



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

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

GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

NOVOS FILTROS ATIVOS CA DE POTÊNCIA PLENA PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM ALTA TENSÃO CC E CA

**Marcos Pereira (*)
SIEMENS AG**

**Andreas Zenkner
SIEMENS AG**

**André Luiz Pereira de Oliveira
SIEMENS AG**

RESUMO

O primeiro filtro ativo AC utilizado em um Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua (CCAT) foi instalado pela Siemens em 1998 na estação conversora de CCAT Tjele na Dinamarca, como um projeto de demonstração. Este filtro ativo usou um conversor *IGBT* de 0,6 MVA. Este informe técnico introduz os Novos Filtros Ativos CA de Potência Plena desenvolvidos como um novo equipamento pela mesma companhia. Quatro destes equipamentos foram comissionados nas estações conversoras do *Neptune Regional Transmission System – USA (Neptune)* em 2007. Estes novos filtros ativos têm um conversor *IGBT* multinível de 22 MVA e abrem novas possibilidades para a eliminação de harmônicos nas estações de CCAT e também no Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada onde forem requeridas tais aplicações.

PALAVRAS-CHAVE

Filtros Ativos, Transmissão em Alta Tensão CC e CA, Harmônicos, Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

Um total de quatorze filtros ativos foram instalados em estações conversoras de Sistemas de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua (CCAT, também conhecidos pelo termo em inglês *High Voltage Direct Current – HVDC*) entre 1993 e 2000 ([1]-[2]). Todos estes dispositivos incluem uma fonte de tensão que é essencialmente um conversor de dois-níveis com transistores de potência *MOS-FET* ou *IGBT* para produzir uma tensão harmônica composta com amplitude e forma de onda requeridas. Em todas estas aplicações, o filtro ativo está conectado em série com um filtro passivo, formando assim o chamado filtro híbrido.

As vantagens de filtros ativos foram apresentadas em numerosos documentos e demonstradas pelos projetos mencionados acima. Muitas publicações já explicaram o princípio de operação e aspectos de aplicação deste equipamento ([1]-[2]-[3]-[4]), de forma que estes aspectos não precisam ser tratados aqui especialmente.

Filtros ativos CC em CCAT clássicos podem alcançar as exigências harmônicas usando conversores com níveis abaixo de 1 MVA. Isto é principalmente devido ao reator de alisamento que está sempre presente na conexão CC à linha de transmissão. Entretanto são necessários conversores muito maiores para uma mitigação significativa dos harmônicos do lado CA da estação de CCAT. Devido à importância deste equipamento para futuros projetos, especialmente em áreas povoadas onde a compactação da instalação e exigências para baixos níveis de harmônicos têm um papel importante, a tecnologia já disponível foi estendida pelo desenvolvimento de um conversor à *IGBT* com potência até 26 MVA (referente à saída senoidal) em sua versão padrão, satisfatória para a aplicação de filtro ativo. Adicionalmente o sistema de controle foi expandido para atender novas exigências e oferecer mais possibilidades.

A meta do desenvolvimento foi tornar possível suprir as exigências harmônicas de uma estação de CCAT de tamanho médio com um único filtro ativo. Com isto, os muitos filtros passivos de dupla sintonia e tripla sintonia utilizados atualmente em uma estação conversora podem ser simplificados em filtros passivos com sintonia simples ou em bancos de capacitores, reduzindo significativamente a área da estação. Deste modo, a filtragem de harmônicos é executada essencialmente pelo filtro ativo enquanto os outros recursos são dedicados à compensação da potência reativa exigida pelo conversor de CCAT. Além disso, os filtros ativos alcançam melhores níveis de harmônicos, assegurando que as exigências serão satisfeitas até mesmo se os parâmetros de rede variarem ou se estes não são exatamente conhecidos durante a fase de projeto.

Os Filtros Ativos CA de Potência Plena têm excelente aplicação com a tecnologia de compensação série para CCAT ([5]-[6]). Nesta, a potência reativa fornecida pelos filtros passivos paralelos é reduzida a aproximadamente um terço em comparação aos sistemas de CCAT clássicos. Esta reduzida potência reativa pode ser fornecida através de filtros híbridos, sendo que a parte passiva é responsável pela potência reativa e a parte ativa é responsável pela eliminação de harmônicos do sistema.

2.0 - OS PRIMEIROS FILTROS ATIVOS CA DE POTÊNCIA PLENA

O *Neptune Regional Transmission System – USA (Neptune)*, um Sistema Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua (CCAT) submerso (marinho) e subterrâneo, iniciou sua operação em 2007. O projeto incluiu duas estações conversoras, a estação Sayreville em Nova Jersey e a estação Duffy Avenue na cidade de North Hempstead em Nassau County, EUA. Este sistema é capaz de transportar 660 MW.

Foram executados extensos estudos para determinar o impacto da conexão de CCAT nos níveis de harmônicos da rede e para dimensionar os filtros exigidos. Para ter certeza que as especificações harmônicas serão atendidas mesmo sob condições adversas, foi decidido instalar um Filtro Ativo CA de Potência Plena e um segundo para redundância em cada estação conversora. Isto resultou no arranjo mostrado na Figura 1 a seguir, relativa à estação conversora Duffy Avenue.

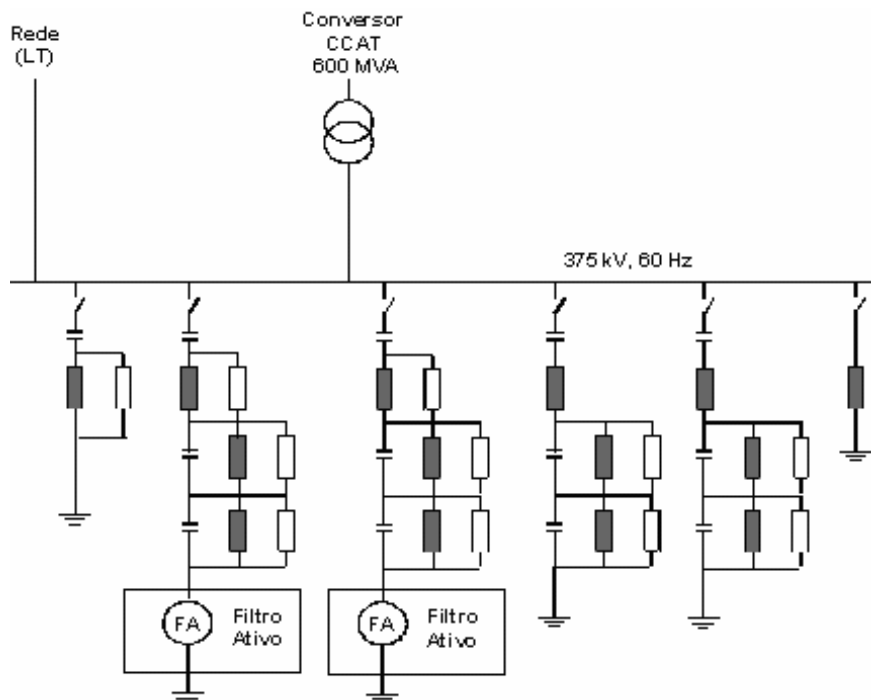


Figura 1 – Representação Simplificada do Diagrama Unifilar da Subestação 375 kV da estação conversora CCAT Duffy Avenue com dois Filtros Ativos CA de Potência Plena

A subestação tem um filtro de sintonia simples e dois filtros de sintonia tripla assim como dois filtros híbridos. Normalmente apenas um dos dois filtros híbridos é ligado, sendo o outro redundante. Entretanto a operação em paralelo de ambos os filtros também é possível.

Os estudos harmônicos revelaram que os melhores resultados são obtidos se o Filtro Ativo CA na estação conversora CCAT Duffy Avenue usar controle de corrente e o Filtro Ativo CA na estação conversora CCAT em Sayreville controlar os harmônicos de tensão. Então os harmônicos de tensão são detectados no barramento em Duffy Avenue, enquanto que no barramento em Sayreville são detectados os harmônicos de corrente no cabo subterrâneo que conecta a estação à rede.

Dados principais dos Filtros Ativos CA de Potência Plena instalados:

- Tensão nominal de conversão: 20 kV_{PICO}, fase-terra;
- Corrente nominal RMS: 600 A_{RMS};
- Faixa de frequência: até 50^o harmônico;
- Número de harmônicos: até 16.

A tensão nominal pode ser aumentada até 24 kV pelo acréscimo de 4 módulos de válvula por fase e o número de harmônicos pode ser aumentado até 18 se necessário. Dez harmônicos são atualmente controlados em ambas estações conversoras CCAT.

3.0 - DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DO FILTRO ATIVO CA DE POTÊNCIA PLENA

Os componentes do circuito de potência do Filtro Ativo CA de Potência Plena são mostrados no diagrama unifilar apresentado na Figura 2, que também ilustra as conexões do filtro ativo a uma estação genérica apontando as duas possibilidades mencionadas anteriormente para medir (e controlar) harmônicos. A “parte ativa” está montada dentro de um container com ar-condicionado. O circuito é idêntico para todas as três fases. O container acomoda além do conversor *IGBT* multinível, o reator do conversor L1, um filtro para frequências elevadas formado por C1, C2, C3, e os indutores e resistências associados. Além disto, também estão instalados os pára-raios de óxido de zinco (ZnO) F1 e os transformadores de corrente T1 e T2.

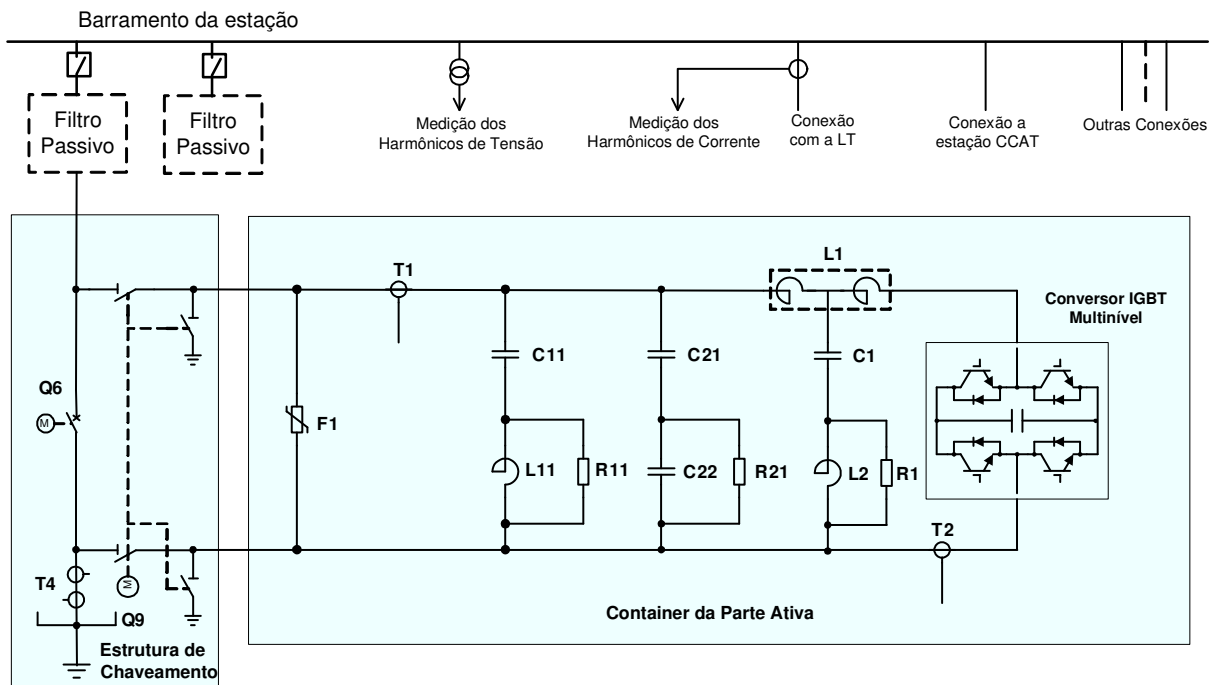


Figura 2 – Diagrama Unifilar dos Equipamentos do Filtro Ativo CA de Potência Plena ilustrando a conexão ao barramento da estação e possíveis pontos de medição dos harmônicos

O container provê áreas separadas para os sistemas de controle e proteção e uma terceira área para o sistema de resfriamento. As portas da sala do conversor são travadas eletricamente se o filtro ativo não estiver aterrado ou se os capacitores de conversão ainda não estiverem descarregados. Os condicionadores de ar são fixados nas paredes externas do container.

Um segundo bloco é formado pela estrutura de chaveamento mostrada na Figura 2. Esta estrutura externa pre-fabricada estabelece a interface do sistema ativo para o filtro passivo, sendo capaz de conectar ou desconectar e aterrar o sistema ativo, com o filtro passivo em operação. Inclui um disjuntor de desvio à vácuo, chaves seccionadoras isoladoras e de aterramento assim como transformadores de corrente. As conexões para o container do sistema ativo e para o filtro passivo são executadas através de cabos subterrâneos.

O terceiro bloco é o trocador de calor colocado próximo ao container. Uma mistura de água de-ionizada é usada para esfriar os módulos do conversor, os reatores do conversor e os resistores do filtro para frequências elevadas.

Uma visão externa dos equipamentos do Filtro Ativo CA de Potência Plena com os três blocos mencionados é mostrada na Figura 3.



Figura 3 – Container do Filtro Ativo CA de Potência Plena, estrutura de chaveamento e trocador de calor

O arranjo interno dos equipamentos no container do Filtro Ativo CA de Potência Plena é apresentado na Figura 4. A sala de controle pode ser vista ao lado esquerdo. As bombas do sistema de resfriamento são localizadas no lado oposto do container. Na área do conversor é possível identificar as estruturas do conversor, os três reatores dos conversores resfriados à água ao topo e o filtro para frequências elevadas na parede "aberta" perto dos conectores principais do container (os seis quadrados mostrados no desenho).

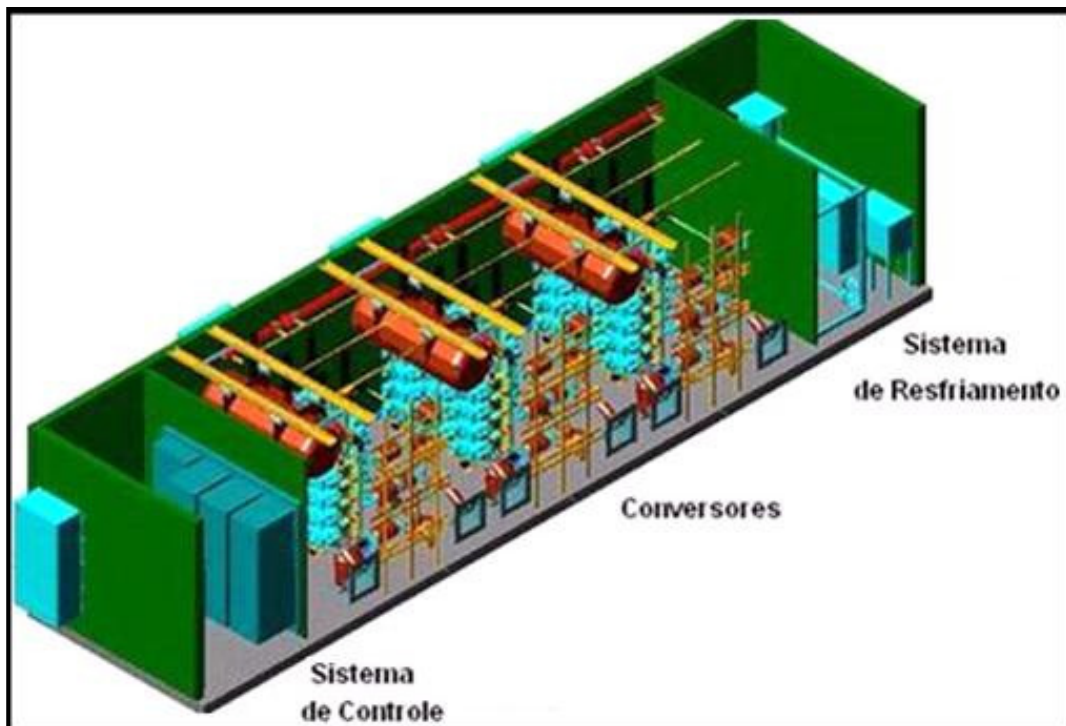


Figura 4 – Localização dos Equipamentos dentro do container do Filtro Ativo CA de Potência Plena

O container com todos os seus componentes, com exceção dos equipamentos de ar condicionado, são próprios para transportes tanto terrestre quanto marinho e são completamente montados e testados na fábrica antes da remessa para instalação.

4.0 - DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DO FILTRO ATIVO CA DE POTÊNCIA PLENA

Um conversor *IGBT* multinível é utilizado para alcançar a potência, faixa de frequência e qualidade de sinal exigidas. O projeto do container desenvolvido permite instalar até 24 módulos de válvula por fase, o que significa que os 4 filtros ativos entregues, tendo 20 módulos por fase, poderiam ser facilmente ampliados com mais 4 módulos por fase se necessário.

A Figura 5 explica a constituição da fase de uma válvula em maior detalhe. Os semicondutores de potência constituem uma ponte H de quatro quadrantes com um capacitor como elemento de armazenamento de tensão contínua. Este capacitor é mantido na sua tensão nominal de operação utilizando-se a corrente que circula no filtro.

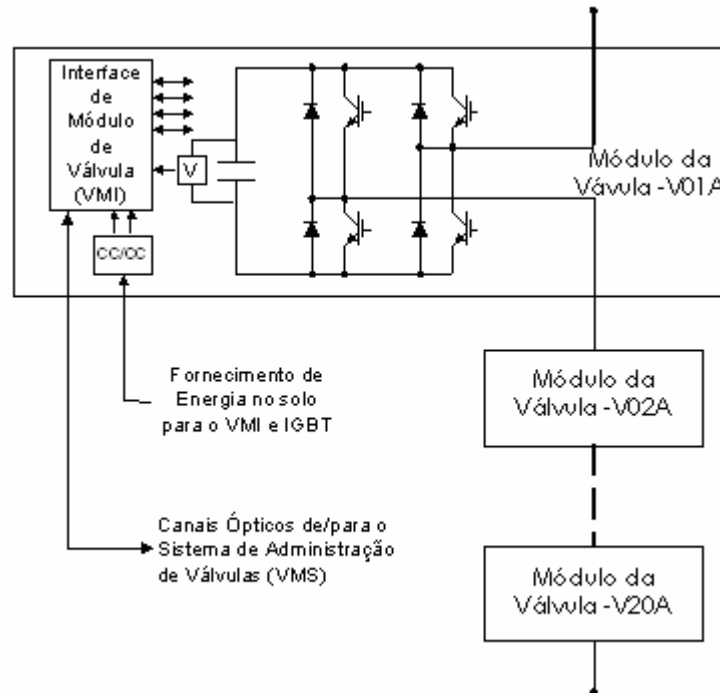


Figura 5 – Topologia do Conversor

Os dados elétricos principais do módulo de válvula são:

- Tensão de saída nominal nos terminais: 1 kV_{PICO};
- Corrente nominal RMS: 600 A;
- Pico de corrente nominal repetitivo: 1500 A;
- Frequência nominal de chaveamento: 1 kHz.

Os pulsos de controle para os quatro *IGBT* são criados pelo Sistema de Administração de Válvulas (*Valve Management System - VMS*) na sala de controle e transmitidos aos módulos através de fibras óticas. Uma placa de Interface de Módulo de Válvula (*Valve Module Interface - VMI*) localizada no módulo de válvula é responsável por decodificar as mensagens enviadas pelo VMS e controlar os respectivos *IGBT*.

O *VMI* transmite ao *VMS* a tensão contínua medida no capacitor de válvula. Este sinal é exigido para permitir o controle da tensão do capacitor, o qual é executado para todos os módulos de válvula pelo *VMS*. O *VMI* também recebe os sinais de supervisão dos módulos dos *IGBT* e sinaliza condições operacionais e defeitos para o *VMS*. Algumas ações, por exemplo, devido à sobretensão no capacitor de válvula ou sobrecorrente do *IGBT* (detecção *Vcesat*) são iniciadas diretamente pelo *VMI* que pode reagir em poucos microssegundos.

A energia auxiliar para a eletrônica no *VMI* e dos módulos de disparo é suprida via terra por um conversor CC/CC no módulo de válvula que provê o isolamento de alta tensão necessário.

Devido à frequência de chaveamento escolhida e à pluralidade de módulos de válvula, é possível produzir um sinal de saída de alta qualidade através de técnicas de *PWM* implementadas no *VMS*. E nenhuma válvula é chaveada simultaneamente, de forma que o degrau máximo de tensão de saída do conversor corresponde à tensão contínua nos capacitores do módulo de válvula (aproximadamente 1 kV). Mesmo assim, é necessário filtrar a tensão de saída do conversor para evitar a propagação de tensões de alta frequência. Esta função é executada pelos reatores do conversor e pelos filtros para frequências elevadas mostrados na Figura 2. Ambos os

componentes são compactos. O reator do conversor e os resistores dos filtros são conectados ao sistema de resfriamento, de forma a não aquecer o ar dentro do container. Na Figura 6 são ilustrados o conversor e os filtros para frequências elevadas da fase A.



Figura 6 – Vista parcial do conversor e reator da fase A e também filtro para frequências elevadas, buchas e transformadores de corrente na parede do container

5.0 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE CONTROLE DO FILTRO ATIVO CA DE POTÊNCIA PLENA

O controle harmônico do Filtro Ativo CA de Potência Plena é baseado no mesmo princípio utilizado no filtro ativo CA instalado na estação conversora Tjele na Dinamarca [2], mas com novas implementações no hardware e software, como por exemplo:

- Em vez de um controlador para cada fase e harmônico, três controladores de componentes simétricos são providos para cada harmônico, isto é, um para sequência positiva, um para sequência negativa e um para sequência zero. Isto tem várias vantagens em relação ao arranjo anterior. Uma delas é explorar o fato que os harmônicos produzidos pelo conversor CCAT e outras grandes instalações pertencem essencialmente a uma destas classes. Por exemplo, os 11º, 23º, 35º e 47º são harmônicos essencialmente de sequência negativa, enquanto os 13º, 25º, 37º, e 49º harmônicos são de sequência positiva. Então, se os controladores harmônicos são dedicados à componentes simétricas em vez de valores de fase, estes harmônicos são fortemente reduzidos assim que o controlador de sequência pertinente é parametrizado pelo sistema de auto-sintonia e inicializado;
- Podem ser implementados até 18 controladores harmônicos, permitindo a mitigação simultânea de até 18 harmônicos;
- Plataforma de controle *WinCC®*, a mesma usada pela Siemens para o controle dos conversores CCAT;
- Interface Homem-Máquina (*Human – Machine Interface - HMI*) completa para controle remoto e local;
- Sistemas de Registro Sequencial de Eventos (*Sequential Events Recording - SER*) e Registro de Perturbações (*Transient Fault Recording - TFR*), ambos exibidos na tela da HMI;
- Sincronização de tempo com o relógio da estação ou *GPS*;
- Acesso remoto ao controle por discagem via telefone, se necessário.

6.0 - TESTES FUNCIONAIS DE DESEMPENHO NA FÁBRICA DO FILTRO ATIVO CA DE POTÊNCIA PLENA

O teste funcional dos Filtros Ativos CA de Potência Plena em fábrica incluiu a geração de harmônicos de tensões e correntes até os níveis do equipamento. Estes harmônicos não deveriam alcançar a rede de distribuição, pois causariam grandes perturbações na rede. Desta forma, seria então necessária uma fonte de energia separada, por exemplo, turbinas a gás ou geradores de diesel e/ou filtros potentes para todas as frequências cobertas pelos

testes, resultando em uma instalação de grande porte. Para resolver este problema, uma planta de testes especial foi desenvolvida de acordo com o diagrama unifilar da Figura 7.

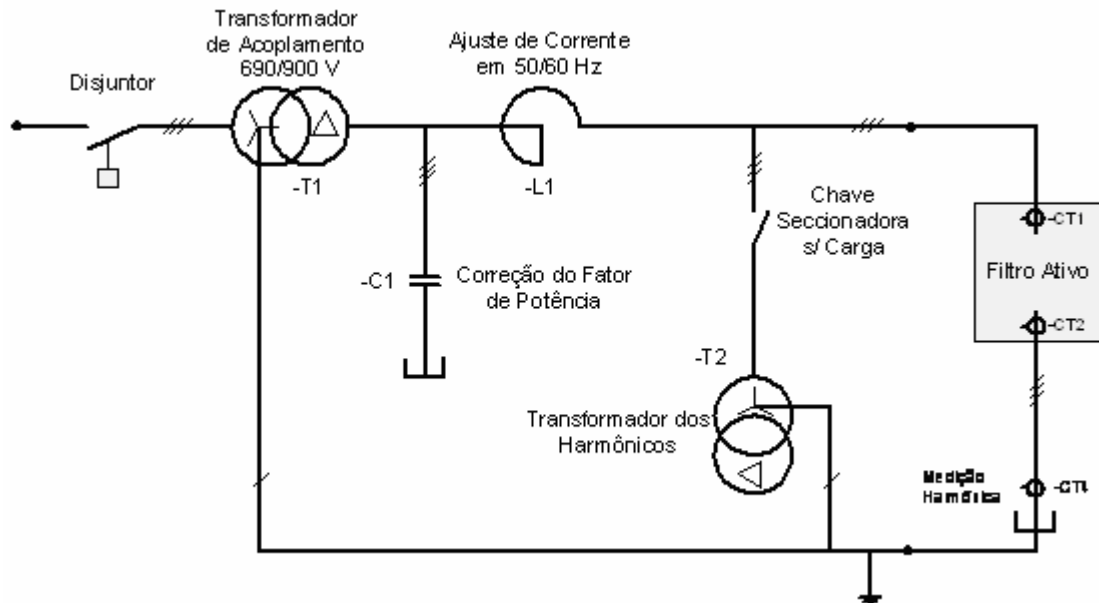


Figura 7 – Instalação desenvolvida para testes de carga e funcionais do Filtro Ativo CA de Potência Plena na fábrica

O transformador -T1 proporciona o acoplamento à rede e bloqueia efetivamente os componentes de sequência zero entre os lados primário e secundário. Como a tensão de frequência fundamental no conversor de filtro ativo é reduzida, uma tensão secundária de 900 V foi suficiente. Porém, a isolamento do secundário em relação ao primário e terra são compatíveis com os níveis de tensão do objeto de teste, isto é, $20 \text{ kV}_{\text{pico}}$ neste caso. O reator série -L1 estabelece o valor da corrente de curto-circuito no objeto de teste e é ajustado para obter uma corrente aproximadamente da magnitude da corrente de frequência fundamental do filtro ativo na estação. O transformador -T2 tem o primário conectado em estrela e secundário conectado em delta. Isto possibilita a passagem somente da corrente de sequência zero no seu primário. Por conseguinte, correntes de sequência zero criadas pelo conversor circulam pelo primário do -T2, enquanto outros componentes circulam pelos reatores - L1. A reatância de -T2 foi especificada para permitir a seleção de harmônicos de tensão e corrente para os testes. O capacitor -C1 compensa a potência reativa desenvolvida em -L1 e no reator do conversor para reduzir a demanda de corrente da fonte de energia.

A instalação de teste desenvolvida obtém da rede a potência ativa exigida para cobrir as perdas, enquanto oferece um circuito com impedância adequada para os harmônicos. Deste modo, os harmônicos produzidos não alcançam a rede. Testes de carga foram executados ajustando o controle para produzir os harmônicos selecionados no sistema de sequência zero de forma que sejam alcançados o pico de corrente e valores efetivos exigidos. Da mesma forma é possível executar testes de tensão desconectando-se -T2.

Apesar do tamanho compacto da instalação de testes e reduzidas dimensões e seus componentes, os quais são acomodados em um container de tamanho semelhante ao do container do filtro ativo, este equipamento permite executar testes na tensão plena e nível de corrente do filtro ativo e até mesmo testes de sobrecarga. Ao mesmo tempo, é testada a adequação do equipamento auxiliar incluindo a válvula de resfriamento. Permite também testes de controle de “loop aberto e fechado” como também sequências de operação. O mesmo vale para medição, HMI, registro sequenciais de eventos, dados e registros de perturbações e das ligações dos dados.

O teste completo do Filtro Ativo CA de Potência Plena e do seu equipamento auxiliar usando a instalação de testes descrita trata-se de uma atividade fundamental para reduzir para um mínimo os trabalhos de comissionamento dos filtros ativos no local.

7.0 - CONCLUSÃO

A experiência prévia com o Filtro Ativo CA instalado como um projeto de demonstração em Tjele na Dinamarca [2] mostrou a potencialidade deste equipamento para mitigar eficazmente os harmônicos produzidos pelos conversores do Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Contínua (CCAT) e outras fontes de harmônicos na rede de transmissão. Baseado nisso, foi desenvolvido um Filtro Ativo CA de Potência Plena utilizando um poderoso conversor IGBT multinível. As primeiras quatro unidades foram comissionadas em 2007 no Neptune Regional Transmission System – USA (Neptune), conectando Sayreville (Nova York) à North Hempstead

em Nassau County, EUA, através de cabos submerso (marinho) e subterrâneo. Uma destas unidades possui potência suficiente para eliminar até 16 harmônicos na estação (dez deles foram selecionados para o projeto). A gama de frequência dos Filtros Ativos CA de Potência Plena vai até o 50º harmônico.

O sistema ativo é construído em um container próprio para transporte terrestre e marinho. A instalação de testes na fábrica permitiu testes de carga e funcionais completos do equipamento antes do transporte, reduzindo significativamente o tempo de instalação e comissionamento.

Os novos Filtros Ativos CA de Potência Plena desenvolvidos abrem novas perspectivas para filtrar harmônicos em estações conversoras CCAT e também em outros pontos e aplicações no Sistema de Transmissão em Alta Tensão em Corrente Alternada.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cigré Working Group 14.28, "Active DC Filters in HVDC Applications", em Revista *Electra* - Edição N° 187, França, 1999.
- [2] P. L. Sørensen, M. Pereira, K. Sadek, G. Wild, "Active AC Filters for HVDC Applications", em *Cigré International Conference on Power Systems - ICPS 2001*, Wuhan, China, 2001
- [3] T. Westeweller, M. Pereira, H. Huang, G. Wild, "Performance Calculations and Operating Results of Active AC Harmonic Filters for HVDC Transmission Systems", em *IEEE/PES Summer Meeting*, Vancouver, 2001.
- [4] M. Pereira, G. Wild, "Experience with the Application of Active AC and DC Filters in HVDC Systems", em *IEEE/PES T&D 2002 Latin America*, São Paulo - Brazil, 2002.
- [5] K. Sadek, M. Pereira, D. P. Brandt, A. M. Gole, A. Daneshpooy, "Capacitor Commutated Converter Circuit Configurations for DC Transmission", em *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, 1988.
- [6] M. Pereira, A. Zenkner, A. L. P. de Oliveira, "Full Range Active AC Filter with Multilevel IGBT Converter for Transmission and Distribution Systems", em *IEEE/PES T&D 2008 Latin America*, Bogotá – Colômbia, 2002.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcos A. C. Pereira, engenheiro eletricista, graduado pela Universidade Federal de Pernambuco em 1974, trabalhou entre 1968 e 1987 no Centro de Despacho de Carga e nas áreas de controle e proteção, dentro das Diretorias de Operação e Engenharia da CHESF. Em 1987 iniciou seu trabalho na Siemens, em Erlangen, Alemanha, como gerente de projetos, conduzindo atividades de P&D para HVDC e FACTS, onde atualmente desempenha a função de senior expert em tecnologia de FACTS e VSC.



Andreas Zenkner concluiu sua educação profissional em eletrônica em Nuremberg na Alemanha, em 1991. Ingressou na Siemens em Erlangen, Alemanha, em 1996, desenvolvendo atividades nas áreas de controle e proteção de estações de CCAT e de filtros ativos para CC e CA. Presentemente é um gerente de projetos de desenvolvimento para aplicações em FACTS utilizando conversores com fonte de tensão (VSC) para FACTS.



André Luiz Pereira de Oliveira nasceu em São José do Rio Preto/SP em 1978. Engenheiro Eletricista pela EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá (Itajubá - MG) desde 2001. Obteve os títulos de Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos e Mestre em Ciências (MSc) pela Universidade Federal de Itajubá (Itajubá - MG) em 2003 e 2007 respectivamente. Certificado pelo *Project Management Institute® - PMI®* dos Estados Unidos da América (USA) como *Project Management Professional (PMP®)* em 2004. Trabalhou de 2001 à 2008 na SIEMENS Ltda. e desde 2009 na SIEMENS AG (Alemanha) na área *Energy Sector – Power Transmission - Power Transmission Solutions (E T PS)* como Project Manager (PM). É responsável pelo fornecimento “turn-key” de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua (HVDC), Subestações de Alta Tensão, Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão (SPCS) e Sistemas de Compensação de Reativos (FACTS), gerenciando contratos com empresas industriais e concessionárias do setor elétrico.