

Elementos para Especificação de Compensadores Estáticos de Potência Reativa para Sistemas Elétricos de Potência

MANFREDO CORREIA LIMA

Chesf
manfredo@chesf.gov.br

Resumo — São apresentados neste trabalho os principais requisitos a serem contemplados na Especificação de um compensador estático de potência reativa (CER) para instalação em sistemas elétricos de potência, para aplicação na Rede Básica do Sistema Interligado Nacional Brasileiro. A Especificação deve definir de forma clara e objetiva o escopo do fornecimento, relacionando os serviços e materiais incluídos e os dados da rede elétrica necessários para a elaboração do projeto do CER. Este documento deve apresentar caráter funcional, permitindo também que soluções tecnologicamente inovativas e economicamente competitivas sejam consideradas, tais como o emprego de CER baseados na tecnologia VSC (*Voltage Source Converters*). Ao final, uma comparação entre estes equipamentos e os CER tradicionais é também apresentada.

Palavras-chaves — Ciclo de Sobrecarga - Compensador Estático - Desempenho Dinâmico - Especificação - Sistema de Controle - *Voltage Source Converter* (VSC).

I. INTRODUÇÃO

Compensadores estáticos de potência reativa (CER) são aplicados no Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN) desde a década de 1980, quando foram instalados pela Transmissora Chesf os CER Fortaleza (-140 a 200MVar, 230kV) e Milagres (-70 a 100MVar, 230kV), com o objetivo de implementar um controle de tensão baseado em equipamentos FACTS [1]. Na época, devido ao pioneirismo da solução adotada, foram utilizadas especificações de compensadores síncronos como base para elaboração das primeiras especificações de compensadores estáticos. A partir daí, conceituados organismos técnicos internacionais como a Cigré e o IEEE produziram documentos com o objetivo de definir requisitos básicos para elaboração de especificações para compensadores estáticos de potência reativa. Com base em tais documentos e na própria experiência operacional, as Transmissoras passaram a elaborar as suas próprias especificações. A tendência atual é que estes documentos sejam elaborados priorizando-se os aspectos funcionais do projeto, de forma a não inviabilizar a adoção de soluções inovativas do ponto de vista tecnológico e muito menos conduzir ao emprego de uma determinada tecnologia em detrimento de outras também viáveis. A proposta deste trabalho é apresentar os principais requisitos a serem contemplados na especificação de um CER para aplicação em sistemas elétricos de potência, com ênfase

no Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN), considerando a evolução tecnológica registrada nos equipamentos de compensação reativa controlada nos últimos anos, além das mudanças no modelo do Setor Elétrico Brasileiro registradas a partir da criação do Operador Nacional do Sistema (ONS). A Especificação deve ser elaborada de modo a definir de forma clara e objetiva o escopo de fornecimento do equipamento, relacionando os serviços e materiais incluídos e os dados da rede elétrica onde será conectado o CER, necessários para a elaboração do seu projeto. Concluindo, a Especificação deve permitir que soluções tecnologicamente inovativas que apresentem vantagens quando comparadas à solução tradicional e que sejam competitivas do ponto de vista econômico sejam consideradas na seleção da alternativa vencedora. Neste contexto, destacam-se os compensadores estáticos de potência reativa baseados na tecnologia VSC (*Voltage Source Converters*), também conhecidos pelo acrônimo STATCOM. Uma comparação entre os itens relevantes associados ao desempenho destes equipamentos e aqueles relacionados aos compensadores estáticos tradicionais é também apresentada.

II. PRINCIPAIS REQUISITOS DE ESPECIFICAÇÃO DE UM CER

Dentre os mais relevantes itens a serem contemplados na especificação de que trata este artigo técnico, destacam-se:

- Tensões nominais e limites contínuos de fornecimento de potência reativa;
- Limites máximos e mínimos de frequência nos regimes permanente, dinâmico e transitório, além da máxima taxa de variação (Hz/s);
- Níveis mínimo e máximo de curto-circuito no ponto de acoplamento com a rede básica;
- Configuração mínima dos equipamentos de média tensão que integram o CER;
- Índices de disponibilidade, confiabilidade e redundância.
- Conjunto mínimo de peças reserva para atendimento à disponibilidade mínima especificada;
- Ciclo de sobrecarga do CER associado às máximas sobretensões possíveis de ocorrer na rede elétrica onde este equipamento será conectado;
- Requisitos de harmônicos (*performance and ratings*);

- Operação em modos degradados quando da perda de elementos que integram o CER, com religamento automático;
- Valores máximos de perdas de potência ativa;
- Estratégias de sobretensão e subtensão;
- Requisitos de desempenho em regime permanente, dinâmico e transitório;
- Sistemas de proteção intrínseca dos equipamentos que integram o CER;
- Sistema de controle em malha fechada.

A seguir, alguns dos itens mais relevantes dentre os acima listados são comentados de forma mais detalhada.

A. Limites Contínuos de Tensão e Potência Reativa

A Especificação deverá estabelecer os limites nominais contínuos de tensão e potência reativa no ponto de acoplamento com a Rede Básica ou Ponto de Acoplamento Comum (PAC) com base em critérios de planejamento atualmente definidos pela EPE e nos Procedimentos de Rede estabelecidos pelo ONS. Estes valores são determinados através de estudos de fluxo de potência e estabilidade, onde são simuladas contingências simples do sistema de transmissão, tais como perda de linha, de geração, de transformador e rejeição de carga. Nestas condições, o compensador deverá manter a sua tensão terminal medida no PAC dentro dos limites definidos pelos critérios de planejamento e procedimentos de rede.

Com relação à tensão terminal do CER, para sistemas de 230kV, considera-se admissível uma variação de $\pm 5\%$ em torno do valor nominal, em regime permanente enquanto para sistemas de 500kV, considera-se $+10\%$ e -5% em torno do respectivo valor. Desta forma, o CER deverá ser dimensionado para fornecer os seus nominais contínuos medidos no PAC para qualquer valor de tensão terminal compreendido entre o valor nominal e $\pm 5\%$ (230kV) e entre -5% e $+10\%$ (500kV).

B. Componentes do Circuito Principal

O CER Funil (-100 a +200MVar, 230kV) foi o primeiro compensador estático de geração tecnológica atual a ser aplicado no sistema Chesf, atual rede básica do SIN em 2001 [2]. Este equipamento possui dois reatores controlados a tiristores (RCT), dois bancos de capacitores manobrados a tiristores (CMT) e dois filtros duplamente sintonizados na terceira e quinta harmônica (STF), que junto com o transformador 230/13,5kV - 200MVA, formam um sistema de seis pulsos, apto a fornecer um valor de potência reativa de saída no 230kV continuamente variada entre 100MVar indutivos e 200MVar capacitivos. Este CER possui disjuntores nos setores de alta e média tensão, o que produz elevado grau de flexibilidade e disponibilidade, devido à possibilidade de operação em modos degradados, quando da perda de um ou mais dos seus elementos, através do religamento automático. Um modo degradado válido representa uma configuração onde, embora os limites de potência de saída sejam reduzidos, é possível variar de forma contínua o seu valor, mantendo-se os níveis de harmônicos produzidos pelo compensador dentro dos limites especificados. Desta forma, um modo degradado válido para

este projeto requer pelo menos a presença de um reator controlado e um filtro. A seleção dos modos degradados válidos é efetuada de forma automática pelo sistema de controle e caso um modo degradado inválido seja produzido, o religamento do CER é bloqueado pela proteção.

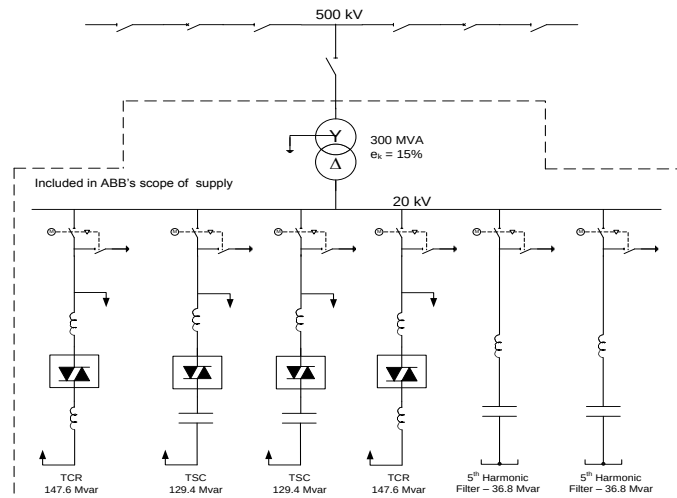


Fig. 1. Configuração Típica de um CER Aplicado ao SIN Brasileiro.

Com a evolução do SIN brasileiro e o aumento dos seus níveis de curto-circuito, foi possível suprimir os disjuntores de média tensão mantendo-se a operação em modos degradados, como mostrado na Fig. 1. Neste caso, as manobras de religamento e seleção dos modos degradados são realizadas através do disjuntor de alta tensão e das chaves seccionadoras motorizadas de média tensão, o que requer a manobra do seu transformador abaixador. Através dos recentes leilões da ANEEL, observa-se uma tendência em estabelecer a configuração mínima para o setor de média tensão dos novos compensadores a seguir: dois reatores controlados a tiristores, dois capacitores manobrados a tiristores e filtros a serem definidos pela Transmissora, de forma a atender aos limites de harmônicos especificados. Conforme estabelecido em [3], especial atenção deve ser dada ao dimensionamento dos filtros de harmônicos para que estes não venham a ser desligados por sobrecarga em condições de contingências simples da rede elétrica, mesmo em caso de operação degradada. A operação em modos degradados com religamento automático descrita neste trabalho representa, na opinião do autor, um relevante requisito a ser contemplado na Especificação de um CER para aplicação em sistemas elétricos de potência.

C. Ciclo de Sobrecarga

Para definição do ciclo de sobrecarga a ser imposto ao CER, deverão ser realizados estudos de transitórios eletromagnéticos, contemplando a simulação das mais severas contingências relativas à ocorrência de sobretensões na rede elétrica sem a presença do CER, para maximizar os valores de sobretensão. Considerando a configuração típica de CER apresentada na Fig. 1, uma estratégia utilizada de forma exitosa até o momento para dimensionamento do referido ciclo de sobrecarga é apresentada a seguir.

Para sobretensões não superiores a 1,3 pu no setor de alta tensão, as válvulas dos RCT devem ser projetadas para que o seu disparo seja efetuado de forma controlada, sem a

ocorrência de disparos protetivos. Para sobretensões superiores a 1,3 pu, os CMT devem ser bloqueados, caso esta ação seja permitida pela proteção contra sobretensão nos capacitores e pulsos de disparo contínuos devem ser enviados aos RCT. Isto faz com que nesta situação, tais elementos contribuam de modo efetivo para a redução das sobretensões. Não obstante, caso a tensão primária permaneça em 1,3 pu por mais de 1s, um comando de desligamento para o CER deve ser emitido. As válvulas dos capacitores manobrados a tiristores devem dimensionadas para permitir o bloqueio para tensões primárias de até 1,5 pu. Para valores superiores a este nível, a proteção de sobretensão nos capacitores não deve permitir o bloqueio dos referidos elementos.

Um ciclo de sobretensão típico especificado para os CER objeto deste trabalho é apresentado a seguir, considerando os máximos valores de tensão no setor de alta tensão e levando em conta as mais severas contingências na rede básica contempladas na fase de projeto:

- Primeiro patamar: 1,80 pu por 50 ms;
- Segundo patamar: 1,40 pu por 200 ms;
- Terceiro patamar: 1,30 pu por 1 s;
- Quarto patamar: 1,20 pu por 10 s;
- Quinto patamar: 1,10 pu continuamente (Indutiva);
- Sexto patamar: 1,05 pu continuamente (Capacitiva).

A estratégia aqui apresentada permite o atendimento pleno ao ciclo de sobretensão especificado, sem redução da capacidade de sobrecarga indutiva dos CER durante a ocorrência de sobretensões. Para CER conectados no nível de tensão de 500kV, utiliza-se também 1,10 pu para o sexto patamar do ciclo de sobrecarga. A temperatura da junção dos tiristores que integram as válvulas dos RCT e CMT é calculada através de um modelo térmico baseado na determinação das impedâncias térmicas transitórias dos tiristores definido pelo Fabricante, devendo seu valor estar disponível na interface humano máquina do CER, junto com informações adicionais do seu sistema de resfriamento.

D. Disponibilidade

Conforme estabelecido em [3], a disponibilidade anual especificada para o CER objeto deste trabalho, incluindo todos os equipamentos de páteo, válvulas de tiristores, serviços auxiliares, sistemas de proteção, supervisão, resfriamento e controle de malha aberta e fechada deverá ser superior a 99%. Além disso, a disponibilidade anual especificada para os sistemas de supervisão, proteção e controle deverá ser superior a 99,93%, conforme o Submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede do ONS. O atendimento aos requisitos relativos aos índices de disponibilidade e confiabilidade deverá ser comprovado na etapa de projeto através de cálculos que constam do relatório de RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*), elaborado pelo Fabricante. Deverá também ser requerido ao Fabricante que informe o conjunto mínimo de peças reserva para garantir o atendimento aos índices de disponibilidade e confiabilidade especificados. Recomenda-se que a aquisição deste conjunto de peças reserva seja contemplada no escopo do fornecimento do CER.

III. SISTEMA DE CONTROLE

A título de exemplo de sistema de controle utilizado em um CER aplicado no SIN, é apresentado a seguir o esquema empregado no CER Tauá II pertencente à Transmissora Chesf e em operação desde dezembro de 2016 [4]. Neste esquema são utilizadas como entradas a tensão de sequência positiva e a componente reativa da corrente, ambas medidas no setor de alta tensão (Fig. 2). Os valores instantâneos destes sinais são filtrados através de filtros discretos do tipo IIR (*Infinite Impulse Response*) sintonizados na terceira, quinta e sétima harmônicas. Em seguida, é efetuada a conversão dos referidos sinais do domínio das componentes de fase para o das componentes alfa e beta, a partir das quais são obtidas as componentes de sequência positiva e negativa dos sinais de tensão e as componentes d e q dos sinais de corrente. A magnitude do vetor de tensão de sequência positiva e a componente reativa da corrente do compensador no setor de alta tensão são retificadas e aplicadas à entrada de um filtro sintonizado na segunda harmônica. Em seguida, o sinal de corrente é multiplicado pelo estatismo (*slope*) e subtraído do sinal de erro de tensão, obtido a partir da diferença entre a tensão medida no setor de alta tensão e a tensão de referência, cujo valor é ajustado pelo operador. O resultado (V_{ERROR}) é o sinal de erro corrigido pelo estatismo, que serve de entrada ao controlador principal do CER.

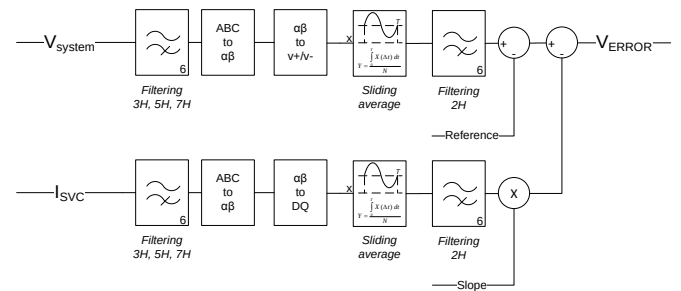


Fig. 2. Formação do Sinal de Entrada do Controlador Principal do CER.

Conforme mostrado na Fig. 3, ao sinal V_{ERROR} é aplicado o conjunto de ganhos a seguir descrito. O primeiro ganho (SCL) corrige o sinal de erro com base no nível de curto-circuito dinâmico medido no ponto de acoplamento do CER com a rede básica, propiciando que os parâmetros de performance especificados relativos à resposta ao degrau sejam atendidos, conforme a seguir.

- Percentual de *overshoot* máximo de 30%;
- Tempo de subida (*Rise Time*) máximo de 33 ms;
- Tempo de estabilização (*Settling Time*) máximo de 100 ms.

Este conjunto de parâmetros foi definido com base em recomendações de entidades técnicas internacionais, além de experiência operacional [3] e vem sendo utilizado de forma exitosa nas especificações de vários CER aplicados no SIN. O sistema de controle do CER deverá possuir um esquema automático de otimização de ganho que garanta o atendimento aos referidos parâmetros de performance, desde que o nível de curto-circuito no PAC mantenha-se no intervalo definido no projeto. Uma estratégia utilizada com sucesso para a implementação do mencionado algoritmo de otimização de ganho baseia-se na aplicação programada de um pequeno distúrbio no sinal de saída do compensador e na medição da relação entre os erros de tensão e potência reativa

correspondentes a este distúrbio, sendo tal procedimento conhecido como **Teste de Ganho** [2]. Com base na magnitude e polaridade do sinal de saída do CER quando da aplicação do Teste de Ganho, o ganho SCL será elevado ou reduzido.

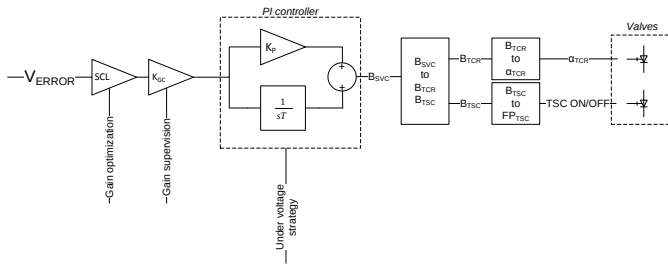


Fig. 3. Estágio Final do Sistema de Controle em Malha Fechada do CER.

Deverá ser implementada uma malha de controle, denominada Supervisor de Ganho (GS) cujo objetivo é preservar a operação estável do CER caso sejam detectadas oscilações no seu sinal de saída de magnitude superior ao definido em projeto, reduzindo o ganho K_{GC} até que tais oscilações sejam satisfatoriamente amortecidas. Este requisito deverá constar na Especificação, pois garante operação estável mesmo em condições de operação não previstas no projeto do CER. A malha de controle principal deste equipamento normalmente baseia-se na ação de um controlador proporcional-integral (PI), com parâmetros ajustáveis através dos valores dos ganhos SCL e K_{GC} (Fig. 3). Um controlador integral puro também poderá ser utilizado, devendo o Fabricante ficar livre para definir qual a estratégia de controle mais adequada a ser utilizada no seu projeto [5]. A susceptância dos CMT é determinada com base nos limites de chaveamento definidos para estes elementos, que possuem estratégia de controle discreta (ON / OFF). Por outro lado, a susceptância dos RCT é variada continuamente entre os seus limites máximo e mínimo, com base no valor do ângulo de disparo dos tiristores definido pelo sistema de controle do compensador. Tais elementos são responsáveis pelo controle contínuo da potência reativa injetada pelo CER na rede básica. O sistema de controle do CER deve possuir no mínimo duas unidades redundantes, produzindo redundância de 100%, com transferência automática.

IV. MALHAS DE CONTROLE SUPLEMENTARES

A. Manobra de Elementos Externos Shunt

A atual tecnologia de CER disponível para aplicação no SIN brasileiro permite que tais equipamentos efetuem o controle da manobra de elementos externos previamente selecionados, tais como reatores e capacitores shunt conectados ao seu setor de alta tensão. Reatores shunt são inseridos caso a susceptância de saída do CER atinja o seu limite indutivo por um intervalo de tempo pré-determinado e desligados, caso a referida susceptância torne-se inferior ao respectivo limite indutivo. De maneira análoga, capacitores shunt são inseridos caso a susceptância de saída do CER atinja o seu limite capacitivo por um intervalo de tempo pré-ajustado e desligados quando o referido sinal torna-se inferior a este limite. Caso o CER seja desligado por proteções associadas a defeitos internos, elementos shunt eventualmente inseridos permanecem neste estado e passam a ser comandados pelo

operador. Deverão ser informados na Especificação quantos e se possível quais elementos shunt externos serão controlados pelo CER objeto deste documento.

B. Esquema de Bloqueio por Subtensão

Este esquema força o CER a operar em 0MVAR caso a sua tensão terminal seja reduzida abaixo de um valor previamente ajustado, por um intervalo de tempo também determinado, o que na configuração base aqui apresentada corresponde ao bloqueio dos CMT e de um RCT, sendo o outro RCT utilizado para compensar a susceptância dos filtros, para produzir 0MVAR no ponto de acoplamento comum (PAC). Esta função tem por objetivo evitar que na eliminação de faltas nas suas proximidades, o CER venha a operar em pontos fortemente capacitivos e desta forma contribua para a elevação das sobretensões associadas à eliminação das faltas, devido ao elevado valor de erro desenvolvido na entrada da sua malha de controle principal durante o defeito. O referido esquema deve ser apto a atuar para faltas locais ou remotas, equilibradas ou desequilibradas. Tais requisitos deverão fazer parte da Especificação do CER. A detecção do nível de atuação do referido esquema pode, por exemplo, ser efetuada através da medição da componente de sequência positiva da tensão de alta para faltas trifásicas equilibradas e do mínimo valor eficaz da referida tensão para faltas desequilibradas. O CER é liberado para efetuar o controle da tensão quando seu sinal de entrada atingir um valor superior ao nível de desbloqueio acrescido de uma histerese definida em projeto.

V. OPERAÇÃO DE DOIS OU MAIS CER ELETRICAMENTE PRÓXIMOS

Como descrito em [5], quando se tem dois CER operando eletricamente próximos, para atender aos requisitos de Especificação referidos no item III, os ganhos dos seus respectivos sistemas de controle devem ser ajustados levando em conta a dinâmica da rede elétrica. Para isto, medições da sensibilidade tensão x potência reativa da rede devem ser efetuadas para propiciar a definição de valores adequados para tais parâmetros. Como mencionado no item III, este processo é implementado pela malha de controle denominada Otimizador de Ganho (GO). A medição da sensibilidade da rede elétrica baseia-se na injeção pelo CER de um pulso de susceptância e na correspondente variação de tensão ou potência reativa. No entanto, se um segundo CER opera eletricamente próximo daquele cujo GO encontra-se ativo, a resposta da rede elétrica será alterada e a medição efetuada durante o teste de ganho será imprecisa.

Uma estratégia para fazer face a esta questão baseia-se na implementação de um esquema de controle e de um link rápido de telecomunicação entre os CER adjacentes para inibir a malha principal de controle do CER que não está realizando o seu teste de ganho naquele instante (CER passivo), forçando tal equipamento a operar no modo manual durante um curto intervalo de tempo através da aplicação de uma banda morta no seu controlador principal. Uma alternativa para implementação do referido esquema é descrita a seguir.

- Um sinal é enviado do CER ativo ao CER passivo, indicando que o primeiro irá aplicar o pulso de medição (teste de ganho);

- Ao receber o sinal de alerta, o CER passivo aplica uma banda morta no seu sistema de controle e informa ao CER ativo que o pulso de medição pode ser aplicado;
- O CER ativo recebe esta informação do CER passivo, realiza o teste de ganho e transmite a informação requerida pelo CER passivo para cálculo do seu ganho;
- Ao final do teste de ganho, o CER ativo informa ao CER passivo que a banda morta poderá ser removida;
- O CER passivo remove a banda morta e retoma à sua operação normal;
- Caso uma grande perturbação seja aplicada na rede elétrica no instante da aplicação do teste de ganho, a banda morta é desativada e o CER passivo retoma de imediato à operação no modo de controle de tensão, sem esperar o final do teste de ganho realizado pelo CER ativo, que será considerado inválido.

Recomenda-se que um esquema nos moldes do aqui descrito seja contemplado na Especificação de CER objeto deste trabalho, caso haja previsão de outros CER operando eletricamente próximos.

VI. CER TRADICIONAL X STATCOM

Com a intensa utilização de energias renováveis verificada nos últimos anos no sistema elétrico europeu em substituição a fontes de energia baseadas na utilização de combustíveis fósseis e usinas nucleares, adequações no sistema de transmissão foram necessárias para viabilizar o escoamento destas fontes de energia, como o uso intenso de equipamentos baseados em eletrônica de potência tais como elos de HVDC e equipamentos FACTS. Neste contexto, as tecnologias de compensação estática controlada que utilizam a comutação pela linha, baseadas na utilização de tiristores e aquelas autocomutadas, que utilizam conversores multinível (MMC), apresentam-se no momento como as alternativas mais viáveis para o controle da tensão e melhoria da estabilidade dinâmica em sistemas elétricos de potência. Neste item é apresentada uma comparação sucinta entre a tecnologia *Voltage Source Converter* (VSC) e a tradicional.

A. CER de Tecnologia Tradicional

Tais equipamentos utilizam a tecnologia tradicional de válvulas de tiristores comutadas pela linha, junto com elementos indutivos e capacitivos shunt divididos em três grupos, conforme a seguir.

- Reatores Controlados a Tiristores (RCT): injetam na rede elétrica potência reativa indutiva continuamente variada do valor máximo a zero, conforme o ângulo de disparo dos tiristores varia entre os seus valores mínimo e máximo, próximos respectivamente a 90° e 180°;
- Capacitores Manobrados a Tiristores (CMT): injetam na rede elétrica potência reativa capacitiva variada de forma discreta, conforme suas válvulas de tiristores são disparadas ou bloqueadas;
- Filtros Passivos: injetam potência reativa capacitiva cujo valor depende da sua tensão terminal;

- O valor de potência reativa indutiva ou capacitiva injetado na rede elétrica varia com o quadrado da tensão proporcionando uma faixa de sobrecarga indutiva definida pela suportabilidade das válvulas de tiristores dos reatores controlados;
- Faixas de potência reativa de saídas simétricas ou assimétricas podem ser facilmente obtidas através do dimensionamento adequado dos RCT, CMT e filtros;
- A operação em modos degradados pode ser obtida através do desligamento automático de elementos defeituosos e religamento automático do CER através do seu sistema de controle.

B. CER de Tecnologia VSC

- Utilizam conversores tipo fonte de tensão (VSC – *Voltage Source Converters*) com base em chaves semicondutoras de comutação forçada (IGBT) conectados ao PAC através de um transformador abaixador;
- A potência reativa de saída independe do valor da tensão terminal, sendo limitada principalmente pela suportabilidade térmica das chaves semicondutoras;
- Índices de disponibilidade superiores a 99% para os CER tipo VSC são obtidos atualmente sem ser necessária a adoção de requisitos adicionais;
- Utilizam conversores modulares multinível (MMC) nas válvulas de IGBT;
- Cada ramo de conversor multinível (MMC) possui uma redundância intrínseca de 10%. A operação em modos degradados é possível caso conversores adicionais sejam instalados;
- Possuem faixa simétrica de potência reativa. Caso faixas assimétricas sejam requeridas, elementos shunt fixos ou manobrados a tiristores devem ser instalados em conjunto com o CER tipo VSC;
- Podem ser aplicados em locais caracterizados por reduzida relação entre a potência nominal do CER e o nível de curto-circuito no ponto de acoplamento sem implicar em degradação do desempenho dinâmico;
- Apresentam melhor desempenho transitório, em especial na eliminação de faltas, por não efetuar chaveamento de capacitores *shunt* para promover a recuperação da tensão terminal;
- Proporciona redução no tamanho e nos níveis de potência dos reatores a núcleo de ar utilizados (Fig. 6).

C. Cálculo de Perdas e Ciclo de Sobrecarga Indutiva

O critério atualmente adotado pela ANEEL para cálculo das perdas máximas de CER não considera a capitalização dos seus valores ao longo da vida útil do referido equipamento, da ordem de trinta anos. As referidas perdas são definidas através de cálculo e ratificadas através de medições de campo para os pontos de operação correspondentes às potências nominal indutiva, nominal capacitiva e 0MVar. Neste contexto, os CER tipo VSC normalmente não atendem aos

limites estabelecidos pela ANEEL, o que atualmente tem inviabilizado a sua aplicação em situações onde a aplicação dos CER tradicionais é viável. As Tabelas I e II apresentam valores comparativos de perdas calculadas para os CER tradicionais Extremoz e Ceará Mirim pertencentes respectivamente às Transmissoras Chesf e Extremoz Transmissora do Nordeste (ETN) e para o CER tipo VSC Rio Branco, pertencente à Transmissora Eletronorte [3]. Observa-se que as perdas máximas do CER Rio Branco são superiores às calculadas para os CER de tecnologia tradicional. A título de ilustração, a Fig. 4 apresenta uma curva comparativa de perdas para os CER tradicionais e do tipo VSC, onde se pode ver que nos limites nominais, as perdas máximas deste último são superiores às do CER tradicional [6]. Por outro lado, o atendimento ao ciclo de sobrecarga indutiva atualmente especificado pela ANEEL não se dá de forma plena em CER tipo VSC (Fig. 5), o que também contribui para inviabilizar a sua aplicação, à luz dos critérios adotados pela ANEEL. A Fig. 6 apresenta o arranjo típico de um CER tipo VSC (STATCOM), destacando-se a redução do espaço requerido para a sua instalação. A Fig. 7 apresenta a característica $V \times I$ de um CER STATCOM, destacando-se que nos limites nominais, a potência reativa de saída é mantida para valores reduzidos da tensão terminal.

VII. CONCLUSÕES

- Os principais requisitos para especificação de um CER para aplicação no SIN são apresentados, levando-se em consideração o caráter funcional do referido documento e a experiência operacional das Transmissoras que utilizam estes equipamentos.
- Aspectos relevantes a serem incluídos em uma especificação tais como redundância, perdas máximas, disponibilidade, religamento automático e otimização de ganho são abordados neste trabalho.
- Uma comparação entre as tecnologias tradicional e baseada no emprego de conversores VSC é também efetuada, evidenciando a viabilidade da tecnologia tradicional com base nos critérios atualmente utilizados para especificação de CER para aplicação no SIN.
- A utilização de equipamentos de compensação baseados em conversores VSC somente será viável de forma plena no SIN brasileiro caso o critério associado ao cálculo de perdas atualmente utilizado seja reavaliado e aqueles itens nos quais o STATCOM apresenta desempenho superior, tais como a resposta transitória na eliminação de faltas e curva característica $V \times I$ sejam considerados. O atendimento ao ciclo de sobrecarga especificado deverá ser assegurado pelo STATCOM.

TABELA I. CER TRADICIONAIS: PERDAS MÁXIMAS

Ponto de Operação	150MVar Capacitivos	0MVar	75MVar Indutivos
Limites da ANEEL (%)	0,6	0,2	0,4
CER Ceará Mirim (%)	0,598	0,156	0,39
CER Extremoz (%)	0,6	0,16	0,4

TABELA II: CER VSC RIO BRANCO: PERDAS MÁXIMAS

Ponto de Operação	55MVar Capacitivos	0MVar	20MVar Indutivos
CER Rio Branco	1,45%	0,37%	0,91%

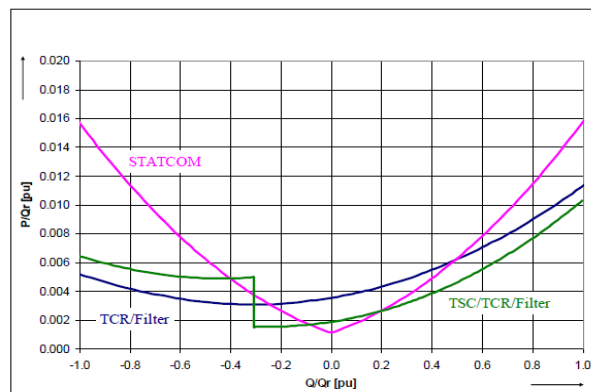


Fig. 4. Perdas Típicas para CER Tradicionais e do Tipo VSC [6].

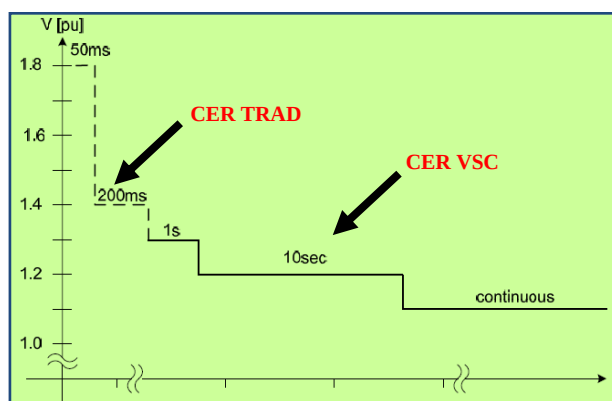


Fig. 5. Ciclo de Sobrecarga para CER Tradicionais e do Tipo VSC [6].

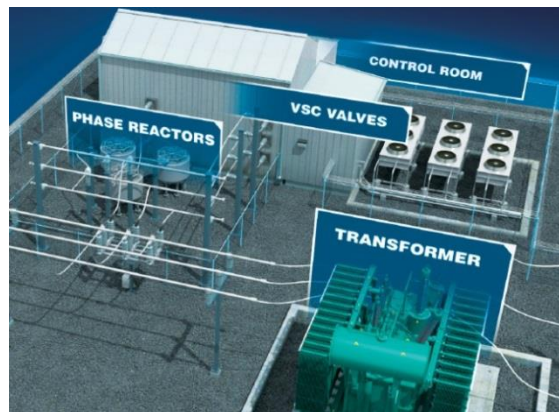


Fig. 6. CER STATCOM: Arranjo Típico.

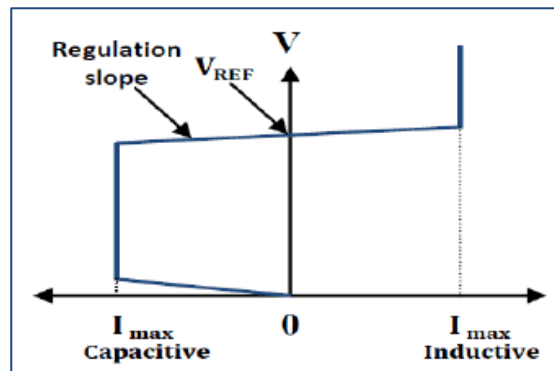


Fig. 7. CER STATCOM: Característica $V \times I$.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] Narain Hingorani and Lazlo Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Wiley IEEE Press, 1999, ISBN 978-0-7803-3455-7.
- [2] Manfredo Correia Lima, “Um Panorama do desenvolvimento Tecnológico Associado à Aplicação de Equipamentos FACTS no Sistema Elétrico Brasileiro: Aspectos de Projeto Básico”, *XVI Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (ERLAC)*, 17 a 21 de Mayo de 2015, Puerto Iguazu, Argentina, Procedures em DVD.
- [3] Sergio de Oliveira Frontin (Organizador), *Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*, Brasília, Teixeira, 2013, ISBN 978-85-88041-07-7. pp.703-754.
- [4] J. Aho, S. Kuusinen, T. Nissinen, A. Kähkönen, M. Lima, H. Salvador, M. Spinella, R. Campos, “Blocking Reactor as Part of SVC System – a Novel concept for Harmonics Reduction and Lowered Operational Losses”, *CIGRÉ 2016 Meeting*, B4-202, Paris, August, 2016.
- [5] Manfredo Correia Lima, Per-Emil Eliasson, Claes Brisby, “Considerations Regarding Electrically Close Static Var Compensators Joint Operation and Performance”, *XIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE)*, May 18th to 21th 2014, Foz do Iguaçu, Brazil, Procedures in DVD.
- [6] G. Pilz, D. Langner, M. Battermann, H. Schmitt, “Line - or self-commutated Static Var Compensators (SVC) – Comparison and application with respect to changed system conditions” *Cigré Colloquium HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance*, October 2nd-3th 2013, Brasilia, Brazil.