

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

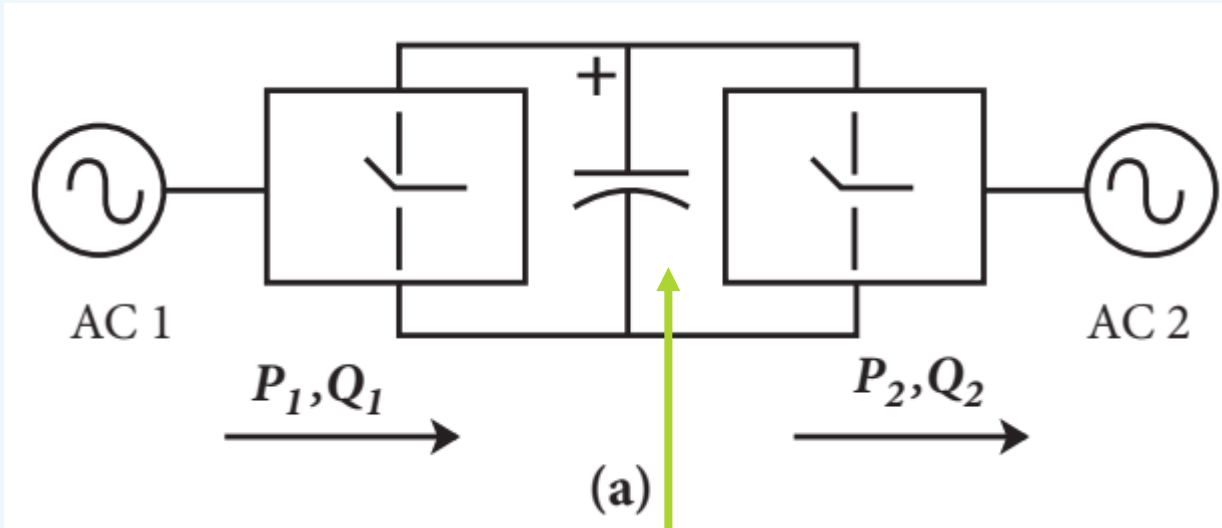
Seção 4.3 - O sistema de gerenciamento da distribuição e suas funções

CONCEITOS

HVDC com elo de tensão



Sistema HVDC com elo de tensão

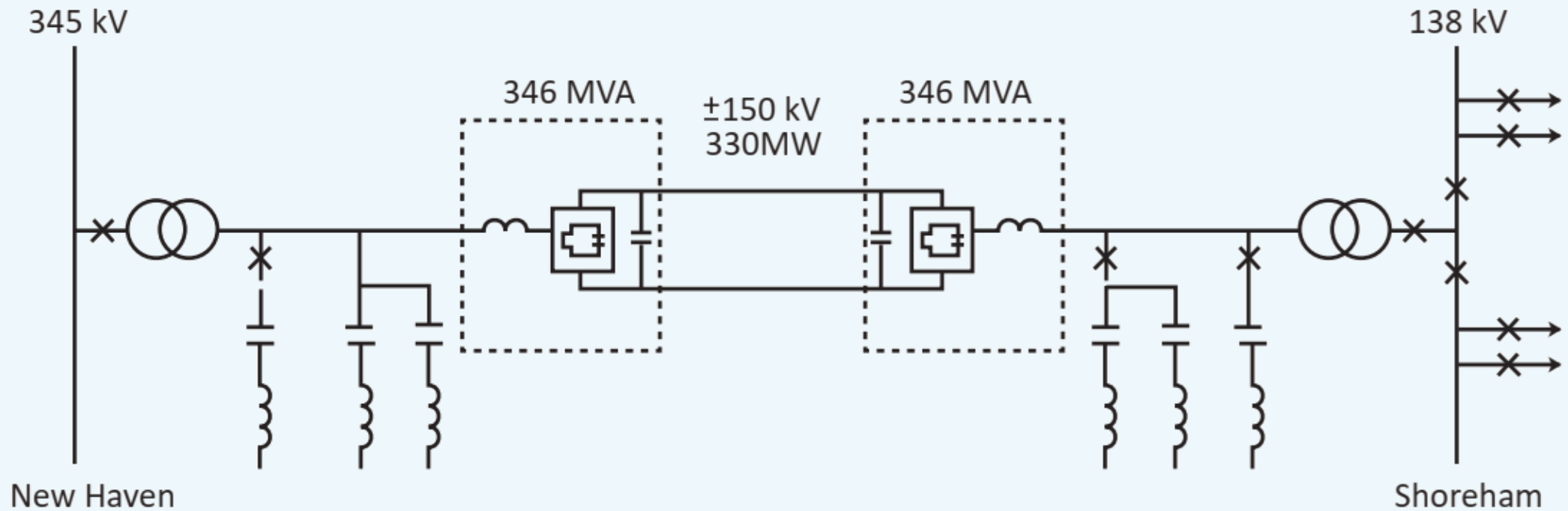


Fonte: MOHAN, 2016.

Presença de capacitor
no lado CC



Sistema HVDC com elo de tensão



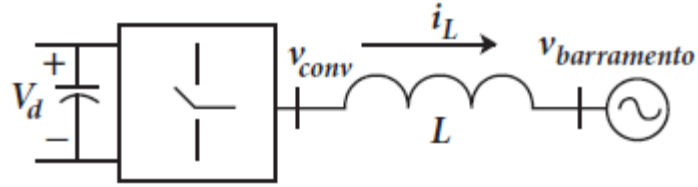
Fonte: MOHAN, 2016.



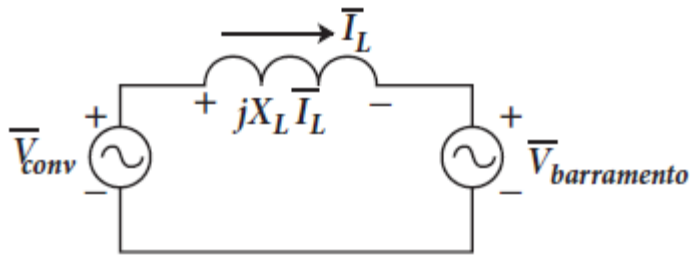
Capacitor HVDC



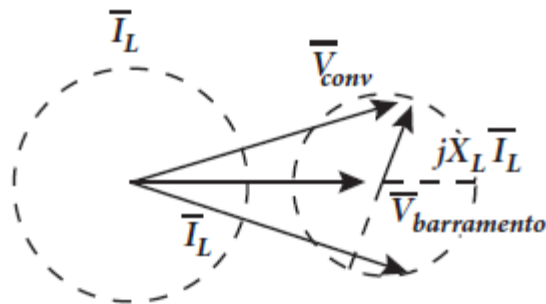
Fonte: <https://images.app.goo.gl/8Nd3Z71xqrkpqS5y7>



(a)



(b)

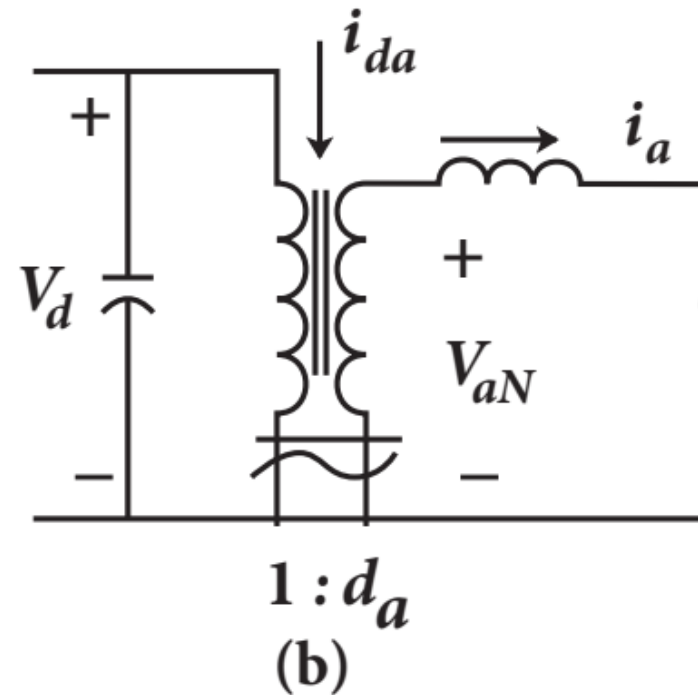
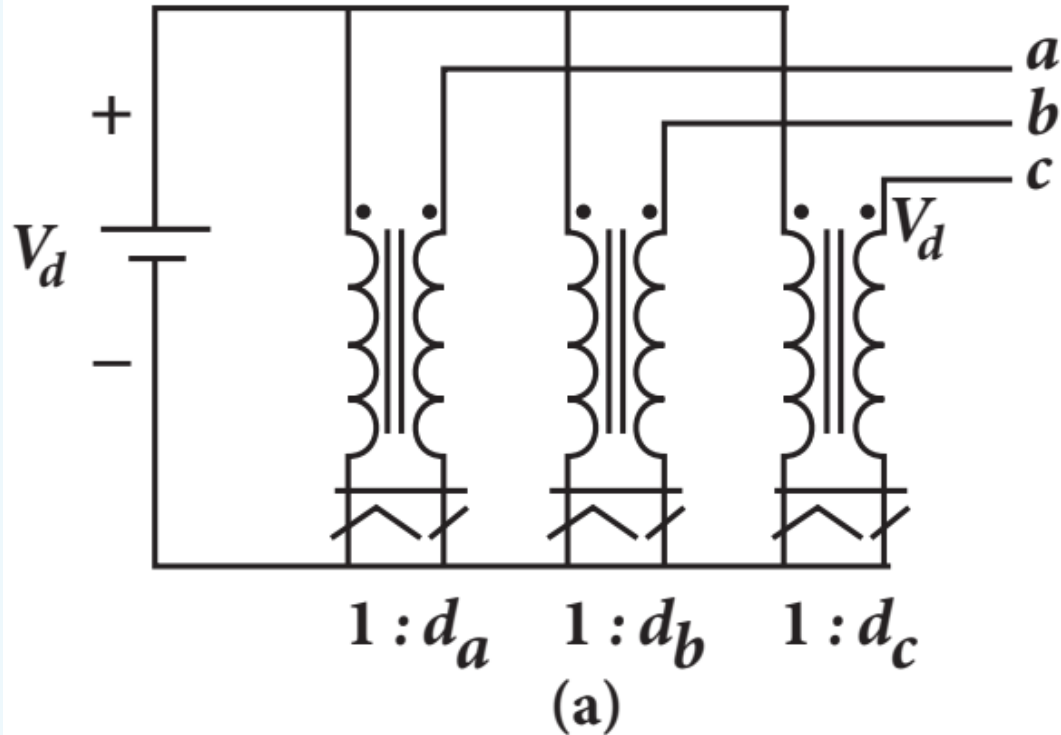


(c)

- Os conversores com elo de tensão são baseados em chaveamento PWM e caracterizados por um lado de corrente contínua com um capacitor e de um lado de um sistema CA indutivo. A tensão contínua resultante é bem definida, mas a corrente CA é controlada pelo processo de modulação.



Modelagem ideal: transformadores de tap continuamente variável



$$v_{aN} = 0,5V_d + \underbrace{\hat{V}_a \sin \omega t}_{v_d}$$

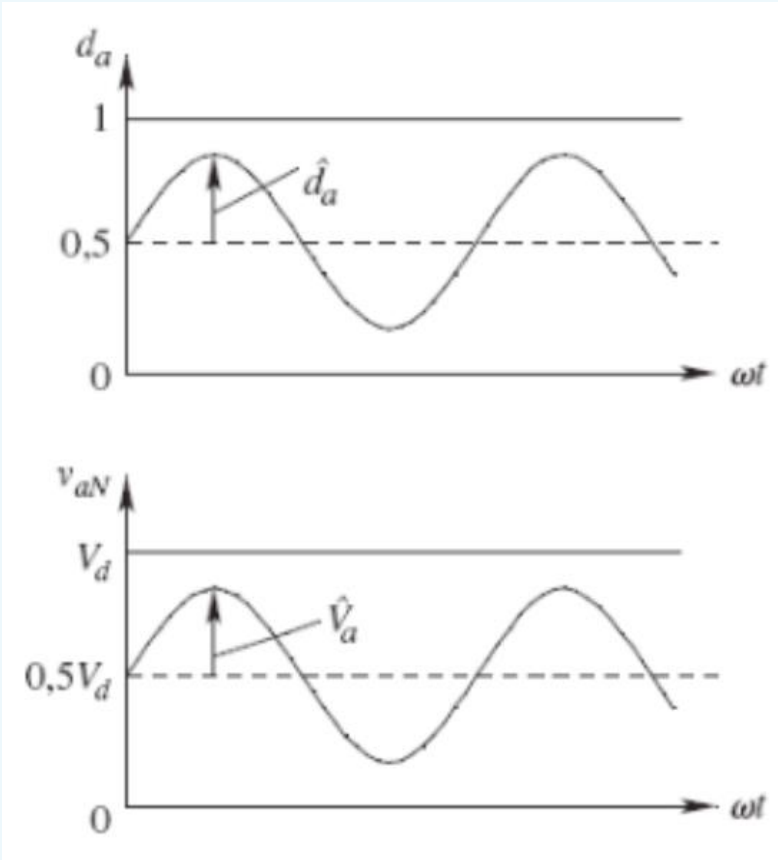
$$V_{aN} = d_a V_d$$

$$d_a = 0,5 + \hat{d}_a \sin \omega t$$

$$\hat{V}_a = \hat{d}_a V_d$$



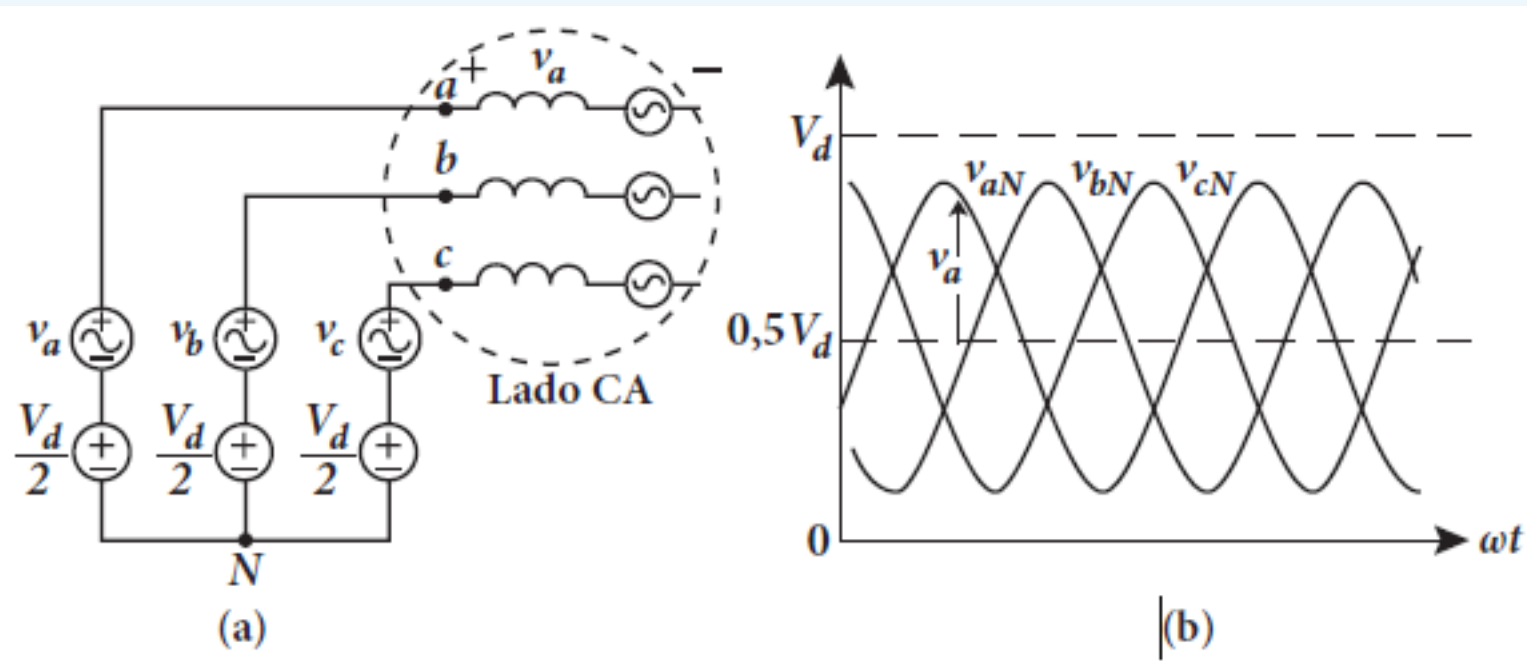
Modelagem ideal: transformadores de tap continuamente variável



Fonte: MOHAN, 2016.



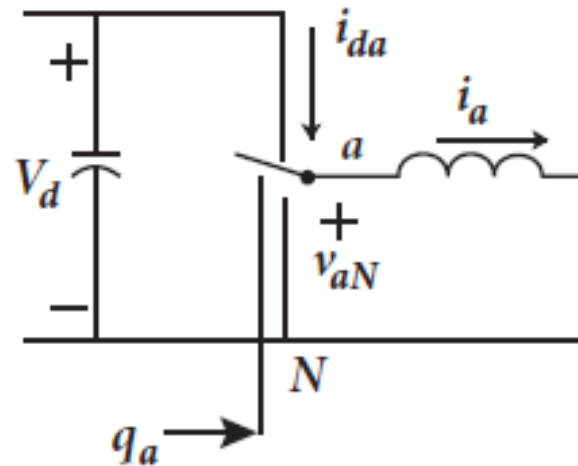
Resultado das tensões



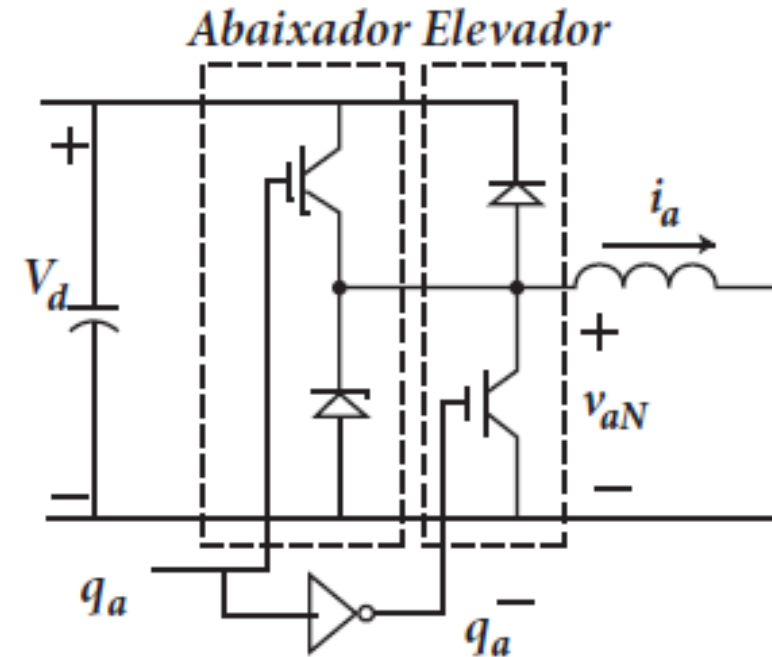
Fonte: Mohan (2016, [s.p.]).



Funcionamento do conversor utilizando transistores



(a)

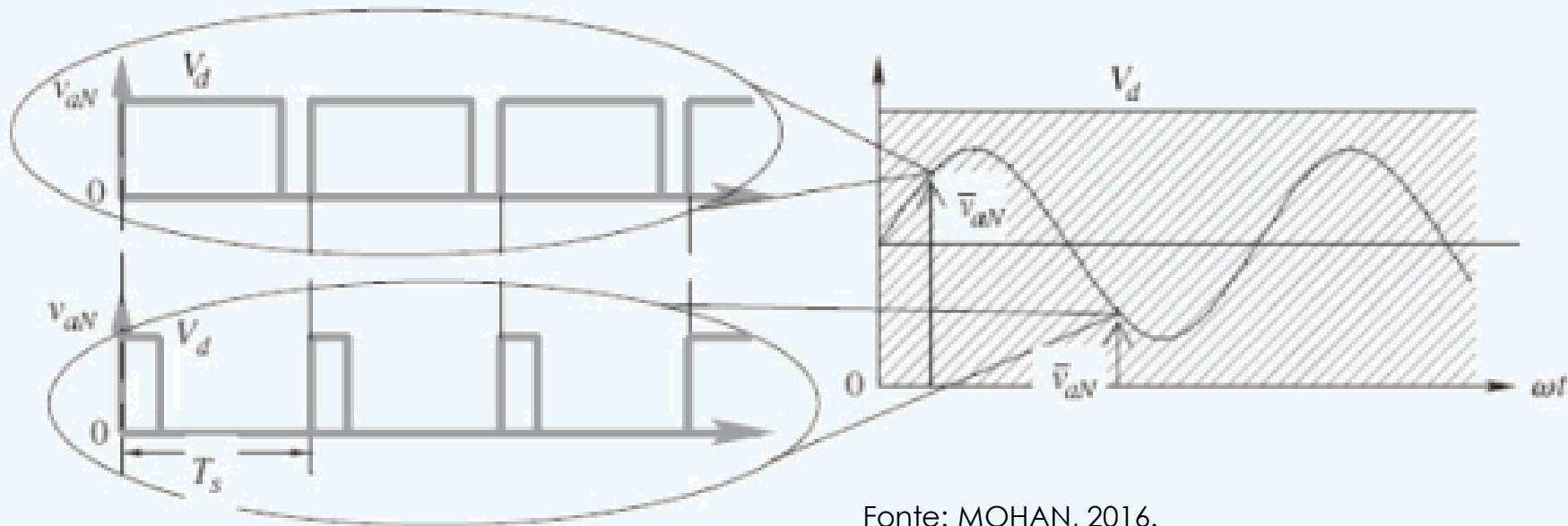


(b)

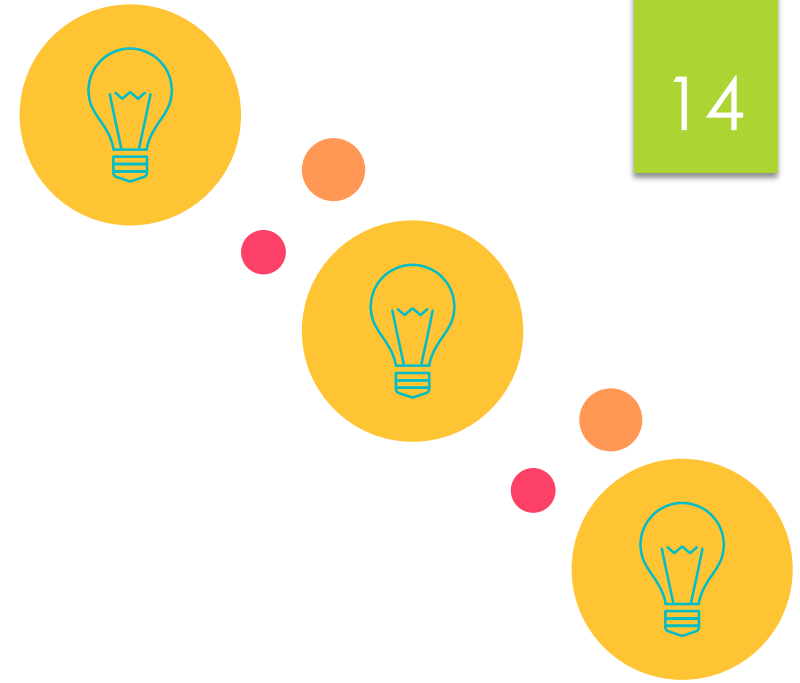
Fonte: Mohan (2016, [s.p.]).



Implementação – chaveamento com PWM



EXERCÍCIOS





- Quando comparamos o conversor de um sistema HVDC com elo de tensão em relação ao sistema com elo de corrente, percebemos uma diferença que é a presença de um _____ conectado em _____ com o lado CC do conversor. Esse dispositivo funciona como uma espécie de “porta de tensão”, o que também confere ao conversor o nome de “conversor _____”.

Assinale a alternativa que completa corretamente o texto.

- a) Indutor – paralelo – fonte de tensão.
- b) Indutor – paralelo – inversor.
- c) Capacitor – série – fonte de tensão.
- d) Capacitor – paralelo – fonte de tensão.
- e) Capacitor – paralelo – retificador.



Os sistemas HVDC utilizando conversores fonte de tensão são normalmente conversores transistorizados que utilizam modulação por largura de pulso (PWM). Desde o início do emprego desses conversores até os dias atuais, alguns progressos foram feitos com relação aos valores nominais de tensão, tornando-os comparáveis aos conversores tiristorizados.

Com relação aos sistemas HVDC, assinale a alternativa correta.

- a) Os conversores tiristorizados recebem o acrônimo em inglês de VSC, que significa Voltage Source Converters.
- b) Os conversores com elo de tensão são caracterizados por um lado CC com um capacitor em paralelo e de um lado CA indutivo.
- c) A autocomutação do conversor com elo de corrente permite o seu uso para sintetizar um conjunto de tensões trifásicas balanceadas.
- d) A autocomutação do conversor com elo de tensão permite o seu uso para sintetizar um conjunto de tensões trifásicas desbalanceadas.
- e) Os sistemas HVDC com elo de tensão não permitem o controle de potência ativa e reativa.

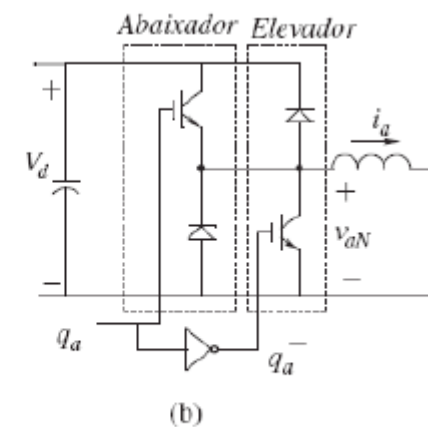


- Um conversor com elo de tensão utilizando transistores IGBT tem a estrutura conforme mostrada na figura a seguir:

Podemos ver que quando o sinal é de _____, apenas o transistor _____ conduz, e a corrente poderá então fluir no indutor de saída em ambas as direções através do transistor superior se essa for _____ ou através do diodo superior se for _____.

Assinale a alternativa que completa adequadamente as lacunas.

- a) Nível alto – superior – positiva – negativa.
- b) Nível alto – superior – negativa – positiva.
- c) Nível alto – inferior – positiva – negativa.
- d) Nível baixo – superior – positiva – negativa.
- e) Nível baixo – superior – negativa – positiva.



Fonte: Mohan (2016, [s.p]).

SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: revisão de
consultoria em
HVDC



Situação Problema

- ▶ **Você:** consultor de planejamento de sistemas de transmissão.
- ▶ **Desafio:** sistema com controle de reativos, sem que os reativos sejam consumidos pela rede CA
- ▶ **Utilização de HVDC**

**Pode-se adaptar os
conversores já
existentes?**



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)



SP: resolução

- Conversor adequado: elo de tensão;
- Característica: uso de conversores transistorizados e chaveamento PWM;
- Uma lado CC com capacitor e outro lado CA indutivo;
- Porém: harmônicos de saída;
- Necessidade de filtragem;



SP: resolução

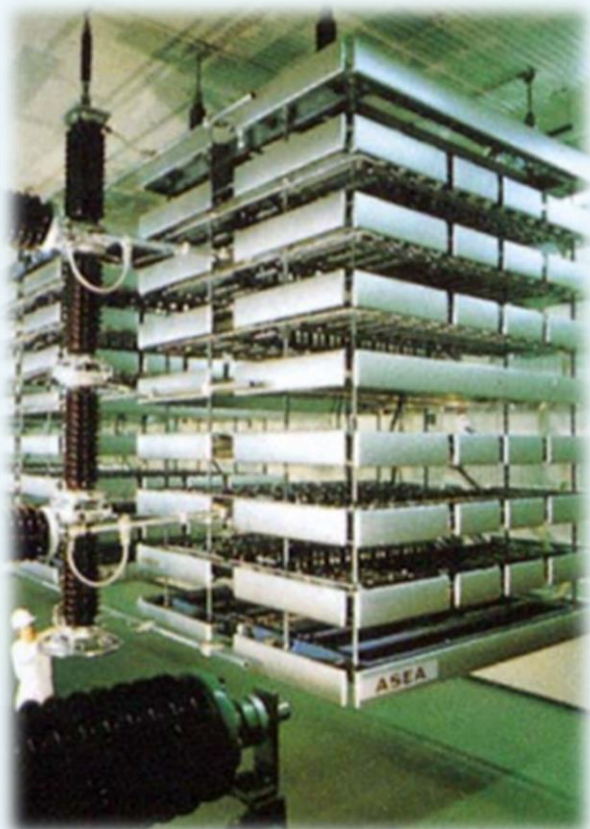
► Vantagens:

- Rápidos e independentes para controle de fluxo de pot.
- Garantia de qualidade da onda gerada;
- Operação simples como retificador ou inversor;
- Operação em quatro quadrantes (FP atrasado ou
► adiantado)



Válvula tiristorizada

150 kV 914 A



Fonte: ABB, 2013.

Sala de válvulas

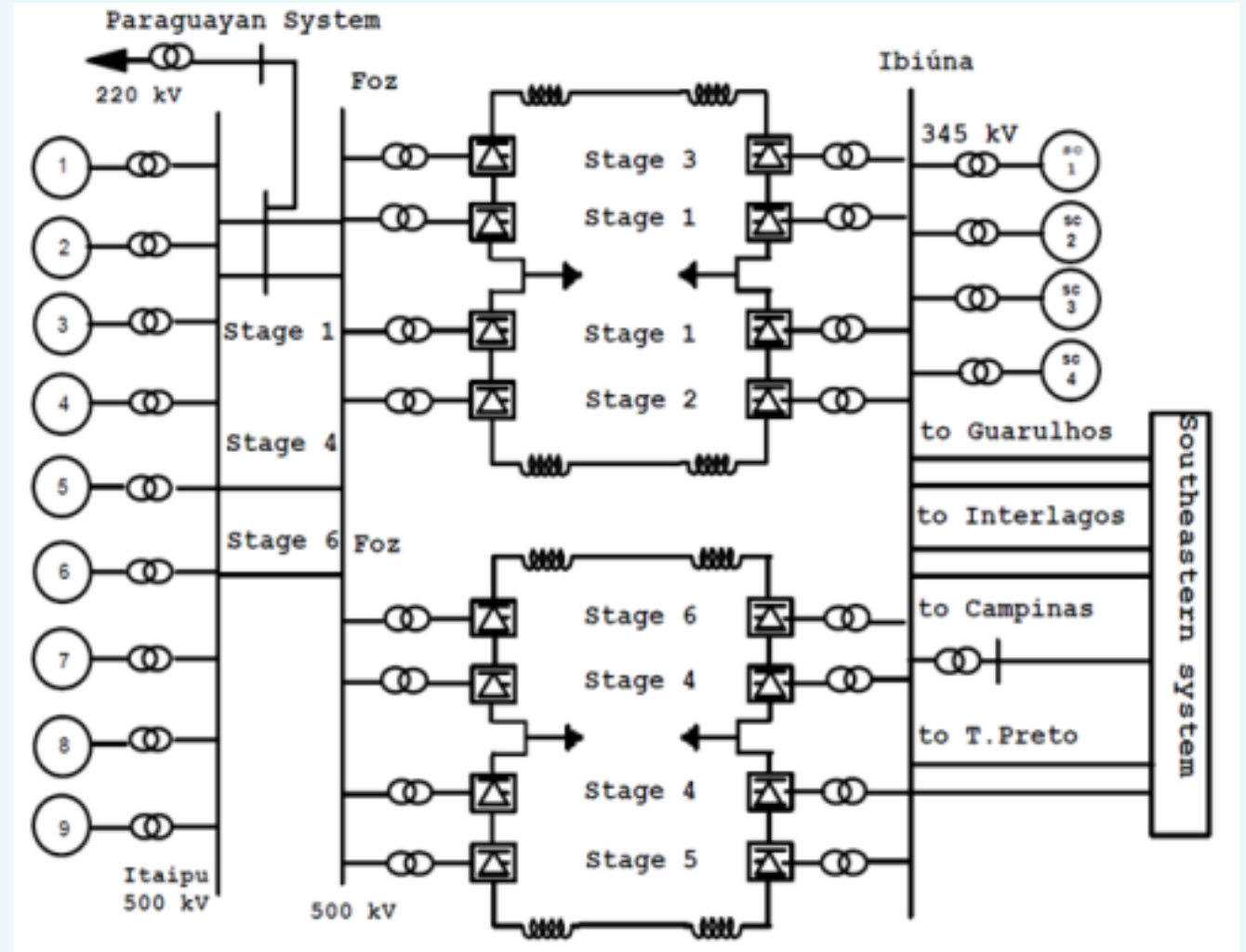


Fonte: ABB, 2013.



► Itaipu:

- Bipolos em ± 600 kV
- Potência 3150 mW
- 800 km



EXERCÍCIOS





- Os dois conversores VSC em conexão ponto-a-ponto, na teoria, podem ser conectados por linha aérea. No entanto, esta opção ainda é pouco explorada devido a indisponibilidade comercial de disjuntores CC. Por conseguinte, a maioria dos sistemas de transmissão VSC-HVDC utiliza a conexão por cabos subterrâneos, onde os riscos de curto-circuito são praticamente inexistentes.

Com relação à transmissão em corrente contínua, no que tange os conversores VSC, avalie o texto a seguir, completando suas lacunas:

A conexão entre os _____ VSC do HVDC pode ser feita através de uma conexão direta, ou conexão em back-to-back, ou através de uma linha de transmissão em corrente contínua, também chamada de transmissão ponto-a-ponto. Se os VSCs são conectados em _____, usa-se apenas um _____ no elo CC. Porém, quando a transmissão ocorre por cabo ou linha aérea, transmissão ponto-a-ponto, são necessários _____ nos terminais CC de cada conversor.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas.

- terminais do - série - capacitor - indutores
- conversores – ponto-a-ponto – indutor – indutores
- sistemas – série – transformador – capacitores
- circuitos – paralelo – conversor – capacitores
- conversores - back-to-back – capacitor – capacitores



Cada uma das tecnologias de HVDC disponíveis apresentam vantagens, desvantagens e limitações. Uma relação de curto circuito SCR (Short Circuit Ratio) muito baixa, por exemplo, é a principal limitação para o HVDC clássico com conversores LCC (Line Commutated Converter) baseado em tiristores. Por outro lado, o a tecnologia VSC-HVDC (Voltage Source Converter) não tem limitações com relação à SCR, porém apresenta perdas maiores no conversor devido a sua alta frequência de operação (perdas por chaveamento), quando comparado ao HVDC a tiristores. O uso VSC-HVDC ainda é limitado em aplicações de até algumas centenas de megawatts enquanto que o LCC ainda é a melhor opção para os sistemas UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current, com tensões na faixa de 600 a 1100 kV) em alta potência (na faixa dos gigawatts).

Considerando as informações apresentadas, analise as afirmativas sobre VSC-HVDC a seguir:

- I. O sistema VSC-HVDC é composto por dois conversores VSC (retificador-inversor).;
- II. A principal característica das chaves auto-comutadas do conversor VSC é a condução bidirecional de corrente e suportabilidade unidirecional de tensão;
- III. A conexão entre os conversores VSC do HVDC pode ser feita através de uma linha de transmissão em corrente contínua (transmissão ponto-a-ponto) ou através de uma conexão direta, também chamada de conexão em back-to-back
- IV. O uso de conversores controlados não é indicado em sistemas VSC-HVDC

Considerando o contexto apresentado, é correto o que se afirma em:

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



► Os sistemas de transmissão VSC-HVDC possuem vários recursos técnicos que se mostram particularmente vantagens quando comparados aos sistemas tradicionais LCC HVDC e os tornam especialmente atrativos nas seguintes aplicações:

- Transmissão de potência para sistemas AC de baixa potência
- Fornecimento de potência para cargas offshore
- Conexão de parques eólicos (onshore e offshore)
- Sistemas multi terminais

O desenvolvimento de novos materiais e semicondutores têm beneficiado os projetos de sistemas VSC-HVDC tornando a tecnologia de transmissão VSC atraente em um número crescente de aplicações. Além disso, muitas pesquisas estão sendo direcionadas a reduzir custos e também as perdas relacionadas a esses conversores.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente as características de um sistema VSC-HVDC:

- Os sistemas LCC HVDC são superiores aos sistemas VSC-HVDC na maioria das aplicações, exceto para projetos de grandes potências.
- Os sistemas VSC-HVDC são indicados somente para aplicações para a transmissão de grandes potências.
- MSistemas VSC-HVDC podem gerar instabilidade nos sistemas AC que interligar.
- Os IGBTs não são indicados para aplicações VSC-HVDC devido a alta corrente que flui pelos conversores VSC.
- Se comparados ao LCC HVDC, os sistemas VSC-HVDC não possuem limitações com relação a relação de curto circuito SCR (short circuit ratio).

INTERVALO

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO