

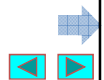
Capítulo 5

Retificadores controlados

Retificadores controlados

Introdução

- Retificadores com apenas **diodos** → tensão fixa de saída
- Retificadores com **tiristores** → controle de fase, com tensão de saída ajustável
- Ajustam-se os **ângulos de disparos** dos tiristores
- O desligamento dos tiristores é **natural** (em função da rede)
- Com **cargas indutivas**, o desligamento pode ser **forçado**
- São designados como conversores **CA-CC**
- Dois tipos: 1) **Monofásico** e 2) **Trifásico**
- No estudo de cargas altamente indutivas, pode-se supor que a carga seja modelada por uma **fonte de corrente constante**



Retificadores controlados

Conversores de fase controlada (monofásico de meia-onda)

$$\begin{aligned}
 V_{o(dc)} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta \\
 &= \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \\
 I_{o(dc)} &= \frac{V_{o(dc)}}{R} \\
 V_{o(rms)} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \theta d\theta} \\
 &= \frac{V_m}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}
 \end{aligned}$$

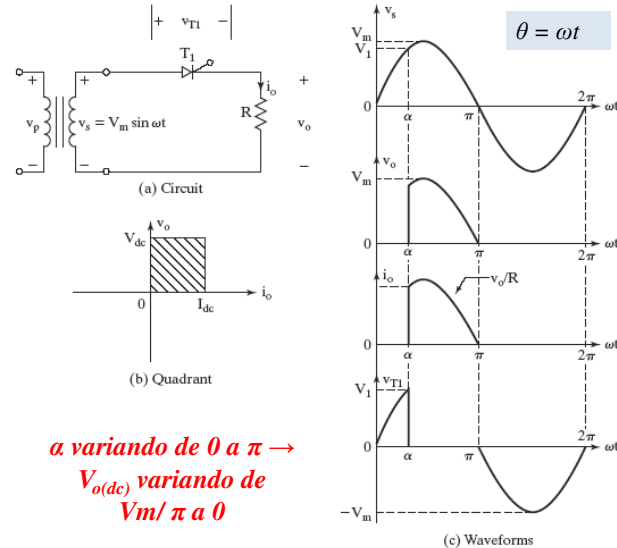


Fig. 5.1

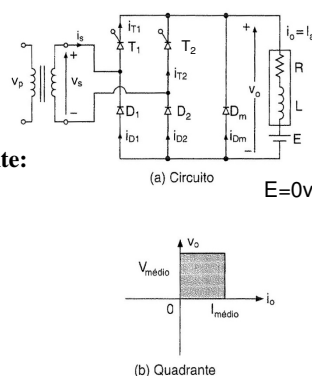
Retificadores controlados

Conversores monofásicos semicontrolados (onda completa em ponte)

Carga altamente indutiva

Operação em um quadrante:
 $(V_o > 0 \text{ e } I_o > 0)$

Tensão média:
 $V_{o(dc)} = (V_m/\pi)(1 + \cos \alpha)$



Obs. Caso RL não seja altamente indutiva (corrente não pode ser considerada constante): Realiza-se análise semelhante à feita para retificador monofásico em ponte com diodos (2 modos).

(c) Formas de onda

Retificadores controlados

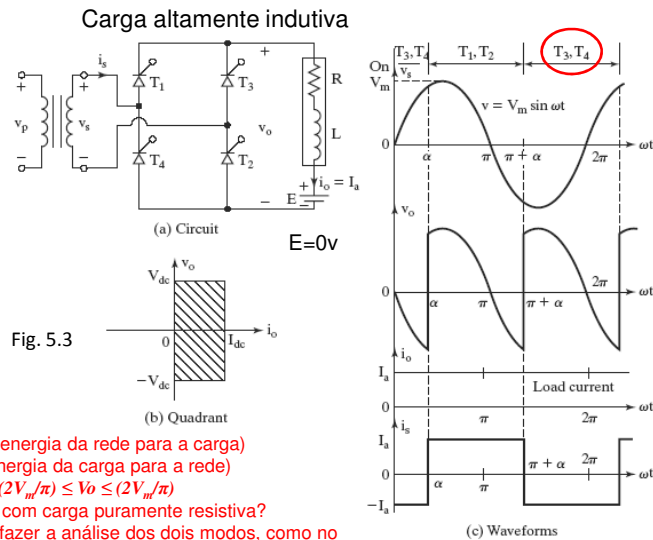
Conversores monofásicos controlados (onda completa em ponte)

$$V_{o(dc)} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \theta d\theta$$

$$= \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m^2 \sin^2 \theta d\theta}$$

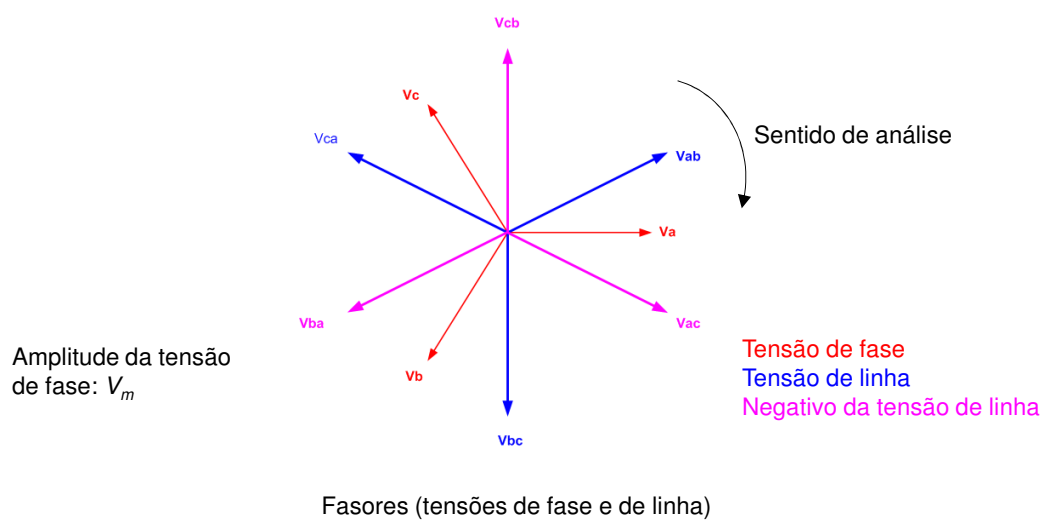
$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}} = V_s$$



- $V_o > 0$: modo retificação (energia da rede para a carga)
- $V_o < 0$: modo inversão (energia da carga para a rede)
- Para $\alpha: \pi \rightarrow 0$, implica em $-(2V_m/\pi) \leq V_o \leq (2V_m/\pi)$
- Como ficariam as curvas com carga puramente resistiva?
- Para carga RL qualquer: fazer a análise dos dois modos, como no caso de retificadores com diodos

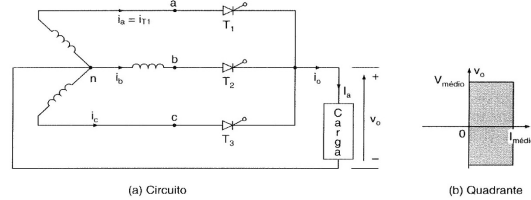
Circuitos e retificadores controlados

Retificador trifásico



Retificadores controlados

Conversores trifásicos (meia-onda)



Características:

- Opera a uma frequência maior (simplifica o filtro)
- Tensão média maior
- Corrente da rede de alimentação terá componente CC
- Para carga resistiva a corrente pode se tornar descontínua
- As tensões de fase polarizam os tiristores

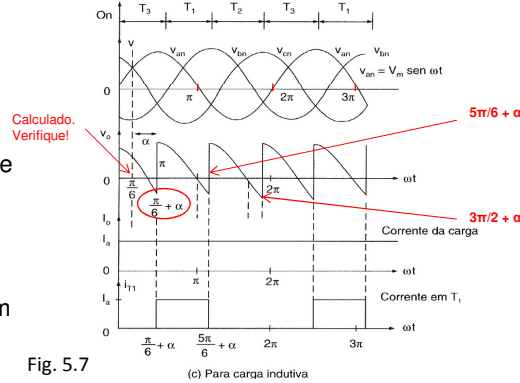
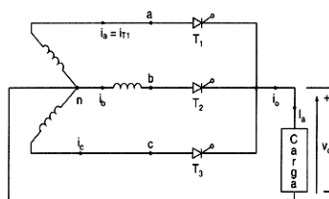


Fig. 5.7

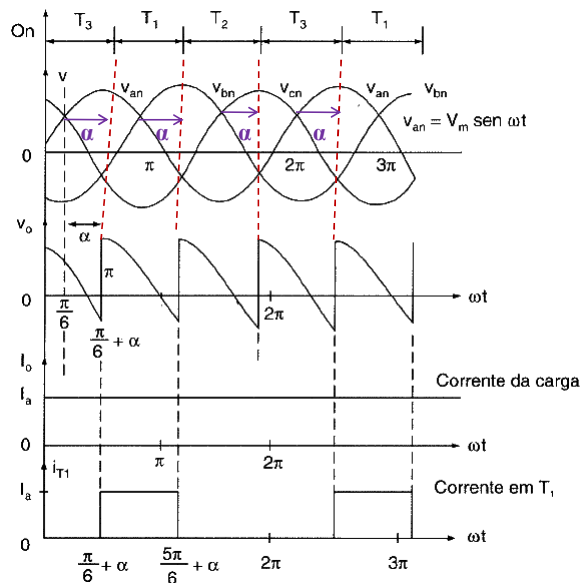
(c) Para carga indutiva



$$30^\circ \rightarrow \pi/6$$

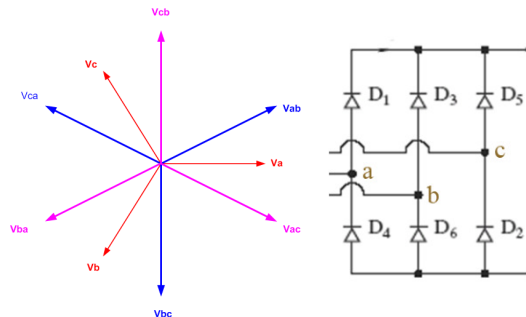
$$30^\circ + 120^\circ = 150^\circ \rightarrow \pi/6 + 2\pi/3 = 5\pi/6$$

- Após determinada tensão de fase se tornar a de maior valor, aguarda-se um ângulo de fase α e dispara-se o tiristor correspondente àquela fase.
- V_o pode se tornar negativo, pois não existe diodo de freewheeling em paralelo com a carga.



Retificadores controlados

Retificador trifásico em ponte (com diodos) visto no capítulo 3



$$V_{o(dc)} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_m \cos \theta d\theta$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654 V_m$$

$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{2}{2\pi/q} \int_0^{\pi/q} 3V_m^2 \cos^2 \theta d\theta}$$

$$= V_m \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} = 1.6554 V_m \quad (q=6)$$

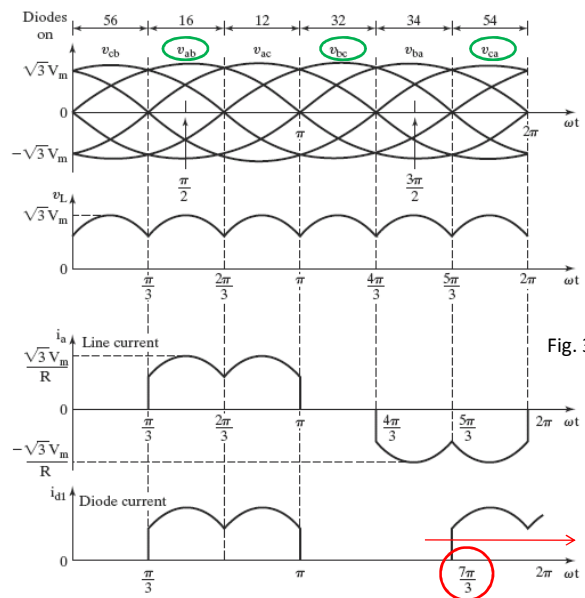


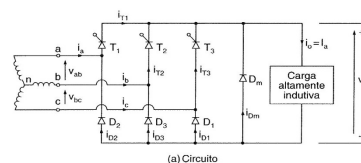
Fig. 3.26

Retificadores controlados

Conversores trifásicos semicontrolados (onda completa em ponte)

Características:

- Operação em **um quadrante**
- D_m não permite tensão negativa na carga
- As tensões de linha polarizam os diodos
- A interpretação dos gráficos temporais deve ser feita em relação às **tensões de linha** (v_{ac} , v_{ba} e v_{cb})



(a) Circuito

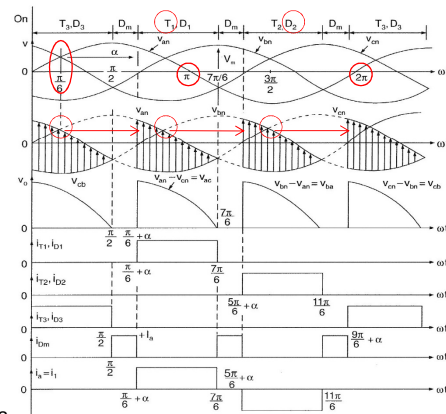
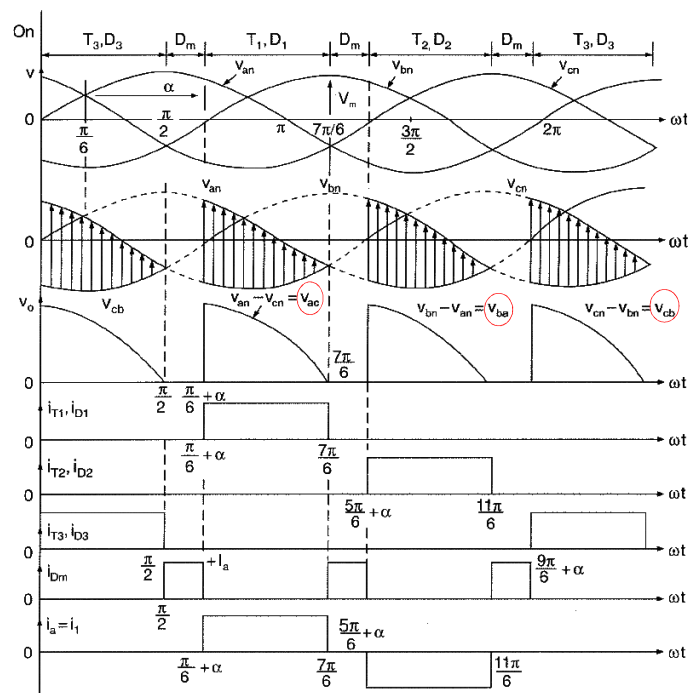


Fig. 5.8

(b) Formas de onda para $\alpha = 90^\circ$

Observar:

v_{ac} , v_{ba} e v_{cb}



Retificadores controlados

Conversores trifásicos controlados (onda completa em ponte)

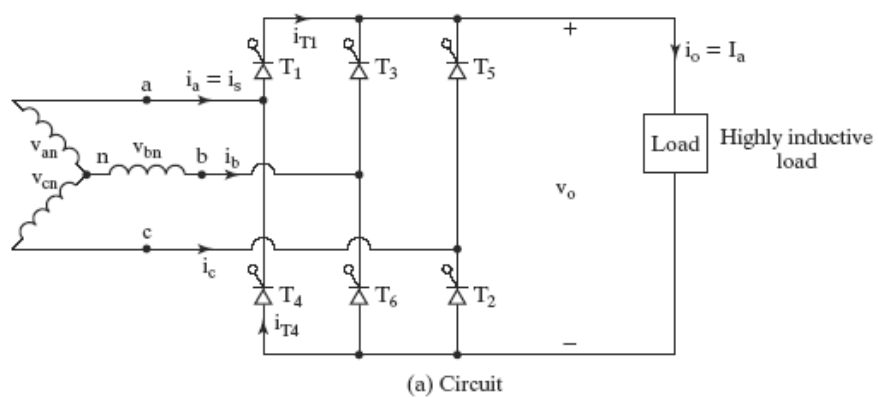


Fig. 5.10

Retificadores controlados

Conversores trifásicos controlados (onda completa em ponte)

$$\begin{aligned}
 V_{o(dc)} &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} v_{ab} d\theta = \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3} V_m \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta \\
 &= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{o(rms)} &= \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} 3V_m^2 \sin^2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta} \\
 &= \sqrt{3} V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha}
 \end{aligned}$$

Obs. A interpretação dos gráficos temporais deve ser feita em relação às **tensões de linha** (v_{ab} , v_{bc} e v_{ca})

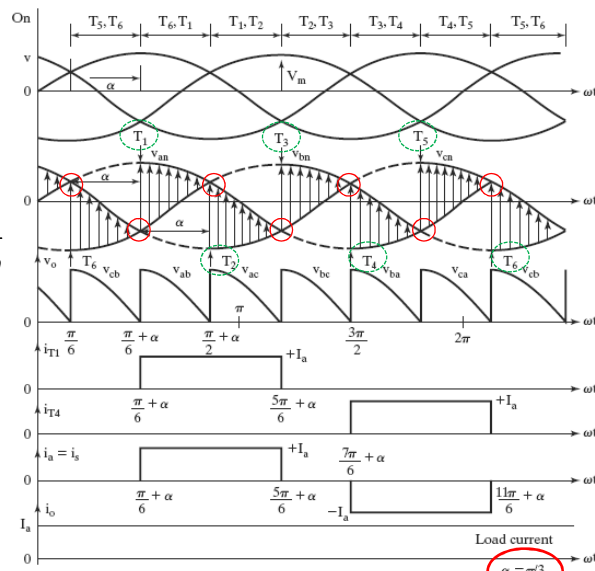


Fig. 5.10

(b) Waveforms

$\alpha = \pi/3$