MARCO ANTONIO BARBOSA HORITA

Reatores Controlados por Saturação para Compensação de Reativos

São Paulo
2014

MARCO ANTONIO BARBOSA HORITA

Reatores Controlados por Saturação para Compensação de Reativos

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

São Paulo
2014

MARCO ANTONIO BARBOSA HORITA

Reatores Controlados por Saturação para Compensação de Reativos

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Sistemas de
Potência

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Jardini

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 21 de Março de 2014

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Horita, Marco Antonio Barbosa

**Reatores controlados por saturação para compensação de reativos / M.A.B. Horita. -- São Paulo, 2014.
87 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

**1.Sistemas elétricos de potência 2.Engenharia elétrica
3.Transformadores e reatores I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.**

Dedico esse trabalho à minha família e amigos. Em especial aos meus pais por terem me passados seus valores, a noção da importância de estudar e a consciência de que sempre teremos muito a aprender. Sem seu suporte, carinho e dedicação nenhuma de minhas conquistas seriam possíveis.

AGRADECIMENTOS

A origem desta pesquisa foi um projeto de P&D estratégico, o projeto Transmitir, financiado e desenvolvido pela ANEEL em conjunto com as empresas Furnas, Eletronorte, CTEEP, CEMIG e TBE. Sou grato a todos os envolvidos. Agradeço ao meu orientador, professor Jardimi, que sugeriu e apoiou esse trabalho, foi quem viabilizou e me guiou até a sua conclusão. Agradeço também ao engenheiro Tamyres Luis Machado Jr. pelo apoio no entendimento do projeto de reatores. E por fim agradeço a meu colega Marcos Bassini pelas inúmeras discussões que, por diversas vezes, serviram para elucidar muitas questões.

*Our doubts are traitors,
and make us lose the good we oft might win,
by fearing to attempt*

William Shakespeare

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar conceitos e prover ferramentas para estudos e análises de um equipamento ainda não explorado pelo sistema elétrico brasileiro para compensação reativa de linhas de transmissão, o Reator Controlado por Saturação. Inicialmente é apresentada a teoria necessária para o entendimento do equipamento, as aplicações e sua potencial utilidade para o Brasil. Através da concepção de um circuito equivalente e da análise de modelos adaptados para o *MCSR* (*Magnetic Controlled Shunt Reactors*) de softwares de transitórios eletromagnéticos aspectos sobre seu comportamento dinâmico e tempo de resposta são esclarecidos. Uma comparação entre o circuito equivalente com um modelo generalista de transformador ajustado às características do *MCSR* é realizada. A comparação serve para conferir credibilidade às suposições usadas para a elaboração do circuito equivalente e interpretações do funcionamento e dinâmica extraídas da análise deste circuito. Com uma melhor e mais clara percepção da dinâmica e efeitos do Reator Controlado por Saturação sobre a rede, realiza-se uma análise de distorção harmônica, sendo assim possível esclarecer alguns aspectos negativos do equipamento. Para o estudo da aplicabilidade e utilidade do *MCSR* no sistema elétrico brasileiro um modelo para transitórios eletromecânicos é proposto. Os parâmetros que determinam a dinâmica e resposta do equipamento são explorados através de suposições razoáveis e das características do equipamento. O modelo é primeiramente testado e analisado em um sistema simples composto por uma geração representada como fonte ideal, um circuito equivalente PI de uma linha de transmissão, uma carga e o *MCSR* realizando a compensação reativa. O trabalho segue para a escolha de uma rede brasileira em que o *MCSR* seria uma opção viável. Uma rede no norte do Brasil é escolhida para a análise e, após estudos de fluxo de potência, propõe-se a troca de um CER (Compensador Estático de Reativos) e quatro reatores shunt fixos por quatro Reatores Controlados por Saturação. A rede é então modelada no PSCAD e realizam-se estudos de distorção harmônica e estabilidade eletromecânica. Por fim realiza-se uma comparação econômica entre três alternativas de compensação reativa para o sistema escolhido incluindo a opção adotada e a opção sugerida com *MCSRs*. O trabalho conclui que reatores controlados por saturação são, em muitos casos, uma alternativa mais barata ao CER e, portanto deve ser estudado no planejamento e expansão do sistema elétrico.

Palavras-Chave: Reator Saturável, *MCSR*, Compensação Reativa.

ABSTRACT

This work aims to present concepts and provide tools for research and analysis of an equipment not yet explored by the Brazilian power system for reactive compensation of AC transmission lines, the Magnetic Controlled Shunt Reactor (MCSR). Initially, the theory used for the understanding of the equipment, its applications and usefulness for the Brazilian network, is presented. By the analysis of an equivalent circuit and a model implemented in software for electromagnetic transient simulation adapted to the MCSR (Magnetic Controlled Shunt Reactors) some aspects of its dynamic behaviour and response time are clarified. A comparison between the equivalent circuit and an electromagnetic transformer model adapted to the characteristics of the MCSR (implemented in the PSCAD software) is performed. The comparison serves to grant credibility to the assumptions used for the preparation of the equivalent circuit and interpretations of the function and dynamics drawn from the analysis of this circuit. With a better and clearer understanding of the dynamics and effects of the MCSR on the network a simplified analysis of harmonic distortion is performed allowing to clarify some negative aspects of the equipment. To study the applicability and usefulness of the equipment in the Brazilian electrical system a model for electromechanical transients is proposed. The parameters that determine the dynamics and response of equipment are explored using reasonable assumptions and the characteristics of the equipment. The model is first tested and analyzed in a simplified system consisting of a generation represented as ideal source, an equivalent PI circuit representing a transmission line, a load and the MCSR performing the reactive compensation. The work follows to the choice of a Brazilian network on which the MCSR would be a viable option. A network in northern Brazil is chosen for analysis. Further studies of power flow reveals the possibility to exchange the SVS (Static Var System) and four shunt reactors for four MCSRs. The network is then modelled in PSCAD and studies of harmonic distortion and electromechanical stability are conducted. Finally we make an economic comparison between three alternatives of reactive compensation for the chosen system including the originally adopted and the suggested solutions. The study concludes that magnetic controlled reactor are, in many cases, a cheaper alternative to the SVS and therefore should be studied in the planning and expansion of the power system.

Keywords: Magnetic Controlled Shunt Reactor, MCSR, Reactive Compensation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Representação simplificada do <i>MCSR</i> [3].....	20
Figura 2 <i>MCSR</i> não saturado. E Figura 3 <i>MCSR</i> saturado (lado superior da senoide).	21
Figura 4 <i>MCSR</i> sistema trifásico [5].....	22
Figura 5 Modelo elétrico simplificado de um transformador com primário conectado ao sistema CA e secundário a uma fonte de corrente CC.	24
Figura 6 Curva de saturação para L_{mag} (mudança de inclinação para 50%)......	24
Figura 7 Curva de saturação para L_{mag} (mudança de inclinação para 25%)......	25
Figura 8 Fluxo induzido pela fonte de corrente (Φ_2) e fluxo total médio no reator (50%). ..	27
Figura 9 Fluxo induzido pela fonte de corrente (Φ_2) e fluxo total médio no núcleo do reator (25%).	27
Figura 10 Correntes circulando no reator quando I_2 é 1,5 pu. No eixo das abscissas o tempo esta em segundos e no eixo da ordenadas a corrente esta em pu (saturação 50%).	29
Figura 11 Correntes circulando no reator quando I_2 é 2,8 pu. No eixo das abscissas o tempo esta em segundos e no eixo da ordenadas a corrente esta em pu (saturação 50%).	30
Figura 12 “Caminhos” para o fluxo magnético[7].	32
Figura 13 Circuito magnético equivalente[7]......	32
Figura 14 Representação do modelo UMEC de transformador no PSCAD [15]......	33
Figura 15 Fluxo no núcleo ferromagnético devido a uma corrente no terceiro enrolamento[15]......	34
Figura 16 Circuito montado no PSCAD para a representação do reator variável.	35
Figura 17 Dados do transformador (modelo UMEC) usados na simulação no PSCAD.	35
Figura 18 Razão entre comprimentos e áreas dos braços com as bases do núcleo ferromagnético. Deve ser informado no modelo UMEC do PSCAD.....	36
Figura 19 Fluxos no primário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).	37
Figura 20 Fluxos no secundário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).	37
Figura 21 Fluxos no primário e no secundário do transformador (reator) com excitação no primário (valores médios)......	38
Figura 22 Fluxos no primário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).	39

Figura 23 Fluxos no secundário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).	39
Figura 24 Fluxos no primário e no secundário do transformador (reator) com excitação no primário (valores médios).....	40
Figura 25 Correntes circulando no reator quando I_2 é 1,5 pu. No eixo das abscissas o tempo esta em segundos e no eixo da ordenadas a corrente está em pu.....	40
Figura 26 Correntes circulando no reator quando I_2 é 2,8 pu. No eixo das abscissas o tempo esta em segundos e no eixo da ordenadas a corrente está em pu.....	41
Figura 27 Fluxo médio no enrolamento de potência do reator para uma inclinação de 25% na saturação. Curvas obtidas do (MEQ) e do PSCAD.	42
Figura 28 Fluxo médio no enrolamento de potência do reator para uma inclinação de 50% na saturação. Curvas obtidas do Modelo Elétrico Equivalente (MEQ) e do PSCAD.....	42
Figura 29 Corrente circulando no circuito primário (enrolamento de potência) do reator quando I_2 é 1,5 pu.	43
Figura 30 Corrente circulando no circuito primário (enrolamento de potência) do reator quando I_2 é 2,8 pu.	43
Figura 31 Ilustração do parâmetro de saturação α para um nível de saturação B.	46
Figura 32 Forma de onda da corrente em um dos enrolamentos de potência (em uma das fases) do <i>MCSR</i>	47
Figura 33 Forma de onda resultante da corrente em uma das fases do reator controlado por saturação.	47
Figura 34 Modelo proposto para o <i>MCSR</i>	52
Figura 35 Circuito elétrico equivalente representado pelo “Polo 3: Controle”.....	54
Figura 36 Fluxo médio no núcleo e possíveis aproximações.	54
Figura 37 Sistema simples com <i>MCSR</i>	58
Figura 38 Implementação do modelo da figura 31 no PSCAD (em uma fase).	59
Figura 39 Curva do fluxo médio no núcleo do reator em função da corrente injetada no secundário quando a tensão no primário é de 1 p.u.	60
Figura 40 Gráfico da tensão RMS na barra em que o <i>MCSR</i> está conectado.....	66
Figura 41 Potências reativas: Total absorvida na barra, da carga e do reator controlado por saturação.	67
Figura 42 Corrente absorvida pelo reator em uma das fases.	67
Figura 43 Envoltória da corrente CA absorvida na barra da carga/reator.	68
Figura 44 Sistema base.	69

Figura 45 Sistema base com nova configuração de compensação reativa.	71
Figura 46 Rede base com nova configuração de compensação reativa modelada no PSCAD.	75
Figura 47 Tensão RMS nas barras em que os <i>MCSRs</i> estão conectados.	79
Figura 48 Corrente absorvida por um reator controlado por saturação instalado na barra BV 500 kV antes da rejeição de carga	79
Figura 49 Corrente absorvida por um reator controlado por saturação instalado na barra BV 500 kV durante a rejeição de carga	80
Figura 50 Corrente absorvida por um reator controlado por saturação instalado na barra BV 500 kV durante a rejeição de carga.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	-	Corrente Alternada
CC	-	Corrente Contínua
CER	-	Compensador Estático de Reativos
EMT	-	Electromagnetic Transient
FACTS	-	Flexible AC transmission system
FP	-	Fluxo de Potência
MCSR	-	Magnetically Controlled Shunt Reactor (ou Reator Controlado por Saturação)
MEQ	-	Modelo Elétrico Equivalente
OLTC	-	On Load Tap Changer
ONS	-	Operador Nacional do Sistema
PI	-	Proporcional Integral
PSCAD	-	Power Systems Computer Aided Design (programa de simulação de transitórios eletromagnéticos)
RMS	-	Root Mean Square
SIN	-	Sistema Interligado Nacional
SVC	-	Static Var Compensator
SVS	-	Static Var System
THD	-	Total Harmonic Distortion
UMEC	-	Unified Magnetic Equivalent Circuit

SUMÁRIO

1. Considerações Iniciais	13
1.1. Introdução	13
1.2. Objetivo	14
1.3. Organização do Texto	16
2. Revisão Bibliográfica	17
3. O <i>MCSR</i> (Reatores Controlados por Saturação)	20
4. <i>MCSR</i> – Características eletromagnéticas	23
4.1. Modelo Elétrico Equivalente	23
4.2. O modelo UMEC e PSCAD	31
4.3. Comparação da simulação do Modelo Elétrico Equivalente (MEQ) e modelo UMEC do PSCAD e Considerações.	41
4.4. Característica Harmônica do <i>MCSR</i>	45
5. <i>MCSR</i> – Modelo para Transitório Eletromecânico	52
5.1. Teste do Modelo	58
6. Potencial do <i>MCSR</i> no sistema elétrico brasileiro	69
6.1. A rede utilizada	69
6.2. Dimensionamento	70
6.3. Estudo de estabilidade	73
7. Comparação de Custos	81
8. Conclusão	83
9. Trabalhos Futuros	85
10. Bibliografia	86

1. Considerações Iniciais

1.1. Introdução

O Brasil como um país de grandes dimensões possui os recursos naturais espalhados por seu território e exige a construção de infraestrutura adequada para o transporte desses recursos aos seus centros consumidores. Muitas vezes as regiões com capacidade hídrica para a geração de energia elétrica encontram-se distantes dos centros consumidores, essa característica implica que, para o aproveitamento desse potencial, sejam construídas linhas de transmissão longas e com grande capacidade. No caso da transmissão de energia usando corrente alternada a longas distâncias as dificuldades técnicas são razoáveis, principalmente porque o perfil da carga muda consideravelmente ao longo do dia. Há períodos em que as linhas de transmissão encontram-se pouco ou muito carregadas. O controle do nível de tensão em longas linhas de transmissão CA é necessário para garantir a qualidade da energia e a operação saudável dos equipamentos do sistema. Dependendo do carregamento das linhas de transmissão a necessidade de compensação reativa muda, um problema que para linhas curtas não é relevante, pois a variação dessa necessidade é pequena e os limites de tensão ao longo do dia encontram-se em níveis toleráveis. Porém em linhas de grande comprimento essas variações podem tornar-se um problema e a necessidade de equipamentos flexíveis capazes de se adequar a condição momentânea do sistema são muitas vezes obrigatórios.

O sistema de transmissão elétrico brasileiro contém linhas de grandes comprimentos, o que acarreta grandes valores de reatância indutiva série e susceptância capacitiva paralela. Essa última provoca tensões elevadas nos terminais em aberto da linha, em especial durante energizações e rejeição de carga. A compensação indutiva, ou *shunt*, equilibra o valor dessa capacitância. Porém, em situações de maior carregamento, essa compensação paralela faz com que as tensões no terminal de carga fiquem excessivamente baixas. Dessa forma, uma compensação indutiva variável em função da condição operativa traz grande vantagem em termos de desempenho do sistema de transmissão.

O critério N-1 muitas vezes inviabiliza a utilização de reatores e banco de capacitores convencionais. Dessa forma, equipamentos mais custosos e sofisticados como compensadores estáticos são empregados. Com o intuito de manter o sistema operando dentro de limites

estabelecidos pode-se, em diversas situações, utilizar os reatores magneticamente controlados por saturação (*MCSR*) no lugar dos custosos compensadores estáticos.

O *MCSR* (Magnetic Controlled Shunt Reactors), segundo informações de um fabricante, é utilizado em alguns países como República da Belarus, Lituânia e Cazaquistão. É interessante realizar estudos para verificar a viabilidade da sua aplicação no sistema elétrico brasileiro, bem como o desempenho desses equipamentos em regime e durante transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos.

1.2. Objetivo

O objetivo desta pesquisa é apresentar estudos comparativos entre um sistema de transmissão em que é utilizado compensador estático de reativos (CER) juntamente com reatores paralelos de linha convencionais, e o mesmo sistema substituindo-se esses dois equipamentos por *MCSRs*. O CER oferece uma grande flexibilidade, pois o valor de potência reativa fornecida ou absorvida pode variar de acordo com o estado operativo da linha, já o reator controlado por saturação pode variar apenas o valor da potência reativa absorvida através do controle de sua saturação.

É abrangido neste trabalho o princípio de operação, modelos e métodos para estudos de fluxo de potência, estabilidade e transitórios eletromagnéticos do *MCSR*. Neste tipo de reator, sua configuração física, bem como suas características magnéticas (i.e., sua curva de saturação) são importantes para modelagem de seu funcionamento. É proposta uma técnica para dimensionamento da curva de saturação, e seu ponto de operação, e uma análise sobre a viabilidade de saturação sustentada em regime permanente. São apresentadas curvas típicas do comportamento do dispositivo, bem como seu efeito no controle de reativos em um sistema simples.

Os estudos de fluxo de potência envolvem a utilização de reatores controlados por saturação em operação normal e em situações de emergência como perdas de linhas e perdas de cargas, para verificar o desempenho desses equipamentos. Algumas considerações sobre os tempos de resposta e atuação do controle eletrônico da saturação também são abordadas.

A grande vantagem na utilização de reatores controlados por saturação é o baixo custo da eletrônica de potência (um pequeno percentual da sua potência nominal) envolvida em sua construção. Ao contrário dos compensadores estáticos que necessitam de chaves que suportem elevadas correntes e tensões, os reatores controlados por saturação precisam apenas magnetizar o núcleo injetando uma corrente CC em uma bobina de controle. Portanto os componentes de eletrônica de potência, responsáveis por encarecer os compensadores estáticos, são substancialmente mais baratos nesses equipamentos. Estima-se que o custo dos reatores magneticamente controlados seja um pouco superior que o de reatores convencionais. Propõe-se que o dimensionamento de futuras redes de transmissão de energia considere estudos utilizando equipamentos como:

- a) Compensação reativa convencional e compensação reativa (indutiva/capacitiva) controlável;
- b) Reator magneticamente controlado.

Comparam-se as duas soluções sob os aspectos técnico e econômico assumindo os prováveis custos de cada alternativa.

Este tipo de reator também é usado na indústria para controle de tensão onde, por exemplo, existem fornos a arco, pode ainda ser associado a bancos de capacitores e ser usado para compensação de fator de potência.

Desta forma esta pesquisa contribui para:

- O entendimento do funcionamento de reatores controlados por saturação.
- Aplicação em um sistema de transmissão real.
- Modelagem voltada a estudos de transitórios eletrodinâmicos e eletromagnéticos.
- Avaliação técnica e econômica da aplicação.

Podendo assim abrir as portas para a aplicação de tais equipamentos no sistema elétrico brasileiro.

1.3. Organização do Texto

Após este capítulo, no capítulo 2, como considerações iniciais, é apresentada uma revisão bibliográfica contendo uma breve descrição do conteúdo dos artigos usados como base para a elaboração deste trabalho.

No capítulo 3 é feita uma descrição sucinta sobre o reator controlado por saturação e seu princípio de funcionamento.

No capítulo 4 procura-se esclarecer o comportamento em regime do *MCSR* e elucidar aspectos relacionados a saturação do núcleo para assim conceber um modelo simplificado do equipamento. Neste capítulo é concebido um modelo elétrico do *MCSR* e os resultados obtidos são comparados com o modelo UMEC (Unified Magnetic Equivalent Circuit) do PSCAD. Também no capítulo 4 é realizada uma análise breve da distorção harmônica do reator.

No capítulo seguinte (5) é apresentada uma proposta de um modelo para estudos de transitórios eletromecânicos e são realizados testes iniciais do modelo em um sistema simples.

No capítulo 6 avalia-se a utilização do *MCSR* em uma rede do sistema elétrico brasileiro substituindo um CER e reatores shunt fixo por *MCSRs*. Estima-se que a nova configuração da compensação de reativos mostre-se uma alternativa mais barata em relação à configuração original.

No capítulo 7 estimam-se os custos de um reator controlado por saturação e usando tabelas de preços de referência da ANEEL compara-se o custo da nova configuração de reativos à configuração original.

No capítulo 8 são realizados comentários e consideração do autor acerca do equipamento e de sua utilidade para o sistema brasileiro e indicações de pesquisas futuras.

2. Revisão Bibliográfica

O uso da saturação de reatores para controle de tensão em locais onde ocorre *flicker* tem sido analisado já há algum tempo. Reatores de saturação natural (Friedlander) foram opções para compensação reativa bastante empregada nas décadas de 1960-1980 e hoje devido a evolução da eletrônica de potência foram substituídos por CERs [17]. Porém a tecnologia de reatores de, tanto saturação natural como os controlados por saturação se desenvolveram em alguns países da ex-união soviética e hoje, ao que tudo indica, se apresentam como opção competitiva para compensação reativa de linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão [17].

Recentemente a técnica de uso da saturação forçada no núcleo do reator através da injeção de corrente em um enrolamento auxiliar passou a ser empregada em equipamentos de compensação reativa na Europa e Ásia. Essa tecnologia ainda não explorada no Brasil pode ser competitiva com outros equipamentos de controle ativo de reativos como o CER dependendo da aplicação.

Em [1] é realizado uma análise e estudo do uso de reatores controlados por saturação em uma linha longa (1000 km) em 500 kV. O artigo apresenta um estudo do estado operativo da linha contendo apenas *MCSRs* para diversas condições de carregamento e realiza uma análise de pequenos sinais do sistema incluindo o controle e aspectos físicos do equipamento. Também são apresentadas simulações e análises de estabilidade transitória. O autor conclui que os reatores controlados por saturação contribuem para amortecer oscilações no sistema e, portanto melhoram a estabilidade.

A referência bibliográfica [2] apresenta o *MCSR*, suas aplicações e vantagens. O artigo introduz princípios de funcionamento e operação do equipamento em um ponto de vista sistêmico e argumenta através da análise de um sistema reduzido a redução das perdas do sistema e o aumento da capacidade de transmissão da linha.

Em [3] o *MCSR* é analisado no seu princípio magnético e propriedades elétricas. Características eletromagnéticas como o fluxo no núcleo, a saturação e a corrente elétrica no enrolamento de potência são constatados em um protótipo em 380V/13A e comparados com resultados obtidos usando o *software* de transitórios eletromagnéticos (PSCAD). O autor

conclui que o modelo do programa PSCAD representa bem o equipamento e pode ser usado em estudos eletromagnéticos em sistemas com *MCSRs*.

Em [4] é analisado o uso de *MCSRs* em linhas de alta e extra-alta tensão. O uso de *MCSRs* é justificado principalmente para compensar o perfil de carregamento das linhas bastante variável ao longo do dia, que pode gerar tensões bastante elevadas caso fossem utilizados reatores de linha convencionais. No artigo é realizada uma análise de pequenos sinais para um sistema proposto usando reatores convencionais e *MCSR* e, então, comparados. Os controles e ajustes do *MCSR* são discutidos com a finalidade de aumentar a margem de estabilidade do sistema.

Em [5] são apresentados os princípios de operação do *MCSR* e são realizadas análises de distribuição de fluxo magnético no núcleo do reator usando métodos de elementos finitos. Dessa maneira calculam-se as correntes nos enrolamentos de potência do *MCSR* para diferentes correntes CC nos enrolamentos de controle e obtêm-se a curva característica de controle (corrente no enrolamento de potência x corrente no enrolamento de controle). No artigo também é apresentado uma análise de distorção harmônica do equipamento.

Em [6] é apresentado uma análise da reatância de dispersão do *MCSR* durante a saturação do núcleo usando métodos de elementos finitos. As reflexões da variação da reatância de dispersão e seus efeitos na corrente no enrolamento de potência são evidenciados e o autor propõe um método para a análise de *MCSRs* em sistema de alta e extra-alta tensão.

Em [7] não é discutido aspectos específicos de reatores controlados por saturação, mas propõe-se um o conceito de núcleo normalizado para transformadores com várias pernas para modelos do tipo UMEC. O artigo demonstra como especificar de parâmetros para o modelo UMEC sem necessariamente possuir dados como a geometria do núcleo ferromagnético.

Em [8] é aplicado e estendido o conceito de núcleo normalizado (UMEC) para um transformador trifásico de cinco pernas. Uma metodologia para a obtenção da permeabilidade magnética (usando núcleo normalizado) é proposta. Uma comparação entre transformadores trifásicos com três e cinco pernas durante ensaios de curto circuito, sobretensão e abertura de circuito é realizada.

Em [9] é apresentado o histórico de desenvolvimento e aplicação de reatores controlados por saturação. O artigo mostra diversas ocasiões em que o *MCSR* foi solução técnica e o estado da

tecnologia atualmente, ressaltando as capacidades e benefícios do equipamento para sistemas de transmissão de energia em geral.

Em [10] é apresentado o resultado direto deste trabalho e contém alguns dos resultados obtidos pelo autor durante a elaboração desta pesquisa. O conteúdo do artigo é relativo, principalmente, ao capítulo 6.

[11] é uma publicação de um fabricante de equipamentos do tipo *MCSR* onde é discutida a evolução da tecnologia e as suas vantagens principalmente quando associados a bancos de capacitores comutados ou não. Também são dadas informações técnicas específicas a respeito do equipamento, como peso específico (kg/kVAr), perdas em vazio (W/kVAr) e perdas no cobre (W/kVAr). No artigo ficam evidenciadas diversas situações reais em que o emprego desse tipo de equipamento mostrou-se solução técnica adequada. O artigo conclui que reatores controlados por saturação possuem grande versatilidade e, com a evolução da tecnologia, apresentam-se cada vez mais atraentes e aumentam mais ainda o seu campo de atuação.

Em [12] são abordados aspectos relativos a utilidade do *MCSR*, bem como suas características de funcionamento e operação. O artigo ainda apresenta uma análise harmônica do equipamento e realiza um modelo no programa Matlab/Simulink para realizar simulações. No artigo também é apresentado um estudo de estabilidade em um trecho do sistema elétrico brasileiro usando *MCSRs*.

Em [13] são apresentados os conceitos, princípios de funcionamento e características do *MCSR*. A pesquisa propõe um modelo matemático para análise e uso em programas de transitórios eletromagnéticos. Usando as premissas (basicamente um enrolamento para circulação de terceira harmônica) e conceitos adotados no artigo o autor mostra através de seu modelo matemático que a injeção de corrente harmônica pelo *MCSR* é muito pequena.

A tese de doutorado [17] aborda os reatores de saturação natural (Friedlander). Na pesquisa é apresentada a evolução da tecnologia e seu emprego ao redor do globo. No trabalho ficam esclarecidos aspectos teóricos e técnicos acerca desse tipo de reator. A contribuição do autor é relativa a uma nova técnica desenvolvida para o projeto básico de reatores de saturação natural. Também é montado um protótipo e realizadas simulações em programa de transitório eletromagnético. Os resultados são então comparados.

3. O MCSR (Reatores Controlados por Saturação)

O MCSR é um equipamento de controle ativo do nível de tensão da barra em que está conectado (em paralelo). Através do controle da saturação do núcleo ferromagnético o consumo de potência reativa indutiva é alterado e assim é possível regular a tensão na barra. O seu efeito é o equivalente a diminuir ou aumentar a secção transversal do núcleo de maneira a alterar a indutância equivalente do reator vista pelo sistema.

Figura 1 Representação simplificada do MCSR [3].

Na figura 1 observam-se seis enrolamentos. Quatro são enrolamentos de potência (L1, L3, L4 e L6) e dois são de controle (L2 e L5). A eletrônica de potência conectada nos enrolamentos de controle é responsável por injetar um valor de corrente contínua e deslocar a curva de saturação do reator. Dessa maneira é possível variar a condição de operação do equipamento indo de não saturado até completamente saturado. Para uma curva de saturação com inclinação de 33% estima-se que a potência reativa consumida possa chegar a três vezes o valor nominal de operação (com o núcleo totalmente saturado). Os sentidos da corrente nos enrolamentos das bobinas representadas por L2 e L5 são contrários e, portanto o fluxo produzido por essas bobinas tem sentidos opostos. A ideia é que cada braço do reator representado na figura 1 sature durante semiciclos diferentes. Assumindo que a tensão aplicada aos enrolamentos de potência seja a mesma a distorção na corrente acontece apenas para o lado positivo em um braço e negativo no outro e a soma das duas correntes no nó de conexão com o sistema é simétrica.

A saturação do reator permite apenas o aumento da potência reativa consumida no sistema, e caso opere em condição parcialmente saturada ocorrerá a injeção de harmônicas na rede,

portanto, é desejável que durante operação normal o reator trabalhe não saturado. Caso seja necessário é possível, através de projeto adequado, conceber um *MCSR* que trabalhe parcialmente saturado em regime permanente e assim durante mudanças de carregamento da linha é possível variar a potência reativa injetada para mais ou para menos. Se a injeção de harmônicas for característica restritiva e a instalação de filtros for custosamente proibitiva essa limitação faz com que seja possível apenas aumentar a potência reativa indutiva consumida e restringe o seu campo de aplicações para linhas muitas vezes operando abaixo de sua potência característica. As figuras 2 e 3 mostram a corrente absorvida pelo reator em condição não saturada e devido a uma saturação parcial (em apenas uma coluna do núcleo).

Figura 2 *MCSR* não saturado.

Figura 3 *MCSR* saturado (lado superior da senoide).

Na figura 3 observa-se a distorção da corrente. Essa distorção sugere que sejam feitos estudos no sistema em que se pretende aplicar o *MCSR* para averiguar se os efeitos da corrente harmônica injetada requerem a instalação de filtros.

A grande vantagem do *MCSR* sobre outros equipamentos de controle ativo de reativos é o seu baixo custo. A eletrônica de potência envolvida na sua construção deve possuir capacidade cerca de 1% a 3% [11][13] da potência nominal consumida pelo reator. O principal custo de equipamentos como compensadores estáticos é o elevado preço da eletrônica de potência, principalmente porque devem ter capacidade igual à potência de trabalho do CER. O *MCSR* pode não possuir a mesma versatilidade e rapidez de um compensador estático, porém destaca-se pelo seu preço reduzido.

Na figura 1 foi representado apenas um dos blocos do *MCSR* (usado em uma fase do sistema trifásico), para a aplicação no sistema elétrico é necessário um bloco para cada fase. Portanto devem-se acrescentar outros dois blocos iguais ao da figura 1 para as demais fases.

A eletrônica de potência usada para o controle da saturação do núcleo pode ser a mesma para os circuitos magnéticos das três fases. O *MCSR* deve ter um comportamento equilibrado e assim a corrente CC injetada nos enrolamentos de controle deve ter o mesmo valor em todas as fases. A figura 4 ilustra um reator magneticamente controlado trifásico.

Figura 4 *MCSR* sistema trifásico [5].

Da mesma maneira como na figura 1, na figura 4 observa-se que para cada fase o reator saturável possui dois braços com um total de, no mínimo, quatro enrolamentos. Idealmente as fases devem estar magneticamente isoladas para evitar acoplamento mútuo do fluxo entre fases. A figura 4 apresenta uma possível configuração para o *MCSR*. Isolar magneticamente as fases pode se tornar uma tarefa difícil, uma vez que o reator deverá operar saturado, o fluxo magnético pode se fechar por diversos caminhos, inclusive pelas bobinas de outra fase. Outra preocupação adicional com esse tipo de reator é a concentração de fluxo na carcaça do equipamento. O fato de operar saturado (total ou parcialmente) pode fazer com que o fluxo magnético induza correntes nas camadas externas produzindo calor.

Neste trabalho não serão avaliadas características e complicações mecânicas na construção do *MCSR*. O foco é avaliar o circuito magnético, a eletrônica de potência, sua atuação no sistema elétrico através de simulações e estimar seu custo para comparação com equipamentos já bem difundidos no mercado.

4. MCSR – Características eletromagnéticas

Para a melhor compreensão do funcionamento do *MCSR*, procurou-se avaliar a saturação do núcleo ferromagnético quando dois enrolamentos, um de potência e um de controle são sobrepostos. O enrolamento de potência está conectado a um sistema CA, e, portanto, a tensão aplicada a esse enrolamento é a tensão alternada do sistema, o enrolamento de controle está conectado a um retificador controlado que terá o objetivo de injetar corrente contínua para manter o módulo da tensão CA no ponto de conexão dentro do valor alvo.

Dois métodos foram usados para verificar como ocorre a saturação no núcleo ferromagnético do reator. O primeiro método consistiu na avaliação do modelo elétrico convencional de um transformador (apresentado na figura 5) com indutância de magnetização variável para a representação da saturação. No segundo método foi utilizado o modelo de transformador UMEC (*Unified Magnetic Equivalent Circuit*) [7] do software de transitórios eletromagnéticos PSCAD. Em ambos os casos o primário do transformador está conectado ao sistema elétrico CA, modelado como um barramento infinito, e no secundário está a eletrônica de potência, representada como uma fonte de corrente.

4.1. Modelo Elétrico Equivalente

Uma primeira análise do comportamento do reator controlado por saturação foi realizada utilizando o modelo elétrico equivalente apresentado na figura 5.

A reatância de magnetização X_{mag} foi modelada de forma não linear, a saturação inicia em 1 pu de tensão (joelho da curva). A inclinação da reta na zona de saturação é uma característica de projeto assumindo valores típicos de 25%, 33%, 50%, etc. Foram realizadas duas simulações do modelo elétrico, na primeira utilizou-se uma indutância de magnetização modelada pela figura 6 (transição de inclinação de 100% para 50%) e na segunda utilizou-se uma indutância de magnetização modelada pela figura 7 (transição de inclinação de 100% para 25%).

Figura 5 Modelo elétrico simplificado de um transformador com primário conectado ao sistema CA e secundário a uma fonte de corrente CC.

O modelo de transformador acima é simplificado e foi usado como ponto de partida para a compreensão do *MCSR*. A eletrônica de potência procura injetar um nível contínuo de corrente nas bobinas de controle do reator, logo a reatância de dispersão L_{disp2} não influencia na resolução do circuito (pois não há “queda de tensão”). Portanto, foi considerada (somada) na reatância de dispersão do primário L_{disp1} , ou seja, todo o efeito de dispersão no núcleo ferromagnético foi rebatido para o primário. A corrente I_1 é a corrente circulando no primário, I_2 é a corrente circulando no secundário, I' é a corrente passando por R_m e I'' é a corrente passando por L_{mag} . L_{disp} representa a dispersão de fluxo no primário do transformador, R_s representa as perdas no enrolamento da bobina e R_m representa as perdas no ferro do núcleo do reator. As curvas de magnetização adotadas para L_{mag} são apresentadas abaixo.

Figura 6 Curva de saturação para L_{mag} (mudança de inclinação para 50%).

Figura 7 Curva de saturação para L_{mag} (mudança de inclinação para 25%).

O equacionamento do circuito elétrico da figura 5 é apresentando a seguir:

$$V_{sis}(t) = R_s \cdot I_1(t) + L_{disp1} \cdot \frac{dI_1(t)}{dt} + V_m(t) \quad (1)$$

$$V_m(t) = I'(t) \cdot R_m = L_{mag} \cdot \frac{dI''(t)}{dt} \quad (2)$$

$$I'(t) = I_1(t) - I''(t) \quad (3)$$

As equações 1, 2 e 3 descrevem o circuito da figura 5. Para a resolução do circuito elétrico do reator foi usada uma planilha Excel e as equações reescritas na forma de equações de diferenças.

$$I_1(t + \Delta t) = (V_{sis}(t) - R_s \cdot I_1(t) - V_m(t)) \cdot \frac{\Delta t}{L_{disp1}} + I_1(t) \quad (4)$$

$$V_m(t) = I'(t) \cdot R_m \quad (5)$$

$$I''(t + \Delta t) = \frac{R_m}{L_{mag}} \cdot \Delta t \cdot I'(t) + I''(t) \quad (6)$$

Usando as equações acima e escolhendo os valores iniciais das correntes iguais a zero é possível resolver o circuito elétrico do reator. Foi assumido que a tensão V_m é uma senóide de amplitude 1 pu, frequência 60 Hz e com valor 0 em t_0 . A corrente I_2 não circula fisicamente no enrolamento primário, mas influencia na magnetização de L_{mag} , em outras palavras, I_2 influencia as equações apresentadas na medida em que muda a indutância L_{mag} vista pelo enrolamento de potência. Na simulação realizada a corrente I_2 está presente já muito antes da tensão V_{sis} ser imposta no enrolamento primário do reator, qualquer transitório devido a I_2

aconteceu antes do início da simulação e o ponto de operação na curva da figura 6 devido a I_2 já está estabelecido. Essa característica simplifica a contabilização do efeito de I_2 sobre o circuito, uma vez que a corrente é contínua e, passado o transitório, circula integralmente por L_{mag} (não se divide em R_m e L_{mag}).

Para a representação da curva de saturação da figura 6 no circuito elétrico do reator é necessário uma mudança no valor da indutância de L_{mag} caso o joelho da saturação seja ultrapassado. Como a saturação foi representada por dois segmentos de reta (uma simplificação da curva real) e sua inclinação muda de 100% para 50% (ou 25%), L_{mag} pode assumir apenas dois valores 1 pu ou 0,5 pu (0,25 pu). A tensão V_{sis} é senoidal e, portanto induz fluxo nos dois sentidos, ou seja, pode fazer com que L_{mag} transite entre as regiões de saturação e não saturação. É preciso contabilizar conjuntamente os fluxos induzidos pelas correntes I'' e I_2 . Como o circuito não é linear, pois L_{mag} assume dois possíveis valores é necessário que o fluxo acumulado no núcleo seja contabilizado a cada passo de integração, ou seja, uma variação de corrente induzirá uma variação de fluxo no núcleo que deverá ser calculado instantaneamente de acordo com a curva de saturação da figura 6 e somado ao fluxo acumulado até o passo anterior.

$$\Delta I = I(t) - I(t - \Delta t) \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \varphi(t - \Delta t) + \Delta I \cdot L_{mag} \quad (8)$$

Como I_2 é constante, ΔI é a variação de I'' entre um passo e outro. Se o fluxo φ ultrapassar o joelho da saturação, ou seja, 1 pu, altera-se o valor de L_{mag} , ou seja, a mudança em L_{mag} deve acontecer no mesmo passo de integração em que φ ultrapassa seu valor máximo não saturado. Para garantir que L_{mag} seja alterado no instante correto o algoritmo implementado na planilha Excel realiza uma predição de segunda ordem (Taylor de segunda ordem), estimando assim o valor que o fluxo total acumulado assumirá no próximo passo de integração. É fundamental utilizar o valor correto de L_{mag} na contabilização do fluxo, portanto a predição precisa estar correta e deve ser checada a cada passo da simulação. Esse método mostrou-se eficaz, principalmente por não haver variações em V_m (V_m é a mesma senóide por toda a simulação) e por ter sido usado um passo de integração pequeno (0,1 graus elétricos).

Como o circuito conectado ao enrolamento secundário será responsável por regular o valor de I_2 é importante para o correto projeto, dimensionamento e controle, conhecer o comportamento da indutância vista pelo secundário. Espera-se que a indutância de

magnetização não seja bem representada pelas curvas das figuras 6 e 7 na medida em que I_2 varia. Para conhecer melhor o comportamento e traçar uma nova curva de “saturação” para o reator iniciou-se a simulação com diferentes valores de I_2 e calculou-se o fluxo induzido pela fonte de corrente e o fluxo total médio no núcleo do reator. Os resultados são apresentados na figura 8 e 9 abaixo.

Figura 8 Fluxo induzido pela fonte de corrente (Φ_2) e fluxo total médio no reator (50%).

Figura 9 Fluxo induzido pela fonte de corrente (Φ_2) e fluxo total médio no núcleo do reator (25%).

O fluxo total no núcleo do reator é a soma dos fluxos induzidos nos circuitos primário e secundário. Nas figuras 8 e 9 Φ_2 é o fluxo induzido pela fonte de corrente quando o primário está em aberto. Pode-se perceber que a curva de Φ_2 é praticamente a mesma das figuras 6 e 7. Φ_{T_m} é calculado quando uma tensão V_{sis} de 1 pu é aplicada no circuito primário, o fluxo total médio é então calculado como o valor médio da soma dos fluxos induzidos no primário e secundário (Φ_{I_m} e Φ_2). Nas tabelas 1 e 2 são apresentados resumos dos resultados das simulações.

Tabela 1 Resultados da simulação (50% de inclinação).

I2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Φ_2	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
Φ_{I_m}	0,00	-0,01	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,13	-0,15	-0,18	-0,21	-0,19	-0,17	-0,15	-0,14	-0,12
Φ_{T_m}	0,00	0,09	0,18	0,26	0,34	0,42	0,50	0,57	0,65	0,72	0,79	0,86	0,93	0,99	1,06	1,13

I2	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Φ_2	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,84	1,90	1,95	2,00
Φ_{I_m}	-0,12	-0,11	-0,09	-0,08	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Φ_{T_m}	1,13	1,19	1,26	1,32	1,38	1,45	1,51	1,57	1,62	1,68	1,74	1,79	1,84	1,90	1,95	2,00

Tabela 2 Resultados da simulação (25% de inclinação).

I2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Φ_2	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,02	1,05	1,08	1,10
Φ_{I_m}	0,00	-0,02	-0,05	-0,08	-0,12	-0,16	-0,20	-0,24	-0,28	-0,34	-0,38	-0,36	-0,34	-0,31	-0,29
Φ_{T_m}	0,00	0,08	0,15	0,22	0,28	0,34	0,40	0,46	0,52	0,56	0,62	0,66	0,71	0,76	0,81

I2	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
Φ_2	1,12	1,15	1,17	1,20	1,22	1,25	1,27	1,30	1,32	1,35	1,37	1,40	1,43	1,45	1,48
Φ_{I_m}	-0,27	-0,25	-0,23	-0,21	-0,20	-0,18	-0,16	-0,15	-0,13	-0,12	-0,11	-0,09	-0,08	-0,07	-0,06
Φ_{T_m}	0,86	0,90	0,94	0,98	1,02	1,07	1,11	1,15	1,19	1,23	1,27	1,30	1,34	1,38	1,42

I2	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4
Φ_2	1,50	1,52	1,55	1,58	1,60	1,63	1,65	1,68	1,70	1,73	1,75	1,78	1,80	1,83	1,86
Φ_{I_m}	-0,05	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Φ_{T_m}	1,45	1,48	1,51	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67	1,70	1,73	1,75	1,78	1,80	1,83	1,86

A tensão aplicada no primário do transformador é senoidal com valor médio zero, porém verificou-se nas simulações I'' possui um valor médio na medida em que o reator satura parcialmente. A explicação para isso é a distorção da corrente criada pela saturação do núcleo que acontece apenas durante meio ciclo (no caso das simulações do MEQ, durante o meio

ciclo positivo). A figura 10 apresenta um gráfico em que é possível constatar a distorção da corrente.

Figura 10 Correntes circulando no reator quando I_2 é 1,5 pu. No eixo das abscissas o tempo esta em segundos e no eixo da ordenadas a corrente esta em pu (saturação 50%).

A assimetria da corrente circulando na reatância de magnetização do reator cria um valor médio. Esse valor médio é responsável por criar um fluxo que tende a desmagnetizar o núcleo, ou seja, se opõe ao fluxo médio gerado pela fonte de corrente no secundário, explicando a diferença nas curvas Φ_{IT_m} e Φ_{i2} nas figuras 8 e 9. Nas tabelas 1 e 2 é fácil verificar que $\Phi_{i1_m} + \Phi_{i2} = \Phi_{IT_m}$. A soma dos valores médios do fluxo gerado no primário e no secundário é o valor médio do fluxo resultante no núcleo do reator. O resultado apresentado na figura 7 demonstra que para a saturação completa do núcleo do reator é necessário um valor maior de corrente imposta no secundário (para compensar pela desmagnetização causada pela assimetria da corrente no primário). Nas tabelas 1 e 2 verifica-se que o valor médio de I'' desaparece apenas quando I_2 é aproximadamente 2,8 pu (para 50% de inclinação na saturação) e 3,8 pu (para 25% de inclinação na saturação). Na figura 11 é apresentado um gráfico com as correntes no reator quando este está completamente saturado no caso de 50% de inclinação na saturação, ou seja, quando I_2 é 2,8 pu.

Figura 11 Correntes circulando no reator quando I_2 é 2,8 pu. No eixo das abscissas o tempo está em segundos e no eixo da ordenadas a corrente está em pu (saturação 50%).

Na figura 11 o reator está operando durante todo o ciclo de corrente na região saturada, portanto não há distorção na forma de onda. Como nessa região de operação a indutância vista pelo reator é metade espera-se que a potência reativa consumida seja próxima do dobro em relação à operação na região não saturada (para 50% de inclinação). A tensão V_{sis} é de 1 pu e a corrente circulando no primário, de acordo com a figura 11, é de aproximadamente 1,7 pu de maneira que a potência reativa consumida quando operando saturado é de 1,7 pu. Como esperado a potência reativa chega a ser quase o dobro do valor nominal de operação, a diferença acontece principalmente devido a queda de tensão em R_s . Na tabela 3 são apresentados os dados usados na simulação do circuito elétrico mostrado na figura 5.

Tabela 3 Dados do circuito elétrico do reator.

Reator	
V_{sis} (pu)	1,0
L_{disp1} (pu)	0,038
R_s (pu)	0,2
R_m (pu)	25,0
L_{mag} (pu)	1,0/0,5 ou 0,25
L_{disp2} (pu)	0
Δt (graus elétricos)	0,1

Na tabela 3 estão todos os dados do circuito elétrico usados nas simulações. V_{sis} possui forma de onda senoidal, frequência 60 Hz e amplitude de 1 pu, Δt é o passo de integração usado para a resolução das equações de diferenças (4 a 8).

4.2. O modelo UMEC e PSCAD

O transformador é um equipamento fundamental em sistemas de potência. A criação de modelos que representem suas características físicas é de suma importância. Diferentes estudos exigem diferentes níveis de detalhamento e complexidade. Para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas trifásicos muitas vezes é necessário modelos que representem o acoplamento do circuito magnético entre fases, que considerem a variação dos parâmetros em função da frequência, efeitos da saturação e histerese do material ferromagnético. Porém, para os estudos que são o foco desse trabalho, estabilidade, fluxo de potência e alguns transitórios eletromagnéticos lentos, modelos menos complexos podem ser empregados.

Os modelos tradicionais de transformadores para programas de transitórios eletromagnéticos representam o equipamento pelo seu equivalente elétrico composto por resistores, indutores e capacitores. A maioria dos programas usam modelos de transformadores baseados no circuito equivalente de Steinmetz (parecido com o modelo usado na seção anterior figura 5). A vantagem desses modelos é que seus parâmetros podem ser facilmente obtidos através dos testes convencionais de curto-circuito e circuito aberto (vazio), porém não representam adequadamente transformadores trifásicos em que o núcleo possui vários braços e o fluxo se distribui de maneira não uniforme. O modelo de transformador UMEC leva em consideração a geometria do núcleo e os efeitos de dispersão do fluxo para gerar uma matriz de indutância e criar uma representação elétrica equivalente mais adequada. Apesar dos testes aqui realizados considerarem um transformador monofásico, utilizou-se o modelo UMEC para as simulações, pois é um modelo mais preciso.

A figura 12 representa um transformador trifásico de três enrolamentos com três braços. Na figura é possível visualizar os possíveis “caminhos” para o fluxo magnético. Na figura 13 é apresentado o circuito magnético equivalente.

Figura 12 “Caminhos” para o fluxo magnético[7].

Figura 13 Circuito magnético equivalente[7].

O modelo de transformador UMEC (Unified Magnetic Equivalent Circuit) é baseado na geometria do núcleo ferromagnético. Diferente dos modelos convencionais de transformador, o UMEC considera os efeitos de acoplamento entre enrolamentos de diferentes fases e acoplamento entre enrolamentos da mesma fase, também é geralmente incluído o efeito da saturação. Esse modelo de transformador está presente nas versões mais recentes do PSCAD e é adequado para estudos de transitórios eletromecânicos, como estabilidade, e transitórios

eletromagnéticos em que as frequências envolvidas atingem alguns poucos kHz. O modelo UMEC presente no PSCAD não representa os efeitos de capacitâncias parasitas, a histerese do material ferromagnético, a variação dos parâmetros como resistência e indutância em função da frequência, portanto não representa adequadamente transitórios muito rápidos. A figura 14 representa o modelo UMEC de transformador do PSCAD.

Figura 14 Representação do modelo UMEC de transformador no PSCAD [15].

A relação tensão-corrente para os seis enrolamentos é dado pelo equacionamento a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \cdots & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & \cdots & M_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{61} & M_{62} & \cdots & L_6 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde:

R_i é a resistência do enrolamento “ i ”.

L_i é a indutância própria do enrolamento “ i ”.

M_{ij} é a indutância mútua entre os enrolamentos “ i ” e “ j ”.

As indutâncias próprias e mútuas dependem das dimensões, geometria e propriedades magnéticas do núcleo e do número de espiras nos enrolamentos.

As medidas exatas das dimensões do núcleo ferromagnético e o número de espiras em cada enrolamento são informações que geralmente não estão disponíveis ao usuário. Dessa maneira o modelo UMEC deduz essas relações a partir de informações que são facilmente obtidas a partir de testes usuais a esses equipamentos como testes de circuito aberto e curto circuito. A figura 15 ilustra o fluxo magnético no núcleo do transformador devido a uma corrente no terceiro enrolamento.

Figura 15 Fluxo no núcleo ferromagnético devido a uma corrente no terceiro enrolamento [15].

Com uma corrente I_3 circulando no terceiro enrolamento e todos os outros enrolamentos mantidos em circuito aberto, as seguintes equações descrevem a relação fluxo e corrente:

$$N_3 \cdot I_3 = \mathcal{R}_w \cdot \Phi + \mathcal{R}_y \cdot \frac{\Phi}{2} + \mathcal{R}_w \cdot \frac{\Phi}{2} \quad (10)$$

Onde:

$\mathcal{R}_w$ é a relutância do braço do núcleo ferromagnético (onde se colocam os enrolamentos).

$\mathcal{R}_y$ é a relutância da “base” do núcleo ferromagnético.

ℓ_i designa o comprimento físico do braço (w) ou da “base” (y) do núcleo.

A_i é a área da seção transversal do braço (w) ou da base (y) do núcleo.

P_i é a permeância do braço (w) ou do base (y) do núcleo.

Para este caso temos:

$$N_3 \cdot I_3 = \left(\frac{3}{P_w} + \frac{1}{P_y} \right) \cdot \frac{\Phi}{2} \quad (11)$$

A indutância própria é definida como:

$$L_3 = \frac{N_3}{I_3} \cdot \frac{\Phi}{2} = \frac{2 \cdot N_3^2}{\left(\frac{3}{P_w} + \frac{1}{P_y} \right)} \quad (12)$$

A indutância mútua entre os enrolamentos 1 e 3 é definida como:

$$M_{13} = \frac{N_1}{I_3} \cdot \frac{\Phi}{2} = \frac{N_1 \cdot N_3}{\left(\frac{3}{P_w} + \frac{1}{P_y} \right)} \quad (13)$$

Expressões similares podem ser obtidas para os outros termos da equação (9).

Para que o usuário não precise entrar com dados como relutância e número de espiras, esses valores são extraídos da relação de tensão entre os enrolamentos, da curva de magnetização e da relação área do braço e área da base do núcleo (valores relativos).

Para a verificação dos resultados obtidos da simulação do modelo elétrico equivalente apresentado na figura 5 utilizou-se o PSCAD e o modelo de transformador UMEC em simulação como apresentado na figura 16.

Figura 16 Circuito montado no PSCAD para a representação do reator variável.

Da mesma maneira como realizado no circuito elétrico equivalente, o barramento CA em que o reator variável está conectado foi representado por uma fonte de tensão ideal, a eletrônica de potência conectada no secundário do reator foi modelada por uma fonte de corrente contínua. A entrada de dados e os parâmetros usados na simulação são apresentados na figura 17.

General		Currents		Currents	
Transformer name	T1	Point 1 - Current as a Percentage	0.0 [%]	Point 1 - Current as a Percentage	0.0 [%]
Transformer MVA	0.5 [kVA]	Point 2 - Current as a Percentage	100 [%]	Point 2 - Current as a Percentage	100 [%]
Primary voltage (RMS)	70.7107 [V]	Point 3 - Current as a Percentage	300 [%]	Point 3 - Current as a Percentage	500 [%]
Secondary voltage (RMS)	70.7107 [V]	Point 4 - Current as a Percentage	0.0	Point 4 - Current as a Percentage	0.0
Base operation frequency	60.0 [Hz]	Point 5 - Current as a Percentage	0.0	Point 5 - Current as a Percentage	0.0
Leakage reactance	0.0377 [pu]	Point 6 - Current as a Percentage	0.0	Point 6 - Current as a Percentage	0.0
No load losses	0.04 [pu]	Point 7 - Current as a Percentage	0.0	Point 7 - Current as a Percentage	0.0
Copper losses	0.4 [pu]	Point 8 - Current as a Percentage	0.0	Point 8 - Current as a Percentage	0.0
Model saturation?	Yes	Point 9 - Current as a Percentage	0.0	Point 9 - Current as a Percentage	0.0
Tap changer winding	None	Point 10 - Current as a Percentage	0.0	Point 10 - Current as a Percentage	0.0
Graphics Display	Windings	Voltages		Voltages	
		Point 1 - Voltage in pu	0.0 [pu]	Point 1 - Voltage in pu	0.0 [pu]
		Point 2 - Voltage in pu	1.0 [pu]	Point 2 - Voltage in pu	1.0 [pu]
		Point 3 - Voltage in pu	2.0 [pu]	Point 3 - Voltage in pu	2.0 [pu]
		Point 4 - Voltage in pu	0.0	Point 4 - Voltage in pu	0.0
		Point 5 - Voltage in pu	0.0	Point 5 - Voltage in pu	0.0
		Point 6 - Voltage in pu	0.0	Point 6 - Voltage in pu	0.0
		Point 7 - Voltage in pu	0.0	Point 7 - Voltage in pu	0.0
		Point 8 - Voltage in pu	0.0	Point 8 - Voltage in pu	0.0
		Point 9 - Voltage in pu	0.0	Point 9 - Voltage in pu	0.0
		Point 10 - Voltage in pu	0.0	Point 10 - Voltage in pu	0.0

Figura 17 Dados do transformador (modelo UMEC) usados na simulação no PSCAD.

Na figura 17, na região designada por “General” devem-se inserir os dados gerais do transformador. “Leakage reactance” representa a reatância de dispersão e o valor usado foi o

mesmo do L_{disp1} do circuito elétrico equivalente, “*No load losses*” representa as perdas no material ferromagnético, o valor usado foi o valor de R_m e “*Cooper losses*” representa as perdas nos enrolamentos do transformador, o valor usado foi o dobro do valor de R_s , pois o modelo UMEC distribui uma resistência equivalente que depende do número de espiras em cada enrolamento. As tensões no primário e secundário são iguais, portanto a resistência é dividida igualmente entre os enrolamentos. Como se desejou manter a resistência do enrolamento primário igual a R_s adotou-se duas vezes o valor de R_s para “*Cooper losses*”. Outro dado importante para o modelo UMEC são as dimensões do núcleo ferromagnético, porém o PSCAD adota o conceito de núcleo normalizado (explicado em [7]) e, portanto as dimensões exatas do núcleo não são necessárias. A informação que deve ser fornecida é a razão dos comprimentos e das áreas do braço e da base do núcleo (como mostrado na figura 18).

General	
Ratio yoke/winding-limb length	1.0
Ratio yoke/winding-limb area	1.0

Figura 18 Razão entre comprimentos e áreas dos braços com as bases do núcleo ferromagnético. Deve ser informado no modelo UMEC do PSCAD.

Como a simulação realizada possui caráter investigativo, ou seja, não pretende representar um equipamento real, a razão escolhidas para o núcleo do reator, tanto para o comprimento como para a área foi 1. Na figura 17 na parte central e à direita vemos duas colunas replicadas, mas com valores diferentes em seus parâmetros. A coluna na parte central da figura representa a saturação com inclinação de 50% e a coluna na direita representa a saturação com inclinação de 25%. Em ambas as colunas a partir do quarto ponto na curva os valores conseguintes são zero. A partir do primeiro zero o PSCAD interpola o ponto seguinte mantendo a inclinação do ponto anterior.

Os resultados obtidos com o PSCAD são mostrados nas figuras (19 a 21) a seguir.

Figura 19 Fluxos no primário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).

Figura 20 Fluxos no secundário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).

Figura 21 Fluxos no primário e no secundário do transformador (reator) com excitação no primário (valores médios).

Nas figuras 19 a 21 pode-se ver os fluxos médios no primário e no secundário do transformador (reator) para uma saturação com inclinação 25% ocorrendo em 1 pu de tensão. Na figura 21 é verificado que existe uma diferença nas curvas do primário e secundário devido ao efeito de dispersão. O efeito de dispersão é mais bem representado no modelo UMEC do PSCAD, pois é calculado em todos os enrolamentos. Não existe maneira de medir os fluxos no primário e secundário do reator usando o modelo elétrico (figura 5), apenas inferir pelas correntes I_2 e I'' . O PSCAD divide a indutância de dispersão nos enrolamentos primário e secundário e também representa a resistência de ambos os enrolamentos, portanto existe uma diferença quando verificamos o fluxo médio no núcleo usando medições no enrolamento primário (potência) e enrolamento secundário (controle). Nas figuras 22 a 24 é mostrado gráficos dos fluxos médios no primário e no secundário do transformador (reator) para uma saturação com inclinação 50% ocorrendo a partir de 1 pu de tensão.

Figura 22 Fluxos no primário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).

Figura 23 Fluxos no secundário do transformador (reator). Em azul sem excitação no primário. Em verde com excitação no primário (valores médios).

Figura 24 Fluxos no primário e no secundário do transformador (reator) com excitação no primário (valores médios).

Na figura 24 é verificado que existe uma diferença nas curvas referentes ao primário e secundário do transformador devido ao efeito de dispersão.

As figuras 25 e 26 mostram as formas de onda obtidas em simulação no PSCAD usando o modelo UMEC de transformador com saturação em 1 pu de tensão e inclinação de 50%.

Figura 25 Correntes circulando no reator quando I_2 é 1,5 pu. No eixo das abscissas o tempo está em segundos e no eixo da ordenadas a corrente está em pu.

Figura 26 Correntes circulando no reator quando I_2 é 2,8 pu. No eixo das abscissas o tempo está em segundos e no eixo da ordenadas a corrente está em pu.

Na figura 25 a corrente injetada no enrolamento de controle do reator foi de 1,5 pu, é possível verificar, observando a distorção da corrente, que o reator está operando parcialmente saturado. Na figura 26 a injeção de corrente no enrolamento de controle é de 2,8 pu, não há distorção na corrente, pois o reator está operando totalmente saturado.

Os resultados obtidos do programa PSCAD (o modelo UMEC de transformador) e o modelo elétrico equivalente apresentado na seção anterior são semelhantes e serão comparados na próxima seção.

4.3. Comparação da simulação do Modelo Elétrico Equivalente (MEQ) e modelo UMEC do PSCAD e Considerações.

Nas figuras (27 a 30) a seguir os resultados obtidos com as simulações do Modelo Elétrico Equivalente (MEQ) (ilustrado na figura 5) e das simulações no PSCAD do modelo de transformador UMEC são sobrepostos.

Figura 27 Fluxo médio no enrolamento de potência do reator para uma inclinação de 25% na saturação. Curvas obtidas do (MEQ) e do PSCAD.

Figura 28 Fluxo médio no enrolamento de potência do reator para uma inclinação de 50% na saturação. Curvas obtidas do Modelo Elétrico Equivalente (MEQ) e do PSCAD.

Nas figuras 27 e 28 é possível comparar os resultados obtidos no PSCAD e no modelo elétrico equivalente para o valor médio do fluxo no enrolamento de potência em função da corrente injetada no enrolamento de controle do reator saturável. Em ambas as figuras as curvas adquiridas são bastante próximas, a diferença aumenta na medida em que é injetado um valor maior de corrente no enrolamento de controle, pois a representação da dispersão é diferente nos modelos. A representação no PSCAD é mais próxima do real, pois no MEQ o

efeito da dispersão é inteiramente representado no enrolamento de potência (circuito primário) de maneira que todo o fluxo gerado pela corrente injetada no enrolamento de controle (circuito secundário) concatena com o circuito primário.

As figuras 28 e 29 apresentadas a seguir sobrepõem as formas de onda da corrente quando o circuito primário é submetido a uma tensão de 1 pu e no enrolamento de controle é injetado uma corrente de 1,5 e 2,8 pu.

Figura 29 Corrente circulando no circuito primário (enrolamento de potência) do reator quando I_2 é 1,5 pu.

Figura 30 Corrente circulando no circuito primário (enrolamento de potência) do reator quando I_2 é 2,8 pu.

Nas figuras 29 e 30 é possível comparar as correntes no enrolamento de potência do reator quando I_2 é 1,5 pu (figura 29) e 2,8 pu (figura 30). Em ambas as figuras percebe-se que as correntes obtidas pelo CEQ e no PSCAD são muito próximas. As diferenças advêm principalmente da maneira como o efeito de dispersão de fluxo é representado nos modelos.

Pelas comparações realizadas nas figuras 27 a 30 constata-se que o Modelo Elétrico Equivalente representa adequadamente o reator saturável em regime permanente, uma vez que quando comparado com um modelo já muito estudado e avaliado, o UMEC, os resultados apresentados são bastante parecidos. As diferenças encontradas são pequenas e não representam erros significativos.

As investigações realizadas e documentadas nesta seção tiveram o objetivo de esclarecer o comportamento do reator controlado por saturação no âmbito magnético e seu equivalente elétrico. As curvas de saturação vistas pelo enrolamento de controle mostradas nas figuras 27 e 28 são importantes, pois relacionam o fluxo médio gerado no núcleo ferromagnético e a corrente injetada no secundário. Essa característica é importante tanto para o projeto do reator como para sua modelagem em programas de transitórios eletromagnéticos e estabilidade.

As modelagens e simulações realizadas são de equipamentos monofásicos, e apenas “metade” do reator controlado por saturação foi representado. É importante lembrar que o equipamento real é composto por, pelo menos, dois enrolamentos de potência e dois enrolamentos de controle (como mostrado na figura 1). Pode-se imaginar, de maneira simplificada, que o *MCSR* é composto por dois MEQ, ou dois transformadores como o mostrado na figura 16, porém a corrente injetada no enrolamento de controle (secundário) em cada elemento é de sentido contrário. O fluxo induzido pela corrente contínua no núcleo de cada transformador tem sentido oposto e a corrente distorce em sentido contrário em cada elemento. Portanto a soma das correntes no nó de conexão é simétrica, ou seja, igualmente distorcida no semiciclo positivo e negativo. Essa simplificação só é verdadeira se cada “metade” do reator possuir um núcleo ferromagnético independente (magneticamente desacoplados), o nó de conexão for o mesmo e a corrente injetada for a mesma, porém induzindo o fluxo em sentidos opostos.

Na realidade espera-se que o reator saturável seja algo mais parecido como o que é mostrado na figura 1, ou seja, para um equipamento monofásico os dois enrolamentos de potência e os dois enrolamentos de controle estão magneticamente conectados pelo núcleo ferromagnético e haverá acoplamento magnético entre os quatro enrolamentos (potência e controle). A complexidade aumenta se imaginarmos que o equipamento usado na transmissão, ou seja, na

rede básica é trifásico e o núcleo ferromagnético é único para as três fases, pois dessa maneira haverá acoplamento magnético (indutâncias mútuas) entre os enrolamentos de potência e controle das diferentes fases.

A modelagem realizada neste trabalho não considera acoplamento magnético entre diferentes fases. Assumi-se que esses efeitos são de menor importância, pois não é desejável que sejam relevantes (e portanto serão amenizados no projeto). E em estudos de estabilidade e fluxo de potência geralmente não são considerados. Outra simplificação que não representa adequadamente o equipamento, principalmente durante transitórios eletromagnéticos e com relação a injeção de harmônicas na rede é a curva de saturação. Nas simulações realizadas a curva de saturação foi modelada por duas retas com inclinações diferentes, a mudança de inclinação acontece na região que seria considerada o “joelho” da curva. É possível afirmar seguramente que essa simplificação afeta principalmente a injeção de corrente harmônica, pois a forma de onda da corrente é proporcional ao fluxo magnético e, portanto, à curva de saturação. Também se espera que a representação simplificada da saturação afete transitórios eletromagnéticos rápidos, pois mudanças bruscas de corrente geram sobretensões maiores dependendo da indutância do reator e a curva de saturação nada mais é do que a representação da indutância do equipamento.

4.4. Característica Harmônica do *MCSR*.

Como verificado nas simulações anteriores sabe-se que o *MCSR* absorve uma corrente distorcida e, portanto injeta corrente harmônica na rede. É importante quantificar essa componente harmônica para verificar, principalmente, a necessidade do uso de filtros junto com o equipamento.

Nesta seção é apresentada uma análise simplificada da corrente harmônica absorvida pelo *MCSR*.

Figura 31 Ilustração do parâmetro de saturação α para um nível de saturação B .

$$\sin t_1 = \sin t_2 = B ; \alpha = t_2 - t_1 \quad (14)$$

$$t_2 = \pi - t_1 \rightarrow \alpha = \pi - 2.t_1 ; t_1 = \sin^{-1} B \rightarrow \alpha = \pi - 2.\sin^{-1} B \quad (15)$$

$$\sin^{-1} x = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} x \rightarrow \alpha = 2.\cos^{-1} B \quad (16)$$

Como:

$$B = \frac{B_j - B_d}{B_j} \rightarrow \alpha = 2.\cos^{-1} \left(\frac{B_j - B_d}{B_j} \right) \quad (17)$$

B representa o nível de saturação do núcleo ferromagnético

B_j representa o joelho da curva de saturação

B_d é o fluxo induzido pelo enrolamento de controle no núcleo ferromagnético

Para fins de análise e equacionamento da deformação da corrente absorvida pelo *MCSR* o parâmetro α na figura 31 representa a região em que o reator opera saturado. Na representação simplificada da curva de saturação (compostas por duas retas) a forma de onda da corrente em um dos enrolamentos, para uma tensão perfeitamente senoidal aplicada ao reator, é dada pela figura 32.

Figura 32 Forma de onda da corrente em um dos enrolamentos de potência (em uma das fases) do *MCSR*.

A forma de onda da figura 32 é em apenas um enrolamento de potência. Para cada fase devem-se ter dois e, portanto devemos somar a forma de onda da figura 32 com outra simétrica em relação ao eixo das abscissas. A figura 33 ilustra a forma de onda obtida em cada fase do reator para um fator de saturação α .

Figura 33 Forma de onda resultante da corrente em uma das fases do reator controlado por saturação.

A forma de onda apresentada na figura 33 é a corrente em uma fase do *MCSR*, resultado da soma das correntes nos enrolamentos de potência. Pela figura é possível inferir que o conteúdo harmônico presente na forma de onda depende tanto de α como da inclinação da reta representando a saturação do núcleo ferromagnético.

Para a avaliação do conteúdo harmônico injetado pelo *MCSR* no sistema variou-se α de 0 a 360 graus e avaliou-se o *THD* (*Total Harmonic Distortion*) para três inclinações de saturação diferentes (25%, 33% e 50%). O *THD* é definido como sendo igual à raiz quadrada da soma dos quadrados das harmônicas de 60 Hz normalizados em relação à fundamental. Os resultados são apresentados na próxima página na tabela 4. É importante apontar que na análise realizada considerou-se que a tensão aplicada ao reator é senoidal e livre de conteúdo harmônico.

Tabela 4 Avaliação do conteúdo harmônico injetado pelo *MCSR* para diferentes valores de α e de saturação.

Alfa (graus)	SATURAÇÃO 25%			SATURAÇÃO 33%			SATURAÇÃO 50%		
	THD Y	3º Harmônica	THD D	THD Y	3º Harmônica	THD D	THD Y	3º Harmônica	THD D
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10	0,25%	0,11%	0,21%	0,22%	0,10%	0,18%	0,20%	0,09%	0,17%
20	0,76%	0,39%	0,57%	0,53%	0,29%	0,40%	0,32%	0,18%	0,24%
30	1,85%	1,12%	1,35%	1,26%	0,77%	0,91%	0,67%	0,42%	0,47%
40	3,47%	2,40%	2,38%	2,35%	1,64%	1,60%	1,21%	0,86%	0,81%
50	5,48%	4,22%	3,43%	3,73%	2,89%	2,32%	1,92%	1,50%	1,18%
60	7,67%	6,44%	4,15%	5,27%	4,43%	2,84%	2,74%	2,32%	1,45%
70	9,81%	8,79%	4,21%	6,83%	6,12%	2,91%	3,59%	3,23%	1,50%
80	11,67%	10,95%	3,81%	8,25%	7,75%	2,68%	4,41%	4,15%	1,40%
90	13,15%	12,68%	3,36%	9,46%	9,12%	2,41%	5,15%	4,97%	1,29%
100	13,82%	13,55%	2,65%	10,12%	9,93%	1,93%	5,64%	5,53%	1,07%
110	14,00%	13,75%	2,39%	10,45%	10,27%	1,79%	5,96%	5,86%	1,02%
120	13,51%	13,12%	2,89%	10,29%	9,99%	2,20%	6,02%	5,84%	1,30%
130	12,40%	11,75%	3,87%	9,62%	9,12%	3,01%	5,77%	5,47%	1,81%
140	10,73%	9,79%	4,37%	8,48%	7,73%	3,46%	5,22%	4,76%	2,13%
150	8,58%	7,44%	4,18%	6,89%	5,97%	3,36%	4,35%	3,77%	2,12%
160	6,03%	4,90%	3,33%	4,92%	4,00%	2,72%	3,19%	2,59%	1,76%
170	3,16%	2,36%	1,93%	2,62%	1,96%	1,60%	1,75%	1,31%	1,07%
180	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
190	2,59%	1,93%	1,59%	2,17%	1,62%	1,33%	1,44%	1,07%	0,89%
200	4,47%	3,63%	2,47%	3,78%	3,08%	2,09%	2,58%	2,10%	1,43%
210	5,63%	4,89%	2,74%	4,81%	4,18%	2,34%	3,34%	2,90%	1,62%
220	6,22%	5,68%	2,52%	5,36%	4,89%	2,17%	3,77%	3,44%	1,53%
230	6,36%	6,03%	1,97%	5,51%	5,22%	1,71%	3,93%	3,72%	1,22%
240	6,16%	5,98%	1,31%	5,36%	5,21%	1,14%	3,86%	3,74%	0,83%
250	5,70%	5,60%	1,01%	4,99%	4,89%	0,89%	3,62%	3,55%	0,66%
260	5,07%	4,96%	1,05%	4,45%	4,35%	0,93%	3,25%	3,18%	0,70%
270	4,40%	4,22%	1,21%	3,88%	3,72%	1,07%	2,85%	2,72%	0,81%
280	3,61%	3,35%	1,27%	3,18%	2,95%	1,13%	2,35%	2,17%	0,86%
290	2,82%	2,49%	1,30%	2,49%	2,19%	1,16%	1,85%	1,61%	0,88%
300	2,08%	1,69%	1,20%	1,84%	1,49%	1,07%	1,37%	1,10%	0,82%
310	1,42%	1,03%	0,95%	1,26%	0,90%	0,85%	0,94%	0,66%	0,65%
320	0,87%	0,53%	0,65%	0,77%	0,46%	0,58%	0,58%	0,32%	0,45%
330	0,47%	0,19%	0,39%	0,42%	0,16%	0,35%	0,33%	0,10%	0,29%
340	0,24%	0,01%	0,22%	0,23%	0,01%	0,21%	0,21%	0,02%	0,19%
350	0,19%	0,07%	0,17%	0,19%	0,07%	0,17%	0,19%	0,07%	0,17%
360	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Na tabela 4 é apresentado o *THD* (Total Harmonic Distortion) da corrente absorvida pelo *MCSR* (quando conectado em estrela com centro aterrado), a parcela da terceira harmônica e a

distorção harmônica caso o reator fosse conectado em delta (desaparecendo os harmônicos múltiplos de 3). Na tabela percebe-se que o *THD* gerado pelo reator é bastante elevado e que a terceira harmônica é a principal responsável. Esse resultado sugere que uma possível solução técnica para o problema seria conectar o reator ao sistema elétrico em delta e confinar o conteúdo harmônico da terceira e seus múltiplos dentro desse enrolamento. Porém conectar o enrolamento de potência em triângulo implica em diversas dificuldades técnica, principalmente devido a questões de isolamento. Uma solução apontada em diversos artigos, e adotada por um fabricante, é conectar um enrolamento de compensação em delta (usada para suprir a fonte CC, por exemplo). Com isso em mente fez-se uma análise do *THD* eliminando a terceira e todos os seus demais múltiplos. O resultado está na terceira coluna para cada curva de saturação. A eliminação fez com que o *THD* que antes chegava a 14% agora não passe de 4,5%.

Com relação à inclinação da saturação do núcleo percebe-se que quanto menor for a inclinação maior será o conteúdo harmônico (como esperado) e que essa diferença é aproximadamente proporcional a razão entre as inclinações para os piores casos de *THD*.

Para o estudo harmônico apresentado nesta seção foram realizadas simplificações que certamente introduzem erros para uma avaliação fiel do equipamento real e seu desempenho em campo. A simetria da corrente absorvida pelos enrolamentos de potência, a tensão perfeitamente senoidal na barra do reator e, principalmente, a simplificação da característica de saturação do reator (aproximada por uma reta com inclinação diferente a partir do “joelho” da curva). Enquanto os efeitos de uma tensão distorcida ou da falta de simetria das correntes são de difícil avaliação e comparação com as respectivas simplificações, pode-se inferir com certa segurança que a simplificação da curva de saturação contribui para uma análise mais conservadora na medida em que, no equipamento real, a saturação ocorre de modo mais “suave”. A simplificação na saturação provavelmente contribui para um *THD* maior.

Na tabela 4 nas regiões em vermelho estão as piores condições de *THD* e nas regiões pintada em azul estão as condições em que o reator opera livre de conteúdo harmônico. É interessante perceber que, além das condições “não saturado” e “totalmente saturado” ($\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 360^\circ$ respectivamente), existe uma terceira situação em que o reator opera livre de conteúdo harmônico, quando $\alpha = 180^\circ$.

A análise realizada nesta seção permite concluir que caso a conexão do reator ao sistema elétrico seja em estrela será necessário o uso de filtros, uma vez que equipamentos com níveis

de conteúdo harmônico maiores que 3% geralmente não são permitidos. Porém a conexão em delta é promissora e poderia eliminar grande parte desse conteúdo harmônico e possivelmente dispensar o uso de filtros.

O objetivo deste trabalho não foi uma avaliação criteriosa do equipamento, mas sim, a partir das informações de fabricantes, elaborar um modelo de transitórios eletromecânicos para avaliar o seu uso no sistema elétrico brasileiro. O modelo apresentado na próxima seção é o equivalente para um *MCSR* em estrela e, portanto injeta conteúdo harmônico considerável. Para o estudo realizado considerou-se irrelevante o tipo de configuração do reator (em delta ou estrela).

5. MCSR – Modelo para Transitório Eletromecânico

Com base nas informações obtidas nos testes e nas simulações nas seções anteriores um modelo simplificado para o reator controlado por saturação é proposto. A figura 34 apresenta o modelo concebido.

Figura 34 Modelo proposto para o MCSR.

O modelo mostrado na figura 34 é uma simplificação. Desprezam-se efeitos de dispersão (L_{disp} na figura 5) e perdas no ferro (R_m na figura 5), pois são efeitos de ordem secundária e não têm grande impacto nos resultados de interesse, são efeitos mais importantes do ponto de vista do equipamento, para seu projeto e especificação. Espera-se que seja possível representar adequadamente transitórios eletromecânicos em que o principal objetivo é verificar os balanços de potência e as oscilações de frequência da rede.

De acordo com informações do fabricante e de artigos publicados [4] [11] [12] o MCSR atua para manter a tensão na barra em um determinado valor. O modelo apresentado na figura 34 procura controlar o valor *RMS* (*root mean square*) da componente fundamental da tensão na

barra. O erro de tensão serve de entrada para um PI (controlador proporcional integral). A saída desse PI é o alvo de tensão que deverá ser imposta ao enrolamento de controle, ou seja, é o valor alvo para a eletrônica de potência que está diretamente conectada no enrolamento secundário (controle) do *MCSR*. É comumente sabido que a velocidade de atuação da eletrônica de potência para atingir seus alvos de controle não excede mais do que alguns poucos ciclos da rede. Como será demonstrado mais adiante, o tempo de atuação do reator é limitado principalmente pela indutância vista pelo enrolamento secundário e não na velocidade de atuação das chaves, portanto especial atenção deve ser dada a este aspecto quando estudando o *MCSR*.

No modelo da Figura 34, as constantes multiplicando os sinais de entrada e saída (V_{inst} e I_{inst}), são constantes de conversão para valores por unidade. O polo 3 $\left(\frac{G}{1+sT}\right)$ indicado como enrolamento de controle que segue o PI caracteriza o atraso para a variação do fluxo no núcleo dos reatores. O PI é limitado a apenas valores positivos para evitar que haja a inversão da tensão contínua aplicado em cada braço do reator, pois para manter a coerência com o equipamento real e para que haja o devido funcionamento do modelo os valores devem ser sempre positivos em uma coluna do núcleo e sempre negativos na outra. O valor máximo na saída do PI é função da potência máxima de operação das chaves. Os dois polos que representam os enrolamentos de potência multiplicando o sinal $V_{inst}(pu)$ são idênticos e incluem as características como fator de qualidade, a relação L/R e a saturação. Os polos 4 e 5 representam o fluxo induzido no núcleo pelos enrolamentos de potência. Os polos 1 e 2 representam a relação *tensão x corrente* no sistema e são os polos que ditam a dinâmica de balanços de energia reativa entre a rede e o *MCSR*.

O bloco designado por “Polo 3: Controle” (figura 34) representa a relação entre a corrente contínua injetada no enrolamento de controle e o fluxo médio no núcleo do reator. O bloco deve representar as curvas apresentadas nas figuras 27 e 28. Essas curvas foram obtidas mantendo-se a tensão alternada no primário do reator (enrolamento de potência) em 1 pu e a sua forma muda caso essa tensão varie. Outro aspecto importante nas curvas (figuras 27 e 28) é que a sua forma não é a de uma reta. O bloco “Polo 3” é uma polo e, portanto é linear, não muda de acordo com a tensão na barra e sua representação é a de uma reta. Ou seja, o bloco “Polo 3” é uma simplificação. Para os estudos de estabilidade estima-se que essas simplificações não tenham relevância nos resultados.

Figura 35 Circuito elétrico equivalente representado pelo “Polo 3: Controle”.

A relação entre I e o fluxo médio mostrado nas figuras 27 e 28 será representado por uma reta, pois no modelo proposto na figura 34, o termo T_3 é constante e, portanto o valor de L (figura 32) é fixo. Deve-se escolher um valor de indutância que represente adequadamente a relação entre corrente injetada no secundário e fluxo médio no núcleo.

Figura 36 Fluxo médio no núcleo e possíveis aproximações.

Na figura 36 são apresentadas a relação entre fluxo médio induzido no núcleo ferromagnético em função da corrente contínua injetada no enrolamento de controle e duas possíveis aproximações que definirão a indutância L (figura 35) e serão informação para a determinação do polo 3 da figura 31. A RETA (2), em verde na figura 36, foi construída usando o método de mínimos quadrados para aproximar uma reta que passa pela origem da curva de fluxo médio (em azul). Apesar de ser a reta mais próxima da curva, a RETA (2) apresenta um grande erro em um ponto de grande interesse que é o momento em que o reator opera totalmente saturado, ou seja, quando o fluxo ϕ está próximo de 2 pu. Já RETA (1), em vermelho, foi traçada usando apenas o primeiro e o último ponto da curva de fluxo médio e,

portanto representa bem a relação entre o fluxo e a corrente injetada nessas extremidades. De acordo com a relação abaixo:

$$\varphi = LI \quad (20)$$

As indutâncias das retas 1 e 2 na figura 36 são respectivamente: $L(1) = 0,4$ e $L(2) = 0,473$. Os valores estão em pu. Como a indutância vista pelo enrolamento de controle afeta diretamente o desempenho do *MCSR*, pois caracteriza o atraso (T_3 na figura 31) do polo 3, é mais conservador escolher a reta 2 ($L = 0,473$).

No modelo proposto a saturação do reator foi representada por duas retas. A corrente contínua injetada no enrolamento de controle cria um fluxo magnético representado por $\Phi_{controle(eq)}$ na figura 34. A soma desse fluxo com o fluxo criado pelo enrolamento de potência é comparada com o valor máximo para a saturação do reator (Φ_{sat}), o “joelho” da curva de saturação. Caso a soma dos fluxos seja maior que o valor limite, as constantes de tempo T_1 e T_2 são alteradas. Se, por exemplo, a inclinação na saturação seja de 50% os valores de T_1 e T_2 são alterados para metade do valor nominal. É importante notar que existem dois polos que representam os enrolamentos de potência e dois comparadores para indicação da saturação, pois cada polo e respectivo comparador devem representar o *MCSR* durante o semiciclo positivo ou negativo.

A seguir será explicado como definir os parâmetros do modelo apresentado na figura 34.

O enrolamento de potência:

Para os polos 1 e 2, que representam o circuito de potência do *MCSR*, seus parâmetros são determinados em função da tensão e potência nominais de operação e do fator de qualidade do reator.

$$\frac{V_n^2}{S_n} = \omega L \rightarrow L = \frac{V_n^2}{S_n \omega} \quad (21)$$

$$\frac{\omega L}{R} = Q \rightarrow R = \frac{\omega L}{Q} \quad (22)$$

As equações acima determinam a indutância e a resistência do circuito de potência do reator controlado por saturação. Em que:

V_n é a tensão nominal de operação.

S_n é a potência nominal de operação.

Q é o fator de qualidade.

R é a resistência elétrica do enrolamento.

ω é a frequência angular do sistema em rad/s.

De acordo com a figura 35 e as equações 21 e 22 as constantes G_1 , G_2 , T_1 e T_2 são:

$$G_1 = G_2 = \frac{1}{R} = \frac{Q}{\omega L} \quad (23)$$

$$T_1 = T_2 = \frac{L}{R} = \frac{V_n^2 Q}{S_n \omega^2 L} \quad (24)$$

Se as bases forem $V_b = V_n$ e $S_b = S_n$ temos $Z_b = V_n^2/S_n$ e em pu:

$$G = Q \quad (25)$$

$$T = \frac{Q}{\omega} \quad (26)$$

Logo os polos 1 e 2 para condição nominal (não saturado) de operação (em pu) são:

$$\frac{Q}{1+s\frac{Q}{\omega}} \quad (27)$$

Lembrando que o valor das constantes T_1 e T_2 muda no momento em que o núcleo satura, ou seja, só valem Q/ω quando o reator não está saturado.

O enrolamento de controle

Para a determinação dos parâmetros G_3 e T_3 do polo 3 é necessário escolher a reta (indutância) que representará a relação entre a corrente injetada e o fluxo médio produzido no núcleo ferromagnético. Outra informação importante é a tensão máxima imposta pela eletrônica de potência ao enrolamento de controle e sua potência máxima (nominal) de operação. Com essas informações pode-se estimar G_3 e T_3 da seguinte maneira:

Se V_c é a tensão máxima que pode ser imposta ao enrolamento de controle e P_c é a potência máxima de operação da eletrônica de potência. É razoável supor que a resistência elétrica do enrolamento de controle é $R_c = \frac{V_c^2}{P_c}$, pois como V_c é constante, passado o transitório o único fator limitando a corrente I_c no enrolamento de controle é a resistência R_c . Dessa maneira o polo 3 fica:

$$\frac{1/R_c}{1+s\frac{L_c}{R_c}} \quad (28)$$

Lembrando que L_c é estimado a partir das curvas apresentadas nas figuras 27 e 28. A figura 36 sugere duas possíveis aproximações para as curvas de saturação.

Uma vez que o polo 3 representa o fluxo médio induzido no núcleo em função da corrente contínua injetada no enrolamento de controle é importante sobrepor esse efeito (somar) ao do fluxo produzido pelos enrolamentos de potência. Independente da distorção da corrente o fluxo no núcleo é linear (no caso perfeitamente senoidal), pois a saturação nada mais é que um efeito de dispersão de fluxo, ou seja, atingida a saturação o fluxo magnético excedente deve se fechar pelo ar e não mais pelo núcleo ferromagnético.

Polos auxiliares

Os polos 4 e 5 representam o fluxo magnético induzido no núcleo pelos enrolamentos de potência. Logo seus parâmetros são os mesmos e poderiam ser substituídos por um único polo. Os polos estão duplicados no desenho da figura 34 apenas para efeito ilustrativo. Os parâmetros G_4 , G_5 , T_4 e T_5 são iguais aos dos polos 1 e 2 quando não saturados, portanto os polos 4 e 5 são:

$$\frac{Q}{1+s\frac{Q}{\omega}} \quad (29)$$

O comportamento dinâmico do modelo apresentado na figura 34 será próximo do equipamento real com as mesmas especificações. A diferença esperada entre o modelo proposto nesta seção e os modelos das seções anteriores é na velocidade da resposta de atuação do equipamento, uma vez que a curva do fluxo médio em função da corrente injetada

no secundário é aproximada por uma reta e, portanto a indutância vista pelo secundário é diferente. Como demonstrado anteriormente a indutância vista pelo enrolamento de controle afeta diretamente a velocidade de atuação do equipamento. Porém pequenas diferenças na rapidez da atuação do modelo não devem gerar erros relevantes em simulações de estabilidade. E no que diz respeito ao regime, todos os modelos apresentados até o momento, em teoria, devem apresentar o mesmo comportamento.

5.1. Teste do Modelo

Em uma primeira análise um sistema simples composto por uma fonte ideal, uma linha e uma barra com uma carga e tensão regulada pelo modelo do MSCR proposto foi criado em programa de transitórios eletromagnéticos (PSCAD).

O objetivo é controlar o nível de tensão na ocasião de uma rejeição de carga em 6s e religamento em 10s. A figura a seguir apresenta a rede usada na simulação.

Figura 37 Sistema simples com *MCSR*.

A linha na figura acima é representada como um circuito PI, sendo R , X e Q a resistência, a reatância e a potência capacitiva nominal de uma linha com 300 km para tensão de 500 kV. Os dados da linha foram retirados de um trecho real do sistema brasileiro. É a linha que conecta as subestações de Equador e Boa Vista e foram obtidos do arquivo do *software* ANAREDE no site do ONS (Operador Nacional do Sistema). A carga possui potência nominal de 180 MVA e fator de potência 0,8 indutivo.

O *MCSR* é representado como uma fonte de corrente controlada e possui potência e tensão nominal de 150 MVar e 500 kV respectivamente. A figura 38 apresenta a implementação do modelo da figura 37 no PSCAD.

Notar que neste *software* o cálculo é trifásico e feito no tempo (valores instantâneos de variáveis senoidais), dessa forma é preciso representar a saturação do reator tanto no semi ciclo positivo como no negativo. Também é preciso estender o modelo proposto para as três fases. Para isso basta triplicar o modelo e conectar um em cada fase.

Figura 38 Implementação do modelo da figura 31 no PSCAD (em uma fase).

No modelo utilizado para a simulação desejou-se que o reator tivesse uma capacidade máxima 450 MVar quando operando totalmente saturado, ou seja, 3 vezes a capacidade nominal. Para isso a inclinação na saturação deve ser de 33%. A figura 39 mostra a relação entre o fluxo médio no núcleo do reator e a corrente contínua injetada no enrolamento de controle.

Figura 39 Curva do fluxo médio no núcleo do reator em função da corrente injetada no secundário quando a tensão no primário é de 1 p.u.

Para a obtenção da curva mostrada na figura 39 foi usado o MEQ apresentado na seção 4.1. A saturação do reator ocorre quando a tensão aplicada no enrolamento de potência é maior que 1,1 pu, ou seja, o máximo fluxo no núcleo do reator é de 1,1 pu. No MEQ foram usados 0,38 pu para a reatância de dispersão e 250 pu para a resistência que representa as perdas no ferro. Pode-se inferir que, na curva de fluxo médio (azul) da figura 39, o efeito de dispersão está (pelo menos parcialmente) representado, apesar de não estar diretamente incluído no modelo proposto nesta seção, pois o seu efeito, que é a queda de tensão no enrolamento L_{disp1} , é capturado nas simulações para a obtenção da curva de fluxo médio em função da corrente injetada no enrolamento de controle. O mesmo não pode ser dito para as perdas no ferro, pois esta é modelada como uma resistência em paralelo com a reatância de magnetização (vide figura 5) e no modelo para transitórios eletromecânicos não há perdas em vazio e, portanto não são contabilizadas no modelo. Usando o método de mínimos quadrados a curva em azul foi aproximada por uma reta (em verde) passando pela origem, a inclinação dessa reta representa a indutância aproximada vista pela eletrônica de potência e, de acordo com o gráfico da figura 39, vale 0,595 pu.

$$L_{c(pu)} = 0,595 \text{ pu}$$

Para o sistema proposto na figura 37 são adotadas as seguintes bases:

$$V_b = 500 \text{ kV}$$

$$S_b = 150 \text{ MVA}$$

Logo temos $I_b = 0,1732 \text{ kA}$, $I_{b(pico)} = 0,245 \text{ kA}$, $Z_b = 1666,67 \Omega$ e $L = 4,42 \text{ H}$.

Logo 1 pu de fluxo é:

$$\varphi_b = 4,42 \cdot 0,245 = 1,083 \text{ kWb}$$

Para estimar os parâmetros do polo do enrolamento de controle foi assumido que quando a eletrônica de potência impõe a máxima tensão nos terminais do enrolamento, passado o transitório, há a circulação da máxima corrente, ou seja, a eletrônica de potência atua na sua máxima potência de operação. Também foi adotado que a máxima corrente de operação é a que satura completamente o reator. De acordo com informações do fabricante a eletrônica de potência possui potência máxima de operação de cerca de 3% da capacidade nominal. Portanto para um equipamento de 150 MVA a eletrônica de potência tem uma capacidade de 4,5 MW. Com essas informações e com as suposições explicadas podemos concluir que:

$$V_{max} \cdot I_{max} = S_c = 4,5 \text{ MW} \rightarrow I_{max} = \frac{4,5}{V_{max}} \quad (30)$$

$$R_c = \frac{V_{max}^2}{P_c} = \frac{V_{max}^2}{4,5} \quad (31)$$

Onde V_{max} , I_{max} e S_c são respectivamente a tensão, corrente e potência máximas de operação da eletrônica de potência.

A inclinação da RETA de aproximação da figura 39 é de 0,595. Portanto pode-se definir:

$$\frac{L_c}{L_b} = 0,595 \rightarrow L_c = L_b \cdot 0,595 \quad (32)$$

L_c é a indutância equivalente (reta verde na figura 39) vista pelo enrolamento de controle. L_b é a base de indutância do enrolamento de controle e deve respeitar a relação de espiras entre primário (potência) e secundário (controle) do reator $\frac{N_p^2}{N_c^2}$. A seguir é mostrado que, uma vez definido V_{max} tem-se definido L_b . Pela figura 39 sabe-se que o reator encontra-se totalmente saturado quando a corrente no enrolamento de controle é de 3,4 pu, pela aproximação, o fluxo que correspondente vale 2,023 pu.

$$2,023 \cdot \varphi_b = 2,023 \cdot 1,083 = 2,191 \text{ kWb} = L_b \cdot 0,595 \cdot I_{max} \rightarrow L_b \cdot I_{max} = 3,68 \text{ kWb}$$

L_b pode assumir qualquer valor, uma vez que é definido pela relutância do circuito magnético e o número de espiras. Portanto pode ser expresso em função da corrente I_{max} ou da tensão V_{max} .

$$L_b \cdot I_{max} = 3,68 \rightarrow L_b = \frac{3,68}{I_{max}} \rightarrow L_b = 0,818 V_{max} \quad (33)$$

Seguindo as premissas apresentadas anteriormente conclui-se que a tensão máxima de operação da eletrônica de potência define a indutância de base do enrolamento de controle. Essa rigidez é consequência do fato que, em regime, a tensão máxima deve corresponder a uma corrente máxima e essa corrente máxima deve ser apenas o suficiente para fazer com que o reator opere totalmente saturado.

Será introduzido agora o conceito de fator de qualidade $Q = \frac{\omega L}{R}$. Em reatores o ideal é um elevado fator de qualidade, pois dessa maneira a resistência é pequena em comparação a reatância e, portanto, o reator não terá perdas elevadas. Porém existe um compromisso entre o fator de qualidade e o custo do enrolamento, pois para aumentar o fator de qualidade (ou seja, diminuir a resistência do enrolamento) deve-se aumentar a secção do fio encarecendo este. Para reatores nessa faixa de tensão e potência é comum um fator de qualidade entre 200 e 300, porém para o enrolamento de controle, como este não estará permanentemente operando, pode-se relaxar esse critério.

$$\frac{\omega L_b}{R_c} = Q \rightarrow \frac{L_c}{R_c} = \frac{0,595 Q}{2 \pi 60} \quad (34)$$

$$L_c I_{max} = 2,023 \varphi_b \rightarrow V_{max} = \frac{2,023 \varphi_b 2 \pi 60}{0,595 Q} \quad (35)$$

A equação acima mostra que a tensão de operação da eletrônica de potência conectada ao enrolamento de controle é uma função apenas da curva de saturação e do fator de qualidade do enrolamento. O resultado é interessante, pois mostra que tanto o desempenho do equipamento, dado pela constante de tempo $\frac{L_c}{R_c}$, como a tensão máxima não dependem da potência máxima de operação do enrolamento de controle. E pela equação (35) percebe-se que existe um compromisso entre o fator de qualidade e a tensão máxima, pois é desejado um fator de qualidade baixo para baratear o enrolamento de controle e melhorar o desempenho do *MCSR*, porém também se deseja uma tensão máxima baixa para baratear a eletrônica de potência. Outro resultado importante segue abaixo:

$$L_c = \frac{(2,023 \varphi_b)^2 2 \pi 60}{0,595 Q P_c} \quad (36)$$

A equação (36) mostra que a indutância aproximada vista pelo enrolamento de controle é uma função da curva de saturação (e sua aproximação), do fator de qualidade e da potência da eletrônica. Ou seja, definida a curva de saturação e a eletrônica de potência (sua potência e tensão de operação), Q está definido e, portanto L_c .

Uma investigação sobre o fator de qualidade é apresentada a seguir.

Sabemos que a indutância de um reator pode ser definida pelo número de espiras e pela relutância do circuito magnético.

$$L_b = \frac{N^2}{\Re} - \text{onde } N \text{ é o número de espiras e } \Re \text{ é a relutância do circuito magnético}$$

É razoável assumir que a resistência do enrolamento é proporcional ao número de espiras.

$$R_c = k N - k \text{ é constante e representa a resistência do enrolamento por espira}$$

Dessa forma, tem-se:

$$Q = \frac{\omega N}{k \Re}$$

Ou seja, podemos variar Q linearmente aumentando o número de espiras ou diminuindo a resistência do fio.

As considerações acima permitem escrever o polo que representa o enrolamento de controle como:

$$\frac{1/R_c}{1 + s \frac{L_c}{R_c}} = \frac{\left(\frac{0,595 Q}{\omega L_c} \right)}{1 + s \frac{0,595 Q}{\omega}} \quad (37)$$

As discussões realizadas aqui surgiram na tentativa de encontrar parâmetros razoáveis para o modelo proposto nesta seção, porém são muito mais importantes para o projeto do *MCSR* do que para o modelo. A seguir é apresentada uma maneira mais direta e razoável para a obtenção do ganho e constante de tempo do polo representando o enrolamento de controle.

Parece mais razoável que informações da curva de saturação e potência e tensão da eletrônica estejam disponíveis. Com essas informações pode-se escrever o polo do enrolamento de controle como:

$$\frac{1/R_c}{1 + s \frac{L_c}{R_c}} = \frac{P_c/V_{max}^2}{1 + s \cdot \frac{2,023 \varphi_b}{V_{max}}} = \frac{4,5/V_{max}^2}{1 + s \frac{2,191}{V_{max}}} \quad (38)$$

O resultado acima indica que quanto maior a tensão máxima de operação da eletrônica de potência menor será a constante de tempo do circuito RL e, portanto, mais rápida será a resposta do reator controlado por saturação. Na função de transferência do enrolamento de controle vemos que a constante de tempo multiplicando o polo é consequência de L_c e R_c . L_c representa o fluxo médio induzido no núcleo devido à ação conjunta dos enrolamentos de controle e potência. Já L_b é a indutância vista pelo enrolamento de controle quando o enrolamento de potência está em aberto, ou seja, é a indutância própria do enrolamento de controle.

Outra maneira de visualizar que o aumento de V_{max} diminui a constante de tempo é perceber que de acordo com as suposições e limites adotados tem-se:

$$V_{max} I_{max} = cte$$

$$\frac{V_{max}^2}{R} = cte$$

$$L I_{max} = cte$$

$$\text{Se } V_{max}' = 2 V_{max}$$

$$V_{max}' I_{max}' = cte = V_{max} I_{max} \rightarrow 2 V_{max} I_{max}' = V_{max} I_{max} \rightarrow I_{max}' = \frac{I_{max}}{2}$$

$$\frac{V_{max}'^2}{R'} = \frac{V_{max}^2}{R} \rightarrow \frac{4 \cdot V_{max}^2}{R'} = \frac{V_{max}^2}{R} \rightarrow R' = 4 R$$

$$L' \frac{I_{max}}{2} = L I_{max} \rightarrow L' = 2 L$$

$$T = \frac{L'}{R'} = \frac{2 L}{4 R} = 0,5 \frac{L}{R}$$

Portanto se dobra a tensão máxima de operação em regime para a saturação plena do *MCSR* a constante de tempo cai pela metade.

As suposições acima mantêm a operação e controle do *MCSR* simples. Poder-se-ia imaginar um controle mais sofisticado que monitora a corrente ou a potência sendo injetada no enrolamento de controle e dinamicamente limita a tensão aplicada pela eletrônica de potência de modo a permitir a operação do equipamento com uma tensão maior que V_{max} e, na medida em que a corrente máxima (para a saturação completa do equipamento) ou a corrente alvo é atingida, diminuir a tensão aplicada. Caso o controle seja executado dessa maneira V_{max} indicaria a tensão máxima em regime para operação completamente saturado e não a tensão máxima que pode ser aplicada pela eletrônica de potência. Como o objetivo é avaliar o desempenho e a utilidade do *MCSR* no sistema elétrico brasileiro foi adotado um modelo de controle mais simples e conservador (pois não otimiza a resposta do equipamento).

Para o modelo usado nas simulações da rede da figura 34 foi escolhido uma tensão V_{max} para a eletrônica de potência de 10 kV. Esse nível de tensão foi escolhido com base em informações de fabricante. A justificativa para esse valor de tensão é a relação custo benefício, pois esse nível garante um bom desempenho para o *MCSR* e um custo baixo para a eletrônica de potência e não resulta em um fator de qualidade excessivamente elevado ($Q=139$). Logo o polo do enrolamento de controle fica:

$$\begin{aligned} \frac{4,5 / V_{max}^2}{1 + s \frac{2,191}{V_{max}}} &= \frac{0,045}{1 + s 0,2191} \rightarrow \text{em pu com } V_b = V_{max} \text{ e } I_b \\ &= I_{max} \cdot \frac{1}{1 + s 0,2191} \end{aligned} \quad (39)$$

Para os polos dos enrolamentos de potência e enrolamentos auxiliares (em p.u.):

$$\frac{Q}{1 + s \frac{Q}{\omega}} = \frac{200}{1 + s 0,5305} \quad (40)$$

Adotou-se um fator de qualidade $Q = 200$, valor comum para reatores shunt em 500 kV.

É importante que algumas simplificações e suposições feitas para a elaboração dos parâmetros apresentados anteriormente sejam esclarecidas. A dinâmica do enrolamento de controle é governada principalmente pela constante de tempo do polo. Ao escolher essa constata como

$\frac{L_c}{R_c}$ assumiu-se que essa dinâmica é predominantemente definida pela curva de fluxo médio induzido no núcleo ferromagnético apresentada na figura 39 e que a aproximação L_c captura de maneira adequada (para estudos de transitórios eletromecânicos) seus efeitos. Todas as simulações realizadas anteriormente (MEQ e UMEC) avaliaram o comportamento em regime do *MCSR*. Sua característica dinâmica não foi abordada e a constante de tempo da dinâmica $\frac{I(S)}{V(S)}$ como $\frac{L_c}{R_c}$ é uma suposição. É razoável esperar que a constante de tempo seja algo próximo dessa aproximação, pois com certeza é inferior a L_b (pois a saturação pode apenas diminuir a indutância equivalente do circuito) e superior a um terço de L_b (pois esse é o ponto de completa saturação do reator).

Existem diversas maneiras de se definir os parâmetros ganho (G) e constante de tempo (T) do enrolamento de controle. A metodologia aqui apresentada definiu a indutância do enrolamento de controle a partir de uma corrente máxima de operação, mas poder-se-ia fazer o contrário, ou seja, definir uma tensão e corrente de operação a partir da indutância própria do enrolamento de controle e da aproximação da curva de saturação da figura 39.

Os resultados das simulações são apresentados a seguir. Gráficos da tensão RMS na barra, potência reativa do reator, potência reativa da carga e a potência reativa total são mostrados nas próximas figuras (40 a 43).

Figura 40 Gráfico da tensão RMS na barra em que o *MCSR* está conectado.

No gráfico da figura 40 observa-se que o modelo do *MCSR* comportou-se como esperado e foi capaz de manter a tensão na barra em 1 p.u. A oscilação de tensão é bem amortecida e mantém-se dentro de valores aceitáveis. Na obtenção dos gráficos das figuras 40 e 41 usou-se

medidores com constantes de tempo de 30 ms, ou seja, algum amortecimento e filtragem provém do medidor, porém estima-se que não seja relevante para a avaliação dos resultados.

Em $t = 6$ s acontece o evento de rejeição de carga. O controle então atua de maneira a manter o valor eficaz da tensão dentro do alvo (1 pu), por volta de $t = 8$ s, percebe-se na figura que, a tensão é controlada. Em $t = 10$ s acontece o religamento da carga e a tensão na barra oscila devido à perturbação na rede e à dinâmica de controle do *MCSR* retornando ao seu valor inicial.

Figura 41 Potências reativas: Total absorvida na barra, da carga e do reator controlado por saturação.

Na figura 41 é possível verificar que, após a abertura da carga, o *MCSR* atua para balancear a tensão na barra e passa a suprir a potência reativa que antes era da carga. A potência de trabalho do reator passa de 150 MVar para aproximadamente 260 MVar e passa a operar parcialmente saturado como pode ser visto na figura 42.

Figura 42 Corrente absorvida pelo reator em uma das fases.

Na figura 43 é possível visualizar a dinâmica do módulo da corrente CA total na barra em que o reator está conectado. No momento da rejeição há a tendência de diminuição da corrente absorvida, porém o *MCSR* compensa aumentando a potência reativa indutiva consumida.

Figura 43 Envoltória da corrente CA absorvida na barra da carga/reator.

Pelos resultados apresentados nesta seção é possível verificar a dinâmica do modelo proposto para transitórios eletromecânicos (figura 34). Os resultados estão de acordo com o esperado. Portanto, o modelo proposto captura adequadamente a dinâmica do *MCSR* e pode ser usado para estudos de estabilidade eletromecânica.

6. Potencial do MCSR no sistema elétrico brasileiro

As investigações realizadas nas sessões anteriores tiveram o objetivo de compreender melhor o funcionamento do *MCSR*. O *MCSR* é um equipamento de controle ativo do nível de tensão da barra em que está conectado e, portanto, possui utilidade para aumentar a estabilidade e eficiência do sistema elétrico. Durante transitórios eletromecânicos pode ajudar a amortecer oscilações no sistema e em linhas em que existem grandes variações de carga durante o dia, ou seja, a necessidade de reativos muda consideravelmente, o *MCSR* ajuda dinamicamente a manter a operação do sistema adequada e eficiente. Um dos objetivos desse trabalho é avaliar o emprego desse equipamento no sistema elétrico brasileiro e para isso é necessário a elaboração de um modelo que possa ser usado em simulações e que compreenda o funcionamento básico do equipamento principalmente durante transitórios eletromecânicos. Como já mencionado anteriormente imagina-se que o reator controlado seja um equipamento FACTS (*Flexible AC Transmission System*) alternativo ao CER.

6.1. A rede utilizada

Para avaliar a utilização do reator controlado por saturação no sistema elétrico brasileiro escolheu-se uma rede pouco carregada do SIN (Sistema Interligado Nacional). A rede escolhida está representada na figura a seguir.

Figura 44 Sistema base.

A figura 44 apresenta o sistema estudado com sua configuração atual de compensação reativa. É importante observar que no sistema da figura 44 existe um CER, equipamento caro, mas necessário para a operação adequada da rede. A rede e os parâmetros vieram do arquivo do programa ANAREDE obtido no site do ONS (Operador Nacional do Sistema) [16]. Na figura 44 está representada apenas uma parte do sistema, uma vez que no arquivo obtido no site do ONS consta todo o SIN. A seguir é apresentada uma tabela relacionando as barras da figura 44 com as barras do arquivo do programa ANAREDE.

Tabela 5 Relação de barras da fig.44 e do arquivo base do ONS

Nome da Barra figura 44	Nome da barra/número (arquivo base ANAREDE)
B 230 kV	BALBIN-AM230/10410
P 230 kV	P.FIG-AM230/10419
C 230 kV	CROCHA-AM230/10405
M 230 kV	MANAUS-AM230/10400
L 230 kV	LECHUG-AM230/10560
L 500 kV	LECHUG-AM500/10012
E 500 kV	EQUADO-RR500/60000
BV 500 kV	BVISTA-RR500/60001
BV 230 kV	BVISTA-RR230/60002
BV 69 kV	BVISTA-RR069/60003
CER	BVISTACER013/60008

6.2. Dimensionamento

A proposta do estudo reportado neste capítulo é a troca de quatro reatores shunt de linha (dois próximos a barra BV 500 kV e dois próximos a E 500 kV) e do CER do sistema apresentado na figura 44 por 4 *MCSRs* instalados onde anteriormente estavam os reatores fixos. A figura 45 apresentada a seguir mostra nova configuração que será estudada.

Figura 45 Sistema base com nova configuração de compensação reativa.

O compensador estático (marcado em azul na figura 44) e os dois reatores de 130 MVA próximos a BV 500 kV e os dois de 160 MVA próximos a E 500 kV (um total de 4) são os equipamentos substituídos por *MCSRs*. O estudo avaliará a viabilidade técnico-econômica de trocar os equipamentos citados por quatro *MCSRs* situados na mesma posição dos reatores shunt convencionais.

Para o dimensionamento dos *MCSRs* foram avaliadas as condições de fluxo de potência (FP) e as tensões nas barras para as situações de perda de uma linha entre as barras BV 500 kV e E 500 kV e a saída da carga na barra BV 230 kV (casos mais críticos na definição de compensação reativa do sistema). Para a realização desse estudo os reatores de linha e o compensador estático foram removidos, as barras BV 500 kV e E 500 kV foram alteradas para tipo PV com injeção de potência ativa zero e a tensão fixada em 1,1 pu. Posteriormente o mesmo estudo foi realizado com tensão nas barras fixada em 0,95 pu e uma terceira situação com 1 pu em BV 500 kV e 1,05 pu em E 500 kV também foi analisada. Objetivo foi identificar possíveis pontos de operação para os reatores controlados por saturação. A tabela 6 mostra os resultados obtidos e os reatores shunt equivalente que mantêm as tensões nas barras dentro dos limites para as condições de operação normal e contingências já descritas.

Tabela 6 Resumo dos resultados obtidos no FP.

1.1 pu em ambas as barras						
	Reativos injetados nas barras		Reativos necessários por unidade MCSR			
	BV 500 kV	E 500 KV	BV 500 kV	E 500 KV	Shunt Eq. BV*	Shunt Eq. E*
Base	275,5	807,5	137,8	167,8	113,8	138,7
S/ carga em BV 230 kV	366,2	860,4	183,1	194,3	151,3	160,5
S/ 1 LT BV 500 kV-E 500 kV	37,5	569,2	37,5	127,3	31,0	105,2
0.95 pu em ambas as barras						
	Reativos injetados nas barras		Reativos necessários por unidade MCSR			
	BV 500 kV	E 500 KV	BV 500 kV	E 500 KV	Shunt Eq. BV*	Shunt Eq. E*
Base	154,1	950,0	77,1	299,0	85,4	331,3
S/ carga em BV 230 kV	256,9	1.000,0	128,5	324,0	142,3	359,0
S/ 1 LT BV 500 kV-E 500 kV	-31,0	764,8	-31,0	265,1	-34,3	293,7
1.00 pu em BV 500 kV e 1.05 pu em E 500 kV						
	Reativos injetados nas barras		Reativos necessários por unidade MCSR			
	BV 500 kV	E 500 KV	BV 500 kV	E 500 KV	Shunt Eq. BV*	Shunt Eq. E*
Base	419,2	631,2	209,6	100,6	209,6	91,3
S/ carga em BV 230 kV	512,6	684,7	256,3	127,4	256,3	115,5
S/ 1 LT BV 500 kV-E 500 kV	106,5	528,9	106,5	121,1	106,5	109,9

*Normalizado de acordo com a tensão na barra

O estudo de fluxo de potência foi realizado com o programa ANAREDE e utilizou-se o sistema elétrico brasileiro completo (o arquivo escolhido foi o cenário para o ano de 2017 sem geração na Venezuela) obtido no site do ONS [16].

Na tabela 6, grifado em cinza, estão possíveis condições de operação dos reatores controlados por saturação, o valores são todos de potência reativa indutiva em MVar. A faixa de operação em que os novos reatores deverão atuar varia de aproximadamente 100 a 160 MVar. A tabela indica que a substituição proposta é possível e que o *MCSR* pode ser considerado como alternativa para esse sistema. Na tabela 7 estão indicados os pontos de operação do *MCSR*.

Tabela 7 Reativos no *MCSR*s.

	MVar reator BV	MVar reator E	Tensão na barra (pu)
Base	138	168	1.1
S/ carga em BV 230 kV	183	194	1.1
S/ 1 LT BV 500 kV-E 500 kV	107	121	1.0/1.05

6.3. Estudo de estabilidade

O sistema estudado com o FP foi modelado no PSCAD para análise dinâmica de contingências. A rede completa foi reduzida na região do subsistema de interesse, modelando os intercâmbios entre área interna e externa como cargas PQ nas barras onde há exportação de energia e como fontes equivalentes de Thevenin nas barras onde há importação de energia. As linhas foram modeladas por π equivalentes a 60 Hz, os transformadores tiveram seus taps fixos na condição de regime e não foi modelado o *OLTC* (*On Load Tap Changer*). A rede no programa EMT é trifásica e contempla a sequência zero, exceto pelas fontes equivalentes. As cargas e a compensação reativa foram modeladas como impedância constante. O modelo do *MCSR* foi estendido para um modelo trifásico com controle de tensão independente por fase. A tabela 8 apresenta um resumo dos parâmetros dos elementos usados no PSCAD (rede original). A primeira coluna à direita denomina as linhas de transmissão, nas colunas seguintes estão, respectivamente, a tensão em kV, a resistência, reatância e susceptância em valores percentuais.

Tabela 8 Dados de linhas usados no PSCAD.

Linhas (Sb=100 MVA)	V base (kV)	R (%)	Reatância (%)	Susceptância (%)
B 230 kV - L 230 kV	230	1,596	10,357	42,023
B 230 kV - P 230 kV	230	0,575	3,706	14,894
P 230 kV - C 230 kV	230	1,006	6,498	26,193
C 230 kV - L 230 kV	230	0,250	0,161	0,646
2 x M 230 kV - L 230 kV	230	0,190	1,223	4,911
2x L 500 kV - E 500 kV	500	0,350	5,418	462,740
2x E 500 kV - BV 500 kV	500	0,292	4,459	374,160

A tabela 9, apresentada a seguir, informa os demais dados dos elementos presentes no sistema arquitetado no PSCAD, ou seja, dados dos transformadores, das cargas, dos elementos passivos de compensação reativa e dos geradores equivalentes. Quando os valores constarem em pu a base adotada foi 100 MVA para a potência e a respectiva tensão nominal.

Tabela 9 Dados dos transformadores, compensação reativa, cargas e equivalentes.

Transformadores (Sb=100 MVA)	Tap N1/N2	X (pu)	Cargas	P (MW)	Q (MVar)
4x L 230 kV - L 500 kV	1,000/1,020	0,0155	P 230 kV	16,0	5,25
BV 500 kV - BV 230 kV	1,050/1,000	0,0108	M 230 kV	385,2	151,6
BV 500 kV - CER	1,000/1,000	0,0225	L 230 kV	1439,1	27,0
CER - BV 230 kV	1,000/1,000	0,0113	BV 230 kV	200,0	60,0
4x BV 230 kV - BV 69 kV	1,000/0,986	0,1000	BV 500 kV	150,0	60,0

Compensação Reativa	Tipo	MVar	Geradores	X (ohms)	V (pu)	S cc (MVA)
L 230 kV	C	385	L 500 kV	62,05	1,096	4400
L 500 kV	L	2x 160	B 230 kV	22,82	1,022	2318
E 500 kV	L	3x 130/2x 160				
BV 500 kV	L	2x 130				

A figura 46, apresentada na próxima página, ilustra a rede realizada no software de transitórios eletromagnéticos (PSCAD).

Figura 46 Rede base com nova configuração de compensação reativa modelada no PSCAD.

Para o estudo de estabilidade substituiu-se dois reatores shunt fixos de 130 MVA e dois de 160 MVA por equipamentos *MCSRs* de 100 MVA e 130 MVA respectivamente. Os novos reatores controlados por saturação foram programados para manter as barras onde estão conectados em 1,1 pu. As mesmas situações simuladas no fluxo de carga foram reproduzidas no programa EMT. Uma simulação de rejeição de carga também foi realizada através de um disjuntor entre as barras BV 500 kV e BV 230 kV. As tabelas 10 e 11 apresentam um resumo do estudo.

- *Especificação do enrolamento de potência:*

$$S_n = 150 \text{ MVA} ; V_n = 380 \text{ kV} ; (\text{fator de qualidade}) Q = 200$$

Se for desejado 150 MVAr de potência reativa deve-se ter aproximadamente:

$$\frac{380^2}{150} = \omega L = 962,67\Omega \rightarrow L = 2,55 \text{ H} ; \frac{\omega L}{R} = 200 \rightarrow R = 4,81\Omega$$

Assumindo $V_{\text{base}} = 380 \text{ kV}$, $S_{\text{base}} = 150 \text{ MVA}$, tem-se em pu : $\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{200}{1+0,5305s}$

É importante notar que o valor da constante $L/R = 0,5305$ é alterada para $0,5305/3 = 0,1768$ no momento em que ocorre a saturação do núcleo (para representar a saturação).

- *Especificação do enrolamento de controle:*

O enrolamento de controle foi especificado da mesma maneira e com os mesmo parâmetros do item 4. Ou seja, foi assumido um fator de qualidade $Q = 139$ e uma curva de saturação como a apresentada na figura 39. O polo do enrolamento de controle em pu fica:

$$\frac{1}{1 + s \cdot 0,2191}$$

O reator usado no sistema simples do item 4 e os usados na simulação do sistema apresentado na figura 46 são os mesmos (em pu). A diferença é apenas a potência nominal de operação (e consequentemente a potência durante a saturação).

- *Saturação do núcleo ferromagnético:*

Como já mencionado a representação da saturação do reator foi modelada como uma mudança na constante de tempo L/R dos enrolamentos de potência. Quando há 1,1 pu de fluxo passando pelo núcleo atinge-se a saturação. Os polos 4 e 5 na figura 34 representam o

fluxo induzido no núcleo pelos enrolamentos de potência. Note que esses polos (ao contrário dos polos 1 e 2) possui constante L/R fixo, pois representam o efeito de magnetizar e desmagnetizar o núcleo da mesma maneira que o enrolamento de controle.

Os resultados da simulação são apresentados a seguir.

Tabela 10 Resumo das simulações realizadas no PSCAD.

Resumo das simulações no programa PSCAD	Reativo injetado pelos <i>MCSRs</i> (MVAR)		Tensão nas barras (pu)		Distorção harmônica total		Distorção harmônica individualizada (3º)	
	E 500 kV	BV 500 kV	E 500 kV	BV 500 kV	E 500 kV	BV 500 kV	E 500 kV	BV 500 kV
Base	140,7 x 2	105,8 x 2	1,1	1,1	1,1%	1,3%	1,1%	1,2%
S/ a carga em BV 230 kV	170,2 x 2	147,1 x 2	1,1	1,1	3,2%	3,5%	3,1%	3,3%
S/ 1 LT entre BV e E (500kV)	130 x 2	100 x 1	1,04	1,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Rejeição de carga	182,5 x 2	187,1 x 2	1,1	1,1	4,8%	11,7%	4,7%	11,6%

Na tabela 10 é possível verificar que o reator controlado por saturação atua da maneira esperada e mantém as tensões nas barras dentro do limite de 1,1 pu. Para as diversas condições de operação o *MCSR* injeta diferentes quantidades de reativos e mantém o sistema operando adequadamente. A tabela 10 também mostra que a quantidade de reativos injetada pelo *MCSR* é compatível com o que foi concluído pelo estudo usando o programa de fluxo de potência (ANAREDE), ou seja, a quantidade de reativos injetada pelo *MCSR* é muito próxima do obtido com o ANAREDE. O principal problema do equipamento, a exagerada injeção de harmônicos na rede é constatada nas simulações. No caso da rejeição de carga, após o evento, o *MCSR* chega a gerar 11,7% de distorção harmônica, valor bastante elevado, porém, como mostrado no item 3.4 e constatado na simulação, a distorção é composta principalmente por terceira harmônica. Como já mencionado e analisado o *THD* gerado pelo reator controlado por saturação poderia ser substancialmente reduzido caso a configuração dos enrolamentos seja em delta.

A tabela 11 mostra as tensões nas barras do sistema para as diversas condições de operação estudadas no programa de FP e a rejeição de carga.

Tabela 11 Tensão nas barras nas simulações realizadas no PSCAD.

Barra	Caso Base	Tensão RMS (pu)		
		S/ a carga em BV 230 kV	S/ 1 LT entre BV e E (500kV)	Rejeição de carga
B 230 kV	1,05	1,05	1,04	1,06
P 230 kV	1,05	1,06	1,04	1,06
C 230 kV	1,05	1,06	1,03	1,06
M 230 kV	1,03	1,04	1,02	1,05
L 230 kV	1,05	1,06	1,03	1,06
L 500 kV	1,06	1,07	1,04	1,08
E 500 kV	1,10	1,10	1,04	1,10
BV 500 kV	1,10	1,10	1,01	1,10
BV 230 kV	1,05	1,06	0,96	0,00
BV 69 kV	1,03	1,04	0,95	0,00

Pela tabela é possível constatar que a nova configuração mantém o sistema operando de maneira adequada e é uma alternativa ao uso do CER (compensador estático de reativos). A nomenclatura das barras é referente ao apresentado na figura 44.

A seguir serão apresentados gráficos com a forma de onda da tensão e da corrente nas barras em que estão instalados os *MCSRs* e um gráfico da potência reativa consumida nessas barras. Todos os gráficos são da simulação de rejeição de carga.

No gráfico apresentado na figura 47 percebemos que a tensão RMS se mantém abaixo de 1,3 pu, valor normalmente aceitável para esse tipo de contingência. Também é possível verificar a atuação do reator controlado por saturação mantendo a tensão na barra em 1,1 pu.

Figura 47 Tensão RMS nas barras em que os *MCSRs* estão conectados.

As figuras 48, 49 e 50 mostram a forma de onda da corrente absorvida por um dos reatores conectados na barra BV 500 kV antes, durante e após o evento de rejeição de carga.

Figura 48 Corrente absorvida por um reator controlado por saturação instalado na barra BV 500 kV antes da rejeição de carga

Figura 49 Corrente absorvida por um reator controlado por saturação instalado na barra BV 500 kV durante a rejeição de carga

Figura 50 Corrente absorvida por um reator controlado por saturação instalado na barra BV 500 kV durante a rejeição de carga.

Na figura 48, de maneira coerente com as informações apresentadas na tabela 10, verifica-se que a forma de onda da corrente absorvida pelo reator no momento anterior a rejeição de carga é distorcida e, portanto, possui conteúdo harmônico. Na figura 49 é possível visualizar a forma de onda da corrente no momento da rejeição de carga. Evidencia-se o controle atuando e o momento transitório para a acomodação da tensão em 1,1 pu. Na figura 50 é apresentada a corrente absorvida pelo *MCSR* após o evento, nas simulações realizadas esta é a corrente que causa maior distorção harmônica na tensão na barra BV 500 kV.

7. Comparação de Custos

Quando comparando alternativas para soluções de problemas técnicos o aspecto econômico é fundamental. Nesta seção são apresentadas algumas considerações e estimativas do custo do *MCSR* e uma breve comparação com outras possibilidades. Na seção anterior o *MCSR* provou ser uma alternativa técnica promissora, o objetivo nesta seção é verificar a relação custo x benefício do equipamento.

Serão comparadas três alternativas:

- a) Solução convencional com os equipamentos da figura 44.
- b) Substituindo os reatores de linha de 130 MVA próximos à barra BV 500 KV e os dois reatores de linha de 160 MVA próximos a barra E 500 kV por reatores controlados por saturação e remoção do CER.
- c) Como “b”, porém utilizando reatores controlados por tiristores (TCR) valores de 183/194 MVar (tabela 2).

Na comparação entre as alternativas a), b) e c) não serão considerados os custos dos equipamentos comuns às três alternativas (5 reatores fixos, módulos de conexão, etc). Os custos individuais dos equipamentos serão baseados nos custos de fabricante tradicional de acordo com cotação realizada em fevereiro de 2012.

O custo do reator fixo foi cotado em 12 USD / kVar, o custo compensador estático indutivo ou capacitivo cotado em 52 USD / kVar para L ou C. Dessa maneira os custos dos equipamentos de compensação reativa ficam:

Reator 500 kV	130 MVar	preço: 1,56 M USD
Reator 500 kV	160 MVar	preço: 1,92 M USD
CER 500 kV	I 120/ C 160 MVar	preço: 6,24 + 7,8 = 14,04 M USD

Não se dispondo de preço na mesma base para o reator controlado por saturação, seu preço é estimado considerando:

- I. Preço de eficiência: (100%) valor de 115 MVar ou 140 MVar (reator fixo) a 1 pu (compatíveis aos valores de potência nominal do caso base da tabela 10). Desta forma estes reatores terão perdas em regime equivalentes a solução de referência.
- II. O reator saturável é dividido em duas partes com metade da potência total por parte. Considerou-se que isso acarreta um acréscimo de 20% no custo.
- III. Como o reator deve trabalhar, no caso base, levemente saturado suas perdas em regime normal de operação serão maiores e, portanto o sistema de refrigeração deverá ser mais eficiente. Por conta disso o equipamento deverá encarecer cerca de 10%.
- IV. O enrolamento de controle acarreta aumento de 5% no custo.
- V. Das perdas totais 85% ocorrem no cobre e 15% no ferro. Ao trabalhar saturado (no caso base) as perdas no ferro passarão de 0,15 pu para 0,45 pu Para compensar o aumento de perdas no ferro precisa-se diminuir as perdas no cobre em 35%. O aumento da secção do cobre implica em um custo adicional de 20%.
- VI. Substituição das ferragens de aço por aço inox (saturação). Aumento de 10%.

As estimativas para o custo do reator saturável foram realizadas junto a um engenheiro projetista experiente de transformadores e reatores. Desta forma o reator controlado por saturação deverá ter um custo 1,65 vezes o custo de um reator fixo.

Tabela 12 Comparativo entre as soluções a, b e c.

	Solução convencional (a)	Solução com <i>MCSRs</i> (b)	Solução com RCT (c)
Reator em BV	3,12	4,56	19,0
Reator em E	3,84	5,55	20,2
Compensador Estático	14,04	-	-
TOTAL	21,0	10,11	39,2

A tabela 12 apresentada anteriormente permite concluir que o *MCSR* pode ser competitivo dentro das bases de custo indicado ou mesmo que custe 3,5 vezes o valor do reator fixo similar.

8. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um equipamento de controle ativo para compensação reativa de linhas de transmissão. A partir de seus princípios de funcionamento foi elaborado um MEQ (Modelo Elétrico Equivalente) e a partir deste realizado simulações simplificadas para elucidar acerca das características gerais do equipamento. Para validar os resultados e interpretações usou-se o UMEC (Unified Magnetic Equivalent Circuit), um modelo já bastante testado e validado para transformadores com a possibilidade para vários enrolamentos e presente no PSCAD. Os resultados das simulações do UMEC no PSCAD, com as características adaptadas às do Reator Controlado por Saturação, foram então comparadas aos resultados obtidos com o MEQ. Concluiu-se que as suposições e interpretações realizadas até então eram válidas.

Durante as análises realizadas no trabalho observou-se que o reator na sua concepção mais simples, ou seja, estrela com centro aterrado, poderia potencialmente injetar quantidades significativas de harmônicos na rede. Portanto uma análise mais profunda da distorção harmônica foi realizada. Os estudos mostraram que na configuração comum de reatores fixos de alta tensão (estrela com centro aterrado), o *MCSR* em muitas situações não poderia atuar sem filtros, pois a injeção de harmônicos é demasiada. Também se observou que o conteúdo harmônico é principalmente composto de terceira e seus múltiplos. Em muitos artigos é sugerido que o secundário do *MCSR* seja construído em configuração delta e, portanto a terceira harmônica e seus múltiplos ficam confinadas neste enrolamento. Uma nova análise excluindo-se a terceira harmônica e seus múltiplos é realizada e conclui-se que, caso não haja essas harmônicas o Reator Controlado por Saturação poderia, na maioria das situações, dispensar a instalação de filtros adicionais.

O objetivo principal do trabalho é avaliar o uso de *MCSRs* no sistema elétrico brasileiro e para isso era necessário a elaboração de um modelo para transitórios eletromecânicos. Usando as informações e conhecimentos obtidos no decorrer do trabalho, foi proposto um modelo. O modelo atende a todas as características importantes para transitórios eletromecânicos e seus parâmetros são discutidos a fim de obter um comportamento realista do equipamento durante as simulações. Os primeiros testes usando o PSCAD e um sistema simplificado comprovam o comportamento adequado do modelo.

Foi então que se escolheu uma rede brasileira em que o Reator Controlado por Saturação parecia uma alternativa promissora. Através de um estudo de fluxo de potência verificou-se a viabilidade e estabeleceram-se as potências nominais e capacidades de operação do *MCSR*. A rede escolhida foi modelada no PSCAD e o sistema com a nova configuração de reatores foi simulado. Nas simulações iniciais o *MCSR* mostrou-se não apenas uma solução viável, mas também promissora, principalmente quando levado em consideração a análise econômica realizada no capítulo seguinte.

O reator controlado por saturação (*MCSR*) mostra-se uma alternativa para controle de tensão nos sistemas AC de alta a extra-alta tensão. É um equipamento capaz de controlar dinamicamente a tensão através da modulação da sua impedância indutiva, sendo provavelmente mais baratos que os compensadores estáticos de reativos, porém possui uma atuação mais lenta e injeta harmônicos de baixa ordem (principalmente terceira) o que eventualmente implica na necessidade de filtros que encareceriam o sistema. O provável custo da alternativa com reator saturável é menor que a solução convencional mesmo que o reator saturável venha custar 3,5 o custo do fixo. O modelo proposto desenvolvido para programa tipo EMT baseia-se em características reais do equipamento e procura capturar principalmente a dinâmica dos balanços de potência. É adequado para estudo de estabilidade, porém para estudo de transitórios eletromagnéticos rápidos as simplificações impostas nos modelos precisam ser revistas. Estudos mais detalhados são necessários para o modelo proposto a fim de averiguar as possíveis divergências com o equipamento real. As utilidades do *MCSR* são muitas e esses equipamentos devem ser considerados em novos projetos de transmissão e como alternativa para o aumento da capacidade de transmissão de linhas já existentes.

9. Trabalhos Futuros

Os estudos realizados nesta pesquisa analisam mais precisamente o comportamento em regime de equipamentos monofásicos (e monofásicos estendidos para trifásicos independentes por fase) ou o comportamento durante transitórios lentos. Ainda é necessário o desenvolvimento e disseminação de modelos, técnicas e ferramentas que possibilitem a compreensão e estudo de reatores controlados por saturação em um espectro mais amplo de cenários e situações. Para diversos estudos de transitórios eletromagnéticos são necessários modelos mais complexos que capturem efeitos como acoplamento magnético entre fases e entre enrolamentos. No caso do *MCSR* o acoplamento entre enrolamentos de controle e de potência (na mesma fase e entre fases) e a representação adequada da sua saturação são aspectos importantes do equipamento e em muitas situações podem ter efeitos relevantes no seu desempenho. Modelos que representem bem esses aspectos são importantes e precisam ser desenvolvidos. Efeito que também precisa ser investigado é a histerese do material ferromagnético e sua influência na atuação desses reatores. Outra característica importante e que deve ser mais bem detalhada nos modelos para fenômenos EMT é a eletrônica de potência (e o controle associado) do reator, pois afetará diretamente a resposta do *MCSR* frente a contingências como curto circuitos.

Do ponto de vista do sistema é importante criar modelos que possam representar o equipamento durante curtos-circuitos, manobras como energização e religamento, e descargas atmosféricas. Portanto, sugere-se que os próximos trabalhos foquem-se na concepção de modelos próprios para fenômenos do tipo EMT.

O desenvolvimento desses modelos também deverá contribuir para a análise harmônica do equipamento, pois com a representação adequada da saturação, do acoplamento magnético entre enrolamentos e da histerese espera-se que seja possível realizar estudos bastante precisos de distorção e impedância harmônica.

10. Bibliografia

- [1] Belyaev A N, Smolovik S V, “Steady-state and transient stability of 500kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors”, IEEE Power Tech Conference, Russia, Vol.13, No.5, pp.743–749, 2005.
- [2] A. Bryantsev, M. Bryantsev, B. Bazylev, S. Dyagileva, A. Negryshev, R. Karymov, E. Makletsova, S. Smolovik, “Power Compensators Based on Magnetically Controlled Shunt Reactors in Electric Networks with a Voltage between 110 kV and 500 kV”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2010.
- [3] Zhao Shi-shuo, Yin Zhong-dong, Li Peng, “Research of Magnetically Controlled Reactor Simulation Model and its Experiments”, 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, Harbin, China, Junho 2012
- [4] A. Bryantsev, V. Dorofeev, M. Zilberman, A. Smirnov, S. Smolovik. "Magnetically controlled shunt reactor application for AC HV and EHV transmission lines", CIGRE, Paris, B4-307, 2006.
- [5] L. Yan-ping, Z. Hai-ting, A. Zhen, “The 500 kV *MCSR* Modeling and Steady-state Characteristics Analysis” International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Beijing, China, agosto 2011.
- [6] Liang Yan-ping, Zhang Fang, Zhang Haiting, “Leakage inductance calculation and simulation research of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor”, IEEE conference on industrial electronics and application, Vol.21, No.8, pp.425–430, 2010.
- [7] W. Enright, O. B. Nayak, G. D. Irwin, J. Arrillaga. “An electromagnetic transients model of multi-limb transformers using normalised core concept.” International conference on Power System Transients (IPST), Seattle, USA, páginas 93-98, Junho 1997.
- [8] W. Enright, N. R. Watson, O. B. Nayak. “Three-Phase five-limb unified magnetic equivalent circuit transformer models for PSCAD V3.” International conference on Power System Transients (IPST), Budapest, Hungary, Junho 1999.
- [9] Xiangzheng Xu, “The Status and Development of Magnetically Controlled Reactor.” IEEE, International Conference on Test and Measurement, 2009.

- [10] M. A. B. Horita, M. T. Bassini, J. A. Jardini, G. Y. Saiki, M. L. Santos, R. P. Casolari, “Aplicação de Reator Variável Controlado por Saturação no Sistema de Transmissão Elétrico Brasileiro.” Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXII SNPTEE), Brasília, Brasil, Outubro 2013.
- [11] A. D. De Abranches, A. Bryantsev, V. Cioban, “Novo Eficiente Compensador Estático Baseado em Reator Saturado para Controle de Tensão e Compensação dos Reativos” Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXII SNPTEE), Brasília, Brasil, Outubro 2013.
- [12] M. V. Farinha, G. N. Taranto, J. Ludwig, T. Martins, T. Masseran, “A Utilização de Reatores de Saturação Controlada do Tipo *MCSR* (Magnetically Controlled Shunt Reactor) no Controle de Tensão de Sistemas de Potência” Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXII SNPTEE), Brasília, Brasil, Outubro 2013.
- [13] Yao Yao, Baichao Chen, Cuihua Tian, “Modeling and Characteristics Research on EHV Magnetically Controlled Reactor”, The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007), 2007.
- [14] ZIR, Magnetically Controlled Shunt Reactors, Catálogo.
- [15] Manual PSCAD (Power System Computer Aided Design).
- [16] ONS. Carga Pesada, Março de 2012, acessado em junho de 2012 http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/c_referencia_permanente_anual.aspx
- [17] L. A. M. Fonte, “Desenvolvimento de Reatores com Saturação Natural para Aplicação em Sistemas de Potência”, Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências, Recife-PE, 269 p, 2004.