



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

BR/GAT/32
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

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

NOVO E EFICIENTE COMPENSADOR ESTÁTICO BASEADO EM REATOR SATURADO PARA CONTROLE DE TENSÃO E COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

**Alexander Bryantsev
DARVAL**

**Victor Cioban
DARVAL**

**Anna Dunshee Abranches (*)
DARVAL**

RESUMO

Nesse informe, é mostrada a aplicação de um equipamento visando à compensação de reativos baseados em reatores magneticamente controlados em paralelo com banco de capacitores. A característica funcional desse é similar ao SVC, e em alguns aspectos operacionais e funcionais apresenta vantagens em relação a SVC e STATCOM. A aplicação desse equipamento em redes de alta tensão diminui o impacto da perda de fornecimento, aumento a capacidade de transmissão e a confiabilidade da rede. Apresentam-se aqui as principais características do equipamento e informações sobre o desempenho do mesmo em redes reais, bem como a experiência adquirida com o seu uso.

PALAVRAS-CHAVE

Compensação controlada de reativos, suporte de tensão, reator magneticamente controlado, estabilidade de tensão, capacidade de transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O emprego dos dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission System) pode ser considerado como um ponto fundamental para o progresso na operação de sistemas de potência, pois permitiu um uso mais eficiente da transmissão existente bem como de uma melhor utilização dos equipamentos de controle. Dentre as possíveis funções, que um dispositivo FACTS possa ter, a de controle de reativos responde pela maioria das aplicações atuais. Equipamentos como SVC (baseado em tiristores) e STATCOM (baseado em chaves autocomutadas) têm sido aplicados em diversas redes elétricas ao longo dos anos. Em países como a Rússia e outros participantes da CIS (Commonwealth of Independent States – países da antiga União Soviética), o controle flexível de reativos automatizado tem sido realizado pelo emprego de reator em derivação magneticamente controlado (MCSR) em paralelo com bancos de capacitores (CB). Esta topologia foi denominada Sistema CSR (SCSR) e por mais de dez anos tem sido utilizada nos países acima apresentando uma funcionalidade bastante similar ao SVC. O SCSR apresenta também algumas vantagens tecnológicas, econômicas e operacionais podendo ser considerado como o mais “natural” entre os dispositivos FACTS. O SCSR pode apenas alterar o consumo de reativos, o que em diversos cenários não é suficiente para estabilizar a tensão nos sistemas de potência. O presente informe aborda também algumas das limitações associadas ao emprego do SCSR.

A operação do reator magneticamente controlado (MCSR) é baseada no efeito de saturação de um núcleo ferromagnético e um projeto especial de circuito magnético. Baseado em uma tecnologia proprietária é possível projetar reatores controlados nas classes de tensão de 6 a 500 kV com potências nominais entre 10 a 180 Mvar. O presente informe técnico apresenta detalhes da operação, aplicabilidade e eficácia no uso do SCSR em redes reais em países da CIS em redes de até 400 kV de tensão nominal. Até o momento atual não há análogos internacionais no que se refere ao emprego do reator magneticamente controlado. Nos sistemas de potência de países como

(*) Praia do Flamengo, 66 – sala 417-418 - Bloco B – CEP 22.210-903 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 3449-2814 – Email: adunshee@darval.com.br

Rússia, Casaquistão, Bielorrússia e Latvia os reatores magneticamente controlados via controle por válvula magnética são amplamente usados há cerca de dez anos. Atualmente há mais de cem unidades comissionadas.

2.0 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO MCSR

O arranjo de um MCSR com válvulas magnéticas é apresentado na Fig. 1. Cada fase de um MCSR é basicamente um transformador com dois enrolamentos com uma das “pernas partidas” (split limb). Um dos enrolamentos é conectado à rede elétrica (U_{NW}), o segundo enrolamento é o de controle que é conectado a uma fonte de tensão controlada (U_{CTRL}). As seções da rede e dos enrolamentos de controle são conectados em antiparalelo sem qualquer enlace eletromagnético. Cada enrolamento da fase gera o seu próprio fluxo magnético: o enrolamento conectado a rede produz um fluxo alternado (F) na frequência industrial enquanto que o enrolamento de controle produz um fluxo de magnetização controlável e retificado (F_s). Esse último, por sua vez, desloca o fluxo alternado de forma que a levar o equipamento na zona de saturação, assim resultando em uma mudança da impedância do equipamento. Os gráficos das variações da tensão, corrente e fluxos magnéticos para um MCSR também é apresentado na Fig. 1.

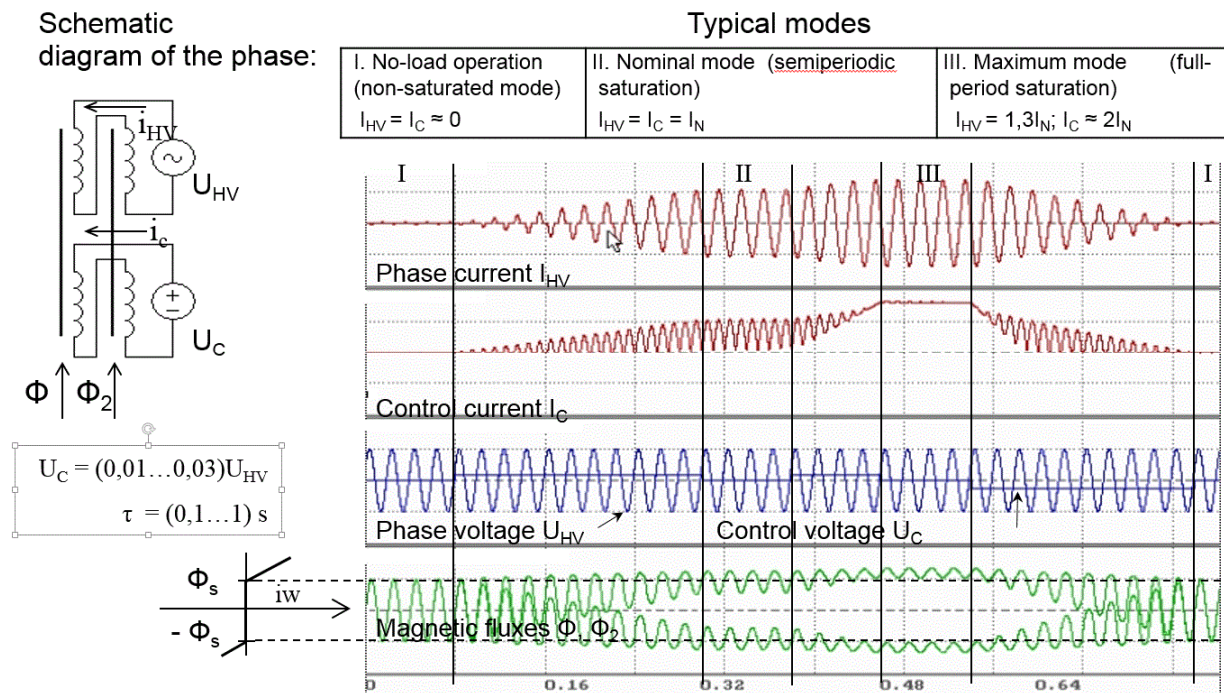


FIGURA 1 – Diagrama básico de um MCSR, modos de operação e comportamento das correntes e dos fluxos

Dentre as principais características do MCSR pode mencionar:

1. Parâmetros técnicos: peso específico entre 1,5 a 3 kg/kvar, perdas a vazio entre 0,5 a 1 W/kvar, perdas no cobre de 4 a 8 W/kvar
2. Indicadores de desempenho: operação automática, variação de potência de 0,01 a 1,2 vezes a potência nominal em todos os modos normais de operação, tempo máximo para estabilização entre 100 a 150 ms, custos de operação, confiabilidade e manutenção similares aos de um reator convencional fixo
3. Indicadores funcionais: adequado para qualquer cenário onde um reator fixo, reatores manobrados ou mesmo um reator controlado a tiristor possam vir a ser utilizados.

Dentre as ditas economias emergentes como os países do grupo conhecido como BRICS (Brasil, Rússia, China, Índia e África do Sul) e outros como Peru, Angola, há uma característica peculiar, a grande distância separando as áreas propícias para a geração de energia aos centros de carga. Essa condição traz o impositivo de aumentar a capacidade de transmissão dos circuitos sem afetar a qualidade de serviço da rede, i.e., sem afetar as margens de estabilidade transitória, angular ou de tensão e os limites operacionais. O emprego de dispositivos capazes de absorver ou gerar reativos. No caso de equipamentos baseados em semicondutores como tiristores ou IGBTs há a limitação de tensão, tipicamente cerca de 35 kV demandando o emprego de um transformador elevador para permitir a operação do equipamentos em redes de alta e extra alta tensão. A aplicação do dispositivo diretamente no barramento de alta (ou extra-alta) tensão é uma vantagem do SCSR quando comparado ao SVC ou ao STATCOM. Conforme mencionado acima, o SCSR consiste na conexão de um MCSR em paralelo com um banco de capacitores (CB).

3.0 - CONTROLE DE REATIVOS EMPREGANDO O SCSR

A viabilidade de um SCSR em alta-tensão foi verificada em 1997 quando o primeiro MCSR foi instalado em paralelo com um banco de capacitores de 42 Mvar na subestação de Kudymkar. Posteriormente, três SCSR com bancos de capacitores de 46 Mvar foram instalados na subestação de Tomskneft que serviram para mostrar a eficiência e a confiabilidade do projeto. Nessas instalações, os protótipos de SCSRs necessitavam de controle manual do banco de capacitores. O sucesso na operação desses equipamentos permitiu a criação de novos controles automatizados para o SCSR. Atualmente dois esquemas podem ser empregados, a saber:

1. Os CB, dotados de disjuntores próprios, são instalados em paralelo com o MCSR, nessa configuração, a potência de uma das seções de CB deve ser menor ou igual à capacidade do MCSR. Levando-se em conta que bancos de capacitores de até 220 kV são largamente empregados nos sistemas de potência, esse esquema é recomendado para sistema com tensão nominal de até 230 kV.
2. Os CBs são conectados ao enrolamento do MCSR com tensão nominal de 11 a 38,5 kV, nessa configuração a transição entre consumo para geração de reativos não demanda o chaveamento do CB. Somente com o reator sem carga alguma o CB é capaz de prover a potência nominal. Esse esquema é o recomendável para redes elétricas com tensão nominal entre 110 a 500 kV ou superior.

Atualmente, modificações no MCSR foram desenvolvidas com o terciário – enrolamento de compensação. Tipicamente, a tensão no enrolamento de compensação é 11 kV e a potência de 25 a 30 % da potência do enrolamento de compensação, podendo ser modificado para aumentar a capacidade de 100% ou mais. Nessa configuração o CB pode ser conectado ao enrolamento de compensação do MCSR. A potência máxima do CB é igual a potência do enrolamento de potência do MCSR. Nesse tipo de arranjo o CB pode ser conectado ao enrolamento de compensação do MCSR. Nesse caso a potência máxima do CB deve ser igual a do enrolamento de compensação.

3.1 PRÍNCÍPIO DE OPERAÇÃO DO SCSR

O primeiro SCSR automatizado foi comissionado em 2007 na subestação de Zvezdnaya com uma faixa de ± 25 Mvar e tensão nominal de 110 kV. O unifilar dessa configuração é apresentado na Fig. 2a, nessa configuração o CB é conectado em paralelo com o MCSR a manobrado por uma chave. A Fig. 2b apresenta o unifilar do primeiro SCSR automatizado desenvolvido para Tyumenergo. Em ambas as figuras, ACS representa o sistema de controle automático, VT, os transformadores de potencias e CT, os transformadores de corrente (2). O funcionamento do sistema de controle automático do SCSR (3),(4) pode ser entendido da seguinte forma: o ACS define a tensão de referência (para o modo de regulação de tensão), a mínima e máxima corrente do reator e o intervalo de tempo entre as comutações sequencias do CB. O emprego do SCSR foi empregado na subestações de chaveamento de Tavricheskaya em 2009.

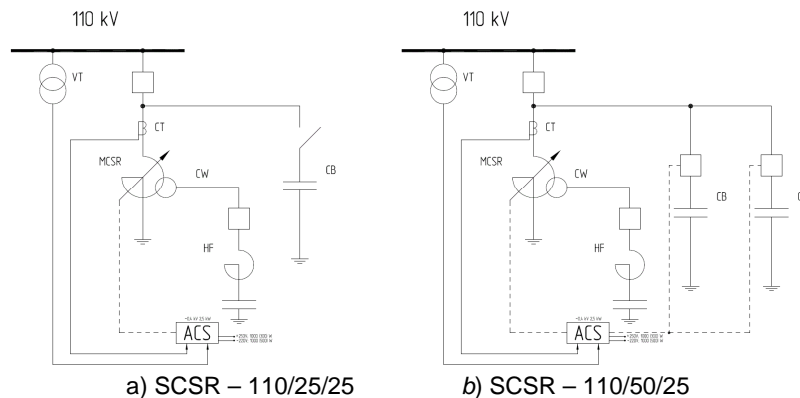


FIGURA 2 – Diagramas Unifilares para o SCSR

Todas essas configurações de SCSR foram fornecidas com reatores magneticamente controlados dotados de circuitos de magnetização internos, o que permite o suprimento de energia dos enrolamentos através de retificadores diretamente imersos em óleo sem o uso de alimentação no barramento de 10 kV. Esse procedimento simplifica a integração do SCSR na subestação, permitindo uma maior economia no custo do equipamento já que não há necessidade de suprimento de energia no barramento de 10 kV. O primeiro protótipo de SCSR para a classe de 330 kV foi comissionado em 2008 para a usina nuclear de Ignalina, com filtros de harmônicos conectados ao enrolamento de controle, a potência do equipamento é de -180/+18 Mvar, a Fig. 3 apresenta o unifilar dessa configuração. Atualmente um novo SCSR de 220 kV está sendo instalado na subestação de Shymkent no Cazaquistão, consiste de um projeto desenvolvido em dois estágios. No primeiro é instalado um MCSR trifásico de 100 Mvar e dois filtros de harmônicos de 18 Mvar cada serão instalados nos enrolamentos de compensação. No segundo estágio CB de 220 kV serão instalados em paralelo com o MCSR.

Durante a carga leve há usualmente um excesso de reativos levando a tensão terminal do SCSR acima do valor de referência, o que causa a atuação do ACS levando a um aumento da corrente de magnetização do reator. Como resultado, a um aumento da corrente (até um valor máximo pré-determinado) e o SCSR passa operar consumindo reativos. O ACS rastreia as variações de tensão devido a mudanças na carga da rede elétrica e ajusta a tensão de acordo através da mudança contínua da corrente de magnetização do reator. Quando a carga aumenta, há normalmente uma necessidade de reativos e a tensão na rede cai. O ACS reage à queda de tensão e checa primeiro se a corrente no reator já está no valor mínimo permitido, se for o caso há um comando para a manobra do banco de capacitores, levando o SCSR ao modo de geração de reativos. A regulação contínua da tensão é assegurada pelo MCSR (4)(5). Caso a carga continue a aumentar, haverá ainda a queda da tensão terminal do SCSR abaixo do valor de referência, o ACS reage a essa nova queda verificando novamente a corrente do reator e dá um comando para o fechamento do segundo banco de capacitores e assim sucessivamente.

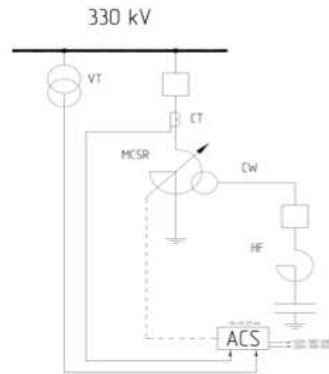


Figura 3 – Unifilar simplificado para o SCSR de 330 kV

Características especiais podem ser estabelecidas para o SCSR durante cenários críticos, definidos aqui como modos emergenciais: durante períodos de manutenção programada e após falhas não previstas. Geralmente, a potência do SCSR (potência nominal do CB e potência nominal do MCSR) é determinada por esses modos e as cargas de pico durante o inverno e a carga mínima nos meses de verão (no caso da operação em países do CIS). Caso seja empregado o SCSR em um ponto ótimo da rede e os parâmetros do CB e do MCSR são selecionados adequadamente, tem-se a possibilidade de um suprimento de carga dentro dos parâmetros ditos normais em todos os pontos de operação da rede. A instalação o SCSR garante um maior fornecimento de energia na rede devido ao suporte de reativos, melhor condição de estabilidade de tensão, bem como modos para cenários de emergência e após emergências. Um exemplo dessas características é apresentado na Fig. 4. Nessa figura, o traço superior (curva verde) mostra o perfil horário da tensão no barramento de 110 kV na subestação de Tavricheskaya após a instalação do SCSR. A mesma curva sem a presença do compensador também é mostrada na figura, traço inferior (curva em vermelho). Com o SCSR a variação de tensão foi de $\Delta U = 0,4$ kV, com uma média de 101,9 kV. Antes da instalação do SCSR a variação registrada era de $\Delta U = 2,6$ kV, com uma média de 97,5 kV.

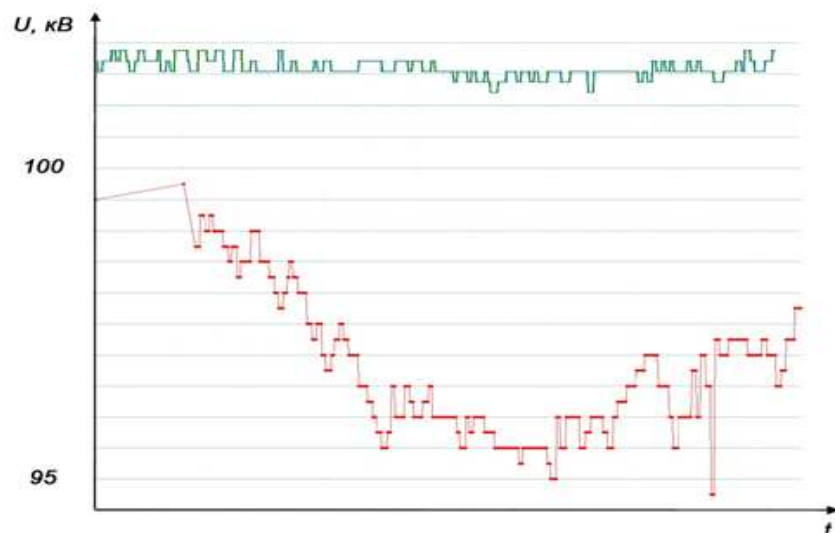


Figura 4 – Fragmentos do diagrama diário da tensão (entre 4 da manhã e meio-dia) para o barramento de 110 kV em Taycheskaya, pertencente ao sistema da TyumenEnergó.

4.0 - EXPERIÊNCIA ADQUIRIDA NA APLICAÇÃO E OPERAÇÃO DO SCSR

Cerca de 30 SCSR já existem em operação, cada qual com características específicas, tendo sido empregado com sucesso para o suporte de reativos em regiões remotas onde há falta de infraestrutura e pessoal e inclusive, demonstrando assim a alta confiabilidade e essencialmente ininterrupta disponibilidade do SCSR. Companhias petrolíferas, mineradoras bem como redes isoladas ou com elos fracos ou em crescente desenvolvimento têm apresentado interesse no emprego de SCSR. No caso de clientes industriais há, ainda, o atrativo de custo de manutenção baixo e a elevada taxa de disponibilidade. O baixo custo de manutenção se dá pelo pouco uso de semicondutores de potência e dos controles associados a esses dispositivos.

A experiência operativa desses equipamentos permitiu ressaltar os seguintes pontos com relação ao uso do SCSR:

- SCSR pode ser ligado direto na linha é na função de reator de linha, se comparada com o reator fixo, melhora o perfil de tensão do sistema, as contingências são menos severas e se reduz as perdas ativas. (Quando a linha estiver muito carregada de potência ativa, ela passa a consumir potência reativa que terá que ser fornecida por alguma outra fonte do sistema. O reator fixo fica consumindo potência reativa conforme sua capacidade, o SCSR não.)
- É capaz de ajudar no controle automático da tensão em pontos determinados na rede ajudando a estabelecer um perfil de tensão com oscilações bem menores;
- Pode-se aumentar a capacidade da transmissão em até 150 % e uma redução nas perdas específicas até cerca de 30%;
- Praticamente elimina os chaveamentos durante a regulação de tensão podendo chegar a uma redução de mais de uma ordem de grandeza no número de chaveamento necessários durante variações da tensão;
- Reduz os problemas associados com a subexcitação em geradores;
- Ajuda a minimizar a propagação de efeitos em cascatas que podem levar a grandes desligamentos e blecautes
- Reduz impactos econômicos causados por ações indevidas dos esquemas de proteção

Outra aplicação interessante do SCSR se refere ao controle da rede da companhia petrolífera Narynmarneftegaz (5). No final de 2008, havia algumas dificuldades para a inclusão de um circuito de 220 kV, 150 km entre South Khylochuy e Varandey para alimentar a rede da Narynmarneftegaz que alimenta os campos de óleo e gás de Yuzhnoe Khylochuy (Rússia). Devido ao efeito Ferranti durante a energização, a tensão no terminal receptor aumentava significativamente causando um aumento de 40 Mvar de reativos na linha. Das cinco turbinas a gás de 25 MW planejadas, duas já haviam sido comissionadas e mesmo assim não era possível garantir a energização do circuito de 220 kV até a subestação de Varandey. Avaliações realizadas pelos projetistas indicavam que seriam necessárias pelo menos três turbinas a gás. Contudo, mesmo após o comissionamento das cinco turbinas o problema durante a energização persistia. Como resultado, pequenas mudanças na carga, da ordem de 1 MW, onde a carga total é de mais de 20 MW, regularmente causava o “trip” dos geradores e o desligamento de todo o circuito. Durante 2009 e na primeira metade de 2010, houve mais de uma dúzia desses eventos. A situação mudou drasticamente após o comissionamento da solução de controle de reativos baseado na tecnologia do SCSR contendo quatro reatores fixos de 3,3 Mvar, um MCSR de 25 Mvar e um SCSR composto de um MCSR de 25 Mvar e dois bancos de capacitores de 25 Mvar conforme mostrado na Fig. 5

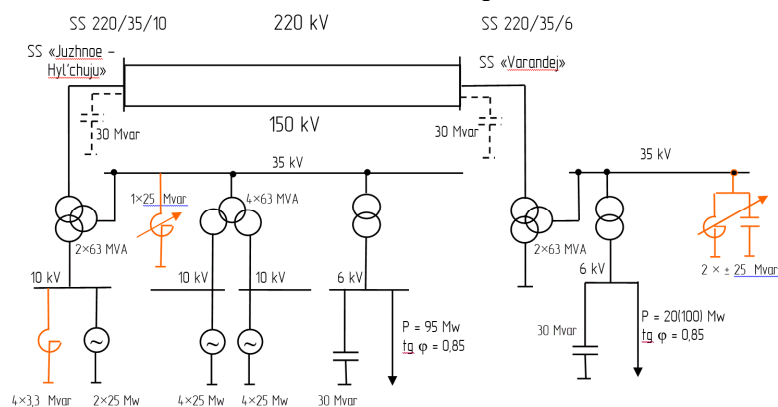


Figura 5 – Configuração da compensação de reativos na rede de Narynmarneftegaz

Os principais resultados do comissionamento da solução de controle de reativos são descritos a seguir:

1. A operação da rede de 220/35/10/6 de Naryanmarneftegaz se manteve estável para qualquer flutuação de carga abaixo de 10 MW;
2. A tensão nas subestações de Yuzhnoe Khylichuyu e Varandey permanecem controladas de acordo com os limites operacionais, entre 220 kV e 230 kV, com precisão de ± 1 kV independentemente da carga na rede;
3. A operação subexcitada dos geradores foi excluída de todos os cenários de operação;
4. A capacidade de transmissão da rede de 220/35kV agora está de acordo com os valores de projeto, a saber:
 - a. O circuito de 220 kV entre Yuzhnoe Khylichuyu e Varandey operou com 20 MW com o subsequente aumento para 100 MW
 - b. O sistema de 35 kV de Yuzhnoe Khylichuyu chegou a 95 MW.

Outro exemplo interessante ocorre no sistema norte de Angola. A rede elétrica nessa região cresce, havendo situações onde há mais disponibilidade de transmissão e geração do que de carga propriamente dita. O diagrama unifilar para o sistema norte de Angola é apresentado na Fig. 6. As principais usinas da região são Capanda, Cambambe e Cazenga. A transmissão de energia elétrica se dá por uma rede de transmissão de 220 kV e 400 kV, 50 Hz

Em condições normais de operação havia um aumento significativo da tensão em diversos pontos da rede. A subestação de Cazenga possui a maior carga e em condições normais ocorre subtensão. Na parte do sistema próxima a Capanda a carga é bem menor. Falhas frequentes ocorrem no sistema o que resulta em "trip" dos geradores e perda de carga. Uma peculiaridade desse sistema é que a maioria das ocorrências se dá durante a carga leve ou mesmo mínima.

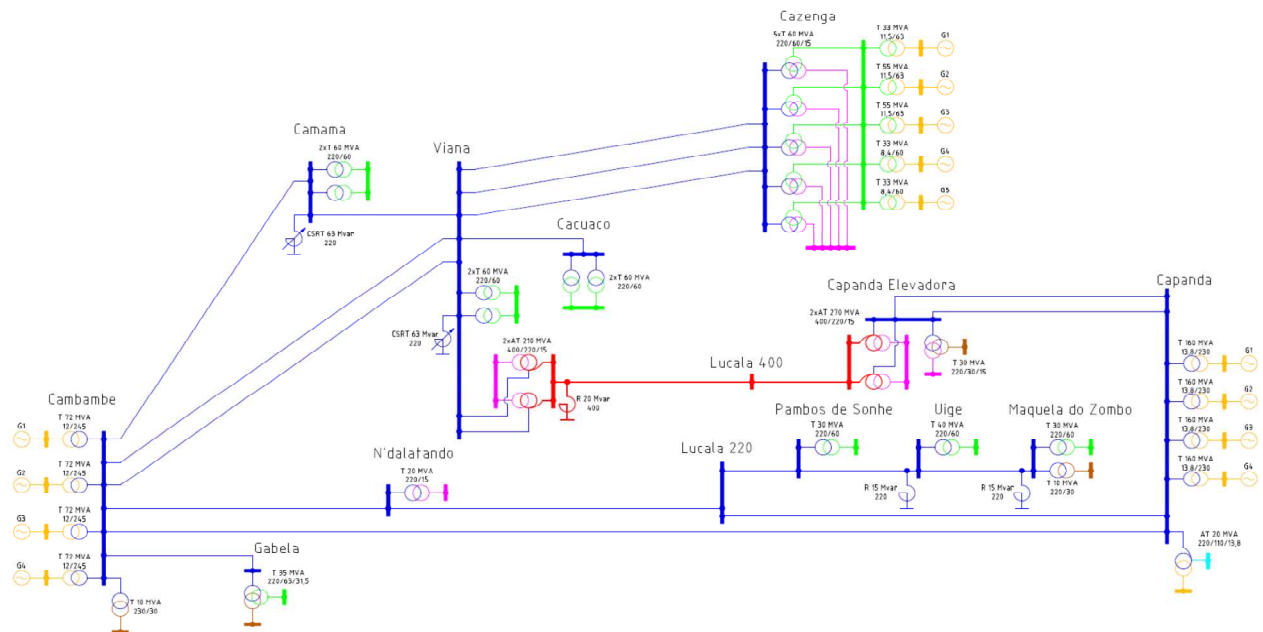


Figura 6 – Unifilar da rede de 220 e 400 kV

A análise das condições de operação mostrou que possivelmente a causa dos frequentes colapsos sistêmicos foi o excesso de reativos nas linhas que no caso de perda de parte da carga fluía para os geradores levando-os a operações instáveis e auto excitação dos geradores síncronos o que ocasionava o desligamento dos mesmos. A perda de uma usina acarretava um efeito em cascata desligando outras usinas. Após a perda de parte da geração e com o desbalanço de potência ativa aumentando a frequência na reduzia causando o desligamento de outras unidades geradoras. A fim de evitar essa sequência de eventos e baseados nos cálculos da operação em condição normal, a instalação dos seguintes equipamentos de controle de reativos foi recomendada:

- SCSR de -100/+10 Mvar, 400 kV na subestação de Capanda 400 kV
- SCSR de -100/+10 Mvar, 400 kV na subestação de Viana 400 kV
- SCSR de -60/+6 Mvar, 220 kV na subestação de Uíge 220 kV

O SCSR em Capanda 400 kV permitiu chavear o circuito de 400 kV adequadamente e também garante a ausência de fluxo de reativos na direção da subestação de Capanda. O SCSR em Uíge permitiu evitar o aumento da tensão no circuito de 220 kV Lucala—Maquela do Zombo durante a carga leve, bem como no caso da perda da carga na mesma subestação.

5.0 - CONCLUSÃO

O presente informe técnico apresenta algumas informações sobre o emprego do SCSR baseado no uso de MCSR e bancos de capacitores. É mostrado que o equipamento pode reduzir impactos significativos na rede elétrica, aumentando a confiabilidade e até mesmo postergando a necessidade de instalação de reforços. Melhorias contínuas dos controles e algoritmos de controle realizados recentemente tem permitido um aumento na relação custo-benefício do SCSR, incluindo desempenho, perdas, peso e dimensões. Isso tem permitido a abertura de novas aplicações do SCSR em áreas como metalúrgicas, mineração, indústria petroquímica, transportes.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. M. BRYANTSEV – Magnetically controlled shunt reactors – collection of articles, Zodiac, 2004, 264pp.
- (2) A. M. BRYANTSEV – Sistema CSR, Patente No. 2335056, bulletin no. 27, em 27.09.08
- (3) A. M. BRYANTSEV – Sistema CSR, Patente No. 2335026, bulletin no. 27, em 27.09.08
- (4) A.M. BRYANTSEV. Ways to control the Sistema CSR. Patent No. 2337424. Bulletin No. 30 of 27.10.08.
- (5) A. M. BRYANTSEV, B. I. BAZYLEY, A. I. LURYE, S. V. SMOLOVIK – Regulation and stabilization of high voltage power supply system by controlled SCSR of inductive-capacitive type, Electricity, No. 10, 2012

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Prof. Bryantsev Alexander Mikhailovich

Doutor em Ciências de Engenharia, professor, vencedor do premio do Governo Russo em Ciências Técnicas em 2003. Professor Titular de sistemas eletrotécnicos, consultor científico de sistemas adaptáveis em Laboratório de Transmissão de Eletricidade do Moscow Energy Institute.

Alexander Mikhailovich foi combinando trabalhos pedagógicos, científicos e administrativos, fez a realização de testes de esferas de produção e operação de dispositivos de indução elétrica controlada magneticamente, substancializou teoricamente e desenvolveu a produção de reatores controlados magneticamente com saturação de núcleo magnético.

Uma série de novos produtos baseados nos trabalhos de Bryantsev foi desenvolvida em cooperação com ZTR (Zaporozhtransformator), Moscow Transformer Plant, Lenenergo, Companhia industrial "Uzhkazenergoremont" etc.

Na qualidade de diretor Geral Adjunto da sociedade anônima "Ramensky electrotehnichesky zavod Energia" na cidade Ramenskoe, região de Moscou desenvolveu a produção de reatores controlados de 25, 32, 63, 100, 180 MVA para sistemas de potência 6-500 kV (e superior). Por suas elaborações Bryantsev tornou-se o vencedor do prêmio do Governo Russo em Ciências Técnicas em 2003.

A ampla adoção de reatores controlados magneticamente tornou-se um dos programas de maior prioridade para o FSK da Rússia (Operador Nacional do Sistema de Transmissão da Rússia) e em outros sistemas de CIS.

Atualmente Bryantsev é o responsável pelo desenvolvimento e organização da produção industrial de dispositivos de potência reativa (SRPs) para 6-500 kV baseados em reatores controlados magneticamente e bancos de capacitores. Ele gerencia a pesquisa científica e pedagógica, orienta pós-graduados, estagiários e alunos que estão estudando na magistratura do Moscow Energy Institute. Ele é membro do Supervisory Board of the Union of Electrical Engineers of Russia, atua como membro do conselho editorial da revista técnico-científica "Elektrotehnika". Desde 1997 Bryantsev é um acadêmico da Academy of Electro-Technical Sciences of Russia.

Prof. Bryantsev tem vários prêmios: ele é laureado da Exposição de realizações de economia nacional em KazSSR, laureado da Exposição de realizações da economia nacional na URSS, tem medalha de ouro e diploma da 6th International industrial property salon, laureado com o Governo Russo em Ciências Técnicas. Ele publicou mais 200 pesquisas científicas, também recebeu mais de 80 certificados de reconhecimento e de patentes.