



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/25
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

CONSIDERAÇÕES RELATIVAS À ESPECIFICAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA REATIVA PARA APLICAÇÃO NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Manfredo Correia Lima (*)
Chesf

RESUMO

São apresentados os principais requisitos a serem contemplados na especificação de um compensador estático de potência reativa (CER) para aplicação na Rede Básica do Sistema Interligado Nacional. 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. Tal documento deverá 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-CHAVE

Ciclo de Sobrecarga, Compensador Estático, Especificação, Sistema de Controle, Voltage Source Converter

1.0 - INTRODUÇÃO

Compensadores estáticos de potência reativa (CER) são aplicados no Sistema Interligado Nacional (SIN) desde a década de 1980, quando foram instalados pela Chesf os CER Fortaleza (-140 a 200Mvar, 230kV) e Milagres (-70 a 100Mvar, 230kV), com o objetivo de implementar na sua área de influência um controle de tensão baseado em dispositivos FACTS (1). Na ocasião, 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. Com base em tais documentos e na própria experiência operacional, as Transmissoras passaram a elaborar as suas especificações.

A tendência atual é que tais especificações sejam elaboradas 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 IT é apresentar os principais requisitos a serem contemplados na especificação de um CER para aplicação na Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando a evolução tecnológica registrada nos equipamentos de compensação reativa controlada nos últimos anos, além das mudanças no modelo do Setor Elétrico Brasileiro que ocorreram a partir da criação do Operador Nacional do Sistema (ONS).

A Especificação deve ser elaborada de forma 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.

(*) Rua Delmiro Gouveia, nº 333, Bairro Bongi – CEP 51.021-330, Recife, PE, Brasil
Tel: (+55 81) 3229-2539 – Fax: (+55 81) 3229-2488 – Email: manfredo@chesf.gov.br

Concluindo, a Especificação de que trata este IT deve permitir que soluções tecnologicamente inovativas que apresentem vantagens quanto ao desempenho do compensador 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 como STATCOMS. Uma comparação entre os itens relevantes associados ao desempenho destes equipamentos e aqueles relacionados aos compensadores estáticos tradicionais é também aqui apresentada.

2.0 - PRINCIPAIS REQUISITOS DE ESPECIFICAÇÃO DE UM CER

Dentre os mais relevantes itens a serem contemplados na referida especificação, 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 / seg).
- 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 que o CER deverá suportar, associado às máximas sobretensões possíveis de ocorrer na rede elétrica onde este equipamento será conectado.
- Requisitos de harmônicos (*performance e 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 sobre 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.

2.1 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 definidos 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 $\pm 5\%$ em torno do valor nominal, 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).

2.2 Componentes do Circuito Principal

O CER Funil foi o primeiro compensador estático de geração atual a ser aplicado no sistema Chesf em 2001 (3). 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 uma potência reativa de saída no 230kV continuamente variada entre 100Mvar indutivos e 200Mvar capacitivos. Este CER possui disjuntores na 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 esta potência, mantendo-se os níveis de harmônicos produzidos pelo compensador dentro dos limites especificados. Desta forma, um modo degradado válido 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.

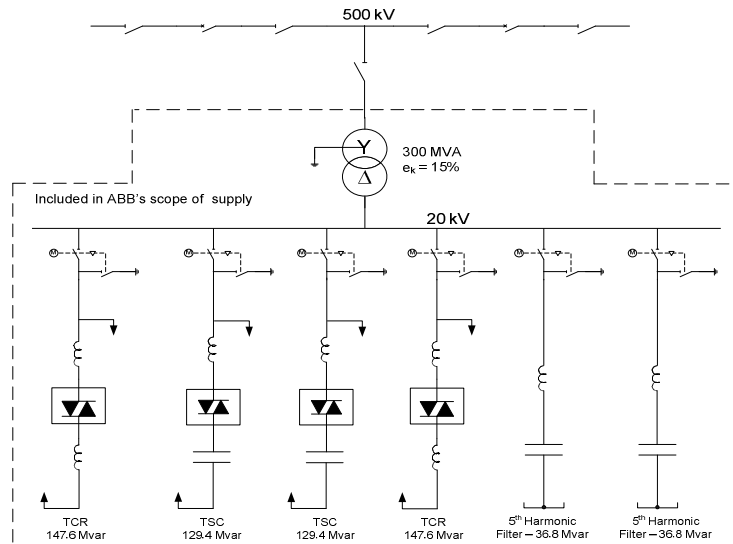


FIGURA 1- Configuração Típica de um CER Aplicado no SIN

Com a evolução do SIN e a elevação dos seus níveis de curto-circuito, tornou-se possível suprimir os disjuntores de média tensão mantendo-se a operação em modos degradados, como mostrado na Figura 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 por parte desta Agência uma tendência em estabelecer a configuração mínima para o setor de média tensão dos novos compensadores a seguir indicada: 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 (2), 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 com indisponibilidade de um filtro. A operação em modos degradados com religamento automático aqui descrita é, na opinião do autor, um relevante requisito a ser contemplado na Especificação de um CER para aplicação no SIN.

2.3 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 obtidos. Considerando a configuração típica de CER apresentada na Figura 1, uma estratégia utilizada de forma exitosa até o momento para dimensionamento do referido ciclo de sobrecarga é descrita a seguir.

Para sobretensões não superiores a 1,3pu 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 1,3pu, 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, o que faz com que nesta situação, tais elementos contribuam de modo efetivo para a redução das sobretensões. Não obstante, caso a tensão primária permaneça em 1,3pu por mais de 1seg, um comando de desligamento para o CER é emitido. As válvulas dos capacitores manobrados a tiristores devem ser dimensionadas para permitir o bloqueio para tensões primárias de até 1,5pu. Para valores superiores a este nível, a proteção de sobretensão nos capacitores não permite o bloqueio dos referidos elementos.

Um ciclo de sobretensão típico especificado para os CER objeto deste IT é apresentado a seguir, considerando os máximos valores de tensão no setor de alta tensão, 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 contínua (Indutiva);
- Sexto patamar: 1,05 pu contínua (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 1,10pu para o sexto patamar do referido ciclo. 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, estando seu valor disponível na interface humano máquina do CER.

2.4 Disponibilidade

Conforme (2), a disponibilidade anual especificada para o CER, 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 ser requerido ao Fabricante que informe o conjunto mínimo de peças reserva que garanta 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.

3.0 - SISTEMA DE CONTROLE:

3.1 Malha de Controle Principal

A malha principal de um CER típico projetado para aplicação no Sistema Elétrico Brasileiro utiliza como entradas a tensão de sequência positiva e a sua componente reativa da corrente, ambas medidas no setor de alta tensão. 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 (Figura 2).

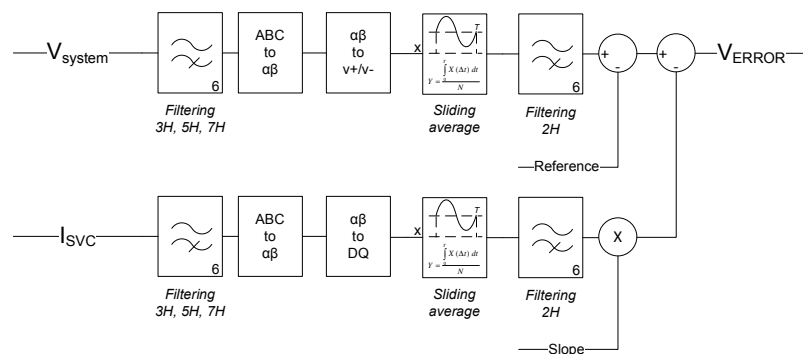


FIGURA 2 – Formação do Sinal de Entrada do Controlador Principal do CER

Conforme mostrado na Figura 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 para o compensador relativos à resposta ao degrau seja atendidos, conforme a seguir.

- Percentual de *overshoot* máximo de 30%.
- Tempo de subida (*Rise Time*) máximo de 33mseg.
- Tempo de estabilização (*Settling Time*) menor que 100mseg.

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. Deve ser especificado que 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” (3). 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.

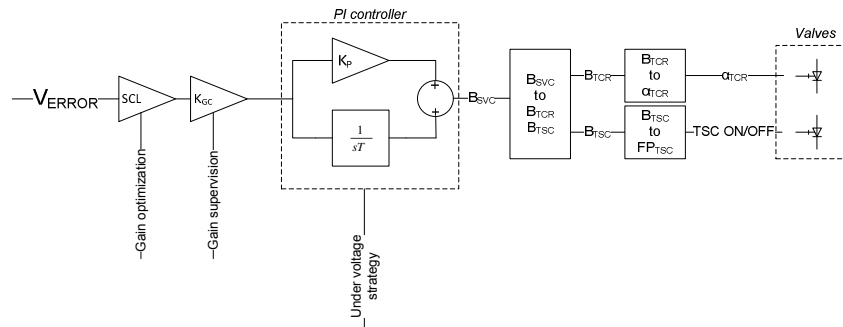


FIGURA 3: Estágio Final do Sistema de Controle em Malha Fechada do CER

A segunda malha de controle do CER, denominada Supervisor de Ganho (GS) tem por objetivo preservar a estabilidade do compensador caso sejam detectadas oscilações no seu sinal de saída, reduzindo o ganho K_{GC} do seu valor normal fixado em 1,0 até que tais oscilações sejam satisfatoriamente amortecidas. Este requisito deverá também 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} . Um controlador integral puro também poderá ser utilizado, devendo o Fabricante ser deixado livre para definir qual a estratégia de controle mais adequada a ser utilizada no seu projeto (4). 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, sendo estes elementos responsáveis pelo controle contínuo da potência reativa injetada pelo CER na rede básica. O sistema de controle do CER deve possuir duas unidades redundantes, produzindo redundância de 100%.

4.0 - MALHAS SUPLEMENTARES DE CONTROLE

4.1 Manobra de Elementos Shunt Externos

A atual tecnologia de CER disponível para aplicação no SIN permite que tais equipamentos efetuem o controle da manobra de elementos externos previamente selecionados, tais como reatores e capacitores shunt conectados ao setor de alta tensão dos mencionados CER. 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 quais elementos shunt externos serão controlados pelo CER objeto deste documento.

4.2 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 corresponde ao bloqueio dos CMT e de um RCT, sendo o outro RCT utilizado para compensar a susceptância dos filtros, o que produz 0Mvar na alta tensão. 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. A detecção do nível de atuação do referido esquema deve ser efetuada através da medição da componente de sequência positiva da tensão de alta para faltas trifásicas equilibradas e do mínimo valor TRUE RMS da referida tensão para faltas desequilibradas. O CER é liberado para efetuar o controle da tensão depois que seu sinal de entrada atingir um valor superior ao nível de desbloqueio acrescido de uma histerese definida em projeto. Tais requisitos deverão fazer parte da Especificação do CER.

5.0 - INFLUENCIA DE DOIS OU MAIS CER OPERANDO ELETRICAMENTE PRÓXIMOS

5.1 Influência da Operação de CER Adjacentes

Quando se tem dois CER operando eletricamente próximos, a identificação dos coeficientes de sensibilidade da tensão em relação à potência reativa pelos respectivos Otimizadores de Ganho é afetada, pois cada CER comporta-se como uma susceptância controlada de forma independente na região de influência do equipamento vizinho. Durante os testes em RTDS reportados em (4), uma função especial para considerar a influencia das interações entre dois CER eletricamente próximos no desempenho do Otimizador de Ganho foi testada. Esta função, descrita de forma detalhada em (4), reduz o valor do ganho determinado pelo Otimizador de Ganho através de um fator função do nível de curto-circuito no ponto de acoplamento do CER com a rede básica (setor de alta tensão), resultando em valores mais reduzidos e conservativos para os referidos ganhos. Este requisito deverá fazer parte da Especificação caso haja a previsão de se ter um ou mais equipamentos desta natureza operando eletricamente próximos do CER objeto deste documento.

5.2 Operação do Otimizador de Ganho com dois CER Operando Eletricamente Próximos

Como descrito em (4), quando se tem dois CER operando eletricamente próximos, para atender aos requisitos de especificação referidos no item 3.0 deste IT, 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 estes ganhos.

Como mencionado no item 3.1 deste IT, este processo é implementado pela malha de controle denominada Otimizador de Ganho. 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 Otimizador de Ganho 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 o referido equipamento a operar no modo manual durante um curto intervalo de tempo através da aplicação de uma banda morta no seu controlador principal. O referido esquema pode ser implementado conforme descrito a seguir.

- Um sinal é enviado do CER ativo, indicando que este equipamento 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 e realiza o seu teste de 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 a sua operação normal.
- Caso uma grande perturbação seja aplicada neste instante na rede elétrica, 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.

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

6.0 – CER TRADICIONAL X STATCOM

Com a intensa utilização de parques eólicos 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 são necessárias para viabilizar o escoamento destas fontes de energia, como o emprego de equipamentos baseados em eletrônica de potência tais como elos de HVDC e dispositivos FACTS (5). 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, apresentam-se 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 VSC e a tradicional, comentando-se sobre a viabilidade da aplicação da primeira no SIN.

6.1 CER de Tecnologia Tradicional

Conforme descrito ao longo deste IT, tais equipamentos utilizam a tecnologia tradicional de 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 de 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, que injetam potência reativa capacitiva cujo valor depende da sua tensão terminal.
- O valor de potência reativa indutiva ou capacitiva injetado no sistema elétrico varia com o quadrado da tensão no lado de alta tensão do transformador elevador do CER, proporcionando uma faixa de sobrecarga indutiva definida pela suportabilidade das suas válvulas de tiristores.
- Faixas de potência reativa de saída 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.

6.2 CER Baseados em Conversores Tipo Fonte de Tensão (VSC)

- Utilizam conversores tipo fonte de tensão (*VSC – Voltage Source Converters*) à base de IGBT e são conectados ao ponto de acoplamento comum através de um transformador abaixador.
- A potência reativa de saída independe do valor da tensão terminal, sendo definida pela suportabilidade térmica das chaves semicondutoras utilizadas.
- Índices de disponibilidade superiores a 99% para os CER tipo VSC são obtidos atualmente sem ser necessária a adoção de requisitos adicionais.
- Cada ramo de conversor multinível possui uma redundância intrínseca de 10%. A operação em modos degradados é possível caso conversores adicionais sejam instalados em paralelo.
- 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.

6.3 Cálculo de Perdas e Ciclo de Sobrecarga Indutiva

O critério atualmente adotado pela ANEEL para cálculo das perdas máximas de compensadores estáticos de potência reativa não considera a capitalização dos seus valores ao longo da vida útil estimada para o referido equipamento, da ordem de trinta anos. As referidas perdas são definidas por esta Agência 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 1 e 2 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 o CER tipo VSC Rio Branco, primeiro equipamento que utiliza esta tecnologia instalado no SIN e pertencente à Transmissora Eletronorte (3). Pode-se observar claramente que as perdas máximas do CER Rio Branco são superiores às calculadas para os CER de tecnologia tradicional. A título de ilustração, a Figura 4 apresenta uma curva comparativa de perdas para os CER tradicionais e do tipo VSC, de onde se pode ver que nos limites nominais, as perdas máximas deste último são nitidamente superiores às do CER tradicional. Por outro lado, o atendimento ao ciclo de sobrecarga indutiva atualmente especificado pela ANEEL não se dá de forma plena em CER tipo VSC conforme mostrado na Figura 5, o que também contribui para inviabilizar a sua aplicação em situações onde a utilização do CER tradicional é viável.

Tabela 1 – Perdas Máximas para CER Tradicionais

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 2 – Perdas Máximas para o CER VSC Rio Branco

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

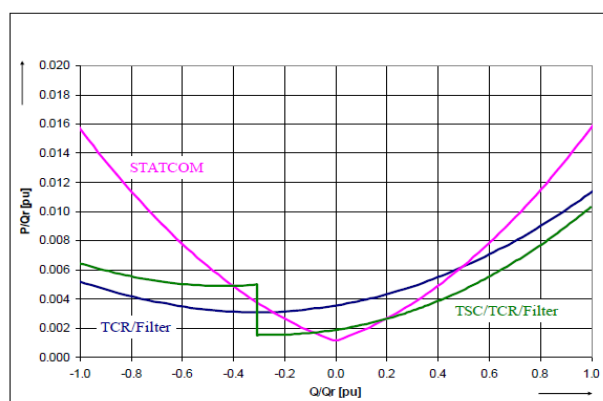


FIGURA 4. Perdas Típicas para em CER Tradicionais e do Tipo VSC (5)

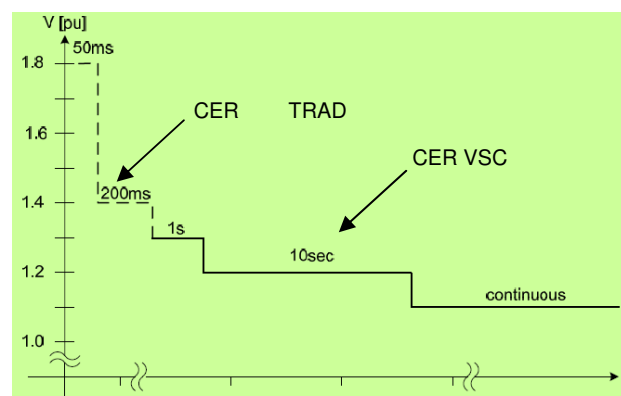


FIGURA 5: Ciclo de Sobrecarga Indutiva para CER Tradicionais e Tipo VSC (5)

7.0 – CONCLUSÕES

- Os principais requisitos para especificação de um CER para aplicação no SIN são apresentados neste IT, levando-se em consideração principalmente 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 IT.
- Uma comparação entre as tecnologias tradicional e baseada no emprego de conversores VSC é também efetuada, evidenciando as vantagens 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 no SIN caso critérios tais como os associados ao cálculo de perdas e ciclo de sobrecarga atualmente utilizados sejam reavaliados.

8.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (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) 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.
- (3) Manfredo Correia Lima, "Um Panorama do desenvolvimento Tecnológico Associado à Aplicação de Equipamentos FACTS no Sistema Elétrico Brasileiro: Aspectos de Projeto Básico", XVI Encontro Regional Iberoamericano de Cigré (ERAC), 17 a 21 de Mayo de 2015, Puerto Iguazu, Argentina, Procedures em DVD.
- (4) 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, Brasil, Procedures in DVD.

- (5) 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.

9.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

Manfredo Correia Lima nasceu em Recife, Brasil, em 1957. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1979, recebeu o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1997 e o de Doutor em Engenharia Mecânica, com ênfase em automação de sistemas pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2005. Dr. Correia Lima ingressou na Chesf em 1978, onde desenvolve atividades nas áreas de eletrônica de potência, equipamentos FACTS, qualidade de energia, sistemas de controle, transitórios eletromagnéticos e transmissão em CCAT. Em 1992, ingressou na Universidade de Pernambuco (UPE), onde é responsável pelas disciplinas Eletrônica de Potência e Controle de Processos e desenvolve atividades de pesquisa. É representante da Chesf no CE - B4 (Eletrônica de Potência e Elos CCAT) da Cigré Brasil e sócio fundador da Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE).

