



Electrónica de Potencia

UNIDAD Nº 0. INTRODUCCIÓN A LA ASIGNATURA

UNIDAD Nº 1. REPASO DE CONCEPTOS Y DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

UNIDAD Nº 2. AMPLIFICADORES DE POTENCIA

UNIDAD Nº 3. DISPOSITIVOS DE CUATRO CAPAS

➡ **UNIDAD Nº 4. CONVERTIDORES**

Tema 7.- Convertidores ac/dc: rectificación

Rectificación monofásica media onda: Carga resistiva, carga resistiva-inductiva, carga RL-generador, diodo de libre circulación. Rectificación de media onda controlado: Carga resistiva, carga RL, carga RLE. Efecto de la conmutación. Rectificador monofásico onda completa: En puente, toma media, carga RL, carga RLE. Filtro por condensador. Filtro L. Filtro LC. Rectificador controlado monofásico de onda completa: Carga R, carga RL, carga RLE. Rectificación trifásica de media onda. Rectificación polifásica de media onda. Rectificación trifásica de onda completa. Rectificadores controlados: trifásico media onda, polifásico onda completa.

Tema 8.- Filtrado y fuentes reguladas

Tema 9.- Convertidores dc/dc

Tema 10.- Introducción a las configuraciones básicas de las fuentes de alimentación conmutadas

Tema 11.- Convertidores dc/ac: inversores

Prof. J.D. Aguilar Peña
Departamento de Electrónica. Universidad Jaén

jaguilar@ujaen.es

<http://voltio.ujaen.es/jaguilar>



7.1 Introducción	1
7.2 Rectificador monofásico de media onda	1
7.2.1 Carga resistiva	1
7.2.2 Carga resistiva-inductiva	6
7.2.3 Carga RLE	12
7.2.4 Rectificador monofásico de media onda, con diodo volante	17
7.2.5 Rectificador monofásico de media onda, con diodo volante, alimentando una carga RLE	18
7.3 Rectificador controlado monofásico de media onda	19
7.3.1 Rectificador controlado media onda: carga resistiva	19
7.3.2 Rectificador controlado monofásico de media onda con carga inductiva	24
7.3.3 Rectificador controlado monofásico de media onda con diodo volante y carga inductiva	27
7.3.4 Rectificador controlado monofásico de media onda: carga RLE	30
7.4 Rectificadores monofásicos de onda completa	31
7.4.1 Rectificador con transformador de toma intermedia	31
7.4.2 Puente rectificador con diodos	34
7.4.3 Estudio para una carga RL altamente inductiva	35
7.4.4 Estudio para una carga RLE	36
7.5 Puente rectificador monofásico totalmente controlado	41
7.5.1 Carga resistiva	41
7.5.2 Estudio para una carga altamente inductiva, corriente continuada	43
7.5.3 Carga RL, corriente discontinua	46
7.5.4 Carga RLE	47
7.5.5 Carga RL con diodo volante	48
7.5.6 Convertidor monofásico en modo inversor	49
7.6 Puente rectificador monofásico semicontrolado o mixto	49
7.7 Rectificadores Polifásicos	51
7.7.1 Rectificadores polifásicos de media onda	51
7.7.2 Rectificador controlado polifásico de media onda	53
7.7.3 Rectificador trifásico de media onda	53
7.7.4 Rectificador controlado trifásico de media onda	56
7.7.5 Puente rectificador trifásico de onda completa	62
7.7.6 Puente rectificador trifásico totalmente controlado	68
7.7.7 Puente rectificador trifásico semicontrolado	74
7.8 Conmutación: El efecto de la inductancia del generador	76
7.8.1 Conmutación en rectificadores monofásicos controlados con transformador de toma intermedia	77
7.8.2 Conmutaciones en puentes rectificadores trifásicos	79
7.9 Factor de Potencia	80
7.9.1 Factor de potencia en rectificadores monofásicos	81
7.9.2 Factor de potencia en rectificadores polifásicos	83



7.1 Introducción

Un rectificador es un subsistema electrónico cuya misión es la de convertir la tensión alterna, cuyo valor medio es nulo, en otra tensión unidireccional de valor medio no nulo.

A la hora de llevar a cabo la rectificación, se han de utilizar elementos electrónicos que permitan el paso de la corriente en un solo sentido, permaneciendo bloqueado cuando se le aplique una tensión de polaridad inapropiada. Para ello, el componente más adecuado y utilizado es el diodo semiconductor. Este dispositivo es el fundamento de los rectificadores no controlados.

7.2 Rectificador monofásico de media onda

7.2.1 CARGA RESISTIVA

Este circuito sólo rectifica la mitad de la tensión de entrada; o sea, cuando el ánodo es positivo con respecto al cátodo. Podemos considerarlo como un circuito en el que la unidad rectificadora está en serie con la tensión de entrada y la carga.

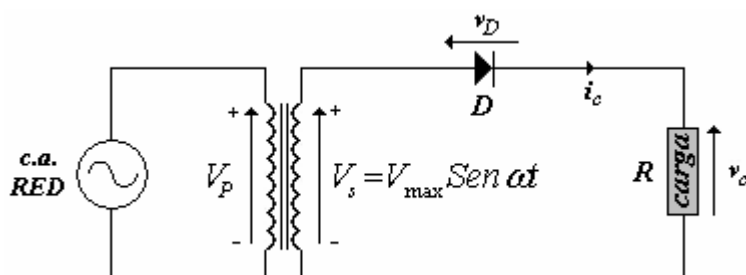


Fig 7.1
Circuito rectificador monofásico de media onda con carga resistiva

El funcionamiento consiste en tomar de la red una señal sinusoidal de valor medio nulo, y proporcionar a la carga, gracias al diodo, una forma de onda unidireccional, de valor medio no nulo como se aprecia en la figura 7.2.

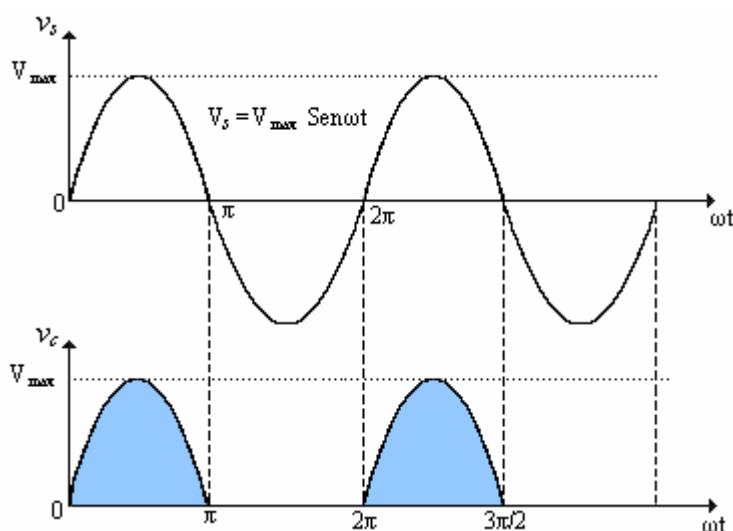


Fig 7.2
Forma de onda del circuito rectificador monofásico de media onda con carga resistiva.

$$V_C = V_{\max} \text{Sen} \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq \pi$$

$$V_C = 0 \quad \pi \leq \omega t \leq 2\pi$$

Tensión media en la carga: Este valor nos determina la componente de c.c. de la tensión en la carga. Lo obtenemos calculando el promedio del voltaje de salida del rectificador:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{\max} \text{Sen} \omega t d\omega t = \frac{V_{\max}}{\pi} = 0,318 V_{\max} \quad \text{E 7.1}$$

así que tendremos una componente continua del orden del 30% del valor de pico.

Tensión eficaz en la carga:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_{\max} \text{Sen} \omega t d\omega t)^2 d\omega t} = \frac{V_{\max}}{2} \quad \text{E 7.2}$$

Regulación: Mediante el parámetro regulación se mide la variación de la tensión continua de salida (V_{dc}) en función de la corriente continua que circula por la carga. Dicha variación de la tensión de salida es debida a una pequeña resistencia que presenta el devanado secundario (R_s), y a la resistencia interna del diodo cuando está conduciendo (R_d). Por eso, lo más conveniente para nuestro rectificador es que el porcentaje de regulación sea lo menor posible:

$$r(\%) = \frac{V_{dc(\text{envacio})} - V_{dc(\text{aplenacarga})}}{V_{dc(\text{aplenacarga})}} \times 100\% \quad \text{E 7.3}$$

Siendo el valor de tensión media en la carga:

$$V_{dc(\text{en plena carga})} = \left(\frac{V_{\max}}{\pi} \right) - (I_{dc(\text{en plena carga})} (R_s + R_d))$$

Factor de forma:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0,5 V_{\max}}{0,318 V_{\max}} = 1,57 \quad \text{E 7.4}$$

Factor de rizado: Es una buena forma de medir el alisamiento en la salida de c.c.:

$$FR(\%) = \frac{V_{ac,rms(\text{salida})}}{V_{dc}} \times 100\% \quad \text{E 7.5}$$

Sabiendo que:

$$(V_{rms})^2 = (V_{ac,rms(\text{salida})})^2 + (V_{dc})^2$$

Valor medio de la corriente en la carga:

$$I_{dc} = \frac{I_{\max}}{\pi} \quad \text{E 7.6}$$

Valor eficaz de la corriente en la carga:

$$I_{rms} = \frac{I_{\max}}{2} \quad \text{E 7.7}$$

Sabiendo que:

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R_L} \quad \text{E 7.8}$$

Los valores de I_{dc} e I_{\max} deberán tenerse en cuenta a la hora de elegir un diodo semiconductor para el rectificador, siendo estos valores de intensidad los que circularán por el devanado secundario del transformador.

Potencia media en la carga:

$$P_{dc} = \frac{(V_{dc})^2}{R} = \frac{(0,318 V_{\max})^2}{R} \quad \text{E 7.9}$$

Potencia eficaz en la carga:

$$P_{ac} = \frac{(V_{rms})^2}{R} = \frac{(0,5 V_{\max})^2}{R} \quad \text{E 7.10}$$

Rendimiento:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{\frac{(V_{dc})^2}{R}}{\frac{(V_{rms})^2}{R}} = \frac{(0,318 V_{\max})^2}{(0,5 V_{\max})^2} = \frac{0,101}{0,25} = 0,404 \rightarrow (40,4\%) \quad \text{E 7.11}$$

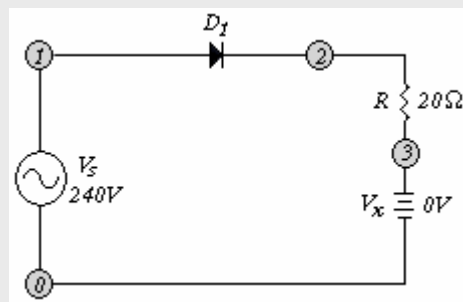
PROBLEMA 7.1

Dado un rectificador monofásico de media onda con carga resistiva, cuyo esquema es el mostrado en la figura 7.1, calcular lo siguiente:

- Tensión de pico en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Potencia eficaz en la carga.
- Factor de potencia.

DATOS: $R = 20 \Omega$; $V_s = 240V$; $f = 50Hz$

Obtener mediante Pspice las formas de onda de: V_c (tensión de carga), V_{dc} , i_c , I_{dc} , I_{rms} , P_{ac}



...
Solución:

- a) La tensión de pico en la carga corresponderá con la tensión máxima suministrada por el secundario

$$V_{p(carga)} = V_{max} = \sqrt{2} V_S = 1.414 \cdot 240 V = 339.4 V$$

- b) La corriente de pico en la carga se correspondería con la intensidad máxima y se podría obtener de la tensión máxima:

$$I_{p(carga)} = I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{339,4}{20} = 16,97 V$$

- c) Usando la ecuación 7.1 obtenemos la tensión media en la carga:

$$V_{dc} = (0,318) V_{max} = 108 V$$

- d) La corriente media en la carga la calcularemos usando la ecuación del apartado anterior, pero sustituyendo V_{max} por I_{max} :

$$I_{dc} = 5,4 A$$

- e) La corriente eficaz en la carga se calcula usando la ecuación 7.2 y sustituyendo en ella la V_{max} por la I_{max} :

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{2} = 8,48 A$$

- f) La potencia alterna en la carga será:

$$P_{ac} = (I_{rms})^2 R = 1440 W$$

- g) El factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{1440 W}{240 V \cdot 8.48 A} = 0.7$$

Simulación con Pspice:

Problema7_1: RECTIFICADOR MONOFASICO DE M.O. CON CARGA RESISTIVA

```
VS 1 0 SIN (0 339.4V 50HZ)
R 2 3 20HM
VX 3 0 DC 0V
D1 1 2 DMOD
```

```
.MODEL DMOD D (IS=2.22E-15 BV=1200V IBV=13E-3 CJO=2PF TT=1US)
```

```
.TRAN 10US 30MS 10US
```

```
.PROBE
```

```
.OPTIONS ABSTOL=1.0N RELTOL=0.01 VNTOL=1.0M ITL5=40000
```

```
.END
```



PSPICE

PROBLEMA 7.2

Dado un rectificador monofásico de media onda con carga puramente resistiva, como se muestra en la figura 7.1, calcular lo siguiente:

- La eficiencia de la rectificación.
- El factor de forma.
- El factor de rizado.
- El factor de utilización del transformador.
- La tensión inversa de pico en el diodo.
- El factor de cresta de la corriente de alimentación.

Solución:

- a) Partiendo de la ecuación [E7.11], tenemos:

$$\eta = \frac{(0,318 V_{\max})^2}{(0,5 V_{\max})^2} = 0,405 \rightarrow (40,5\%)$$

- b) De la ecuación [E7.4], calculamos el factor de forma:

$$FF = \frac{0,5 V_{\max}}{0,318 V_{\max}} = 1,57 \rightarrow (157\%)$$

- c) A partir de la ecuación [E7.5], obtenemos:

$$FR = 1,21 \rightarrow (121\%)$$

- d) Primero necesitaremos saber el valor de la tensión eficaz y el valor eficaz de la intensidad en el secundario:

$$V_s = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 V_{\max} \quad I_s = \frac{0,5 V_{\max}}{R}$$

$$S = V_s I_s = (0,707 V_{\max}) \frac{0,5 V_{\max}}{R}$$

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_s I_s} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{(0,707 V_{\max}) \frac{0,5 V_{\max}}{R}} = \frac{(0,318)^2}{(0,707)(0,5)} = 0,286 \rightarrow \frac{1}{TUF} = 3,496$$

- e) La tensión inversa de pico en el diodo:

$$PIV = V_{\max}$$

- f) El factor de cresta será:

$$CF = \frac{I_{s(pico)}}{I_s} = \frac{V_{\max}/R}{0,5 V_{\max}/R} = \frac{1}{0,5} = 2$$

PROBLEMA 7.3

El rectificador monofásico de media onda de la figura 7.1, es alimentado por una tensión $V_s = 120V$, 50Hz. Expresa la tensión instantánea en la carga, $v_c(t)$, en series de Fourier.

Solución:

La onda no presenta simetrías y por tanto hay que esperar que la serie tenga términos sen y cos

La tensión de salida v_c puede expresarse en series de Fourier como:

$$v_c(t) = V_{dc} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \text{Sen} \omega t + b_n \text{Cos} \omega t) \quad \text{donde: } V_{dc} = \frac{V_{\max}}{\pi}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_c \text{Sen } n\omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \text{Sen} \omega t \text{Sen } n\omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{2} \quad \text{para } n=1$$

$$a_n = 0 \quad \text{para } n=2,4,6,\dots$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_c \text{Cos } n\omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \text{Sen} \omega t \text{Cos } n\omega t \, d\omega t = 0 \quad \text{para } n=1$$

$$b_n = \frac{V_{\max}(\text{Cos } n\pi + 1)}{\pi(1 - n^2)} \quad \text{para } n=2,3,4,\dots$$

Sustituyendo a_n y b_n , la tensión instantánea en la carga será:

$$v_c(t) = \frac{V_{\max}}{\pi} + \frac{V_{\max}}{2} \text{Sen} \omega t - \frac{2V_{\max}}{3\pi} \text{Cos} 2\omega t + \frac{2V_{\max}}{15\pi} \text{Cos} 4\omega t - \frac{2V_{\max}}{35\pi} \text{Cos} 6\omega t + \dots$$

$$\text{donde: } V_{\max} = \sqrt{2}(120) = 169,7 \, V \quad \omega = 2\pi(50) = 314,16 \, \text{rad} / \text{seg}$$

7.2.2 CARGA RESISTIVA-INDUCTIVA

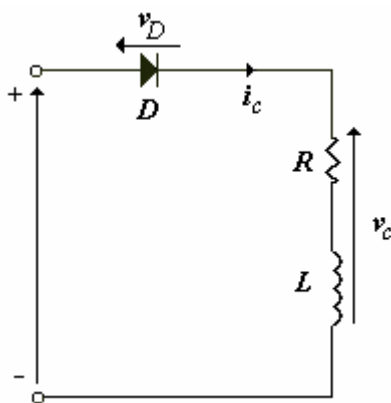
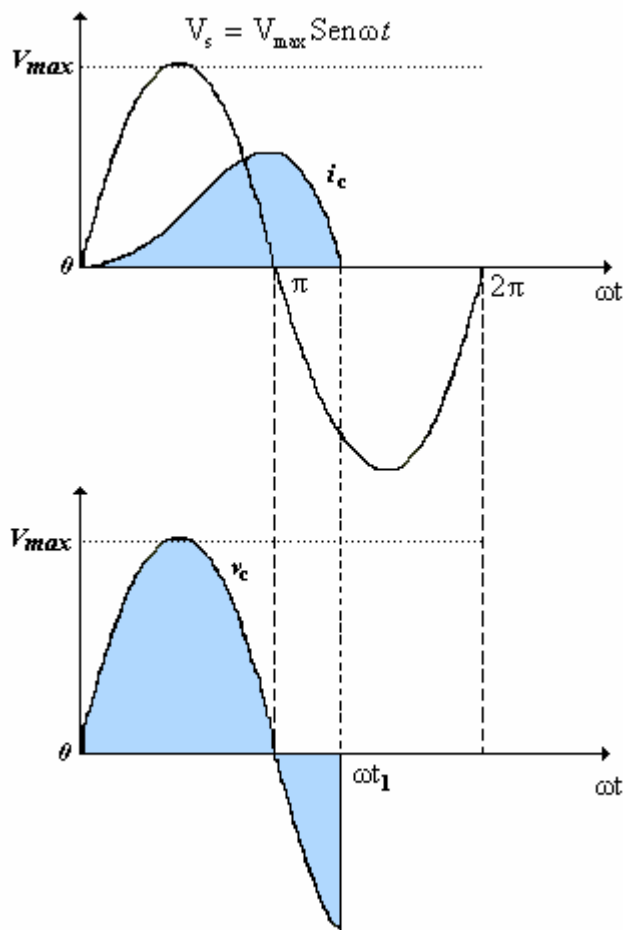


Fig 7. 1
Circuito rectificador monofásico de media onda con carga RL.



[7_1]

Fig 7. 2
Formas de onda del circuito para una carga RL.
En ellas se puede apreciar el comportamiento del circuito para un periodo de la señal.

Para $0 < \omega t < \omega t_1$: Durante este intervalo el diodo conducirá y el valor de la tensión en la carga será:

$$v_C = v_S = V_{\max} \text{Sen} \omega t$$

y se cumplirá la siguiente ecuación,

$$L \left(\frac{di_C}{dt} \right) + R i_C = V_{\max} \text{Sen} \omega t$$

E 7.12

Al resolver la diferencial obtenemos el valor de i_C ; la solución puede obtenerse expresando la corriente como la suma de la respuesta forzada (i_f) y la respuesta natural (i_l).

La respuesta forzada para esta aplicación, es la corriente existente después de que la respuesta natural haya decaído a cero. En este caso es la corriente sinusoidal de régimen permanente que existiría en el circuito si el diodo no estuviera presente:

$$i_f = \frac{V_{\max}}{Z} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

La respuesta natural es el transitorio que tiene lugar cuando se proporciona energía a la carga. [Hart]

$$i_l = A \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \rightarrow \tau = \frac{L}{R}$$

$$i_C = i_f + i_l = \frac{V_{\max}}{Z} \left[\text{Sen}(\omega t - \varphi) + \text{Sen} \varphi e^{-\frac{\omega t}{Q}} \right]$$

E 7.13

donde : $Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ $\text{Sen} \varphi = \frac{L\omega}{Z}$ $Q = \text{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R} \rightarrow \varphi = \text{arctg} \frac{L\omega}{R}$

Para $\omega t = \omega t_1$: La intensidad i_C se hace cero, porque el diodo pasará a estar bloqueado y se cumplirá que:

$$\text{Sen}(\omega t_1 - \varphi) = -\text{Sen} \varphi e^{-\frac{R}{L} t_1}$$

en la que ωt_1 tendrá un valor superior a $T/2$ y cuanto más grande sea el valor de R/L , más se aproximará a T , no existe solución analítica y se necesita de algún método numérico.

Para $\omega t_1 < \omega t < 2\pi$: Ahora tampoco circulará corriente por el circuito, al estar el diodo bloqueado,

$$i_C = 0 \qquad v_D = v_S < 0 \qquad v_C = 0$$

❖ Casos límites de funcionamiento

Si $L\omega/R$ es nulo: Significa que tenemos una carga resistiva pura.

$$\omega t_1 = \pi$$

La corriente i_C valdrá:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{R} \text{Sen} \omega t \qquad \text{para } 0 < \omega t < \pi$$

$$i_C = 0 \qquad \text{para } \pi < \omega t < 2\pi$$

mientras que la tensión media en la carga vale:

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{2}V_S}{\pi} = \frac{V_{\max}}{\pi}$$

Si $L\omega/R$ crece: el punto ωt_1 tiende a desplazarse hacia la derecha en el eje y la V_{dc} , a su vez, disminuye, valiendo ahora:

$$V_{dc} = \frac{V_{\max}}{2\pi} (1 - \text{Cos} \omega t_1)$$

E 7.14

y produciéndose una disminución en el valor medio de i_C :

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

Si $L\omega/R$ tiende a infinito: quiere decir que tenemos una carga inductiva pura. Así ωt_1 se aproxima a 2π , y el valor de V_{dc} tiende a cero.

La corriente circulará por la carga durante todo el periodo, y vendrá dada por:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{L\omega} (1 - \text{Cos} \omega t)$$

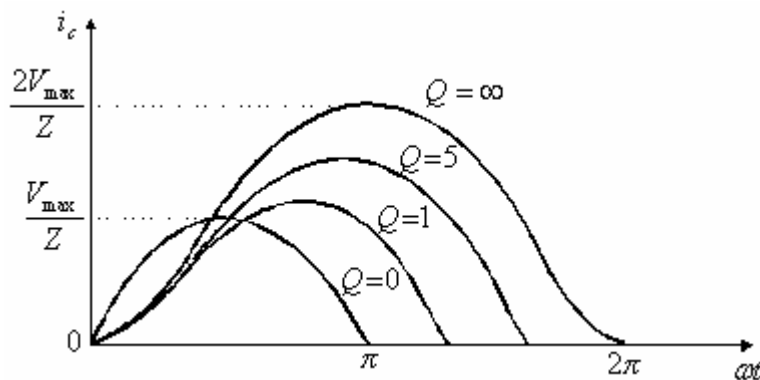


Fig 7. 5

En esta gráfica podemos observar la forma de onda de i_c para distintos valores de Q . La corriente está referida a V_{\max}/Z .

Para finalizar diremos que este rectificador funciona en régimen de conducción discontinua, y en el cual la inductancia de la carga aumentará el ángulo de conducción y disminuirá el valor medio de la tensión rectificada.

PROBLEMA 7.4

Dado un rectificador monofásico de media onda con carga RL, como el mostrado en la fig 7.3, calcular lo siguiente:

- La tensión media en la carga.
- La corriente media en la carga.
- Usando Pspice, obtener la representación gráfica de la tensión en la carga y la corriente en la carga.
- Obtener los coeficientes de Fourier de la tensión de salida.
- Obtener el factor de potencia de entrada.

DATOS: $R = 20 \Omega$; $L = 0,0531H$; $V_s = 120V$; $f=50Hz$

Solución:

$$V_{\max} = 120\sqrt{2} = 169,7V \quad \omega = 2\pi f = 314,16 \text{ rad/s}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} = 26\Omega \quad \varphi = \arctg\left(\frac{L\omega}{R}\right) = \frac{2\pi}{9} \text{ rad} \quad Q = \tan \varphi = 0,84$$

$$i_c = \frac{V_{\max}}{Z} = \left[\text{Sen}(\omega t - \varphi) + \text{Sen} \varphi e^{-\frac{\omega t}{Q}} \right] = \frac{169,7}{26} \left[\text{Sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{9}\right) + \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{9}\right) e^{-\frac{\omega t}{0,84}} \right]$$

y mediante tanteo obtenemos el valor de ωt que hace que $i_c=0$:

$$\omega t = 3,846 \text{ rad} \quad t = \frac{\omega t (20)(10^{-3})}{2\pi} = 12,24 \text{ ms}$$

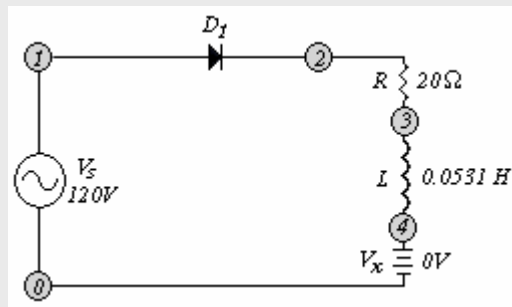
- Con el valor de ωt calculado, ya podemos hallar la tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{3,846} V_{\max} \text{Sen} \omega t d\omega t = 47,6V$$

- A partir de V_{dc} obtenemos el valor de la corriente media en la carga:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = 2,38A$$

c) Usando el esquema y el listado que se ofrecen a continuación obtenemos:



Descripción del circuito:

Problema7_4: RECTIFICADOR MONOFASICO DE M.O. CON CARGA RL

```
VS 1 0 SIN(0 169.7V 50HZ)
R 2 3 20HM
L 3 4 0.0531H
VX 4 0 DC 0V
D1 1 2 DMOD
```



```
.MODEL DMOD D(IS=2.22E-15 BV=1200V IBV=13E-3 CJO=2PF TT=1US)
```

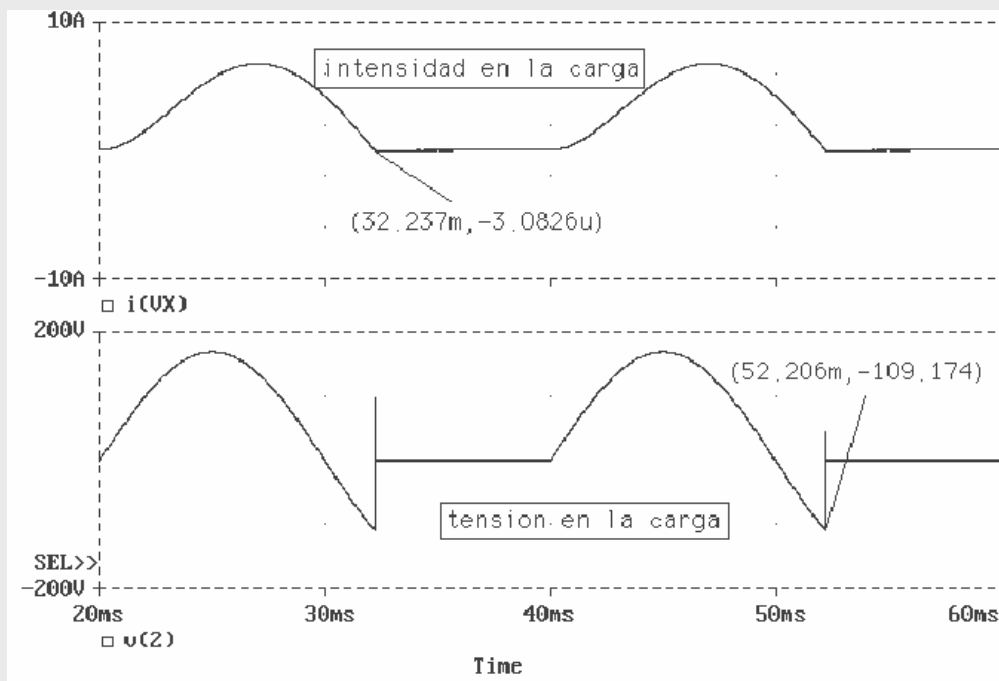
```
.TRAN 10US 40MS 20MS 10US
```

```
.PROBE
```

```
.OPTIONS ABSTOL=1.0N RELTOL=0.01 VNTOL=1.0M ITL5=20000
```

```
.FOUR 50HZ I(VX) V(2)
```

```
.END
```



Se puede apreciar en las formas de onda obtenidas, que la $i_c=0$ para $(12.237\text{msg}+T)$.

d) Los coeficientes de Fourier de la tensión en la carga serán:

...

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(2)

DC COMPONENT = 4.721008E+01

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	9.052E+01	1.000E+00	7.152E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	4.434E+01	4.899E-01	-1.024E+02	-1.096E+02
3	1.500E+02	1.104E+01	1.220E-01	1.090E+01	3.747E+00
4	2.000E+02	1.064E+01	1.176E-01	-1.561E+02	-1.633E+02
5	2.500E+02	8.834E+00	9.759E-02	-4.498E+01	-5.213E+01
6	3.000E+02	4.692E+00	5.184E-02	1.169E+02	1.097E+02
7	3.500E+02	6.239E+00	6.892E-02	-1.054E+02	-1.125E+02
8	4.000E+02	4.043E+00	4.466E-02	2.315E+01	1.600E+01
9	4.500E+02	3.971E+00	4.387E-02	-1.761E+02	-1.832E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 5.380883E+01 PERCENT

- e) Para la obtención del factor de potencia de entrada, tendremos que obtener las series de Fourier de la corriente de entrada. Esta será igual que la corriente que atraviesa Vx.

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(VX)

DC COMPONENT = 2.360451E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.476E+00	1.000E+00	-3.268E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	1.140E+00	3.280E-01	-1.615E+02	-1.288E+02
3	1.500E+02	2.049E-01	5.895E-02	-5.732E+01	-2.465E+01
4	2.000E+02	1.528E-01	4.395E-02	1.305E+02	1.632E+02
5	2.500E+02	1.030E-01	2.963E-02	-1.215E+02	-8.883E+01
6	3.000E+02	4.597E-02	1.323E-02	3.813E+01	7.081E+01
7	3.500E+02	5.266E-02	1.515E-02	1.743E+02	2.070E+02
8	4.000E+02	2.996E-02	8.620E-03	-5.836E+01	-2.568E+01
9	4.500E+02	2.621E-02	7.542E-03	1.015E+02	1.342E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 3.382103E+01 PERCENT

Corriente media de entrada, $I_{S(dc)} = 2,36A$ Corriente eficaz de entrada del fundamental, $I_{1(rms)} = 3,47/\sqrt{2} = 2,453$ Distorsión armónica total de la corriente de entrada, $THD = 33,82\% = 0,3382$ Corriente armónica eficaz, $I_{h(rms)} = I_{1(rms)} \times THD = 0,829$ Corriente eficaz de entrada, $I_S = \sqrt{(I_{S(dc)})^2 + (I_{1(rms)})^2 + (I_{h(rms)})^2} = 3,5A$

...

...

Ángulo de desplazamiento, $\Phi_1 = -32,68$

Factor de desplazamiento, $DF = \cos\Phi_1 = 0,841$ (en retraso)

El factor de potencia valdrá:

$$PF = \frac{V_S I_{1(rms)}}{V_S I_S} \cos\Phi_1 = 0,59$$

También podemos calcular el factor de potencia directamente usando el valor de THD:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cos\Phi_1 = 0,79$$

Con este segundo método se obtiene un valor superior al obtenido con la primera ecuación. Esto es debido a la existencia de una componente continua de un valor significativo, por lo que esta última fórmula la emplearemos solo cuando no existe componente continua.

7.2.3 CARGA RLE

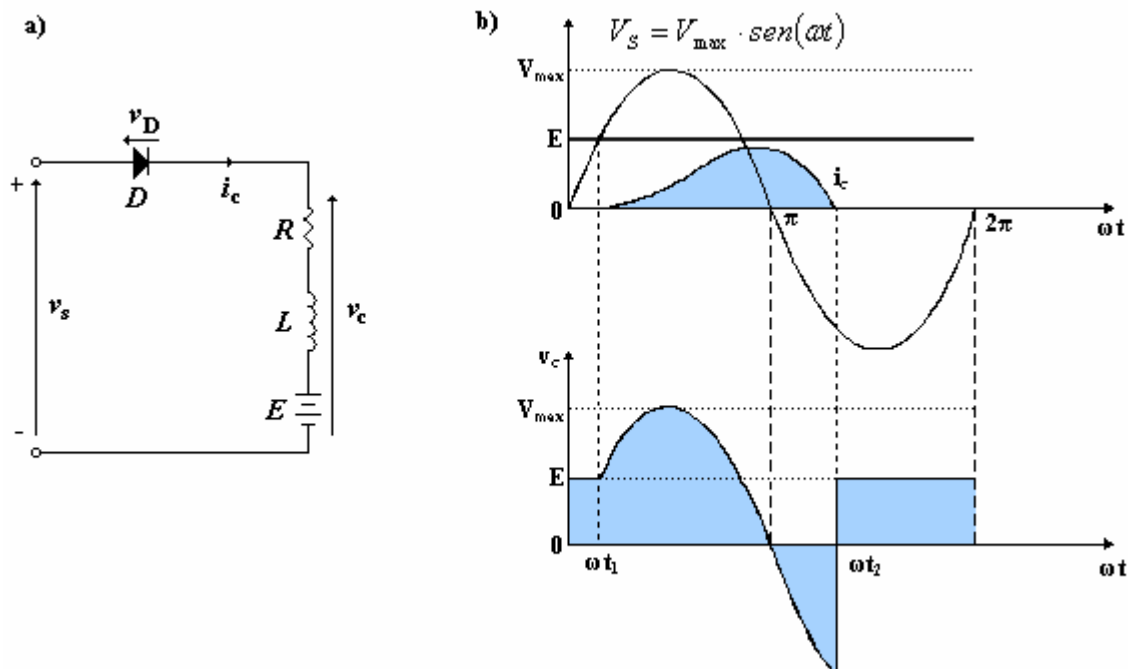


Fig 7. 6 a) Montaje de un circuito rectificador monofásico de media onda con carga RLE. b) Formas de onda para una carga RLE

Este tipo de carga estará caracterizada por dos parámetros:

$$m = \frac{E}{V_{\max}} \qquad Q = \frac{L\omega}{R}$$

Para $\omega t_1 < \omega t < \omega t_2$: El diodo conducirá, $V_C = V_S$

El ángulo ωt_1 será tal que: $V_{\max} \text{Sen} \omega t_1 = E \Rightarrow m = \text{Sen} \omega t_1$

En este intervalo de tiempo en el que el diodo permanece en conducción, se cumplirá la siguiente ecuación:

$$R i_C + L \left(\frac{di_C}{dt} \right) + E = V_{\max} \text{Sen} \omega t \quad i_C(\omega t_1) = 0$$

Y resolviéndola se obtiene la expresión de la corriente que circulará por la carga:

$$i_C = -\frac{E}{R} + \frac{V_{\max}}{Z} \left[\text{Sen}(\omega t - \varphi) + \left(\frac{E}{R} \frac{Z}{V_{\max}} - \text{Sen}(\omega t_1 - \varphi) \right) e^{\frac{-\omega t + \omega t_1}{Q}} \right]$$

Desarrollando, y expresando después $\text{Sen} \varphi$ y $\text{Cos} \varphi$ en función de Z, R y Q, y sustituyendo $\text{Sen} \omega t_1 = m$ se obtiene:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{R} \left[-m + \frac{\text{Sen} \omega t - Q \text{Cos} \omega t}{1 + Q^2} + \frac{m Q^2 + Q \sqrt{1 - m^2}}{1 + Q^2} e^{\frac{-\omega t + \omega t_1}{Q}} \right] \quad \text{E 7.15}$$

La corriente se hace cero para ωt_2 tal que:

$$\text{Sen} \omega t_2 - Q \text{Cos} \omega t_2 = m + m Q^2 - \left[m Q^2 + Q \sqrt{1 - m^2} e^{\frac{-\omega t_2 + \omega t_1}{Q}} \right] \quad \text{E 7.16}$$

Para $\omega t_2 < \omega t < (2\pi + \omega t_1)$: El diodo estará bloqueado,

$$i_C = 0 \quad V_C = E \quad V_D = V_S - E < 0$$

❖ Influencia de los parámetros

Como la tensión $L(di_C/dt)$ tiene un valor medio nulo, el valor medio I_{dc} de la corriente estará ligado al valor medio V_{dc} de la tensión en la carga, y a E por medio de:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc} - E}{R}$$

La tensión media rectificada será:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\omega t_1}^{\omega t_2} V_{\max} \text{Sen} \omega t d\omega t + \int_{\omega t_2}^{2\pi + \omega t_1} E d\omega t \right]$$

$$V_{dc} = \frac{V_{\max}}{2\pi} (\text{Cos} \omega t_1 - \text{Cos} \omega t_2) + E - \frac{E}{2\pi} (\omega t_2 - \omega t_1) \quad \text{E 7.17}$$

Si $L = 0$

$$\omega t_2 = \pi - \omega t_1$$

$$V_{dc} = E \left(\frac{1}{2} + \frac{\omega t_1}{\pi} \right) + \frac{V_{\max}}{\pi} \cos \omega t_1$$

En el gráfico siguiente se puede determinar el valor de ωt_2 en función de E y de LR .

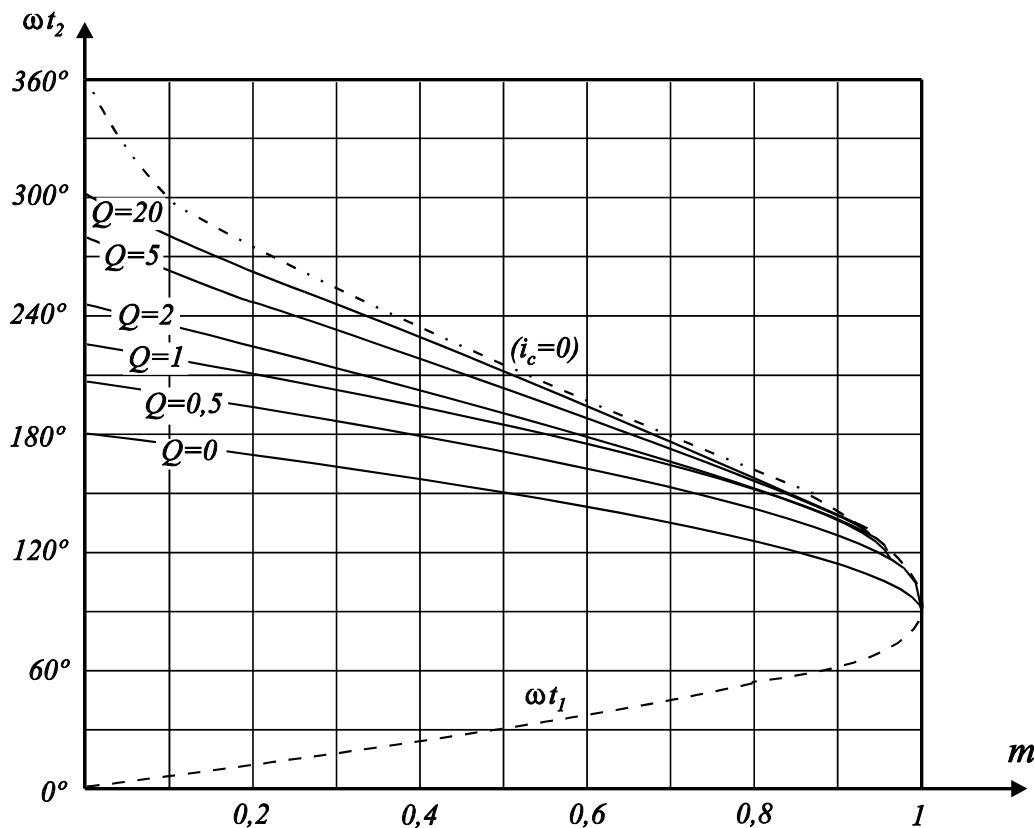


Fig. 7.7 Este gráfico nos da las variaciones del ángulo de extinción ωt_2 en función de m , para diversos valores de Q . Este ángulo es calculado con la ecuación 7.16.

Las diferentes curvas están comprendidas entre la correspondiente a $Q = 0$ y la dibujada en trazo mixto, que se corresponde con $Q = \infty$ ($i_c = 0$), cuyo cálculo se lleva a cabo haciendo V_{dc} igual a E en la ecuación [E7.17].

La diferencia entre el valor de ωt_2 y el de ωt_1 (curva en trazo discontinuo) da el ángulo de conducción del diodo.

Las curvas de la figura 7.7 nos muestra como, en conducción discontinua, la tensión rectificada depende de las características de la carga.

PROBLEMA 7.5

En un rectificador monofásico de media onda, se dispone de una batería de carga con capacidad de 100W-h. La corriente media es $I_{dc}=5A$. La tensión en el primario es $V_p=120V$, 50Hz y el transformador tiene una relación de transformación $a = 2:1$. Calcular lo siguiente:

- Ángulo de conducción del diodo (δ).
- Valor de la resistencia limitadora de corriente (R).
- Valor de la potencia (P_R) en R .
- El tiempo de carga de la batería (T) expresado en horas.
- La eficiencia del rectificador.
- La tensión inversa de pico en el diodo (PIV).

DATOS: $E=12V$; $V_p=120V$; $f=50Hz$; $a=2$

...

Solución:

$$V_S = \frac{V_P}{a} = \frac{120}{2} = 60V \quad V_{\max} = \sqrt{2}V_S = \sqrt{2}(60) = 80,85V$$

Si el ángulo de conducción del diodo vale $\delta = \omega t_2 - \omega t_1$:

$$\omega t_1 = \arcsen\left(\frac{E}{V_{\max}}\right) = 8,13^\circ \text{ ó } 0,1419\text{rad}$$

$$\omega t_2 = 180 - \omega t_1 = 180 - 8,13 = 171,87^\circ$$

$$\delta = 163.74^\circ$$

a) La corriente media de carga la calcularemos mediante la expresión:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} \frac{V_{\max} \text{Sen} \omega t - E}{R} d\omega t$$

de donde obtenemos que:

$$R = \frac{1}{2\pi I_{dc}} (2V_{\max} \text{Cos} \omega t_1 + 2E\omega t_1 - \pi E) = 4,26\Omega$$

b) La corriente eficaz en la batería será:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} \frac{(V_{\max} \text{Sen} \omega t - E)^2}{R^2} d\omega t} =$$

$$= \frac{1}{2\pi R^2} \left[\left(\frac{(V_{\max})^2}{2} + E \right) (\pi - 2\omega t_1) + \frac{(V_{\max})^2}{2} \text{Sen} 2\omega t_1 - 4V_{\max} E \text{Cos} \omega t_1 \right] = 8,2A$$

$$P_R = (I_{rms})^2 R = (8,2)^2 (4,26) = 286,4W$$

c) Calculamos ahora la potencia P_{dc} entregada a la batería:

$$P_{dc} = EI_{dc} = (12)(5) = 60W$$

$$TP_{dc} = 100 \Rightarrow T = \frac{100}{P_{dc}} = 1,667h$$

d) El rendimiento o eficiencia del rectificador valdrá:

$$\eta = \frac{\text{potencia entregada a la batería}}{\text{potencia total entregada}} = \frac{P_{dc}}{P_{dc} + P_R} = 0,1732 \rightarrow (17,32\%)$$

e) La tensión inversa de pico en el diodo será:

$$PIV = V_{\max} + E = 96,85V$$

PROBLEMA 7.6

Representar gráficamente el comportamiento de la tensión en la bobina. Comentar como afecta la evolución de dicha tensión en el valor de la intensidad que recorre el circuito.

Calcular:

- Para un rectificador monofásico de media onda con carga RL.
- Para un rectificador monofásico de media onda con carga LE.

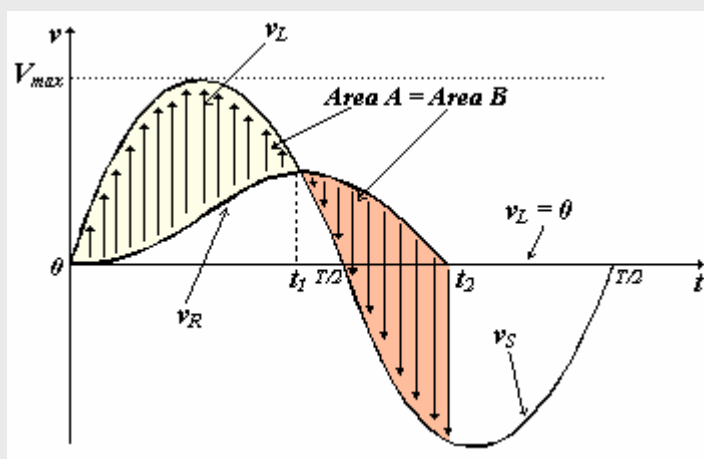
Solución:

- Considerando el comportamiento de la bobina por tramos, como nos muestra la figura:

0-t₁: Área A, tiempo en que la bobina se carga progresivamente con una tensión $L(di_C/dt)$. La intensidad que recorre el circuito es proporcionada por la fuente.

t₁-T/2: Fragmento restante del semiciclo positivo de v_s , en este caso la bobina tiene una tensión superior a la de la fuente, cambiando la polaridad de la misma y manteniendo en conducción al diodo.

T/2-t₂: Estará dentro del semiciclo negativo de v_s , y seguiremos teniendo corriente en la carga ocasionada por el cambio de polaridad mantenido por bobina, debido a la energía almacenada que tiende a cederla

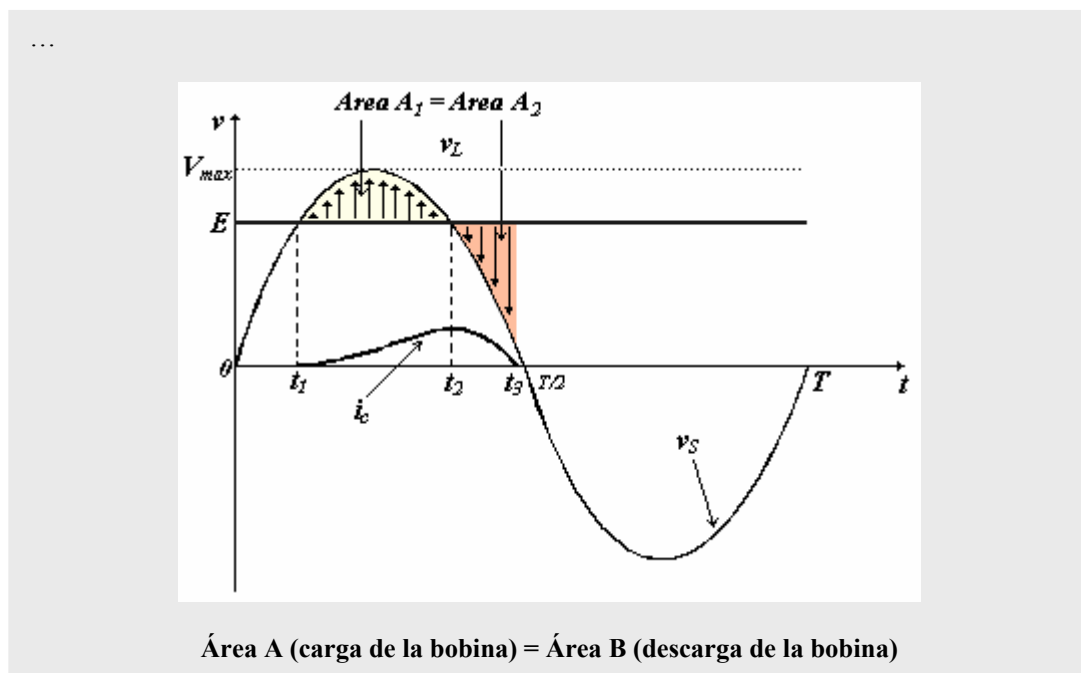


Área A (energía almacenada) = Área B (energía cedida)

- En la gráfica se pueden observar las dos áreas iguales que corresponden a la carga y descarga de la inductancia. Idealmente la bobina no consume potencia, almacena y cede esa energía.

t₁-t₂: Es el área A, donde la tensión de la fuente es superior al valor de la f.e.m. en la carga, provocando la corriente del circuito y el efecto de carga de la bobina.

t₁-t₂: La tensión de la fuente tendrá un valor inferior al de la f.e.m., aunque circula corriente en la carga debido a la descarga de la bobina.



7.2.4 RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA, CON DIODO VOLANTE

El montaje se obtiene a partir de un rectificador monofásico de media onda con carga RL, al que se le ha añadido un diodo en paralelo con la carga y que recibe el nombre de “diodo volante”.

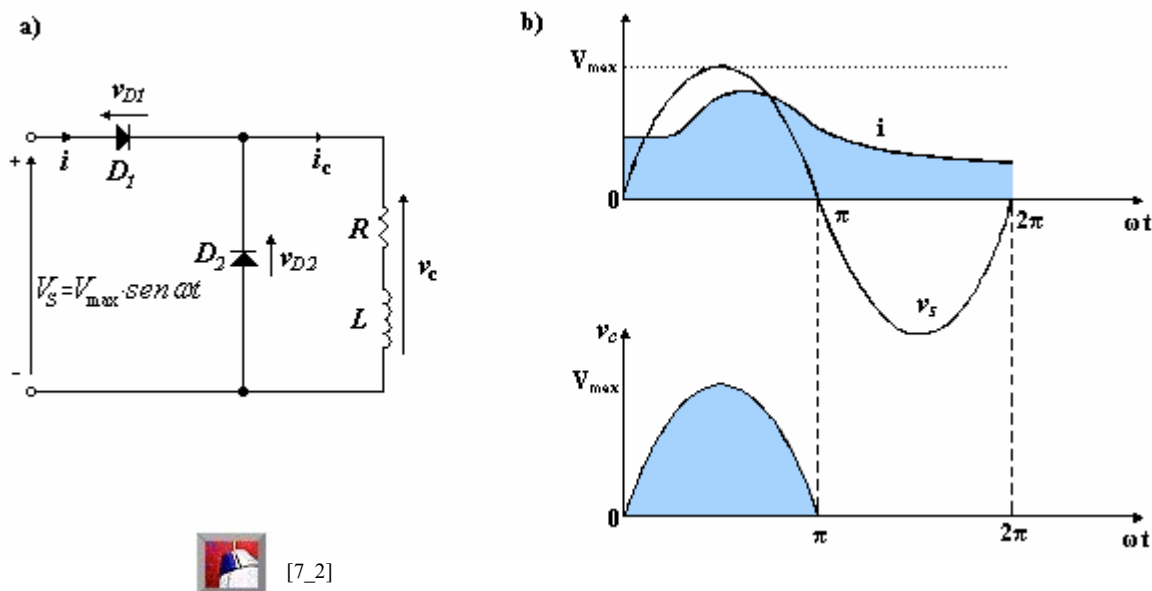


Fig 7. 8 a) Montaje del rectificador monofásico de media onda con carga RL y diodo volante, b) Formas de onda del circuito

La tensión en la carga valdrá v_s o cero según conduzca uno u otro diodo, así que D_1 y D_2 formarán un conmutador.

Para $0 < \omega t < \pi$: En este intervalo será el diodo D_1 el que conduzca;

$$v_c = v_s \quad i = i_c \quad v_{D2} = -v_s < 0$$

La ecuación de malla del circuito nos servirá para deducir el valor de i_c :

$$R i_c + L \left(\frac{di_c}{dt} \right) = V_{\max} \text{Sen} \omega t \quad i_c(t=0) = i_0$$

Para $\pi = \omega t < 2\pi$: Ahora será el diodo D_2 el que conduzca;

$$V_C = 0 \quad i = 0 \quad v_{D1} = v_S < 0 \quad i_c = i_c(\pi) e^{\frac{-\omega t + \pi}{Q}}$$



PROBLEMA 7.7

Determine la corriente y la tensión media en la carga y la potencia absorbida por la resistencia en el circuito de la figura 7.8.a, donde $R = 2 \Omega$ y $L = 25\text{mH}$. $V_m = 100\text{V}$ y la frecuencia es de 60Hz



Problema7_7.cir

PSpice

Solución: $V_0 = 31,8\text{V}$; $I_0 = 15,9\text{A}$; $P = 534\text{W}$

[Hart]

7.2.5 RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA, CON DIODO VOLANTE, ALIMENTANDO UNA CARGA RLE

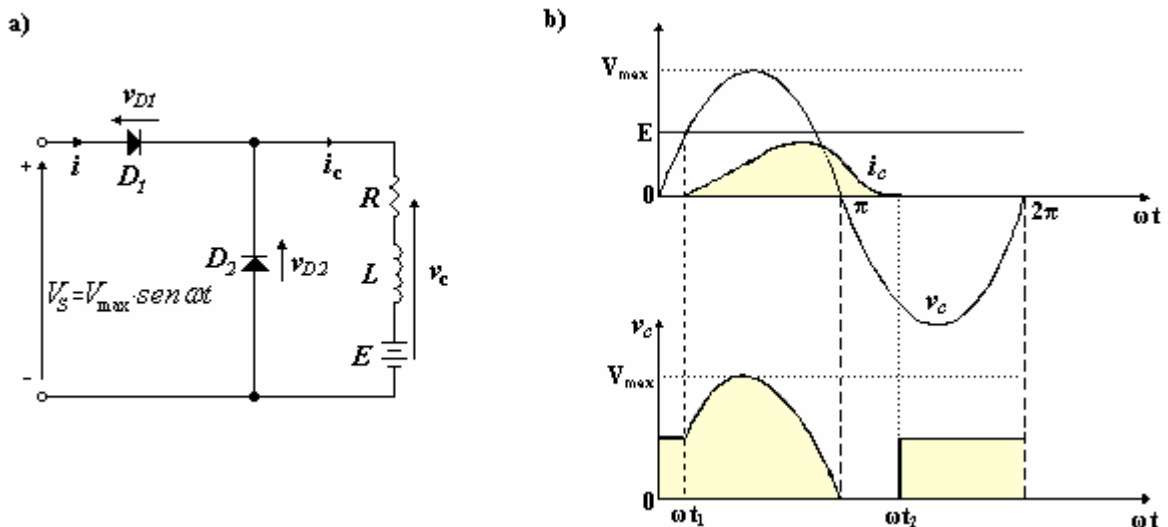


Fig 7.9 a) El montaje lo hemos obtenido al añadir al circuito del rectificador monofásico de media onda con carga RLE, un diodo volante;

b) Formas de onda del circuito rectificador monofásico de media onda con diodo volante y carga RLE.



[7_3]



[7_4]

El hecho de colocar este diodo volante D_2 , hace que la tensión v_C no pueda hacerse negativa. Este diodo hará su función para valores de m y Q , para los que ωt sea superior a π .

Para $0 < \omega t < \pi$: D_1 conducirá para el valor de $\text{Sen} \omega t_1 = 0$.

Para $\pi < \omega t < \omega t_2$: Será D_2 el que conduzca.

7.3 Rectificador controlado monofásico de media onda

Los rectificadores controlados reciben este nombre por que utilizan un dispositivo de control, en este caso el tiristor. Utilizan los mismos montajes que se usan para los no controlados pero sustituyendo los diodos por tiristores parcial o totalmente. La ventaja de colocar tiristores viene dada por la capacidad de estos de retardar su entrada en conducción, sucediendo esta cuando la tensión en sus bornes sea positiva y además reciba un impulso en su puerta.

El ángulo de retardo α es un parámetro fundamental, ya que actuando sobre él es posible hacer variar la relación entre el valor de la tensión rectificada de salida y el valor de las tensiones alternas de la entrada, de ahí el calificativo de “controlados”.

En los rectificadores controlados, por lo tanto, se controla el cebado del tiristor y el bloqueo será natural.

7.3.1 RECTIFICADOR CONTROLADO MEDIA ONDA: CARGA RESISTIVA

En este montaje, con el cambio del diodo por un tiristor podremos tener un control sobre el valor medio de la tensión en la carga cuando tengamos una tensión de ánodo positiva respecto al cátodo y se le proporcione a la puerta un impulso de cebado.

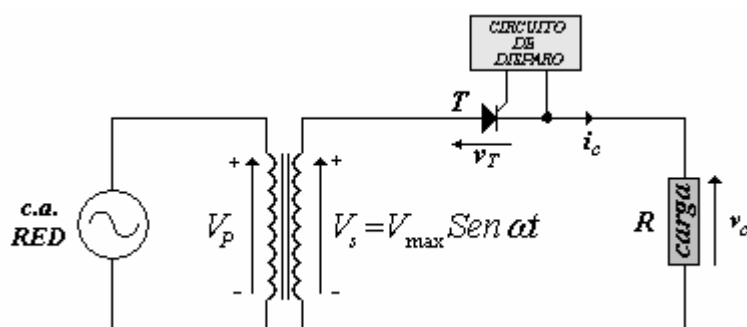


Fig 7. 10
Circuito rectificador controlado monofásico de media onda. La diferencia respecto al circuito no controlado es el cambio del diodo por un tiristor.

Durante el semiciclo positivo de la tensión de entrada, la tensión de ánodo es positiva respecto a la de cátodo, así que estará preparado para entrar en conducción. Cuando el tiristor es disparado para $\omega t = \alpha$, este empieza a conducir, haciendo que circule por la carga la corriente del secundario. En el instante $\omega t = \pi$, la tensión del secundario empieza a ser negativa, lo que provoca el paso a corte del tiristor por ser la tensión de ánodo negativa con respecto a la de cátodo. En este caso α (ángulo de retardo), será el tiempo que pasa desde que la tensión del secundario empieza a ser positiva hasta que se produce el disparo del tiristor en $\omega t = \alpha$.

El uso en la industria de este tipo de rectificador es casi nulo debido a sus bajas prestaciones, como por ejemplo una señal a la salida de gran rizado y de baja pulsación.

La región de funcionamiento se muestra en la siguiente figura:

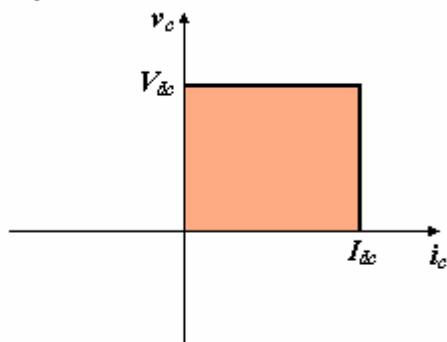


Fig 7. 11
Cuadrante de funcionamiento para el rectificador controlado monofásico de media onda. Podemos apreciar como la tensión de salida y la intensidad tienen una sola polaridad.

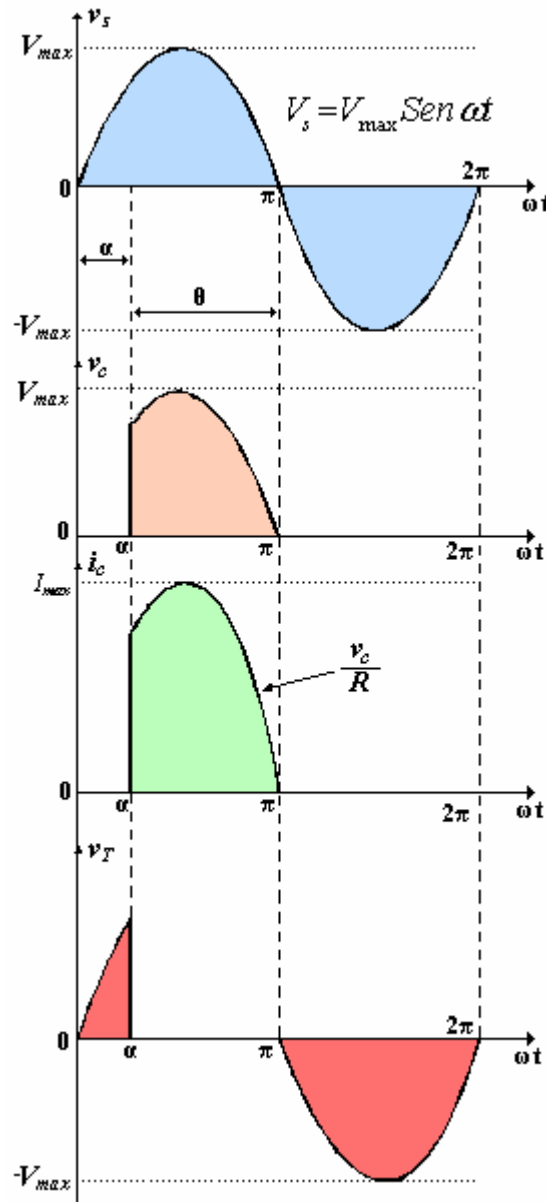


Fig 7. 12

Formas de onda del rectificador controlado monofásico de media onda. Podemos observar la tensión en el secundario, tensión en la carga, intensidad en la carga y tensión en extremos del tiristor. Todo estará representado para un ángulo de retardo α , por lo que tendremos un ángulo de conducción en la carga θ . El sistema de disparo deberá suministrar impulsos con desfase variable respecto a la tensión en el secundario y con la frecuencia de esta; con ello conseguimos regular el valor de tensión en la carga.

Tensión media en la carga: Si V_{\max} es la tensión en el secundario, tenemos que:

$$V'_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{\max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{E 7.18}$$

Para $\alpha = 0^\circ$, la tensión media en la carga será V_{dc} y su valor: $V_{dc} = \frac{V_{\max}}{\pi}$

Y el valor normalizado valdrá:

$$V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \quad \text{E 7.19}$$

Tensión eficaz en la carga:

$$V'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 d\omega t} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \text{Cos} 2\omega t}{2} d\omega t} =$$

$$= \frac{V_{\max}}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{1}{2} \left(\omega t - \frac{1}{2} \text{Sen} 2\omega t \right) \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{\max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{Sen}(2\alpha)}$$

E 7.20

Para $\alpha = 0^\circ$, la tensión eficaz será V_{rms} y su valor: $V_{rms} = \frac{V_{\max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi} = \frac{V_{\max}}{2}$

y el valor normalizado valdrá:

$$V_{n(rms)} = \frac{V'_{rms}}{V_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{Sen}(2\alpha)}$$

E 7.21

Tensión inversa de pico soportada por el tiristor: Esta tensión será la máxima de entrada para $\alpha \leq \pi/2$, por lo tanto:

$$PIV = V_{\max}$$

E 7.22

Corriente media en la carga:

$$I'_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_{\max} \text{Sen} \omega t d\omega t = \left(\frac{I_{\max}}{2\pi} \right) (1 + \text{Cos} \alpha) \rightarrow I'_{dc} = \frac{V'_{dc}}{R}$$

E 7.23

Corriente eficaz en la carga:

$$I'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (I_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 d\omega t} = \left(\frac{I_{\max}}{2} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)} \rightarrow I'_{rms} = \frac{V'_{rms}}{R}$$

E 7.24

PROBLEMA 7.8

Dado un rectificador controlado monofásico de media onda con carga resistiva, cuyo esquema es el mostrado en la figura 7.10.

Calcular lo siguiente:

- Tensión de pico en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Potencia alterna en la carga.

DATOS: $R=20 \Omega$; $V_S=240V$; $\alpha = 40^\circ$

Solución:

La tensión de pico en la carga corresponderá con la tensión máxima suministrada por el secundario:

$$V_{p(carga)} = V_{\max} = \sqrt{2} V_S = (1,414)(240) = 339,4V$$

- La corriente de pico en la carga se correspondería con la intensidad máxima y se podría obtener de la tensión máxima:

$$I_{P(carga)} = I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} = \frac{339,4}{20} = 16,97V$$

...

b) Usando la ecuación [E7.18] obtenemos la tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \left(\frac{V_{\max}}{2\pi} \right) (1 + \cos \alpha) = \left(\frac{339,4}{2\pi} \right) (1 + \cos 40^\circ) = 95,4V$$

c) La corriente media en la carga la calcularemos usando la ecuación del apartado anterior, pero sustituyendo V_{\max} por I_{\max} :

$$I'_{dc} = 4,77 A$$

d) La corriente eficaz en la carga se calcula usando la ecuación [E7.24]:

$$I'_{rms} = \left(\frac{I_{\max}}{2} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} = 8,20 A$$

e) La potencia alterna en la carga será:

$$P_{ac} = (I'_{rms})^2 R = 1345W$$



Cuestión didáctica 7.1

Dados el circuito a simular y el listado de un rectificador controlado monofásico de media onda con carga resistiva, obtener mediante Pspice las formas de onda de: V_c , i_c , V'_{dc} , I'_{dc} , I'_{rms} , P'_{ac} .

CD7_1: RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFASICO DE MEDIA ONDA

*DEFINICION DE PARAMETROS

.PARAM VM={240*SQRT(2)}; VALOR DE LA TENSIÓN DE PICO DE ENTRADA

.PARAM ALFA=40; GRADOS DEL ANGULO DE RETARDO

.PARAM RETARDO={ALFA*20MS/360}; RETARDO EN SEGUNDOS

.PARAM PW={1MS}

VS 1 0 SIN (0V {VM} 50HZ 0S 0S 0DEG); SEÑAL ENTRADA

Vg 4 2 PULSE (0V 10V {RETARDO} 1NS 1NS {PW} 20MS); PULSO EN PUERTA SCR

*CARGA

R 2 3 20HM

VX 3 0 DC 0V

XT1 1 2 4 2 SCR

* SUBCIRCUITO DEL SCR

* Insertar subcircuito del SCR

.TRAN 20US 100MS 0MS 20US

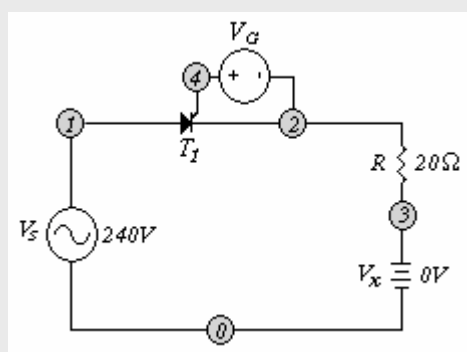
.PROBE

.OPTIONS ABSTOL=1.0N RELTOL=1.0M VNTOL=1.0M ITL5=100000

.END



PSpice



PROBLEMA 7.9

Dado un rectificador monofásico controlado de media onda con carga puramente resistiva y con un ángulo de retardo $\alpha = \pi/2$.

Calcular lo siguiente:

- La eficiencia de la rectificación.
- Factor de forma.
- Factor de rizado.
- Factor de utilización del transformador.
- La tensión inversa de pico en el diodo (PIV).

Solución:

Ayudándonos de las ecuaciones vistas a lo largo del estudio, hemos obtenido los siguientes resultados:

$$V'_{dc}=0,1592V_{max}; I'_{dc}=(0,1592V_{max})/R; V_{n(dc)}=0,5; V'_{rms}=0,3536V_{max}; I'_{rms}=(0,3536V_{max})/R; P'_{dc}=V'_{dc}I'_{dc}=(0,1592V_{max})^2/R; P'_{ac}=V'_{rms}I'_{rms}=(0,3536V_{max})^2/R.$$

- a) La eficiencia será:

$$\eta = \frac{P'_{dc}}{P'_{ac}} = \frac{(0,1592V_{max})^2}{(0,3536V_{max})^2} = 0,2027 \rightarrow (20,27\%)$$

- b) El factor de forma valdrá:

$$FF' = \frac{V'_{rms}}{V'_{dc}} = \frac{0,3536}{0,1592} = 2,221 \rightarrow (222,1\%)$$

- c) Calculamos ahora el factor de rizado:

$$RF' = \sqrt{FF'^2 - 1} = 1,983 \rightarrow (198,3\%)$$

- d) Para calcular el factor de utilización necesitamos obtener antes lo siguiente:

$$\text{Tensión eficaz en el secundario} \rightarrow V_s = V_{max} / \sqrt{2} = 0,707V_{max}$$

$$\text{Intensidad eficaz en el secundario} \rightarrow I_s = 0,3536V_{max} / R$$

(El valor eficaz de la intensidad por el secundario será igual a la que circule por la carga.)

$$\text{Potencia aparente del transformador} \rightarrow S = V_s I_s = 0,707V_{max} \frac{0,3536V_{max}}{R}$$

$$TUF = \frac{P'_{dc}}{V_s I_s} = \frac{(0,1592)^2}{(0,707)(0,3536)} = 0,1014 \rightarrow \frac{1}{TUF} = 9,86$$

- e) La tensión inversa de pico en el tiristor será:

$$PIV = V_{max}$$

7.3.2 RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA CON CARGA INDUCTIVA

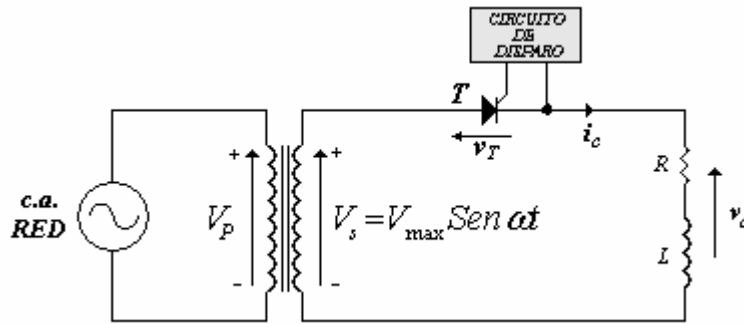


Fig 7. 13
Rectificador controlado monofásico de Media Onda con carga RL.

El tiristor empieza a conducir para $\omega t = \alpha$, que será el retardo que introduzca el circuito de disparo. Esto provoca la circulación de corriente y un voltaje en la bobina y en la resistencia v_L y v_R respectivamente:

$$v_L = L \frac{di_C}{dt} = v_S - v_R \quad v_R = R i_C$$

En la siguiente gráfica podemos apreciar que:

- Para valores entre α y ωt_1 , v_L es positiva.
- Cuando $\omega t = \omega t_1$, v_L se hace negativa y la corriente empieza a disminuir.
- Para $\omega t = \omega t_2$ la corriente se anula y se cumplirá que $A_1 = A_2$ (el área A_1 es la tensión acumulada en la bobina, y el área A_2 será la descarga de tensión de la bobina sobre la resistencia y la tensión de entrada con la carga actuando como generador).

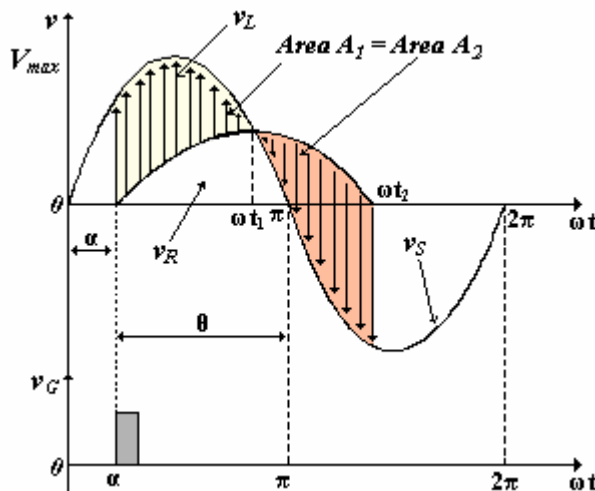


Fig 7. 14
Formas de onda del rectificador controlado monofásico de media onda con carga RL.
En la carga habrá corriente para $\alpha < \omega t < \omega t_2$, donde ωt_2 es el punto representado en la figura en el cual cesa la corriente. Durante el tiempo que circula intensidad por la carga se cumple que $v_c = v_s$.

- ❖ **Expresión de la corriente instantánea en la carga:** A partir del disparo del tiristor se cumple en el circuito la siguiente ecuación:

$$R i_C + L \frac{di_C}{dt} = V_{\max} \text{Sen} \omega t$$

Para $i_C(\omega t = \alpha) = 0$:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{Z} \left[\text{Sen}(\omega t - \varphi) - \text{Sen}(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{Q}} \right]$$

E 7.25

donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad \varphi = \arcsen\left(\frac{L\omega}{Z}\right) \quad Q = \tan \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

La corriente se anulará para un ωt_2 que cumpla:

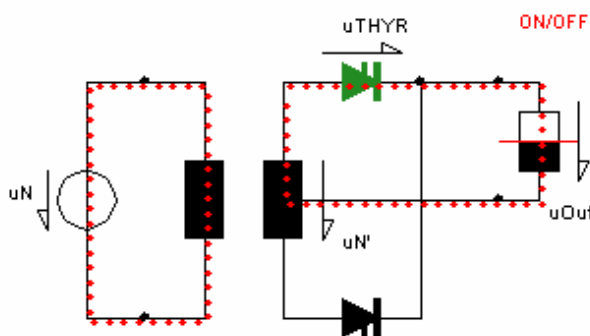
$$\text{Sen}(\omega t_2 - \varphi) = \text{Sen}(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t_2}{Q}}$$

E7.26



www.ipes.ethz.ch

Rectificador de media onda monofásico con transformador con toma media en el secundario



PROBLEMA 7. 10

Un rectificador controlado monofásico de media onda con carga RL, como el mostrado en la figura 7.13, es conectado a una tensión de secundario $V_s=240V$, 50Hz, y a una carga $L=0,1H$ en serie con $R=10\Omega$. El tiristor se dispara con $\alpha=90^\circ$ y se desprecia la caída de tensión del mismo en directo.

Calcular lo siguiente:

- La expresión que nos da la corriente instantánea en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Coefficientes de Fourier de la corriente de entrada i_s , y el factor de potencia de entrada PF, con ayuda de Pspice.

DATOS: $V_s = 240V$; $f = 50Hz$; $R = 10\Omega$; $L = 0,1H$

Solución:

Calculamos los valores máximos de la tensión de secundario y la intensidad:

$$V_{\max} = 240\sqrt{2} = 339,4V \quad I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} = \frac{339,4}{10} = 33,94A$$

- Usando la ecuación [E7.25] y sustituyendo en ella los siguientes valores:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} = 32,97\Omega; \quad \varphi = \arcsen\left(\frac{L\omega}{Z}\right) = 72,3^\circ = 1,262rad;$$

$$Q = \tan \varphi = 3,135; \quad \alpha = 90^\circ = 1,571rad; \quad \omega = 2\pi f;$$

...

...

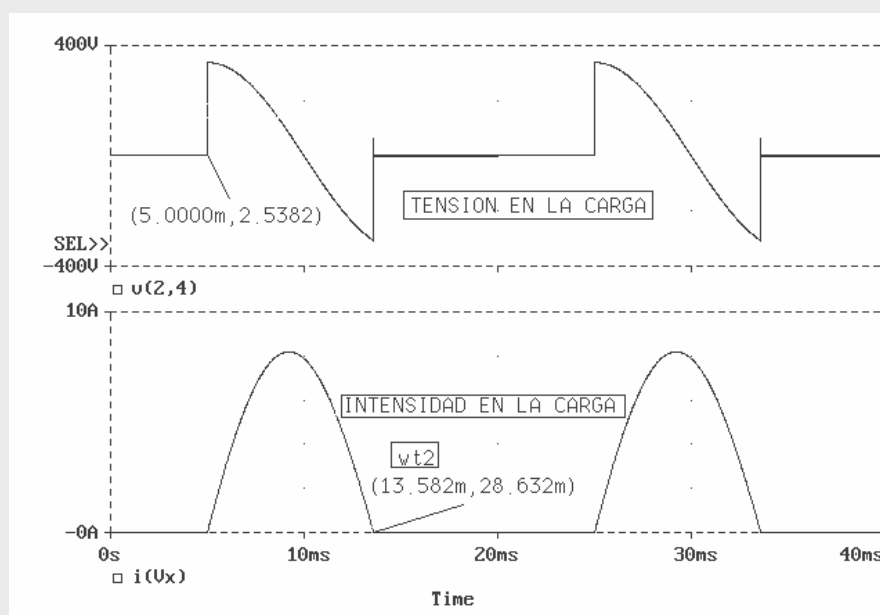
$$i_c = 10,30 \left[\text{Sen}(314,16t - 1,262) - 0,304e^{\frac{1,571-394,16t}{3,135}} \right]$$

b) La tensión media en la carga será:

$$V'_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{90^\circ}^{\omega t_2} 339,4 \text{Sen} \omega t \, d\omega t$$

Por tanteo y ayudados por la expresión [E7.26], obtenemos que $t=0,0136\text{sg}$ para un ángulo en el que se anula la corriente i_c , $\omega t_2=245^\circ$. Por lo tanto ya podemos resolver la ecuación de la tensión media en la carga obteniendo: $V'_{dc} = 22,8V$

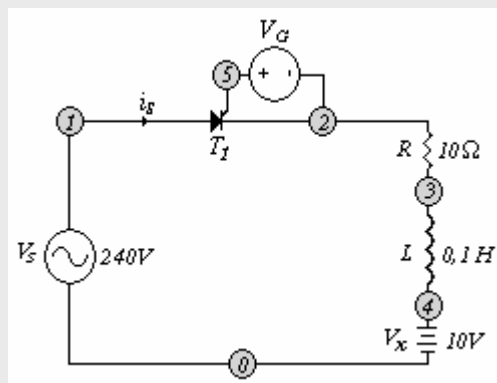
Para verlo más claro nos ayudamos de la simulación por Pspice, donde se aprecia un valor de $t = 13,582\text{mseg}$, muy similar al obtenido por tanteo:



c) La intensidad en la carga será:

$$I'_{dc} = \frac{V'_{dc}}{R} = \frac{22,8}{10} = 2,28A$$

d) Para la obtención de los coeficientes de Fourier y el factor de potencia tenemos el montaje y el listado para la simulación mediante Pspice:



...

Problema7_10: RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO DE M.O. CON CARGA RL

VS	1	0	SIN (0V 339.4V 50HZ 0S 0S 0DEG)
VG	5	2	PULSE (0V 10V 5MS 1NS 1NS 100US 20MS)
R	2	3	10HM
L	3	4	0.1H
VX	4	0	DC 0V
XT1	1	2	5 2 SCR

* Insertar subcircuito del SCR


.TRAN 20US 80MS 0MS 20US

.PROBE

.OPTIONS ABSTOL=1.0N RELTOL=1.0M VNTOL=1.0M ITL5=10000

.FOUR 50HZ I(VX)

.END


 PSpice

7.3.3 RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA CON DIODO VOLANTE Y CARGA INDUCTIVA

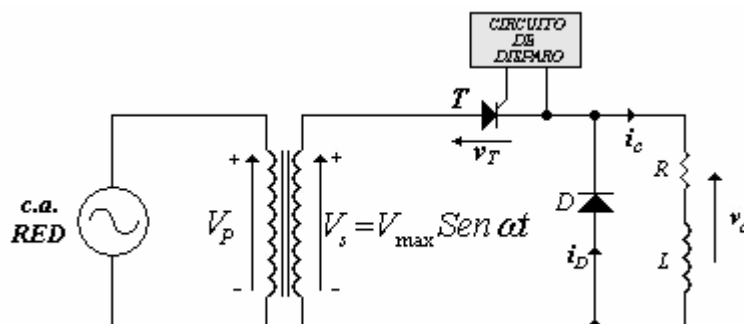


Fig 7. 15
Rectificador controlado monofásico de media onda con diodo volante y carga inductiva. Cuando la carga es muy inductiva, conviene poner un diodo en paralelo con la carga, el cual evita la presencia de tensiones inversas en la carga.

Mientras el tiristor está conduciendo, la intensidad en la carga viene dada por la ecuación:

$$v_c = R i_c + L \left(\frac{di_c}{dt} \right)$$

Cuando la tensión del secundario se haga negativa, en la carga la tensión se anulará y la corriente decrecerá exponencialmente. Si observamos las formas de onda de la figura 7.16, apreciamos que si el valor de la corriente disminuye por debajo del valor de mantenimiento, la corriente en la carga se hará discontinua (disparo del tiristor para α grande, figura “b”). En la figura “a”, cuando se produce el disparo del tiristor en el siguiente ciclo de la tensión de entrada, aún existe circulación de corriente en la carga, así que tendremos conducción continuada (α pequeño).

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_{\max} \text{Sen} \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{2\pi} (1 + \text{Cos} \alpha)$$

E 7.27

Por lo tanto, cuando se dispara el tiristor con α elevado, menor será el valor de la tensión media en la carga, siendo cero para $\alpha = 180^\circ$.

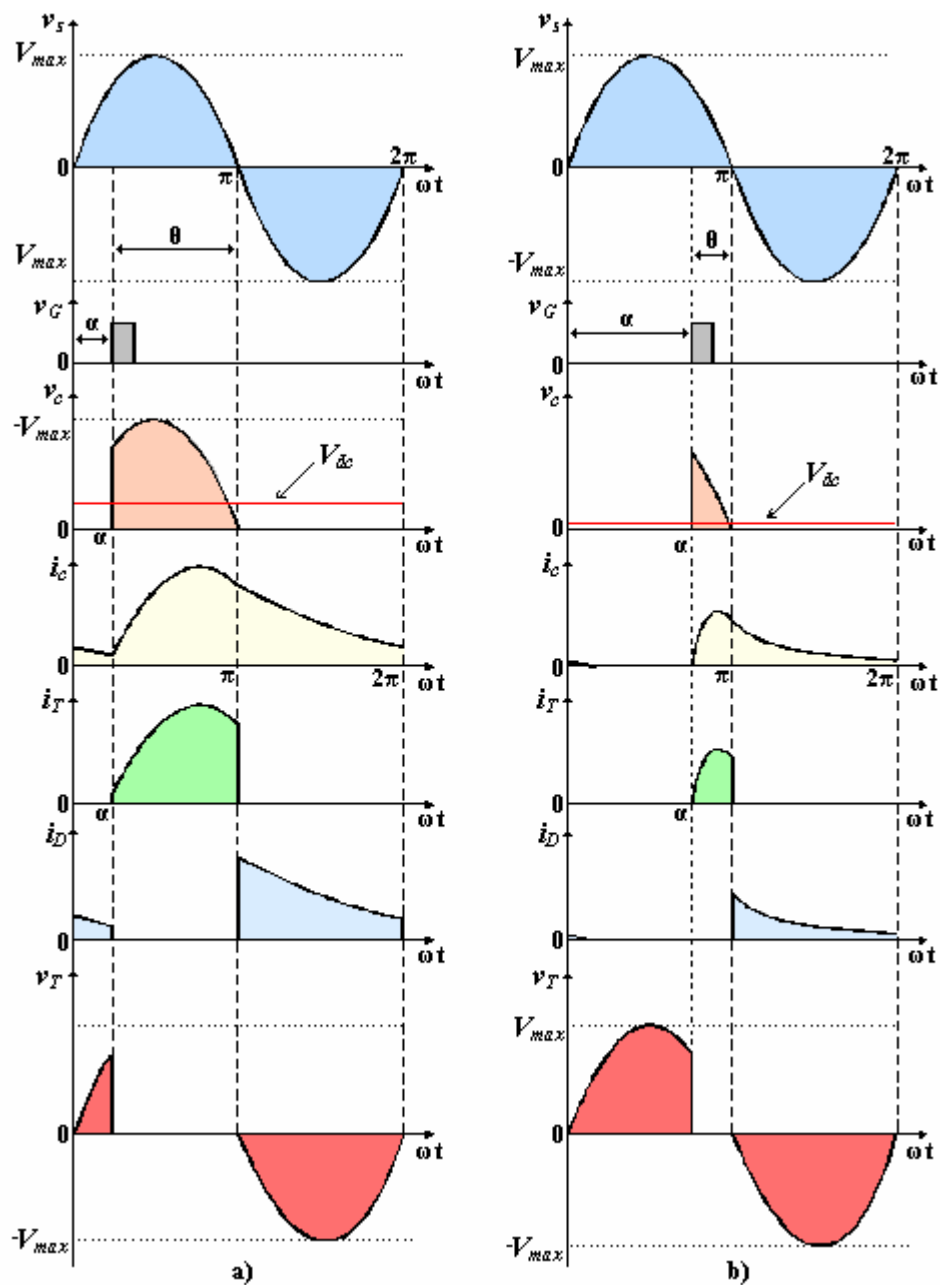


Fig 7. 16

Formas de onda en un rectificador monofásico de media onda con carga inductiva y diodo volante:

- Con un ángulo de retardo α pequeño.
- Con un ángulo de retardo α grande.

El hecho de colocar un diodo volante tiene dos grandes ventajas:

- Prevenir de posibles valores negativos de tensión en la carga.
- Permitir que el tiristor pase al estado de bloqueo una vez alcanzada la tensión de secundario valor cero; entonces se deja de transferir intensidad a la carga mediante el tiristor.

PROBLEMA 7. 11

Un rectificador controlado monofásico de media onda con diodo volante, es usado para proporcionar a una carga altamente inductiva unos 15A, con una tensión de alimentación de 240V eficaces. Despreciando la caída de tensión en el tiristor y en el diodo.

Calcular lo siguiente:

- Tensión media en la carga para los ángulos de retardo: 0° , 45° , 90° , 135° , 180° .
- Especificar requisitos de intensidad eficaz y tensión inversa de pico que tiene que soportar el tiristor (PIV_T).
- Especificar requisitos de intensidad eficaz y tensión inversa de pico que tiene que soportar el diodo (PIV_D).

Solución:

- Con la ecuación estudiada anteriormente, hallamos la tensión media en la carga para los distintos valores de α dados:

$$V'_{dc} = \frac{V_{\max}}{2\pi} (1 + \cos \alpha), \text{ donde } V_{\max} = 240\sqrt{2} = 339,4 \text{ V}$$

α	0°	45°	90°	135°	180°
V_{dc}	108 V	92	54 V	16 V	0 V

- Los requisitos para el tiristor serán:

- La tensión inversa de pico que debe soportar el tiristor coincidirá con la tensión máxima de alimentación:

$$PIV_T = V_{\max} = 339,4V$$

- La corriente eficaz que atravesaría el tiristor suponiendo que esté conduciendo durante todo el periodo de la señal sería de 15A. Sin embargo, será para $\alpha=0^\circ$ el tiempo máximo que estará conduciendo, ya que para este valor conducirá medio semiciclo. Por lo tanto la corriente eficaz para medio semiciclo será:

$$I_{T(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi 15^2 d\omega t} = 10,6A$$

- Los requisitos para el diodo serán:

- La tensión inversa a soportar será:

$$PIV_D = V_{\max} = 339,4V$$

- El valor eficaz de corriente que conviene que soporte será de 15A, ya que cuando el ángulo de disparo del tiristor tiene valores cercanos a 180° , el diodo puede conducir para casi todo el periodo de la tensión de alimentación:

$$I_{D(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 15^2 d\omega t} = 15A$$

7.3.4 RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA: CARGA RLE

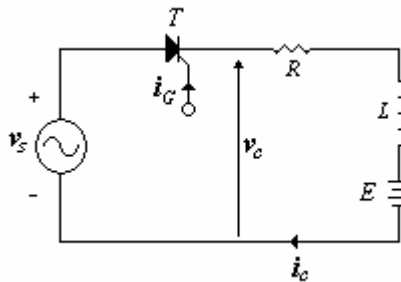


Fig 7. 17

Montaje para el rectificador controlado monofásico de media onda con carga RLE.

Para el estudio, vamos a definir los siguientes parámetros:

- **m** : relación entre la F.E.M. y la V_{\max} del secundario $\rightarrow m = E/V_{\max}$
- **λ y λ'** : ángulos para los que la tensión en el secundario es igual al valor de la F.E.M. $\rightarrow (V_{\max} \text{Sen}\lambda = E; V_{\max} \text{Sen}\lambda' = E)$

$$\lambda = \arcsen\left(\frac{E}{V_{\max}}\right) = \arcsen m \quad \lambda' = \pi - \lambda$$

Debemos aprovechar el momento en que la tensión alterna en el secundario, menos la tensión E de la batería, tenga un valor positivo para aplicar un impulso a la puerta del tiristor y que este pase a conducir. Esto significa que el disparo se ha de producir entre λ y λ' para que $V_{ak} > 0$.

$$V_{\max} \text{Sen}\alpha - E \geq 0 \rightarrow V_{\max} \text{Sen}\alpha \geq E \rightarrow \text{Sen}\alpha \geq \frac{E}{V_{\max}} \rightarrow \alpha \geq \arcsen\left(\frac{E}{V_{\max}}\right)$$

Si el disparo se produce antes de que se cumpla esta condición para α , y el impulso fuera de corta duración, el tiristor no conduciría.

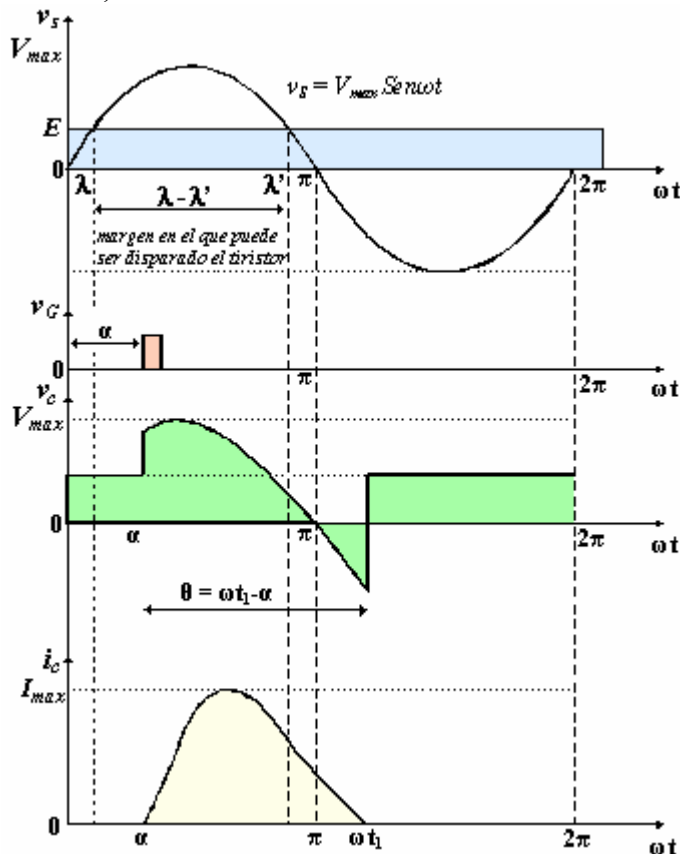


Fig 7. 18

Formas de onda para el rectificador controlado monofásico de media onda con carga RLE. Están representadas la tensión del secundario, impulso de disparo en puerta, tensión en la carga e intensidad en la carga.

Si el disparo se produce para un ángulo de retardo α , tal que $\lambda \leq \alpha \leq \lambda'$, se cumplirá que:

$$V_{\max} \text{Sen} \omega t - E = R i_c + L \left(\frac{di_c}{dt} \right)$$

Y de esta ecuación, para $i_{c(\omega t=\alpha)} = 0$ obtenemos:

$$i_c = -\frac{E}{R} + \frac{V_{\max}}{Z} \left[\text{Sen}(\omega t - \varphi) + \left[\frac{E}{R V_{\max}} - \text{Sen}(\alpha - \varphi) \right] e^{\frac{\alpha - \omega t}{Q}} \right] \quad \text{E 7.28}$$

Sabiendo que:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}; \quad \text{Sen} \varphi = \frac{L \omega}{Z} \rightarrow \varphi = \arcsen \left(\frac{L \omega}{Z} \right); \quad Q = \text{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R}$$

Si θ es el ángulo de conducción, la corriente se anulará para un ángulo $\omega t = \alpha + \theta = \omega t_1$, y así se cumplirá que:

$$\text{Sen} \omega t_1 - Q \text{Cos} \omega t_1 = m + m Q^2 - \left(m Q^2 + Q \sqrt{1 - m^2} \right) e^{\frac{\alpha - \omega t_1}{Q}} \quad \text{E 7.29}$$

7.4 Rectificadores monofásicos de onda completa

7.4.1 RECTIFICADOR CON TRANSFORMADOR DE TOMA INTERMEDIA

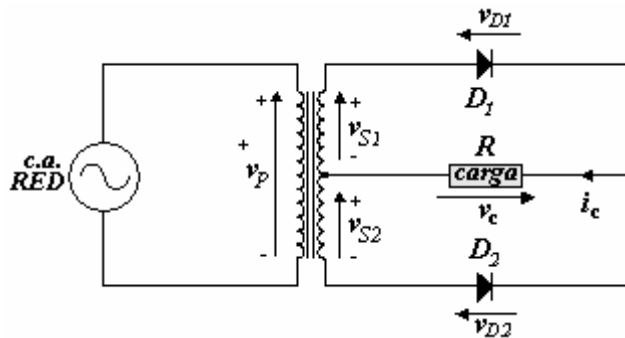


Fig 7.19
Montaje para el rectificador con transformador de toma intermedia.

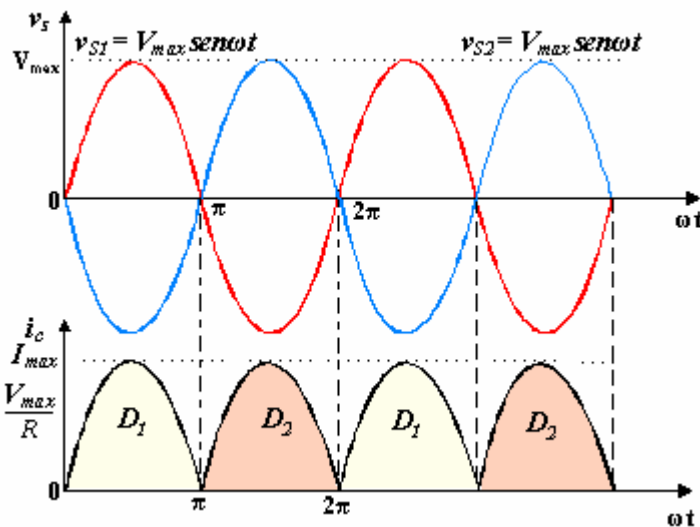


Fig 7.20
Formas de onda.

Para este montaje se utiliza un transformador con toma intermedia, que será el encargado de proporcionarnos dos tensiones (v_{S1} y v_{S2}), de igual magnitud y con un desfase entre ellas de 180° .

Tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{\max} \text{Sen} \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{\pi} [-\text{Cos} \omega t]_0^{\pi} = \frac{2V_{\max}}{\pi} = 0,636V_{\max}$$

E 7.30

Tensión eficaz en la carga:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (V_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707V_{\max}$$

E 7.31

Regulación: Vamos a considerar la resistencia del devanado secundario (Rs) y del diodo (Rd):

$$V_{dc}(\text{en plena carga}) = \frac{2V_{\max}}{\pi} - I_{dc}(Rs + Rd)$$

$$r(\%) = \frac{V_{dc}(\text{en vacío}) - V_{dc}(\text{en plena carga})}{V_{dc}(\text{en plena carga})} \times 100 = \left(\frac{2V_{\max}}{\pi} - I_{dc}(Rs + Rd) \right) \times 100$$

E 7.32

Factor de forma:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_{\max}/\sqrt{2}}{2V_{\max}/\pi} = 1,11 \rightarrow (111\%)$$

E 7.33

Factor de rizado:

$$FR = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}} \right)^2} - 1 = 0,482 \rightarrow (48,2\%)$$

E 7.34

Si comparamos este último resultado con el factor de rizado del rectificador de media onda (121%), podemos observar que se ha producido una considerable reducción.

V_{RRM}: Es fácil demostrar que el valor de tensión de pico inverso máximo que soportarán cada uno de los diodos que forman éste montaje se corresponde con 2 V_{Smax}.

Corriente en los diodos:

$$I_{dc(D_1)} = I_{dc(D_2)} = \frac{I_{\max}}{\pi} \quad I_{rms(D_1)} = I_{rms(D_2)} = \frac{I_{\max}}{2\sqrt{2}}$$

E 7.35

Potencia aparente en el secundario (S):

$$S = 2V_S I_S = (2)(0,707)V_{\max} \cdot \frac{V_{\max}}{2R}$$

E 7.36

Potencia media en la carga:

$$P_{dc} = \frac{(0,636V_{\max})^2}{R}$$

E 7.37

Potencia eficaz en la carga:

$$P_{ac} = \frac{(0,707V_{\max})^2}{R}$$

E 7.38

Rendimiento: también conocido como eficiencia, se obtiene con la relación entre la potencia continua y eficaz en la carga:

$$\eta = \frac{(0,636V_{\max})^2 / R}{(0,707V_{\max})^2 / R} = 0,81 \rightarrow (81\%) \quad \text{E 7.39}$$

Factor de utilización del transformador:

$$TUF = \frac{P_{dc}}{S} = 0,5732 \rightarrow (57,32\%) \quad \text{E 7.40}$$

Después de este análisis hemos podido observar que el rendimiento de este tipo de transformador es el doble del monofásico de media onda, lo cual, unido a la duplicación de la intensidad media, y a la notable reducción del rizado, implica una clara mejora.

Cabe destacar que la frecuencia en el fundamental de media onda era de 50Hz, y ahora, la frecuencia valdrá el doble, o sea 100Hz.

Si hubiera que destacar un inconveniente, este sería el hecho de que los diodos soporten un valor inverso doble al que soportaban para el rectificador de media onda, pero esto tampoco supone un problema grande para los diodos que existen en el mercado.

PROBLEMA 7. 12

Dado un rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia con carga RL, obtener la expresión de la tensión en la carga $v_C(t)$, usando el método de descomposición en series de Fourier.

Solución:

Expresando la tensión de salida v_C en series de Fourier tenemos:

$$v_C(t) = V_{dc} + \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

donde :

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_C(t) d\omega t = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \sin \omega t d\omega t = \frac{2V_{\max}}{\pi}$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_C(t) \cos n\omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \sin \omega t \cos n\omega t d\omega t = \\ &= \frac{4V_{\max}}{\pi} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \frac{-1}{(n-1)(n+1)} \end{aligned}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_C \sin n\omega t d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \sin \omega t \sin n\omega t d\omega t = 0$$

La tensión instantánea en la carga, al sustituir cada término por su valor quedará:

$$v_C(t) = \frac{2V_{\max}}{\pi} - \frac{4V_{\max}}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4V_{\max}}{15\pi} \cos 4\omega t - \frac{4V_{\max}}{35\pi} \cos 6\omega t - \dots$$

7.4.2 PUENTE RECTIFICADOR CON DIODOS

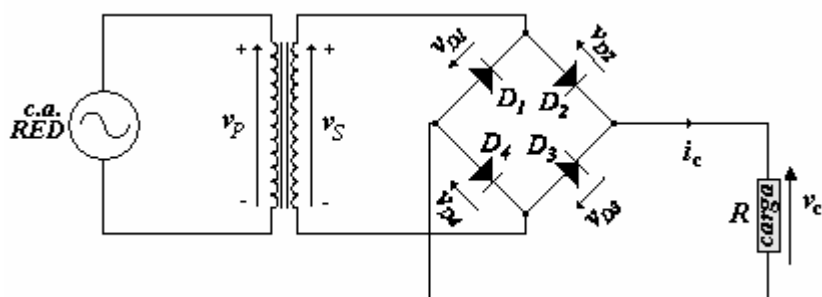


Fig 7.21
Montaje para el puente rectificador con diodos

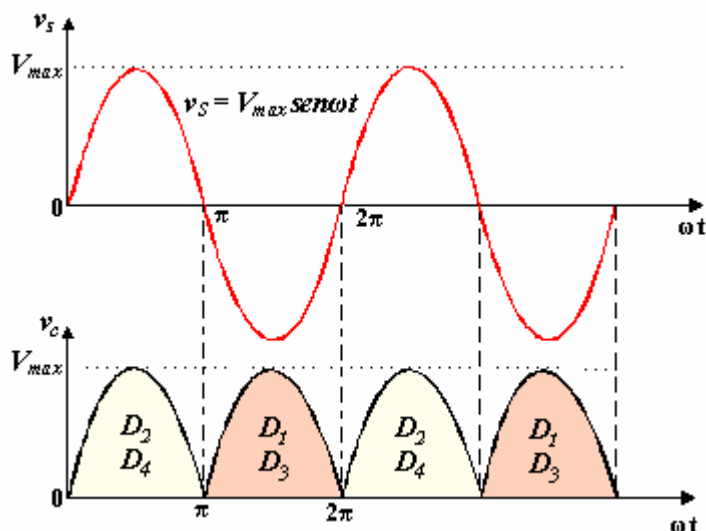


Fig 7.22
Forma de onda en la carga para el puente rectificador con diodos. Como se puede observar, se obtiene en la carga la misma forma de onda que en el caso del rectificador con transformador de toma intermedia.

Recibe el nombre de puente rectificador, por estar formado por cuatro diodos conectados en puente y su principal ventaja respecto al otro rectificador de onda completa es que no necesita transformador de toma intermedia.

Durante el semiciclo positivo de la señal de entrada conducirán D_2 y D_4 , mientras que D_1 y D_3 estarán polarizados inversamente. Así, en el semiciclo negativo sucederá lo contrario.

Los parámetros característicos son prácticamente iguales que para el rectificador con transformador de toma intermedia, excepto la tensión inversa máxima que soporta cada diodo, que en este caso será V_{max} .

Puedes comprobar el funcionamiento de este circuito en la siguiente aplicación Java del Power Electronics Systems Laboratory (IPES), (Rectificadores en puente de diodos monofásicos. Carga Resistiva)



www.ipes.ethz.ch

Rectificadores en puente de diodos monofásicos Carga resistiva

IPES-Home

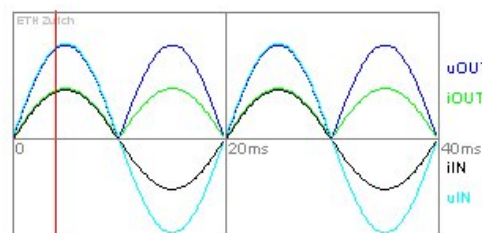
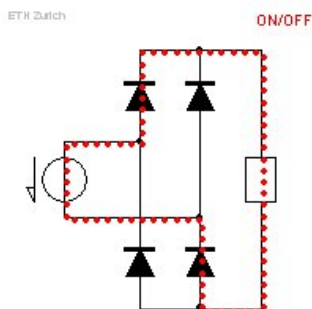


Fig 7.23 Rectificador en puente de diodos monofásicos

Cuestión didáctica 7.2



Dado un puente rectificador monofásico de onda completa, con carga resistiva. Calcular:

- Tensión de pico en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Potencia eficaz en la carga.

DATOS: $R = 20\Omega$; $V_s = 240V$; $f = 50Hz$

Solución: $V_{p(carga)} = 339,4V$; $I_{p(carga)} = 16,97A$; $V_{dc} = 216V$; $I_{dc} = 10,8$; $I_{rms} = 12A$; $P_{ac} = 2880W$

7.4.3 ESTUDIO PARA UNA CARGA RL ALTAMENTE INDUCTIVA

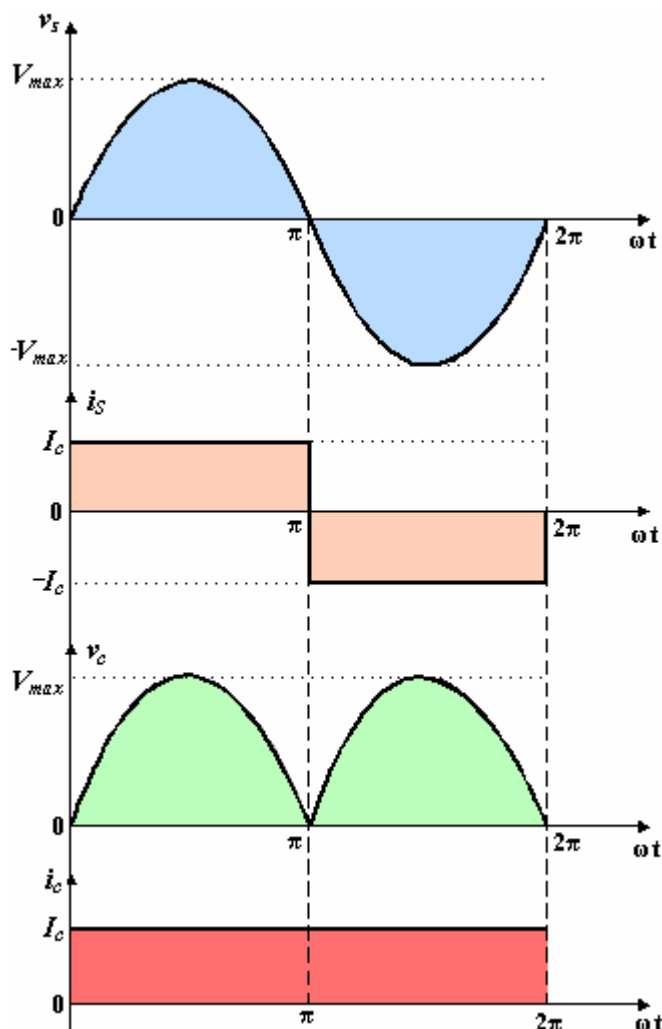


Fig 7. 24
Formas de onda para el puente rectificador monofásico, con carga altamente inductiva.

El efecto de este tipo de carga es fácilmente apreciable mirando las formas de onda. La corriente en la carga será constante y tendrá un valor I_C .

Cuestión didáctica 7.3

Dado un puente rectificador monofásico de onda completa, con carga RL, altamente inductiva.

Calcular:

- Tensión de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Potencia en la carga.
- Corriente media en los diodos.

DATOS: $R = 20\Omega$; $V_s = 240V$; $f = 50Hz$

Solución: $V_{p(carga)} = 339.4V$; $V_{dc} = 216V$; $I_{dc} = 10.8A$; $I_{p(carga)} = 10.8A$; $I_{rms} = 10.8A$;
 $P_c = 2334W$, $I_{D(dc)} = 5.4A$

7.4.4 ESTUDIO PARA UNA CARGA RLE

Cuando introducimos una carga RL, la forma de onda de la intensidad en la carga dependerá de los valores de R y L:

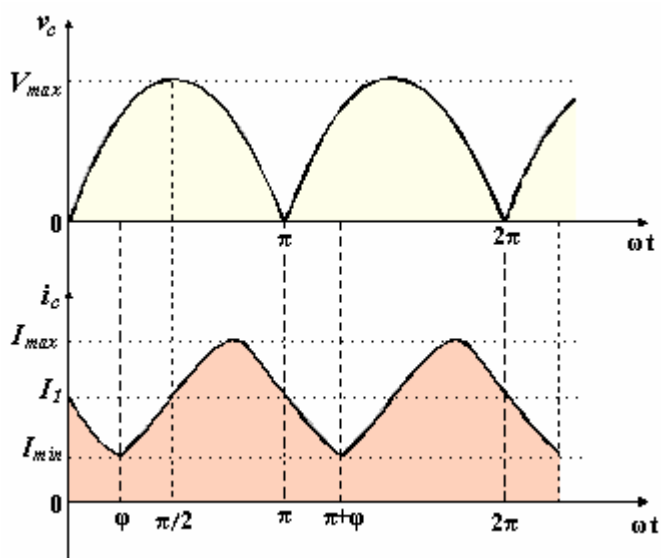


Fig 7.25

Formas de onda en el puente rectificador monofásico con carga RL.

Para el estudio que vamos a realizar añadiremos la tensión de una batería (E) en la carga.

Sabemos que la tensión en el secundario es $V_s = V_{max} \text{Sen} \omega t$, así que la corriente que circulará por la carga la obtendremos de:

$$L \left(\frac{di_c}{dt} \right) + Ri_c + E = V_{max} \text{Sen} \omega t$$

$$i_c = \frac{V_{max}}{Z} \text{Sen}(\omega t - \varphi) + A_1 e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E}{R}$$

E 7.41

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad \varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

Caso 1: Corriente continuada en la carga: La constante A_1 de la ecuación [E7.41] se puede hallar partiendo de la condición $\omega t = \pi, i_C = I_1$.

$$A_1 = \left(I_1 + \frac{E}{R} - \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen} \varphi \right) e^{\left(\frac{R\pi}{L\omega} \right)}$$

Y sustituyendo en la ecuación [E7.41]:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen}(\omega t - \varphi) + \left(I_1 + \frac{E}{R} - \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen} \varphi \right) e^{\frac{R}{L} \left(\frac{\pi}{\omega} - t \right)} \quad \text{E 7.42}$$

Si aplicamos unas condiciones iniciales tales que:

$$I_1 = \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen} \varphi \frac{1 + e^{-\left(\frac{R\pi}{L\omega} \right)}}{1 - e^{-\left(\frac{R\pi}{L\omega} \right)}} - \frac{E}{R} \quad \text{para } I_1 \geq 0 \quad \text{E 7.43}$$

Sustituyendo en [E7.42] y simplificando:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{Z} \left[\operatorname{Sen}(\omega t - \varphi) + \frac{2}{1 - e^{-\left(\frac{R\pi}{L\omega} \right)}} \operatorname{Sen} \varphi e^{-\left(\frac{R}{L} t \right)} \right] - \frac{E}{R} \quad \text{E 7.44}$$

para $0 \leq \omega t \leq \pi$ e $i_C \geq 0$

Ya que conducirán durante medio semiciclo, la corriente eficaz en los diodos será:

$$I_{D(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (i_C)^2 d\omega t}$$

La corriente eficaz en la carga la obtendremos a partir de la tensión eficaz en los diodos para un periodo completo:

$$I_{rms} = \sqrt{(I_{D(rms)})^2 + (I_{D(rms)})^2} = \sqrt{2} I_{D(rms)}$$

La corriente media en los diodos será:

$$I_{D(dc)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_C d\omega t$$

Caso 2: Corriente discontinua en la carga: Solo circulará corriente en la carga durante un periodo $\omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2$. El diodo comenzará a conducir para $\omega t = \omega t_1$, y este vendrá dado por:

$$\omega t_1 = \arcsen\left(\frac{E}{V_{\max}}\right)$$

Con la ecuación [E7.41] y para valores $\omega t = \omega t_1$, $i_C(\omega t) = 0$:

$$A_1 = \left(\frac{E}{R} - \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen}(\omega t_1 - \varphi) \right) e^{\left(\frac{R\omega t_1}{L\omega} \right)}$$

Si sustituimos este valor en la ecuación [E7.41]:

$$i_C = \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen}(\omega t - \varphi) + \left(\frac{E}{R} - \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen}(\omega t_1 - \varphi) \right) e^{\frac{R}{L} \left(\frac{\omega t_1}{\omega} - t \right)} \quad \text{E 7.45}$$

Para $\omega t = \omega t_2$, la corriente en la carga se hace cero:

$$\frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen}(\omega t_2 - \varphi) + \left(\frac{E}{R} - \frac{V_{\max}}{Z} \operatorname{Sen}(\omega t_1 - \varphi) \right) e^{\frac{R}{L} \left(\frac{\omega t_1 - \omega t_2}{\omega} \right)} = 0$$

Se puede calcular ωt_2 aplicando un proceso iterativo de ensayo y error en la anterior ecuación.

La corriente eficaz en los diodos será:

$$I_{D(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} (i_C)^2 d\omega t}$$

Y la tensión media en los diodos es:

$$I_{D(dc)} = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} i_C d\omega t$$

PROBLEMA 7. 13

Dado un puente rectificador monofásico de onda completa y con carga RLE.

Calcular lo siguiente:

- Corriente en la carga I_1 , para condiciones iniciales $\omega t = 0$.
- Corriente media en los diodos.
- Corriente eficaz en los diodos.
- Corriente eficaz en la carga.
- Obtener gráficamente la representación instantánea de la intensidad de entrada, intensidad en la carga y la tensión en la carga, mediante Pspice.
- Calcular los coeficientes de Fourier de la corriente de entrada y el factor de potencia de entrada.

DATOS: $R = 2,5 \Omega$; $L = 6,5 \text{ mH}$; $E = 10 \text{ V}$; $V_p = 120 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$

Solución:

Vamos a suponer que la corriente en la carga es continuada. Si no estamos en lo cierto obtendremos un valor para dicha corriente igual a cero, y tendremos que volver a hacer los cálculos para una corriente discontinua.

$$V_{\max} = \sqrt{2}V_s = \sqrt{2}(120) = 169,7 \text{ V} \quad \omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314,16 \text{ rad / s}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = 3,228 \Omega \quad \varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) = 39,24^\circ$$

...

- a) Usando la ecuación [E7.43] calculamos el valor de la corriente en la carga para $\omega t=0$:

$$I_1 = 27,7 A$$

La suposición del principio será cierta, ya que $I_1 > 0$.

- b) Sacamos la corriente media en los diodos mediante la integración numérica de i_C en la ecuación [E7.44]:

$$I_{D(dc)} = 19,6 A$$

- c) La corriente eficaz en los diodos la determinamos mediante la integración numérica de $(i_C)^2$ entre los límites $\omega t=0$ y π :

$$I_{D(rms)} = 28,74 A$$

- d) Calculamos ahora la corriente eficaz en la carga:

$$I_{rms} = \sqrt{2} I_{D(rms)} = 40,645 A$$

- e) A continuación se muestran el esquema y el listado necesarios para la simulación mediante Pspice.

Descripción del circuito:

Problema7_13: PUENTE RECTIFICADOR MONOFASICO CON CARGA RLE

VS 1 0 SIN (0 169.7V 50HZ)

R 3 5 2.5

L 5 6 6.5MH

VX 6 4 DC 10V

VY 1 2 DC 0V

D1 2 3 DMOD

D2 0 3 DMOD

D3 4 2 DMOD

D4 4 0 DMOD

.MODEL DMOD D (IS=2.22E-15 BV=1200V IBV=13E-3 CJO=2PF TT=1US)

.TRAN 10US 60MS 20MS 10us

.FOUR 50HZ i(VY)

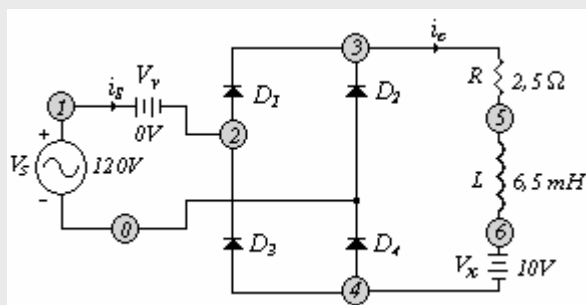
.PROBE

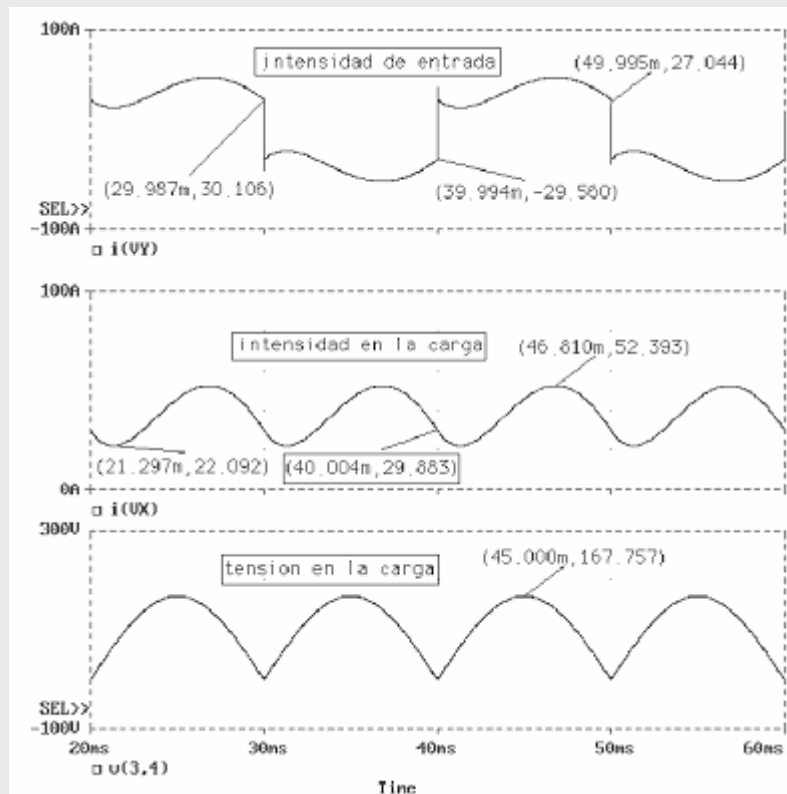
.OPTIONS ABSTOL=0.1N RELTOL=0.01 VNTOL=1.0M ITL5=20000

.END



PSpice





Podemos apreciar en las formas de onda obtenidas con Pspice, que $I_1=29,883A$.

- f) Necesitaremos obtener los coeficientes de Fourier de la corriente de entrada para poder calcular el factor de potencia de entrada:

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(VY)

DC COMPONENT = 2.450486E-02

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	5.357E+01	1.000E+00	-1.242E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	3.549E-02	6.624E-04	9.130E+01	1.037E+02
3	1.500E+02	1.183E+01	2.208E-01	2.626E+01	3.868E+01
4	2.000E+02	4.846E-02	9.045E-04	8.847E+01	1.009E+02
5	2.500E+02	7.427E+00	1.386E-01	1.663E+01	2.905E+01
6	3.000E+02	3.617E-02	6.753E-04	9.175E+01	1.042E+02
7	3.500E+02	5.388E+00	1.006E-01	1.236E+01	2.477E+01
8	4.000E+02	4.797E-02	8.955E-04	8.787E+01	1.003E+02
9	4.500E+02	4.205E+00	7.850E-02	1.014E+01	2.256E+01

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.902541E+01 PERCENT

Corriente media de entrada, $I_{S(dc)} = 0,0245A \cong 0A$

Corriente eficaz de entrada del fundamental, $I_{1(rms)} = 53,57/\sqrt{2} = 37,88$

Distorsión armónica total de la corriente de entrada, $THD = 29,02\% = 0,2902$

Corriente armónica eficaz, $I_{h(rms)} = I_{1(rms)} \times THD = 11$

...

Corriente eficaz de entrada, $I_S = \sqrt{(I_{S(dc)})^2 + (I_{1(rms)})^2 + (I_{h(rms)})^2} = 39,44 A$

Ángulo de desplazamiento, $\Phi_1 = -12,42$

Factor de desplazamiento, $DF = \cos \Phi_1 = 0,976$ (en retraso)

El factor de potencia será:

$$PF = \frac{V_S I_{1(rms)}}{V_S I_S} \cos \Phi_1 = 0,937 \text{ (en retraso)}$$

Si usamos THD para calcularlo:

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \cos \Phi_1 = 0,937$$

En esta ocasión ambos valores son iguales debido a que la componente continua es de un valor insignificante.

7.5 Puente rectificador monofásico totalmente controlado

7.5.1 CARGA RESISTIVA

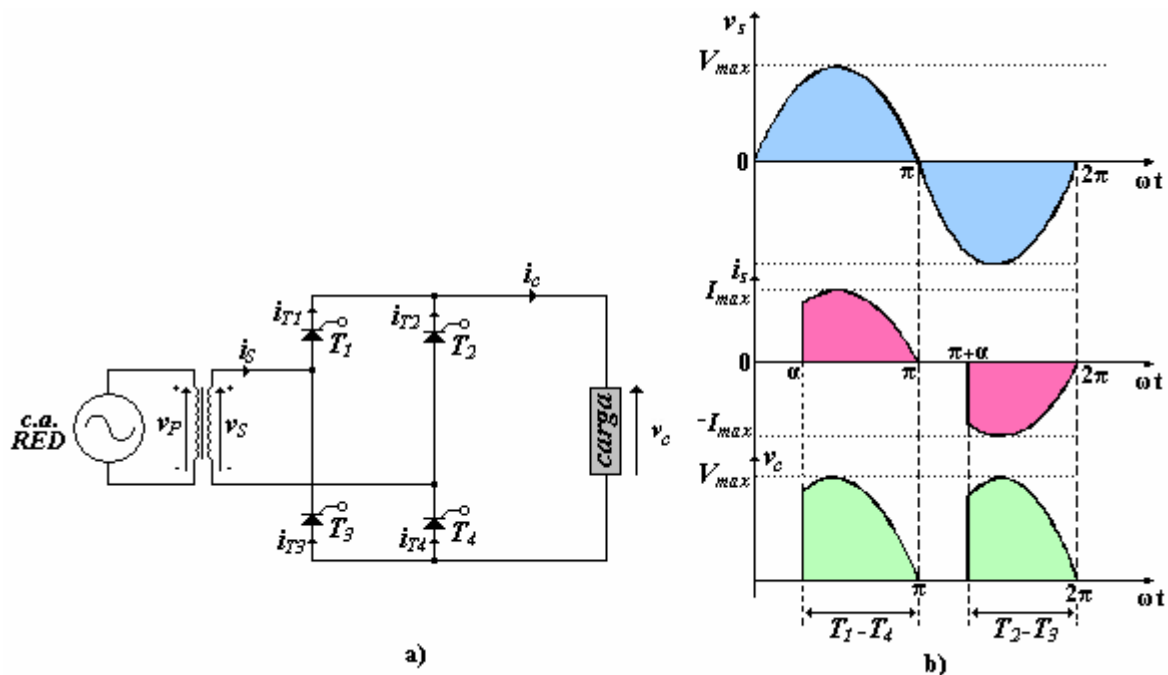


Fig 7. 26

a) Montaje para el puente rectificador monofásico totalmente controlado.

En este montaje, los diodos que formaban el puente rectificador no controlado se sustituyen por tiristores, haciendo posible el control de fase de una onda completa de la señal de entrada.

b) Formas de onda del puente rectificador totalmente controlado, con carga resistiva. Están representadas las formas de onda de la intensidad en el secundario y la tensión en la carga.

Los tiristores T_1 y T_4 conducirán durante el semiciclo positivo de la entrada, y los T_2 y T_3 en el negativo. Eso quiere decir que los tiristores se dispararán de dos en dos con un ángulo de retardo α .

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \text{Sen} \omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi} V_{\max} (-\text{Cos} \pi + \text{Cos} \alpha) = \frac{V_{\max}}{\pi} (1 + \text{Cos} \alpha) \quad \text{E 7.46}$$

Para $\alpha = 0^\circ$ (actuando como diodos), la tensión media en la carga será V_{dc} y su valor: $V_{dc} = \frac{2V_{\max}}{\pi}$

Intensidad eficaz en la carga:

$$I'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (I_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi}\right)\right]} \quad \text{E 7.47}$$

Potencia eficaz en la carga:

$$P'_{ac} = (I'_{rms})^2 \cdot R \quad \text{E 7.48}$$

PROBLEMA 7. 14

Dado un puente rectificador monofásico totalmente controlado como el mostrado en la figura 7.26 a), calcular lo siguiente:

- Tensión de pico en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Intensidad media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Potencia eficaz en la carga.
- Tensión media en los tiristores.
- Potencia del generador y factor de potencia.

DATOS: $R=20 \, \Omega$; $V_S=240V$

Solución:

- a) La tensión de pico en la carga será (para $\alpha < 90^\circ$):

$$V_{p(carga)} = V_{\max} = \sqrt{2} V_S = 240\sqrt{2} = 339,4V$$

- b) Ayudándonos del valor anterior calculamos la corriente de pico en la carga:

$$I_{p(carga)} = \frac{V_{p(carga)}}{R} = 16,97A$$

- c) La tensión media en la carga es:

$$V'_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{40^\circ}^{\pi} V_{\max} \text{Sen} \omega t \, d\omega t = \frac{339,4}{\pi} [1 + \text{Cos} 40^\circ] = 190,8A$$

- d) La corriente media la calculamos usando la tensión media en la carga:

$$I'_{dc} = \frac{V'_{dc}}{R} = \frac{190,8}{20} = 9,54A$$

- e) Con la ecuación [E7.47] calculamos la corriente eficaz en la carga:

$$I'_{rms} = \sqrt{\frac{I_{\max}^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\text{Sen} \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi}\right)\right]} = 11,60A$$

- f) El valor anterior nos sirve para el cálculo de la potencia eficaz en la carga:

$$P'_{ac} = (I'_{rms})^2 R = 2691W \quad \dots$$

...

g) La corriente media que atravesará los tiristores será:

$$I_{T(dc)} = \frac{I'_{dc}}{2} = \frac{9,54}{2} = 4,77 A$$

h) La potencia del generador:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} = 240V \cdot 11,60A = 2784VA$$

Y el factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{2691}{2784} = 0,967$$

7.5.2 ESTUDIO PARA UNA CARGA ALTAMENTE INDUCTIVA, CORRIENTE CONTINUADA

En el circuito presentado suponemos que la carga es altamente inductiva, de tal forma que la corriente en la carga es continua y libre de componentes ondulatorias.

Debido a la carga inductiva, los tiristores que conducen durante el semiciclo positivo de la señal de entrada, seguirán conduciendo más allá de $\omega t = \pi$, aun cuando el voltaje de entrada sea negativo.

Las formas de onda para este caso están representadas en la siguiente figura:

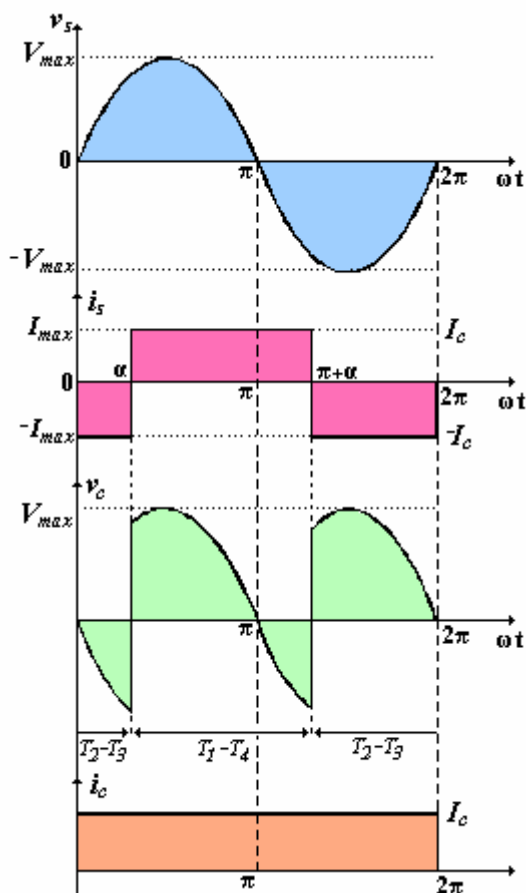


Fig 7. 27

Formas de onda para un puente rectificador controlado con carga altamente inductiva. Este tipo de carga provoca que la corriente en la carga I_c , sea de valor constante. Se han representado la tensión en la carga, intensidad en la carga e intensidad en el secundario del transformador.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int V_{\max} \text{Sen} \omega t d\omega t = \left(\frac{2}{\pi} \right) V_{\max} \text{Cos} \alpha$$

E 7.49

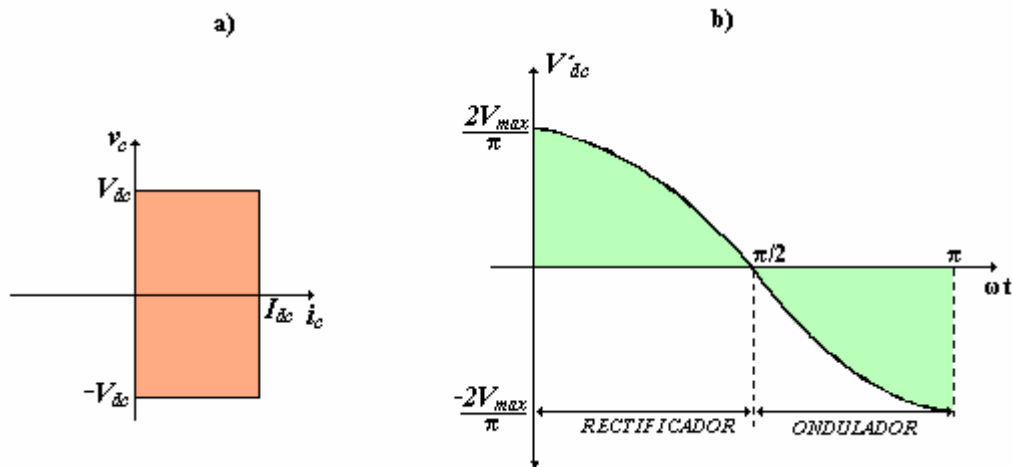


Fig 7. 28

- a) Cuadrantes de funcionamiento del puente rectificador monofásico totalmente controlado. Como podemos apreciar, puede trabajar en el primer y cuarto cuadrante.
- b) Modos de funcionamiento del puente rectificador monofásico totalmente controlado:
- a) Como rectificador ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$): Tensión media en la carga positiva.
 - b) Como ondulator ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$): Tensión media en la carga negativa.

Durante el periodo que va desde α a π , el voltaje de entrada y la corriente de entrada son positivos; la potencia fluye de la alimentación a la carga. Se dice que el convertidor opera en modo rectificación.

Durante el periodo π hasta $\pi + \alpha$, el voltaje de entrada es negativo y la corriente de entrada positiva; existiendo un flujo inverso de potencia, de la carga hacia la alimentación. Se dice que el convertidor opera en modo inversor. Dependiendo del valor de α , el voltaje promedio de salida puede ser positivo o negativo y permite la operación en dos cuadrantes (modo rectificador y modo inversor u ondulator). Los dos modos de funcionamiento del rectificador se pueden apreciar en la figura 7.28b).

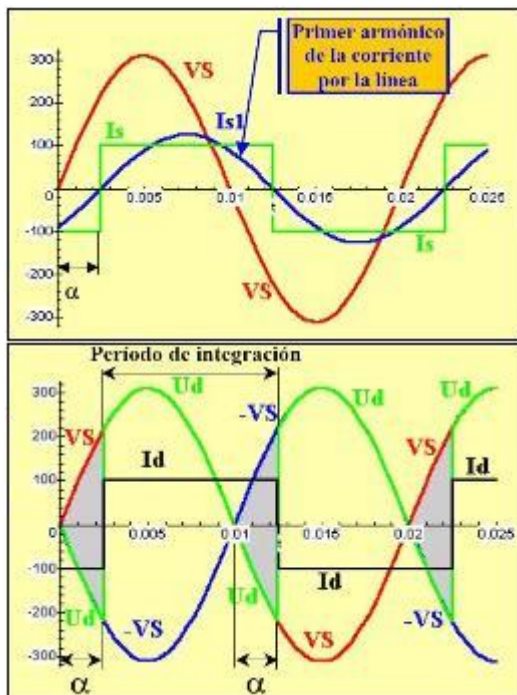


Fig 7.29

En estas figuras se puede observar la tensión de entrada, la intensidad suministrada por el secundario del transformador y la componente fundamental de esta corriente, para diferentes valores del ángulo de retardo. El ángulo de desfase de I_s , como se puede ver coincide con el ángulo de retardo α .

Un método para determinar la tensión y la corriente de salida en el caso de corriente continuada es utilizar la serie de Fourier. La expresión general de la serie de Fourier para la forma de onda de tensión en el caso de corriente continua es:

$$v_0(\omega t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n)$$

El valor (medio) en continua es: $V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$

Las amplitudes de los términos de alterna se calculan a partir de $V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, donde:

$$a_n = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right]; b_n = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]; n = 2, 4, 6 \dots$$

La serie de Fourier para la corriente se determina utilizando superposición.

La corriente eficaz se determina a partir de $I_{rms} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2}$, donde:

$$I_0 = \frac{V_0}{R}; I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega_0 L|}$$



PROBLEMA 7.15

Un rectificador controlado de onda completa en puente, utiliza un generador de 120Vrms a 60Hz y una carga R-L, donde $R = 10\Omega$ y $L = 100\text{mH}$. El ángulo de disparo es $\alpha = 60^\circ$. Calcular:

- La expresión de la corriente en la carga.
- La componente continua (media) de la corriente.
- La potencia absorbida por la carga.

Solución: $V_0 = 54\text{V}$; $I_{rms} = 5,54\text{A}$; $P = 307\text{W}$

[Hart]



Cuestión didáctica 7. 4

Dado un puente rectificador monofásico totalmente controlado con carga RL altamente inductiva.

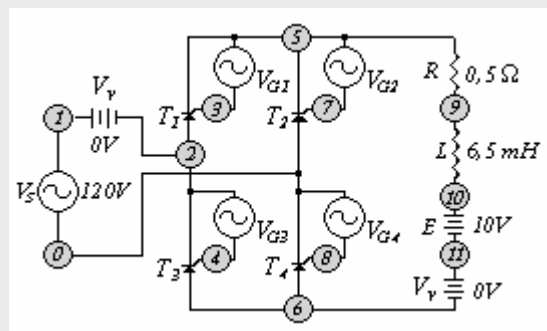
Calcular:

- Tensión de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Potencia en la carga.
- Corriente media en los tiristores.

DATOS: $R = 20\Omega$; $V_s = 240\text{V}$; $\alpha = 40^\circ$

Solución: $V_{p(carga)} = 339,4\text{V}$; $V_{dc} = 165,5\text{V}$; $I_{dc} = 8,28\text{A}$; $I_{p(carga)} = 8,28\text{A}$; $I_{rms} = 8,28\text{A}$; $P_c = 1370\text{W}$; $I_{T(dc)} = 4,14\text{A}$.

...



Descripción del circuito:

CD7_4: PUENTE RECTIFICADOR MONOFASICO TOTALMENTE CONTROLADO CON CARGA RLE

*DEFINICION DE PARAMETROS

.PARAM VM={120*SQRT(2)}; VALOR DE LA TENSION DE PICO DE ENTRADA

.PARAM ALFA=40; GRADOS DEL ANGULO DE RETARDO

.PARAM RETARDO1={ALFA*20MS/360}; RETARDO EN SEGUNDOS

.PARAM RETARDO2={ALFA*20MS/360+10MS}

.PARAM PW={1MS}

VS 1 0 SIN (0V {VM} 50HZ 0S 0S 0DEG)

VG1 3 5 PULSE(0V 10V {RETARDO1} 1NS 1NS 100US 20MS)

VG4 8 0 PULSE(0V 10V {RETARDO1} 1NS 1NS 100US 20MS)

VG2 7 5 PULSE(0V 10V {RETARDO2} 1NS 1NS 100US 20MS)

VG3 4 2 PULSE(0V 10V {RETARDO2} 1NS 1NS 100US 20MS)

L 9 10 6.5MH

VE 10 11 DC 10V

VY 1 2 DC 0V

VX 11 6 DC 0V

XT1 2 5 3 5 SCR

XT2 0 5 7 5 SCR

XT3 6 2 4 2 SCR

XT4 6 0 8 0 SCR

* SUBCIRCUITO DEL SCR

.SUBCKT SCR 1 2 3 2

S1 1 5 6 2 SMOD

RG 3 4 50HM

VX 4 2 DC 0V

VY 5 7 DC 0V

DT 7 2 DMOD

RT 6 2 1HM

CT 6 2 10UF

F1 2 6 POLY (2) VX VY 0 50 11

.MODEL SMOD VSWITCH (RON=0.0105 ROFF=10E+5 VON=0.5V VOFF=0V)

.MODEL DMOD D(IS=2.2E-15 BV=1200V TT=0 CJO=0)

.ENDS SCR

.TRAN 50US 60MS 40MS 50US

.PROBE

.OPTIONS ABSTOL=1.00N RELTOL=1.0M VNTOL=0.01M ITL5=20000

.FOUR 50HZ I(VY)

.END



PSpice

7.5.3 CARGA RL, CORRIENTE DISCONTINUA

Iniciando el análisis para $\omega t = 0$ y con corriente de carga nula, los SCR S_1 y S_2 del rectificador en puente estarán polarizados en directa y S_3 y S_4 se polarizarán en inversa cuando la tensión del generador se haga positiva. S_1 y S_2 se activarán cuando se les apliquen señales de puerta para $\omega t = \alpha$.

Cuando S_1 y S_2 están activados, la tensión de carga es igual a la tensión del generador. La función de la corriente será:

$$i_0(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\omega \tau}} \right] \text{ para } \alpha \leq \omega t \leq \beta$$

$$\text{donde: } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad y \quad \tau = \frac{L}{R}$$

La función de corriente anterior se hace cero en $\omega t = \beta$. Si $\beta < \pi + \alpha$, la corriente será nula hasta $\omega t = \pi + \alpha$, momento en el cual se aplicarán señales de puerta a S_3 y S_4 , que quedarán polarizados en directa y comenzarán a conducir.

7.5.4 CARGA RLE

PROBLEMA 7. 16

Un rectificador controlado utiliza un generador de alterna con una tensión eficaz de 240V a 60Hz, $V_{cc} = 100V$, $R = 5\Omega$ y una bobina de inductancia suficientemente grande como para obtener corriente continua. Calcular:

- El ángulo de disparo α para que la potencia absorbida por el generador de continua sea 1000W.
- El valor de la inductancia que limitará la variación pico a pico de la corriente de carga a 2A.

Solución: $\alpha = 46^\circ$; $L = 0,31H$

[Hart]



www.ipes.ethz.ch

Rectificador controlado de tiristores, con carga resistiva e inductiva

iPES-Home

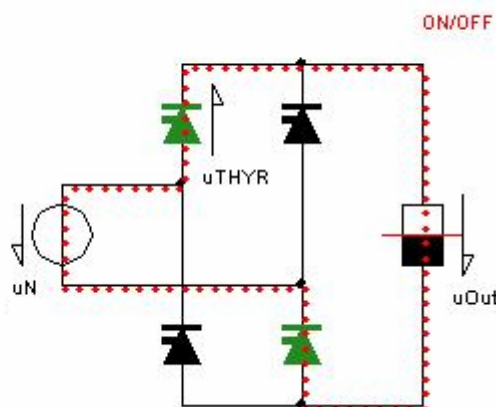


Fig 7. 30 Rectificador controlado onda completa monofásico

7.5.5 CARGA RL CON DIODO VOLANTE

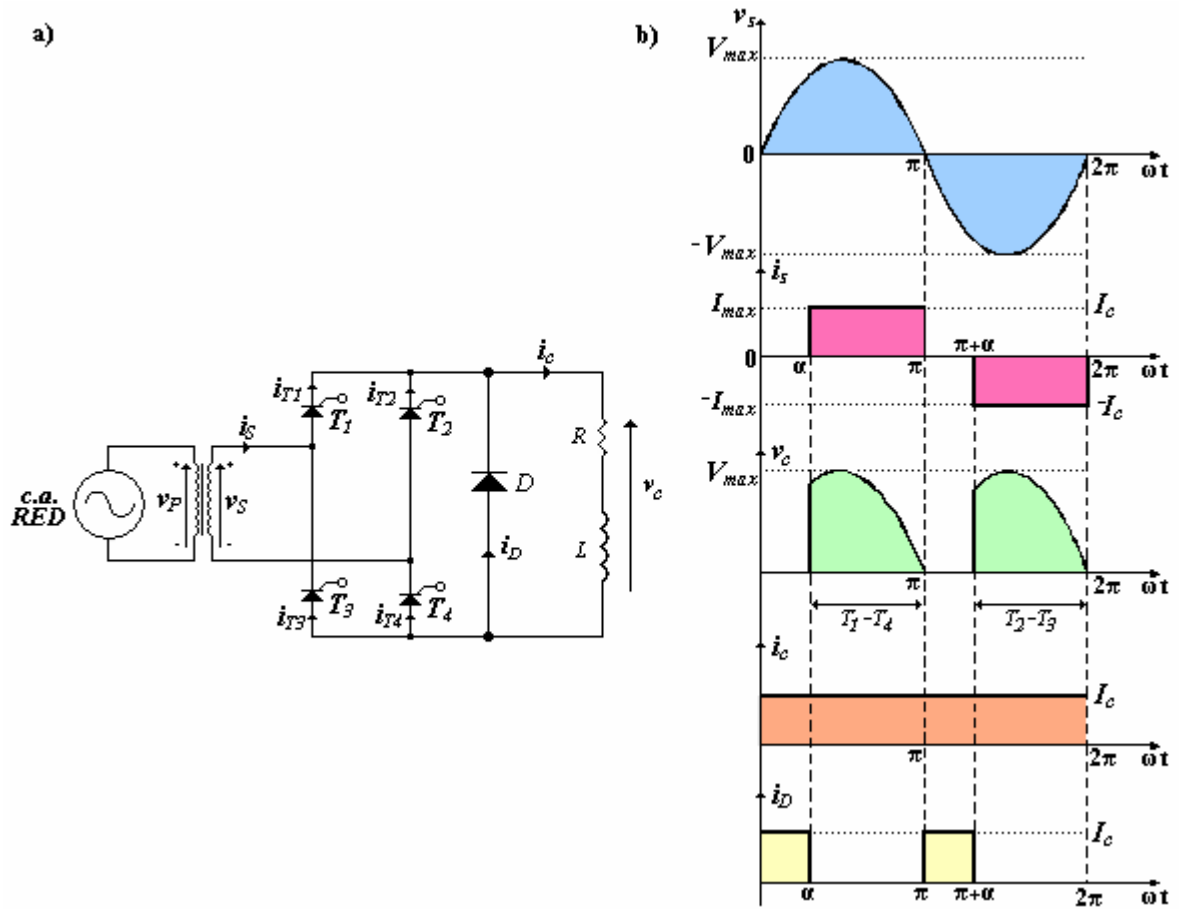


Fig 7.31

a) Montaje para el puente rectificador monofásico totalmente controlado con carga RL. Con el diodo volante se le proporciona otro camino a la corriente que circula por la carga, además de i_{T1-T4} e i_{T2-T3} , y prevenimos las tensiones negativas en la carga.

b) Formas de onda del puente rectificador monofásico totalmente controlado con carga RL y diodo volante. Se han representado la intensidad en el secundario del transformador, tensión en la carga, intensidad en la carga e intensidad que circula por el diodo volante. Podemos apreciar como la porción negativa de la tensión en la carga que teníamos en el montaje sin diodo volante se anula. En ese intervalo la corriente que circula por los diodos y por el secundario se hace cero, circulando la intensidad por el diodo.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{V_{max}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

E 7.50

Intensidad media en los tiristores: como por cada tiristor circulará corriente en cada periodo de la tensión de entrada durante un tiempo $\pi - \alpha$, entonces:

$$I'_{T(dc)} = I'_{dc} \left(\frac{\pi - \alpha}{2\pi} \right)$$

E 7.51

Intensidad media en el diodo volante: Por el diodo circulará corriente solo desde $\omega t = 0$ hasta $\omega t = \alpha$, en cada semiciclo de la tensión de entrada:

$$I'_{D(dc)} = I'_{dc} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)$$

E 7.52

7.5.6 CONVERTIDOR MONOFÁSICO EN MODO INVERSOR

Para que el convertidor opere como un inversor, el generador de continua suministrará la potencia y ésta será absorbida por el puente y transferida al sistema de alterna.

Para que el generador de continua suministre potencia, V_{cc} debe ser negativa. Para que el puente absorba la potencia y ésta se transfiera al sistema de alterna, la tensión de salida del puente, V_o también deberá ser negativa.



PROBLEMA 7.17

La tensión generada por un conjunto de células solares tiene un valor de 110V, conectada de manera que $V_{cc} = -110V$. Las células solares son capaces de producir 1000W. El generador de alterna presenta una tensión eficaz de 120V, $R = 0,5 \Omega$ y L es lo suficientemente grande como para que la corriente de carga sea esencialmente continua. Calcular el ángulo de disparo α para que el conjunto de células solares entregue 1000W. Calcular la potencia transferida al sistema de alterna y las pérdidas en la resistencia. Suponer que los SCR son ideales.

Solución: $\alpha = 165,5^\circ$; $P_R = 41W$; $P = 525,5W$

[Hart]

7.6 Puente rectificador monofásico semicontrolado o mixto

También se suele usar una configuración en la que el ánodo de un diodo está unido al cátodo del otro, y los tiristores también irán conectados así entre ellos, pero ocasiona problemas para controlar a los tiristores porque ambos tienen distinta referencia.

Durante el semiciclo positivo el tiristor T_1 estará en directo, y cuando $\omega t = \alpha$ conducirán T_1 y D_2 en el intervalo $\alpha \leq \omega t \leq \pi$. Cuando $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ en el secundario habrá una tensión negativa, provocando el bloqueo de T_1 y que este y D_2 dejen de conducir, provocando la entrada en conducción del diodo volante D_3 , que se encargará de transferir la corriente a la carga. En el semiciclo negativo tendremos a T_2 en directo y su conducción comenzará para $\omega t = \pi + \alpha$ hasta $\omega t = 2\pi$, conduciendo también D_2 .

A continuación se representa el montaje así como las formas de onda obtenidas con este tipo de rectificador:

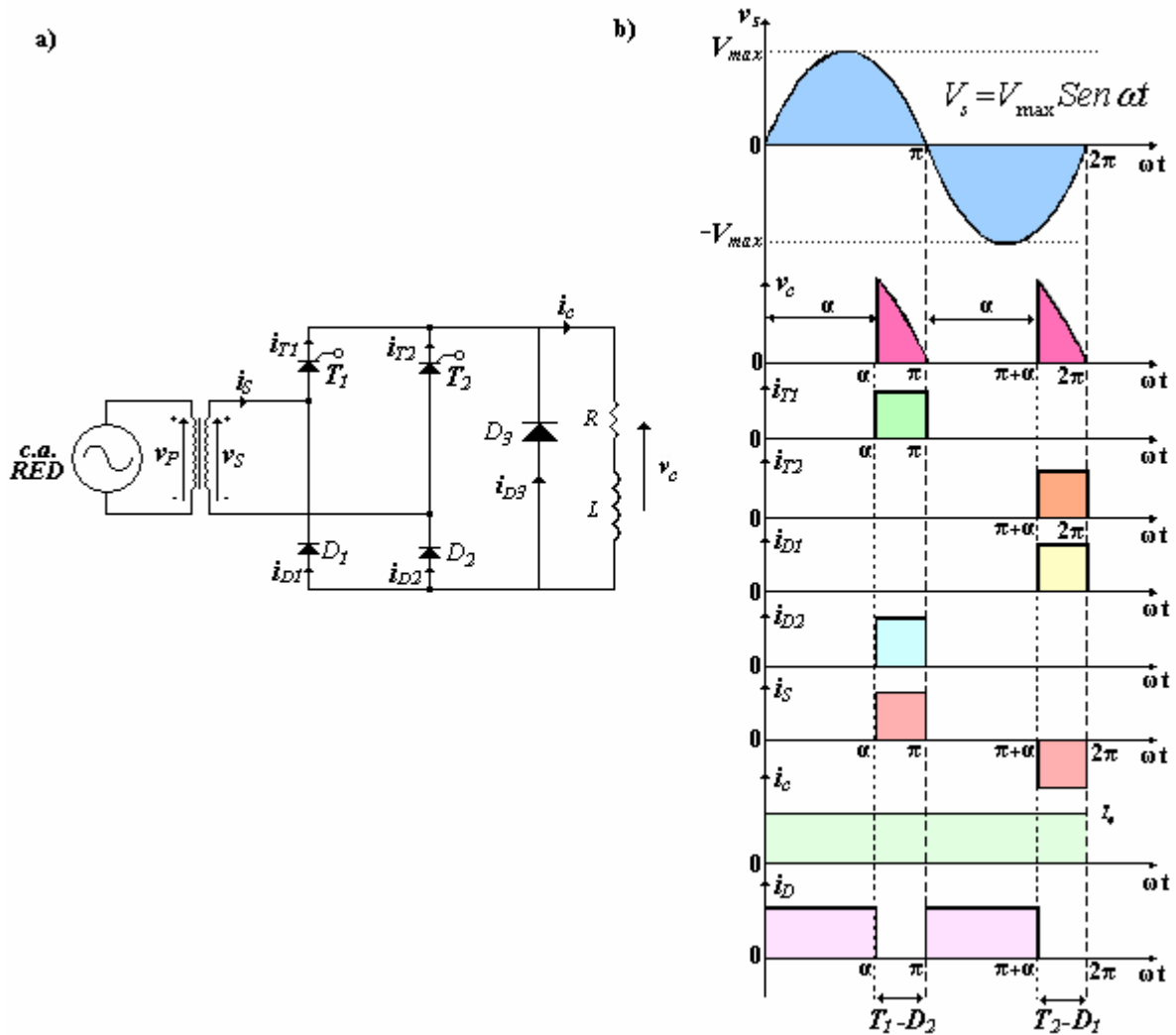


Fig 7.32

a) Montaje para el rectificador monofásico semicontrolado. Se reemplazan por diodos uno de los grupos de conmutación que formaban el puente totalmente controlado. En este montaje no hay posibilidad de obtener tensión negativa en la carga, así que solo trabajará en el primer cuadrante del diagrama tensión-corriente

b) Formas de onda del puente rectificador semicontrolado con carga altamente inductiva. Se han representado la tensión en la carga, intensidad en los tiristores, intensidad en los diodos del puente, intensidad en el secundario, intensidad en la carga e intensidad en el diodo volante.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{\pi} (-\cos \pi + \cos \alpha) = \frac{V_{\max}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{E 7.53}$$

Como la tensión máxima de salida se da para $\alpha = 0$, donde $V_{dc} = (2V_{\max}/\pi)$, el valor normalizado de la tensión en la carga es:

$$V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} = 0,5(1 + \cos \alpha) \quad \text{E 7.54}$$

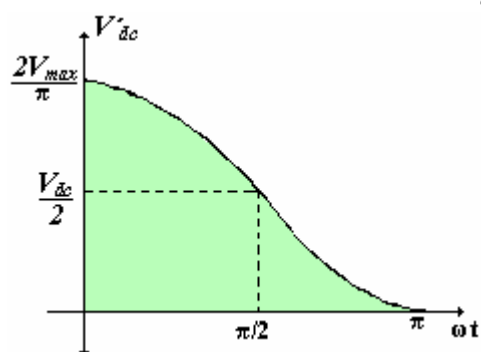


Fig 7.33

Característica de control del puente rectificador semicontrolado.

La tensión media en la carga puede variar desde $(2V_{\max}/\pi)$ hasta 0, con la regulación del ángulo de disparo α , desde 0 hasta π .

7.7 Rectificadores Polifásicos

Este tipo de circuitos se utilizarán para producir tensiones y corrientes continuas para grandes cargas.

Se suele aumentar el número de fases para proteger a los diodos de tensiones o corrientes demasiado elevadas. Además, la frecuencia de rizado en la carga también resulta determinante a la hora de usar rectificadores polifásicos, ya que nos facilitan el rizado y disminuyen los elevados costes que ocasionaría el gran tamaño de los filtros en rectificadores monofásicos para grandes potencias.

7.7.1 RECTIFICADORES POLIFÁSICOS DE MEDIA ONDA

A continuación se muestra el esquema de conexión del rectificador polifásico de media onda:

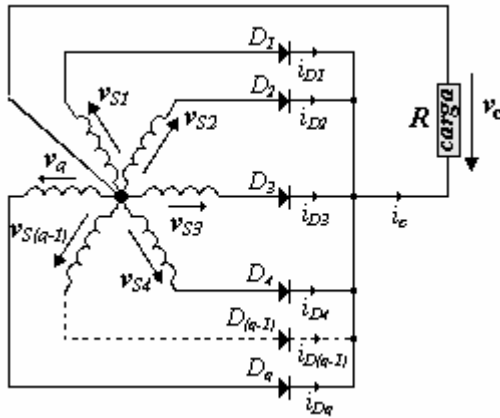


Fig 7. 34

Rectificador polifásico de media onda.

La “q” será el índice de conmutación del rectificador, que para el caso de rectificadores polifásicos coincide con el número de fases.

El desfase entre dos fases sucesivas será $2\pi/q$, y sus tensiones serán:

$$\begin{aligned} V_{S1} &= V_{\max} \cos \omega t ; \\ V_{S2} &= V_{\max} \cos(\omega t - 2\pi/q); \\ V_{S3} &= V_{\max} \cos(\omega t - 4\pi/q) \dots \\ V_{S(q-1)} &= V_{\max} \cos(\omega t - 2\pi(q-1)/q); \\ V_{Sq} &= V_{\max} \cos(\omega t - 2\pi) \end{aligned}$$

Tomando $\omega t=0$, el origen de tiempos que se corresponda con el valor máximo positivo de v_{S1} , cabe pensar que estarán conduciendo todas las fases polarizadas positivamente, pero en realidad pasa lo siguiente: al conducir la fase que genera más tensión, en nuestro caso v_{S1} , el nudo donde se encuentran conectados todos los cátodos de los diodos adquirirá esta tensión y los diodos restantes se encontrarán polarizados inversamente.

Cuando la tensión de la fase que conduce es igual a la de la fase siguiente, su diodo correspondiente quedará polarizado directamente y conducirá, provocando el cese de la conducción de la fase anterior. Este cese instantáneo de la corriente de una fase y el establecimiento de la corriente en la fase siguiente (conocido como conmutación natural) se producirá en los instantes cuyos tiempos son:

$$\pi/q, 3\pi/q, 5\pi/q$$

La tensión rectificada será una señal pulsante de periodo $2\pi/q$, y se define por:

$$-\pi/q < \omega t < \pi/q \rightarrow v_c = V_{\max} \cos \omega t$$

En caso de una carga resistiva pura, la forma de onda de la corriente en la carga será muy parecida a la de la tensión en la carga y se define así:

$$-\pi/q < \omega t < \pi/q \rightarrow i_c = \frac{v_c}{R} = \frac{V_{\max}}{R} \cos \omega t$$

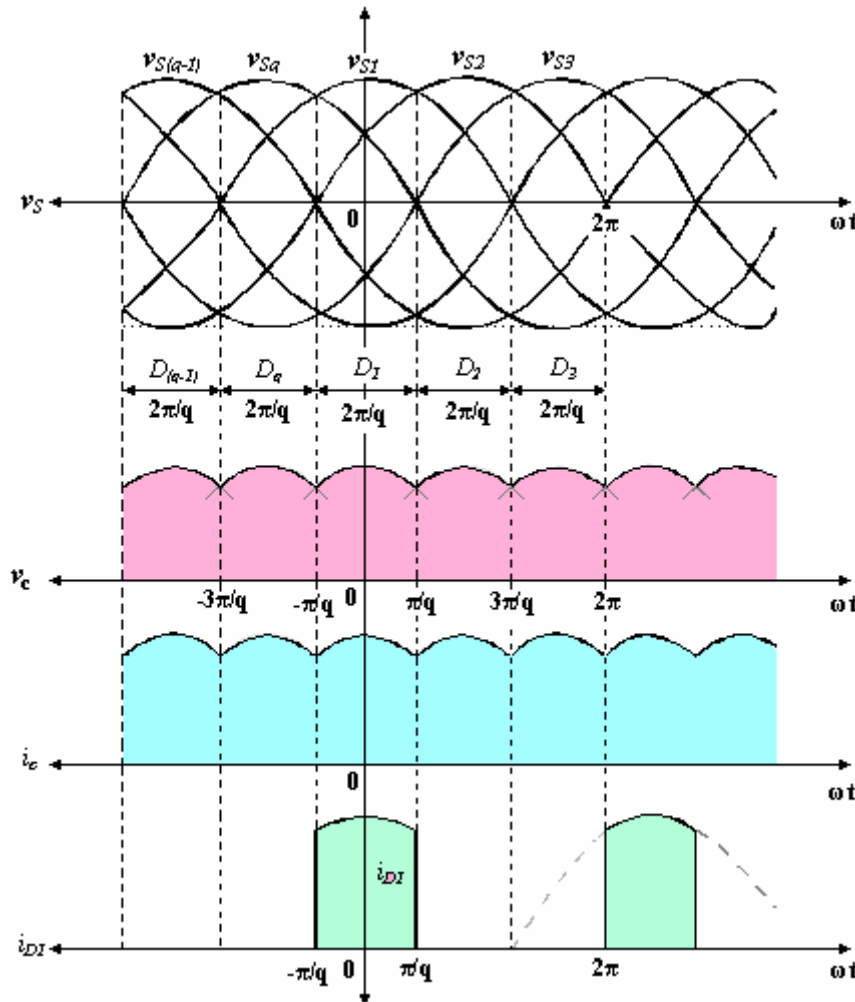


Fig 7. 35
Formas de onda del
rectificador polifásico de
media onda.

Tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/q}^{\pi/q} v_c d\omega t = \frac{q}{\pi} V_{\max} \text{Sen}\left(\frac{\pi}{q}\right)$$

E 7.55

A continuación se muestra un estudio de cómo aumenta la tensión media en la carga con el número de fases:

Nº DE FASES	V _{dc}
2	0,637 V _{max}
3	0,826 V _{max}
6	0,955 V _{max}
48	0,999 V _{max}

Tensión inversa de pico en los diodos: La tensión en extremos de un diodo cualquiera (D₁), para un sistema q-fásico será:

Si q es par: $PIV = 2V_{\max}$

Si q es impar: se puede demostrar que la tensión inversa de pico será:

$$PIV = 2V_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{2q}\right) \quad \text{E 7.56}$$

Corriente media en los diodos:

$$I_{D(dc)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{q}} I_{\max} \cos \omega t d\omega t = I_{\max} \frac{1}{\pi} \text{Sen}\left(\frac{\pi}{q}\right) \quad \text{E 7.57}$$

Corriente eficaz en los diodos: tiene el mismo valor que la corriente por cada secundario del transformador y será:

$$I_{D(rms)} = I_S = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{q}} (I_{\max})^2 (\cos \omega t)^2 d\omega t} = I_{\max} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\frac{\pi}{q} + \frac{1}{2} \text{Sen}\left(\frac{2\pi}{q}\right) \right]} \quad \text{E 7.58}$$

7.7.2 RECTIFICADOR CONTROLADO POLIFÁSICO DE MEDIA ONDA

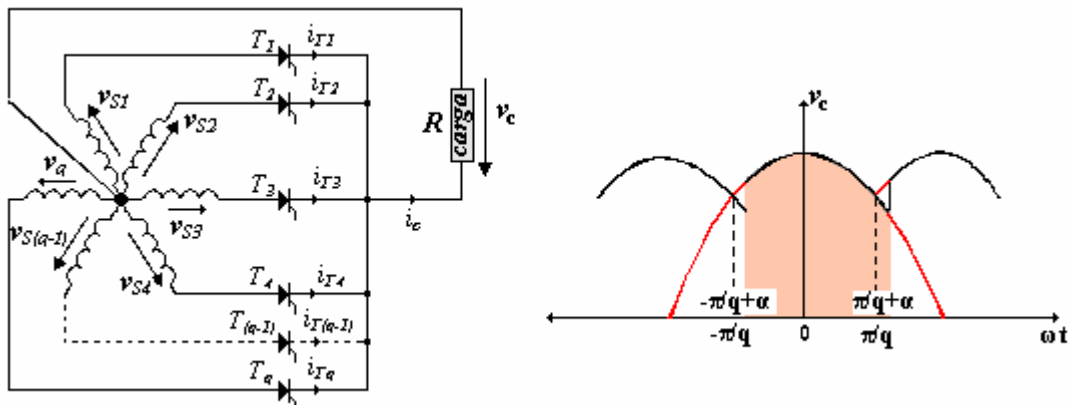


Fig 7. 36 Rectificador controlado M-fásico de media onda y forma de onda de la tensión en la carga.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{q}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{q} + \alpha}^{\frac{\pi}{q} + \alpha} V_{\max} \cos \omega t d\omega t = \frac{q}{\pi} V_{\max} \text{Sen}\left(\frac{\pi}{q}\right) \cos \alpha \quad \text{E 7.59}$$

7.7.3 RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA

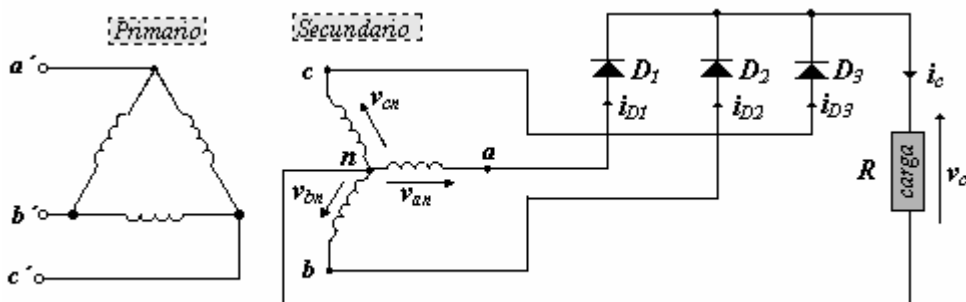


Fig 7. 37 Rectificador trifásico de M.O. los diodos tienen sus cátodos conectados a un punto común, para que en cualquier instante de tiempo el diodo con el mayor voltaje aplicado conduzca, mientras los otros dos estarán polarizados inversamente.

Se colocará el primario en triángulo para anular el tercer armónico de la tensión de la red.

Las tensiones de alimentación referidas al neutro, que se encuentran desfasadas 120°, serán:

$$v_{an} = V_{\max} \text{Sen} \omega t; \quad v_{bn} = V_{\max} \text{Sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \quad v_{cn} = V_{\max} \text{Sen} \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

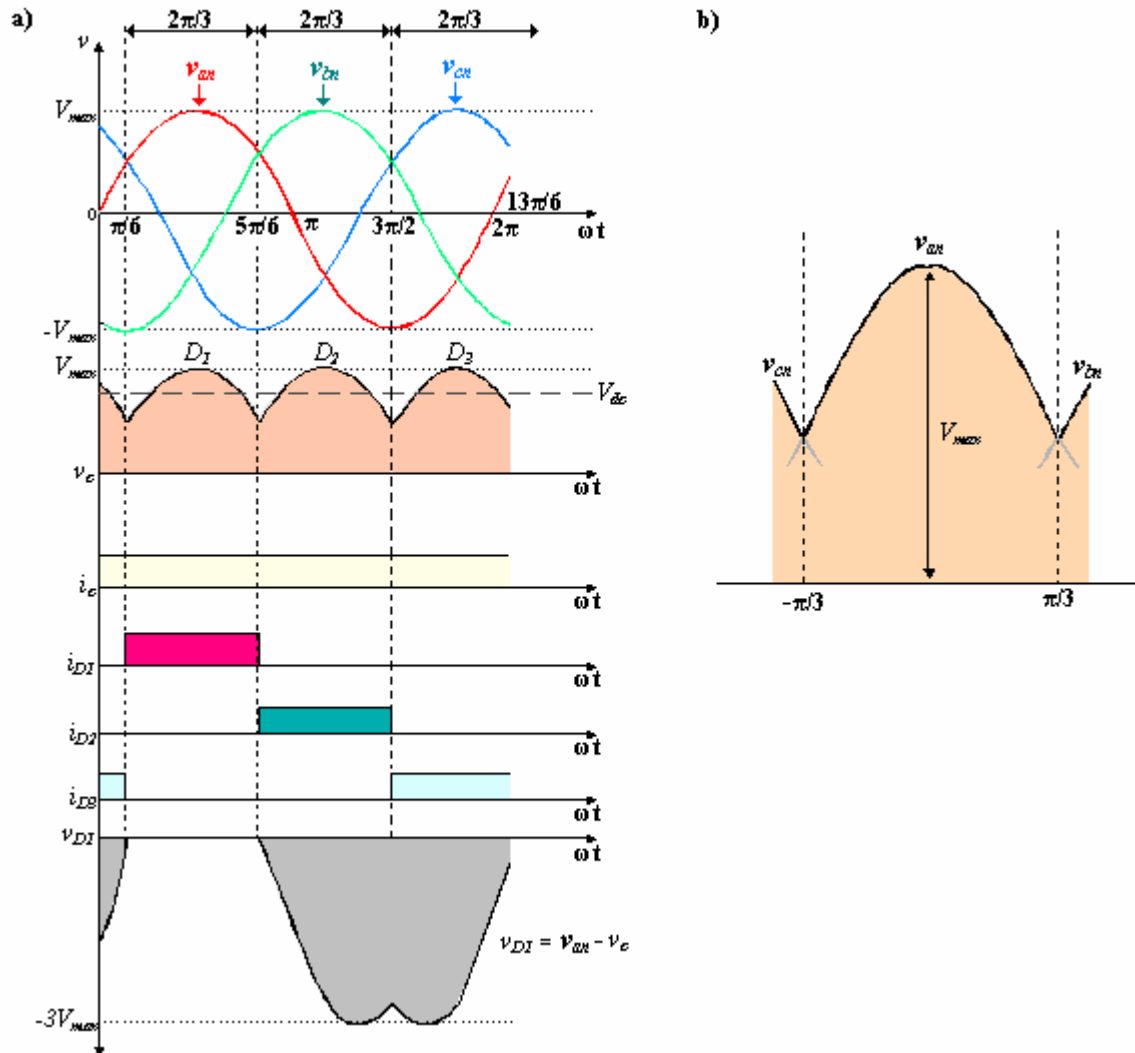


Fig 7. 38

a) Formas de ondas en el rectificador trifásico de media onda.

Cada diodo conduce alternativamente durante periodos de 120° ($2\pi/3$), o sea un tercio de periodo. Con esto se consigue un rectificador que presenta un bajo factor de ondulación, en comparación con los monofásicos.

b) Límites de integración para el cálculo del valor medio de la tensión en la carga.

Tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} V_{\max} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3}{\pi} V_{\max} \text{Sen} \left(\frac{\pi}{3} \right) = 0,827 V_{\max}$$

E 7.60

Cuestión didáctica 7.5

Dado un rectificador trifásico de media onda con carga resistiva.

Calcular:

- Tensión de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente de pico en los diodos.
- Tensión inversa de pico en los diodos.
- Corriente media en los diodos.

DATOS: $R = 25\Omega$; $V_{LS} = 480V$; $f = 50Hz$

Solución: $V_{p(carga)} = 391,9V$; $V_{dc} = 324,1V$; $I_{p(carga)} = 15,68V$; $I_{dc} = 12,96A$; $I_{p(diodo)} = 15,68A$; $PIV = 678,8V$; $I_{D(dc)} = 4,32A$

Descripción del circuito:

```
*CD7_5:RECTIFICADOR TRIFASICO DE MEDIA ONDA
*****
* R CARGA CON POSIBILIDAD DE RLE CARGA
*****
*DEFINICION GENERAL DE PARAMETROS
*****
.PARAM RMS_INP_VOLT={230V}; VOLTAJE DE ENTRADA
.PARAM FREC={50Hz}; FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE ENTRADA
.PARAM LOAD_IMPED={1ohm}; RESISTENCIA DE CARGA
.PARAM LOAD_ANGLE={30deg};
.PARAM KE={0.5}
*
.PARAM PICOVOLT={SQRT(2/3)*RMS_INP_VOLT}
.PARAM PI={3.141593}; RLOAD={LOAD_IMPED*COS(LOAD_ANGLE*PI/180)}
.PARAM LLOAD={LOAD_IMPED*SIN(LOAD_ANGLE*PI/180)/(2*PI*FREC)}
.PARAM ELOAD={KE*PICOVOLT}
*****
VA  AV  0 SIN(0 {PICOVOLT} {FREC} 0 0 0) ; FASE A
VB  BV  0 SIN(0 {PICOVOLT} {FREC} 0 0 -120) ; FASE B
VC  CV  0 SIN(0 {PICOVOLT} {FREC} 0 0 -240) ; FASE C
*****
Rsource-A AV  A 1mohm ; source resistance, phase A
Rsource-B BV  B 1mohm ; source resistance, phase B
Rsource-C CV  C 1mohm ; source resistance, phase C
*****
DA  A OUT Dgen ; diodo DA
DB  B OUT Dgen ; diodo DB
DC  C OUT Dgen ; diodo DC
*****
Rload OUT 0 {RLOAD} ; RESISTENCIA DE CARGA
*Lload RL LE {LLOAD} ; POSIBILIDAD DE INDUCTANCIA
*Veload LE 0 DC {ELOAD} ; POSIBILIDAD DE EMC
*****
.MODEL Dgen D
*****
.TRAN 10us 60ms 20.001ms 10us
.OPTIONS ABSTOL=1m RELTOL=1m VNTOL=1m ITL5=0
.PROBE
.END
```



PSpice

7.7.4 RECTIFICADOR CONTROLADO TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA

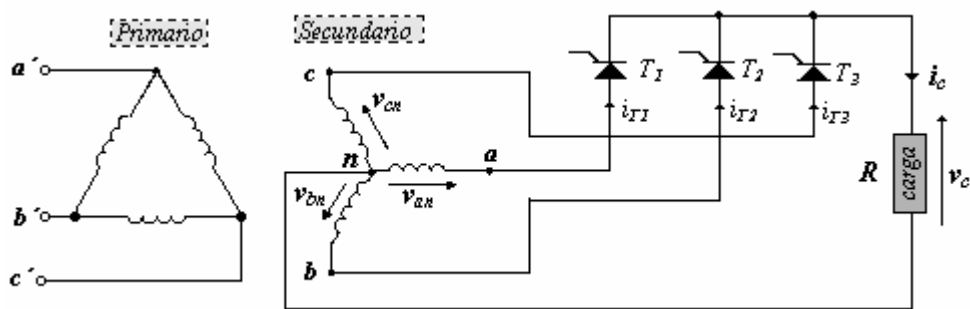


Fig 7. 39
Montaje para el rectificador controlado trifásico de media onda. Se puede construir a partir de tres rectificadores controlados de media onda

❖ Estudio par una carga resistiva y $\alpha \leq 30^\circ$:

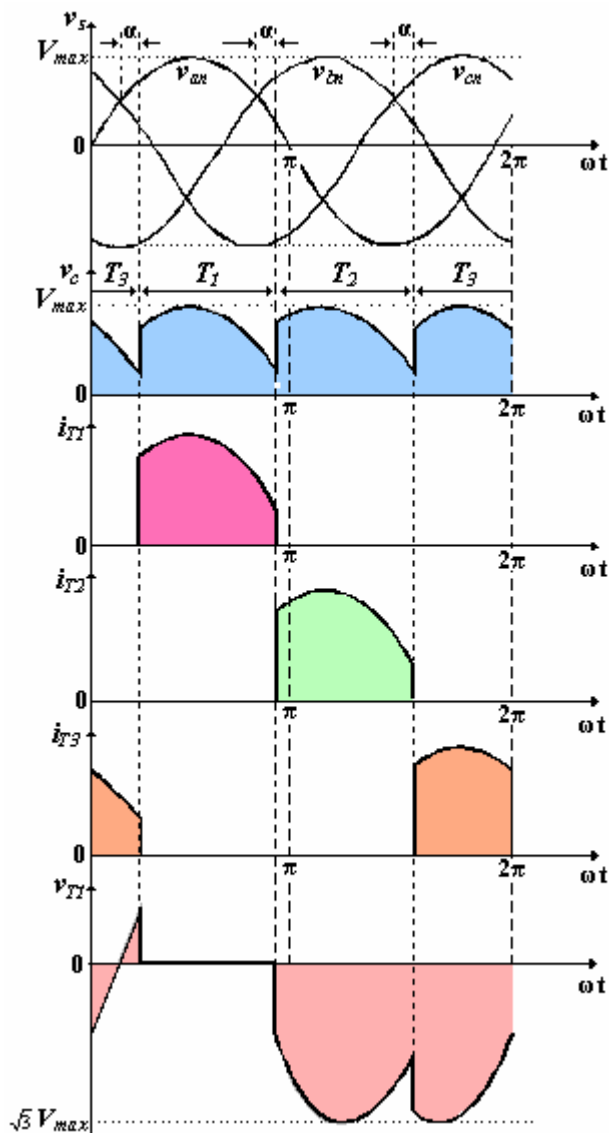


Fig 7. 40
Formas de onda para una corriente continuada en un rectificador trifásico de media onda con carga resistiva. Están representadas la tensión en la carga, corriente en los tiristores y tensión en extremos de T1. Al ser la corriente continuada, el tiristor en conducción permanecerá en ese estado hasta que se produzca el disparo en el siguiente tiristor al que le corresponde conducir.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi + \alpha} V_{\max} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_{\max} \sin \omega t \, d\omega t =$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{\max} \cos \alpha = 0,827 V_{\max} \cos \alpha$$

E 7.61

Para $\alpha=0^\circ$, la tensión media en la carga será V_{dc} y su valor: $V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{2\pi}$

y el valor normalizado de la tensión media valdrá: $V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} = \cos \alpha$

E 7.62

PROBLEMA 7.18

Dado un rectificador controlado trifásico de media onda con carga resistiva. Calcular lo siguiente:

- Tensión de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente de pico en los tiristores.
- Tensión inversa de pico en los tiristores.
- Corriente media en los tiristores.

DATOS: $R=25\ \Omega$; $V_{LS}=480V$, $f=50Hz$; $\alpha=25^\circ$

Solución: $V_{p(carga)} = 391,9V$; $V'_{dc} = 293,7V$; $I_{p(carga)} = 15,68A$; $I'_{dc} = 11,75A$; $I_{p(tiristor)} = 11,68A$; $PIV = 678,8V$; $I_{T(dc)} = 3,92A$.

❖ Estudio para una carga resistiva y $\alpha \geq 30^\circ$:

En este caso la corriente en la carga será discontinua:

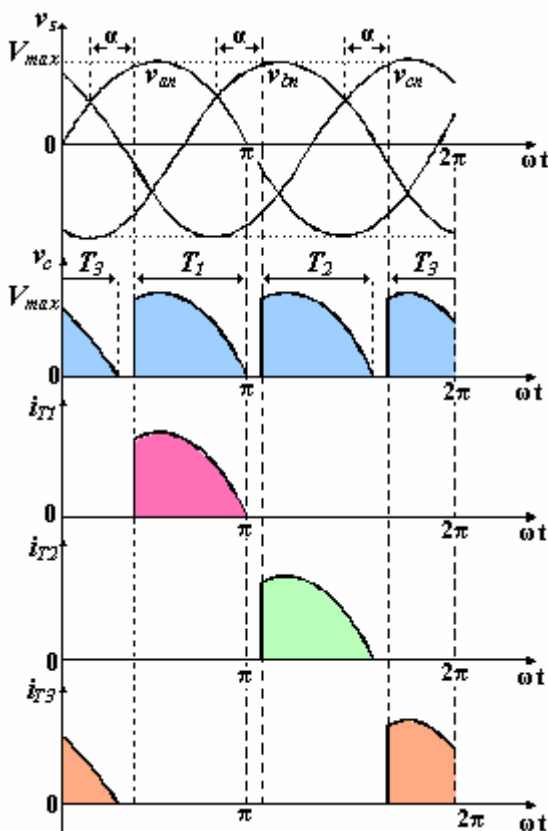


Fig 7.41

Formas de onda para corriente discontinua en el rectificador trifásico de media onda con carga resistiva. Se han representado la tensión en la carga, tensión en el secundario y corriente que circulará por los tiristores.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} V_{\max} \cos \omega t d\omega t = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} V_{\max} \sin \omega t d\omega t =$$

$$= \frac{3}{2\pi} V_{\max} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]$$

E 7.63



Cuestión didáctica 7. 6

Dado un rectificador controlado trifásico de media onda con carga resistiva. Calcular lo siguiente:

- Tensión de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente de pico en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente de pico en los tiristores.
- Tensión inversa de pico en los tiristores.
- Corriente media en los tiristores.

DATOS: $R=25 \Omega$; $V_{LS}=480V$; $f=50Hz$; $\alpha=80^\circ$

Solución: $V_{P(carga)} = 368,3V$; $V'_{dc} = 123,1V$; $I_{P(carga)} = 14,73A$; $I'_{dc} = 4,92A$; $I_{P(tiristor)} = 14,73A$; $PIV = 678,8V$; $I_{T(dc)} = 1,64A$

PROBLEMA 7. 19

Dado un rectificador controlado trifásico de media onda con carga resistiva, si queremos obtener una tensión media en la carga del 50% de la tensión máxima que se pueda obtener. Calcular lo siguiente:

- Valor mínimo de la tensión media en la carga que se puede obtener para corriente continuada.
- Ángulo de retardo α .
- Corriente media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Corriente media que circula por cada tiristor.
- Corriente eficaz que circula por cada tiristor.
- Rendimiento de la rectificación.
- Factor de utilización del transformador (TUF).
- Factor de potencia de entrada.

Datos: $R=10\Omega$; $V_{LS}=208V$; $f=50Hz$

Solución:

$$V_{FS} = \frac{V_{LS}}{\sqrt{3}} = 120,1V \rightarrow V_{\max} = \sqrt{2}V_{FS} = 169,83V$$

Como sabemos que el valor normalizado de la tensión media en la carga es $V'_{n(dc)}=0,5$ (50%), podemos calcular el valor de la tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{2\pi} = 140,45V \rightarrow V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} \rightarrow V'_{dc} = (0,5)(140,45) = 70,23V$$

...

...

- a) El valor mínimo de tensión media en la carga que podemos obtener para corriente continuada será el correspondiente a $\alpha=30^\circ$:

$$V'_{dc(30^\circ)} = 0,827V_{\max} \cos \alpha = (0,827)(169,83) \cos 30^\circ = 121,63V$$

- b) Como $V'_{dc(30^\circ)} > 70,23V$, tendremos corriente discontinua en la carga ($30^\circ < \alpha < 150^\circ$), así que relacionando valores tenemos que:

$$V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] = 0,5 \rightarrow \alpha = 67,7^\circ$$

- c) Calculamos ahora la intensidad media en la carga:

$$I'_{dc} = \frac{V'_{dc}}{R} = \frac{70,23}{10} = 7,02A$$

- d) Para calcular la corriente eficaz en la carga, debemos saber primero el valor de la tensión eficaz en la carga:

$$\begin{aligned} V'_{rms} &= \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} (V_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 d\omega t} = \\ &= \sqrt{3}V_{\max} \sqrt{\frac{5}{24} - \frac{\alpha}{4\pi} + \frac{1}{8\pi} \text{Sen} \left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha \right)} = 94,74V \rightarrow I'_{rms} = \frac{V'_{rms}}{R} = \frac{94,74}{10} = 9,47A \end{aligned}$$

- e) La corriente media que atraviesa cada tiristor será:

$$I_{T(dc)} = \frac{I'_{dc}}{3} = \frac{7,02}{3} = 2,34A$$

- f) La corriente eficaz que atraviesa cada tiristor será:

$$I_{T(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} (V_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 d\omega t} = \frac{I'_{rms}}{\sqrt{3}} = \frac{9,47}{\sqrt{3}} = 5,47A$$

- g) El rendimiento de la rectificación valdrá:

$$\eta = \frac{V'_{dc} I'_{dc}}{V'_{rms} I'_{rms}} = \frac{(70,23)(7,02)}{(94,74)(9,47)} = 0,5495 \rightarrow (54,95\%)$$

- h) Ahora calcularemos el factor de utilización del transformador:

$$TUF = \frac{V'_{dc} I'_{dc}}{S} \rightarrow S = 3V_{FS} I_{FS} = 3(120,1)(5,47) = 1970,84W$$

$$TUF = \frac{(70,23)(7,02)}{1970,84} = 0,25 \rightarrow (25\%)$$

- i) El factor de potencia de entrada será:

$$PF = \frac{P'_C}{S} \rightarrow P'_C = (I'_{rms})^2 R = (9,47)^2 10 = 896,81W$$

❖ Estudio para una carga altamente inductiva

Con una carga altamente inductiva, la corriente que atravesará la carga será continuada y de valor constante.

- Con $\alpha \leq 30^\circ$, la tensión en la carga es positiva.
- Con $\alpha > 30^\circ$, la tensión en la carga es negativa para unos fragmentos de periodo.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} V_{\max} \cos \omega t d\omega t = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} V_{\max} \sin \omega t d\omega t =$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{\max} \cos \alpha = 0,827 V_{\max} \cos \alpha$$

E 7.64

Podemos apreciar que el resultado obtenido es el mismo que para una carga resistiva con $\alpha \leq 30^\circ$, y es así por que en ambos casos la corriente en la carga es continuada.

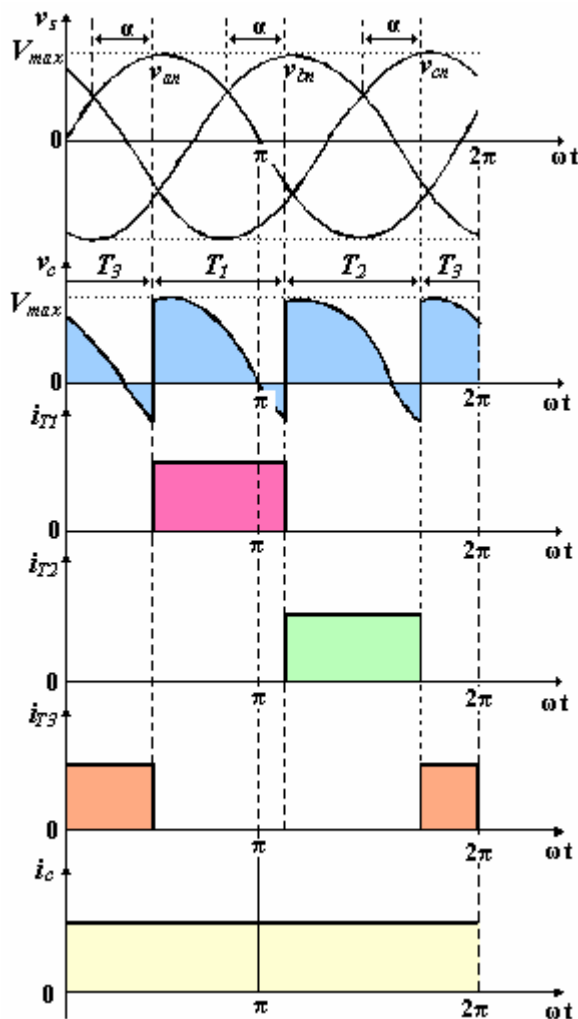


Fig 7. 42

Formas de onda en un rectificador trifásico de media onda con carga altamente inductiva. Se han representado la tensión en la carga, las corrientes en los tiristores y la corriente en la carga.

Con $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ se logran tensiones medias de salida positivas, por lo tanto trabajará en el primer cuadrante del diagrama tensión-corriente. Para $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ la tensión media en la carga será negativa y trabajará en el cuarto cuadrante.



Cuestión didáctica 7.7

Dado un rectificador controlado trifásico de media onda con carga altamente inductiva. Calcular lo siguiente:

- Tensión de pico en la carga.
- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Tensión inversa de pico en los tiristores.
- Corriente media en los tiristores.

DATOS: $R=25\ \Omega$; $V_{LS}=480V$; $f=50Hz$; $\alpha=50^\circ$

Solución: $V_{p(carga)} = 391,9V$; $V_{dc} = 208,3V$; $I_{dc} = 8,33A$; $PIV = 678,8V$; $I_{T(dc)} = 2,78A$

❖ Estudio para una carga inductiva con diodo volante

a)

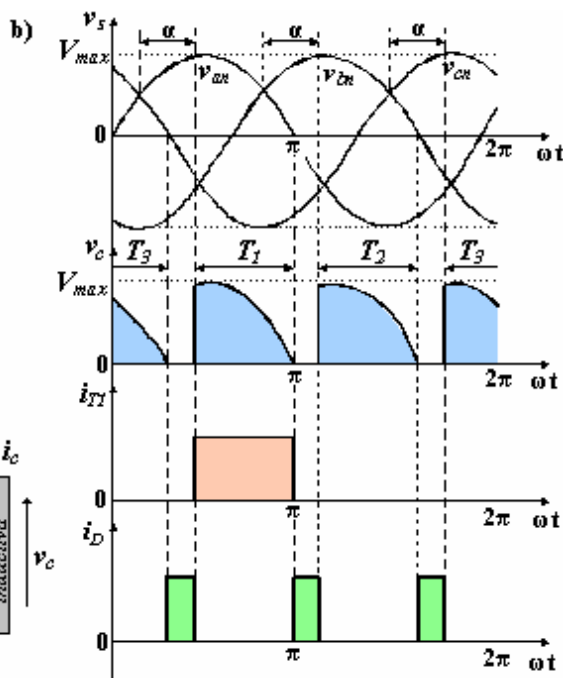
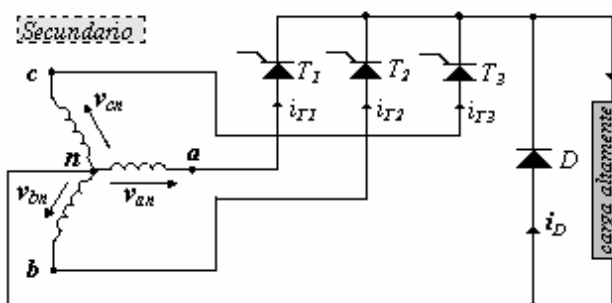


Fig 7. 43

a) Montaje para el puente rectificador trifásico de media onda con carga altamente inductiva y diodo volante.

b) Formas de onda del puente rectificador trifásico de media onda con carga altamente inductiva y diodo volante. Se han representado la tensión en la carga, intensidad en T1 e intensidad en el diodo volante.

- Para $\alpha \leq 30^\circ$, el valor de la tensión media en la carga viene dado por la ecuación usada para una carga resistiva y $\alpha \leq 30^\circ$ [E7.61].
- Para $30^\circ < \alpha < 150^\circ$, el valor de la tensión media en la carga vendrá dado por la ecuación usada para una carga resistiva y $30^\circ < \alpha < 150^\circ$ [E7.63]. En este caso el diodo volante conduce tres intervalos durante un periodo. Por ejemplo, para la fase V_{an} el tiristor T_1 conduce desde $\omega t = \alpha + \pi/6$ hasta $\omega t = \pi$, y el diodo volante conducirá desde $\omega t = \pi$ hasta que T_2 empieza a conducir para $\omega t = 5\pi/6$. Esto significa que el tiempo que están en conducción T_1 y el diodo volante en un ciclo, será $\pi/3$.

7.7.5 PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA

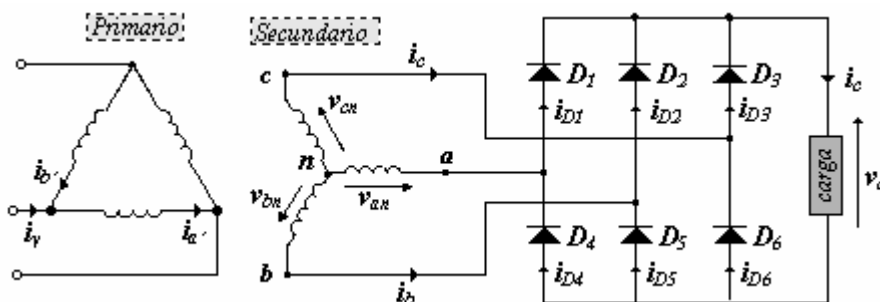


Fig 7.44
Montaje para el rectificador trifásico de onda completa. Se utiliza para aplicaciones de alta potencia.

Este tipo de circuitos se puede estudiar dividiéndolo en dos partes:

Rectificador tipo P: Será la parte de circuito compuesta por los diodos D_1 , D_2 , D_3 , y que tiene un comportamiento igual a un rectificador trifásico de media onda. En cualquier instante permitirá conectar a la carga el más alto de los voltajes trifásicos.

Rectificador tipo N: Está compuesto por los diodos D_4 , D_5 , D_6 , y en cualquier instante permitirá conectar a la carga con el más bajo de los tres voltajes de alimentación. Con la unión de ambas partes conseguimos que durante todo el tiempo se conecte el más alto de los tres voltajes a uno de los terminales de la carga y al otro terminal de la carga se conecte el más bajo de dichos voltajes.

En la figura que se muestra a continuación podemos observar como la parte superior de la forma de onda es la del grupo tipo P, y la inferior la del tipo N. Así, el voltaje en la carga puede considerarse como la suma de los voltajes de dos rectificadores de media onda trifásicos, con relación al neutro “n”.

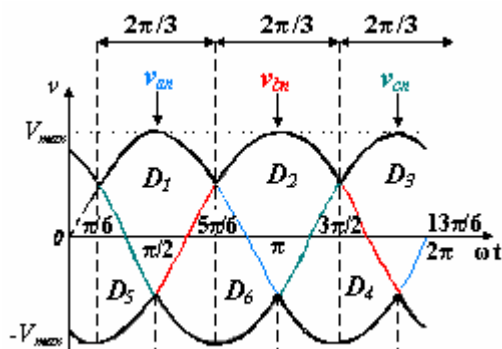


Fig 7.45
Formas de onda del puente rectificador trifásico.

En la figura 7.46, para la tensión en la carga vemos seis pulsos con una duración de $\pi/3$, provocando en cada periodo una secuencia de conducción de los diodos tal que:

$$D_3D_5; D_5D_1; D_1D_6; D_6D_2; D_2D_4; D_4D_3$$

La secuencia de conducción se corresponde con los seis voltajes senoidales por ciclo, y cuya diferencia de voltajes es:

$$V_{cn}-V_{bn}; V_{an}-V_{bn}; V_{an}-V_{cn}; V_{bn}-V_{cn}; V_{bn}-V_{an}; V_{cn}-V_{an}$$

El máximo voltaje será $\sqrt{3}V_{\max}$.

En la siguiente página también se muestra un diagrama fasorial donde se pueden apreciar los voltajes compuestos, tomando V_{ab} como origen de fases.

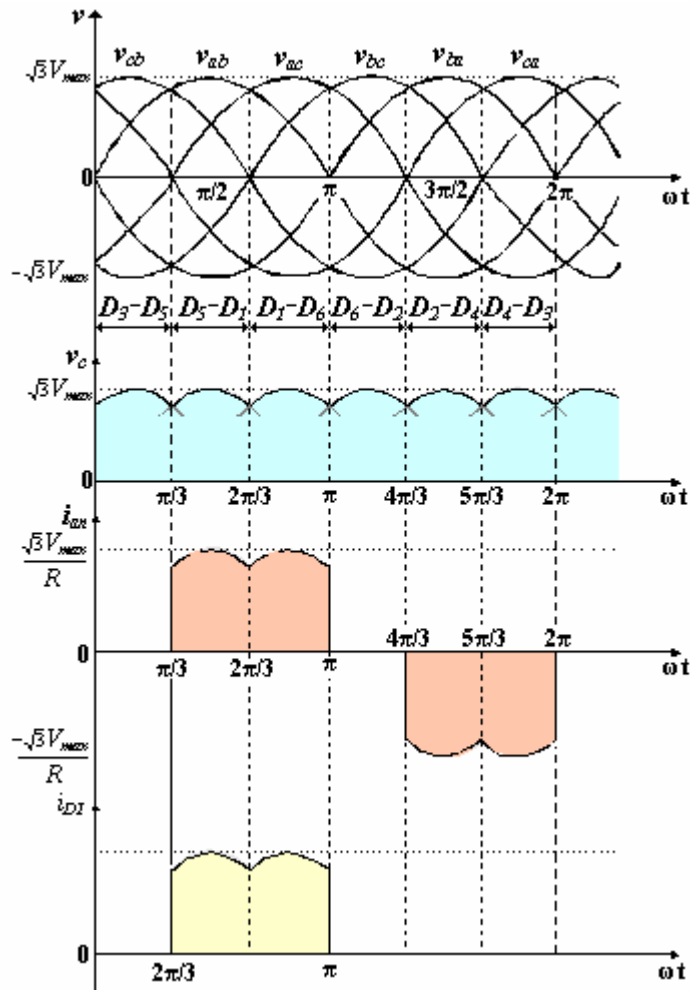


Fig 7. 46
Formas de onda del puente rectificador trifásico.

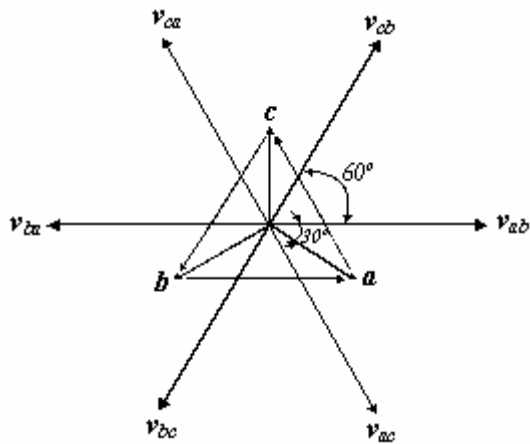


Fig 7. 47
Diagrama fasorial

Tensión media en la carga: Se puede calcular obteniendo la tensión media que entrega cada rectificador de media onda (tipo P y tipo N) que compone el puente:

$$V_{dc} = 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_{\max} \cos \omega t d\omega t = 1,654 V_{\max}$$

E 7.65

Se puede también considerar como un rectificador hexafásico de media onda, cuya tensión es la de fase-fase:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_{\max} \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} = 1,654 V_{\max} \quad \text{E 7.66}$$

y podemos decir que:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{F(\max)} = \frac{3}{\pi} V_{L(\max)} \quad \text{E 7.67}$$

Tensión eficaz en la carga:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi/6} 3(V_{\max})^2 (\cos \omega t)^2 d\omega t} = \left(\sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} \right) V_{\max} = 1,6554 V_{\max} \quad \text{E 7.68}$$

Corriente media en los diodos: La corriente de pico en los diodos es $I_{\max} = \sqrt{3} V_{\max} / R$, que se corresponde con la corriente máxima de línea. Además cabe destacar que en los diodos circula la intensidad que atraviesa la carga, durante $T/3$.

$$I_{D(dc)} = \frac{1}{3} I_{0(dc)} = \frac{V_{L\max}}{\pi \cdot R} = 0.3183 \cdot I_{\max} \quad \text{E 7.69}$$

Corriente eficaz en los diodos:

$$I_{D(rms)} = \frac{I_{0(rms)}}{\sqrt{3}} \quad \text{E 7.70}$$

Corriente eficaz en el secundario del transformador:

$$I_{S(rms)} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{0(rms)} \quad \text{E 7.71}$$

La corriente eficaz de carga es aproximadamente igual a la corriente media ya que los términos de alterna son pequeños.

Los coeficientes de los términos seno de la serie de Fourier son nulos por simetría por lo que podemos expresar la tensión de la siguiente manera:

$$v_0(t) = v_0 + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} u_n \cos(n\omega_0 t + \pi)$$

$$u_n = \frac{6 \cdot V_{m,L-L}}{\pi(n^2 - 1)} \quad n = 6, 12, 18, \dots$$

Cuando la tensión de salida es periódica, con un periodo de $1/6$ de la tensión del generador de alterna, los armónicos a la salida son del orden $6k\omega$, siendo $k = 1, 2, 3, \dots$

Potencia aparente del generador

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{L-L(rms)} \cdot I_{S(rms)}$$

PROBLEMA 7. 20

Dado un puente rectificador trifásico de onda completa con carga resistiva, calcular lo siguiente:

- Tensión media en la carga.
- Corriente media en la carga.
- Corriente media en los diodos.
- Tensión inversa de pico en los diodos.
- Potencia media en la carga.

DATOS: $R = 100 \Omega$; $V_{LS} = 480 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$

Solución:

- Primero calcularemos el valor de la V_{\max} (fase-neutro) y después, usando la ecuación E2.43 hallaremos la tensión media en la carga:

$$V_{\max} = \sqrt{2} V_{FS} = \frac{\sqrt{2} V_{LS}}{\sqrt{3}} = 391,9 \text{ V} \rightarrow V_{dc} = 1,654 V_{\max} = 648,2 \text{ V}$$

- La corriente media en la carga es:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{648,2}{100} = 6,482 \text{ A}$$

- Usando la ecuación [E7.69], calculamos la corriente media en los diodos:

$$I_{D(dc)} = 0,3183 I_{\max} = \frac{0,3183 V_{L(\max)}}{R} = \frac{(0,3183)\sqrt{3}(460)}{100} = 2,07 \text{ A}$$

- La tensión máxima de línea será la tensión inversa de pico que soportarán los diodos:

$$PIV = V_{LS} \sqrt{2} = (460)(1,414) = 650 \text{ V}$$

- Y la potencia media será:

$$P_{dc} = (I_{dc})^2 R = (6,482)^2 (100) = 4201,63 \text{ W}$$

Descripción del circuito:

```

Problema7_20: PUENTE RECTIFICADOR TRIFASICO CON CARGA RLE
.PARAM VPICO={392}
Van 0 1 SIN (0V {VPICO} 50HZ)
Vbn 0 4 SIN (0V {VPICO} 50HZ 0S 0S -120DEG)
Vcn 0 6 SIN (0V {VPICO} 50HZ 0S 0S -240DEG)
R 3 5 100HM
*L 7 8 1.5MH
*VX 8 5 DC 10V
VY 1 2 DC 0V
D1 2 3 DMOD
D2 4 3 DMOD
D3 6 3 DMOD
D4 5 2 DMOD
D5 5 4 DMOD
D6 5 6 DMOD
.MODEL DMOD D (IS=2.22E-15 BV=1200V IBV=13E-3 CJO=2PF TT=1US)
.TRAN 10US 40MS 20MS 10US
.PROBE
.OPTIONS ABSTOL=1.0N RELTOL=1.0M VNTOL=1.0M ITL5=20000
.FOUR 50HZ I(VY)
.END
  
```





PROBLEMA 7.21

El rectificador trifásico de la figura 7.44 utiliza un generador trifásico con una tensión eficaz de 480V de línea a línea, y la carga es una resistencia de $25\ \Omega$ en serie con una bobina de 50mH.

Calcular:

- El nivel de continua de la tensión de salida.
- El término de continua y el primer término de alterna de la corriente de carga.
- La corriente media y la corriente eficaz en los diodos.
- La corriente eficaz en el generador.
- La potencia aparente del generador.

Solución: (a) $V_0 = 648\text{V}$; (b) $I_0 = 25.9\text{A}$, $I_{6(\text{rms})} = 0.23\text{A}$; (c) $I_{D(\text{med})} = 8.63\text{A}$, $I_{D(\text{rms})} = 15.0\text{A}$ (d) $I_{S(\text{rms})} = 21.2\text{A}$; (e) $S = 17.6\text{kVA}$

[Hart]

❖ Formas de onda para una carga altamente inductiva

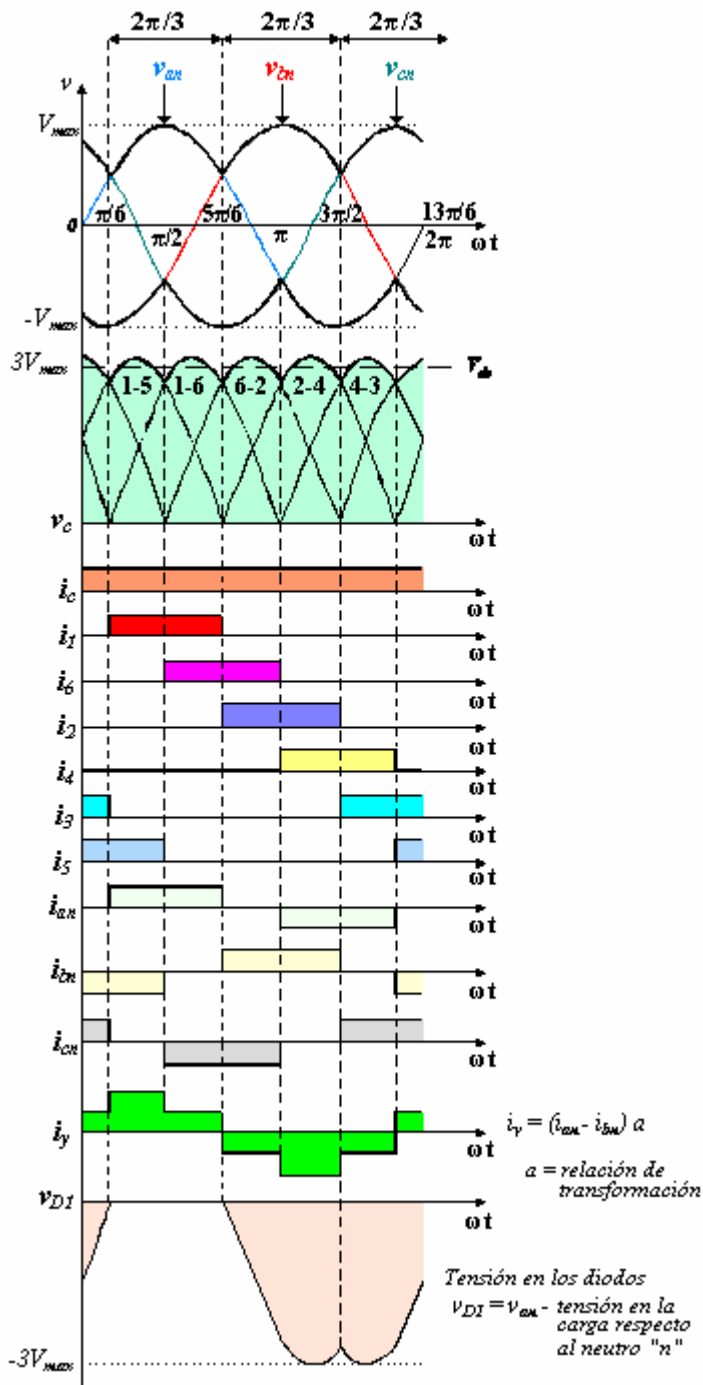


Fig 7. 48
Formas de onda de un puente rectificador trifásico, con carga altamente inductiva.

La serie de Fourier de las corrientes en la fase a de la línea de alterna es:

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_0 \left(\cos \omega_0 t - \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t + \frac{1}{7} \cos 7\omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_0 t - \dots \right)$$

armónicos $6k \pm 1$ para $k = 1, 2, 3 \dots$

PROBLEMA 7.22

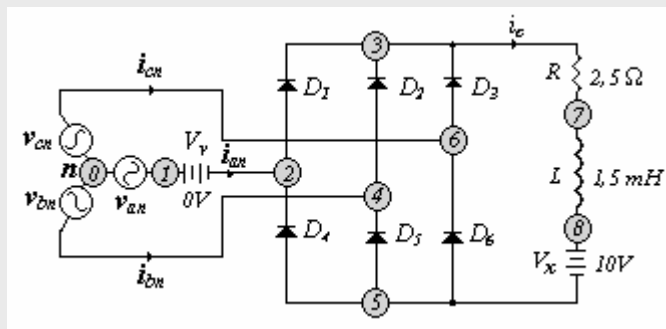
Dados el circuito a simular y el listado de un puente rectificador trifásico de onda completa con carga RLE.

- Obtener gráficamente la representación instantánea de la corriente de entrada, intensidad en la carga, y tensión en la carga, mediante Pspice.
- Obtener los coeficientes de Fourier de la corriente de entrada y el factor de potencia de entrada

DATOS: $R=2,5 \Omega$; $L=1,5 \text{ mH}$; $E=10 \text{ V}$; $V_{ab}=208 \text{ V}$; $f=50 \text{ Hz}$

Solución:

- El circuito a simular y el listado son los siguientes:



Problema7_22: PUENTE RECTIFICADOR TRIFASICO CON CARGA RLE

```
Van 0 1 SIN (0V 169.7V 50HZ)
Vbn 0 4 SIN (0V 169.7 50HZ 0S 0S -120DEG)
Vcn 0 6 SIN (0V 169.7 50HZ 0S 0S -240DEG)
```

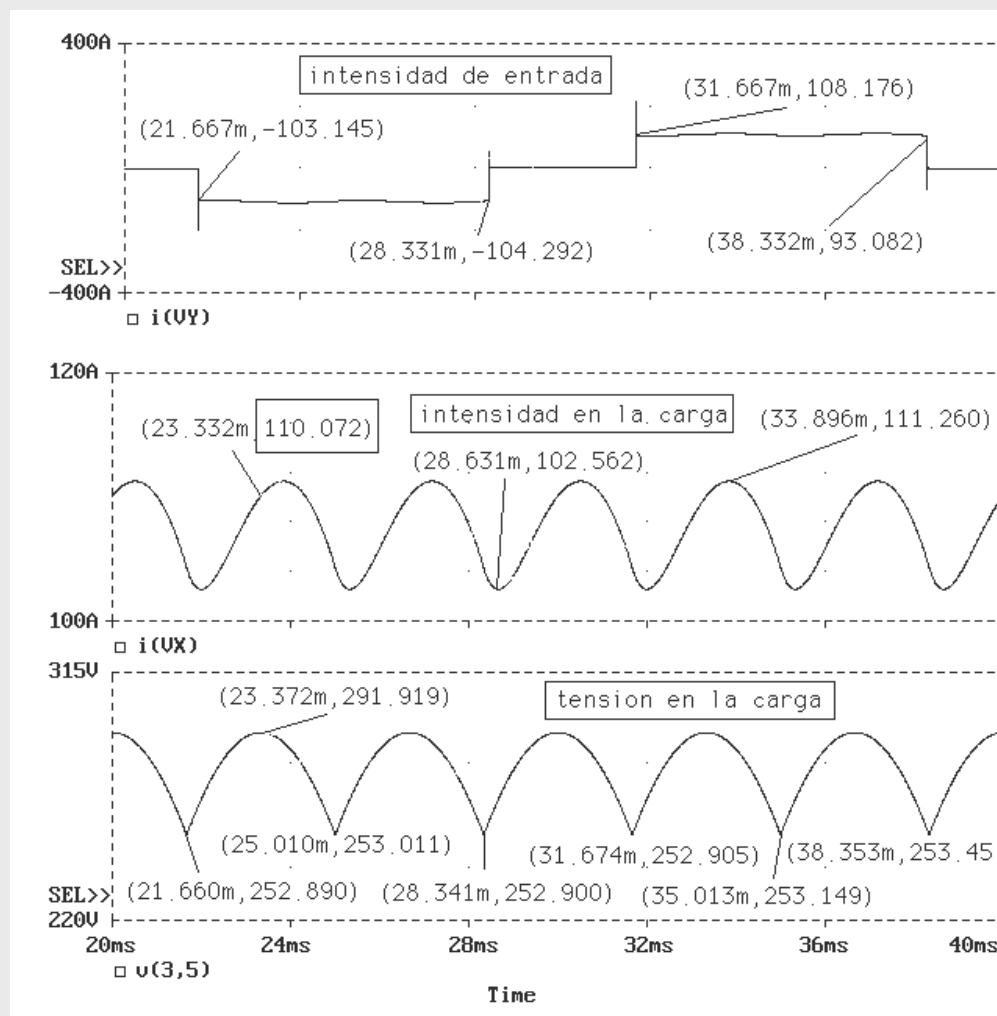
```
R 3 7 2.5HM
L 7 8 1.5MH
VX 8 5 DC 10V
VY 1 2 DC 0V
```

```
D1 2 3 DMOD
D2 4 3 DMOD
D3 6 3 DMOD
D4 5 2 DMOD
D5 5 4 DMOD
D6 5 6 DMOD
```

```
.MODEL DMOD D (IS=2.22E-15 BV=1200V IBV=13E-3 CJO=2PF TT=1US)
.TRAN 10US 40MS 20MS 10US
.PROBE
.OPTIONS ABSTOL=1.0N RELTOL=1.0M VNTOL=1.0M ITL5=20000
.FOUR 50HZ I(VY)
.END
```



Y las formas de onda que se obtienen serán:



Se puede apreciar que $I_1=110,072A$.

- b) Para obtener el factor de potencia de entrada, tenemos que obtener los coeficientes de Fourier de la corriente de entrada.

7.7.6 PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO TOTALMENTE CONTROLADO

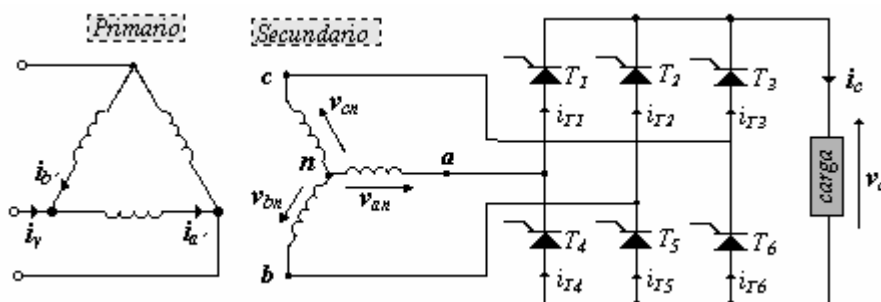
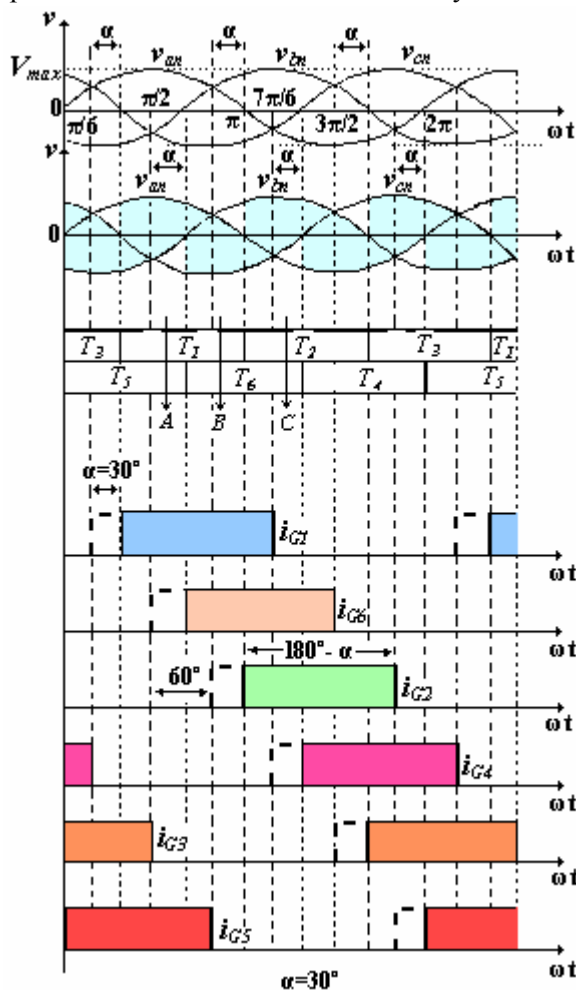


Fig 7. 49
Montaje para el puente rectificador trifásico totalmente controlado. Es de onda completa con 6 tiristores y se usa en aplicaciones industriales de más de más de 120kW.

Esta configuración puede trabajar en el primer y cuarto cuadrante del diagrama tensión-intensidad.

El circuito de disparo ha de suministrar 6 impulsos de control para cada período de la tensión de alimentación, separados $\pi/3$ en el tiempo, con una duración por impulso de $180^\circ - \alpha$, contando α desde el instante de conmutación natural si fueran diodos. El orden en que los tiristores reciben sus impulsos se debe al orden de encendido y su ubicación.



[7_5]

Fig 7. 50

Formas de onda para $\alpha=30^\circ$, en un puente rectificador trifásico totalmente controlado. Podemos apreciar los tiempos de conducción de los tiristores que forman el puente, trabajando con carga resistiva.

-Instante A: encendido simultáneo de T_5 y T_1 que da origen al siguiente circuito:

$$V_{an}-T_1-CARGA-T_5-V_{bn}$$

-Instante B: una vez encendido T_1 y tras un desfase de 60° , llega un impulso hasta la puerta de T_6 , y esto hace que dicho tiristor conduzca y que la corriente conmute de T_5 a T_6 dando origen al circuito siguiente:

$$V_{an}-T_1-CARGA-T_6-V_{cn}$$

-Instante C: T_2 recibe el impulso principal 60° después de la entrada en conducción de T_6 . Esto hace que T_2 conduzca y la corriente conmute de T_1 a T_2 , donde resultará el siguiente circuito:

$$V_{bn}-T_2-CARGA-T_6-V_{cn}$$

Para nuestro montaje, el orden de conducción será:

$$T_1-T_6; T_6-T_2; T_2-T_4; T_4-T_3; T_3-T_5; T_5-T_1$$

Tensiones de línea:	Tensiones de fase:
$v_{ab} = v_{an} - v_{bn} = \sqrt{3}V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$ $v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} = \sqrt{3}V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ $v_{ca} = v_{cn} - v_{an} = \sqrt{3}V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$	<p>(Siendo V_{\max} la tensión máxima de fase)</p> $V_{an} = V_{\max} \text{Sen} \omega t$ $V_{bn} = V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$ $V_{cn} = V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$

A continuación se muestra el desarrollo de la tensión rectificada para diversos ángulos de control α y con carga resistiva:

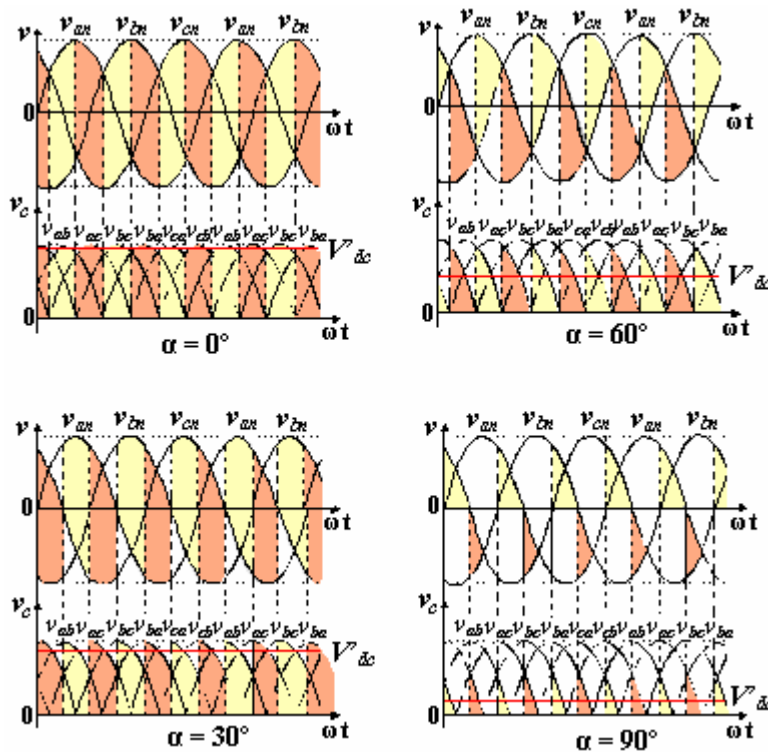


Fig 7. 51
Formas de onda de la tensión en la carga para los ángulos de control: $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$.

En la siguiente figura se ilustra la característica de control del puente rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva:

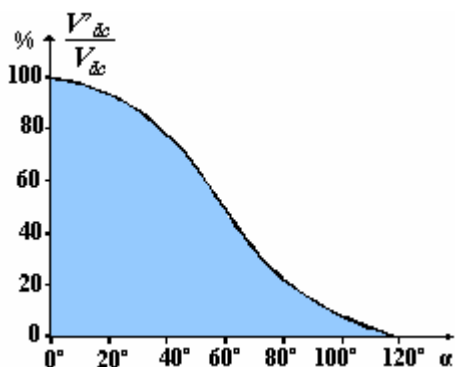


Fig 7. 52
Característica de control del puente rectificador trifásico totalmente controlado.

❖ Estudio para un ángulo de retardo $\alpha \leq 60^\circ$:

Con estas condiciones tendremos en la carga una tensión continuada positiva. Tomando como ejemplo la figura 7.50, para $\alpha = 30^\circ$, vemos que cada tiristor empieza a conducir 30° después de que lo hiciera el mismo montaje pero con diodos. Cada elemento conducirá durante 60° , igual que lo hacía en el puente no controlado.

Tensión media en la carga: Integrando para un intervalo de 60° tenemos:

$$V'_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_{ab} d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{3} V_{\max} \text{Sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d\omega t = \frac{3\sqrt{3} V_{\max}}{\pi} \text{Cos } \alpha$$

E 7.72

$$V'_{dc} = 1,654 V_{\max} \text{Cos } \alpha$$

O de otra forma, si tomamos el circuito como dos rectificadores trifásicos controlados de media onda:

$$V'_{dc} = 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{\pi}{3}+\alpha} V_{\max} \cos \omega t d\omega t = 1,654 V_{\max} \cos \alpha \quad \text{E 7.73}$$

El valor máximo se dará para $\alpha=0$, siendo $\rightarrow V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{\pi}$

Tensión eficaz en la carga:

$$V'_{rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} (V_{ab})^2 d\omega t} = \sqrt{3} V_{\max} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha} \quad \text{E 7.74}$$

PROBLEMA 7. 23

Dado un puente rectificador trifásico totalmente controlado con carga resistiva. Si se quiere obtener una tensión media en la carga del 50% de la tensión máxima que se pueda obtener. Calcular lo siguiente:

- El mínimo valor de tensión media que se puede obtener para corriente continuada.
- Ángulo de retardo α .
- Corriente media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Corriente media que circula en los tiristores.
- Corriente eficaz que circula en los tiristores.
- Rendimiento de la rectificación.
- Factor de utilización del transformador (TUF).
- Factor de potencia de entrada.

DATOS: $R=10 \Omega$; $V_{LS}=208V$; $f=50Hz$

Solución:

$$V_{FS} = \frac{V_{LS}}{\sqrt{3}} = 120,1V \rightarrow V_{\max} = \sqrt{2} V_{FS} = 169,83V \text{ (Tensión máxima de fase)}$$

Como sabemos que el valor normalizado de la tensión media en la carga es $V'_{n(dc)}=0,5$ (50%), podemos calcular el valor de la tensión media en la carga:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{\pi} = 280,9V \rightarrow V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} \rightarrow V'_{dc} = (0,5)(280,9) = 140,5V$$

a) El valor mínimo de tensión media en la carga que podemos obtener para corriente continuada será el correspondiente a $\alpha=60^\circ$:

$$V'_{dc(60^\circ)} = 1,654 V_{\max} \cos \alpha = (1,654)(169,83) \cos 60^\circ = 140,5V$$

b) Como $V'_{dc}=V'_{dc}(60^\circ)$, significa que el ángulo de disparo será $\alpha = 60^\circ$.

c) Calculamos ahora la intensidad media en la carga:

$$I'_{dc} = \frac{V'_{dc}}{R} = \frac{140,45}{10} = 14,05A$$

d) Para calcular la corriente eficaz en la carga, debemos saber primero el valor de la tensión eficaz en la carga:

...

...

$$V'_{rms} = \sqrt{3}V_{\max} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos((2)(60^\circ))} = 159,29V$$

$$I'_{rms} = \frac{V'_{rms}}{R} = \frac{159,29}{10} = 15,93A$$

e) La corriente media que atraviesa cada tiristor será:

$$I_{T(dc)} = \frac{I'_{dc}}{3} = \frac{14,05}{3} = 4,68A$$

f) La corriente eficaz que atraviesa cada tiristor será:

$$I_{T(rms)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \left[\sqrt{3}V_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]^2 d\omega t} = I'_{rms} \sqrt{\frac{1}{3}} = 9,2A$$

g) El rendimiento de la rectificación valdrá:

$$\eta = \frac{V'_{dc} I'_{dc}}{V'_{rms} I'_{rms}} = \frac{(140,45)(14,05)}{(159,29)(15,93)} = 0,778 \rightarrow (77,8\%)$$

h) Ahora calcularemos el factor de utilización del transformador:

$$TUF = \frac{V'_{dc} I'_{dc}}{S} \rightarrow S = 3V_{FS} I_{FS} \rightarrow I_S = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \left[\sqrt{3}V_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]^2 d\omega t}$$

$$I_S = I'_{rms} \sqrt{\frac{2}{3}} = 13A \rightarrow S = 3(120,1)(13) = 4683,9W$$

$$TUF = \frac{(140,45)(14,05)}{4683,9} = 0,421 \rightarrow (42,1\%)$$

i) El factor de potencia de entrada será:

$$PF = \frac{P'_C}{S} \rightarrow P'_C = (I'_{rms})^2 R = (15,93)^2 10 = 2537,6W$$

$$PF = 0,542 \text{ (en retraso)}$$

El factor de potencia obtenido es menor que para un puente rectificador trifásico semicontrolado, pero mayor que para un rectificador trifásico de media onda.

❖ Estudio para un ángulo de retardo $\alpha > 60^\circ$:

- En caso de carga inductiva, el valor de la tensión en la carga se puede hacer negativo para algunos tramos de un ciclo.
- Si tenemos una carga altamente inductiva y sin diodo volante, habrá una corriente continuada en la carga y aplicaremos las ecuaciones [E7.72] y [E7.74] para hallar la V'_{dc} y la V'_{rms} respectivamente.

- Si tenemos carga altamente inductiva y diodo volante o la carga es resistiva, los tiristores conducirán desde que se disparan (para $\alpha > 60^\circ$) hasta que el valor instantáneo de la tensión en la carga sea cero. Por lo tanto tendremos corriente discontinua en la carga.

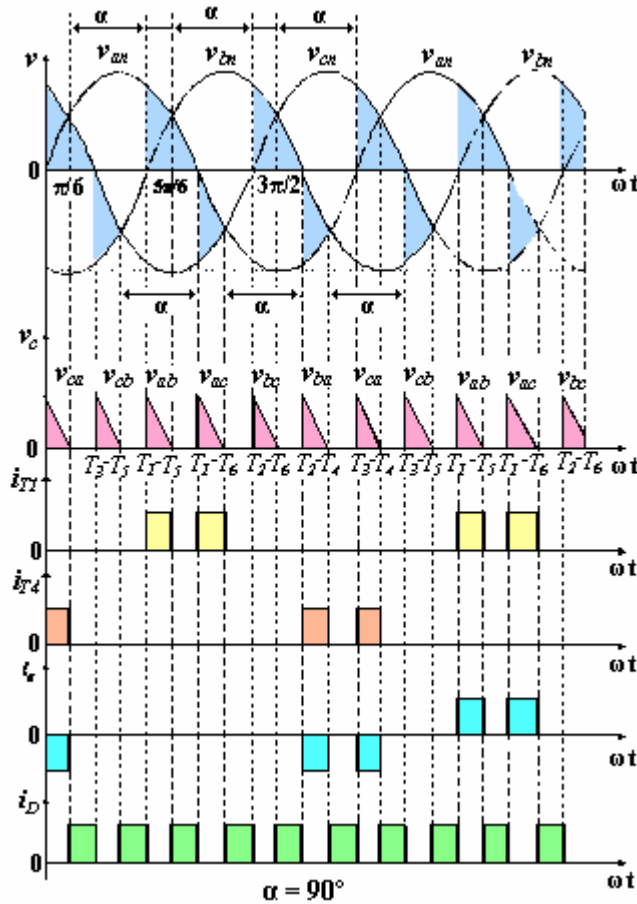


Fig 7. 53

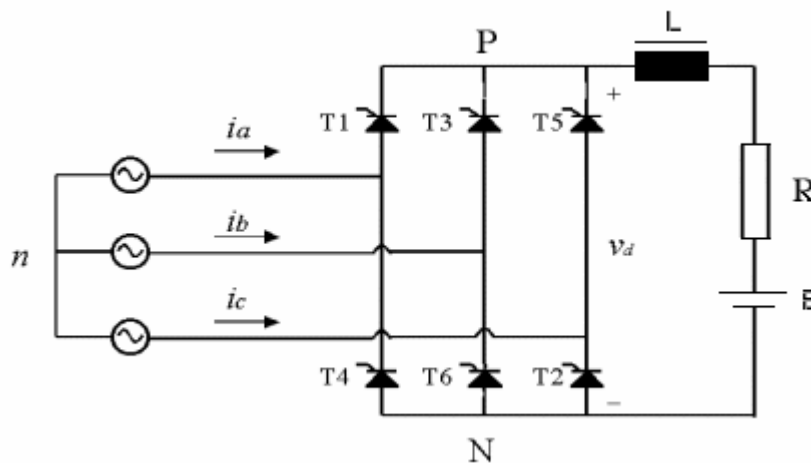
Formas de onda del puente rectificador trifásico totalmente controlado con carga inductiva y diodo volante para $\alpha=90^\circ$. Podemos apreciar que no tenemos tensiones negativas en la carga.

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} v_{ab} d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \sqrt{3}V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t$$

$$V'_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_{\max}}{\pi} \left[1 + \text{Cos}\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]$$

E 7.75



Puente rectificador trifásico totalmente controlado



www.voltio.ujaen.es/jaguiar



PROBLEMA 7.24

Dado un puente rectificador trifásico totalmente controlado con carga RLE, y usando Pspice. Obtener lo siguiente:

- La representación gráfica de la tensión en la carga (v_c), intensidad en la carga (i_c), e intensidad de entrada (i_s).
- Los coeficientes de Fourier de la corriente de entrada i_s , y el factor de potencia de entrada PF.

DATOS: $R=0,5\Omega$; $L=6,5\text{mH}$; $E=10\text{V}$; $V_s=120\text{V}$; $f=50\text{Hz}$; $\alpha=60^\circ$

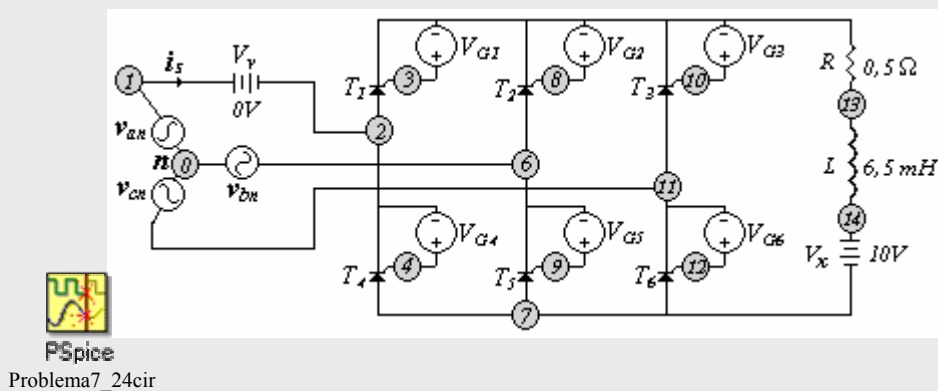
Solución:

$$V_{\max} = \sqrt{2}V_s = 169,7\text{V}$$

Para $\alpha=60^\circ$, los tiempos de retardo aplicados a los tiristores serán:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{(90)(20\text{msg})}{360} = 5\text{msg}; & t_2 &= \frac{(210)(20\text{msg})}{360} = 11,666\text{msg}; \\ t_3 &= \frac{(330)(20\text{msg})}{360} = 18,333\text{msg}; & t_4 &= \frac{(270)(20\text{msg})}{360} = 15\text{msg}; \\ t_5 &= \frac{(30)(20\text{msg})}{360} = 1,666\text{msg}; & t_6 &= \frac{(150)(20\text{msg})}{360} = 8,333\text{msg} \end{aligned}$$

A continuación se muestran el circuito a simular y su listado:



7.7.7 PUENTE RECTIFICADOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO

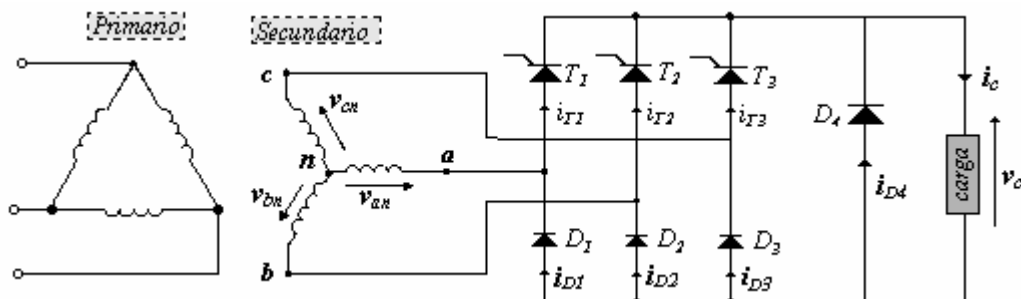


Fig 7. 54

Montaje para el puente rectificador trifásico semicontrolado. Esta configuración es usada en aplicaciones industriales de más de 120kW en las que se requiera que el convertidor trabaje en el primer cuadrante.

En la figura 7.55 se muestra la tensión entregada a la carga para distintos ángulos de disparo en un puente rectificador trifásico totalmente controlado y en un puente rectificador trifásico semicontrolado. La tensión instantánea en la carga se anula para $\alpha=60^\circ$, y se acentúa más a medida

que aumenta α , por lo que la tensión media en la carga va de un máximo positivo para $\alpha = 0^\circ$, hasta un valor nulo para $\alpha = 180^\circ$. El armónico fundamental de la tensión rectificada es de 150Hz, en caso de redes de 50Hz.

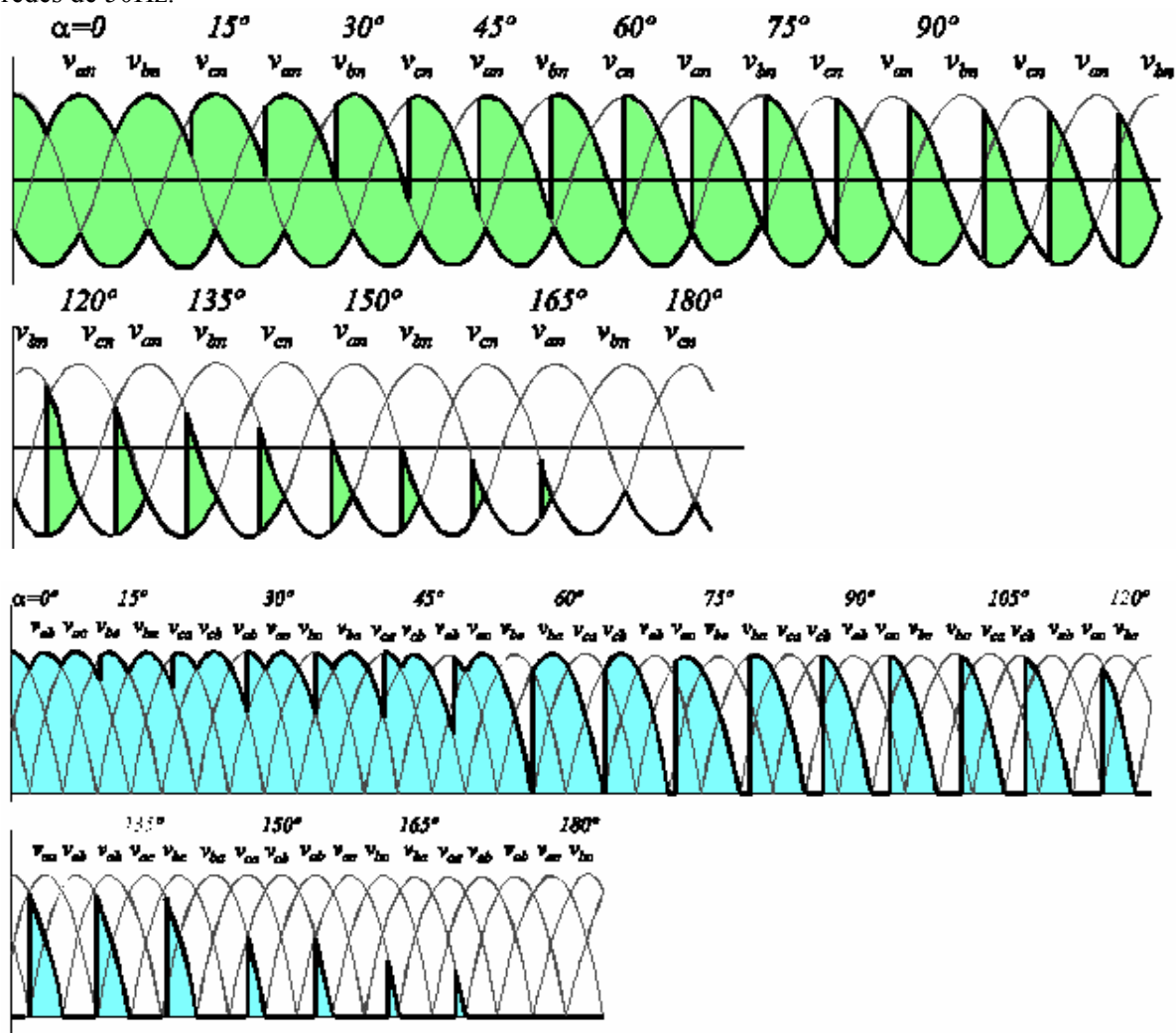


Fig 7. 55

Comparación de las tensiones proporcionadas a la carga para distintos ángulos de disparo:

- a) Para el puente rectificador trifásico totalmente controlado.
b) Para el puente rectificador trifásico semicontrolado.



Cuestión didáctica 7. 8

Dado un puente rectificador trifásico semicontrolado con carga resistiva, queremos obtener una tensión media en la carga del 50% de la tensión máxima que se pueda obtener.

Calcular:

- El mínimo valor de tensión media que se puede obtener para corriente continuada.
- Ángulo de retardo α .
- Corriente media en la carga.
- Corriente eficaz en la carga.
- Corriente media que circula por cada tiristor.
- Corriente eficaz que circula por cada tiristor.
- Rendimiento de la rectificación.
- Factor de utilización del transformador (TUF).
- Factor de potencia de entrada (PF).

DATOS: $R = 10 \Omega$; $V_{LS} = 208V$; $f = 50Hz$

Solución: $V_{dc(60^\circ)} = 210,67V$, $\alpha = 90^\circ$, $I'_{dc} = 14,05A$, $I'_{rms} = 18,01A$, $I_{T(dc)} = 4,68A$

$I_{T(rms)} = 10,4A$, $0(\%) = 60,8\%$, $TUF(\%) = 37,2\%$, $PF = 0,612$ (retraso).

PROBLEMA 7.25

Dado un puente rectificador trifásico semicontrolado con carga RLE, y usando Pspice. Obtener lo siguiente:

- La representación gráfica de la tensión en la carga (v_C), intensidad en la carga (i_C), e intensidad de entrada (i_S).
- Los coeficientes de Fourier de la corriente de entrada i_S , y el factor de potencia de entrada PF. Comparar este factor de potencia con el obtenido en el problema 7.20 y comentar el resultado.

DATOS: $R=0,5\ \Omega$; $L=6,5\text{mH}$; $E=10\text{V}$; $V_S=120\text{V}$; $f=50\text{Hz}$; $\alpha=60^\circ$

Solución:

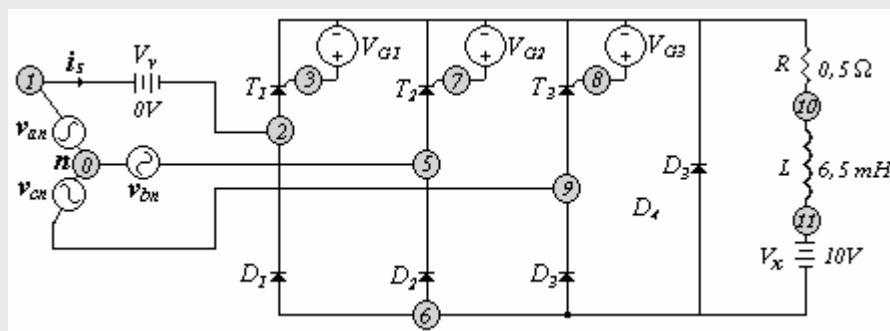
$$V_{\max} = \sqrt{2}V_S = 169,7\text{V}$$

Para $\alpha=60^\circ$, los tiempos de retardo aplicados a los tiristores serán:

$$t_1 = \frac{(90)(20\text{msg})}{360} = 5\text{msg}; \quad t_2 = \frac{(210)(20\text{msg})}{360} = 11,666\text{msg};$$

$$t_3 = \frac{(330)(20\text{msg})}{360} = 18,333\text{msg};$$

A continuación se muestran el circuito a simular, su listado y las tensiones de puerta:



Problema7_25.cir

PSPICE

Podemos apreciar que en este caso (semicontrolado), el factor de potencia obtenido es superior al calculado en el ejemplo anterior (totalmente controlado). Como sabemos, este factor indica la cantidad de energía que se aprovecha con respecto a la fuente primaria. Esto hace que el rectificador trifásico semicontrolado presente unas características muy interesantes para el control de motores, y en igualdad de condiciones, incluso superiores al rectificador totalmente controlado.

7.8 Conmutación: El efecto de la inductancia del generador

Hasta ahora hemos considerado que cuando un tiristor se cebaba, el semiconductor se bloqueaba instantáneamente. Pero siempre hay inductancias en el circuito que no permiten variaciones tan rápidas de las corrientes.

7.8.1 CONMUTACIÓN EN RECTIFICADORES MONOFÁSICOS CONTROLADOS CON TRANSFORMADOR DE TOMA INTERMEDIA

Para este montaje vamos a representar el conjunto de las inductancias que actúan en el circuito, por dos inductancias iguales y colocadas cada una de ellas en serie con un tiristor:

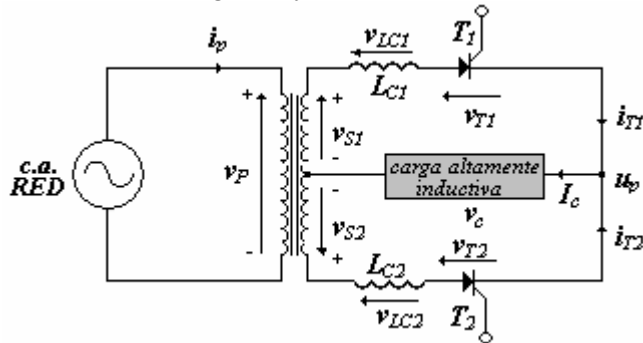


Fig 7. 56
Montaje monofásico con transformador de toma intermedia con reactancia de conmutación.

Supongamos que está conduciendo T_1 y que en el instante t_0 cebamos el T_2 ; la corriente en este tiristor no puede aumentar instantáneamente hasta el valor de la corriente constante I_C que circula por la carga. La inductancia L_{C1} provoca un aumento de tensión, mientras L_{C2} provoca una disminución de la tensión, de forma T_1 y T_2 conducen simultáneamente hasta que i_{T1} se anule e i_{T2} sea igual a la corriente I_C , en el instante t_1 : $i_{T1} + i_{T2} = I_C$

Mientras los dos tiristores conducen simultáneamente, la fuente de alimentación está cortocircuitada. Las tensiones en bornes de las inductancias de conmutación serán:

$$v_{LC1} = L_C \left(\frac{di_{T1}}{dt} \right) \quad v_{LC2} = L_C \left(\frac{di_{T2}}{dt} \right)$$

y como estas tensiones son iguales y de signo contrario:

$$\frac{di_{T1}}{dt} = - \frac{di_{T2}}{dt}$$

Los dos tiristores tienen el cátodo al mismo potencial u_p , y la velocidad de variación de la corriente en los tiristores durante la conmutación es:

$$u_p = v_1 - L_C \left(\frac{di_{T1}}{dt} \right) = v_2 - L_C \left(\frac{di_{T2}}{dt} \right) = v_2 + L_C \left(\frac{di_{T1}}{dt} \right)$$

$$2L_C \left(\frac{di_{T2}}{dt} \right) = -2L_C \left(\frac{di_{T1}}{dt} \right) = v_2 - v_1 \rightarrow \left(\frac{di_{T2}}{dt} \right) = \frac{1}{2L_C} (v_2 - v_1)$$

La corriente en un tiristor, durante la conmutación, variará tanto más rápidamente cuanto mayor sea la diferencia de tensión entre las dos fases en el instante dado y cuanto menor sea la inductancia de conmutación.

A veces es necesario conocer la duración de la conmutación. El intervalo de tiempo $t_1 - t_0$ se expresa por el ángulo μ , (ángulo de conmutación). Para un grupo con cebado natural tenemos:

$$1 - \cos \mu = \frac{2X_C I_C}{2V_{\max}}$$

Y para cebado controlado:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) = \frac{2X_C I_C}{2V_{\max}} = \frac{\omega L_C I_C}{V_{\max}}$$

E 7.76

donde:

$$X_c = L_c \omega \quad \omega = 2\pi f \quad V_{\max} = \sqrt{2}V_s \quad V_s = V_1 = V_2$$

Caída de tensión debida a la conmutación: En el circuito habrá una pérdida de tensión relacionada con el funcionamiento sin conmutación. Dicha pérdida podemos apreciarla en la siguiente figura (zona sombreada en v_{LC1}), sabiendo que esta caída de tensión se corresponde con la tensión que se pierde en cada tiristor:

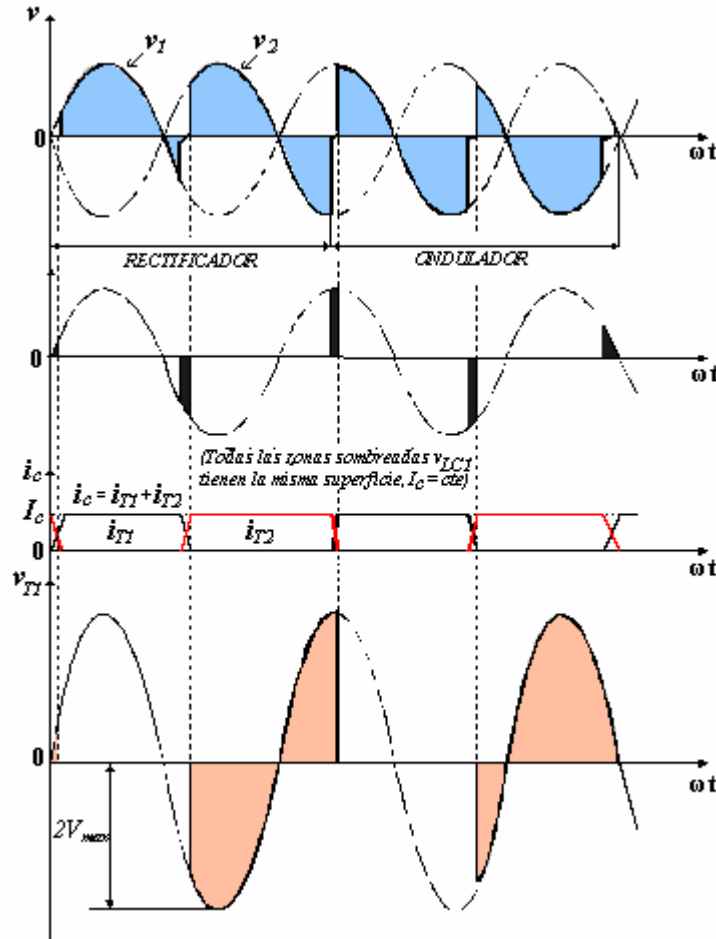


Fig 7. 57
Formas de onda de las tensiones y las corrientes con variación de α , en un rectificador monofásico con transformador de toma intermedia.

La i_c pasará del valor 0 al máximo I_c .

$$\int_{t_0}^{t_1} L_c \left(\frac{di}{dt} \right) dt = L_c i_c \Big|_0^{I_c} = L_c I_c$$

La conmutación se produce dos veces por periodo, en el intervalo de tiempo:

$$\frac{2\pi}{2} \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2f}$$

y la V_x (caída de tensión debida a la conmutación) será:

$$V_x = \frac{1}{\pi} X_c I_c = \frac{2L_c I_c}{T}$$

E 7.77

PROBLEMA 7. 26

Dado un circuito rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia, en el que vamos a tener una corriente en la carga de 20A, y para un ángulo de retardo $\alpha=40^\circ$. Calcular:

- Tensión de pérdidas en la conmutación.
- Tensión media que vamos a tener a la salida teniendo en cuenta la caída de tensión en la conmutación.

DATOS: $L=1\text{mH}$; $I_C=20\text{A}$; $V_S=220\text{V}$; $f=50\text{Hz}$; $\alpha=40^\circ$

Solución:

- Usando la ecuación [E7.77], calculamos el valor de la V de pérdidas en la conmutación:

$$V_X = \frac{2I_C L_C}{T} = \frac{(2)(20)(1)(10^{-3})}{1/50} = 2V$$

- Idealmente, la tensión que tendremos a la salida es:

$$V'_{dc} = \frac{2V_{\max}}{\pi} \cos \alpha = \frac{\sqrt{2}(2)(220)}{\pi} \cos 40^\circ = 151,73V$$

Pero teniendo en cuenta la caída de tensión en la conmutación:

$$V_{dc(\text{salida})} = V'_{dc} - V_X = 151,73 - 2 = 149,73V$$

7.8.2 CONMUTACIONES EN PUENTES RECTIFICADORES TRIFÁSICOS

En las figuras 7.58 y 7.59 se muestran, respectivamente el montaje y las formas de onda teniendo en cuenta los efectos de la conmutación.

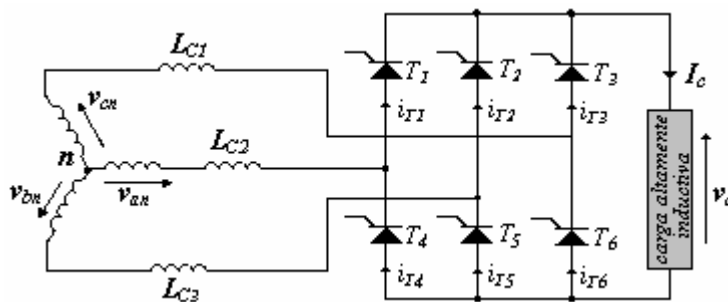


Fig 7. 58
Esquema de un puente trifásico con reactancias de conmutación.

Para un puente rectificador trifásico, el ángulo de conmutación vale, para $\alpha=0$:

$$1 - \cos \mu = \frac{2X_C I_C}{\sqrt{3}V_{\max}}$$

y para $\alpha \neq 0$:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) = \frac{2X_C I_C}{\sqrt{3}V_{\max}}$$

E 7.78

Caída de tensión debida a la conmutación: La tensión perdida es la necesaria para hacer que la corriente en cada semiconductor pase de 0 a I_C :

$$\int_{t_0}^{t_1} L_C \left(\frac{di}{dt} \right) dt = L_C i_C \Big|_0^{I_C} = L_C I_C$$

Esta conmutación se produce seis veces por período, es decir, en cada intervalo de tiempo de:

$$\frac{2\pi}{6} \frac{1}{\omega} = \frac{1}{6f}$$

por eso, si llamamos V_X a la caída de tensión debida a la conmutación:

$$V_X = \frac{3}{\pi} X_C I_C = \frac{6L_C I_C}{T}$$

E 7.79

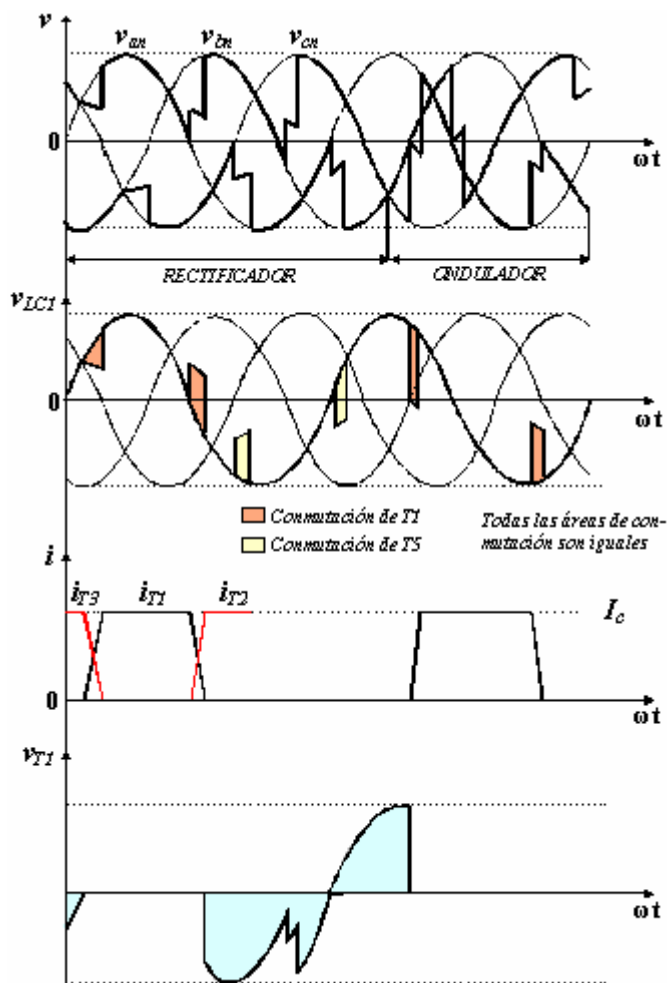


Fig 7. 59
Formas de onda de las tensiones y las corrientes con variación de V , en un rectificador monofásico con transformador de toma intermedia.

7.9 Factor de Potencia

El factor de potencia en rectificadores dependerá considerablemente del tipo de carga conectada. En el caso de los controlados, nos encontramos con que presentan un factor inferior a 1, y a veces bastante inferior.

7.9.1 FACTOR DE POTENCIA EN RECTIFICADORES MONOFÁSICOS

a) Con Carga Resistiva

❖ Estudio para el puente totalmente controlado

El factor de potencia viene dado por el cociente entre la potencia suministrada a la carga (P'_C) y la potencia aparente de la fuente (S):

$$P'_C = (I'_{rms})^2 R \quad S = V_{rms} I'_{rms} = \left(\frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \right) I'_{rms}$$

$$PF = \frac{P'_C}{S} = \frac{\sqrt{2} R I'_{rms}}{V_{max}} \quad \text{E 7.80}$$

$$I'_{rms} = \left(\frac{V_{max}}{\sqrt{2} R} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)} \rightarrow PF = \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)} \quad \text{E 7.81}$$

Para el montaje no controlado ($\alpha=0$), el factor de potencia valdrá 1.

❖ Estudio del rectificador con transformador de toma intermedia

La principal diferencia entre este montaje y el puente rectificador, es que en aquel vamos a tener dos fuentes de tensión (v_1 y v_2), así que la potencia aparente que proporciona el secundario será:

$$S = S_1 + S_2 \rightarrow S_1 = S_2 \rightarrow S = 2S_1 \rightarrow S_1 = V_{1(rms)} I_{1(rms)}$$

La intensidad eficaz $I_{1(rms)}$, será igual que la suministrada por un rectificador monofásico controlado de media onda, ya que cada fuente suministra corriente cada medio semiciclo.

$$I_{1(rms)} = \left(\frac{I_{max}}{2} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)} \rightarrow S = 2 \left(\frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{I_{max}}{2} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\pi}{2\pi} \right)}$$

Para calcular la potencia en la carga hay que saber el valor de I'_{rms} :

$$I'_{rms} = \left(\frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \right) \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)}{2}} \rightarrow P'_C = 2 (I'_{rms})^2 R$$

y el factor de potencia valdrá:

$$PF = \frac{P'_C}{S} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + \left(\frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)}{2}} \quad \text{E 7.82}$$

El factor de potencia para el secundario es inferior que para el primario del transformador, en una relación de 0,707. Esto significa que el transformador necesario tendría que ser mayor que el utilizado para alimentar un puente rectificador.

PROBLEMA 7. 27

Una carga resistiva es alimentada por un rectificador monofásico controlado. El montaje consta de un transformador reductor, cuyo primario ha sido conectado a una tensión de red $V_p = 480V$, 50Hz. En el secundario vamos a tener una tensión máxima $V_{max} = 100V$.

Calcular:

- Para un puente rectificador monofásico controlado, determinar el factor de potencia.
- Para un transformador de toma intermedia en el secundario, determinar la potencia aparente en el primario y en el secundario.
- Para un rectificador con transformador de toma intermedia, determinar el factor de potencia.

DATOS: $R=10\Omega$; $V_p=480V$; $f=50Hz$; $V_{max}=100V$; $\alpha=45^\circ$

Solución:

- El PF para el rectificador monofásico controlado lo hallamos con la [E7.81]:

$$PF = \sqrt{1 - \left(\frac{45^\circ}{180^\circ}\right) + \left(\frac{\text{Sen}90^\circ}{2\pi}\right)} = 0,9535$$

- Primero hemos de calcular la I_{rms} suministrada por cada una de las tensiones del secundario para hallar la potencia aparente en el secundario:

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{100}{10} = 10A \rightarrow I_{rms} = \left(\frac{10}{2}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{45^\circ}{180^\circ}\right) + \left(\frac{\text{Sen}90^\circ}{2\pi}\right)} = 4,767A$$

$$S_s = 2 \left(\frac{100}{\sqrt{2}}\right) 4,767 = 674V - A$$

Para calcular la potencia aparente en el primario, antes debemos hallar la corriente eficaz en el primario, y a su vez para calcular esta, hemos de determinar la intensidad máxima en el primario mediante la relación de transformación del transformador:

$$\frac{I_{S(max)}}{I_{P(max)}} = \frac{V_p}{V_s} \rightarrow I_{P(max)} = 10 \left(\frac{100}{\sqrt{2}(480)}\right) = 1,473 \rightarrow I_p = \left(\frac{1,473}{\sqrt{2}}\right) 0,9535 = 0,993A$$

Y la potencia aparente en el primario será:

$$S_p = (480)(0,993) = 477V - A$$

- Para el PF del rectificador con transformador de toma intermedia usamos la [E7.82]:

$$PF = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{45^\circ}{180^\circ}\right) + \left(\frac{\text{Sen}90^\circ}{2\pi}\right)}{2}} = 0,674$$

b) Con Carga Altamente Inductiva

❖ Estudio del puente rectificador monofásico totalmente controlado

Teniendo en cuenta que vamos a tener una corriente constante en la carga de valor I_C , el factor de potencia será:

$$P'_C = I_C^2 R \quad \text{E 7.83} \quad S = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} I_C \quad \text{E 7.84} \quad I_C = \frac{2V_{\max}}{\pi R} \cos \alpha \quad \text{E 7.85}$$

$$PF = \frac{P'_C}{S} = 0,9 \cos \alpha \quad \text{E 7.86}$$

Cuando sea no controlado ($\alpha=0$), el factor de potencia vale 0,9 y por tanto es menor a la unidad. Dicho factor respecto al primario será igual que respecto al secundario, al ser las respectivas potencias aparentes iguales.

7.9.2 FACTOR DE POTENCIA EN RECTIFICADORES POLIFÁSICOS

En la mayoría de los casos en los que se trabaja con grandes cargas, se utilizan los puentes rectificadores polifásicos. La carga suele tener carácter inductivo, así que la corriente que circule por el sistema será de valor constante I_C . El estudio se realizará para un puente rectificador trifásico respecto a la fuente de alimentación.

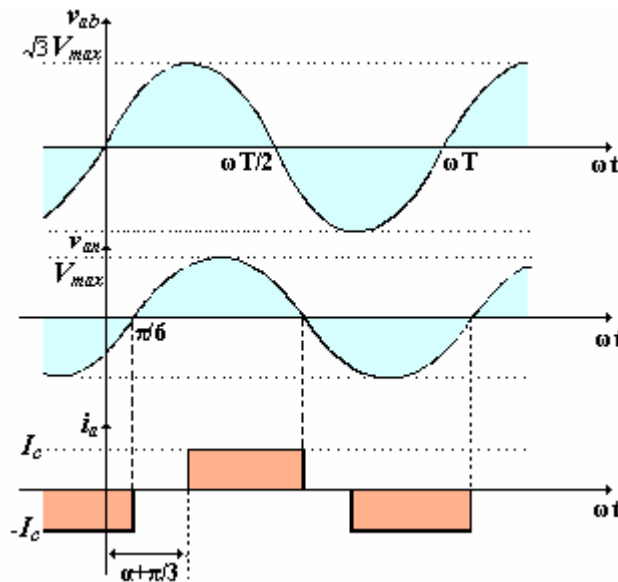


Fig 7. 60
Formas de onda en un puente rectificador trifásico con carga altamente inductiva. Se observa como la corriente de línea de la fase A podría comenzar $\pi/6$ después de que se haga cero V_{an} , si $\alpha=0$.

El estudio del factor de potencia se puede hacer sobre una fase. La tensión media por fase se calcula integrando, eligiendo los límites de integración para el fragmento en el que la corriente no se hace cero para cada semiciclo:

$$P'_C = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi+\alpha} I_C v_{an} d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi+\alpha} I_C V_{\max} \text{Sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) d\omega t = \left(\frac{\sqrt{3}V_{\max} I_C}{\pi}\right) \cos \alpha \quad \text{E 7.87}$$

El valor eficaz de la corriente para la fase A, la tensión eficaz y la potencia aparente serán:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_C = 0,8165 I_C \quad V_{rms} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \rightarrow S_{(fase)} = V_{rms} I_{rms}$$

y el factor de potencia será:

$$PF = \frac{P'_C}{S} = \left(\frac{3}{\pi}\right) \cos \alpha \quad \text{E 7.88}$$

Para $\alpha=0$, este factor no valdrá la unidad porque la alimentación que nos proporcionan las fases no será continuada durante todo el periodo.

Si tenemos diodo volante, no se producirán cambios para $\alpha \leq 60^\circ$. Para $\alpha > 60^\circ$, el diodo volante conducirá durante ciertos intervalos. Esto se aprecia en la figura:

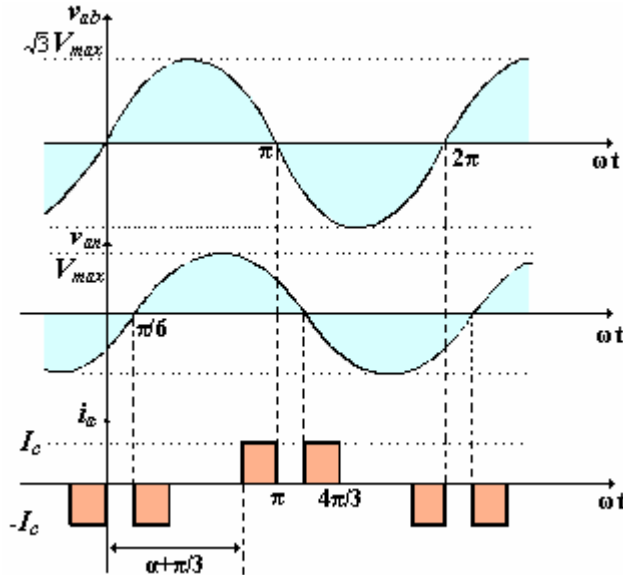


Fig 7. 61

Formas de onda en un puente rectificador trifásico con carga altamente inductiva y diodo volante. Con diodo volante no tendremos tensión instantánea negativa en la carga. La corriente en la fase A se hace cero, en el momento en que vab se anula para $\omega t = \pi$, dejando de valer cero para $\omega t = 2\pi + \alpha$, pasando a un valor nulo cuando vca se hace cero para $\omega t = 4\pi/3$.

La potencia media se evalúa con la suma de las integrales de los dos intervalos de tiempo en los cuales la corriente no se anula:

$$P'_C = \left(\frac{I_C}{\pi} \right) V_{\max} \left[\int_{\alpha + \frac{\pi}{3}}^{\pi} \text{Sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{4\pi}{3}} \text{Sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) d\omega t \right] =$$

$$= \left(\frac{\sqrt{3} V_{\max} I_C}{\pi} \right) \left[1 + \text{Cos} \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad \text{para } \alpha > \frac{\pi}{3}$$

El intervalo de conducción para los dos pulsos de la corriente de línea en cada semiciclo tienen una duración total de $(4\pi/3) - 2\alpha$. Así, la corriente eficaz será:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\left(\frac{4\pi}{3} \right) - 2\alpha}{\pi}} I_C$$

y el factor de potencia:

$$PF = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \left[1 + \text{Cos} \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \frac{1}{\sqrt{\frac{\frac{4\pi}{3} - 2\alpha}{\pi}}}$$

E 7.89

PROBLEMA 7. 28

Una carga RL altamente inductiva es alimentada por un puente rectificador trifásico totalmente controlado. El montaje consta de diodo volante, y el valor de la tensión media en la carga varía desde 1000V a 350V.

Calcular:

- c) El rango de α , para obtener la regulación de la tensión media en la carga deseada.
- d) El factor de potencia para $V_{dc}=1000V$.
- e) El factor de potencia para $V_{dc}=350V$.

DATOS: $R=10\ \Omega$; $V_{FS}=480V$; $f=50Hz$

Solución:

- a) Para $V_{dc}=1000V$, hallamos α con la ecuación [E7.72]:

$$V_{max} = (480)(1,414) = 678,8V \rightarrow 1000 = (1,654)(678,8)\cos\alpha \rightarrow \alpha = 27^\circ$$

para $V_{dc}=350V$, nos ayudamos de la ecuación [E7.75]:

$$350 = \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi}\right)(678,8)[1 + \cos(\alpha + 60^\circ)] \rightarrow \alpha = 73,5^\circ$$

- b) El PF para $\alpha=27^\circ$, lo hallamos con [E7.88]:

$$PF = \left(\frac{3}{\pi}\right)\cos 27^\circ = 0,85$$

- c) Y para $\alpha=73,75^\circ$, usamos [E7.89]:

$$PF = \left(\frac{2,45}{\pi}\right)(1 + \cos 133,5^\circ) \frac{1}{\sqrt{\frac{240-147}{180}}} = 0,338$$



Bibliografía básica para estudio

AGUILAR PEÑA, J. D.; MARTINEZ HERNÁNDEZ, F.; RUS CASAS, C. *Electrónica de Potencia, Convertidores AC-DC*. Colección de apuntes 1995/96.12. Universidad de Jaén.

HART, Daniel W. *Electrónica de Potencia*. Ed. Prentice Hall. Madrid 2004. ISBN 84-205-3179-0

RASHID, M. H. *Electrónica de Potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México 1995.

Bibliografía ampliación

BIRD, B. M.; KING, K. G.; PEDDER, D. A. G. *An Introduction To Power Electronics*. Second Edition. Ed. Wiley, 1993.

FISHER, M. *Power electronics*. PWS-KENT, 1991

GUALDA, J. A.; MARTÍNEZ, P. M. *Electrónica Industrial, Técnicas de Potencia*. Serie Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. 2ª Edición. Marcombo, 1992.

HERRANZ ACERO, G. *Electrónica industrial II. Sistemas de Potencia*. 2ª Edición. Servicio de publicaciones Escuela Técnica Superior de Telecomunicación, 1990

LANDER, C.W. *Power Electronics*. Second Edition. McGraw-hill Book Company, 1987.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS W. P. *Power electronics: Converters, Applications and Design*. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1989.

PINTADO, R. *Electrónica y Automática Industriales*. Serie: Mundo Electrónico. Marcombo, Boixae Editores, 1979.

RASHID, M. H. *Spice for power electronics and electric power*. Prentice Hall International, 1993.

SÉGUIER, G. *Electrónica de potencia: los convertidores estáticos de energía. Conversión Alterna-Continua*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1986. ISBN 84-252-1277-4