



Universidad
de Oviedo

Lección 10

INTRODUCCIÓN A LOS CONVERTIDORES CA/CC

Sistemas Electrónicos de Alimentación
5º Curso. Ingeniería de Telecomunicación

Introducción

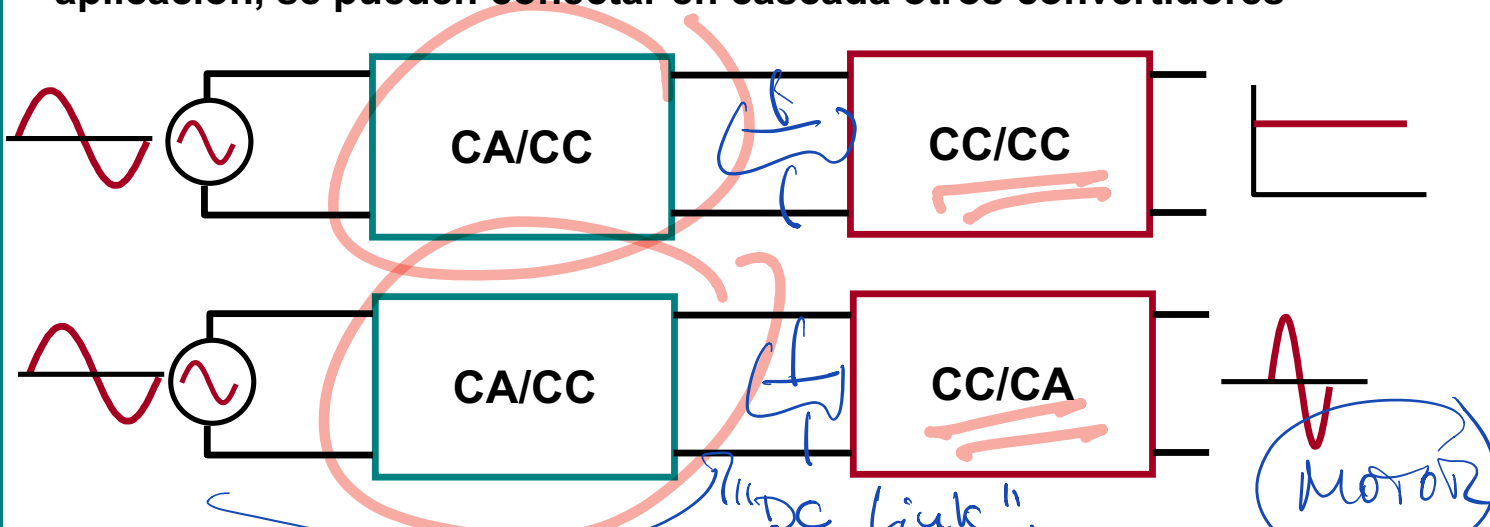
La fuente de distribución de energía eléctrica más habitual es la red eléctrica

La energía se distribuye en forma de tensión alterna

Sin embargo, los equipos electrónicos generalmente necesitan una tensión continua para funcionar

Por esta razón, la primera etapa de conversión suele ser en la mayoría de los casos una transformación CA/CC

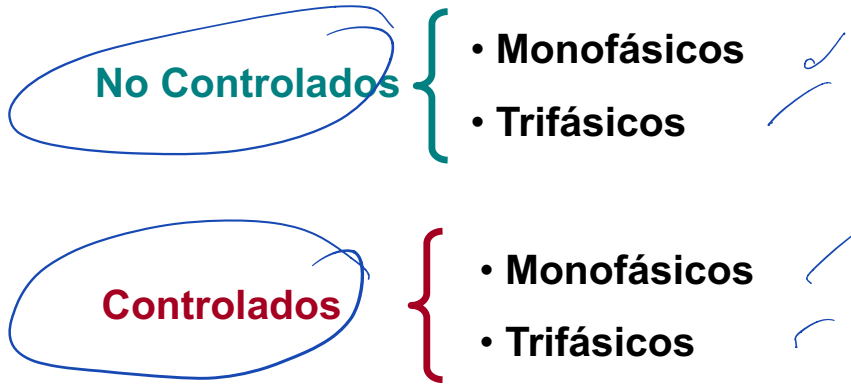
Si la tensión obtenida de esta forma no es adecuada para la aplicación, se pueden conectar en cascada otros convertidores



Introducción

Cap Hold-up time

Los convertidores CA/CC los podemos clasificar de la siguiente forma:



En un rectificador controlado, un circuito de control puede modificar los parámetros de funcionamiento del convertidor y regular en cierta medida la tensión de salida

En el caso de un rectificador no controlado, no hay ninguna posibilidad de control y la tensión de salida depende exclusivamente de la carga

En la actualidad, el esquema más usado se basa en utilizar un convertidor CA/CC no controlado. A continuación se conecta otro convertidor en cascada que es el que se encarga de controlar la tensión de salida

Introducción

Especificaciones típicas de la tensión alterna

Red de baja tensión

Europa

220 V, 50 Hz

230 V, 50 Hz

240 V, 50 Hz

Trifásica

380 V, 50 Hz

400 V, 50 Hz

Los equipos funcionan en un rango: 190-250V

EE.UU

110 V, 60 Hz

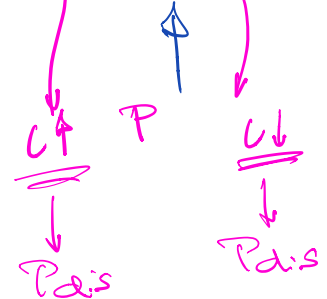
Japón

100 V, 60 Hz

100 V, 50 Hz

Rango de tensión de entrada universal

85 V – 265 V



Red de media tensión

3, 6, 10, 15, 20 kV, 50 Hz

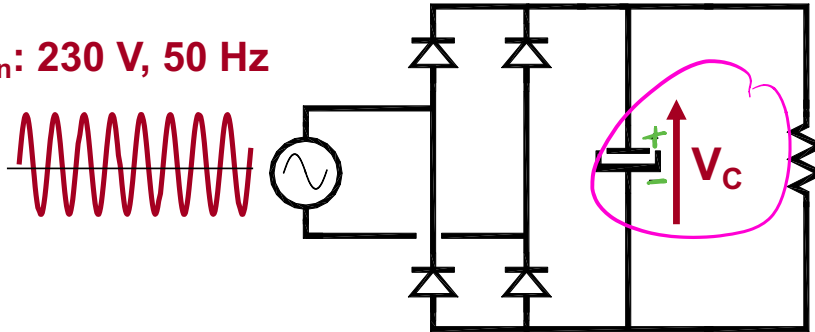
En Asturias, la red de distribución de media tensión es de 22 kV

Las empresas luego pueden transformar a 3 kV o 6 kV

Convertidores monofásicos

El esquema más habitual es el rectificador en puente completo

$V_{in}: 230 \text{ V}, 50 \text{ Hz}$



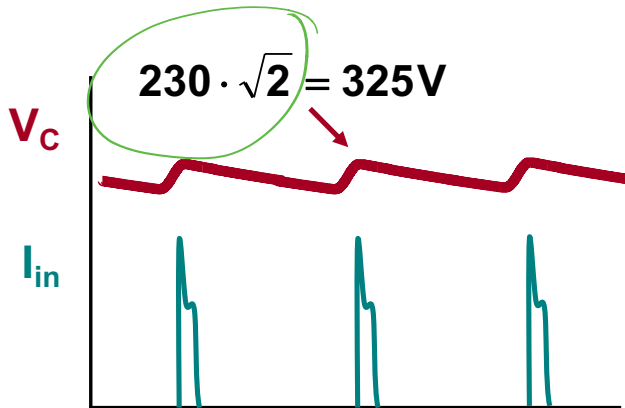
Muy sencillo

Muy robusto

Barato



Formas de onda



La tensión de salida es continua

Tiene un rizado que depende de la carga

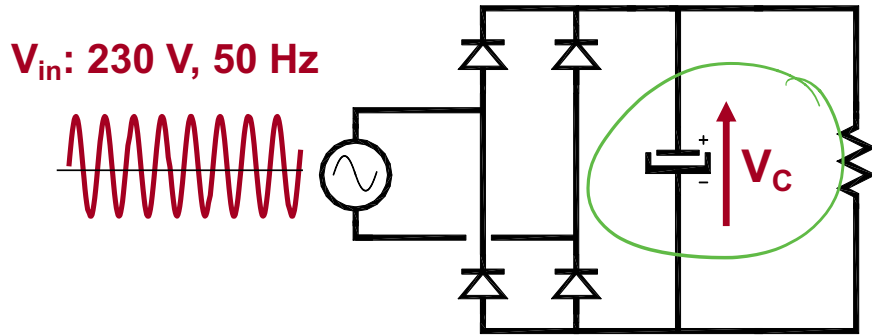
El valor medio no es controlable

La corriente de entrada es muy picuda

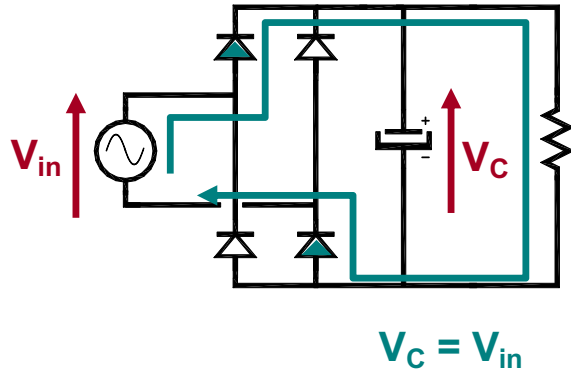
Mal factor de potencia (≈ 0.5)

Convertidores monofásicos

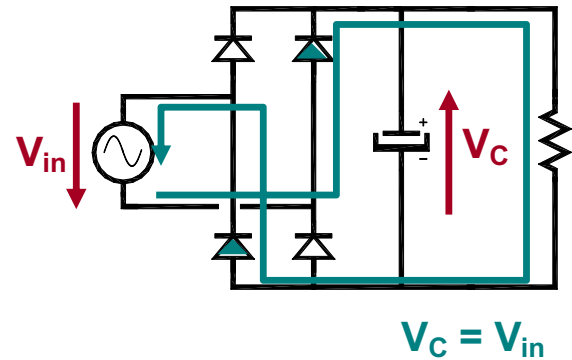
Funcionamiento del circuito



Semicyclo positivo

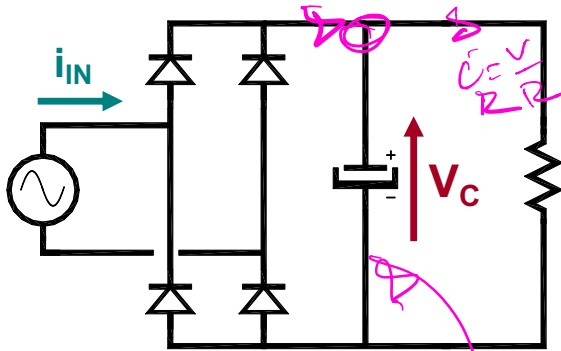


Semicyclo negativo



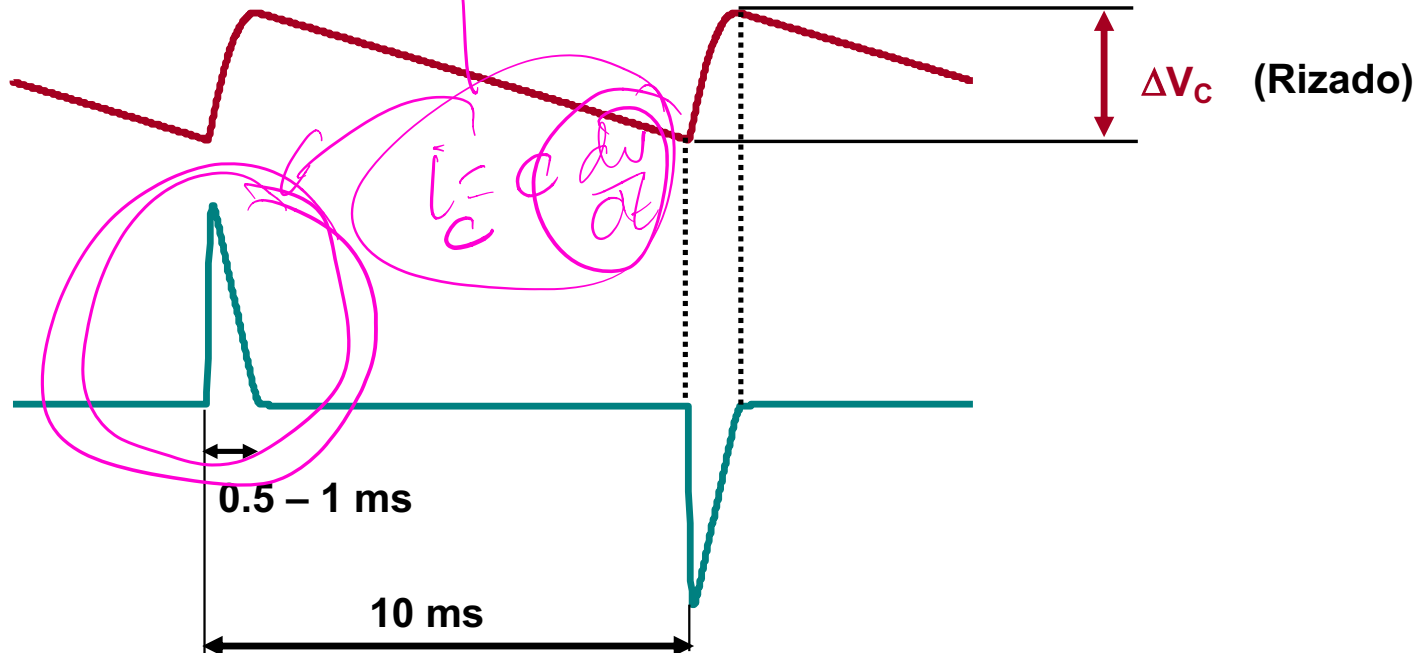
El condensador se carga al valor de pico de la tensión de entrada

Convertidores monofásicos



Formas de onda obtenidas por simulación

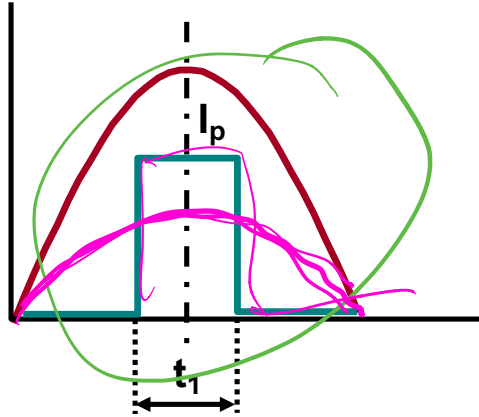
El condensador se carga durante el tiempo en el que hay circulación de corriente. El resto del tiempo esta descargando la energía sobre la carga



Convertidores monofásicos

Cálculo aproximado de la corriente de pico

Suponemos que tiene una forma de onda cuadrada



$$P = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} I_p \cdot V_p \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta = \frac{1}{\pi} I_p \cdot V_p \cdot (-\cos \theta) \Big|_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha}$$

$$P = 2 \frac{V_p \cdot I_p}{\pi} \sin \alpha$$

Suponiendo una duración del pulso de aprox. 1 ms, $\alpha = 18^\circ$

$$V_p = 230 \cdot \sqrt{2} = 325$$

$$P = 1000 \text{ W}$$



$$I_p = 15.6 \text{ A}$$

Si la corriente fuese senoidal:

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \rightarrow I_{ef} = 4.34 \text{ A} \rightarrow I_p = 6.14 \text{ A}$$

El valor de pico es 2.5 veces menor !!

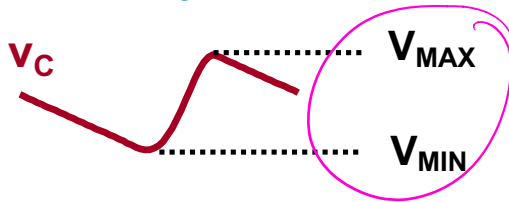
Rizado en el condensador

El rizado de tensión en la salida es uno de los datos fundamentales que deben ser calculados por el diseñador

Este dato se puede calcular de diversos modos

1. Balance energético

Sabiendo la energía que sale del condensador y los valores de tensión máximo y mínimo podemos hacer un balance energético:



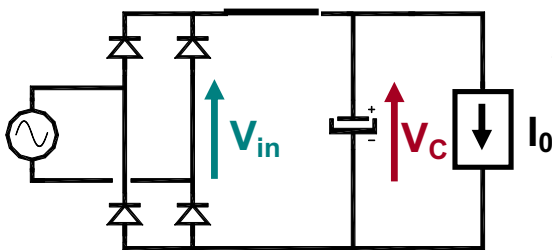
$$P \cdot t = \frac{1}{2} C (V_{MAX}^2 - V_{MIN}^2)$$

P: potencia que maneja el convertidor

t: tiempo que dura la descarga. Se puede aproximar a $T/2 = 10\text{ms}$

2. Corriente de descarga constante

Suponemos que el condensador se descarga con una corriente constante



$$\Delta v_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_{Des}} I_0 dt = \frac{1}{C} I_0 \cdot t_{Des}$$

t_{Des} : tiempo de descarga

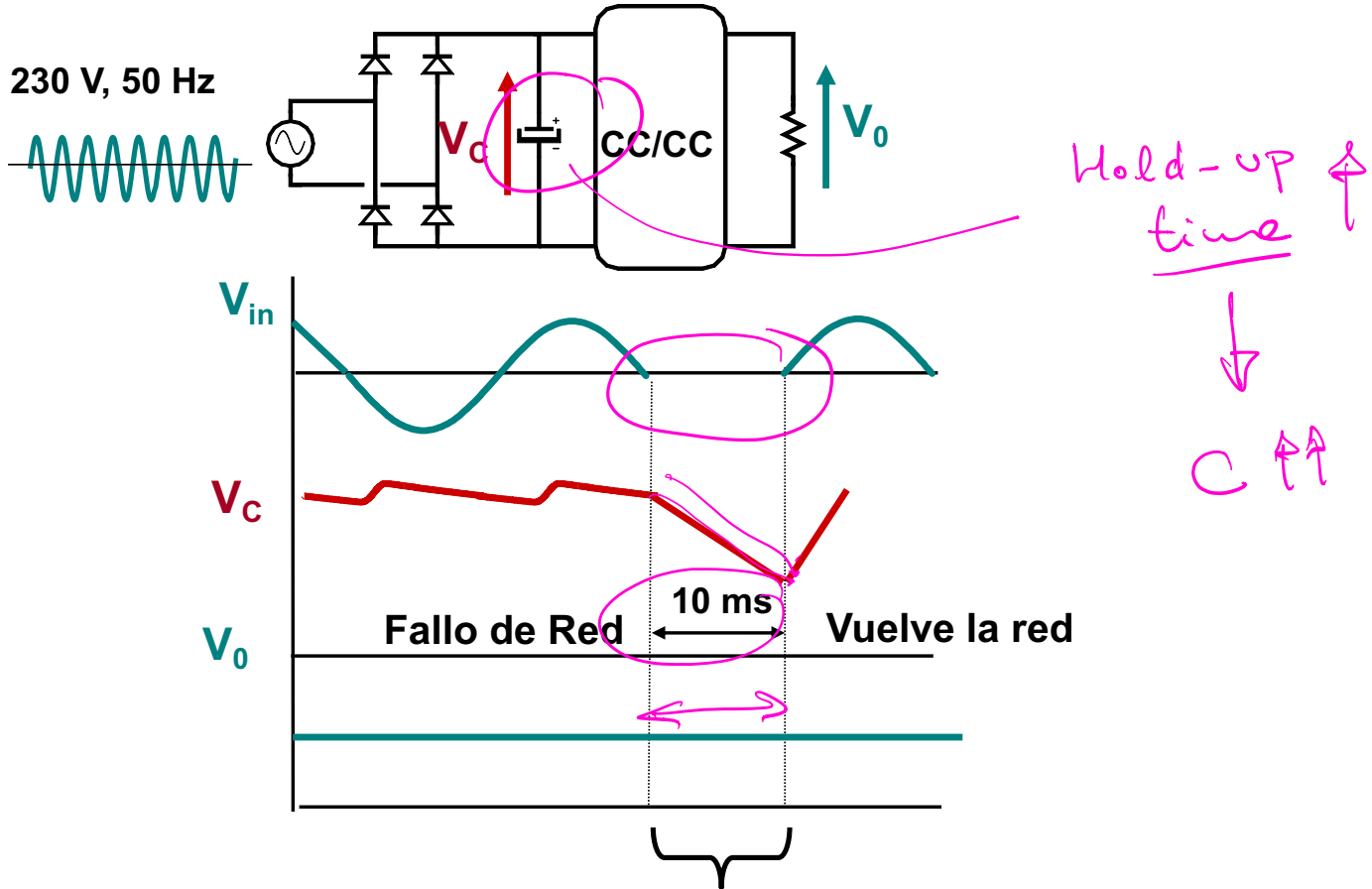
$$I_0 = \frac{\bar{P}}{\bar{V}_c}$$

Si hacemos la aproximación: $t_{Des} = T/2$, cometemos un error del orden del 2%

Restando el tiempo de conducción, la solución es casi exacta

Rizado en el condensador

Uno de los criterios para dimensionar el condensador suele ser el Hold-up time



Se mantiene la tensión de salida gracias a la energía del condensador

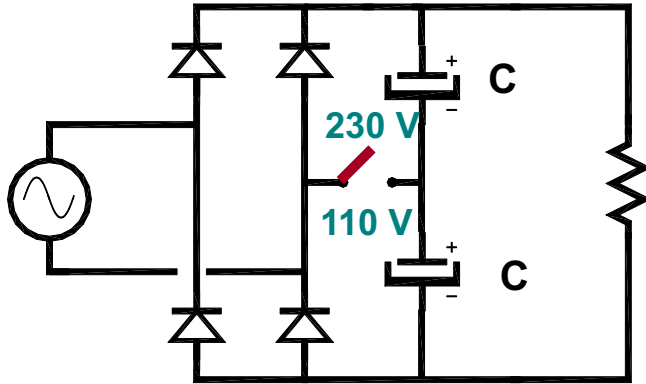
Doblador de tensión

En la actualidad hay muchos equipos portátiles que deben poder funcionar con la tensión nominal de cualquier país

Es el denominado “rango de tensión universal”: 90-265 V

Al haber tanta diferencia de tensión entre la mínima y la máxima, los equipos pueden tener problemas para funcionar

Un posible circuito para solucionarlo es el doblador de tensión



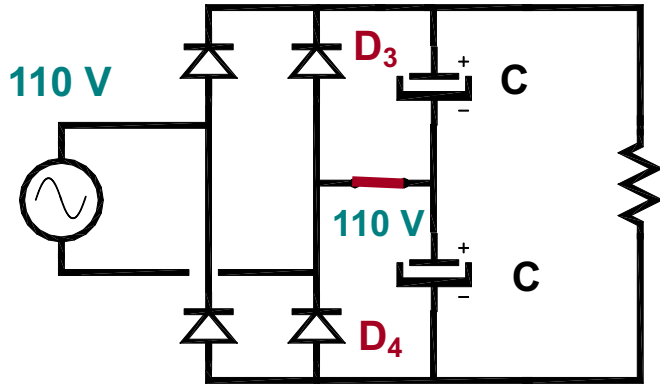
Con 230 V de entrada, el interruptor está abierto

El funcionamiento es igual que el de un rectificador de doble onda normal

El condensador equivalente que verá la red será $C/2$

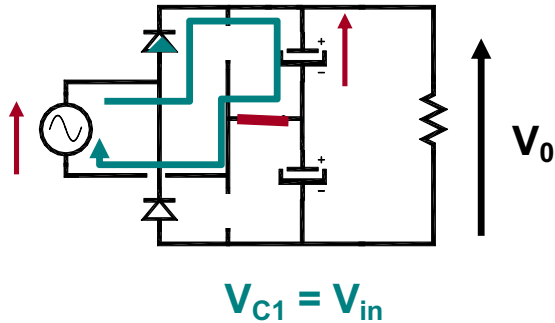
Doblador de tensión

Cuando la tensión de entrada es de 110 V, se cierra el interruptor

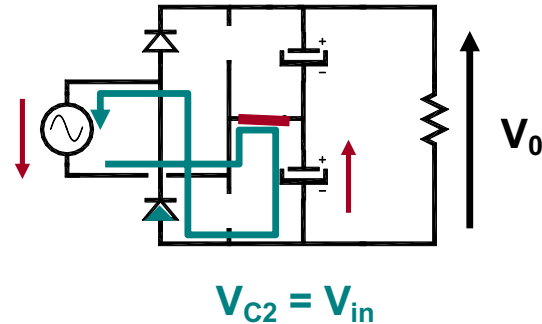


D_3 y D_4 quedan cortados porque están en paralelo con los condensadores

Semiciclo positivo



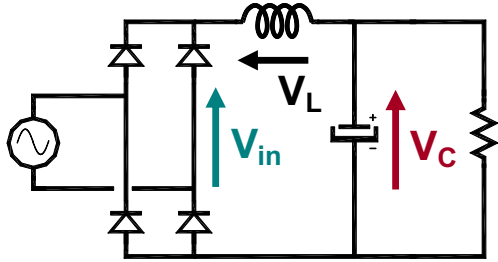
Semiciclo negativo



En total, la tensión en la carga es la suma de la tensión en los dos condensadores: $V_0 = 2 \cdot V_{in}$ ($2 \cdot 110 \text{ V} = 220 \text{ V}$)

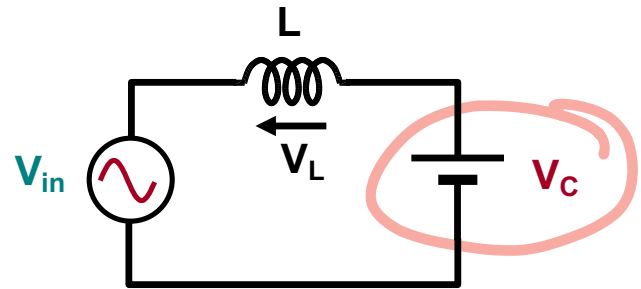
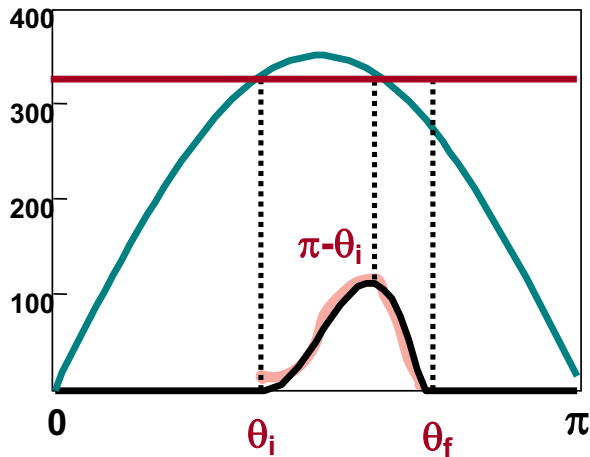
Rectificador con bobina

Para suavizar la forma de onda de la corriente de entrada es posible utilizar una bobina



$$V_L = V_{in} - V_C$$

Suponiendo que el condensador es grande y que, por tanto, el rizado de tensión es nulo, la forma de onda de la corriente será:



$$V_L = V_{in} - V_C$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L(t) dt$$

Análisis de la corriente de entrada

Como hemos podido comprobar, la corriente de entrada no es senoidal pero es mucho más suave que sin bobina

Para analizar la “calidad” de la forma de onda recurrimos al desarrollo en serie de Fourier

$$i_e = i_1 + \sum_{n=2}^{\infty} i_n$$

i_1 : armónico fundamental
 i_n : armónico de orden n

Suponiendo una tensión de entrada senoidal, el único armónico que contribuye al flujo de potencia media es el fundamental ya que las frecuencias deben ser iguales

$$\bar{P} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v_{in} \cdot i_1 \cdot d\theta \quad \bar{P} = V_{ef} \cdot I_{1ef} \cdot \cos \varphi_1$$

La potencia aparente es: $S = V_{ef} \cdot I_{ef}$

El factor de potencia será: $F.P. = \frac{\bar{P}}{S} = \frac{V_{ef} \cdot I_{1ef} \cdot \cos \varphi_1}{V_{ef} \cdot I_{ef}} \rightarrow F.P. = \frac{\bar{P}}{S} = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} \cdot \cos \varphi_1$

Si hay mucha distorsión $I_{1ef} \ll I_{ef}$ por lo que el F.P. será bajo

Si la corriente es senoidal, $I_{1ef} = I_{ef}$ por lo que $F.P. = \cos \varphi_1$

Análisis de la corriente de entrada

Distorsión armónica total (DAT) *Total Harmonic Distortion (THD)*

Da una idea de lo cercana que está una forma de onda a una senoide

THD = 0% Senoidal

THD = 100% No Senoidal

THD = 200% No Senoidal

Definición:

$$THD = \frac{I_{dis}}{I_1}$$

Resto de armónicos

1er armónico

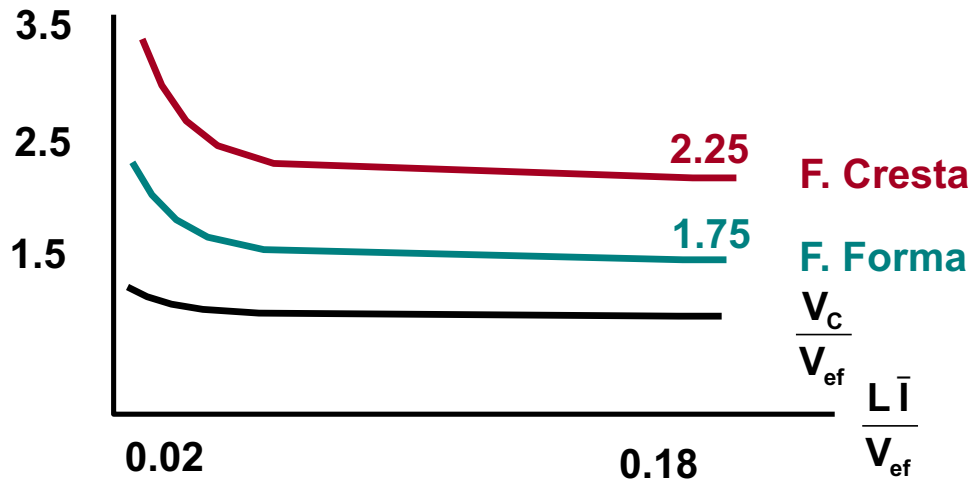
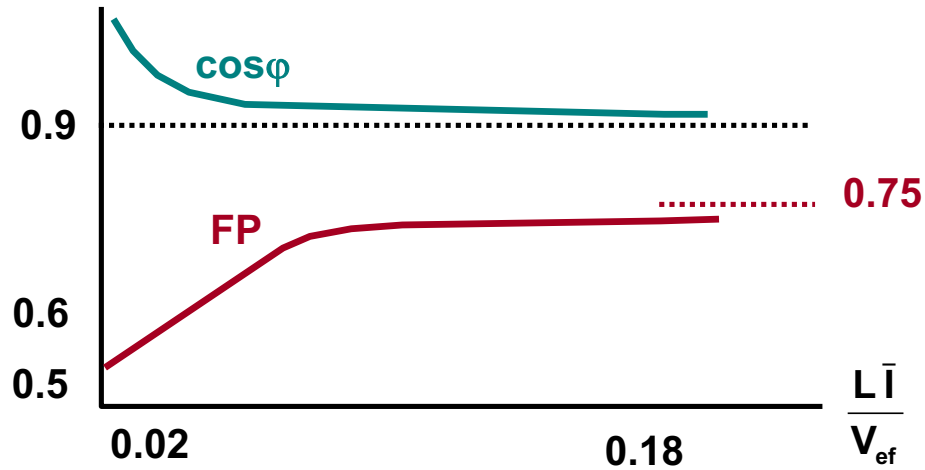
$$I_{dis} = \sqrt{I_e^2 - I_1^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

$$I_e = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Factor de Cresta: $\frac{I_{pico}}{I_{ef}}$

Factor de Forma: $\frac{I_{ef}}{I_{medio}}$

Análisis de la corriente de entrada



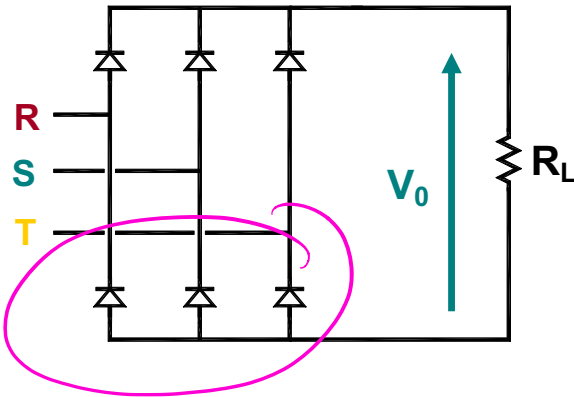
Rectificadores trifásicos

En entornos industriales se suele usar la red trifásica

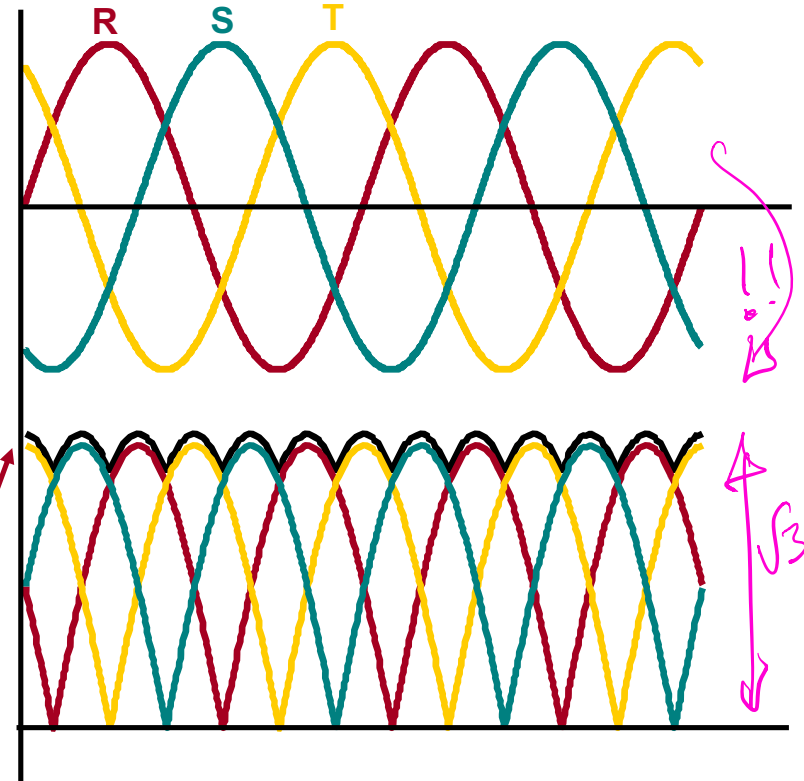
- Las formas de onda tienen menos rizado de forma natural
- Tiene mayor capacidad de manejar potencia

Los circuitos son básicamente iguales a los monofásicos

Suponiendo una R_L muy grande

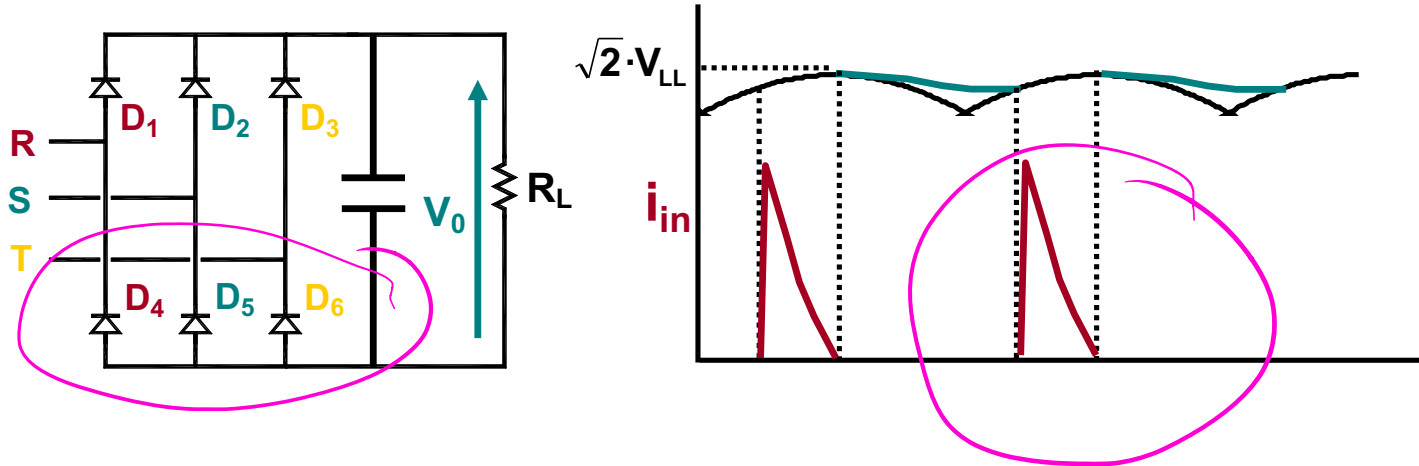


La tensión V_0 será la envolvente de esta forma de onda



Rectificadores trifásicos

Si queremos disminuir aún más el rizado, podemos utilizar un filtro por condensador. Con un condensador infinito tendríamos una tensión de salida igual al valor de pico de la tensión de entrada: $\sqrt{2} \cdot V_{LL} = 1.41 \cdot V_{LL}$



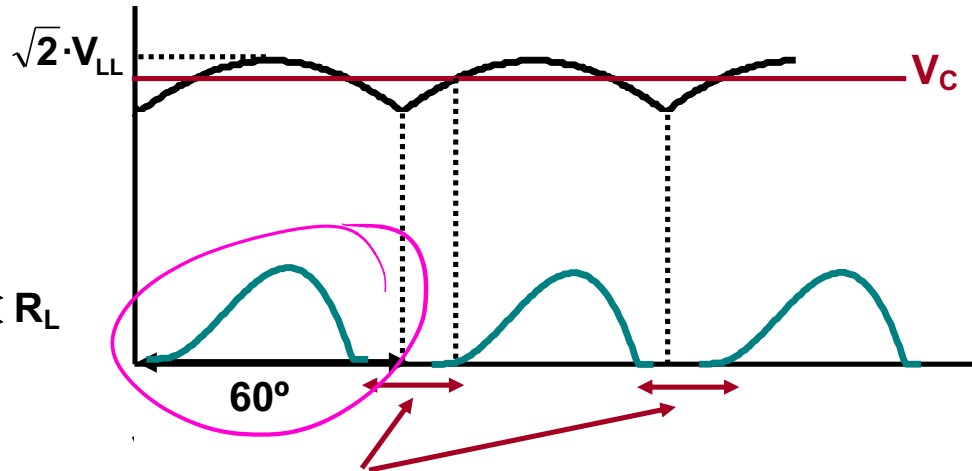
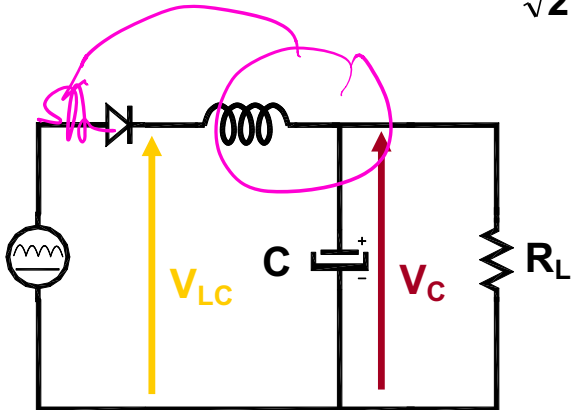
La corriente de entrada tiene una forma de onda similar al caso de tensión monofásica

El tiempo de conducción es muy corto y el valor de pico es elevado

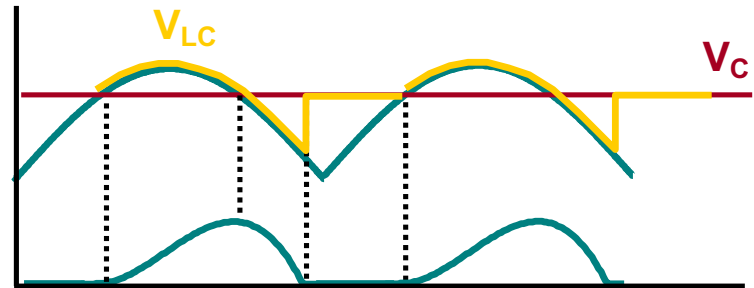
Es una forma de onda poco interesante

Rectificadores trifásicos

También es posible implementar una bobina para suavizar la corriente de entrada



Durante ciertos instantes de tiempo, la corriente es nula

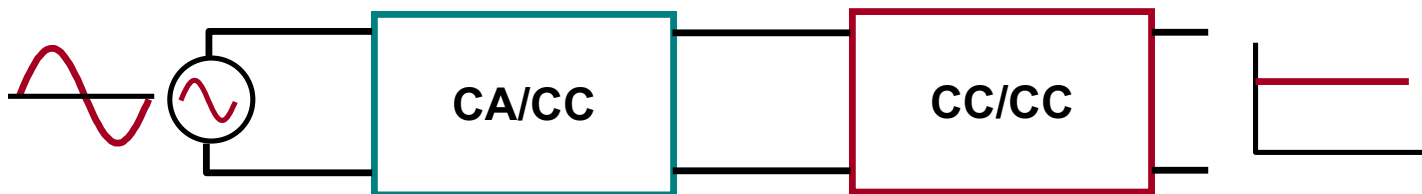


Cuando $i_L=0$, $V_{LC}=V_C$

Cuando $V_{LC}>V_C$, la corriente crece

Cuando $V_{LC}<V_C$, la corriente decrece

Introducción

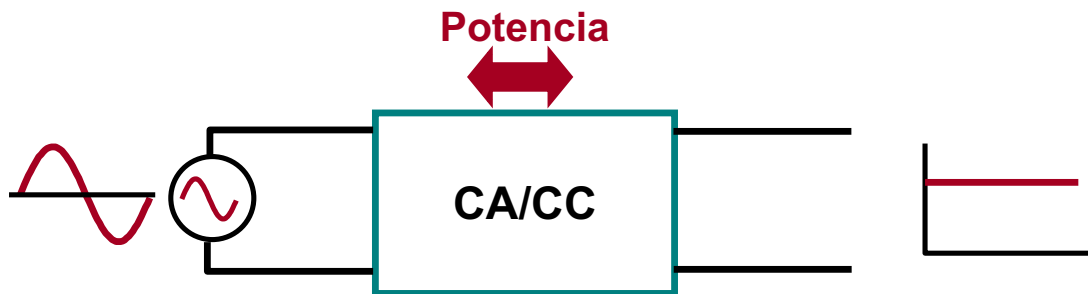


Los rectificadores no controlados se utilizan habitualmente con una segunda etapa conectada en cascada

En algunos equipos de alta potencia puede resultar interesante utilizar rectificadores controlados

Especialmente en sistemas donde sea importante controlar el flujo de potencia bidireccionalmente:

- Transporte de energía en continua (alta tensión)
- Algunos motores de continua y de alterna con capacidad regenerativa



Introducción

Los rectificadores no controlados son en el fondo un caso particular de los convertidores controlados

De todas formas, su gran utilidad práctica recomienda su estudio por separado

Por otra parte, los rectificadores no controlados suelen trabajar en modo discontinuo

Sin embargo, los rectificadores controlados suelen trabajar en modo de conducción continuo

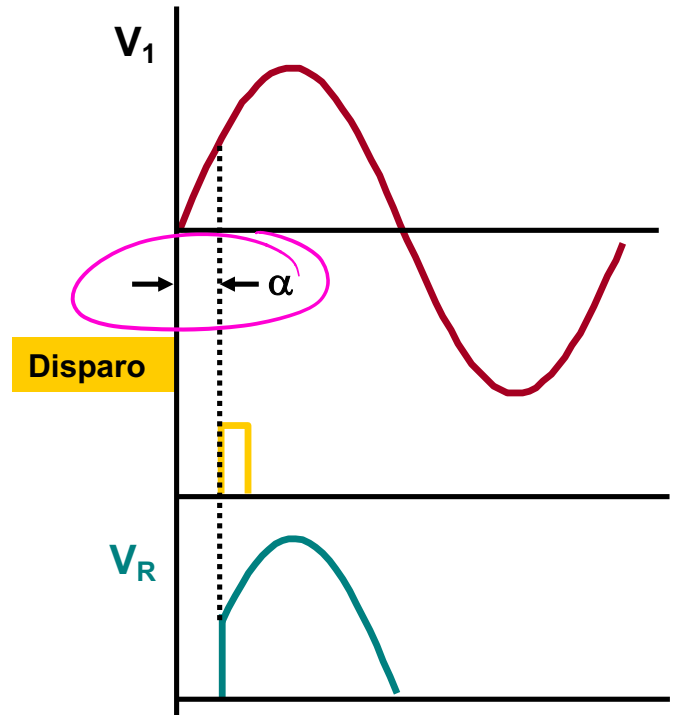
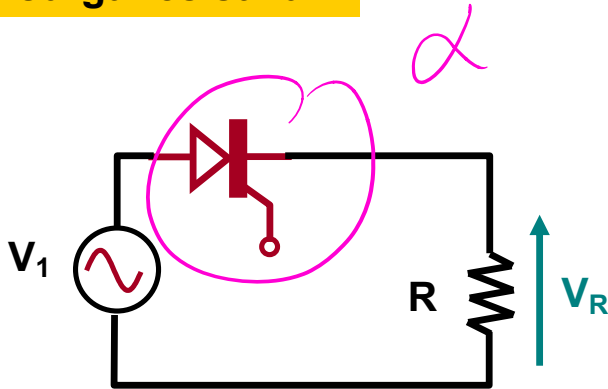
Se usan fundamentalmente en aplicaciones de mucha potencia ,con lo que la tensión de entrada suele ser trifásica



Rectificadores controlados trifásicos en MCC

Control de rectificadores controlados

Carga resistiva

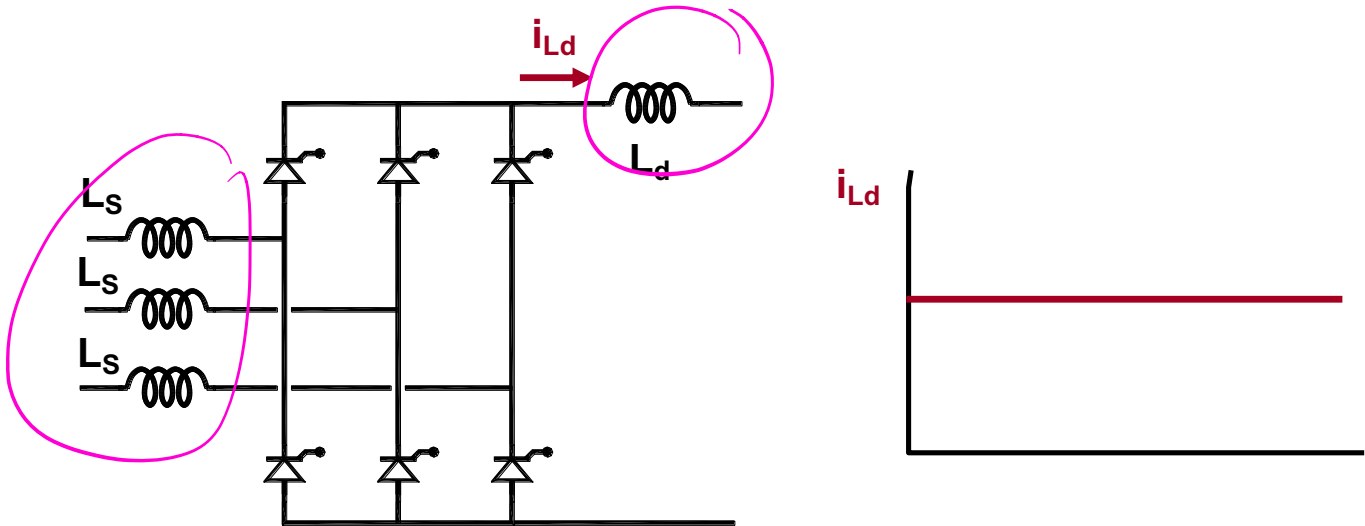


Cuando el tiristor recibe un pulso de corriente en la puerta comienza a conducir, siempre y cuando tenga polarización directa entre ánodo y cátodo

Controlando el ángulo de disparo α controlamos la energía que pasa

Rectificador trifásico controlado

El esquema genérico es similar al visto para rectificadores no controlados



L_s : inductancia debida a la línea

L_d : inductancia colocada por el diseñador

En el análisis de funcionamiento vamos a suponer que el rectificador trabaja en modo de conducción continuo y que L_d es muy grande

Rectificador trifásico controlado

Análisis con $L_s = 0$

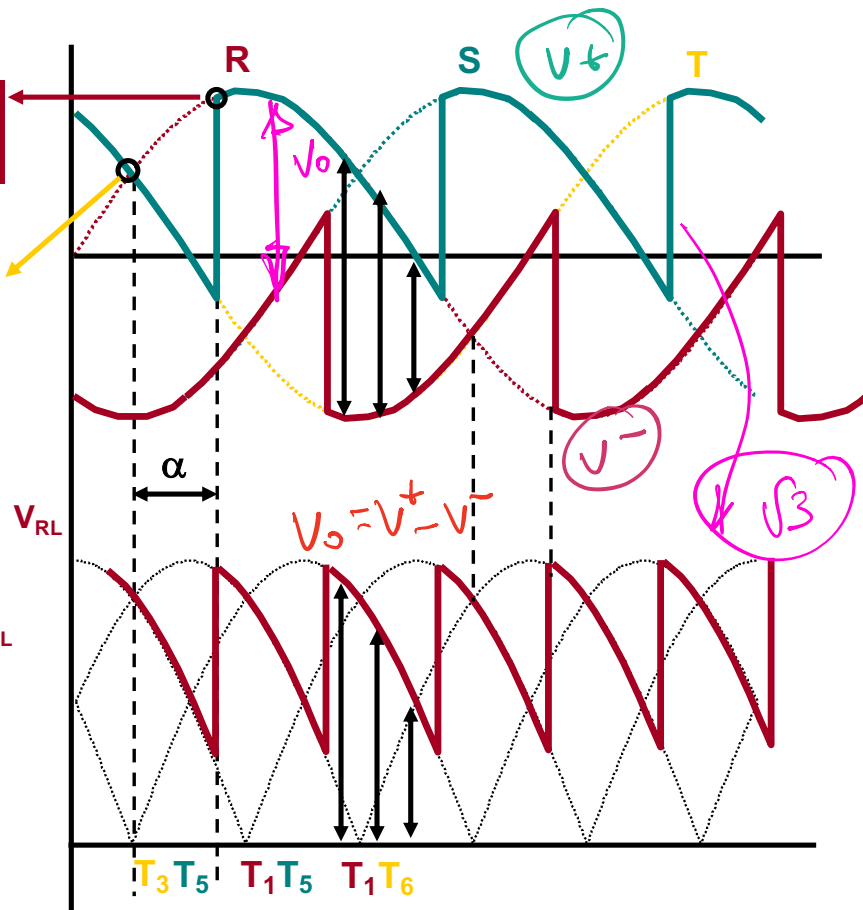
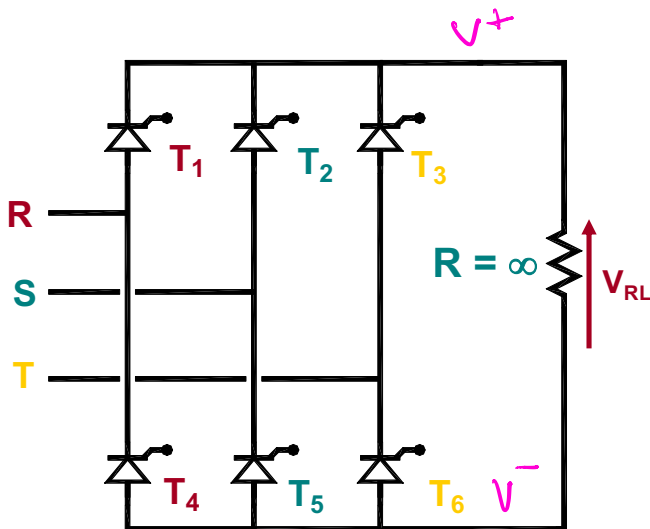
IMPOTANTE

Idea básica: es posible controlar el valor medio de la tensión de salida en función del momento en el que se disparen los interruptores

Formas de onda

Punto en el que comienza la conducción de T_1

Punto en el que comenzaría la conducción de D_1



Control de la tensión de salida

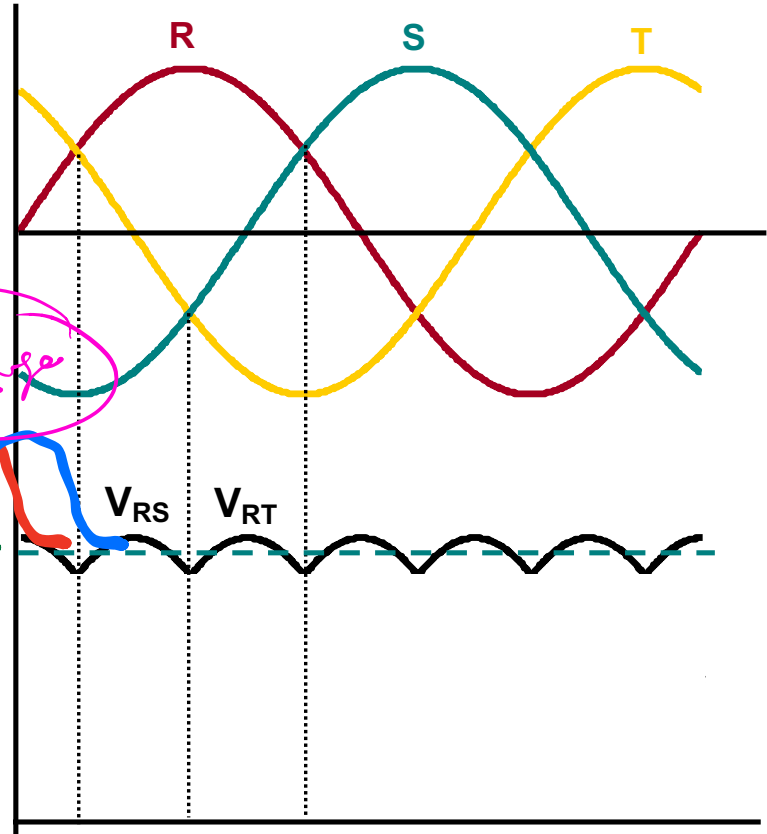
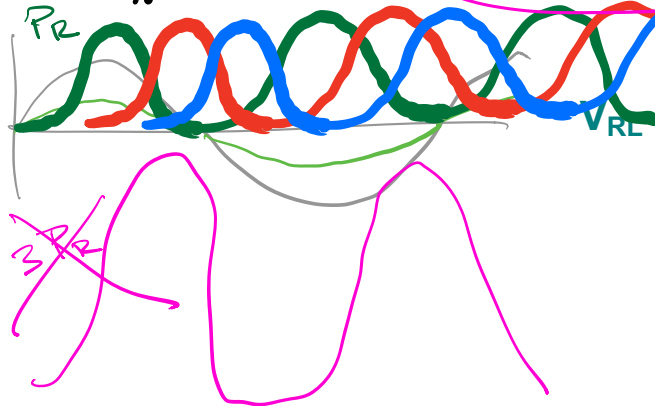
$$V_{RL\alpha} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{LL} \cdot \cos \alpha$$

Al cambiar el ángulo α , cambia el valor de la tensión de salida

Con $\alpha = 0^\circ$, obtenemos la misma tensión que en el caso de un rectificador no controlado

$$\cos 0^\circ = 1$$

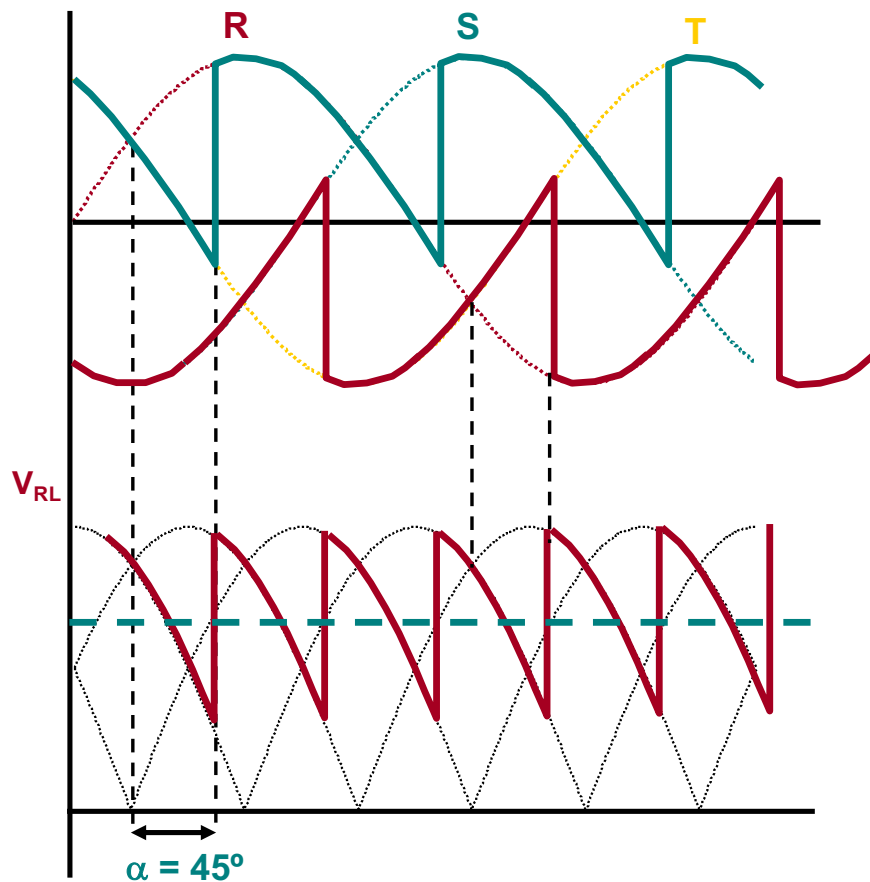
$$V_{RL} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{LL}$$



Control de la tensión de salida

Formas de onda según el ángulo de disparo

$$\alpha = 45^\circ$$



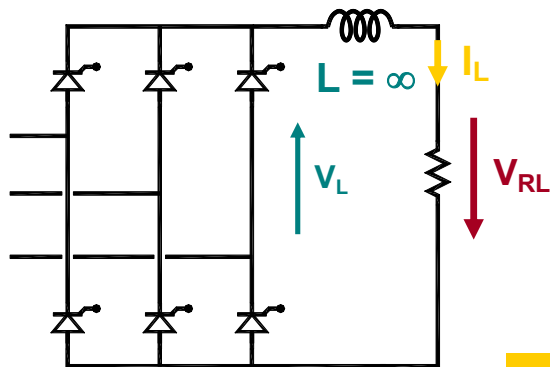
Funcionamiento como inversor no autónomo

Para ángulos mayores de 90° , el coseno es negativo

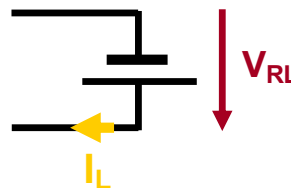
Esto implicaría que la tensión V_{RL} sería negativa

$$V_{RL\alpha} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{LL} \cdot \cos \alpha < 0$$

Esto no quiere decir que el rectificador sea capaz de obtener tensiones negativas



Debemos tener en cuenta el sentido de circulación de corriente



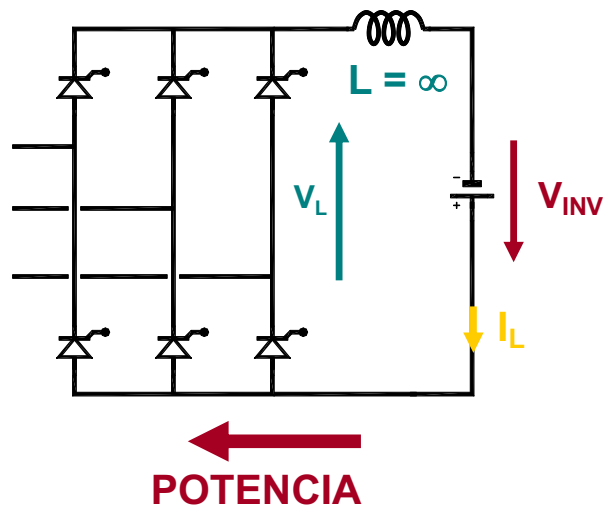
Esta fuente está SUMINISTRANDO potencia

Por tanto, el flujo de potencia no es de izqda-dcha sino al contrario, SE ESTA DEVOLVIENDO POTENCIA A LA RED

Funcionamiento como inversor no autónomo

Por tanto, para que funcione de este modo es necesario que haya una fuente de energía que proporcione la potencia

No puede ser una carga pasiva



Con $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  Funcionamiento como inversor

$$V_{RL\alpha} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{LL} \cdot \cos \alpha < 0$$

Este modo de funcionamiento se puede dar cuando la carga es un motor con capacidad regenerativa

Por ejemplo, un motor frenando que se comporta como generador