

Capítulo 7

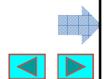
Técnicas de comutação de tiristores

Técnicas de comutação de tiristores

Introdução

- **Disparo**: pulso de sinal no terminal de **gatilho** (forma controlada)
- Em condução, há uma pequena **queda de tensão** entre anodo e catodo (0,25 a 2V)
- **Comutação** do tiristor: procedimento de **desligamento** ou corte do tiristor
- Os tiristores são amplamente utilizados em circuitos de alta corrente e/ou tensão, mesmo com o desenvolvimento de outras chaves eletrônicas com disparo e comutação mais **simples** (circuitos mais simples)

Obs. Antes do estudo das técnicas de comutação (desligamento) dos tiristores serão vistas as técnicas de disparo dos mesmos.

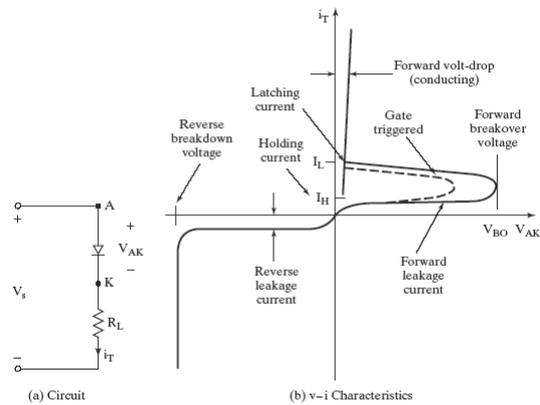


Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)

Formas de disparo do tiristor:

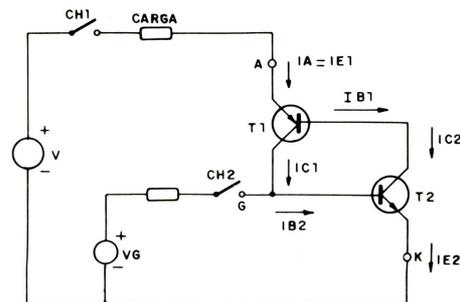
1. Por **pulso de gatilho**
2. Por **sobretensão** (a ser evitado)
3. Por **dv/dt** (corrigido por um *snubber*)
4. Por aumento na **temperatura** (a ser evitado)
5. Por **luz** (LASCR – light activated silicon controlled rectifier)



Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)

Analogia com dois transistores BJT

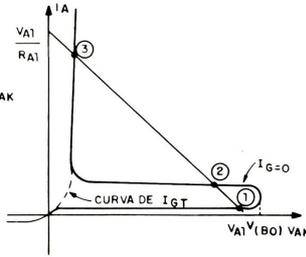
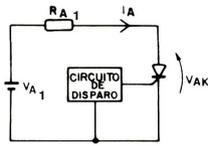


- Com CH1 fechada o tiristor fica diretamente polarizado
- Ao se fechar CH2: $i_{B2} \uparrow \rightarrow i_{C2} = i_{B1} \uparrow \rightarrow i_{C1} \uparrow \rightarrow i_{B2} \uparrow$ ação regenerativa
- Uma vez iniciada a ação regenerativa CH2 pode ser aberta sem que o tiristor deixe de conduzir.

Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)

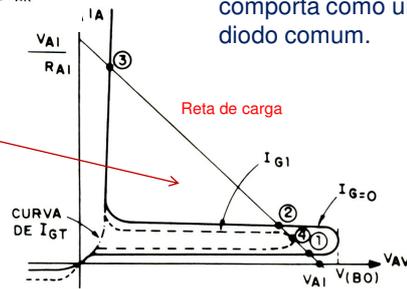
Mecanismo de disparo



$i_G = 0$
 $V_{A1} < V_{(BO)} \rightarrow$ ponto 1 estável

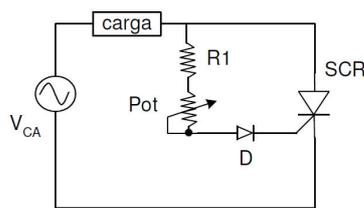
Obs. Para $i_G = I_{GT}$, o tiristor se comporta como um diodo comum.

- $i_G = i_{G1} > 0$
- ponto 4 **tangente** à curva (ponto **instável**)
- ponto 3 **estável** (tiristor conduz corrente de aprox. V_{A1}/R_{A1})
- Para dado V_{A1} e R_{A1} , será necessária uma certa corrente i_G específica para disparo

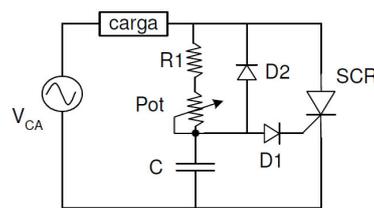


Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)



(a)



(b)

Circuitos de disparo de SCR usando a rede CA.

Circuito (a):

Seja $R_x = R_1 + R_{pot}$ e $V_{disp} = V_m \sin(\alpha)$, onde V_m é a amplitude de V_{CA} e α o ângulo de disparo desejado. D força a corrente de gatilho num único sentido.

$$R_x \approx \frac{V_{disp} - V_q}{I_{GT}}$$

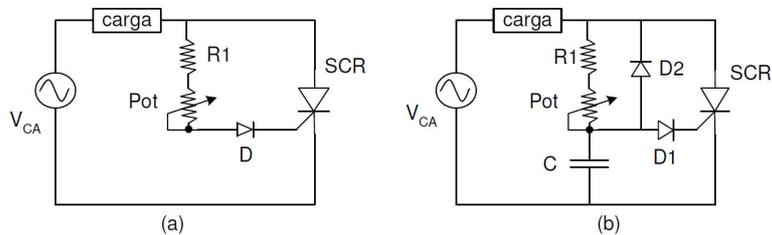
V_q : queda de tensão no diodo mais queda de tensão entre terminal de gatilho e catodo do tiristor (relativamente pequena)

Ângulo de controle: $0 \leq \alpha \leq 90^\circ \rightarrow R_x \leq V_m / I_{GT}$



Técnicas de comutação de tiristores

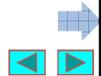
Introdução (disparo)



Circuitos de disparo de SCR usando a rede CA.

Circuito (b):

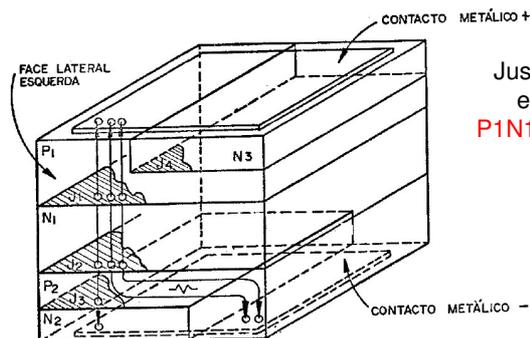
- O circuito $R_x C$ causa um atraso adicional na tensão de gatilho, estendendo o disparo para além de 90° .
- D2 faz com que a tensão do capacitor acompanhe a tensão do semiciclo negativo da excitação, estabelecendo sempre a mesma condição inicial quando do início do semiciclo positivo.



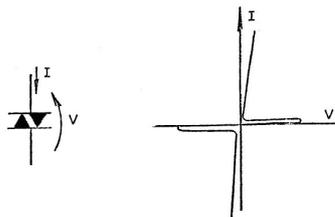
Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)

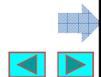
DIAC



Justaposição de duas estruturas PNPN:
P1N1P2N2 e P2N1P1N3



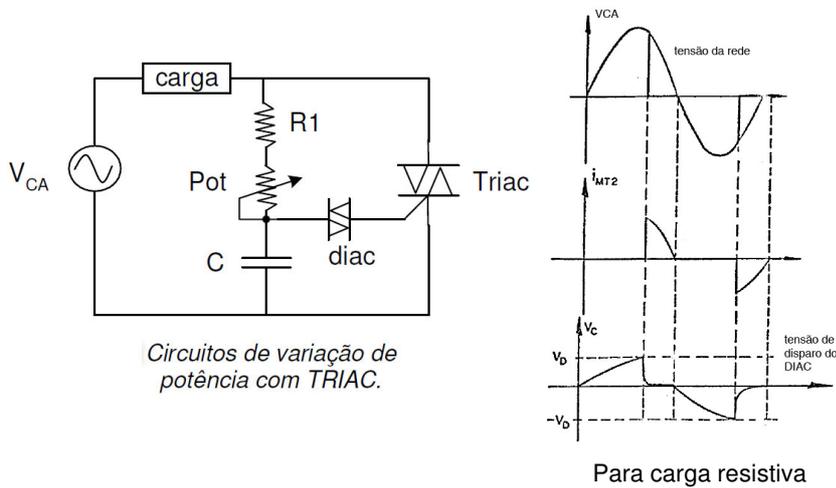
Normalmente, para disparo, a tensão V deve exceder a tensão V_{BO} do dispositivo (tensão de disparo)



Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)

Acionamento CA de uma carga utilizando-se um par DIAC - TRIAC

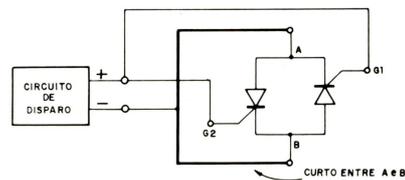
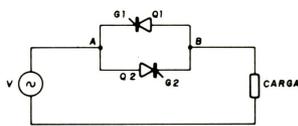


Técnicas de comutação de tiristores

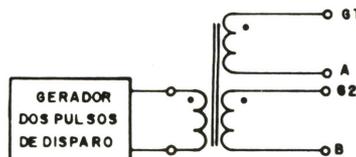
Introdução (disparo)

Acionamentos por transformadores de pulso

Seja o circuito abaixo, analisado no cap. 6



O circuito de disparo tem um nó de referência, se ele for conectado aos catodos dos tiristores (SCRs), surgirá um curto-circuito. A solução poderia ser obtida pelo uso de transformadores de pulso.



Técnicas de comutação de tiristores

Introdução (disparo)

Acionamentos por transformadores de pulso

Obs. Pode-se ter configurações alternativas à dos dois tiristores em antiparalelo utilizando os circuitos das figuras 6.4 e 6.5.

Figura 6.4

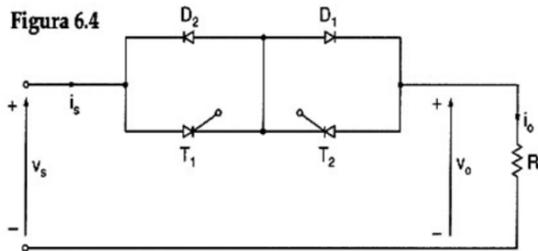
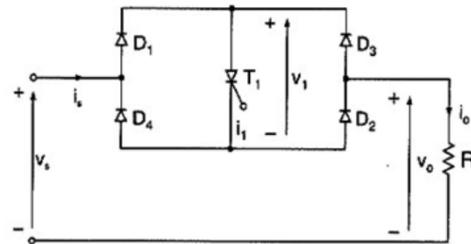


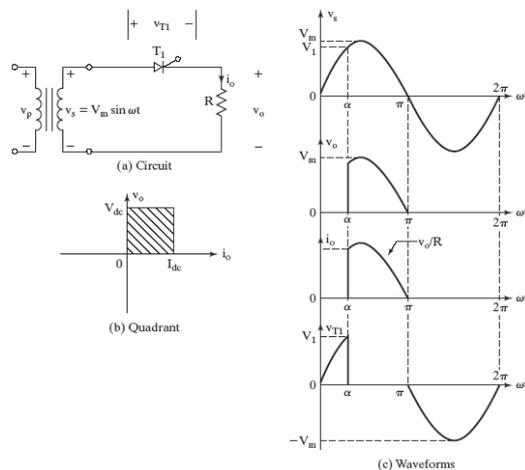
Figura 6.5



Técnicas de comutação de tiristores

Comutação Natural

Em função da polarização imposta pela rede o tiristor comuta

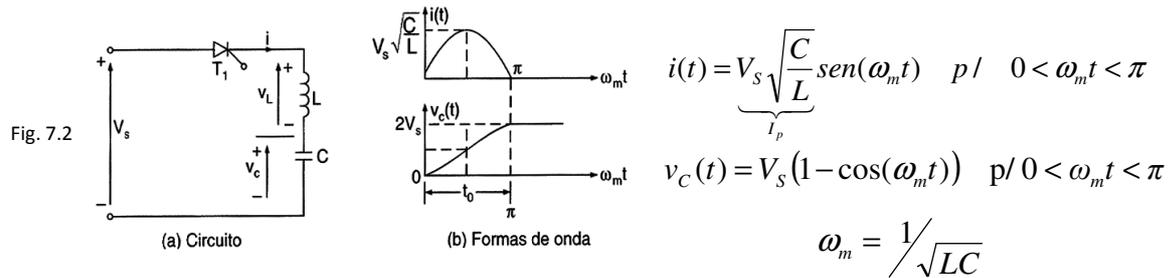


Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada - Autocomutação

- Em circuitos com alimentação CC a comutação natural não ocorre.
- Utilizam-se circuitos de comutação (usada em conversores CC-CC (*choppers*) e CC-CA (inversores))

- **Autocomutação** (devido às características naturais do circuito) – Seja T_1 disparado em $t=0s$:



Em $t_0 = \pi\sqrt{LC}$ T_1 desliga e $v_C(t_0) = 2V_s$

Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada - Autocomutação

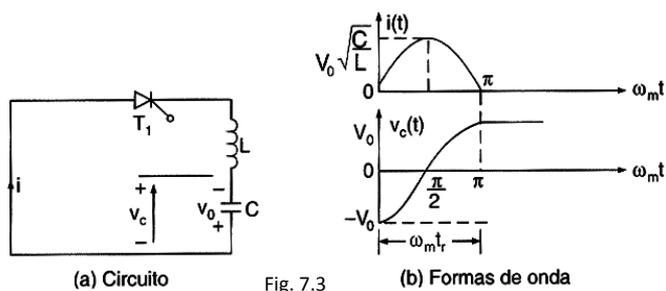


Fig. 7.3

Seja $v_C(0) = -V_0$ e $i(0) = 0$, com $V_s = 0$

Para T_1 disparado em $t = 0s$, $L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + (-V_0) = 0$

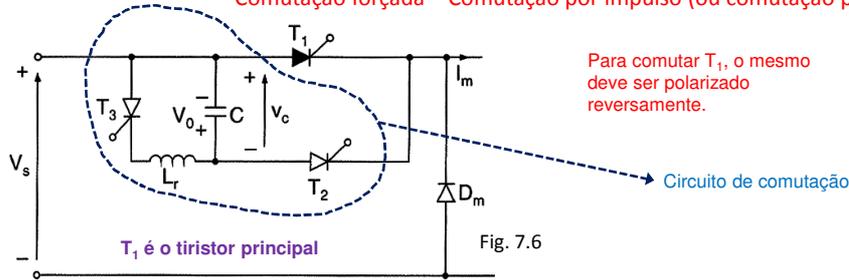
$$i(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \text{sen}(\omega_m t) \quad \text{p/ } 0 < \omega_m t < \pi$$

$$v_C(t) = -V_0 \cos(\omega_m t) \quad \text{p/ } 0 < \omega_m t < \pi$$

Essa topologia será utilizada na **comutação por impulso**, a seguir.

Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por impulso (ou comutação por tensão)

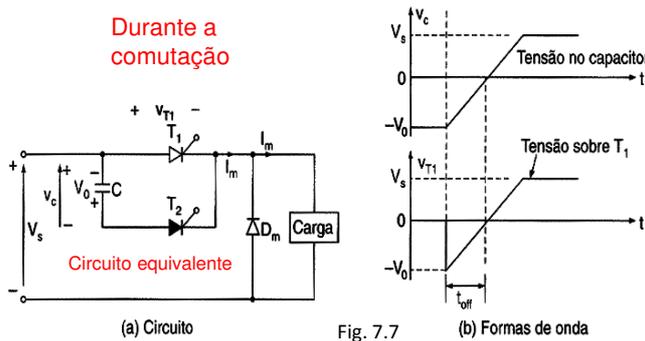


- Inicialmente, supor T_1 conduzindo (corrente I_m) e C carregado com $v_C(t) = -V_0 = -V_S$
- Quando T_2 for disparado $\rightarrow T_1$ fica reversamente polarizado (é desligado)
- T_2 conduzirá a corrente da carga, até C ficar carregado $\rightarrow v_C(t)$ varia de $-V_0 = -V_S$ a V_S
 $\rightarrow T_2$ é desligado (corrente cai abaixo da corrente de manutenção)
- Ao se disparar T_3 ocorre o mesmo visto na figura 7.3, $v_C(t) \rightarrow -V_0 = -V_S$



Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por impulso (ou comutação por tensão)



Tempo de desligamento (t_{off}):

- Até que $v_C(t)$ alcance $0V$
- Deve ser maior que t_q (tempo de desligamento do tiristor – aprox. t_{rr})

Seja a corrente de carga (I_m) é constante:

$$V_0 = \frac{1}{C} \int_0^{t_{off}} I_m dt = \frac{I_m t_{off}}{C}$$

$$t_{off} = \frac{V_0 C}{I_m} \text{ que deve ser maior que } t_q$$

Desvantagem do procedimento:

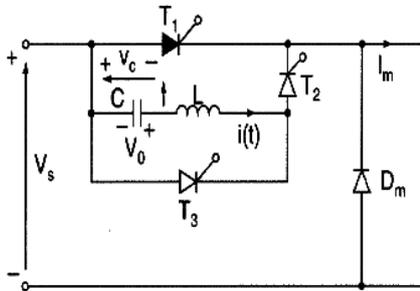
- ✓ Tempo de comutação depende da carga (I_m)



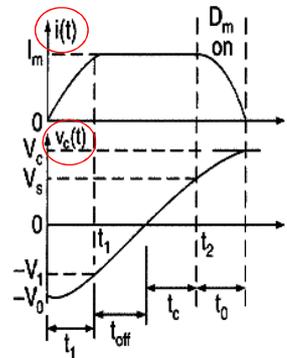
Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por pulso ressonante

Para comutar T_1 , a corrente do mesmo é forçada a cair abaixo da corrente de manutenção.



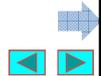
(a) Circuito



(b) Formas de onda

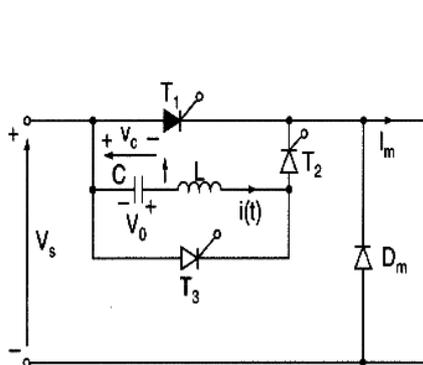
Fig. 7.12

- Seja inicialmente: T_1 conduzindo (I_m) e $v_c(t) = -V_0$
- Quando T_2 é disparado (em $t=0s$): L,C, T_1 e T_2 formam um circuito ressonante

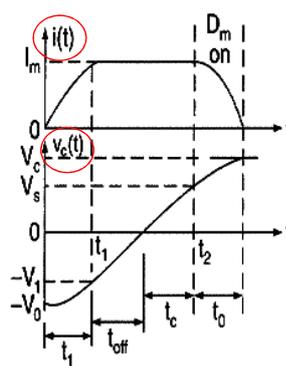


Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por pulso ressonante



(a) Circuito



(b) Formas de onda

Fig. 7.12

$$i(t) = V_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \text{sen}(\omega_m t)$$

$$= I_p \text{sen}(\omega_m t)$$

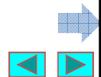
$$v_c(t) = -V_0 \cos(\omega_m t)$$

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Em $t = t_1$, $i(t_1) = I_m$ e a corrente em T_1 é nula (T_1 comuta) $\rightarrow t_1 = \sqrt{LC} \text{sen}^{-1} \left(\frac{I_m}{V_0} \sqrt{\frac{L}{C}} \right)$

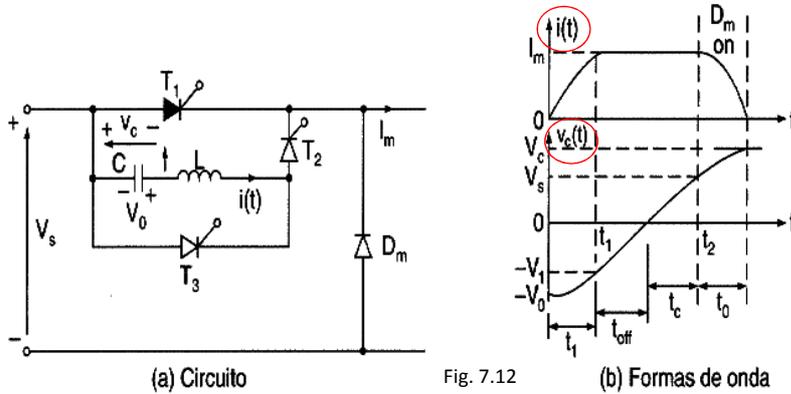
$$v_c(t_1) = -V_1 = -V_0 \cos(\omega_m t_1)$$

A partir de t_1 , assumindo I_m constante $v_c(t)$ cresce como uma reta



Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por pulso ressonante



- Em $t = t_2$, D_m começa a conduzir
- A energia no indutor será armazenada no capacitor
- $v_C(t)$ vai de V_S a V_0

Fig. 7.12

(a) Circuito

(b) Formas de onda

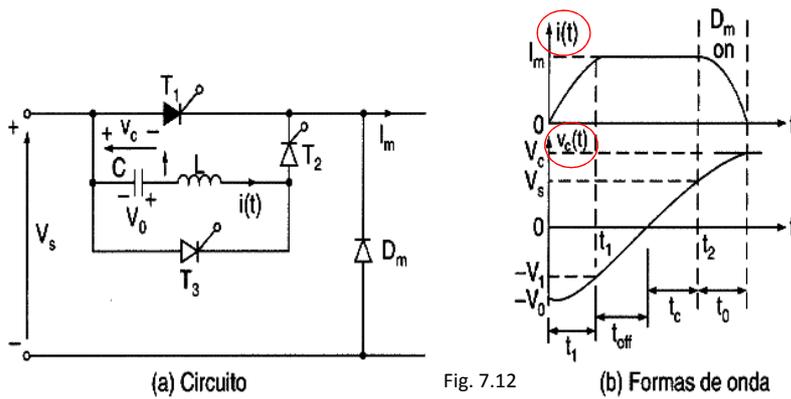
Em $t = t_2 \rightarrow w_L(t_2) = \frac{1}{2} L I_m^2$ Em $t = t_2 + t_0, i(t_2 + t_0) = 0$ e $w_L(t_2 + t_0) = 0$

$\Delta w_C(t_2 + t_0) = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2$, onde $\Delta V = V_0 - V_S$ Logo $\Delta w_C(t_2 + t_0) = w_L(t_2)$



Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por pulso ressonante



$\Delta w_C(t_2 + t_0) = w_L(t_2)$

$\frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{1}{2} L I_m^2$

$\Delta V = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$

$v_C(t_2 + t_0) = V_0 = V_S + \Delta V = V_S + I_m \sqrt{\frac{L}{C}}$

Fig. 7.12

(a) Circuito

(b) Formas de onda

Ao se disparar T_3 $v_C(t)$ irá de V_0 para $-V_0$

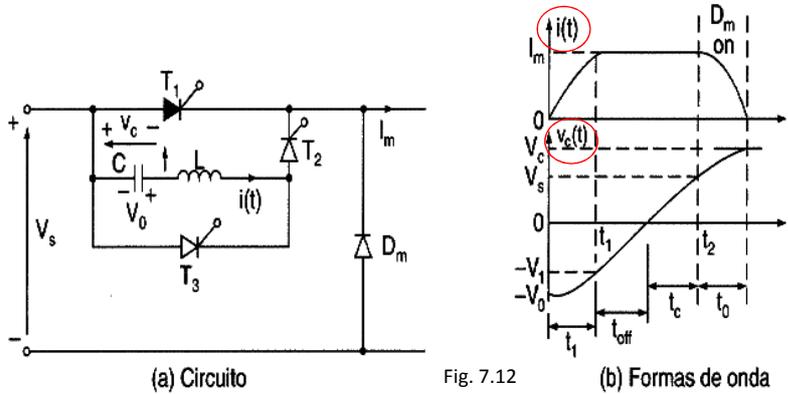
De forma análoga ao já visto

$t_{off} = \frac{V_1 C}{I_m}$



Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação por pulso ressonante



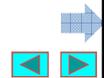
Seja $x = \frac{I_p}{I_m} = \frac{V_0}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}$

Para reduzir a corrente direta de T₁ p/ zero

$x > 1$

Na prática L e C são escolhidos para x=1,5

- ✓ Também denominada **comutação por corrente**
- ✓ t_{off} também depende da carga (I_m)



Técnicas de comutação de tiristores

Comutação forçada – Comutação Complementar

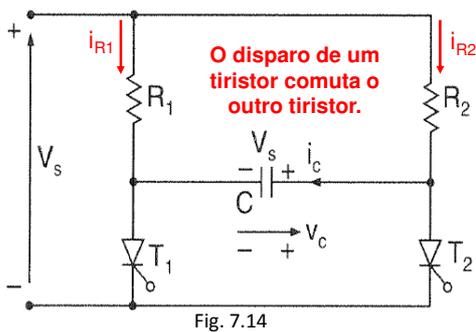


Fig. 7.14

Seja T₁ e T₂ bloqueados e com v_C = 0 p/ t < 0

Se em t = 0s T₁ é disparado:

$$i_{R1} = \frac{V_s}{R_1} \quad , \quad i_C = i_{R2} = \left(\frac{V_s}{R_2} \right) e^{-t/R_2C}$$

$$e \quad v_C = V_s \left(1 - e^{-t/R_2C} \right) \quad p/ \quad t > 0$$

Se em t = t₁ (ex: t₁ > 5R₂C) T₂ for disparado → T₁ comuta

$$i_{R2} = \frac{V_s}{R_2} \quad , \quad i_C = \left(\frac{-2V_s}{R_1} \right) e^{-(t-t_1)/R_1C}$$

$$e \quad v_C = V_s e^{-(t-t_1)/R_1C} - V_s \left(1 - e^{-(t-t_1)/R_1C} \right) \quad p/ \quad t > t_1$$

Se em t = t₂ (ex: (t₂-t₁) > 5R₁C) T₁ for disparado → T₂ comuta

