

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO - UNICAMP EE833 - ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

CONVERSÃO CA-CA E APLICAÇÃO DE "TRIAC"

Introdução TRIAC

O TRIAC desempenha a função de dois tiristores numa operação de onda completa.

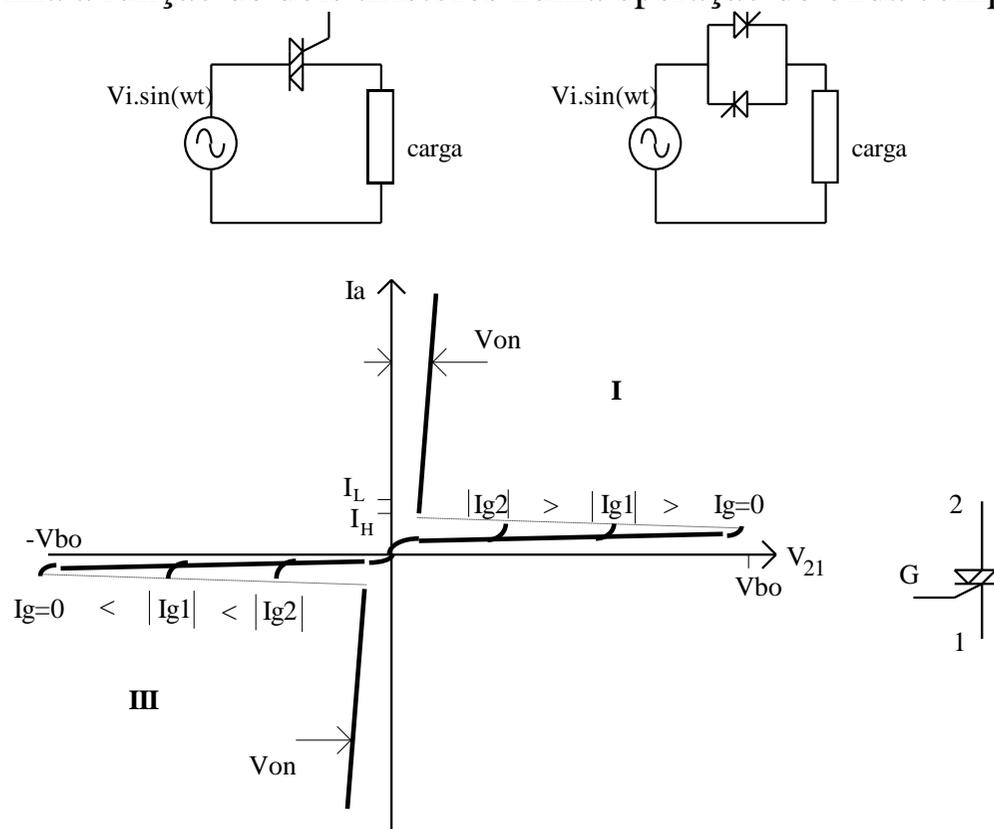


Figura 1. Característica estática de TRIAC e seu símbolo.

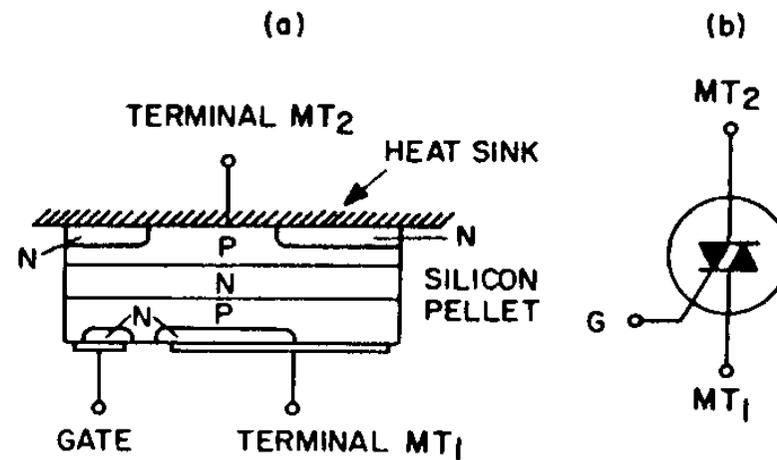


Fig. 2 Estrutura interna (simplificada) de TRIAC e seu símbolo (reproduzido de GE SCR manual).

Os modos de operação mais utilizados são (I)+ e (III)- que correspondem, respectivamente, a:

$$V_{21} > 0 \quad \text{e} \quad i_G > 0$$

$$V_{21} < 0 \quad \text{e} \quad i_G < 0$$

Podem ser usados os modos (I)- e (III)+ que correspondem, respectivamente, a:

$$V_{21} > 0 \quad \text{e} \quad i_G < 0;$$

$$V_{21} < 0 \quad \text{e} \quad i_G > 0,$$

sendo menos preferidos pelo fato de exigirem uma maior corrente de porta.

Variadores de tensão

Em algumas aplicações alimentadas em corrente alternada, nas quais se deseja alterar o valor da tensão (e da corrente) eficaz da carga, é usual o emprego dos chamados Variadores de Tensão, também designados como Gradadores, Controladores CA, ou Contatores Estáticos.

Como aplicações típicas pode-se citar, dentre outras:

- aquecimento (controle de temperatura);
- reguladores de tensão CA (valor eficaz);
- controle de intensidade luminosa em lâmpadas incandescentes;
- acionamento de motores CA de baixa potência;
- partida suave (com tensão reduzida) de motores de indução;
- compensação de reativos em sistemas de potência (RCT, CCT);
- contatores estáticos.

Os dispositivos semicondutores de potência empregados em tais conversores são, tipicamente, tiristores, uma vez que se pode contar com a ocorrência de comutação natural. Em aplicações de baixa potência pode-se fazer uso de TRIACs, enquanto para potência mais elevada utilizam-se dois tiristores em antiparalelo, como mostra a figura 3.

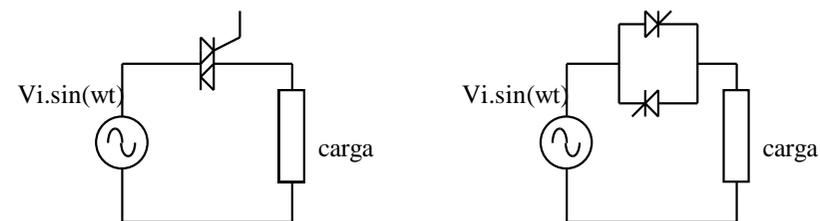
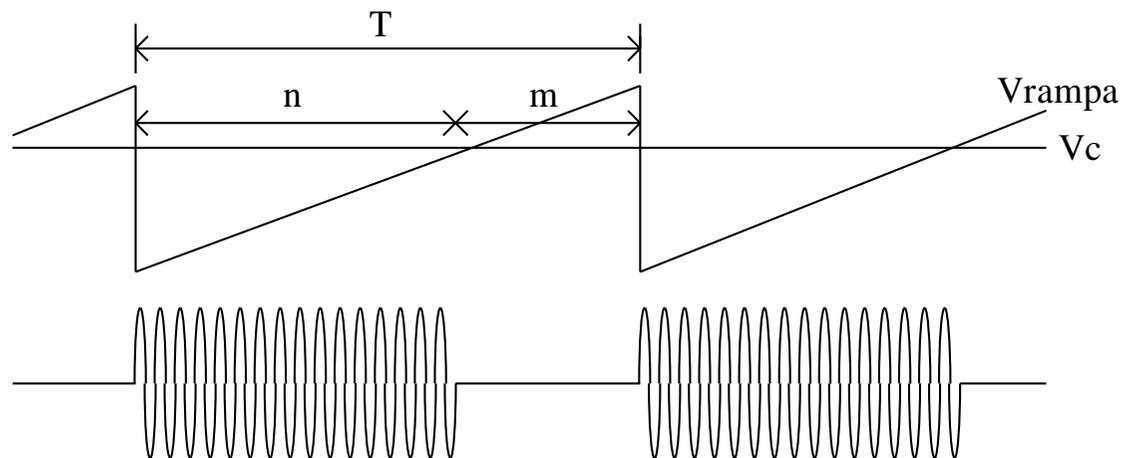


Figura 3 - Variador de tensão CA (monofásico) com TRIAC e com tiristores.

Dois tipos de controle são normalmente empregados para o comando destes conversores: o controle liga-desliga e o controle de fase.

Chaves estáticas e Controle Liga-Desliga

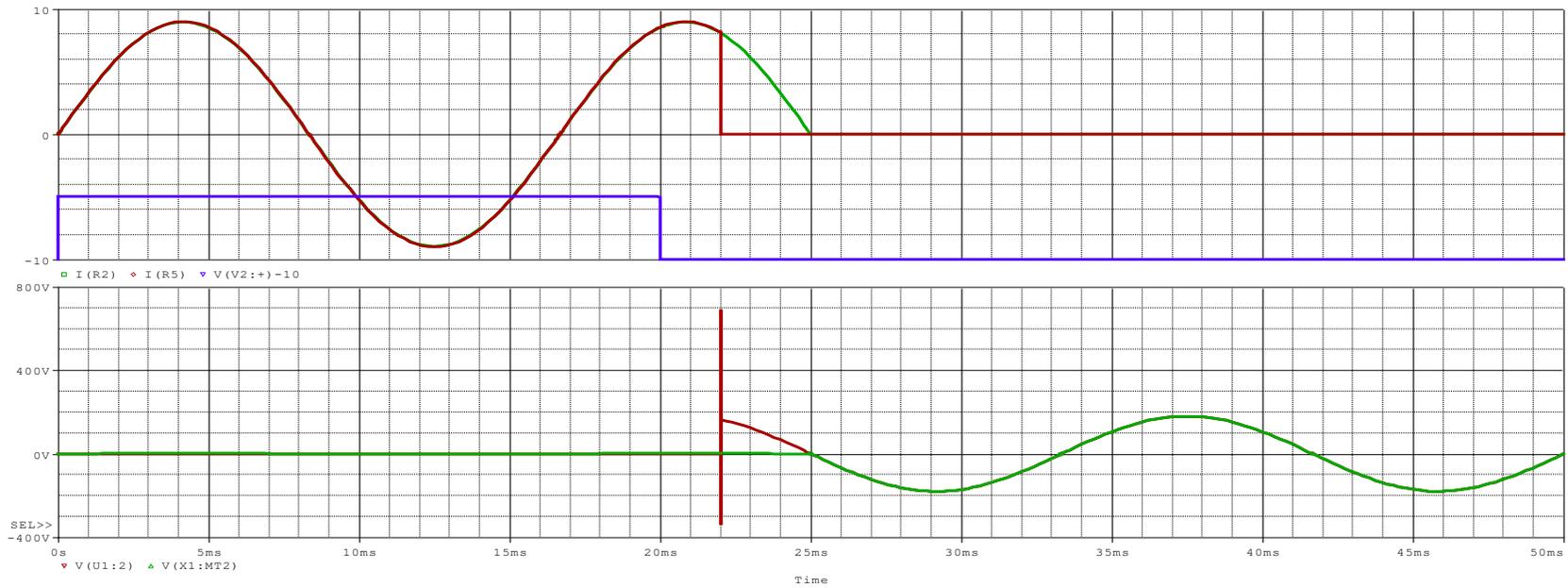
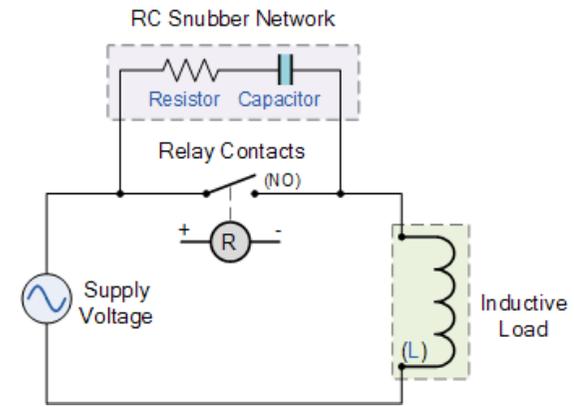
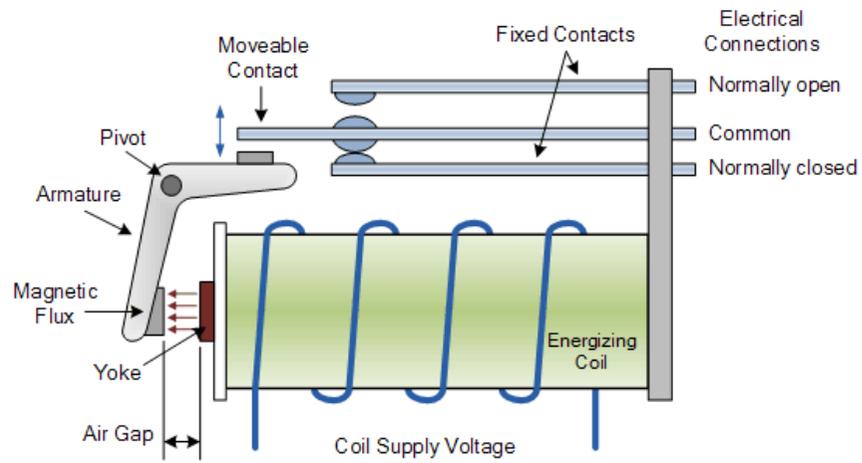


Tensão sobre a carga

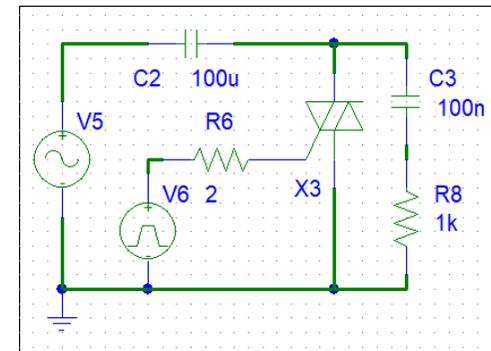
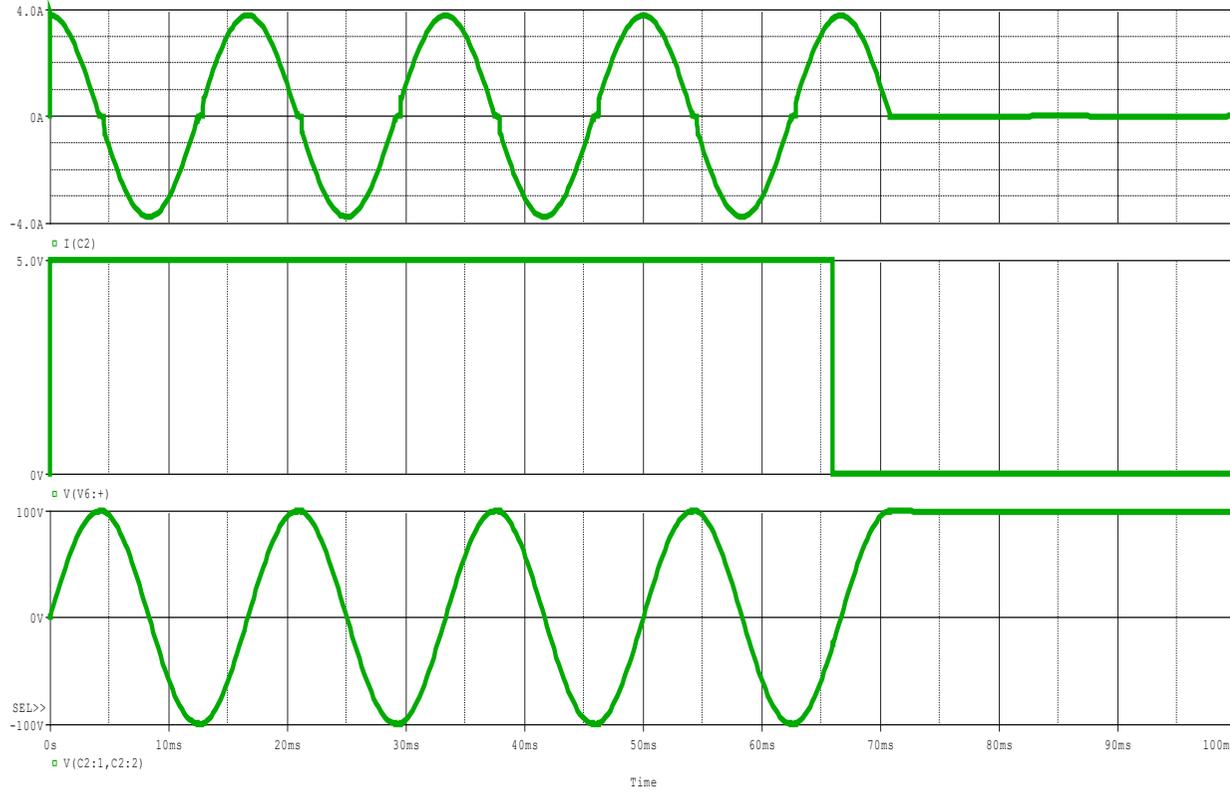
Figura 4 - Operação de controle por ciclos inteiros.

A tensão eficaz aplicada à carga (considerando o período T) é dada por:

$$V_{\text{of}} = \sqrt{\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} V_i^2 [\sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{n}{n+m}} = V_{ef} \sqrt{\delta}$$



Carga capacitiva



Controle de fase

Carga Resistiva

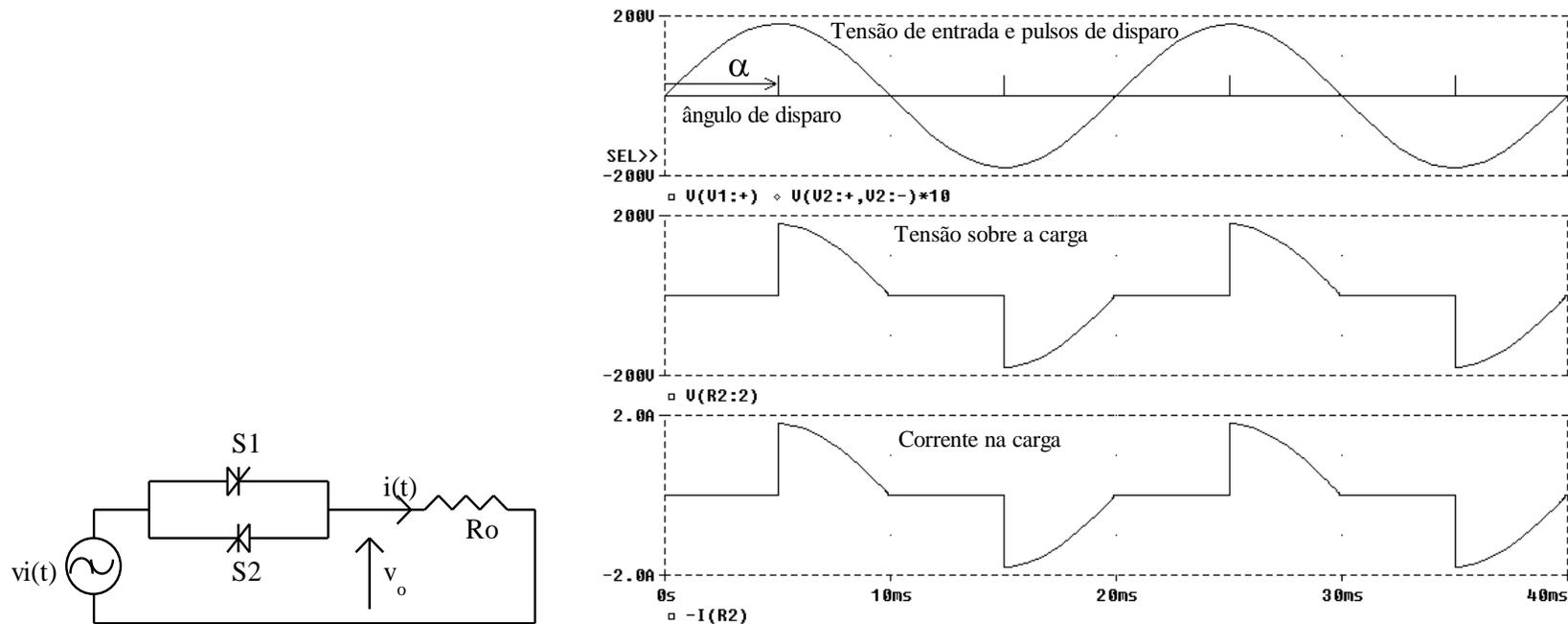


Figura 5 - Circuito e forma de onda de variador de tensão CA monofásico com carga resistiva.

O valor eficaz da tensão aplicada à carga resistiva é:

$$V_{o_{ef}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_i \cdot \sin(\theta))^2 \cdot d\theta} = V_i \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}}$$

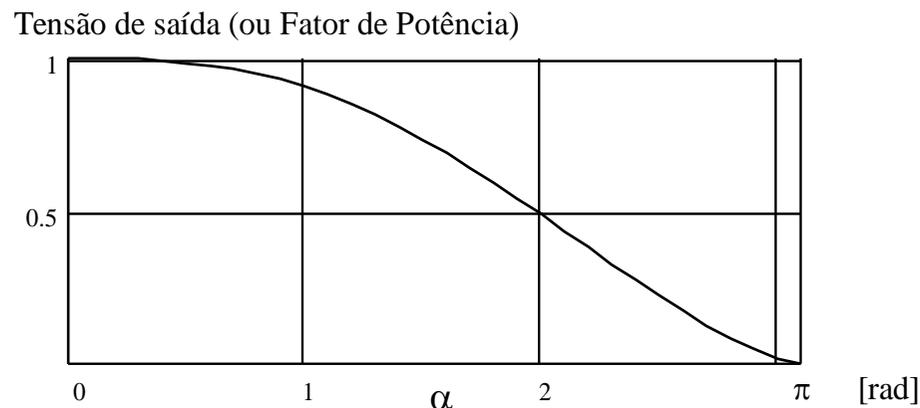


Figura 6 - Tensão de saída (carga resistiva), normalizada em relação ao valor eficaz da tensão de entrada.

A amplitude da componente fundamental da corrente sobre a carga é dada por:

$$V_{h1} = V_i \cdot \sqrt{\left[\frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \right]^2 + \frac{[\cos(2\alpha) - 1]^2}{(2\pi)^2}}$$

A variação das componentes harmônicas da tensão na carga está mostrada na figura, sendo dada por:

$$V_{h_{(2k-1)}} = \frac{V_i}{\pi} \sqrt{\frac{k^2 - k + 1}{2k^2 \cdot (k-1)^2} - \frac{\cos(2\alpha)}{2k \cdot (k-1)} + \frac{\cos(2k\alpha)}{2k^2 \cdot (k-1)} - \frac{\cos[2(k-1)\alpha]}{2k \cdot (k-1)^2}}$$

para k inteiro e maior que 1.

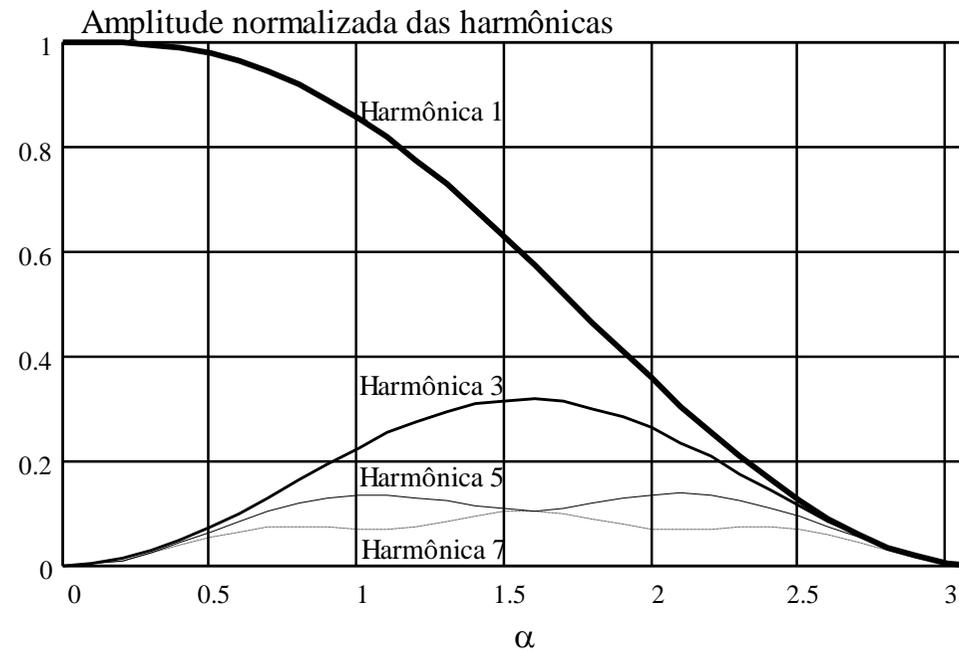


Figura 7 - Amplitude dos harmônicos de tensão (normalizado em relação à amplitude da tensão de entrada), para carga resistiva.

Carga indutiva

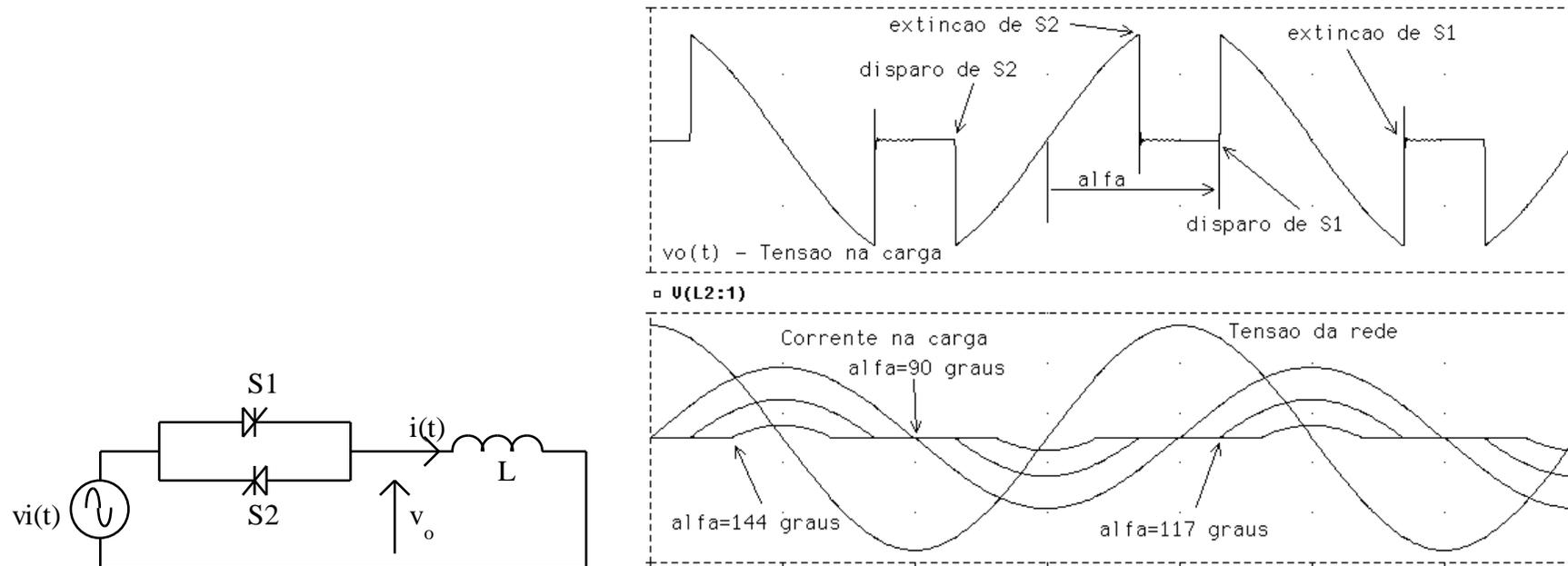


Figura 8 - Circuito e formas de onda de variador de tensão CA com carga indutiva.

A corrente obedece à seguinte expressão:
$$i(t) = \frac{V_i}{\omega L} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\omega t)]$$

O valor eficaz da tensão de saída é:
$$V_{O_{ef}} = V_i \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

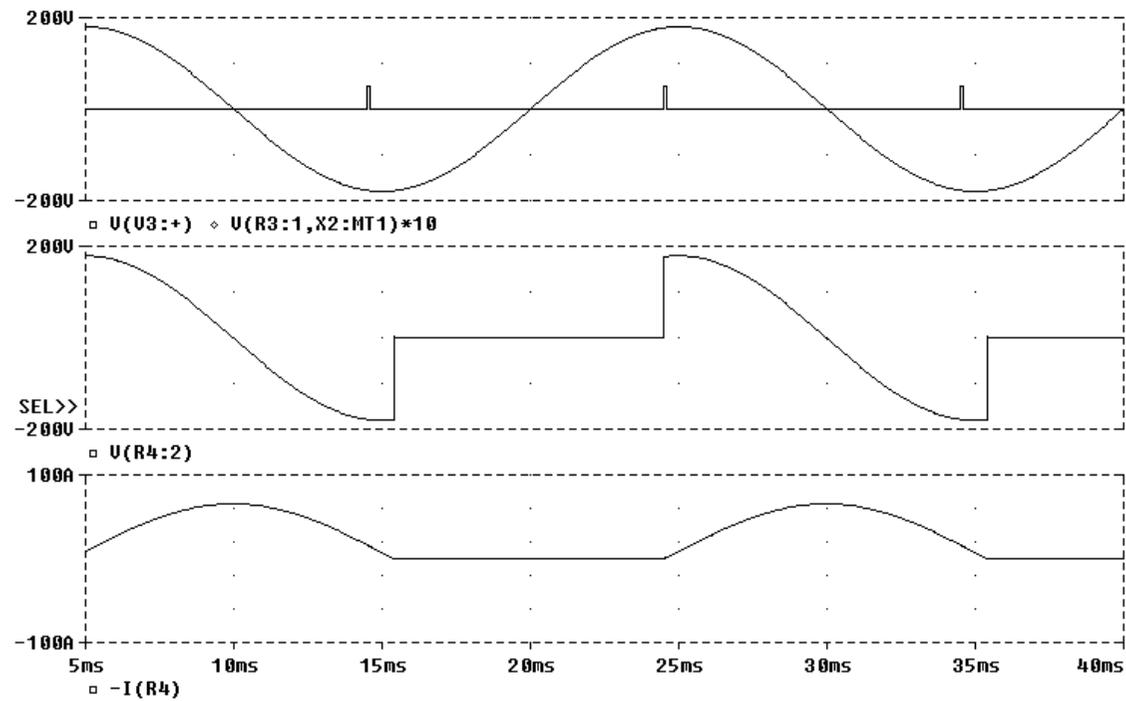


Figura 9 – Formas de onda para ângulo de disparo menor que 90° (pulso estreito).

$$V_{h1} = \frac{2V_i}{\pi} \cdot \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] \quad V_{h_{(2k-1)}} = \frac{2V_i}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sin(2k\alpha)}{2k} - \frac{\sin[2(k-1)\alpha]}{2(k-1)} \right\}$$

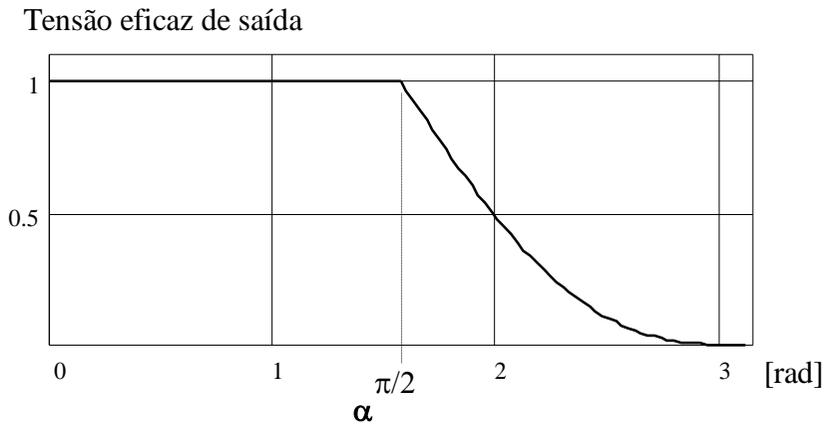


Figura 10 – Tensão de saída (valor eficaz), normalizada, para carga indutiva.

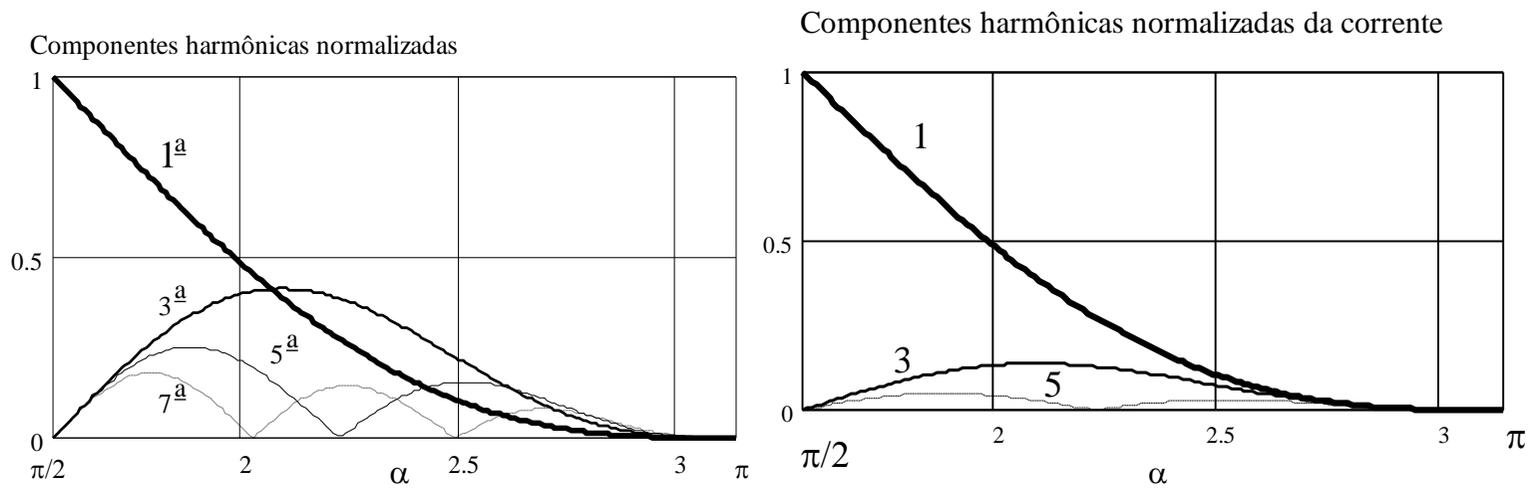


Figura 11 - Amplitude (normalizada) das harmônicas da tensão e da corrente sobre uma carga indutiva.

Carga RL

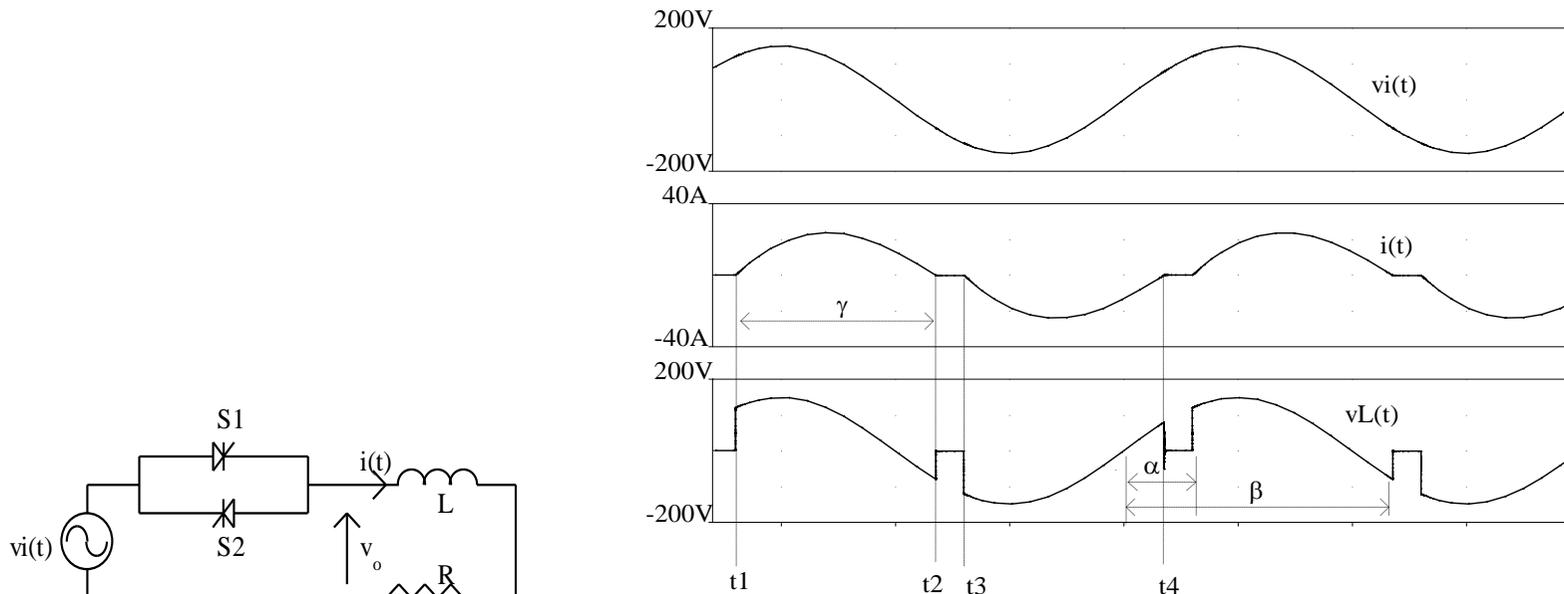


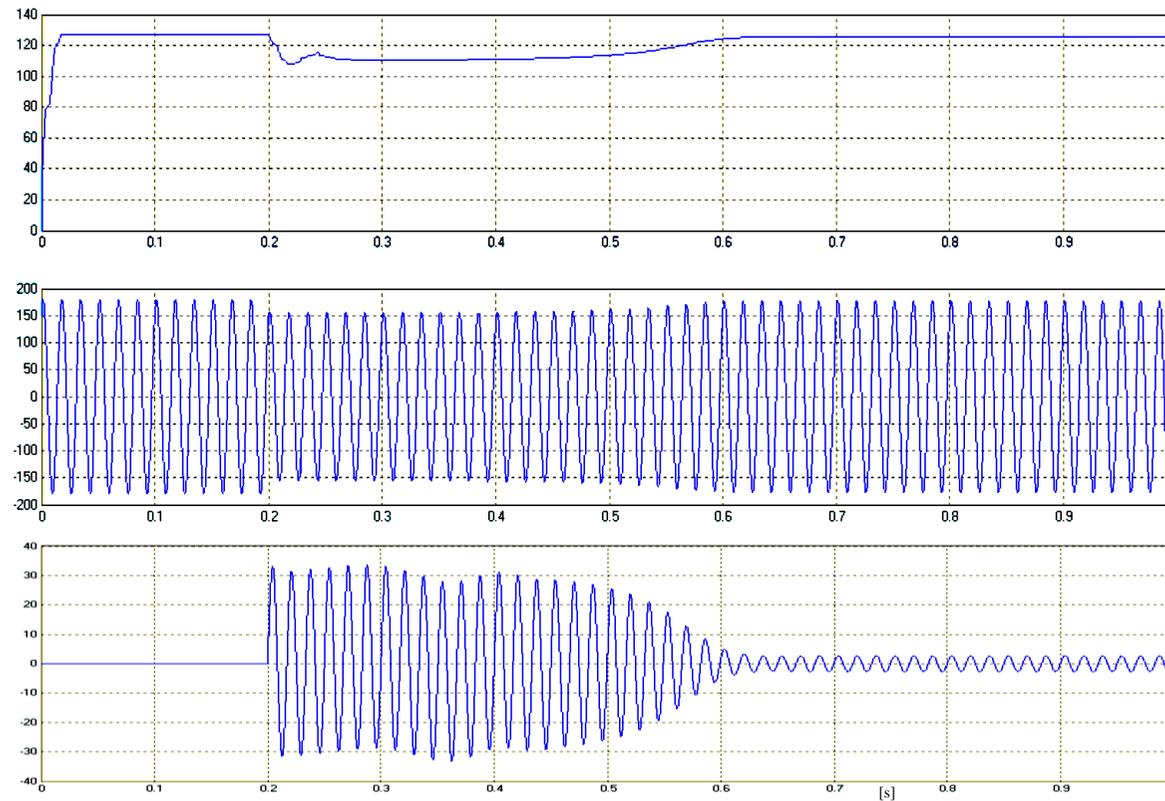
Figura 12 - Variador de tensão CA monofásico e carga RL.

$$i_o(t) = \frac{V_i}{Z} \cdot \left[\sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) \cdot e^{-\left(\frac{\omega t - \alpha}{\text{tg}(\phi)}\right)} \right] \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \phi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

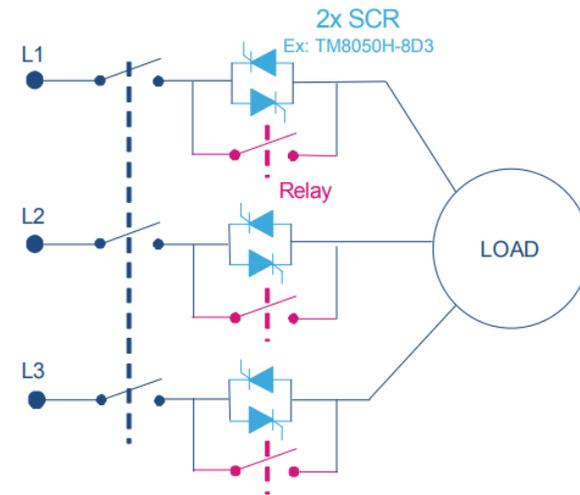
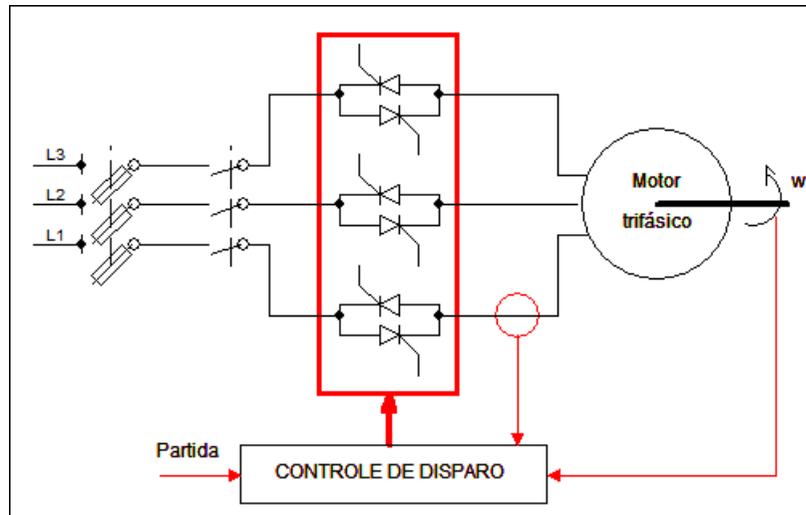
A corrente se anula no ângulo de extinção, β , obtido pela solução de $\sin(\beta - \phi) = \sin(\alpha - \phi) \cdot e^{-\left[\frac{\beta - \alpha}{\text{tg}(\phi)}\right]}$

A tensão eficaz de saída é:
$$V_{o_{ef}} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left[\beta - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right]}$$

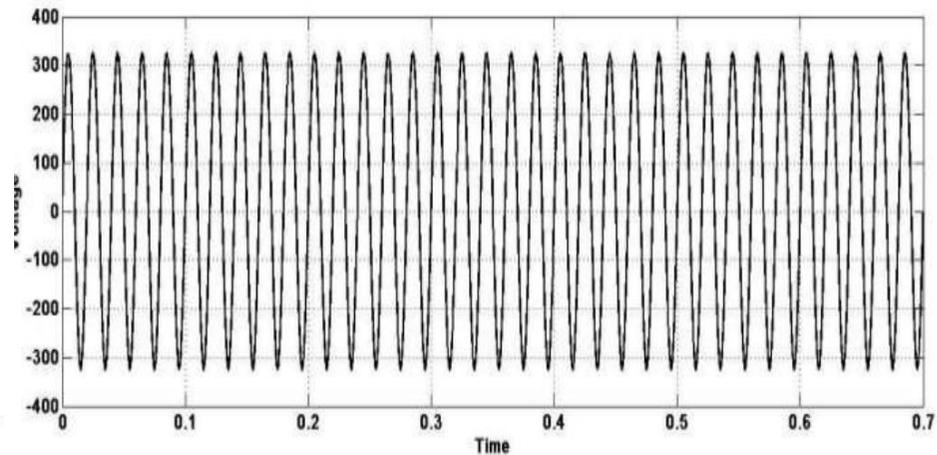
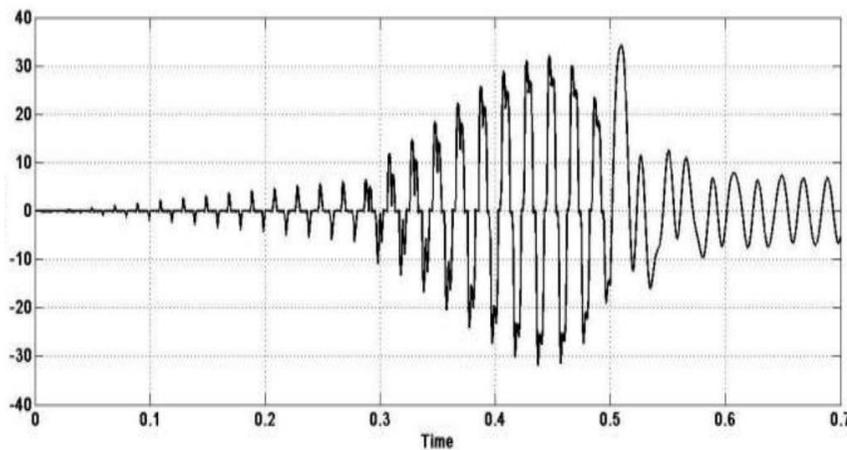
Partida de motor CA (*soft-starter*)



Efeitos de partida de motor de indução trifásico, sem *soft-starter*. Sinais relativos a uma das fases: Tensão eficaz (acima), tensão instantânea (meio), corrente na rede (abaixo).

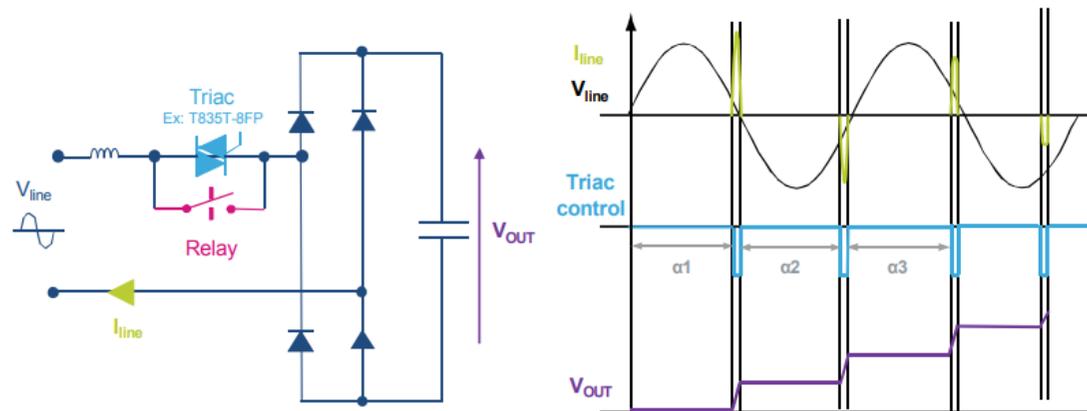


Soft-starter com tiristores.



Atuação de *soft-starter* na limitação da corrente de partida de MI trifásico e redução de afundamento de tensão.

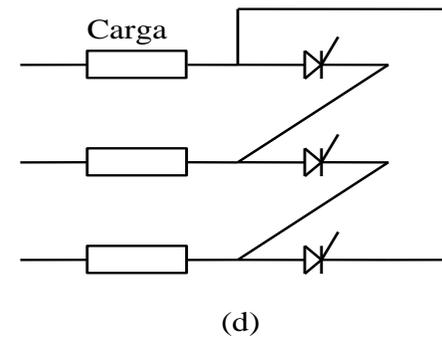
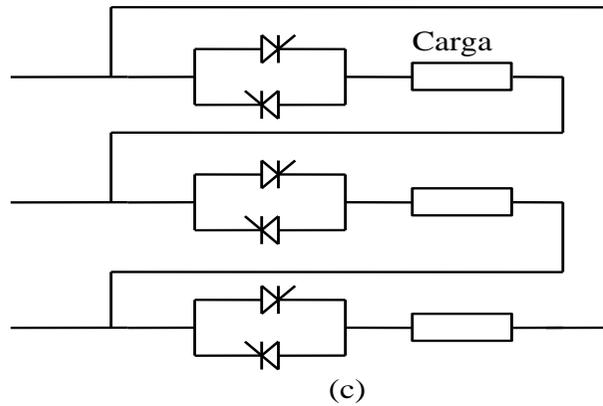
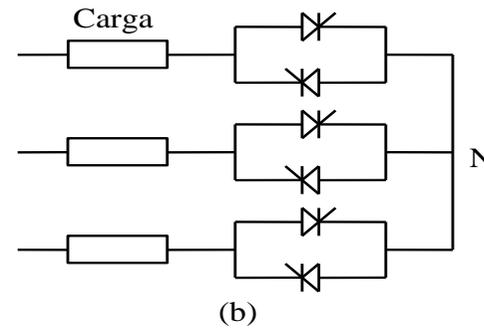
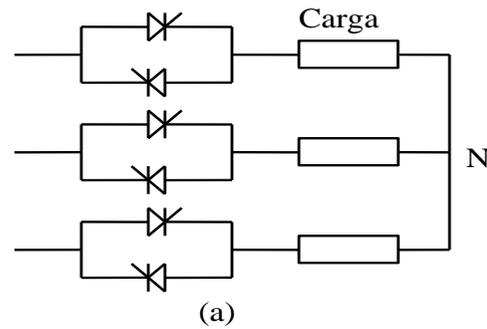
Limitação de *inrush* em retificadores¹



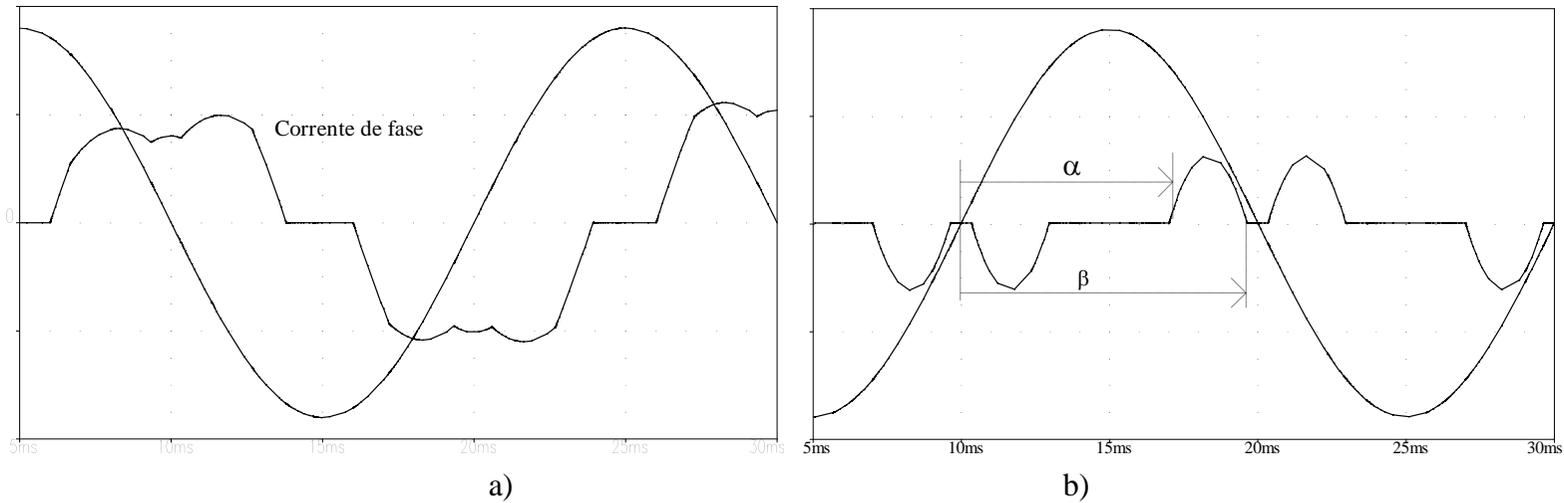
- Para limitar as correntes de energização, o Triac é controlado no modo de controle de fase.
- O Triac inicialmente é acionado no final do semiciclo, em α_1 , quando a tensão instantânea é reduzida.
- No próximo semiciclo, o Triac é acionado com um atraso menor (α_2), e então o capacitor é carregado até uma tensão mais alta. Essa sequência é repetida até que o capacitor esteja carregado na tensão de linha máxima, com disparo em aproximadamente 90° .
- Uma vez que o capacitor está totalmente carregado, não há mais corrente de *inrush*, então o relé pode ser acionado para eliminar a dissipação de potência durante a operação do conversor.

¹ Imagens obtidas em st.com

Conexões trifásicas

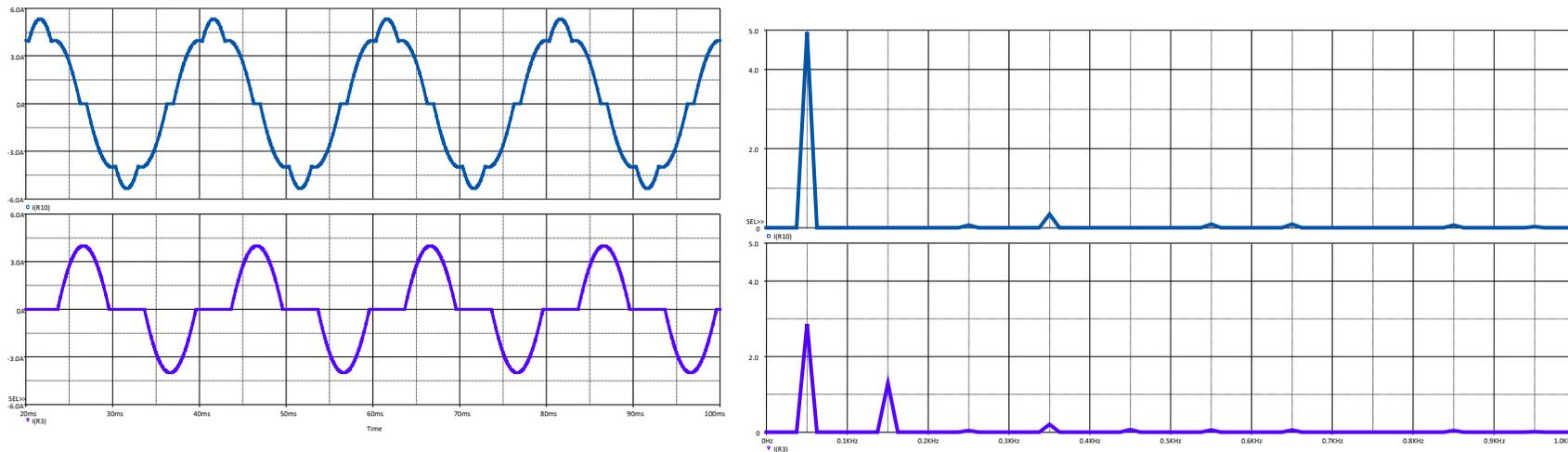


Conexões trifásicas: (a) Com carga em Y; (b) Com controlador em Y;
 (c) Com controlador e carga em Δ ; (d) Com controlador em Δ .

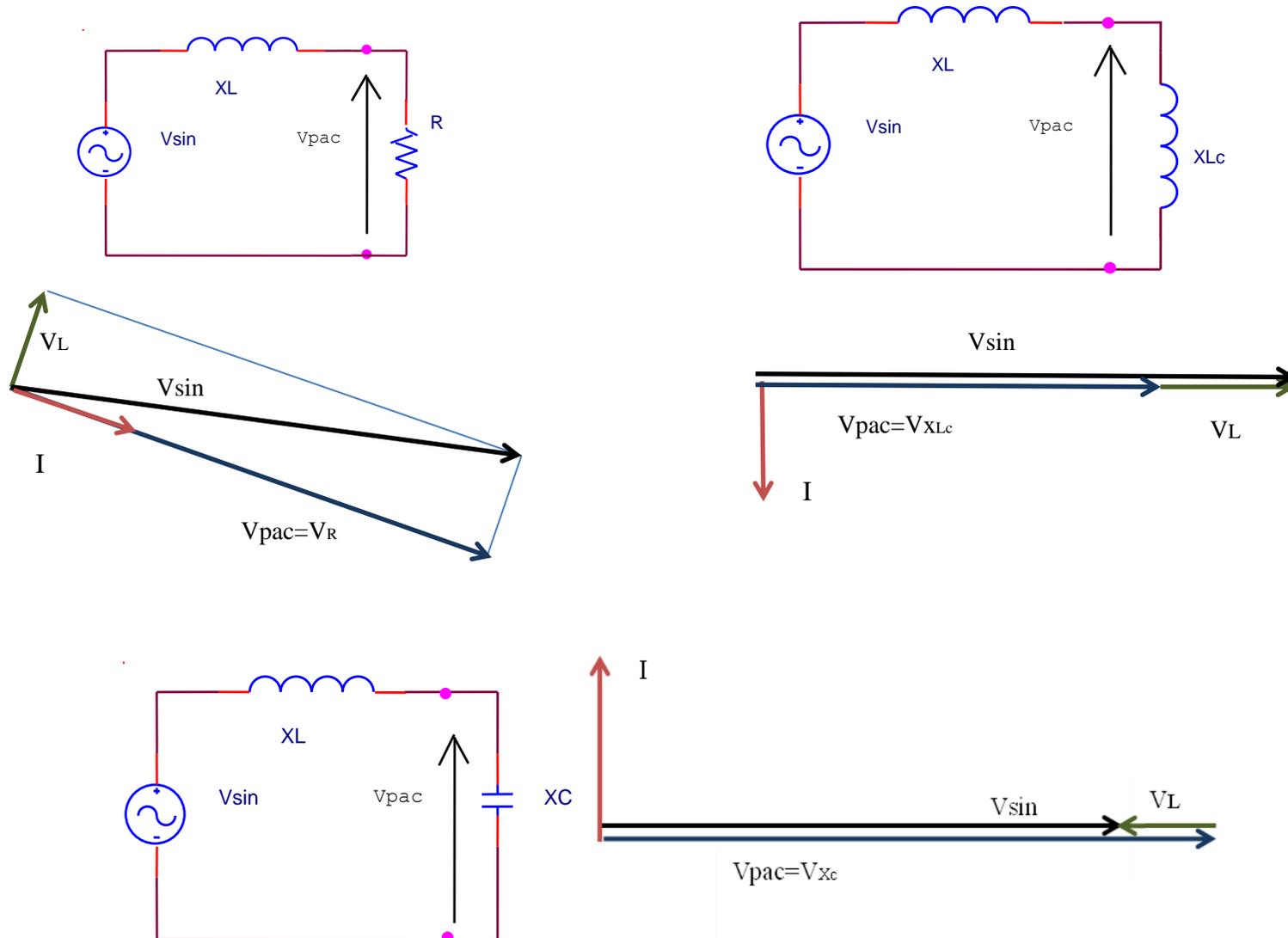


a) Tensão e corrente de fase para carga indutiva e disparo entre 90 e 120 graus.

b) Tensão e corrente de fase, carga indutiva, para disparo entre 120 e 150°



Formas de onda de corrente de fase (inferior) e corrente de linha (superior) para conexão em Δ . Espectro das correntes de fase (inferior) e de linha (superior).



Comportamento de alimentador indutivo (X_L) suprindo carga R, L ou C.

Exemplo de aplicação – Compensador Estático de Reativos (SCV)

Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT) e Reator Controlado a Tiristor (RCT)

Um compensador Estático de Reativos (SVC – Static var Compensator) é formado por um CCT (Capacitor **Chaveado** a Tiristores) e por um RCT (Reator **Controlado** a Tiristores).

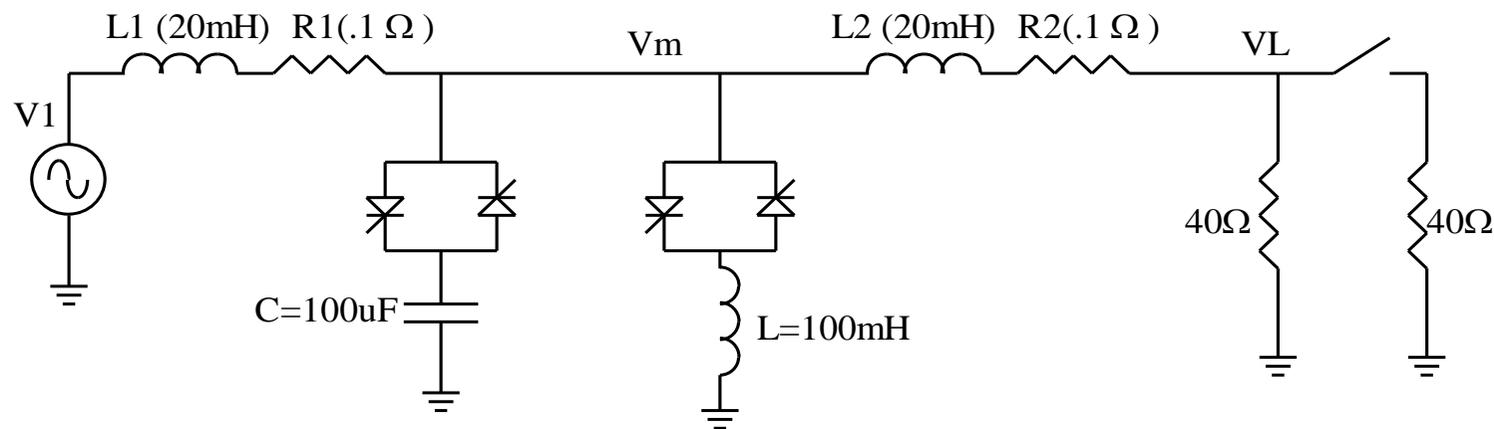


Figura 13 – Rede elétrica com SVC (CCT+RCT)

Alimentador sem compensação

Neste caso não estão em funcionamento nem o CCT, nem o RCT. Como se observa na figura 14, existe uma queda de tensão ao longo da linha. Constata-se também uma abertura angular entre as tensões terminais, devido ao carregamento da linha.

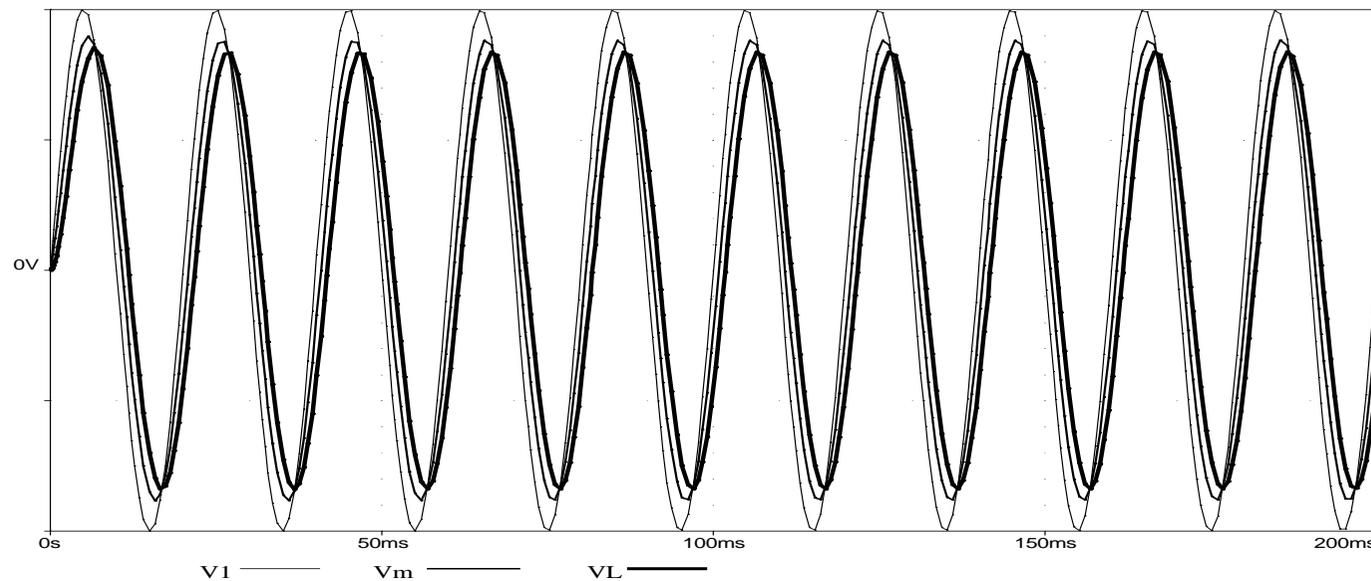


Figura 14 – Tensões ao longo da linha, sem compensação.

CCT atuando e saída de carga

Inicialmente tem-se a carga total inserida no circuito (20Ω). A colocação do capacitor no circuito (80 ms) faz a tensão no centro da linha aumentar, tornando-se maior do que a tensão na própria entrada (sobrecompensação). Na carga tem-se uma tensão com amplitude praticamente igual à da entrada.

Em 150 ms, 50% da carga é desconectada, elevando a tensão de saída. Na corrente, observa-se uma correspondente redução.

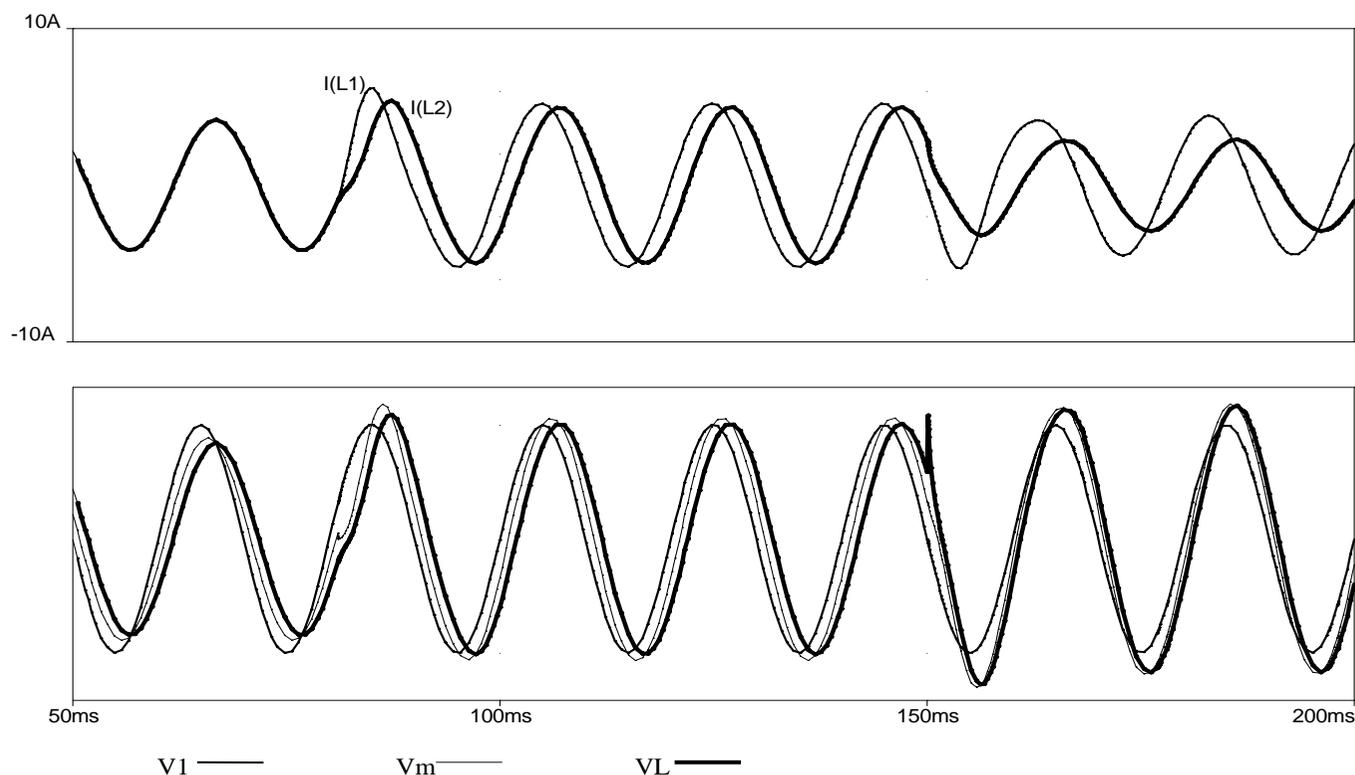


Figura 15 – Formas de onda de tensão e de corrente com atuação do CCT e manobra de carga.

CCT atuando, saída de carga e atuação do RCT

Neste caso, após a desconexão de 50% da carga, o RCT entra em funcionamento de modo a corrigir a demasiada elevação na tensão de saída.

A figura 16 mostra tal funcionamento, com a carga sendo desconectada em 100ms e o RCT passando a atuar em 170ms. Note-se que a ação do RCT permite, ao consumir parte da potência reativa inserida no sistema pelo CCT, recuperar o valor desejado para a tensão na carga.

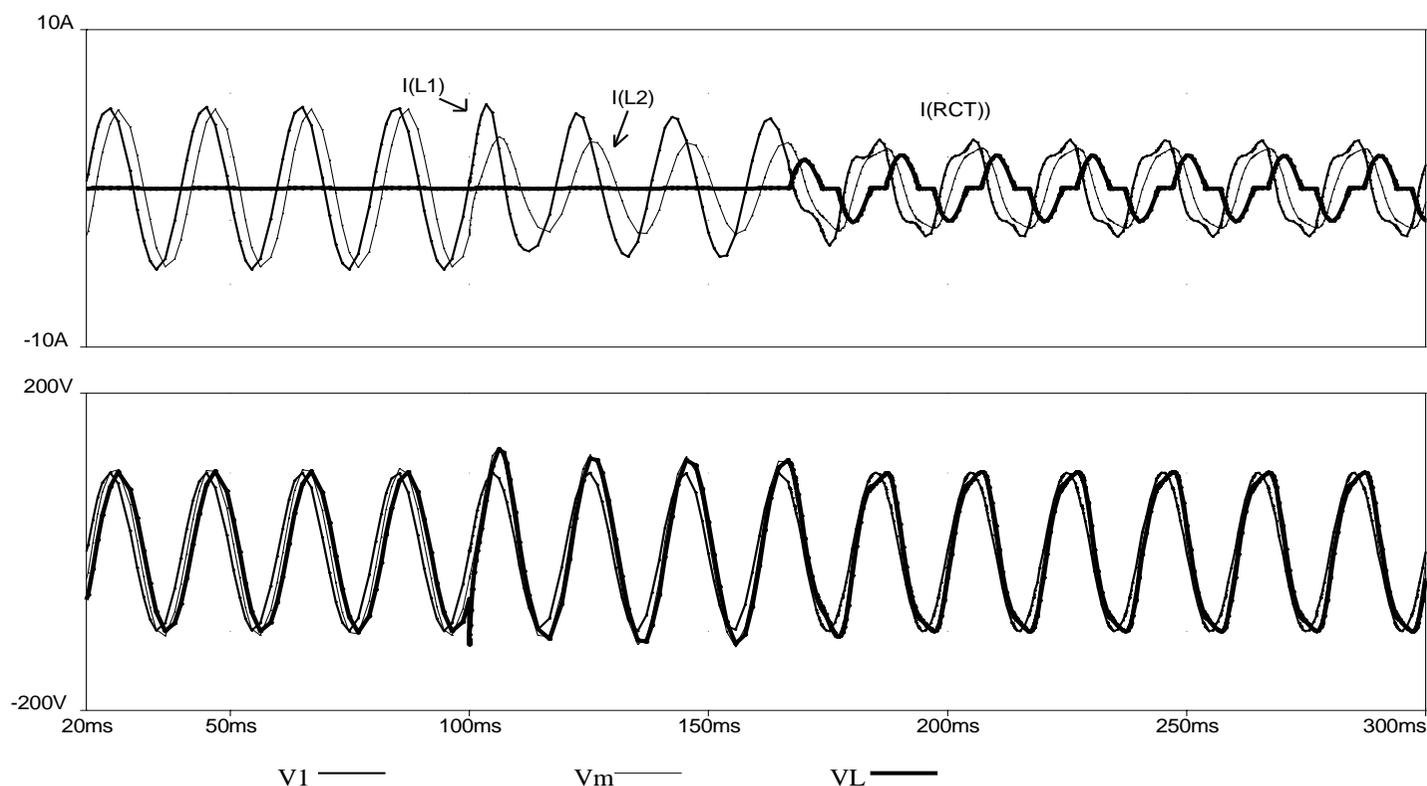


Figura 16 – Formas de onda com CCT (fixo), desligamento de 50% da carga e atuação do RCT.

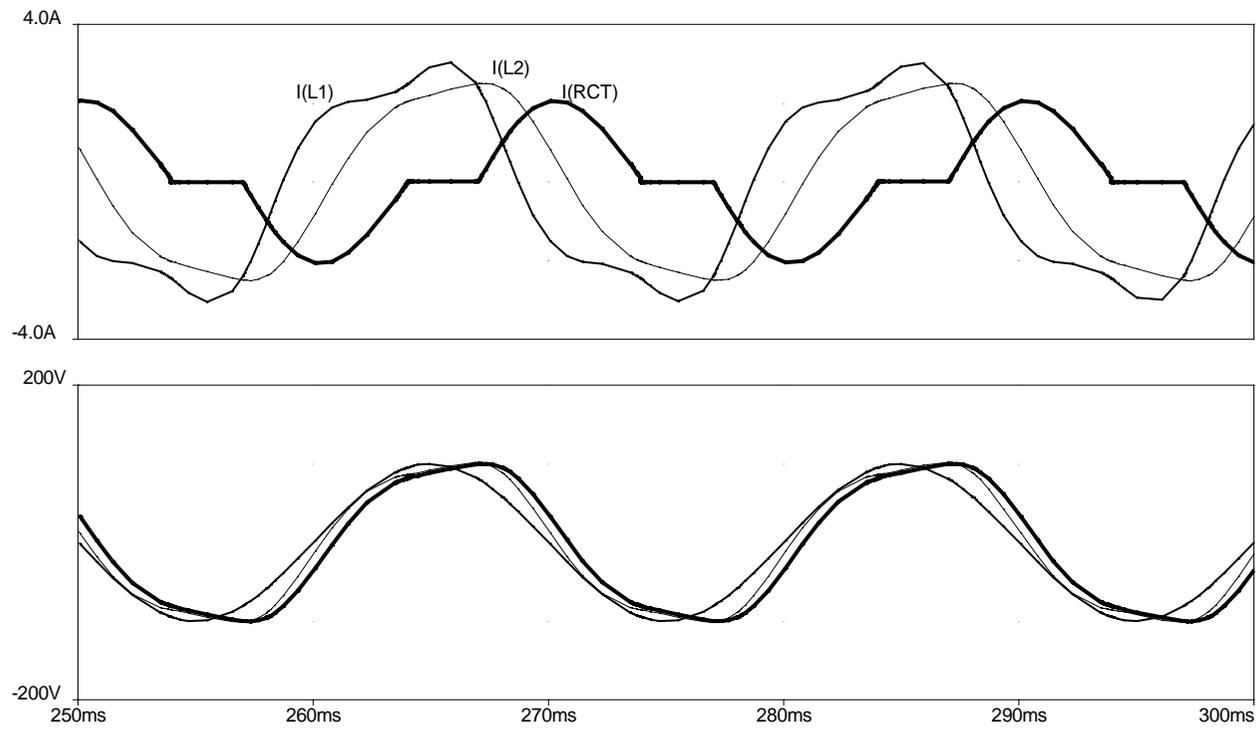


Figura 17 - Detalhe da distorção harmônica introduzida pelo SVC

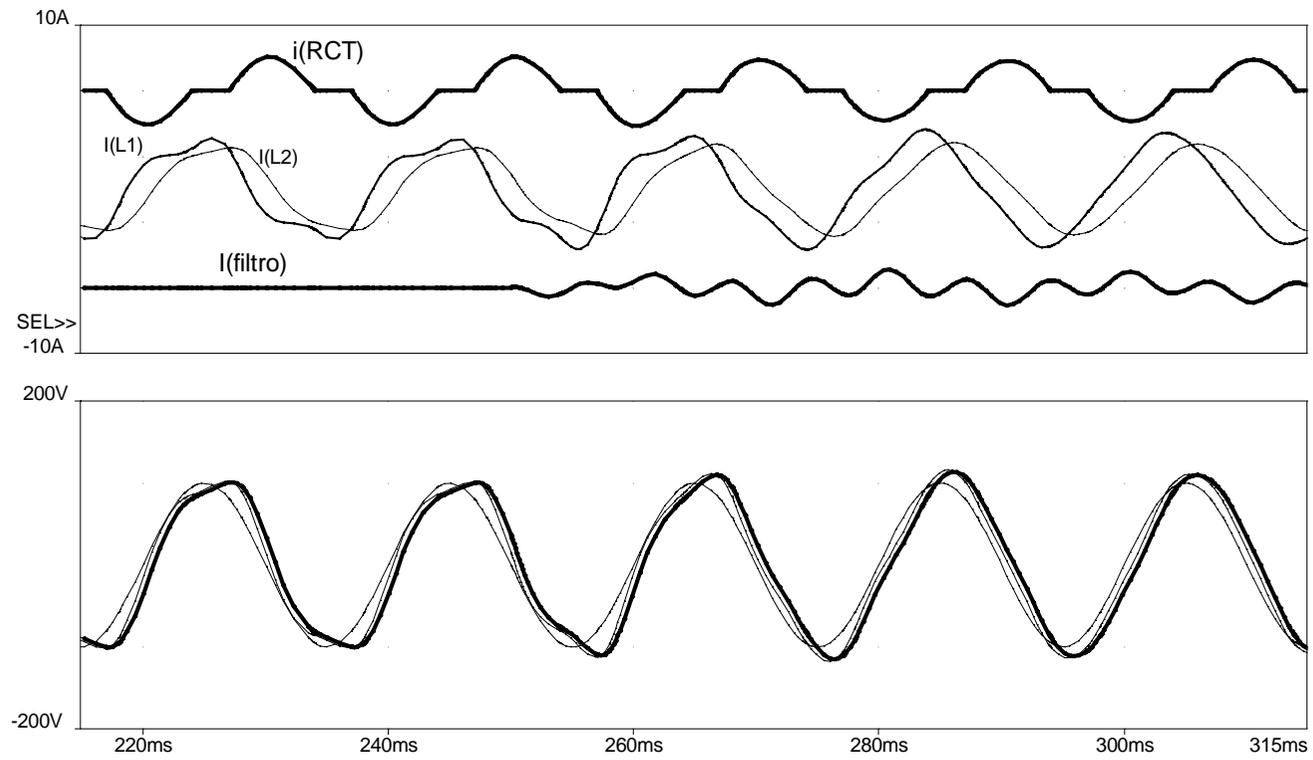


Figura 18 – Formas de onda com atuação de filtro de 3ª harmônica.

Quick and variable reactive power compensation

Siemens Energy Static Var Compensators SVC Classic

Siemens Energy's SVC Classic improves power quality by dynamically injecting the required amount of reactive power into the net. The SVC Classic achieves this fast and reliable functionality by use of state-of-the-art light-triggered thyristors (LTT). By deploying these LTTs there is no need for a delicate thyristor control on medium voltage level – a significant plus in reliability and operational safety. Depending on the application SVC Classic consists of a thyristor controlled reactor (TCR), a thyristor switched capacitor (TSC), or MSCs/MSCDNs. Its modular design provides customized solutions for different requirements.



Increased reliability and stability for your grid

The proven solution SVC Classic – versatile in use from grid stabilization to industrial load compensation.

Whenever fast voltage regulation is required to reliably fulfill voltage stabilization tasks, either in the grid or for large industrial loads, SVC Classic is a proven solution. Various control concepts can be combined with a wide range of configurations to match individual applications.

In that way the SVC Classic solutions can be optimally tailored to suit a wide range of requirements:

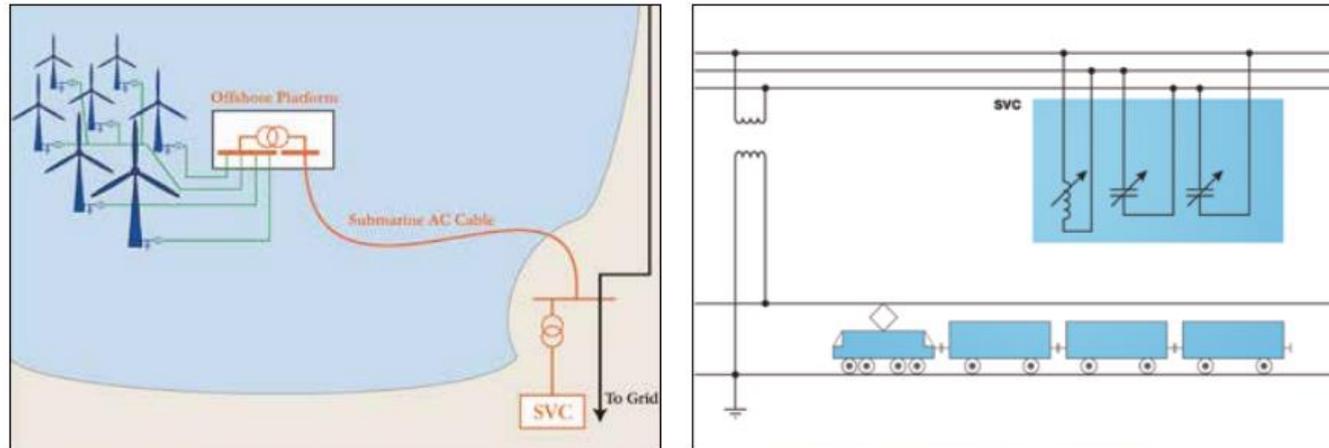
- They increase grid reliability by assisting fault recovery and thus reduce the risk of blackouts. They improve the power factor by dynamically providing reactive power
- They symmetrize unbalance between phases
- They reduce flicker of large industrial consumers like electric arc furnaces



SVC Sogndal, Statnett, Norway

A large variety of SVC Classic concepts covers the wide spectrum of applications. Typical voltage levels range from lower medium voltage up to 800 kV, with typical overall power ratings of up to 1,000 Mvar.

ABB Applications



<https://library.e.abb.com/public/75362d2c1aa7f86783257e0c00478a6f/SVC%20A02-0100.pdf>