

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

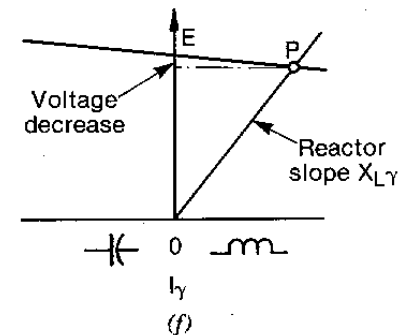
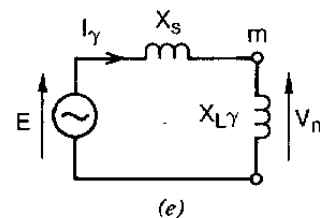
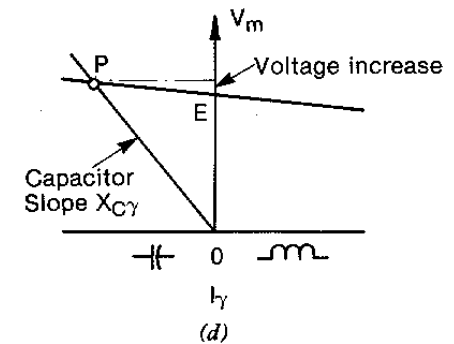
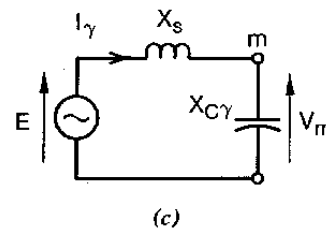
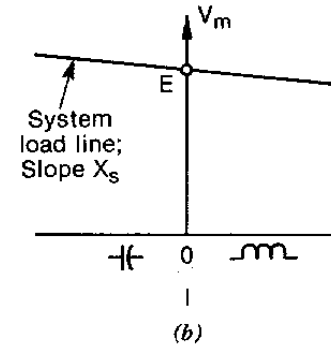
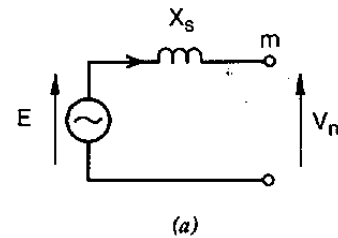
- Aplicações
- Aspectos Básicos de Operação
- Definições e escopo: SVR, TCR e TSC
- TCR – Thyristor Controlled Reactor
- TSC – Thyristor Switched Capacitor
- Implementações de TCRs e TSCs
- Aspectos Básicos de Controle
- Exemplo de Implementação Didática
- Bibliografia

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)



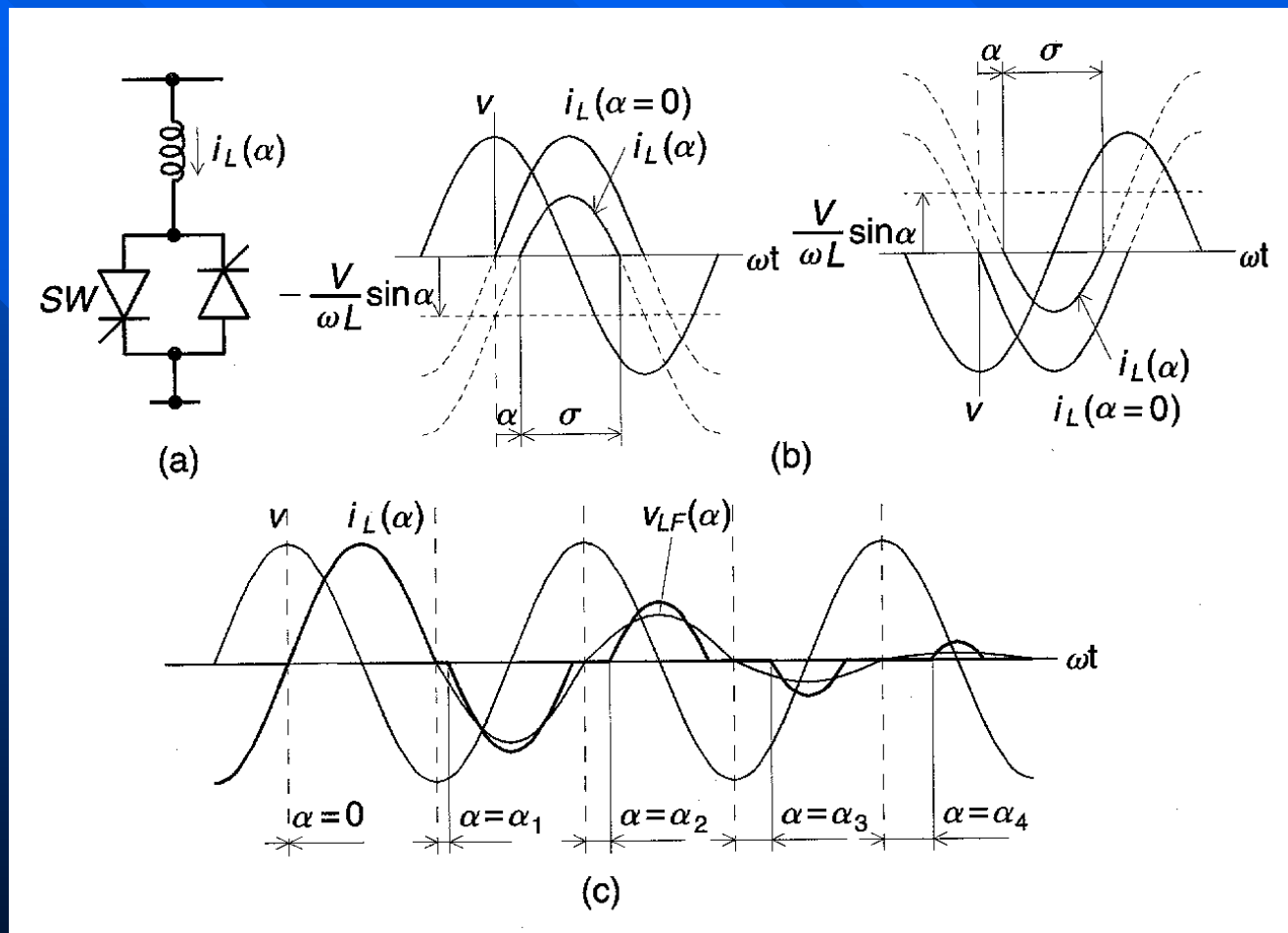
Definições e escopo: SVC, TCR e TSC

- 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:

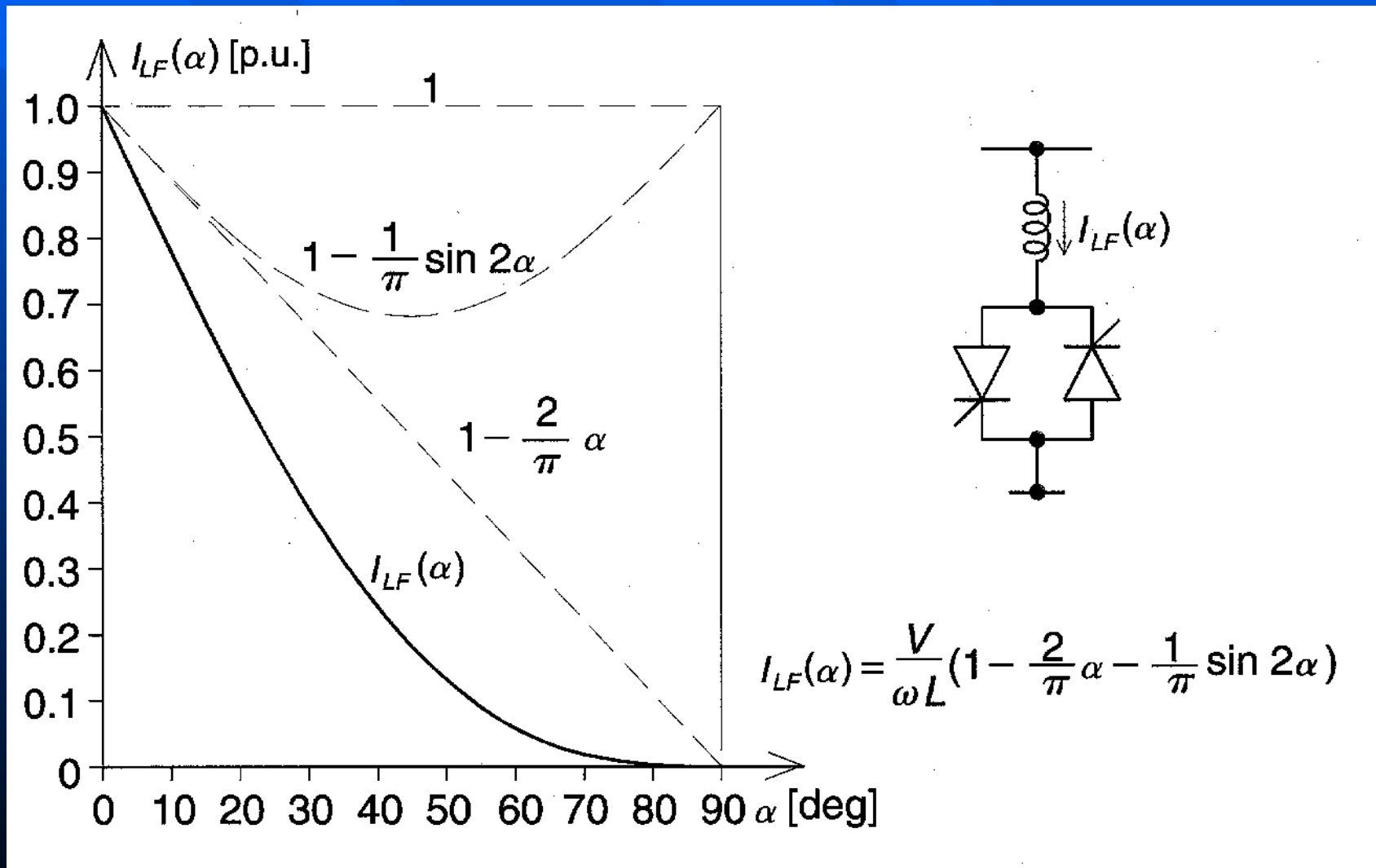
$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right)$$

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

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

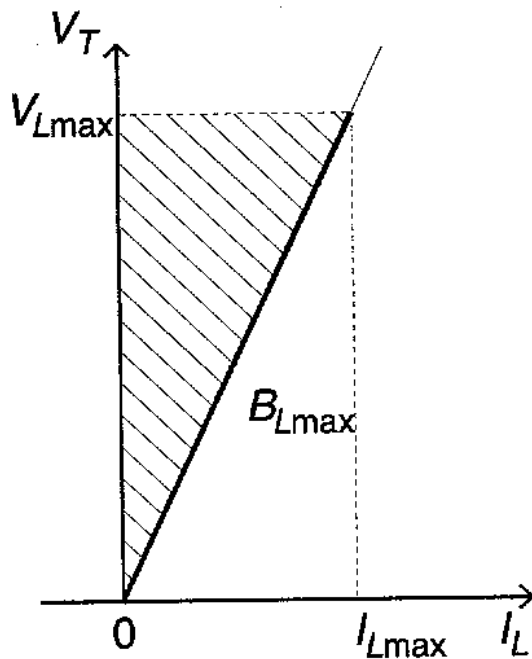
- Cuidado com a definição de α !

TCR – Thyristor Controlled Reactor



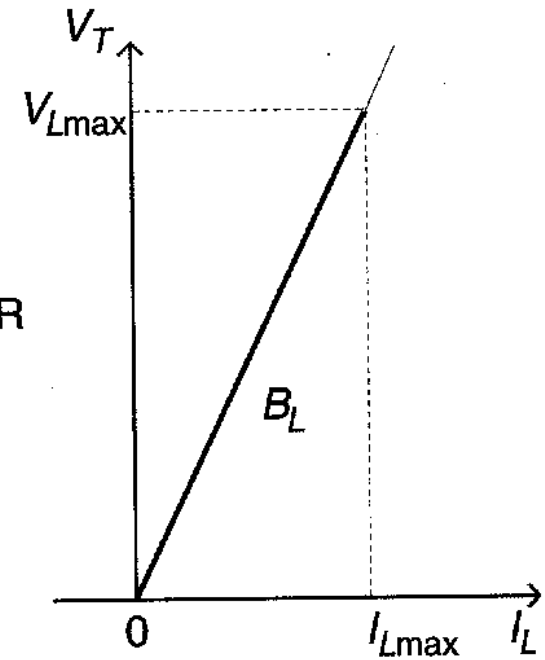
- Variação da amplitude da componente fundamental da corrente com o ângulo α (de: ref. [1], fig. 5.8, cap. 5).

TCR – Thyristor Controlled Reactor



(a)

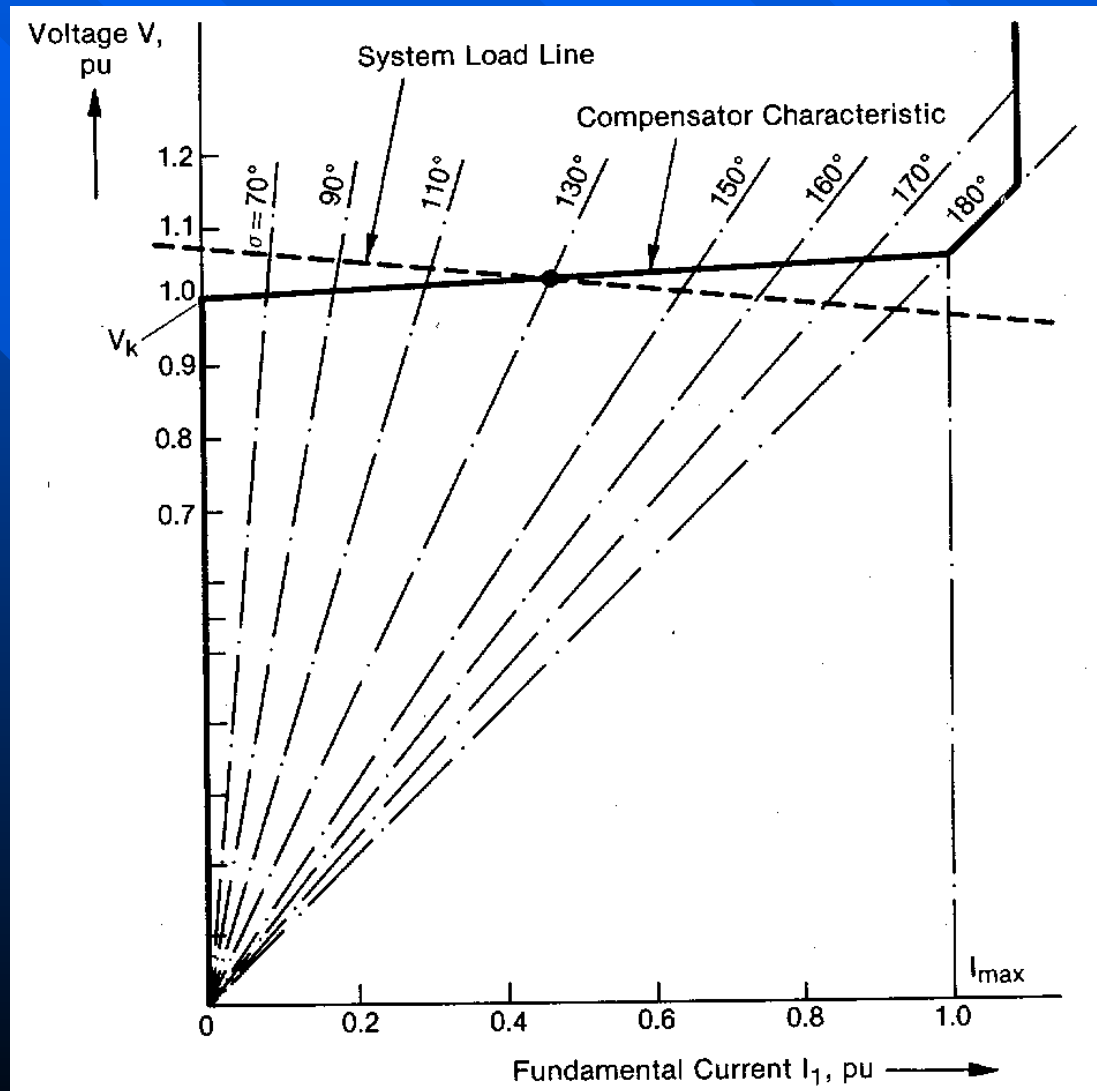
V_{Lmax} = voltage limit
 I_{Lmax} = current limit
 B_{Lmax} = max admittance of TCR
 B_L = admittance of reactor



(b)

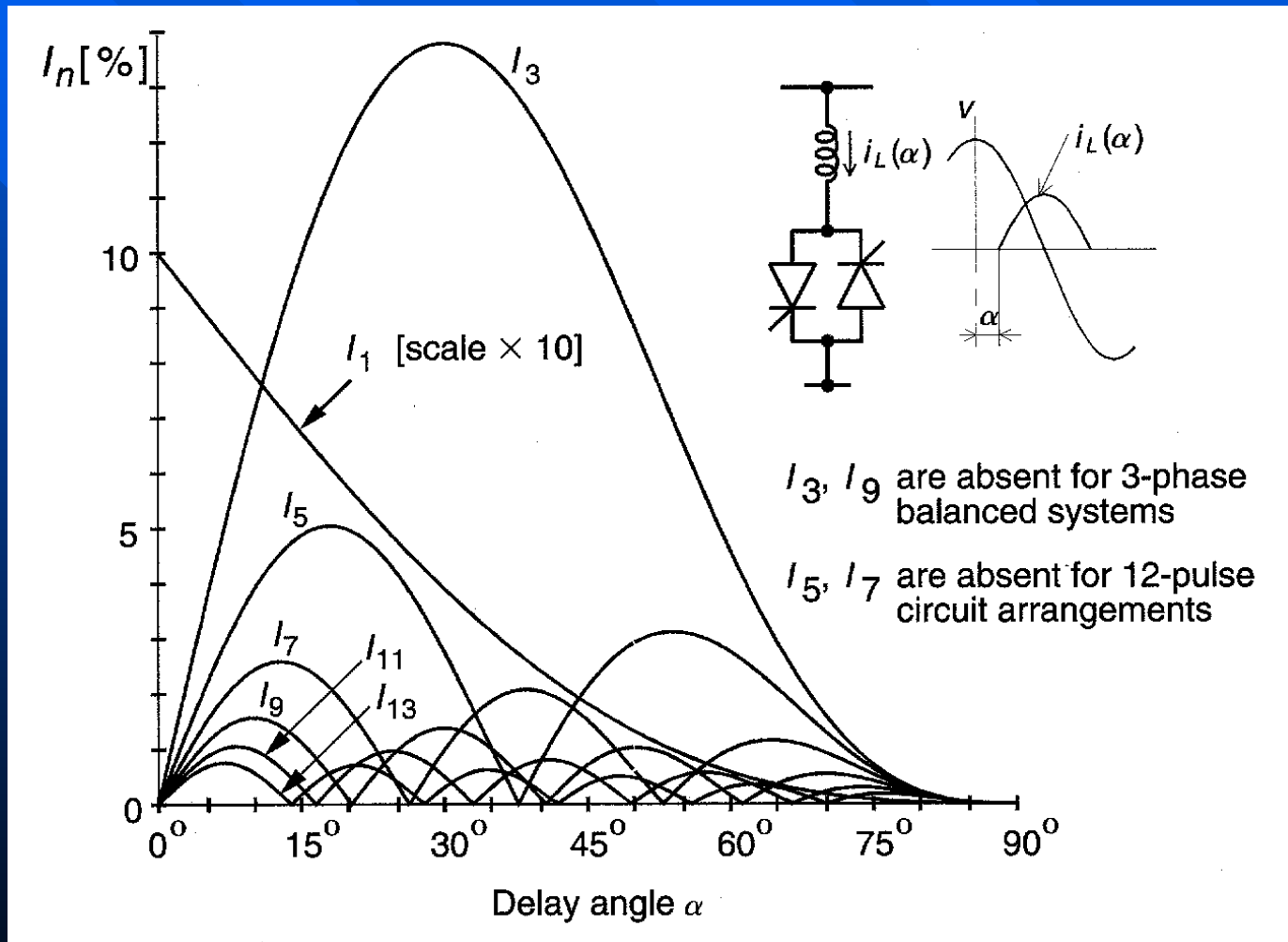
- Áreas de operação V-I do TCR (a) e do TSR (b) (de: ref. [1], fig. 5.9, cap. 5)

TCR – Thyristor Controlled Reactor



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

TCR – Thyristor Controlled Reactor

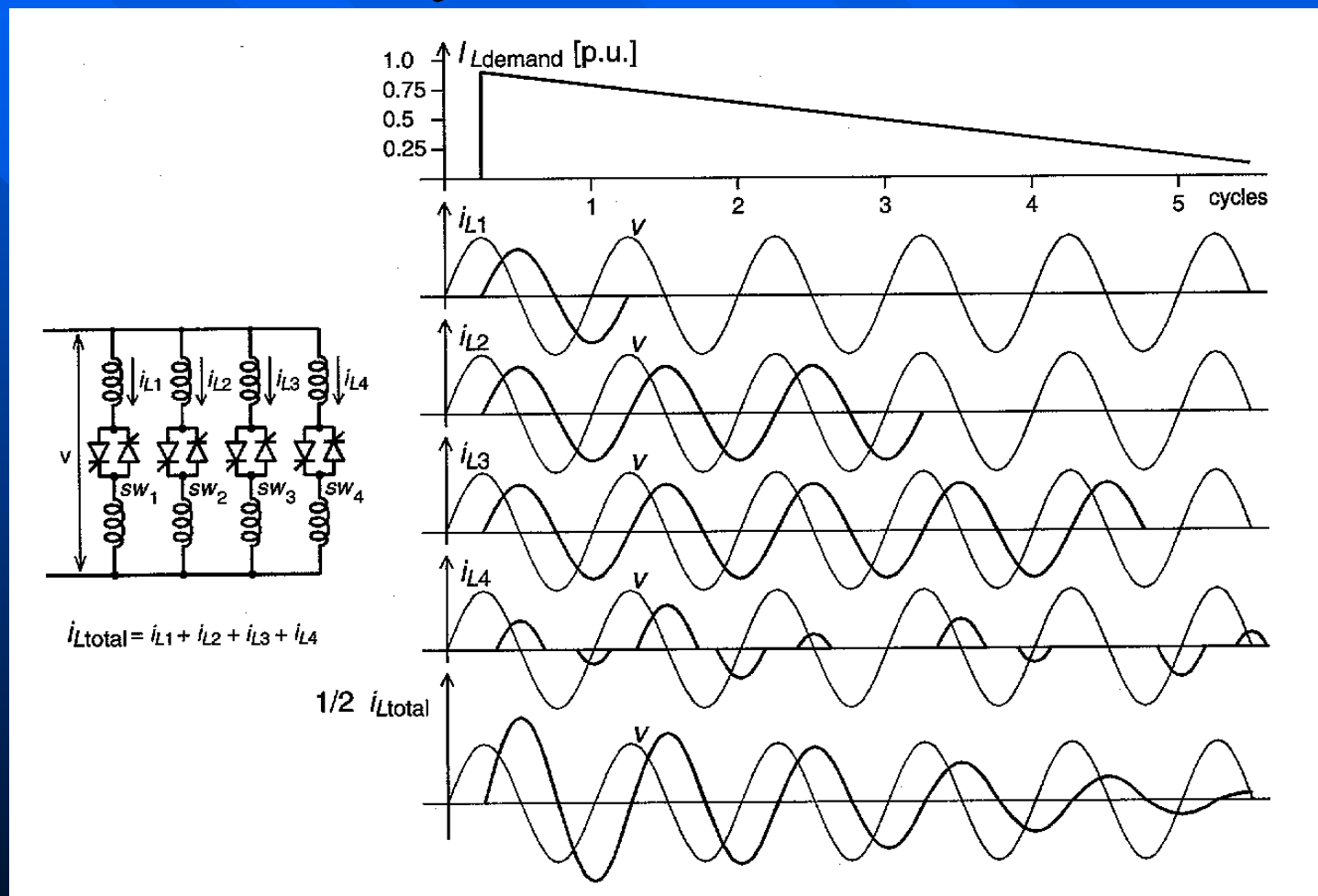


- Amplitudes das componentes harmônicas da corrente do TCR em função do ângulo de atraso (disparo) α . (de: ref. [1], fig. 5.10, cap. 5)

TCR – Thyristor Controlled Reactor

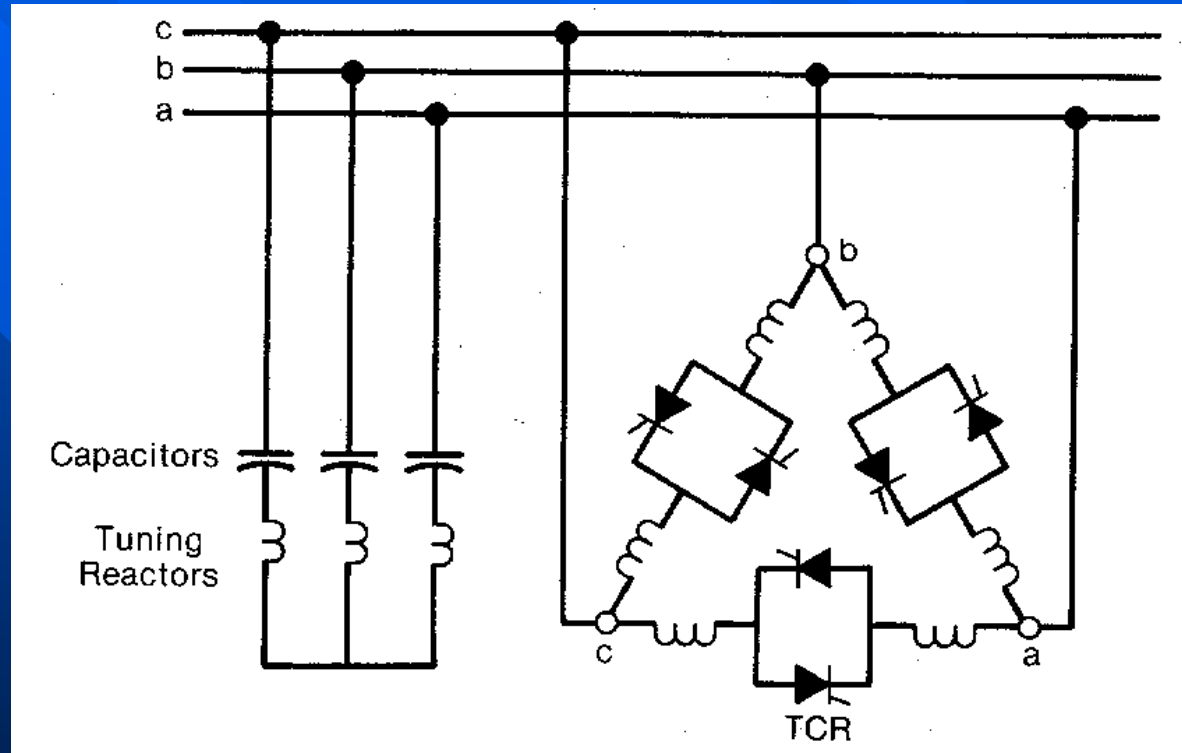
- Minimização das harmônicas do TCR:
 - Conexão em delta (para os múltiplos de 3);
 - m ($m \geq 2$) reatores, com 1 reator controlado e $(m-1)$ reatores chaveados;
 - Filtros LC sintonizados;
 - Arranjos de 12 pulsos;
 - Divisão do indutor (um para cada tiristor).

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

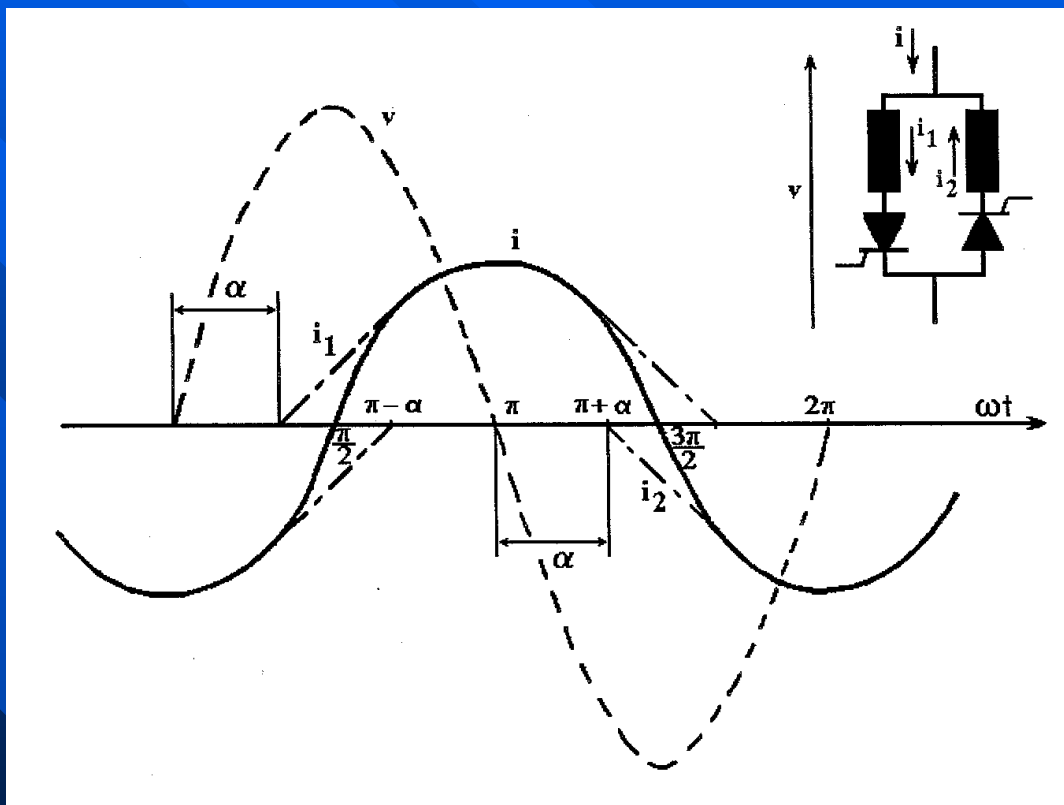


- Emprego de filtros sintonizados e ligação dos reatores em delta. (de: ref. [2], fig. 10, cap. 4).
- Note-se que para a frequência fundamental, os filtros LC se comportam como capacitores:

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

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 α na figura):

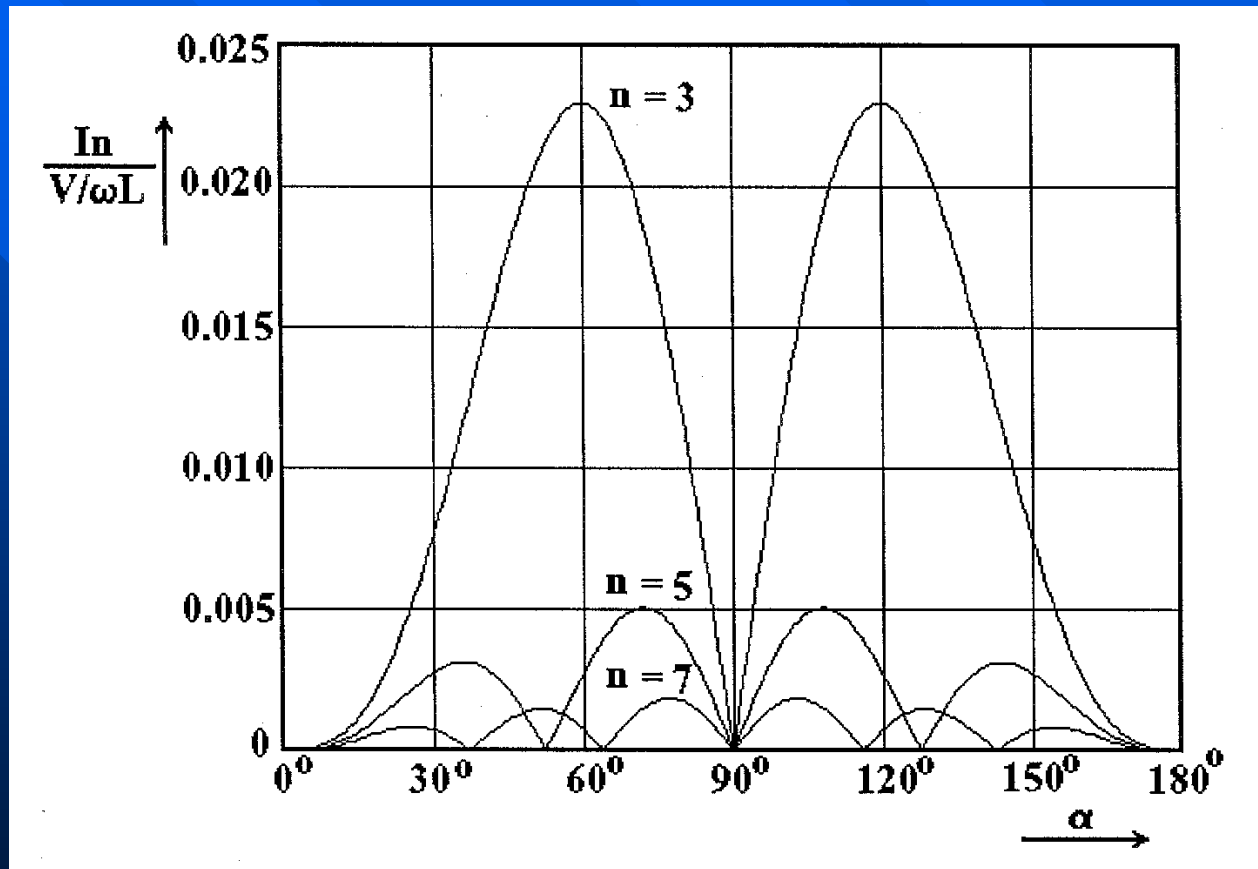


$$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi \cdot \omega \cdot L}$$

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

$$0 < \alpha < \pi$$

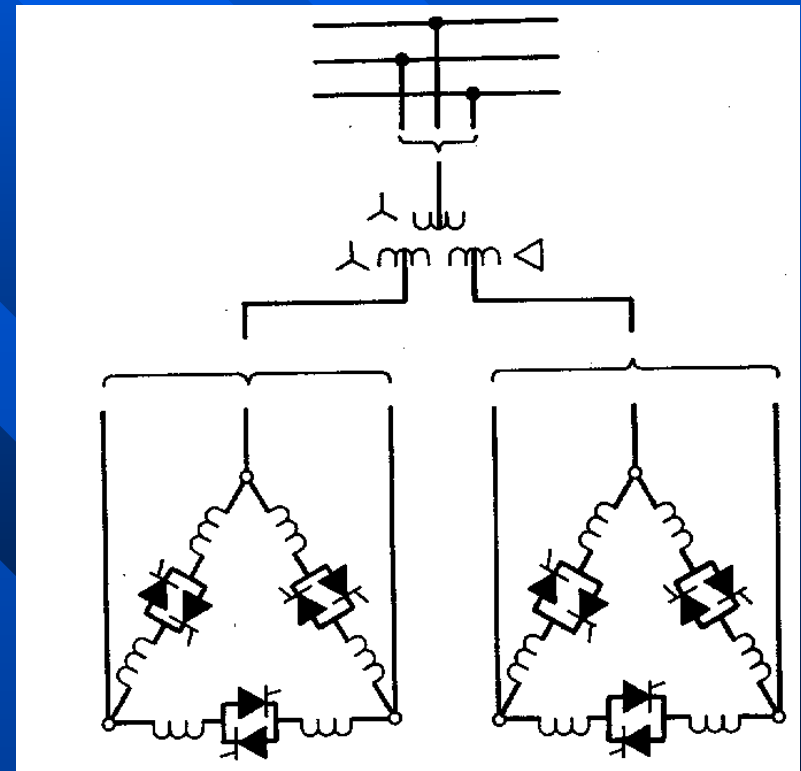
TCR – Thyristor Controlled Reactor



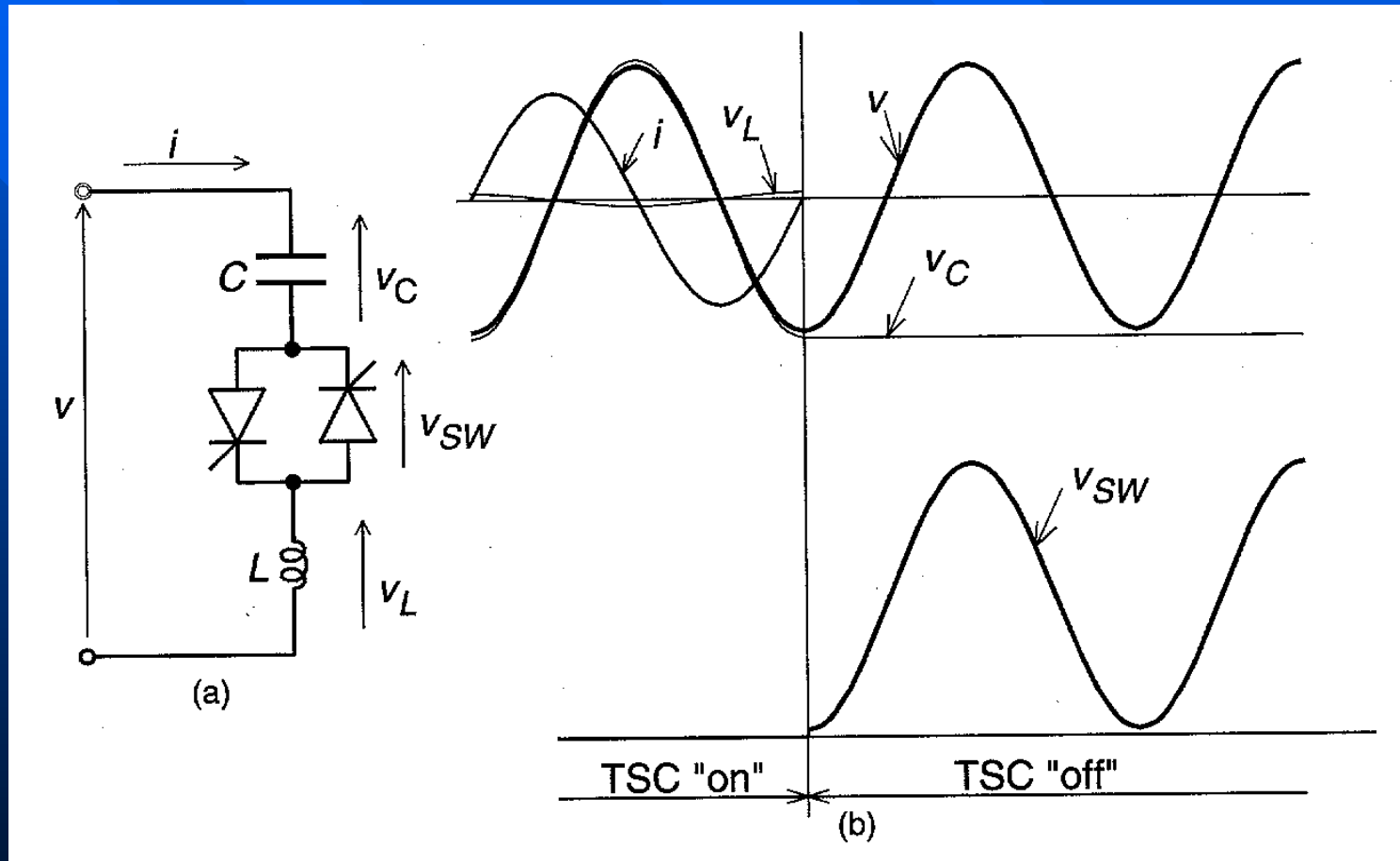
- Amplitudes das componentes harmônicas da corrente do TCR empregando Divisão do Indutor, ou Dois Reatores Unidirecionais, em função do ângulo de atraso (disparo) α . (de: ref. [4], fig. 8);
- Note-se que para $\alpha=90^\circ$, a corrente é puramente senoidal.

TCR – Thyristor Controlled Reactor

- Arranjo de 12 pulsos (de: ref. [2], fig. 12, cap. 4);
- Defasagem de 30° 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.:

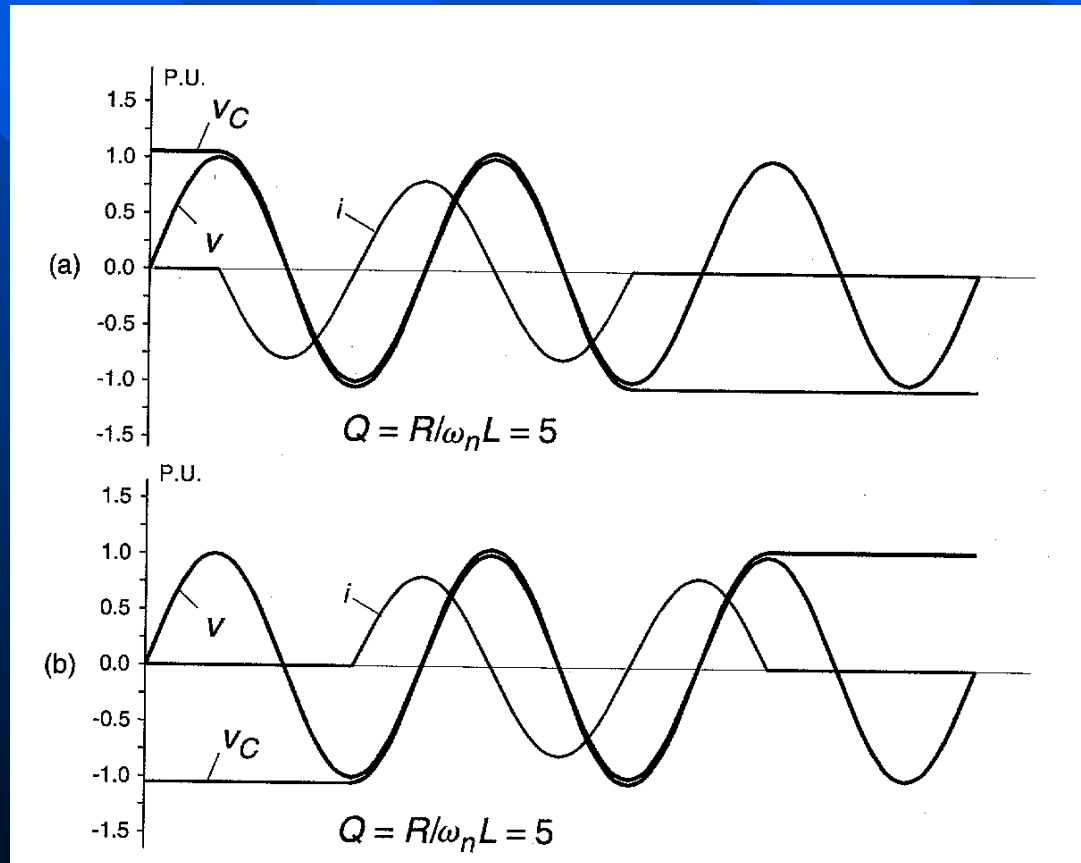
$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \cdot LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

- Amplitude da tensão no capacitor:

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

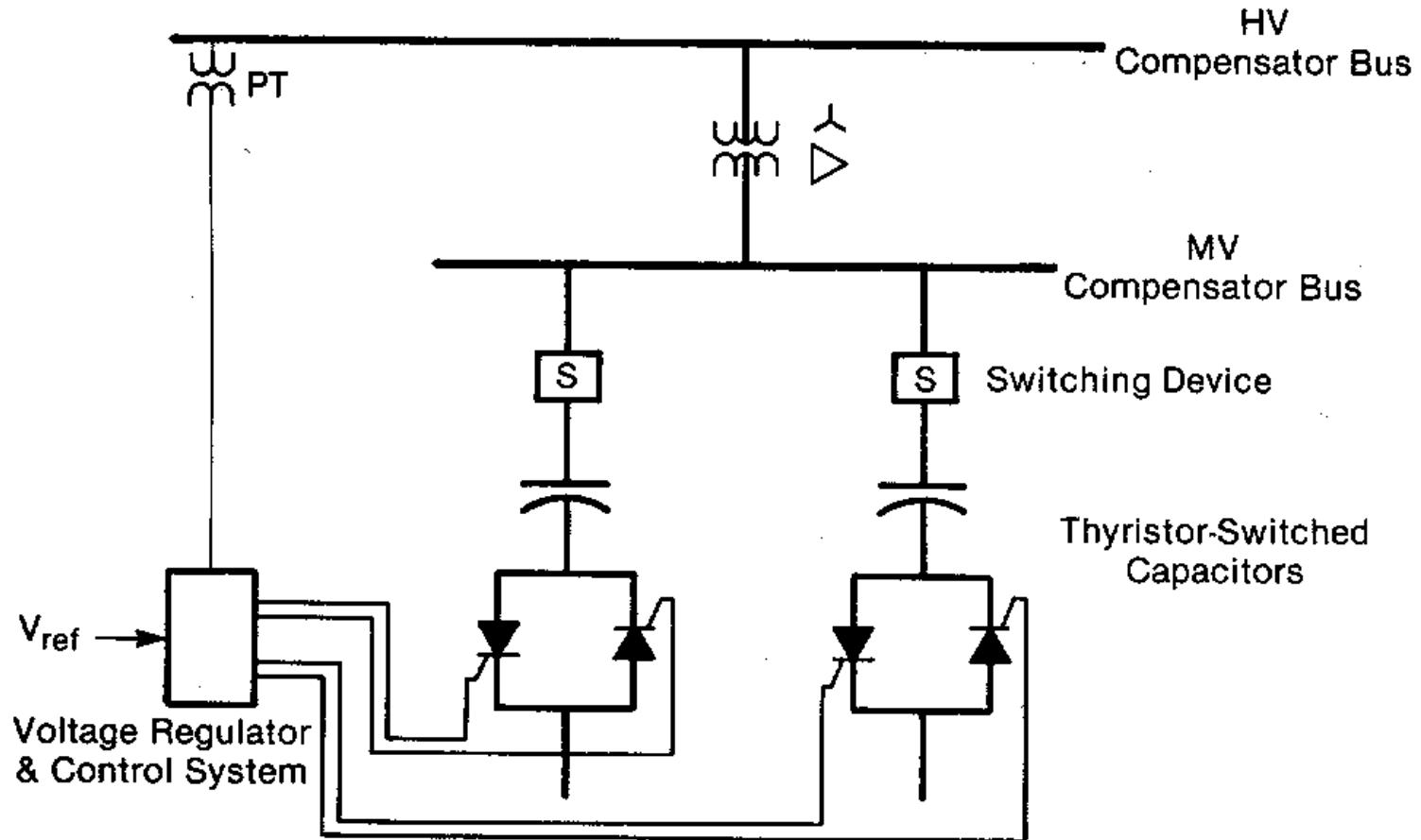
TSC – Thyristor Switched Capacitor

■ Problema do chaveamento



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

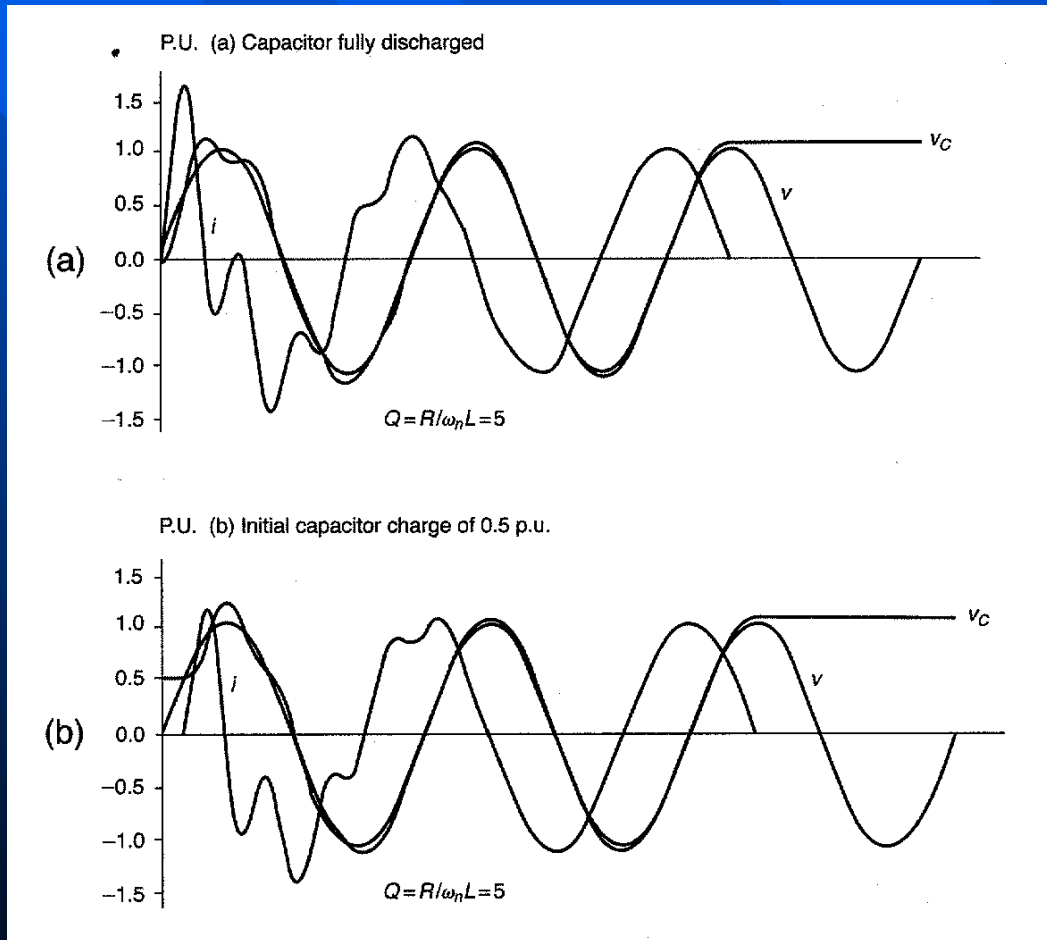
TSC – Thyristor Switched Capacitor



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

TSC – Thyristor Switched Capacitor

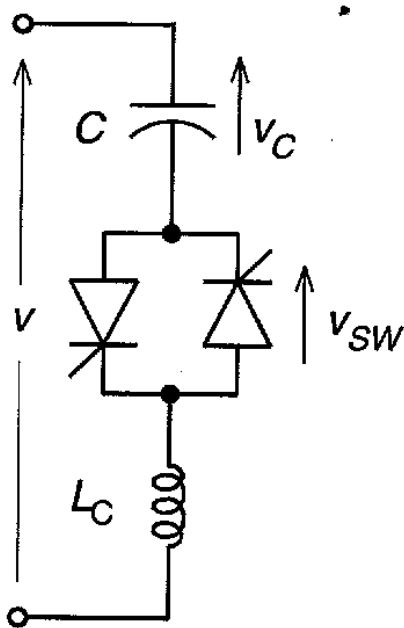
■ Problema do chaveamento



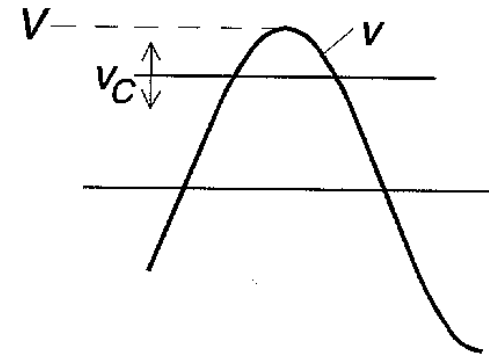
- Chaveamento com transitório do TSC: (a) totalmente carregado; (b) parcialmente carregado (de: ref. [1]. fig. 5.15, cap. 5).

TSC – Thyristor Switched Capacitor

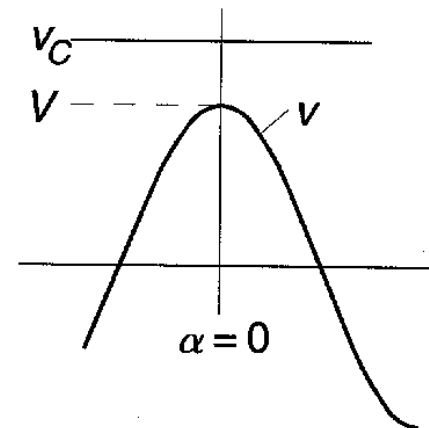
■ Problema do chaveamento



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

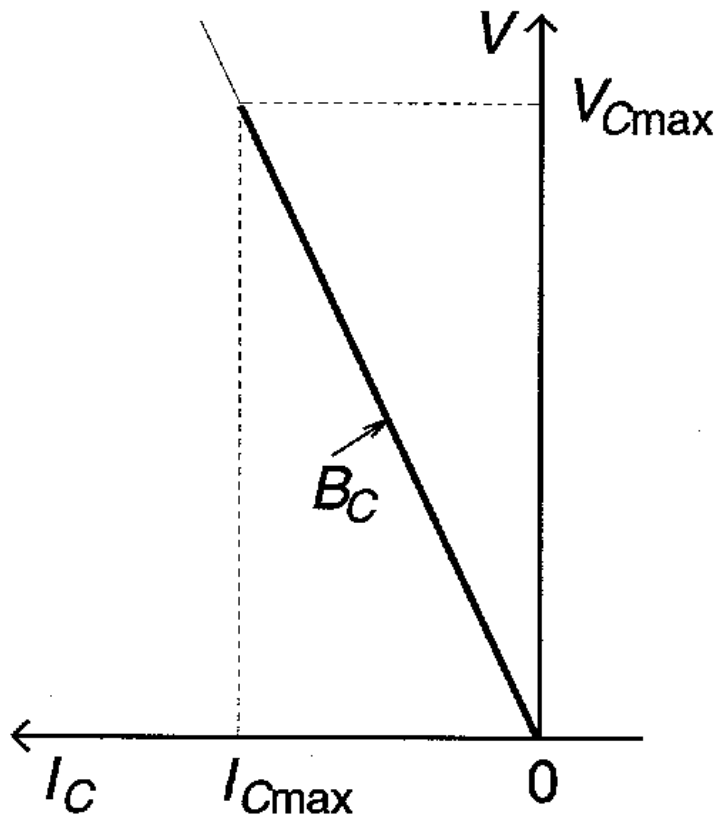


Case 2: $v_C > V$
then $\alpha = 0$
and $v_{SW} = \min$



- 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

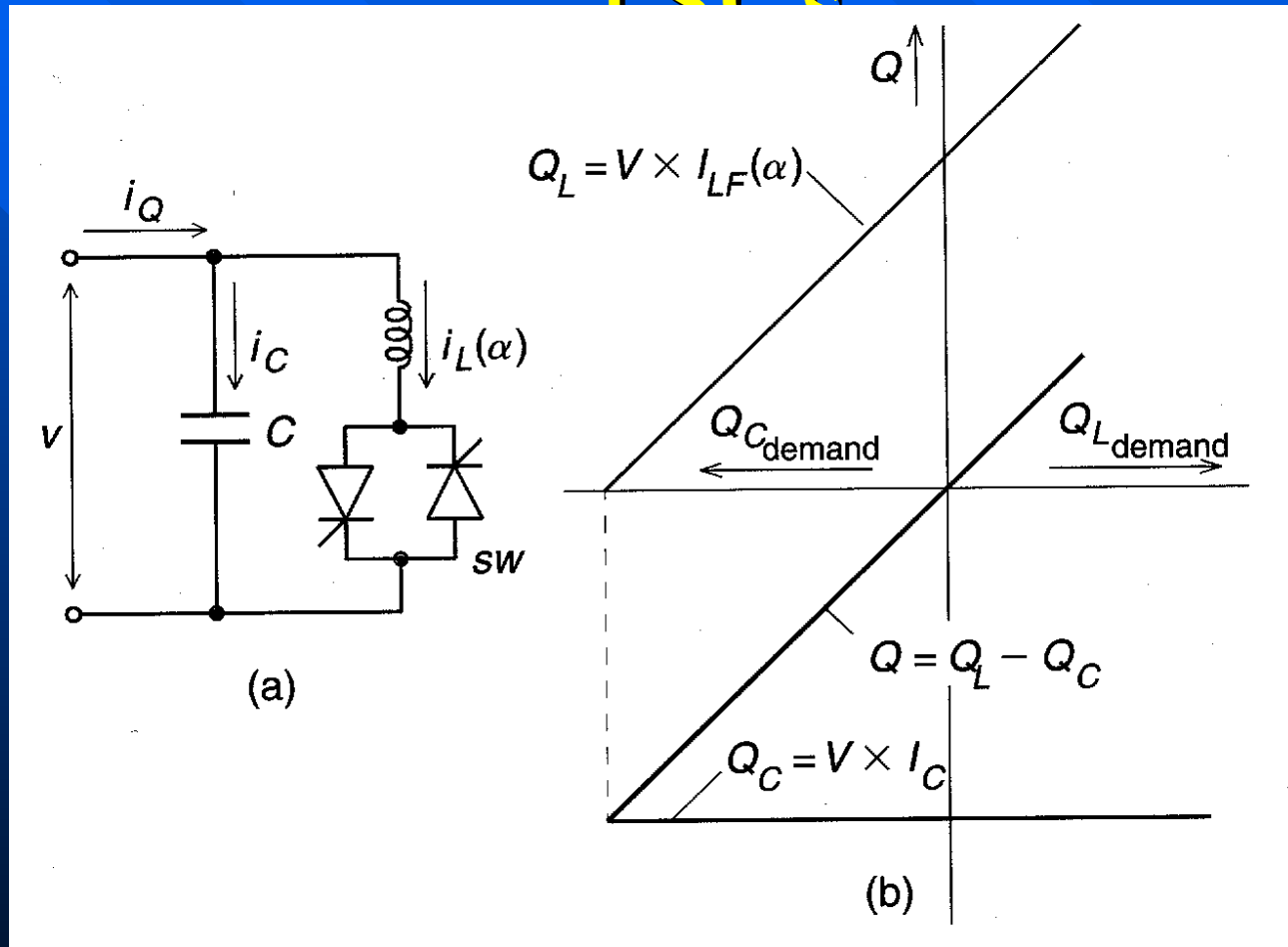
B_C = admittance of capacitor

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

Implementações de TCRs e TSCs

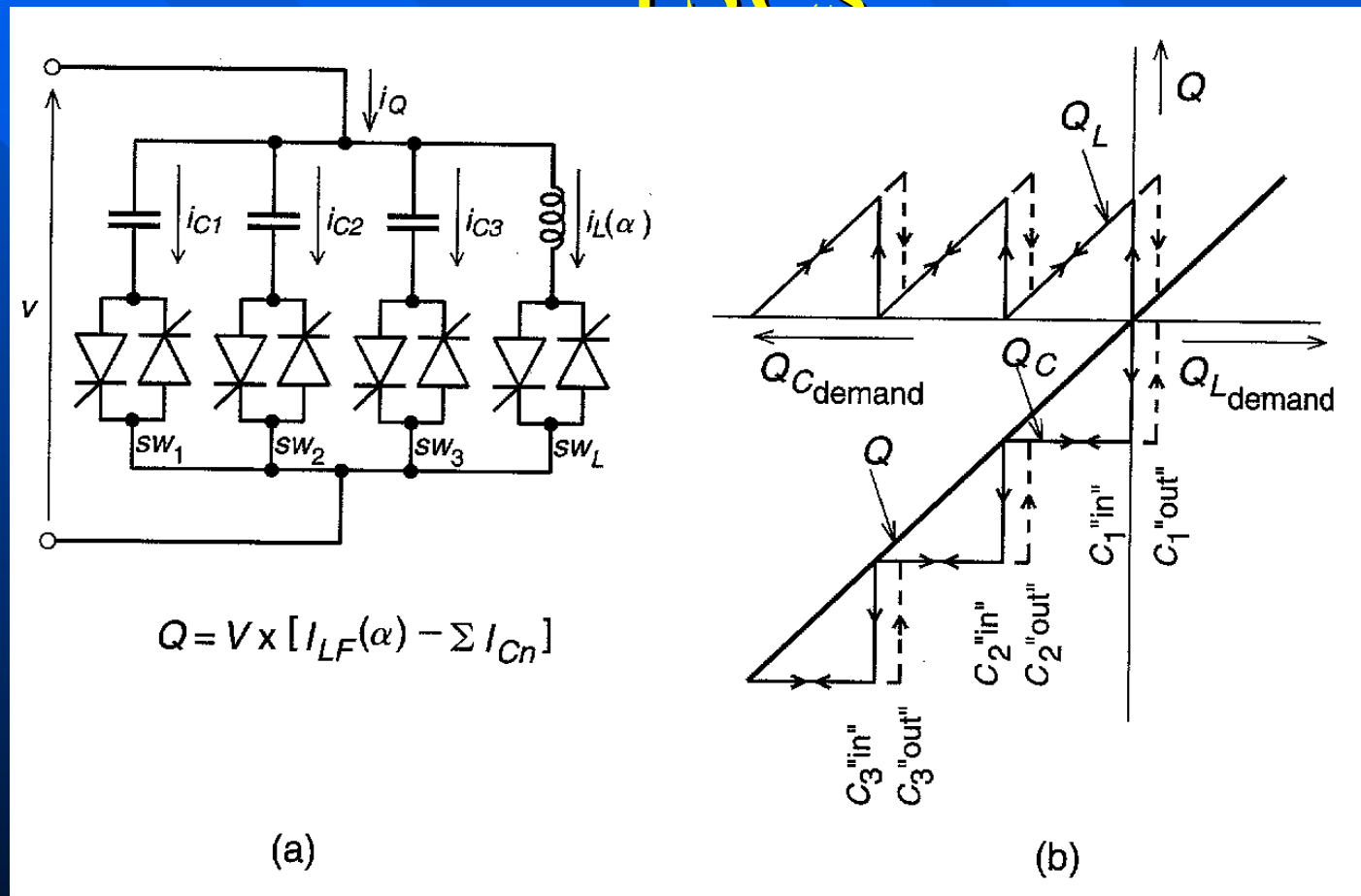
- FC-TCR: Fixed capacitor, thyristor controlled reactor;
- TSC-TCR: Thyristor switched capacitor, thyristor controlled reactor;

Implementações de TCRs e TSCs



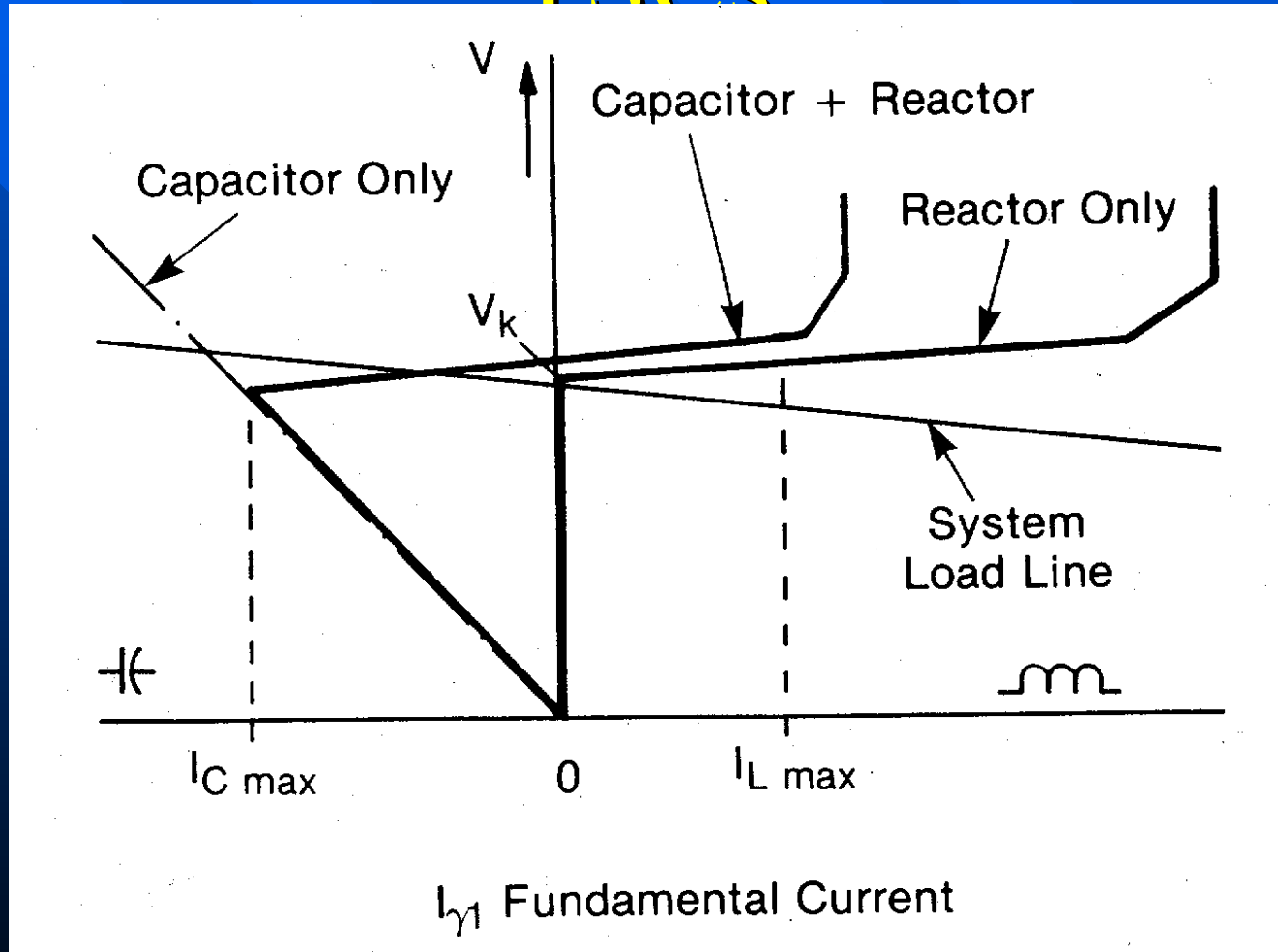
- (a) Esquema básico do compensador tipo FC-TCR;
- (b) característica de geração de reativos em função da demanda de reativos (de: ref. [1], fig. 5.18, cap. 5)

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



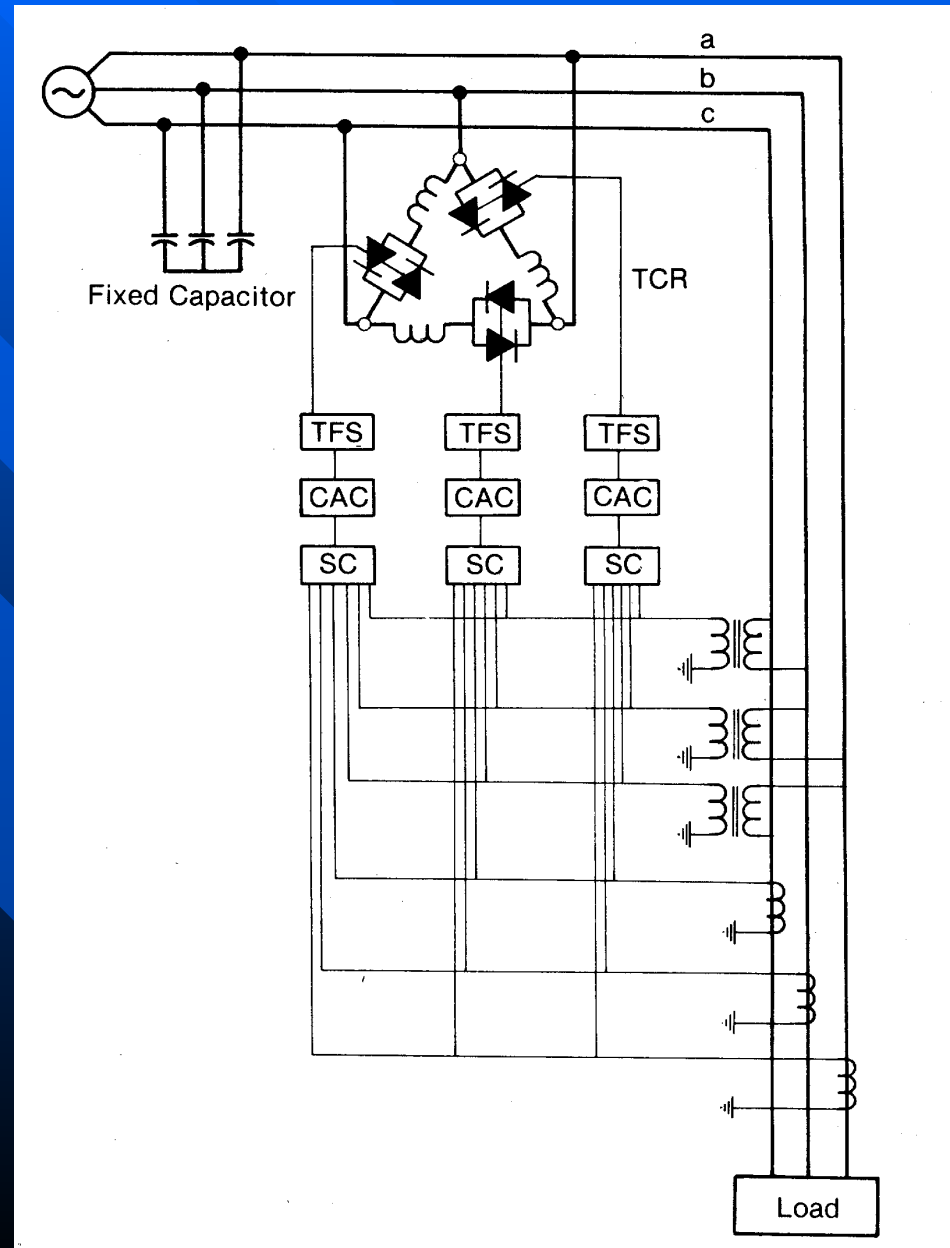
- Característica tensão-corrente de um compensador tipo TSC-TCR (de: ref. [2], fig. 14, cap. 4)

Aspectos Básicos de Controle

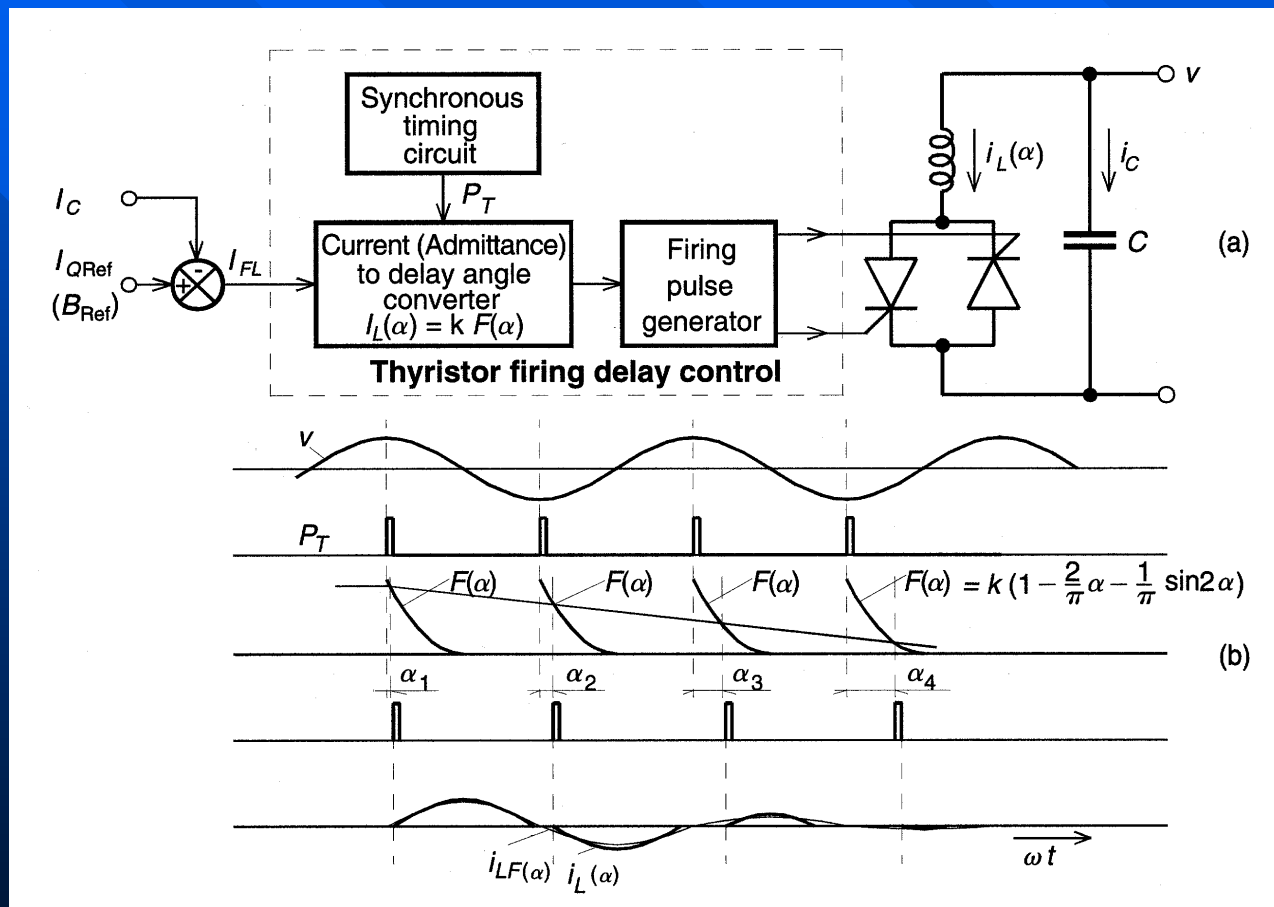
- Estratégias de controle
- Controle em malha aberta:
 - “feedforward”;
 - Velocidade de resposta (aplicações em controle de “flicker”, p.ex.);
- Controle em malha fechada:
 - Acuidade com a referência (controle de tensão de barras, p.ex.).

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);

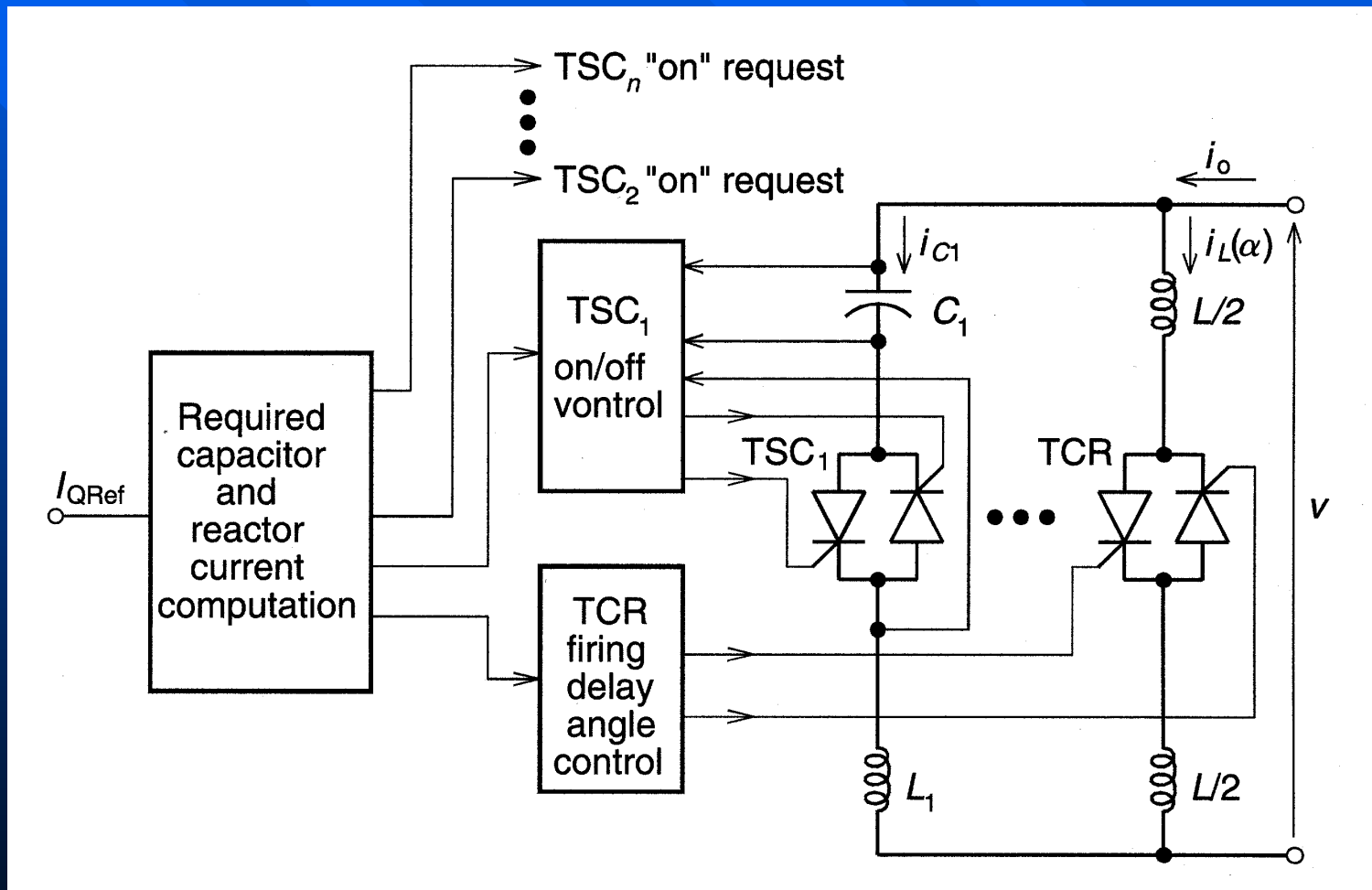


Aspectos Básicos de Controle



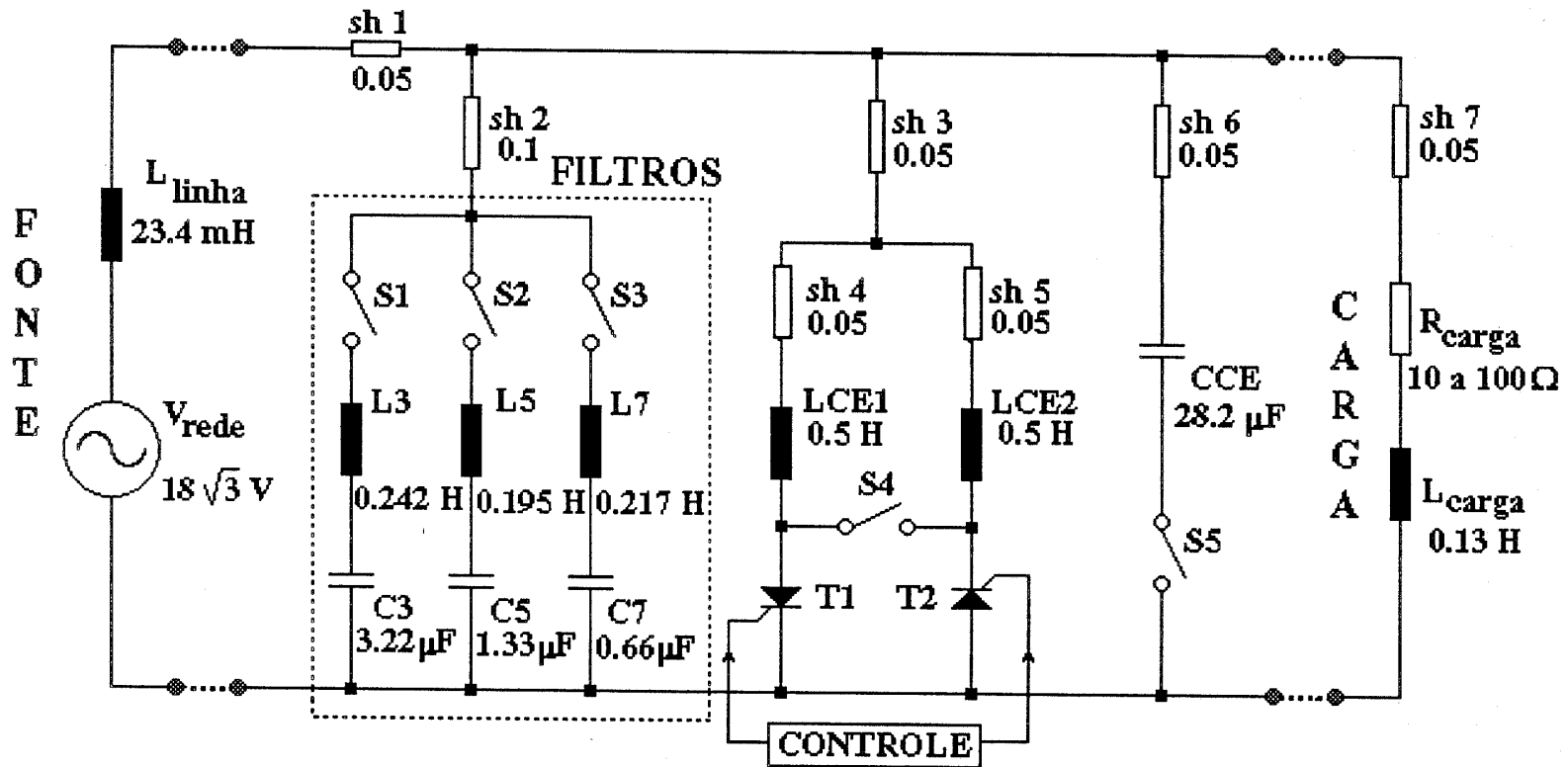
- (a) Controle de um compensador tipo FC-TCR;
- (b) Formas de onda ilustrando princípios básicos de operação; (de: ref. [1], fig. 5.19, cap. 5);

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).