

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO



Sumário

Unidade 1 | Introdução aos sistemas elétricos de potência (SEP)

Seção - 1.1 O sistema elétrico de potência (SEP)

Seção - 1.2 Equipamentos elétricos utilizados em SEP

Seção - 1.3 Subestações de energia

Unidade 2 | Análise do sistema elétrico de potência

Seção - 2.1 Sistema por unidade (PU)

Seção - 2.2 Geradores e cargas utilizados em SEP

Seção - 2.3 Introdução ao fluxo de potência



Sumário

Unidade 3 | Sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC)

Seção 3.1 - Introdução aos sistemas de transmissão em corrente contínua

Seção 3.2 - Sistemas HVDC com elo de corrente

Seção 3.3 - Sistemas HVDC com elo de tensão

Unidade 4 | Automação dos sistemas de distribuição de energia

Seção 4.1 - Motivações para a automação do sistema de distribuição de energia

Seção 4.2 - Monitoramento das redes de distribuição

Seção 4.3 - O sistema de gerenciamento da distribuição e suas funções

SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: Consultoria
para sistema de
transmissão



Situação Problema

- ▶ **Você:** consultor de planejamento de sistemas de transmissão.
- ▶ **Desafio:** licitação para LT maior que 700 km conectando dois sistemas CA.
- ▶ **Complicações** ambientais (direitos);
- ▶ **Instabilidade;**
- ▶ **Alta radiointerferência**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

**Qual tecnologia
utilizar?**

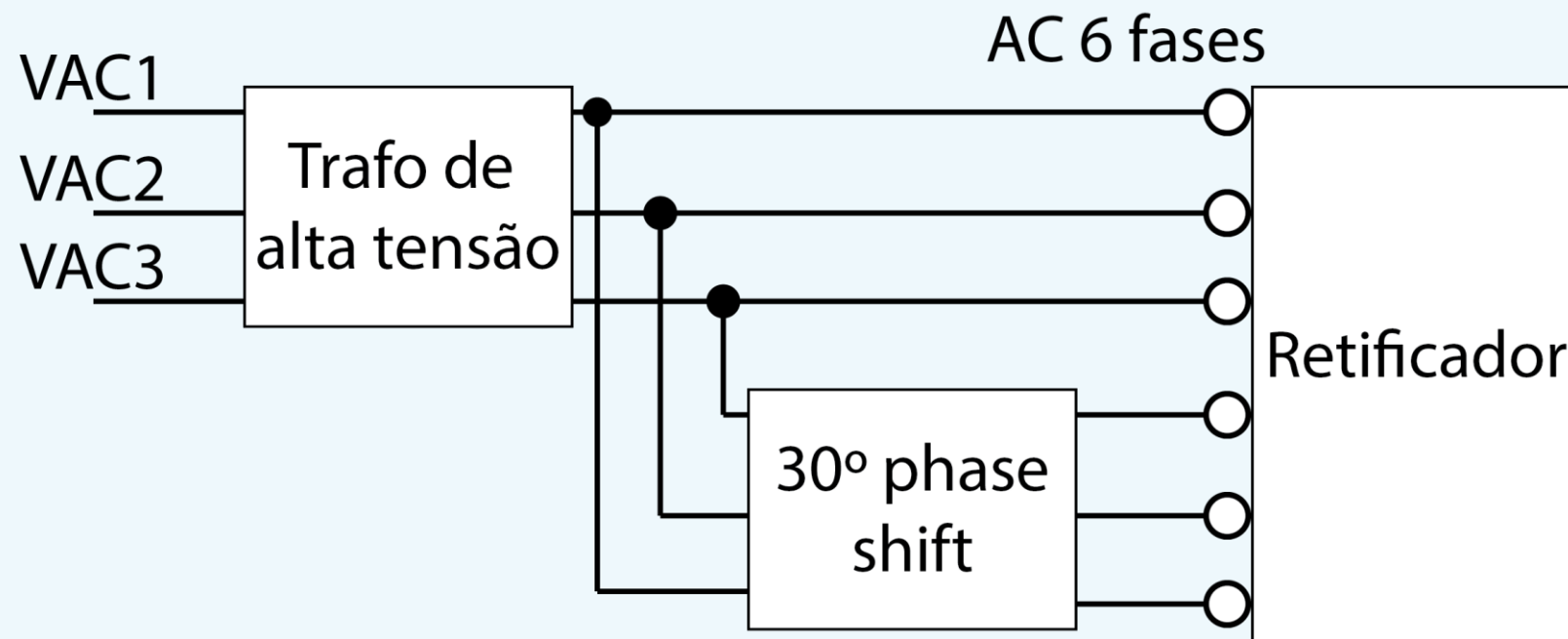


Resolução da SP

- ▶ Utilizar HVDC
 - Boa para transmissão de grandes potências;
 - Economia em cabeamento e torres de sustentação;
 - Grandes distâncias -> CA oferece muitas perdas
 - CA -> necessidade de manipulações intermediárias;
 - HVDC: menos susceptível a radiointerferências;
 - Baixas perdas por efeito corona



Resolução da SP



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

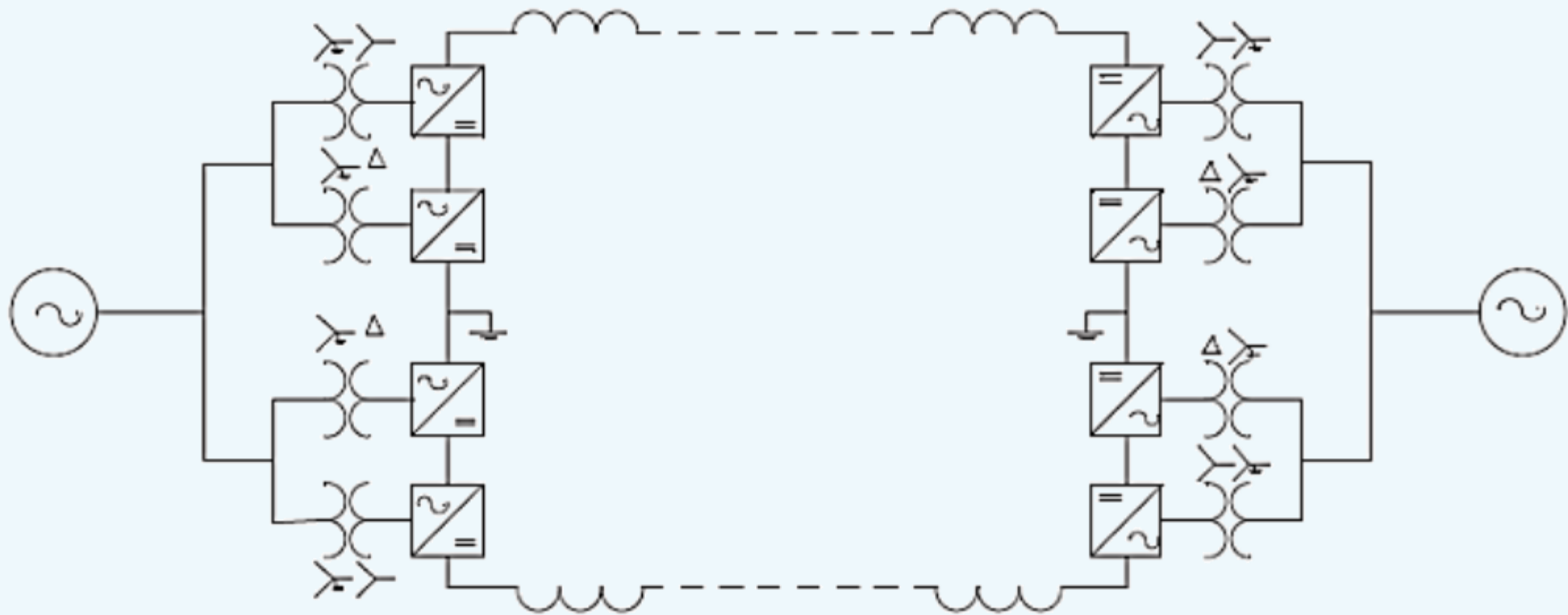
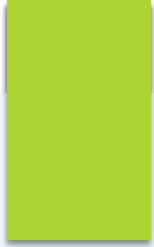
CONCEITOS

HVDC com elo de corrente



HVDC convencional

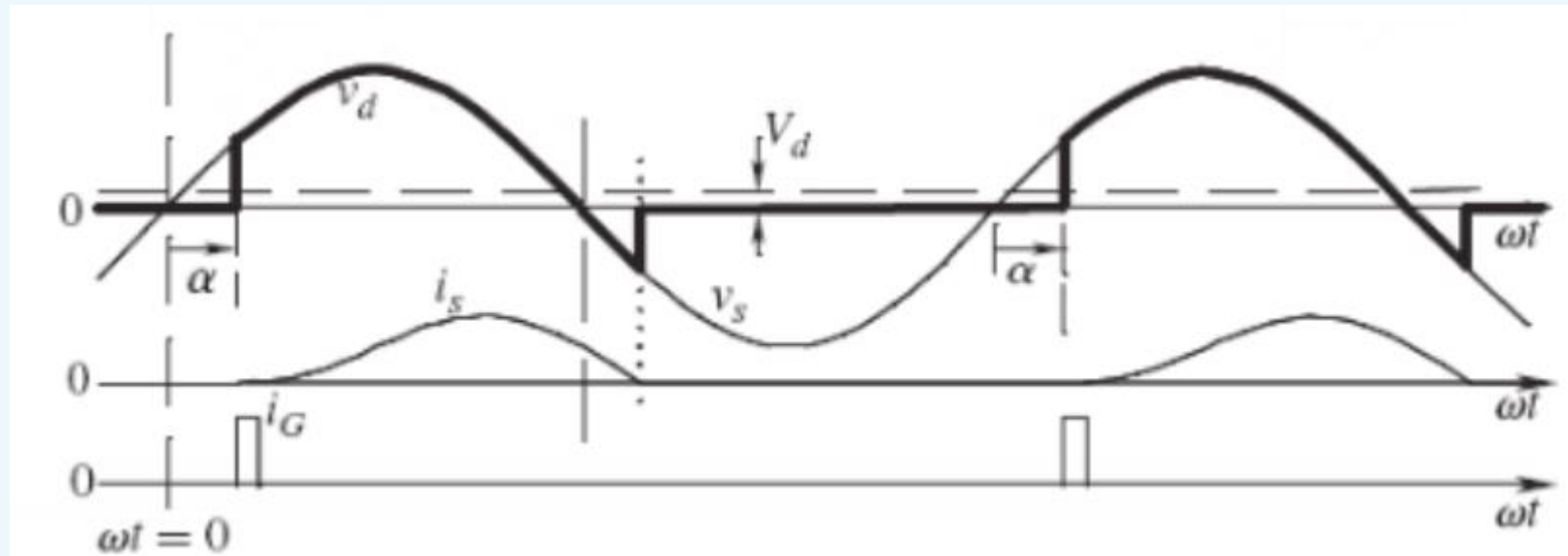
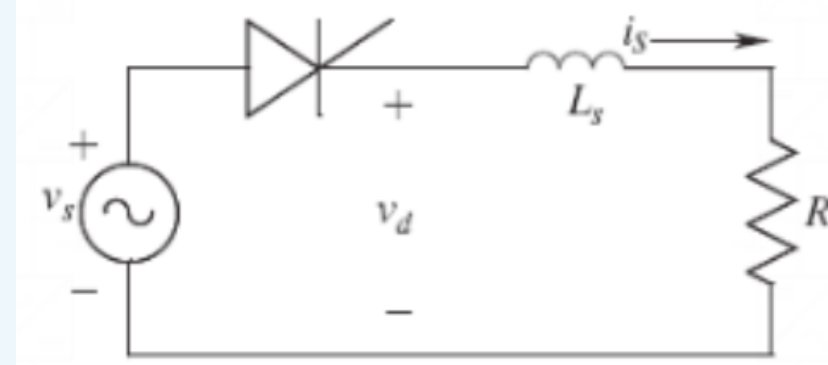
- Uso de válvulas tiristorizadas (controle do acionamento);
- Requerem fonte de tensão síncrona para operar
- Considerar um arranjo de dois polos (positivo e negativo);
- Cada polo tem dois conversores tiristorizados;
- Uso de trafos Y-Y e Y-D -> defasagem de 30° .
- Indutância extra na linha para reduzir variações de corrente;



Fonte: MOHAN, 2016.



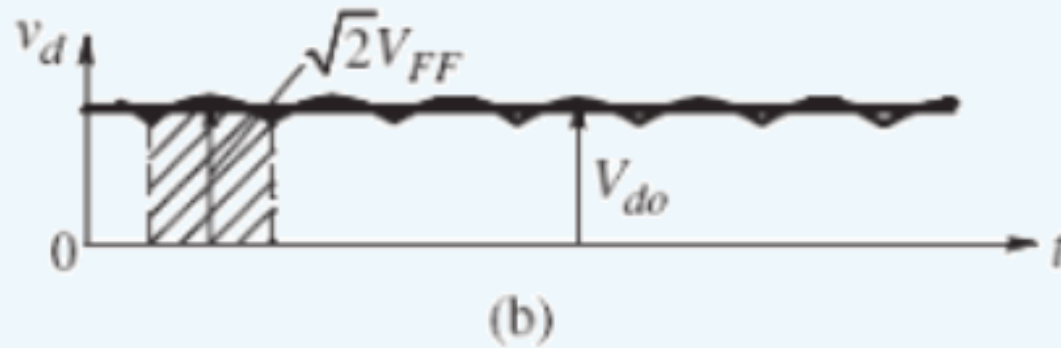
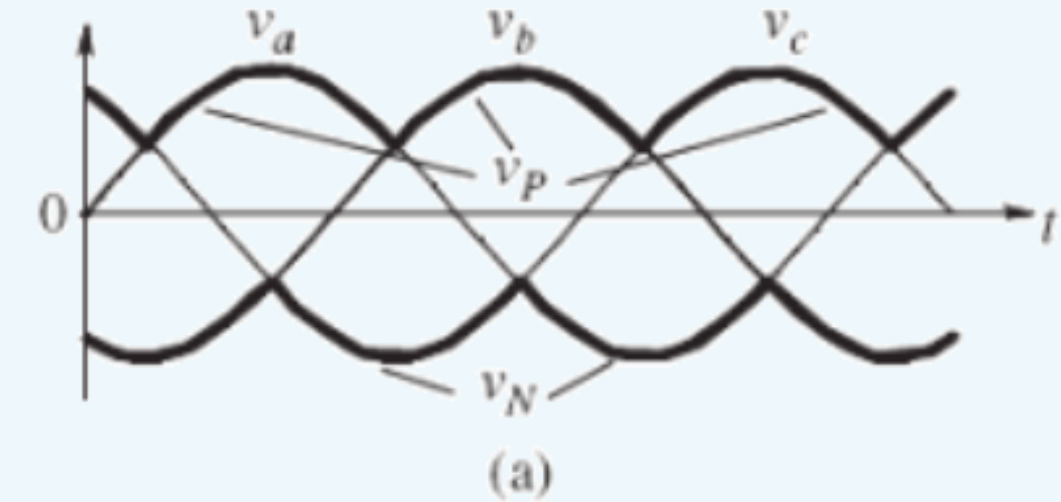
Operação básica do tiristor



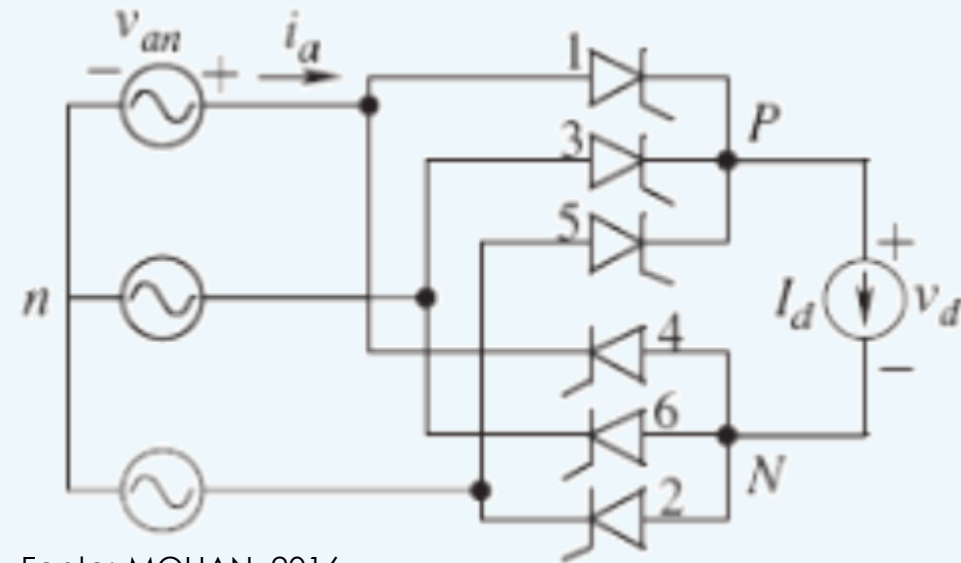
Fonte: MOHAN, 2016.



HVDC: retificador de onda completa



$$v_d = v_{Pn} - v_{Nn}$$



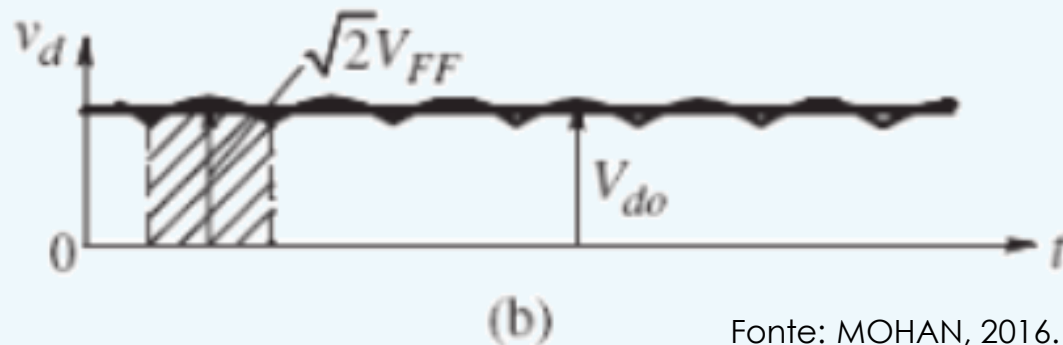
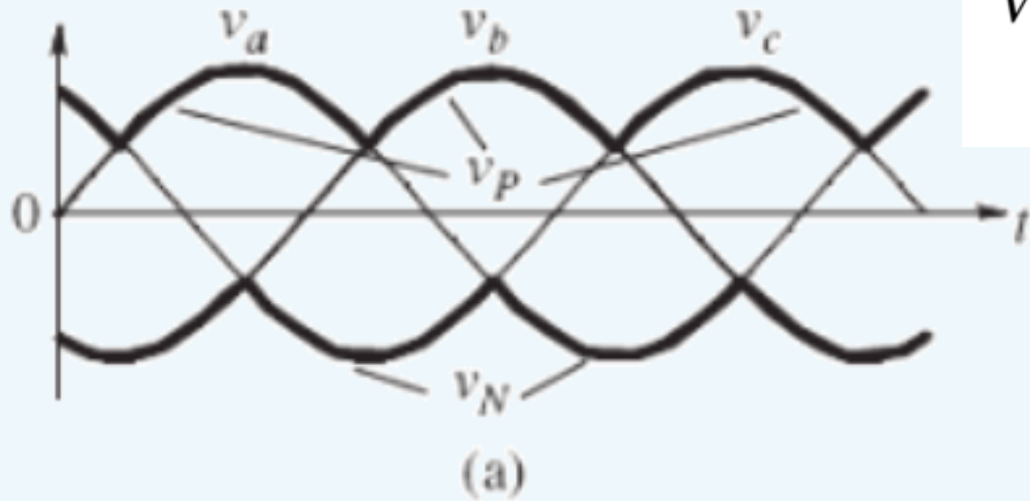
Fonte: MOHAN, 2016.



HVDC: retificador de onda completa

► Tensão CC média:

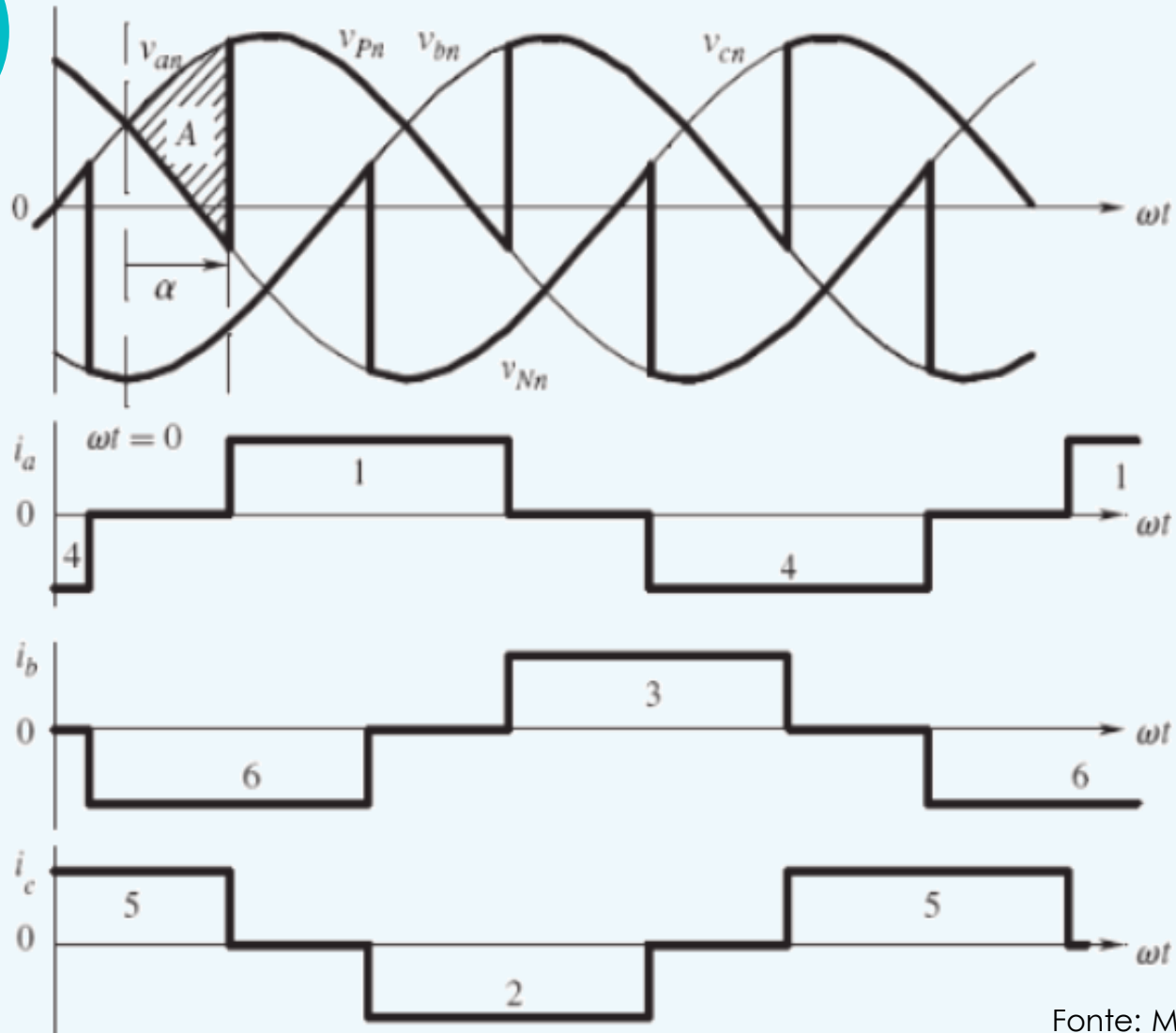
$$V_{d0} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{FF} \cos \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{FF}$$



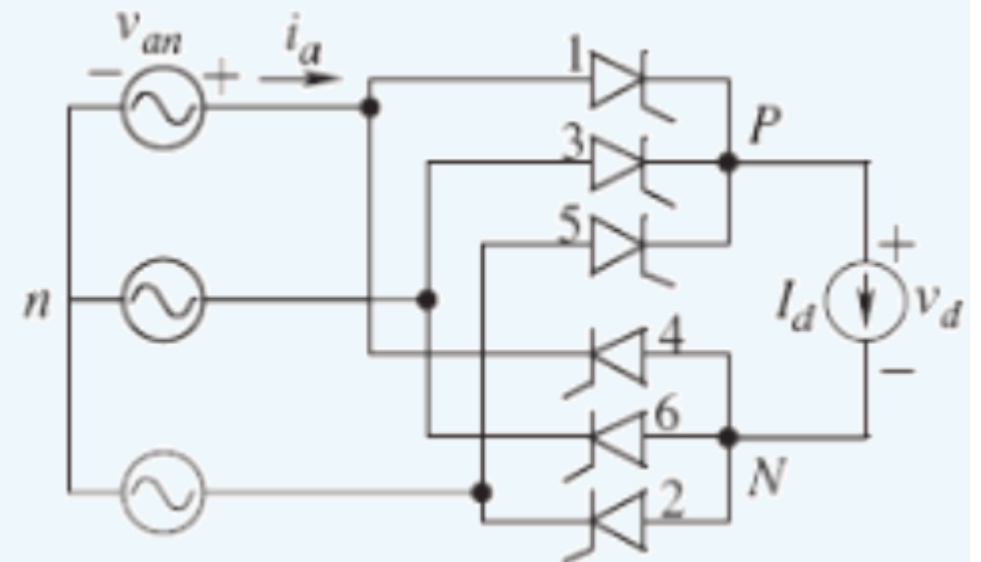
Fonte: MOHAN, 2016.

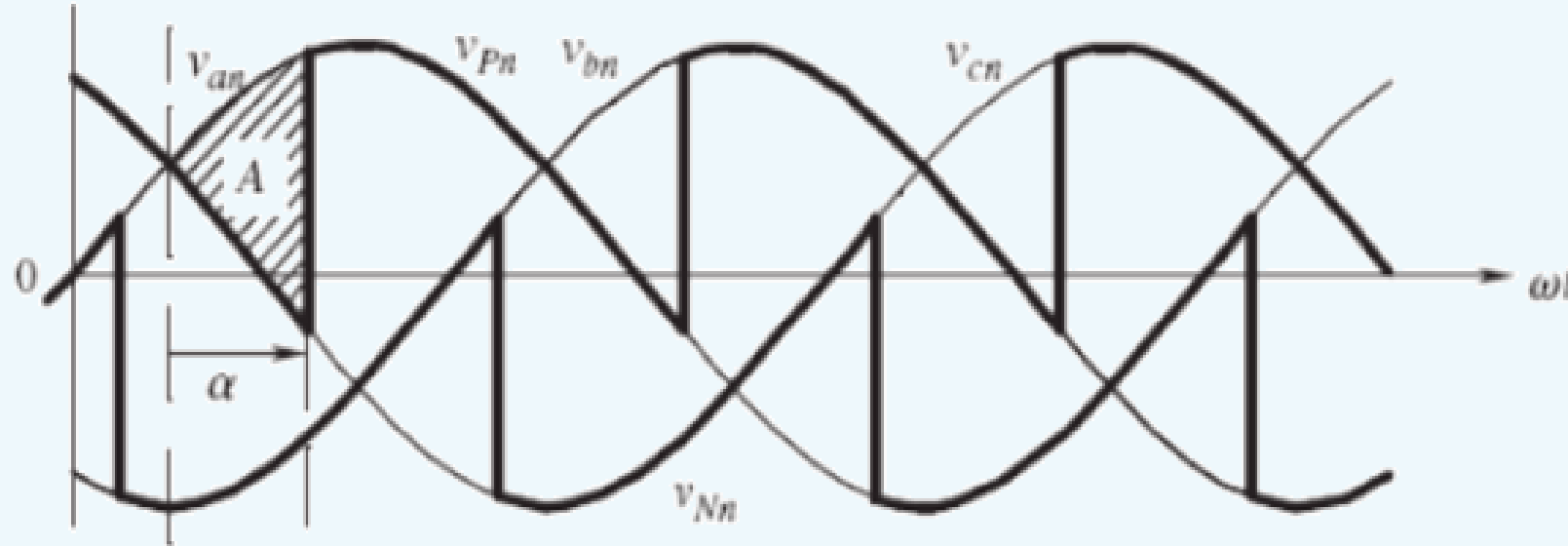
CONCEITOS

HVDC com elo de
corrente e atraso no
disparo



Fonte: MOHAN, 2016.





► Perda por atraso de chaveamento:

► Tensão fase-fase é $\sqrt{2}V_{FF} \sin \omega t$. Então a queda é:

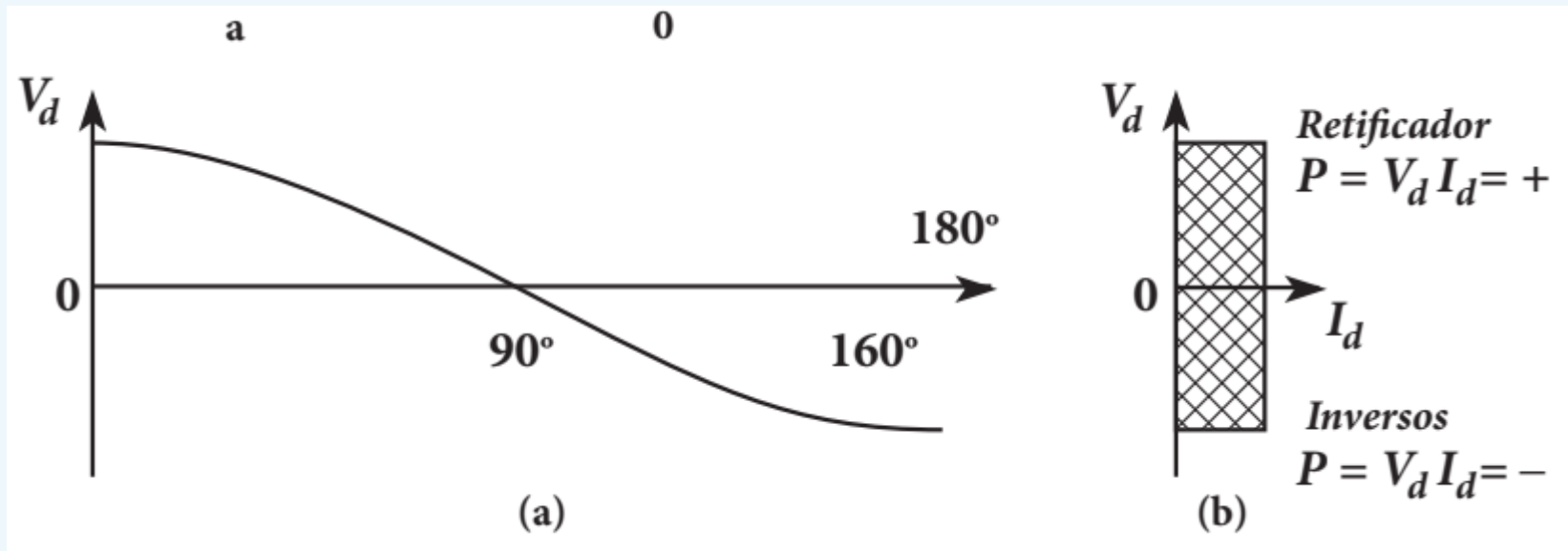
$$\Delta V_{\alpha} = \frac{1}{\pi/3} \underbrace{\int_0^{\alpha} \sqrt{2}V_{FF} \sin \omega t \cdot d(\omega t)}_{A_{\alpha}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{FF} (1 - \cos \alpha)$$

Fonte: MOHAN, 2016.



$$V_{d\alpha} = V_{d0} - \Delta V_{\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{FF} (\cos \alpha)$$

O valor médio da tensão CC é controlado pelo ângulo de disparo!



Fonte: MOHAN, 2016.

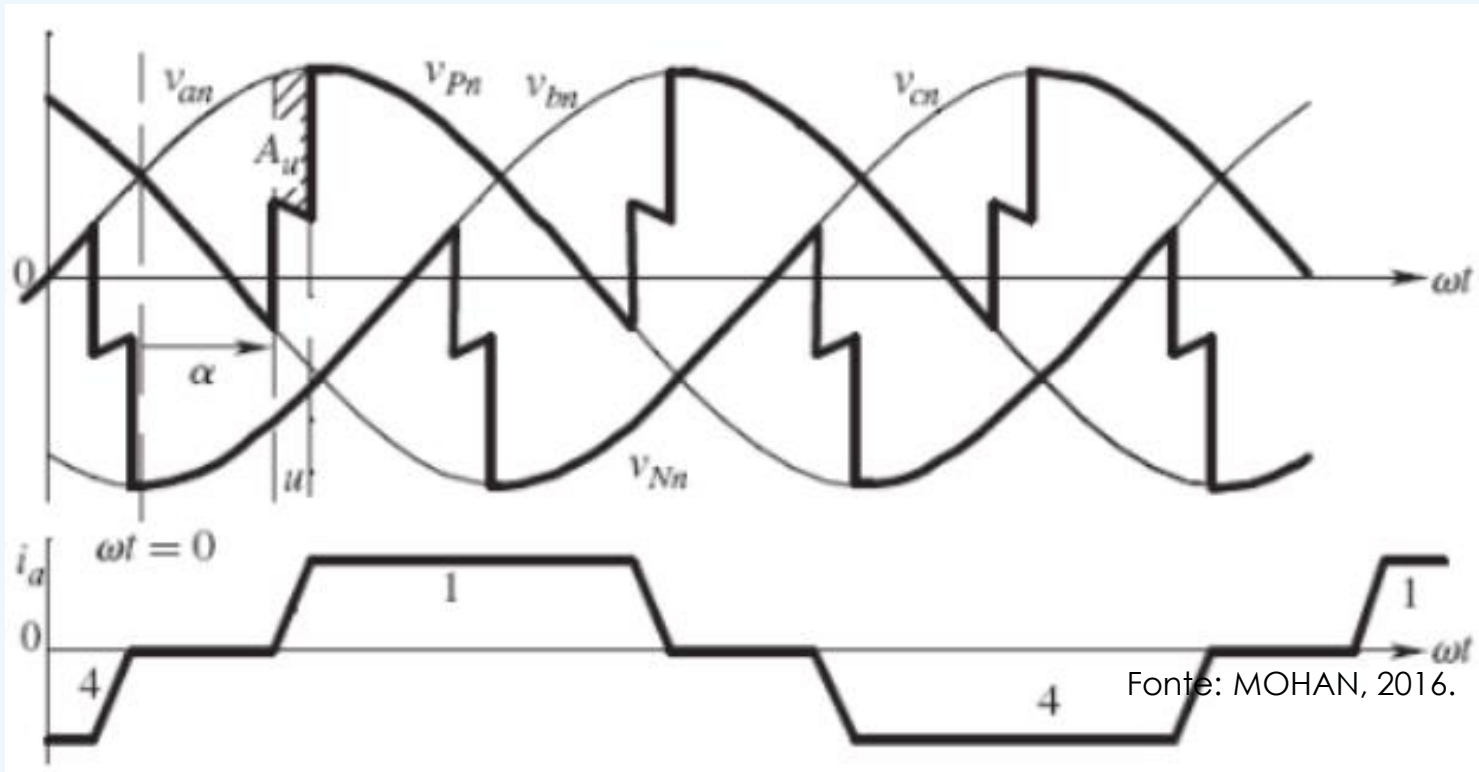


- Se o ângulo de comutação do tiristor for muito grande, ele pode exceder 180 graus. No entanto, acima desse valor, a polaridade se inverte e a comutação não ocorre corretamente. Assim, com a finalidade de se evitar falha de comutação, o ângulo é limitado a 160 graus mais ou menos.



Atraso em casos não ideais

- Indutância do enlace $\neq 0 \rightarrow$ comutação não instantânea



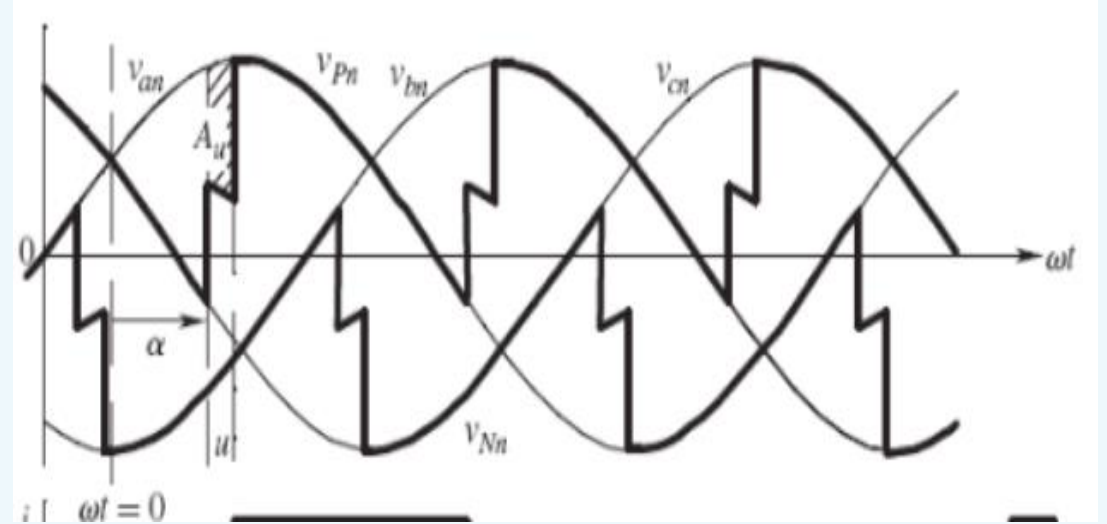
Fonte: MOHAN, 2016.



Atraso em casos não ideais

- Queda de tensão adicional

$$\Delta V_u = \frac{A_u}{\pi/3} = \frac{3}{\pi} \omega L_s I_d$$



Fonte: MOHAN, 2016.

- A tensão de saída deve considerar esse efeito:

$$V_d = V_{d\alpha} - \Delta V_u$$

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{FF} \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} \omega L_s I_d$$

SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: consultoria
para sistema de
transmissão



Situação Problema

- ▶ **Você:** consultor de planejamento de sistemas de transmissão.
- ▶ **Desafio:** licitação para LT maior que 700 km conectando dois sistemas CA.
- ▶ **Utilização de HVDC**

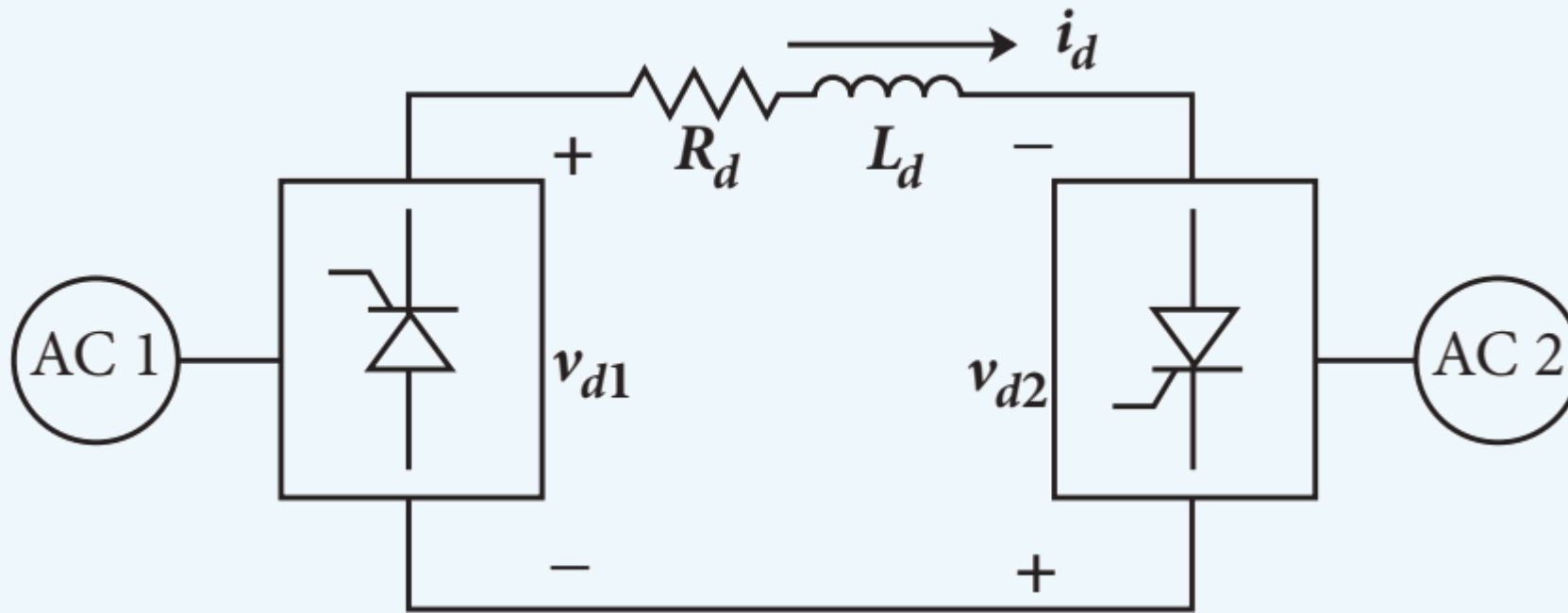
**Qual conversor
utilizar? Como fazer o
controle?**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)



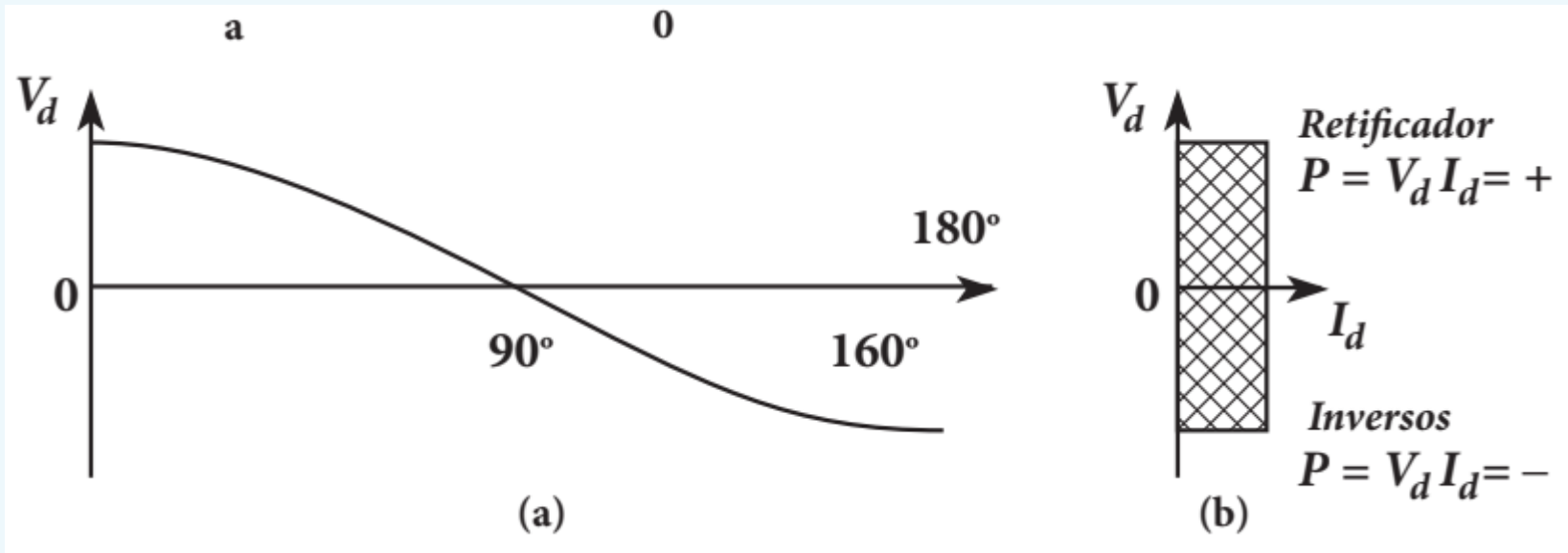
SP: resolução



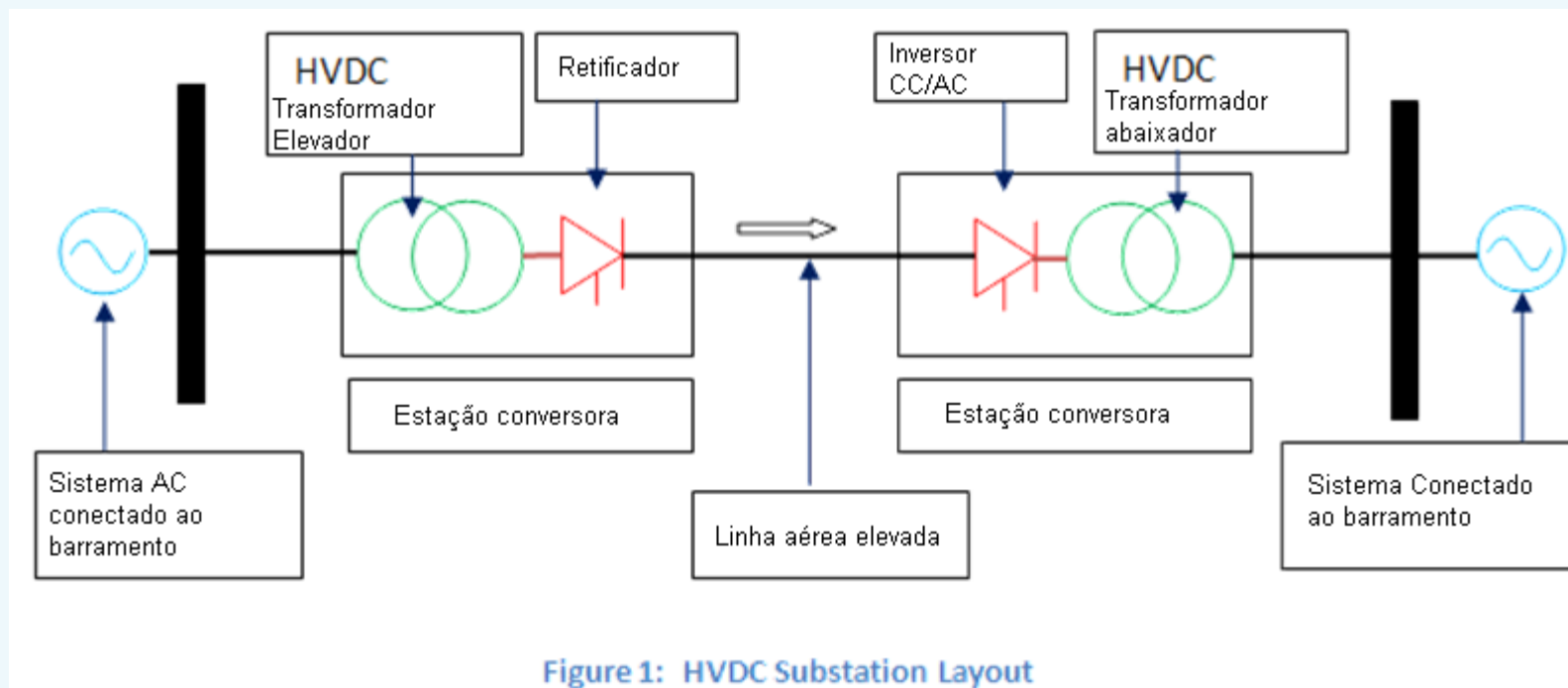
Fonte: MOHAN, 2016.



► Limite de ângulo: 160° -> Operação segura dos tiristores



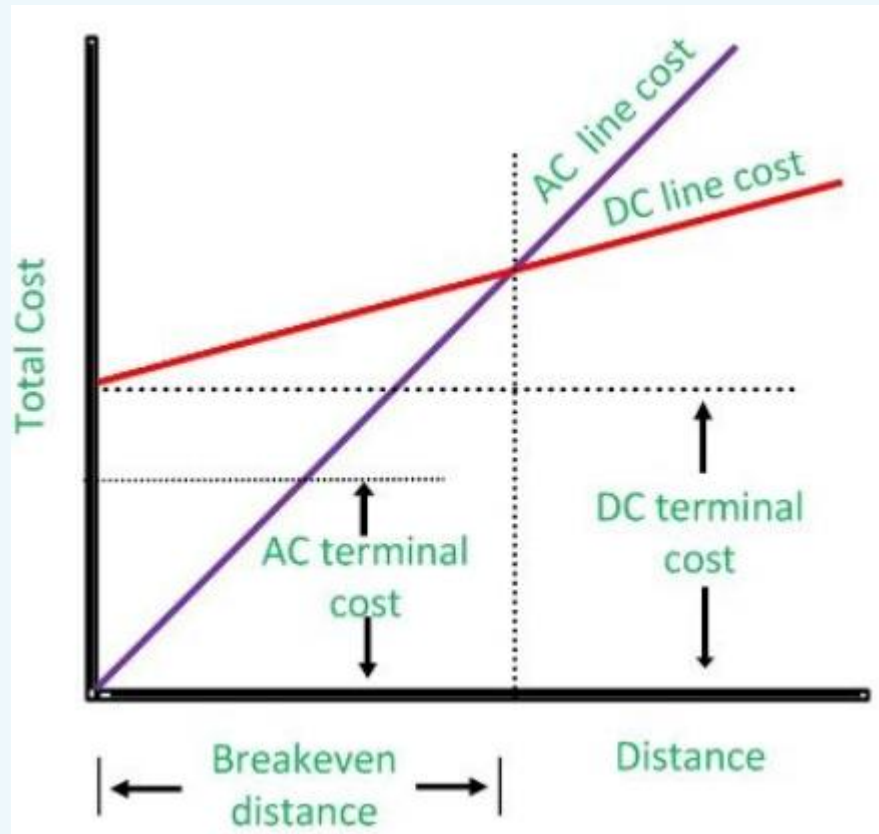
Fonte: MOHAN, 2016.



Fonte: <https://images.app.goo.gl/L1moPszUsRc8tJC7>

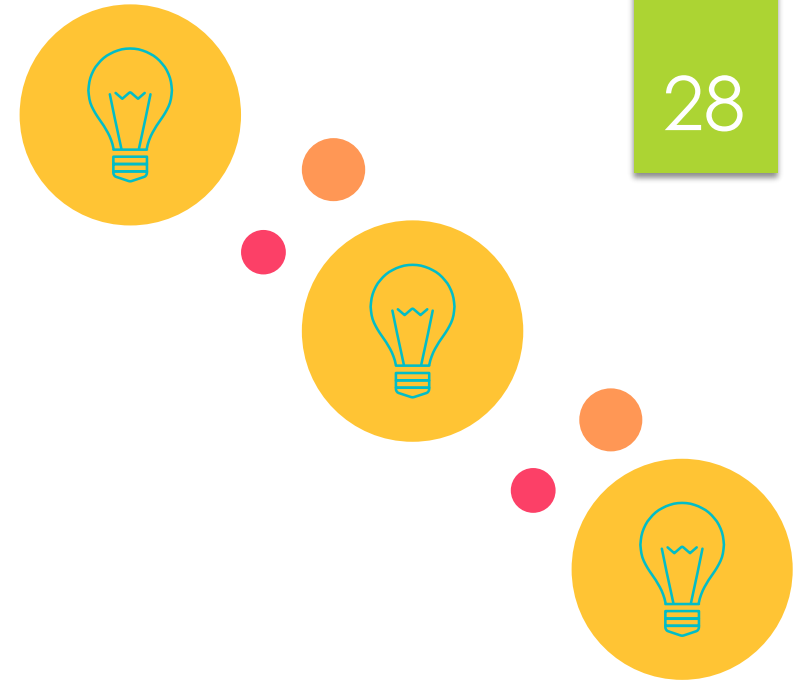


Comparação de custo AC vs. HVDC



Fonte: <https://bit.ly/2RKhTon>

EXERCÍCIOS





- Os sistemas HVDC consistem em sistemas de transmissão no qual a energia é transmitida em corrente contínua. Os sistemas HVDC convencionais empregam a tecnologia utilizando conversores CA/CC, chamadas de comutação por linha ou ainda, HVDC com elo de corrente.

Com relação a esses sistemas, assinale a alternativa correta.

- a) Os sistemas bipolares são construídos geralmente empregando conversores utilizando transistores
- b) Os conversores de 12 pulsos são compostos por dois conversores de 6 pulsos devidamente conectados com transformadores Y-Y para garantir a defasagem de 30 graus.
- c) O controle do conversor é realizado pelo disparo na porta do tiristor, sendo que, se o ângulo de disparo for maior que 90 graus, o conversor opera como retificador.
- d) O controle do conversor é realizado pelo disparo na porta do tiristor, sendo que, se o ângulo de disparo for menor que 90 graus, o conversor opera como retificador.
- e) O ângulo de disparo normalmente é limitado a 180 graus para garantir a correta comutação do tiristor.



- Em um tiristor atuando em um conversor monofásico, se ajustarmos o ângulo de disparo para zero, teremos a operação idêntica à de um diodo em um retificador de meia onda. Assim, durante o semiciclo positivo, o tiristor irá conduzir e, de forma semelhante, irá interromper a passagem de corrente no semiciclo negativo.

Se um conversor trifásico a tiristor em um sistema HVDC está operando com um ângulo de disparo de 45 graus, ele está operando como:

- a) Um inversor.
- b) Um retificador.
- c) Um inversor de frequência.
- d) Um motor trifásico.
- e) Um conversor analógico-digital.



- Considerando os sistemas HVDC com elo de corrente, se o ângulo de comutação do _____ for muito grande, ele pode exceder _____, no entanto acima desse valor a polaridade se inverte e a comutação _____. Assim, com a finalidade de _____ na comutação, o ângulo é limitado a _____.

Assinale a alternativa correta:

- a) Tiristor - 160 graus - não ocorre corretamente – evitar falha – 180 graus.
- b) Tiristor - 180 graus - não ocorre corretamente – evitar falha – 160 graus.
- c) Tiristor - 180 graus - ocorre corretamente – forçar melhorias – 160 graus.
- d) Transistor - 160 graus - ocorre corretamente – forçar melhorias – 180 graus.
- e) Transistor - 160 graus - não ocorre corretamente – evitar falha – 180 graus.



- Em aplicações como projetos de linhas de transmissão em corrente contínua, os conversores têm um papel importante na qualidade da energia entregue nas pontas, pois devem apresentar alta eficiência e baixa ondulação na tensão de saída. Uma das alternativas para atingir esses resultados é muito utilizada em projetos de transmissão em corrente contínua é a associação de retificadores.

Considerando as informações apresentadas, analise a seguir as afirmativas sobre associação de retificadores:

- I. Reduz a ondulação da tensão e da corrente de saída;
- II. Permite a divisão da potência entre os retificadores;
- III. A taxa de distorção harmônica da corrente de entrada é significativamente reduzida;
- IV. Não é indicado para aplicações de grande potência;
- V. O uso de retificadores controlados não é indicado quando houver necessidade associação de retificadores.

É correto o que se afirma em:

- a. I, II e III apenas
- b. I, IV e V apenas.
- c. II, III e IV apenas
- d. II e V apenas
- e. I, III, IV e V apenas



A associação de retificadores pode ser feita tanto em paralelo quanto em série.

Com base na associação de retificadores, avalie a sentença a seguir, preenchendo suas lacunas:

Em aplicações típicas de transmissão de corrente continua são utilizadas associações em _____ de retificadores de _____ o que resulta num retificador de _____. Um exemplo de aplicação da associação em _____ de retificadores é o caso da linha CC que conecta Itaipu a São Roque (SP). O sistema utiliza retificadores _____, permitindo o controle tanto dos reativos quanto da corrente e tensão na saída.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas.

- a. série – seis pulsos – doze pulsos – paralelo – não controlados
- b. série – seis pulsos – doze pulsos – série – controlados
- c. paralelo – seis pulsos – doze pulsos – paralelo – não controlados
- d. paralelo – doze pulsos – seis pulsos – paralelo – controlados
- e. série – controlados – não controlado – conjunto – controlados

INTERVALO

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO