



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GAT.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA CA E CC - GAT

Aplicação de conversores VSC em sistemas de transmissão de potência

Wo Wei Ping *

Luciano de Oliveira Daniel

Ricardo Diniz Rangel

Antônio Ricardo Carvalho

Leonardo Pinto Almeida

CEPEL

RESUMO

Nos últimos 30 anos os dispositivos de eletrônica de potência aplicados em sistemas de transmissão têm se baseado em conversores tiristorizados. Porém, com a evolução das chaves semicondutoras, alguns equipamentos com conversores VSC têm ganhado espaço no mercado em aplicações pelo mundo, porém no Brasil ainda se percebe pouca iniciativa neste sentido. O artigo descreverá os princípios básicos de funcionamento dos conversores VSC e os principais equipamentos baseados neste conversor que conquistaram um mercado no setor de transmissão de potência: STATCOM e CCAT-VSC. Serão mostrados alguns projetos encontrados no mundo e as perspectivas de aplicação da tecnologia no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: FACTS, VSC, CCAT, STATCOM, IGBT.

1.0 - INTRODUÇÃO

O marco na história da evolução dos sistemas de potência relativo ao primeiro emprego de equipamento baseado em eletrônica de potência pode ser atribuído ao projeto de transmissão em corrente contínua (CCAT) entre a ilha de Gotland e o continente sueco, no ano de 1954. Neste projeto foram utilizados conversores CA/CC com válvulas a arco de mercúrio. Transmitia até 20 MW, em 100 kV no lado CC, através de um cabo submarino de cerca de 100 km. Posteriormente, a partir da década de 70 iniciaram-se as primeiras instalações de elos CCAT usando conversores CA/CC com semicondutores do tipo tiristores de potência. A década seguinte foi caracterizada por uma crescente onda de instalação de compensadores estáticos ("Static Var Compensator" - SVC) nos sistemas de potência, também baseados em conversores tiristorizados.

O domínio dos conversores que usam tiristores de potência tem se mantido até os dias de hoje, na forma de equipamentos do tipo SVC e transmissão em CCAT. Outros semicondutores desenvolvidos ao longo deste período não foram capazes de reduzir a importância dos tiristores, dado a sua alta confiabilidade, custo e perdas comparativamente mais reduzidos. Com a introdução do conceito de FACTS ("Flexible AC Transmission System"), lançado originalmente pelo Dr. Hingorani em 1988 [1], aliado ao desenvolvimento de novos tipos de semicondutores, imaginou-se que haveria uma invasão de variedades de equipamentos da família FACTS. As áreas de desenvolvimento de novos equipamentos, seja nos centros de pesquisa da indústria seja nas universidades, conceberam novos tipos de equipamentos baseados em eletrônica de potência, tais como: IPFC ("Interline Power Flow Controller"), DVR ("Dynamic Voltage Restorer"), STATCOM ("Static Shunt Synchronous Compensator"), TCSC ("Thyristor Controlled Series Capacitor"), UPFC ("Unified Power Flow Controller"), SSSC ("Static Synchronous Series Compensator"), impulsionadas pela crescente descoberta de novos dispositivos com semicondutores: GTO ("Gate Turn-off Thyristor"), MCT ("MOS Controlled Thyristor"), SITh ("Static Induction Thyristor"), MTO ("Metal Oxide Semiconductor Thyristor"), IGBT ("Insulated Gate Bipolar Transistor"), IGCT ("Integrated Gate Commutated Thyristor"), entre outros.

Fato é que a esperada evolução dos equipamentos FACTS não aconteceu. Observa-se que nos últimos 30 anos os dispositivos baseados em eletrônica de potência para sistemas de transmissão continuam sendo dominados por conversores que usam tiristores de potência, na forma de SVCs e sistemas CCAT usando conversores tipo fonte de corrente.

No entanto, dentre estas novas opções de dispositivos FACTS, pode-se identificar que os conversores baseados em fonte de tensão ("Voltage Sourced Converter" -VSC) têm encontrado seu espaço no mercado, pelo crescente número de projetos ao redor do mundo. No entanto, no Brasil ainda se percebe pouca iniciativa neste sentido. Os equipamentos que empregam conversores VSC que têm tido maior sucesso comercial são o STATCOM e o CCAT-VSC. O primeiro destina-se primordialmente à regulação de tensão, constituindo-se numa evolução do SVC. Ao passo que o segundo é um sistema de transmissão em corrente contínua com requisitos próprios para aplicação principalmente em sistemas CA fracos (baixa potência de curto-circuito), cargas isoladas (sem geração própria) ou com transmissão através de cabos.

Este artigo tem o objetivo de chamar a atenção dos engenheiros do setor elétrico brasileiro desta nova família de equipamentos, constituindo-se em mais um recurso disponível para deixar o sistema elétrico com maior flexibilidade, confiabilidade e eficiência. Será apresentado o estado-da-arte dessa tecnologia, mostrando o princípio de funcionamento dos conversores VSC e diferentes tipos de configuração. O foco será dirigido aos equipamentos de maior sucesso na indústria: STATCOM e CCAT-VSC, com apresentação das formas mais comuns e de exemplos de projetos no mundo. Finalmente será realizada uma breve avaliação das possíveis aplicações destes equipamentos no sistema elétrico brasileiro.

2.0 - CONVERSOR VSC

A sigla VSC refere-se ao termo original "Voltage Sourced Converter". Trata-se de um conversor CA/CC que se utiliza de dispositivos semicondutores com capacidade de controle de condução e bloqueio, ou seja, dispositivos que exigem um pulso de disparo para entrar em condução e podem interromper a condução através de outro pulso, diferentemente dos tradicionais tiristores, que permitem controle apenas do momento de início de condução, dependendo de um cruzamento da corrente pelo zero para cessar a condução dessa corrente. Os dispositivos semicondutores mais comumente encontrados atualmente na indústria, que desempenham adequadamente esse papel nos equipamentos de sistema de potência, são os GTOs e os IGBTs.

O conversor VSC funciona como uma fonte de tensão do lado CA, por esta razão seria aceitável também que sua sigla seja associada ao termo "Voltage Source Converter", muito embora o termo atualmente adotado pelo Cigré, com a palavra "Sourced", refira-se a um conversor alimentado por uma tensão (do lado CC), a qual é suprida pelo seu capacitor, como mostrado nos próximos itens.

2.1 Tipos de dispositivos semicondutores para conversores VSC

Os dispositivos semicondutores poderiam ser classificados, segundo sua complexidade, em três tipos:

Tipo 1: Diodos – que conduzem de imediato bastando se aplicar tensão positiva (ou seja, polarizado diretamente) e entram em corte quando a corrente por ele passa por zero.

Tipo 2: Tiristores (originalmente "*reverse blocking triode thyristor*" ou "*silicon controlled rectifiers –SCR*") – que necessitam de polarização direta e também de um sinal de controle em seu "gate" e, uma vez iniciada a condução, esta perdura até o próximo cruzamento da corrente pelo zero.

Tipo 3: Transistores, "*Controlled switches*" e "*Force-commutated thyristors*" – que podem controlar a condução (necessitando também de polarização positiva) e também o bloqueio da corrente, através de pulso no "gate".

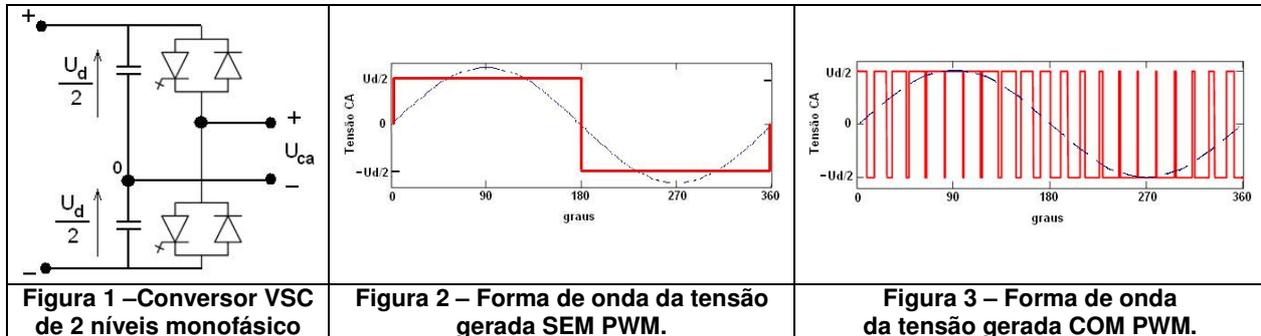
Neste último tipo estão inseridos os principais dispositivos necessários na operação do conversor VSC. Atualmente o elemento mais comumente adotado na prática é o IGBT.

2.2 Funcionamento de um conversor VSC de 2-níveis monofásico

Para entender o princípio de funcionamento de um conversor VSC será apresentado o exemplo mais simples e didático, que consiste num conversor de 2 níveis monofásico. Apesar dos conversores utilizados em aplicações reais serem de topologia mais complexa, a essência do princípio de funcionamento é a mesma do conversor mais simples de 2 níveis.

A topologia desse conversor monofásico é mostrada na Figura 1. As chaves indicadas na figura são compostas na prática por semicondutores do tipo GTO ou IGBT. Por simplificação, serão tratados neste artigo apenas como

IGBTs, mas poderiam ser substituídos por GTOs com o mesmo resultado no funcionamento básico. Os diodos em antiparalelo têm a função de suprir um caminho alternativo da corrente nos momentos em que houver bloqueio de condução por parte dos IGBTs, visto que a corrente no sistema CA tem característica indutiva, e por consequência não é interruptível de forma abrupta. A interrupção poderia ser instantânea se a carga fosse puramente resistiva.



O conversor interliga o sistema monofásico em CA, do lado direito, ao sistema em CC do lado esquerdo. O termo “2 níveis” refere-se ao fato do conversor ser capaz de exteriorizar dois níveis de tensão do lado CA: $+U_d/2$ e $-U_d/2$ (assumiu-se o ponto “0” como referência). Para se ter os dois níveis de tensão o capacitor do lado CC foi desmembrado em dois. Como há controle total dos IGBTs, ao se iniciar a condução com o IGBT superior (mantendo o inferior bloqueado), a tensão externa no lado CA assume o valor de $+U_d/2$, ao passo que quando o inferior estiver em condução (nesse momento, deve-se manter o superior desativado), a tensão externa do lado CA assume o valor negativo: $-U_d/2$, como mostrado na Figura 2. Percebe-se que dois IGBTs não podem ser ativados simultaneamente, sob risco de provocar um curto no capacitor.

Se o sistema de controle de disparo deste conversor estiver sincronizado na frequência fundamental, a tensão resultante será uma onda retangular, cuja componente fundamental será uma função senoidal nesta frequência (60 Hz). A corrente CC poderá ocorrer nos dois sentidos, enquanto que a tensão CC é sempre unidirecional. Percebe-se que tal onda retangular no lado CA contém um razoável conteúdo harmônico, exigindo um contingente de filtros para sua eliminação. Desta forma, é necessário procurar formas para reduzir tal conteúdo harmônico. Uma medida imediata, ainda usando a topologia de conversor de 2-níveis, seria a mudança da estratégia de disparo dos IGBTs, adotando-se a técnica do PWM (pulse width modulation), em que há disparo dos IGBTs numa frequência bem maior que a fundamental, resultando numa forma de onda com vários “degraus”, que resultam num menor conteúdo harmônico. A desvantagem desta técnica é geração de maiores perdas decorrentes dos múltiplos chaveamentos do semiconductor. A Figura 3 ilustra a forma de onda da tensão CA utilizando a técnica PWM.

Outra alternativa de gerar uma tensão CA mais próxima da senoidal seria com a utilização de configurações mais complexas de conversores VSC. Um caminho seria o aumento do número de níveis de tensão, e o outro seria pela colocação em série de conversores de configuração simples, mas defasados magneticamente. Estas técnicas serão apresentadas mais adiante.

2.3 Conversores VSC trifásicos de 2 níveis e 6 pulsos

Na Figura 4 é mostrado o conversor VSC trifásico com IGBTs mais elementar: o VSC de 2 níveis de 6 pulsos. A mesma figura apresenta a tensão da fase “a” deste conversor, que é composto de 6 IGBTs e 6 diodos em antiparalelo.

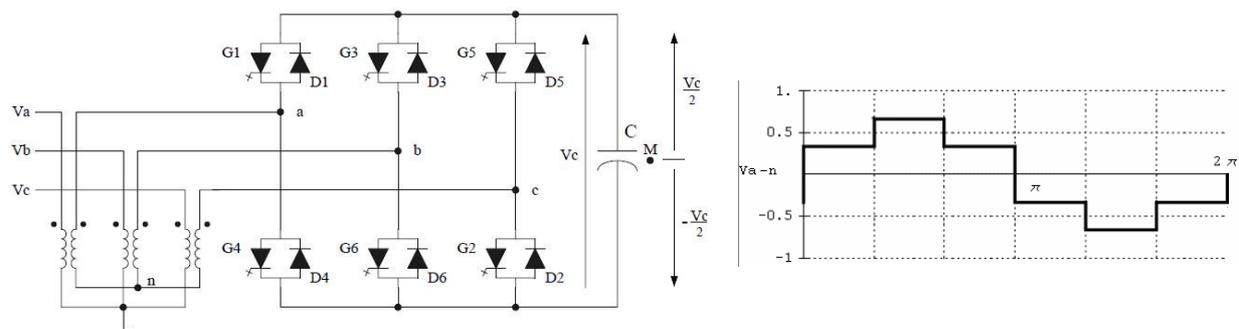


Figura 4 Conversor de 6 pulsos (2 níveis) com capacitor do lado CC e Tensão da fase “a” em relação ao

neutro do sistema.

Para se obter a componente fundamental das tensões fase-neutro deve-se usar a série de Fourier. Calculando a série de Fourier da tensão V_{an} , temos a Equação 1. Observa-se que a tensão fase-neutro só contém harmônicos ímpares de ordem $6n \pm 1$. A componente fundamental da tensão no secundário do transformador pode ser representada pelo seguinte fasor mostrado na Equação 2

$$V_{an} = \frac{2}{\pi} V_c \left(\sin \theta + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{6k-1} \sin(6k-1)\theta + \frac{1}{6k+1} \sin(6k+1)\theta \right] \right) \quad (1) \quad \dot{V}_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_c e^{j\psi} \quad (2)$$

Onde ψ representa o deslocamento angular entre o trem de pulsos de disparo/corte e a referência do sistema. Uma característica importante deste tipo de conversor é que o módulo da tensão aplicada ao sistema depende única e exclusivamente da tensão no capacitor. A única forma de se alterar o módulo da tensão V_s é alterando V_c . Isto pode ser realizado de forma indireta controlando ψ de maneira que entre ou saia potência ativa no conversor, fazendo com que a tensão V_c (e conseqüentemente V_s) aumente ou diminua, respectivamente. O uso de modulações de pulso, entre elas a modulação PWM senoidal, permite que se controle a tensão CA sem alterar a tensão CC.

2.4 Conversor com número de pulsos múltiplo de 6

Uma forma de reduzir o nível de harmônicos de tensão produzidos pelo conversor VSC de 6 pulsos é aumentar o número de pulsos de disparo. Isto é feito conectando-se vários conversores em série no lado CA através de transformadores com defasamento e relação de espiras adequados. Além disso, os trens de pulsos dos conversores deverão ser intercalados e os disparos (cortes) deverão ser ordenados a cada $360/n_p$ graus, onde n_p é o número total de pulsos. A Figura 5 mostra a topologia de um conversor de 2-níveis e 12 pulsos e a Figura 6 mostra tensão total no primário e a componente fundamental para o VSC de 12 pulsos e de 48 pulsos. Note que com o aumento do número de pulsos de disparo, tem-se uma tensão de saída cada vez mais próxima da fundamental, ou seja, com um menor nível de harmônicos.

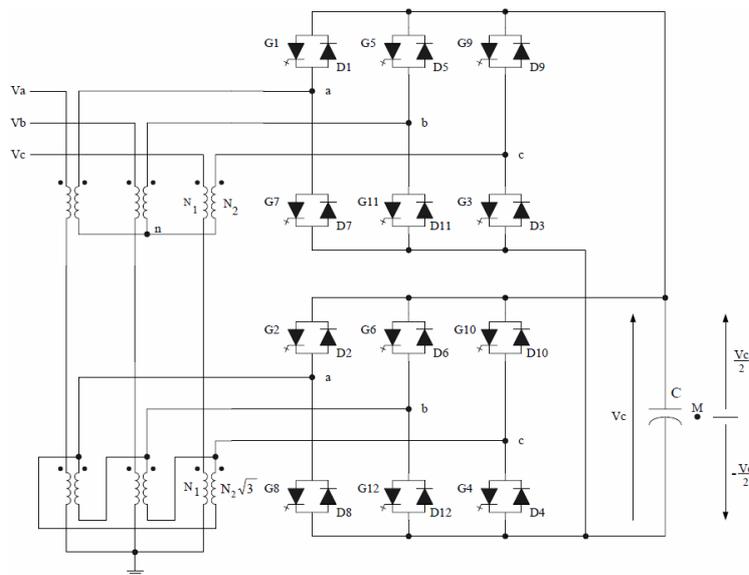


Figura 5 – Conversor VSC de 2-níveis e 12 pulsos

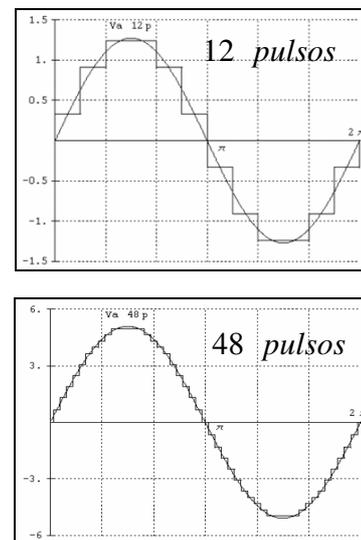


Figura 6 – Tensão total fase-neutro no primário para o VSC de 12 pulsos e de 48 pulsos.

Além de permitir o cancelamento de harmônicos, a elevação do número de pulsos com este tipo de arranjo permite aumentar a capacidade nominal total do equipamento conversor, já que a tensão fundamental será multiplicada por n_c (número de conversores) em relação a um único conversor de 6 pulsos caso os transformadores tenham todos a mesma capacidade nominal.

2.5 Conversores VSC trifásicos de 3 níveis

Outro tipo de conversor que tem se destacado é o VSC de 3 níveis. A obtenção de vários níveis de tensão na forma de onda pode ser conseguida com um único conversor com estrutura especial. A Figura 7 mostra uma configuração de VSC que permite obter 3 níveis de tensão na fase: $V_c/2$, 0 e $-V_c/2$.

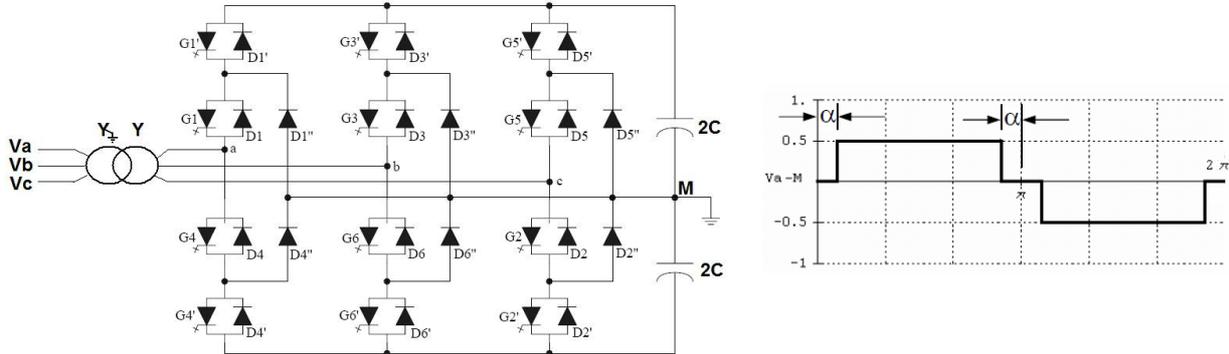


Figura 7 Conversor VSC de 3 níveis de 12 pulsos e tensão de fase em relação ao ponto M.

Se for mantida a mesma energia total armazenada pelo capacitor do conversor de 2 níveis (com capacitância C) os dois capacitores devem ter o valor $2C$. Esta configuração conhecida como NPC ou "Neutral Point Clamped" não é a única, porém é a mais comum. Ela pode ser estendida para mais níveis, com o aumento do número de IGBTs, diodos e capacitores, porém observa-se na literatura uma preferência dos fabricantes de equipamentos pelo uso dos VSCs de até 3 níveis, o que representaria uma solução de compromisso entre flexibilidade, complexidade de controle de disparo/corte das chaves e aumento do nível de potência de cada conversor. Um VSC elementar de 3 níveis possui 12 IGBTs e portanto é inerentemente um conversor de 12 pulsos, embora os pulsos não sejam todos necessariamente espaçados de 30° em regime permanente, como no caso do VSC de 2 níveis. Analisando o funcionamento deste conversor para uma fase pode-se ver que:

- Se os IGBTs G_1 e G_1' forem disparados e os IGBTs G_4 e G_4' forem bloqueados teremos o nível $V_c/2$ na tensão da fase em relação ao ponto M.
- Se os IGBTs G_1 ou G_4 forem disparados e os IGBTs G_1' e G_4' forem bloqueados teremos o nível 0 na tensão da fase em relação ao ponto M.
- Se os IGBTs G_4 e G_4' forem disparados e os IGBTs G_1 e G_1' forem bloqueados teremos o nível $-V_c/2$ na tensão da fase em relação ao ponto M.

Uma das possibilidades que o VSC de 3 níveis oferece é a modulação de largura de pulso de pulso único. Atrasando de um ângulo α o disparo dos IGBTs G_1' , G_2' , G_3' , G_4' , G_5' e G_6' e adiantando do mesmo ângulo o corte destes IGBTs pode-se reduzir a largura dos pulsos positivos e negativos de tensão nas fases. O ângulo α pode ser alterado para controlar o módulo da tensão da fase, porém neste caso o conteúdo harmônico irá variar com α . Para algumas faixas de α uma diminuição da tensão pode resultar em aumento do nível relativo de harmônicos. Uma outra opção é ajustar α para cancelar um harmônico de baixa ordem. Para $\alpha = \pi/10$, por exemplo, o 5º harmônico é anulado à custa de uma redução da ordem de 5% no módulo da tensão fundamental.

3.0 - USO DO VSC NO STATCOM

O termo STATCOM é originado da contração do termo original "Static Synchronous Compensator". No passado já foi chamado de STATCON, em alusão a "Static Condenser", e também de "Self-commutated SVC". É um equipamento FACTS para compensação de potência reativa, constituído por um único VSC em derivação ("shunt"). É capaz tanto de gerar quanto absorver potência reativa, com o objetivo de controlar o módulo da tensão na barra CA a que está ligado, ou de uma outra barra remota. Este objetivo é atingido alterando-se o módulo de sua tensão interna.

Sua finalidade funcional no sistema de potência assemelha-se ao do SVC (Static VAR Compensator), porém seu desempenho dinâmico é superior. Isto não quer dizer, entretanto, que daqui para frente deva-se usar sempre o STATCOM no lugar do SVC, pois o maior preço e a menor maturidade são obstáculos para o domínio comercial. Na Figura 8, vemos uma comparação entre as características V-I do SVC e do STATCOM.

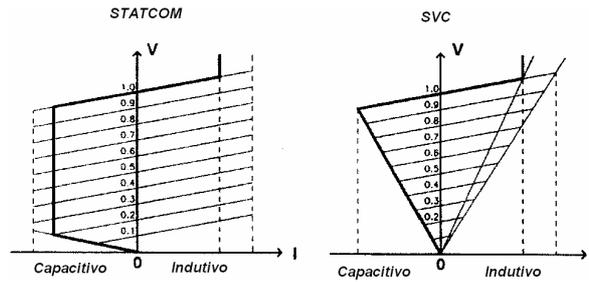


Figura 8 – Características V-I do STATCOM e do SVC.

Das vantagens técnicas do STATCOM, destaca-se sua habilidade de compensação reativa mesmo em níveis de tensão reduzidos, período em que o sistema mais necessita dos reativos, e também seu menor tempo de resposta, conferindo-lhe capacidade para compensar transitórios rápidos como aqueles produzidos por cargas siderúrgicas. O STATCOM também pode ser aplicado para aumento da capacidade de transferência de potência em regime permanente, melhoria da margem de estabilidade transitória, amortecimento de oscilações do sistema, amortecimento de oscilações subsíncronas, controle de flickers e aplicações envolvendo armazenamento de energia.

3.1 Projetos de STATCOM em operação e em construção

Na Tabela 1 são mostrados alguns exemplos de projetos de STATCOM de diversos fabricantes em operação comercial encontrados pelo mundo. A maior parte destas aplicações está relacionada a controle de tensão e mitigação de “flicker” em fornos a arco [4,5].

Tabela 1 – Exemplos de STATCOMs encontrados pelo mundo

STATCOM	ANO	POTÊNCIA	STATCOM	ANO	POTÊNCIA
Kansai Electric Power	1980	±20 Mvar	Ube Steel, Japão	1997	±18 Mvar
Ishihara Steel, Japão	1988	±10 Mvar	Inez, EUA	1998	2x ±160 Mvar
Nissin Steel, Japão	1990	2x ±10 Mvar	Seguin, EUA	1998	±80 Mvar
Inuyama, Japão	1991	±80 Mvar	Tokyo Hatinohe, Japão	1998	±18 Mvar
Chiyoda Steel, Japão	1991	±15 Mvar	Paul Sweet, EUA	1998	±43 Mvar
Tokyo Steel, Japão	1991	3x ±16 Mvar	East Claydon	1999	±75 Mvar
Chubu Steel, Japão	1991	±20 Mvar	Tokyo Oyama, Japão	1999	±18 Mvar
Shin-Shinano, Japão	1992	±50 Mvar	Tokyo Oyama, Japão	1999	±27 Mvar
Teine, Japão	1993	2x ±10 Mvar	Hagfors, Suécia	1999	44 Mvar
Mukoyama, Japão	1994	±22 Mvar	Moselstahlwerke, ALE	2000	38 Mvar
Daido Steel, Japão	1994	±18 Mvar	Talega, EUA	2002	±100 Mvar
Nippon Yakin, Japão	1995	±10 Mvar	Polarit, Finlândia	2002	164 Mvar
Sullivan, EUA	1996	±100 Mvar	Holly, EUA	2004	-80 +110 Mvar
Rejsby H., Dinamarca	1997	±8 Mvar	Kanzaki, Japão	2004	±80 Mvar

4.0 - USO DO VSC EM CCAT

A principal função do elo de corrente contínua é transmitir potência de um ponto a outro do sistema com controlabilidade. A Figura 9 mostra o diagrama de um elo CCAT-VSC composto basicamente de dois conversores fonte de tensão, um operando como retificador e o outro como inversor, e um capacitor CC que tem a função de prover a polarização dos dispositivos semicondutores e garantir “ripple” reduzido na tensão CC. Os conversores podem estar diretamente conectados um ao outro, caracterizando uma conexão Back-to-back, ou unidos através de um cabo, dependendo da aplicação desejada.

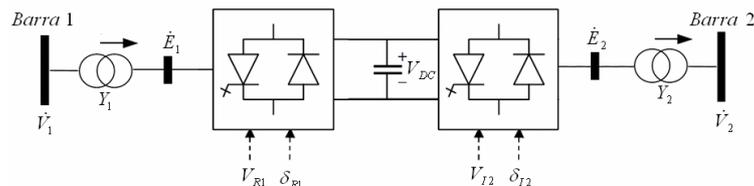


Figura 9 - diagrama de um elo CCAT-VSC.

O controle do elo funciona basicamente da seguinte forma: enquanto um dos terminais VSC controla a potência ativa que flui através do elo, o outro controla a tensão CC. Desprezando-se as perdas nos conversores, pode-se

dizer que a potência ativa que entra no sistema CC deve ser igual à potência ativa entregue ao sistema CA do inversor menos as perdas da transmissão no cabo. Uma das grandes vantagens deste elo é o fato de não necessitar de suporte de reativos (como na transmissão em CCAT a tiristores) e ainda possuir controle da potência reativa em ambos os conversores de maneira independente durante a operação normal do elo. Na Tabela 2 faz-se uma comparação entre os elos convencionais a tiristores (“Line Commutated Converter” - LCC) e os elos VSC.

Tabela 2 – Comparação entre CCAT-LCC e CCAT-VSC

	CCAT-LCC	CCAT-VSC
Tipo de Válvula	Comutada pela linha	Auto-comutada
Falha de Comutação	Pode ocorrer para faltas CA e afundamentos de tensão.	Não ocorre.
Relação de Curto-circuito (SCR)	Em geral, deve ser maior que 2 para operação estável.	Não há limite, podendo ser muito baixa.
Consumo de Potência Reativa	Consome em torno de 50% a 60% da potência ativa transmitida.	Dispensa compensação reativa “shunt” e ainda pode gerar ou absorver reativo do sistema CA.
Dependência de fonte CA	Fonte de tensão CA (geração ou síncrono) é obrigatória.	Não é necessária fonte CA podendo alimentar cargas passivas.
Harmônicos e filtros	Necessita filtros de corrente CA p/ absorver harmônicos de ordem (12n±1) e, para linhas aéreas, filtros CC p/ harm. de ordem (12n).	Geração de harmônicos pode ser reduzida aumentando-se a frequência de chaveamento (filtros fisicamente menores).
Proteção diante de faltas CC	Rápida recuperação é possível.	Rápida recuperação é difícil sem disjuntores CC.
Custo e perdas	Melhores até o momento	As diferenças estão diminuindo devido às melhorias na tecnologia VSC.
Transformador	Transformadores conversores especialmente concebidos	Não são necessários transformadores especiais quando se utiliza modulação PWM.
Tamanho das estações conversoras	Maiores	Consideravelmente menores

As principais aplicações dos elos CCAT-VSC são: Alimentação de redes passivas, transmissão envolvendo sistemas CA fracos (baixa potência de curto-circuito), alimentação de cargas no mar (“offshore”), conexão de parques eólicos (em terra ou no mar), alimentação de centros de cidades e sistemas multiterminais.

4.1 Projetos de CCAT-VSC em operação e em construção

Na Tabela 3 são mostrados alguns dos principais projetos de CCAT-VSC encontrados pelo mundo [4,6].

Tabela 3 – Exemplos de STATCOMs encontrados pelo mundo

NOME	LOCAL	ANO	POT.	Vca	Vcc	CABO/LINHA CC	VSC	DISPARO
Tjuja-Ashu-Susamyr	URSS, Kyrgyzstan	1984	3,2 MW	35 kV/ 50 Hz	14 kV	3,5 km cabo/ 22 km linha aérea	2 níveis ETT	6 pulsos
Hellsjön	Suécia, Hällsjön e Grängesberg	1997	3 MW / 3 Mvar	10 kV/ 50 Hz	±10 kV	Linha aérea	2 níveis IGBT	PWM 1950 Hz
I.R.P.	Japão, Shin-shinano	1998	37,5 MW/ ±37,5 Mvar	66kV-50Hz 275kV-60Hz	10,6 kV	Sem Linha (Back-to-back)	2 níveis GTO	PWM
Gotland	Suécia, Näs - Bäckes	1999	50 MW/ ±30 Mvar	70 kV/ 50 Hz	±80 kV	2x70 km cabo subterrâneo	2 níveis IGBT	PWM 1950 Hz
Tjæreborg	Dinamarca, Tjæreborg - Enge	2000	7,2 MW/ -3 +4 Mvar	10,5 kV/ 50 Hz	±9 kV	2x4,3 km cabo subterrâneo	2 níveis IGBT	PWM 1950 Hz
Directlink	Austrália, T.Valley-N.S.Wales	2000	180 MW/ ±75 Mvar	110/132 kV 50 Hz	±80 kV	6x59 km cabo subterrâneo	2 níveis IGBT	PWM 1950 Hz
Eagle Pass	México-EUA, Eagle Pass	2000	36 MW/ ±36 Mvar	138 kV/ 60 Hz	±15,9 kV	Back-to-back	3-níveis NPC IGBT	PWM 1500 Hz
Murray Link	Austrália, Victoria-South Australia	2002	200 MW/ +140 -150 Mvar	132/220 kV 50 Hz	±150 kV	2x180 km cabo subterrâneo	3-níveis NPC IGBT	PWM 1350 Hz
Cross Sound	EUA, Long Island-Connecticut	2002	330 MW/ ±75 Mvar	345/138 kV 60 Hz	±150 kV	2x40 km cabo submarino	3-níveis NPC/IGBT	PWM 1260 Hz
Troll A	Noruega, Kollsnes-Troll A Platform	2005	2x41 MW	132kV-50Hz 56kV-(0 a 63)Hz	±60 kV	4x70 km cabo submarino	2 níveis IGBT	PWM 1950 Hz
Estlink	Estônia - Finlândia	2006	350 MW	400 kV e 330 kV	±150 kV	2x74km submarino 2x31km subterrâneo	-	-
Caprivi	Namíbia, Gerus - Zambézia	2009	300 MW/ ±130 Mvar	400 kV e 330 kV	350 kV	970 km linha aérea	-	-
NordE.ON 1	Alemanha, "Offshore"-Diele	2009	400 MW	170 kV e 380 kV	±150 kV	2x120km submarino 2x75km subterrâneo	-	-
Valhall	Noruega, Valhall - Lista	2010	78 MW	300 kV e 11 kV	150 kV	292 km cabo submarino	-	-

5.0 - POSSÍVEIS APLICAÇÕES NO BRASIL

Entre as principais aplicações que se pode vislumbrar para equipamentos FACTS do tipo STATCOM e elos CC VSC no Brasil pode-se listar:

1) STATCOM

- Eliminação de “flicker”, produzido por cargas de comportamento aleatório (por exemplo, usinas siderúrgicas) ou por gerações eólicas;
- Compensação de potência reativa em aplicações que exijam resposta rápida;
- Aplicações que requeram instalações compactas devidas a proximidade com áreas densamente povoadas;

2) Elos CC com VSC

- Alimentação de cargas isoladas;
- Transmissão em sistemas com cabos (subterrâneos ou submarinos), que são altamente capacitivos e portanto mais adequados ao funcionamento dos conversores tipo VSC;
- Transmissão de energia gerada em plataformas de extração de gás, como alternativa a gasodutos, principalmente em áreas afastadas da costa [8];
- Segmentação de sistemas CA de longa distância com elos CC “back-to-back” com VSC, visando eliminar os problemas de grandes aberturas angulares e propagação de distúrbios entre os subsistemas. Este tipo de aplicação vem sendo sugerida para os aproveitamentos da região Amazônica [9];
- Conexões entre sistemas assíncronos, como por exemplo com os outros países do Mercosul que têm frequência nominal de 50Hz ou em conexões de gerações eólicas com operação em frequência variável para melhor aproveitamento energético;
- Transmissões CC com conexões em pontos do sistema onde a relação de curto-circuito (SCR) seja baixa, uma vez que os conversores VSC podem fornecer potência reativa ao sistema, tanto em caso de operação como retificador quanto como inversor;
- Limitação de fluxo de potência em interconexões específicas, contribuindo para a melhoria de desempenho dinâmico do sistema com possível aumento de intercâmbios entre determinadas áreas [10].

6.0 - CONCLUSÕES

A evolução da tecnologia dos conversores VSC abriu novas perspectivas de aplicação em sistemas de potência tanto para a transmissão em CCAT quanto para os sistemas de compensação de potência reativa. As aplicações mais atrativas são aquelas que exigem desempenho rápido e soluções para problemas como conexões em sistemas com baixo SCR ou onde a limitação de espaço seja crítica. Os sistemas de transmissão em CCAT usando a tecnologia VSC atualmente podem transmitir até cerca de 1000 MW, em 300kV CC. Os desenvolvimentos em andamento sugerem que esses patamares cresçam rapidamente no futuro próximo. Atualmente os equipamentos baseados em tecnologia de tiristores ainda são mais competitivos economicamente que os do tipo VSC porém espera-se que em breve os custos sejam equivalentes. A robustez e confiabilidade dos equipamentos a tiristor faz prever que eles ainda terão espaço em diversas aplicações. As duas tecnologias (VSC e LCC) na realidade são complementares e coexistirão por um bom tempo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hingorani, N.G., “High Power Electronics and Flexible AC Transmission System”, IEEE Power Engineering Review, July 1988.
- [2] Rangel, R.D., “Modelagem de equipamentos FACTS baseados em inversores de tensão para análise de fluxo de potência e fenômenos eletromecânicos”, tese de doutorado, UFRJ/COPPE, Setembro 2004.
- [3] “Introduction to Solid State Power Electronics”, John William Motto, Jr., POWEREX
- [4] Website da ABB: <http://www.abb.com/>
- [5] “Static Synchronous Compensator (STATCOM)”, Technical Brochure 144, WG 14.19, August 2000
- [6] “VSC Transmission”, Technical Brochure 269, WG B4.37, April 2005.
- [7] Qingguang Yu, Pei Li, Wenhua Liu, Xiaorong Xie, “Overview of STATCOM Technologies”, 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, April 2004.
- [8] Biruel Jr., J. “Análise comparativa das tecnologias embarcadas de aproveitamento de gás natural”, tese de mestrado, UFRJ/COPPE, Setembro 2008.
- [9] Gárdos, R., “Transmissão de energia a longa distância com linhas CA segmentadas por conversores VSC B2B”, tese de mestrado, UFRJ/COPPE, Junho 2008.
- [10] Rangel, R.D., Gárdos, R., Pedrosa, A., Watanabe, E.H., “Representação de Elos CC back-to-back baseados em conversores de tensão para estudos de estabilidade eletromecânica”, XI SEPOPE, Belém-PA, Março 2009.