

MODELAGEM E AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DE UM REGULADOR UTILIZANDO REFORÇO SÉRIE DE TENSÃO ELETRONICAMENTE CONTROLADO

Thiago V. da Silva, Lucas E. Vasconcelos, Fabricio P. Santilio, José C. de Oliveira, João A. F. B. Junior.

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

Uberlândia/MG, Brasil

E-mail: tvsilva@gmail.com, parrasantilio@yahoo.com.br, lucasevasconcelos@gmail.com, jcoliveira@ufu.br, johnareis@gmail.com.

Resumo - As soluções para as variações das tensões de suprimento se apresentam com uma extensa gama de produtos visando a regulação dinâmica desta grandeza. Não obstante tal reconhecimento, os desafios por estratégias alternativas continuam motivando pesquisas em todo o mundo. Neste contexto, o presente artigo encontra-se focado numa proposta de chaveamento e controle de um dispositivo regulador de tensão, aqui denominado por RET (Regulador Eletromagnético de Tensão). A filosofia proposta apoia-se na injeção série de reforços de tensão, aditiva ou subtrativa, extraída de uma estrutura eletromagnética quanto às suas unidades de potência e controlada via chaves eletrônicas. Neste particular o trabalho utiliza uma filosofia operacional e ressalta a estrutura física do dispositivo, a composição da unidade de controle e avalia o desempenho computacional do dispositivo sob a ocorrência de desvios de tensão. As investigações feitas encontram-se alicerçadas em modelos implementados na plataforma ATP.

Palavras-Chave - ATP, Regulador Eletromagnético de Tensão, Controle de Tensão, Dispositivos Semicondutores, Qualidade de Energia, Sistemas de Distribuição.

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO UTILIZANDO FILOSOFIA DE CONTROLE ELETRÔNICA

Abstract - Power quality problems related to short or long time voltage variation have motivated the search for voltage compensator techniques capable to provide voltage regulation to accomplish voltage supply limits. Although one could recognize that a variety of products already offered in the market are capable of attending general electrical power system requirements, the search for new conceptions are still attractive. In this way this paper deals with a device called Electromagnetic Voltage Restorer (EVR). The main idea lies in a series voltage reinforcement, additive or subtractive, throughout an electromagnetic power unit arrangement and an electronic control strategy. In addition, by using a computational time domain model implemented in the ATP simulator, computational studies are carried out to

illustrate the overall electrical system performance at compensating voltage deviations.

Keywords – ATP, Electromagnetic Voltage Regulator, Voltage Control, Semiconductor Devices, Power Quality, Distribution System.

I. INTRODUÇÃO

Quando da violação dos níveis de tensão estabelecidos pelo PRODIST [1] e [2], documento esse elaborado pela ANEEL com o intuito de normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao desempenho dos sistemas de distribuição, medidas corretivas devem ser empregadas visando à restauração do supridor aos padrões exigidos.

Das diversas tecnologias concebidas para a realização desse processo de adequação reconhece-se duas vias distintas quanto à filosofia empregada na regulação: uma primeira denominada via direta, cujos equipamentos constituintes atuam pontualmente no módulo e ângulo das tensões através de dispositivos visando à regulação dos níveis de tensão; e uma segunda, a indireta, a qual se fundamenta no controle das potências reativas que se estabelecem pelos alimentadores visando aos respectivos impactos sobre os níveis das tensões.

Com relação aos dispositivos cujo princípio baseia-se numa correção direta da tensão, o mercado oferece uma gama de produtos, dentre os quais citam-se os transformadores e autotransformadores providos de tapes, chaveados manual ou automaticamente. Tais dispositivos mostram-se, via de regra, bastante atrativos do ponto de vista financeiro, possuindo baixo investimento inicial e manutenção simples. Por outro lado, tais tecnologias apresentam desvantagens que motivam o emprego de outras tecnologias como as abaixo ressaltadas.

No tangente aos equipamentos que proporcionam a regulação da tensão pela compensação de reativos surgem como primeira ideia o emprego dos bancos de capacitores e reatores, fixos ou automáticos. Além destes, há também os compensadores síncronos, para os quais, variando-se suas correntes de campo tem-se o controle da potência reativa [3]. Muito embora ainda à nível de pesquisas, não podem ser ignorados os equipamentos pautados no controle das tensões através de reatores a núcleo saturado [4] e [5].

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, surgiram os compensadores estáticos, componentes da primeira geração de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmissions Systems*), a exemplo do RCT (reator

controlado a tiristor), CCT (capacitor chaveado a tiristor), SVC (*Static Var Compensator*), dentre outros, já em uso há décadas e com eficácia comprovada [6].

Por fim, destaca-se uma segunda geração de produtos componentes da filosofia FACTS, os quais utilizam de conversores VSC – *voltage source converters*. Tais produtos são formados por unidades conversoras conectadas em paralelo e/ou em série com a rede elétrica. Nessa categoria incluem-se dispositivos diversos a exemplo dos controladores série de tensão DVR e SIPCON-S, controladores paralelos como o STATCOM, SIPCON-P, e do controlador série e paralelo UPFC ou UPQC (*Unified Power Flow Controller* ou *Unified Power Quality Conditioner*), dentre outros equipamentos comercialmente disponíveis [7], [8] e [9]. Em contrapartida às vantagens anteriormente apresentadas, a crescente sofisticação de tais equipamentos traz consigo uma elevação dos custos de implementação e manutenção associados aos mesmos [5], [8], [10], [11] e [12].

Isso posto, muito embora a existência de uma extensa gama de produtos disponíveis no mercado destinados à regulação dos níveis de tensão, o tema ainda tem motivado muitos pesquisadores a buscarem novas concepções em que pesem desafios como: simplicidade operacional, robustez, valores de investimento competitivos, instalações físicas menores, custos de manutenção reduzidos, maior índice de nacionalização, propriedades operativas compatíveis com os requisitos impostos, dentre outras questões almejadas para qualquer outro seguimento da engenharia.

À luz desses fatos, fundamentando-se no princípio da compensação direta da tensão via reforços série, positivos ou negativos, de incrementos de tensão de compensação, surge a concepção de regulador deste artigo. Esta compreende um equipamento totalmente eletromagnético no tocante às suas partes de potência, possuindo filosofia e atributos similares aos dispositivos componentes da segunda geração FACTS, destacando o emprego de meios eletrônicos para o controle e compensação almejados. Tal equipamento é denominado aqui por Regulador Eletromagnético de Tensão – RET [13].

II. O REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE TENSÃO

O equipamento focado neste artigo apresenta a topologia ilustrada na Fig. 1. O arranjo evidencia, dentre outras características, a presença do autotransformador em paralelo com a rede, conectado à Barra 2, pelo qual é derivada a tensão; o transformador para a injeção da tensão de compensação em série com a rede de suprimento; e o módulo de chaveamento composto por dois pares de Chaves Principais e um terceiro par denominado Chave Complementar. Muito embora se reconheça a similaridade da presente estrutura com arranjos tradicionais, a concepção apresentada oferece aspectos distintos, a exemplo de:

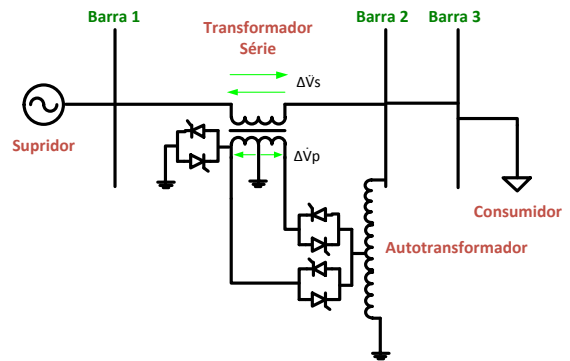


Fig. 1 - Estrutura do Regulador Eletromagnético de Tensão - RET

- A tensão a ser injetada pelo transformador série é oriunda da própria rede de suprimento;
- A potência absorvida pelo autotransformador corresponde apenas a uma parcela destinada ao processo de reforço da tensão;
- Os mecanismos de chaveamento situam-se em tensões mais baixas que a nominal do sistema;
- A utilização de chaves eletrônicas proporciona tempos de respostas bastante reduzidos e adequados à mitigação de fenômenos rápidos como as variações de tensão de curta duração (VTCD);
- A polaridade do reforço de tensão, se positivo ou negativo, é determinada a partir da escolha entre os pares de chaves principais que conectam o autotransformador às extremidades do enrolamento transformador série, permitindo, assim, a compensação de elevações ou reduções da tensão à jusante do ponto de instalação do equipamento;
- O controle do valor eficaz da tensão de compensação é feito de forma contínua a partir da escolha dos ângulos de disparo das chaves principais, ou seja, pelo cisalhamento da onda de tensão proveniente do tape do autotransformador.

A Fig. 2 mostra os diagramas fasoriais e formas de onda representativas do desempenho do regulador no que tange a variações na tensão do supridor e as respectivas ações esperadas para o compensador em discussão. A estratégia do dispositivo baseia-se no reestabelecimento dos valores eficazes de tensão em uma determinada barra a ser regulada, como exposto nos mencionados diagramas.

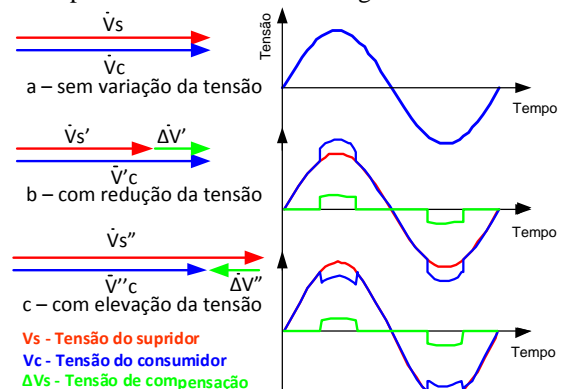


Fig. 2 - Diagrama fasorial do desempenho do RET

Quanto a filosofia utilizada para a variação do nível de compensação da tensão, através da já mencionada inserção série do reforço de tensão, a Fig. 3 mostra o processo ora empregado, o qual envolve as seguintes grandezas: a tensão na saída do autotransformador, os ângulos α e β de disparo dos tiristores e a forma de onda da tensão que será aplicada em série pelo transformador. Os semicondutores utilizados no presente artigo foram tiristores do tipo GTO (gate turn-off), os quais podem ser disparados pela aplicação de um pulso positivo no gatilho e desligados com a aplicação de um pulso negativo no mesmo.

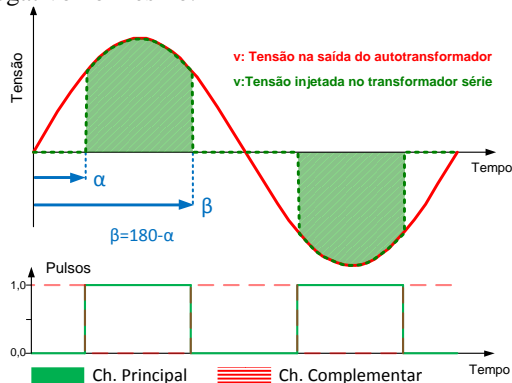


Fig. 3 - Obtenção da tensão de compensação - efeito dos ângulos de disparo das chaves principais

Ainda na Fig. 3 é possível observar os pulsos atrelados com a operação das chaves principais e das chaves complementares. Com relação a estas últimas, conectadas ao transformador série, dois são os motivos que justificam sua presença:

- No caso de bloqueio das chaves, deve-se viabilizar um circuito para a circulação da corrente no enrolamento do transformador série que se encontra conectado às chaves, objetivando oferecer uma condição operativa similar ao funcionamento de um transformador operando em curto-circuito. Essa situação faz-se necessária para se evitar o surgimento de sobretensões, podendo comprometer o nível de isolamento do enrolamento do transformador. Em outras palavras, o recurso aqui concebido visa proporcionar, através de um caminho de circulação de corrente, a criação de um contra fluxo para a respectiva corrente de carga;
- A segunda razão para o emprego desse par de chaves apoia-se na necessidade de complementar a estrutura das chaves principais, mesmo durante a atuação destas, visando oferecer, nos interstícios de condução, caminhos para a circulação das correntes induzidas nos mesmos termos acima referidos.

Com base na estrutura e filosofia operacional do Regulador Eletromagnético de Tensão apresentadas, foi então estabelecida a lógica de controle sintetizada no diagrama de blocos da Fig. 4. Esta permite definir o ângulo de disparo para as chaves em consonância com o nível de compensação desejado.

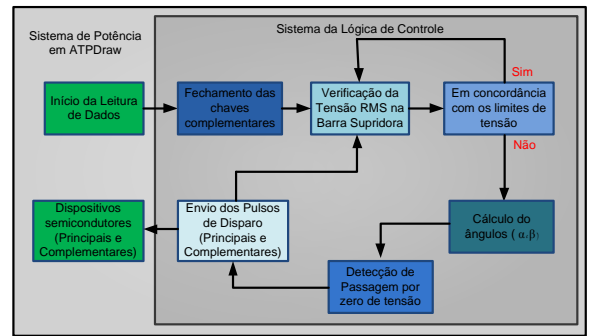


Fig. 4 - Diagrama de blocos para a determinação dos ângulos de controle do RET

O funcionamento básico do controle de chaveamento contínuo ocorre na seguinte sequência:

- A operação do arranjo é iniciada com o fechamento das Chaves Complementares, indicadas na Fig. 1;
- Na sequência procede-se à determinação da tensão no ponto do complexo elétrico para o qual se almeja atingir os propósitos da regulação. Para o sistema em análise, o barramento escolhido corresponde a Barra 1;
- A tensão de suprimento é então medida e confrontada com os limites de referência estabelecidos pelo PRODIST. Se a tensão na Barra 1 encontrar-se dentro da faixa adequada, o controle permanece com as Chaves Complementares fechadas;
- Caso a referida grandeza ultrapasse os limites considerados como adequados, o sistema busca o exato valor eficaz necessário para a regulação, restaurando, assim, o nível de tensão ao seu valor nominal;
- A partir da diferença de tensão eficaz encontrada entre a Barra 1 e a tensão de operação, o controle faz uma análise do circuito elétrico para caracterização do fenômeno, seja de um afundamento ou elevação de tensão, a fim de determinar o par de Chaves Principais a ser utilizado e calcula o valor de α e, por conseguinte, o ângulo suplementar β ;
- Na sequência realiza-se a detecção da passagem por zero da tensão e, em seguida, os pulsos do controle são enviados para as Chaves Principais e Complementares. Para isso, a plataforma emite um sinal positivo e outro sinal zero que comanda a operação de condução e bloqueio das chaves semicondutoras;
- A partir da restauração do nível de tensão desejado, o controle continua operando como descrito até evidenciar a restauração da tensão de suprimento ao seu valor nominal de operação ou constatar um novo eventual desvio de tensão.

III. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA E CASOS ESTUDADOS

Os trabalhos de investigação, em consonância com os propósitos deste artigo, foram realizados através da modelagem do complexo elétrico e do Regulador Eletromagnético de Tensão ilustrado na Fig. 5.

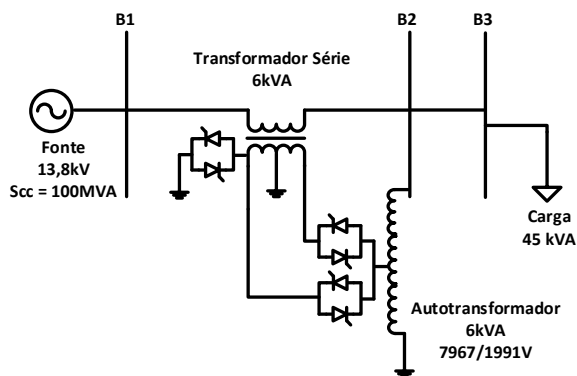


Fig. 5 - Diagrama unifilar adotado para os estudos de casos.

A Tabela I sintetiza as principais informações sobre o sistema elétrico incluindo o dispositivo RET. Para o compensador em pauta, um único tape, de 2000 V, foi disponibilizado pelo autotransformador. Este equivale a um nível de compensação de até 25% para eventuais variações de tensão do barramento.

Tabela I – Dados do Sistema

Dados	Potência (kVA)	FP	Tensão (V)	Zcc%	Rcc%
Autotransformador	6	-	7967/2000	3,5	1,0
Transformador série	6	-	1:1	3,5	1,0
Carga	45	0,94	7967	-	-

No que tange aos casos investigados computacionalmente, dentro de um número infinito de situações factíveis de ocorrência foram adotadas condições operativas atreladas com variações de tensão, acima e abaixo do valor nominal. O conjunto de simulações realizadas pode ser visualizado através dos gráficos de operação apresentados e discutidos nesta etapa, os quais evidenciam que os trabalhos conduzidos envolveram doze intervalos de tempo sequenciais, cada qual atrelado com uma dada condição operativa. O tempo total de estudo foi de 6 segundos e os intervalos representativos dos diferentes desempenhos do sistema correspondem, cada um, a um fenômeno com duração de 1 segundo.

Desta forma, no intervalo de tempo de 0 a 3 segundos, pode-se constatar, gradativamente, decréscimos sucessivos de 10 em 10% da tensão de suprimento. Uma vez restaurada a tensão nominal em $t=3$ s, a partir deste e para os intervalos subsequentes, compreendendo a gama de tempos de 3 a 6 segundos, constata-se elevações de tensão com a mesma taxa percentual anteriormente explicitada. Isto pode ser constatado pela Tabela II.

Tabela II – Tensões de Operação Adotadas para Barra 1

Intervalos	Tempo (s)	Tensão (V)	$\Delta V\%$
Intervalo 1	0 a 1	7967	0
Intervalo 2	1 a 2	7170	-10
Intervalo 3	2 a 3	6373	-20
Intervalo 4	3 a 4	7967	0
Intervalo 5	4 a 5	8763	+10
Intervalo 6	5 a 6	9560	-20

A Fig. 6 apresenta as variações adotadas ao longo do período de investigação, exibidos na Tabela II. As regiões demarcadas com colorações distintas delimitam as faixas de tensão previamente classificadas.

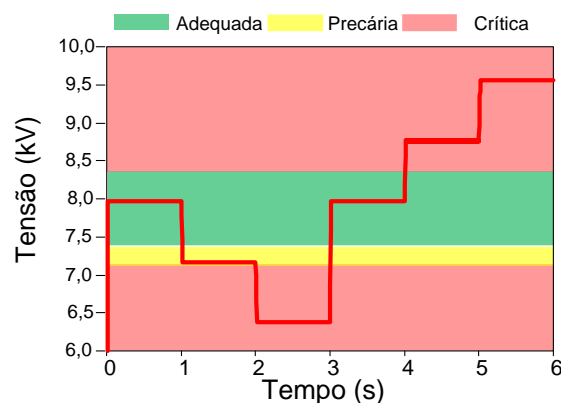


Fig. 6 – Tensões na Barra 1 – variações adotadas ao longo do período de investigação.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em consonância com os níveis de compensação necessários para a restauração da tensão do barramento dentro dos valores preconizados, como previamente descritos, o sistema de controle calcula o ângulo α necessário ao processo de compensação almejado e seu correspondente suplemento. Isso pode ser evidenciado na Fig. 7, indicando, respectivamente, os resultados para cada um dos períodos impostos para as variações de tensão.

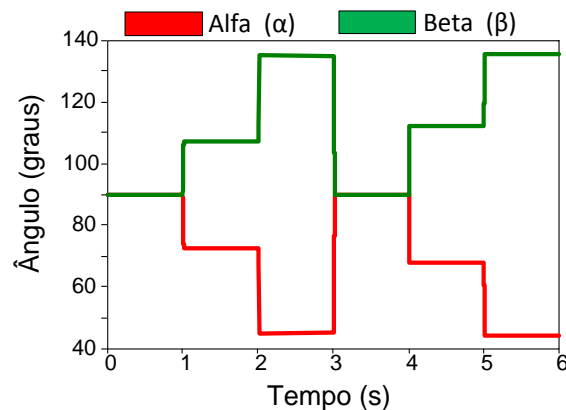


Fig. 7 - Ângulos α e β para obtenção dos valores de tensão injetada.

Encontrado o ângulo requerido, o controle emite os pulsos para abertura e fechamento das chaves principais e da chave complementar com o intuito de recuperar a tensão da Barra 2 para níveis em torno de seu valor nominal.

A Fig. 8 mostra a tensão disponibilizada pelo tape do autotransformador para os diferentes intervalos definidos para os estudos. No eixo vertical à esquerda tem-se os incrementos de tensão produzidos pelo compensador, enquanto que, o eixo à direita corresponde as correntes fornecidas pelo autotransformador.

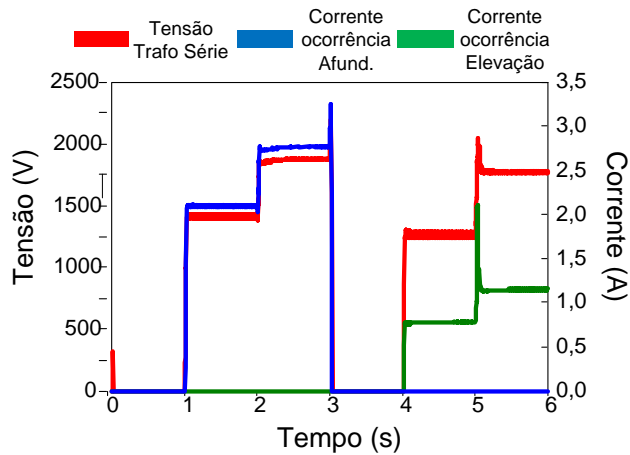


Fig. 8 - Tensões e correntes injetadas no transformador série.

Através do incremento oferecido pelo processo de regulação aqui proposto, o perfil das tensões ao longo do período de estudo, para a Barra 2, passa a se apresentar como indicado na Fig. 9. Esta, para fins comparativos, ainda evidencia as tensões de suprimento não compensadas.

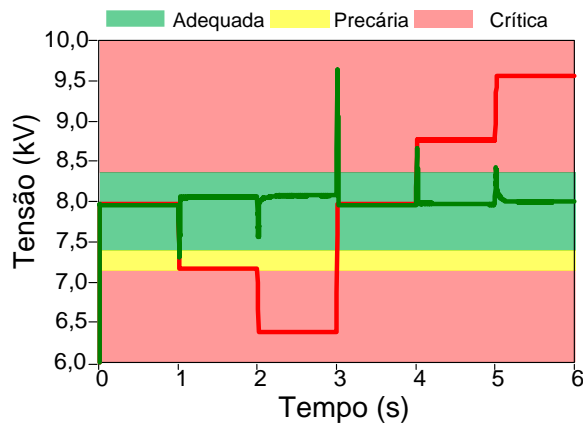


Fig. 9 - Tensões nos barramentos 1 e 2.

No que tange às potências requeridas pelo complexo, em particular as potências aparentes envolvidas no processo de compensação, a Fig. 10 evidencia tais grandezas para os diversos pontos do sistema, a saber: entre a fonte e a Barra 1; entre a Barra 2 e a carga; e, por fim, entre o secundário do autotransformador e o transformador série.

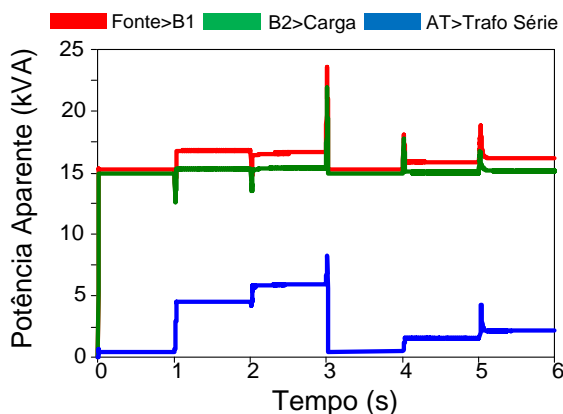


Fig. 10 - - Potências aparentes nos diversos intervalos citados.

De modo similar, os resultados indicados na Fig. 11 fornecem o correspondente desempenho do complexo quanto aos fluxos de potências ativas nos mesmos trechos citados anteriormente.

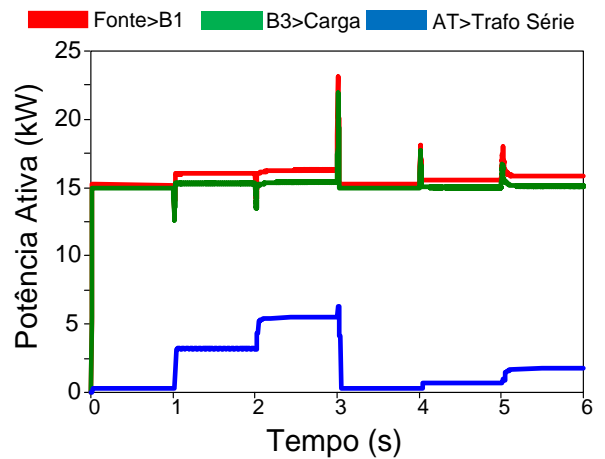


Fig. 11 - Potências ativas nos diversos intervalos citados.

A última grandeza a ser explorada refere-se ao desempenho das potências reativas, as quais, como não poderia ser diferente, obedecem a mesma lógica já destacada para as anteriores. A Fig. 12 ilustra os resultados obtidos para os trechos destacados.

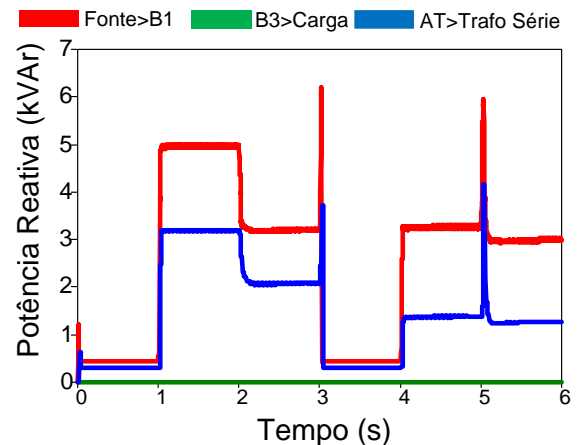


Fig. 12 - Potências reativas nos diversos intervalos citados

À luz dos desempenhos obtidos e sintetizados nas figuras e tabelas pode-se observar que:

- O compensador se mostrou eficaz para o processo da regulação da tensão nos termos requeridos pois, nos termos evidenciados computacionalmente, as tensões, correntes e potências supridas à carga se apresentam com valores praticamente inalterados;
- A nova filosofia de controle se mostrou eficaz, promissora e capaz de promover a regulação das tensões de curta e de longa duração;
- Muito embora os valores constantes nas figuras e tabelas para as potências associadas com a operação do regulador se mostrem positivas, vale observar que, para os casos de afundamentos momentâneos de tensão as mesmas são fornecidas e, para as situações vinculadas com elevações momentâneas de tensão, estas invertem o

seu sentido no Compensador Eletromagnético Série de Tensão;

- As relações percentuais entre as potências entregues à carga, para as distintas situações avaliadas, e aquelas atreladas com os requisitos exigidos do compensador, deixam claro que, este último é exigido com valores inferiores ao do suprimento. Isto evidencia que o dispositivo regulador, para cada nível de compensação solicitado na sua operação, opera com potências significativamente inferiores aos valores entregues à carga. Neste contexto fica demonstrado que quanto maior os valores das variações de tensão a serem restauradas tanto maior será a potência demandada do dispositivo em pauta.

V. CONCLUSÕES

Este artigo visou, sobretudo, ilustrar computacionalmente, a eficácia do controle baseado no chaveamento contínuo para um regulador eletromagnético de tensão, aqui denominado por RET. Com este intuito foi estabelecido um sistema hipotético para o qual foram impostas distintas e sucessivas variações de tensão na forma de elevações e reduções dos valores considerados nominais. Uma vez modelado o referido arranjo, assim como também o regulador de tensão RET e seu controle via chaves eletrônicas no simulador ATP procedeu-se aos estudos de desempenho visando, sobretudo, obter a resposta do equipamento frente a esta nova topologia de controle.

Os resultados obtidos e aqui apresentados mostraram, através das mais diversas grandezas associadas com o processo de compensação idealizado, os ângulos de controle, as compensações de tensão a serem utilizadas, as correntes empregadas, as potência envolvidas e, por fim, o desempenho final atingido na forma da regularização da tensão nos terminais da carga, como demonstrado ao longo do trabalho.

Os valores encontrados se mostraram promissores e, diante do constatado, trabalhos adicionais, principalmente no âmbito laboratorial, se fazem necessários para melhor consubstanciar o processo de regulação aqui considerado.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à CAPES e CNPq pelas bolsas de mestrado e de doutorado no programa de Pós-Graduação da FEELT-UFU para a realização dessa pesquisa e à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto.

REFERÊNCIAS

[1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist – Módulo 8, 2008.

[2] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001.

[3] B. M. Weedy and B. J. Corry – “Electric Power Systems” Fourth Edition, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex – United Kingdom – November 2004.

[4] Vasconcellos, A. B. Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos tipo Reator a Núcleo Saturado Para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação Experimental. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Setembro de 2004.

[5] Barbosa Jr., J. A. F.; Oliveira, J. C.; Gondim, I. N.; Santilio, F. P.; Silva, T. V.; Vasconcellos, A. B.; Pacheco, J. M. Avaliação Técnica e Econômica para o Uso de Reatores Saturados em Substituição aos Lineares em um Sistema de Transmissão em AT. Ninth Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission - CLAGTEE 2011, Mar del Plata - Argentina.

[6] Oliveira, J. C.; Vasconcellos, A. B.; Apolônio, R.; Kawaphara, M. K.; Carvalho, J. E.; Raupp, R. Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia – VII CBQEE 2007, Santos, São Paulo.

[7] Santos, C. H. R. R. Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Novembro de 2003.

[8] Zhengping Xi; Parkhideh, B. ; Bhattacharya, S.; Improving Distribution System Performance with Integrated STATCOM and Super capacitor Energy Storage System, Semicond. Power Electron. Center, North Carolina State Univ., Raleigh, NC, Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008, IEEE.

[9] Weinhold, M.; Zurowski, R.; Mangold, T.; Voss, L.. Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems. II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica 1997 – SBQEE 1997, São Lourenço – Minas Gerais – Brasil.

[10] Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Apolônio, R. - Saturated Core Reactor Static Compensator: Computational Versus Experimental Performance Analysis. 11° International Conference on Harmonics And Quality of Power (ICHQP) - September 2004- New York.

[11] Shi, J.; Tang, Y.; Yang, K.; Chen, L.; Ren, L.; Li, J.; Cheng, S.; “SMES Based Dynamic Voltage Restorer for Voltage Fluctuations Compensation”, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, R&D Center of Applied Superconductivity, Huazhong University of Science and Technology, Hubei, Wuhan, China, march 2010.

[12] L. C. A. Fonseca, “Estudo de Qualidade da Energia - Dimensionamento de um Restaurador Dinâmico de Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Agosto, 2003.

[13] T. V. da Silva, “Uma Proposta para o Controle Eletrônico de Reguladores Eletromagnéticos Através do Reforço Série de Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Agosto, 2012.