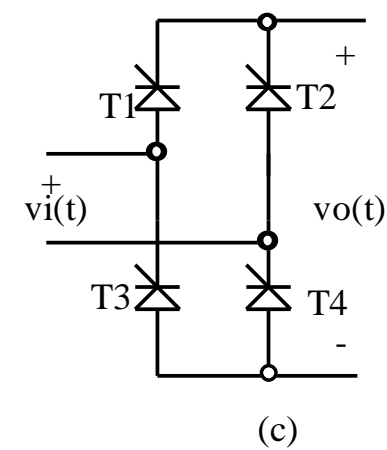
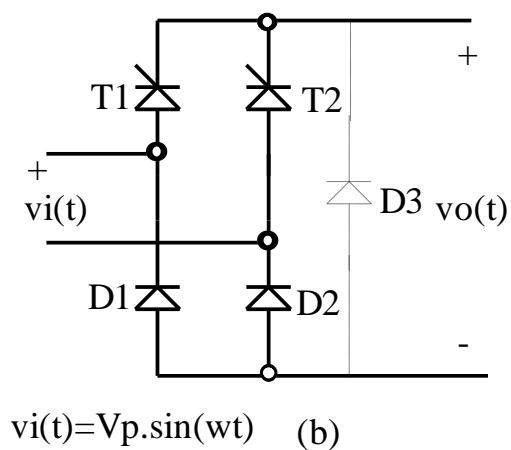
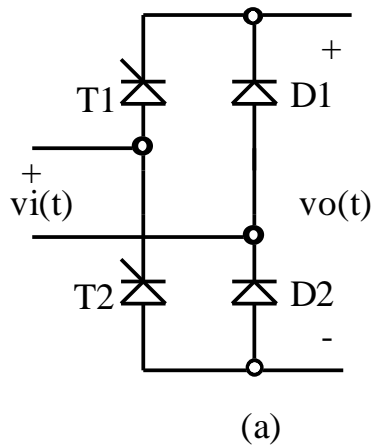


RETIFICADORES CONTROLADOS

Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tiristores. Possuem vasta aplicação industrial, no acionamento de motores de corrente contínua, em estações retificadoras para alimentação de redes de transmissão CC, no acionamento de locomotivas, etc.

Analisaremos inicialmente pontes retificadoras monofásicas, embora o estudo das pontes trifásicas não seja substancialmente diferente. Para potência superior a alguns kVA geralmente se usam pontes trifásicas (ou mesmo hexafásicas).



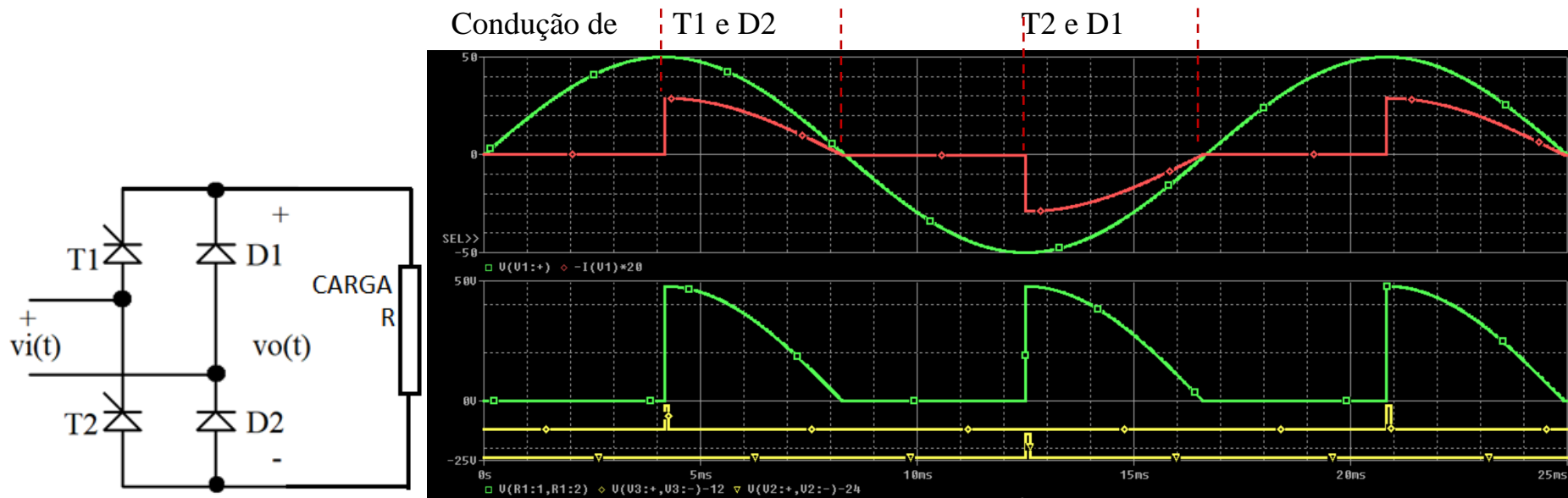
Pontes retificadoras monofásicas:

a) Semicontrolada assimétrica; b) Semicontrolada simétrica; c) Totalmente controlada.

As pontes semicontroladas usam 2 tiristores e 2 diodos. A tensão de saída, $v_o(t)$, assume apenas valores (instantâneos e médios) positivos.

a) Ponte semicontrolada assimétrica

Com polaridade positiva da tensão da entrada, o disparo de T1 conecta a entrada à carga com retorno da corrente por D2. Quando a tensão inverte, a corrente vai a zero, desligando T1 e D2. No semiciclo negativo, quando ocorrer o disparo de T2, este conduzirá juntamente com D1.



Ponte retificadora semicontrolada **assimétrica**, com carga resistiva.

A tensão média de saída, a cada semiciclo é:
$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_p \cdot \sin\theta \cdot d\theta = \frac{V_p}{\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

A tensão eficaz de saída é:
$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_p \cdot \sin\theta)^2 \cdot d\theta} = V_p \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}}$$

Com corrente de carga constante, I_o , a corrente eficaz na entrada é:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_o^2 \cdot d\theta} = I_o \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$$

Com tais valores, é possível explicitar o fator de potência desta carga visto pela rede:

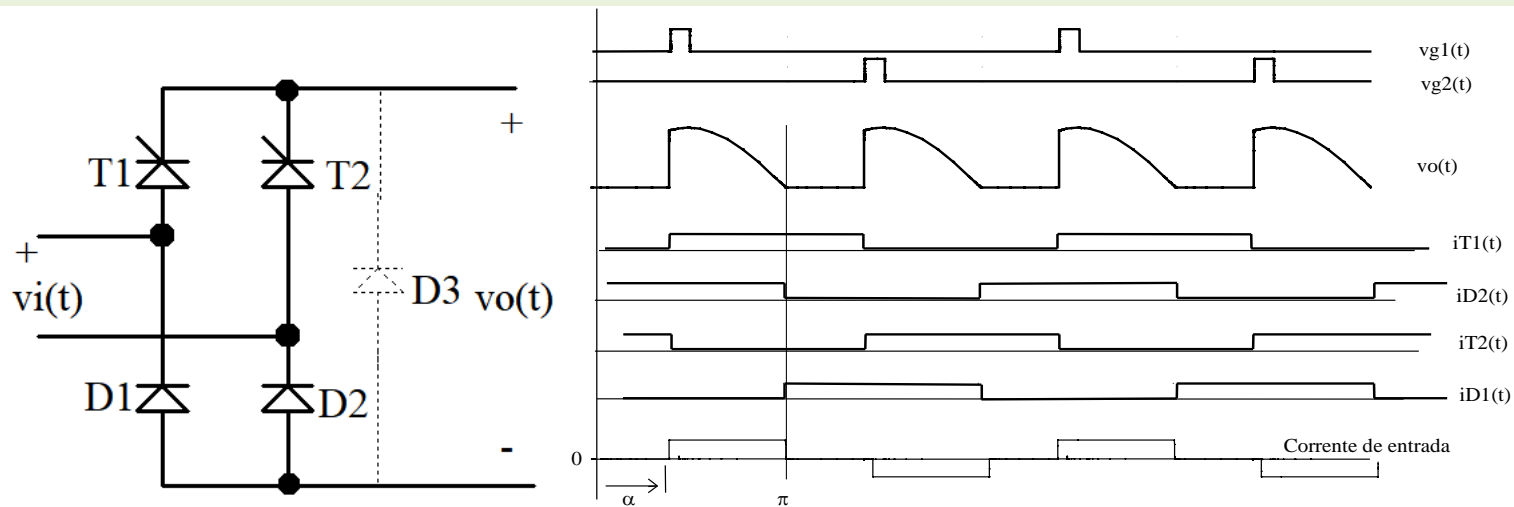
$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos\alpha)}{\sqrt{\pi^2 - \alpha\pi}}$$

Por inspeção, para essa forma de onda de corrente, o fator de deslocamento da fundamental da

corrente é:
$$FD_1 = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

b) Ponte semicontrolada simétrica

Neste circuito o caminho de livre-circulação ocorre através de um SCR e um diodo. Como as formas de onda da tensão de saída e da corrente de entrada são as mesmas, as equações da ponte assimétrica são válidas. Cada componente, diodo ou tiristor, conduzem por 180° .



Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada simétrica, com carga altamente indutiva.

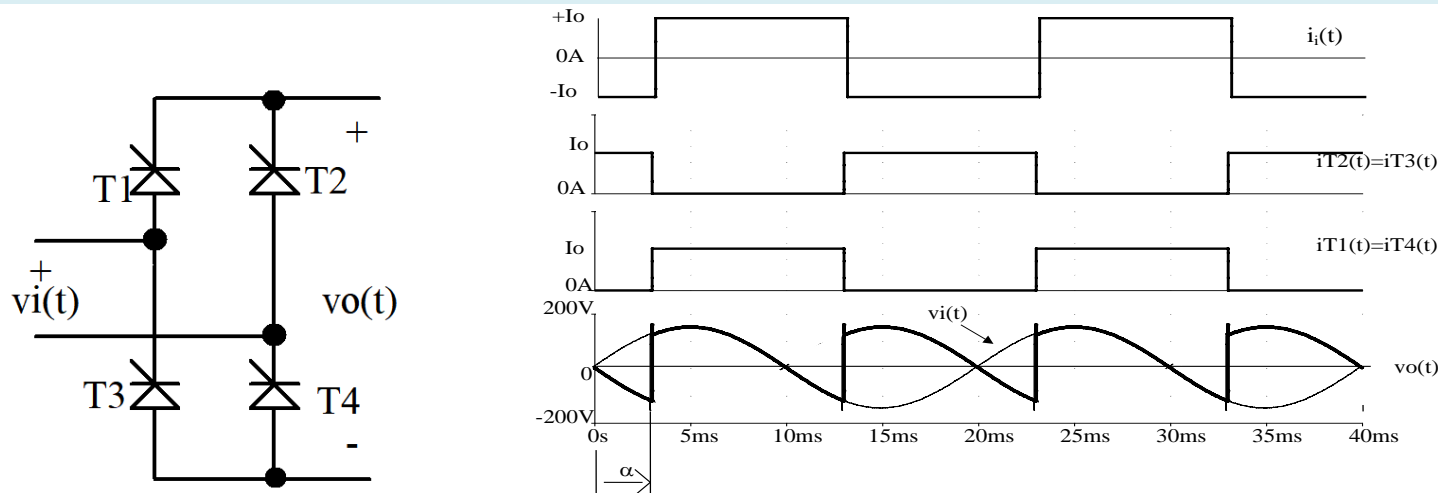
Supondo $v_i(t)$ com a polaridade indicada, quando T1 conduzir, haverá por T1 e D2. Quando a tensão da fonte inverter a polaridade, D1 entrará em condução e D2 bloqueará. A tensão na carga será nula pois T1 e D1 conduzirão, supondo que a corrente não se interrompa (carga indutiva). Quando T2 for disparado, T1 bloqueará. Diodos e tiristores conduzem, cada um por 180° .

c) Ponte totalmente controlada

Os pares de componentes T1 e T4, T2 e T3 devem ser disparados simultaneamente, a fim de garantir um caminho para a corrente através da fonte.

Considere que a corrente no lado CC não se anula (condução contínua). Isso tende a acontecer para cargas em que a componente indutiva é dominante.

Após o disparo do par de tiristores, estes seguem em condução mesmo após a polaridade da fonte se inverter (semiciclo seguinte ao disparo). Isso é possível pelo comportamento do elemento indutivo da carga, cuja tensão se adequa de modo a garantir um caminho para a continuidade da corrente. Quando for disparado outro par de tiristores, aqueles que conduziam terão a corrente anulada e desligarão. A condução de cada par de tiristores se mantém por 180° .



Formas de onda para ponte totalmente controlada, monofásica, alimentando carga indutiva.

A corrente de entrada tem forma quadrada, com a componente fundamental defasada de α em relação à tensão. Quando corrente e tensão na entrada têm sinais opostos, há um fluxo de energia da carga para a fonte.

Em *regime permanente*, no entanto, o fluxo de potência é da fonte CA para a carga, ou seja, o ângulo de disparo deve ser inferior a 90° . Acima de 90° a corrente diminui, a operação entra no modo descontínuo até a parada do motor.

A tensão média de saída, a cada semiciclo é:

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_p \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{2V_p}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

A tensão eficaz de saída é igual ao valor eficaz da tensão de entrada (supondo condução contínua do conversor, ou seja, a ponte retificadora sempre está em funcionamento). A corrente eficaz na entrada vale I_o .

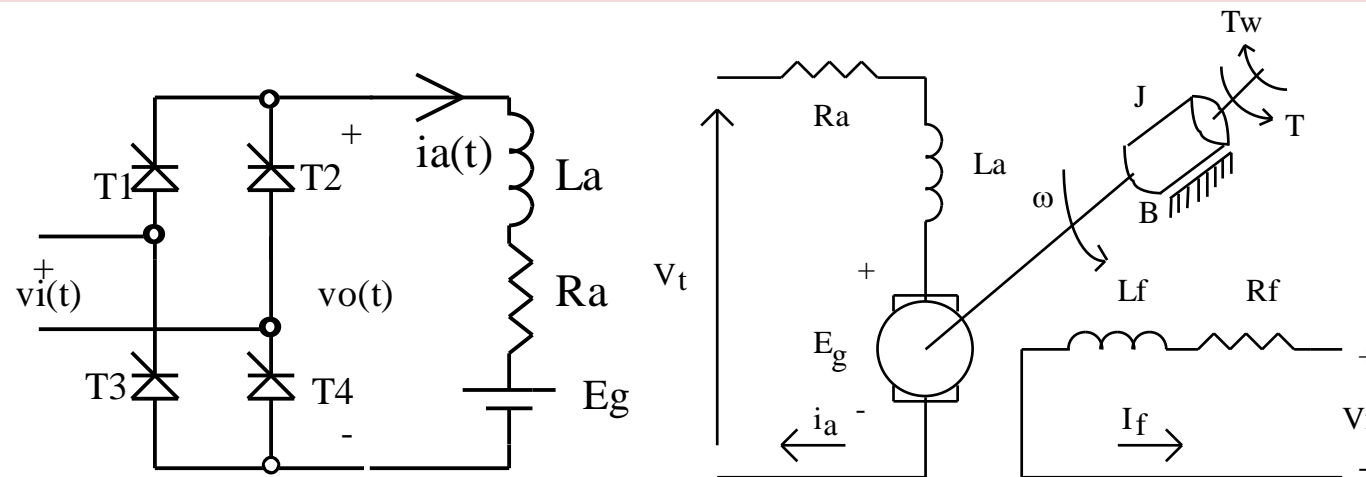
O fator de potência visto pela rede é:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{2\sqrt{2} \cos \alpha}{\pi}$$

Numa situação de condução descontínua, para que seja possível acionar os tiristores, é necessário que no ângulo de disparo a tensão de entrada seja superior à tensão E_g , de modo que os SCRs estejam diretamente polarizados.

No caso de corrente descontínua, quando a corrente da carga vai a zero dentro de cada semiciclo da rede, os tiristores desligarão quando a corrente cair abaixo de I_H .

Um uso importante destes retificadores é no acionamento de motor de corrente contínua. Nestes circuitos não há inversão de polaridade na corrente na carga. A tensão instantânea sobre a carga, $v_o(t)$, pode ser negativa, dado o comportamento indutivo que mantém a circulação de corrente pelos tiristores, mesmo após a inversão da tensão da fonte. A energia retornada à fonte nesta situação é aquela acumulada na indutância.



Retificador monofásico controlado, alimentando circuito de armadura de motor CC.

$$E_g = K_v \cdot \Phi \cdot \omega$$

$$T = K_t \cdot \Phi \cdot i_a$$

E_g : força contra-eleto-motriz de armadura

K : constante determinada por características construtivas da MCC (normalmente $K=K_v=K_t$)

Φ : fluxo de entreferro

ω : velocidade angular da máquina

i_a : corrente de armadura

J : momento de inércia incluindo a carga mecânica.

T : torque

B : atrito

Do circuito elétrico obtém-se que a tensão terminal da máquina é dada por:

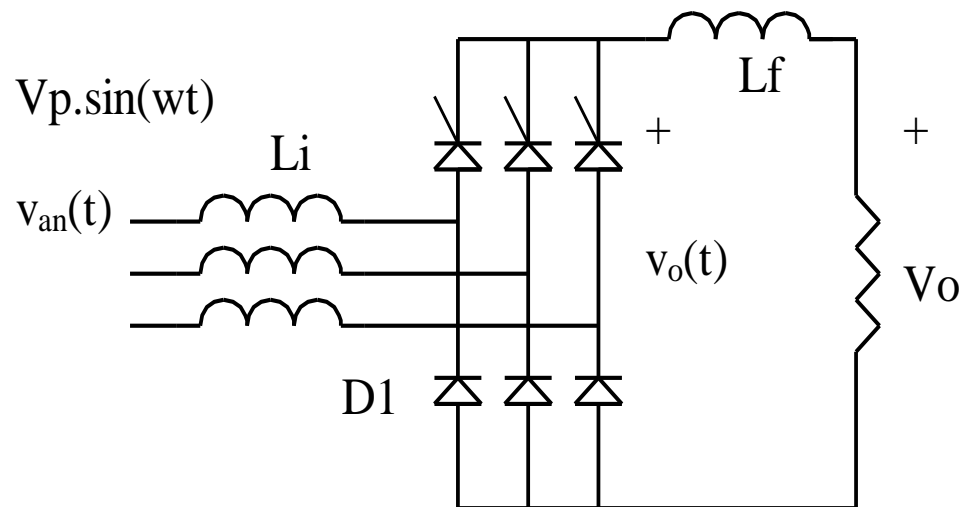
$$v_t(t) = E_g + R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{d}{dt} i_a(t)$$

Considerando apenas os valores médios da tensão terminal e da corrente de armadura, o termo relativo à sua derivada torna-se nulo, de modo que se verifica a relação entre a tensão terminal média (V_t) e a velocidade:

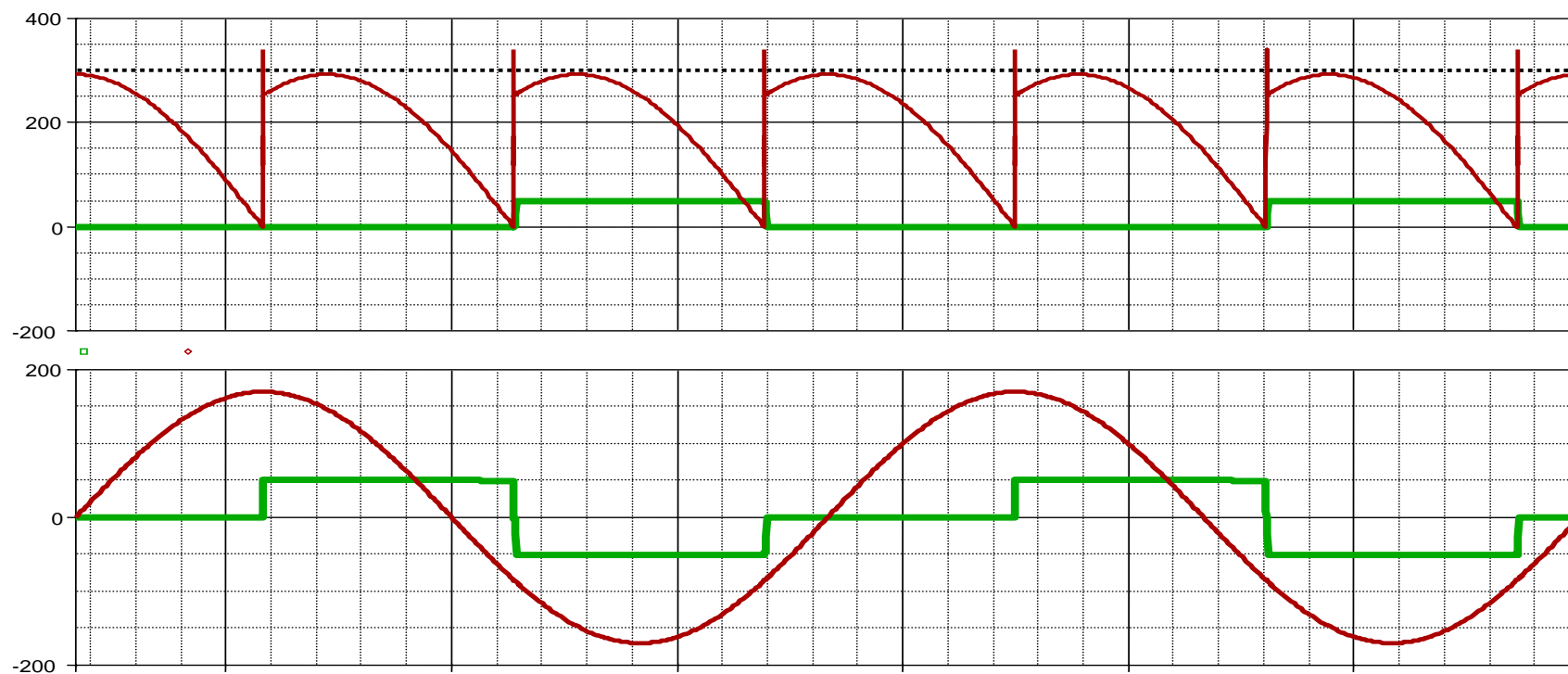
$$\omega = \frac{V_t - R_a \cdot I_a}{K \cdot \Phi}$$

Retificadores trifásicos

A configuração semicontrolada, com três diodos e três tiristores praticamente não é utilizada. A principal razão é a forma de onda da corrente CA. As comutações dos diodos independem do ângulo de disparo, pois ocorrem exclusivamente a partir destes ficarem direta ou reversamente polarizados. A forma de onda da corrente resultante na rede é assimétrica, dando origem a componentes espectrais de ordem par, o que não é desejável, por causar problemas de saturação nos elementos magnéticos da rede, principalmente transformadores.

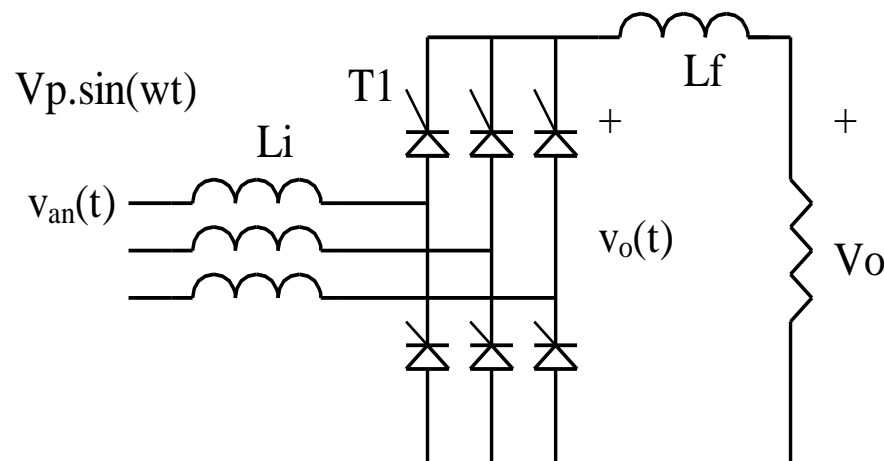


Retificador trifásico semicontrolado.



Formas de onda de retificador trifásico semicontrolado com ângulo de disparo de 60 graus
De cima para baixo: tensão instantânea no barramento CC ($v_o(t)$); Corrente no diodo D1; Tensão da fase A ($v_{an}(t)$); Corrente na fase A.

A conexão controlada apenas usa tiristores. Os pulsos de disparo entre cada tiristor da parte superior devem estar deslocados de 1/3 de ciclo, o mesmo valendo para os da parte inferior.



Retificador trifásico controlado.

O ângulo de disparo é definido a partir do ponto em que a tensão da respectiva fase se torna a maior em valor absoluto ou, o que é equivalente, quando a tensão de linha se torna positiva. Para um ângulo nulo, as formas de onda são idênticas às do retificador a diodo.

A corrente da rede apresenta apenas componentes espectrais de ordem ímpar, exceto os múltiplos da terceira, que não existem.

A tensão média no barramento CC é dada por:
$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{\text{linha}}_{\text{RMS}} \cdot \cos \alpha$$

Uma corrente no lado CC com baixa ondulação reflete para o lado CA uma onda quase quadrada, com condução de 120° a cada 180° , deslocada de um ângulo α em relação à tensão. Neste caso pode-se determinar o espectro da corrente em relação à corrente da carga, I_o . A corrente **eficaz** no lado CA é 81,6% da corrente no lado CC.

A componente fundamental é $I_{i1} = 0,78 \cdot I_o$, enquanto as harmônicas são dadas por:

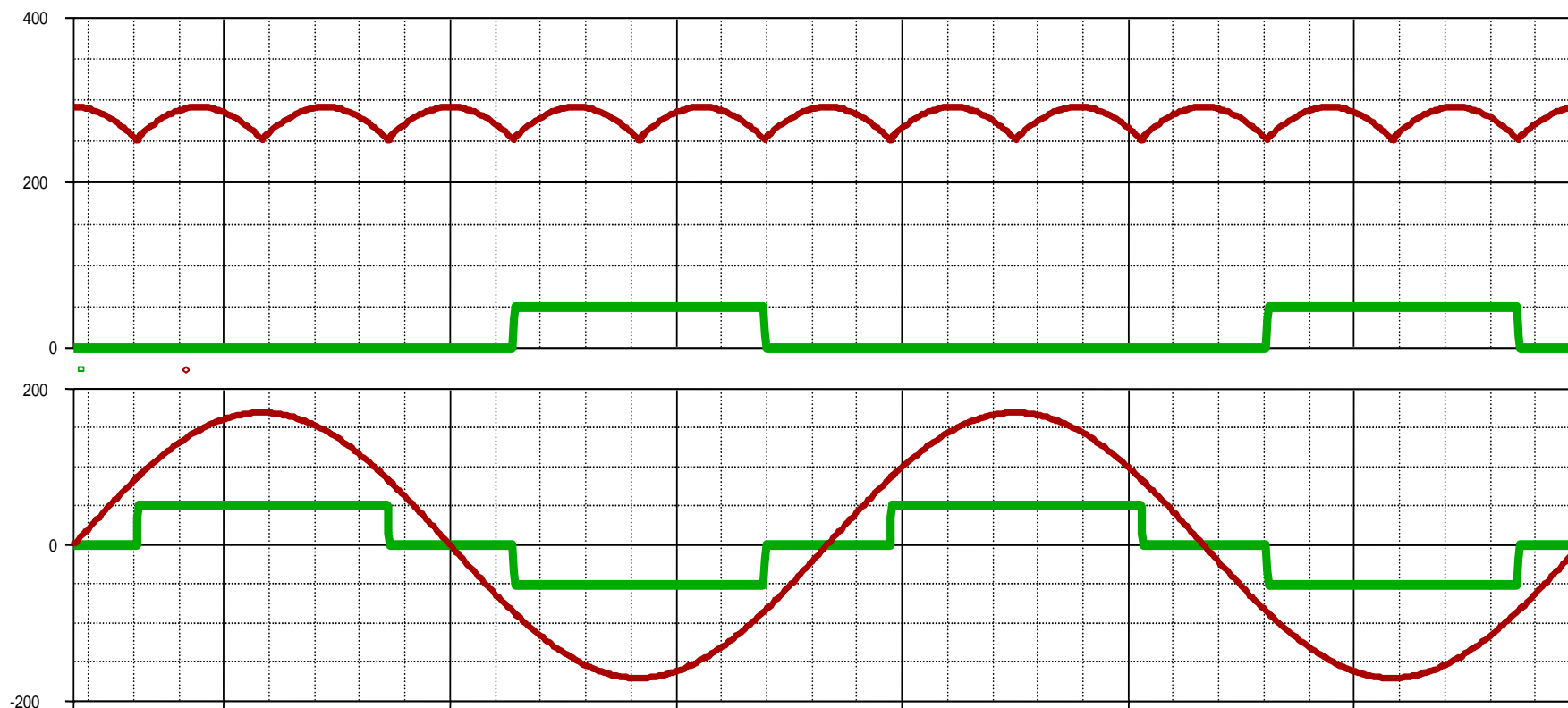
$$I_{ih} = \frac{I_{i1}}{n}, \text{ onde } n=6k\pm 1, \text{ para } k=1,2,\dots$$

Isto permite determinar que a distorção harmônica total da corrente é de 31,08%.

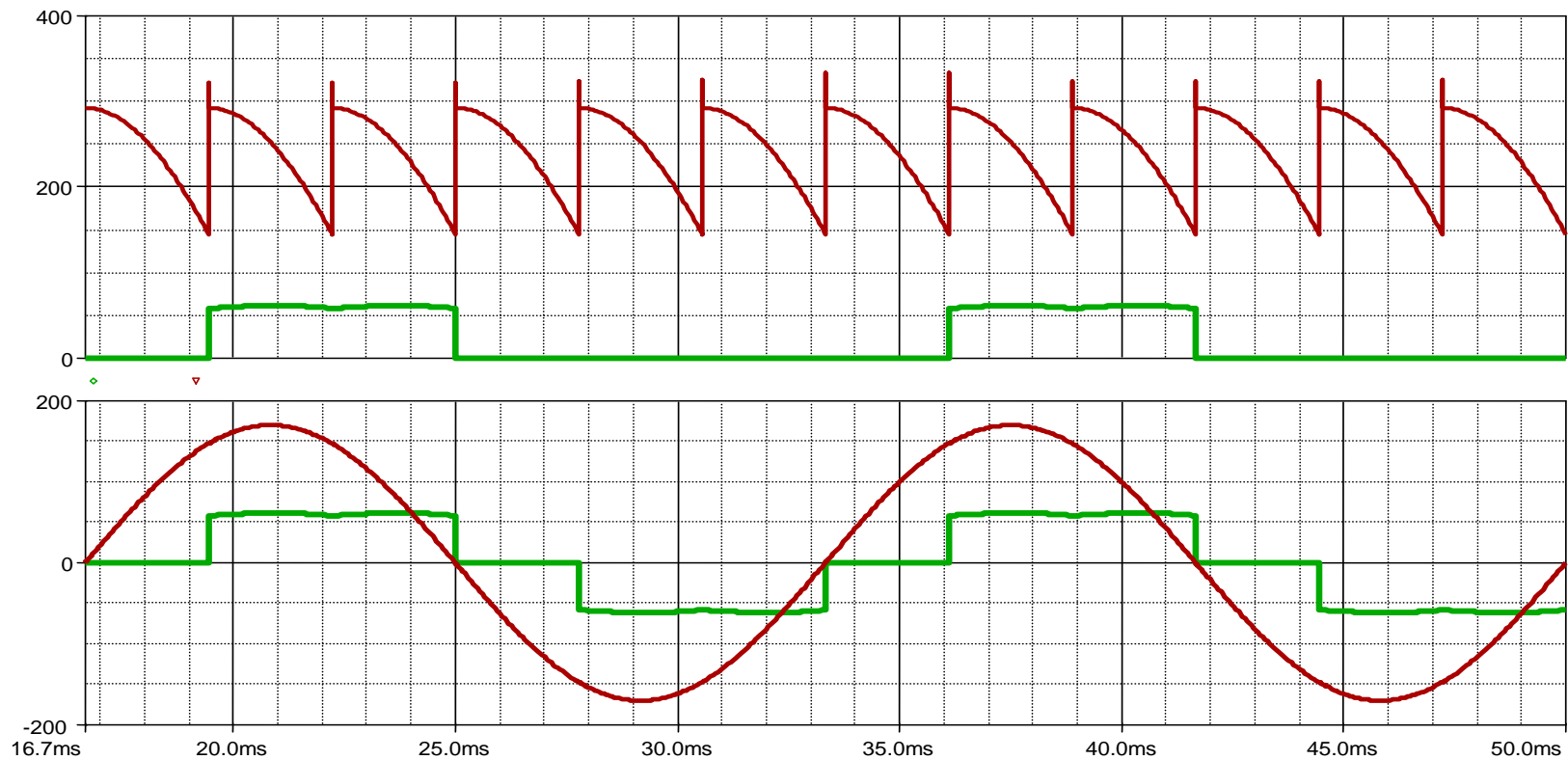
O fator de deslocamento (ângulo entre a tensão e a componente fundamental da corrente) é

igual a $(\cos \alpha)$. O fator de potência é:

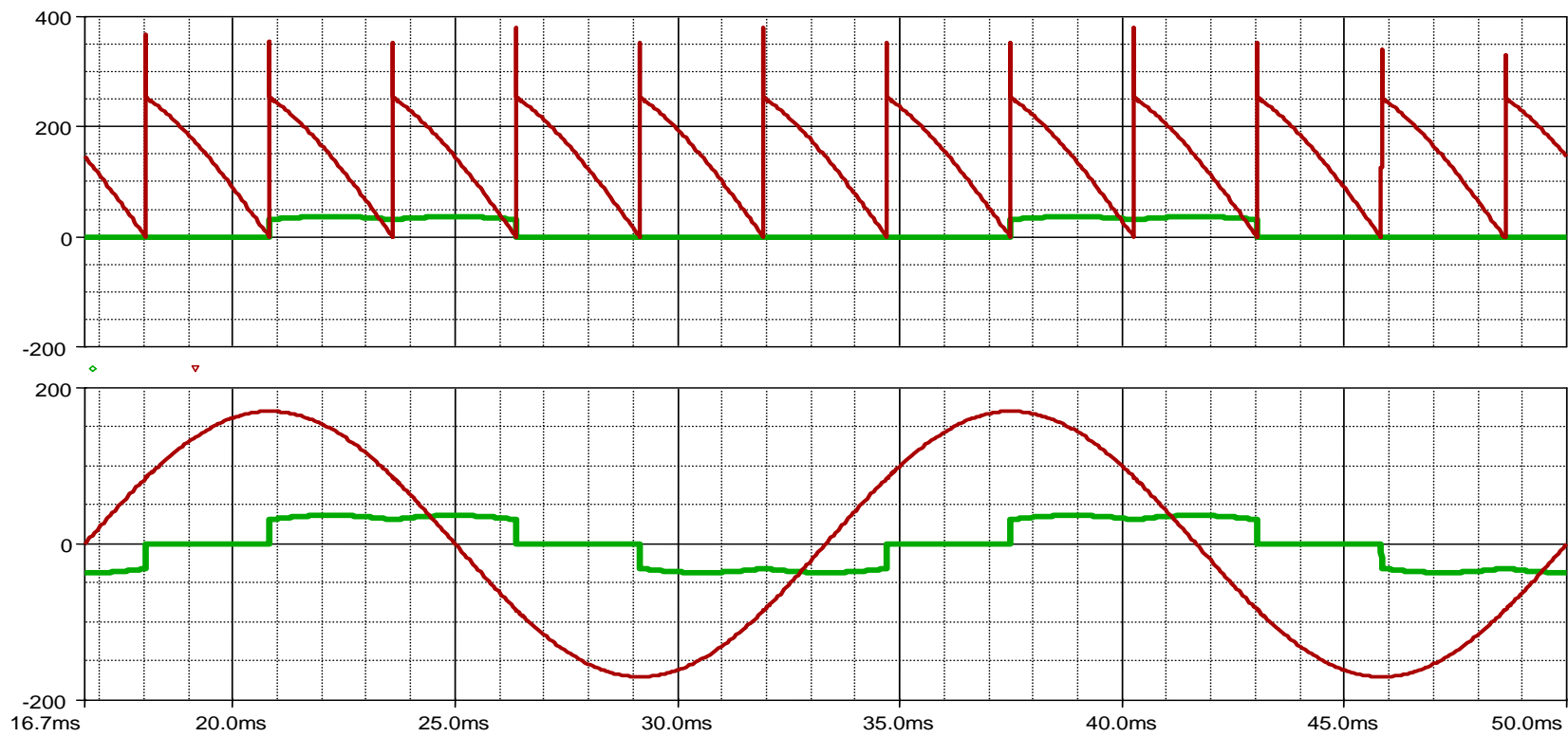
$$FP = \frac{3}{\pi} \cos \alpha$$



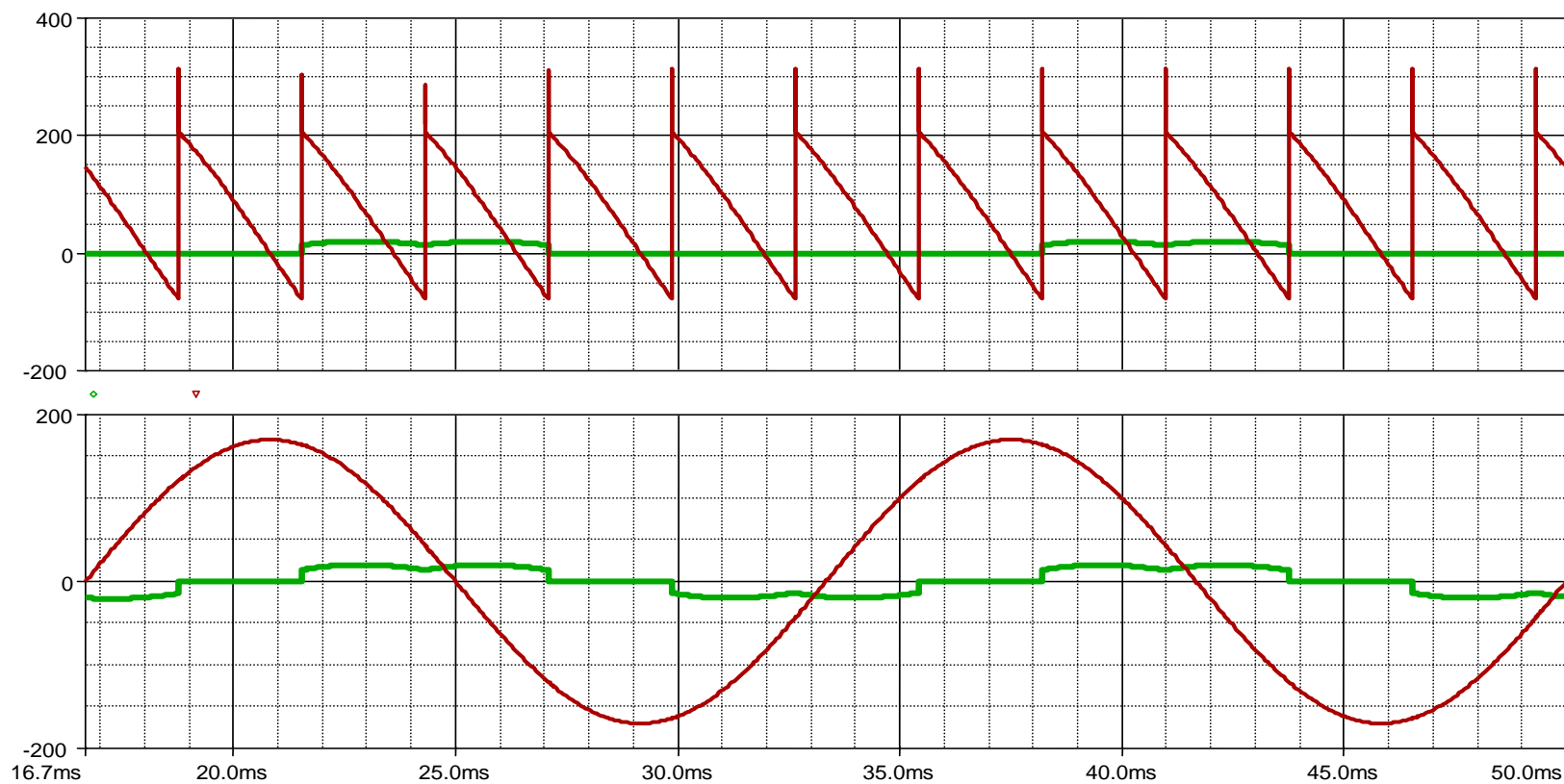
a) Ângulo de disparo: 0 graus (funcionamento como o retificador a diodos)



b) Ângulo de disparo: 30 graus



c) $\hat{\text{A}}\text{ngulo de disparo: } 60 \text{ graus}$



d) Ângulo de disparo: 75 graus

Formas de onda de retificador trifásico controlado.

De cima para baixo: tensão instantânea no barramento CC ($v_o(t)$); Corrente no tiristor T1; Tensão da fase A ($v_{an}(t)$); Corrente na fase A.

Associação de Retificadores

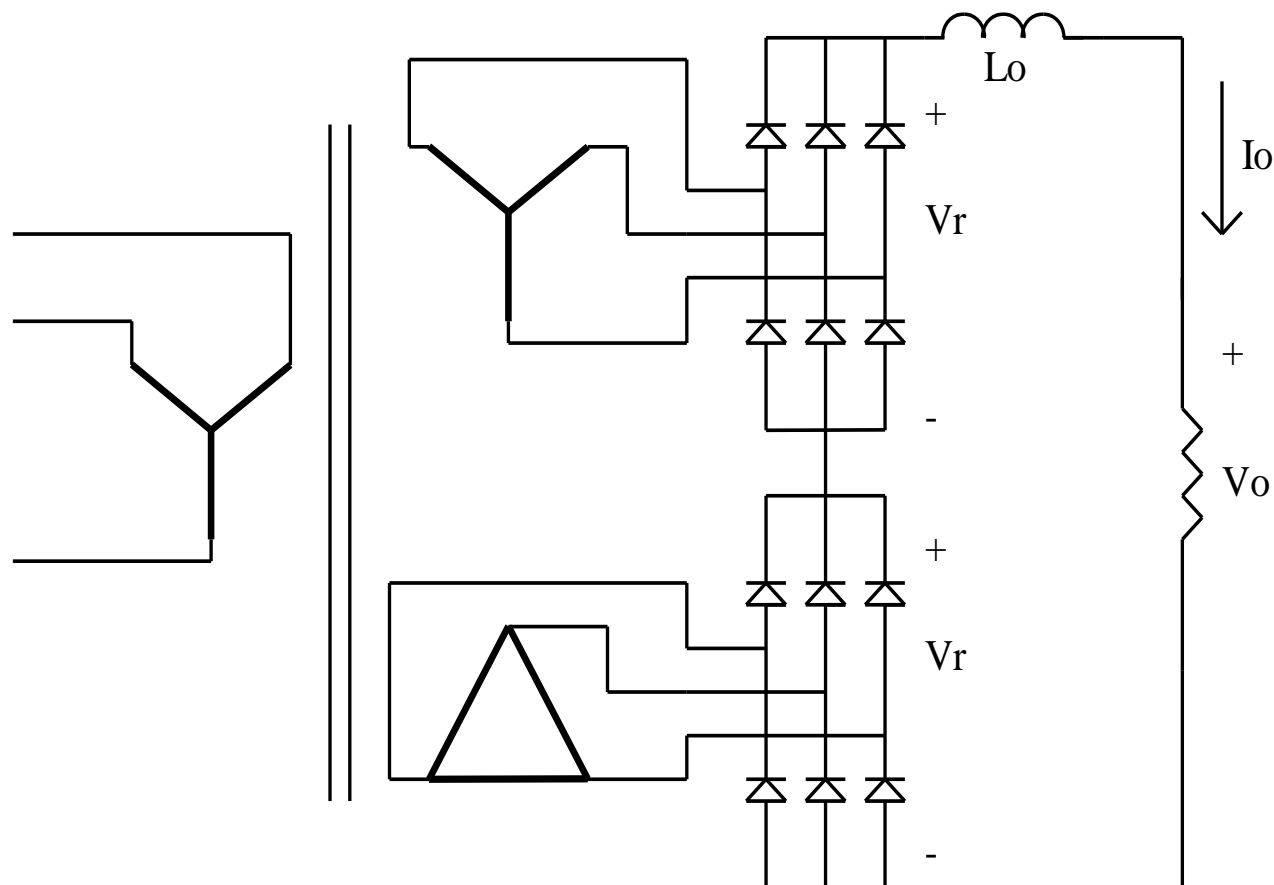
Em determinadas situações pode ser conveniente ou necessário fazer uma associação de circuitos retificadores. Isto se aplica a retificadores controlados ou não. A análise que se segue, embora tome como exemplo retificadores a diodo, pode ser estendida também para circuitos com tiristores e mistos.

São essencialmente três as situações em que são feitas associações de retificadores:

- Uma associação série é normalmente empregada em situações em que se deseja uma tensão CC de saída elevada, que não poderia ser obtida com um retificador único;
- Uma associação em paralelo é feita quando a carga exige uma corrente que não poderia ser fornecida por um único retificador;
- Em ambos os casos, para reduzir o conteúdo harmônico da corrente na rede CA.



Válvula de tiristores em sistema HVDC http://cigre.org.au/events/Web/images/HVDC_Pole_2_Valve_Hall.jpg

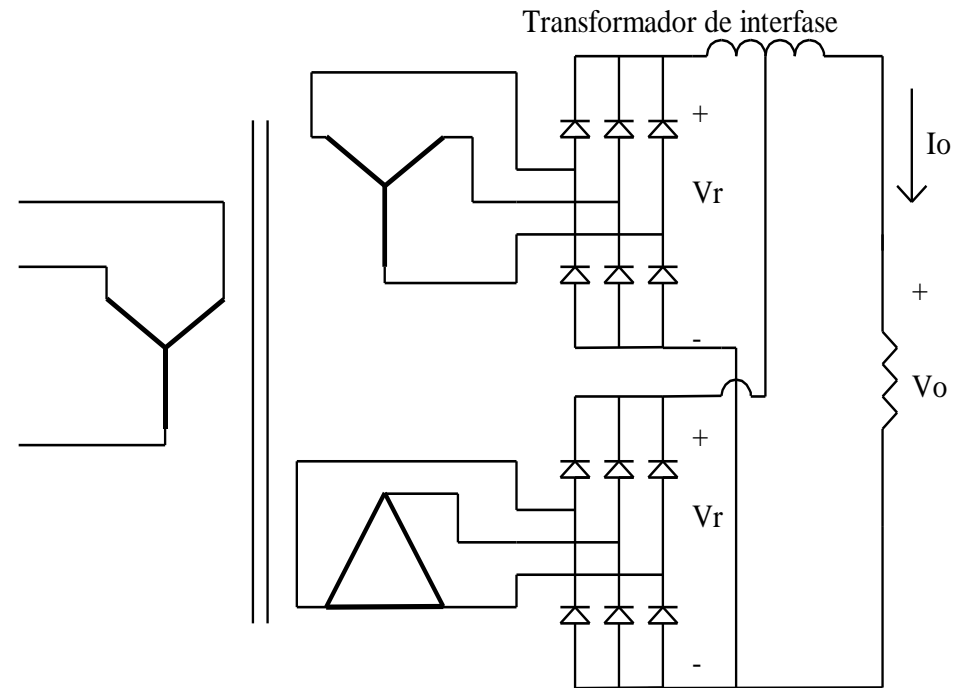


Associação em série de retificadores não controlados. Circuito de “12 pulsos”.

Notem-se em ambos os circuitos que as tensões de entrada de cada um dos retificadores devem ter defasagens adequadas com o objetivo de ter uma forma de onda da corrente de entrada com menor conteúdo harmônico.

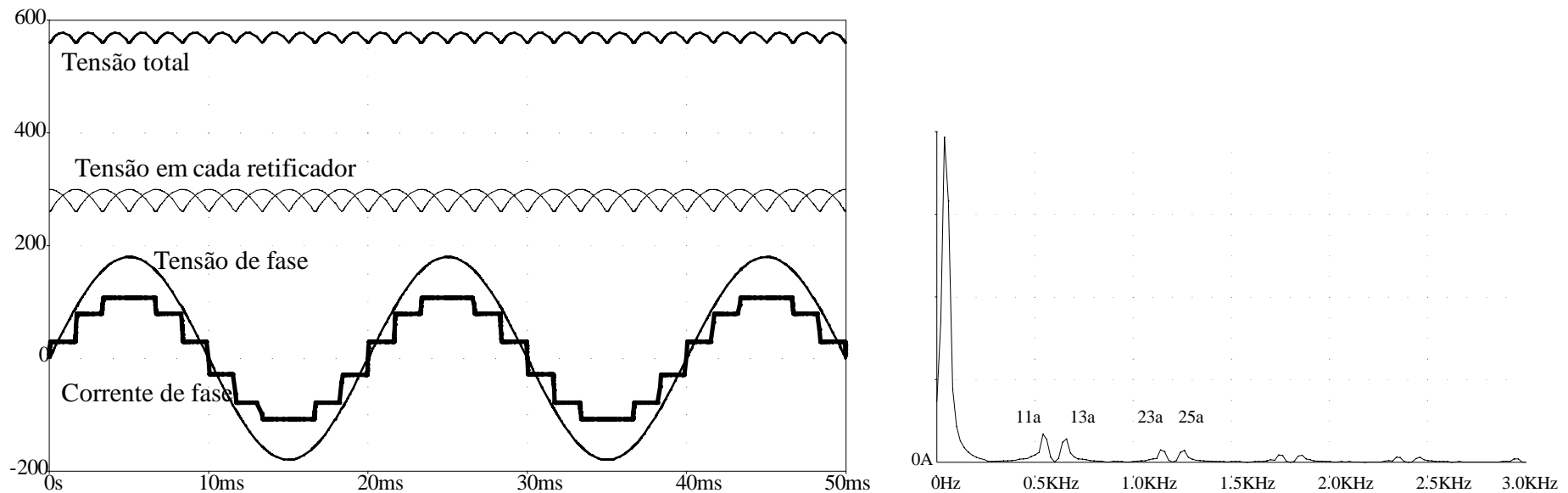
No exemplo, no qual se têm um retificador de 12 pulsos, cada um dos retificadores é alimentado por tensões de mesmo valor eficaz, mas com defasagem de 30° entre os sistemas trifásicos. Isto faz com que a corrente da rede se apresente de uma forma “multinível”. Neste caso, têm-se 6 níveis e o respectivo espectro mostra que só existem harmônicos em frequências de ordem $12k+1$, ou seja, após a fundamental, teremos as componentes de ordem 11^a , 13^a , 23^a , 25^a , e assim por diante. Obviamente, dada a ordem elevada e a amplitude reduzida, um eventual processo de filtragem exigiria elementos LC de valor reduzido, comparado com retificadores de 6 pulsos.

No circuito série, a tensão CC total apresenta uma ondulação em 720 Hz (daí o nome 12 pulsos) e uma variação pico a pico de apenas 3% do valor CC. Aqui também, uma eventual filtragem seria facilitada pela frequência elevada e pela pequena amplitude das variações.



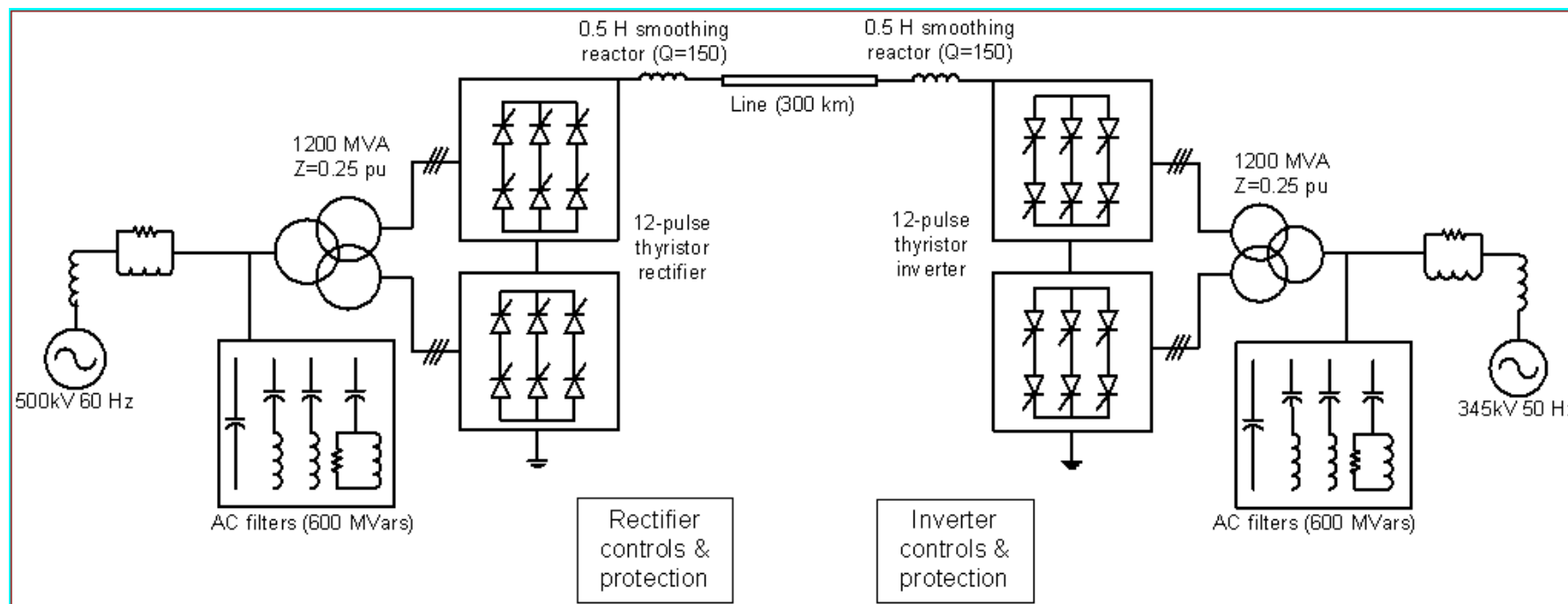
Associação em paralelo de retificadores não controlados. Circuito de “12 pulsos”.

Numa associação em paralelo, é importante que as tensões médias de ambas as pontes retificadoras sejam as mesmas. Mesmo nesta situação, faz-se uso de um indutor (ou transformador) chamado de “interfase”, sobre o qual se tem a diferença instantânea das tensões de cada um dos retificadores. A tensão média aplicada à carga será a média das duas tensões retificadas e a corrente será dividida na razão inversa das reatâncias. Caso elas sejam iguais, cada ponte fornecerá metade da corrente total.



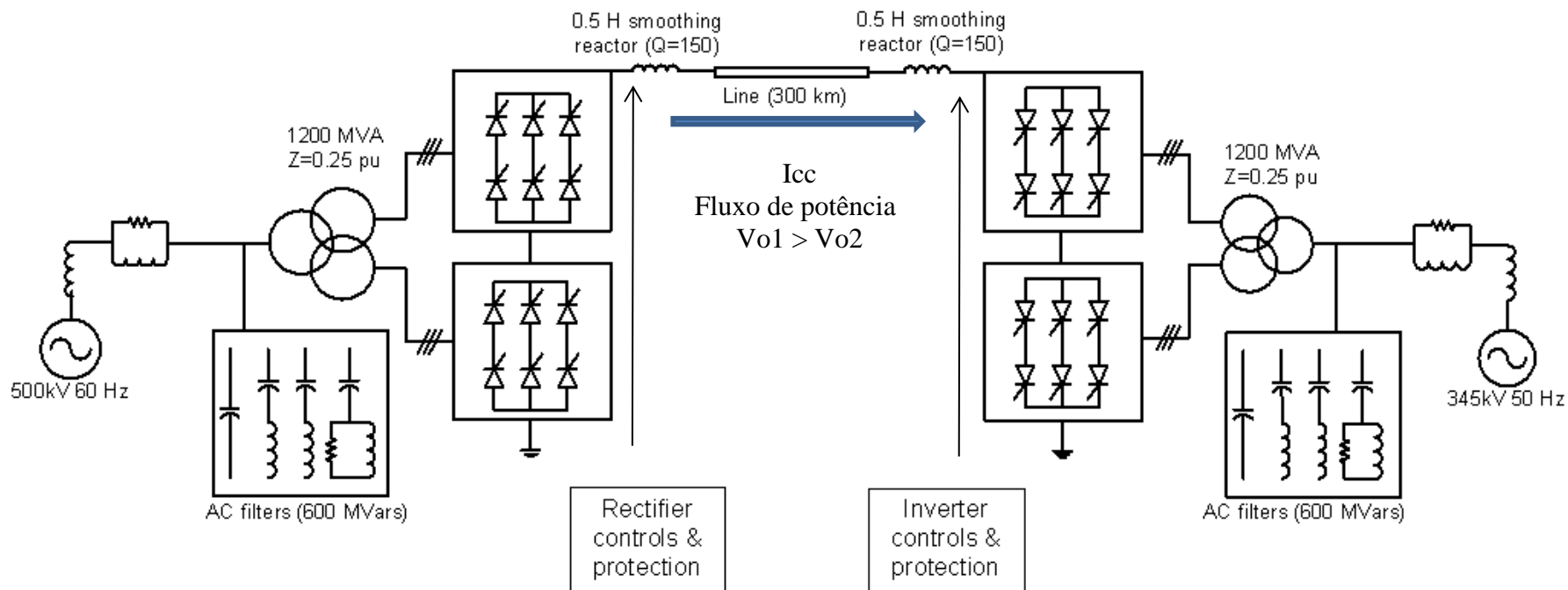
Formas de onda e espectro da corrente na rede para retificador de 12 pulsos.

Um caso típico de aplicação da associação em série de retificadores é na transmissão de energia em corrente contínua, em alta tensão (HVDC), como é o caso da linha CC que conecta Foz do Iguaçu a São Roque (SP), trazendo a energia do Paraguai (produzida em 50 Hz). O sistema opera, via dois cabos, alimentados em +/- 600 kV, transmitindo uma potência de 6000 MW. Neste caso têm-se retificadores controlados, permitindo o controle do fluxo de potência ativa, incluindo a absorção/fornecimento de reativos.



Esquema de sistema de transmissão HVDC

<http://www.emrwebsite.org/uploads/images/EMR06/images/img-lec-belanger-1.gif>



$$V_{o1} = 2 \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{linhaRMS1} \cos(\alpha), 0 < \alpha < 90^\circ$$

$$V_{o2} = 2 \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{linhaRMS2} \cos(\alpha), 90^\circ < \alpha < 180^\circ$$

$$I_{cc} = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{R_{linha}}$$