



**GRUPO VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)**

**A UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE PASSIVA:  
ECONOMIA, SIMPLICIDADE E CONFIABILIDADE**

**Flávio Resende Garcia  
Inepar S/A**

**Stanley A. Miske  
GE Power Delivery**

**RESUMO**

Durante os últimos anos, foram instalados um grande número de capacitores série nos sistemas de transmissão de diversos países ao redor do mundo. Visando buscar uma redução de custos e uma simplicidade construtiva e operativa, sem comprometer a confiabilidade desejada uma nova alternativa de compensação série foi desenvolvida: Compensação Série Passiva. Este artigo trata desta nova alternativa técnica e dos benefícios técnicos e econômicos alcançados em instalações turn key, se comparados com as soluções tradicionais.

**PALAVRAS- CHAVE**

Bancos de Capacitores Série Passivos - Capacitores - Varistores – Economia – Simplicidade - Confiabilidade – Turn Key

**1 - INTRODUÇÃO:**

A confiabilidade comprovada dos capacitores e varistores nas diversas instalações de bancos de capacitores série é impressionante. Esta performance demonstrada em campo gera a oportunidade para uma abordagem alternativa no que tange ao projeto de bancos de capacitores, a qual pode vir a ser muito atrativa e econômica denominada "**Compensação Série Passiva**".

Neste tipo de projeto, o equipamento de compensação série é composto de capacitores em paralelos com varistores, montados em estruturas isoladas. O equipamento é aplicado como parte da linha de transmissão. Quando

aplicado apropriadamente com esta configuração passiva, o banco de capacitores série não necessita de bypass gap's, sistemas de proteção, sistemas de comunicação, disjuntores de bypass, chaves seccionadoras, etc. O resultado desta nova configuração é um projeto simples, robusto e econômico.

**2 – DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO:**

Neste tipo equipamento, os capacitores promovem a compensação da reatância indutiva da linha de transmissão permitindo, desta forma, o incremento da potência a ser transportada com redução nas oscilações de tensão e todas as vantagens dos bancos de capacitores série. Os varistores protegem os capacitores contra sobretensões causadas por curto-circuito no sistema de potência. Os varistores param de conduzir automaticamente quando a falta no sistema é eliminada.

Esta abordagem de projeto é bastante atrativa quando o banco de capacitores é locado em um ponto do sistema onde o nível de curto circuito é baixo e o tempo de duração da corrente de falta é limitado pelos disjuntores de proteção da linha de transmissão entre 0.20 e 0.5 segundos, ou menos. A alta confiabilidade dos capacitores utilizados no projeto é obtida através de uma tecnologia de ponta, de um

projeto conservativo e da proteção dos capacitores através de fusíveis externos. O projeto dos capacitores e processo de fabricação utilizado pela GE/INEPAR tem taxas de falha abaixo de 0.03%. Para o banco de capacitores série passivo, a confiabilidade do capacitor é aumentada através da adoção de projeto com um nível de stress (kV/mm) menor, ou seja, tornando o capacitor mais robusto.

Alem do exposto, cada unidade capacitiva é protegida individualmente através de um fusível limitador de corrente que irá desconectar o capacitor no caso raro da ocorrência de falha. A alta confiabilidade é também garantida pelo fato de que o banco de capacitores é projetado de tal forma a manter-se em operação contínua com até 02 (dois) fusíveis atuados por fase.

A abordagem de projeto utilizada para os varistores é também conservativa. Os varistores são projetados para suportar a uma corrente de falta trifásica, multi-ciclos, no pior ponto do sistema de potência, ou seja, no próprio banco de capacitores série. O tempo de duração desta falta é tipicamente de 0.25 a 0.5 segundos. Devido a natureza desta aplicação, os varistores são também protegidos com fusíveis externos. Além disto, dois varistores extras são fornecidos para cada fase. Como resultado, mesmo no caso indesejável de falha de 02 (dois) varistores, o conjunto de varistores ainda está dimensionado para suportar o pior caso de curto-circuito do sistema de potência.

O equipamento consiste, para cada fase, de dois ou três módulos em série. Este módulos podem ser instalados em vários arranjos físicos dependendo das condições do terreno.

O resultado global do acima exposto é produzir o que existe de mais atual em equipamentos de compensação série simples e confiáveis. Seis instalações similares encontram-se em operação no Sistema de 315 kV e 735 kV da Companhia Hydro Quebec no Canadá. Estas instalações têm tido uma performance extremamente confiável, desde sua energização em 1992.

### 3 – INSTALAÇÃO EM REGIME TURN KEY:

A aplicação da compensação série passiva traz grandes vantagens no fornecimento em regime “turn key”:

- Simplicidade da Instalação (Capacitores, Varistores, Fusíveis e Estruturas Metálicas, Ferragens,

Barramentos e Isoladores).+

- Não existência de comunicação com o nível de terra, ou seja, não há links de fibra óptica para comando, proteção e controle do banco de capacitores série.
- Redução da área necessária à instalação do banco de capacitores série e, por consequência, das obras civis correlatas.
- Tempo de montagem reduzido se comparado com a montagem do banco de capacitores convencional.
- Tempo total do fornecimento em regime turn key bastante reduzido se comparado ao tempo de fornecimento do banco de capacitores série convencional.

Além das vantagens específicas para este tipo de instalação, vale ainda ressaltar as vantagens inerentes aos fornecimentos turn key:

- Economia devido à integração entre as diversas fases do fornecimento turn key: Engenharia, Projeto, Obras Civis, Fornecimento, Montagem, Comissionamento e Start up.
- Otimização da Solução.
- Responsabilidade pela solução global e não apenas pelos equipamentos.
- Respeito aos padrões do cliente e as normas técnicas, porém com implementação das novidades e avanços tecnológicos.

## 4 – INSTALAÇÕES EXISTENTES DE BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE PASSIVOS:

### 4.1 – Introdução:

O sistema HVDC entre Quebec-New England consiste de uma linha de corrente contínua bipolar, 450 kV e 1500 km de comprimento com cinco estações conversoras. O eletrodo de terra da estação conversora de Radisson foi construído em um terreno a 40 km de distância do complexo Radisson/LG2. Devido aos altos valores de resistividade nesta região, um percentual da corrente contínua injetada no eletrodo retornava para a rede CA através do neutro dos transformadores de potência localizados nas subestações de Radisson, LG2 e LG2A. A corrente contínua através dos transformadores levava à saturação dos mesmos gerando distorções harmônicas na rede. A Figura 3 mostra esta parte do sistema elétrico da Hydro-

Quebec. A Hydro-Quebec investigou diversas alternativas para bloquear ou reduzir suficientemente o nível de corrente contínua para impedir qualquer impacto desta sobre a rede CA. Diferentes soluções foram examinadas tais como: aparelhos de bloqueio de corrente de neutro entre o neutro do transformador e a terra, resistência adicional na malha de terra das subestações CA ou a implementação dos capacitores série para bloqueio de corrente contínua nas linhas CA.

#### **Operacional:**

Os testes de campo realizados pela Hydro-Quebec mostraram que os quatro bancos de capacitores série 735 kV para bloqueio de CC foram bastante eficientes na limitação da corrente contínua e das distorções na rede principal CA. Entretanto, foi descoberto que uma corrente CC ainda circulava entre as subestações de Radisson, LG1 e LG2. Visando reduzir estes níveis de corrente CC, a Hydro-Quebec instalou dois bancos série para bloqueio CC em 315 kV nas linhas de Radisson a LG1.

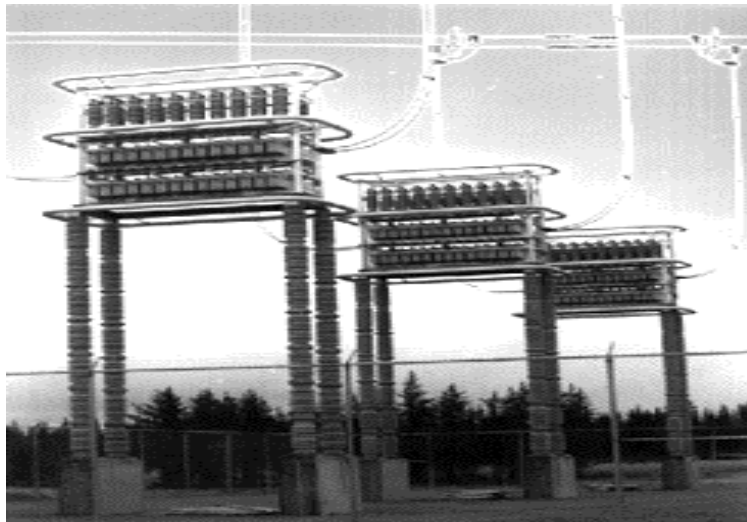


Figura 01 -

A Hydro-Quebec selecionou a implementação capacitores série para o bloqueio de CC. Os estudos mostraram que esta solução era bastante efetiva no bloqueio de CC e confiável no que tange a comprovada tecnologia e disponibilidade comercial dos componentes. Diferentes propostas dos vários fabricantes foram examinadas para este tipo de solução. A proposta ganhadora da GE foi selecionada baseada na sua simplicidade e economia.

#### **4.2 - Localização das Instalações:**

Para bloquear a corrente CC por toda a rede elétrica, foi necessário instalar bancos de capacitores série em quatro linhas de 735 kV: um na linha de LG2 para Chissibi e três nas linhas de Radisson para Némiscau.

Estes equipamentos foram suficientes para bloquear a corrente CC através da rede principal. Estes bancos de capacitores série foram instalados e colocados em operação durante o ano de 1992.

#### **4.3 - Testes em Campo e Experiência**

#### **BANCO DE CAPACITORES SÉRIE PASSIVO**

Estes bancos foram instalados em 1993 nos mesmos moldes dos bancos de 735 kV aqui descritos. Desde que foram colocados em operação, as seis instalações tem operado corretamente. Inspeções visuais tem sido feitas periodicamente, sendo inicialmente a cada duas semanas, posteriormente uma por mês e hoje uma cada três meses. As revisões das atas de inspeção mostra que apenas um fusível de proteção de capacitor de um dos bancos havia atuado até o presente momento, ou seja, durante quase 05 anos em operação.

#### **5 - QUESTIONAMENTOS MAIS COMUNS SOBRE A COMPENSAÇÃO SÉRIE PASSIVA:**

Dentre as questões mais comuns levantadas sobre tal tipo de solução para compensação série citam-se:

- Qual a taxa de falha prevista? Baseado na baixa taxa de falhas dos capacitores GE/INEPAR, estima-se que para o banco de

capacitores série passivo a taxa de falha prevista será em média de 01 (uma) falha a cada 10 anos de operação.

- Quantas unidades capacitivas poderiam falhar sem risco das demais? O banco de capacitores série passivo será projetado para operar continuamente à corrente nominal com 02 (dois) capacitores falhados no mesmo grupo de capacitores em paralelo. A probabilidade da ocorrência de tal fato é extremamente baixa.

- Como detectar falhas, com uma certa rapidez, em uma instalação remota ao longo da linha? A falha de um capacitor ou varistor resultará na operação do fusível externo de proteção associado. O banco pode continuar em serviço nesta condição por tempo indeterminado com 01(um) ou 02 (dois) fusíveis atuados. Um fusível atuado pode ser visto facilmente por uma pessoa no solo. Tal verificação normalmente é coordenada com as inspeções normais na linha de transmissão (isoladores, torres, etc.). A correção do problema irá demandar o desligamento da linha de transmissão. Em função da possibilidade do banco continuar operando mesmo com 01 (um) ou 02 (dois) fusíveis operados permitirá a programação do desligamento para data e horário conveniente. Se desejado, capacitores sobressalentes podem ser instalados no rack de tal forma que a conexão destes irá requerer apenas a instalação do fusível externo de proteção. Se devidamente planejado e com os capacitores sobressalentes instalados, a retirada da linha para manutenção do banco de capacitores série não demandará mais do que uma hora e não necessitará de equipamentos para içamento. Ressalta-se que a retirada da linha para manutenção do banco não ocorrerá mais de uma vez a cada 10 (dez) anos, baseado na taxa de falha dos capacitores GE/INEPAR.

Para o caso raro de uma falha em um dos varistores, o fusível externo associado desconectará a unidade falhada. Também neste caso, quando o fusível operar, a unidade desconectada poderá ser vista do solo. Varistores sobressalentes são instalados e conectados como parte da instalação inicial e não requerem conexão quando da falha de uma das unidades. O varistor falhado não tem que ser removido. O conjunto de varistores é projetado de forma tal que duas unidades do mesmo grupo paralelo podem falhar e o equipamento continuará provendo a proteção contra faltas no sistema de potência. O banco de capacitores série passivo não requer manutenção de rotina.

## **6 - ESTUDOS DA UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE PASSIVA EM UM CLIENTE X:**

Os dois bancos de capacitores série passivos foram analisados pelo Cliente X para instalação nos seguintes circuitos:

- 1) Linha de Transmissão Usina – Cidade A (202 km) - 230 kV
- 2) Linha de Transmissão Cidade A – Cidade B (240 km) - 230 kV

### **6.1 - Características dos Bancos de Capacitores Série:**

Características Elétricas Básicas dos Equipamentos de Compensação Série Passiva para o Cliente X (vide Tabela 01).

### **6.2 - Solução através de Compensação Série Passiva – Estudo para um Caso Real:**

Baseado nas informações recebidas do Cliente X e objetivando verificar a possibilidade da aplicação da solução passiva para compensação série, tem-se a considerar que:

. GE/INEPAR realizaram simulações computacionais no programa EMTP para determinar a energia a ser suportada pelo varistor para o banco de capacitores de 32 ohms, 745 A, para vários pontos de instalação do referido banco ao longo da linha, assumindo o nível de curto-circuito na subestação Usina igual a 15 kA.

. Os resultados destas simulações estão mostradas no Anexo 01. Os gráficos mostram a variação da energia do varistor em função do ponto de instalação do banco de capacitores na linha para tempo de eliminação de faltas de 0.1 e 0.2 segundos..

. Para estes tipos de bancos de capacitores, varistores maiores que 50 MJ por fase são impraticáveis. As curvas mostram que se o banco estiver instalado na subestação, a energia no varistor por fase será de aproximadamente 100 MJ para uma falta de 0.1 segundos. Desta forma, para o banco de capacitores instalado na subestação a solução passiva para compensação série é inviável.

. Entretanto, se o banco de capacitores for instalado no meio da linha (101 km), onde não há a ocorrência de ressonâncias, a energia no varistor será inferior a 10 MJ por fase para faltas de 0.1 segundos, viabilizando a utilização do banco série passivo.

. No gráfico, para linhas 230 kV típicas, cada 10 ohms equivalem a 16 km de linha.

. Vale ressaltar os benefícios técnicos e econômicos da utilização deste tipo de solução:

- Custo em torno de 50 % do custo de um banco série tradicional.
- Prazo de entrega bastante inferior ao de um banco série tradicional.
- Confiabilidade Técnica dos Equipamentos.
- Banco de capacitores faz parte da linha de transmissão.

## 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS:

Este trabalho visa apresentar uma nova concepção para compensação série, através de uma solução técnica confiável, simples e com custos bem inferiores ao de uma solução tradicional. Foram apresentadas neste trabalho as premissas para a utilização desta nova concepção para banco de capacitores bem como exemplo prático de dimensionamento para aplicação e casos existentes já instalados com sucesso no sistema da Hydro-Quebec – Canadá.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] S. A Miske Jr, R. J. Lang, S. D. Rowe, P. Bilodeau, M. Granger, “Recent Series Capacitor Applications in North América.” .

[2] Garcia, R. Flávio, Miske, Stanley A, “Estudos de Sistema para Aplicação da Compensação Série Passiva em 230 kV” – Referência Bibliográfica Interna Inepar.

**TABELA 01 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS BÁSICAS**

ITEM	DESCRIÇÃO	Usina - A	A – B
1.	Tipo: Banco Trifásico constituído de três bancos de capacitores monofásicos, montados sobre plataformas isoladas, com respectivos equipamentos componentes dos sistema de proteção próprio de cada fase.	01	01
2.	Equipamentos associados: seccionadores para desvio e para isolamento do bancos.	01	01
3.	Características Gerais: 3.1 Frequência Nominal (Hz): 3.2 Máxima Tensãp do Sistema (kVrms): 3.3 Tensão Normal de Operação (kVrms): 3.4 Isolamento: 3.4.1 Tensão Suportável a impulso atmosférico(kVpico): 3.4.2 Tensão Nominal à 60 Hz (kVrms): 3.4.3 Distância Mínima de Escoamento (mm) 3.5 Nível Máximo de Radio-inteferência à tensão fase-terra de 153 kv para instalação completa (RIV in uV): 3.6 Tensão Máxima de Operação para inexistência do corona visível para a instalação completa (kVrms)	60 242 230  950 395 3600  250 170	60 242 230  950 395 3600  250 170
4.	Características dos Capacitores Série: 4.1 Corrente Nominal (Arms) 4.2 Reatância Nominal (Ohms) 4.3 Potência Nominal (MVar) 4.4 Tensão Nominal (kVrms)	745 32 54 24	811 38 76 31
5.	Características do Sistema de Proteção:89 5.1 Capacidade de Corrente Nominal (Arms) 5.2 Corrente Suportável durante 1 seg. (kArms) 5.3 Corrente Suportável Assimétrica (kAcrista) 5.4 Tempo de duração da falta (seg)	1250 15 80 0.1	1250 15 80 0.1

Ressonâncias Série:

Linha Usina – Cidade A => a 36% e a 83% da Usina  
Linha Cidade A – Cidade B => a 20% e a 67% da Cidade A

Obs: Em ambas as linhas de transmissão não há a ocorrência de ressonâncias série se os bancos de capacitores forem instalados no meio da linha.

ANEXO 01

