

TEMA 7: Conexión de varios rectificadores

Índice

TEMA 7: Conexión de varios rectificadores.....	1
7.1.- Conexión Serie. Consideraciones generales.....	1
7.1.1.- Ejemplo con rectificadores no controlados.....	1
7.1.2.- Ejemplo con rectificadores controlados.....	6
7.2.- Conexión en paralelo. Consideraciones generales.....	8
7.2.1.- Rectificador "doble estrella".	10
7.4.- Conexión en antiparalelo con corriente de circulación.....	13

7.1.- Conexión Serie. Consideraciones generales.

Para sumar las tensiones o corrientes rectificadas se pueden conectar dos o más rectificadores en serie o en paralelo. Habitualmente los rectificadores conectados están alimentados por la misma fuente alterna e incluso en ocasiones los devanados primarios del transformador son los mismos para todos los grupos.

La asociación en serie se aprovecha para obtener un conjunto rectificador de mayores prestaciones, tales como :

- Aumento del índice de pulsación de la tensión total rectificada.
- Mejora del factor de potencia en el primario común o en la línea de alimentación.

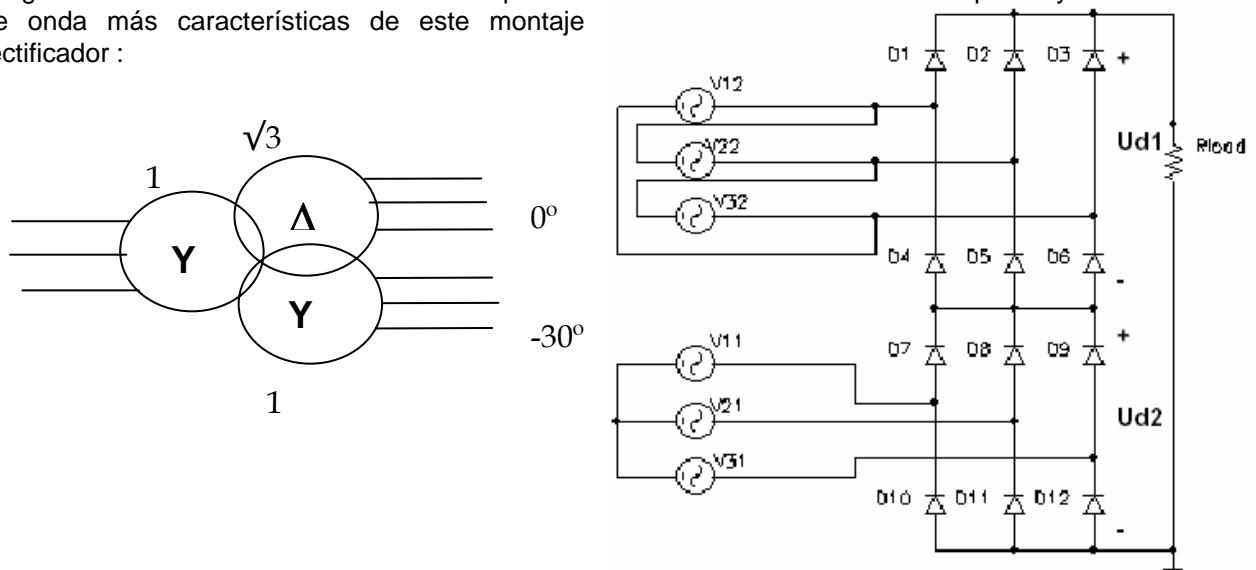
La conexión en serie de dos rectificadores que reciben la energía de la misma red de corriente alterna no ocasiona ninguna dificultad si se verifica que:

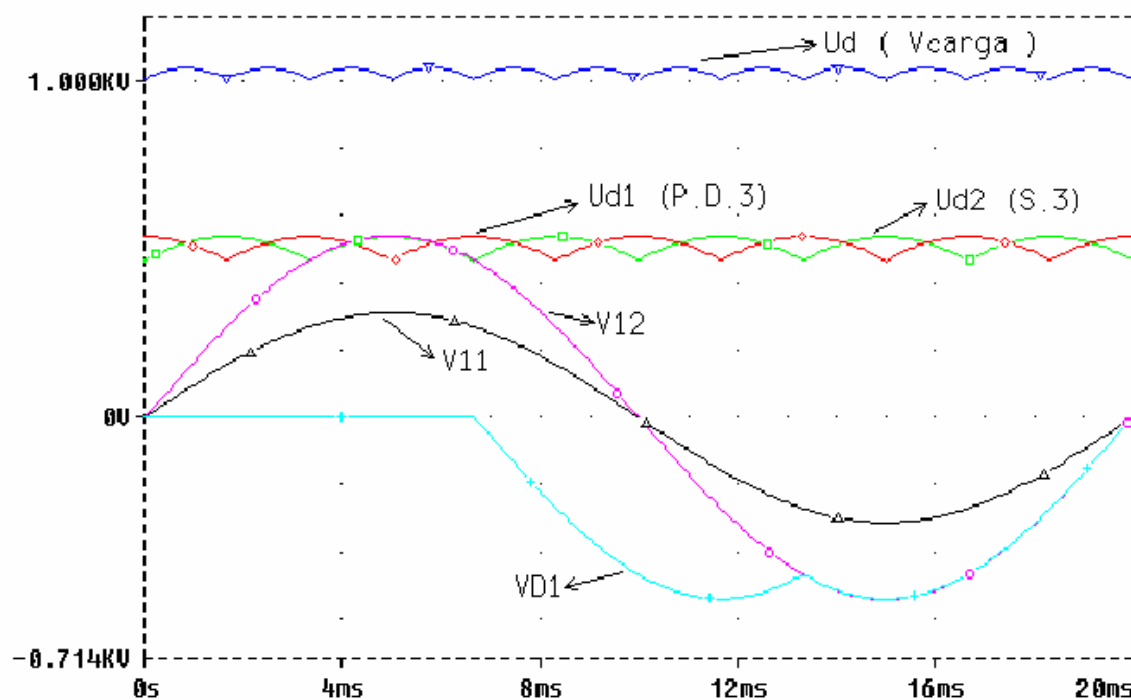
- los dos rectificadores sean capaces de suministrar la misma corriente.
- las tensiones de aislamiento entre los dos conjuntos de diodos y entre los devanados que los alimentan sea suficiente.

7.1.1.- Ejemplo con rectificadores no controlados.

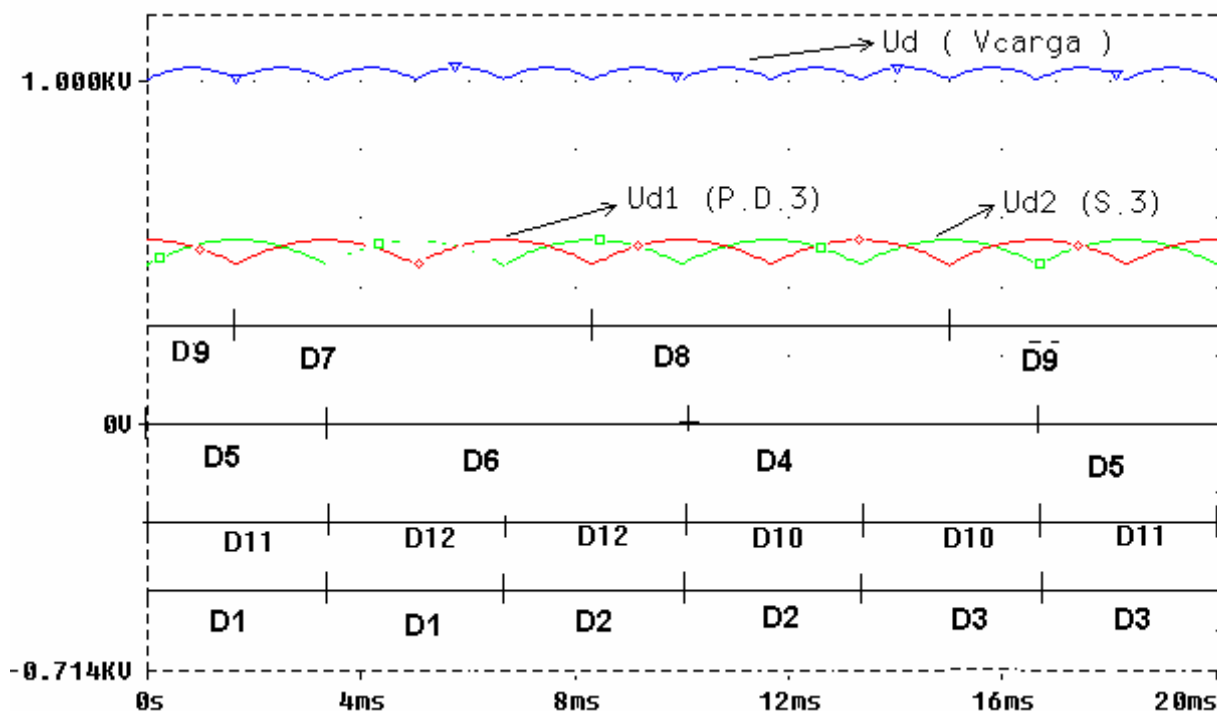
Conexión serie de un P.D.3 y un S.3:

Para obtener una tensión rectificada con un índice de pulsación igual a 12, pueden sumarse las tensiones rectificadas de dos puentes trifásicos, uno alimentado con la fuente en estrella y otro en polígono. Teniendo en común el devanado primario. Veamos a continuación el esquema y las formas de onda más características de este montaje rectificador :





Para determinar la secuencia de conducción de cada diodo en este montaje en serie, podemos analizar la conducción de cada montaje rectificador por separado y posteriormente concatenarlos. Para ello, recordaremos que en el montaje P.D.3, durante cada intervalo conducirá el diodo del grupo positivo que este conectado a la tensión más positiva, y también un diodo del grupo negativo, correspondiendo al que este conectado a la tensión más negativa. Para el montaje rectificador S3, con la fuente en polígono, hay que recordar que la corriente saldrá del vértice más positivo, conduciendo el diodo del grupo positivo correspondiente, y volverá por el vértice más negativo, a través de un diodo de dicho grupo. De esta forma veamos a continuación los intervalos de conducción de cada diodo.



Tal como se muestra en la figura anterior, en este tipo de conexión conducen simultáneamente cuatro diodos. Para que la caída de tensión y las pérdidas debidas a los diodos no tengan mucha importancia, se limitará el empleo para aplicaciones de valor de tensión elevado a la salida.



Para que las tensiones suministradas por los dos rectificadores (u_{d1} y u_{d2}) tengan el mismo valor medio, sus valores eficaces deberán cumplir la siguiente relación:

$$U_{d1} = U_{d2} \rightarrow \frac{6}{\pi} V_1 \sqrt{2} \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{\pi} V_2 \sqrt{2}$$

$V_2 = \sqrt{3} \cdot V_1 \Rightarrow$ los números de espiras de los dos secundarios estarán relacionados por $\frac{n_{22}}{n_{21}} = \sqrt{3}$

Debido al desfase de $\pi/6$ entre las ondas rectificadas parciales, la tensión rectificada total tiene un índice de pulsación igual a 12. Cada uno de los rectificadores conservan, por lo que se refiere a los diodos y devanados secundarios, sus propiedades:

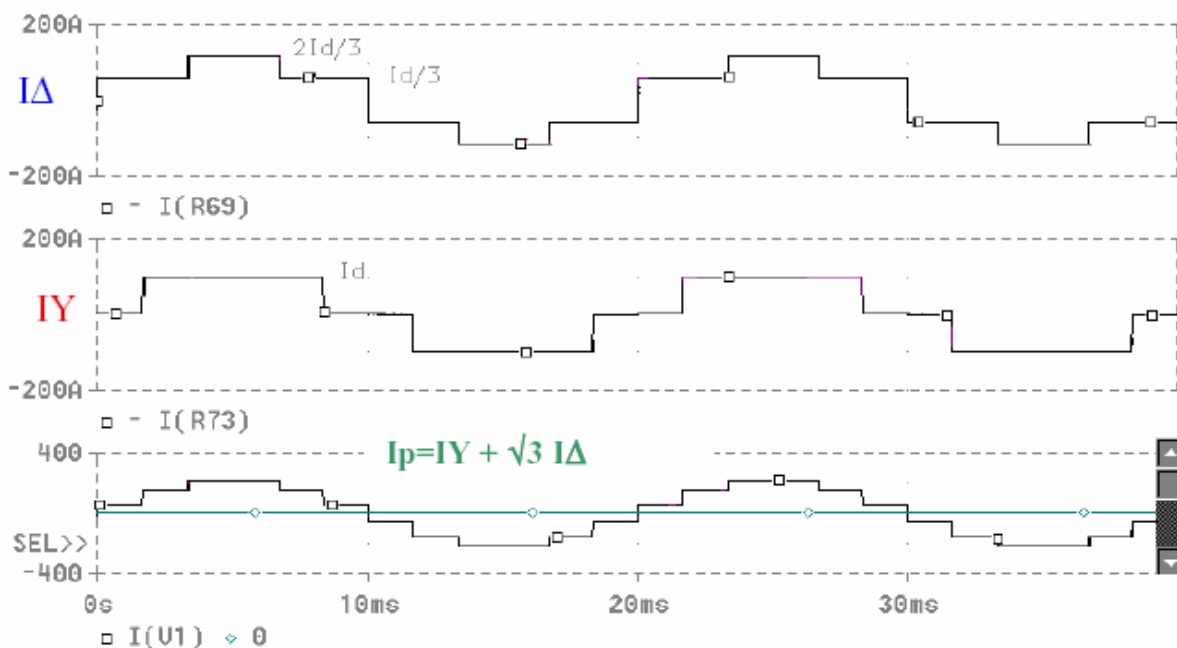
$$n_1 \cdot i_{p1} = n_{21} \cdot i_{S11} + n_{22} \cdot i_{S12}, \quad (PD3) \quad I_{S11_RMS} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad (S3) \quad I_{S12_RMS} = I_d \frac{\sqrt{2}}{3}, \quad \frac{n_{22}}{n_{21}} = \sqrt{3}$$

Despejando, las corrientes primarias tienen por valor eficaz:

$$I_p = 1.63 \cdot \frac{n_{21}}{n_1} I_d = 0.94 \cdot \frac{n_{22}}{n_1} I_d$$

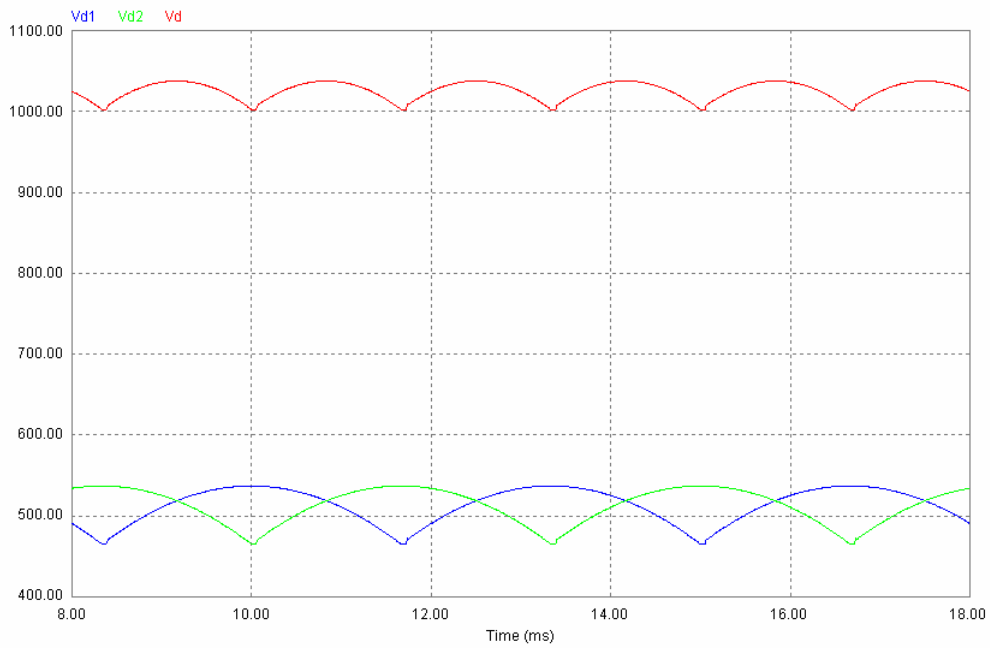
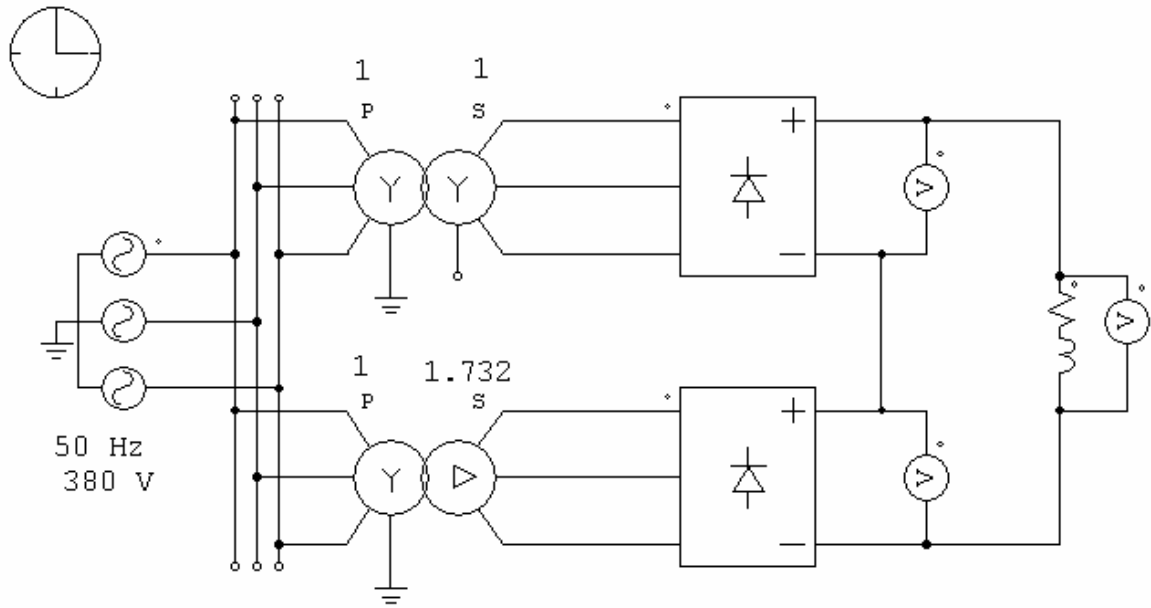
lo que corresponde a un factor de utilización de primario igual a:

$$F_p = \frac{U_{do} I_d}{3 V_1 \frac{n_1}{n_{21}} I_{prms}} = \frac{2 \cdot \frac{6}{\pi} \cdot V_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_d}{3 \cdot V_1 \cdot \frac{n_1}{n_{21}} \cdot 1.6 \cdot \frac{n_{21}}{n_1} \cdot I_d} = 0.989$$



Tal como se muestra en la figura anterior, la corriente de primario es n_1 veces la corriente del secundario en estrella más n_2 veces la corriente del secundario en delta, de manera que esta combinación consigue una forma de onda más senoidal, con menos distorsión armónica. Cuantitativamente, se logra un mayor factor de utilización de primario del transformador, pasando del 0.955 correspondiente al rectificador PD3 o S3 al 0.989 de esta combinación en serie.

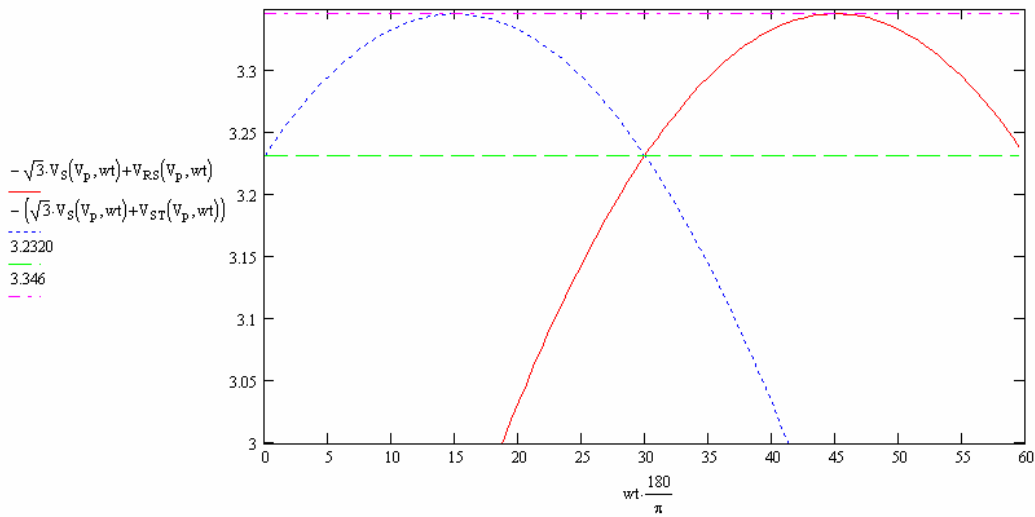
Respecto al factor de ondulación, la conexión serie también reduce dicho parámetro. En la siguiente figura se muestra las formas de onda simuladas:



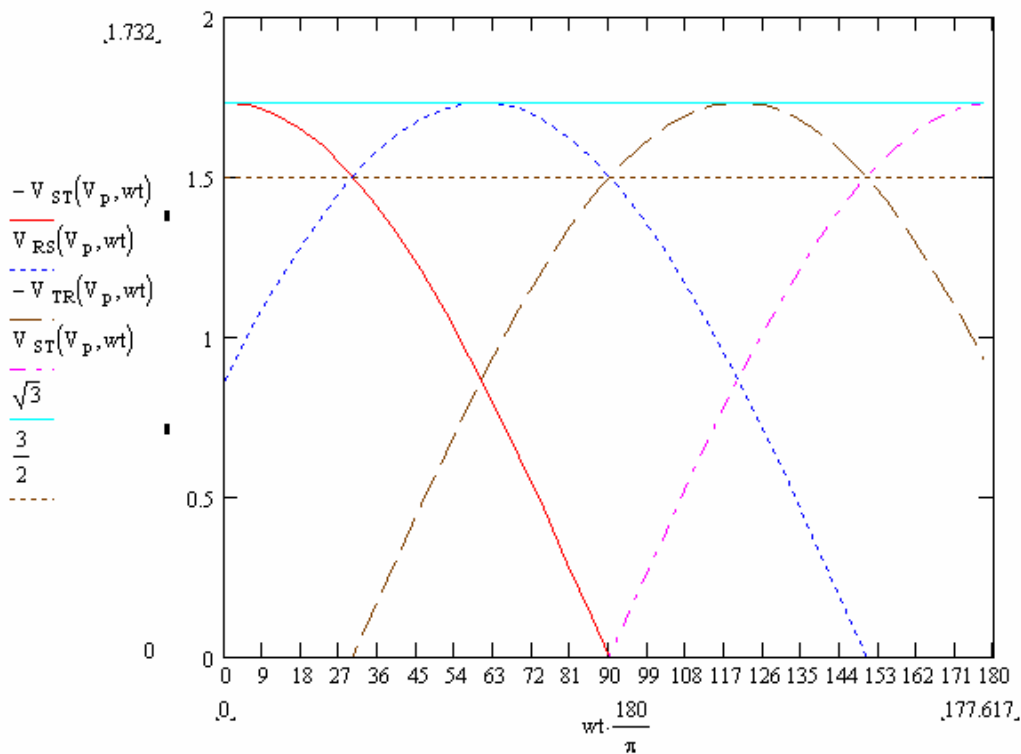


Tensión de salida PD3+S3: Valor máximo-Valor Mínimo = 3.346-3.2320=0.114

$$wt := 0,001 \dots \frac{\pi}{3}$$



Tensión de salida PD3: Valor máximo-Valor Mínimo = 1.732-1.5= 0.2320



7.1.2.- Ejemplo con rectificadores controlados.

La potencia aparente S absorbida por un rectificador con tiristores de la red que lo alimenta, es superior a la potencia activa P por dos razones:

- Las corrientes en la línea no son senoidales.
- El rectificador consume potencia reactiva Q.

Dado que se suponen senoidales las tensiones que la red aplica a la entrada del montaje rectificador, únicamente la componente fundamental de las corrientes en la línea dará un producto v·i no nulo. Es la componente fundamental la que lleva la potencia activa P.

Conexión reversible con controles decalados.

Uno de los principales inconvenientes de los rectificadores con tiristores es el consumo de potencia reactiva, la cual se puede reducir colocando en serie dos rectificadores con controles decalados.

Para un sistema trifásico vimos como la potencia aparente y activa tenían las siguientes expresiones:

$$S = 3 \cdot V_L \cdot I_L$$

$$S = 3 \cdot V_L \cdot \sqrt{I_1^2 + I_{q-1}^2 + I_{q+1}^2 + I_{2q-1}^2 \dots} = 3 \cdot V_L \cdot \sqrt{I^2 + (I_L^2 - I_1^2)} = \sqrt{(3 \cdot V_L \cdot I_1)^2 + 9 \cdot V_L^2 \cdot (I_L^2 - I_1^2)^2} = \sqrt{S_1^2 + D^2}$$

$$P = 3 \cdot V_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

con $S_1 = 3 \cdot V_L \cdot I_1$ potencia aparente del fundamental

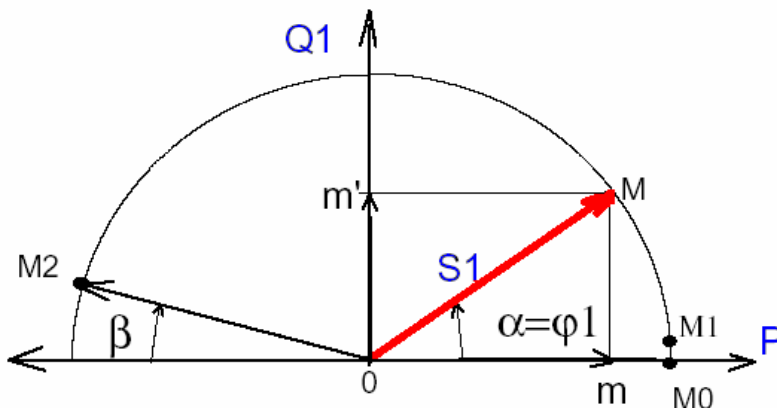
y $D = 3 \cdot V_L \cdot \sqrt{I_L^2 - I_1^2}$ potencia (reactiva) de distorsión.

Por tanto D traduce el efecto de los armónicos en la potencia aparente. Se trata en efecto de una potencia reactiva ya que los armónicos no llevan potencia activa. De la misma forma se puede descomponer S1 de la siguiente forma:

$$S_1 = 3 \cdot V_L \cdot I_1 = \sqrt{(3 \cdot V_L \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1))^2 + (3 \cdot V_L \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1))^2} = \sqrt{P^2 + Q_1^2}$$

siendo P la potencia activa y Q1 la potencia reactiva debido al fundamental

Si suponemos la tensión de la red constante, dado un valor de la corriente de salida Id, los valores de IL e I1, y por tanto los de S, S1 y D, son independientes de α. No es así para P y Q1. Para ilustrar el consumo de la potencia reactiva, se puede dibujar un diagrama que muestre, a Id constante, como varían P y Q1.

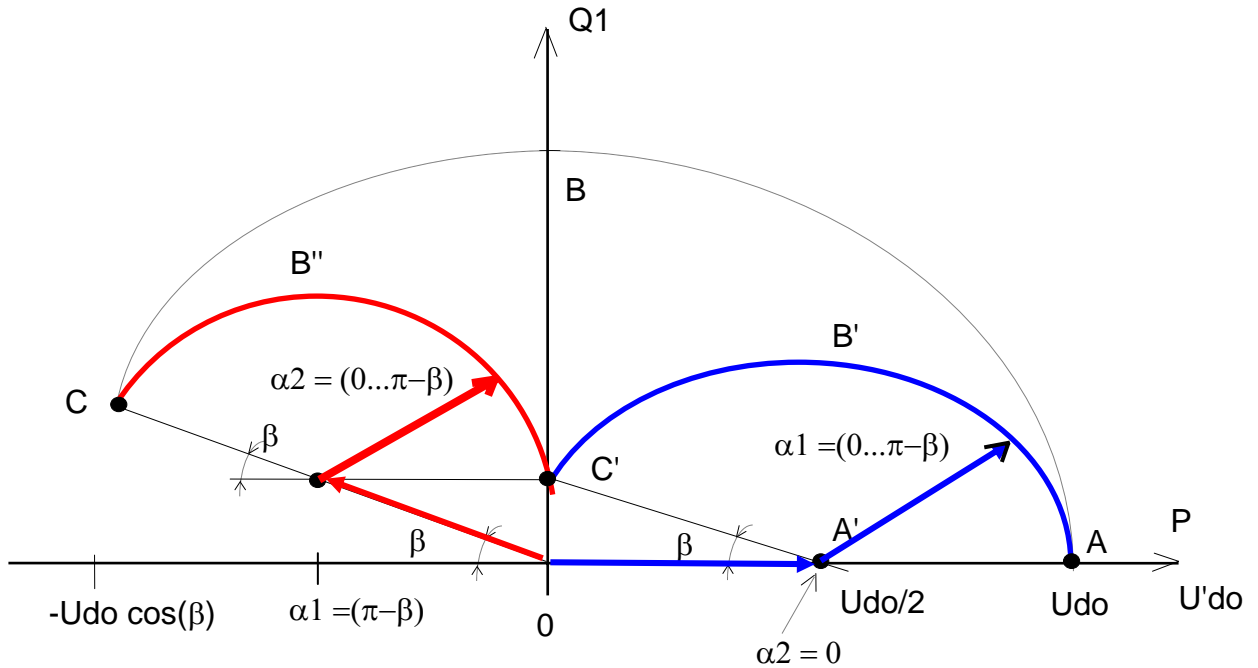


Al igual que con un solo rectificador, cuando α varía desde cero a π-β, en el sistema de ejes descrito, el extremo del vector que representa la potencia aparente correspondiente al fundamental, describe un arco M0 M2 centrado en cero. Si se ponen dos rectificadores en serie suministrando cada uno de ellos una tensión cuyo valor medio máximo es Ud0/2, se les puede

controlar de forma que la potencia reactiva Q disminuya, veamos a continuación el control a realizar.

Supongamos el segundo rectificador funcionando en máxima conducción (α2=0, extremo A' del vector), se hace variar el ángulo de control α1 del primer rectificador de 0 a π-β. El extremo del vector

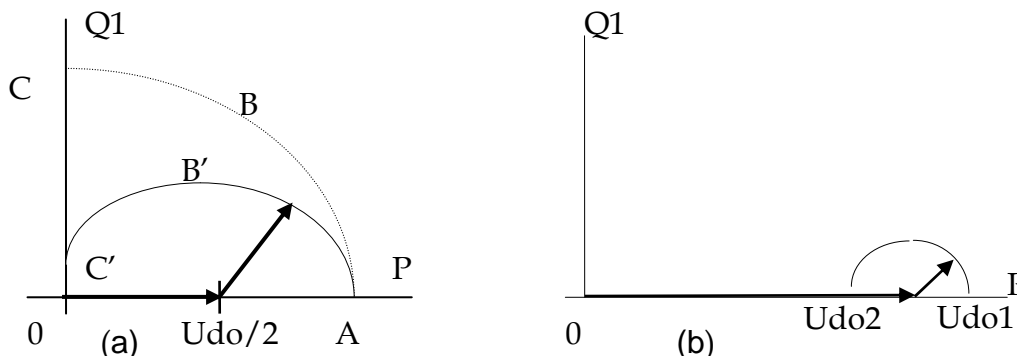
de este rectificador describirá un arco de círculo $AB'C'$. A continuación, manteniendo $\alpha_1 = \pi - \beta$, se hace variar a su vez α_2 de cero a $\pi - \beta$, describiendo un arco de círculo $C'B''C$, tal como se ilustra en la siguiente figura.



De esta forma cuando $U'do$ va de Udo a $-Udo \cos\beta$, la trayectoria ABC se ha sustituido por $AB'C'B''C$. Habiéndose dividido por dos el máximo $Q1$. Esta situación se puede generalizar y poner en serie tres o más rectificadores con tiristores, haciendo pasar sus ángulos de control desde cero a $\pi - \beta$ uno después de otro, dividiendo de esa manera la potencia reactiva consumida. Tal vez una de las limitaciones en cuanto al número de rectificadores dispuestos en serie con este control decalado, redundan en las pérdidas debidas a la caída de tensión de los numerosos semiconductores que hacen falta.

Conexión no reversible con controles decalados

Cuando no es necesaria la reversibilidad de la tensión media rectificada $U'do$, si se quiere reducir la potencia reactiva consumida, podemos disponer un rectificador con diodos, que proporcione una tensión rectificada media $Udo/2$, en serie con el rectificador de tiristores el cual dará una tensión media rectificada $U'do$ variable entre $Udo/2$ y $(-Udo \cos\beta)/2$. Dicha asociación se puede representar en el diagrama $Q1-P$ de la figura siguiente (a), para comparar las trayectorias:



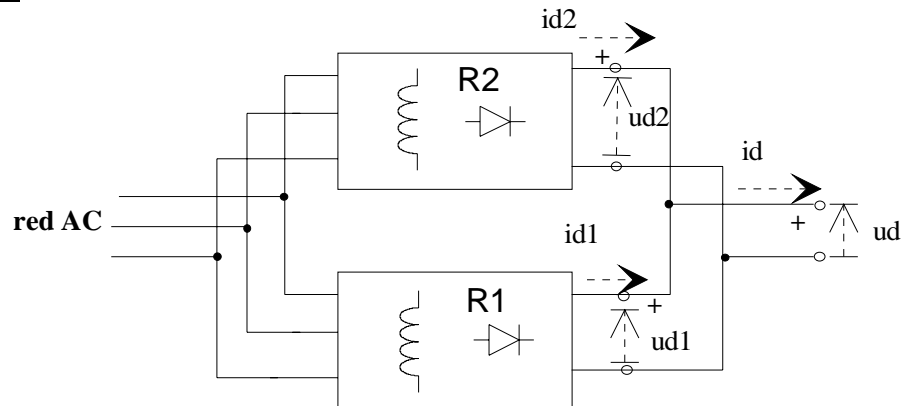
En la figura anterior parte (b) se muestra la trayectoria que resultaría de conectar en serie un rectificador de diodos que proporcionase $(Udo_1 + Udo_2)/2$ y un rectificador con tiristores que

garantizase las variaciones entre U_{d01} y U_{d02} . Esta conexión es interesante cuando U_{d0} varía entre dos límites próximos U_{d01} y U_{d02} .

7.2.- Conexión en paralelo. Consideraciones generales.

Esta asociación se emplea par conseguir más altas corrientes. Para que se puedan conectar en paralelo dos rectificadores hace falta que en vacío, suministren la misma tensión rectificada. Para que se distribuyan de manera homogénea la corriente total entre ellos es preciso que cada uno de ellos, a plena carga, tengan la misma caída de tensión. Las condiciones para la conexión en paralelo de dos conjuntos transformador-diodos, presentan analogías con la conexión en paralelo de transformadores. Sin embargo, la corriente que suministra el rectificador no se puede invertir.

a).- De una forma general :



Cuando los dos rectificadores conducen : $u_d = u_{d1} = u_{d2}$ y $i_d = i_{d1} + i_{d2}$

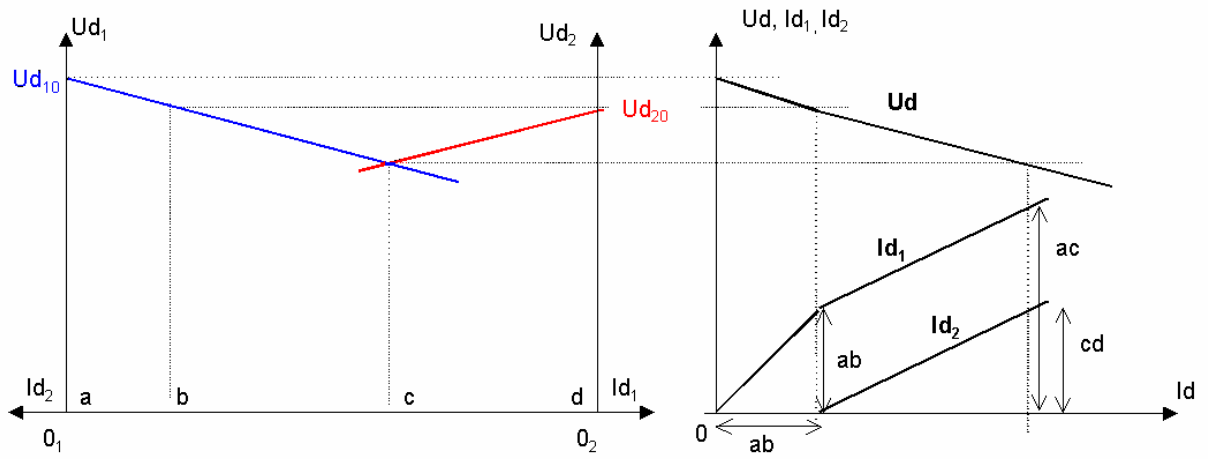
Si durante un intervalo, u_{d1} es mayor que la tensión u_{d2} que puede suministrar el conjunto R2 en vacío, todos los diodos de este están bloqueados, entonces : $u_d = u_{d1}$ y $i_d = i_{d1}$. Si de igual forma, u_{d2} es mayor que u_{d1} en vacío, sólo conduce el segundo rectificador, teniendo : $u_d = u_{d2}$ y $i_d = i_{d2}$

b).- Si los dos rectificadores conectados en paralelo utilizan el mismo esquema, suministrarán tensión rectificada del mismo índice de pulsación formadas por cúspides de senoide en fase, las dos condiciones que deben cumplirse son :

* Para que los dos rectificadores contribuyan por igual, a partir de pequeñas cargas, los valores medios de las tensiones rectificadas en vacío deben ser iguales ($U_{d10} = U_{d20}$).

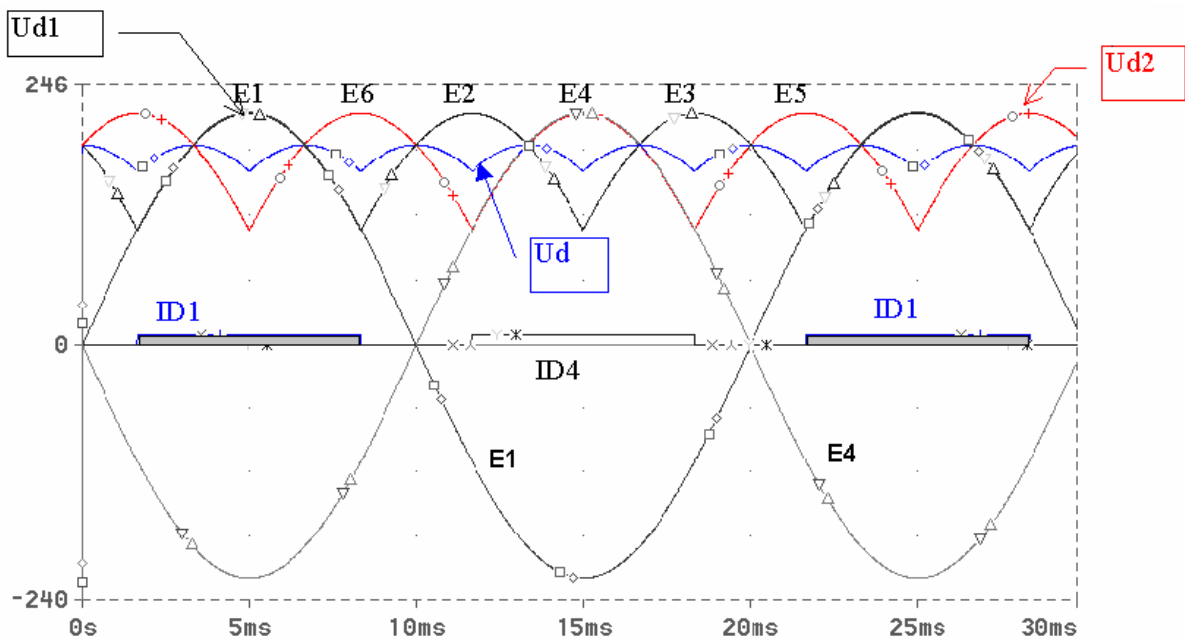
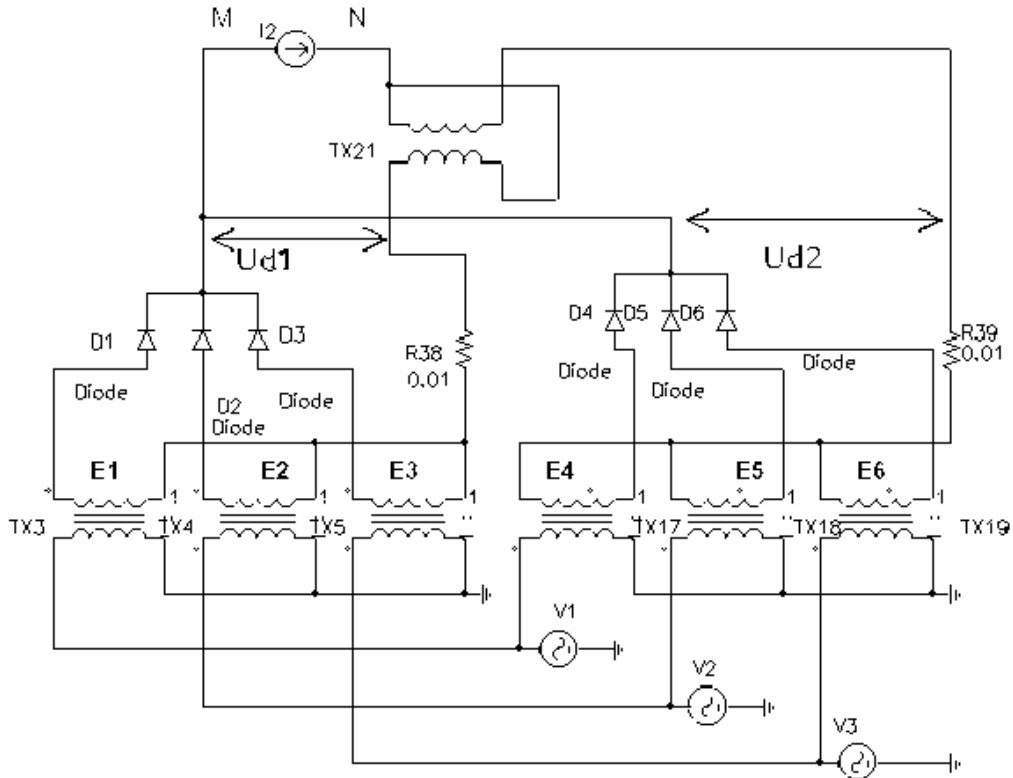
* Para que los dos rectificadores se repartan la corriente total hace falta que las características de tensión sean idénticas si están trazadas en función de I_d/I_{d1nom} e I_d/I_{d2nom} .

Supongamos por ejemplo que el rectificador R1 suministra una tensión en vacío mayor que la de R2, de forma que para pequeños valores de I_d sólo conduce el primer rectificador. Cuando I_d aumenta, y la reducción de u_{d1} son suficientes para hacer que la tensión a la salida sea igual a U_{d2} en vacío, empieza la conducción de R2, tal como se muestra en la siguiente figura:



7.2.1.- Rectificador "doble estrella".

Para obtener una tensión rectificada de índice de pulsación igual a 6, podíamos utilizar el rectificador trifásico PD3 o S3. Sin embargo, cuando la tensión de salida total sea pequeña, la caída de tensión en los dos diodos en serie y las pérdidas correspondientes pueden ser excesivas, sobre todo si la potencia es grande y se exige un rendimiento elevado. Entonces podemos utilizar montajes de media onda, pero limitándonos a un número de fases igual a tres, pues sino, las prestaciones de los rectificadores de media onda disminuyen al aumentar q. Por tanto debemos conectar en paralelo dos rectificadores P.3 con ondas de tensión decaladas, insertando una bobina de absorción para que a la salida obtengamos el valor medio de ambos rectificadores. A este montaje se le denomina de doble estrella. Veamos su configuración y formas de onda a continuación:

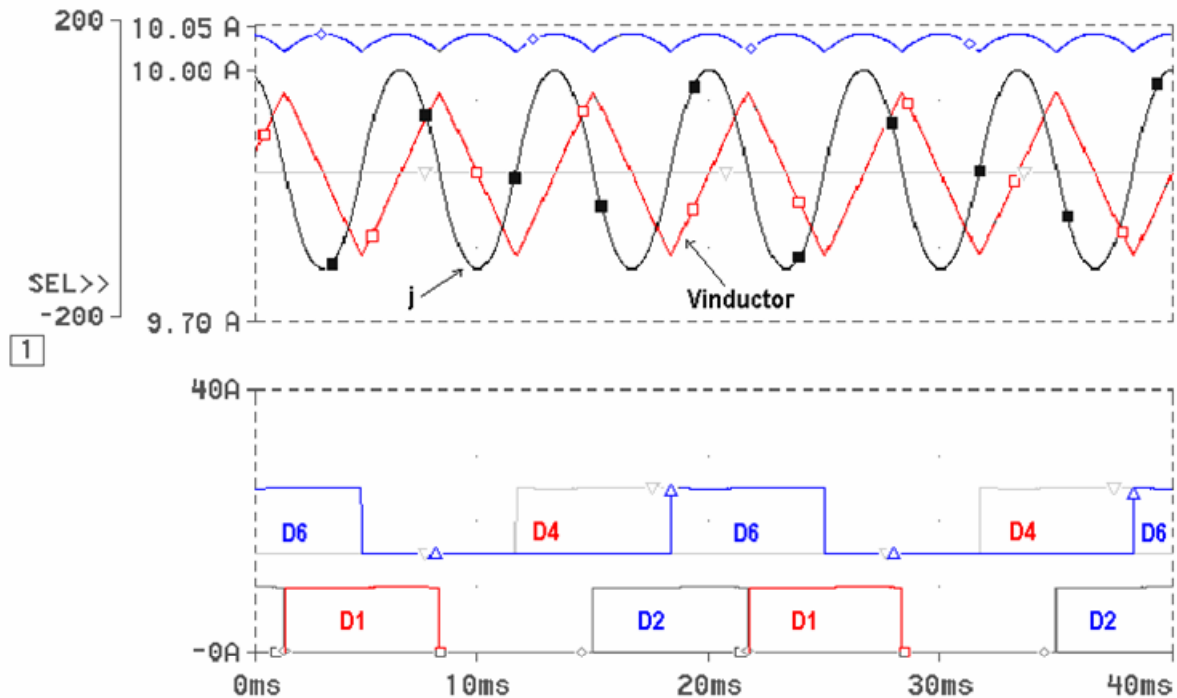




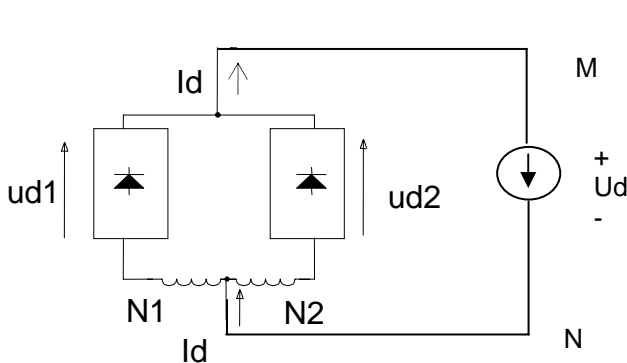
Las tensiones secundarias E1,E2 y E3 dan una tensión rectificada u_{d1} de índice de pulsación igual a 3. A partir de las tensiones E4,E5 y E6 se obtiene una segunda tensión rectificada u_{d2} idéntica a u_{d1} pero con un desfase de $\pi/3$. De esta forma se aprovecha la conexión en paralelo de dos montajes idénticos para mejorar la tensión rectificada.

Si se asocian dos rectificadores con sus tensiones de salida decaladas, habrá una interacción entre ellos. En nuestro caso se han montado dos rectificadores cuyos secundarios están en estrella, con una oposición de fase entre ellas, compartiendo un único primario. Cada rectificador P3 de manera individual funcionaría con un intervalo de conducción de cada diodo de 120° . Al ponerlos en paralelo con las tensiones decaladas, el intervalo de conducción de cada diodo se reduce a 60° . La manera más sencilla de asociar dos rectificadores sin que haya interacción, es mediante una bobina con núcleo de hierro y una toma media llamada “bobina entrefases o de absorción”, de manera que se toma la media de las dos tensiones y permite que cada rectificador trabaje de forma independiente conduciendo simultáneamente un diodo de cada estrella.

En funcionamiento normal, cada uno de los rectificadores suministran $I_d/2$ y cada diodo es recorrido por $I_d/2$ durante $T/3$. La tensión en bornes de la bobina de absorción es alterna y de frecuencia tres veces a de la red, tal como se muestra a continuación :



La tensión en bornes de la bobina con toma media es:



$$V_{N1} - V_{N2} = u_{d2} - u_{d1}$$

Estabobinarealiza la función de divisor de tensión:

$$V_{N1} - V_N = \frac{1}{2}(V_{N1} - V_{N2}) = \frac{1}{2}(u_{d2} - u_{d1})$$

$$V_{N2} - V_N = \frac{1}{2}(V_{N1} - V_{N2}) = \frac{1}{2}(u_{d1} - u_{d2})$$

De donde la expresión de la tensión rectificada será:

$$\begin{aligned} u_d = V_M - V_N &= (V_{N1} - V_N) + u_{d1} = \frac{1}{2}(u_{d2} - u_{d1}) + u_{d1} = \frac{1}{2}(u_{d1} + u_{d2}) \\ &= (V_{N2} - V_N) + u_{d2} = \frac{1}{2}(u_{d1} - u_{d2}) + u_{d2} = \frac{1}{2}(u_{d1} + u_{d2}) \end{aligned}$$

Cada rectificador suministrará $I_d/2$, siendo la corriente por cada diodo $I_d/2$ durante un tercio del período T , por tanto con un valor medio igual a : $I_d/6$. Las corrientes de los devanados secundarios tendrán un valor eficaz igual a :

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\frac{I_d}{2}\right)^2 \cdot \frac{T}{3}} = \frac{I_d}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}$$

y el factor de utilización de secundario valdrá :

$$F_s = \frac{U_{do} \cdot I_d}{6V \cdot I_s} = \frac{3 \cdot V\sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_d}{6V \cdot \frac{I_d}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}} = \frac{3}{\pi\sqrt{2}} \text{ igual que cualquier rectificador P.3}$$

La **bobina de absorción sólo realiza su función de divisor de tensión si es recorrida por una corriente alterna "j"**, corriente debida a la diferencia $u_{d2}-u_{d1}$, que se añade a $I_d/2$ en un rectificador y se resta a la corriente del otro. Veamos como para cierto valor de I_d , denominado **I_d crítica**, la corriente j no puede circular libremente a lo largo de todo el período y la inductancia L del divisor no garantiza de forma permanente la media de u_{d1} y u_{d2} .

La corriente j tiene el mismo período que la tensión $u_{d2}-u_{d1}$ que la ha originado. Si suponemos "La" constante tendremos:

Para $-\pi/6 < \omega t < \pi/6$ conducen los diodos D3 y D5, por tanto :

$$2L_a \cdot \frac{dj}{dt} = V_5 - V_3 = V\sqrt{2} \cdot \left(\sin(\omega t - \frac{5\pi}{3}) - \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \right) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

Así obtenemos :

$$j(\omega t) = -\frac{V\sqrt{2}}{2L_a\omega} \cdot \cos(\omega t) + Cte.$$

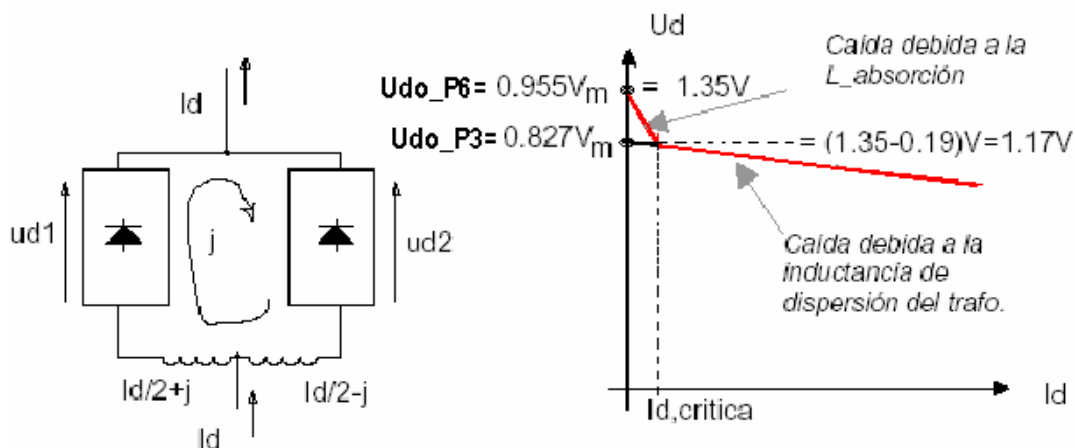
En los dos extremos del intervalo "j" tiene el mismo valor

$$j(-\pi/6) = -\frac{V\sqrt{2}}{L_a\omega} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + Cte = j(\pi/6) = 0 \quad \text{Así pues para } -\pi/6 < \omega t < \pi/6 \text{ tenemos: } j(\omega t) = -\frac{V\sqrt{2}}{2L_a\omega} \cdot \left(\cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

La corriente j tiene una amplitud máxima igual a : $\frac{V\sqrt{2}}{2L_a\omega} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0.095 \cdot \frac{V}{L_a\omega}$

La intensidad crítica corresponderá a la igualdad de $I_d/2$ con el valor de cresta de j , resultando un valor igual a :

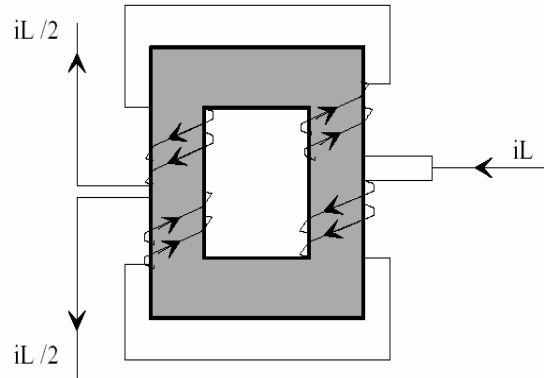
$$\frac{I_{d-critica}}{2} = j_{máx.} \Rightarrow I_{d-critica} = 0.19 \cdot \frac{V}{L_a\omega}$$





Tal como se observa en la figura anterior, En el límite, si I_d es nula, la corriente j es también nula, siendo nula la tensión $2L(dj/dt)$ en bornes de la bobina de absorción. Así es como si la bobina estuviera cortocircuitada y el montaje rectificador se comporta como un rectificador de tipo serie hexafásico (P6).

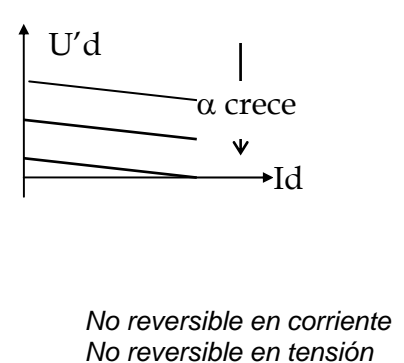
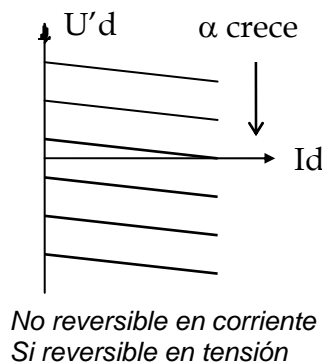
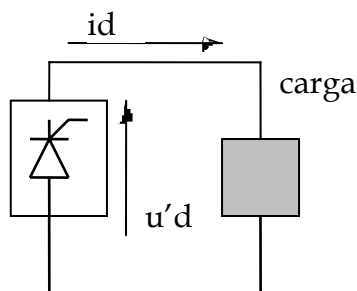
En la realidad se deberían de haber considerado las pérdidas en el hierro del transformador, la resistencia de los devanados, que dan una resistencia equivalente notable. Junto con la inductancia de pérdidas de los devanados secundarios, el cálculo real de la I_d -crítica, resulta ser un factor menor que 0.095, pudiéndose aproximar a 0.05. Cabe comentar la necesidad de que los devanados de la bobina de absorción deben disponerse de forma que las excitaciones magnéticas se compensen, pues de otra forma las componentes continuas de los dos sistemas en estrella la llevarían a saturación perdiendo el aislamiento de los neutros y transformándolo en un rectificador hexafásico. Como resumen, el rectificador en doble estrella con bobina de absorción presenta resultados similares al hexafásico de media onda, con una tensión de salida ligeramente inferior, pero con una corriente media por diodo inferior y un mejor aprovechamiento del transformador.



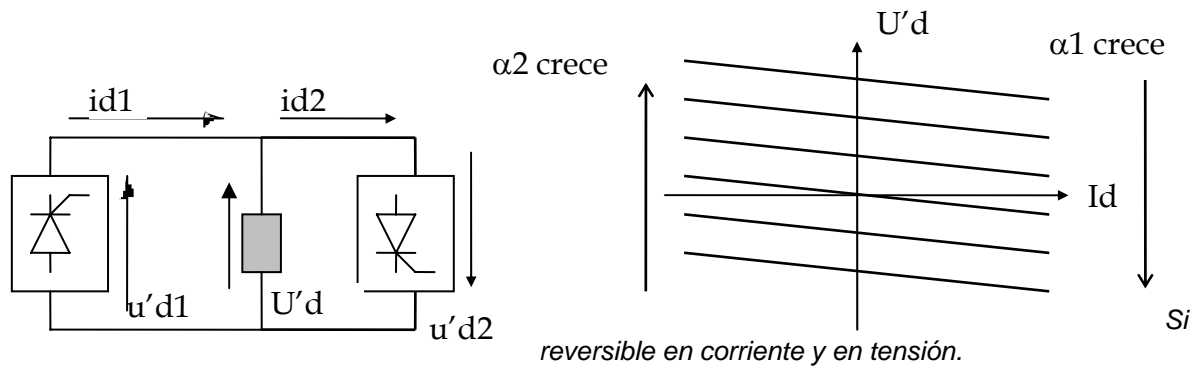
La construcción típica de la bobina de absorción se muestra en la siguiente figura, la cual muestra una estructura de dos ramas con dos bobinados acoplados en cada rama. Este estrecho acoplamiento asegurará un balance de la fuerza magnetomotriz, tal como un transformador, forzando a la corriente de la carga a dividirse de igual forma entre los dos bobinados. La corriente magnetizante circulando desde el neutro de una fuente al neutro de la otra debe circular en la misma dirección en todos los bobinados para satisfacer la condición del flujo.

7.4.- Conexión en antiparalelo con corriente de circulación.

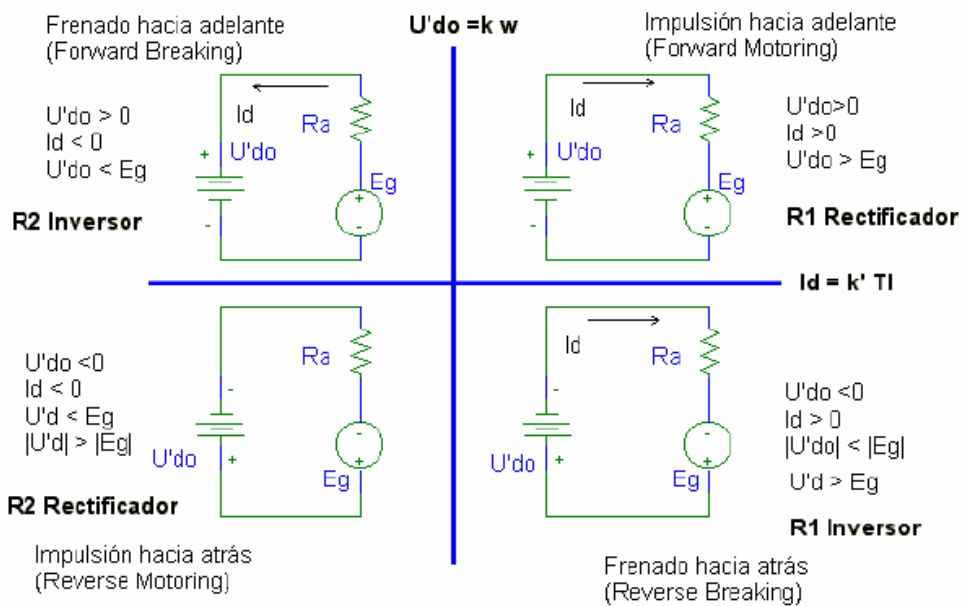
Los rectificadores con tiristores o mixtos y las conexiones en serie o en paralelo tienen, desde el punto de vista de continua, la función de fuentes de tensión variables, reversibles en tensión o no. Estas fuentes son irreversibles en corriente, es decir, la corriente rectificada i_d sale necesariamente del punto de unión de los cátodos. Veamos la característica de un rectificador como el citado con las curvas $U'd(I_d)$ cuando hay reversibilidad y cuando no la hay.



Para ciertos equipos es necesario disponer de fuentes reversibles de corriente. Para ello es preciso colocar dos rectificadores conectados en paralelo inverso o en antiparalelo, tal como se indica en la siguiente figura.



Hay que destacar que la reversibilidad en tensión o en corriente representa la alimentación de una carga activa. De forma que en los cuadrantes 1 y 3, el rectificador que conduce funciona como rectificador ($U'dI_d > 0$) y en los cuadrantes 2 y 4, el rectificador que conduce lo hace como ondulator ($U'dI_d < 0$).



En el cuadrante I y III, tenemos entrega de energía al motor, por lo que se imprime par motor que hace que la carga mecánica se mueva. En el cuadrante II y IV, tenemos que es el motor quien entrega energía al sistema. En este caso el motor funciona comogenerador de continua.

La realización de la conexión en antiparalelo se puede realizar de dos formas:

- Los dos rectificadores son controlados de forma que tengan la misma $U'do$, y la conducción de uno u otro sólo depende de la demanda de la carga continua. Son montajes **con corriente de circulación**. Para poder poner en antiparalelo dos rectificadores, los dos en estado de conducción, hace falta que sus tensiones rectificadas medias sean iguales y de signo contrario. Sus controles han de ser complementarios:

- El primer montaje da: $U'_{do1} = U_{do} \cdot \cos(\alpha1)$ $\alpha2 = \pi - \alpha1$
- El segundo, montado en sentido inverso, da: $U'_{do2} = U_{do} \cdot \cos(\alpha2) = U_{do} \cdot \cos(\pi - \alpha1) = -U'_{do1}$

Si bien la suma de $U'do1 + U'do2$ de los valores medios es nula, no sucede lo mismo con la suma $u'd1 + u'd2$ de los valores instantáneos. De ello resulta una corriente de circulación en el interior del circuito, que se debe de limitar añadiendo una o varias inductancias de limitación.

- Únicamente se ponen en estado de conducción el rectificador correspondiente al sentido de la corriente I_d solicitada. Son montajes **sin corriente de circulación**.