RECTIFICADORES

Una de las principales aplicaciones de los DIODOS es la rectificación de una onda alterna, esto quiere decir, convertir una onda de tensión y corriente alterna en una de corriente continua. De acuerdo a la forma de suministro de la corriente alterna, los rectificadores pueden clasificarse en : Monofásicos y Polifásicos. Los circuitos rectificadores más importantes son:

RECTIFICADORES

- **MONOFASICOS**
  - **1/2 Onda**
  - **Onda Completa**
    - **Bifásico de 1/2 onda**
    - **En puente**
- **POLIFASICOS**
  - **TRIFASICOS**
    - **De 1/2 Onda en estrella simple**
    - **De onda completa con estrella en puente**
  - **HEXAFASICOS**
    - **De 1/2 onda con doble estrella simple**
    - **De 1/2 onda con doble Y y bobina de compensación**
  - **DODECAFASICO** **Trifásico de onda completa en puente con Y-Δ Secundario y bobina de compens.**

ABREVIATURAS DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS A UTILIZAR

e_S : Valor instantáneo de la tensión secundaria del transformador. (v_s ó v_i)
E_S : Valor eficaz de la tensión secundaria del transformador. (E_{Sef}, V_S, V_{Sef}, V_i, V_{ief})
$\hat{E}_S$: Valor máximo ó Amplitud de la tensión secundaria del transformador. ($\hat{V}_S$, V_{Smax}, $\hat{V}_i$ ó V_{imax})
v_L : Valor instantáneo de la tensión de salida del rectificador (Tensión en la carga). (v_o)
$\bar{V}_L$: Valor medio de la tensión de salida del rectificador (Tensión en la carga). ($\bar{V}_{Lmed}$, $\bar{V}_o$, V_{omed})
V_L : Valor eficaz total de la tensión de salida del rectificador (Tensión en la carga). (V_{Lef}, V_o, V_{oef})
$\hat{V}_L$: Valor máximo ó Amplitud de la tensión de salida del rectificador (Tensión en la carga). (V_{Lmax}, $\hat{V}_o$, V_{omax})
V_{PI} ó $_{RWM}$: Valor de la tensión de pico repetitiva inversa que soporta el diodo.
i_S : Valor instantáneo de la corriente en el secundario del transformador. (i_i)
I_S : Valor eficaz de la corriente en el secundario del transformador. (I_{Sef}, I_{ief})
$\hat{I}_S$: Valor máximo ó Amplitud de la corriente en el secundario del transformador. (I_{Smax}, I_{imax})
i_L : Valor instantáneo de la corriente de salida del rectificador (Corriente en la carga). (i_o)
$\bar{I}_L$: Valor medio de la corriente de salida del rectificador (Corriente en la carga). (I_{Lmed}, $\bar{I}_o$, I_{omed})
$\hat{I}_L$ ó I_{FRM} : Corriente máxima repetitiva que circula por el diodo. (I_{Lmax}, $\hat{I}_o$, I_{omax})
$\bar{I}_D$ ó I_{FAV} : Valor medio de la corriente que circula por el diodo. (I_{Dmed})
I_D ó I_{RMS} : Valor eficaz de la corriente que circula por el diodo. (I_{Def})
S_S : Potencia aparente del secundario del transformador.
P_L : Potencia de continua a la salida del rectificador. (P_o)
F_f : Factor de forma.
F_u : Factor de utilización del secundario del transformador.

i : Imput ó Entrada y o : output ó Salida

F_r : Factor de ripple (rizado).
ω : Pulsación de la onda o velocidad angular [rad/s].
f : Frecuencia de la onda [Hz].

CONSIDERACIONES GENERALES A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO DE LOS CIRCUITOS RECTIFICADORES :

1 - Determinación de las condiciones de trabajo

Debemos partir del conocimiento de :

a) Corriente media en régimen nominal $\overline{I_L}$.

b) Tensión media en régimen nominal $\overline{V_L}$.

c) Potencia continua de salida del rectificador $\overline{P_L} = \overline{V_L} \cdot \overline{I_L}$

d) Tipos de carga : Resistivas, Inductivas, Capacitivas, y combinaciones de ellas.

2 - Selección del circuito a utilizar

En general podemos decir, que el tipo de circuito a adoptar dependerá de la potencia de salida en continua, requerida por la carga.

Para **pequeñas potencias** resultan convenientes los rectificadores monofásicos de media onda, bifásicos y puente. Salvo circunstancias especiales se preferirán los bifásicos y puente y comparándolos, se deberá evaluar respecto al costo de los equipos. Los bifásicos requieren dos diodos pero tienen bajo factor de utilización; los monofásicos en puente, requieren cuatro diodos pero tienen un alto factor de utilización.

Para **potencias medias (2 a 3 Kw)** resultan conveniente los trifásicos de media onda. Para **potencia mayor** se pueden utilizar los circuitos trifásicos de onda completa, hexafásicos, trifásicos en doble estrella con transformador interfásico.

La adopción de un circuito en particular, puede sin embargo depender de otros factores, por ejemplo, en la **escala más baja de potencia**, donde el costo es importante, la adopción del circuito dependerá del diodo rectificador adoptado a priori por razones de costo, stok, mercado, etc. En la **escala de media y alta potencia**, el circuito puede fijarse en base a las limitaciones de los elementos rectificadores.

3 - Selección del diodo rectificador.

Se deberán seleccionar entre cuatro tipos de diodos rectificadores: óxido de cobre, selenio (ambos obsoletos), germanio y silicio. Actualmente se consigue una gran variedad de diodos rectificadores de silicio, por lo cual se preferirán los de este último material.
Una vez seleccionado el tipo de diodo rectificador, se deberán calcular los parámetros eléctricos más importantes para que los diodos seleccionados trabajen correctamente.

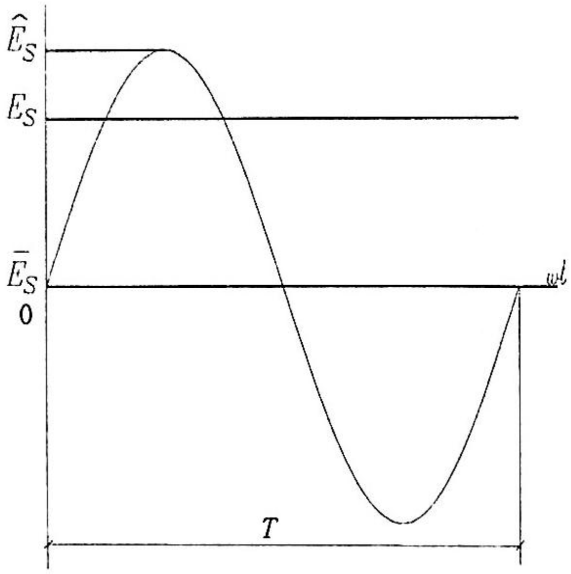
En general cualquiera sea el tipo de diodo rectificador la elección del mismo deberá efectuarse a partir del conocimiento de los valores máximos que determinan sus carácterísticas máximas de funcionamiento, como ser tensión máxima inversa repetitiva **Vpi**, máxima corriente media **Iso (Ifav)**, corriente máxima eficaz **If(rms)**, etc.

4 - Cálculo de los componentes del circuito.

Transformador, filtros, fusibles, llaves, etc.

REPASO DEL CÁLCULO DE VALORES MEDIOS Y EFICACES DE UNA FUNCIÓN

Calcularemos el valor medio y eficaz de un función sinusoidal con simetría de media onda, como la que corresponde a la tensión de salida del secundario de un transformador.



Valor Medio por definición : $\bar{V} = \dfrac{1}{T}\int_0^T v(t).dt \Rightarrow$

$$\bar{E}s = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \hat{E}s.Sen(\omega t).d(\omega t) =$$

$$= \frac{\hat{E}s}{2\pi}\int_0^{2\pi} Sen(\omega t).d(\omega t) = \frac{\hat{E}s}{2\pi}\left[-Cos(\omega t)\right]_0^{2\pi} =$$

$$= \frac{\hat{E}s}{2\pi}\left[-Cos(2\pi) + Cos(0)\right] = \frac{\hat{E}s}{2\pi}\left[-1+1\right] \Rightarrow$$

$$\bar{E}s = 0$$

Esto ocurre con todas las funciones que poseen simetría de media onda, ya que las áreas entre la función y el eje de absisas (de simetrla) son iguales por encima y por debajo del mismo.

Valor Eficaz por definición : $V = \sqrt{\dfrac{1}{T}\int v(t)^2.dt}$

$$Es = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \hat{E}s^2.Sen^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\int_0^{2\pi} Sen^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\frac{1}{2}\left[\omega t - Sen(\omega t).Cos(\omega t)\right]_0^{2\pi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\frac{1}{2}\left[2\pi - Sen(2\pi).Cos(2\pi) - 0 + Sen(0).Cos(0)\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\frac{1}{2}\left[2\pi - 0.1 - 0 + 0.1\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2}} \Rightarrow$$

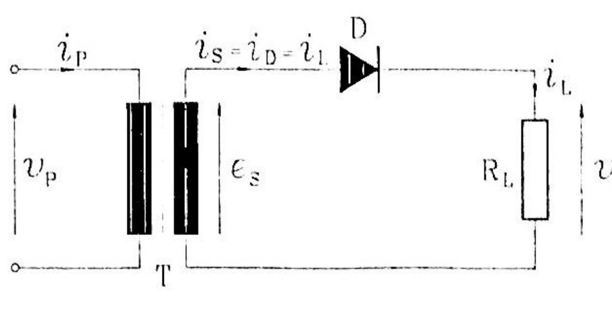
$$\boxed{Es = \frac{\hat{E}s}{\sqrt{2}} = 0,707\,\hat{E}s}$$

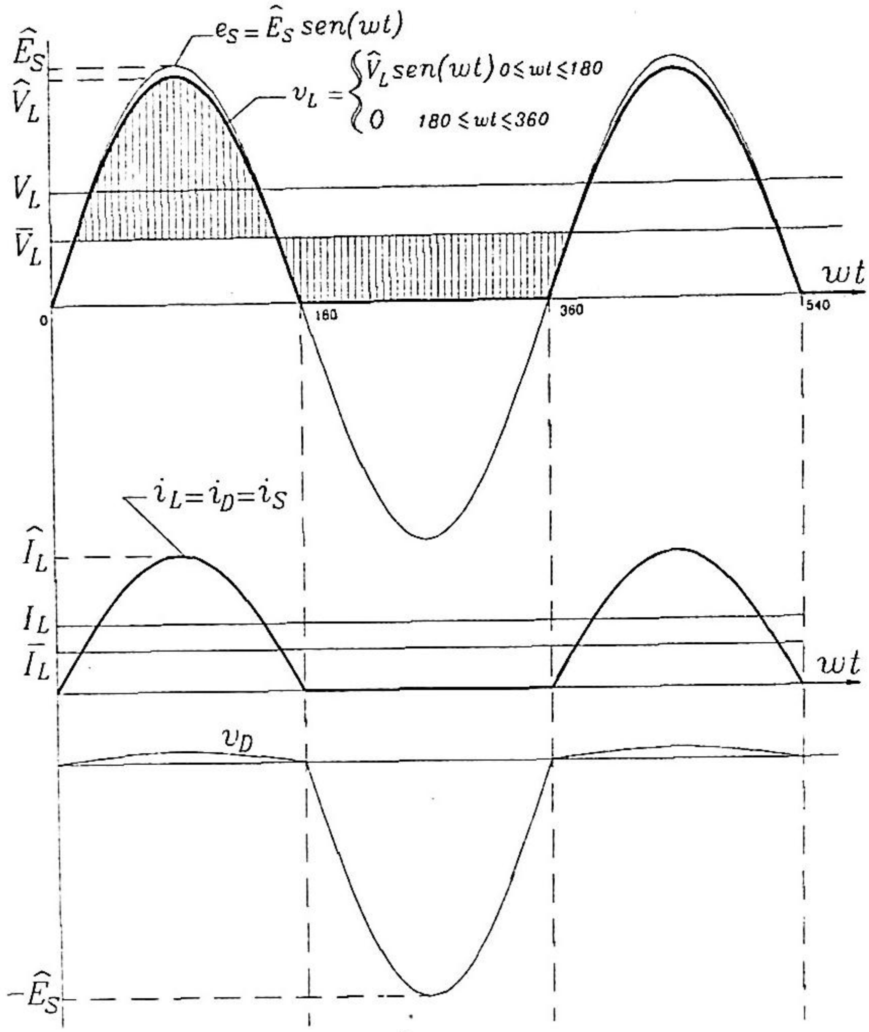
RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA

Este es el rectificador mas elemental, pero también el que da una onda rectificada muy impura ya que su pulsación es muy elevada.

NOTA: Realizaremos los estudios con **cargas resistivas** o sea que la tensión sobre la carga está en fase con la corriente.

En este rectificador cuando el terminal superior del transformador se encuentra con polaridad positiva el diodo queda polarizado directamente, por lo tanto estará en conducción durante todo el semiciclo (+), circulando corriente por la resistencia de carga desde el transformador y a través del diodo. Cuando se invierte la polaridad el diodo queda bloqueado no dejando pasar corriente a la resistencia de carga, o sea que recorta el semiciclo (-).





Cálculo de la Tensión Media sobre la carga : $\overline{V}_L = \dfrac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \hat{V}_l.Sen(\omega t).d(\omega t)$

El valor de $\hat{V}_L$ difiere de $\hat{E}_S$,en que el primero es levemente inferior debido a la caída de tensión en el diodo, pero considerando a la misma despreciable a partir de ciertas condiciones, supondremos los dos valores iguales $(\hat{V}_L = \hat{E}_s)$

$$\overline{V}_L = \frac{\hat{E}_S}{2\pi}\left[-Cos(\omega t)\right]_0^{\pi} = \frac{\hat{E}_S}{2\pi}\left[-Cos(\pi)+Cos(0)\right] = \frac{\hat{E}_S}{2\pi}\left[-(-1)+1\right] \Rightarrow \qquad \boxed{\overline{V}_L = \frac{\hat{E}_S}{\pi} = 0,32\hat{E}_S}$$

Cálculo de la Corriente Media sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión media, porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{\bar{I}_L = \frac{\hat{I}_S}{\pi} = 0,32\hat{I}_S}$$

Cálculo de la Tensión Eficaz sobre la Carga :

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \hat{E}s^2.Sen^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\int_0^{\pi} Sen^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\frac{1}{2}\left[\omega t - Sen(\omega t).Cos(\omega t)\right]_0^{\pi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\frac{1}{2}\left[\pi - Sen(\pi).Cos(\pi) - 0 + Sen(0).Cos(0)\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2\pi}\frac{1}{2}\left[\pi - 0.(-1) - 0 + 0.1\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2^2}} \Rightarrow$$

$$\boxed{V_L = \frac{\hat{E}s}{2} = 0,5\,\hat{E}s}$$

Cálculo de la Corriente Eficaz sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión eficaz , porque las formas de onda son iguales. Además es el único caso en el que la corriente sobre la carga es igual a la del transformador y del diodo.

$$I_L = \frac{\hat{I}_S}{2} = 0,5\,\hat{I}_S = I_S = I_D$$

Factor de forma

Se define como factor de forma a la relación que existe entre el valor eficaz de la onda respecto del valor medio de la misma. El valor ideal de este factor es "1" , esto quiere decir que coinciden el valor medio con el máximo o de cresta de la onda. Siendo la resultante una continua pura, sin componente alguna de c.a.

$$F_f = \frac{V_L}{\overline{V}_L}$$ O sea que en este caso será : $$F_f = \frac{(\hat{E}_S / 2)}{(\hat{E}_S / \pi)} \Rightarrow \quad F_f = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

Factor de ripple ó rizado

Como se ha visto la tensión de salida del rectificador presenta ondulaciones, o sea, se dice que es pulsante. Una tensión de este tipo puede ser descompuesta en una tensión continua, cuyo valor coincide con el valor medio de la tensión sobre la carga $\overline{V}_L$ más una serie de tensiones alternas cuya frecuencia son múltiplo de la fundamental (Tensión alterna de alimentación), esto mediante el desarrollo en series de Fourier.

Podemos definir entonces el Factor de Ripple o Rizado (γ)que expresa una medida de la ondulación que posee la tensión de salida del rectificador, como la relación entre el Valor Eficaz de las Componentes de Alterna sobre la Carga y la Tensión Media sobre la Carga.

$$\gamma = \frac{V_{Lca}}{\overline{V}_L} \quad (1)$$

La tensión Instantánea de salida se puede desarrollar en series de Fourier de la siguiente manera :

$$v_L(t) = \overline{V}_L + \hat{V}_{L1}.Cos(\omega t) + \hat{V}_{L2}.Cos(2\omega t) + \hat{V}_{L3}.Cos(4\omega t) + \cdots\cdots\cdots$$

Por lo tanto la tensión eficaz total se calculará de la siguiente forma :

$$ef_{tot} = V_L = \sqrt{\overline{V}_L^{\,2} + \hat{V}_{L1}^{\,2} + \hat{V}_{L2}^{\,2} + \hat{V}_{L3}^{\,2} + \cdots\cdots} = \sqrt{\overline{V}_L^{\,2} + V_{Lca}^{\,2}}$$

Por lo tanto : $_{Lca} = \sqrt{V_L^{\,2} - \overline{V}_L^{\,2}}$ y reemplazando esta ecuación en la (1) obtenemos que :

$$\gamma = \frac{\sqrt{V_L^{\,2} - \overline{V}_L^{\,2}}}{\overline{V}_L} = \sqrt{\frac{V_L^{\,2} - \overline{V}_L^{\,2}}{\overline{V}_L^{\,2}}} = \sqrt{\frac{V_L^{\,2}}{\overline{V}_L^{\,2}} - 1} \Rightarrow \qquad \gamma = \sqrt{F_F^{\,2} - 1}$$

En este caso será : $\gamma = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - 1} \Rightarrow \gamma = 1,21$

Esto está indicando que existe un 121% de componente de alterna respecto de la de continua en la tensión de salida del rectificador.

Factor de utilización

Se define como factor de utilización (Fu) del arrollamiento secundario del transformador a la relación que existe entre la Potencia Continua que entra a la Carga (Producto de la tensión media y la corriente media) y la Potencia Aparente que sale del Arrollamiento secundario del transformador (Producto de la tensión eficaz y la corriente eficaz). Este coeficiente nos da una idea de cuanto se aprovecha la disponibilidad de potencia del transformador, además nos permitirá ;una vez conocida la potencia en continua que consumirá la carga; calcular la potencia del transformador y lógicamente su tamaño y costo, como así también compararlos en los distintos rectificadores.

$$F_U = \frac{\overline{P}_L}{S_S} = \frac{\overline{V}_L.\overline{I}_L}{E_S.I_S} \quad \text{En este caso será : } F_U = \frac{\frac{\hat{E}_S}{\pi}.\frac{\hat{I}_S}{\pi}}{\frac{\hat{E}_S}{\sqrt{2}}.\frac{\hat{I}_S}{2}} = \frac{2.\sqrt{2}}{\pi^2} \Rightarrow F_U = 0,286$$

o lo que es lo mismo $S_S = 3,5\overline{P}_L$

Esto quiere decir que si el rectificador debe alimentar una carga de 100[W] en continua, el transformador deberá ser de 350 [VA].
Como se observa el Fu es bajo ya que por el secundario del transformador circula corriente durante medio ciclo solamente.

Rendimiento de la conversión

Se define de esta manera a la relación existente entre la potencia de continua aplicada sobre la carga y la potencia total sobre la misma.

$$\eta_c = \frac{\overline{P}_L}{\overline{P}_L + P_{Lca}} \quad \Rightarrow \quad \eta_c = \frac{\overline{V}_L^2/R_L}{\left(\overline{V}_L^2/R_L\right)+\left(V_{Lca}^2/R_L\right)} = \frac{\overline{V}_L^2}{\overline{V}_L^2+V_{Lca}^2} = \frac{\overline{V}_L^2}{V_{Ltot}^2} = \frac{1}{V_{Ltot}^2/\overline{V}_L^2} \Rightarrow \eta_c = \frac{1}{F_F^2}$$

En este caso será : $\eta_C = \frac{1}{(\pi/2)^2} = 0,405$

Esto indica que el 40,5% de la energía alterna de entrada al rectificador se transforma en energía de continua a la salida del mismo.

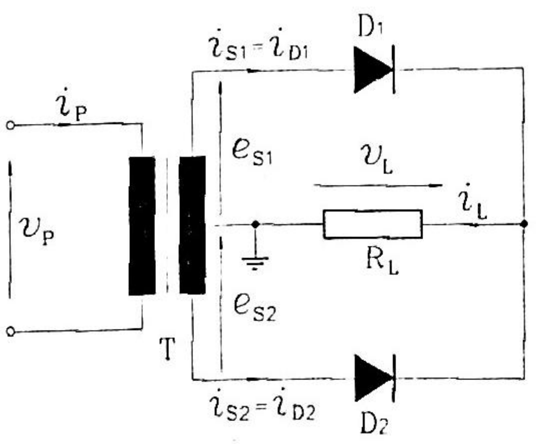
Determinación de los parámetros eléctricos para la selección del diodo

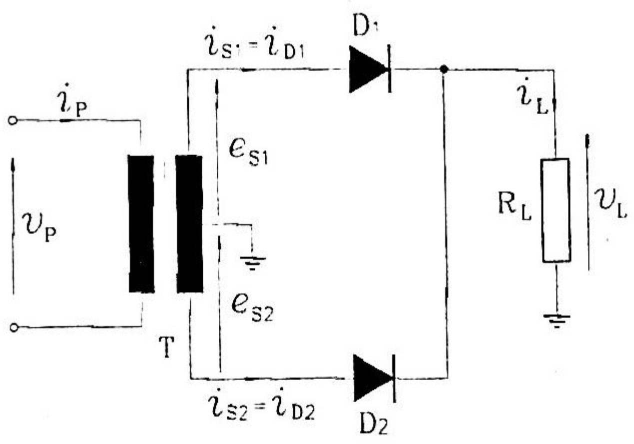
$\hat{I}_D$ ó $I_{FRM} = \hat{I}_S = \pi.\overline{I}_L$ # $\overline{I}_D$ ó $I_{So} = \overline{I}_L$ # I_D ó $I_{F_{RMS}} = I_S = \frac{\pi}{2}\overline{I}_L$

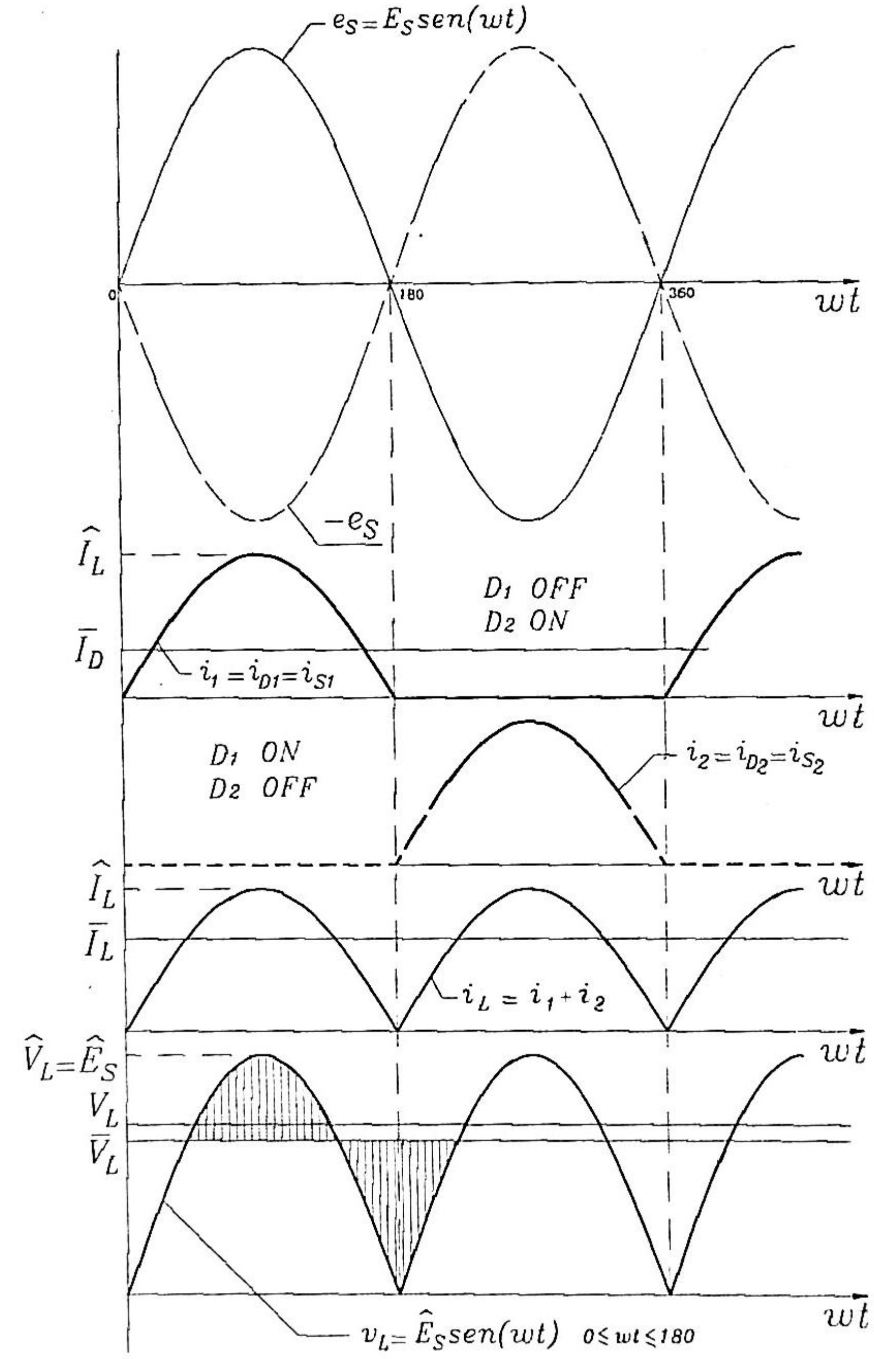
V_{PI} ó $V_{RWM} = \hat{E}_S = \pi.\overline{V}_L$

RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON FUENTE PARTIDA ó BIFÁSICO DE MEDIA ONDA

En este caso cuando el terminal superior (u) del transformador se encuentra con polaridad (+), el diodo D1 queda polarizado directamente, conduciendo este corriente hacia la resistencia de carga (Rl) y de esta al punto medio del transformador (o); mientras que el terminal inferior (x) en el mismo instante de tiempo se encuentra con polaridad (-), por lo que el diodo D2 se encuentra bloqueado. Cuando se inviertan las polaridades, el diodo D2 pasa al estado de conducción y el D1 al estado de bloqueo. Pero como cada diodo actúa rectificando durante medio ciclo, en la carga se compone una onda completa en la que los dos semiciclos resultantes son (+).







$$i_1 = \begin{cases} \hat{I}_L \, sen(wt) & 0 \leq wt \leq 180 \\ 0 & 180 \leq wt \leq 360 \end{cases} \qquad i_2 = \begin{cases} 0 & 0 \leq wt \leq 180 \\ \hat{I}_L \, sen(wt) & 180 \leq wt \leq 360 \end{cases}$$

Cálculo de la Tensión Media sobre la carga : $\overline{V}_L = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \hat{E}s.Sen(\omega t).d(\omega t)$

$$\overline{V}_L = \frac{\hat{E}_S}{\pi}\left[-Cos(\omega t)\right]_0^{\pi} = \frac{\hat{E}_S}{\pi}\left[-Cos(\pi) + Cos(0)\right] = \frac{\hat{E}_S}{\pi}\left[-(-1) + 1\right] \Rightarrow \boxed{\overline{V}_L = 2 \cdot \frac{\hat{E}_S}{\pi} = 0,64\,\hat{E}_S}$$

Cálculo de la Corriente Media sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión media, porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{\overline{I}_L = 2 \cdot \frac{\hat{I}_S}{\pi} = 0,64\,\hat{I}_S}$$

Cálculo de la Tensión Eficaz sobre la Carga :

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \hat{E}s^2 .Sen^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{\pi}\int_0^{\pi} Sen^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{\pi}\frac{1}{2}\left[\omega t - Sen(\omega t).Cos(\omega t)\right]_0^{\pi}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{\pi}\frac{1}{2}\left[\pi - Sen(\pi).Cos(\pi) - 0 + Sen(0).Cos(0)\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{\pi}\frac{1}{2}\left[\pi - 0.(-1) - 0 + 0.1\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{2}} \Rightarrow$$

$$\boxed{V_L = \frac{\hat{E}s}{\sqrt{2}} = 0,707\,\hat{E}s}$$

Como se puede ver este valor coincide con el valor eficaz de la tensión secundaria del transformador, ya que la onda resultante de la rectificación contiene nuevamente los 2 semiciclos independientemente de que haya perdido la simetría de 1/2 onda.

Cálculo de la Corriente Eficaz sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión eficaz, porque las formas de onda son iguales. En este caso la corriente eficaz sobre la carga es mayor a la de cada 1/2 devanado del transformador y de cada diodo.

$$I_L = \frac{\hat{I}_S}{\sqrt{2}} = 0,707\,\hat{I}_S \qquad\qquad I_S = I_D = \frac{\hat{I}_S}{2} = 0,5\,\hat{I}_S$$

Factor de forma

$F_f = \dfrac{V_L}{\overline{V}_L}$. O sea que en este caso será : $F_f = \dfrac{\hat{E}_S/\sqrt{2}}{2\hat{E}_S/\pi} \Rightarrow F_f = \dfrac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$

Factor de ripple ó rizado

En este caso será : $\gamma = \sqrt{\dfrac{V_L^2}{\overline{V}_L^2} - 1} \Rightarrow \gamma = \sqrt{F_F^2 - 1} = \sqrt{\left(\dfrac{\pi}{2\sqrt{2}}\right)^2 - 1} \Rightarrow \gamma = 0,483$

Esto está indicando que existe un 48,3 % de componente de alterna respecto de la de continua en la tensión de salida del rectificador.

Factor de utilización

En este caso para calcular la potencia aparente del transformador, debemos calcularla en 1/2 devanado y multiplicarla por 2. Teniendo en cuenta que la corriente en cada mitad del arrollamiento posee solo 1/2 ciclo.

$F_U = \dfrac{\overline{P}_L}{S_S} = \dfrac{\overline{V}_L.\overline{I}_L}{2.E_S.I_S}$ En este caso será : $F_U = \dfrac{\dfrac{2\hat{E}_S}{\pi}.\dfrac{2\hat{I}_S}{\pi}}{2\cdot\dfrac{\hat{E}_S}{\sqrt{2}}.\dfrac{\hat{I}_S}{2}} = \dfrac{4.\sqrt{2}}{\pi^2} \Rightarrow F_U = 0,573$

o lo que es lo mismo $S_S = 1,745\,\overline{P}_L$. Como se puede ver este factor a aumentado respecto del caso anterior, pero aún es bastante bajo.
Esto quiere decir que si el rectificador debe alimentar una carga de 100[W] en continua, el transformador deberá ser de 174,5 [VA].

Rendimiento de la conversión

Se define de esta manera a la relación existente entre la potencia de continua aplicada sobre la carga y la potencia total sobre la misma.

En este caso será : $\eta_c = \dfrac{1}{F_F^2} = \dfrac{1}{\left(\pi/2\sqrt{2}\right)^2} = 0,81$

Esto indica que el 81 % de la energía alterna de entrada al rectificador se transforma en energía de continua a la salida del mismo.

Determinación de los parámetros eléctricos para la selección del diodo

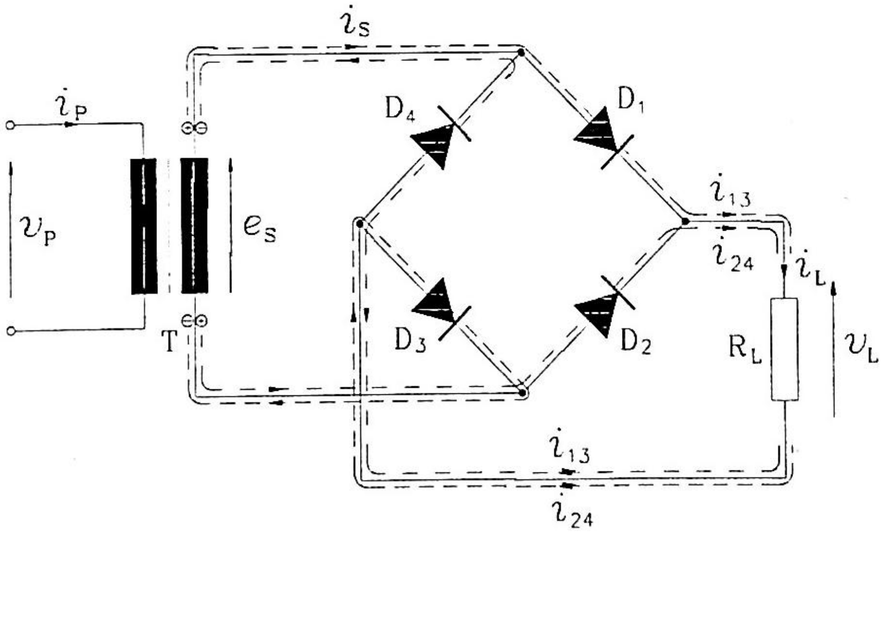
$$\hat{I}_D \text{ ó } I_{FRM} = \hat{I}_S = \frac{\pi}{2}.\bar{I}_L = 1{,}57\bar{I}_L \ \# \ \bar{I}_D \text{ ó } I_{FAV} = 0{,}5\bar{I}_L \ \# \ I_D \text{ ó } I_{F_{RMS}} = I_{D1} = I_{D2} = \frac{\pi}{4}\bar{I}_L = 0{,}785\bar{I}_L$$

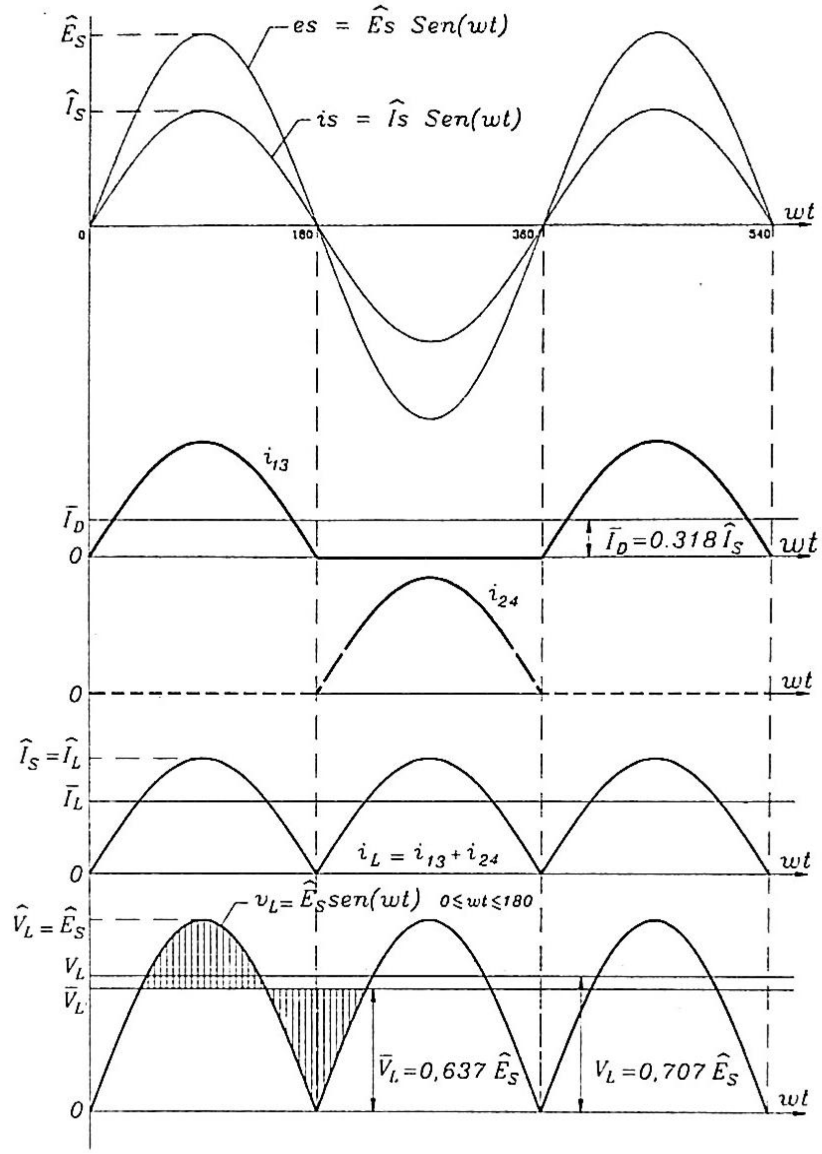
$$V_{PI} \text{ ó } V_{RWM} = 2\hat{E}_S = 2\pi.\bar{V}_L$$

En este caso la "Tensión de Pico Inversa" se duplica respecto del caso anterior debido a que cuando un diodo está conduciendo (Idealmente un Corto Circuito), el otro se encuentra bloqueado y soportando la tensión máxima de los dos arrollamientos. (Ver circuito equivalente).

RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA EN PUENTE (PUENTE DE GRAETZ)

En este caso cuando el terminal superior (u) del transformador se encuentra con polaridad (+), el diodo D1 y D3 quedan polarizados directamente, conduciendo estos corriente según la siguiente trayectoria : de $(u \rightarrow a)$ a través de D1, de $(a \rightarrow b)$ a través de R_L ,y de $(u \rightarrow x)$ a través de D3; mientras que el terminal inferior (x) en el mismo instante de tiempo se encuentra con polaridad (-), por lo que los diodos D2 y D4 se encuentran bloqueados. Cuando se inviertan las polaridades, o sea borne (x) del transformador (+) y borne (u) (-). Los diodos D2 y D4 quedan polarizados directamente y los diodos D1 y D3 inversamente, por lo que se establece una corriente de la siguiente trayectoria : de $(x \rightarrow a)$ a través de D2, de $(a \rightarrow b)$ a través de R_L , y de $(b \rightarrow u)$ a través de D4. Como consecuencia de esto podemos observar que el sentido de la corriente sobre la carga siempre es el mismo cualquiera sea el semiciclo de la tensión alterna de entrada al puente. Este puente logra dar vuelta el semiciclo (-) sobre la carga, obteniéndose en la misma una onda completa similar a la del rectificador anterior, por lo que varios de los cálculos serán iguales.





$$i_{13}=\begin{cases}\hat{I}_L\, sen(wt) & 0\leq wt\leq 180\\ 0 & 180\leq wt\leq 360\end{cases}\qquad i_{24}=\begin{cases}0 & 0\leq wt\leq 180\\ \hat{I}_L\, sen(wt) & 180\leq wt\leq 360\end{cases}$$

$$v_L = v_{L13} + v_{L24} = \hat{E}s.Sen(\omega t) \quad \wedge \quad 0 \leq \omega t \leq \pi$$
$$i_L = i_{L13} + i_{L24} = \hat{I}s.Sen(\omega t) \quad \wedge \quad 0 \leq \omega t \leq \pi$$

Cálculo de la Tensión Media sobre la carga : $\overline{V}_L = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \hat{E}s.Sen(\omega t).d(\omega t) \Rightarrow$

$$\boxed{\overline{V}_L = 2\cdot\frac{\hat{E}_S}{\pi} = 0{,}64\hat{E}_S}$$

Cálculo de la Corriente Media sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión media, porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{\overline{I}_L = 2\cdot\frac{\hat{I}_S}{\pi} = 0{,}64\hat{I}_S}$$

Cálculo de la Tensión Eficaz sobre la Carga : $V_L = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \hat{E}s^2.Sen^2(\omega t)d(\omega t)} \Rightarrow$

$$\boxed{V_L = \frac{\hat{E}s}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,\hat{E}s}$$

Cálculo de la Corriente Eficaz sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión eficaz, porque las formas de onda son iguales.

$I_L = I_S = \frac{\hat{I}_S}{\sqrt{2}} = 0,707\,\hat{I}_S$ En este caso la corriente eficaz sobre la carga es igual a la del arrollamiento del transformador, ya que por el circula corriente durante los dos semiciclos.

$I_{D13} = I_{D24} = \frac{\hat{I}_S}{2} = 0,5\,\hat{I}_S$ En cada rama del puente la corriente eficaz es inferior debido a que ellas si tenemos solo 1/2 onda.

Factor de forma

Este factor es igual al anterior, ya que la forma de onda en la carga también lo es : $F_F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$

Factor de ripple ó rizado

En este caso será : $\gamma = 0,483$

Esto está indicando que existe un 48,3 % de componente de alterna respecto de la de continua en la tensión de salida del rectificador.

Factor de utilización

En este caso el factor de utilización difiere respecto del anterior, porque este transformador posee un solo devanado (no tiene punto medio).

$F_U = \frac{\overline{P}_L}{S_S} = \frac{\overline{V}_L.\overline{I}_L}{E_S.I_S}$ En este caso será : $F_U = \frac{(2\hat{E}_S/\pi).(2\hat{I}_S/\pi)}{(\hat{E}_S/\sqrt{2}).(\hat{I}_S/\sqrt{2})} = \frac{8}{\pi^2} \Rightarrow F_U = 0,81$

o lo que es lo mismo $S_S = 1,234\,\overline{P}_L$. Como se puede ver este factor a aumentado respecto del caso anterior, y es considerablemente bueno y máximo en un transformador monofásico con carga resistiva.
Esto quiere decir que si el rectificador debe alimentar una carga de 100[W] en continua, el transformador deberá ser de 123,4 [VA].

Rendimiento de la conversión

En este caso será : $\eta_c = \frac{1}{F_F^2} = \frac{1}{\left(\pi/2\sqrt{2}\right)^2} = 0,81$

Esto indica que el 81 % de la energía alterna de entrada al rectificador se transforma en energía de continua a la salida del mismo.

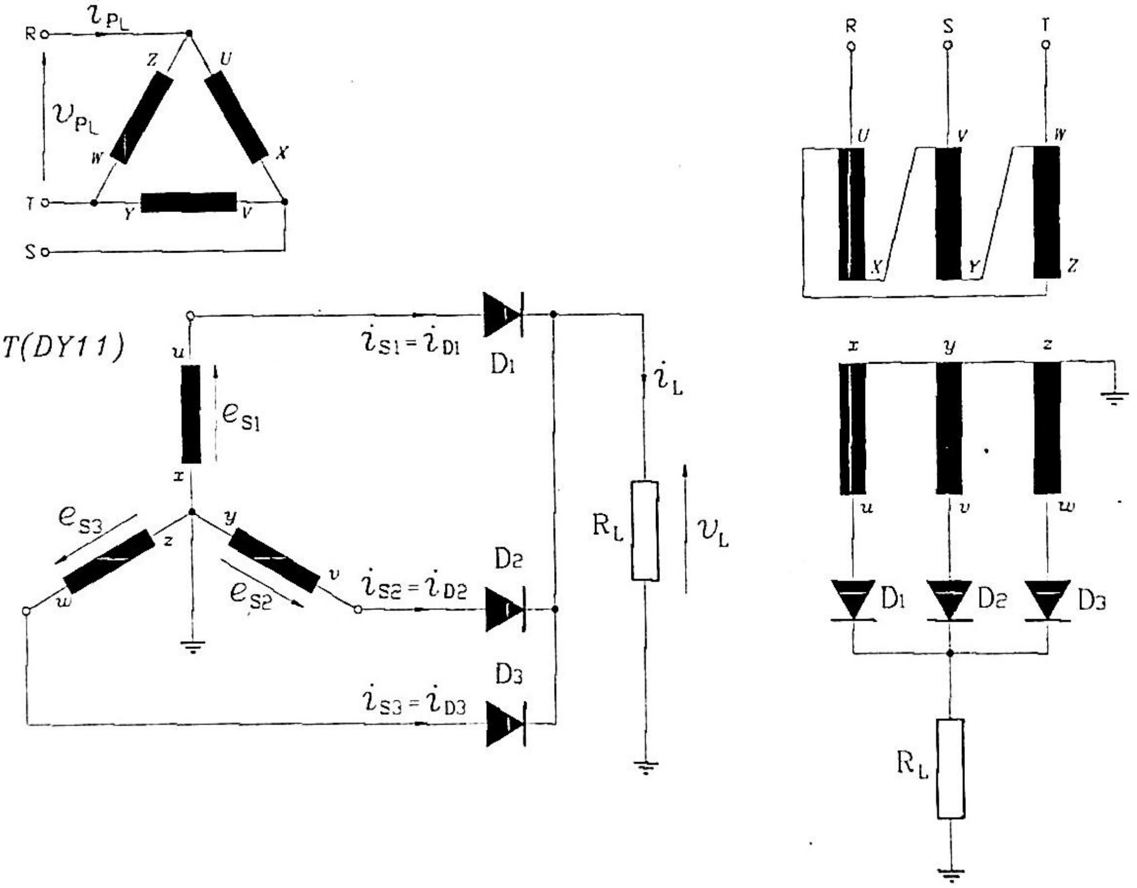
Determinación de los parámetros eléctricos para la selección del diodo

$\hat{I}_D$ ó $I_{FRM} = \hat{I}_S = 1,57\,\overline{I}_L$ # $\overline{I}_D$ ó $I_{FAV} = 0,5\,\overline{I}_L$ # I_D ó
$I_{F_{RMS}} = I_{D13} = I_{D24} = \hat{I}_S/2 = 0,785\,\overline{I}_L$
V_{PI} ó $V_{RWM} = \hat{E}_S = (\pi/2).\overline{V}_L$

RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE 1/2 ONDA (EN ESTRELLA SIMPLE)

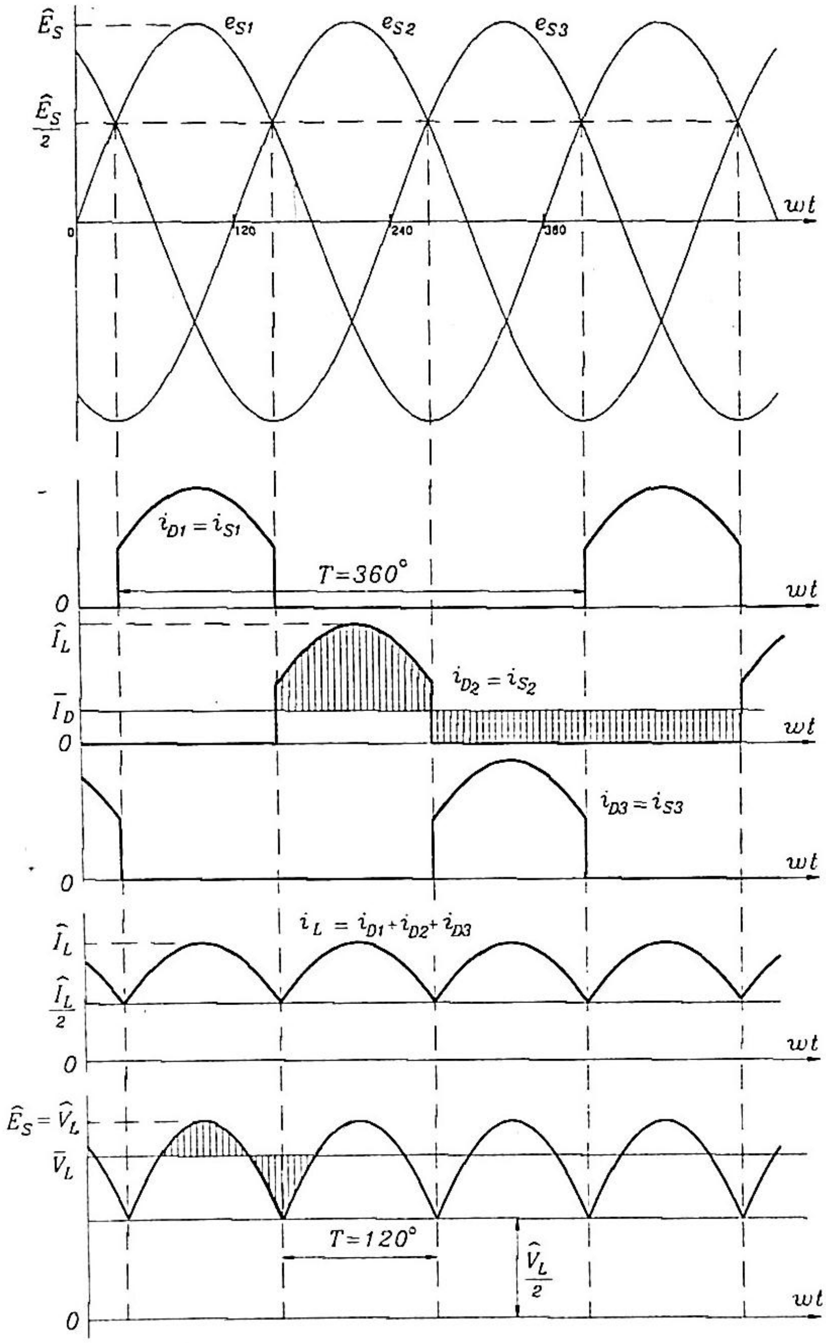
En este rectificador el devanado primario se conecta generalmente en " Triángulo " y el devanado secundario en " Estrella " , a cada fase del devanado secundario se le conecta el ánodo de un diodo en serie y los cátodos de los tres diodos se conectan a la carga la cual cierra el circuito con el centro de estrella del devanado secundario, terminal este que se toma como potencial de referencia o sea de tierra. Cada uno de estos diodos cumplirá la función como ya vimos de recortar el semiciclo negativo de su fase correspondiente.

Pero en este caso el período o ángulo de conducción disminuye respecto de los rectificadores monofásicos de 180° a 120° aproximadamente. Este ángulo de conducción estará limitado por los puntos de intersección de las 3 funciones senoidales desfasadas que representan a la tensión o la corriente y por lo tanto estará reducido a 120° porque si consideramos el instante de tiempo (t_1), en el diodo D1 se encuentra polarizado directamente y por lo tanto en estado de conducción, en ese mismo instante el diodo D3 también se encuentra polarizado directamente pero con un potencial (+) inferior al que polariza a D1 por lo tanto D3 estará bloqueado hasta que lleguemos al instante (t_2), a partir del cual comienza su estado de conducción. Este punto de intersección se produce a la mitad del valor de pico (Ês ó Îs).



A partir de un sistema de tensiones trifásicas, o seadefasadas 120° entre si tenemos :

$$e_{S1} = \hat{E}s.Sen(\omega t)$$
$$e_{S2} = \hat{E}s.Sen(\omega t - 120^\circ)$$
$$e_{S3} = \hat{E}s.Sen(\omega t - 240^\circ)$$



$$v_l = \hat{E}s.Cos(\omega t) \;\wedge\; -\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq +\frac{\pi}{3}$$ y luego este ciclo se repite con período $T = 2\,\dfrac{\pi}{3}$

Cálculo de la Tensión Media sobre la carga : En estos casos para simplificar el cálculo integral, adelantaremos el eje de absisas 90° y reemplazaremos la función seno por una coseno.

$$\overline{V}_L = \frac{1}{(2/3)\pi}\int_{-(\pi/3)}^{(\pi/3)} \hat{E}_S.Cos(\omega t).d(\omega t)$$

$$= \frac{\hat{E}_S}{(2/3)\pi}\left[Sen(\omega t)\right]_{-\pi/3}^{+\pi/3} = \frac{\hat{E}_S}{(2/3)\pi}\left[Sen(\pi/3) - Sen(-\pi/3)\right] =$$

$$= \frac{\hat{E}_S}{(2/3)\pi}\left[\frac{\sqrt{3}}{2} - \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right] = \frac{\hat{E}_S}{(2/3)\pi}\left[\sqrt{3}\right] \Rightarrow \quad \boxed{\overline{V}_L = \frac{3\sqrt{3}}{2}\frac{\hat{E}s}{\pi} = 0{,}827\,\hat{E}_S}$$

Cálculo de la Corriente Media sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión media, porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{\overline{I}_L = 0{,}827\,\hat{I}_S}$$

Cálculo de la Tensión Eficaz sobre la Carga :

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{(2/3)\pi}\int_{-\pi/3}^{+\pi/3}\hat{E}s^2.Cos^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{(2/3)\pi}\int_{-\pi/3}^{+\pi/3}Cos^2(\omega t)d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{(2/3)\pi}\frac{1}{2}\left[\omega t + Sen(\omega t).Cos(\omega t)\right]_{-\pi/3}^{+\pi/3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{(2/3)\pi}\frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{3} + Sen\left(\frac{\pi}{3}\right).Cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \left(-\frac{\pi}{3}\right) - Sen\left(-\frac{\pi}{3}\right).Cos\left(-\frac{\pi}{3}\right)\right]} = \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{(2/3)\pi}\frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{1}{2} - \left(-\frac{\pi}{3}\right) - \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\cdot\frac{1}{2}\right]} =$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{E}s^2}{(2/3)\pi}\frac{1}{2}\left[\frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right]} \Rightarrow \qquad \boxed{V_L = \hat{E}s\sqrt{\left[\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}\right]} = 0,841\hat{E}s}$$

Cálculo de la Corriente Eficaz sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión eficaz porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{I_L = 0,841\hat{I}_S}$$

Factor de forma

$$F_F = \frac{V_L}{\overline{V}_L} = \frac{0,841\hat{E}_S}{0,827\hat{E}_S} \Rightarrow F_F = 1,017$$

Factor de ripple ó rizado

$$\gamma = \sqrt{F_F^{\,2} - 1} = \sqrt{1,017^2 - 1} \Rightarrow \gamma = 0,183$$

Esto está indicando que existe un 18,3 % de componente de alterna respecto de la de continua en la tensión de salida del rectificador.

Factor de utilización

Previamente deberemos calcular , por lo menos la corriente eficaz por cada devanado de fase del transformador.
Cálculo de la corriente media y eficaz por cada diodo y fase del transformador :

$$\overline{I}_D = \overline{I}_S = \frac{1}{2\pi}\int_{-(\pi/3)}^{(\pi/3)}\hat{I}_S.Cos(\omega t).d(\omega t) = \frac{\hat{I}_S}{2\pi}\int_{-(\pi/3)}^{(\pi/3)}Cos(\omega t).d(\omega t) = \frac{\hat{I}_S}{2\pi}\cdot\sqrt{3} \Rightarrow \overline{I}_D = \overline{I}_S = 0,276\hat{I}$$

$$I_D = I_S = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{-(\pi/3)}^{(\pi/3)}\hat{I}_S^{\,2}.Cos^2(\omega t).d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\hat{I}_S^{\,2}}{2\pi}\int_{-(\pi/3)}^{(\pi/3)}Cos^2(\omega t).d(\omega t)} =$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{I}_S^{\,2}}{2\pi}\frac{1}{2}\left[\omega t + Sen(\omega t).Cos(\omega t)\right]_{-\pi/3}^{+\pi/3}} = \hat{I}_S\sqrt{\left[\frac{1}{6} + \left(\frac{\sqrt{3}}{8\pi}\right)\right]} \Rightarrow \qquad \boxed{I_D = I_S = 0,485\hat{I}_S}$$

En este caso para el cálculo de la potencia aparente del transformador, por ser este trifásico debemos multiplicar la potencia de fase por 3.

$$F_U = \frac{\overline{P}_L}{S_S} = \frac{\overline{V}_L.\overline{I}_L}{3.E_S.I_S} = \frac{0,827\hat{E}_S.0,827\hat{I}_S}{3.0,707\hat{E}_S.0,485\hat{I}_S} = 0,665$$

$\Rightarrow F_U = 0,665$ o lo que es lo mismo $S_S = 1,5\overline{P}_L$

Esto quiere decir que si el rectificador debe alimentar una carga de 100[W] en continua, el transformador deberá ser de 150 [VA] en total o 50 [VA] por fase.
Como se observa el Fu es bajo ya que por el secundario del transformador circula corriente durante medio ciclo solamente.

Como se observa el Fu es bajo ya que por el secundario del transformador circula corriente durante medio ciclo solamente.

Rendimiento de la conversión

$$\eta_c = \frac{1}{F_F^{\,2}} = \frac{1}{1{,}017^2} = 0{,}967$$

Esto indica que el 96,7 % de la energía alterna de entrada al rectificador se transforma en energía de continua a la salida del mismo.

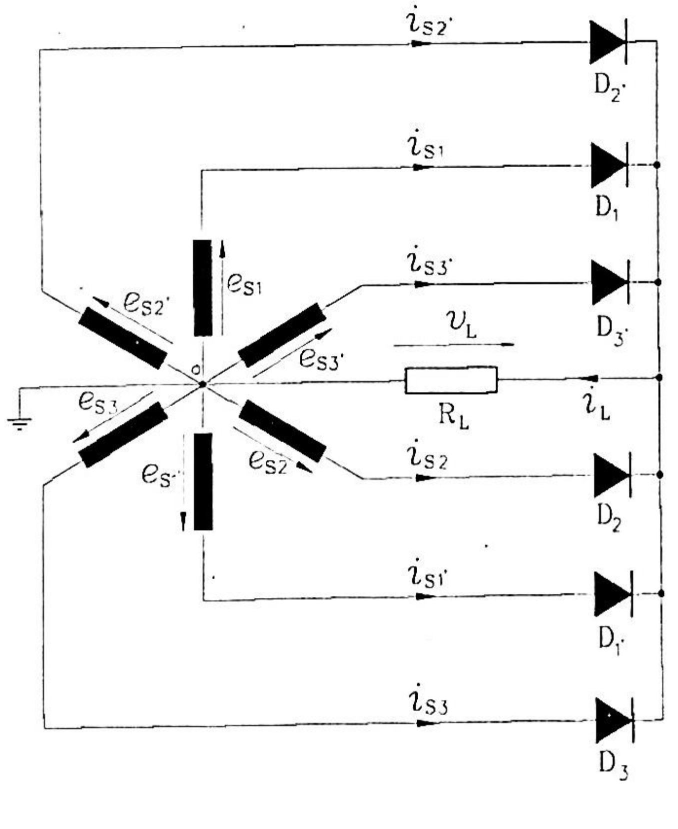
Determinación de los parámetros eléctricos para la selección del diodo

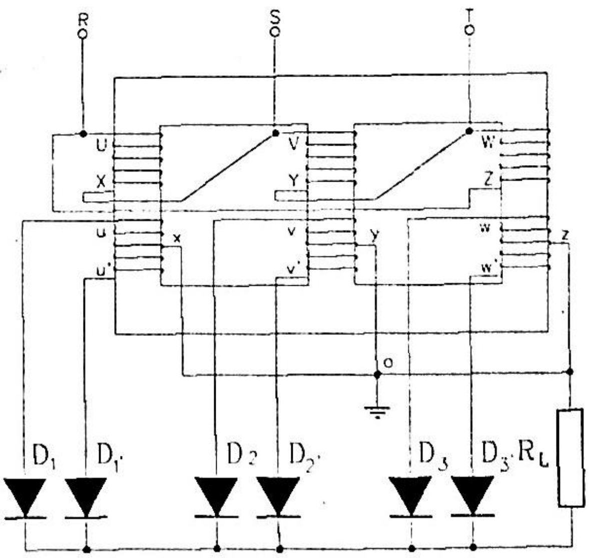
$\hat{I}_D$ ó $I_{FRM} = \hat{I}_S = (2\pi/\sqrt{3}).\bar{I}_L = 1{,}21\bar{I}_L$ # $\bar{I}_D$ ó $I_{So} = \bar{I}_L/3$

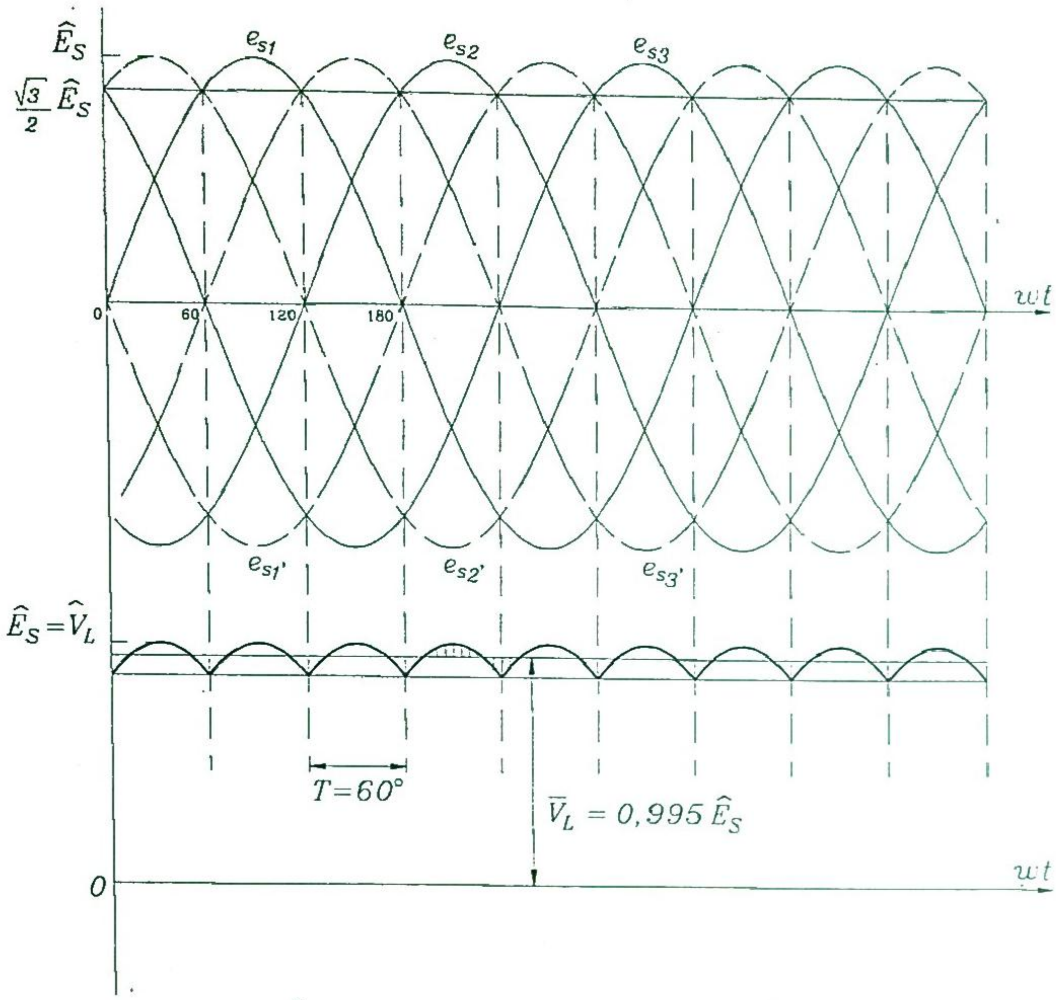
I_D ó $I_{F_{RMS}} = I_S = \bar{I}_L/\sqrt{3} = 0{,}577\bar{I}_L$ # V_{PI} ó $V_{RWM} = \sqrt{3}\hat{E}_S = 2{,}1.\bar{V}_L$

RECTIFICADOR HEXAFÁSICO DE 1/2 ONDA EN ESTRELLA SIMPLE

Esto se puede lograr con un transformador trifásico cuyo secundario posee punto medio de tal manera que las tensiones en cada 1/2 arrollamiento se encuentran en contrafase respecto de dicho punto, en el que por supuesto se formara el centro de la estrella hexafásica. Por lo demás su funcionamiento es similar al rectificador anterior, con la diferencia que se duplica el N° de pulsaciones, ya que tendremos un rectificador de 1/2 onda por cada una de las 6 fases. En este caso el ángulo de conducción de los diodos pasa a ser de 60°.







$e_{S1} = \hat{E}s.Sen(\omega t)$ $\quad e_{S2} = \hat{E}s.Sen(\omega t - 120°)$ $\quad e_{S3} = \hat{E}s.Sen(\omega t - 240°)$

$e_{S1}' = -\hat{E}_S.Sen(\omega t)$ $\quad e_{S2}' = -\hat{E}_S.Sen(\omega t - 120°)$ $\quad e_{S3}' = -\hat{E}_S.Sen(\omega t - 240°)$

$v_L = \hat{E}_S.Cos(\omega t) \wedge -\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq +\frac{\pi}{6}$ y luego este ciclo se repite con período $T = \frac{\pi}{3}$

Cálculo de la Tensión Media sobre la carga : En estos casos para simplificar el cálculo integral, adelantaremos el eje de absisas 90° y reemplazaremos la función seno por una Coseno.

$$\overline{V}_L = \frac{1}{\pi/3}\int_{-(\pi/6)}^{(\pi/6)} \hat{E}_S.Cos(\omega t).d(\omega t)$$

$$\overline{V}_L = \frac{\hat{E}_S}{\pi/3}[Sen(\omega t)]_{-\pi/6}^{+\pi/6} = \frac{\hat{E}_S}{\pi/3}[Sen(\pi/6) - Sen(-\pi/6)] = \frac{\hat{E}_S}{\pi/3}\left[\frac{1}{2} - \left(-\frac{1}{2}\right)\right] = \frac{\hat{E}_S}{\pi/3}[1] \Rightarrow$$

$$\boxed{\overline{V}_L = \frac{3\hat{E}_S}{\pi} = 0,955\hat{E}_S}$$

Cálculo de la Corriente Media sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión media, porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{\overline{I}_L = 0,955\hat{I}_S}$$

Cálculo de la Tensión Eficaz sobre la Carga :

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{\pi/3}\int_{-\pi/6}^{+\pi/6}\hat{E}_S^{\,2}.Cos^2(\omega t).d(\omega t)} = \hat{E}_S\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} \Rightarrow \quad \boxed{V_L = 0,9558\hat{E}_S}$$

Cálculo de la Corriente Eficaz sobre la Carga : Es similar al cálculo de la tensión eficaz, porque las formas de onda son iguales.

$$\boxed{I_L = 0,9558\hat{I}_S}$$

Factor de forma

$$F_F = \frac{V_L}{\overline{V}_L} = \frac{0,9558\hat{E}_S}{0,9549\hat{E}_S} \Rightarrow F_F = 1,0009$$

Factor de ripple ó rizado

$$\gamma = \sqrt{F_F{}^2 - 1} = \sqrt{1,0009^2 - 1} \Rightarrow \gamma = 0,042$$

Esto está indicando que existe un 4,2 % de componente de alterna respecto de la de continua en la tensión de salida del rectificador.

Factor de utilización

Previamente deberemos calcular , por lo menos la corriente eficaz por cada 1/2 devanado de fase del transformador.

Cálculo de la corriente media y eficaz por cada diodo y fase del transformador :

$$\overline{I}_D = \overline{I}_S = \frac{1}{2\pi}\int_{-(\pi/6)}^{(\pi/6)} \hat{I}_S.Cos(\omega t).d(\omega t) \Rightarrow \overline{I}_D = \overline{I}_S = \frac{\hat{I}_S}{2\pi} = 0,16\hat{I}_S$$

$$I_D = I_S = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{-(\pi/6)}^{(\pi/6)} \hat{I}_S{}^2.Cos^2(\omega t).d(\omega t)} \Rightarrow I_D = I_S = \hat{I}_S\sqrt{\frac{1}{12} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi}} = 0,39\hat{I}_S$$

En este caso para el cálculo de la potencia aparente del transformador, por ser este trifásico debemos multiplicar la potencia de fase por 3.

$$F_U = \frac{\overline{P}_L}{S_S} = \frac{\overline{V}_L.\overline{I}_L}{6.E_S.I_S} = \frac{0,955\hat{E}_S.0,955\hat{I}_S}{6.0,707\hat{E}_S.0,39\hat{I}_S} = 0,55$$

$\Rightarrow F_U = 0,551$ o lo que es lo mismo $S_S = 1,814\overline{P}_L$

Esto quiere decir que si el rectificador debe alimentar una carga de 100[W] en continua, el transformador deberá ser de 181,4 [VA] en total o 30,2 [VA] por fase.
Como se observa el Fu es bajo ya que por el secundario del transformador circula corriente durante medio ciclo solamente.

Rendimiento de la conversión

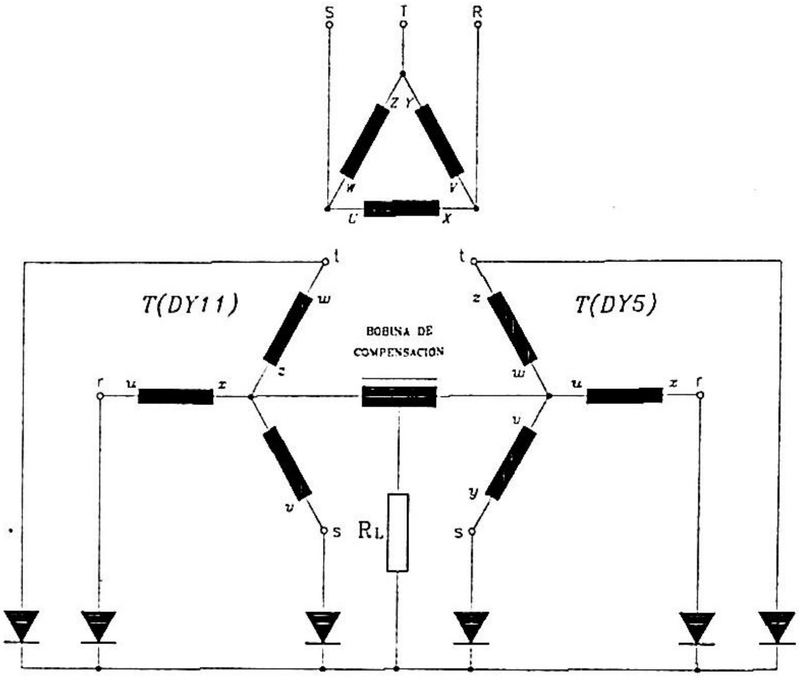
$$\eta_c = \frac{1}{F_F{}^2} = \frac{1}{1,0009^2} = 0,998$$

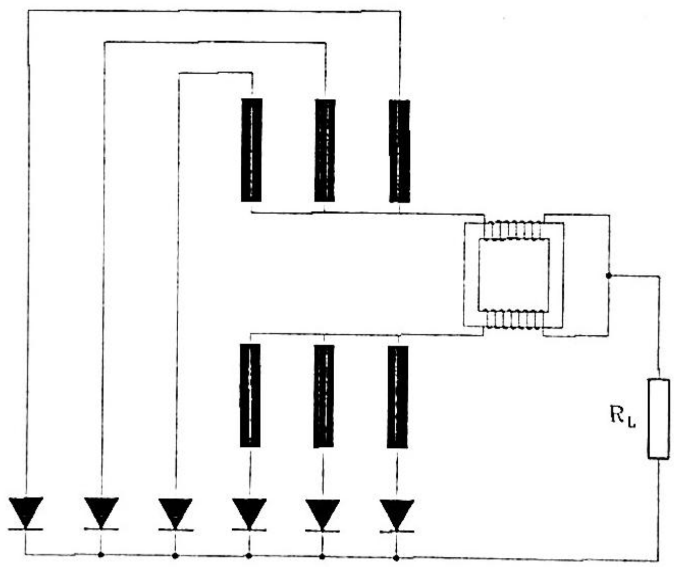
Esto indica que el 99,8 % de la energía alterna de entrada al rectificador se transforma en energía de continua a la salida del mismo.

Determinación de los parámetros eléctricos para la selección del diodo

$\hat{I}_D$ ó $I_{FRM} = \hat{I}_S = (\pi/3).\overline{I}_L = 1,047\overline{I}_L$ # $\overline{I}_D$ ó $I_{So} = \overline{I}_L/6$ # I_D ó $I_{F_{RMS}} = I_S = \overline{I}_L/\sqrt{6} = 0,408\overline{I}_L$
V_{PI} ó $V_{RWM} = 2\hat{E}_S = 2,09.\overline{V}_L$

RECTIFICADOR HEXAFÁSICO DE 1/2 ONDA CON DOBLE ESTRELLA TRIFÁSICA Y BOBINA DE COMPENSACIÓN

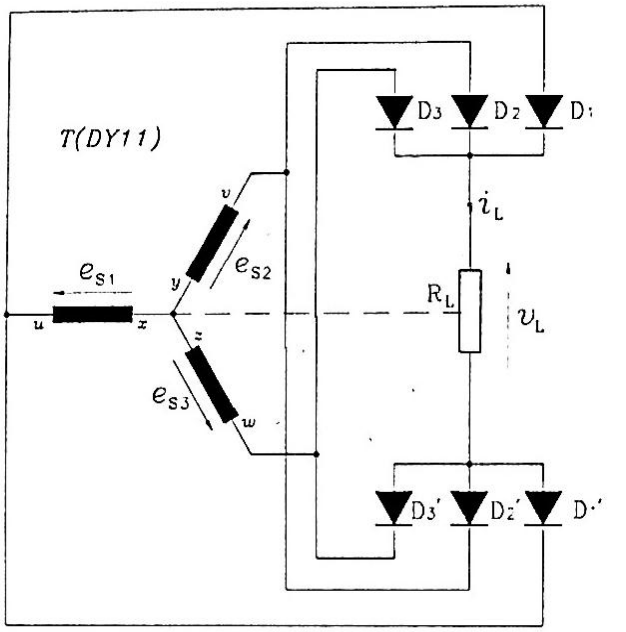


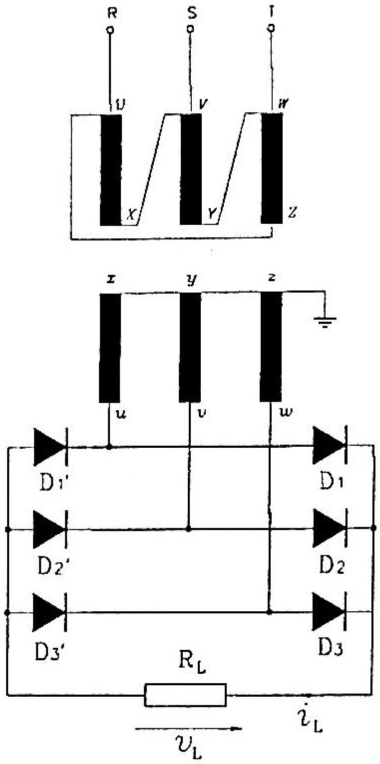


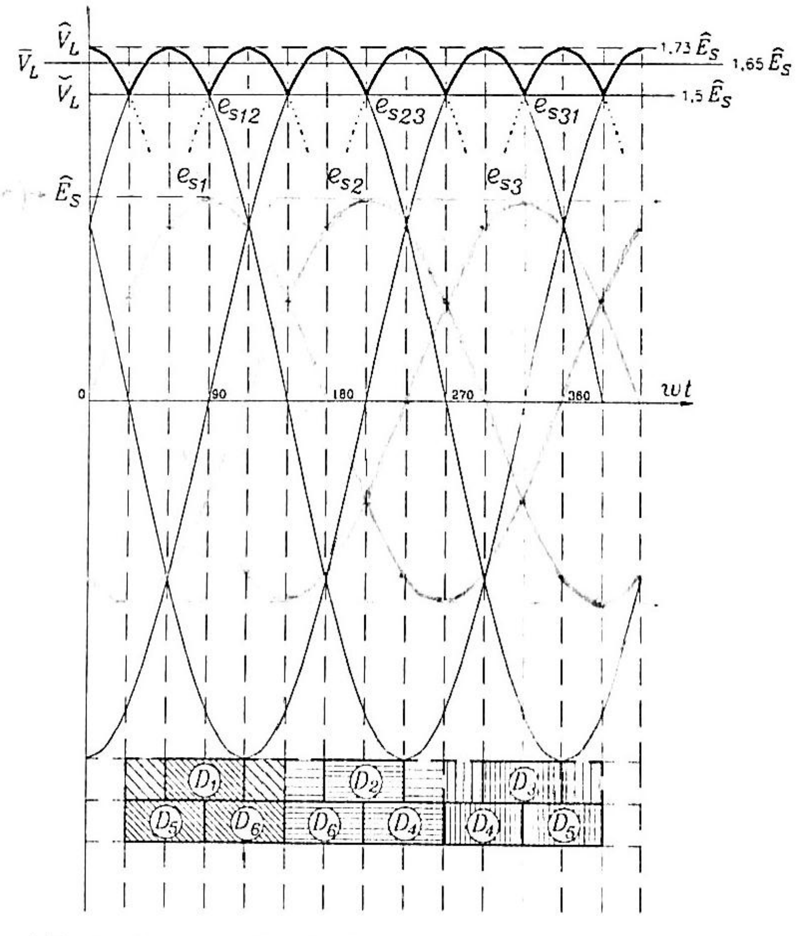
RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA EN PUENTE

En este rectificador el devanado primario se conecta generalmente en "Triángulo" y el devanado secundario en "Estrella", al que se conecta además un puente rectificador trifásico, en el que cada dos diodos del mismo van conectados entre fase y fase. O sea que este rectificador trabaja con tensión compuesta de línea y no con tensión simple de fase, ya que no utiliza el centro de estrella del transformador como punto de referencia de tensión.

En este caso por tratarse de un puente de diodos el semiciclo negativo se invierte sobre la carga y queda como semiciclo (+), por lo que la pulsación de la onda rectificada tendrá un período de 60° ó $\pi / 3[rad]$.







$$e_{S1} = \hat{E}s.Sen(\omega t)$$
$$e_{S2} = \hat{E}s.Sen(\omega t - 120°)$$
$$e_{S3} = \hat{E}s.Sen(\omega t - 240°)$$

$$v_l = \hat{E}s.Cos(\omega t) \quad \wedge \quad -\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq +\frac{\pi}{6}$$

y luego este ciclo se repite con período

$$T = \frac{\pi}{3}$$

Cálculo de la Tensión Media sobre la carga : En este caso, para simplificar se calcula el valor medio de 1/2 onda rectificada y se lo multiplica por 2. Esto es aceptable si consideramos la posición simétrica de la carga respecto del centro de estrella.

$$\overline{V_L} = 2\cdot\frac{1}{(2/3)\pi}\int_{-(\pi/3)}^{(\pi/3)}\hat{E}_S.Cos(\omega t).d(\omega t) = \frac{3}{\pi}\hat{E}_S\left[Sen(\omega t)\right]_{-(\pi/3)}^{+(\pi/3)} = \frac{3}{\pi}\hat{E}_S\left[\sqrt{3}\right]$$

$$\boxed{\overline{V_L} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}\hat{E}_S = 1,654\,\hat{E}_S}$$

Como $\sqrt{3}.\hat{E}_S = \hat{V}_L \Rightarrow \overline{V}_L = \frac{3}{\pi}\hat{V}_L = 0,955.\hat{V}_L$

$0,955.\sqrt{3} = 1,654$

Como podemos observar el valor medio es mayor que el máximo, pero de la tensión de fase, ya que recordemos esta es $\sqrt{3}$ veces menor que la tensión compuesta.

Cálculo de la Corriente Media sobre la Carga : Es similar al cálculo de la corriente media, del rectificador hexafásico de 1/2 onda. Porque las formas de onda son iguales, y la $I_F = I_L$ en una estrella..

$$\bar{I}_L = \frac{1}{2\pi}\int_{-(\pi/6)}^{(\pi/6)}\hat{I}_S.Cos(\omega t).d(\omega t) \Rightarrow \bar{I}_L = \frac{3}{\pi}\hat{I}_S = 0,955\hat{I}_S$$

Cálculo de la Tensión Eficaz sobre la Carga :

$$V_L = \sqrt{\frac{1}{\pi/3}\int_{-\pi/6}^{\pi/6}\left(\sqrt{3}\hat{E}s\right)^2 Cos^2(\omega t)} = \sqrt{\frac{3\hat{E}s^2}{\pi/3}\frac{1}{2}\left[(\omega t)+Sen(\omega t).Cos(\omega t)\right]_{-\pi/6}^{+\pi/6}} = \sqrt{\frac{3\hat{E}s^2}{\pi/3}\frac{1}{2}\left[\frac{\pi}{3}+\frac{\sqrt{3}}{2}\right]} =$$

$$\boxed{V_L = 1,6554\,\hat{E}s}$$

$V_L = 0,956.\hat{V}_L$

Cálculo de la Corriente Eficaz sobre la Carga : Posee el mismo valor que la corriente eficaz del rectificador hexafásico de 1/2 onda. Ya que la corriente de línea es igual a corriente de fase en una conexión estrella.

$$\boxed{I_L = 0,956\hat{I}_S}$$

Factor de forma

$$F_F = \frac{V_L}{\overline{V_L}} = \frac{1,6554\hat{E}_S}{1,654\hat{E}_S} \Rightarrow F_F = 1,0009$$

Factor de ripple ó rizado

$$\gamma = \sqrt{F_F^{\,2} - 1} = \sqrt{1,0009^2 - 1} \Rightarrow \gamma = 0,042$$

Factor de utilización

Previamente deberemos calcular , por lo menos la corriente eficaz por cada devanado de fase del transformador.

Cálculo de la corriente eficaz por cada fase del transformador : El cálculo se simplifica considerando una onda rectangular con amplitud igual al valor medio y con ángulos de conducción para cada semiciclo iguales a $(2/3)\pi[rad] = 120°$

$$I_S = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^2 i_L^{\,2}(\omega t).d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\cdot 2\cdot\frac{2}{3}\cdot\pi\cdot\bar{I}_L^{\,2}} \Rightarrow I_s = \bar{I}_L\sqrt{\frac{2}{3}} = 0,816\bar{I}_L \quad \text{y} \quad Is = 0,78\hat{I}_S$$

En este caso para el cálculo de la potencia aparente del transformador, por ser este trifásico debemos multiplicar la potencia de fase por 3.

$$F_U = \frac{\overline{P_L}}{S_S} = \frac{\overline{V_L}.\bar{I}_L}{3.E_S.I_S} = \frac{1,654\hat{E}_S.0,955\hat{I}_S}{3.0,707\hat{E}_S.0,78\hat{I}_S} = \frac{3}{\pi} = 0,955$$

$\Rightarrow F_U = 0,955$ o lo que es lo mismo $S_S = 1,047\overline{P_L}$

Esto quiere decir que si el rectificador debe alimentar una carga de 100[W] en continua, el transformador deberá ser de 104,7 [VA] en total o 34,9 [VA] por fase.
Como se observa el Fu es elevado ya que por el secundario del transformador circula corriente durante mas de medio ciclo.

Rendimiento de la conversión

$$\eta_c = \frac{1}{F_F^{\,2}} = \frac{1}{1{,}017^2} = 0{,}967$$

Esto indica que el 96,7 % de la energía alterna de entrada al rectificador se transforma en energía de continua a la salida del mismo.

Cálculo de la corriente media que circula por cada diodo :

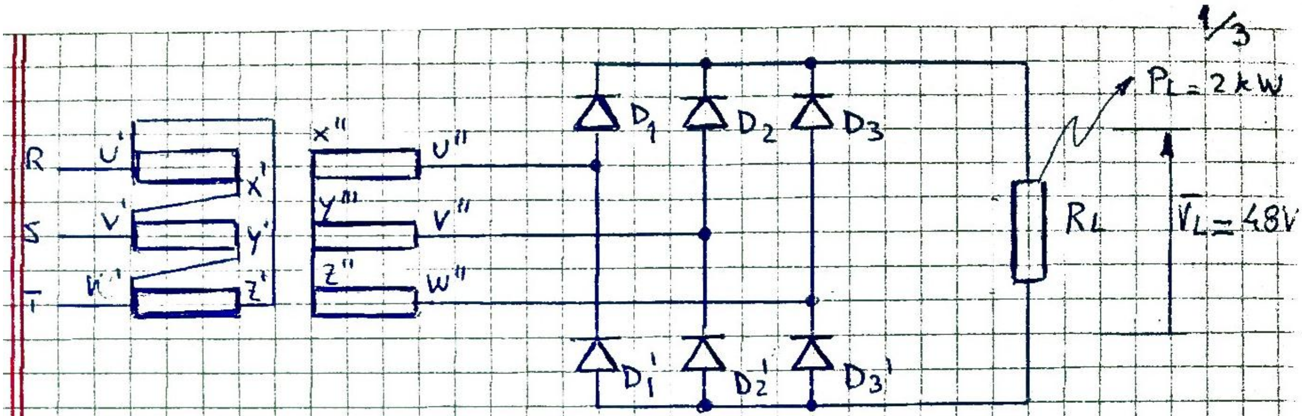
Determinación de los parámetros eléctricos para la selección del diodo

$\hat{I}_D$ ó $I_{FRM} = \hat{I}_S = \bar{I}_L$ # $\bar{I}_D$ ó $I_{So} = \bar{I}_L / 3$ # I_D ó $I_{F_{RMS}} = I_S = \bar{I}_L / \sqrt{3} = 0{,}577\bar{I}_L$

V_{PI} ó $V_{RWM} = \sqrt{3}\hat{E}_S = (\pi / 3)\overline{V_L} = 1{,}047\overline{V_L}$

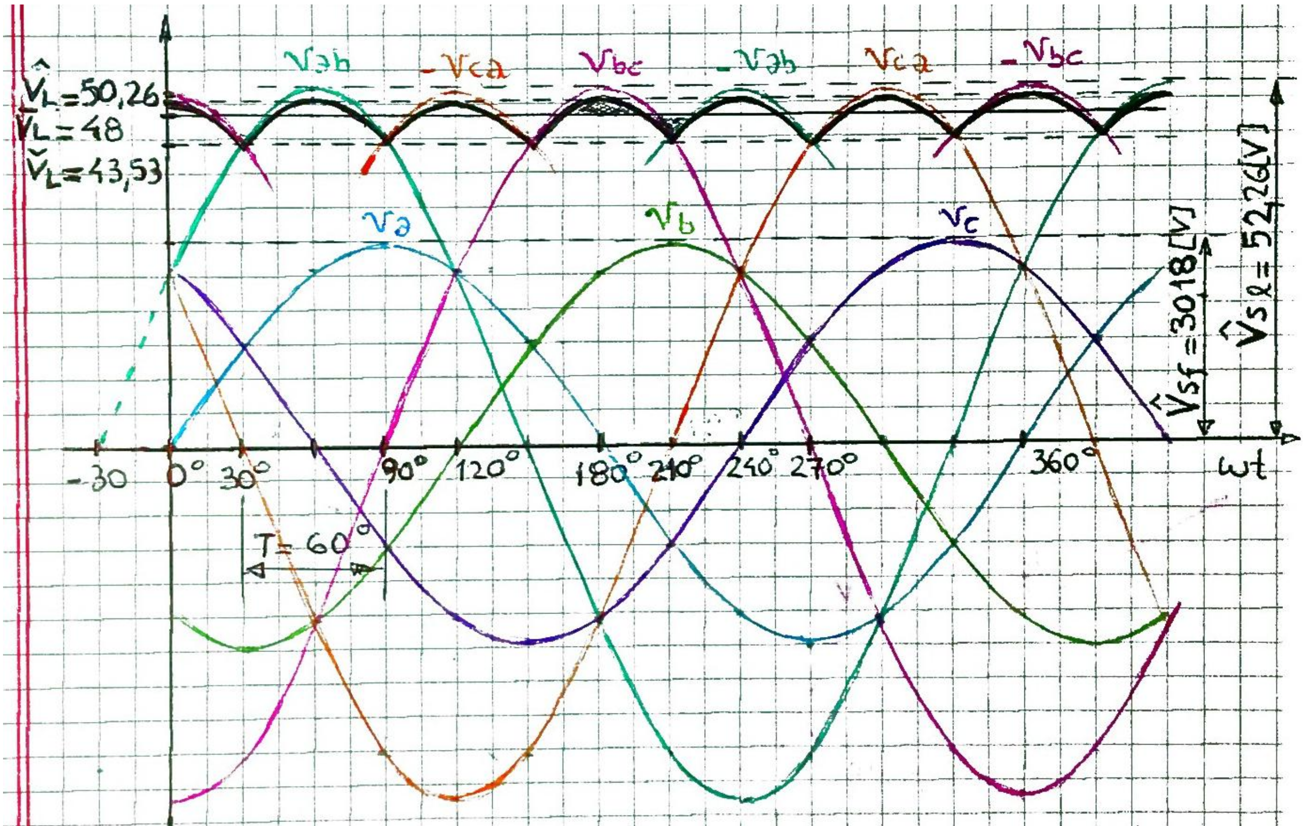
Cálculo de un rectificador trifásico en puente

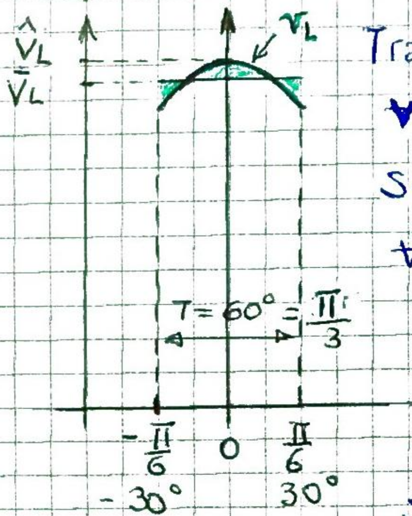
Determinar que diodos y transformador deben utilizarse para alimentar con un rectificador trifásico en puente una carga de 2 KW de continua (Potencia media) con una tensión de 48 V también de continua (Tensión media).



$\bar{I}_L = P_L / \bar{V}_L = 2000W / 48V \Rightarrow \bar{I}_L = 41{,}\widehat{6}[A]$

$R_L = \bar{V}_L / \bar{I}_L = \frac{\bar{V}_L^{\,2}}{P} = \frac{48V}{41{,}6A} \Rightarrow R_L = 1{,}152[\Omega]$





Trasladamos el eje 60° y $V_L = \hat{V}_L \, Sen(\omega t + 30°)$

$\forall \; \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}$

Se transforma en $V_L = \hat{V}_L . Cos\, \omega t$

$\forall \; -\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6}$

$$\bar{V}_L = \frac{1}{T}\int_{\theta_2}^{\theta_1} V_L(\omega t) . d(\omega t) = \frac{1}{\pi/3}\int_{-\pi/6}^{\pi/6} \hat{V}_L . Cos\,\omega t . d\omega t$$

$$\bar{V}_L = \frac{3}{\pi}\hat{V}_L \left| Sen\,\omega t \right|_{-\pi/6}^{\pi/6} = \frac{3}{\pi}\hat{V}_L \left[Sen\frac{\pi}{6} - Sen\left(-\frac{\pi}{6}\right) \right]$$

$$\bar{V}_L = \frac{3}{\pi}\hat{V}_L . \Big(\underbrace{Sen\frac{\pi}{6} + Sen\frac{\pi}{6}}_{1}\Big) \Rightarrow \bar{V}_L = \frac{3}{\pi}\hat{V}_L = 0{,}955\,\hat{V}_L$$

$$\hat{V}_L = \frac{\pi}{3}\bar{V}_L = \frac{\pi}{3}\, 48[V] \Rightarrow \hat{V}_L = 50{,}26[V]$$

$$\check{V}_L = \hat{V}_L . Cos\,30° = 50{,}26 . \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \check{V}_L = 43{,}53[V]$$

La tensión Secundaria del transformador debe considerar la caida de tensión en los diodos (2 Diodos en serie por rama). Suponiendo $\hat{V}_D = 1[V] \Rightarrow$

$$\hat{V}_{S\ell} = \hat{V}_L + 2 . \hat{V}_D = 50{,}26 + 2 . 1 \Rightarrow \hat{V}_{S\ell} = 52{,}26[V]$$

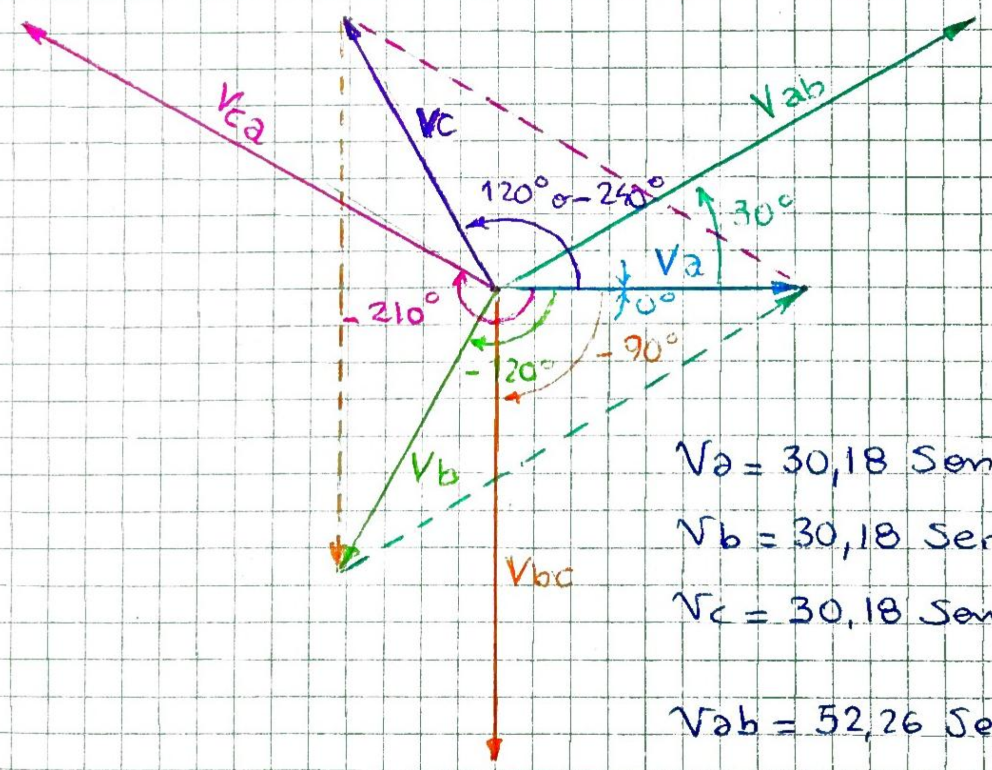
$$\hat{V}_{Sf} = \hat{V}_{S\ell}/\sqrt{3} = 52,26/\sqrt{3} \Rightarrow \hat{V}_{Sf} = 30,18\ [V]$$

Sus valores eficaces son:

$$V_{S\ell} = \hat{V}_{S\ell}/\sqrt{2} = 52,26/\sqrt{2} \Rightarrow V_{S\ell} = 36,96\ [V]$$

$$V_{Sf} = \hat{V}_{Sf}/\sqrt{2} = 30,18/\sqrt{2} \Rightarrow V_{Sf} = 21,34\ [V]$$

El sistema de tensiones trifásicas es:



$$V_a = 30,18\ \text{Sen}\ \omega t$$

$$V_b = 30,18\ \text{Sen}(\omega t - 120°)$$

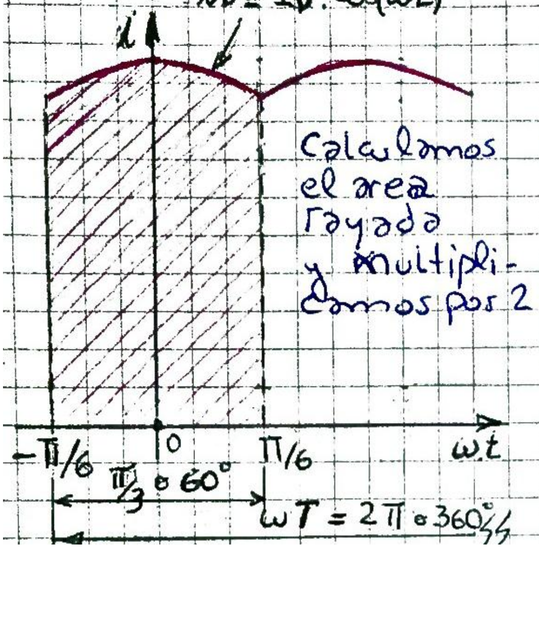
$$V_c = 30,18\ \text{Sen}(\omega t - 240°)$$

$$V_{ab} = 52,26\ \text{Sen}(\omega t + 30°)$$

$$V_{bc} = 52,26\ \text{Sen}(\omega t - 90°)$$

$$V_{ca} = 52,26\ \text{Sen}(\omega t - 210°)$$

Cálculo de la Corriente Media en los diodos.



$$\overline{I_D} = \left\{ \frac{1}{T} \int_{\theta_2}^{\theta_1} i_D(\omega t)\, d(\omega t) \right\} . 2$$

$$\overline{I_D} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \hat{I}_D . \text{Cos}(\omega t)\, d(\omega t) \right\} . 2$$

$$\overline{I_D} = \left\{ \frac{\hat{I}_D}{2\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \text{Cos}(\omega t)\, d(\omega t) \right\} 2$$

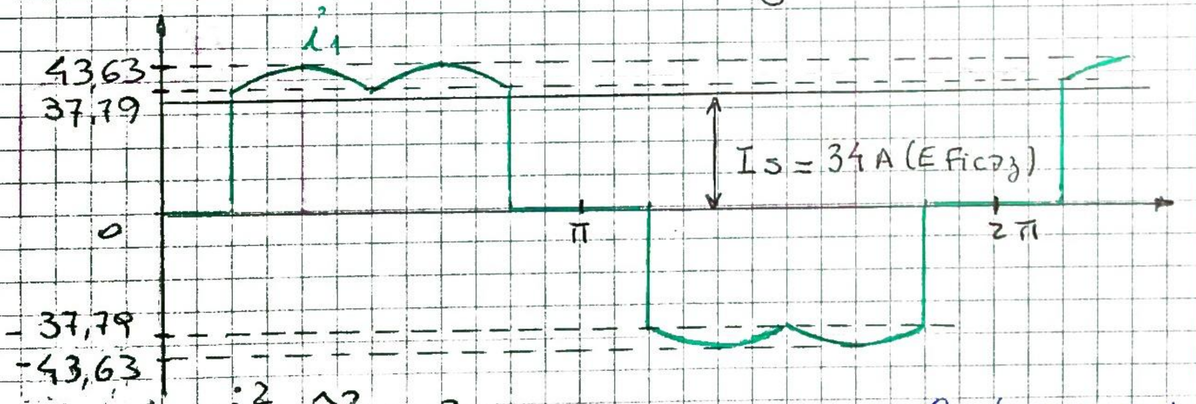
$$\overline{I_D} = \frac{\hat{I}_D}{\cancel{2}\pi} \left| \text{Sen}(\omega t) \right|_{-\pi/6}^{\pi/6} . \cancel{2}$$

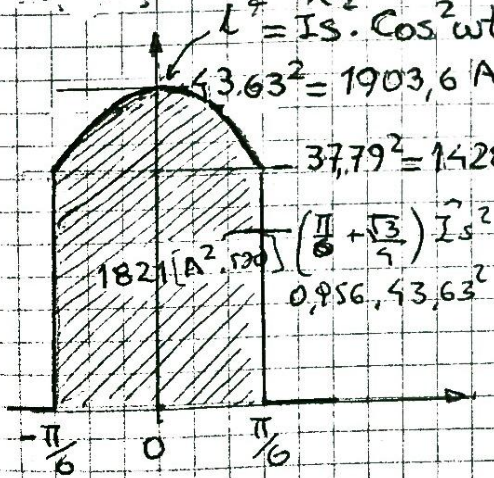
$$\overline{I_D} = \frac{\hat{I}_D}{\pi}\Big[\underbrace{\operatorname{Sen}\frac{\pi}{6} - \operatorname{Sen}(-\pi/6)}_{1}\Big] \Rightarrow \overline{I_D} = \hat{I}_D/\pi = \hat{I}_L/\pi$$

$$\overline{I_D} = 43{,}63\,A/\pi \Rightarrow \boxed{\overline{I_D} = 13{,}89\,A}$$

$$\overline{I_D} = \overline{I_L}/3 = 41{,}\hat{6}\,A/3 = 13{,}89\,A$$

Cálculo de la Corriente eficaz en el 2° del Transf.





Calculamos el área rayada y mutiplicamos por 4.

$$\Big[\int_{-\pi/6}^{\pi/6} \hat{I}_S^2 \cdot \operatorname{Cos}^2\omega t\, d\omega t\Big] \times \frac{\cancel{4}}{2} = I_S^2 \cdot 2\pi$$

$$\left(\frac{\pi}{6}+\frac{\sqrt{3}}{4}\right)$$

$$I_S^2 = \frac{2}{\pi}\,\hat{I}_S^2 \cdot \frac{1}{2}\Big|\omega t + \operatorname{Sen}\omega t \cdot \operatorname{Cos}\omega t\Big|_{-\pi/6}^{\pi/6}$$

$$I_S^2 = \frac{\hat{I}_S^2}{\pi}\Big[\frac{\pi}{6} - \left(-\frac{\pi}{6}\right) + \operatorname{Sen}\frac{\pi}{6} \cdot \operatorname{Cos}\frac{\pi}{6} - \operatorname{Sen}\left(-\frac{\pi}{6}\right) \cdot \operatorname{Cos}\left(-\frac{\pi}{6}\right)\Big]$$

$$I_S^2 = \frac{\hat{I}_S^2}{\pi}\Big[\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6} + \operatorname{Sen}\frac{\pi}{6} \cdot \operatorname{Cos}\frac{\pi}{6} + \operatorname{Sen}\frac{\pi}{6} \cdot \operatorname{Cos}\frac{\pi}{6}\Big]$$

$$I_S^2 = \frac{\hat{I}_S^2}{\pi}\left(\frac{\pi}{3} + 2\operatorname{Sen}\frac{\pi}{6} \cdot \operatorname{Cos}\frac{\pi}{6}\right) = \frac{\hat{I}_S^2}{\pi}\left(\frac{\pi}{3} + \cancel{2} \cdot \frac{1}{\cancel{2}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$I_S^2 = \frac{\hat{I}_S^2}{\pi}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2\pi}\right)\hat{I}_S^2$$

$$I_S = \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2\pi}\right)}\,\hat{I}_S = 0{,}78\,\hat{I}_S$$

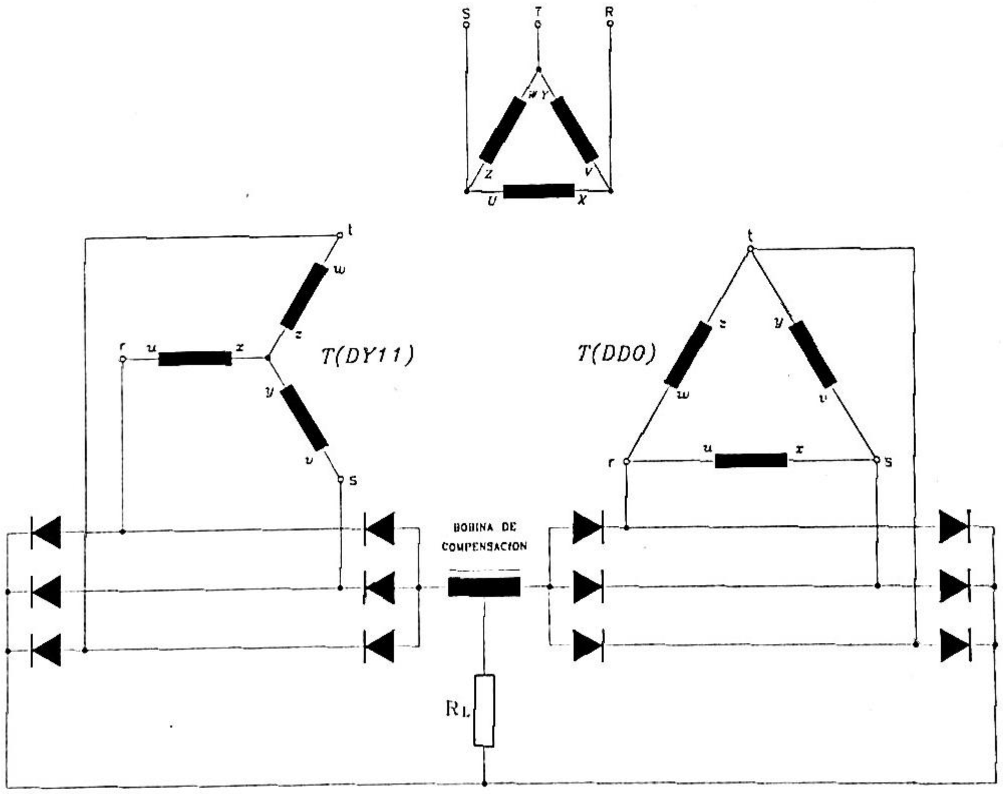
$$\Rightarrow \boxed{I_S = 0{,}78\,\hat{I}_L}$$

$$I_S = 0{,}78 \cdot \frac{\pi}{3}\,\overline{I_L}$$

$$\boxed{I_S = 0{,}817 \cdot \overline{I_L}}$$

$$I_S = 0{,}817 \cdot 41{,}\hat{6}\,A \Rightarrow \boxed{I_S = 34\,[A]}$$

RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA CON ESTRELLA-TRIANGULO SECUNDARIA (12 Fases)



Realizado por : Ing. Héctor Aníbal AYMERICH

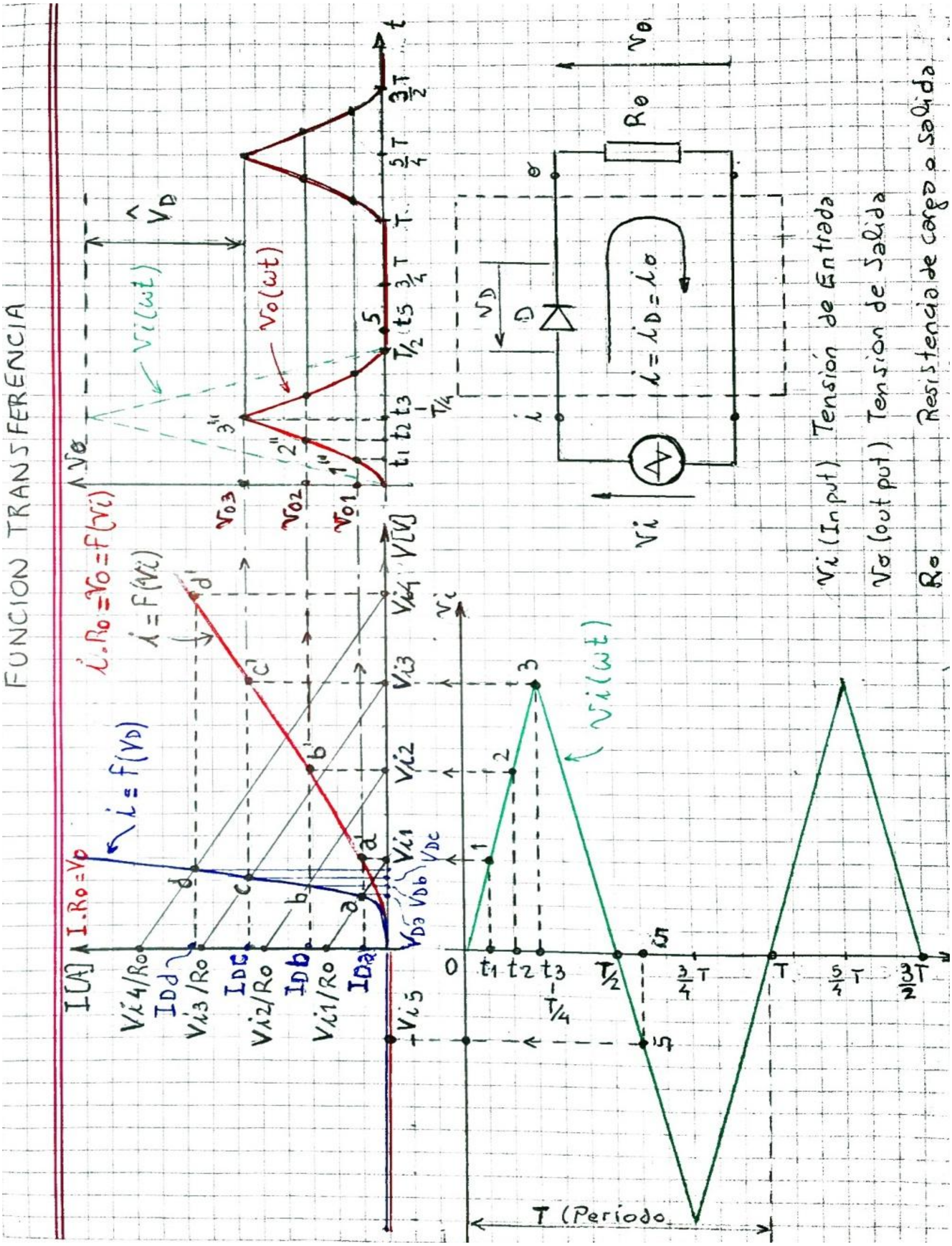
Cátedra de ELECTRÓNICA GENERAL

Departamento Mecánica-Eléctrica

ESCUELA INDUSTRIAL SUPERIOR

ANEXO 1:

Función Transferencia



ANEXO 2:

Armónicas

Dada la tensión pulsante senoidal de ½ onda:

$$v_{(t)} = \begin{cases} \hat{V}.\ \sin(\omega\,.t) & \forall\ \ 0 \leq \omega\,.t\ \leq \pi \\ 0 & \forall\ \ \pi \leq \omega\,.t\ \leq 2\pi \end{cases}$$

Según Fourier, la función pulsante de media onda se puede descomponer en un valor medio (componente de continua), más una serie de armónicas (componentes de alterna), como se indica:

$$v_{(t)} = \frac{\hat{V}}{\pi} + \frac{\hat{V}}{2}\,.\sin(\omega.t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\,.\hat{V}}{\pi\,.(1-4\,.\,n^2)}\,.\cos(2.n.\omega\,.t)$$

$$v_{(t)} = \frac{\hat{V}}{\pi} + \frac{\hat{V}}{2}\,.\sin(\omega.t) - \frac{2\,.\hat{V}}{3.\pi}\,.\cos(2.\omega\,.t) - \frac{2\,.\hat{V}}{15.\pi}\,.\cos(4.\omega\,.t) - \frac{2\,.\hat{V}}{35.\pi}\,.\cos(6.\omega\,.t) - \ ...$$

$$v_{(t)} = \frac{\hat{V}}{\pi} + \left(\frac{\pi}{2}\,.\sin(\omega.t) - \frac{2}{3}\,.\cos(2.\omega\,.t) - \frac{2}{15}\,.\cos(4.\omega\,.t) - \frac{2}{35}\,.\cos(6.\omega\,.t) - \frac{2}{63}\,.\cos(8.\omega\,.t) - \frac{2}{99}\,.\cos(10.\omega\,.t) - \ ...\right)$$

$$V_{efTot}{}^2 = V_{med}{}^2 + V_{efca}{}^2$$

$$V_{efTot}{}^2 = V_{med}{}^2 + V_{ef1}{}^2 + V_{ef2}{}^2 + V_{ef4}{}^2 + V_{ef6}{}^2 + V_{ef8}{}^2 + V_{ef10}{}^2 + ..$$

$$V_{efTot}{}^2 = \left(\frac{\hat{V}}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}.\frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{3\pi}.\frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{15\pi}.\frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{35\pi}.\frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{63\pi}.\frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{99\pi}.\frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \cdots$$

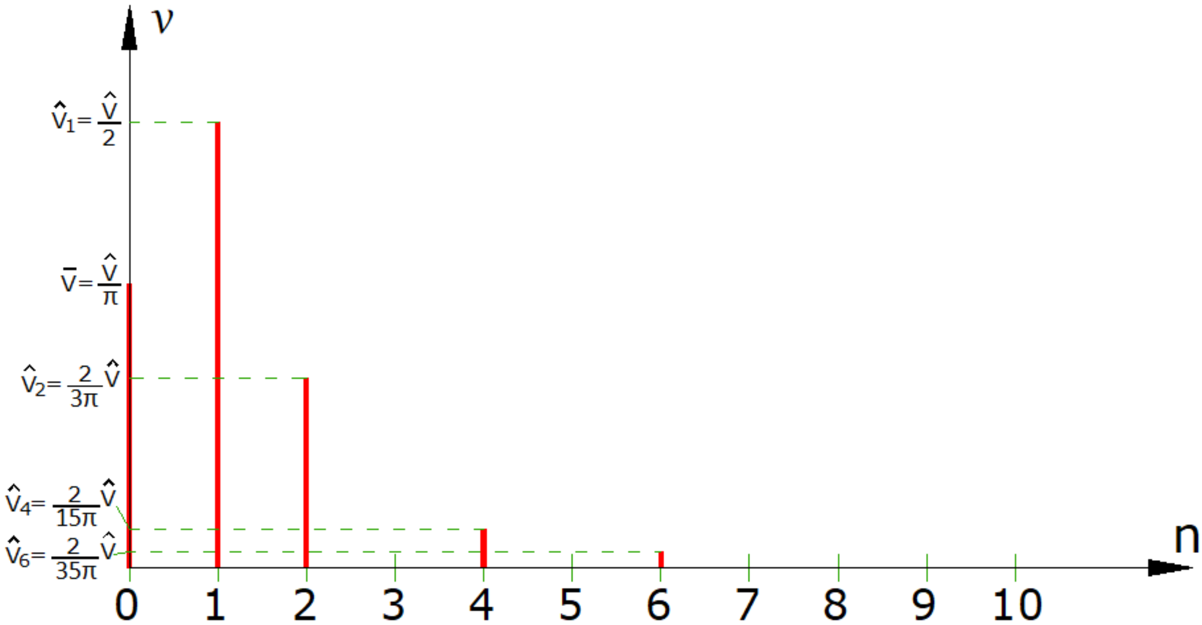
$$V_{efTot}{}^2 = \left[\left(\frac{1}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}.\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{3\pi}.\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{15\pi}.\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{35\pi}.\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{63\pi}.\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{99\pi}.\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \cdots\right].\hat{V}^2$$

$$V_{efTot}{}^2 = \left(\frac{1}{\pi^2} + \frac{1}{8} + \frac{2}{9\pi^2} + \frac{2}{225\pi^2} + \frac{2}{1225\pi^2} + \frac{2}{3969\pi^2} + \frac{2}{9801\pi^2} + \cdots\right).\hat{V}^2$$

$$V_{efTot}{}^2 = 0{,}25.\hat{V}^2 \qquad \Rightarrow \qquad V_{efTot} = 0{,}5\,.\hat{V} = \frac{\hat{V}}{2}$$

Se llega a la misma conclusión que, calculando el valor RMS por integración de la función al cuadrado.

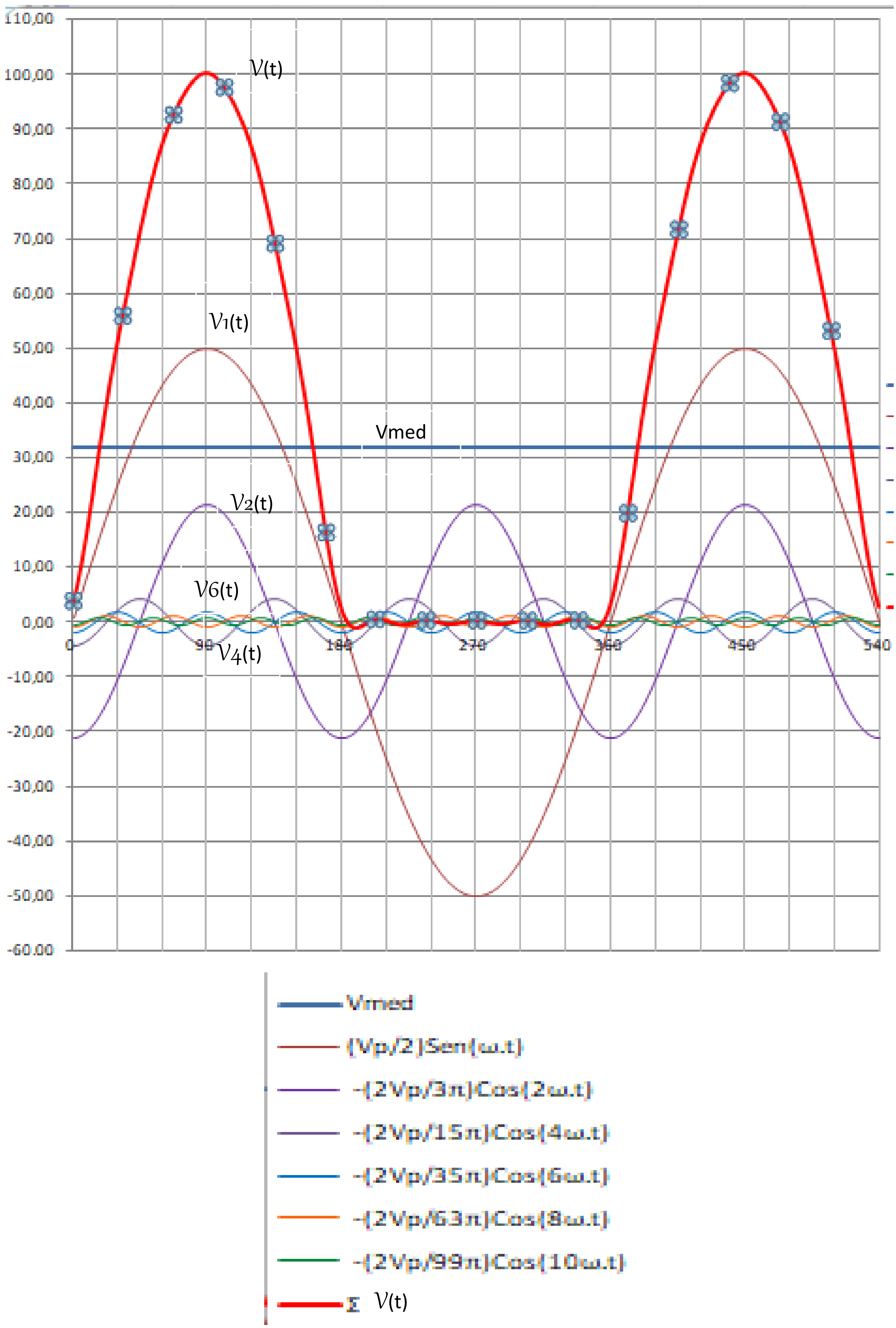
Espectro de armónicas



Las armónicas superiores a la 6ta son muy pequeñas y no se aprecian en el dibujo.

Gráfica de componentes de alterna y de continua de ½ onda pulsante con amplitud de 100 V:

$$\text{Para} \qquad \hat{V} = 100\ V$$



110,00
100,00
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
-10,00
-20,00
-30,00
-40,00
-50,00
-60,00
0
90
180
270
360
450
540
V(t)
V1(t)
Vmed
V2(t)
V6(t)
V4(t)
Vmed
(Vp/2)Sen(ω.t)
-(2Vp/3π)Cos(2ω.t)
-(2Vp/15π)Cos(4ω.t)
-(2Vp/35π)Cos(6ω.t)
-(2Vp/63π)Cos(8ω.t)
-(2Vp/99π)Cos(10ω.t)
Σ V(t)