

Modelagem de Reguladores de Tensão do Tipo Reatores a Núcleo Saturado *Twin-Tripler* na Plataforma Simulink

Márcio Arvelos Moraes
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Núcleo de Qualidade de Energia Elétrica – NQEE
Uberlândia – MG, Brasil
marcio.arvelos@gmail.com

Camilla de Sousa Chaves
José Carlos de Oliveira
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Núcleo de Qualidade de Energia Elétrica – NQEE
Uberlândia – MG, Brasil

Resumo – Este artigo tem por meta propor um modelo computacional de Reatores a Núcleo Saturado (RNS) para a regulação de tensões em sistemas elétricos, utilizando o recurso Simulink da plataforma Matlab. Em específico, foi adotado o arranjo *Twin-Tripler* para o cancelamento intrínseco de harmônicos produzidos pelo próprio equipamento, baseando-se no modelo computacional desenvolvido e validado no programa ATP. Visando uma avaliação comparativa entre os desempenhos computacionais das representações do reator no software Matlab-Simulink com modelos já validados no ATP, são conduzidos estudos através de um sistema elétrico hipotético simplificado. Neste contexto, foi inserido um regulador a núcleo saturado e realizadas investigações quanto a eficácia da regulação da tensão, quando da ocorrência de súbitos alívios de carga. Foram analisadas as formas de onda da tensão e corrente, seus valores eficazes e potências reativas atreladas com o processo de regulação em pauta.

Palavras-Chave – qualidade da energia elétrica, Simulink, reator a núcleo saturado, regulação de tensão, modelagem computacional.

I. INTRODUÇÃO

Nos sistemas elétricos, o emprego de linhas de transmissão de grandes distâncias é uma prática bastante comum, em particular para o caso de países de longas extensões territoriais. Isto se deve, sobretudo, ao fato da concentração do consumo de energia ocorrer em regiões específicas e as gerações se constituírem, predominantemente, por aproveitamentos hídricos distantes. Ora, uma das singularidades dos sistemas de transmissão longos, em alta tensão, está atrelada com as dificuldades associadas com o controle e regulação de tensão oferecida nas barras de consumo, tanto em regime permanente como transitório. Na operação em vazio ou em carga leve, vigente por ocasião das energizações ou devido a rejeições de carga, as capacitâncias associadas a essas linhas impõem, frequentemente, elevações inadmissíveis na tensão das barras de consumo. Por outro lado, quando funcionando na plenitude da carga, registra-se um comportamento inverso, ou seja, uma redução, por vezes, drástica da tensão [1]. Diante desta conjuntura, muitas vezes, estas variações de tensão nas barras de carga superam os valores pré-definidos pelos órgãos reguladores [2]. Esse quadro adverso é tanto mais grave quanto menor for o nível da

potência de curto-circuito do sistema. Para sanar a questão, as soluções, via de regra, se apoiam em dispositivos reguladores que podem ser englobados em dois grupos fundamentais:

- Princípio da compensação direta [3], [4];
- Princípio da compensação indireta [5], [6].

Nesta última categoria, estão os equipamentos cujo processo de regulação encontra sustentação no controle da potência reativa, princípio este utilizado pelo regulador focado neste artigo. Para fins específicos deste trabalho, o dispositivo utilizado corresponde aos clássicos Reatores a Núcleo Saturado (RNS), cujas vantagens e desvantagens são amplamente conhecidas e sintetizadas em [5], [7], [8], [9]. Este produto, de cunho totalmente eletromagnético, dispensa qualquer meio para medições, tomadas de decisão e controle outro que não sua própria característica intrínseca de operação. Tal recurso, uma vez associado em paralelo com um banco de capacitores fixo, compõe o denominado Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado (CERNS), o qual foi amplamente difundido entre os anos de 1960 e 1970 [4], [6].

A característica tensão x corrente exibida pelos RNS é feita sob medida para uma dada aplicação pretendida [10], visto que, sob tensões mais baixas ou condição de plena carga, o reator funcionará na região linear, demandando, dessa forma, uma potência reativa mínima do sistema. À medida que a carga do sistema diminui, a tensão experimenta uma elevação correspondente, o que desloca o ponto de operação do reator para a região de saturação da sua curva de magnetização característica. A elevação do seu consumo de corrente na proporção ditada pela inclinação desta curva poderá, a princípio, ser especificada para satisfazer qualquer nível de compensação desejada. Tal comportamento, além de ensejar um controle contínuo da tensão dentro de patamares determinados, disponibilizará maior parte da capacidade da linha de transmissão para o atendimento das cargas. Além destas características, os princípios físicos que regem a dinâmica do funcionamento destes equipamentos são os mesmos observados em transformadores, ainda que estes exibam peculiaridades próprias de sua natureza.

Dentro do contexto acima, o objetivo deste trabalho está centrado na análise de uma proposta alternativa para a modelagem do RNS utilizando o programa computacional Matlab/Simulink para realização de estudos de desempenho do sistema sob condições transitórias, dinâmicas e de regime

permanente. Este recurso se apresenta como uma ferramenta robusta, versátil e com ampla difusão no meio acadêmico, visto que sua utilização se mostra extremamente superior ao emprego do ATP no que tange a facilidade para o desenvolvimento de modelos específicos de dispositivos e complexos elétricos. Somado a isto, há uma expressiva diversidade de recursos já pré-disponibilizados em sua biblioteca de aplicativos específicos para a área de sistemas de energia, a exemplo de unidades de geração renováveis, sistema de transmissão em corrente contínua, dentre outras. Por fim, reconhece-se, ainda, uma maior utilização do Simulink que ultrapassa as fronteiras dos ambientes acadêmicos. De fato, são várias as empresas de energia e centros de estudos que realizam trabalhos com base neste recurso computacional. Estas justificativas, de modo individual ou coletivo, evidenciam a motivação para a migração da modelagem dos reatores saturados, nos termos aqui postos e explorados.

II. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO COMPENSADOR ESTATICO DE REATIVOS A NÚCLEO SATURADO

O dispositivo elétrico reator a núcleo saturado - RNS apresenta grande similaridade aos transformadores de potência no que tange suas propriedades físicas e seus aspectos construtivos. No entanto, a filosofia operacional do RNS diverge daquela apresentada pelo transformador, tendo em vista que o reator a núcleo saturado, conforme o próprio nome sugere, apresenta um comportamento fortemente não-linear, trabalhando na região de saturação da sua curva de operação. A Fig.1 evidencia as diferenças operacionais impostas pelos dois equipamentos acima referidos, quanto às questões atreladas com o nível de magnetização explorado.

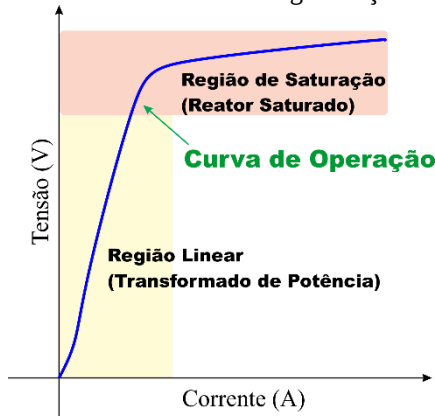


Figura 1. Curva de operação de equipamentos eletromagnéticos

Um reator saturado, embora seja capaz de promover a compensação de reativos e controlar a tensão, apresenta uma característica pouco atrativa de introduzir apreciáveis níveis de correntes harmônicas no sistema ao qual se encontra conectado, por se tratar de uma carga com característica não-linear.

Objetivando atenuar tais efeitos negativos, foram desenvolvidas várias configurações de dispositivos trifásicos, visando reduzir o conteúdo harmônico das correntes. Por esse motivo, a busca por soluções que contribuam para a redução dos níveis de distorções harmônicas produzidas pelo

equipamento, constitui um tema de extrema relevância para o domínio da tecnologia de construção de reatores saturados. De fato, reconhecem-se várias topologias construtivas objetivando a solução de tal problema, utilizando-se para tanto, das mais variadas combinações de conexões entre enrolamentos e disposição de núcleos possíveis. A mais conhecida delas consiste no emprego dos arranjos de reatores denominados por reatores tipo *Twin-Tripler* (ou 12 pulsos) [5], [7], [13]. Sua forma física construtiva pode ser vista na Fig.2, a qual evidencia uma composição associada com a combinação de 12 bobinas, sendo estas divididas em bobinas principais e auxiliares, e agrupadas como indicado. Quanto ao núcleo ferromagnético, este é composto por duas unidades, cada qual formada por três colunas, semelhante aos transformadores trifásicos.

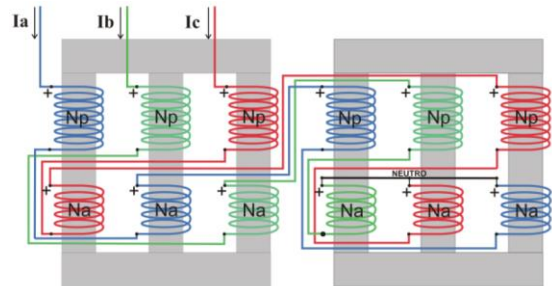


Figura 2. Reator *Twin-Tripler* trifásico com núcleos separados

Por fim, vale aqui ressaltar que, como amplamente divulgado na literatura, o arranjo em questão resulta que as correntes harmônicas sofrem uma expressiva redução das componentes injetadas na rede de conexão, as quais são definidas pela expressão $(12k \pm 1)$, sendo k um número inteiro positivo. Em assim sendo, apenas as ordens harmônicas 11, 13, 23, 25... são, sob condições ideais de operação, inseridas no barramento ao qual se encontra ligado o reator.

III. MODELAGEM DO REATOR NO PROGRAMA SIMULINK

O programa Simulink – Simscape corresponde a um aplicativo baseado num ambiente de simulação constituído por funções de transferência definidas por diagramas de blocos. Estes viabilizam a representação da dinâmica do funcionamento de equipamentos e dispositivos eletroeletrônicos. Buscando meios de representar o referido regulador de tensão nesta plataforma, adotou-se a metodologia utilizada em trabalhos anteriores [11], [12]. Esta consiste na caracterização de cada coluna magnética por meio de transformadores saturáveis de dois enrolamentos e interconexões elétricas entre as bobinas para a configuração do arranjo de 12 pulsos. Para tanto, foi utilizado o modelo de transformador saturável monofásico disponível na biblioteca do programa, o qual baseia-se no circuito elétrico equivalente típico de transformadores.

A partir do recurso pré-existente acima referido, a metodologia para a representação de uma das colunas do reator se baseia no conceito contemplado na Fig.3 e sua respectiva tela de parametrização. Através da Fig.3.b, é possível visualizar os campos onde são inseridos os parâmetros referentes ao reator *Twin-Tripler*.

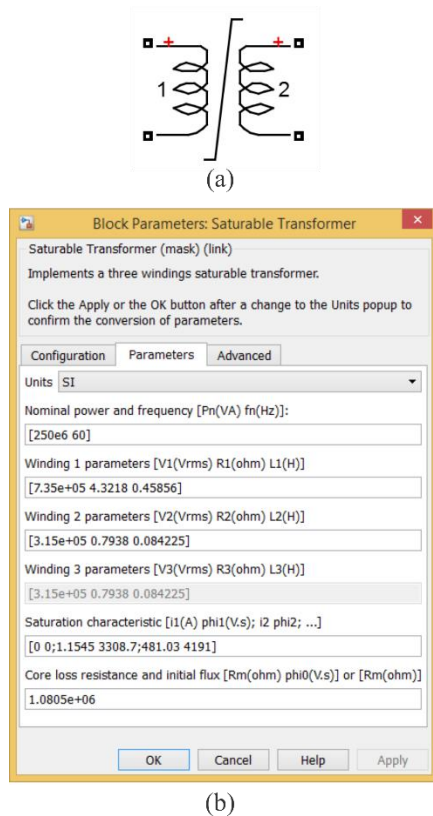


Figura 3. Estratégia para modelagem do reator saturado no Simulink (a) Bloco do transformador monofásico (b) Janela para parametrização do transformador/coluna magnética

A curva de magnetização do material do núcleo, por sua vez, é representada através da relação entre a corrente de pico drenada pelo RNS (I_{pk}) e fluxo concatenado nos enrolamentos (λ), sendo a metodologia para a obtenção da respectiva curva reportada em [11]. A inserção dos pontos referentes à relação $I_{pk} \times \lambda$ é feita no campo *Saturation characteristic* da janela de parametrização do material magnético. A construção da curva de magnetização é realizada pelo programa por meio da interpolação linear entre os referidos pontos, o que resulta em um gráfico similar ao ilustrado pela figura Fig.4.

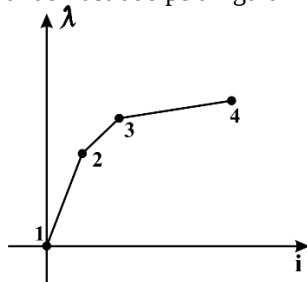


Figura 4. Curva de saturação representativa do núcleo magnético

Após a parametrização do núcleo e enrolamentos presentes em uma das colunas do RNS *Twin-Tripler*, o arranjo completo é obtido por meio da interligação elétrica entre os enrolamentos de cada coluna. A Fig.5 mostra a composição do arranjo *Twin-Tripler* criada no ambiente Simulink. Esta evidencia que a estratégia utilizada conduz a uma modelagem tal que cada coluna magnética possui um comportamento magnético independente das demais, fato este simplificador da estrutura real do produto.

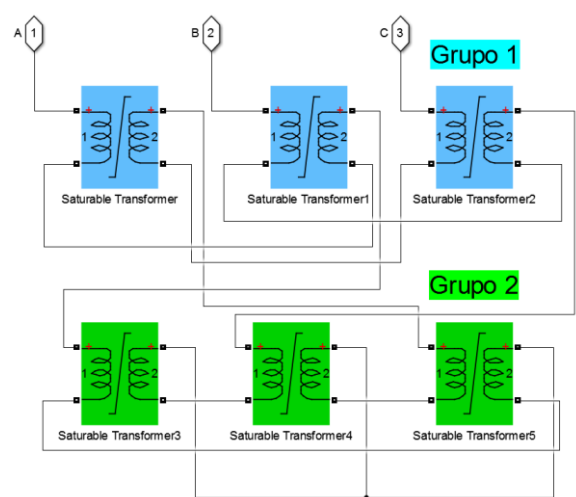


Figura 5. Modelo computacional do RNS *Twin-Tripler* no Simulink

O Grupo 1 evidenciado na Fig.5 representa as colunas magnéticas e enrolamentos do primeiro núcleo, enquanto que o Grupo 2 se refere às colunas e enrolamentos do segundo núcleo. Os enrolamentos identificados por 1 na Fig.5 correspondem às bobinas principais, enquanto que o número 2 está atrelado com as espiras auxiliares. Para a obtenção dos principais dados requeridos para a representação de um dado reator saturado, estes são advindos de um software já desenvolvido em [11].

IV. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

Com a intenção de se avaliar o desempenho operativo do regulador de tensão RNS, adotou-se um circuito equivalente de um sistema elétrico radial de 500kV bastante simplificado em sua composição, como indicado na Fig.6.

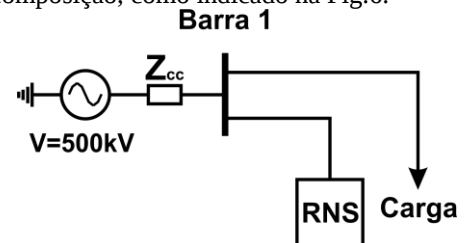


Figura 6. Diagrama equivalente do sistema elétrico utilizado para os estudos de desempenho do reator saturado.

Nota-se que o arranjo é composto por uma fonte em série com uma impedância, representando o circuito equivalente de Thévenin de um sistema de 500kV e potência de curto-circuito de 1600MVA. As cargas conectadas na barra 1 possuem uma sazonalidade intrínseca, resultando em sobretensões quando da ocorrência de rejeição destas, fato este decisivo para a justificativa do uso de um RNS nesta barra.

Quanto à potência solicitada pelas cargas, esta se apresenta com uma variação ao longo do tempo total de estudo, como segue:

- Num primeiro intervalo de tempo (de 0 a 2 s), tem-se a operação com a carga plena;
- Na sequência (de 2 a 4 s), ocorre um súbito alívio de 80% do carregamento original;
- Por fim, no terceiro intervalo (a partir de 4 s), a carga retorna ao seu valor inicial.

V. ESTUDO DE DESEMPENHO DO SISTEMA COM O REATOR SATURADO NO SIMULINK

No estudo computacional realizado, foram analisadas as tensões, correntes, potências e distorções harmônicas do RNS para as diversas etapas da operação do sistema elétrico, considerando-se, num primeiro momento o funcionamento da rede sem a presença do RNS e, na sequência, estando o mesmo inserido.

A. Sistema sem a presença do regulador de tensão

O comportamento do sistema sem a presença do regulador de tensão quanto aos níveis de tensão está expresso na Fig.7.

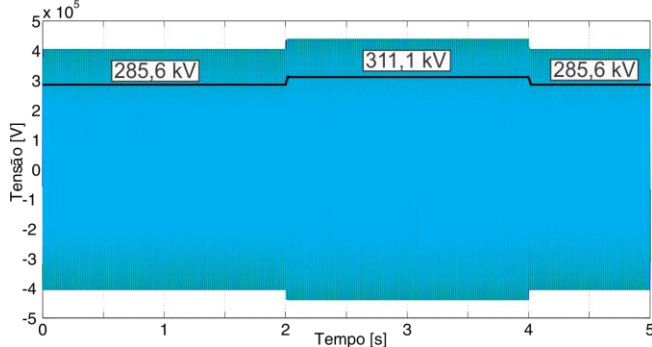


Figura 7. Tensão na barra1 sem o RNS - Simulink

Durante os intervalos de tempo 0,0 à 2,0 s e 4,0 à 5,0 s, o sistema experimenta a condição de carga plena. Nestas condições, a tensão da barra 1 é de 285,6 kV fase-neutro, valor este abaixo do nominal em cerca de 1%. Já no intervalo de 2,0 à 4,0s, a condição de alívio de carga acarretou numa tensão de 311,1kV fase-neutro, o que resulta em um valor eficaz de 7,7% acima do nominal. Nestes termos, constata-se uma violação dos limites preconizados.

B. Sistema com a presença do regulador de tensão

Utilizando o modelo implementado no Simulink descrito anteriormente, esta seção apresenta os resultados computacionais obtidos para a operação anteriormente descrita, levando-se em conta, desta feita, a presença do reator saturado.

A Fig.8 corresponde a implementação do alimentador sob análise com a presença do RNS.

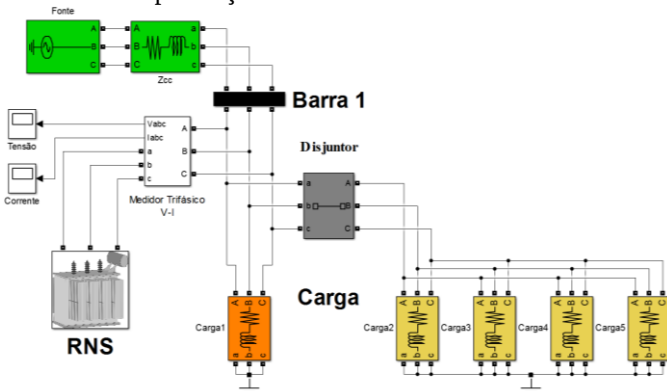


Figura 8. Diagrama de blocos do sistema elétrico no Simulink

No que tange aos resultados que expressam o funcionamento do conjunto formado pela rede, carga e regulador, estes encontram-se, consonantemente, mostrados na Fig.9.

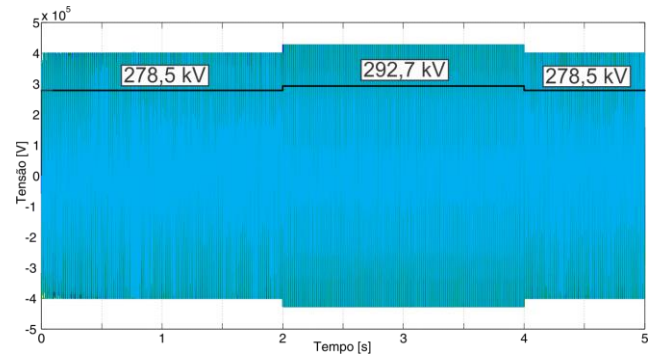


Figura 9. Tensão na barra 1 com o RNS - Simulink

Para o caso em questão, a tensão sob condição de carregamento pleno conduziu a um valor de 278,5kV fase-neutro, portanto, cerca de 3% abaixo da nominal. Para a situação atrelada com o alívio de carga, com a presença do RNS, esta grandeza atingiu 292,7kV fase-neutro, portanto, 1,4% acima do nominal. Isto ratifica a eficácia do regulador em cumprir sua função quanto ao processo da compensação.

No que tange a corrente reativa consumida pelo reator, esta foi de 58,0 A no intervalo de 0,0 à 2,0 s, e no intervalo de 2,0 à 4,0 s foi de 142,7 A, como mostra a Fig.10. De fato, idealmente, o valor de 58 A foi relativamente elevado, o que se deve ao projeto físico do reator implementado. Não obstante a isto, vale reconhecer que, sob a ação de uma tensão associada com a perda da carga, esta grandeza foi substancialmente incrementada para o atendimento ao requisito da regulação ora almejada.

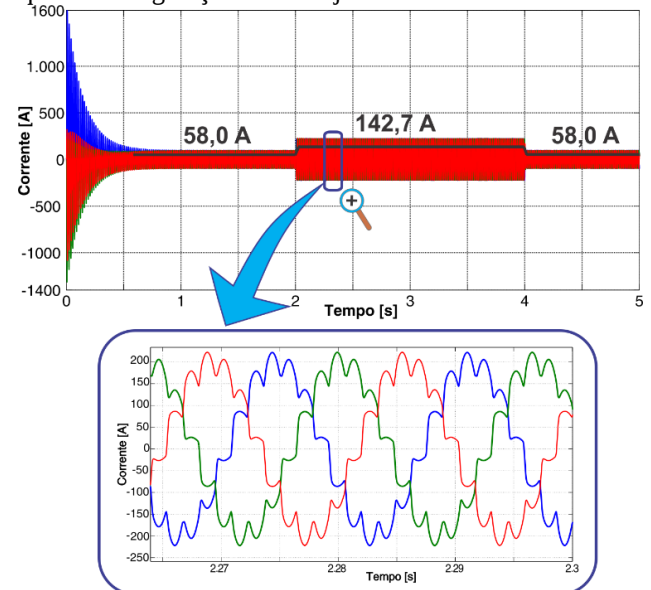


Figura 10. Corrente do reator ao longo do processo dinâmico - Simulink

Como já informado, a utilização de um reator com características não lineares se apresenta como responsável pela geração de correntes harmônicas, as quais são parcialmente compensadas pelo arranjo físico empregado. O resultado encontrado para o espectro de frequências da corrente de operação do reator empregado, quando do alívio de carga, encontra-se indicado na Fig.11.

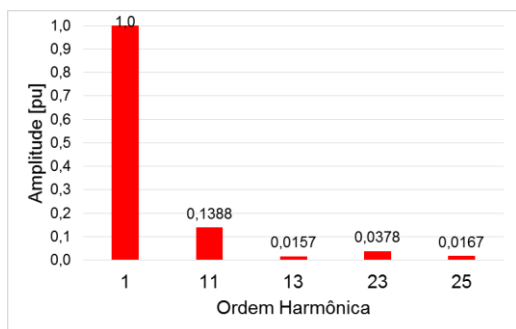


Figura 11. Espectro harmônico da corrente do reator saturado quando da atuação para o processo da regulação - Simulink

De acordo com a teoria, a tecnologia empregada pelo RNS para regular a tensão utiliza a absorção de potência reativa do sistema. O comportamento desta grandeza ao longo do processo é mostrado na Fig.12.

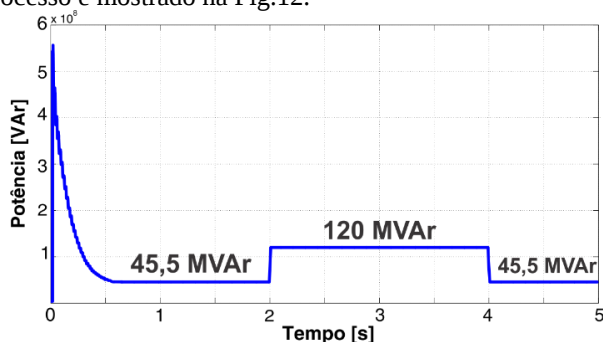


Figura 12. Potência reativa consumida pelo reator saturado ao longo do período de operação proposto - Simulink

VI. DESEMPENHO COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS DE REATOR SATURADO NO SIMULINK E ATP

Em consonância com afirmativa feita no início deste artigo, vale lembrar que o equipamento em pauta já foi objeto de modelagem, simulação e validação através da plataforma ATP. Portanto, o confronto comparativo entre a funcionalidade do modelo ora proposto com aquele já ratificado através de experimentos em campo, se apresenta como uma etapa relevante para fins da confiabilidade da nova representação obtida.

Dentro desta lógica, o mesmo sistema disposto na seção anterior é, nesta etapa, avaliado com base nos recursos disponibilizados no programa ATP. Para tanto, a Fig.13 indica a implementação do alimentador, carga e reator na plataforma aqui explorada. A topologia, parâmetros, condições operativas, dentre outras características, são todas absolutamente similares às aquelas já utilizadas.

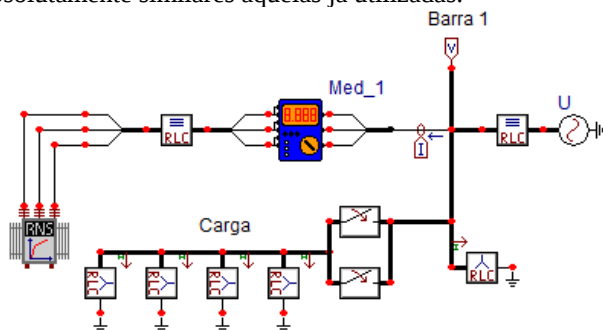


Figura 13. Sistema elétrico representado no ATP

Visando o processo comparativo entre as performances dos dois aplicativos, a Fig.14 mostra quais as tensões obtidas com a presença do reator saturado em questão, advindas do ATP.

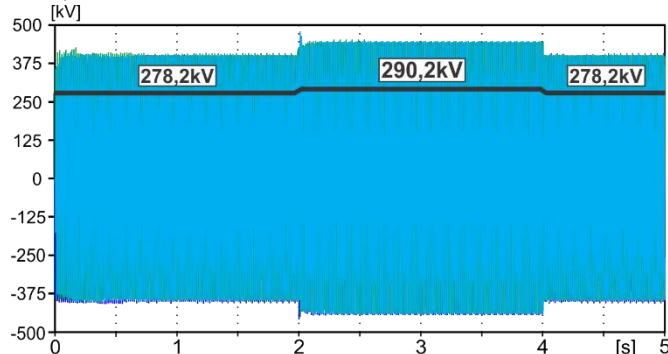


Figura 14. Tensão na barra 1 com o RNS - ATP

No intervalo de 0,0 à 2,0 s, o valor eficaz obtido pelo ATP foi de 278,2 kV fase-neutro, representando pois, um nível 4% menor que o nominal. Dessa forma, nota-se que o resultado é extremamente próximo ao fornecido pelo Simulink, que foi de 3%.

Quando da redução da carga, a tensão eficaz determinada pelo ATP foi de 290,2 kV fase-neutro, correspondendo então a um nível 0,5% acima do nominal. O valor fornecido pelo Simulink indicou uma tensão correspondente de 1% acima do nominal, mostrando mais uma vez que os resultados estão condizentes.

Quanto à questão das formas de onda e seus valores eficazes, além das distorções harmônicas presentes, ressalta-se que estas grandezas encontram-se ilustradas na Fig.15. Constata-se, num primeiro momento, que os valores eficazes para as condições de carga nominal e subsequente alívio de 80%, são, correspondentemente, de 56,0 A e 140,4 A. Comparativamente às grandezas correspondentes fornecidas pelo Simulink, observa-se uma grande identidade entre os resultados.

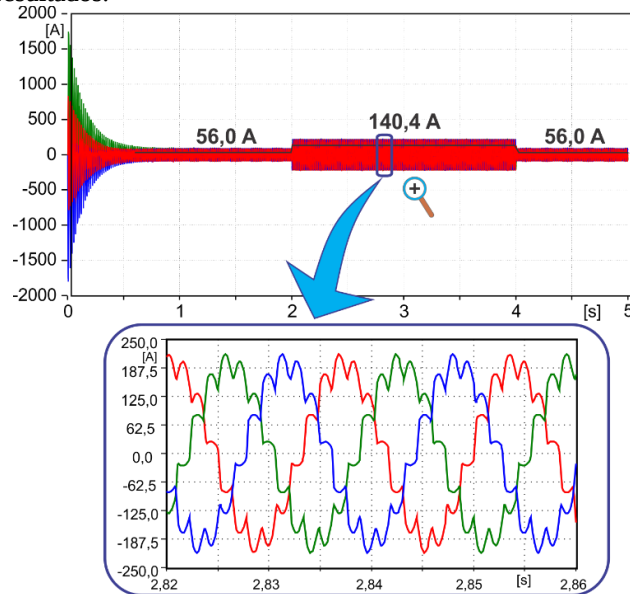


Figura 15. Corrente solicitada pelo reator saturado - ATP

No instante da rejeição de carga, o resultado encontrado para o espectro de frequências da corrente de operação do reator, este encontra-se indicado na Fig.16.

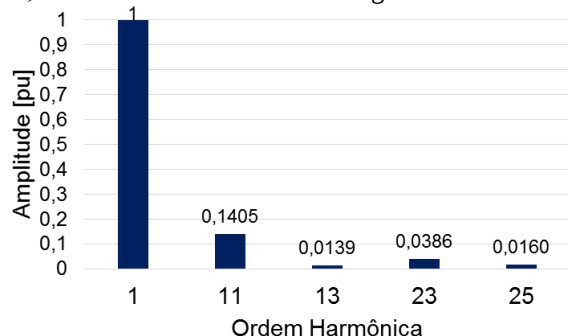


Figura 16. Espectro harmônico da corrente do reator saturado quando da atuação para o processo da regulação - ATP

A potência reativa absorvida pelo reator está expressa na Fig.17. Esta mostra que, na condição inicial, ocorre um consumo de potência reativa de 46,8MVar, enquanto que, para a situação de alívio de carga, esta grandeza passa para 123,6MVar. Mais uma vez constata-se uma correlação quase que exata entre os desempenhos advindos dos dois métodos para a simulação do sistema em pauta.

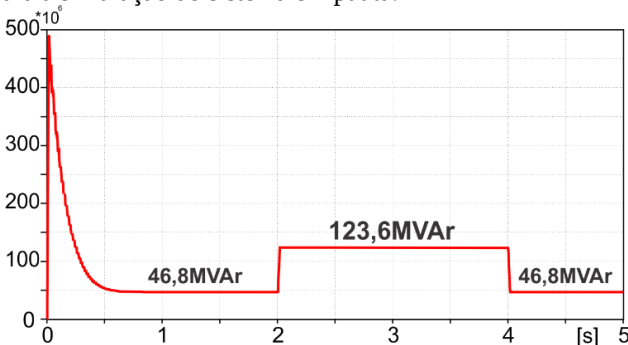


Figura 17. Potência reativa consumida pelo reator saturado ao longo do período de operação proposto - ATP

VII. CONCLUSÕES

O artigo foi centrado na proposição de uma estratégia alternativa para a modelagem e estudos de desempenho dinâmico de sistemas elétricos com a inserção do regulador de tensão conhecido por Reator a Núcleo Saturado do tipo *Twin-tripler*. A proposta foi da utilização do software Matlab empregando o recurso Simulink, cujas propriedades e atrativos foram apontados ao longo do texto. Uma vez apresentadas as bases para a modelagem do RNS nesta plataforma, foram realizados estudos de desempenho utilizando um sistema elétrico simplificado, o qual foi submetido a fenômenos responsáveis por alterações e violações das tensões eficazes em relação a regulamentação existente. A motivação maior para o trabalho se apoia no fato que, trabalhos anteriores, viabilizaram meios computacionais para os estudos ora focados no simulador ATP, o qual serviu como base comparativa para a verificação da eficácia da proposta ora feita. Uma pronta correlação entre os resultados das simulações efetuadas nos dois aplicativos evidenciou, com clareza, o sucesso do modelo implementado, constatação esta que abre horizontes para estudos de desempenho com o Matlab, que se revela uma ferramenta de ampla difusão no

mercado e com as suas propriedades intrínsecas atrativas aos usuários.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas*, vol. I, Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1977.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8*, 20 Maio 2015. [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf.
- [3] Y. H. Chung, "Neural Network Controlled Voltage Disturbance Detector and Output Voltage Regulator for Dynamic Voltage Restorer," em *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Dinamarca, 2007.
- [4] R. S. Vedam e M. S. Sarma, *Power Quality - VAr Compensation in Power Systems*, USA: CRC Taylor & Francis Group, 2009.
- [5] A. B. Vasconcellos, "Análise operacional de compensadores estáticos com reator a núcleo saturado quanto a produção e compensação de correntes harmônicas," VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, 2008.
- [6] A. M. Bryantsev, "Magnetically controlled electrical reactors", Moscou, Rússia: Znack, 2012.
- [7] J. A. F. Barbosa Jr., J. C. Oliveira, I. N. Gondim, F. P. Santilio, T. V. Silva, A. B. Vasconcellos e J. M. Pacheco, "Avaliação Técnica e Econômica para o uso de reatores saturados em substituição aos lineares em um sistema de transmissão em AT," IX CLAGTEE - Electricity Generation and transmission, Mar del Plata, 2011.
- [8] A. B. Vasconcellos, "Modelagem, projeto e construção de compensadores estáticos tipo reator à núcleo saturado para melhoria da qualidade da energia: análise computacional e validação experimental," tese, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [9] J. M. Pacheco, "Determinação dos parâmetros de compensadores estáticos de reativos e estratégia para o projeto otimizado de reatores saturados," tese, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [10] J. A. F. Barbosa Jr., J. C. Oliveira, I. N. Gondim, F. P. Santilio, T. V. Silva, A. B. Vasconcellos e J. M. Pacheco, "Estabelecimento e validação de uma sistemática para a obtenção das curvas de magnetização de reatores saturados para simulação no ATP," 9th Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - IX CBQEE, Cuiabá, 2011.
- [11] J. A. F. Barbosa Jr., "Uma contribuição para a modelagem, construção e análise de desempenho de compensadores de tensão a reator saturado," tese, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- [12] C. S. Chaves, J. C. Oliveira, R. Ariza, L. E. Vasconcelos, J. A. F. Barbosa Jr., "Estudo comparativo entre o emprego de ligas amorfas em relação ao aço silício na construção de reatores saturados," CEEL, Uberlândia, 2013.
- [13] J. A. F. Barbosa Jr., "Modelagem e análise de desempenho transitório e dinâmico de compensadores estáticos de reativos utilizando reatores saturados," dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.