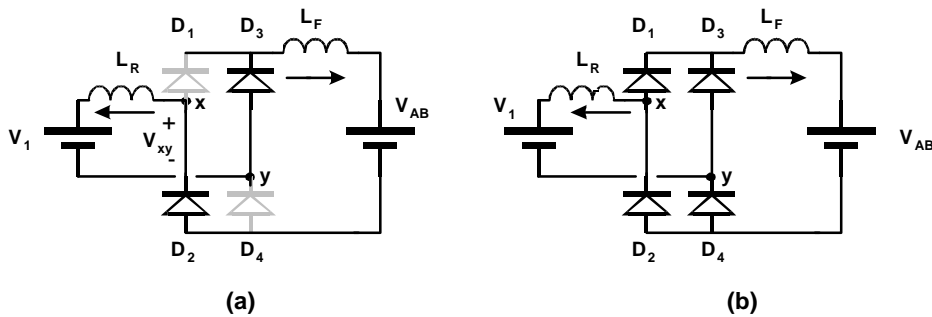


Fig. 1-12. Pasos para determinar los diodos en conducción.

$$V_{XY} = \frac{V_I \cdot L_F - V_{AB} \cdot L_R}{L_R + L_F} \quad (1.17)$$

De acuerdo con las condiciones deducidas esta topología tiene tres posibles modos de funcionamiento. Las condiciones bajo las cuales se da cada uno de estos modos están resumidas en la Tabla 1-2.

MODO	CONDICIONES	
1	-----	MCD en L_F
2	$V_{AB} < V_1 \frac{L_F}{L_R}$	MCC en L_F
3	$V_{AB} > V_1 \frac{L_F}{L_R}$	Límite MCC/MCD en L_F

Tabla 1-2. Modos de funcionamiento para rectificador de onda completa tipo (1) con señal simétrica.

1.3.1.1 Modo 1.

Cuando el valor de la tensión V_{AB} sea muy próximo a V_1 por el circuito circulará poca corriente y por tanto se favorecerá el funcionamiento del mismo en MCD. En la Fig. 1-13 pueden observarse las formas de corriente más representativas así como los circuitos equivalentes para su estudio en cada uno de los diferentes tramos en que ha sido dividido el funcionamiento. Tenemos dos incógnitas (I_1 y t_2) por lo que necesitamos dos ecuaciones.

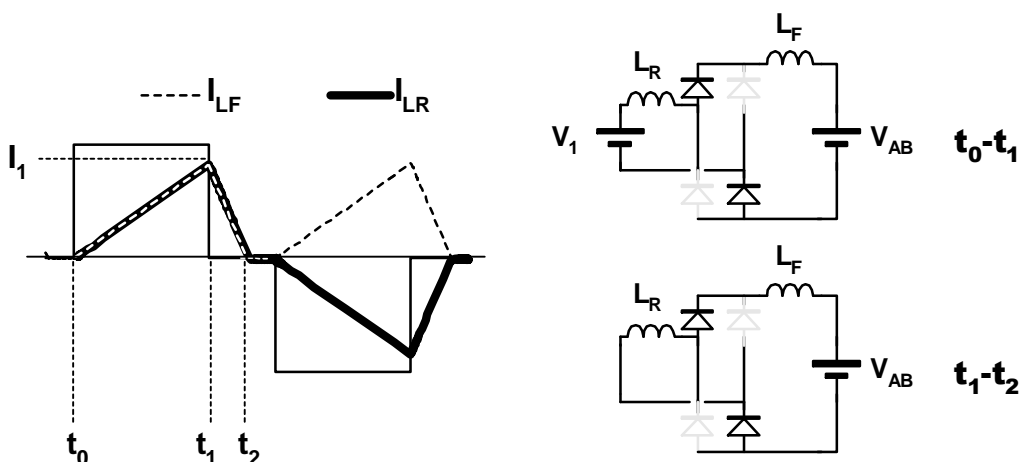


Fig. 1-13. MODO 1. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simuladas en Pspice.

Intervalo t_0-t_1 (donde $t_1=d T_s$)

De acuerdo con el circuito equivalente asociado a este intervalo (Fig. 1-13) la corriente tanto en la bobina de filtro como en la bobina retrasadora alcanzará un valor de pico I_1 cuyo valor puede ser calculado mediante la ecuación (1.18).

$$I_1 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_F} t_1 \quad (1.18)$$

Intervalo t_1-t_2 .

Se mantienen en conducción los mismos diodos que en el apartado anterior, por lo que las bobinas que se habían cargado en serie también se descargan en serie suportando entre las dos la tensión aplicada a la RAI (1.19). Igualando (1.18) y (1.19) se calculará el valor de " t_2 " (1.20). En este modo de funcionamiento " t_2 " tendrá un valor máximo de $T_s/2$, ya que si se alcanzara este valor se estaría en MCC. Este modo se dará mientras la tensión V_{AB} sea superior al límite calculado según (1.21).

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{L_R + L_F} (t_2 - t_1) \quad (1.19)$$

$$t_2 = t_1 \frac{V_1}{V_{AB}} \quad (1.20)$$

$$V_{AB \text{ lim iteMCD}} = V_1 \cdot 2 \cdot d \quad (1.21)$$

1.3.1.2 Modo 2.

A diferencia de la topología anteriormente estudiada (rectificador de media onda) el caso que nos ocupa presenta un solo modo de conducción discontinua pero dos modos de conducción continua. Las condiciones que deben darse para que la RAI funcione en el Modo 2, que es uno de los MCC son:

- $V_{AB} < V_1 \frac{L_F}{L_R}$
- $V_{AB} < V_1 \cdot 2 \cdot d$

La Fig. 1-14 muestra los circuitos equivalentes en cada intervalo de funcionamiento así como las formas de onda más importantes.

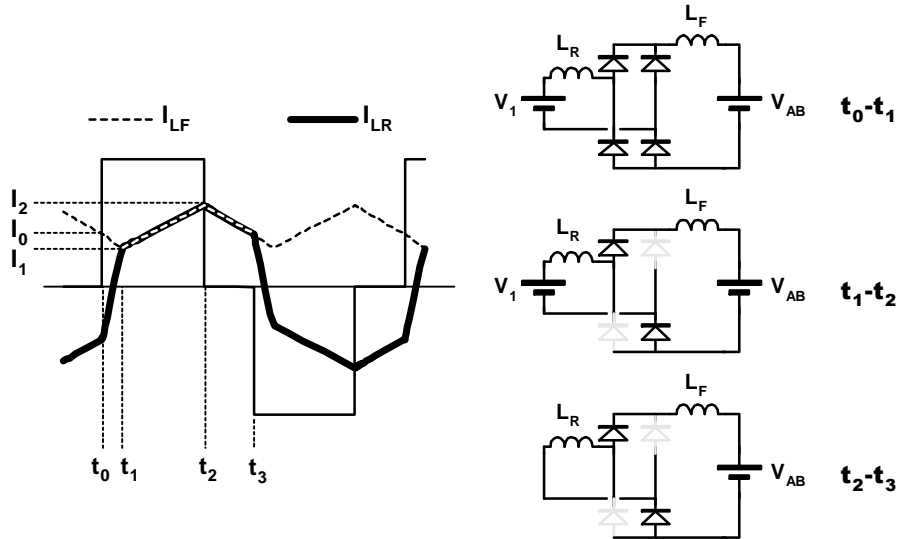


Fig. 1-14. MODO 2. Principales formas de onda y circuitos equivalentes.

Intervalo t_0-t_1 .

Debido a las condiciones de este modo durante este intervalo conducirán los cuatro diodos de la RAI, tal y como puede verse en el circuito equivalente de este tramo. El final de este intervalo se alcanzará cuando el valor de las corrientes en las bobinas se igualen o lo que es igual, cuando la corriente que circula por los diodos D_2 y D_3 se anule. Del funcionamiento en este tramo pueden deducirse las expresiones (1.22) y (1.23).

$$I_1 = I_0 + \frac{V_{AB}}{L_F} t_1 \quad (1.22)$$

$$I_1 = -I_0 + \frac{V_1}{L_R} t_1 \quad (1.23)$$

Intervalo t_1-t_2 ($t_2=dT_s$).

Se abren los diodos D_2 y D_3 quedando conectadas en serie la bobina retrasadora y la bobina de filtro. Este periodo se prolongará hasta que se anule la tensión en el devanado N_3 . De este intervalo puede deducirse la expresión (1.24).

$$I_2 = I_1 + \frac{V_1 - V_{AB}}{L_F + L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.24)$$

Intervalo t_2 - t_3 ($t_3=T_s/2$).

Calculando la tensión " V_{xy} " se comprueba que los diodos que permanecen en conducción son los indicados en la Fig. 1-14. Las bobinas (conectadas en serie) se descargan con una tensión aplicada a sus extremos V_{AB} . La ecuación (1.25) se obtiene del comportamiento aquí explicado.

$$I_0 = I_2 - \frac{V_{AB}}{L_R + L_F} (t_3 - t_2) \quad (1.25)$$

Como puede comprobarse en este modo de funcionamiento se tienen 4 incógnitas (I_0 , I_1 , I_2 , t_1) que pueden calcularse mediante el sistema de ecuaciones formador por las ecuaciones (1.22)-(1.25).

1.3.1.3 Modo 3.

Las condiciones que deben darse para que la RAI funcione en este modo son:

- $V_{AB} > V_1 \frac{L_F}{L_R}$
- $V_{AB} < V_1 \cdot 2 \cdot d$

Este modo mantendrá las bobinas conectadas en serie durante todos los intervalos descritos en el funcionamiento. El valor absoluto de la corriente en ambas bobinas será el mismo tal y como muestra la Fig. 1-15.

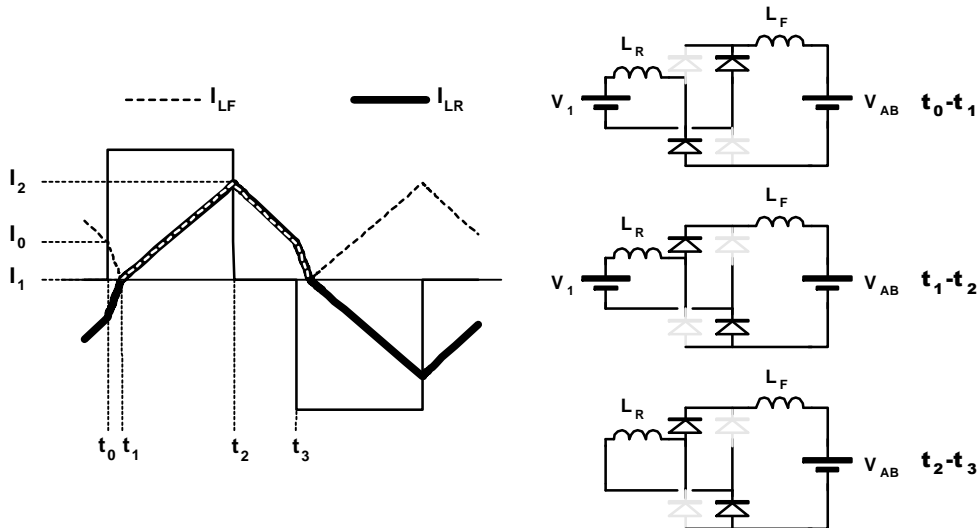


Fig. 1-15. MODO 3. Principales formas de onda y circuitos equivalentes.

Intervalo t_0 - t_1 .

Al igual que sucedía en el modo anterior (Modo 2), la corriente existente en las bobinas en " t_0 " obliga a conducir a D_2 y D_3 . Sin embargo en este caso, al calcular el valor de " V_{xy} " (1.17) se obtiene un valor negativo, lo que significará que no conducirán D_1 y D_4 . Estos diodos no

conducirán hasta que la corriente cambie de sentido en el intervalo siguiente. Este comportamiento se resume en la ecuación (1.26).

$$I_0 = \frac{V_1 + V_{AB}}{L_R + L_F} t_1 \quad (1.26)$$

Intervalo t_1 - t_2 .

Al cambiar de sentido la corriente que circula por la bobina retrasadora cambian los diodos que se encuentran en conducción. La ecuación deducida en este tramo es (1.27).

$$I_2 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_F} (t_2 - t_1) \quad (1.27)$$

Intervalo t_2 - t_3 .

Al anularse la tensión de alimentación se inicia la descarga de las bobinas hasta alcanzar de nuevo el valor de corriente I_0 en " t_3 ". La ecuación aquí deducida es (1.28).

$$I_0 = I_2 - \frac{V_{AB}}{L_R + L_F} (t_3 - t_2) \quad (1.28)$$

Cómo el valor de I_1 es nulo, este modo presenta 3 incógnitas que podrán calcularse resolviendo el sistema formado por las ecuaciones (1.26)-(1.28).

1.3.2 Características Tensión-Corriente.

Al estudiar los modos de funcionamiento han sido propuestos los límites entre cada uno de los modos. A diferencia de las topologías con rectificadores de media onda, los límites aquí deducidos no estarán ordenados de una forma creciente o decreciente como sucedía en la Fig. 1-6. En este caso podrá pasarse del modo 1 al modo 3 sin pasar por el modo 2. Para determinar el modo de funcionamiento correspondiente a cada valor de V_{AB} deberá seguirse el organigrama mostrado en la Fig. 1-16.

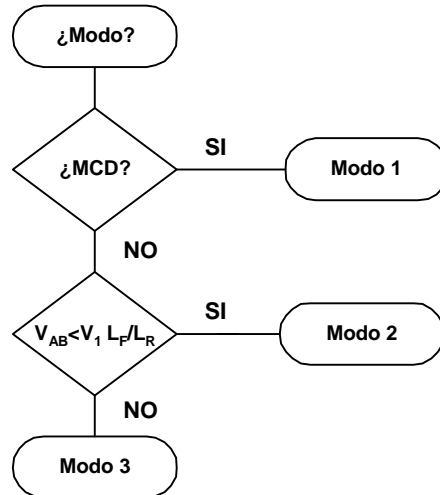


Fig. 1-16. Organigrama para la obtención del modo de funcionamiento.

En la Fig. 1-17 se muestran las características media (línea continua) y de pico (línea discontinua) para los siguientes valores de " K ": 0.5 (a), 0 (b) y 2 (c). Bajo cada una de estas características, se ha representado la forma de corriente que tendría un RAA con cada una de ellas. Sobre cada característica han sido marcados los modos de funcionamiento para que pueda comprobarse cómo cada uno de ellos influye sobre la forma final de la característica.

La característica (a) es una “mezcla” de (b) y (c). Sin embargo, sobre la forma final de la corriente de entrada al RAA siempre tendrá más importancia el modo de funcionamiento con mayor corriente. Así, puede comprobarse que las características y formas de onda (a) y (c) son similares aún cuando la bobina de filtro en (c) es cuatro veces superior a la bobina de (a). Esta reducción de la bobina de filtro puede llevar a una deducción errónea: “si disminuye la bobina de filtro aumentará la corriente de pico”. Sin embargo esto no es así, ya que aunque el valor del rizado aumenta (obsérvese la diferencia entre la corriente media y la de pico), el valor máximo no es apreciablemente superior. Por otra parte, la característica (b) es muy diferente a las dos anteriores y se aleja del modelo “resistencia sin pérdidas”. La corriente de pico en este ejemplo será aproximadamente el doble de la corriente media, por lo que aumenta el estrés de corriente sobre el convertidor CC/CC. Esta diferencia de comportamiento es debida a que en este caso el modo de funcionamiento más importante es el “3” mientras que en los casos anteriores era el “2”.

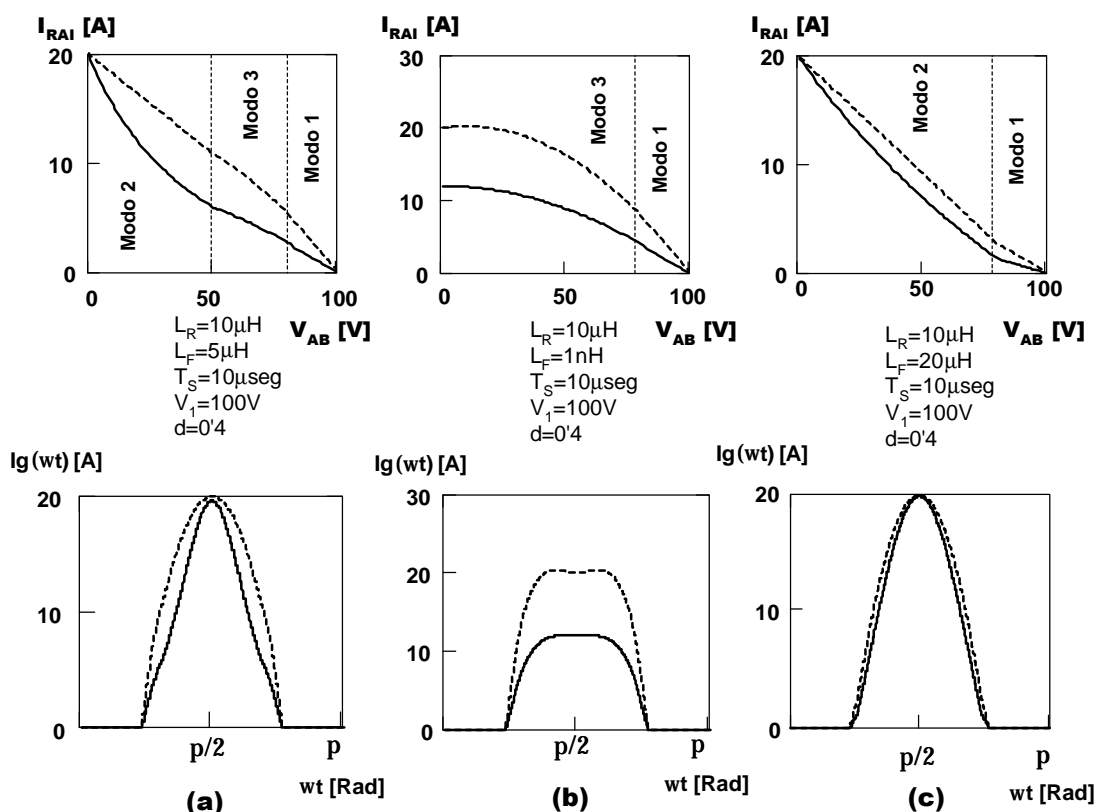


Fig. 1-17. Características y corrientes de entrada para RAI de onda completa tipo (1) alimentada con señal simétrica.

La característica tensión corriente correspondiente a la topología con “sólo” bobina de filtro presentará alta impedancia sólo en el “Modo 1”. Por tanto su factor de aprovechamiento es muy bajo, por lo que no se ha incluido en este análisis.

1.4 Rectificador de onda completa tipo (1) y señal asimétrica.

La misma topología estudiada en el apartado anterior puede ser alimentada desde la tensión generada en una bobina del convertidor CC/CC. Al modificarse la señal de alimentación de la RAI también se modificarán sus ecuaciones de funcionamiento. Sin embargo, podrá comprobarse que los resultados obtenidos son muy similares a los del apartado anterior.

Este tipo de RAI será muy apropiada para topologías basadas en convertidores de retroceso y para convertidores CC/CC sin aislamiento (reductor, elevador, reductor-elevador). La Fig. 1-18 muestra un ejemplo de esta topología dentro de un RAA así como todas las configuraciones posibles.

1.4.1 Ecuaciones de funcionamiento.

La Fig. 1-19 muestra de forma general la forma que presentará la tensión de alimentación en la RAI. Dado que en la mayor parte de las aplicaciones el convertidor CC/CC trabajará en MCC, sólo se obtendrán las características donde $d_2=1-d_1$. Las ecuaciones aquí obtenidas serán válidas siempre y cuando el valor de d_1 sea menor de 0'5. Para facilitar la comprensión de las expresiones aquí deducidas se incluirá en las gráficas el valor de la tensión aplicada a la entrada del puente de diodos de la RAI (V_{xy}). Esta tensión será función (entre otras cosas) del número de diodos que se encuentren en conducción.

Los diferentes modos de funcionamiento existentes dependerán de la configuración de la RAI, de la señal de alimentación y de la tensión V_{AB} . A continuación se analizará el número de modos de conducción posibles en esta configuración.

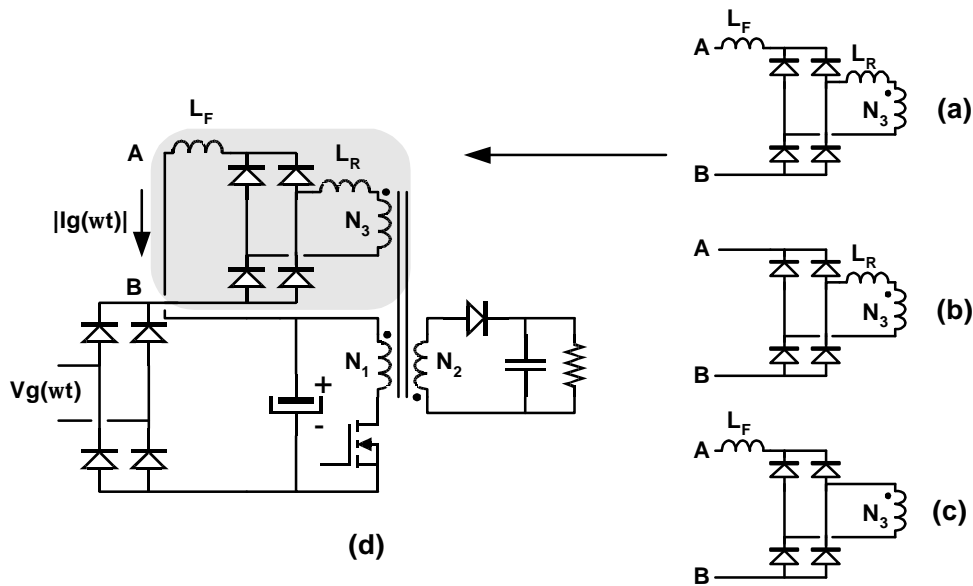


Fig. 1-18.(a)(b)(c) RAI con rectificador de onda completa (d) Convertidor de retroceso con corrector de armónicos del tipo (a).

Instante t_0 con MCD.

Igual que para la RAI anterior.

Instante dT_s en MCD y MCC.

Inicialmente D_1 y D_4 se encuentran en conducción. En el instante dT_s cambiará el valor y la polaridad de la tensión de alimentación. D_1 y D_4 seguirán conduciendo hasta que la corriente que por ellos circula se anule. Si en estas condiciones calculamos V_{XY} (1.29) comprobaremos que V_{AB} siempre será positiva. Por tanto, D_2 y D_3 no conducirán.

$$V_{XY} = \frac{V_{AB} \cdot L_R - V_2 \cdot L_F}{L_R + L_F} \quad (1.29)$$

Instante t_0 con MCC.

Al igual que sucedía con este tipo de RAI cuando estaba alimentada por una tensión simétrica, dependiendo de la tensión V_{XY} (1.17) pueden conducir dos o cuatro diodos. Si es negativa coincidirá con la polarización de los diodos que inicialmente se encuentran en conducción por lo que no cambiará nada. Si por el contrario es positiva, significará que conducen los cuatro diodos a la vez y que la tensión real en ese punto es nula.

De acuerdo con las condiciones deducidas esta topología tiene cinco posibles modos de funcionamiento. Las condiciones bajo las cuales se da cada uno de estos modos están resumidas en la Tabla 1-3.

MODO	CONDICIONES		
1	Límite MCD y MCD en L_F	$V_{AB} > V_1 \frac{L_F}{L_R}$	$V_{AB} > V_2 \frac{L_F}{L_R}$
2	Cuasi-Límite MCD y MCC en L_F	$V_{AB} < V_1 \frac{L_F}{L_R}$	$V_{AB} > V_2 \frac{L_F}{L_R}$
3 Imposible $V_2 < V_1$	-----	$V_{AB} > V_1 \frac{L_F}{L_R}$	$V_{AB} < V_2 \frac{L_F}{L_R}$
4	MCC en L_F	$V_{AB} < V_1 \frac{L_F}{L_R}$	$V_{AB} < V_2 \frac{L_F}{L_R}$
5	MCD en L_F	-----	$V_{AB} > V_2 \frac{L_F}{L_R}$
6	MCD en L_F	-----	$V_{AB} < V_2 \frac{L_F}{L_R}$

Tabla 1-3. Modos de funcionamiento para rectificador de onda completa tipo (1) con señal asimétrica.

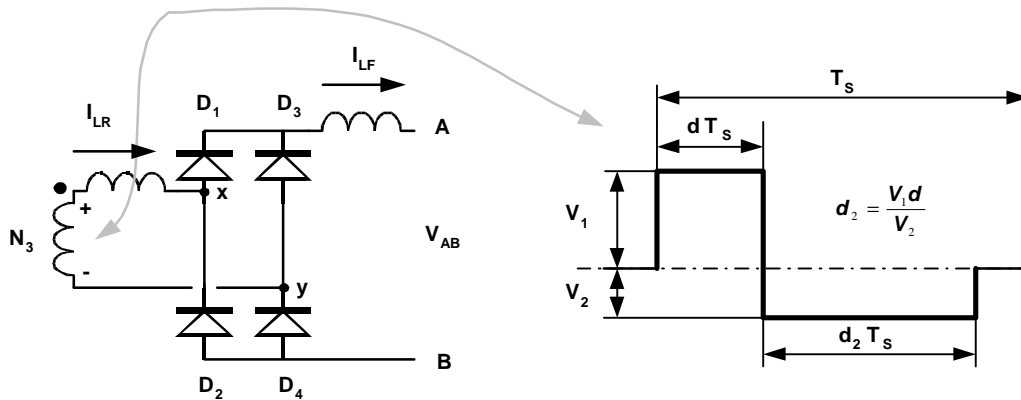


Fig. 1-19. Tensión en los extremos del devanado N_3 y sentidos de corriente que se considerarán como positivos.

1.4.1.1 Modo 1.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} > V_1 \frac{L_F}{L_R}$
- $V_{AB} > V_2 \frac{L_F}{L_R}$

- MCC en L_F

Tenemos 4 incógnitas (I_0 , I_1 , t_1 y t_3) por tanto necesitaremos 4 ecuaciones, que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0 - t_1 .

Sólo conducen los diodos resaltados en el circuito equivalente de la Fig. 1-20. Durante este tramo las dos bobinas quedan conectadas en serie obteniéndose la ecuación (1.30). Este tramo termina cuando la corriente en los diodos se anula y comienzan a conducir D_1 y D_4 .

$$I_0 = \frac{V_1 + V_{AB}}{L_F + L_R} t_1 \quad (1.30)$$

Intervalo t_1 - t_2 (donde $t_2 = dT_s$).

Al cambiar en sentido de la corriente en la bobina retrasadora, cambian los diodos que se encuentran en conducción. Las bobinas continúan estando en serie. Sin embargo, la tensión existente en sus extremos es la diferencia entre V_1 y V_{AB} . La evolución de la corriente quedará resumida en la ecuación (1.31).

$$I_1 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_F + L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.31)$$

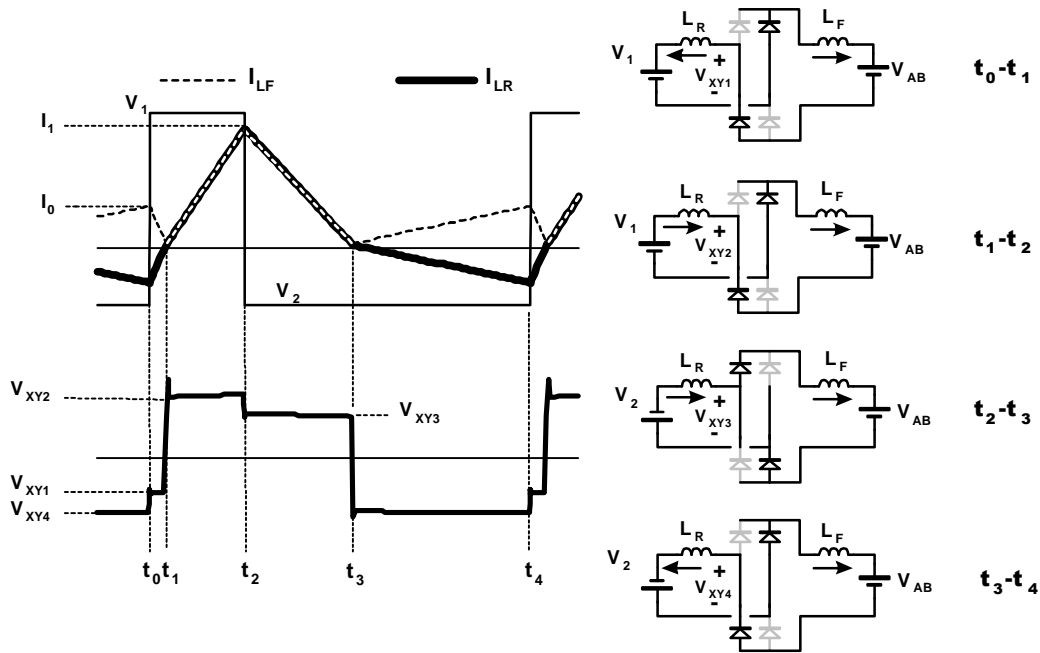


Fig. 1-20. MODO 1. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Intervalo t_2 - t_3 .

Las bobinas continúan trabajando en serie, ya que no se han modificado los diodos que se encuentran en conducción. La variación de la tensión de alimentación modificará la pendiente de decrecimiento de la corriente. Este cambio puede apreciarse en la ecuación (1.32).

$$I_1 = \frac{V_2 + V_{AB}}{L_F + L_R} (t_3 - t_2) \quad (1.32)$$

Intervalo t_3-t_4 (donde $t_4=T_s$).

El cambio de sentido que se produce en la corriente que circula por la bobina retrasadora, modifica los diodos en conducción. De todas formas, las bobinas siguen estando conectadas en serie. La ecuación (1.33) completará el sistema de ecuaciones necesario para determinar la corriente que circula por la RAI en este modo de funcionamiento.

$$I_0 = \frac{V_2 - V_{AB}}{L_F + L_R} (t_4 - t_3) \quad (1.33)$$

Los valores de I_0 , I_1 , t_1 y t_3 serán obtenidos de la resolución del sistema de ecuaciones formado por (1.30)-(1.33). Puede servir como comprobación observar que la tensión V_{XY} , coincide con la tensión de polarización calculada para determinar qué diodos se encuentran en conducción.

1.4.1.2 Modo 2.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} < V_1 \frac{L_F}{L_R}$
- $V_{AB} > V_2 \frac{L_F}{L_R}$
- MCC en L_F

Tenemos 5 incógnitas (I_0 , I_1 , I_2 , t_1 y t_3) por tanto necesitaremos 5 ecuaciones, que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

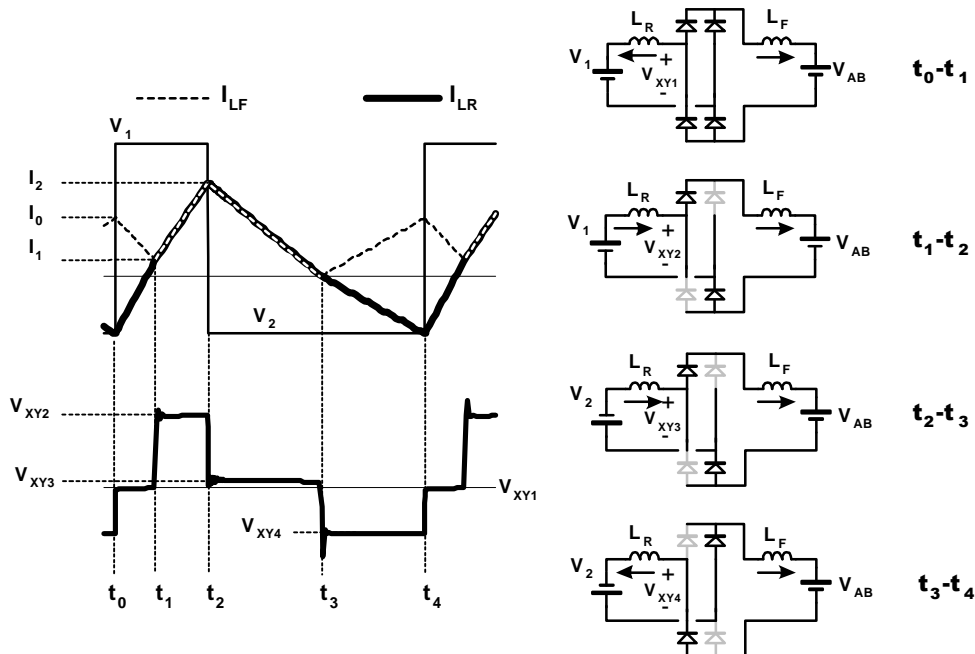


Fig. 1-21. MODO 2. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Intervalo t_0-t_1 .

Durante este intervalo se encuentran en conducción los cuatro diodos, por lo que el valor de “V_{xy}” será “0” (Fig. 1-21). En estas condiciones la tensión aplicada a las bobinas es diferente y por tanto también lo será su evolución.

Este intervalo se prolongará hasta que la corriente en la bobina retrasadora iguale a la corriente en la bobina de filtro. De este intervalo pueden obtenerse dos ecuaciones (1.34) y (1.35).

$$I_1 = \frac{V_1}{L_R} t_1 - I_0 \quad (1.34)$$

$$I_1 = I_0 - \frac{V_{AB}}{L_F} t_1 \quad (1.35)$$

Intervalo t_1 - t_2 (donde $t_2=dT_s$).

Durante este intervalo sólo conducirán los diodos D₁ y D₄. Al coincidir la corriente en las dos bobinas sólo puede obtenerse una ecuación .

$$I_2 = I_1 + \frac{V_1 - V_{AB}}{L_F + L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.36)$$

Intervalo t_2 - t_3 .

Se mantienen en conducción los mismos diodos que en el tramo anterior. Sin embargo, al modificarse la tensión de alimentación variará la evolución de la corriente en las dos bobinas, ya que se encuentran en serie. La ecuación deducida en este tramo es (1.37).

$$I_2 = \frac{V_2 + V_{AB}}{L_F + L_R} (t_3 - t_2) \quad (1.37)$$

Intervalo t_3 - t_4 (donde $t_4=T_s$).

Este intervalo se inicia cuando la corriente en los diodos D₁ y D₄ se anula. La ecuación deducida en este tramo es (1.38).

$$I_0 = \frac{V_2 - V_{AB}}{L_F + L_R} (t_4 - t_3) \quad (1.38)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo de funcionamiento estará formado por (1.34)-(1.38).

1.4.1.3 Modo 3.

Este modo se daría bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} > V_1 \frac{L_F}{L_R}$
- $V_{AB} < V_2 \frac{L_F}{L_R}$

Si $V_1 > V_2$ este caso es imposible.

1.4.1.4 Modo 4.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} < V_1 \frac{L_F}{L_R}$
- $V_{AB} < V_2 \frac{L_F}{L_R}$
- MCC en L_F

Tenemos 6 incógnitas (I_0 , I_1 , I_2 , I_3 , t_1 y t_3) por lo que necesitaremos 6 ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

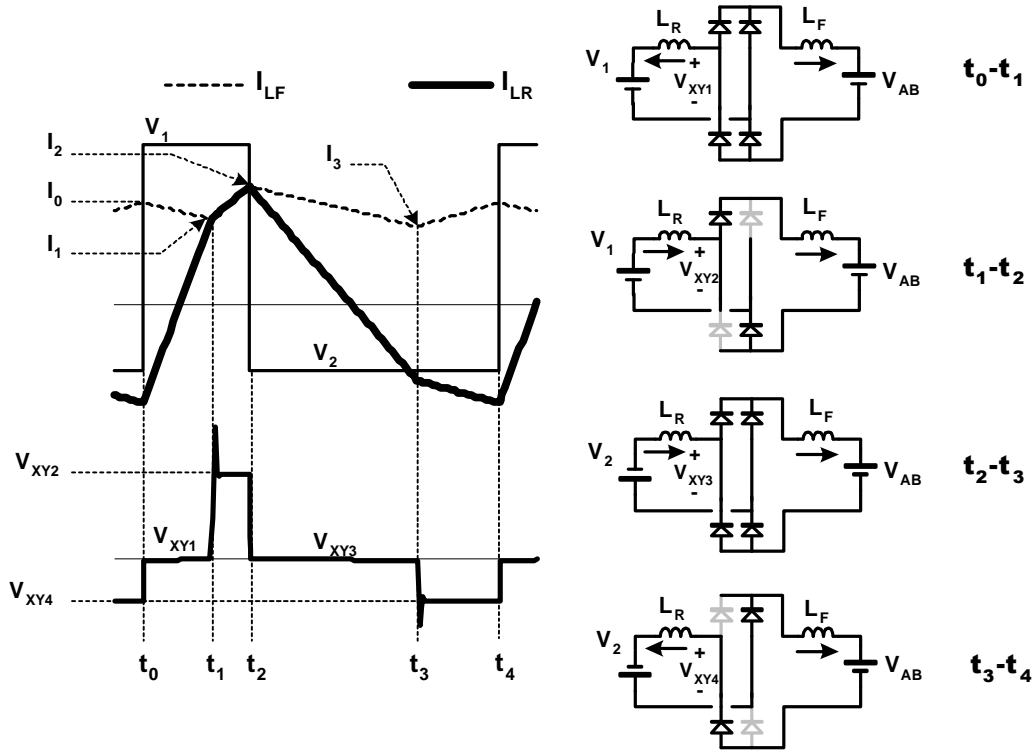


Fig. 1-22. MODO 4. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Intervalo t_0 - t_1 .

Este tramo es equivalente al intervalo t_0 - t_1 del modo 2. Por tanto las ecuaciones a él asociadas son (1.34) y (1.35).

Intervalo t_1 - t_2 (donde $t_2=dT_s$).

Este tramo es equivalente al intervalo t_1 - t_2 del modo 2. Por tanto la ecuación a él asociada es (1.36).

Intervalo t_2 - t_3 .

Nuevamente conducen los cuatro diodos y por tanto V_{xy} valdrá 0. La evolución de la corriente en las dos bobinas vuelve a ser diferente y por tanto pueden obtenerse dos ecuaciones en este intervalo (1.39) y (1.40).

$$I_3 = \frac{V_2}{L_R}(t_3 - t_2) - I_2 \quad (1.39)$$

$$I_3 = I_2 - \frac{V_{AB}}{L_F}(t_3 - t_2) \quad (1.40)$$

Intervalo t_3-t_4 (donde $t_4=T_s$).

Cuando se igualen las corrientes en la bobina de filtro y la bobina retrasadora se iniciará este intervalo. En ese instante se abrirán los diodos D_1 y D_4 quedando las bobinas conectadas en serie. La ecuación deducida en este tramo es (1.41).

$$I_0 = I_3 + \frac{V_{AB} - V_2}{L_F + L_R} (t_4 - t_3) \quad (1.41)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo de funcionamiento estará formado por (1.34)-(1.36) y (1.39)-(1.41).

1.4.1.5 Modo 5.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- MCD en L_F
- $V_{AB} > V_2 \frac{L_F}{L_R}$

Tenemos dos incógnitas (I_1 , y t_2) por lo que sólo necesitaremos dos ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

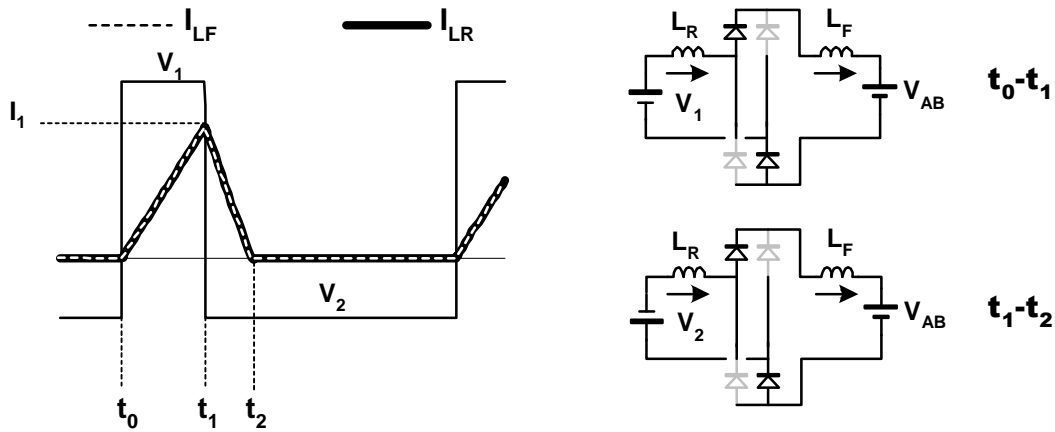


Fig. 1-23. MODO 5. Principales formas de onda y circuitos equivalentes.

Intervalo t_0-t_1 (donde $t_1=dT_s$).

La corriente inicial en los diodos es nula, por lo que sólo estarán en disposición de conducir aquellos que estén polarizados directamente (D_1 y D_4). Las bobinas se cargan en serie. El valor máximo de corriente podrá calcularse mediante (1.42).

$$I_1 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_F + L_R} t_1 \quad (1.42)$$

Intervalo t_1-t_2 .

De acuerdo con el circuito equivalente correspondiente a este intervalo se mantienen en conducción los mismos diodos que en el intervalo anterior. La ecuación obtenida en este intervalo será (1.43).

$$I_1 = \frac{V_2 + V_{AB}}{L_F + L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.43)$$

1.4.1.6 Modo 6.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- MCD en L_F
- $V_{AB} < V_2 \frac{L_F}{L_R}$

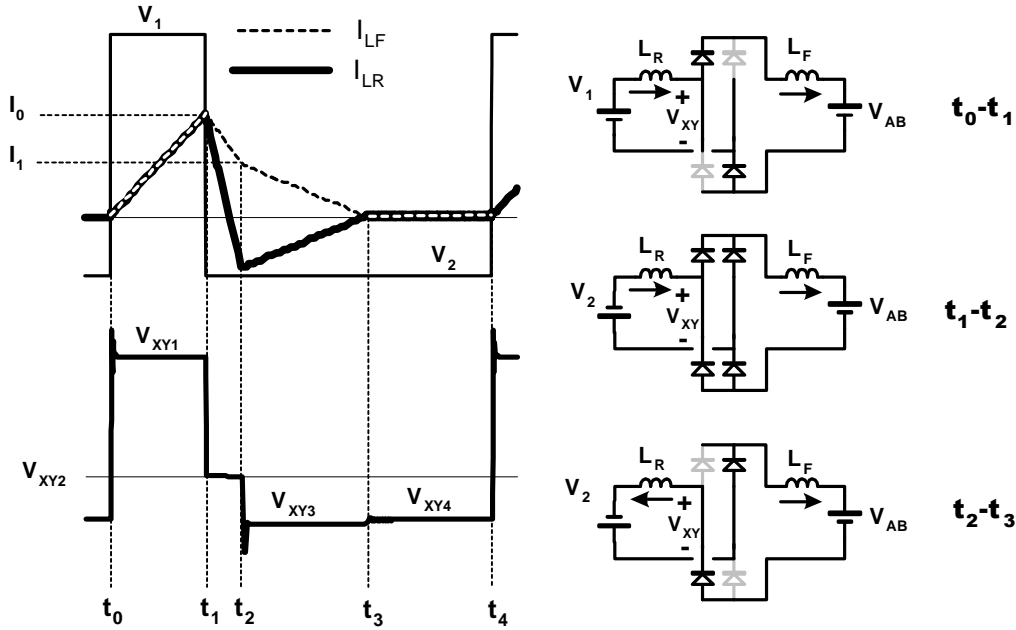


Fig. 1-24. MODO 6. Principales formas de onda y circuitos equivalentes. Simulados en Pspice.

Tenemos 4 incógnitas (I_0 , I_1 , t_2 y t_3) por lo que necesitaremos 4 ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0 - t_1 (donde $t_1=dT_s$).

Este tramo es equivalente al intervalo t_0 - t_1 del modo 5. La ecuación asociada a este tramo será (1.44).

$$I_0 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_F + L_R} t_1 \quad (1.44)$$

Intervalo t_1 - t_2 .

A diferencia de lo que sucede en el tramo del mismo nombre correspondiente al modo 5, durante este intervalo conducen los cuatro diodos. La evolución de la corriente en las dos bobinas es diferente. Por tanto las ecuaciones aquí deducidas son (1.45) y (1.46).

$$I_1 = I_0 - \frac{V_{AB}}{L_F} (t_2 - t_1) \quad (1.45)$$

$$I_1 = \frac{V_2}{L_R} (t_2 - t_1) - I_0 \quad (1.46)$$

Intervalo t_2 - t_3 .

Al igualarse la corriente en las dos bobinas dejarán de conducir los diodos D_1 y D_4 . La ecuación deducida en este tramo será (1.47).

$$I_1 = \frac{V_{AB} - V_2}{L_F + L_R} (t_3 - t_2) \quad (1.47)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo estará formado por (1.44)-(1.47).

1.4.2 Características Tensión-Corriente.

Utilizando las ecuaciones deducidas en el apartado anterior pueden obtenerse las características tensión-corriente (media y de pico) necesarias para diseñar reductores activos de armónicos.

En la Fig. 1-25, se muestran diferentes características junto a las corrientes que con ellas pueden obtenerse en un RAA. En ellas puede comprobarse cómo los resultados son similares a los obtenidos para la misma topología con alimentación simétrica. Las diferencias entre los resultados tienden a desaparecer al aumentar el valor de la bobina de filtro. De entre las pocas diferencias existentes debe citarse que en la característica sin bobina de filtro (b) la máxima corriente de entrada no se corresponde con el valor máximo de corriente media de entrada. Este dato deberá tenerse en cuenta cuando se determine el tamaño de los magnéticos así como el estrés de corriente que como consecuencia de la utilización de la RAI se produce sobre el convertidor CC/CC.

De igual forma que en el caso anterior (alimentación simétrica) la topología que sólo dispone de bobina de filtro no es aconsejable para ser utilizada en RAA. Esta topología sólo tiene alta impedancia en el modo 6.

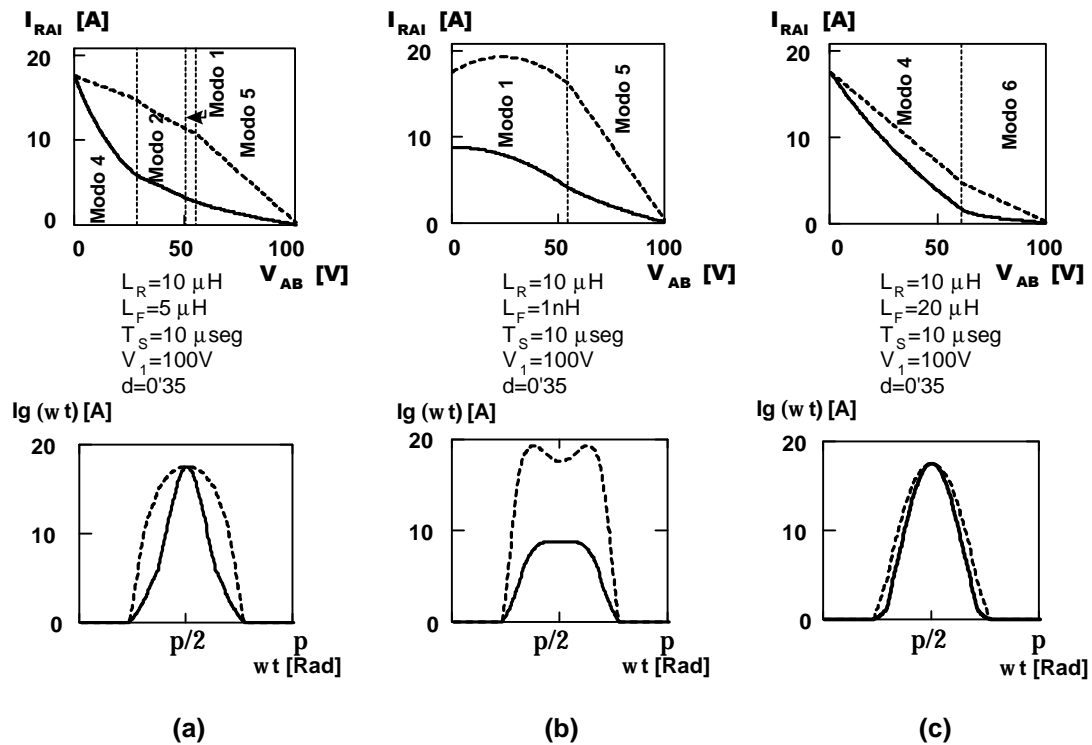


Fig. 1-25. Características y corrientes de entrada para RAI de onda completa tipo (1) alimentada con señal asimétrica.

1.5 Rectificador de onda completa tipo (2) y señal simétrica.

Los circuitos con varios interruptores derivados de la familia “reductora” que presenten un devanado auxiliar con toma media podrán utilizar este tipo de RAI. Las posibles configuraciones que puede adoptar esta topología así como su utilización como RAA son mostradas en la Fig. 1-26.

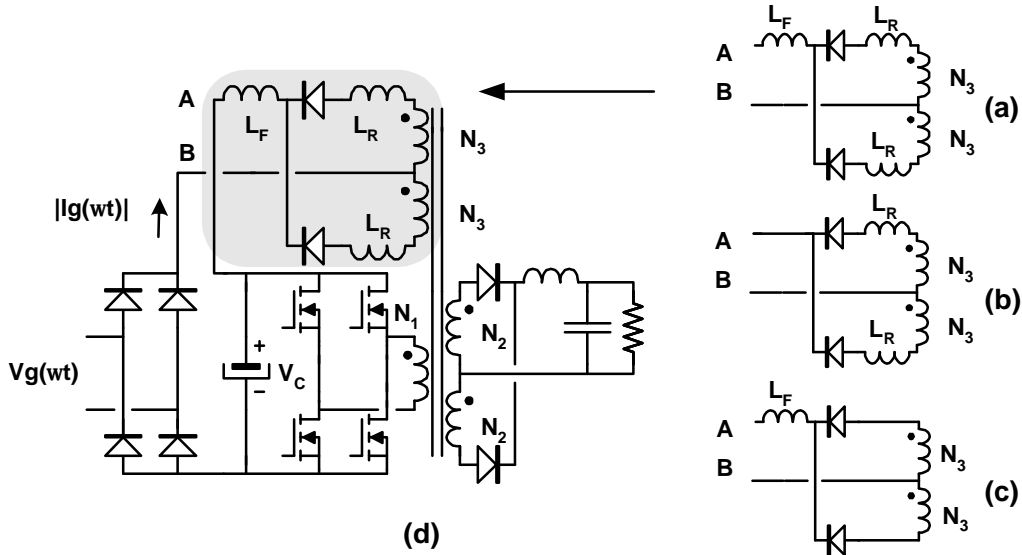


Fig. 1-26. (a)(b)(c) RAI con rectificador de onda completa tipo 2 (d) Puente completo con corrector de armónicos del tipo (a).

1.5.1 Ecuaciones de funcionamiento.

La forma de onda de tensión que alimentará la RAI es la mostrada en la Fig. 1-27. La tensión V_{XB} mostrada en la figura será muy útil para determinar en número de diodos que se encuentra en conducción en cada uno de los diferentes tramos en que se subdividirá el funcionamiento de cada modo de conducción.

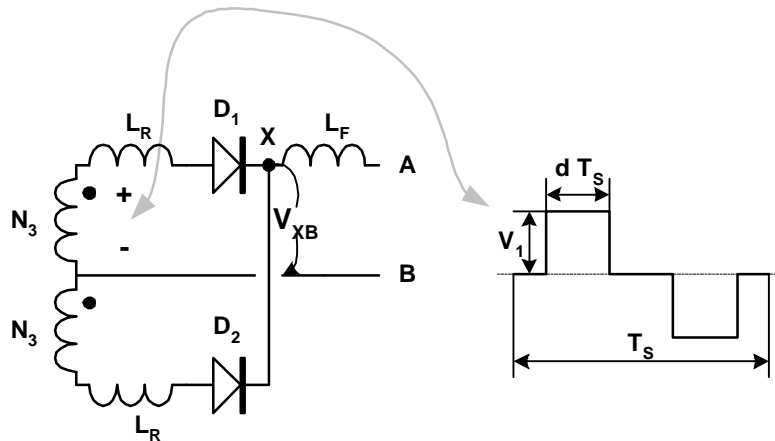


Fig. 1-27. Tensión en los devanados N_3 .

A diferencia de las demás topologías esta RAI solo presenta dos modos de funcionamiento: MCD y MCC. Gracias a la simetría que presenta la tensión de alimentación, podrá analizarse sólo un semiperíodo de la misma. A continuación se obtendrán sus ecuaciones de funcionamiento.

1.5.1.1 Modo 1.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} > V_1 \cdot 2 \cdot d$

Las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes para cada tramo aparecen en la Fig. 1-28.

Intervalo t_0 - t_1 (donde $t_1=dT_s$).

Las bobinas están conectadas en serie y se cargan a la diferencia de tensión entre las dos fuentes mostradas en el circuito equivalente. La evolución de la corriente en este tramo viene dada por la expresión (1.48).

$$I_0 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_F} t_1 \quad (1.48)$$

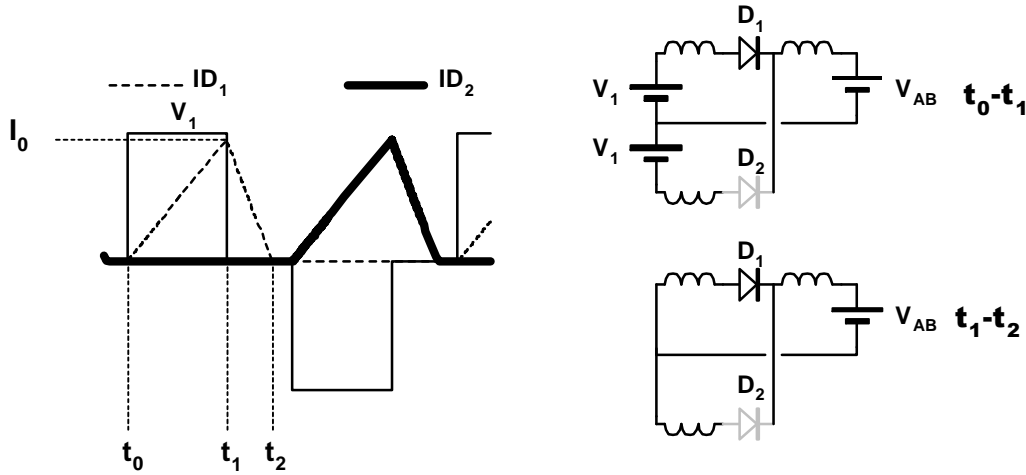


Fig. 1-28. Modo 1. Formas de onda más importantes y circuitos equivalentes.

Intervalo t_1 - t_2 .

Durante este periodo de tiempo, la tensión V_{XB} siempre será positiva, por lo que será imposible la conducción de los dos diodos al mismo tiempo. Las bobinas que se habían cargado en serie se descargarán en serie a la tensión V_{AB} (ecuación (1.49)).

$$I_0 = \frac{V_{AB}}{L_R + L_F} (t_2 - t_1) \quad (1.49)$$

Mediante la resolución del sistema de ecuaciones formado por (1.48)-(1.49) se obtendrá el valor de I_0 y t_2 .

1.5.1.2 Modo 2.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} < V_1 \cdot 2 \cdot d$

En esta topología siempre existirán periodos de tiempo durante los cuales conducirán los dos diodos. Las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes para cada tramo aparecen en la Fig. 1-29.

Tenemos 5 incógnitas (I_0 , I_1 , I_2 , t_1 y t_3) por lo que necesitaremos 5 ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0 - t_1 .

En este tipo de RAI las bobinas retrasadoras siempre trabajarán en MCD. Por tanto, si la bobina de filtro trabaja en MCC al iniciarse este intervalo siempre conducirán los dos diodos. Este estado se prolongará hasta que la corriente en D_1 iguale a la corriente en la bobina de filtro. La corriente en D_1 parte de cero hasta alcanzar en (t_1) el valor de la corriente en la bobina de filtro (I_1). La corriente en D_2 parte de un valor inicial (I_0) hasta anularse en (t_1). Finalmente deberá cumplirse que la suma de la corriente en los diodos es igual a la corriente en la bobina de filtro. Mediante estas premisas pueden obtenerse las ecuaciones (1.50)-(1.52).

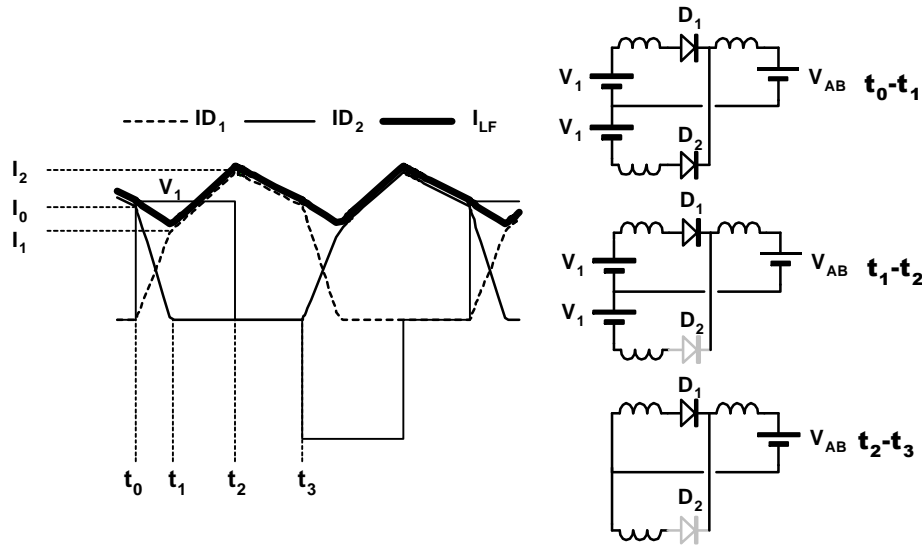


Fig. 1-29. Modo 2. Formas de onda más importantes y circuitos equivalentes.

$$I_1 = \frac{V_1 - \frac{L_R}{L_R + 2L_F} V_{AB}}{L_R} t_1 \quad (1.50)$$

$$I_0 = \frac{V_1 + \frac{L_R}{L_R + 2L_F} V_{AB}}{L_R} t_1 \quad (1.51)$$

$$I_1 = \frac{\frac{L_R}{L_R + 2L_F} V_{AB} - V_{AB}}{L_R} t_1 + I_0 \quad (1.52)$$

Intervalo t_1 - t_2 (donde $t_2 = dT_s$).

Cuando la corriente en D_1 iguale a la de la bobina de filtro el diodo D_2 se abrirá. En este estado la bobina retrasadora que se encuentra en la misma rama que el diodo D_1 queda conectada en serie con la bobina de filtro. Este intervalo se prolongará hasta que se anule la tensión en el transformador. La evolución de la corriente en este tramo da lugar a la ecuación (1.53).

$$I_1 + \frac{V_1 - V_{AB}}{L_F + L_R} (t_2 - t_1) = I_2 \quad (1.53)$$

Intervalo t_2 - t_3 .

Para que D_2 conduzca V_{XB} debe ser negativa. Esto es imposible, por lo que sólo conducirá D_1 . Las bobinas seguirán conectadas en serie con la tensión V_{AB} en sus extremos. La ecuación obtenida en este intervalo será (1.54).

$$I_2 + \frac{-V_{AB}}{L_F + L_R}(t_3 - t_2) = I_3 \quad (1.54)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo de funcionamiento estará formado por (1.50)-(1.54).

1.5.2 Características Tensión-Corriente.

El límite entre los dos modos de funcionamiento está claramente definido por la tensión que tendría el convertidor en MCC. Por tanto, obtener el modo de funcionamiento correspondiente a una determinada tensión V_{AB} será muy sencillo.

En este tipo de RAI hay que destacar la “no necesidad” de incluir bobina de filtrado. Como puede verse en la Fig. 1-30, aún cuando ésta no existe (b), la diferencia entre la corriente de pico (línea discontinua) y la corriente media (línea continua) es mínima. En cualquiera de sus configuraciones esta topología se puede aproximar con bastante exactitud por el modelo “resistencia sin pérdidas”. Así, sin perder ninguna ventaja, una topología que en un principio era utilizada con tres bobinas puede realizarse con dos. Si bien es cierto que existen versiones de esta topología con integración magnética que permiten realizar el diseño con un solo núcleo, esta forma de proceder permitirá reducir el tamaño del mismo.

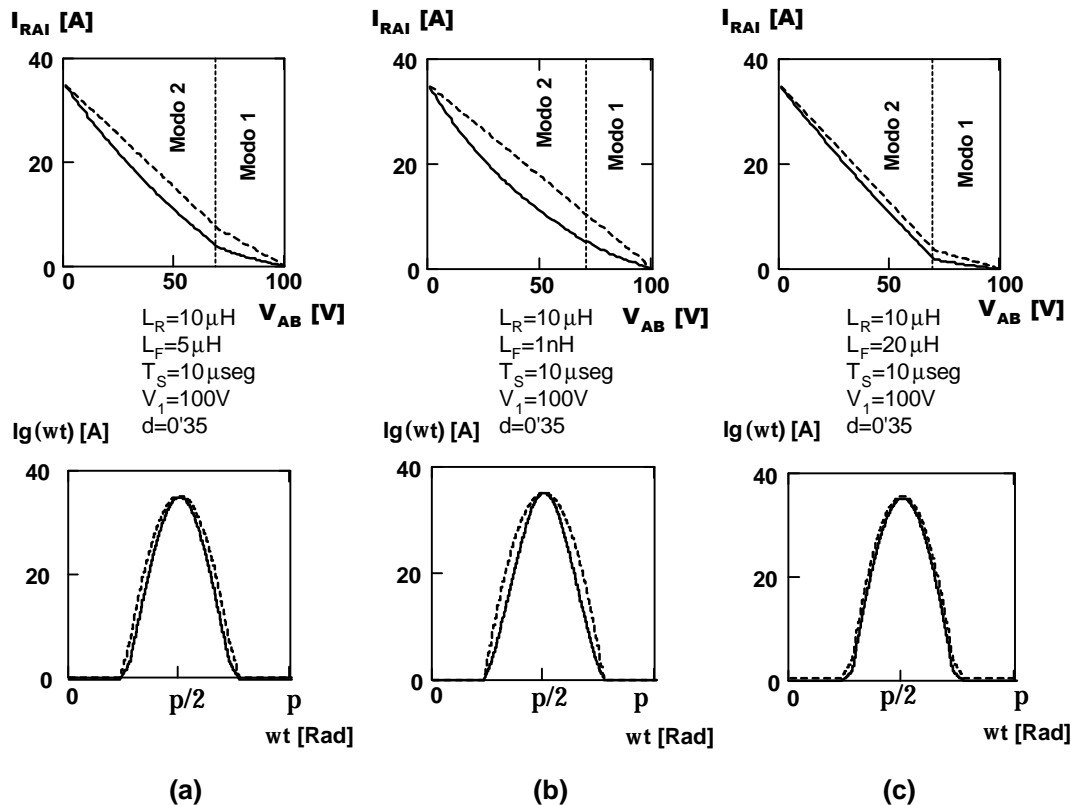


Fig. 1-30. Características y corrientes de entrada para RAI de onda completa tipo (2) alimentada con señal simétrica.

1.6 Rectificador de onda completa tipo (2) con alimentación asimétrica (2 diodos).

Igual que sucedía en el apartado 1.3 este tipo de RAI puede ser alimentada con la tensión procedente de una bobina acoplada. Con objeto de obtener una característica lo más general posible se ha trabajado con una señal de alimentación de tres niveles (así podrá simularse el comportamiento de la RAI cuando el convertidor principal trabaje en MCD). Esta forma de proceder complica la resolución de las ecuaciones de funcionamiento y por tanto la obtención de cualquier parámetro del convertidor (forma de corriente, armónicos, potencia, etc). Si se reúne la complejidad añadida junto a la poca probabilidad de utilizar el convertidor (CC/CC) en MCD en el tipo de aplicaciones a las que va destinado, se comprenderá por qué ésta ha sido la única topología así planteada.

Este tipo de RAI será muy apropiada para topologías basadas en convertidores de retroceso y para convertidores CC/CC sin aislamiento (reductor, elevador, reductor-elevador). La Fig. 1-31 muestra un ejemplo de esta topología dentro de un RAA así como todas las configuraciones posibles.

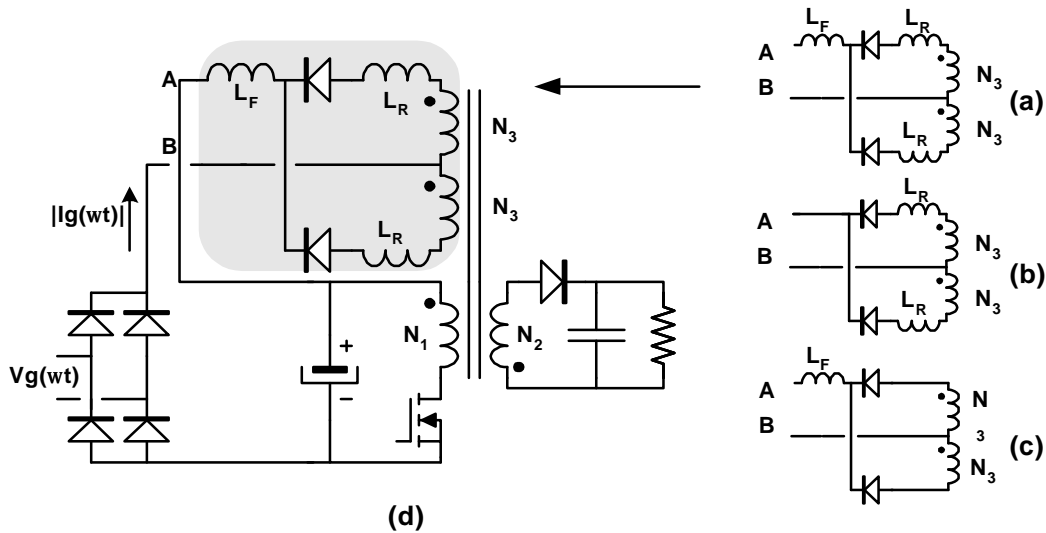


Fig. 1-31. (a)(b)(c) RAI con rectificador de onda completa tipo (2) y (d) Convertidor de retroceso con corrector de armónicos del tipo (a).

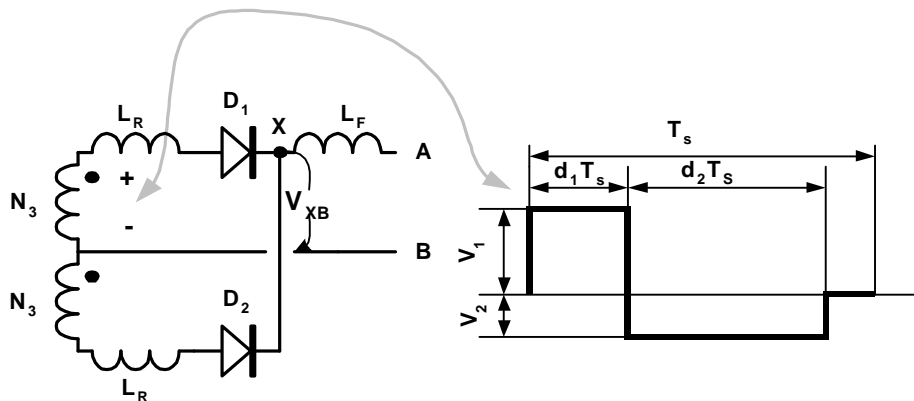


Fig. 1-32. Tensión en los devanados N_3

1.6.1 Ecuaciones de funcionamiento.

La tensión que “verá” la RAI es la mostrada en la Fig. 1-32. De igual forma que en las topologías ya tratadas se estudiarán los diferentes modos de funcionamiento que pueden aparecer en función de las condiciones de trabajo aplicadas al convertidor.

Al utilizar una tensión de alimentación con un tramo de tensión nula aparecen dos modos de conducción discontinuos diferentes en L_F , MCD1 y MCD2. Si la corriente en la bobina de filtro se anula antes de que la tensión en N_3 sea cero tendremos el MCD2 y en caso contrario el MCD1.

Siempre que la bobina de filtro trabaje en MCC al inicio del periodo de conmutación conducirán los dos diodos. En el instante d_1T_s está conduciendo D_1 , la tensión en los cátodos (V_{XB}) en estas condiciones vendrá dada por (1.55). Si esta tensión es menor que V_2 , D_2 estará polarizado inversamente y no conducirá. Esta condición puede plantearse como una inecuación (1.56). Sustituyendo la parte izquierda de la inecuación por su valor máximo (tensión límite entre los modos 1 y 2) y la parte derecha por su valor mínimo ($L_R=\infty$) se llega a (1.57) que como puede comprobarse es imposible. Por tanto, siempre que el convertidor trabaje en MCC conducirá D_2 .

$$V_{XB} = \frac{V_{AB}L_R - V_2L_F}{L_R + L_F} \quad (1.55)$$

$$V_{AB} > \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R} V_2 \quad (1.56)$$

$$V_1 > V_1 \frac{1-d_1}{d_2} \quad (1.57)$$

En cada uno de los posibles modos de conducción discontinua, V_{XB} en el instante d_1T_s también coincide con (1.55). La condición (1.56) sí podrá darse en MCD.

Por cada modo de conducción discontinua existen dos modos de funcionamiento que junto con el MCC hacen un total de 5. Sin embargo, mientras se dé la condición (1.56) el convertidor no podrá funcionar en MCD1, por lo que sólo existirán 4 modos de funcionamiento. Para comprobar esto bastará con obtener en el modo de conducción 3 el límite entre en MCD1 y el MCD2.

MODO	CONDICIONES	
1	MCD1 en L_F	$V_{AB} < \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R} V_2$
2	MCC en L_F	$V_{AB} < \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R} V_2$
3	MCD2 en L_F	$V_{AB} > \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R} V_2$
4	MCD2 en L_F	$V_{AB} < \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R} V_2$

Tabla 1-4. Modos de funcionamiento para rectificador de onda completa tipo (2) con señal asimétrica.

1.6.1.1 Modo 1.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} < V_2 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R}$
- MCD1

Las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes para cada tramo aparecen en la Fig. 1-33. Tenemos 5 incógnitas (I_1 , I_2 , I_3 , t_2 y t_4) por lo que necesitaremos 5 ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0 - t_1 (donde $t_1 = dT_s$).

La corriente inicial en las bobinas es nula, por lo que sólo puede conducir el diodo D_1 durante este intervalo. La bobina retrasadora de la rama del diodo en conducción queda en serie con la bobina de filtro con una tensión en sus extremos igual a la diferencia entre la tensión de alimentación (V_1) y la tensión aplicada a la RAI. El valor de I_1 puede obtenerse mediante (1.58).

$$I_1 = \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_F} t_1 \quad (1.58)$$

Intervalo t_1 - t_2 .

Como consecuencia del valor que alcanza V_{XB} , D_2 quedará directamente polarizado. La corriente en D_1 parte de I_1 hasta anularse en el instante que la corriente en D_2 , que parte de cero, alcanza el valor de la corriente en la bobina de filtro (I_2). La corriente en la bobina de filtro siempre será la suma de las corrientes en los diodos. De este planteamiento se obtienen (1.59) y (1.60).

$$I_2 = I_1 - \frac{2 \cdot \frac{L_R}{L_R + 2 \cdot L_F} V_{AB}}{L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.59)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - \frac{L_R}{L_R + 2 \cdot L_F} V_{AB}}{L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.60)$$

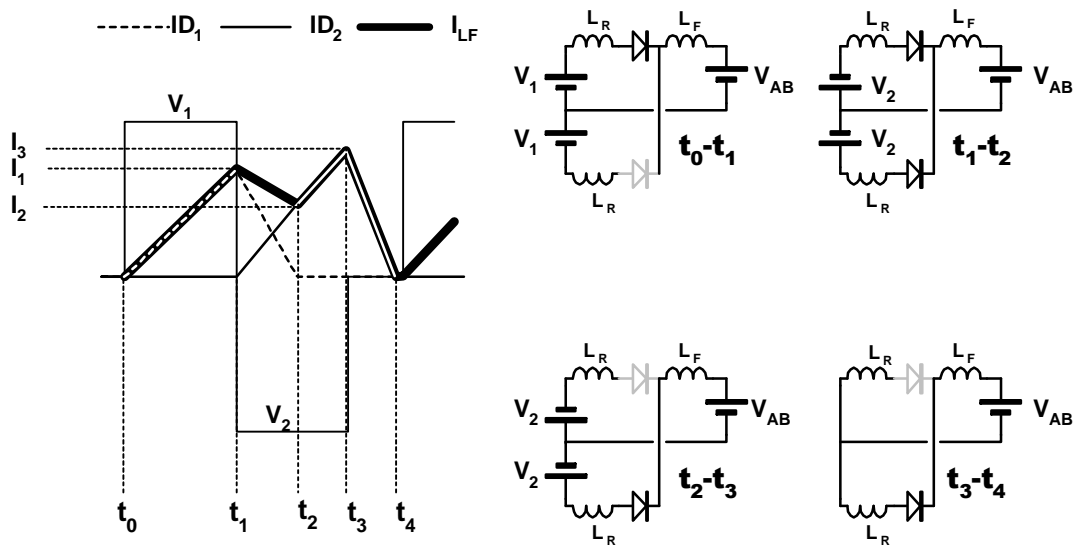


Fig. 1-33. Modo 1. Formas de onda más importantes y circuitos equivalentes.

Intervalo t_2-t_3 ($t_3=(d_1+d_2)T_s$).

Al finalizar el intervalo anterior D_1 quedará abierto. La bobina retrasadora de la rama inferior quedará en serie con la bobina de filtro. La tensión en los extremos de las bobinas será la diferencia entre la tensión en N_3 y la tensión V_{AB} . De este intervalo se obtiene la ecuación (1.61).

$$I_3 = I_2 + \frac{V_2 - V_{AB}}{L_R + L_F}(t_3 - t_2) \quad (1.61)$$

Intervalo t_3-t_4 .

Las dos bobinas se descargan en serie. La tensión en los extremos de las bobinas es V_{AB} . De este planteamiento se obtiene (1.62).

$$0 = I_3 - \frac{V_{AB}}{L_R + L_F}(t_4 - t_3) \quad (1.62)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo de funcionamiento estará formado por (1.58)-(1.62).

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones podrá obtenerse el límite entre este modo y el siguiente (modo 2) igualando " t_4 " a T_s . Si el valor de V_{AB} es inferior a $V_{AB\text{limite1}_2}$ (1.63) el circuito estará en MCC en L_F .

$$V_{AB\text{limite1}_2} = V_1 d_1 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R(1-d) + L_F} \quad (1.63)$$

1.6.1.2 Modo 2.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} < V_2 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R}$
- $V_{AB} < V_1 d_1 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R(1-d) + L_F}$ (MCC)

Las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes para cada tramo aparecen en la Fig. 1-34. Tenemos 7 incógnitas (I_0 , I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , t_1 y t_3) por lo que necesitaremos 7 ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0-t_1 .

La corriente en D_1 partirá desde cero hasta igualar la corriente en la bobina de filtro (I_1). La corriente en D_2 partirá de un valor inicial I_0 hasta anularse en t_1 . Este comportamiento queda recogido en las ecuaciones (1.64)-(1.65).

$$I_0 = \frac{V_1 + V_{AB} \frac{L_R}{L_R + 2 \cdot L_F}}{L_R} t_1 \quad (1.64)$$

$$I_1 = I_0 - \frac{V_{AB} \frac{2 \cdot L_R}{L_R + 2 \cdot L_F}}{L_R + L_F} t_1 \quad (1.65)$$

Intervalo t_1 - t_2 .

El intervalo anterior finalizará cuando la corriente en D_1 alcance a la corriente en L_F . En ese instante el diodo D_2 se abrirá cargando la bobina retrasadora de su rama y la bobina de filtro. La ecuación correspondiente a este tramo es (1.66).

$$I_2 = I_1 + \frac{V_1 - V_{AB}}{L_R + L_F}(t_1 - t_2) \quad (1.66)$$

Intervalo t_2 - t_3 .

Dadas las condiciones de funcionamiento durante este intervalo conducirán D_1 y D_2 . La corriente en D_1 decrecerá hasta anularse en el instante que la corriente en D_2 se iguale a la corriente en la bobina de filtro. Las ecuaciones deducidas en este intervalo son (1.67)-(1.68).

$$I_3 = I_2 - \frac{V_{AB} \frac{2 \cdot L_R}{L_R + 2 \cdot L_F}}{L_R}(t_3 - t_2) \quad (1.67)$$

$$I_3 = \frac{V_2 - \frac{L_R}{L_R + 2 \cdot L_F} V_{AB}}{L_R}(t_3 - t_2) \quad (1.68)$$

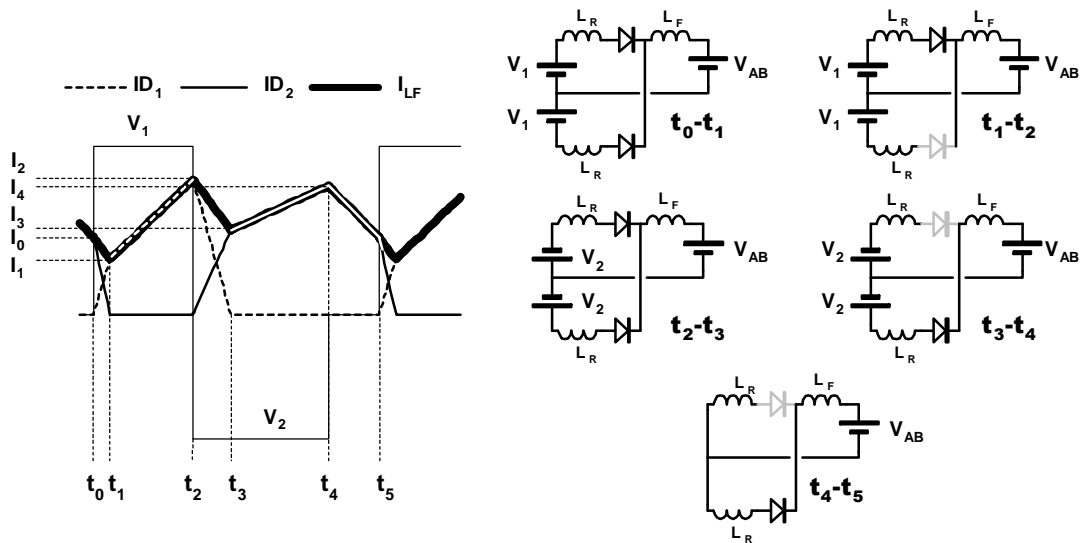


Fig. 1-34. Modo 2. Formas de onda más importantes y circuitos equivalentes.

Intervalo t_3 - t_4 .

Al finalizar el intervalo anterior salió de conducción D_1 quedando conectadas en serie la bobina retrasadora (D_2) y la bobina de filtro. Este intervalo finalizará cuando se anule la corriente en N_3 . La ecuación que de aquí puede obtenerse es (1.69).

$$I_4 = I_3 + \frac{V_2 - V_{AB}}{L_R + L_F}(t_4 - t_3) \quad (1.69)$$

Intervalo t_4 - t_5 .

Durante este periodo de tiempo las bobinas se descargan hasta alcanzar la corriente I_0 . La ecuación que de aquí puede obtenerse es (1.70).

$$I_0 = I_4 - \frac{V_{AB}}{L_R + L_F}(t_5 - t_4) \quad (1.70)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo de funcionamiento estará formado por (1.64)-(1.70).

1.6.1.3 Modo 3.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- $V_{AB} > V_2 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R}$
- MCD

Las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes para cada tramo aparecen en la Fig. 1-35. Tenemos dos incógnitas (I_1 y t_2) por lo que necesitaremos dos ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0 - t_1 .

D_1 está polarizado directamente y por tanto la corriente I_1 puede calcularse mediante (1.58).

Intervalo t_1 - t_2 .

D_2 está polarizado inversamente, por lo que no conducirá. Utilizando (1.71) podrá determinarse el valor de t_2 .

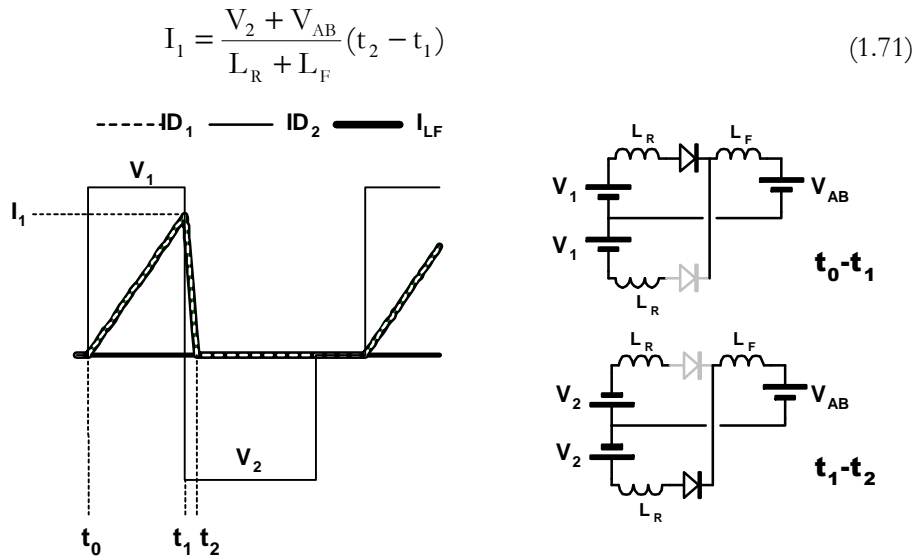


Fig. 1-35. Modo 3. Formas de onda más importantes y circuitos equivalentes.

De este modo de funcionamiento no puede pasarse directamente al MCC. Por tanto será necesario pasar bien por el modo 4, bien por el modo 5.

1.6.1.4 Modo 4.

Este modo se dará bajo las siguientes condiciones:

- MCD2

- $V_{AB} < V_2 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R}$

Las formas de onda más importantes así como los circuitos equivalentes para cada tramo aparecen en la

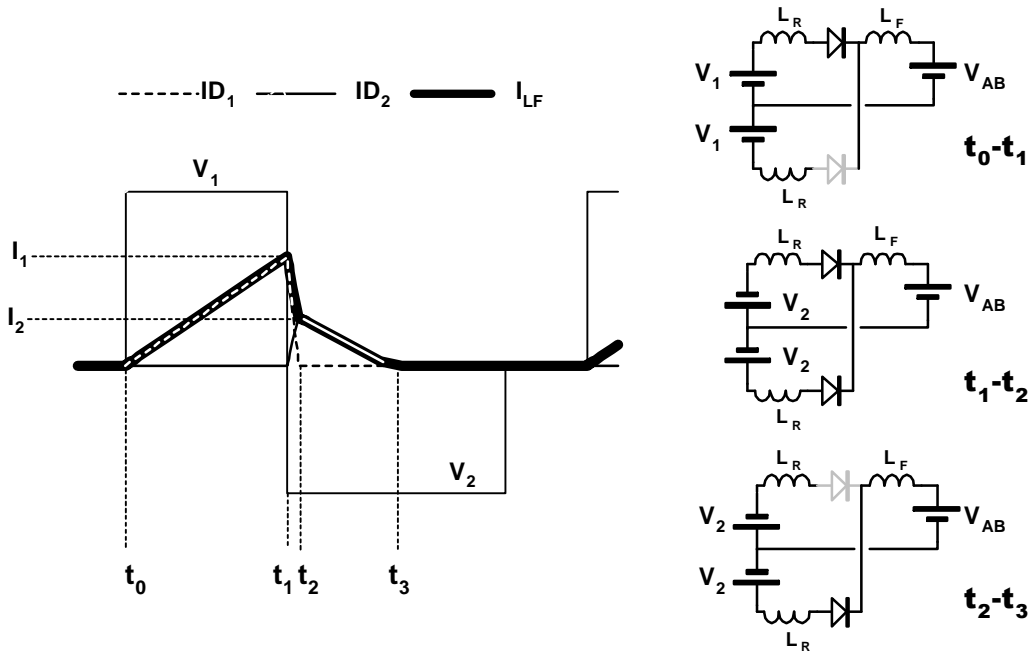


Fig. 1-36. Tenemos 4 incógnitas (I_1 , I_2 , t_2 y t_3) por lo que necesitaremos 4 ecuaciones que se obtendrán del funcionamiento en los diferentes intervalos.

Intervalo t_0 - t_1 .

Igual que en el modo anterior.

Intervalo t_1 - t_2 .

Debido a las condiciones de este modo de funcionamiento D_2 está polarizado directamente, por lo que conducirá. De la evolución de las corrientes en este intervalo se obtendrán las ecuaciones (1.72)-(1.73).

$$I_2 = I_1 - \frac{V_{AB} \frac{2 \cdot L_R}{L_R + 2 \cdot L_F}}{L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.72)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - \frac{L_R}{L_R + 2 \cdot L_F} V_{AB}}{L_R} (t_2 - t_1) \quad (1.73)$$

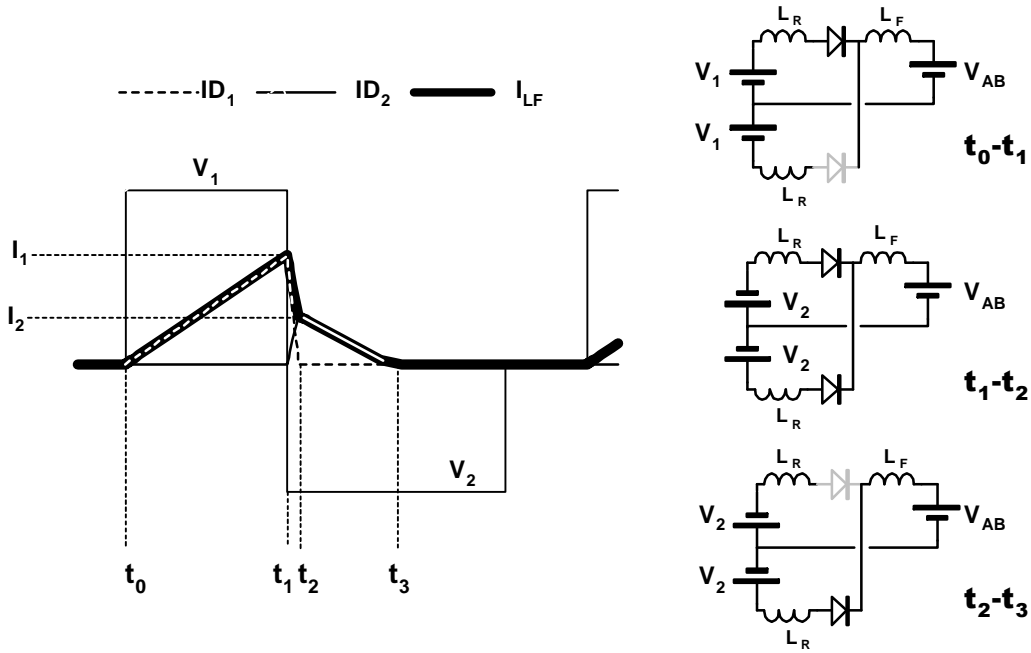


Fig. 1-36. Modo 4. Formas de onda más importantes y circuitos equivalentes.

Intervalo t_2-t_3 .

Al terminar el intervalo anterior la corriente en D_2 ha igualado la corriente en la bobina de filtro. Por tanto, D_1 ha dejado de conducir. Las bobinas se descargarán con una tensión en sus extremos igual a la diferencia entre V_2 y V_{AB} (1.74)

$$I_2 = \frac{V_2 - V_{AB}}{L_R + L_F} (t_3 - t_2) \quad (1.74)$$

El sistema de ecuaciones que determina el funcionamiento de la RAI en este modo de funcionamiento estará formado por (1.72)-(1.74) y (1.58).

El límite entre este modo y el modo 1 puede obtenerse igualando " t_3 " a $(d_1 + d_2)T_s$. El valor obtenido es mostrado en (1.75).

$$V_{AB \text{ límite } 4-1} = V_1 V_2 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{V_1 (L_R + L_F) + V_2 L_F} \quad (1.75)$$

1.6.2 Características Tensión-Corriente.

Para finalizar se obtendrán las características tensión-corriente para diferentes valores de "K" de igual forma que se ha hecho en apartados anteriores. Para determinar el modo de funcionamiento en que se encuentra la RAI en función de la tensión en sus extremos se seguirá el esquema mostrado en Fig. 1-37.

$$\text{Limite1} = V_1 d_1 \frac{2 \cdot L_F + L_R}{L_R (1 - d) + L_F}$$

$$\text{Limite2} = V_1 \cdot V_2 \frac{L_R + 2 \cdot L_F}{V_1 (L_R + L_F) + V_2 L_F}$$

$$\text{Limite3} = V_2 \frac{L_R + 2 \cdot L_F}{L_R}$$

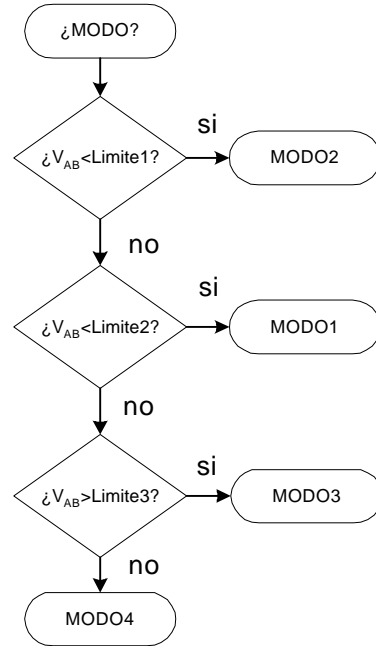


Fig. 1-37. Diagrama de flujo para determinar el modo de conducción.

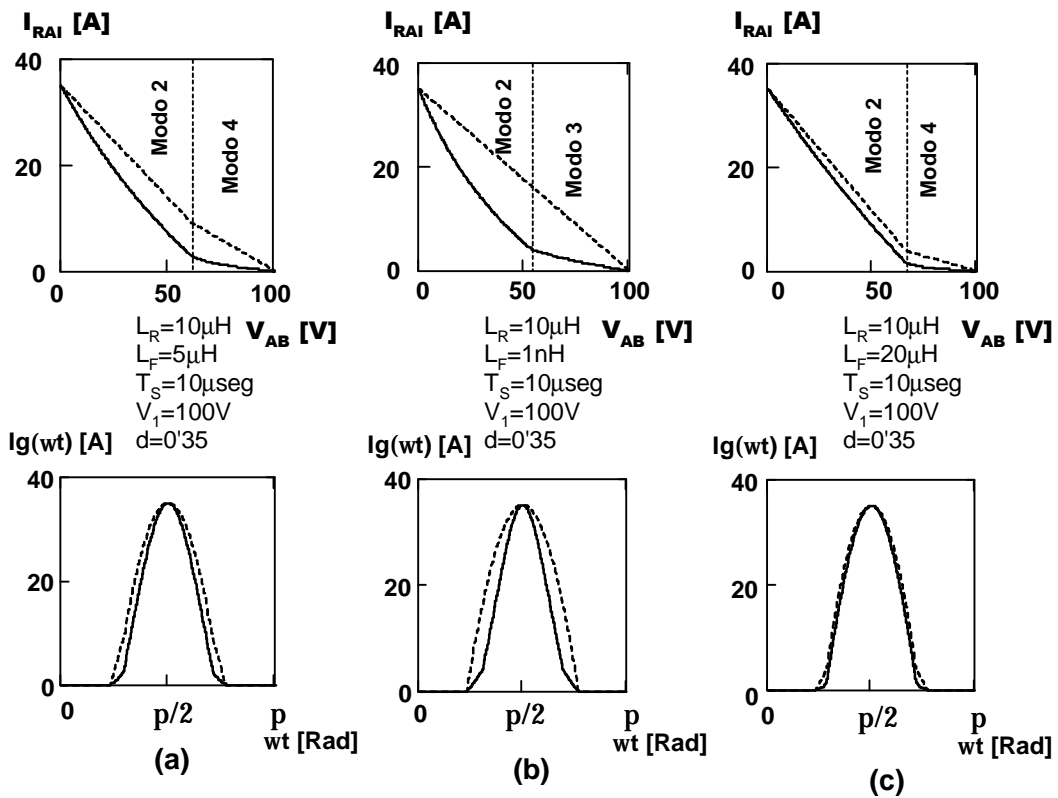


Fig. 1-38. Características y corrientes de entrada para RAI de onda completa tipo (2) alimentada con señal simétrica.

Los resultados obtenidos mostrados en la Fig. 1-38 son muy similares a los representados en la Fig. 1-30 correspondientes a esta misma topología pero con alimentación simétrica. Cabe destacar otra vez, que incluso en la topología donde la bobina de filtro no existe (b) la característica puede ser aproximada por el modelo “resistencia sin pérdidas” sin penalizar en corriente y sin penalizar al convertidor principal en forma alguna. Las formas de corriente mostradas han sido obtenidas suponiendo el convertidor CC/CC en MCC.