

**Resultados Obtidos na Operação de Sistemas de Compensação Série em
Alimentadores de Média Tensão da AES Sul**

H. R. P. M. de Oliveira - AES Sul, C. E.C. Figueiredo - AES Sul, N.C. de Jesus - UNJUÍ

E-mail: hermes.oliveira@aes.com

Palavras-chave - Sistemas de Distribuição, Regulação de Tensão, Oscilações de Tensão, Compensação Série, Qualidade de Energia.

Resumo - Este trabalho relata as experiências durante o comissionamento e aplicação de sistemas com compensação série em alimentadores de distribuição pertencentes a AES SUL - Distribuidora Gaúcha de Energia S/A. São apresentados os resultados de medições realizadas num sistema onde ocorreram oscilações de tensão devido a interação do capacitor série com motores de indução trifásicos no acionamento de levantes hidráulicos. A análise da operação através de programas de transitórios eletromagnéticos demonstrou a instabilidade no sistema inicialmente proposto para instalação da compensação série. Neste caso, realizou-se uma adequação para um novo sistema de distribuição, cujos resultados durante a energização e desempenho sob condições normais de operação são também apresentados.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas de compensação série é amplamente utilizada em sistemas de transmissão, visando a melhoria da estabilidade tanto em regime permanente quanto transitório, além do aumento da capacidade de transporte de energia elétrica [6]. A utilização desta filosofia de compensação em sistemas de distribuição também tem apresentado inúmeros benefícios, sendo que muitos projetos comprovam técnica e economicamente as vantagens sobre o sistema convencional com reguladores de tensão e capacitores shunt. Atualmente, existem aproximadamente 200 capacitores série instalados e utilizados em sistemas de distribuição de vários países do mundo [5]. Neste caso, o principal objetivo é a redução das quedas de tensão existentes e melhoria da regulação do sistema. Atualmente, com a necessidade de níveis de qualidade de energia compatíveis, a utilização de capacitores série também é direcionada no sentido de reduzir os índices de severidade de flicker. Apesar das inerentes vantagens da compensação série, como a regulação praticamente instantânea, diminuição dos valores de regulação de tensão e suporte a partida de motores, os efeitos adversos são bem conhecidos, decorrentes principalmente dos fenômenos de ferroressonância e oscilações subsíncronas [1], [7]. Neste sentido, são apresentados os resultados e as considerações sobre a aplicação em dois alimentadores de distribuição em 23 kV, pertencentes ao sistema

elétrico da AES SUL. O sistema inicialmente adotado pela concessionária para aplicação da compensação série apresentava elevadas quedas de tensão mesmo com a presença de três reguladores de tensão. Além disso, a demanda máxima era praticamente proveniente dos acionamentos de bombas localizadas juntos aos levantes hidráulicos utilizados durante o período de irrigação das lavouras de arroz na fronteira do Estado do Rio Grande do Sul, especificamente, o alimentador 110 da Subestação I de Uruguaiana/RS, que alimentava inúmeros motores de grande porte na faixa de 200 a 400 CV, os quais partiam principalmente através de chaves compensadoras. Após os estudos e definição do projeto por um consultor externo, realizou-se os procedimentos para implementação do projeto, com a proposta de substituir dois reguladores automáticos de tensão por bancos de capacitores em série, cada qual com reatâncias equivalentes de 35 $[\Omega]$. Durante o comissionamento do projeto original foram observadas oscilações de tensão, as quais resultaram em uma instabilidade do sistema, não sendo possível a operação do equipamento junto as condições normais de carga do sistema. Após as simulações realizadas em programas de transitórios eletromagnéticos, onde conclui-se a vulnerabilidade e inviabilidade da aplicação dos bancos no referido sistema, procedeu-se com o objetivo de realocar um dos bancos em um outro sistema com características distintas, cujos resultados após a inserção do sistema de compensação série foram satisfatórios, conforme descrito a seguir.

2. PROJETO ORIGINAL

O alimentador 110 do sistema de Uruguaiana originalmente supria em 23 kV uma demanda máxima próxima a 12 MVA com um fator de potência de 0,9 quando o projeto inicial foi realizado. Naturalmente, considerando a influência de três bancos de capacitores shunt instalados ao longo do alimentador, cada um com potência nominal de 600 kVAR. Em relação a queda de tensão, mesmo com três reguladores de 32 degraus e 200 A, conectados em estrela aterrada, o alimentador apresentava uma queda de tensão próxima a 15% no ponto mais crítico, sob condições de operação a plena carga, referente as atividades correlacionadas a irrigação das lavouras de arroz. Neste particular, seria necessário a implementação de uma nova solução para melhoria e adequação do perfil de tensão deste sistema.

A figura 1 mostra o diagrama unifilar do sistema original de Uruguaiana.

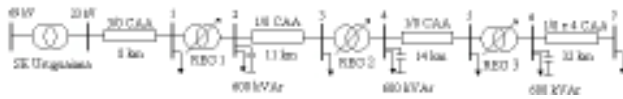


Fig. 1 - Diagrama unifilar original (Al 110/Uruguaiana)

Conforme projeto elaborado por um consultor externo, contratado pela AES Sul, dois reguladores de tensão seriam substituídos por dois bancos idênticos de capacitores série com reatância capacitiva de 35Ω e potência nominal de 5,1 MVar cada banco, visando a melhoria da tensão fornecida. A figura 2 apresenta o diagrama unifilar do sistema projetado para Uruguaiana, com a utilização da filosofia de compensação série, segundo o consultor externo. Os bancos de capacitores shunt nestas mesmas condições, seriam realocados nas barras a montante do primeiro banco série para não minimizar o efeito de compensação.



Fig. 2 - Diagrama unifilar com compensação série (Al 110/Uruguaiana)

Salienta-se que o primeiro banco apresentava um alto grau de compensação de aproximadamente 280%, enquanto a relação X_C/X_L do segundo equivalia a valores próximos a 180%. A necessidade destes níveis de compensação era decorrente do fator de potência relativamente alto deste alimentador, associado as elevadas resistências dos condutores utilizados. Além disso, o levantamento da carga indicou motores de diversas potências nominais, sendo os mais significativos na faixa de 200 a 400 C. Os resultados deste projeto em regime permanente mostravam que a máxima queda de tensão do alimentador ficaria próxima a 7%.

3. RESULTADOS OBTIDOS (AL 110)

Após a instalação dos equipamentos necessários para efetivar a operação da proposta original, foi realizado o comissionamento para energização do sistema de compensação série. O primeiro banco foi conectado durante operação das principais cargas deste sistema, ou seja, junto a operação de motores de indução trifásicos utilizados no acionamento de levantes hidráulicos. Logo após a inserção do banco de capacitores série, observou-se significativas oscilações de tensão. Imediatamente, procedeu-se no sentido de operar a chave de by-pass através do comando manual do dispositivo de proteção a vácuo. A figura 3 mostra como ocorreu a variação da tensão RMS, com valores de tensão insustentáveis, resultando inclusive em cintilação das lâmpadas dos consumidores próximos a este banco. A figura 4 mostra o registro da forma de onda em um determinado instante,

quando da ocorrência das oscilações. Analisando o comportamento das tensões instantâneas, e considerando a envoltória, verifica-se uma frequência equivalente próxima a 8Hz. Foram realizadas algumas energizações adicionais, as quais também apresentaram ocorrências críticas e instabilidade do sistema. Sendo assim, optou-se em fazer somente a inserção do segundo banco de capacitores em série, o qual em operação não implicou em qualquer perturbação do sistema. Porém, os resultados de desempenho em regime permanente não foram os esperados. Neste momento, novamente tentou-se energizar o primeiro banco de capacitores, mas os resultados foram surpreendentes, com sobretensões drásticas sustentadas no sistema, as quais provavelmente foram decorrentes do fenômeno de ferrossonância com o transformador de potencial instalado no sistema de proteção do segundo banco ou transformadores de distribuição operando a vazio. Entretanto, nestas condições, não registrou-se as formas de onda pelo equipamento de medição e procedeu-se no sentido de retirada definitiva do equipamento através do acionamento de seu by-pass.

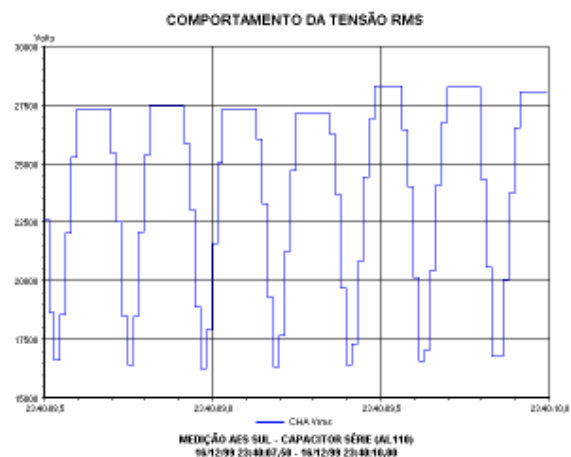


Fig. 3 - Comportamento da tensão RMS durante oscilações subsíncronas

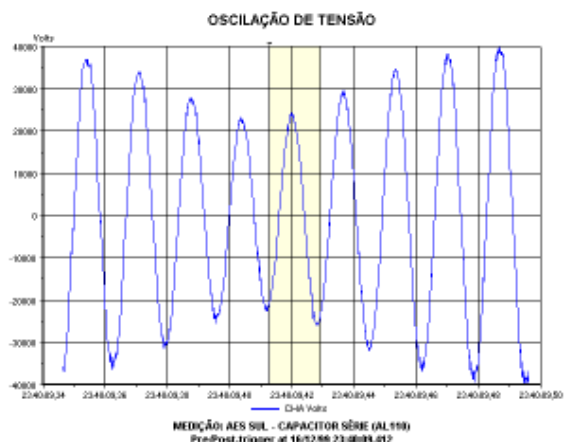


Fig. 4 - Tensões instantâneas durante a ocorrência de oscilações subsíncronas

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO (AL 110)

Para avaliar a vulnerabilidade do sistema proposto, frente as condições de oscilações subsíncronas devido a partida de motores de indução, foram simulados diversos casos através da modelagem do sistema no programa de transitórios eletromagnéticos Microtran, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.1. Partidas de Motores de Indução

Como o sistema apresentava carga motora com a mais preponderante, analisou-se os resultados de partida de motores de indução trifásicos a jusante do sistema de compensação série. As figuras 5, 6 e 7 mostram, respectivamente, as correntes de partida para motores com potências nominais de 75, 150 e 200 CV, conectados no sistema de baixa tensão em 380 V, imediatamente após a barra de instalação do capacitor série. Observou-se que na medida do aumento da potência nominal dos motores, aumentava a probabilidade de oscilações subharmônicas (auto-excitação) com a presença do capacitor série [4].

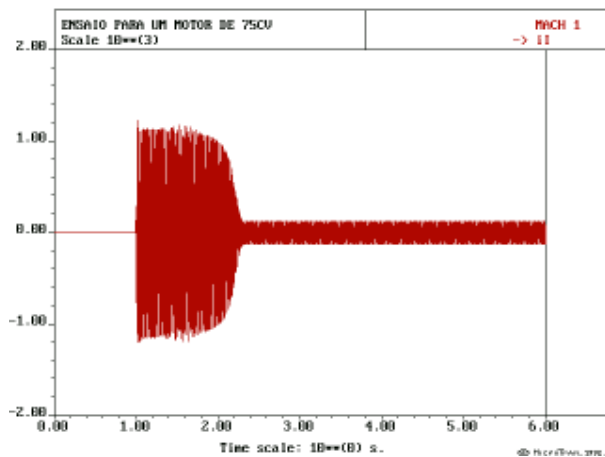


Fig. 5 - Corrente de partida do motor de 75 CV

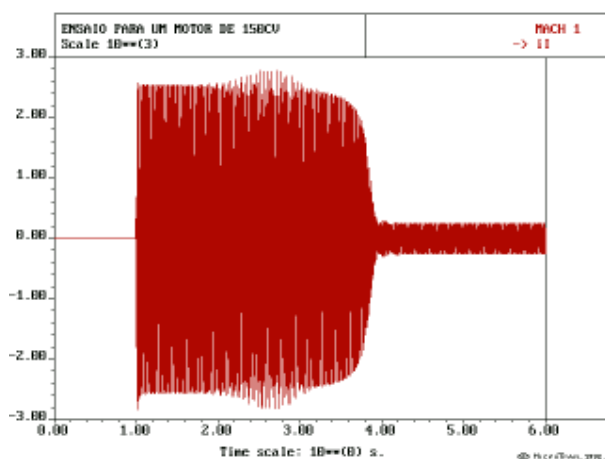


Fig. 6 - Corrente de partida do motor de 150 CV

Na figura 6, as correntes apresentaram uma pequena tendência de oscilação, porém o motor atingiu o regime permanente de maneira normal. Já para o motor de maior potência (200 CV), as correntes não se estabilizaram e o motor não acelerou até as condições normais de

trabalho, caracterizando como oscilações subsíncronas, conforme o comportamento da corrente e velocidade desenvolvida pelo motor, apresentado respectivamente nas figuras 7 e 8. Para motores de potências maiores os resultados foram similares.

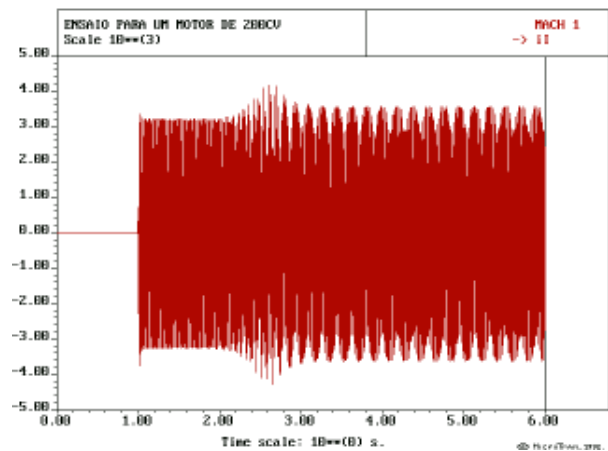


Fig. 7 - Corrente de partida do motor de 200 CV

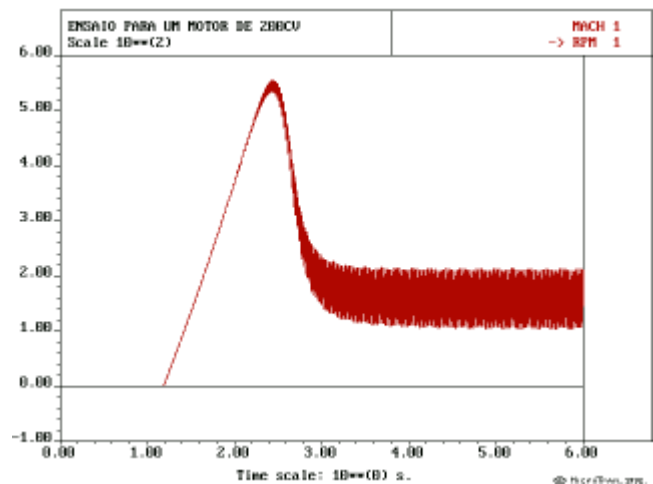


Fig. 8 - Velocidade desenvolvida pelo motor de 200 CV

4.2. Simulação de Alternativas para Amortecimento das oscilações de Tensão

4.2.1. Redução do Grau de Compensação

Diante das oscilações de tensão ocorridas, realizou-se simulações no sentido de avaliar as condições técnicas para contornar os problemas e instabilidade do sistema. A primeira alternativa seria a redução do grau de compensação, diminuindo portanto a probabilidade do fenômeno frente as cargas motoras do sistema. As figuras a seguir mostram a evolução considerando esta alternativa para dois casos contendo dez motores com diversas potências e instantes de partida distintos. A figura 9 mostra a corrente total solicitada considerando um grau de compensação de 200%, conjuntamente com a partida de diversos motores de 200 CV, onde os efeitos das oscilações permaneceram inalterados. A figura 10 mostra o resultado para uma compensação de 150%, onde no caso específico, os motores entraram em regime permanente sem qualquer perturbação ao sistema.

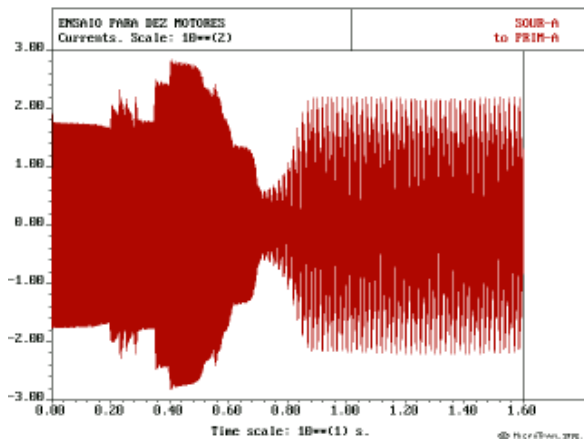


Fig. 9 - Corrente total com compensação de 200%

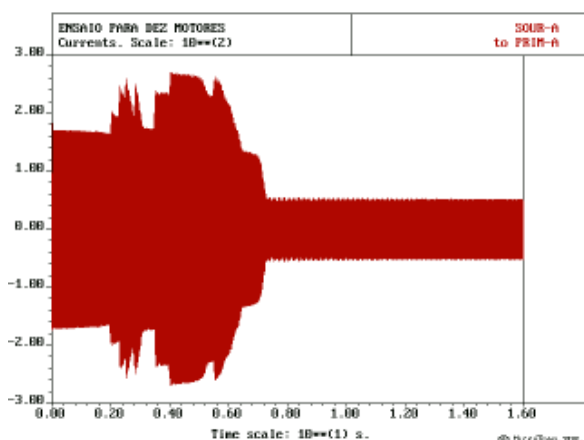


Fig. 10 - Corrente total com compensação de 150%

4.2.2. Resistor de Amortecimento

Um dos métodos efetivos para mitigação de oscilações auto-excitadas durante a partida de motores é a utilização de um resistor de amortecimento [3]. A resistência paralela tipicamente se situa na faixa de 5 a 10 X_C [Ω]. Para avaliar estas características simulou-se um caso com a inserção de um resistor de amortecimento com valor de 140 [Ω] aos 8 seg., e abertura da respectiva chave aos 20 seg., sendo uma relação de 4 vezes sobre a reatância do banco. Neste caso, o sistema apresentava uma configuração com dez motores de potência nominal de 200 CV, partindo nos mais variados instantes. Enquanto o resistor de amortecimento esteve em operação, os motores operavam normalmente e, após a abertura da chave de conexão do resistor, ocorreram novamente oscilações, o que caracteriza um caso particular de auto-excitação de motores de indução, não somente no período de partida, mas também em regime permanente, como mostra a figura 11. Conforme [8], este é um fenômeno provável com cargas parabólicas, ou seja, acionamento de bombas e compressores na presença de compensação série. Este fenômeno é conhecido como Hunting, causando perturbações relacionadas ao efeito flicker.

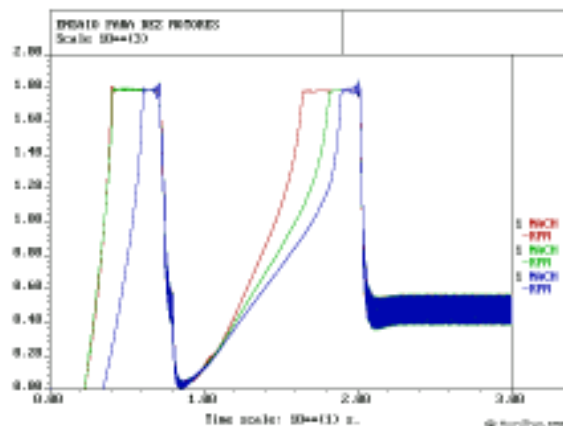


Fig. 11 - Velocidades desenvolvidas com resistor de amortecimento

4.2.3. Filtro RLC

Durante a ocorrência de ressonâncias com sistema de compensação série ao longo da história [2], uma das soluções encontradas e que apresentaram bons resultados refere-se ao filtro RLC, como mostra a figura 12. O princípio de funcionamento baseia-se em utilizar os elementos LC de tal forma que ocorra uma ressonância paralela à frequência industrial, e para frequências abaixo da síncrona, a impedância equivalente é reduzida, atuando praticamente o circuito de amortecimento, sendo que os valores utilizados na simulação foram de 100[Ω], 68 [mH] e 98[μ F]. A figura 13 ilustra a corrente no resistor durante a atuação do filtro para o mesmo caso, onde eliminou-se as oscilações de tensão do sistema.

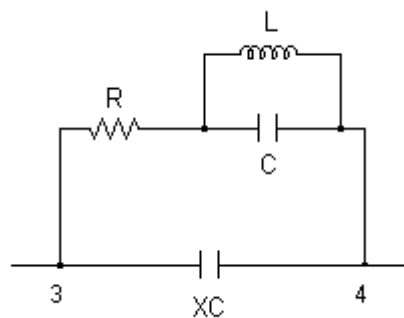


Fig. 12 - Configuração do filtro RLC

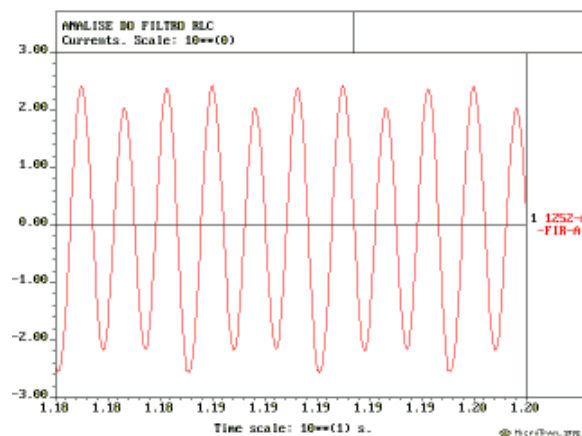


Fig. 13 - Corrente no resistor do filtro RLC

5. ADEQUAÇÃO DO SISTEMA E DO BANCO DE CAPACITOR SÉRIE

Apesar das simulações indicarem algumas alternativas com bom desempenho quanto a eliminação das oscilações de tensão, a análise econômica determinou a inviabilidade e impossibilidade de operação do sistema de compensação série originalmente proposto para aplicação no alimentador 110 de Uruguaiana. Após a seleção do novo sistema e análise em regime permanente, adotou-se o alimentador 03, pertencente ao sistema de distribuição em 23 kV da AES Sul, derivando da SE UJAC-320 de Salto do Jacuí. Este alimentador apresenta 5 MVA de demanda máxima com um fator de potência de 0,92. Na configuração com dois reguladores apresentava uma queda de tensão máxima de 9%. O diagrama unifilar simplificado é apresentado na figura 14, onde se previa a simples substituição de um regulador de tensão por um dos bancos série, inserido na cidade de Arroio do Tigre. Um fator a destacar é que no ponto de aplicação, o grau de compensação era praticamente o mesmo do segundo banco série do projeto elaborado inicialmente, o qual também não resultou em oscilações devido ao maior amortecimento do sistema.

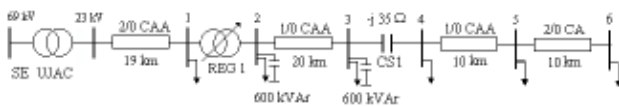


Fig.14 - Diagrama unifilar (AI 03/Salto do Jacuí)

5.1. Resultados de Simulação (AL 03 - UJAC 320)

Apesar do sistema proposto para adequação da compensação série não apresentar cargas motoras como as mais significativas, realizou-se a modelagem deste sistema frente à avaliação das condições de partida de motores de indução. Sendo assim, simulou-se um motor de 200 CV partindo junto à barra 4 da figura 14, onde os resultados foram normais, conforme a velocidade desenvolvida pelo motor e ilustrada na figura 15.

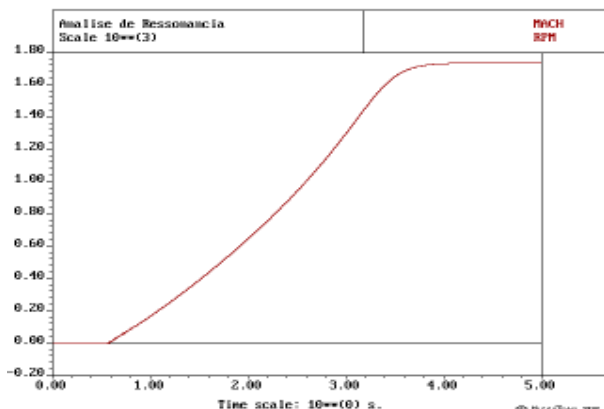


Fig.15 - Velocidade desenvolvida pelo motor de 200CV

5.2. Resultados Obtidos (AL 3 - UJAC 320)

A implementação do banco série foi realizada, sendo que os principais componentes do sistema podem ser verificados na figura 16.

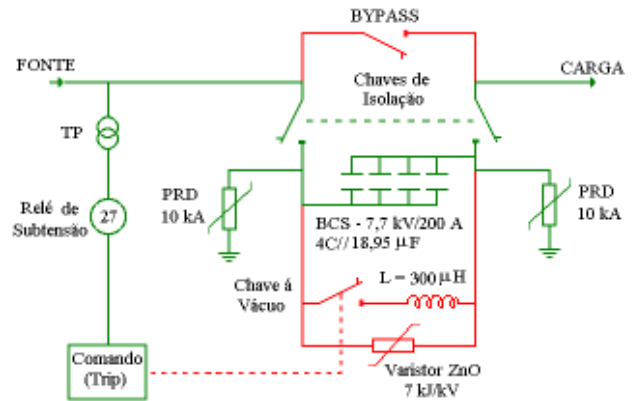


Fig.16 - Diagrama unifilar do sistema de compensação série

A figura 17 apresenta a visão geral do sistema de compensação série implementado.



Fig.17 - Implementação do sistema de compensação série

A energização deste sistema foi realizada sob condições normais de operação, obtendo-se elevações de tensão significativas em determinados períodos. Não foram verificados quaisquer sinais de oscilações, sendo que o sistema mostrou-se bastante estável e com uma boa regulação de tensão. A figura 16 ilustra o comportamento das tensões RMS a montante e a jusante do capacitor série, registradas imediatamente a fase final do comissionamento e energização do banco, com resultados considerados satisfatórios. Neste caso, durante a operação sob carga máxima ocorreram quedas de tensão significativas de tensão. Deve-se salientar que os dois bancos de capacitores shunt mostrados na figura 13 não estavam em operação. Neste sentido, durante a carga máxima já existe uma deterioração da tensão na própria subestação, o que dificultou a obtenção de um perfil adequado das tensões do sistema no referido período.

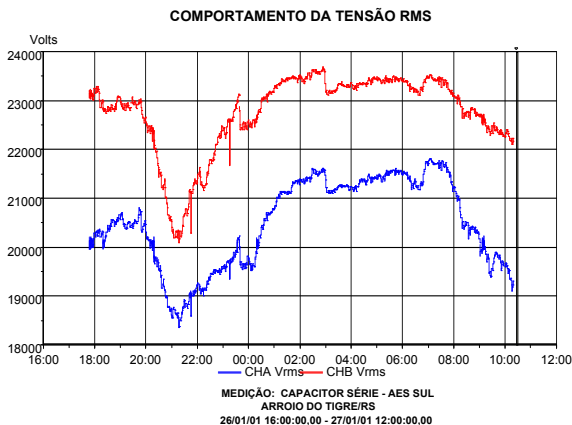


Fig.17 - Comportamento das tensões no sistema de compensação série

Portanto, os resultados indicaram que a adequação do banco de capacitores foi conveniente, principalmente na comparação da operação do sistema com dois reguladores de tensão. Após cerca de onze meses de operação plena do alimentador com o sistema de capacitor série, foram registrados novamente as tensões nas barras de instalação do banco, com elevações de tensão de 5 a 14% e desempenho satisfatório, como verifica-se na figura 17.

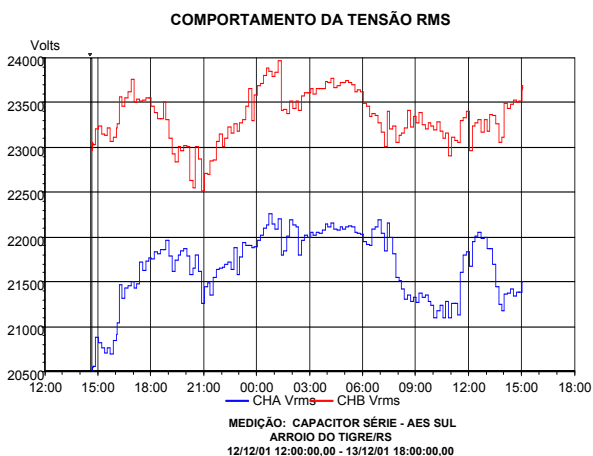


Fig.18 - Comportamento das tensões no sistema de compensação série

6. CONCLUSÕES

Este artigo relatou experiências distintas na aplicação de sistemas de distribuição com sobrecompensação série em dois alimentadores de distribuição do sistema de 23 kV da AES SUL. Em virtude das características de sistemas típicos de distribuição rural, com resistências e quedas de tensão consideráveis, existe a necessidade de sobrecompensação para obter-se níveis adequados de tensão, o que implica em um maior risco de ressonâncias. Os resultados apresentados mostraram oscilações de tensão ocorridas durante a energização do primeiro banco série do sistema original, em função do grande número de carga motora conectada ao alimentador. Desta forma, o sistema que objetivava a redução dos níveis de regulação e diminuição dos índices de severidade de flicker, foi o

próprio responsável pela sua ampliação, gerando tensões insustentáveis em operação devido ao alto grau de compensação. Após a ocorrência dessa oscilação, realizou-se um estudo detalhado, considerando as principais características do sistema e modelagem em programas de transitórios eletromagnéticos, avaliando inclusive algumas técnicas para eliminação das oscilações. Neste aspecto, destaca-se que no referido sistema existiu a possibilidade de ocorrência de oscilações em regime permanente (hunting), além do fenômeno de auto-excitação na partida de motores de indução, pois a inclusão de um resistor de amortecimento não apresentou os resultados esperados, com oscilações sustentadas após a abertura da chave do resistor. Diante da impossibilidade de aplicação do sistema originalmente proposto pelas características da carga e conseqüências decorrentes da inviabilidade técnica, procedeu-se no sentido de readequação e aplicação em um outro sistema de distribuição. Neste caso, os resultados foram satisfatórios, mostrando a potencialidade e vantagens inerentes de regulação em sistema de distribuição com compensação série, desde que observados os níveis de desempenho e condições de ressonância, principalmente quando um alto grau de compensação é necessário à solução de problemas de quedas de tensão. Desta forma, após a determinação de um sistema com características distintas de carregamento e propícias a utilização da compensação série, aplicou-se um dos bancos do sistema projetado para Uruguiana em outro alimentador, com valores significativos de desempenho e redução da regulação de tensão para o sistema final adotado. Portanto, o sistema de compensação série foi implementado e mostrou-se viável ao novo sistema, considerando os resultados obtidos sob plenas condições de operação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Butler, J.W., Concordia, C. "Analysis of Series Capacitor Applications Problems", AIEE Transactions, navol. 56,1937, pp.975-988
- [2] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group of the system Dynamic Performance - Subcommittee Power Systems Engineering Committee. "Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, no 5 Sept/Oct 1980, pp 1810-1818.
- [3] Larsson, L.O.; Samuelson, J.; Lombard, J.J.; Berneche, P.; Aliard, G. "Applications of a New Concept for a Compact Series Capacitor Scheme for Distributions Networks", Canadian Electrical Association, Vancouver, March 1995.
- [4] Mahmoud, A.A.; Ortmeyer, T.H.; Harley, R.G. "Effect of Reactive Compensation on Induction Motor Dynamic Performance", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 3, May/June 1980, pp. 841-846.

- [5] Miske, S.A. "Considerations for the Application of Series Capacitors to Radial Power Distribution Circuits", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 2, April 2001, pp. 306-318.
- [6] C. G. Vabo, P.P.E. Silva, A.W. Cavalcanti, "Aplicação de Bancos de Capacitores Série para Regulação de Tensão e Compensação Reativa em Sistemas de Distribuição". Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 1994.
- [7] C.F. Wagner., "Self-excitation of Induction Motors with Series Capacitor Series Capacitor" AIEE Transactions, vol.60, 1941, pp.1241-1247
- [8] Westinghouse, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse, 1964, p.258.