

# Compensadores Estáticos

Prof. Wilson Komatsu

Escola Politécnica da USP

Depto. de Eng. de Energia e Automação Elétricas

Laboratório de Eletrônica de Potência

Outubro de 2002

# Estrutura da Apresentação

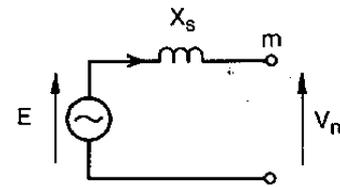
- Aplicações
- Aspectos Básicos de Operação
- Definições e escopo: SVR, TCR e TSC
- TCR – Thyristor Controlled Reactor
- TSC – Thyristor Switched Capacitor
- Implementações de TCRs e TSCs
- Aspectos Básicos de Controle
- Exemplo de Implementação Didática
- Bibliografia

# Aplicações

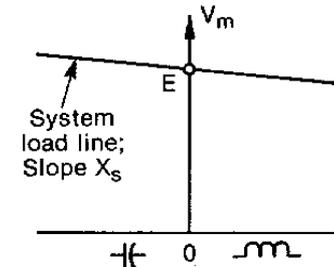
- **Sistemas de Potência:**
  - Regulação de tensão;
  - Compensação de reativos;
  - Balanceamento de cargas;
  - Estabilização.
- **Sistemas Industriais:**
  - Correção de fator de potência;
  - Absorção de variação de tensão (“flicker”).

# Aspectos Básicos de Operação

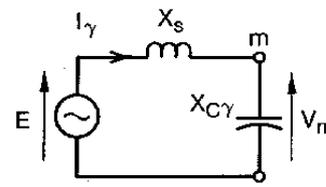
- (a) Thévenin equivalente de um sistema, barra m;
- (b) Característica de carga do sistema, barra m;
- (c) Capacitor shunt na barra m;
- (d) Ponto de operação P com capacitor shunt;
- (e) Reator shunt na barra m;
- (f) Ponto de operação m com reator shunt.
- (de: ref. [2], fig. 8, cap. 3)



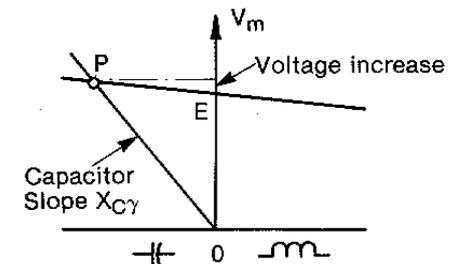
(a)



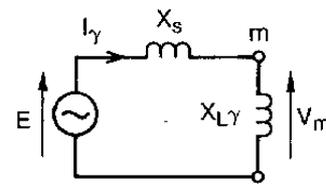
(b)



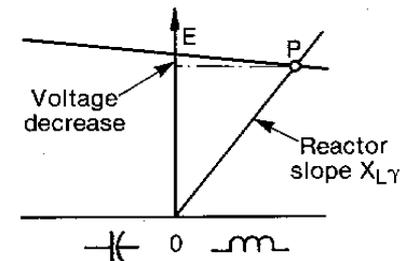
(c)



(d)



(e)



(f)

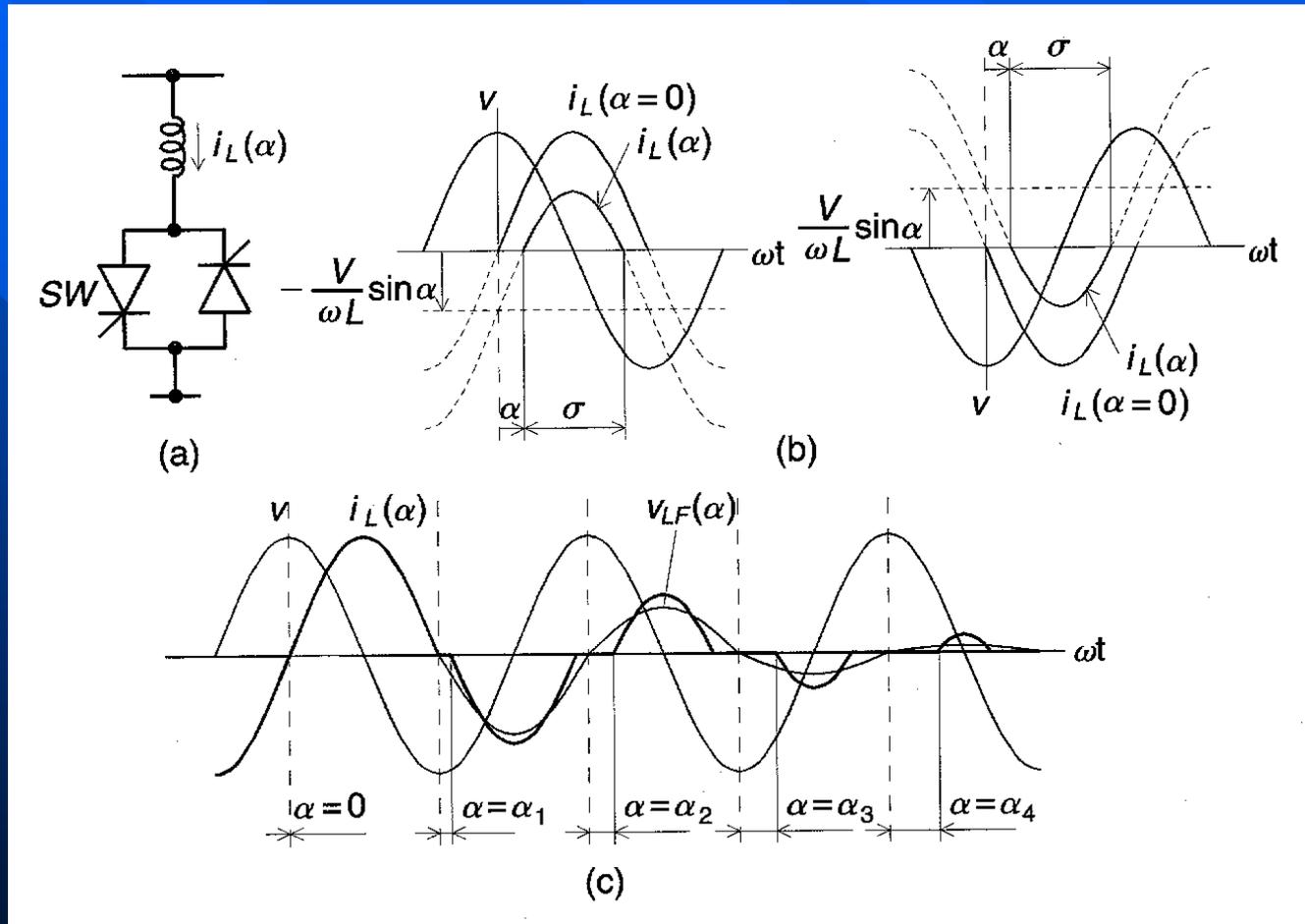
# Definições e escopo: SVC, TCR e TSC

- SVC: Static VAR Compensator;
- Definição CIGRE-IEEE: SVC é um SVG cuja saída varia de modo a controlar ou manter determinado parâmetro (tensão, frequência) do sistema elétrico;
- SVG: Static VAR Generator: conjunto de chaves semicondutoras de potência, componentes passivos e controlador;
- SVC é um SVG com controle dedicado.

# Definições e escopo: SVC, TCR e TSC

- Os SVCs podem ser subdivididos em:
  - SVCs com tiristores;
  - SVCs com conversores chaveados emulando uma fonte de tensão síncrona com a rede;
- Os SVCs com tiristores são:
  - TCR: thyristor controlled reactor;
  - TSR: thyristor switched reactor;
  - TSC: thyristor switched capacitor.
- Reatores e capacitores chaveados mecanicamente não constituem SVCs (tempos de resposta envolvidos).

# TCR – Thyristor Controlled Reactor



- (a) Circuito básico do TCR;
- (b) Controle do ângulo de disparo (atraso);
- (c) Formas de onda típicas.
- (de: ref. [1], fig. 5.7, cap. 5)

# TCR – Thyristor Controlled Reactor

- Susceptância e corrente fundamental:

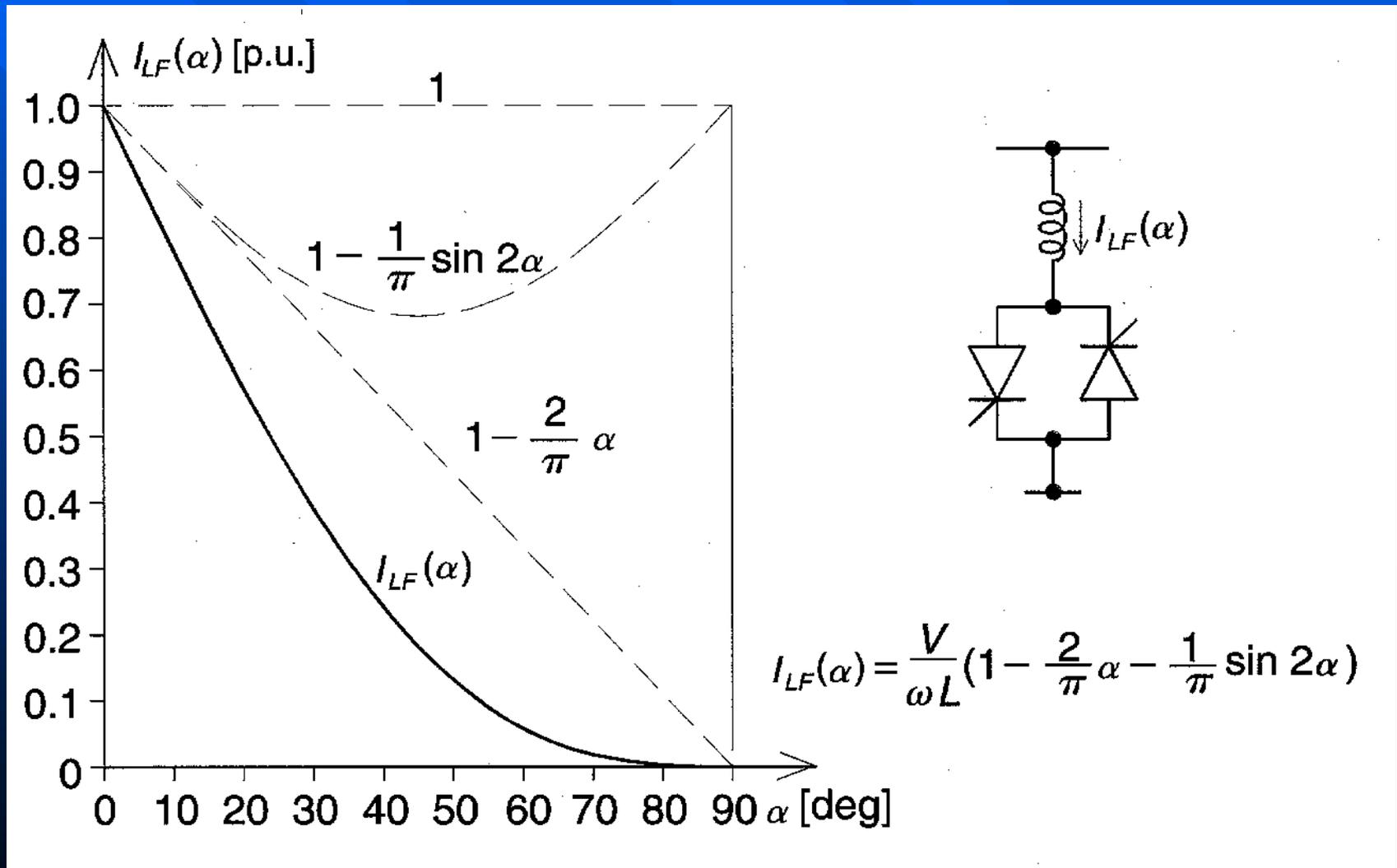
$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right)$$

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi \omega L}$$

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right)$$

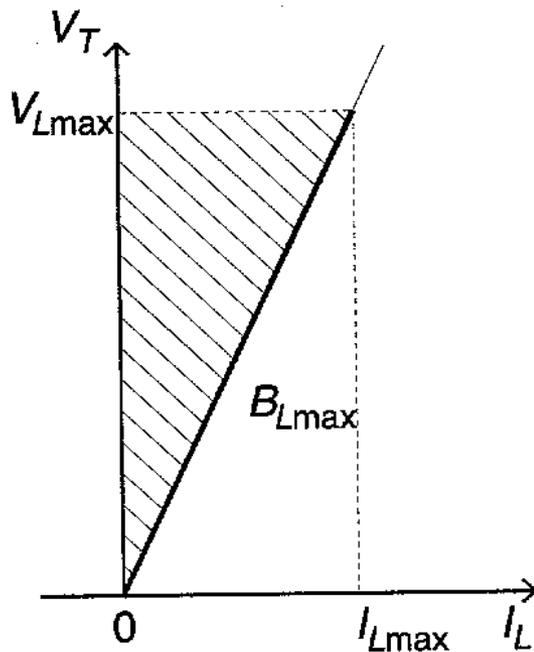
- Cuidado com a definição de  $\alpha$ !

# TCR – Thyristor Controlled Reactor



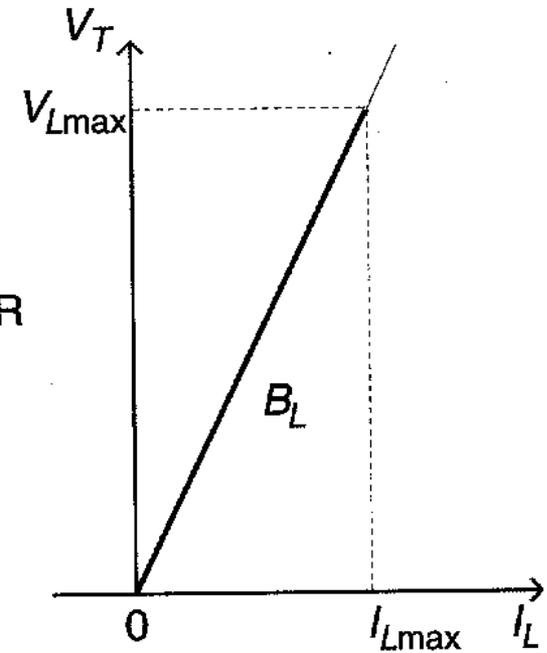
- Variação da amplitude da componente fundamental da corrente com o ângulo  $\alpha$  (de: ref. [1], fig. 5.8, cap. 5).

# TCR – Thyristor Controlled Reactor



(a)

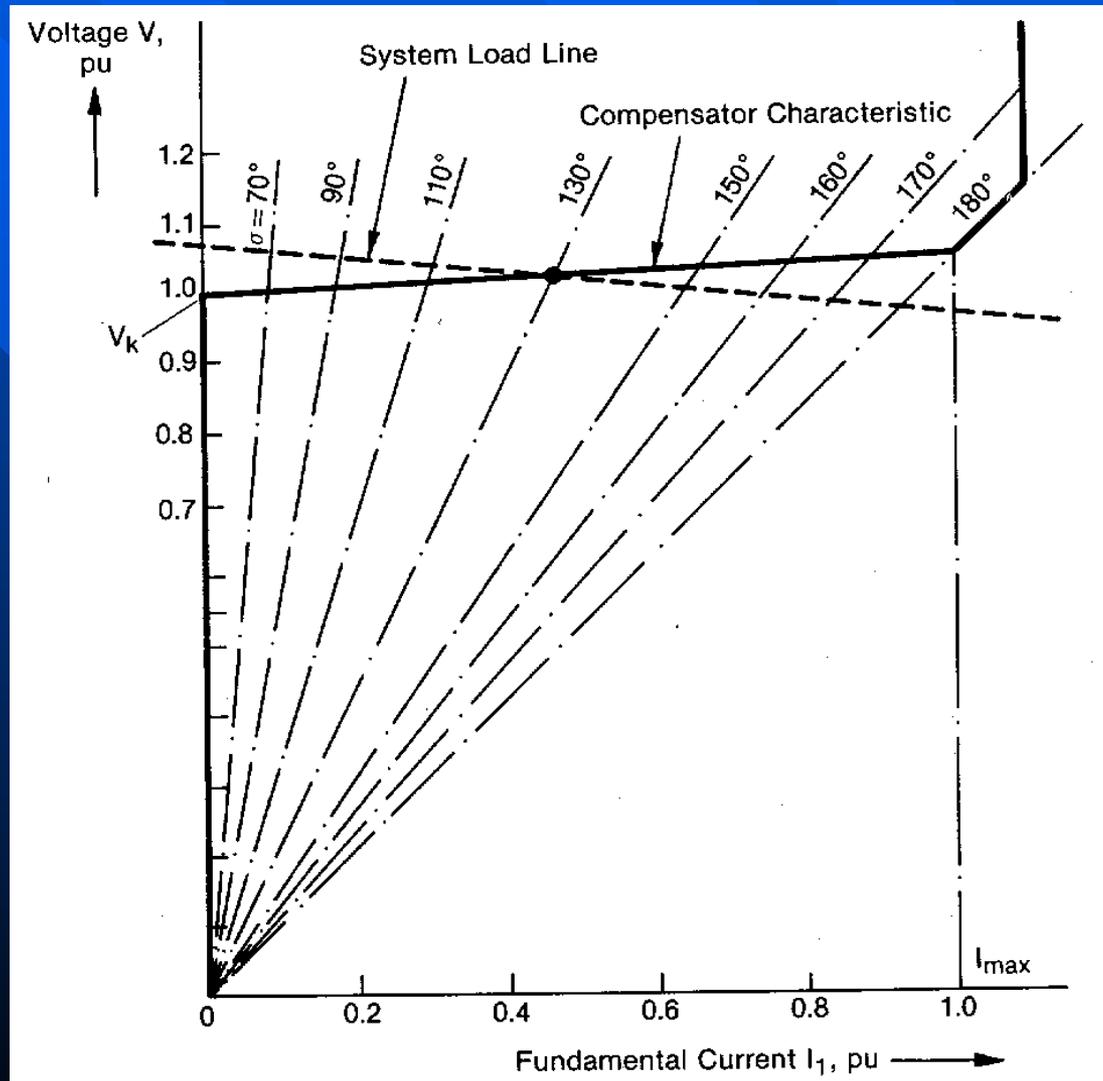
$V_{Lmax}$  = voltage limit  
 $I_{Lmax}$  = current limit  
 $B_{Lmax}$  = max admittance of TCR  
 $B_L$  = admittance of reactor



(b)

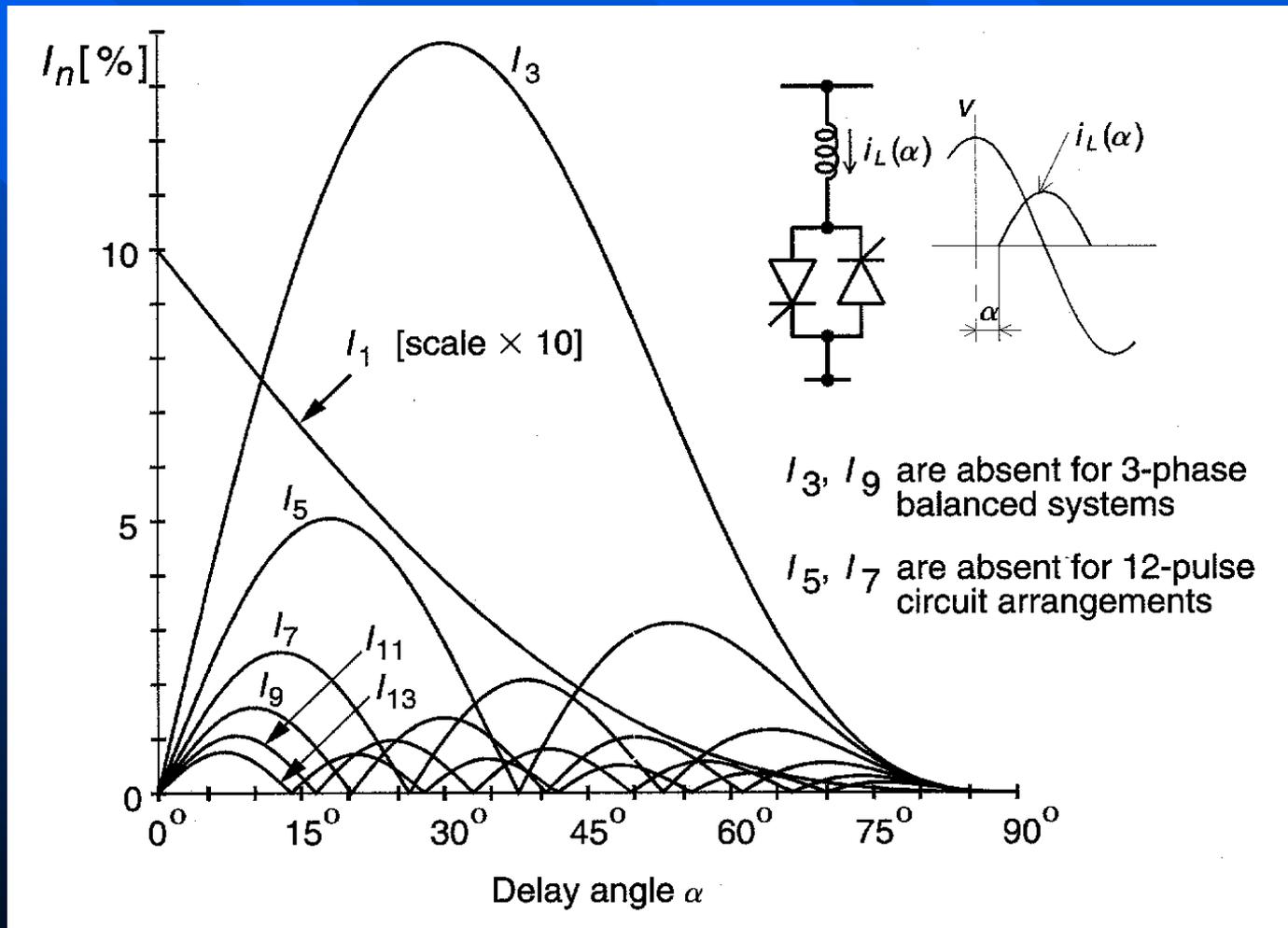
- Áreas de operação V-I do TCR (a) e do TSR (b) (de: ref. [1], fig. 5.9, cap. 5)

# TCR – Thyristor Controlled Reactor



■ Característica tensão/corrente (da fundamental) no TCR. (de; ref. [2], fig. 8, cap. 4)

# TCR – Thyristor Controlled Reactor

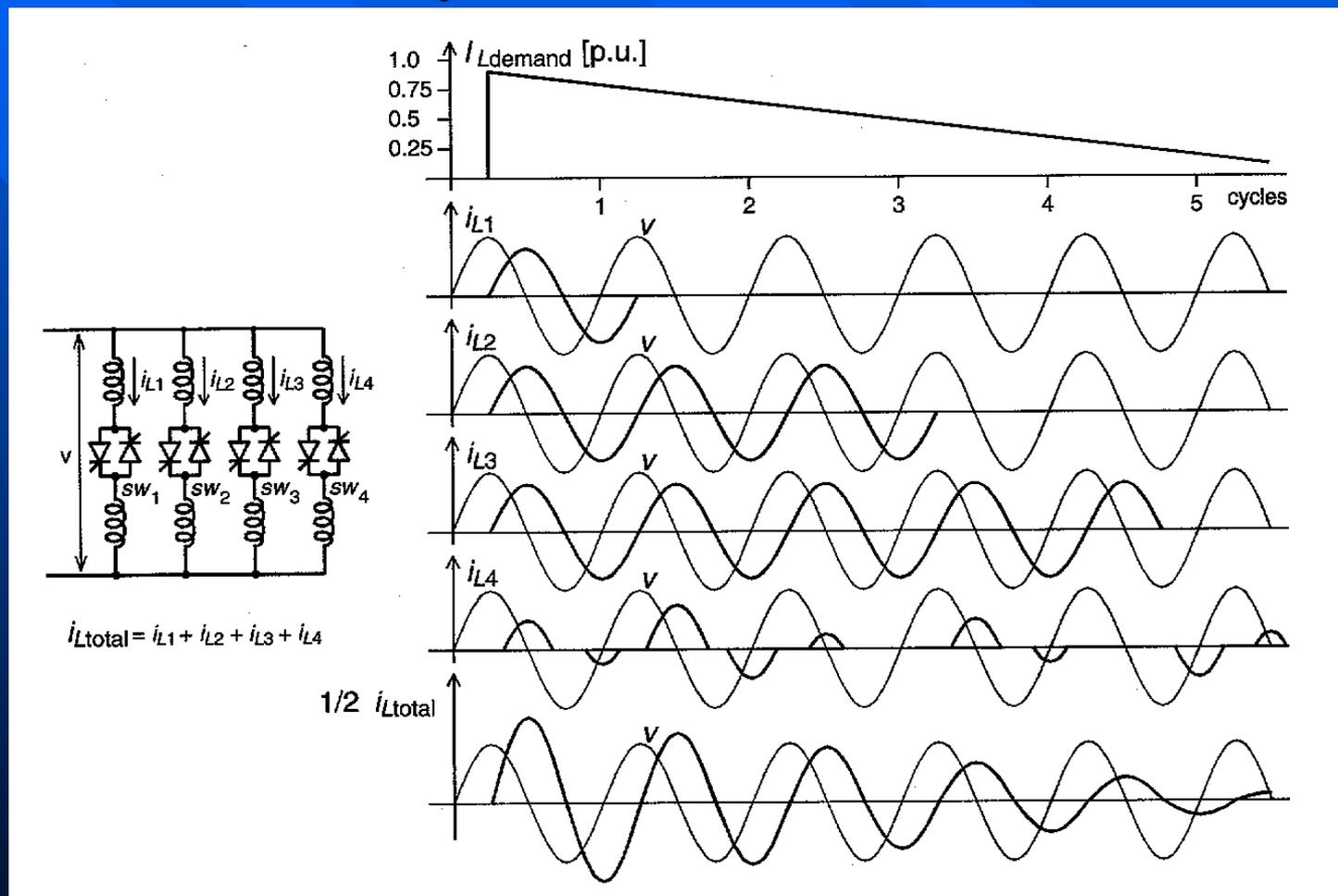


- Amplitudes das componentes harmônicas da corrente do TCR em função do ângulo de atraso (disparo)  $\alpha$ . (de: ref. [1], fig. 5.10, cap. 5)

# TCR – Thyristor Controlled Reactor

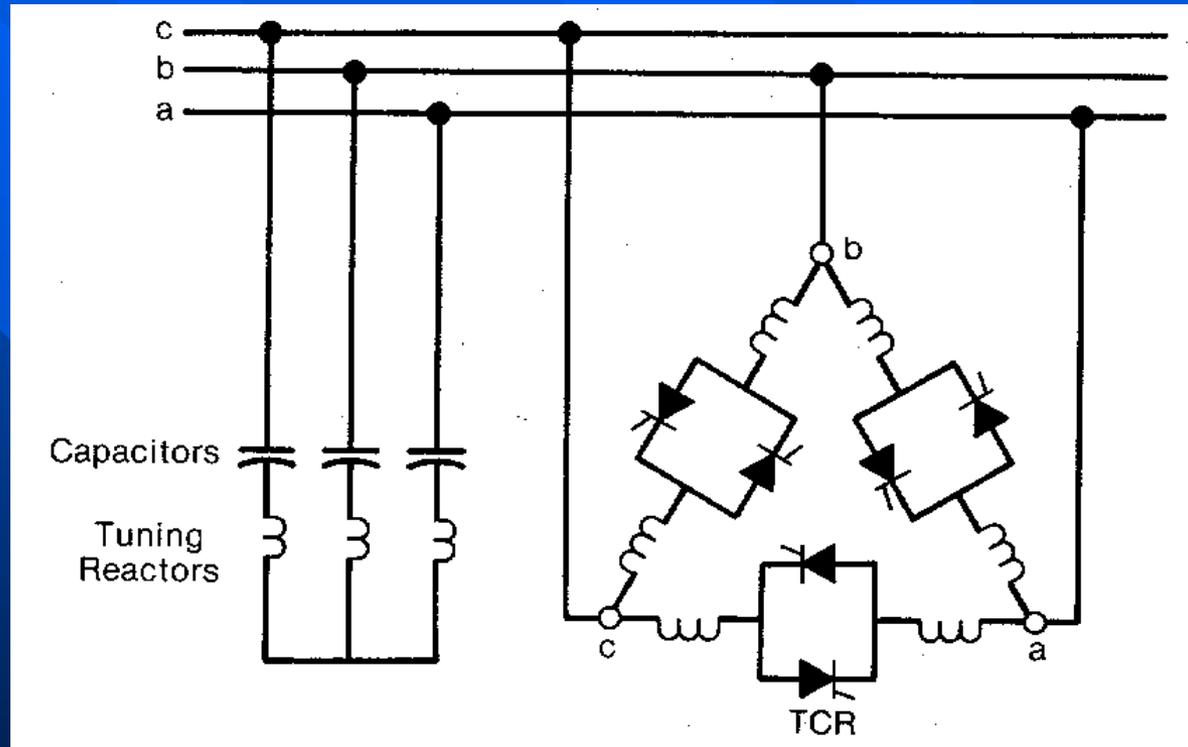
- Minimização das harmônicas do TCR:
  - Conexão em delta (para os múltiplos de 3);
  - $m$  ( $m \geq 2$ ) reatores, com 1 reator controlado e  $(m-1)$  reatores chaveados;
  - Filtros LC sintonizados;
  - Arranjos de 12 pulsos;
  - Divisão do indutor (um para cada tiristor).

# TCR – Thyristor Controlled Reactor



- Ilustração do método empregando  $m$  ( $m \geq 2$ ) reatores, com 1 reator controlado e  $(m-1)$  reatores chaveados, sendo no caso  $m=4$ . (de: ref.[1], fig. 5.11, cap. 5);
- Empregado em TCRs de maior potência. As perdas são minimizadas devido à operação chaveada nos  $(m-1)$  reatores.

# TCR – Thyristor Controlled Reactor

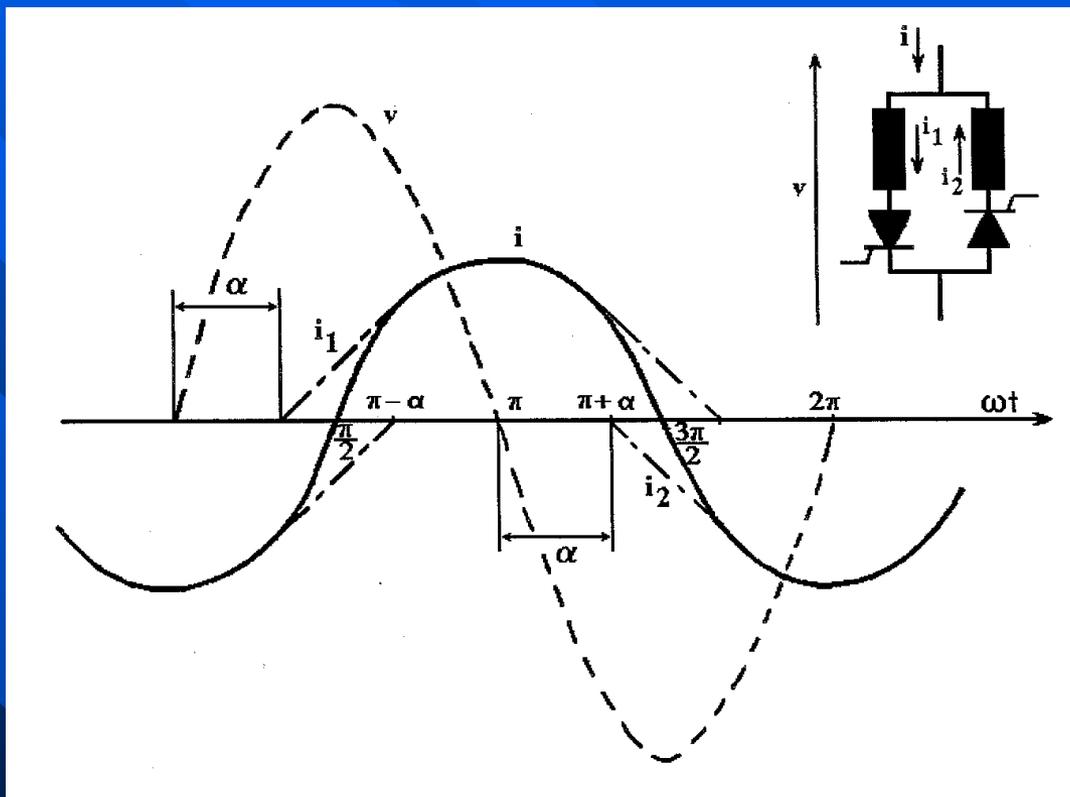


- Emprego de filtros sintonizados e ligação dos reatores em delta. (de: ref. [2], fig. 10, cap. 4).
- Note-se que para a frequência fundamental, os filtros LC se comportam como capacitores:

$$C_{Filtro} \omega_{rede} = \frac{C_{Filtro}}{1 - L_{Filtro} \cdot C_{Filtro} \cdot (\omega_{rede})^2}$$

# TCR – Thyristor Controlled Reactor

- Divisão do Indutor, ou Dois Reatores Unidirecionais (Conforme conceito da Universidade de Manitoba) (de: ref. [4], fig. 6);
- Aumento do custo dos reatores (dois reatores com valor  $2L$ );
- Minimização das harmônicas ( $\sigma > 180^\circ$ );
- Susceptância e corrente fundamental eficaz (note a definição de  $\alpha$  na figura):

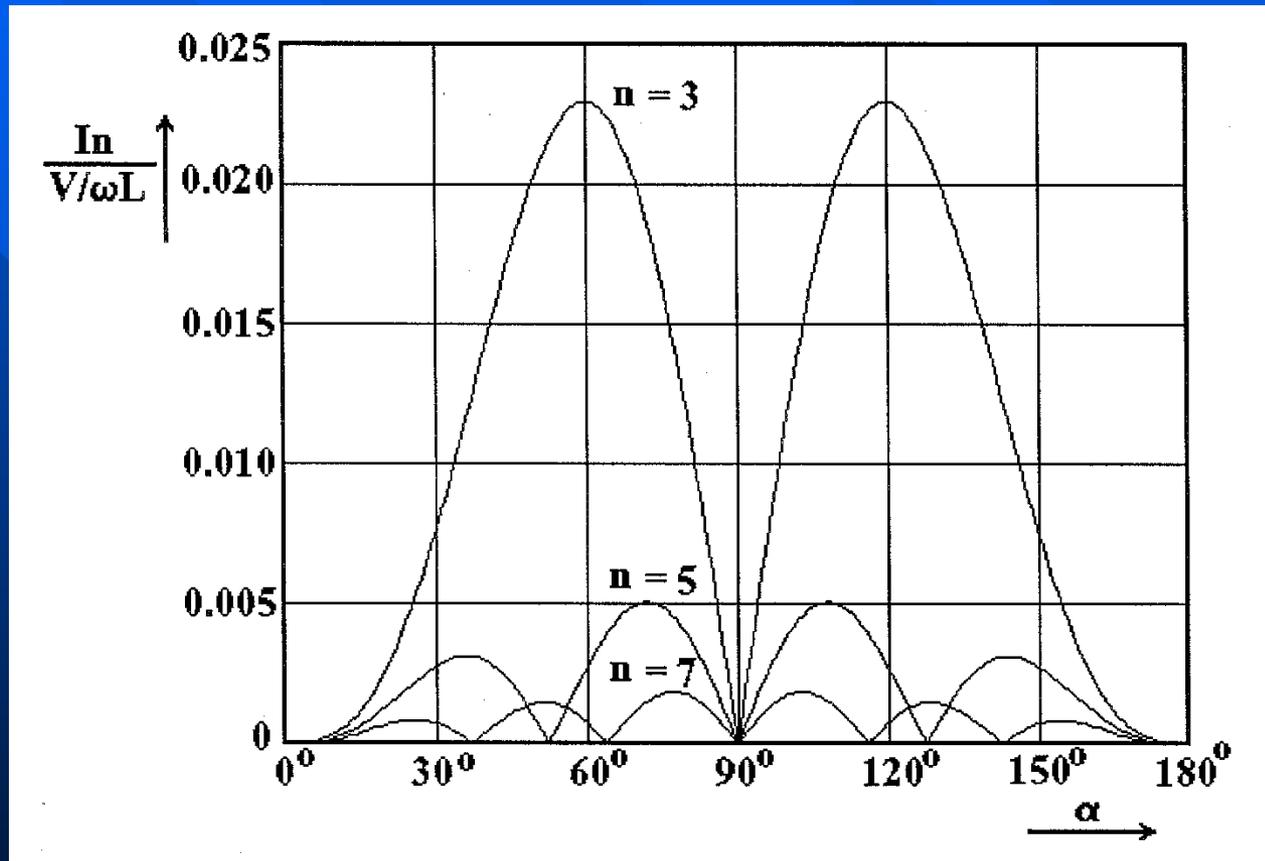


$$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi \cdot \omega \cdot L}$$

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left( \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right)$$

$$0 < \alpha < \pi$$

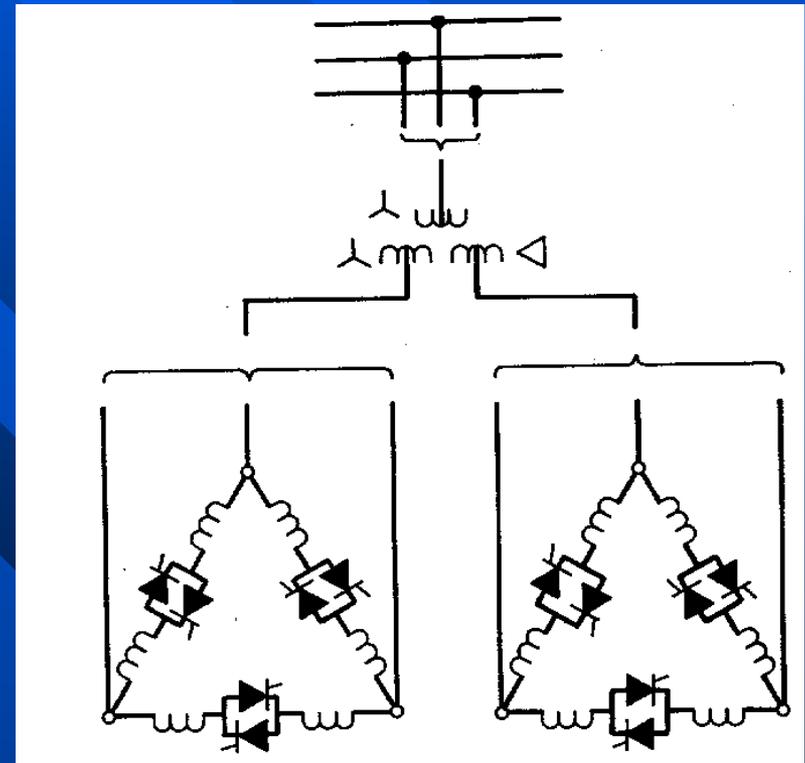
# TCR – Thyristor Controlled Reactor



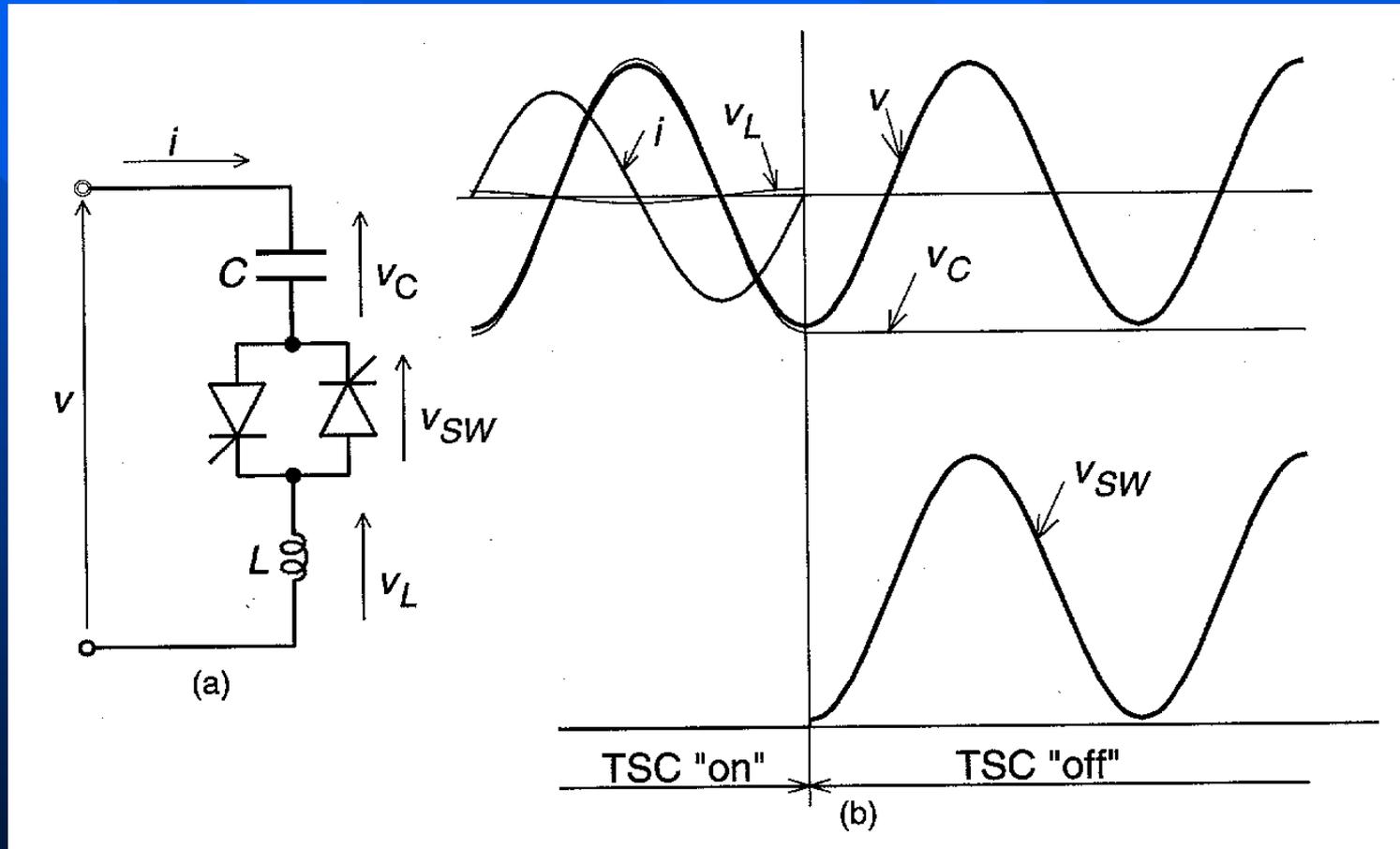
- Amplitudes das componentes harmônicas da corrente do TCR empregando Divisão do Indutor, ou Dois Reatores Unidirecionais, em função do ângulo de atraso (disparo)  $\alpha$ . (de: ref. [4], fig. 8);
- Note-se que para  $\alpha=90^\circ$ , a corrente é puramente senoidal.

# TCR – Thyristor Controlled Reactor

- Arranjo de 12 pulsos (de: ref. [2], fig. 12, cap. 4);
- Defasagem de  $30^\circ$  entre as tensões e correntes dos dois TCRs;
- Harmônicas a partir da 11a e 13a;
- Possibilidade de operação independente dos dois TCRs;
- Possibilidade de uso de:
  - Um transformador trifásico;
  - Dois transformadores trifásicos;
  - Três transformadores monofásicos.



# TSC – Thyristor Switched Capacitor



- (a) Circuito básico do TSC;
- (b) Formas de onda típicas. (de: ref. [1], fig. 5.12, cap. 5);
- Variação discreta de capacitância (reativos).

# TSC – Thyristor Switched Capacitor

- Da figura anterior:

- Tensão senoidal da fonte:

$$v = V \cdot \sin \omega t$$

- Corrente no ramo capacitivo:

$$i(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega \cdot C \cdot \cos \omega t$$

- Frequência natural em p.u.:

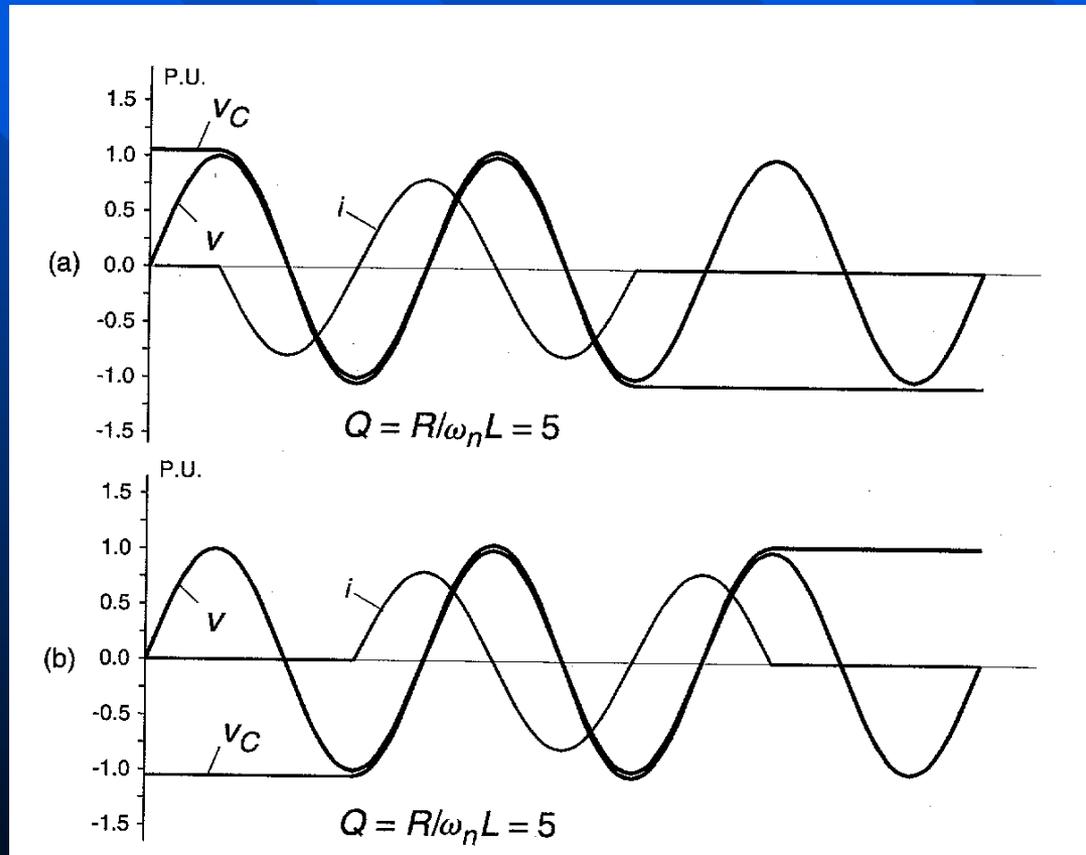
$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \cdot LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

- Amplitude da tensão no capacitor:

$$V_C = V \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

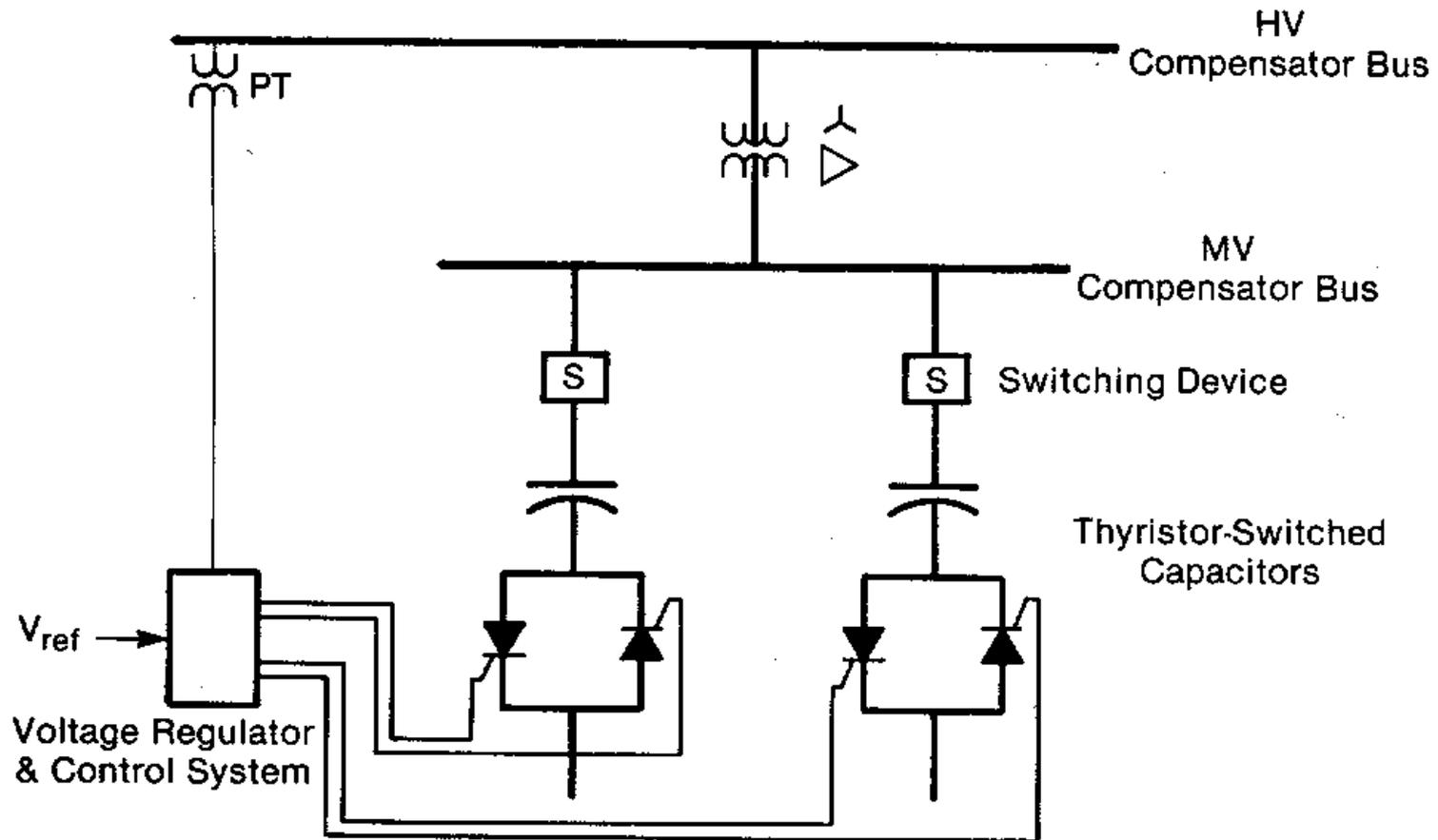
# TSC – Thyristor Switched Capacitor

## ■ Problema do chaveamento



## ■ Chaveamento sem transitório do TSC (de: ref. [1]. fig. 5.14, cap. 5)

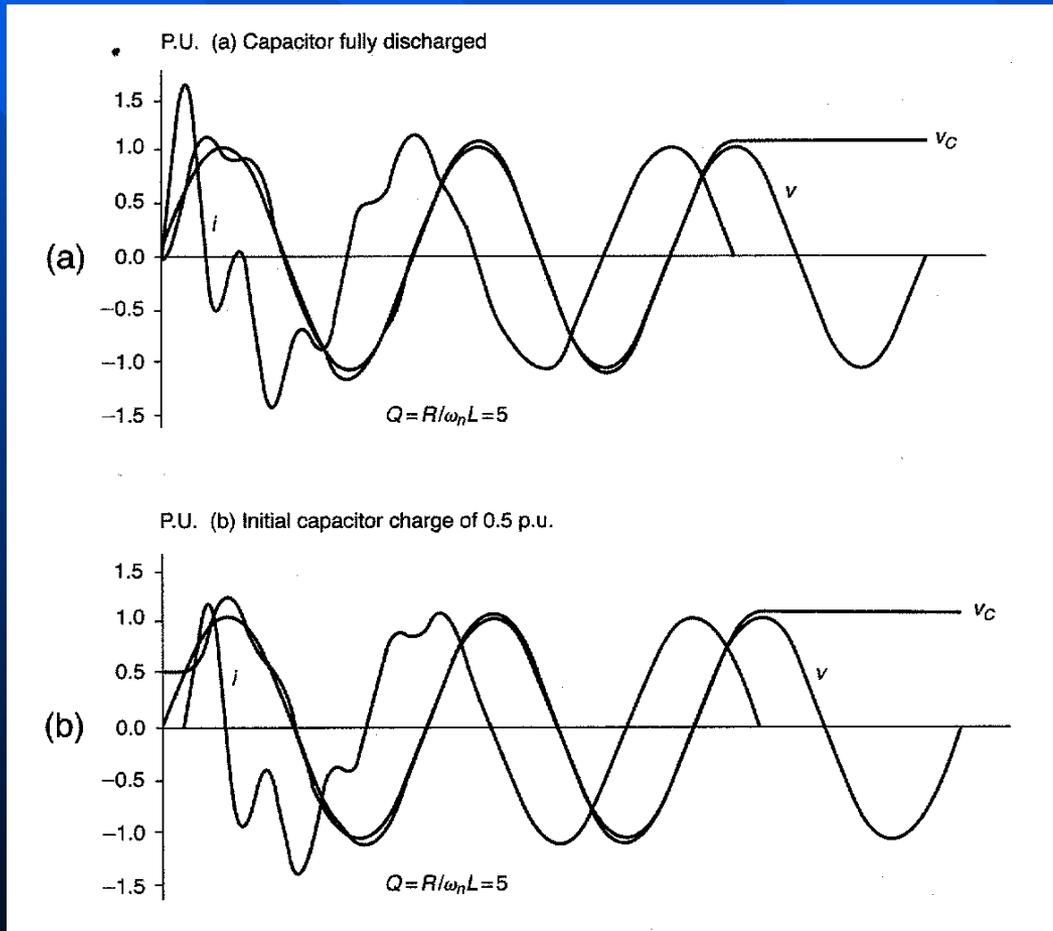
# TSC – Thyristor Switched Capacitor



- Exemplo de implementação do TSC, utilizando dois bancos de capacitores (de: ref. [2]. fig. 3, cap. 4)

# TSC – Thyristor Switched Capacitor

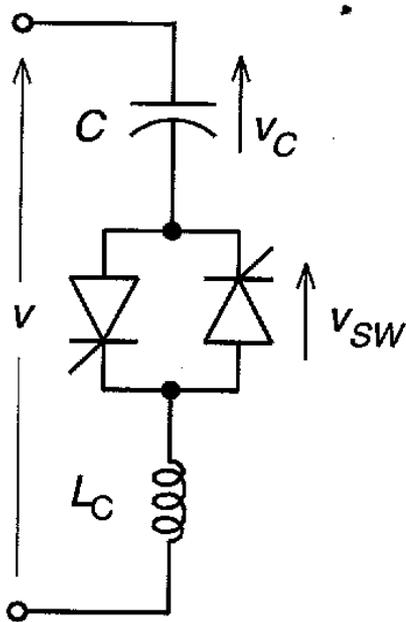
## ■ Problema do chaveamento



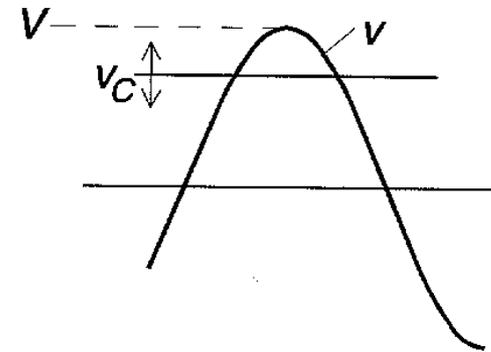
- Chaveamento com transitório do TSC: (a) totalmente carregado; (b) parcialmente carregado (de: ref. [1]. fig. 5.15, cap. 5).

# TSC – Thyristor Switched Capacitor

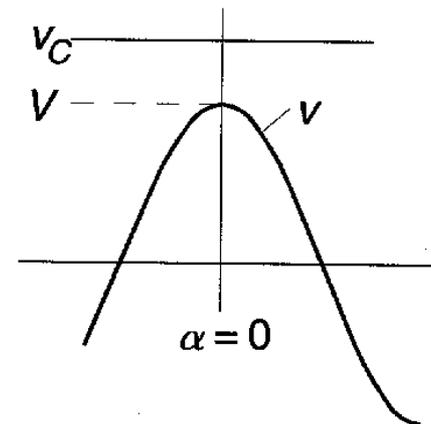
## ■ Problema do chaveamento



**Case 1:**  $v_C \leq V$   
then  $v_C = v$   
or  $v_{SW} = 0$

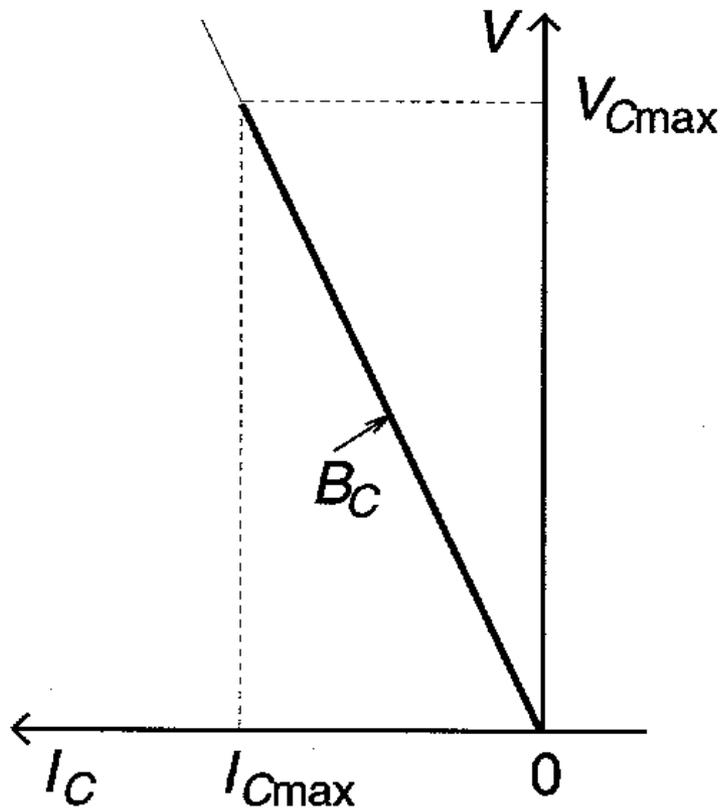


**Case 2:**  $v_C > V$   
then  $\alpha = 0$   
and  $v_{SW} = \min$



- Condições de chaveamento do TSC com minimização de transitório, para diferentes tensões residuais (de: ref. [1], fig. 5.16, cap. 5).

# TSC – Thyristor Switched Capacitor



$V_{Cmax}$  = voltage limit

$I_{Cmax}$  = current limit

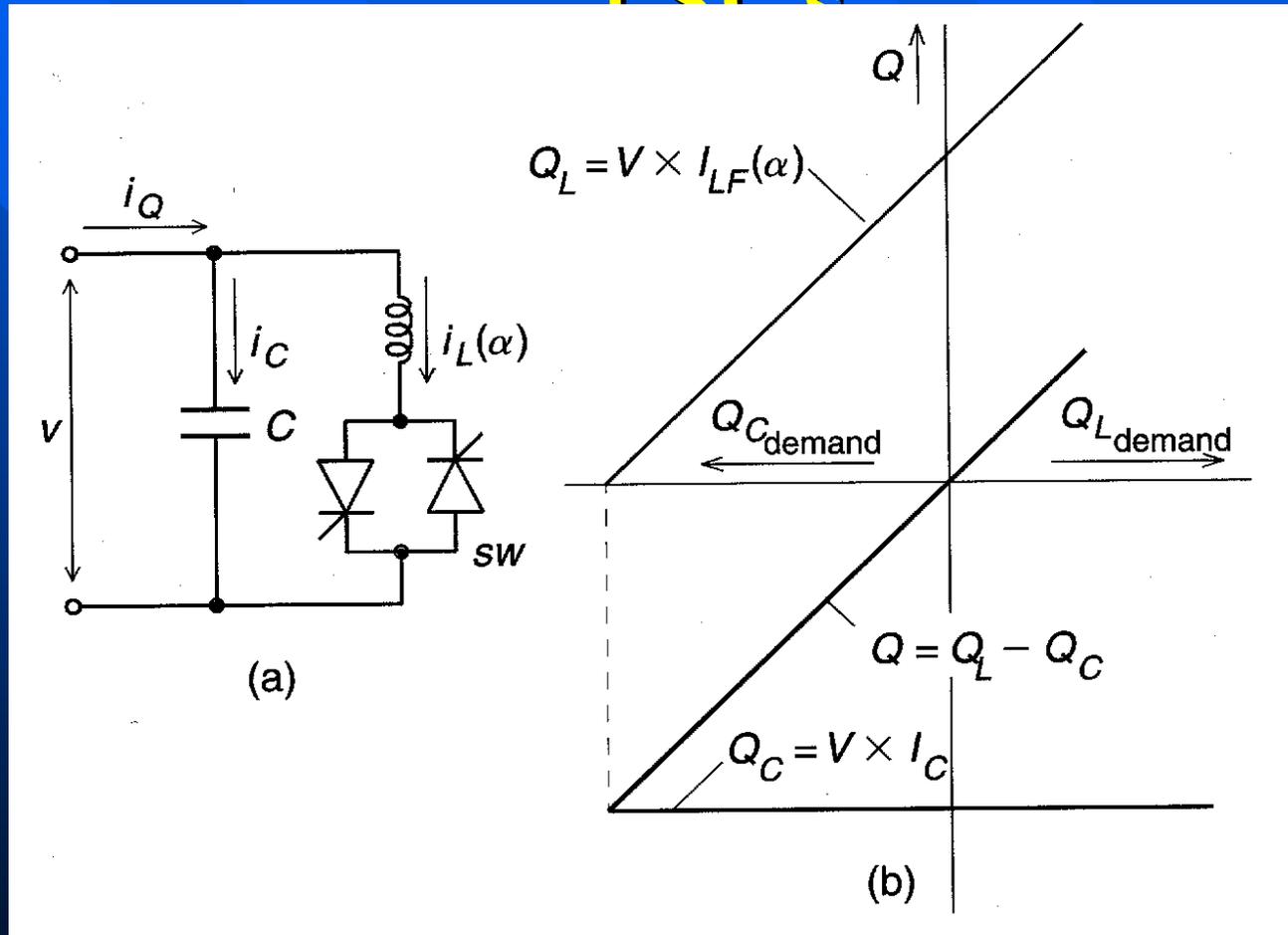
$B_C$  = admittance of capacitor

- Reta de operação V-I do TSC (de: ref. [1], fig. 5.17, cap. 5)

# Implementações de TCRs e TSCs

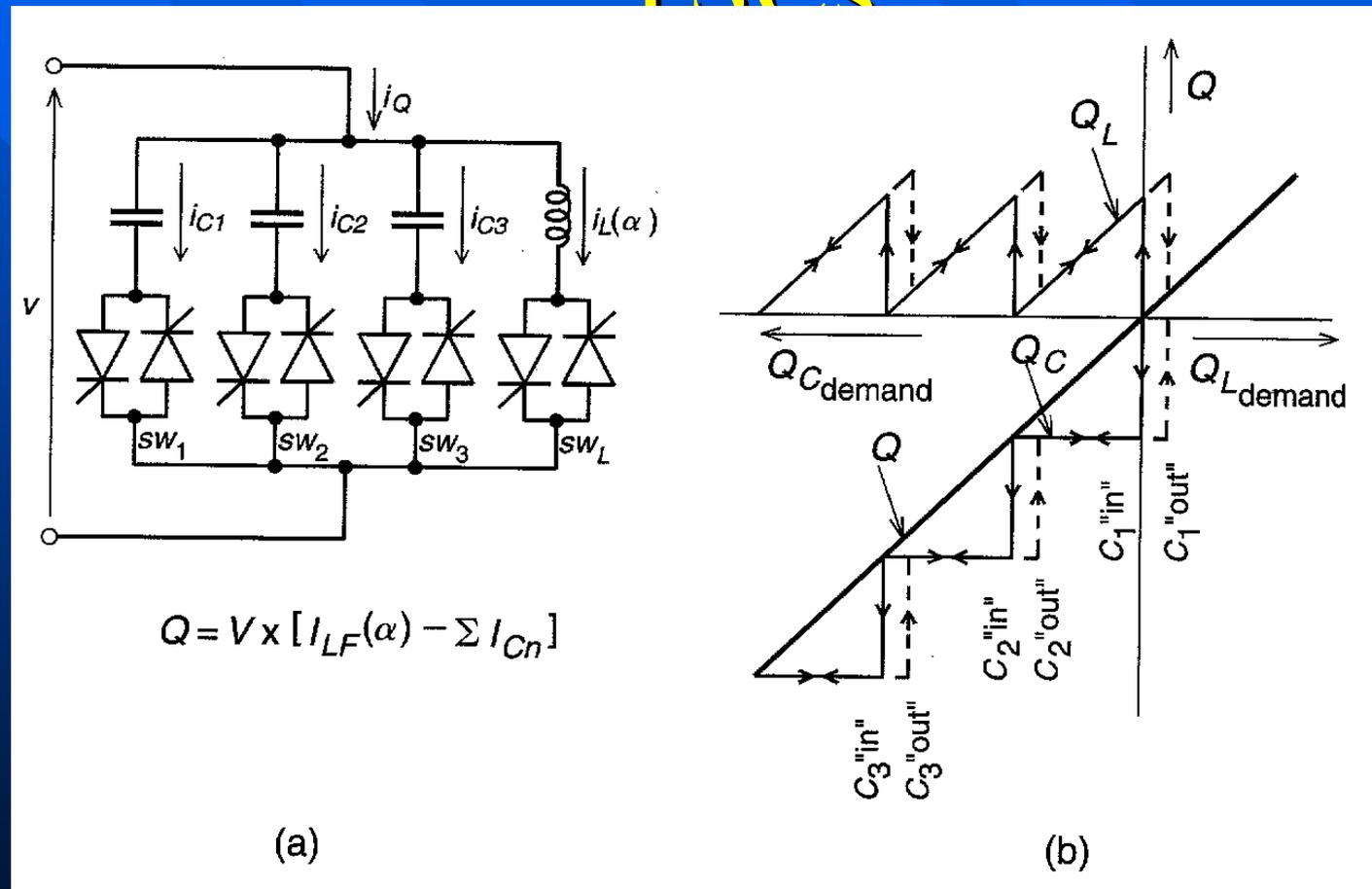
- FC-TCR: Fixed capacitor, thyristor controlled reactor;
- TSC-TCR: Thyristor switched capacitor, thyristor controlled reactor;

# Implementações de TCRs e TSCs



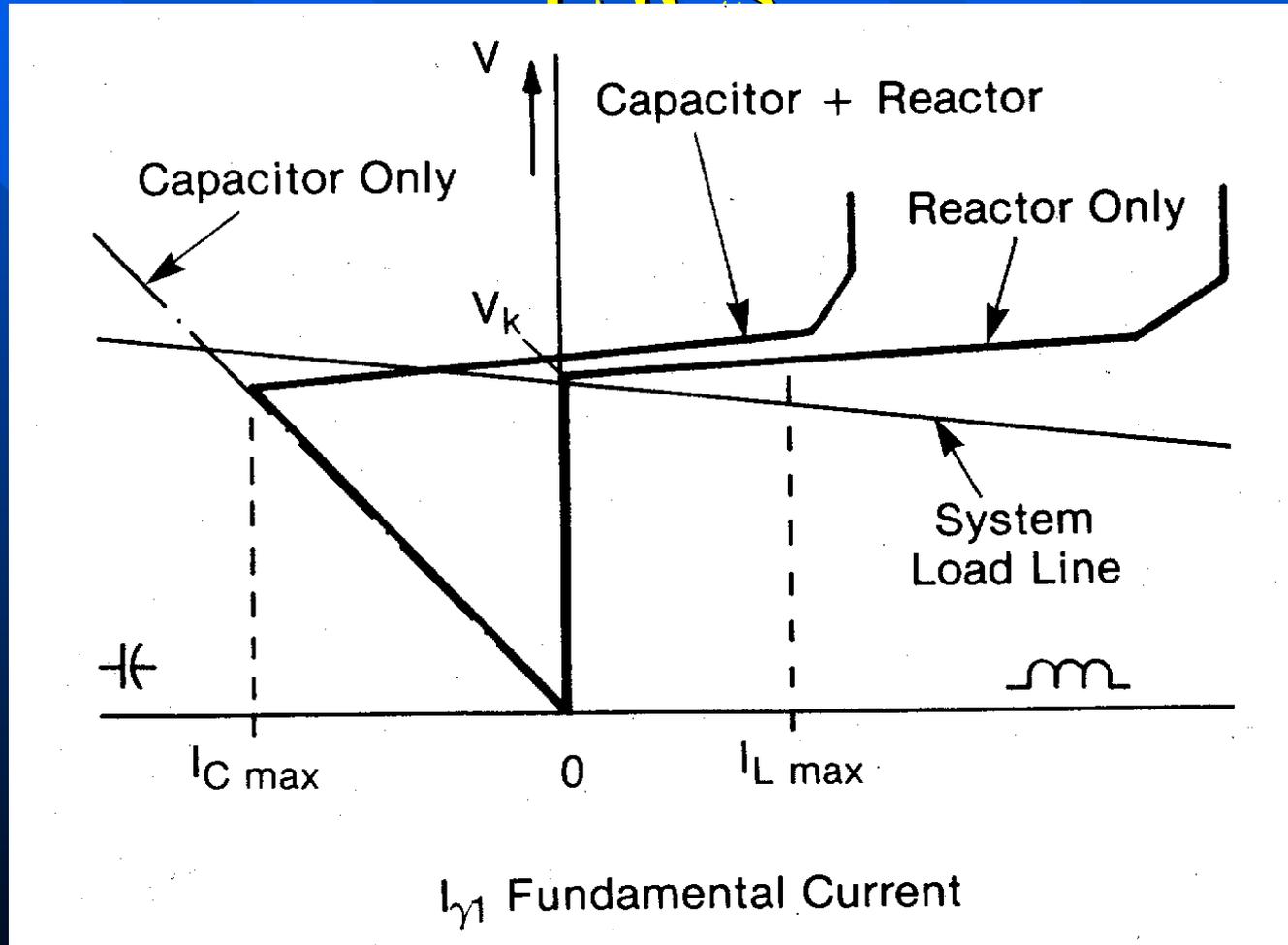
- (a) Esquema básico do compensador tipo FC-TCR;
- (b) característica de geração de reativos em função da demanda de reativos (de: ref. [1], fig. 5.18, cap. 5)

# Implementações de TCRs e TSCs



- (a) Esquema básico do compensador tipo TSC-TCR;
- (b) característica de geração de reativos em função da demanda de reativos (de: ref. [1], fig. 5.22, cap. 5)

# Implementações de TCRs e TSCs



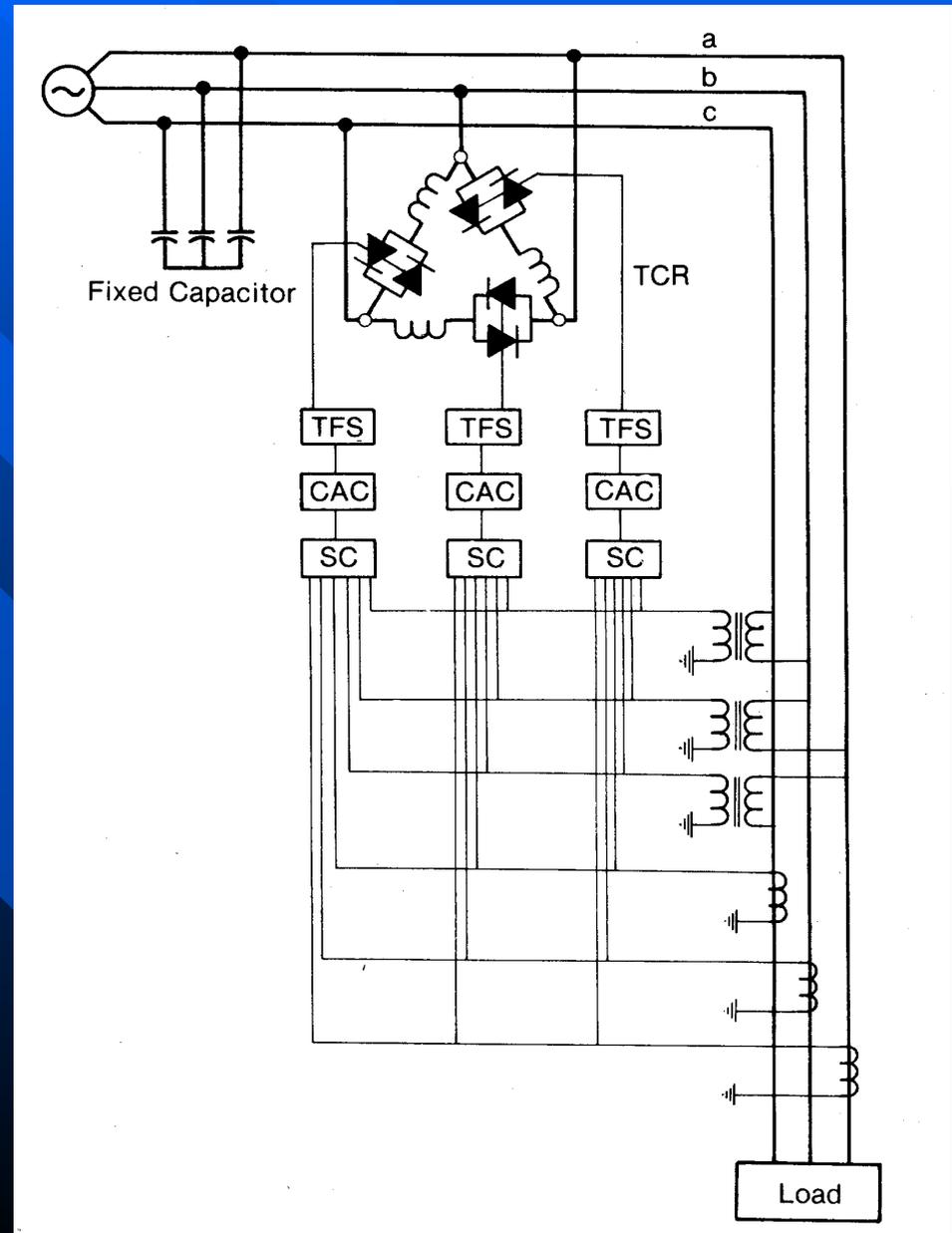
- Característica tensão-corrente de um compensador tipo TSC-TCR (de: ref. [2], fig. 14, cap. 4)

# Aspectos Básicos de Controle

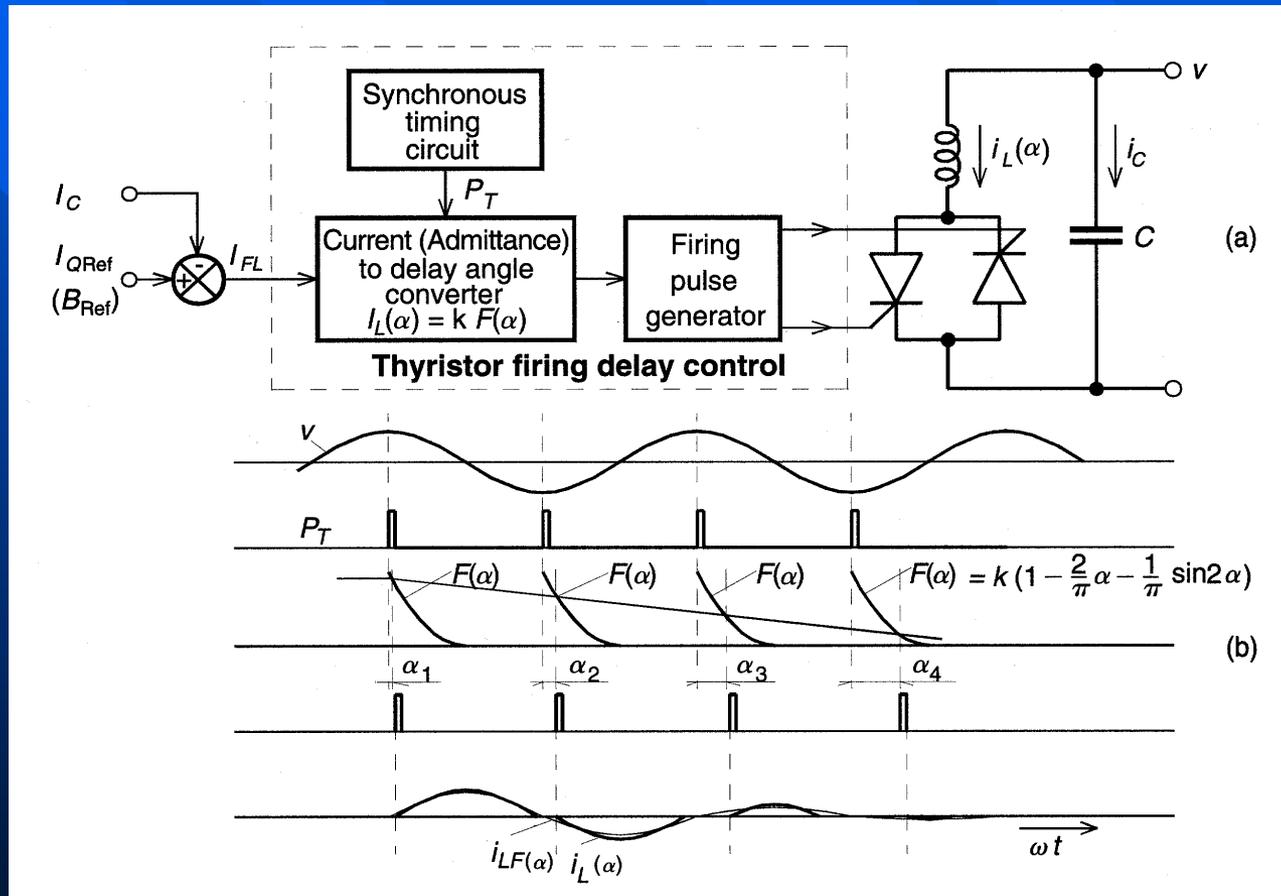
- Estratégias de controle
- Controle em malha aberta:
  - “feedforward”;
  - Velocidade de resposta (aplicações em controle de “flicker”, p.ex.);
- Controle em malha fechada:
  - Acuidade com a referência (controle de tensão de barras, p.ex.).

# Aspectos Básicos de Controle

- Controle em malha aberta de um compensador de “flicker”, usando um compensador tipo FC-TCR:
  - TFS: Thyristor Firing System;
  - CAC: Conduction Angle Calculator;
  - SC: Susceptance Calculator(de: ref. [2], fig. 17, cap. 4);

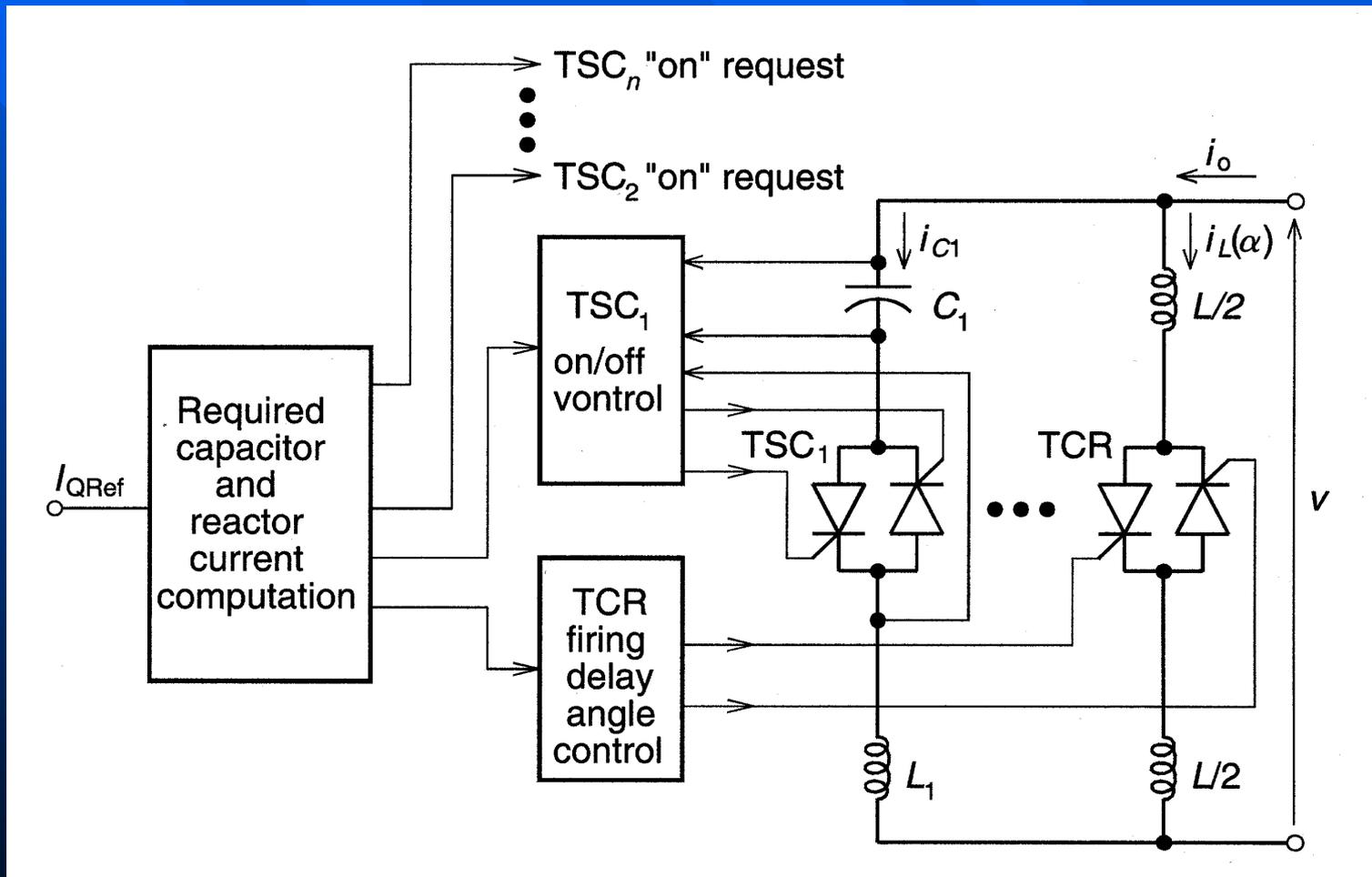


# Aspectos Básicos de Controle



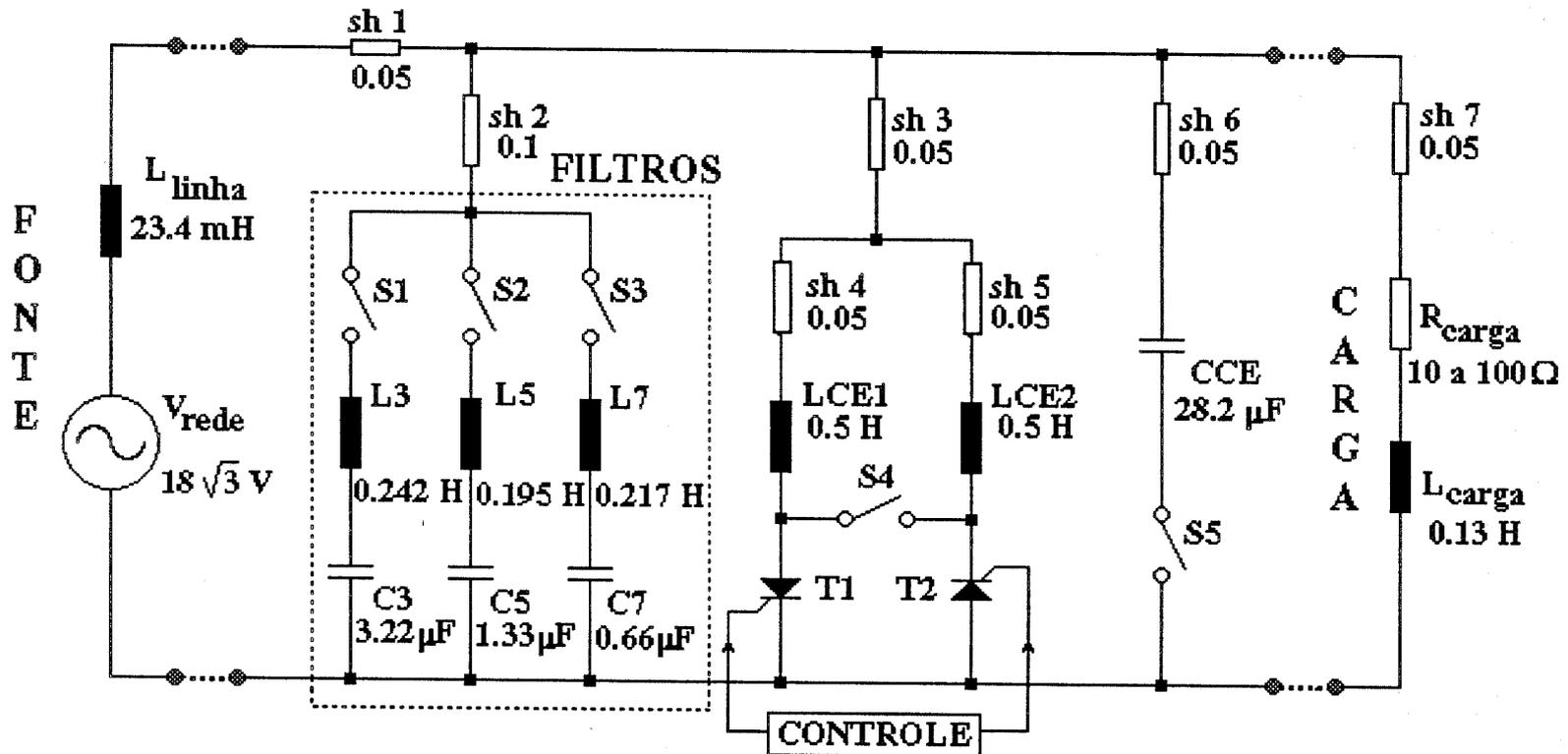
- (a) Controle de um compensador tipo FC-TCR;
- (b) Formas de onda ilustrando princípios básicos de operação; (de: ref. [1], fig. 5.19, cap. 5);

# Aspectos Básicos de Controle



- Esquema de controle para um compensador tipo TSC-TCR (de: ref. [1], fig. 5.23, cap. 5);

# Exemplo de Implementação Didática



- Circuito de potência do compensador estático didático implementado no Laboratório de Eletrônica de Potência da EPUSP (de: ref. [4], fig. 2).

# Bibliografia

- [1] GYUGI, L. HINGORANI, N.G.; Understand FACTS – Concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press, Piscataway, 2000;
- [2] MILLER, T.J.E.; Reactive control in electric systems. John Wiley & Sons, New York, 1982;
- [3] DUBEY, G.K. et alli; Thyristorized Power Controllers. Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1986.
- [4] KAISER, W. Compensador Estático. Escola Politécnica, PEA, 2001. (apostila didática do curso PEA-0502: Laboratório de Eletrônica de Potência).