

Análise da viabilidade operacional conjunta de reguladores de tensão à núcleo saturado e controlado a tiristores para a estabilização de tensão em sistemas elétricos

Arnulfo B. Vasconcellos, Roberto Apolônio, Mário K. Kawaphara, José C. Oliveira, José E. Carvalho, Jackson M. Pacheco, Fabricio P. Santilio, Regiane S. Barros

Resumo - Este artigo apresenta resultados de investigações conduzidas no âmbito da regulação da tensão em um sistema elétrico, considerando dois dispositivos distintos para os fins almejados, operando conjuntamente. Um deles consiste no emprego dos compensadores estáticos formados de um reator à núcleo saturado e o outro, relacionado com o clássico reator controlado a tiristores em conjunto com um banco de capacitores chaveado a tiristores. O foco do trabalho está centrado em estudos computacionais sobre o desempenho dos dois dispositivos, operando em paralelo, utilizando para tanto o simulador ATP. Um conjunto de estudos, que compreendem a operação de um sistema de transmissão radial, com a inserção dos mencionados dispositivos e a ocorrência de situações adversas de operação que exigem a atuação dos mencionados reguladores. Os resultados apresentados e discutidos ilustram a eficácia dos modelos implementados e seus impactos sobre a dinâmica operacional do sistema, no que tange às variações de tensão.

Palavras-chave – Compensadores de reativos à núcleo saturado, compensadores de reativos à tiristores, Compensação Estática, Controle de Tensão, Modelagem.

I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por um expressivo número de linhas de transmissão longas. Isto se deve, dentre outros aspectos, a sua vasta extensão territorial, concentração do consumo de energia em regiões específicas, e geração predominantemente hidrelétrica. Uma das singularidades dos sistemas de transmissão longos em alta tensão está nas dificuldades inerentes à regulação de tensão junto às barras de consumo, tanto em regime permanente como sob condições transitórias e dinâmicas.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Este trabalho conta com o suporte financeiro da Eletronorte através do programa de P&D com a participação da UFMT e UFU.

J. C. de Oliveira trabalha na Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: jcoliveira@ufu.br); A. B. de Vasconcellos, J. M. Pacheco, M. K. Kawaphara e R. Apolonio trabalham na Universidade Federal de Mato Grosso (e-mails: arnulfo@ufmt.br, jackson@ufmt.br, apolonio@cpd.ufmt.br, kiyoshi@cpd.ufmt.br); J. E. Carvalho trabalha na Eletronorte (joseeduardo@eln.gov.br)

Na operação em vazio ou em carga leve, vigente por ocasião das energizações ou como consequência das rejeições de carga, as capacitâncias associadas a essas linhas de grande extensão impõem, frequentemente, elevações na tensão das barras que superam os valores pré-definidos pelos órgãos reguladores (ONS e ANEEL). Por outro lado, quando funcionando na plenitude da carga, muitas vezes registra-se um comportamento inverso, ou seja, uma redução drástica da tensão. Objetivando a conformidade dos padrões de tensão, uma das soluções mais comuns encontra sustentação na compensação de reativos. De fato esta é uma das práticas mais comuns entre as concessionárias nacionais responsáveis pela geração e transmissão de energia elétrica. Dentre os mecanismos utilizados para tanto se destaca, como princípio, o emprego de compensadores fixos ou outros com características variáveis.

No contexto dos dispositivos dinâmicos, os reatores controlados a tiristores operando em conjunto com um banco de capacitores fixos ou chaveados têm sido largamente utilizados por muitas empresas. Esta tecnologia, surgida nos anos 80, ainda se destaca como uma alternativa altamente atrativa para muitas aplicações. O compensador estático é basicamente constituído por um reator controlado a tiristores (RCT), um capacitor chaveado a tiristores (CCT) e, normalmente, há também filtros harmônicos. Um arranjo típico, extraído de [2], é indicado na Figura 1.

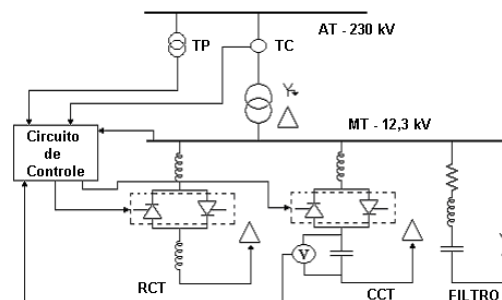


Figura 1. Diagrama unifilar do Compensador Estático: RCT, CCT e Filtro harmônico.

Não obstante os pontos positivos relacionados com os dispositivos baseados na tecnologia de chaveamento eletrônico, para várias aplicações podem ser consideradas soluções mais simples, de menor custo, reduzida manutenção e outros aspectos atrativos. Nestas situações surge à idéia do uso de um princípio já bastante difundido

na engenharia elétrica, qual seja, do emprego de dispositivos compensadores baseados na saturação magnética de reatores e sua operação em paralelo com bancos de capacitores. O efeito final é similar àquele obtido com a tecnologia eletrônica, com a diferença que a compensação reativa variável não requer dispositivos de chaveamento e sofisticados sistemas de controle. Um dos pontos de maior importância deste produto refere-se, além dos custos e simplicidade, sua capacidade de promover um controle de tensão de forma intrínseca ao seu princípio construtivo.

A não linearidade da curva BxH do material constituinte do núcleo magnético define uma das mais importantes propriedades operativas do dispositivo. Devido a este fato, a corrente harmônica produzida pelo equipamento não deve ser esquecida quando o desempenho global do equipamento é considerado [3], [4], [5], [6]. Tal equipamento não é novo e já foi empregado há cerca de quatro décadas quando a tecnologia de semicondutores era ainda embrionária. No entanto, a sua utilização não foi amplamente difundida nos sistemas de energia, principalmente devido à opção oferecida pelo compensador estático tiristorizado.

O compensador estático a núcleo saturado fundamenta-se numa combinação de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais [1], [4], [5], [8], [9], [10], [11], [12]. Esta propriedade construtiva proporciona as vantagens supra destacadas.

Focando, pois o emprego destes equipamentos, este artigo tem por objetivo apresentar resultados de estudos de desempenho, via modelagem no ATP, destes compensadores e seus impactos num sistema de transmissão típico da rede nacional. Para tanto é utilizada uma linha de Transmissão da ELETRONORTE entre as cidades de Cuiabá e Sinop no Estado de Mato-Grosso. As investigações têm por propósito a avaliação da eficácia do compensador a núcleo saturado (RNS) em paralelo com o compensador estático de reativos com controle eletrônico (CER) na regulação de tensão da unidade sob foco. Diferentes casos, compreendendo elevações de tensões, são considerados nas simulações.

Tendo em vista que detalhes sobre os princípios físicos, características de funcionamento, modelagem computacional e outras propriedades para os compensadores controlados a tiristores são amplamente contempladas em [1], [4], [5] e [2], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20] o presente artigo fica direcionado a apresentar as características de funcionamento, modelagem computacional do RNS e aos aspectos aplicativos e aos resultados obtidos.

Vale, todavia ressaltar que as discussões dos casos investigados estão associadas com a operação simultânea dos dois dispositivos reguladores, um baseado na tecnologia do reator saturado, que recebeu a designação RNS, e o outro, que utiliza os chaveamentos tiristorizados (CER). O aparente conflito entre o emprego simultâneo das duas estratégias se justifica pelos princípios que nortearam o presente trabalho, qual seja a resposta à pergunta: sendo o sistema original composto por um regulador de tensão de um tipo, havendo necessidade de expansão, poder-se-ia considerar um complemento da compensação de reativos através de outra tecnologia? A resposta a tal indagação é dada através das investigações consideradas na seqüência.

Este projeto foi financiado pela Eletronorte, através de recursos de P&D, sob o título: Análise da Viabilidade Técnica da Operação Conjunta de Reator Controlado a Tiristores e Reatores a Núcleo Saturado na Absorção de Reativos para o Controle de Tensão em Linhas de Transmissão, aprovado pela ANEEL, sob o número (SGTI) 232, ciclo 2005/2006, executado em convênio com a Universidade Federal de Mato Grosso.

II. REATOR SATURADO: PRINCÍPIOS BÁSICOS E CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO

O reator saturado tem o seu núcleo de forma fechada como o de um transformador, sem enrolamento de potência no secundário. O material magnético não linear usado neste tipo de equipamento deve, idealmente, apresentar as seguintes propriedades:

- Alta permeabilidade na região não saturada;
- Efeito desprezível da histerese;
- Baixa permeabilidade na região saturada.

O aço-silício de grãos orientados laminado a frio embora não seja o ideal, atende, em parte, aos requisitos acima expostos.

A característica V x I do compensador é mostrada na figura 2. É possível observar que, antes de ser atingida a saturação, a indutância apresentada pelo reator vista pelo suprimento é alta e a corrente correspondente é baixa. Assim que a saturação é alcançada a indutância diminui e a corrente associada é substancialmente aumentada. Desta maneira, o reator a núcleo saturado pode ser usado para compensar elevação de tensão quando um controle muito rígido não é exigido (ele é um consumidor natural de energia reativa).

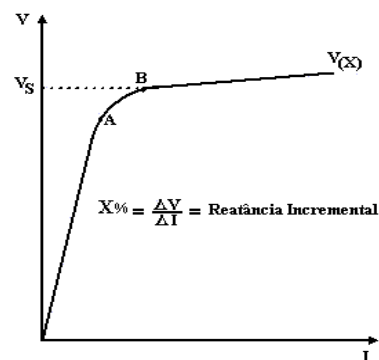


Figura 2. Característica de Saturação

III. MODELO DO REATOR SATURADO

A figura 3 mostra o modelo físico do reator a núcleo saturado Twin-Tripler. Um arranjo de seis unidades é composto por dois reatores com três unidades cada. Cada unidade operará sobre as mesmas leis físicas, porém limitada por condições de fronteira. Essas dependerão do arranjo dos enrolamentos de cada unidade e do tipo de conexão usado. Twin-Tripler é o termo comum usado para o reator de seis unidades consistindo de dois enrolamentos zig-zag com ângulos de 30° entre eles e conectados em série.

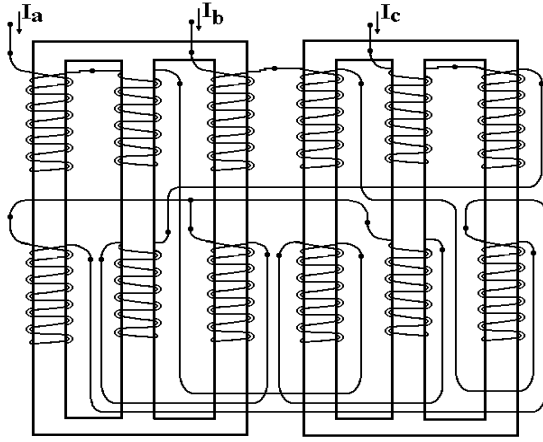


Figura 3. Modelo físico do reator à núcleo saturado Twin-Tripler

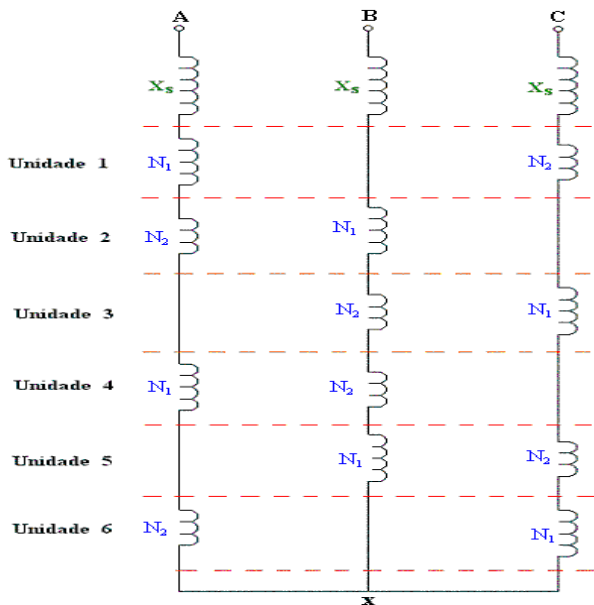


Figura 4. Diagrama do circuito do reator twin-tripler.

Considerando o reator twin-tripler representado pelo circuito equivalente da figura 4, é possível escrever um conjunto de equações que regem seu comportamento. Para tanto supõe-se que a tensão de suprimento trifásica está equilibrada. Se o ponto comum-estrela do reator saturado não está conectado ao neutro do sistema e ωL é a reatância do sistema, então é possível afirmar que: a tensão entre cada fase do suprimento e o ponto comum-estrela é igual à queda de tensão na reatância do sistema mais a tensão estabelecida nas unidades não saturadas do reator. Considerando a tensão na fase A como referência tem-se:

$$V \cos \theta - V_x = L \frac{di_A}{dt} + N_1 \left[\frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_4}{dt} \right] - N_2 \left[\frac{d\phi_2}{dt} + \frac{d\phi_6}{dt} \right] \quad (1)$$

$$V \cos(\theta - 120^\circ) - V_x = L \frac{di_B}{dt} + N_1 \left[\frac{d\phi_2}{dt} + \frac{d\phi_3}{dt} \right] - N_2 \left[\frac{d\phi_3}{dt} + \frac{d\phi_4}{dt} \right] \quad (2)$$

$$V \cos(\theta + 120^\circ) - V_x = L \frac{di_C}{dt} + N_1 \left[\frac{d\phi_3}{dt} + \frac{d\phi_6}{dt} \right] - N_2 \left[\frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_5}{dt} \right] \quad (3)$$

Nestas equações $\frac{d\phi_i}{dt}$ será zero para todas as unidades saturadas.

Com o ponto comum-estrela flutuando, outra equação válida é:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4)$$

Um último grupo de equações que rege o desempenho deste circuito equivalente está relacionado com as fmm's em cada núcleo. Estas devem ser zero para todas as unidades não saturadas.

As equações de (1) a (4), combinadas com as equações das fmm's e com os modos de operação do reator, possibilitam o cálculo dos fluxos nos núcleos, as correntes nas linhas e a tensão do ponto estrela-comum para cada modo de operação. As correntes de linhas como estabelecidas em [15], são expressas como:

$$i_A = 0.259 \frac{V}{\omega L} \sin(\theta + 75^\circ) \quad (5)$$

$$i_B = -0.966 \frac{V}{\omega L} \sin(\theta + 75^\circ) \quad (6)$$

$$i_C = 0.707 \frac{V}{\omega L} \sin(\theta + 75^\circ) \quad (7)$$

i_A = Corrente na fase A, para o reator à núcleo saturado Twin-Tripler

i_B = Corrente na fase B, para o reator à núcleo saturado Twin-Tripler

i_C = Corrente na fase C, para o reator à núcleo saturado Twin-Tripler

A figura 5 mostra o correspondente diagrama utilizado na simulação no ATPDraw. Como visto na figura 3, o aspecto físico é semelhante à construção de um transformador trifásico, com conexões apropriadas entre os enrolamentos para prover a constituição almejada para o Reator Twin-Triple. Para a simulação do Reator à Núcleo Saturado Twin-Tripler no ATP

Draw0 foi utilizado o componente Transformador Saturado Trifásico (Three Phase Saturable Transformer) [1] para a geração de um arquivo na forma .dat. Com base nesse cartão foram retirados os parâmetros utilizados para a criação dos blocos. Cada bloco representa um transformador monofásico de três enrolamentos. Nesse caso, para se obter a ligação zigue-zague, foi utilizado apenas o enrolamento primário e secundário de cada transformador, deixando o enrolamento terciário em aberto. Isto é mostrado na figura 5.

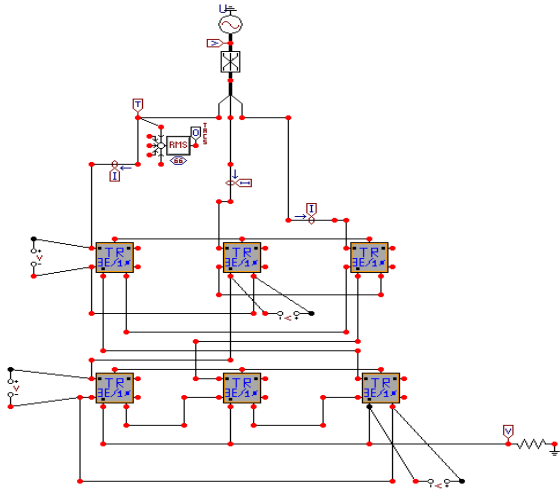


Figura 5. Modelo computacional do RNS no ATP.

Para a parametrização de cada transformador monofásico, os dados requeridos podem ser visualizados através da figura 6.

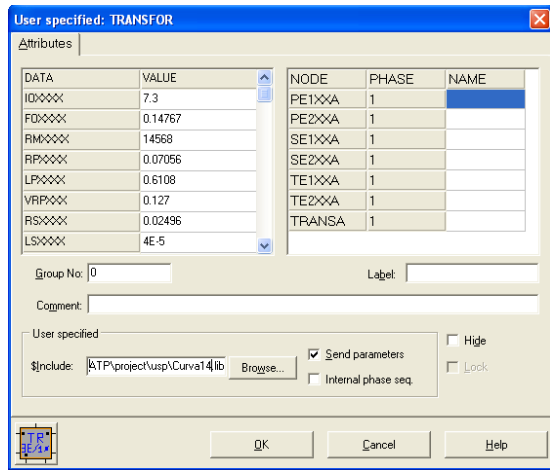


Figura 6. Parametrização para o processamento do RNS via ATPDraw

As informações requeridas são:

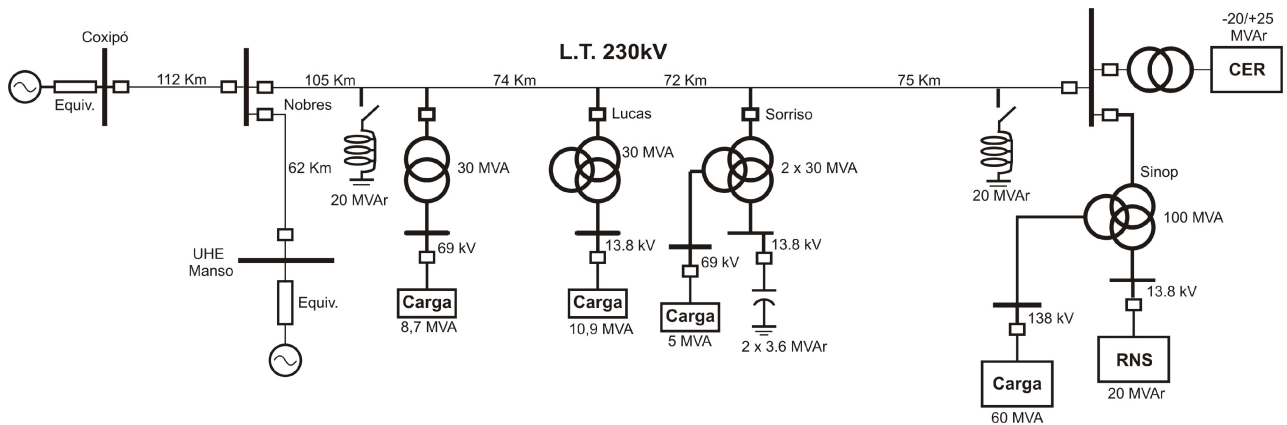


Figura 7. Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado na simulação.

IOXXXX- valor da corrente de magnetização para o ponto em que se inicia a saturação na curva de magnetização;

FOXXXX- valor do fluxo para o ponto da curva de magnetização onde começa a saturação;

RMXXXX- valor da resistência de magnetização;

RPXXXX- valor da resistência do enrolamento primário;

LPXXXX- valor da indutância do enrolamento primário;

VRPXXXX- valor da tensão fase-neutro aplicada sobre o enrolamento primário;

RSXXXX- valor da resistência do enrolamento secundário;

LSXXXX- valor da indutância do enrolamento secundário;

VRSXXXX- valor da tensão aplicada sobre o enrolamento secundário.

IV. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

O diagrama unifilar do sistema simulado é apresentado na Figura 7 e alguns dados relevantes são fornecidos pela tabela 1.

Tabela I – Dados do Sistema

Dados	Potência (MVA)	Fator de Potência	Tensão (kV)	Potência (MVAr)	Distância (km)
Carga	60,0	0,8	138	-	-
Extensão da linha	-	-	-	-	438
CER	20,0	-	12,3	25,0	-
Reator Twin-Tripler	20,0	-	13,8	-	-

A. Alívio de carga sem os compensadores RNS e CER

A presente situação está relacionada com fenômenos que conduzem a uma elevação momentânea de tensão sobre o barramento da cidade de Sinop, na rede básica de 230 kV, quando da ausência dos compensadores em foco (RNS e CER). Nesse sentido, em $t=1s$ é provocada a ocorrência de tal evento, com a retirada de 92% da carga presente no secundário do transformador da cidade de Sinop. O resultado desta ação ocasiona uma elevação de 10,7% na tensão, com duração de 1,0 segundo.

Os perfis das tensões entre fases do barramento de 230kV de Sinop, durante todo o intervalo de simulação (entre 0,0 e 3,0s), proveniente de tais manobras são evidenciados na Figura 8.

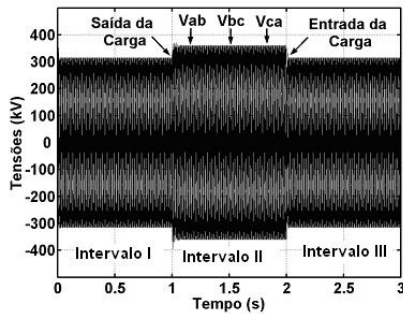


Figura 8. Tensões entre fases no barramento 230 kV da cidade de Sinop – alívio de carga - sem os compensadores (RNS e CER).

As Figuras 9 (a) e (b) ilustram, respectivamente, detalhes das tensões em Sinop para duas condições, uma relacionada com a operação normal e outra sob a ação do alívio repentino da carga. Os resultados refletem o desempenho da tensão sem os compensadores. O seu valor inicial, em torno de 222,8kV (0,969 p.u.), no intervalo de 0,0 a 1,0s, foi elevado para 254,6kV (1,107 p.u.), no intervalo de 1,0 a 2,0s. Esta tensão retoma o seu valor inicial, após o religamento da carga, que ocorrem em $t \geq 2,0s$, como mostra a Figura 8.

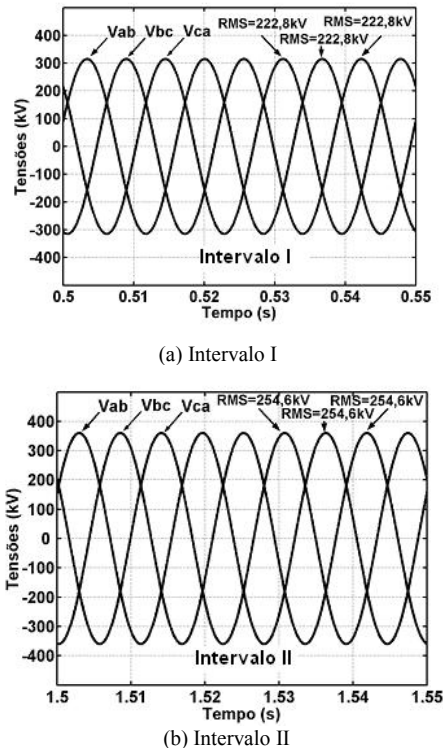


Figura 9. Tensões entre fases no barramento 230kV da Cidade de Sinop – detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – sem a presença dos compensadores (RNS e CER).

Avançando na direção da rede de distribuição na cidade de Sinop, a Figura 10 destaca os perfis das tensões entre fases do

barramento 13,8kV durante todo o intervalo de simulação (entre 0,0 e 3,0s).

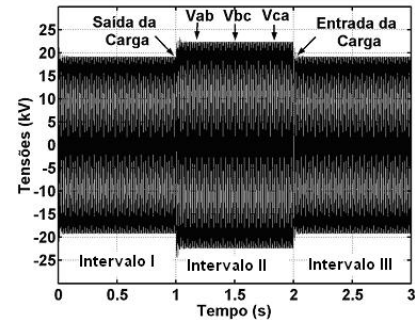


Figura 10. Tensões no barramento 13,8 kV da cidade de Sinop – alívio de carga - sem os compensadores (RNS e CER).

Seguindo a mesma estratégia anterior, as Figuras 11 (a) e (b) mostram detalhes da tensão na rede de distribuição, considerando os dois momentos focados nos estudos. Como se observa, o valor de 13,5kV (0,978 p.u.), no intervalo de 0,0 a 1,0s, foi incrementado para 15,8kV (1,145 p.u.), no intervalo de 1,0 a 2,0s.

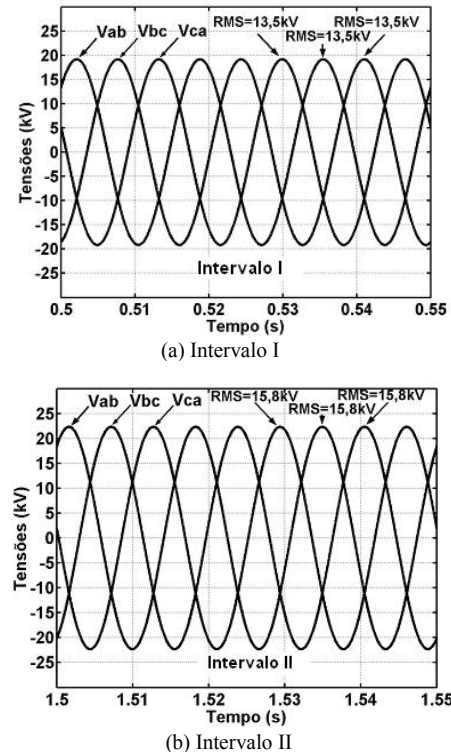


Figura 11. Detalhes das tensões no barramento 13,8kV da Cidade de Sinop: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – sem a presença dos compensadores (RNS e CER).

B. Alívio de carga com os compensadores RNS e CER.

Neste caso, a retirada parcial da carga, com a duração de 1,5 s, ocorreu no início do intervalo II. A escolha da duração dos intervalos de 1,5s deve-se a necessidade de um maior tempo para se atingir as condições de regime permanente na simulação de retirada e inserção da carga. No intervalo III, com duração de 1,5s, o sistema volta a apresentar suas

características operacionais estabelecidas como premissas. O comportamento da tensão nos barramentos de 230 kV, indicado na Figura 12, contempla, agora, a presença e ação

conjunta dos dois compensadores. Um deles corresponde ao RNS (de 20 MVar) e o outro ao compensador eletrônico (CER) constituído por: um RCT de 20 MVar, um CCT de 21,5 MVar e um filtro de 3,5 MVar. Os pontos de instalação física dos dispositivos encontram-se indicados na Figura 7. Nesta constata-se que o RNS foi conectado na barra de 13,8 kV e o CER na barra de 230 kV (através de um transformador individual que abaixa a tensão para 12,3 kV). As condições operativas são as mesmas já discutidas. Os detalhes das tensões do barramento de 230 kV são ilustrados nas Figuras 13 (a) e (b).

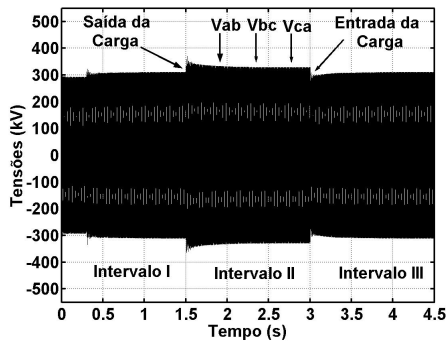


Figura 12. Tensões no barramento 230kV na Cidade Sinop – alívio de carga – presença dos compensadores (RNS e CER).

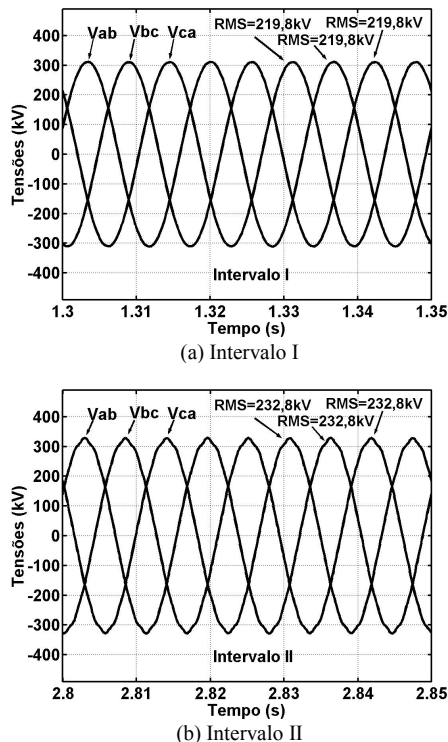


Figura 13. Tensões no barramento 230 kV na Cidade Sinop - detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – com a presença dos compensadores (RNS e CER).

Baseando-se nas Figuras 13 (a) e (b), pode-se constatar a eficácia dos compensadores em manter a tensão no barramento da subestação da cidade de Sinop. Esta que era inicialmente de 219,8kV (0,956 p.u.) foi elevada para 232,8kV (1,012p.u.), mesmo durante a retirada momentânea de 92% da carga. Esta tensão retoma o seu original, apenas

quando o referido distúrbio é eliminado em $t \geq 3,0s$ como mostra a figura 12.

A figura 14 destaca as tensões registradas no barramento de 13,8kV de Sinop, durante todo o intervalo de estudo (entre 0,0 e 4,5s).

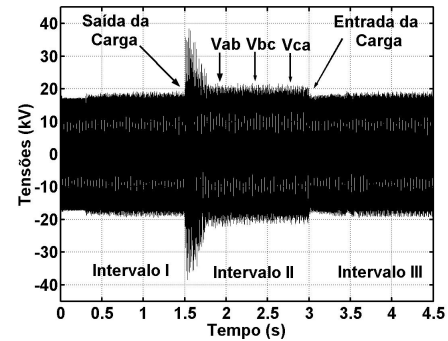


Figura 14. Tensões entre fases no barramento 13,8kV na Cidade Sinop – alívio de carga – presença dos compensadores (RNS e CER)

Complementarmente, as Figuras 15(a) e (b), ressaltam os resultados para os momentos anteriores e posteriores ao alívio de carga.

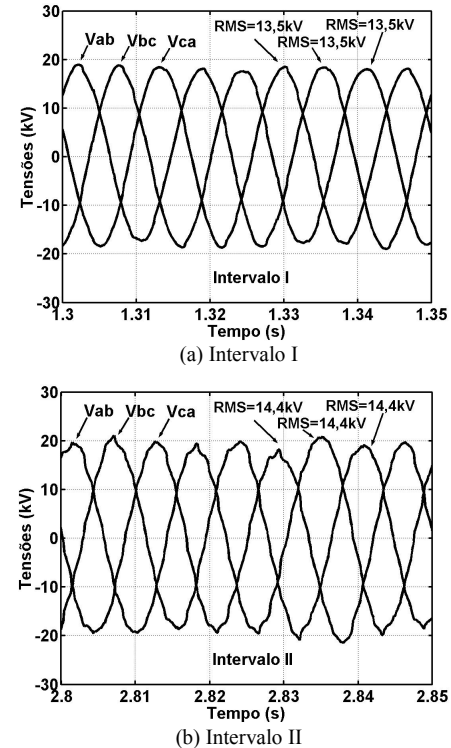
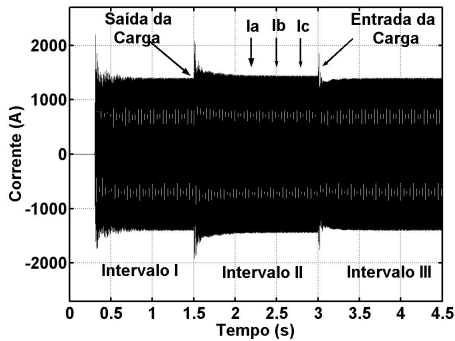


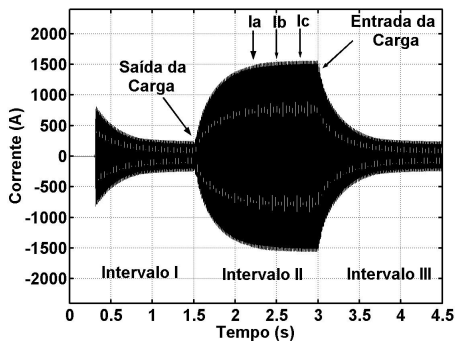
Figura 15. Tensões no barramento 13,8 kV na Cidade Sinop - detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – com a presença dos compensadores (RNS e CER).

Observa-se que, no que tange ao barramento 13,8kV, a tensão inicial de 13,5kV (0,978 p.u.) foi elevada, durante o distúrbio, para 14,4kV (1,043 p.u.). Este valor retoma o seu nível original, apenas quando o referido distúrbio é eliminado em $t \geq 3,0s$. Desta forma constata-se, mais uma vez, que os reatores foram efetivos no controle da tensão. Vale observar que, quando da ausência do reator, a tensão havia sido elevada para 15,8 kV.

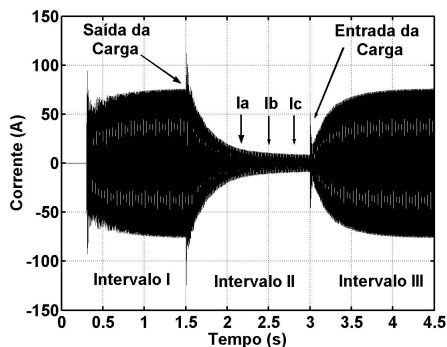
Objetivando esclarecer sobre os desempenhos dos dois compensadores, as Figuras 16(a), (b) (c), (d) e (e) oferecem meios para uma melhor identificação das condições operativas impostas aos dois compensadores quando da perda de 92% da carga suprida. São destacadas as formas de onda das seguintes grandezas: correntes no CCT, RCT, CER (lado 12,3 kV), do RNS (lado 13,8 kV) e a corrente resultante da carga (lado 230 kV).



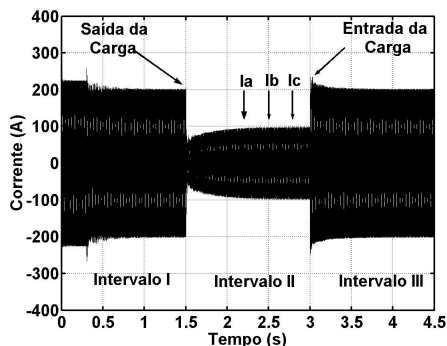
(a) Corrente CCT



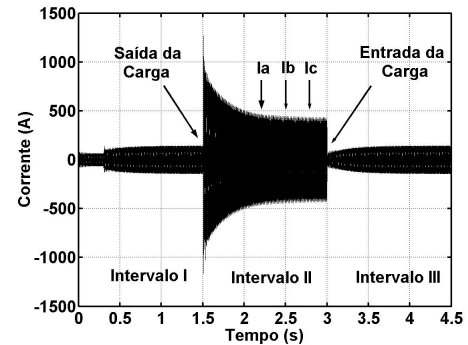
(b) Corrente RCT



(c) Corrente CER (RCT+CCT+filtro)



(d) Corrente na barra 230 kV



(e) Corrente RNS

Figura 16. Formas de onda para as correntes de linha: (a) no CCT; (b) no RCT; (c) no CER (CCT+RCT+Filtro); (d) na barra da SE-Sinop (lado 230 kV); (e) no RNS. Resultados associados com uma retirada de 92% da carga.

Os resultados da Figura 16 evidenciam que:

(i) - No *intervalo I*, após 0,3s o CER - Figura 16(a) - inicia sua operação com o CCT injetando potência reativa na rede. Isto ocorre em função da referência de tensão pré-estabelecida em seu controle, fato este que determina a necessidade da elevação da tensão encontrada naquele instante. Ao longo deste período as absorções de reativos pelo RCT - Figura 16(b) e pelo RNS - Figura 16(c) se mostram moderadas. Os pontos de funcionamento para estas unidades foram definidos de modo a adequar as respectivas tensões terminais.

(ii) - No *intervalo II*, devido à retirada de carga, houve, como seria esperado, um aumento abrupto de tensão. Como o CCT ainda se mantém ligado ao sistema, objetivando a redução da tensão, o RNS aumenta subitamente o seu consumo de reativos, enquanto que o RCT atua na mesma direção, porém, de forma mais lenta. Todavia, à medida que este último incrementa sua corrente, o RNS reduz sua participação no processo da compensação, evidenciando, assim, um menor tempo de resposta para o dispositivo saturado. Vale destacar que o capacitor chaveado se manteve inalterado ao longo deste período de análise. Também, como constatado anteriormente, a eficácia do conjunto de compensadores foi apropriada aos propósitos da regulação das tensões. A Figura 16(d) ilustra ainda os impactos da perda de carga sobre a corrente na barra da SE-Sinop (lado de 230 kV). Esta corrente é atribuída à absorção de potência reativa pelo RNS, pelos 8% da carga que se mantiveram conectadas e pelo reator linear de 20MVar (na SE-Sinop).

(iii) - No *intervalo III*, com a entrada da carga, a tensão é reduzida e com isto o RCT diminui a absorção de potência lentamente, retornando às condições pré-existentis no intervalo I. À medida que a corrente do RCT diminui, a do RNS é incrementada para absorver o excesso de potência reativa do CCT, mantendo, assim, a tensão nos padrões almejados. Mais uma vez, o CCT permaneceu conectado ao sistema. Ao final, a corrente resultante no CER volta a ser capacitiva.

V. CONCLUSÕES

Este artigo teve por foco principal mostrar a viabilidade da operação conjunta de dois tipos de reguladores de tensão, um baseado nos princípios dos chaveamentos eletrônicos e outro na saturação magnética. Dispondo-se de modelos computacionais para os dois equipamentos, os quais foram implementados no simulador ATP, foi possível a realização de estudos sobre o desempenho físico da operação simultânea dos mesmos quando inseridos num complexo elétrico típico. Este corresponde à rede de alimentação da cidade de Sinop – MT, a qual tem sido alvo de estudos e soluções voltadas para o controle da tensão. A utilização de um regulador convencional (eletrônico) em paralelo com uma solução não convencional (reator saturado) mostrou-se efetiva e vislumbrou a possibilidade do emprego de expansões do suporte de reativos via equipamentos com tecnologias distintas. De fato, diante das crescentes situações que exigem maiores demandas de energia, uma das questões levantadas está na busca de alternativas para os suportes de tensão. O trabalho em pauta mostrou, através de uma investigação preliminar e resultados positivos, a possibilidade de se conciliar o funcionamento conjunto de equipamentos com diferentes filosofias construtivas, como os dois aqui focados. Desta forma, ficou evidenciado que, situações que demandem expansões da rede com respectivos suportes de reativos, possam ser consideradas a hipótese do emprego de diferentes tecnologias para os propósitos da estabilização de tensão.

Um outro aspecto relevante à comparação de desempenho entre os 2(dois) dispositivos compensadores (RNS e CER em paralelo) está nos tempos de resposta que ambos atendem aos propósitos almejados. Neste particular constatou-se que, muito embora os resultados obtidos quanto ao controle de tensão tenham sido esclarecedores sobre o sucesso operacional dos 2(dois) dispositivos, o RNS apresentou maior rapidez que o CER.

A pesquisa reacendeu uma tecnologia já desconsiderada pela comunidade da engenharia elétrica, qual seja, o emprego dos compensadores de reativos baseados numa estratégia já empregada no passado (RNS) e, na atualidade, desconsiderada como opção de solução para vários problemas relacionados com o controle da tensão em sistemas elétricos. A referida linha de compensadores possui como atributos: simplicidade, eficácia, baixo custo, reduzida manutenção, tecnologia nacional, etc., e, com certeza, deve se firmar como uma proposta atrativa para a solução de problemas em redes elétricas para as quais outros recursos tecnológicos poderiam se fazer proibitivos por questões de custos de investimento, instalação e manutenção.

Um dos pontos altos do trabalho está alicerçado na obtenção de uma ferramenta computacional que permite traduzir com alto grau de fidelidade a operação do RNS e do CER. Tal programa, empregando técnicas no domínio do tempo permite que estudos de desempenho em regime permanente e condições transitórias sejam prontamente realizados. Esta afirmativa fundamenta-se nos diversos testes de validação conduzidos ao longo do trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Apolônio, R. Kawaphara, M. K., Carvalho, J. E., Pacheco, J. M. – Um Proposta para Melhoria do Desempenho de Sistemas de Transmissão Radiais em 230kV sob o Ponto de Vista do Controle de Tensão: Reator à Núcleo Saturado. VII SBQEE, Santos-SP, Brasil, Agosto de 2007.
- [2] Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Apolônio, R. Kawaphara, M. K., Carvalho, J. E. – Compensador Estático de Reativos Controlados a Tiristores: Modelagem e Simulação. VII SBQEE, Santos-SP, Brasil, Agosto de 2007.
- [3] Pacheco, J. M., Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Apolônio, R., Miranda, N. R. O., Pereira, E. S. – Projeto e Análise Desempenho de um Reator Saturado de 570kVAr e 13,8kV para Regulação de Tensão. VII SBQEE, Santos-SP, Brasil, Agosto de 2007.
- [4] Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Apolônio, R. – Compensador Estático a Reator Saturado: Geração Harmônica Sob Condições Ideais e Não Ideais de Suprimento. V SBQEE, Aracaju – Sergipe – Brasil, 17 a 20 de Agosto de 2003.
- [5] J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, R. Apolônio; “Análise do Desempenho Dinâmico de um Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado”; VI SBQEE, Aracaju-SE, Brasil, Agosto/2005.
- [6] J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, R. Apolônio; “Saturated Core Reactor Static Compensator: Computational Analysis Versus Experimental” (in Portuguese), XV CBA, Gramado-RS, Brazil, September/2003.
- [7] M. A. Carvalho; “Application of Saturated Reactors in Systems of Transmission” (in Portuguese), XIII SNPTEE, Camboriú-SC, Brazil, October/1995.
- [8] FERREIRA, F. M. C.. Aplicação de Reatores com Saturação Natural em Sistemas de Extra-Alta Tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Dezembro de 1998.
- [9] MAGNATA DA FONTE, L. A.. Reatores Saturados: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Dezembro de 1997.
- [10] LEAL, F. S.. Reatores Saturados com Excitação Paralela. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Novembro de 2000.
- [11] FANDI, M.. Reator Controlado a Tiristores: Modelagem para Análises sob Condições de Operação em Regimes Permanente e Transitório. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Julho de 1998.
- [12] PINHEIRO, R. F.. Equipamentos Estáticos para Compensação de Reativos e Desequilíbrios em Sistemas Elétricos. Dissertação de Mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Julho de 1980.
- [13] MARTINS, W. K. A. G.. Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Julho de 2002.
- [14] BRASIL, D. O. C.. Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Maio, 1996.
- [15] MARTINS, W. K. A. G.. Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Julho de 2002.
- [16] SAMESIMA, M. I.. Compensadores Estáticos de Reativos e de Desequilíbrios em Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, Abril de 1984.
- [17] REIS, A. K. C., Compensação de Potência Reativa Através do Controle da Saturação de Reatores. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 1997
- [18] DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F.. Electrical Power Systems Quality. Editora Mc-Graw Hill, EUA – 1995.
- [19] FRIEDLANDER, E.. Principle and Analysis of a Stabilized Phase Multiplier Type of Magnetic Frequency Convertor, Electrical Energy, Vol. I, pp 55-66, October 1956.
- [20] OLIVEIRA, J. C.. Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos. Gráfica da UFU, Uberlândia, 1986.