

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ÍRIS DE JESUS MORAES

APLICAÇÃO DE TCSC NA DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA:
ESTUDO DE CASO

VITÓRIA
2016

ÍRIS DE JESUS MORAES

**APLICAÇÃO DE TCSC NA DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA:
ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

VITÓRIA
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M827a Moraes, Íris de Jesus, 1988-
Aplicação de TCSC na distribuição primária : estudo de caso
/ Íris de Jesus Moraes. – 2016.
76 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Energia elétrica –
Distribuição. 3. Modelagem. 4. Capacitores. 5. Tiristores. 6.
Limitador de corrente de falta. 7. Compensador Série. I.
Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

ÍRIS DE JESUS MORAES

**APLICAÇÃO DE TCSC NA DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA:
ESTUDO DE CASO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 25 de agosto de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Flavio Barcelos Braz da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo

Ao meu noivo, Davi.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que me dá forças para atingir meus objetivos.

Agradeço a minha mãe pelo apoio constante e por tanto sacrifício por me ajudar. Agradeço também ao meu noivo, que sempre acreditou na minha capacidade e nos meus sonhos.

Aos meus sogros por me darem apoio quando eu mais preciso.

Ao prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti, por toda a orientação dada e pela confiança em meu trabalho.

A todos que me ajudaram a chegar até aqui e que, sem dúvida, vão me ajudar a ir ainda mais longe.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES pelo apoio financeiro

Resumo

Nos dias atuais, o sistema de distribuição tem passado por problemas elétricos que requerem soluções distintas das convencionais.

Dispositivos de eletrônica de potência, já consolidados, quando aplicados aos sistemas de transmissão para melhorar suas características, começam a ter grande uso também a nível de distribuição de energia. O uso de dispositivos com eletrônica de potência como o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), comumente usado em linhas de transmissão, está sendo gradualmente utilizado em sistemas de distribuição de média tensão, evitando, assim, gastos desnecessários por parte das concessionárias, tal como o recondutoramento do alimentador.

Este trabalho apresenta a modelagem de um TCSC e analisa a sua operação atuando como limitador de corrente de falta, em um alimentador de distribuição de 11,4 kV, apresentando por simulação, seu comportamento no estado estacionário, bem como durante uma condição de falta. A modelagem de um circuito detector de falta que controla o acionamento dos tiristores do TCSC é realizada, onde é proposta uma transição em rampa para a recuperação de um estado para a operação normal, analisando seu desempenho.

O diagrama de blocos para alcançar tal metodologia de recuperação é apresentado e pode ser implementado em qualquer software de simulação.

Os resultados de simulação mostram o bom desempenho da abordagem proposta.

Abstract

Nowadays, the distribution system has experienced electrical problems that require different solutions from conventional ones.

Power electronics devices, already consolidated when applied to transmission systems to improve its characteristics, begins to have great use also at distribution levels. The use of power electronics devices such as the TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), commonly used in transmission lines, is being gradually used in medium voltage distribution systems, thus avoiding unnecessary expenses by concessionaires such as reconductoring feeder.

This work presents the modeling of a TCSC, and analyzes its operation acting as fault current limiter in a 11,4 kV distribution feeder, presenting by simulation their behavior at steady state as well as during a fault condition. The modeling fault detector circuit, that controls the activation of the thyristors of the TCSC is carried out, where it is proposed a ramp transition for the recovering of a state to normal operation, analyzing its performance.

The block diagram for achieve recovery methodology is presents and can be implemented in any simulation software.

The results of simulations show the good performance of the proposed approach.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Perfil de tensão com a instalação de um BCS, próximo à carga	19
Figura 1.2: Representação monofásica do TCSC	20
Figura 2.1: Representação monofásica do TCSC	25
Figura 2.2: Módulo do TCSC na prática	26
Figura 2.3: Comparação entre as reatâncias do TCSC.....	29
Figura 2.4: Modo de operação de bloqueio	30
Figura 2.5: Gráfico da impedância em função do ângulo de atraso	31
Figura 2.6: Linha de transmissão sem compensação série	32
Figura 2.7: Sistema de potência com compensação série	32
Figura 2.8: Gráfico da potência ativa e reativa em função do ângulo de defasagem	33
Figura 2.9: Sistema radial simples	34
Figura 2.10: Gráfico da estabilidade de tensão.....	35
Figura 2.11: Critério das áreas iguais sem compensação.....	36
Figura 2.12: Critério das áreas iguais com compensação	36
Figura 2.13: Amortecimento de oscilação de potência por meio do ângulo do gerador	38
Figura 2.14: Amortecimento de oscilação de potência por meio potência transmitida	38
Figura 2.15: Amortecimento de oscilação de potência por meio do grau de compensação k ..	38
Figura 2.16: Representação do TCSC como FCL atuando em um sistema elétrico.....	40
Figura 3.1: Sistema modelado	41
Figura 3.2: Perfil de tensão com carga pesada, sem o TCSC.....	46
Figura 3.3: Perfil de tensão com carga leve, sem o TCSC.....	46
Figura 4.1 - Implementação do circuito do TCSC.....	49
Figura 4.2 – Tensões nos capacitores e rampas geradas pelo PLL.....	50
Figura 4.3 - Fluxograma lógico do circuito detector de falta	51
Figura 4.4- Sinal de saída gerado	52
Figura 4.5- Circuito gerador de rampa.....	53
Figura 4.6- Curva da impedância do TCSC em função do ângulo de disparo α	54
Figura 4.7 - Variação do ângulo de disparo	55
Figura 4.8 - Circuito de disparo com base na tensão do capacitor	56
Figura 5.1 – Perfil de tensão com carga pesada, com o TCSC	57
Figura 5.2 – Perfil de tensão com carga leve, com o TCSC	58
Figura 5.3: Corrente instantânea na condição de falta, sem o TCSC, em carga pesada	59
Figura 5.4: Comportamento da tensão eficaz na barra “0100”, na situação de carga pesada ..	60

Figura 5.5: Comportamento da tensão eficaz na barra “0300”, na situação de carga pesada ..	60
Figura 5.6: Tensão no capacitor para carga pesada	61
Figura 5.7: Corrente no indutor, na situação de carga pesada	61
Figura 5.8: Corrente de falta com o TCSC, na situação de carga pesada	62
Figura 5.9: Corrente de falta sem o TCSC, na situação de carga leve	63
Figura 5.10: Comportamento da tensão na barra “B0100”, na situação de carga leve	63
Figura 5.11: Comportamento da tensão na barra “0300”, na situação de carga leve	64
Figura 5.12: Tensão no capacitor para carga leve	64
Figura 5.13: Corrente no indutor, na situação de carga leve	65
Figura 5.14: Corrente de falta com o TCSC, na situação de carga leve	65

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Impedâncias em ohms do sistema da área em estudo	42
Tabela 3.2: Dados dos condutores	43
Tabela 3.3: Potência ativa e reativa para carga pesada	44
Tabela 3.4: Potência ativa e reativa para carga leve	45
Tabela 5.1: – Carga pesada com o TCSC.....	66
Tabela 5.2: – Carga leve com o TCSC.....	67
Tabela 5.3: – Carga pesada com o TCSC.....	69
Tabela 5.4: – Carga leve.....	70
Tabela 5.5: – Situações analisadas para o caso de carga pesada	70
Tabela 5.6: – Situações analisadas para o caso de carga leve	71

Lista de Abreviações ou Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
B ₁	Barramento 1
B ₂	Barramento 2
BC	Banco de Capacitor
BCS	Banco de Capacitor Série
BT	Baixa Tensão
C	Capacitância
CB	<i>Circuit Breaker</i> – Disjuntor
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CS	Capacitor Série
DVR	<i>Dinamic Voltage Restorer</i> – Restaurador Dinâmico de Tensão
EMTP	<i>Eletromagnetic-transient program</i> – Programa de transitório eletromagnético
FACDS	<i>Flexible AC Distribution Systems</i> – Sistema de Distribuição AC Flexível
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i> – Sistema de Transmissão AC Flexível
f	Frequência fundamental
f_e	Frequência ressonante
I_{12}	Corrente Elétrica entre as barras 1 e 2
$i_{capacitor}$	Corrente do capacitor
i_{rede}	Corrente da rede elétrica
k	Grau de compensação série
L	Indutância
L_D	Elemento indutivo limitador
MFCL	<i>Magnetic Fault Current Limiters</i> – Limitador de Corrente de Falta Magnético
MOV	<i>Metal-Oxide Varistor</i> – Varistor de Óxido Metálico
MT	Média Tensão

P_{12}	Potência Elétrica entre as barras 1 e 2
P_m	Potência mecânica
Q_c	Potência reativa do capacitor
R	Resistência
R_1	Resistência de Sequência Positiva
R_0	Resistência de Sequência Zero
RSS	Ressonância Subsíncrona
RT	Regulador de Tensão
SE	Subestação
SFCL	<i>Superconducting Fault Current Limiters</i> – Limitador de Corrente de Falta Supercondutor
StFCL	<i>Static Fault Limiters</i> – Limitador de Falta Estático
T_1	Tiristor 1
T_2	Tiristor 2
TCR	<i>Thyristor-Controlled Reactor</i> – Reator Controlado a Tiristor
TCSC	<i>Thyristor-Controlled Series Capacitor</i> – Capacitor Controlado a Tiristor
TSR	<i>Thyristor-Switched Reactor</i> – Reator Comutado a Tiristor
UHSC	<i>Ultra-High-Speed Contact</i> – Contato de Ultra Alta Velocidade
V_1	Tensão da barra 1
V_2	Tensão da barra 2
V_{carga}	Tensão da carga
V_{fonte}	Tensão da fonte
X	Reatância entre as barras 1 e 2
X_1	Reatância de Sequência Positiva
X_0	Reatância de Sequência Zero
X_C	Reatância do capacitor
X_L	Reatância do indutor
X_{TCR}	Reatância do TCR
$X_{TCSC}(\alpha)$	Reatância Equivalente do Dispositivo TCSC
Z	Impedância
Z_{TCR}	Impedância do TCR

Lista de Símbolos

α	Ângulo de Disparo do Tiristor
π	Constante pi
ω	Frequência Angular

Sumário

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO	i
Agradecimentos	vi
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviações ou Siglas	xii
Lista de Símbolos	xiv
Sumário.....	xv
Capítulo 1: Introdução.....	17
1.1 A compensação série capacitiva.....	18
1.2 Compensação série com TCSC.....	20
1.3 O Limitador de Corrente de Falta	21
1.4 A proposta do trabalho	23
Capítulo 2: Revisão do Comportamento do TCSC.....	25
2.1 A Estrutura do TCSC.....	25
2.2 Modos de Operação.....	29
2.4 Resumo	40
Capítulo 3: O Sistema Estudado	41
3.1 Características elétricas do sistema de distribuição	41
3.6 Resumo	47
Capítulo 4: Modelagem do TCSC.....	48
4.1 Especificação do TCSC	48
4.2 Circuito detector de falta.....	50
4.3 Circuito gerador de rampa	52
4.4 Circuito de disparo	55
4.5 Resumo	56
Capítulo 5: Simulações.....	57

5.1 Perfil de tensão no alimentador com TCSC.....	57
5.2 Curto-circuito próximo à fonte.....	58
5.3 Curto-circuito no meio da linha	66
5.4 Curto-circuito na última barra.....	68
5.4.2 Comparativo das correntes de curto	70
5.5 Conclusões	71
Capítulo 6: Conclusão	72
Referências Bibliográficas.....	74

Capítulo 1: Introdução

A tecnologia dos dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) é aplicada tradicionalmente aos sistemas de transmissão de maneira a adaptar as características da linha ao binômio geração-carga. O objetivo é alcançado quando o controlador flexível se comporta como compensador série, de forma a elevar a capacidade de transmissão, amortecer oscilações de potência, controlar o fluxo de potência ou ainda quando atuar como FCL (*Fault Current Limiter*) para limitar as correntes de curto-circuito.

O sistema de distribuição sofre com quedas de tensão ao longo de alimentadores, dificultando o atendimento a diversas cargas. Construção de novas subestações ou recondutoramento do alimentador são exemplos de técnicas primordiais para a redução da impedância da linha e consequente amenização da instabilidade de tensão. No entanto, os gastos são significativos (De CAMARGO, 1998) e (De CAMARGO, SANTANA, [s.d]), gerando grandes investimentos por parte das empresas, que visam obter bons resultados de regulação de tensão, baixas perdas e atender seus clientes da maneira mais eficiente possível.

O uso de compensação capacitiva paralela em sistemas de transmissão e distribuição é consolidado nos sistemas elétricos (GOUVEA, Jr, [s.d.]) e (Jr., Carneiro, 2008). A alternativa de compensação série na distribuição, embora já explorada em alguns estudos da década de 1990, utilizando capacitores série (De CAMARGO, 1998), (De OLIVEIRA *et al*, 2002), (SUZUKI, 2010), (SUZUKI, [s.d]), (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003a), (LEMES, FERREIRA, SUZUKI, 2014), (De CAMARGO, SANTANA, 1992), (De CAMARGO, 1992), (De CAMARGO, 1995), (De CAMARGO ,SANTANA, [s.d]), (ACERBI, BUENO, [s.d]), só recentemente tem sido avaliada com mais ênfase, e nota-se que os estudos ainda não são totalmente conclusivos, pois na distribuição cada situação tem suas especificidades.

Ressalta-se que, como a compensação série é pouco aplicada em sistema de distribuição, torna-se necessário avaliar esta tecnologia em programas computacionais para posteriormente realizar testes em campo. A compensação série, em aplicações práticas nacionais atuais, além de envolver os capacitores série, engloba o DVR (Restaurador Dinâmico de Tensão) (OLIVEIRA *et al*, [s.d]) e (BIANCHIN *et al*, 2008), o SSSC (Compensador Estático Síncrono

Série) (MONTEIRO et al, [s.d]) e o TCSC (Capacitor Série Controlado por Tiristor) (UNESP; FEPISA, 2010).

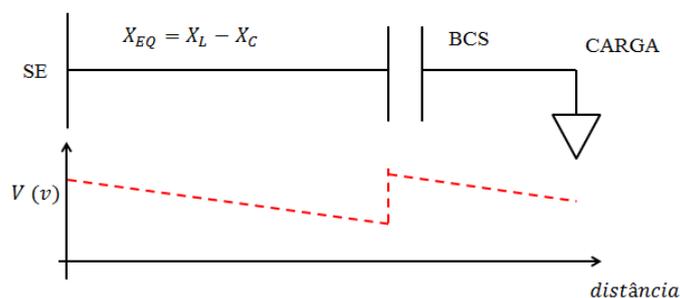
Aliado à compensação série, a função de Limitador de Corrente de Falta - FCL (*Fault Current Limiter*) torna os equipamentos FACTS cada vez mais completos. O TCSC é um equipamento comumente usado com este tipo de função. Este fato induz à redução de custos, uma vez que é desnecessária a inserção de dispositivos próprios para a mitigação de correntes de falta. Logo, alguns problemas do sistema elétrico passam a ser resolvidos em toda a sua plenitude com velocidade, confiabilidade e flexibilidade.

1.1 A compensação série capacitiva

O emprego da compensação série por concessionárias de energia elétrica, em sistemas de distribuição de baixa e média tensão, tende a melhorar os requisitos de rede. Esse método é considerado inovador, sendo bastante aplicado em sistemas de transmissão acima de 138 kV. Deve-se atentar, ainda, ao fato de que a resistência, em sistema de distribuição, não pode ser desprezada, influenciando a modelagem desta técnica (De ALMEIDA *et al*, 2013). O método, muito utilizado pelas empresas, envolve o uso de banco de capacitores série (BCS), que, sendo de fabricação nacional, reduziu ainda mais os investimentos em um projeto aplicado a sistemas de distribuição no Brasil (De CAMARGO, 1988). Além disso, uma grande vantagem é a sua regulação, que é proporcional à carga (De CAMARGO, SANTANA, [s.d]) e (ACERBI, BUENO, [s.d]). Trata-se de um método de compensação que visa compensar a reatância indutiva da linha por meio da reatância capacitiva (De CAMARGO, 1988), (LEMES, FERREIRA, SUZUKI, 2014), (ACERBI, BUENO, [s.d]), aumentando a capacidade de transferência de potência (MONTEIRO *et al*, [s.d]), e também elevar o nível de curto-circuito (SUZUKI, [s.d]), (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003a), (De CAMARGO, SANTANA, 1992), (De CAMARGO, 1992).

Pode-se observar na Figura 1.1 o comportamento da tensão ao longo de um alimentador em vista da aplicação de um banco de capacitor série (BCS) próximo à carga, onde X_L é a reatância indutiva a ser parcialmente compensada pela reatância capacitiva.

Figura 1.1: Perfil de tensão com a instalação de um BCS, próximo à carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Grandes empresas de energia elétrica, tais como a CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), a AES SUL (Distribuidora Gaúcha de Energia S/A), a ELEKTRO Eletricidade e Serviços S/A e a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), investiram em projetos de P&D com compensação série em redes de distribuição, para alcançar melhor regulação da tensão e reduzir a severidade de cintilação (*flicker*) (De CAMARGO, 1998), (SUZUKI, 2010), (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003a), (De CAMARGO, SANTANA, 1992), (De CAMARGO, 1992), (De CAMARGO, SANTANA, [s.d]), (ACERBI, BUENO, [s.d]). O banco de capacitor série foi utilizado, por essas empresas, para auxiliar na partida de grandes motores de indução trifásicos (MIT) (De CAMARGO, 1998), (De OLIVEIRA *et al*, 2002), (SUZUKI, [s.d]) e (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003), bem como melhorar o fluxo de potência entre alimentadores e controlar os reativos na linha (OLIVEIRA *et al*, [s.d]) e (MONTEIRO *et al*, [s.d]).

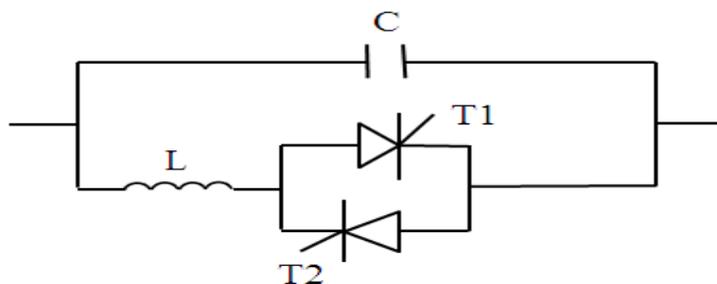
São aplicações que obtiveram desenvolvimento em campo, inicialmente, a partir de testes em plataformas, que permitiram a análise de transitórios eletromagnéticos. Apesar das vantagens do uso da compensação, usando BCS fixos, trata-se de uma técnica que, além de não apresentar flexibilidade, pode provocar o surgimento de ressonância subsíncrona (De OLIVEIRA *et al*, 2002), (SUZUKI, 2010), (SUZUKI, [s.d]), (ACERBI, BUENO, [s.d]) e (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003b) em decorrência de um possível alto grau de compensação em um dado sistema, sendo por isso indicada a análise prévia de transitórios. No uso dessa técnica, existe ainda a desvantagem devido a fenômenos de ferroressonância (De OLIVEIRA *et al*, 2002), (SUZUKI, [s.d]), (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003a) e (ACERBI, BUENO, [s.d]) autoexcitação (oscilação sub-harmônica) de motores de indução (De OLIVEIRA *et al*, 2002), (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003a) e (De JESUS,

De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003b) e oscilações periódicas (*hunting*), (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003a), (De CAMARGO, SANTANA, 1992), (De CAMARGO, 1992), (ACERBI, BUENO, [s.d]) e (De JESUS, De OLIVEIRA, LÍBANO, 2003b).

1.2 Compensação série com TCSC

O Capacitor Série Controlado a Tiristor (TCSC), Figura 1.2, tem sido recentemente avaliado para uso no sistema de distribuição.

Figura 1.2: Representação monofásica do TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contrário à compensação série, que utiliza banco de capacitor série fixo, este controlador, além de regular tensão, amortecer transitórios e reduzir as perdas, visa mitigar problemas de ferroressonância e ressonâncias eletromagnéticas, comumente típicas deste tipo de compensação. No âmbito nacional, este equipamento foi instalado na rede de distribuição da concessionária ELEKTRO para classes de tensão acima de 13,8 kV, em decorrência da progressiva necessidade de energia elétrica com alta qualidade. O projeto do Capacitor Série Controlado a Tiristor em distribuição (D-TCSC), cujo início se deu em 2010, desenvolveu-se em conjunto com a Universidade Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira - São Paulo. Previamente, foi analisado o tipo da rede elétrica da concessionária, fazendo-se um levantamento dos melhores alimentadores para a instalação do equipamento compensador. Posteriormente, foram realizadas simulações para, em seguida, confeccionar o protótipo de bancada e realizar os testes necessários com cargas convencionais, motrizes e eletronicamente chaveadas. Além disso, foi criada uma estrutura e realizada a montagem do D-TCSC, com os componentes já em tamanho real, tais como capacitores, reatores para controle tiristorizado, estrutura para suporte, chaves a vácuo, para-raios, reatores de descarga etc., sendo realizadas

as devidas medições, que foram necessárias para a avaliação do comportamento do dispositivo (FORMULÁRIO DE PROJETO, 2010).

1.3 O Limitador de Corrente de Falta

O FCL (*Fault Current Limiter*) é um equipamento conectado em série com a rede elétrica para manter a corrente em níveis aceitáveis, introduzindo uma impedância de valor elevado durante a ocorrência de falta do sistema. Tal dispositivo passa a se comportar como uma baixa impedância caso o sistema volte a seu estado normal de operação.

Existem diferentes tecnologias de FCL:

- *Superconducting Fault Current Limiters* (SFCL)
- *Magnetic Fault Current Limiters* (MFCL)
- *Static Fault Limiters* (StFCL)

A transição entre os estados de baixa e alta impedância do FLC deve ser feita rapidamente de forma a minimizar possíveis danos no equipamento e a um descarregamento adequado de elementos capacitivos. Outro ponto importante deste equipamento é referente a seu peso e custo que irá depender do tipo do FCL de acordo com a aplicação. Além disso, tal limitador auxilia na melhora da estabilidade do sistema, reduz afundamentos de tensão e ainda diminui o custo de novas instalações (PERERA, 2009).

1.3.1 A Localização do FCL

Dependendo do local de instalação do FCL, podem ocorrer mudanças na sua impedância. Os possíveis locais são:

- No alimentador primário de um sistema de distribuição
- Em um circuito de transformador
- Em um ponto de conexão com uma GD

A sua instalação no alimentador de um sistema de distribuição primário aborda apenas sua operação para uma falta. Ocorre que os alimentadores são radiais e por esta razão torna-se

necessário instalar um FCL para cada alimentador, resultando em um número de FCL's elevado. Além disso, a presença deste equipamento provoca a redução de afundamentos de tensão, porém isso irá depender dos parâmetros do sistema, o tipo de falta e da própria impedância do FCL.

Outro local pode ser em série com um transformador. Neste caso, ocorre a limitação da quantidade de FCL's, resultando em economia. Por fim, há a opção de o FCL ser conectado em um ponto de conexão com uma GD. Desta forma, ocorrerá a limitação de corrente de falta a partir desta GD, não ocorrendo a melhora da tensão da rede durante a falta (PERERA, 2009).

1.3.2 O uso do FCL

O aumento de demanda tem sido verificado no sistema de distribuição juntamente com a crescente modificação dos sistemas de geração, que cada vez têm utilizado fontes alternativas de energia tais como painéis solares e energia eólica. A Geração Distribuída (GD) tem se tornado muito utilizada, e muitas vezes é localizada em pontos fracos da rede, o que obriga as concessionárias a elevarem a margem de segurança de seus sistemas de forma a permitir a interconexão de uma GD (KUMARA *et al*, 2006). Além disso, a instalação de uma GD nestas áreas implicará no aumento da corrente de curto-circuito que os equipamentos podem suportar (PERERA, 2009).

Segundo Lanes (2006), caso ocorra a manutenção de tais correntes de falta por um longo período, tanto os equipamentos quanto os cabos poderão ser danificados e ainda colocará em risco a vida das pessoas. Estas manutenções têm um custo cada vez maior, pois o nível da corrente de curto tende a se elevar frequentemente.

Um Limitador de Corrente de Falta (FCL) deverá ter os seguintes critérios:

- Queda de tensão nula quando o sistema opera sem falta;
- Tenha alta impedância quando ocorre o curto-circuito;
- Opere antecipadamente ao primeiro pico da corrente de falta;

- Redução da corrente de falta transitória;
- Eliminação da componente CC da corrente de falta;
- Interrompa a corrente de falta de regime permanente.

Será visto com mais detalhes que o TCSC pode ter a capacidade de ajustar a sua impedância entre a região indutiva e capacitiva, evitando a região proibitiva de ressonância, o que levará à mitigação de corrente de curto-circuito. A aplicação deste controlador tem significativa vantagem de custo caso tenha outra aplicação além da limitação de corrente de curto. Por exemplo, no Brasil, o TCSC é utilizado para o controle do fluxo de potência e para amortecer oscilações de potência nas interlições Norte-Sul I e II, mas também poderá atuar limitando a corrente de falta.

1.4 A proposta do trabalho

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo analisar as aplicações dos dispositivos FACTS do tipo TCSC em um sistema elétrico de média tensão (distribuição primária), estudar o comportamento do sistema em decorrência da aplicação desta tecnologia, verificando o seu comportamento como compensador série e ressaltando o uso da limitação de corrente de falta em sistemas de distribuição.

Este capítulo apresentou introdução acerca do uso da eletrônica de potência em sistemas de distribuição, que teve como base inicial o uso de capacitores série para a compensação. Viu-se que a eletrônica de potência estendeu-se para solucionar outros problemas que vão além da compensação série, tal como a limitação de corrente de falta. Com isso, o TCSC surge como uma solução conveniente, por ser um equipamento completo, já que pode suprimir altas correntes de curto-circuito em decorrência da crescente demanda apresentada nos últimos anos em sistemas de média tensão.

O capítulo 2 apresenta a estrutura, as principais características e aplicações do TCSC, e o capítulo 3 apresenta o sistema de distribuição em estudo com suas principais características e a modelagem desta rede no PSCAD/EMTDC.

O capítulo 4 mostra os circuitos auxiliares necessários para o correto funcionamento do TCSC, bem como a modelagem deste controlador abordando a metodologia de seu desenvolvimento.

O capítulo 5 apresenta o resultado das simulações do sistema sem e com a inserção do TCSC, sendo que as conclusões dos estudos observados na simulação são apresentadas no capítulo 6.

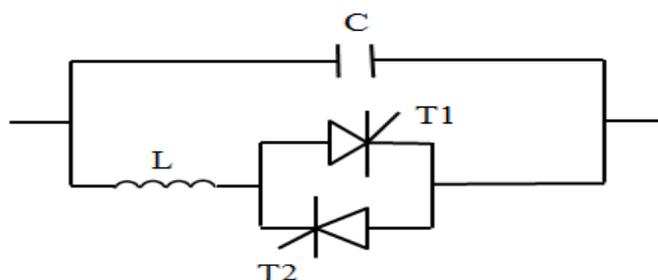
Capítulo 2: Revisão do Comportamento do TCSC

Neste capítulo são apresentadas as principais características do dispositivo TCSC, destacando inicialmente a sua estrutura e os seus componentes complementares de proteção e as equações que regem o seu funcionamento. Na seção 2.2 são apresentados os seus modos de operação e na seção 2.3 apresentam-se algumas de suas aplicações.

2.1 A Estrutura do TCSC

O Capacitor Série Controlado por Tiristor é uma impedância variável composta por um capacitor em paralelo com um TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) que é formado por dois tiristores em antiparalelo e em série com um indutor (HINGORANI, GYUGI, 1999) e (ETT et al, 2011), como se observa de na Figura 2.1.

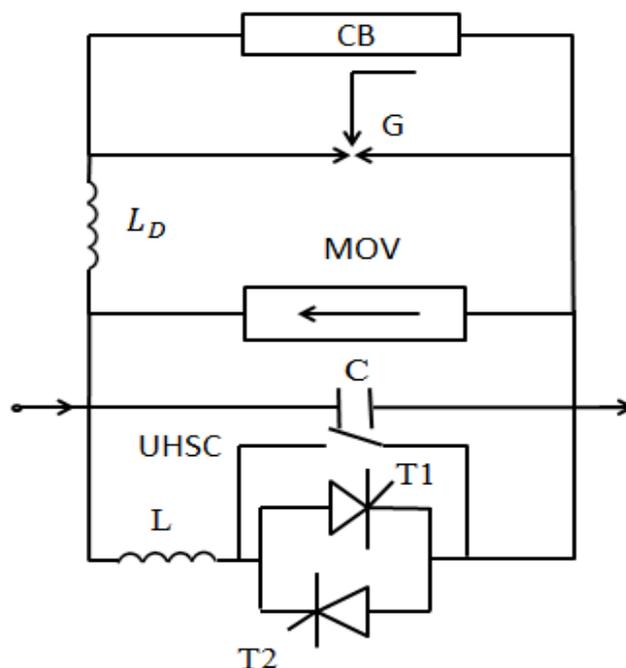
Figura 2.1: Representação monofásica do TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na prática, o módulo do TCSC inclui ainda um dispositivo de proteção, mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2: Módulo do TCSC na prática



Fonte: Elaborado pelo autor.

O *Metal-Oxide Varistor* (MOV) é um resistor não linear utilizado para prevenir possíveis sobretensões no capacitor, além de permitir que este elemento permaneça no circuito, mesmo quando da existência de faltas, e auxilia na estabilidade transitória.

Já o *Circuit Breaker* (CB) é um interruptor que “bypassa” o capacitor em caso de faltas muito severas ou em decorrência do mau funcionamento de equipamentos.

O indutor L_D é um elemento que limita tanto a frequência quanto a amplitude da corrente no capacitor durante a operação de *bypass* do capacitor.

Já o dispositivo *gap* ou centelhador protege o MOV, caso o nível de proteção deste seja ultrapassado. Trata-se de uma atuação que ocorre em torno de 5ms. Existem alguns tipos de *gaps*, porém aquele que atua protegendo os capacitores do compensador é o *gap* com MOV.

Um contato metálico denominado *Ultra-High-Speed Contact* (UHSC) é usado sempre que os tiristores operarem por longos períodos em modo de condução *on*, para reduzir as perdas em condução. Basicamente, além realizar vários chaveamentos, caracteriza-se por não ter perdas, semelhantemente ao CB. Trata-se de um dispositivo que é fechado assim que o tiristor passa a

conduzir e é aberto logo que o tiristor entre em modo de bloqueio. Caso os tiristores passem por situações de sobrecargas e também durante condições de falta, o contato metálico é fechado para aliviar o “*stress*” no tiristor. (MATHUR; VARMA, 2002), (ZAMPELLIN, 2014).

Com relação ao seu comportamento elétrico, o TCSC fornece uma reatância capacitiva variável de forma contínua devido a uma impedância reativa variável controlada por um ângulo de atraso. A impedância do TCSC é constituída por uma reatância capacitiva, diretamente conectada aos terminais do TCSC, juntamente com um TCR, isto é, uma reatância indutiva cujo valor é controlado pelo disparo dos tiristores.

Tem-se que a reatância do TCR, para $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, pode ser representada pela equação 2.1 (FUERTE-ESQUIVEL; ACHA; AMBRIZ-PÉREZ, 2000).

$$Z_{TCR} = jX_{TCR} = j \frac{X_L \cdot \pi}{2(\pi - \alpha) + \text{sen}2\alpha} \quad (2.1)$$

Onde o termo X_L , apresentado na equação 2.1 é dado por $\omega \cdot L$.

Já a impedância do capacitor é representada pela equação 2.2.

$$Z_C = -jX_C \quad (2.2)$$

X_C é dado por $X_C = 1/\omega \cdot C$

Então a impedância do TCSC é dada pela equação 2.3.

$$Z_{TCSC}(\alpha) = \frac{-jX_C \cdot jX_{TCR}}{-jX_C + jX_{TCR}} \quad (2.3)$$

A impedância da equação 2.3 foi obtida a partir do paralelo entre o TCR na frequência fundamental e a reatância fixa do capacitor, o que torna esta equação válida apenas para o primeiro ciclo da corrente. Passado o primeiro ciclo, o capacitor armazena cargas, conduzindo as tensões em regime permanente para valores elevados em comparação com os casos em que o efeito de carregamento do capacitor é desprezado.

Logo, a equação 2.3 subestima a impedância em regime permanente do TCSC, já que os efeitos do “armazenamento de carga” do capacitor são desprezados (FUERTE-ESQUIVEL, ACHA, AMBRIZ-PÉREZ, 2000). Assim, a reatância equivalente do TCSC, em função do ângulo de disparo α é melhor representada pela equação 2.4.

$$X_{TCSC}(\alpha) = -X_c + C_1 \left(2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2(\pi - \alpha)) \right) - C_2 \cdot \cos^2(\pi - \alpha) (\varpi \cdot \tan(\varpi \cdot (\pi - \alpha)) - \tan(\pi - \alpha)) \quad (2.4)$$

Onde:

$$C_1 = \frac{X_c + X_{LC}}{\pi} \quad (2.5)$$

$$X_{LC} = \frac{X_c X_L}{X_c - X_L} \quad (2.6)$$

$$C_2 = \frac{4X_{LC}^2}{X_L \cdot \pi} \quad (2.7)$$

$$\varpi = \frac{1}{\sqrt{LC} \cdot 2\pi \cdot f} \quad (2.8)$$

A dedução da equação pode ser vista em Zampellin (2014).

Segundo Tenório e Jenkins (1997), a frequência de ressonância, representada pela equação 2.8, também pode ser expressa em relação à frequência fundamental pela equação 2.9.

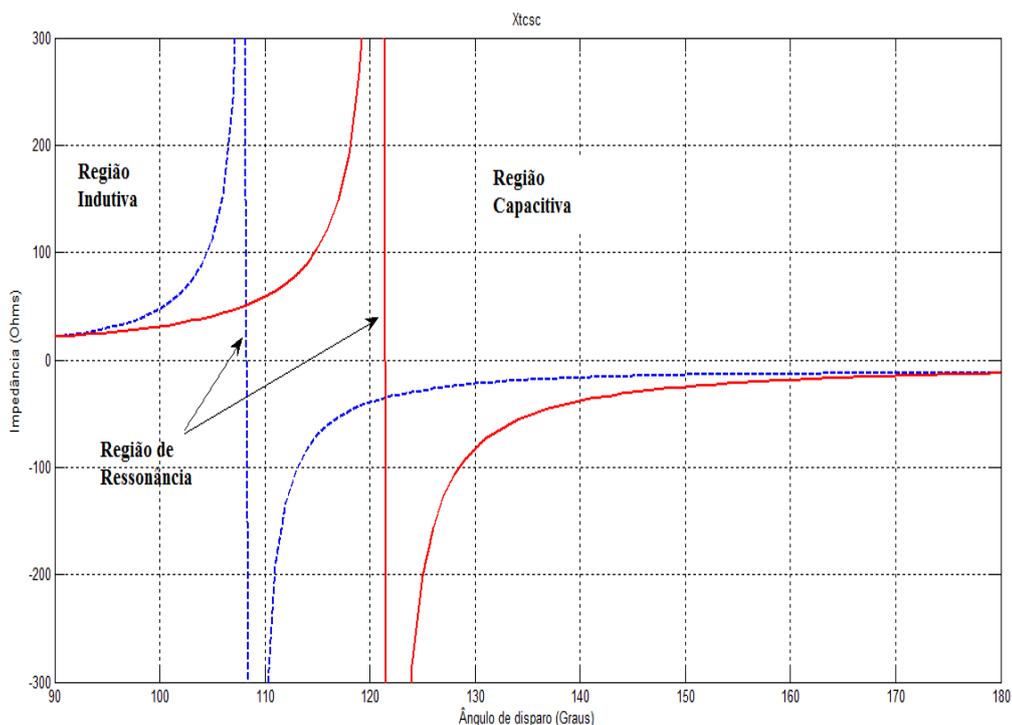
$$\varpi = \sqrt{X_c / X_L} \text{ pu} \quad (2.9)$$

Logo, como a reatância, que varia em função do ângulo α e pode sofrer uma variação de um valor mínimo, correspondente a $\omega \cdot L$, até o valor máximo, representado por ∞ (infinito), o capacitor também pode variar de um valor mínimo, representado por $\omega \cdot C$, até um valor máximo, onde ocorre a ressonância paralela, especificamente quando $X_c = X_L(\alpha)$ em que, teoricamente, a reatância do TCSC se torna infinita. Essa região deve ser evitada para prevenir problemas de harmônicos e grandes correntes internas, que podem vir a danificar o controlador ou até interromper a linha. (TAPIA 2007).

A Figura 2.3 mostra o comportamento típico da reatância do TCSC com o ângulo de disparo, para os dois equacionamentos. Os efeitos do “armazenamento de carga”, relatados

anteriormente, se tornam visualmente maiores próximos à região de ressonância. A curva em tracejado foi gerada usando a equação 2.4 e a curva traço cheio usando a equação 2.3.

Figura 2.3: Comparação entre as reatâncias do TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Meikandasivam, Nema e Jain (2011), o fator descrito pela equação 2.8 pode definir a faixa da região indutiva e capacitiva e o número de pontos de ressonância, que podem reduzir a faixa de operação do TCSC. Este fator deve ser menor do que 3 (HU, CHENG, CAI, 2004). Estudos realizados mostram que para valores de ϖ entre 1 e 3 existem diversos pontos de ressonância (MEIKANDASIVAM, NEMA E JAIN, 2011). Porém, quanto mais próximo for este fator de 3, esta região de ressonância se desloca em direção ao ângulo de 180° tornando a região capacitiva cada vez mais limitada. Caso o valor de ϖ seja maior do que 3 podem haver múltiplos pontos de ressonância, reduzindo a operação do dispositivo TCSC.

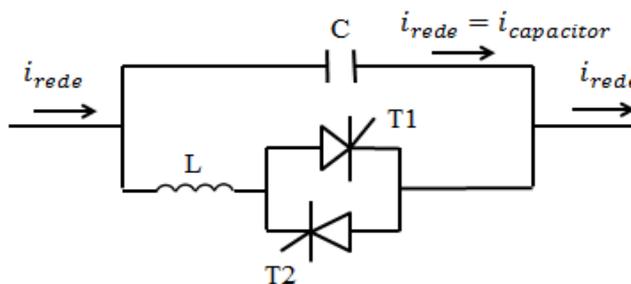
2.2 Modos de Operação

O TCSC possui três modos de operação (GONÇALVES, 2007), onde podem ser encontrados diferentes valores de reatâncias.

Existe o modo de bloqueio, mostrado na Figura 2.4, em que o ângulo de disparo é 180° , os tiristores não recebem sinal de disparo e o TCSC opera como um banco fixo de capacitores.

Este modo é bastante usado quando o TCSC opera em baixa impedância.

Figura 2.4: Modo de operação de bloqueio

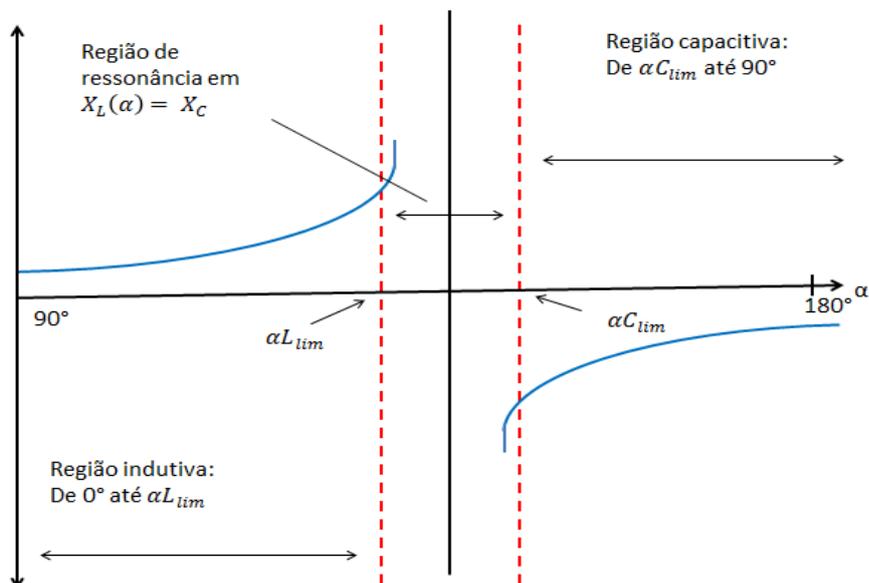


Fonte: Elaborado pelo autor.

Já no modo *bypass*, também denominado TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), o ângulo de disparo dos tiristores é de 90° e os mesmos conduzem de forma contínua, sendo o módulo do TCSC caracterizado por incluir uma reatância indutiva.

Há ainda o chamado modo Vernier, que pode ser tanto capacitivo quanto indutivo. No modo Vernier indutivo o ângulo de disparo pode variar entre 90° e um ângulo limite α_{lim} que é definido pela região de ressonância, como se observa na Figura 2.5. Já no modo Vernier capacitivo, o ângulo do disparo dos tiristores varia entre 180° e o ângulo limite α_{lim} . Os modos Vernier capacitivo e indutivo permitem controlar a compensação feita por meio do ângulo de disparo dos tiristores. Assim o TCSC poderá fazer a compensação de reativo capacitivo ou indutivo, dependendo da necessidade do projeto.

Figura 2.5: Gráfico da impedância em função do ângulo de atraso



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 Aplicações do TCSC

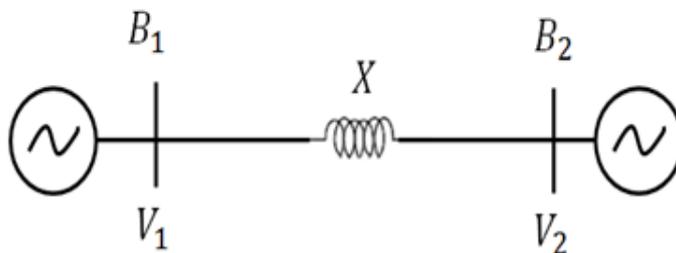
As aplicações mais comuns de compensadores série envolvem a elevação de capacidade de transmissão, estabilidade de tensão, melhoramento da estabilidade transitória, amortecimento de oscilação de potência e amortecimento de oscilação subsíncrona.

2.3.1 Capacidade de transmissão

Dentre as aplicações do TCSC a mais comum é a elevação da capacidade de transmissão, por meio da compensação capacitiva série.

A transferência de potência real em uma linha de transmissão relaciona-se com a reatância indutiva da linha, as suas tensões terminais e a defasagem angular entre estas. O fluxo de potência ativa entre duas barras representadas na Figura 2.6 pode ser obtido pela equação 2.10.

Figura 2.6: Linha de transmissão sem compensação série



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$P_{12} = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \text{sen} \delta_{12} \quad (2.10)$$

Onde, a partir da equação 2.10 e da Figura 2.6 pode ser definido:

P_{12} : Potência transferida entre as barras 1 e 2;

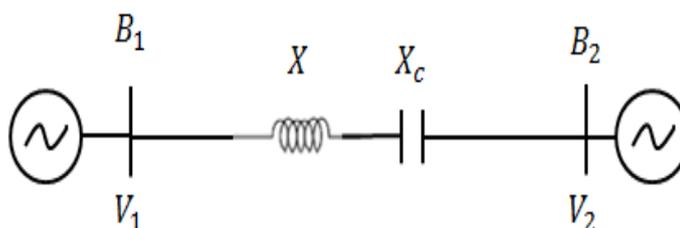
V_1 e V_2 : módulos nas barras 1 e 2, respectivamente;

δ_{12} : defasagem entre as tensões das barras 1 e 2, respectivamente ($\angle V_1 - \angle V_2$);

X : reatância série da linha de transmissão;

A ideia básica da compensação série é aumentar a capacidade de transmissão, reduzindo a impedância X da linha, na relação $P = (V^2/X) \cdot \text{sen} \delta$. Para tal, pode-se adicionar um capacitor equivalente do TCSC em série, considerando a mesma linha de transmissão da figura anterior, porém agora com um capacitor em série, como é mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Sistema de potência com compensação série



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde X_c é a reatância capacitiva do TCSC.

A impedância equivalente da linha transmissão é dada pela equação 2.11.

$$X_{eq} = X - X_c \quad (2.11)$$

Ou

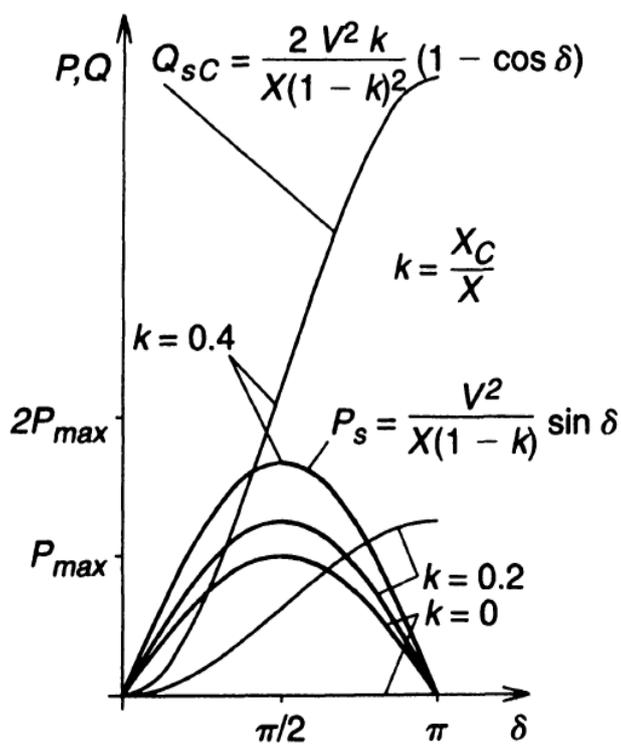
$$X_{eq} = (1 - k) \cdot X \quad (2.12)$$

Onde k é o grau de compensação série dado pela equação 2.13 e que pode variar entre 0 e 1.

$$k = X_c/X \quad (2.13)$$

A Figura 2.8 mostra algumas situações, onde a potência ativa e reativa tem seus valores elevados, de acordo com o grau de compensação série. As tensões V_1 e V_2 são consideradas de valor eficaz semelhante, V .

Figura 2.8: Gráfico da potência ativa e reativa em função do ângulo de defasagem



Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

Os valores de potência e corrente são dados pela equação 2.14 e 2.15, respectivamente.

$$P_{12} = \frac{V^2}{(1-k) \cdot X} \cdot \text{sen} \delta_{12} \quad (2.14)$$

$$I_{12} = \frac{2 \cdot V}{(1-k) \cdot X} \cdot \text{sen} \frac{\delta_{12}}{2} \quad (2.15)$$

Já a potência reativa, que é fornecida pelo capacitor série é dada pela equação 2.16.

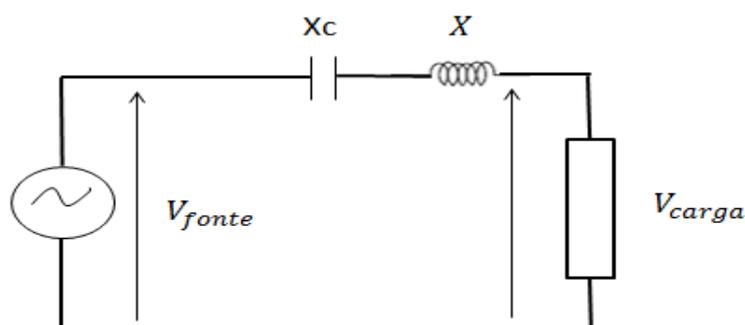
$$Q_c = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \frac{K}{(1-K)^2} \cdot (1 - \cos \delta_{12}) \quad (2.16)$$

Pode-se observar pela Figura 2.8 que a potência ativa transmitida eleva-se com o grau de compensação série k . De forma equivalente, a potência reativa que o capacitor série fornece aumenta bruscamente com o valor de k . A reatância capacitiva cancela parte da reatância indutiva da linha de transmissão, como se esta tivesse seu tamanho reduzido. Uma explicação equivalente é que, para aumentar a corrente em uma impedância série, a tensão nos terminais dessa impedância precisa ser elevada. Isso é conseguido inserindo um elemento série, tal como um capacitor.

2.3.2 Estabilidade de tensão

A compensação série também é usada para reduzir a variação da tensão no terminal de carga e a possibilidade de colapso de tensão. Um sistema simples pode ser observado na Figura 2.9, onde podem ser observadas a reatância da linha X , a reatância do capacitor série X_c e uma carga Z .

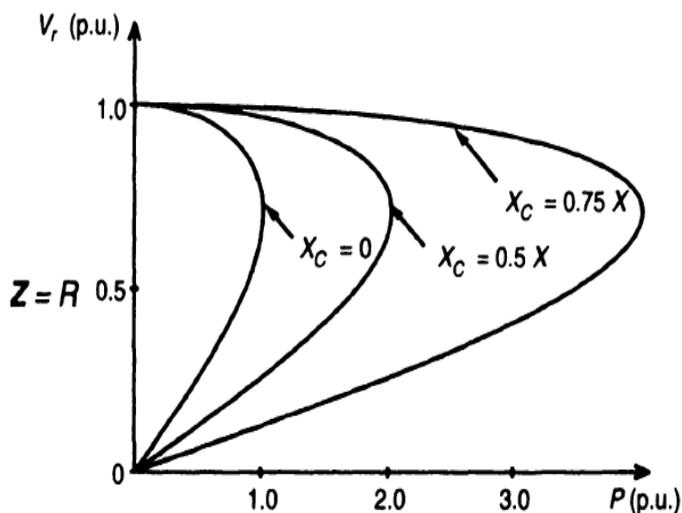
Figura 2.9: Sistema radial simples



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 2.10 mostra a curva da tensão em função da potência P com compensação de 0, 0,5 e 0,75. Ao traçarmos uma linha vertical em uma das curvas obteremos dois pontos. O ponto superior representará o ponto de estabilidade e o inferior, que terá uma menor tensão, o ponto de instabilidade de tensão.

Figura 2.10: Gráfico da estabilidade de tensão



Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

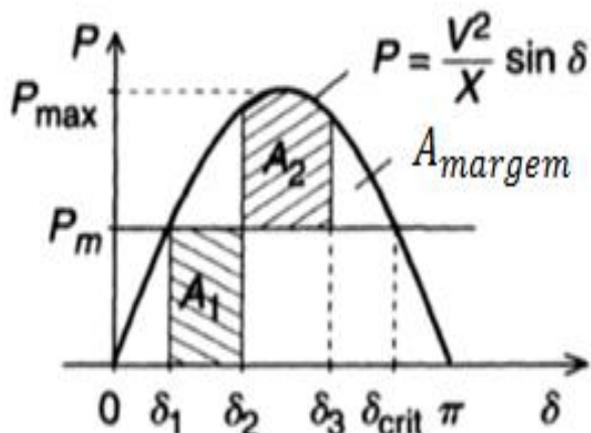
2.3.3 Melhoramento da estabilidade transitória

A capacidade da compensação série em controlar o fluxo de potência pode ser usada para elevar o limite de estabilidade transitória e amortecer oscilações de potência. Supondo que os sistemas das Figuras 2.6 e 2.7 transmitam uma potência P e que ambos estejam sujeitos a mesma falta durante o mesmo intervalo de tempo. O comportamento destes sistemas pode ser observado nas Figuras 2.11 e 2.12.

Para o sistema sem compensação e com compensação, antes da falta ocorrer, a potência P é transmitida nos ângulos de defasagem correspondentes a δ_1 e δ_{s1} , respectivamente. Durante a falta, a potência elétrica transmitida torna-se zero, enquanto que a potência mecânica dos geradores permanece constante, P_m . Assim, o gerador localizado na barra 2 acelera a partir dos ângulos δ_1 e δ_{s1} , para os ângulos δ_2 e δ_{s2} , respectivamente, quando a falta é extinta. As energias de aceleração são representadas pelas áreas A_1 e A_{s1} . Depois que a falta é extinta, a potência elétrica transmitida torna-se maior do que a potência mecânica, fazendo com que o gerador da barra 2 desacelere. Porém, a energia cinética acumulada aumenta, até que o equilíbrio entre as duas energias, de aceleração e desaceleração, seja alcançado nos ângulos δ_3 e δ_{s3} , respectivamente. As áreas A_{margin} e $A_{smargin}$ determinam a margem de estabilidade transitória para o caso sem compensação e com compensação, respectivamente. Comparando

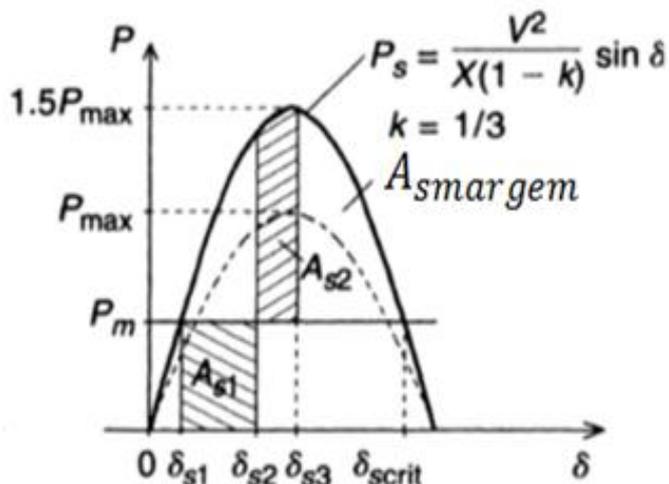
ambas as áreas, observa-se que a margem de estabilidade transitória para o sistema compensado é maior do que para o caso sem nenhuma compensação série. A elevação da margem de estabilidade transitória aumentará de acordo com o grau de compensação série.

Figura 2.11: Critério das áreas iguais sem compensação



Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

Figura 2.12: Critério das áreas iguais com compensação



Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

Na prática, a compensação série capacitiva não pode ser maior do que 75% por várias razões, incluindo alta corrente de falta e dificuldades no controle do fluxo de potência. A compensação série comumente é limitada por cerca de 30% devido às preocupações de subsincronismo.

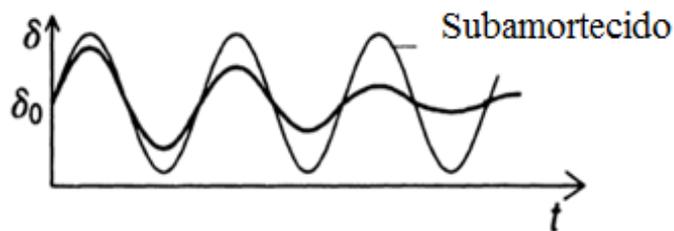
2.3.4 Amortecimento de oscilação de potência

A compensação série também é utilizada para amortecer oscilações de potência e para tal é preciso variar a compensação aplicada de forma a neutralizar os desequilíbrios de aceleração e desaleração de uma máquina. Em outras palavras, quando a rotação do gerador acelera e o ângulo δ aumenta, a potência elétrica transmitida deve aumentar para compensar o excesso de potência mecânica. Porém, caso o gerador desacelere e o ângulo δ diminui, a potência elétrica precisa ser reduzida para equilibrar a falta de potência mecânica.

As Figuras 2.13, 2.14 mostram, respectivamente, oscilações amortecidas e subamortecidas do ângulo δ em torno de seu estado estacionário δ_0 e oscilações amortecidas e subamortecidas da potência elétrica em torno da sua potência em regime estacionário P_0 . Já a Figura 2.15 apresenta a variação do grau de compensação capacitiva série aplicada, k . Com um valor de k máximo, a impedância da linha é baixa e assim a potência transmitida é máxima. Quando o grau de compensação se torna nulo a impedância da linha se torna máxima e a potência elétrica de transmissão, mínima.

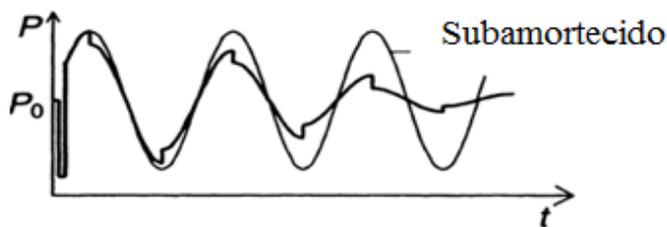
Este tipo de controle tem maior efetividade para amortecimento de grandes oscilações de potência.

Figura 2.13: Amortecimento de oscilação de potência por meio do ângulo do gerador



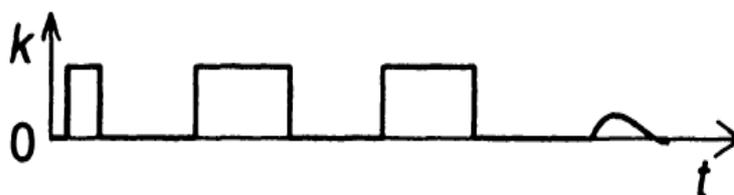
Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

Figura 2.14: Amortecimento de oscilação de potência por meio potência transmitida



Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

Figura 2.15: Amortecimento de oscilação de potência por meio do grau de compensação k



Fonte: (Hingorani, Gyugi, 1999).

2.3.5 Amortecimento de oscilação subsíncrona

Estudos mostraram que a interação entre um capacitor série oscilando na frequência natural de ressonância e o sistema mecânico de um conjunto gerador – turbina pode resultar em um amortecimento negativo, intensificando oscilações elétricas e mecânicas.

Um capacitor em série com um circuito indutivo de uma linha de transmissão (incluindo o gerador e as indutâncias de dispersão do transformador), forma um circuito ressonante com a frequência natural de $f_e = 1/2\pi \sqrt{LC} = f \sqrt{\frac{X_c}{X}}$. Onde X_c é a reatância do capacitor série e X é a reatância total da linha na frequência fundamental do sistema de potência, f .

Já que o grau de compensação k , definido por $\frac{X_c}{X}$, usualmente é de 0,25 a 0,75, a frequência ressonante f_e é menor que a frequência f . Ou seja, a frequência f_e é uma frequência subharmônica. Caso ocorra algum distúrbio na rede e o circuito elétrico esteja em uma situação de oscilação, então a componente subharmônica da corrente de linha resulta em um campo subharmônico na máquina, que como rotacionada para trás em relação ao campo principal, produz um torque alternante no rotor na frequência $f - f_e$. Se essa diferença de frequência coincide com uma das ressonâncias de torsão do conjunto gerador – turbina, a oscilação de torção mecânica é estimulada, o que aumenta ainda mais a ressonância elétrica. Tal fato caracteriza a ressonância subsíncrona. Grandes geradores com turbinas multiestágios tem múltiplos modos de torsão com frequências abaixo da fundamental e são os mais suscetíveis à ressonância subsíncrona com capacitor série em uma linha de transmissão.

Para explorar todas as capacidades funcionais da compensação série capacitiva para o controle do fluxo de potência, melhora na estabilidade transitória e amortecimento de oscilações de potência, é necessário que, no mínimo, seja mitigada a ressonância subsíncrona. Isto é alcançado utilizando compensadores série baseados em eletrônica de potência.

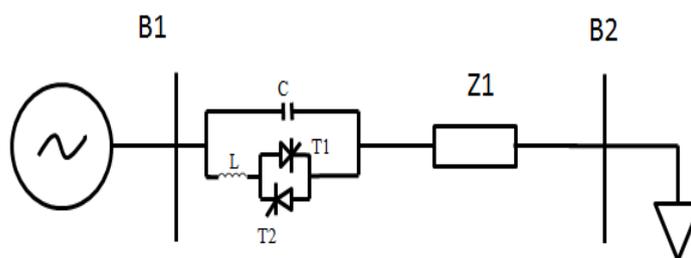
2.3.6 Limitador de corrente de falta

A necessidade em se limitar a corrente de falta já é antiga. Reduzir este tipo de corrente evita o emprego de disjuntores caros e gastos desnecessários em substituir equipamentos. Um método bastante utilizado faz uso de um controle de disparo de tiristores, que insere uma alta indutância no circuito, quando há um curto-circuito na rede, limitando assim a corrente de falta. (KARADY, 1990).

Os TCSC's também podem ser utilizados como Limitadores de Corrente de Falta (FCL). Se no circuito apresentado na Figura 2.16, ocorre um curto-circuito na LT próximo à barra B_2 , e

o TCSC está instalado na barra B_1 , os tiristores T_1 e T_2 são disparados. Quando ocorre esse gatilho, o indutor passa a operar em paralelo com o capacitor e o circuito ressonante irá limitar a corrente de falta. Assim que a falta é eliminada, os disparos são cancelados.

Figura 2.16: Representação do TCSC como FCL atuando em um sistema elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Resumo

Neste capítulo, foi apresentada a estrutura do TCSC, incluindo os seus elementos de proteção e realizou-se uma análise referente ao uso da melhor equação da impedância do TCSC a ser utilizada. Além disso, apresentaram-se os modos de operação do dispositivo e algumas de suas aplicações, que vão desde a transferência de fluxo de potência, amortecimento de oscilações de potência, até a limitação de corrente de falta, que é o foco do presente trabalho.

Capítulo 3: O Sistema Estudado

Neste capítulo são apresentadas as características do sistema de distribuição de média tensão baseada em uma rede real em uma região do estado do Espírito Santo. Com base nestas informações, o sistema elétrico será modelado no *software* PSCAD/EMTDC. Serão analisadas 26 cargas operando no período da tarde, atuando como carga pesada, e no período da madrugada, atuando como carga leve. É avaliada a influência no circuito e a inserção de um D-TCSC, projetado para operar como FCL. Além disso, o perfil de tensão obtido, ao longo do alimentador, através de simulação, é apresentado.

3.1 Características elétricas do sistema de distribuição

Para a modelagem do sistema, foi utilizado o *software* de simulação PSCAD de versão 4.2.0. A Figura 3.1 mostra o diagrama unifilar do sistema modelado. A rede projetada é constituída por uma fonte ideal de 11,4 kV e um alimentador de 1,132 km de extensão, tratando-se de um valor aproximado, uma vez que as distâncias entre as barras têm elevada quantidade de casas decimais. As barras do sistema modelado são numeradas sequencialmente a partir de B0100. Tem-se em linha: B0100, B0200, B0300, B0400, B0500, B0600, B0700, B0800, B1000, B1100, B1200, B1300, B1400, B1500, B1600, B1700, B1800, B1900, B2000, B2100, B2200, B2300, B2400, B2500 e B2600. As barras com ramificações são nomeadas com alteração nas duas últimas casas decimais. Por exemplo, a barra B0410 tem origem na barra B0400. O sistema adotado também é formado por 26 cargas desequilibradas ao longo do alimentador, modeladas como potência constante com o bloco *Fixed Load*, disponível na biblioteca do PSCAD. Dependendo do trecho analisado, foram empregadas diferentes impedâncias de acordo com a característica de cada cabo e comprimento do trecho, dados na Tabela 3.1

Figura 3.1: Sistema modelado

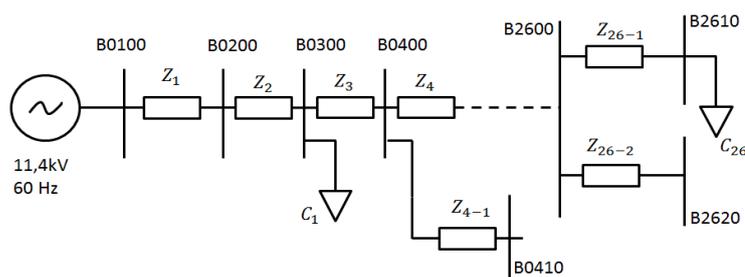


Tabela 3.1: Impedâncias em ohms do sistema da área em estudo

Impedância	Cabo Fase	Comprimento do cabo fase (m)	Barras	R1 (Ω/m)	X1 (Ω/m)	R0 (Ω/m)	X0 (Ω/m)
Z1	3x500Cx MT	205,77	B0100-B0200	0,000891	0,00107	0,006302	0,002036
Z2	185AX	16,49	B0200-B0300	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z3	185AX	21,54	B0300-B0400	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z4	185AX	13,34	B0400-B0500	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z5	185AX	54,06	B0500-B0600	0,000591	0,000756	0,002079	0,003825
Z6	185AX	15,23	B0600-B0700	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z7	185AX	34,18	B0700-B0800	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z8	185AX	37,34	B0800-B0900	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z9	336AN	2,24	B0900-B1000	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z10	185AX	56,65	B1000-B1100	0,000394	0,000504	0,001386	0,00255
Z11	185AX	48,39	B1100-B1200	0,000394	0,000504	0,001386	0,00255
Z12	185AX	64,26	B1200-B1300	0,000394	0,000504	0,001386	0,00255
Z13	185AX	23,77	B1300-B1400	0,000197	0,000252	0,000693	0,001275
Z14	336AN	43,87	B1400-B1500	0,00038	0,000812	0,001386	0,00255
Z15	336AN	23,24	B1500-B1600	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z16	336AN	37,80	B1600-B1700	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z17	336AN	34,21	B1700-B1800	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z18	336AN	36,24	B1800-B1900	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z19	336AN	27,80	B1900-B2000	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z20	336AN	35,61	B2000-B2100	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z21	336AN	82,41	B2100-B2200	0,00057	0,001218	0,002079	0,003825
Z22	336AN	20,05	B2200-B2300	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z23	336AN	50,49	B2300-B2400	0,00038	0,000812	0,001386	0,00255
Z24	336AN	83,76	B2400-B2500	0,00057	0,001218	0,002079	0,003825
Z25	336AN	31,58	B2500-B2600	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Z26-2	336AN	32,23	B2600-B2620	0,00019	0,000406	0,000693	0,001275
Total		1132,55	-	0,007843	0,01322	0,03125	0,047936

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Tabela 3.2 mostra, além da corrente nominal de cada cabo, a relação adimensional X/R para sequência zero e positiva.

Tabela 3.2: Dados dos condutores

Cabo Fase	X_0/R_0	X_1/R_1	Corrente Nominal (A)
1/0 AN	1,55	0,75	141
185 AX	1,84	1,28	314
2 AN	1,16	0,49	118
336 AN	1,84	2,14	500
3x3500CxMT	0,32	1,20	560
4 AN	0,85	0,32	98

Fonte: Elaborado pelo autor.

No PSCAD, quando o alimentador tem um comprimento menor do que 15 km e é considerado um *time step* de 50 μ s, pode ser utilizado o modelo π -*section* para a implementação de redes elétricas. A linha de distribuição modelada tem aproximadamente 1,132 km, e adotou-se um *time step* de 50 μ s nas simulações, justificando assim a utilização do modelo π -*section* para toda a modelagem da rede de distribuição.

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, os valores totais de demanda de potência para as 26 cargas nas fases A, B e C analisadas no período da tarde, atuando como carga pesada, e no período da madrugada, atuando como carga leve. A distribuição das potências nas barras é diversificada e desequilibrada.

Tabela 3.3: Potência ativa e reativa para carga pesada

Cargas	Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
		P(kW)	Q(kvar)	P(kW)	Q(kvar)	P(kW)	Q(kvar)
C1	B0300	24,38	10,38	24,78	10,55	25,17	10,72
C2	B0500	10,51	4,48	23,23	9,89	22,72	9,67
C3	B0610	39,01	16,62	44,06	18,77	39,72	16,92
C4	B0611	26,42	11,25	24,39	10,39	24,26	10,33
C5	B0620	17,96	7,65	17,23	7,34	7,28	3,10
C6	B0700	48,39	20,61	44,95	19,15	46,13	19,65
C7	B0810	40	17,04	40	17,04	40	17,04
C8	B1010	34,58	14,73	30,54	13,01	39,86	16,98
C9	B1021	15,21	6,477	15,21	6,48	15,21	6,48
C10	B1100	23,02	9,81	18,07	7,69	15,58	6,64
C11	B1210	34,12	14,53	56,28	23,98	49,48	21,08
C12	B1211	51,14	21,79	52,74	22,47	53,27	22,69
C13	B1300	21,63	9,21	16,77	7,14	18,76	7,99
C14	B1530	70,34	29,97	50,65	21,58	34,76	14,81
C15	B1710	49	20,87	49	20,87	49	20,87
C16	B1810	58,19	24,79	54,49	23,21	56,25	23,96
C17	B1910	104	44,30	104	44,30	104	44,30
C18	B1921	27,44	11,69	33,00	14,06	36,92	15,73
C19	B1922	42,21	17,98	40,24	17,14	34,76	14,81
C20	B2010	46,02	19,61	47,40	20,19	45,25	19,27
C21	B2100	34,84	14,84	30,79	13,12	28,72	12,24
C22	B2211	63,67	27,12	63,67	27,12	63,67	27,12
C23	B2300	0	-200	0	-200	0	-200
C24	B2410	89	37,91	89	37,91	89	37,91
C25	B2500	49,01	20,88	41,93	17,86	43,60	18,57
C26	B2610	31,67	13,49	31,67	13,49	31,67	13,49
Total	-	1051,76	248,03	1044,79	244,75	1015,04	232,37

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.4: Potência ativa e reativa para carga leve

Cargas	Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
		P(kW)	Q(kvar)	P(kW)	Q(kvar)	P(kW)	Q(kvar)
C1	B0300	53,69	22,79	53,50	22,665	55,39	23,47
C2	B0500	8,89	3,72	18,65	7,81	17,31	7,30
C3	B0610	46,62	19,86	55,33	23,46	48,64	20,61
C4	B0611	20,05	8,43	18,96	7,97	17,87	7,61
C5	B0620	14,52	6,18	16,68	6,89	8,47	3,39
C6	B0700	35,52	15,01	31,92	13,56	33,73	14,28
C7	B0810	36,67	15,62	36,67	15,62	36,67	15,62
C8	B1010	26,25	10,69	23,39	9,48	31,63	13,06
C9	B1021	8,57	3,65	8,57	3,65	8,57	3,65
C10	B1100	45,02	19,05	36,12	15,30	30,26	12,85
C11	B1210	18,59	7,92	33,14	14,12	27,99	11,93
C12	B1211	31,95	13,61	32,78	13,96	34,83	14,84
C13	B1300	27,40	10,49	17,48	6,92	21,17	8,29
C14	B1530	57,18	19,05	44,93	18,79	30,37	12,66
C15	B1710	40,83	17,39	40,83	17,39	40,83	17,39
C16	B1810	51,95	22,13	46,64	19,87	50,06	21,33
C17	B1910	52	22,15	52	22,15	52	22,15
C18	B1921	13,57	5,78	16,31	6,95	18,24	7,77
C19	B1922	25,16	10,72	24,18	10,30	20,56	8,76
C20	B2010	49,80	21,22	52,77	22,48	49,16	20,94
C21	B2100	30,22	12,03	34,69	13,33	29,47	11,54
C22	B2211	54,67	23,29	54,67	23,29	54,67	23,29
C23	B2300	0	-200	0	-200	0	-200
C24	B2410	32,33	13,77	32,33	13,77	32,33	13,77
C25	B2500	42,11	17,18	44,73	17,53	39,86	16,22
C26	B2610	30	12,78	30	12,78	30	12,78
Total	-	853,56	154,51	857,27	160,04	820,08	145,5

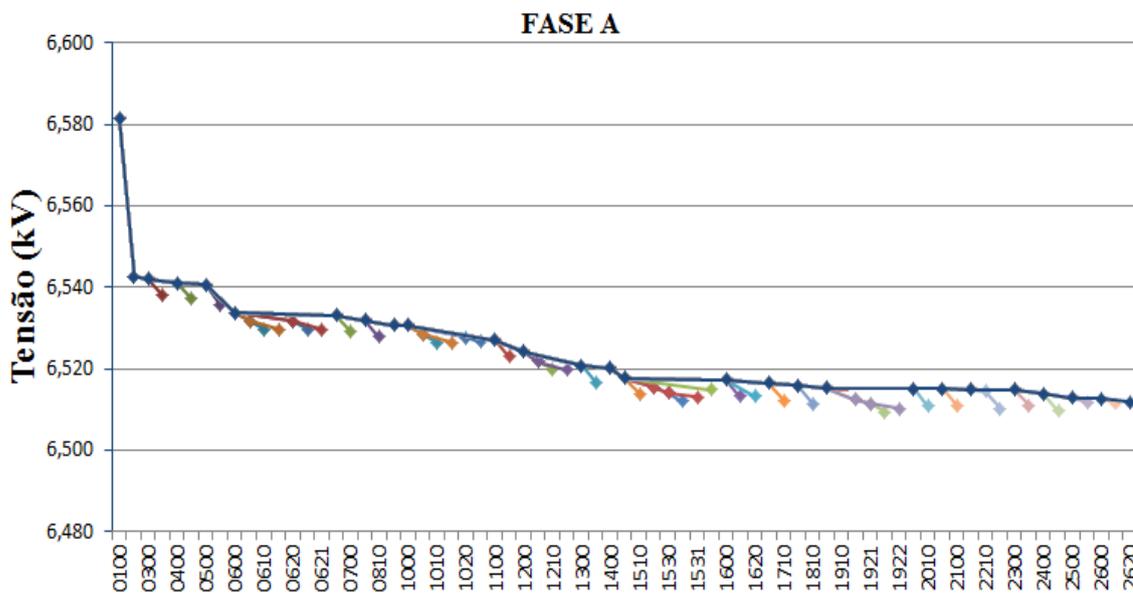
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como os resultados são similares, apesar de diferentes, devido ao desequilíbrio das cargas, apresenta-se no texto apenas os valores referentes à fase A.

A Figura 3.2 ilustra o comportamento do sistema com carga pesada, na condição original em regime permanente. A partir da barra inicial “B0100”, a tensão passou de 6,58 kV para uma tensão de 6,51 kV na última barra.

O sistema montado foi considerado válido, pois os erros entre as potências ativa e reativa da simulação com os valores reais foi inferior a 1%.

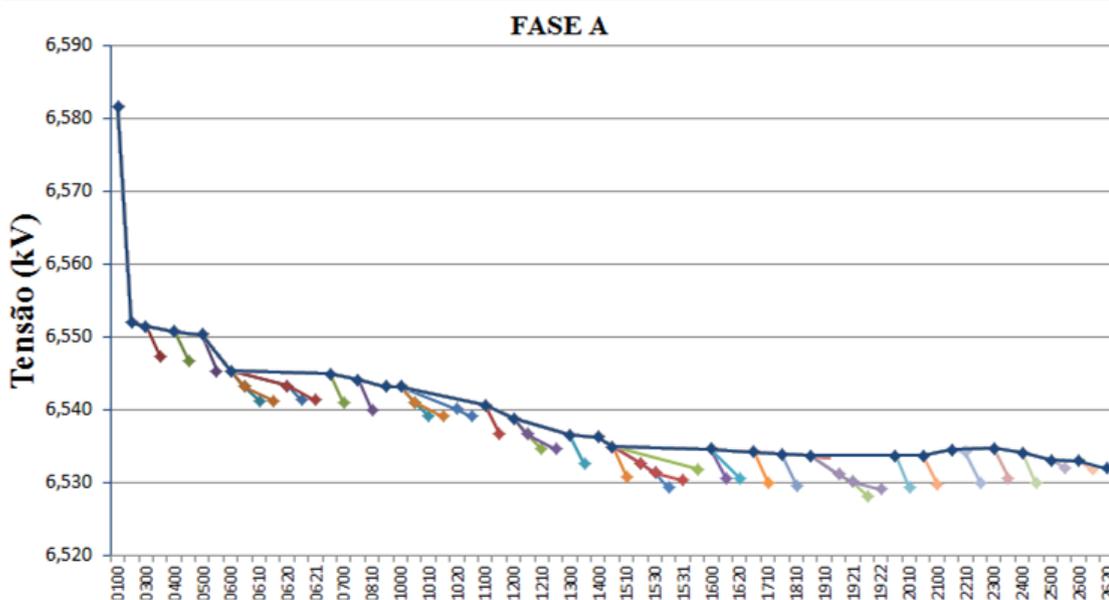
Figura 3.2: Perfil de tensão com carga pesada, sem o TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi obtido o perfil de tensão considerando carga leve. A Figura 3.3 mostra a tensão ao longo do alimentador. Observa-se que tensão na barra “0100” apresenta um valor de 6,58 kV, e na última barra, foi detectada uma tensão de aproximadamente 6,53 kV.

Figura 3.3: Perfil de tensão com carga leve, sem o TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados apresentados nesta seção, foi possível modelar o sistema no PSCAD/EMTDC.

3.6 Resumo

Neste capítulo foi apresentado o sistema elétrico analisado obtido, em uma região do Estado do Espírito Santo, com suas ramificações e os tipos de cargas analisadas, bem como os valores elétricos das impedâncias ao longo do alimentador. Com base nestas características e nos parâmetros do sistema, foi elaborado o modelo do sistema proposto através do programa PSCAD/EMTDC. Desta forma, obteve-se uma planta de simulação a partir da qual é possível realizar o estudo dos efeitos originados pela inserção do dispositivo TCSC no sistema, atuando como limitador de corrente de falta, conforme mostrado nos próximos capítulos do trabalho.

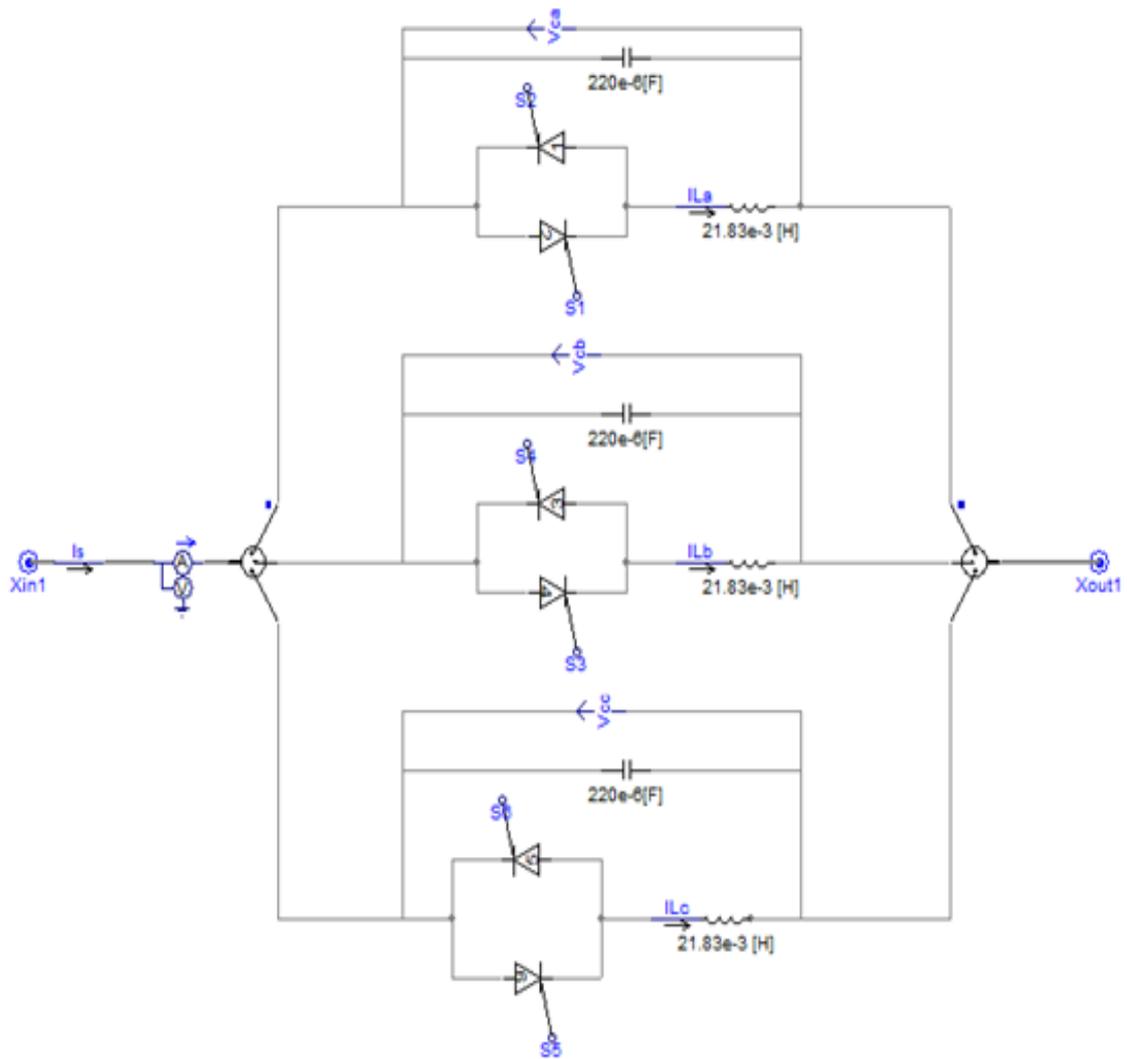
Capítulo 4: Modelagem do TCSC

Este capítulo mostra a modelagem do TCSC com a obtenção dos seus parâmetros, a metodologia adotada para implementar o circuito detector de falta e descreve a obtenção do circuito gerador de rampa, necessário para que o TCSC tenha uma variação angular contínua. Além disso, será apresentado o circuito de disparo baseado no cruzamento da tensão do capacitor por zero.

4.1 Especificação do TCSC

Usando como base a tensão nominal do sistema de 6,58 kV e a corrente nominal do cabo principal de 560 A, a impedância de base do alimentador é de 11,75 Ω . Conforme Tenório (1997) e Meikandasivam (2011), a impedância capacitiva foi escolhida como sendo 1 p.u, e a reatância indutiva como 0,7 p.u. De acordo com a equação 2.8, estes valores em p.u resultam em uma frequência de 71,7 Hz, que é um pouco acima da frequência do sistema. Desta forma, os valores calculados do capacitor e do indutor foram, respectivamente, de 225,7 μF e 21,8 mH. No entanto, adotou-se um valor para o capacitor 220 μF . O modelo do TCSC usado neste trabalho é um conjunto formado por 3 TCR's e 3 capacitores, conforme pode ser observado na Figura 4.1.

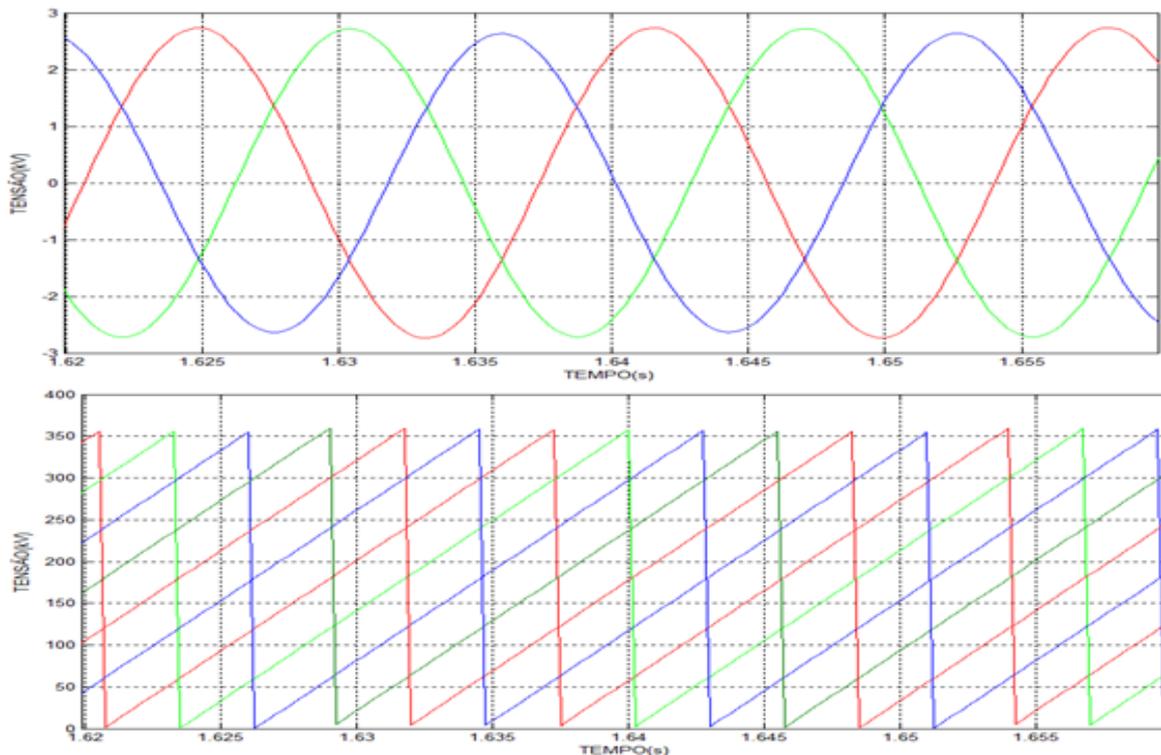
Figura 4.1 - Implementação do circuito do TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.2 mostra as tensões v_{ca} , v_{cb} , v_{cc} , as rampas geradas, o ângulo α de referência e o sinal de disparo gerado para $\alpha = 120^\circ$.

Figura 4.2 – Tensões nos capacitores e rampas geradas pelo PLL



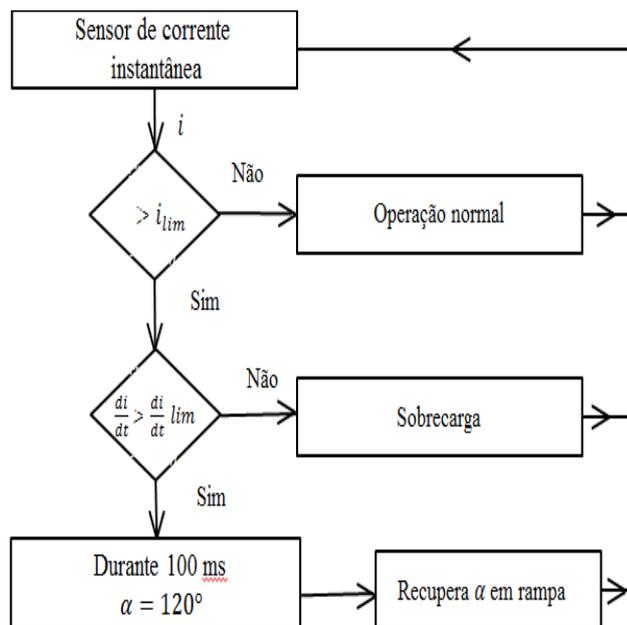
4.2 Circuito detector de falta

Neste estudo, o objetivo do uso do TCSC foi baseado em limitar a corrente de curto-circuito quando alguma situação de falta fosse identificada. Para a detecção de curto, foi implementado um circuito detector que fosse capaz de identificar uma falta no sistema. A análise de detecção foi desenvolvida a partir da abordagem apresentada por (FAJONI, 2015). A Figura 4.3 ilustra o fluxograma de atuação do circuito detector de curto.

Este circuito deve ser capaz de distinguir uma real situação de falta das operações normais do sistema. Se o sinal de corrente e sua derivada primeira ultrapassarem certos limites, o TCSC é acionado e o ângulo de disparo muda de 180° , referente a uma impedância de valor baixo, para um ângulo de 120° , referente a uma impedância de valor alto, desta forma limitando a corrente de curto-circuito.

Quando a condição de falta se extingue, o sistema se recupera continuamente, com o ângulo de disparo evoluindo em rampa para o estado de regime permanente, quando o ângulo de disparo volta a ser 180° . Por sua vez, o circuito detector de corrente volta a verificar se há a existência de corrente de curto-circuito.

Figura 4.3 - Fluxograma lógico do circuito detector de falta



Fonte: Elaborado pelo autor.

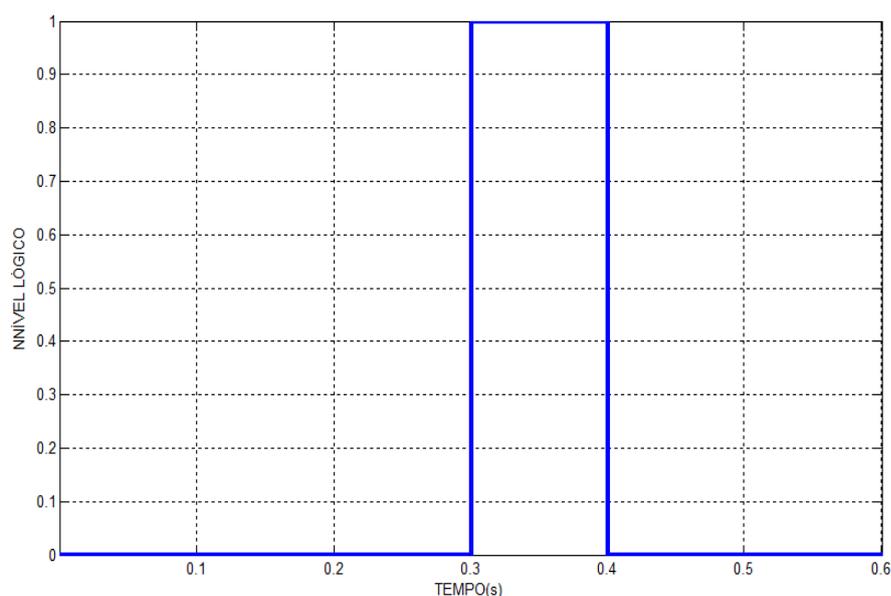
Inicialmente, foi pensado nos possíveis modos de operações do TCSC. Quando o sistema estivesse operando em regime, os tiristores deste controlador devem receber um ângulo de disparo tal que o módulo do TCSC atue como uma impedância de valor suficiente para não interferir na atuação do sistema. Caso ocorra alguma situação de falta, os tiristores são acionados com um ângulo correspondente a uma impedância suficiente para reduzir a corrente de curto-circuito. Estes dois modos de operação trabalham em conjunto com o circuito detector de curto, pois este envia os sinais correspondentes à situação de regime permanente e de falta.

4.3 Circuito gerador de rampa

Este trabalho tem por objetivo, além de efetuar um estudo de caso do TCSC como FCL, propor a recuperação do comportamento em regime do TCSC com o crescimento em rampa do ângulo de disparo α até 180° . Sendo assim, após vários testes, concluiu-se que a melhor variação do ângulo de disparo pertence à região capacitiva do TCSC. Foi obtido o gráfico da impedância em função do ângulo de disparo e escolhidos dois valores para as situações de baixa e de alta impedância.

O circuito detector de curto fornece um sinal de saída que pode ter dois estados: nível lógico zero, quando o sistema opera em regime permanente, e nível lógico 1 quando há uma situação de falta. Este sinal é melhor representado pela Figura 4.4.

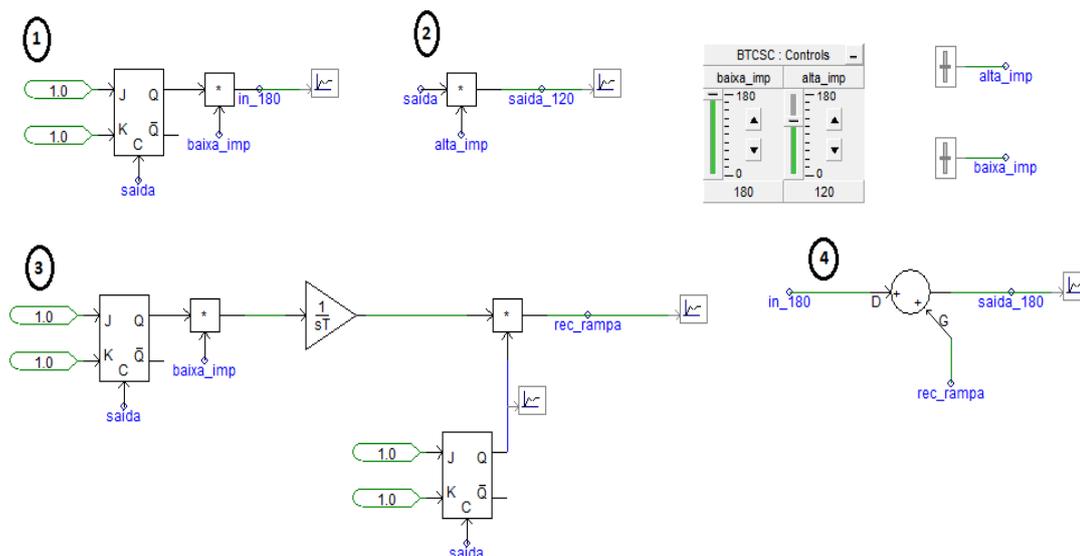
Figura 4.4- Sinal de saída gerado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.5 apresenta o circuito gerador de rampa contínua proposto, em PSCAD, utilizando blocos nativos.

Figura 4.5- Circuito gerador de rampa



Fonte: Elaborado pelo autor.

As partes marcadas na Figura 4.3 são explicadas a seguir:

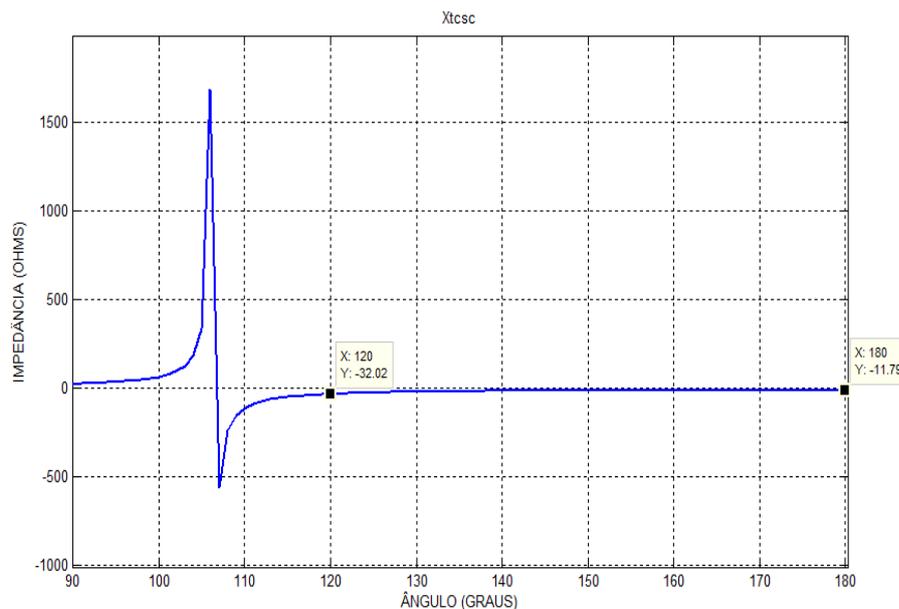
Parte 1 – Esta parte do circuito utiliza um flip-flop do tipo JK, cujo *clock* é o sinal denominado “saída”. Este sinal representa a saída do circuito detector de curto e indica o momento em que a falta é detectada e extinta, identificado por um sinal digital que pode ser 0 para regime permanente ou 1 para a situação de falta. Quando este subsistema indica que houve uma subida de borda, o sinal vai para nível lógico 1, sendo multiplicado pelo ângulo de 180°.

Parte 2 – Quando o sinal “saída” é detectado com nível lógico 1, representado aqui como a variável *alta_imp*, é o momento em que o ângulo de disparo deve estar configurado para ser 120°, de forma a limitar a corrente de curto-circuito.

Para definir qual será o ângulo de disparo correspondente a uma alta impedância é necessário traçar o gráfico da impedância do TCSC em relação ao ângulo de disparo percebido pelos tiristores. Para o caso analisado, o gráfico que representa a obtenção de tal ângulo pode ser observado na Figura 4.6. Quando o sistema opera em regime permanente o ângulo de disparo de 180° indica uma reatância de $-j11,79 \Omega$. Nota-se que para um ângulo de disparo de 120° há uma reatância capacitiva de $-j32 \Omega$. Este valor de impedância foi obtido após terem sido realizados alguns testes de simulação, observando a impedância para cada ângulo de disparo

na região capacitiva, de forma a não atingir a região de ressonância. Concluiu-se que para este estudo de caso, trata-se de uma reatância suficiente para reduzir a corrente de curto. Comparando os casos em regime permanente e em curto obtivemos uma variação de reatância referente a $20,21 \Omega$.

Figura 4.6- Curva da impedância do TCSC em função do ângulo de disparo α



Fonte: Elaborado pelo autor.

Parte 3 – Ocorre a formação de uma rampa a partir da mudança do ângulo de 120° para 180° , com uma constante de tempo de 1 segundo. A este sinal é somado o ângulo de disparo de 120° , que permanece durante todo o curto-circuito.

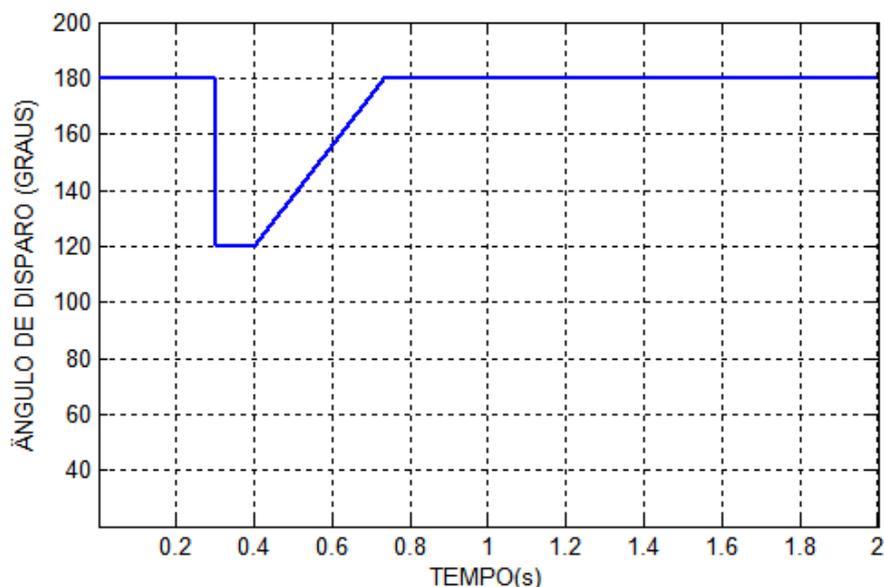
Parte 4 – Esta operação representa a formação completa da variação angular correspondente à situação de regime permanente.

Resumindo, o ângulo de 180° corresponde a uma impedância de $-j11,79 \Omega$ e foi escolhido um ângulo de disparo de 120° que é utilizado para limitar a corrente de curto, pois este ângulo corresponde a uma impedância que foi suficiente para mitigar a corrente de curto-circuito neste trabalho.

A Figura 4.7 mostra a variação proposta do ângulo de disparo, correspondente à passagem da situação de regime permanente para a condição de falta e posterior recuperação do sistema.

Como dito antes, para a recuperação do ângulo de disparo, foi proposto realizar uma variação não brusca e contínua, tal como o comportamento de uma rampa.

Figura 4.7 - Variação do ângulo de disparo



Fonte: Elaborado pelo autor.

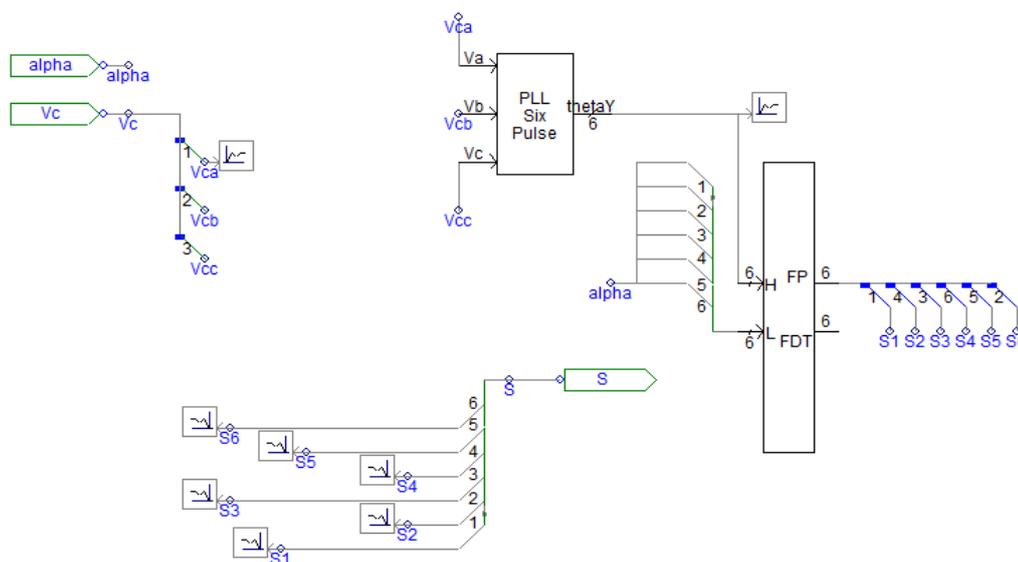
4.4 Circuito de disparo

Segundo Zampellin (2014) e Mathur e Varma (2002), quando o disparo dos tiristores é baseado na corrente de linha que atravessa o circuito do TCSC, o ângulo de disparo deve variar entre 0° e 90° . Caso esteja baseado na tensão medida nos capacitores do TCSC, o ângulo de disparo deve ficar entre 90° e 180° . Adotou-se como disparo dos tiristores o último caso.

A Figura 4.8 mostra o circuito de disparo sintetizado no PSCAD.

Cada uma das tensões dos capacitores passa por um PLL para formar cada qual uma onda dente de serra na frequência da rede. Em seguida são comparadas com o ângulo de disparo “alpha”, criado pelo circuito gerador de rampa, apresentado na seção 4.2. As saídas para cada tiristor são obtidas através do bloco nativo do PSCAD *Interpolated Firing Pulses*.

Figura 4.8 - Circuito de disparo com base na tensão do capacitor



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Resumo

O capítulo 4 apresentou o circuito gerador de rampa e o circuito detector de curto-circuito, necessários para o perfeito funcionamento do TCSC. Observou-se que a variação do ângulo de disparo na recuperação se dá de forma contínua e suave, o que implica em uma análise de simulação sem interrupções no funcionamento do processo. Também foi apresentado o circuito de disparo dos tiristores referente à região analisada do ângulo de disparo.

Capítulo 5: Simulações

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados das simulações com o TCSC e sem o TCSC, abordando a situação de carga leve e carga pesada. São estudadas também algumas possibilidades de localização da falta, que pode ser no final do alimentador, no meio da linha ou próximo à fonte de tensão de 11,4 kV.

Em todos os casos a serem analisados, o curto-circuito do sistema é representado por uma resistência R_{CC} de valor baixo, correspondente a 1Ω , sendo considerado que a falta ocorre no instante $t=0,3$ segundos e tem duração de 50 ms .

5.1 Perfil de tensão no alimentador com TCSC

No capítulo 3, analisou-se a tensão nas barras do alimentador, nas condições de carga pesada e carga leve, para a fase A. Ao operar com o TCSC, instalado na subestação, ocorre a inserção de reatância capacitiva em série com o alimentador, em regime permanente. A tensão resultante nas barras não pode ser superior ao máximo previsto em norma (ANEEL, 2012).

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam a tensão nas barras em carga pesada e carga leve, respectivamente. Percebe-se que ocorre um pequeno aumento da tensão nas barras em relação à situação inicial (Figuras 3.2 e 3.3), porém dentro dos limites normativos.

Figura 5.1 – Perfil de tensão com carga pesada, com o TCSC

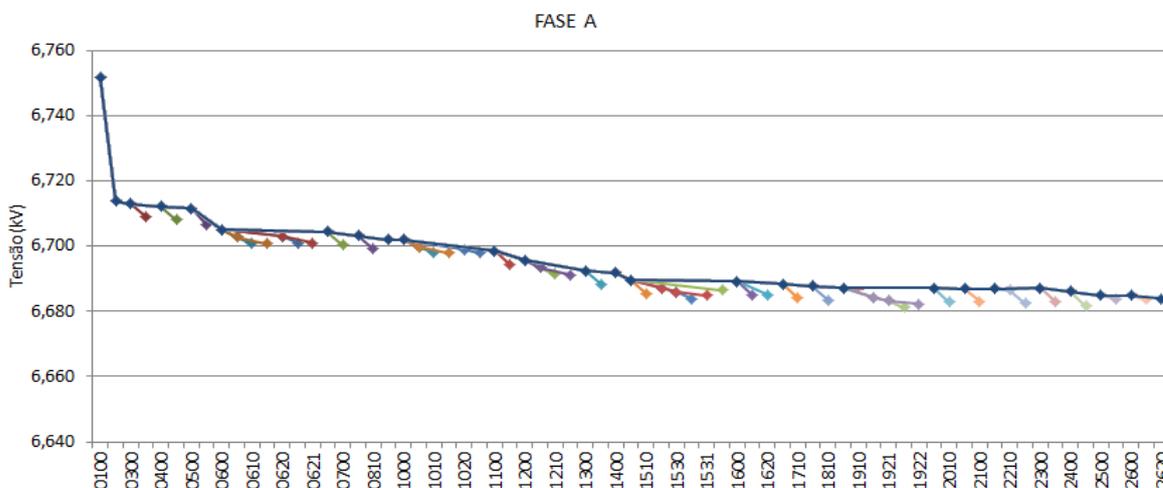
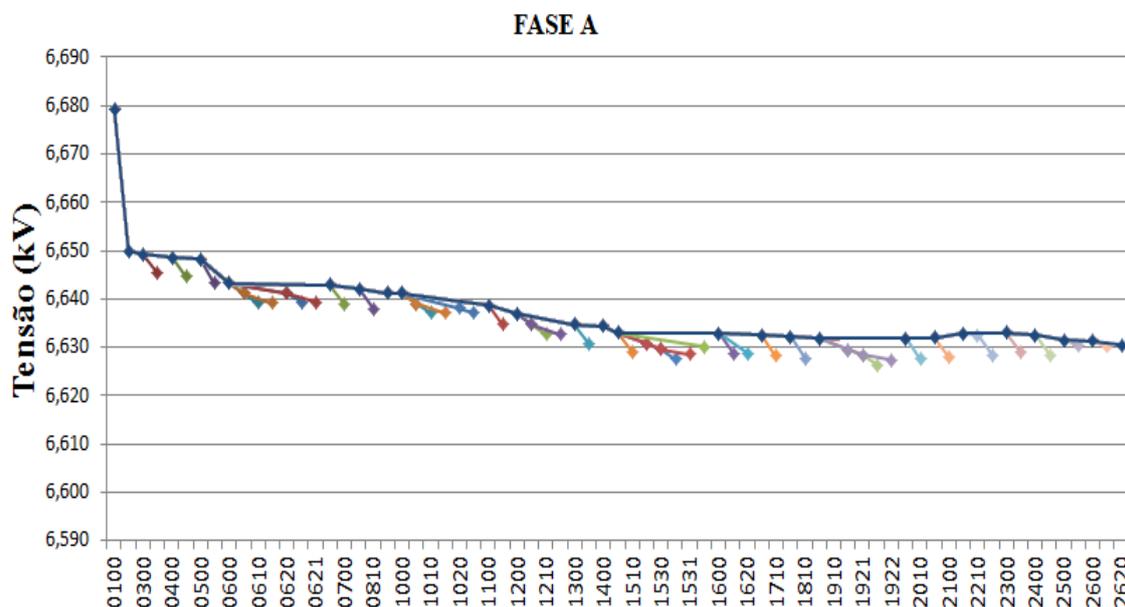


Figura 5.2 – Perfil de tensão com carga leve, com o TCSC



Fonte: Elaborado pelo autor

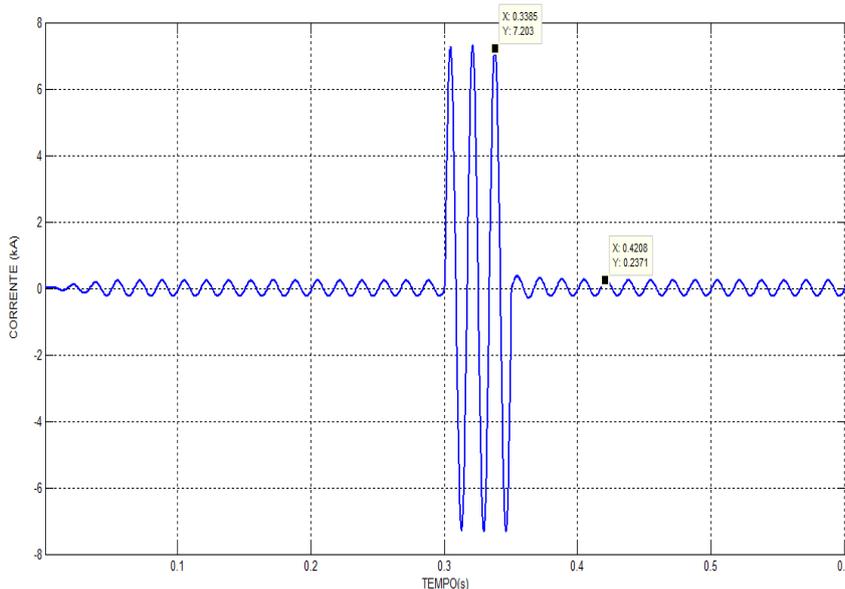
5.2 Curto-circuito próximo à fonte

Nesta seção será analisado o curto-circuito localizado na barra “B0300”, próximo à fonte de tensão. Serão vistos o comportamento das grandezas elétricas, em situações de carga pesada e carga leve com e sem o TCSC.

5.2.1 Carga pesada sem o TCSC

Neste caso, o TCSC não está instalado e a corrente de curto-circuito atinge seu valor máximo em 7,1 kA. Ressalta-se que será o valor de corrente de falta mais elevado dentre os dados coletados. Isto ocorre em razão da proximidade da falta em relação à fonte de tensão do sistema, correspondendo ao menor valor de impedância no sistema. O comportamento da corrente pode ser vista na Figura 5.3.

Figura 5.3: Corrente instantânea na condição de falta, sem o TCSC, em carga pesada

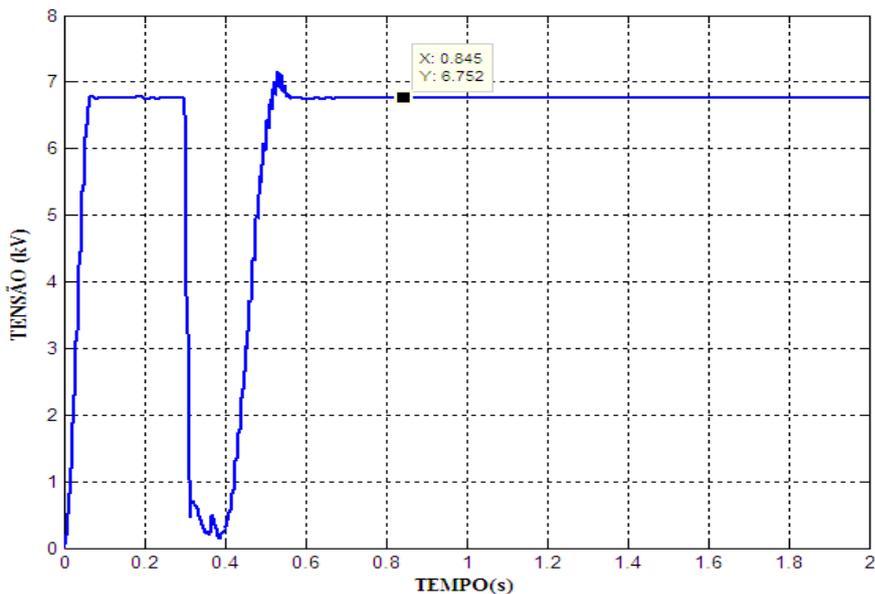


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2 Carga pesada com o TCSC

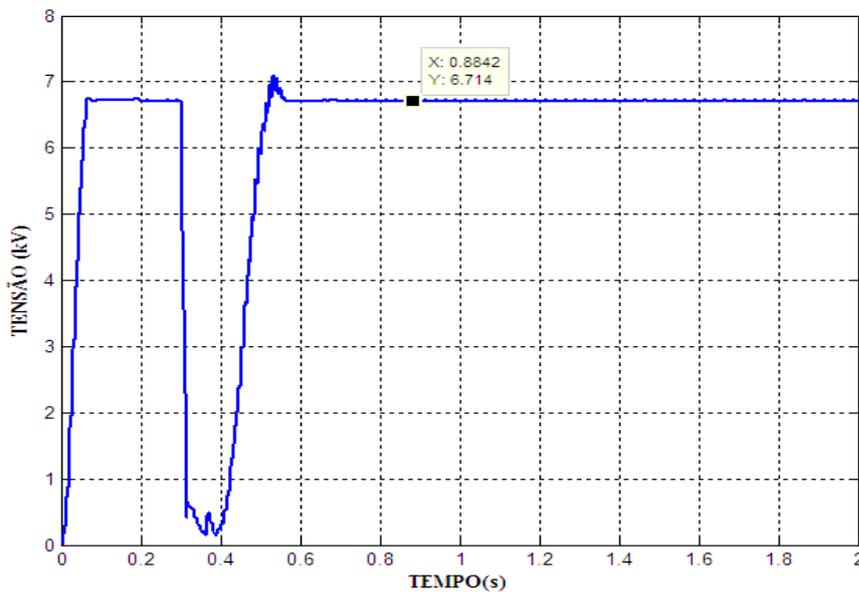
O comportamento da tensão eficaz na primeira barra e na barra do curto-circuito “B0300” é apresentado respectivamente nas Figuras 5.4 e 5.5, na situação de carga pesada com o TCSC. Na Figura 5.4 a tensão se estabiliza em 6,752 kV e na Figura 5.5 a tensão é mantida em 6,714 kV. Ambas as Figuras mostram que, após a recuperação da falta, a tensão consegue se estabilizar e a sobretensão na recuperação é pequena.

Figura 5.4: Comportamento da tensão eficaz na barra “0100”, na situação de carga pesada



Fonte: Elaborado pelo autor

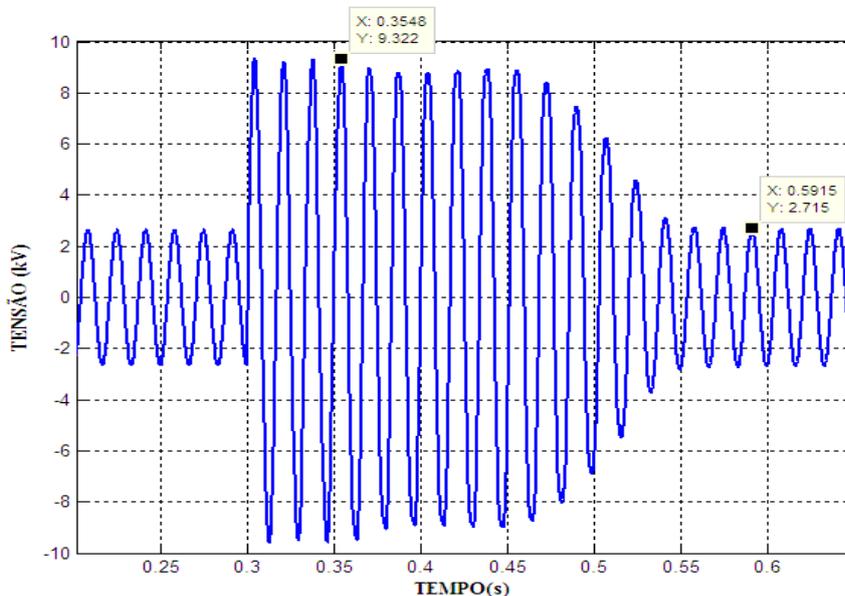
Figura 5.5: Comportamento da tensão eficaz na barra “0300”, na situação de carga pesada



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.6, observa-se que a tensão no capacitor atinge um valor máximo de 9,322 kV e passa a descarregar-se, retornando assim para a condição de regime permanente referente a uma tensão de 2,715 kV.

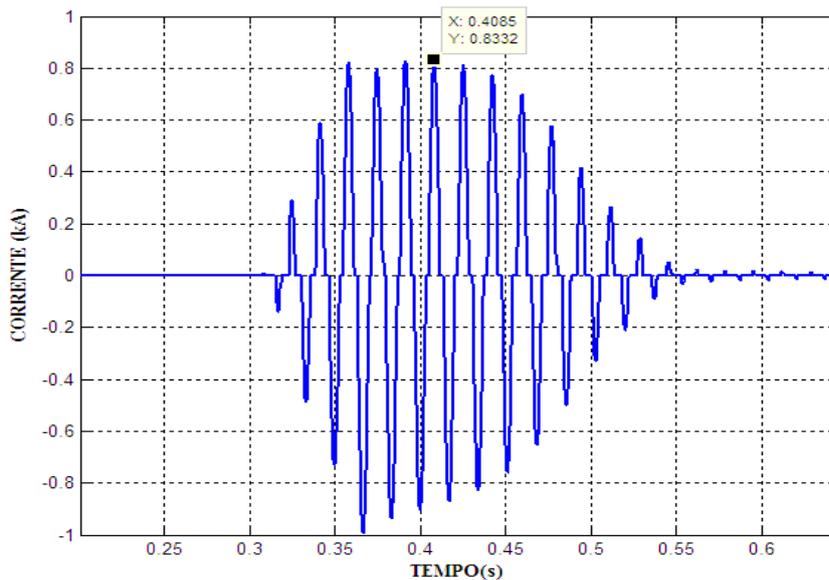
Figura 5.6: Tensão no capacitor para carga pesada



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a corrente no indutor, esta atingiu o valor máximo, durante o curto-circuito, de 833 A, tratando-se de um valor conveniente para este estudo de caso. O comportamento desta corrente é visto na Figura 5.7.

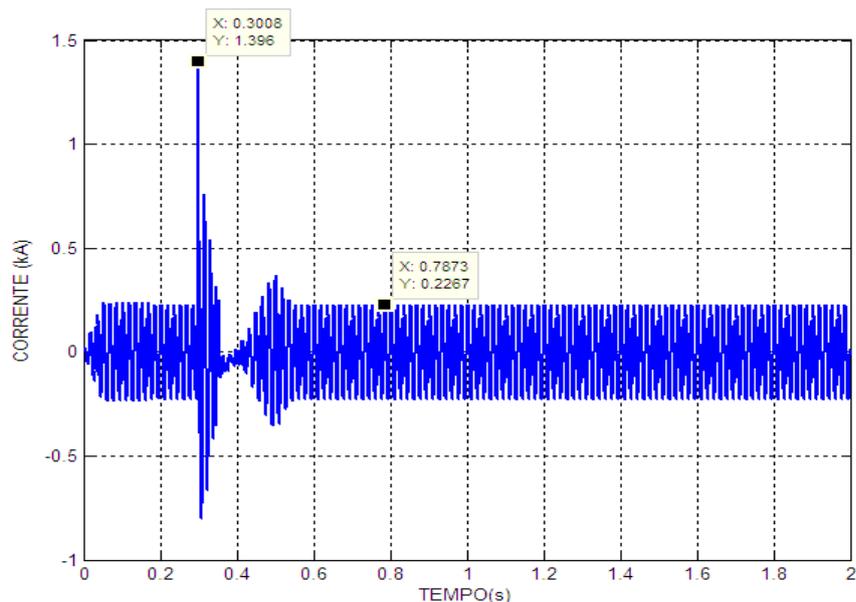
Figura 5.7: Corrente no indutor, na situação de carga pesada



Fonte: Elaborado pelo autor

Já a corrente de falta não atingiu um valor elevado como no caso sem o TCSC. Na Figura 5.8 o maior valor de corrente de falta é de 1,395 kA e ainda assim é referente a um pico de corrente, que logo é extinto gradualmente.

Figura 5.8: Corrente de falta com o TCSC, na situação de carga pesada

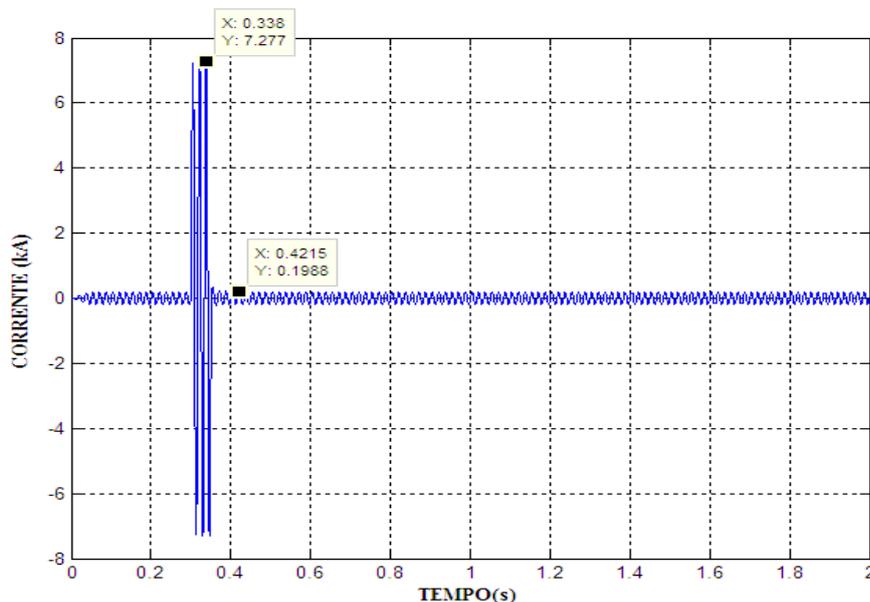


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.3 Carga leve sem o TCSC

A Figura 5.9 apresenta o comportamento quando da não utilização do TCSC em carga leve, para esta análise. A corrente atinge um elevado valor durante o curto-circuito, o que já é suficiente para a inserção de um dispositivo limitador de corrente de falta.

Figura 5.9: Corrente de falta sem o TCSC, na situação de carga leve

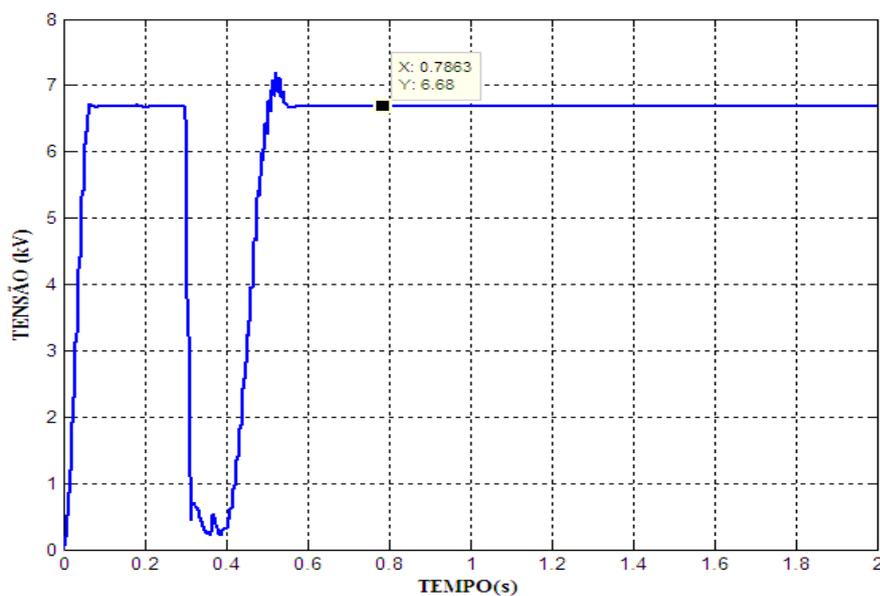


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.4 Carga leve com o TCSC

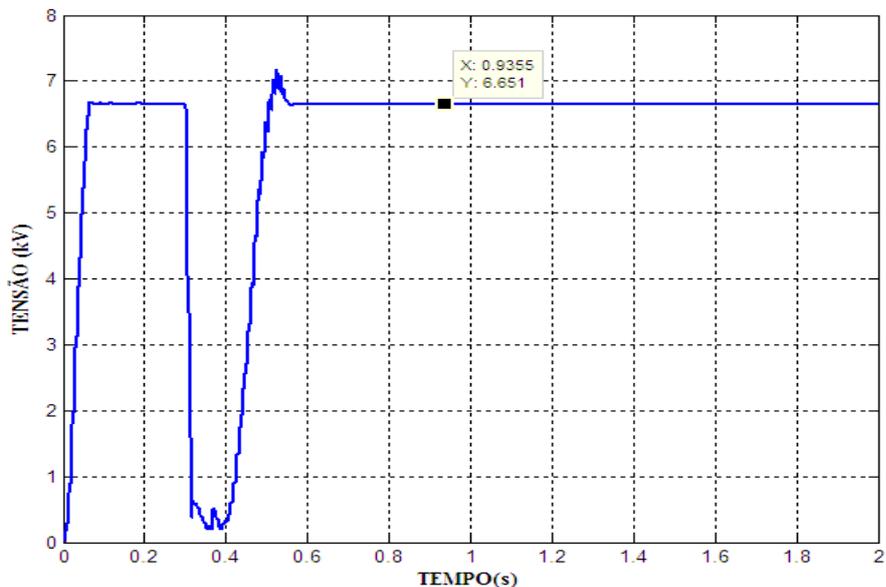
Na Figura 5.10, é observado que a tensão eficaz, após a recuperação da falta, atinge um valor de 6,68 kV, na primeira barra do sistema. Já com relação à barra “B0300”, a mesma possui um valor de tensão eficaz de 6,651 kV, como é observado na Figura 5.11.

Figura 5.10: Comportamento da tensão na barra “B0100”, na situação de carga leve



Fonte: Elaborado pelo autor

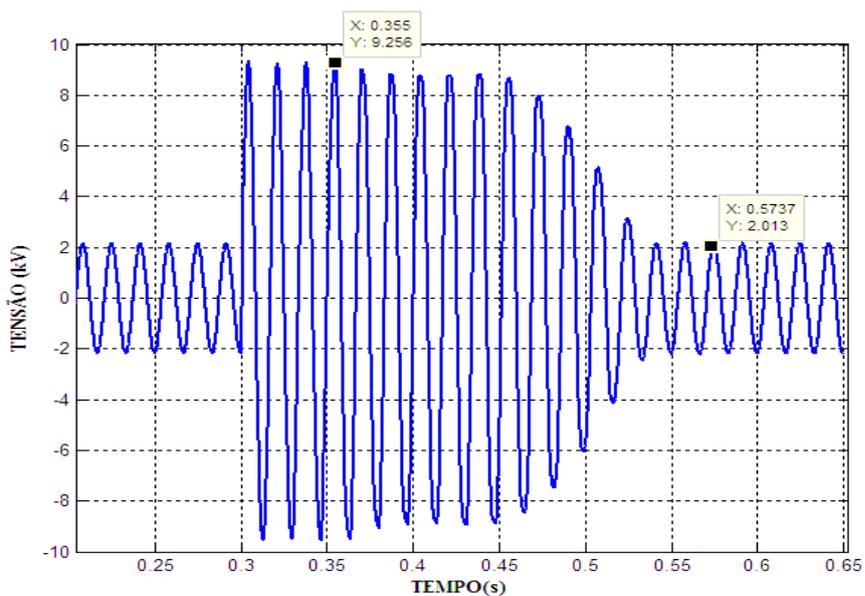
Figura 5.11: Comportamento da tensão na barra “0300”, na situação de carga leve



Fonte: Elaborado pelo autor

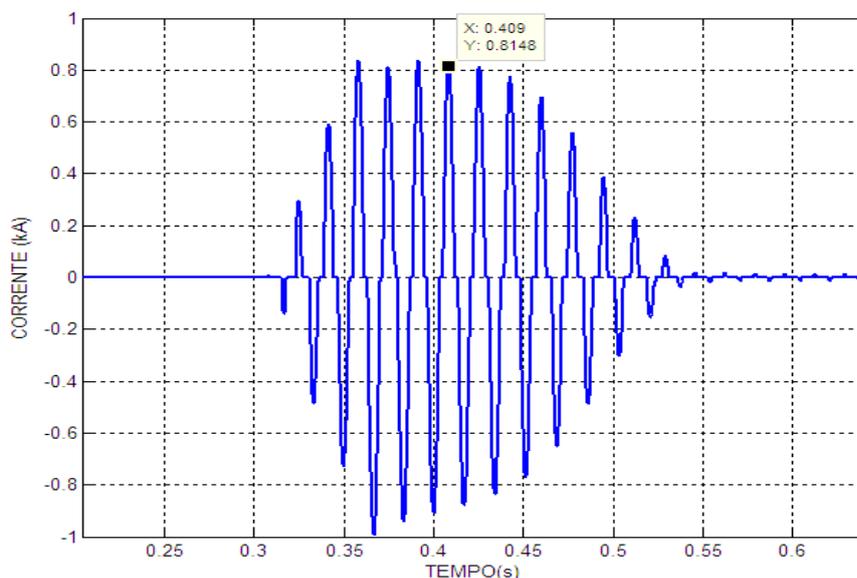
O comportamento dos valores instantâneos da tensão no capacitor e da corrente do indutor pode ser observado, respectivamente nas Figuras 5.12 e 5.13.

Figura 5.12: Tensão no capacitor para carga leve



Fonte: Elaborado pelo autor

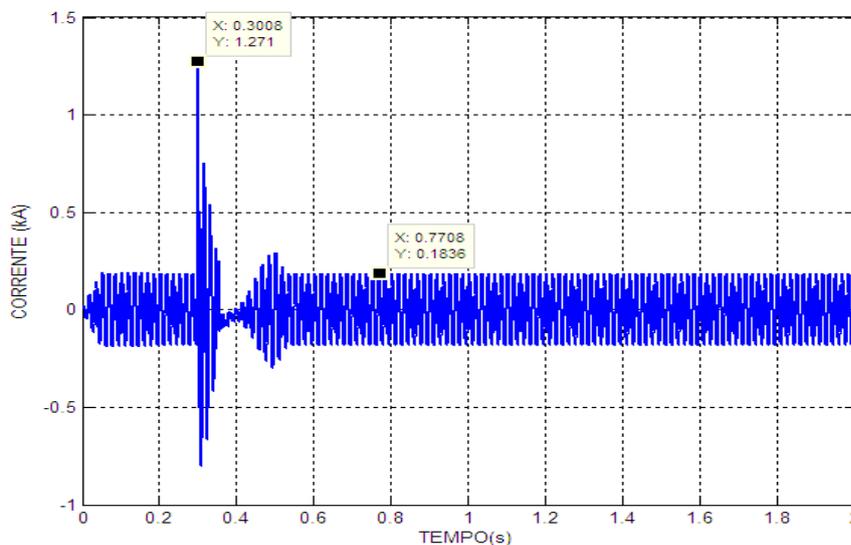
Figura 5.13: Corrente no indutor, na situação de carga leve



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando-se a corrente no indutor, observa-se que o máximo valor de corrente foi aproximadamente de 815 A. Apesar de ser um valor acima da condição de carga pesada, também se trata de um valor adequado que não sobreaqueceria o equipamento e assim não danificaria o sistema. Nota-se a existência de corrente no indutor apenas no momento em que ocorre o curto-circuito, pois é o momento em que o tiristor está sendo chaveado. A Figura 5.14 mostra o comportamento instantâneo da corrente de falta durante a carga leve.

Figura 5.14: Corrente de falta com o TCSC, na situação de carga leve



Fonte: Elaborado pelo autor

Como se observa dos resultados desta seção, os valores eficazes de tensão, os valores de pico de tensão no capacitor, corrente no indutor, e correntes de falta com e sem o TCSC, para as situações de carga pesada e carga leve não diferem significativamente. Assim, nas próximas análises apresentam-se apenas os valores obtidos, para evitar gráficos repetitivos.

5.3 Curto-circuito no meio da linha

O curto-circuito foi localizado na barra “B1200” a uma distância de aproximadamente 569 metros a partir da fonte de tensão. Será analisado o comportamento das grandezas elétricas, em situações de carga pesada e carga leve, com e sem o TCSC.

5.3.1 Carga pesada

Tal como no caso anterior foi analisado o comportamento da rede sem a atuação do TCSC, agora com um curto-circuito na barra “B1200”, com carga pesada. Neste caso, a corrente de curto-circuito atinge seu valor máximo em 6,565 kA, muito acima da capacidade do alimentador podendo causar efeitos destrutivos.

Foi simulado então, o comportamento do TCSC, considerando o caso de carga pesada, com o TCSC e foram obtidos os resultados conforme se observa na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: – Carga pesada com o TCSC

	Medição	Característica	Situação
I_{falta} (kA)	1,339	Valor de pico	Durante a falta
$I_{indutor}$ (kA)	0,7964		
$V_{capacitor}$ (kV)	9,452		
V0100 (kV)	6,752	Valor eficaz	Recuperado
V1200 (kV)	6,697		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando o TCSC é inserido no sistema, nota-se que um pico de corrente de 1,339 kA que ocorre exatamente no instante de 0,3 segundos. Trata-se de um valor que não influencia no bom funcionamento do mesmo, por ser um evento que rapidamente é mitigado pela atuação

do TCSC e por esta razão, durante o período da falta, a corrente possui valores baixos, restabelecendo seu valor após o retorno do sistema para o regime permanente.

Ainda com relação à Tabela 5.1, nota-se que a tensão, na barra 0100 se estabiliza em 6,752 kV e a tensão na barra 1200 é mantida em 6,697 kV. Com isso, após a recuperação da falta, a tensão consegue se estabilizar.

Pode-se observar também que quando ocorre o curto-circuito, a tensão no capacitor atinge um valor máximo de 9,452 kV e, assim como no caso anterior, passa a descarregar-se gradualmente de acordo com a extinção da falta, voltando assim para a condição de regime permanente referente a uma tensão de 2,706 kV.

5.3.2 Carga leve

Para a carga leve foi observado que, inicialmente sem o TCSC, o valor da corrente de falta atinge um valor elevado correspondente de 6,657 kA. Assim como no caso da carga pesada, é um resultado que implicaria em futuros problemas elétricos para o sistema em decorrência do sobreaquecimento de equipamento e forças destrutivas. A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos com a inserção do TCSC.

Tabela 5.2: – Carga leve com o TCSC

	Medição	Característica	Situação
I_{falta} (kA)	1,23	Valor de pico	Durante a falta
$I_{indutor}$ (kA)	0,8491		
$V_{capacitor}$ (kV)	9,474		
V0100 (kV)	6,68	Valor eficaz	Recuperado
V1200 (kV)	6,637		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A inserção do TCSC provoca uma redução significativa da corrente de falta e nota-se que ocorre um pico de corrente de 1,23 kA, Tratando-se de um valor que não influencia na operação do TCSC, por ser um evento que dura poucos ciclos. Além disso, a corrente restabelece seu valor após o retorno do sistema para o regime permanente.

A Tabela 5.2 mostra que a tensão na barra 0100 se estabiliza em 6,68 kV e a tensão na barra 1200 é mantida em 6,637 kV. Esses valores de tensão são ligeiramente menores que os anteriores, uma vez que a demanda de carga é menor.

Já com relação à tensão no capacitor, esta atinge um valor máximo de 9,474 kV e assim como no caso da carga pesada, passa a descarregar-se gradualmente até atingir a condição de regime permanente. A corrente de pico no indutor é de 849 A.

5.4 Curto-circuito na última barra

Neste caso, a falta é localizada na barra “2620”, que é a última barra do sistema, sendo analisados o comportamento das grandezas elétricas, em situações de carga pesada e carga leve com e sem o TCSC.

5.4.1 Carga pesada

Nesta última análise, foi estudado o comportamento da carga pesada quando um curto-circuito é aplicado na última barra e os resultados estão na Tabela 5.3.

Para o TCSC fora de atuação, a corrente de curto-circuito atinge seu valor máximo em 5,405 kA. Ressalta-se que até agora foi o valor de corrente de falta mais baixo dentre as correntes de falta anteriores, considerando carga pesada, em razão do afastamento da falta em relação à fonte de tensão do sistema, tendo originalmente uma impedância maior no caminho.

Tabela 5.3: – Carga pesada com o TCSC

	Medição	Característica	Situação
I_{falta} (kA)	1,268	Valor de pico	Durante a falta
$I_{indutor}$ (kA)	0,821		
$V_{capacitor}$ (kV)	9,109		
V0100 (kV)	6,752	Valor eficaz	Recuperado
V2620 (kV)	6,685		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme é apresentado na Tabela 5.3, a tensão na primeira barra se estabiliza em 6,752 kV e tensão na barra 2620 é mantida em 6,685 kV.

Observou-se que a tensão no capacitor atingiu um valor máximo de 9,109 kV, quando passou a descarregar-se, retornando assim para a condição de regime permanente que foi referente a uma tensão de 2,716 kV.

Para esta condição, a corrente no indutor atingiu o valor máximo, durante o curto-circuito de 821 A, tratando-se novamente de um valor conveniente para este estudo de caso.

Assim como nos casos anteriores, a corrente de falta não atinge um valor elevado como no caso sem o TCSC. O maior valor de corrente de falta é de 1,268 kA e ainda assim é referente a um pico de corrente, que logo é extinto gradualmente.

5.4.2 Carga leve

Para o caso de carga leve, o valor da corrente de falta sem o uso do dispositivo foi de 5,38 kA, que equivale a uma condição imprópria para o bom desempenho do sistema. Os valores referentes à inclusão do TCSC podem ser vistos na Tabela 5.4

Tabela 5.4: – Carga leve

	Medição	Característica	Situação
I_{falta} (kA)	1,152	Valor de pico	Durante a falta
$I_{indutor}$ (kA)	0,824		
$V_{capacitor}$ (kV)	9,744		
V0100 (kV)	6,68	Valor eficaz	Recuperado
V2620 (kV)	6,651		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi analisado que a tensão, após a recuperação da falta, atinge um valor de 6,68 kV, na primeira barra do sistema. Já com relação à barra “2620”, a mesma possui um valor de tensão de 6,651 kV.

O comportamento da tensão no capacitor levou a um valor máximo de tensão de 9,744 kV e a corrente do indutor alcançou um valor de 824 A, aproximadamente.

5.4.2 Comparativo das correntes de curto

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os valores percentuais da corrente de curto para cada uma das situações analisadas em que o caso sem TCSC é considerado 100%.

Tabela 5.5: – Situações analisadas para o caso de carga pesada

	B0300 Sem TCSC	B0300 Com TCSC	↓(%)	B1200 Sem TCSC	B1200 Com TCSC	↓(%)	B2620 Sem TCSC	B2620 Com TCSC	↓(%)
I_{falta} (kA)	7,20	1,39	80,62	6,57	1,34	79,60	5,41	1,27	76,54

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.6: – Situações analisadas para o caso de carga leve

	B0300 Sem TCSC	B0300 Com TCSC	↓(%)	B1200 Sem TCSC	B1200 Com TCSC	↓(%)	B2620 Sem TCSC	B2620 Com TCSC	↓(%)
$I_{falta}(kA)$	7,27	1,27	82,53	6,66	1,23	81,53	5,38	1,15	78,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Conclusões

As simulações realizadas, considerando três pontos representativos de ocorrência de falta (início, meio e final da linha), mostram que o TCSC consegue atuar limitando a corrente de falta e recuperando-se, ao final do curto, sem causar sobretensões no sistema.

Capítulo 6: Conclusão

Este trabalho apresentou a análise de um sistema modelado de 11,4 kV, composto por 26 cargas, com distribuição de potências nas barras diversificada e desequilibrada, utilizando o programa PSCAD/EMTDC. Estudou-se também o comportamento de tal sistema com a inserção de dispositivo TCSC para a limitação de corrente de falta.

No PSCAD, quando o alimentador tem um comprimento menor do que 15 km e é considerado um *time step* de 50 μ s, pode ser utilizado o modelo π -*section* para a implementação de redes elétricas. A linha de distribuição modelada tem aproximadamente 1,132 km, e adotou-se um *time step* de 50 μ s nas simulações, justificando assim a utilização do modelo π -*section* para toda a modelagem da rede de distribuição. Além disso, as cargas desequilibradas foram modeladas como potência constante utilizando o bloco *Fixed Load*.

Os dados dos alimentadores e das cargas e demais equipamentos presentes no sistema elétrico foram tomados como base em um sistema de distribuição real em uma região do estado do Espírito Santo.

Também foi realizada a implementação em simulação do dispositivo TCSC, com a obtenção de seus parâmetros. Para o bom desempenho do equipamento foi realizado um circuito detector de curto que fosse capaz de distinguir uma situação real de falta das operações normais do sistema. Além deste circuito complementar, foi criado um circuito para a variação do ângulo de disparo, de forma contínua e não brusca tal como o comportamento de uma rampa, na recuperação do sistema.

Por fim, foram apresentadas as simulações do comportamento do TCSC no sistema modelado de média tensão. Foi analisado que o sistema efetivamente alcançou maior mitigação da corrente de falta com o uso deste dispositivo.

O sistema pôde recuperar seu comportamento em regime permanente sem sobretensões graças à variação contínua de impedância proposta pelo TCSC. As tensões nas barras conseguiram entrar em regime após a atuação do TCSC no instante da ocorrência da falta. Já as tensões nos

capacitores também apresentaram um comportamento adequado, pois conseguiram sofrer um descarregamento gradual. Isto ocorreu graças à proposta de variação do ângulo de disparo por meio de um sinal de rampa. A corrente no indutor indicou baixos valores no instante do curto e apresentou valor nulo após a extinção da falta, indicando que os tiristores pararam de comutar e que o TCSC passou agora atuar como um simples capacitor série de baixa impedância.

Com isso, o dispositivo TCSC apresentou o comportamento esperado, atuando como uma impedância variável e auxiliou o sistema de distribuição na limitação do curto-circuito e na sua recuperação em regime permanente.

Análises adicionais e enriquecedoras podem ser realizadas a partir do estudo efetuado como: analisar o comportamento da rede incluindo uma impedância na fonte, não considerada neste trabalho; comportamento do sistema se parte da linha é aberta após o curto; análise do funcionamento da estrutura quando é incluída geração distribuída no alimentador em estudo; verificação das correntes de curto com e sem o TCSC com cargas modeladas de forma mista; estudo de comportamento com curto fase-neutro ou fase-fase.

Referências Bibliográficas

ACERBI, M. R. C; BUENO, A. F. M. Compensação Série em Sistemas de Distribuição - Experiência da CEMIG em 13,8 KV. **SINDIS – CIER**, Minas Gerais, p. 1-15, 1996.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, **PRODIST - MÓDULO 8**, 2012.

DE ALMEIDA, P. R. et al. **Compensador Série Controlado a Tiristores como Solução para Partida de Motores**, p.1-6, 2014.

DE CAMARGO, J. Aplicação de Capacitor Série no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, **Companhia Paulista de Força e Luz**, Rio de Janeiro, p.4-18, 1988.

DE CARMAGO, J. A experiência da CPFL na aplicação de capacitores série na distribuição, **Subcomitê de Distribuição de Energia Elétrica**, Campinas – SP, p. 88-117, 1992.

DE CAMARGO, J. Metodologia para Compensação Reativa Através de Bancos de Capacitores Fixos, **Companhia Paulista de Força e Luz**, p. 94-101, 1995.

DE CAMARGO, J.; SANTANA, R. L. S. Regulação de Tensão Utilizando Banco de Capacitores Série, **I SIDEE - Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica**, p. 1-6, [s.d].

DE CAMARGO, J; SANTANA, R. L. S. A visão atual da CPFL e da INDUCON sobre a aplicação de bancos de capacitores em série na distribuição, **SENDI**, Blumenau, p. 4-23, 1992.

DE JESUS, N. C.; DE OLIVEIRA, H. R. P. M.; LÍBANO, F. B. Considerações sobre Aplicação de Compensação Série em Sistemas de Distribuição visando Melhorias na Qualidade de Energia, **V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Sergipe, p. 1- 6, 2003. “a”

DE JESUS, N. C.; DE OLIVEIRA, H. R. P. M.; LÍBANO, F. B. Modelagem e simulação dinâmica do TCSC utilizando o programa de transitórios eletromagnéticos Microtran para estudos de qualidade de energia, **V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica**, Sergipe, p. 1- 6, 2003. “b”

DE OLIVEIRA, H. R. P. M. et al. AES Sul's Experiences Using Series Compensation on Medium-Voltage Distribution System, **IEEE**, p. 2061-2066, 2002.

ETT, G. et al. **Alternativas Não Convencionais para Transmissão de Energia Elétrica - Estado da Arte**, 1 edição, Brasília: Goya, 2011.

FAJONI, FERNANDO CARDOSO. **Desenvolvimento e Construção de um Limitador de Correntes Elétricas com Núcleo Magnético Saturado**. 2015. Tese (Doutorado em Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas.

FUERTE-ESQUIVEL, C.R.F.; ACHA, E.; AMBRIZ-PÉREZ, H. A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Solution o Practical Power Networks, **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 1, p. 58-64, 2000.

GONÇALVES, DAVID DO NASCIMENTO. **Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC**, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GOUVEA, M. R. *et al.* Controle de Tensão e Compensação de Reativos no Sistema Elétrico da CPFL, **I SIDEE – Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica**, [s.d].

HINGORANI, N. G.; GYUGI, L. **Understanding FACTS - Concepts and Flexible AC Transmission Systems**, New York: IEEE, 1999.

HU, GUOWEN; CHENG, MING; CAI, GUILONG. Relation between fundamental frequency equivalent impedance and resonant point for thyristor controlled series compensation, **IEEE Industrial Eletronics Society**, Korea, ano 31, p. 1128-1132, 2004.

KARADY, G.G. Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit, **IEE Proceedings-C**, v. 139, n.1, p. 1-6, 1990.

KUMARA J.R.S.S. *et al.* Design and Testing of an TCSC for Distribution Network Applications, **ICIIS, - First International Conference on Industrial and Information Systems**, Sri Lanka , p. 151-155, 2006.

LANES, Matusalém Martins. **Limitador eletrônico de Corrente de Curto-Circuito Baseado em Circuito Ressonante Controlado por Dispositivos Semicondutores de Potência**, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

LEMES, A. L.; FERREIRA, D. J.; SUZUKI, M. **Análise das aplicações de Capacitores em Série nos Sistemas de Média Tensão realizadas pela CPFL**. In: XXI SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Santos, 2014.

MATHUR, R. MOHAN; VARMA, RAJIV K. **Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems**, USA: Wiley Interscience, 2002.

MEIKANDASIVAM, S.; NEMA, RAJESH KUMAR; JAIN, SHAIENDRA KUMAR. Selection of TCSC Parameters: Capacitor and Inductor, **Internatioanl Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering**, p.102-107, 2011.

MONTEIRO, Andréia Maia. **Um Estudo de Dispositivos Limitadores de Corrente de Curto-Circuito com Ênfase no IPC (*Interphase Power Controller*)**, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

PERERA, B. A. P. THILAK KUMARA. **Embedded Generation Impacts to Medium Voltage Distribution Network and Mitigation Techniques**, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Morauwa, Sri Lanka, 2009.

SUZUKI, M. *et al.* Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23 kV, **XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo, p. 1-11**, 2010.

SUZUKI, M. *et al.* Solução de Problemas de Partida de Grandes Motores de Indução com Compensador Série, [s.d].

TAPIA, C. A. I. **Estudio, proyecto y simulación de un compensador Serie estático de reactivos basado en el tcsc**, 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Chile, 2007.

TENÓRIO, A.R.M; JEKINS, N. Investigation of the TCSC as a Fault Limiter, **International Conference on Power Systems Transints Seattle**, p. 345-350, 1997.

UNESP; FEPISA. **D-TCSC: Compensador Série Eletronicamente Controlado para o Sistema de Distribuição da ELEKTRO**, 2010.

ZAMPELLIN, L. **Regulação de Tensão Utilizando Compensador Série Controlado a Tiristores para Sistemas de Distribuição**, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2014.