

ANÁLISE DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO APERFEIÇOADO  
(E-STATCOM) PARA OBTENÇÃO DE RELIGAMENTO MONOPOLAR E  
AUMENTO DE ESTABILIDADE EM LT'S LONGAS

Luiz Eduardo de Souza Mouta

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

---

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

---

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

---

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2009

*“A dúvida é o sal do espírito; sem uma pitada de dúvida, todos os conhecimentos em breve apodreceriam.”*  
Émile-Auguste Chartier

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela graça de poder aprender e por impulsionar-me em tudo até hoje, mesmo sem que muitas vezes eu percebesse. A todos os meus familiares, em especial aos meus pais, que tanto me incentivaram ao longo das longas horas de estudo e durante os tempos mais difíceis dessa longa jornada.*

*Ao professor Maurício Aredes pelo apoio e dedicação destinados na elaboração deste estudo.*

*Aos alunos de doutorado Antonio Carlos Borré e Gilson Santos pela ajuda inestimável neste trabalho.*

*Aos amigos e funcionários do Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão.*

*A vós,  
Muito Obrigado!!!*

Resumo do Projeto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

ANÁLISE DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO APERFEIÇOADO  
(E-STATCOM) PARA OBTENÇÃO DE RELIGAMENTO MONOPOLAR E  
AUMENTO DE ESTABILIDADE EM LT'S LONGAS

Luiz Eduardo de Souza Mouta

Fevereiro/2009

Orientador: Maurício Aredes

Dadas as características geográficas e energéticas do Brasil, é necessária a existência de linhas de transmissão longas interligando as grandes concentrações de fontes hidrelétricas e de consumidores. Além disso, é também grande a preocupação com o desempenho destas linhas, que adquirem, no caso brasileiro, importância considerável na tarefa de contribuir para o desenvolvimento do país.

É dessa preocupação que surgem as mais variadas técnicas de controle impostas às grandezas elétricas das linhas de transmissão, que minimizam os efeitos dos distúrbios, sejam eles transitórios ou de longa duração. Seguindo esse raciocínio, é praticamente obrigatória a opção por compensações dos parâmetros naturais do sistema, visando uma operação normal da linha mesmo em regime permanente.

No entanto, com o passar do tempo, foi vista a necessidade da utilização de um dispositivo diferente, que agisse no sistema elétrico no sentido de combater distúrbios que fossem além de surtos de tensão ou variação brusca na demanda de potência reativa. Isto porque, após a contribuição de trabalhos de alguns pesquisadores confirmando a viabilidade da manobra de religamento monopolar na ocorrência de faltas monofásicas temporárias, verificava-se a existência de uma corrente não-nula mesmo após a abertura dos disjuntores nas extremidades da linha correspondentes à fase sob defeito. Este fenômeno impede a eficiência plena da manobra de religamento monopolar, e é chamado comumente de arco secundário.

A proposta deste trabalho é o estudo de um equipamento novo, concebido a partir da modificação de um compensador estático original, de modo a permitir uma ação ainda mais abrangente no sistema elétrico, mantendo as funcionalidades anteriormente já conhecidas do STATCOM e acrescentando a possibilidade de extinção da corrente de arco secundário.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Aspectos Gerais . . . . .	2
1.2 Um histórico do STATCOM . . . . .	3
1.3 Motivação do Trabalho . . . . .	4
1.4 Objetivos . . . . .	5
1.5 Estrutura do Texto . . . . .	5
<b>2 Alguns Aspectos sobre Linhas de Transmissão</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução . . . . .	8
2.2 Parâmetros Elétricos . . . . .	9
2.3 Soluções das Equações . . . . .	14
2.4 Quadripólos representando uma linha de transmissão . . . . .	17
2.5 Fluxo de Potência e Estabilidade . . . . .	18
2.5.1 Fluxo de Potência . . . . .	18
2.5.2 Estabilidade em Sistemas de Potência . . . . .	20
2.5.3 Energização de Linhas e o Efeito Ferranti . . . . .	22
2.5.3.1 Impedância terminal maior que $Z_c$ . . . . .	24
2.5.3.2 Impedância terminal menor que $Z_c$ . . . . .	25
2.6 Conclusões Parciais . . . . .	25
<b>3 Religamento Monopolar</b>	<b>27</b>
3.1 Introdução . . . . .	28
3.2 Modelagem Matemática do Arco Secundário . . . . .	31
3.3 Exemplos de Simulação do Arco Secundário . . . . .	34
3.3.1 Modelagem em PSCAD/EMTDC . . . . .	34
3.3.2 Tecnologias para auxiliar a Extinção do Arco Secundário . . . . .	36
3.4 Conclusões Parciais . . . . .	37

<b>4</b>	<b>Estudo do Compensador Estático</b>	<b>39</b>
4.1	Aspectos Gerais sobre Compensação Reativa . . . . .	40
4.2	O E-STATCOM . . . . .	42
4.2.1	Aspectos Gerais . . . . .	42
4.2.2	O STATCOM . . . . .	42
4.2.2.1	O Controle do STATCOM . . . . .	44
4.2.3	A Função <i>Enhanced</i> . . . . .	49
4.3	Conclusões Parciais . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Resultados das simulações</b>	<b>54</b>
5.1	Sistema estudado na simulação . . . . .	55
5.2	Resultados . . . . .	56
5.3	Conclusões Parciais . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>65</b>
6.1	Conclusões e Apontamentos Finais . . . . .	66
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros . . . . .	67

# Lista de Figuras

2.1	Sistema Interligado Nacional (Fonte: ONS) . . . . .	9
2.2	Esquema de uma linha de transmissão aérea . . . . .	9
2.3	Representação dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão aéreas	10
2.4	Circuito $\pi$ -equivalente de uma linha de transmissão . . . . .	16
2.5	Linha de transmissão representada por um quadripólo . . . . .	17
2.6	Dois sistemas interligados por uma linha simples . . . . .	20
2.7	Margem de estabilidade - situação estável . . . . .	21
2.8	Margem de estabilidade - situação instável . . . . .	22
2.9	Circuito equivalente de uma linha de transmissão monofásica sem perdas	23
3.1	Abertura trifásica (disjuntores em vermelho) para uma falta monofásica (em azul) no meio da linha de transmissão. . . . .	28
3.2	Abertura monofásica (disjuntor em vermelho) para uma falta monofásica (em azul) no meio da linha de transmissão. . . . .	29
3.3	Segmento de linha de transmissão, com suas impedâncias e admitâncias (impedâncias longitudinais mútuas removidas da figura por facilidade). . . . .	31
3.4	Capacitâncias próprias e mútuas de uma linha. . . . .	31
3.5	Característica estacionária do arco secundário. . . . .	33
3.6	Simulação-exemplo de um arco secundário no software EMTDC/PSCAD . . . . .	36
4.1	Compensador <i>shunt</i> ideal. . . . .	42
4.2	Circuito de potência do STATCOM. . . . .	43
4.3	Geração de corrente indutiva e capacitiva pelo STATCOM. . . . .	44
4.4	Representação esquemática em blocos do sistema de controle do STATCOM. . . . .	45
4.5	Diagrama em blocos do PLL. . . . .	46
4.6	Diagrama de blocos do controle da tensão no capacitor do elo CC. . . . .	47
4.7	Diagrama em blocos do controle de tensão. . . . .	48

4.8	Diagrama em blocos que mostra a estratégia de controle de corrente vetorial e o chaveamento PWM senoidal do inversor. . . . .	48
4.9	Injeção de corrente na fase defeituosa. . . . .	50
4.10	Configuração do E-STATCOM para extinção do arco secundário. . . . .	50
4.11	Controle do lado retificador do E-STATCOM operando no modo de extinção do arco secundário. . . . .	51
4.12	Diagrama de blocos do circuito de sincronismo (PLL) monofásico. . . . .	51
4.13	Controle do lado inversor do E-STATCOM operando no modo de extinção do arco secundário. . . . .	52
5.1	Esquema geral do caso estudado: Interligação Norte-Sul . . . . .	55
5.2	Tensão em Miracema com a atuação do E-STATCOM. . . . .	57
5.3	Potência reativa fornecida pelo E-STATCOM. . . . .	58
5.4	Tensão nos capacitores CC do E-STATCOM operando no modo normal. . . . .	58
5.5	Condutâncias dos sub-arcos sem a atuação do E-STATCOM. . . . .	59
5.6	Correntes nas condutâncias $g_1$ e $g_2$ sem a atuação do E-STATCOM. . . . .	60
5.7	Condutâncias $g_1$ e $g_2$ com a atuação do E-STATCOM. . . . .	60
5.8	Correntes nas condutâncias $g_1$ e $g_2$ com a atuação do E-STATCOM. . . . .	61
5.9	Tensão nos capacitores CC do E-STATCOM (modo Enhanced). . . . .	61
5.10	Tensão nos capacitores CC do E-STATCOM analisada em instantes de tempo menores. . . . .	62
5.11	Correntes de saída do conversor durante a extinção do arco secundário. . . . .	63
5.12	Correntes de saída do conversor com o E-STATCOM operando em modo normal e compensando uma potência reativa de 170 Mvar. . . . .	64

# Lista de Tabelas

4.1	Vantagens e Desvantagens das Compensações Reativas Típicas . . . .	41
5.1	Elementos conectados às barras . . . . .	56

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo inicial, são listados os aspectos gerais da utilização dos equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Um breve histórico da evolução do equipamento tratado especificamente neste trabalho, o STATCOM, também é citado, com o objetivo de ilustrar como o mesmo tomou a forma atual ao longo do tempo. Por último, são apresentados a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e os objetivos a que este se propõe.

## 1.1 Aspectos Gerais

Considerando as características geográficas, políticas e energéticas do Brasil, é necessária a existência de linhas de transmissão longas interligando as grandes concentrações de fontes hidrelétricas e de consumidores.

É dessa necessidade que surgem as diversas técnicas de controle impostas às grandezas elétricas das linhas, que minimizam os efeitos dos distúrbios, sejam eles transitórios ou de longa duração. Entre estas técnicas, destacam-se o controle de tensão, de fator de potência e da potência ativa transmitida. Deve-se lembrar ainda que o controle sobre uma mesma grandeza pode ser feito de formas diferentes, em função da natureza do distúrbio que causa a alteração; há diferentes técnicas de controle para evitar os surtos de tensão, sejam os mesmos sustentados ou originados por descargas atmosféricas.

No caso das linhas de transmissão longas convencionais (acima de 240 km, de acordo com [1]), o problema de ressonância associado à presença de indutâncias e capacitâncias é delicado, podendo originar distúrbios de natureza tanto transitória quanto sustentada. Assim, é praticamente obrigatório optar-se pela compensação direta destes parâmetros, de modo a manter a operação normal da linha, mesmo em regime permanente.

A tradição indica o uso de elementos fixos, como reatores *shunt* ou capacitores em série. Por outro lado, a sólida evolução da eletrônica de potência desde a década de 1980 permitiu a entrada no mercado de elementos controlados por chaves semicondutoras, como o SVC (Static Var Compensator), o STATCOM (Static Compensator) e o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), atualmente já utilizados em escala mundial. Estes proporcionam uma maior controlabilidade sobre tensão, impedância e potência que os elementos fixos, atuando com dinâmica muito mais rápida e sendo, portanto, em geral mais eficazes no controle e minimização de distúrbios.

Dentre os três citados acima, destacou-se o STATCOM, devido ao fato de este não trabalhar com a introdução de elementos de circuito no sistema - como capacitores e indutores. Assim, proporciona uma dinâmica transitória mais rápida e menos oscilante do que os outros dois dispositivos citados.

A característica operacional do STATCOM [2] em regime permanente é semelhante a do Compensador Síncrono Rotativo. A diferença é que o primeiro (o STATCOM) emprega chaves semicondutoras de potência em estado sólido, doravante é chamado de compensador estático. O controle destes dispositivos permite uma rápida controlabilidade das grandezas do sistema elétrico. Conseqüentemente, este equipamento também controla de forma muito eficiente a potência reativa.

## 1.2 Um histórico do STATCOM

Os primeiros estudos de implementação do STATCOM começaram em 1976, a partir do estudo de um grupo ligado às empresas Kansay Electric Co. Ltd. e à Mitsubishi Electric Corporation. O desenvolvimento deste equipamento novo na época, utilizando blocos inversores compostos por tiristores e circuitos auxiliares complexos para implementar nos mesmos a comutação forçada, tinha como objetivo aumentar a capacidade da produção de correntes de compensação, que era bem limitada nos SVC's (Static Var Compensators) [3] [4] [5] [6]. O desenvolvimento do STATCOM visava também a redução do tamanho dos compensadores eliminando os grandes capacitores e reatores dos SVC's.

Em 1980, foi implementado e testado o primeiro protótipo do STATCOM [7]. Este foi dimensionado para a potência de 20 MVA e tensão de 77 kV, utilizando ainda tiristores com circuitos auxiliares de comutação forçada. O objetivo inicial do dispositivo era aumentar a estabilidade do sistema, visando dessa forma melhorar também sua dinâmica. Isso era alcançado através da compensação dos reativos.

Em 1992, o primeiro STATCOM entrou em operação na subestação de Inuyama, pertencente à Kansay Electric Co. Ltd. [8]. Este STATCOM de 48-pulsos tem uma potência nominal de 80 MVA, tensão de 154 kV e é constituído por transformadores especiais ligados em zigue-zague. Os inversores foram montados com GTO's (Gate Turn Off Thyristor) de 4,5 kV / 3 kA.

Com o sucesso do desenvolvimento do STATCOM, houve um maior interesse da comunidade científica pelo equipamento. Logo surgiram muitas contribuições visando melhorar o desempenho do compensador. Alterações na topologia do STAT-

COM [9] [10] ou o acionamento dos inversores por técnicas de PWM em altas frequências foram propostas [11] [12].

Além disto, foram estudadas diferentes metodologias de controle aplicáveis ao STATCOM [13] [14] e a possibilidade de aplicação do dispositivo em sistemas de distribuição, com a introdução do conceito de Custom Power [15]. As características principais do compensador nessa aplicação são: assegurar uma maior estabilidade para o sistema elétrico e o controle da tensão em sistemas de distribuição [16].

### 1.3 Motivação do Trabalho

Com a evolução do STATCOM desde a sua primeira implementação, o conhecimento sobre o comportamento do dispositivo no sistema elétrico e possíveis estratégias de controle vêm aumentando consideravelmente.

Porém, grande parte da bibliografia encontrada envolve a aplicação do compensador estático na estabilização da tensão de um determinado ponto do sistema elétrico, ou no controle do fator de potência visto pela geração, nesse mesmo ponto, quando alimentando uma carga com determinada demanda de potência reativa.

Foi vista, com o passar do tempo, a necessidade de se conceber um dispositivo diferente, que agisse no sistema elétrico no sentido de combater distúrbios além de surtos de tensão ou variação brusca na demanda de potência reativa. Isto porque, após a contribuição de trabalhos da parte de alguns pesquisadores [17] [18] confirmando a viabilidade da manobra de religamento monopolar na ocorrência de faltas monofásicas temporárias, verificava-se na prática a existência de uma corrente em uma fase anteriormente sob defeito, mesmo após a eliminação do mesmo com a abertura do disjuntor correspondente. Essa circulação de cargas impede o religamento monopolar, e é chamada comumente de arco secundário.

Este fenômeno pode se auto-extinguir ou não, dependendo da interação entre o próprio arco e a rede elétrica. Portanto, faz-se necessária a utilização de um método de extinção que assegure a possibilidade de religamento monopolar, no caso da ocorrência de faltas monofásicas temporárias e manutenção do arco secundário.

A maior motivação deste trabalho é o estudo de um equipamento diferente, concebido a partir da modificação de um compensador estático original tomado como base, de modo a permitir uma ação ainda mais abrangente no sistema elétrico, mantendo as funcionalidades anteriormente já conhecidas do STATCOM, mas acrescentando a possibilidade de extinção da corrente de arco secundário.

## 1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova topologia para o STATCOM, mantendo as principais funções do compensador estático e permitindo a possibilidade de utilizá-lo na extinção do fenômeno arco secundário.

Enquanto o sistema estiver funcionando intacto e sem contingências, o compensador estático é conectado em paralelo a uma das barras e faz a regulação da tensão neste ponto do sistema elétrico. Na presença de uma falta monofásica, imediatamente após a abertura dos disjuntores correspondentes ao trecho sob falta, o controle muda para o modo de extinção do arco secundário e sintetiza uma corrente de valor contrário ao medido. Com a extinção do fenômeno, o compensador volta ao modo de operação normal.

A fim de comprovar a eficiência do compensador estático no que diz respeito aos seus dois modos de operação, o mesmo foi utilizado em um modelo elétrico da interligação Norte-Sul. O equipamento foi conectado mais precisamente na subestação de Miracema, que é a unidade central da conexão. A ferramenta computacional utilizada para a validação do trabalho foi o software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

## 1.5 Estrutura do Texto

Este texto foi organizado em 6 capítulos, que possuem o conteúdo resumido nos parágrafos seguintes.

No capítulo 2 é feita uma revisão de vários conceitos sobre linhas de transmissão.

São mostrados os parâmetros elétricos, as soluções das equações que modelam as linhas em parâmetros distribuídos, os quadripólos - outra forma de representação das LT's - e um estudo sobre fluxo de potência e estabilidade, útil para ilustrar a importância da regulação da tensão no sistema elétrico.

No capítulo 3 são descritos os principais aspectos sobre religamento monopolar e o fenômeno estudado neste trabalho, o arco secundário. São apresentadas também a modelagem matemática do arco e exemplos de simulação do mesmo em programas de transientes eletromagnéticos, como o PSCAD/EMTDC.

No capítulo 4 é detalhado o princípio de funcionamento e operação do E-STATCOM. Antes do estudo propriamente dito do compensador, é feita uma introdução com uma abordagem sobre os aspectos da compensação reativa. Posteriormente são desenvolvidos os tópicos sobre o precursor deste modelo citado no trabalho - o STATCOM, e mostrado o motivo de mudança da topologia e controle do equipamento original.

O sistema elétrico estudado e os resultados das simulações são apresentados no capítulo 5. Uma análise mais aprofundada de alguns resultados também é mostrada nesse capítulo.

No capítulo 6 seguem-se as principais conclusões obtidas com relação ao tema desenvolvido e apresentadas algumas sugestões para a continuidade do trabalho.

## Capítulo 2

# Alguns Aspectos sobre Linhas de Transmissão

Neste capítulo, será abordada uma breve revisão sobre a teoria básica de linhas de transmissão. Esta explanação sobre tais conhecimentos é necessária devido à ocorrência do arco secundário se dar, na maioria das vezes, em linhas de transmissão longas (acima de 240 km). Portanto, um embasamento inicial do assunto torna-se fundamental para os conceitos introduzidos ao longo deste trabalho.

## 2.1 Introdução

O Sistema Elétrico Brasileiro tem como característica mais marcante um domínio expressivo de usinas hidroelétricas, cuja importância para o setor sobrepõe às térmicas e nucleares.

Portanto, a opção pela utilização do potencial hidroelétrico do país determinou as principais características do sistema elétrico, já que usinas desse tipo são construídas onde se pode aproveitar da melhor maneira os fluxos e os desníveis dos rios, muitas vezes localizados em áreas distantes dos centros consumidores. Conseqüentemente, para atender à demanda do mercado, foi necessário o desenvolvimento de um extenso sistema de transmissão, no qual as linhas criam uma complexa rede de caminhos alternativos para levar, com segurança e eficiência, toda a energia produzida nas usinas até os centros de consumo.

É comum, no caso brasileiro, a divisão do sistema elétrico em dois sub-sistemas - um com as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e outro reunindo as regiões Nordeste e Norte. No fim da década de 90, ambos foram acoplados por uma linha de transmissão, a Interligação Norte-Sul, e passaram a formar um único sistema interligado de âmbito nacional.

Atualmente, outras interligações entre outros sub-sistemas já estão em funcionamento, possibilitando opções de troca de energia entre regiões e permitindo a obtenção de benefícios por meio da diversidade de comportamento das vazões entre os rios das diferentes bacias hidrográficas.

Como estas interligações têm em geral comprimentos totais na faixa de centenas de quilômetros (devido à extensão do território brasileiro), o estudo das linhas longas é fundamental para a compreensão do sistema elétrico como um todo. Como será visto, o comprimento destas é um dos fatores decisivos para sua operação adequada, definindo requisitos técnicos importantes como compensação reativa, sobretensões e procedimentos operativos como abertura, religamento e outros.

Para ilustrar melhor o que foi escrito acima, na figura 2.1 é detalhado todo o sistema interligado nacional.



Figura 2.1: Sistema Interligado Nacional (Fonte: ONS)

## 2.2 Parâmetros Elétricos

Pelo fato de serem predominantes em extra-alta tensão, o enfoque deste trabalho é direcionado às linhas de transmissão aéreas, cuja parte ativa é composta de cabos suspensos acima do solo, conforme representado esquematicamente na figura 2.2.

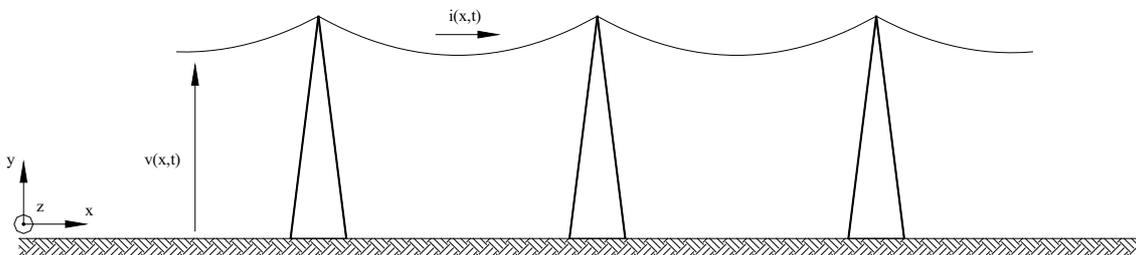


Figura 2.2: Esquema de uma linha de transmissão aérea

Este sistema cabos + solo tem como modelo um circuito elétrico de extensão por toda a linha, e possui quatro parâmetros básicos: uma resistência ( $R$ ) e uma indutância ( $L$ ) em série na direção longitudinal, e uma condutância ( $G$ ) em paralelo

com uma capacitância ( $C$ ) na direção transversal. A figura 2.3 apresenta um esquema de representação destes parâmetros.

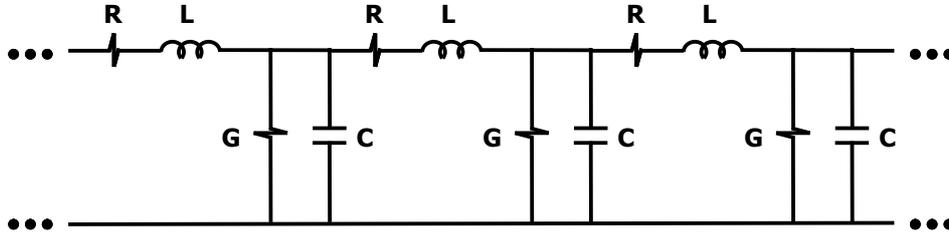


Figura 2.3: Representação dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão aéreas

Os parâmetros mostrados acima são fornecidos por unidade de comprimento e modelam o comportamento elétrico das linhas de transmissão nas equações das mesmas, que, no domínio da frequência, têm a forma mostrada em (2.1) e (2.2) [1].

$$-\frac{d[\vec{V}]}{dx} = [\vec{Z}] \cdot [\vec{I}] \quad (2.1)$$

$$-\frac{d[\vec{I}]}{dx} = [\vec{Y}] \cdot [\vec{V}] \quad (2.2)$$

Nas expressões citadas,  $[\vec{Z}] = [R] + j \cdot \omega \cdot [L]$  é chamada matriz de impedância longitudinal e  $[\vec{Y}] = [G] + j \cdot \omega \cdot [B]$  é chamada matriz de admitância transversal da linha. Os vetores  $[\vec{V}]$  e  $[\vec{I}]$  são respectivamente denominados tensão transversal e corrente longitudinal.

São convenientes as seguintes observações a respeito das expressões (2.1) e (2.2):

- São duas expressões de origem matricial, nas quais matrizes e vetores possuem dimensão correspondente ao número de fases da linha;
- O domínio da frequência é de comum utilização para os cálculos de regime permanente, com  $\omega = 2\pi f$ . Porém, cálculos transitórios também podem ser efetuados, com o uso da transformação de Fourier.

A obtenção exata dos parâmetros elétricos de uma LT é uma tarefa árdua praticamente falando, devido às diversas imprecisões na modelagem física, principalmente

relacionadas ao comportamento elétrico e topográfico do solo. Assim, é comumente utilizada a adoção de aproximações e hipóteses no cálculo dos parâmetros  $R$ ,  $L$ ,  $G$  e  $C$ , sendo as mais comuns as listadas a seguir [19]:

- i. O solo é, em geral, adotado como plano e homogêneo, isto é, com parâmetros elétricos uniformes ao longo das três dimensões espaciais. É normal que a permissividade elétrica  $\varepsilon_s$  seja desprezada, enquanto a condutividade  $\sigma_s$  e a permeabilidade magnética  $\mu_s$  são consideradas constantes com relação à frequência. Em estudos mais detalhados, porém, pode-se considerar o valor de  $\varepsilon_s$ , bem como as variações de  $\sigma_s$  e  $\mu_s$  com a frequência;
- ii. Os cabos são considerados tubulares, com secção reta na forma de coroa circular e raios interno e externo iguais a  $r_0$  e  $r_1$ , respectivamente, onde a corrente na alma de aço ( $r < r_0$ ) é desprezível;
- iii. Além da hipótese anterior, os cabos também são considerados homogêneos, sendo neste caso razoável a desconsideração com o valor da permissividade  $\varepsilon$ , já que, ao contrário do solo, os cabos possuem um valor de condutividade  $\sigma$  muito elevado. A condutividade e a permeabilidade dos cabos são consideradas constantes com a frequência;
- iv. Apesar de serem esticados ao longo do comprimento na forma de catenárias, o que faz com que suas distâncias ao solo sejam variáveis em todo o espaço físico da linha, os cabos são considerados paralelos entre si e ao solo, com diâmetro muito menor que as demais distâncias envolvidas;
- v. Os efeitos nos extremos das LT's e das estruturas de suporte mecânico são desconsiderados nos cálculos dos campos eletromagnéticos que dão origem aos parâmetros.

Não é a intenção deste trabalho detalhar as deduções analíticas dos parâmetros anteriormente citados, sendo suficiente neste ponto, uma apresentação das expressões finais da impedância longitudinal e da admitância transversal.

A impedância longitudinal é comum de ser representada como sendo uma soma de duas parcelas:

$$[\bar{Z}] = [\bar{Z}_{\text{int}}] + [\bar{Z}_{\text{ext}}] \quad (2.3)$$

A consideração das duas parcelas é feita porque nem o solo nem os condutores tem características reais de condutores perfeitos, havendo, portanto, a presença de campo eletromagnético no interior de ambos (além de no próprio ar). Como a impedância longitudinal por unidade de comprimento é a razão entre o campo elétrico longitudinal e a corrente nos condutores, as duas parcelas representam estas relações dentro ( $Z_{int}$ ) e fora ( $Z_{ext}$ ) dos cabos. A parcela exterior, evidentemente, engloba o campo eletromagnético no ar e no solo.

A parcela da impedância correspondente ao campo no interior de condutores tubulares é dada por:

$$\bar{Z}_{int(i,i)} = j \cdot \frac{\omega \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot \bar{\eta} \cdot r_1} \cdot \frac{\bar{I}_0(\bar{\eta} \cdot r_1) \cdot \bar{K}_1(\bar{\eta} \cdot r_0) + \bar{I}_1(\bar{\eta} \cdot r_0) \cdot \bar{K}_0(\bar{\eta} \cdot r_1)}{\bar{I}_1(\bar{\eta} \cdot r_1) \cdot \bar{K}_1(\bar{\eta} \cdot r_0) - \bar{I}_1(\bar{\eta} \cdot r_0) \cdot \bar{K}_1(\bar{\eta} \cdot r_1)} \quad (2.4)$$

Na expressão (2.4), a constante  $\bar{\eta} = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma}$  e  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $K_0$  e  $K_1$  são funções de Bessel modificadas de primeira e segunda espécie, com os sub-índices indicando ordem zero e um, respectivamente. Estas quatro são funções complexas de variáveis complexas, e suas expressões analíticas podem ser encontradas em [20].

Como pode ser visto em (2.4), a impedância interna dos cabos só não é nula na diagonal principal da matriz de impedâncias (elementos  $ii$ ), com o contrário acontecendo fora desta diagonal (elementos  $ij$ ).

A impedância externa, no entanto, foi formulada com excelente aproximação por Carson [21], utilizando integrais infinitas sem solução analítica. A principal aproximação adotada por Carson é considerar a propagação instantânea das ondas eletromagnéticas, o que torna seus resultados válidos numa faixa de frequências até cerca de 2 MHz.

Para tornar mais simples as expressões de Carson, Deri [22] desenvolveu o conceito do plano complexo de retorno, o que transforma - com boa aproximação - as expressões da impedância externa em:

$$\bar{Z}_{ext(I,J)} = j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \sqrt{\frac{x_{ij}^2 + (h_i + h_j + \bar{h}_p)^2}{x_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \quad (2.5)$$

Na equação (2.5),  $x_{ij}$  corresponde à distância horizontal entre os cabos  $i$  e  $j$  ( $x_{ii} = 0$ ),  $h_i$  e  $h_j$  são, respectivamente, a distância vertical entre os cabos  $i$  e  $j$  e o solo

$$\text{e } \overline{h_p} = \frac{1}{\sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_s \cdot \sigma_s}}.$$

Quanto à admitância transversal, o cálculo e as expressões são, em geral, bem mais simplificadas, já que para efeitos desta natureza (transversais) o solo pode ser, com ótima aproximação, considerado um condutor perfeito. A capacitância da linha é determinada a partir da matriz  $P$  dos potenciais de Maxwell, cuja expressão é dada por:

$$P_{(I,J)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \left( \sqrt{\frac{x_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2}{x_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \quad (2.6)$$

Como em (2.5),  $x_{ii} = 0$  e  $h_i - h_j = l_i$ . A partir desta matriz, a admitância transversal da linha é calculada por:

$$[\overline{Y}] = [G] + j \cdot \omega \cdot [C] = [G] + j \cdot \omega \cdot [P]^{-1} \quad (2.7)$$

Mais detalhes, inclusive citando sobre como considerar os parâmetros reais do solo, podem ser encontrados em [23].

Na maioria de estudos, a matriz de condutâncias  $G$  pode ser desprezada com o argumento de que a condutividade do ar pode ser considerada ínfima. Entretanto, pode ser relevante, em alguns estudos, tomar o valor da condutância de cadeias de isoladores [24].

No entanto, é importante frisar que as linhas de transmissão foram representadas neste capítulo pela teoria de circuitos elétricos, que associa aos elementos uma impedância e/ou uma admitância. Como já mencionado, tal representação é adequada para faixas de frequência que compreendem desde 0 até poucos megahertz.

Para uma representação mais detalhada, tipicamente para efeitos ou eventos que abrangem uma faixa de frequência acima da citada no parágrafo anterior, faz-se necessária a utilização da teoria completa dos campos eletromagnéticos, com a inclusão dos efeitos de propagação das ondas, desconsiderados por Carson na concepção do cálculo das impedâncias externas dos condutores.

## 2.3 Soluções das Equações

Os comportamentos de tensão e corrente no tempo ao longo de uma LT podem ser obtidos pela solução do sistema de equações diferenciais mostrado em (2.1) e (2.2), como um elemento de circuito qualquer. A grande diferença das linhas de transmissão para os demais circuitos elétricos é que seus parâmetros  $Z$  e  $Y$  são distribuídos ao longo de seu comprimento, que é considerado desprezível nos circuitos tradicionais, sendo estes modelados por meio de elementos de parâmetros concentrados.

Para resolver as equações (2.1) e (2.2), deriva-se ambas em relação a  $x$ , e assim são obtidas as seguintes equações:

$$-\frac{d^2 [\bar{V}]}{dx^2} = [\bar{Z}] \cdot [\bar{Y}] \cdot [\bar{V}] \quad (2.8)$$

$$-\frac{d^2 [\bar{I}]}{dx^2} = [\bar{Y}] \cdot [\bar{Z}] \cdot [\bar{I}] \quad (2.9)$$

Ambas as expressões são, após o processo de derivação, independentes entre si, e suas soluções devem ser de tal forma que, quando derivadas duas vezes em relação a  $x$ , levam à expressão original multiplicada pela constante  $[\bar{Y}] \cdot [\bar{Z}]$ . Duas soluções típicas são mostradas abaixo [1]:

$$\bar{V}(x) = \bar{K}_1 \cdot \exp((\bar{Y} \cdot \bar{Z})^{1/2} \cdot x) + \bar{K}_2 \cdot \exp(-(\bar{Y} \cdot \bar{Z})^{1/2} \cdot x) \quad (2.10)$$

$$\bar{I}(x) = (\bar{Y} \cdot \bar{Z})^{-1/2} \cdot \bar{K}_1 \cdot \exp((\bar{Y} \cdot \bar{Z})^{1/2} \cdot x) - (\bar{Y} \cdot \bar{Z})^{-1/2} \cdot \bar{K}_2 \cdot \exp(-(\bar{Y} \cdot \bar{Z})^{1/2} \cdot x) \quad (2.11)$$

Observando as expressões (2.10) e (2.11), pode-se encarar a tensão e a corrente como compostas por duas ondas que se propagam em sentidos opostos na linha de transmissão - uma no sentido positivo de  $x$  (chamada incidente, referente à parcela de  $K_1$ ) e outra no negativo (chamada refletida, referente à parcela de  $K_2$ ).

As constantes  $\bar{K}_1$  e  $\bar{K}_2$  devem ser obtidas a partir das condições de contorno, isto é, dos valores de tensão e correntes nos extremos da linha ( $x = 0$ ) e ( $x = L$ ).

Partindo dos valores no extremo receptor da linha  $V(L) = V_R$  e  $I(L) = I_R$ , é possível chegar a:

$$\overline{K}_1 = \frac{\overline{V}_R + \overline{I}_R \cdot \overline{Z}_C}{2} \quad (2.12)$$

$$\overline{K}_2 = \frac{\overline{V}_R - \overline{I}_R \cdot \overline{Z}_C}{2} \quad (2.13)$$

Em (2.12) e (2.13), foi definido  $\overline{Z}_C = (\overline{Z} \cdot \overline{Y})^{-1/2}$  como sendo a impedância característica da linha. Uma interpretação física para esta grandeza tem a ver com a existência de reflexões no terminal receptor; se a impedância da carga alimentada pela linha for igual a  $\overline{Z}_C$ , o valor de  $K_2$  torna-se nulo, não existindo então, onda refletida.

Com a substituição dos valores obtidos nas equações referentes à tensão e corrente, tem-se:

$$\overline{V}(x) = \overline{V}_R \cdot \cosh(\overline{\gamma}x) + \overline{I}_R \cdot \overline{Z}_C \cdot \sinh(\overline{\gamma}x) \quad (2.14)$$

$$\overline{I}(x) = \overline{I}_R \cdot \cosh(\overline{\gamma}x) + (\overline{V}_R \cdot (\overline{Z}_C)^{-1}) \cdot \sinh(\overline{\gamma}x) \quad (2.15)$$

Nas expressões (2.14) e (2.15), foi definida a constante de propagação  $\overline{\gamma} = (\overline{Z} \cdot \overline{Y})^{1/2}$ , que mostra o quanto as alterações de módulo e fase das ondas de tensão e corrente que se propagam por uma dada linha.

Para uma representação coerente das linhas de transmissão no âmbito dos circuitos elétricos, os resultados das equações podem ser transformados em um circuito equivalente, denominado  $\pi$ -equivalente, devido à forma dos seus ramos mostrada na figura 2.4.

Na referida figura, as seguintes grandezas podem ser destacadas:

- $\overline{Z}_{km}$  - Impedância série total da linha de transmissão convertida do modelo  $\pi$ -nominal para  $\pi$ -equivalente  $[\Omega]$ ;

- $\bar{Y}_{km}$  - Admitância paralela total da linha de transmissão convertida do modelo  $\pi$ -nominal para  $\pi$ -equivalente [S];
- $\bar{Z}$  - Impedância série total da linha de transmissão de acordo com o modelo  $\pi$ -nominal, igual a  $zl$ ;
- $\bar{Y}$  - Admitância série total da linha de transmissão de acordo com o modelo  $\pi$ -nominal, igual a  $yl$ ;
- $\bar{\gamma}$  - Constante de propagação da linha:  $\bar{\gamma} = \alpha + j \cdot \beta$ ;
- $\bar{z}$  - Impedância série por unidade de comprimento [ $\Omega/\text{km}$ ];
- $\bar{y}$  - Admitância paralela por unidade de comprimento [S/km];
- $\alpha$  - constante de atenuação [neper/km];
- $\beta$  - constante de fase [rad/s];
- $l$  - comprimento da linha [km].

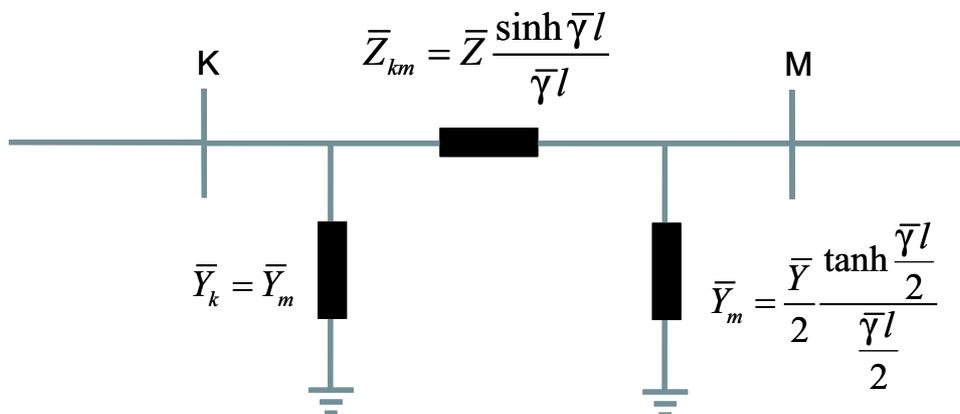


Figura 2.4: Circuito  $\pi$ -equivalente de uma linha de transmissão

Simplificações no circuito podem ser admitidas em função do tamanho da linha, pois os fatores hiperbólicos e até mesmo os efeitos da admitância transversal podem ser desprezados em linhas curtas.

Outra característica destes cálculos a ser considerada é que os mesmos são efetuados em componentes de seqüência, de modo a evitar o possível acoplamento entre as fases típico deste domínio (de fase). Nas expressões (2.10) a (2.15), os valores de

$\bar{z}$  e  $\bar{y}$  são as componentes de seqüência positiva, determinados a partir das matrizes de impedância e admitância apresentadas em (2.3) e (2.7).

## 2.4 Quadripólos representando uma linha de transmissão

É comum a representação de elementos ou até de trechos de um circuito elétrico por quadripólos, isto é, modelos elétricos de quatro terminais nos quais as grandezas internas não têm acesso disponível.

O mesmo procedimento pode ser aplicado às linhas de transmissão, se não for interesse observar grandezas ao longo do comprimento da mesma. Neste caso, representa-se uma LT pelas constantes complexas  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , que relacionam as grandezas terminais como mostrado na figura 2.5.

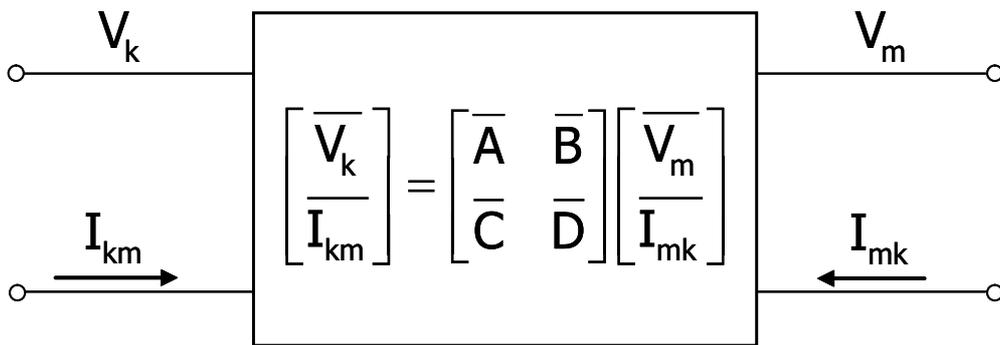


Figura 2.5: Linha de transmissão representada por um quadripólo

As constantes  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  e  $\bar{D}$  podem ser relacionadas ao circuito  $\pi$ -equivalente das linhas pelas seguintes equações:

$$\bar{A} = (1 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_m) \quad (2.16)$$

$$\bar{B} = -\bar{Z}_{km} \quad (2.17)$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_m + \bar{Y}_k + \bar{Y}_m \cdot \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_k \quad (2.18)$$

$$\bar{D} = -(1 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_m) \quad (2.19)$$

Nas linhas de transmissão, é comum fazer  $\bar{Y}_k = \bar{Y}_m$  (dividindo a admitância total do trecho em duas partes iguais), simplificando as expressões (2.16), (2.17), (2.18) e (2.19) para:

$$\bar{A} = 1 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_m = 1 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_k \quad (2.20)$$

$$\bar{B} = -\bar{Z}_{km} \quad (2.21)$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_m \cdot (2 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_m) = \bar{Y}_k \cdot (2 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_k) \quad (2.22)$$

$$\bar{D} = -\bar{A} = -(1 + \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_m) = (-1 - \bar{Z}_{km} \cdot \bar{Y}_k) \quad (2.23)$$

Entre estas grandezas, observa-se a característica  $\bar{A} \cdot \bar{D} - \bar{B} \cdot \bar{C} = -1$ , própria de linhas de transmissão.

## 2.5 Fluxo de Potência e Estabilidade

### 2.5.1 Fluxo de Potência

No quadripólo da figura 2.5, tomando  $V_s = V_k$ ,  $V_r = V_m$ ,  $I_s = I_{km}$  e  $I_r = -I_{mk}$ , as potências ativa e reativa nos terminais emissor e receptor são dadas por:

$$P_s = \text{Re} [\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*] \quad (2.24)$$

$$Q_s = \text{Im} [\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*] \quad (2.25)$$

$$P_r = \text{Re} [\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*] \quad (2.26)$$

$$Q_r = \text{Im} [\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*] \quad (2.27)$$

Considerando que as constantes do quadripólo da linha são genericamente dadas por  $\bar{A} = A \cdot \exp(j \cdot \alpha)$ ,  $\bar{B} = B \cdot \exp(j \cdot \beta)$ ,  $\bar{C} = C \cdot \exp(j \cdot \eta)$ ,  $\bar{D} = D \cdot \exp(j \cdot \Delta)$ , e que a defasagem angular entre as tensões  $V_k$  e  $V_m$  é igual a  $\delta$ , as expressões (2.24), (2.25), (2.26) e (2.27) podem ser transformadas em:

$$P_s = \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \cos(\beta + \delta) + \frac{D \cdot V_s^2}{B} \cdot \cos(\beta - \Delta) \quad (2.28)$$

$$Q_s = \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \sin(\beta + \delta) + \frac{D \cdot V_s^2}{B} \cdot \sin(\beta - \Delta) \quad (2.29)$$

$$P_r = \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \cos(\beta - \delta) - \frac{A \cdot V_r^2}{B} \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (2.30)$$

$$Q_r = \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \sin(\beta - \delta) - \frac{A \cdot V_r^2}{B} \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad (2.31)$$

Na hipótese de uma linha sem perdas ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = -\pi/2$  e  $\Delta = \pi$ ), as expressões simplificam-se para:

$$P_s = \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \sin(\delta) \quad (2.32)$$

$$Q_s = \frac{D \cdot V_s^2}{B} - \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \cos(\delta) \quad (2.33)$$

$$P_r = -\frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \sin(\delta) \quad (2.34)$$

$$Q_r = \frac{A \cdot V_r^2}{B} - \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \cos(\delta) \quad (2.35)$$

Neste caso, a potência ativa é transmitida sem perdas pela linha, e seu valor é igual a  $P_s$  ou  $-P_r$ , que possuem valores iguais. A potência reativa absorvida pela linha é igual a:

$$\Delta Q = Q_s - Q_r = \frac{A}{B} \cdot (V_s^2 - V_r^2) - 2 \cdot \frac{V_s \cdot V_r}{B} \cdot \cos(\delta) \quad (2.36)$$

Considerando as equações (2.32), (2.33), (2.34), (2.35) e (2.36), podem ser feitas as seguintes afirmações:

- i. Quando a tensão  $V_s$  está adiantada em relação à tensão  $V_r$  ( $\delta > 0$ ), existe um fluxo de potência ativa do emissor para o receptor;
- ii. Quando a tensão  $V_s$  está atrasada em relação à tensão  $V_r$  ( $\delta < 0$ ), existe um fluxo de potência ativa do receptor para o emissor;
- iii. Quando a tensão  $V_s$  está em fase com a tensão  $V_r$  ( $\delta = 0$ ) e o módulo da tensão  $V_s$  é igual ao da tensão  $V_r$ , não existe corrente no circuito, e portanto não existe fluxo de potência ativa, nem potência reativa;
- iv. Quando a tensão  $V_s$  está em fase com a tensão  $V_r$  ( $\delta = 0$ ) e o módulo de  $V_s$  é maior que o de  $V_r$ , existe potência reativa indutiva ( $Q_s > 0$ );
- v. Quando a tensão  $V_s$  está em fase com a tensão  $V_r$  ( $\delta = 0$ ) e o módulo de  $V_s$  é menor que o de  $V_r$ , existe potência reativa capacitiva ( $Q_s < 0$ );

### 2.5.2 Estabilidade em Sistemas de Potência

A estabilidade pode ser definida, de uma maneira ampla, como sendo a propriedade que um sistema possui de permanecer em um ponto de equilíbrio de operação em condições normais, e recuperar um outro ponto de equilíbrio, mesmo após a ocorrência de uma perturbação [25].

Trata-se, na verdade, de uma condição de equilíbrio entre forças opostas. O mecanismo pelo qual máquinas síncronas interconectadas mantêm o sincronismo entre si é um processo de restauração de forças, que age sempre que ocorrem perturbações que tendem a acelerar ou desacelerar uma ou mais máquinas em relação às outras. Sob condições de regime permanente, há o equilíbrio entre o torque mecânico (entrada) e o torque elétrico (saída) em cada máquina e a velocidade permanece constante. Se o sistema é perturbado, há uma tendência das máquinas acelerarem ou desacelerarem, buscando um novo ponto de equilíbrio.

Dependendo da intensidade da perturbação e do ponto inicial de operação, o novo estado de equilíbrio poderá ser alcançado ou não. Para exemplificar o assunto, é considerado um sistema simples (figura 2.6), composto por uma linha de transmissão representada de forma simplificada por sua reatância longitudinal equivalente interconectando dois sub-sistemas.

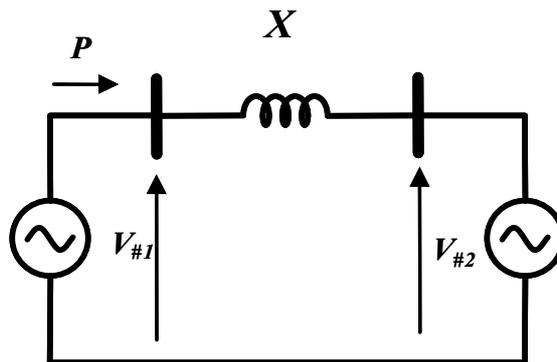


Figura 2.6: Dois sistemas interligados por uma linha simples

Em condições normais de regime permanente, o sistema 1 está transferindo para o sistema 2 uma potência igual a  $P = P_0$  sob um ângulo de carga  $\delta_0$  (ponto A da figura 2.7).

Se por algum motivo a linha sai do regime normal de operação devido à ocorrência

de uma falta - e considerando que, desde o início da mesma até a sua recuperação, a potência ativa transmitida ao longo da linha é nula -, o gerador do sistema 1 não pode mudar sua potência mecânica instantaneamente (devido às altas constantes de tempo dos reguladores mecânicos das turbinas), o que causa uma aceleração neste (o gerador), aumentando sua frequência e levando o ângulo de carga de  $\delta_0$  para  $\delta_1$ . Se a linha volta a operar neste instante, a potência transmitida será agora igual a  $P_1$  - que é superior a  $P_0$  (ver na figura 2.7) -, o que faz com que o gerador sofra uma desaceleração. A área  $A_1$  (na mesma figura) corresponde à energia cinética de aceleração do gerador.

Como a frequência no ponto  $(\delta_1, P_1)$  é maior do que a frequência original, o ângulo de carga aumentará ainda até  $\delta_2$ , no qual a área  $A_2$  é igual à área  $A_1$  (desprezando a dissipação de energia por atrito). Se a área dada pela soma de  $A_2$  e  $A_3$  for maior do que a área  $A_1$ , diz-se que o sistema é dinamicamente estável. Por outro lado, se não for possível ter uma área  $A_2$  igual a  $A_1$ , o sistema é dito como instável.

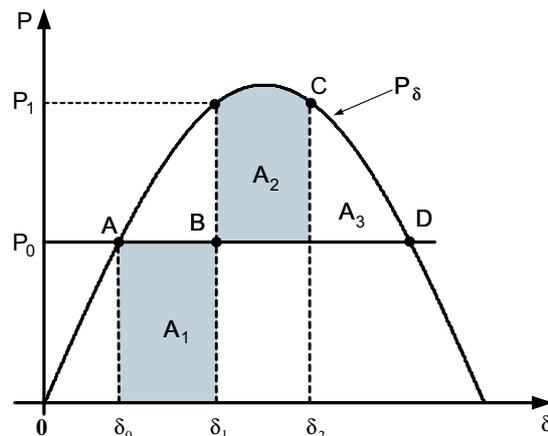


Figura 2.7: Margem de estabilidade - situação estável

Uma situação instável é mostrada na figura 2.8, onde o sistema é o mesmo visto na figura 2.6, mas com a linha fora de operação por um tempo maior. Neste caso, o gerador sofre uma aceleração maior do que no caso anterior, e o ângulo  $\delta$  ultrapassa o ângulo crítico ( $\delta_c$ ), assumindo o valor de  $\delta_1$ . Então, a energia necessária para desacelerar o sistema não é suficiente, pois a área  $A_2$  é menor do que a área  $A_1$ , fazendo com que o sistema se torne instável.

Deve-se notar que o ângulo crítico é ligeiramente inferior a  $\pi/2$  - ponto em que a

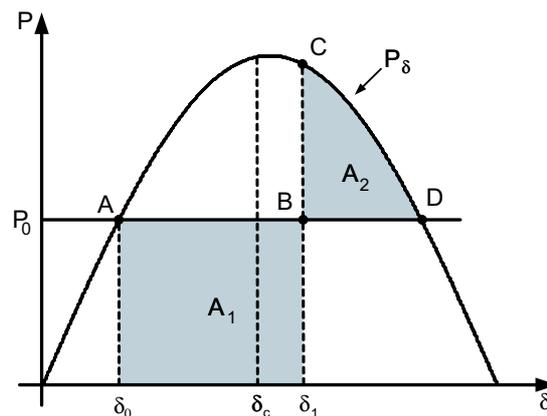


Figura 2.8: Margem de estabilidade - situação instável

curva da potência alcança seu máximo e no mesmo não se pode garantir que o sistema irá retornar ao ponto de equilíbrio -, e que a região em que é possível restabelecer o equilíbrio corresponde àquela na qual a derivada da potência transmitida em relação ao ângulo de fase é positiva.

É fundamental ressaltar que, de acordo com (2.32) e (2.34), a potência ativa máxima que uma linha pode transmitir (também chamada margem de estabilidade) é função inversa de sua reatância série equivalente. Como esta grandeza cresce de forma significativa com o comprimento da linha (como mostrado na figura 2.3), é natural que linhas longas possuam naturalmente menores margens de estabilidade, dispondo de áreas menores de recuperação no caso de eventuais perturbações.

### 2.5.3 Energização de Linhas e o Efeito Ferranti

O efeito Ferranti e suas causas podem ser mais simplesmente abordados com o auxílio de uma linha monofásica ideal (sem perdas) a dois condutores, distantes suficientemente do solo de modo que o efeito deste seja desprezível [26]. Neste caso, a impedância longitudinal e a admitância transversal passam a ser representadas apenas por uma indutância e uma capacitância, respectivamente.

A figura 2.9 apresenta o circuito equivalente para esta linha.

Considerando o fechamento da chave  $S$  no instante  $t = 0$ , o extremo gerador da linha é imediatamente conectado a uma fonte  $V_s$ , mas a tensão  $V_1$  não pode se alterar

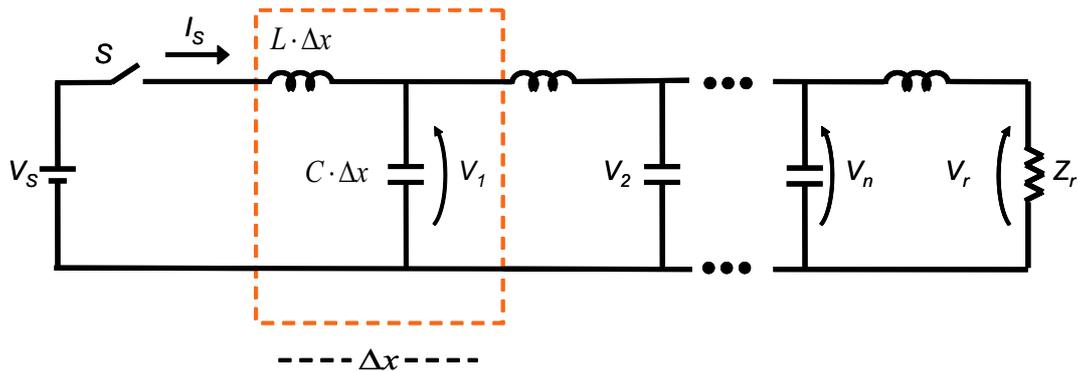


Figura 2.9: Circuito equivalente de uma linha de transmissão monofásica sem perdas

instantaneamente devido à presença do indutor, que impede a variação instantânea das correntes. Isto se repete de forma semelhante por todos os trechos infinitesimais  $\delta x$  da linha, até a tensão  $V_n$ , causando um efeito de propagação tanto da tensão quanto da corrente.

A existência de cargas elétricas estáticas dá origem a campos elétricos, assim como o movimento destas dá origem a campos magnéticos. Deste modo, a energização da linha via chave  $S$  e fonte  $V_s$  faz estabelecer campos elétricos e magnéticos ao longo de todo seu comprimento, progressivamente, propagando-se do terminal emissor ao terminal receptor. A velocidade de propagação dessas frentes de onda é definida pela relação entre o comprimento total da linha e o tempo que as frentes de onda levam para alcançar o terminal receptor, ou seja:

$$v = \frac{l}{T} \quad (2.37)$$

Esta mesma velocidade pode ser definida a partir dos parâmetros unitários da linha [1], que no caso da linha sem perdas é dada por:

$$v = \lambda \cdot f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.38)$$

Em cada trecho infinitesimal, a corrente  $I_S$  só começará a fluir após o intervalo de tempo de energização  $\Delta t$ . Seu valor é constante e independente do comprimento total da linha. Cabe lembrar que, como não há reflexões de onda em cada trecho  $\Delta x$ , a impedância de entrada de cada trecho é igual à impedância característica da

linha, definida na seção 2.2 e, numa linha sem perdas, dada simplificadamente por:

$$\frac{V_s}{I_s} = Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.39)$$

A cada intervalo de tempo  $\Delta t$ , a fonte fornece uma energia igual a  $V_s \cdot I_s \cdot \Delta t$ , que, em uma linha sem perdas não se dissipa, sendo armazenada nos campos elétrico e magnético da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta E_m + \Delta E_E \\ \Delta E &= \frac{1}{2} I_s^2 L \Delta x + \frac{1}{2} V_s^2 C \Delta x \end{aligned} \quad (2.40)$$

De acordo com (2.39),  $V_s = I_s \cdot Z_c = I_s \sqrt{\frac{L}{C}}$  que, substituída em (2.40), leva à conclusão de que a energia fornecida pela fonte se divide em parcelas iguais entre a do campo elétrico e a do campo magnético. Esse equilíbrio acontece em toda a linha quando, em seu terminal receptor, estiver conectada uma carga com valor de impedância igual à característica da LT.

Se este não for o caso (como freqüentemente não é, pela dificuldade de se obter igualdade exata destas impedâncias), esse equilíbrio é perturbado, e dois casos são passíveis de ocorrer.

### 2.5.3.1 Impedância terminal maior que $Z_c$

Quando a impedância terminal da linha é maior do que sua impedância característica, a corrente  $I_r$  será menor do que a corrente  $I_s$  de energização de cada trecho. Por conseguinte, há uma redução na energia armazenada no campo magnético e, para ser mantido o equilíbrio energético total, um excedente é armazenado no campo elétrico, o que acaba por se traduzir em uma elevação na tensão  $V_r$  da linha.

No caso extremo, quando a linha está em aberto ( $Z_r$  infinito), a corrente terminal é nula e a tensão que aparece no terminal receptor da linha (assumindo um caso ideal) será o dobro da gerada na fonte.

A este fenômeno de sobretensão dá-se o nome de Efeito Ferranti.

### 2.5.3.2 Impedância terminal menor que $Z_c$

Quando o inverso ocorre (impedância terminal menor que a impedância característica), a corrente  $I_r$  é maior que a corrente  $I_s$  de energização de cada trecho, havendo um excedente de energia armazenada no campo magnético. Novamente, para a manutenção do equilíbrio total, este excedente traduz-se em uma redução da parcela que é armazenada no campo elétrico.

Isso leva, como conseqüência, a uma redução da tensão no terminal receptor  $V_r$ .

## 2.6 Conclusões Parciais

Linhas de transmissão aéreas possuem características oriundas de sua extensão de centenas de quilômetros no sistema elétrico brasileiro. Tal natureza origina uma série de peculiaridades, desde a determinação de seus parâmetros elétricos até a verificação da estabilidade do sistema próximo a seus terminais. No que se refere aos parâmetros elétricos  $Z$  e  $Y$ , há um aumento de seus valores com o aumento do comprimento da linha, o que causa, como foi visto ao longo do capítulo:

- Aumento da impedância série total equivalente entre seus terminais;
- Aumento da admitância shunt total equivalente entre seus terminais e a terra;
- Aumento das impedâncias e admitâncias mútuas);
- Aumento do efeito Ferranti;
- Redução da margem de estabilidade, diminuindo a capacidade do sistema de se regenerar de uma perturbação;

Portanto, a operação de linhas longas possui aspectos que devem ser cuidadosamente analisados, a fim de manter um funcionamento adequado do sistema como um todo e um fornecimento eficiente de energia. Não é raro que haja a necessidade da conexão de dispositivos compensadores dos parâmetros elétricos da linha - capacitores em série ou reatores em derivação, ou até mesmo de equipamentos de

eletrônica de potência, a fim de minimizar os efeitos negativos descritos acima com uma dinâmica rápida e segura.

# Capítulo 3

## Religamento Monopolar

O objetivo deste capítulo é o detalhamento do que é o religamento monopolar, incluindo os fenômenos envolvidos e o que é feito para torná-lo uma manobra viável de se utilizar nos sistemas de potência.

## 3.1 Introdução

O religamento monopolar em linhas de transmissão é um assunto de muito interesse na área de sistemas de potência, principalmente por englobar aspectos técnicos, econômicos e de confiabilidade dos sistemas elétricos. Além disso, os estudos teóricos nessa área não são triviais, dada a natureza estatística e não-linear dos fenômenos concernentes a esse assunto.

Como é sabido da área de sistemas de potência [1], as fases da linha de transmissão de um sistema trifásico possuem acoplamento indutivo e capacitivo. Isto é visível nas matrizes de impedância e admitância que modelam a LT nos componentes matriciais fora da diagonal principal.

Ocorre que, devido a estes acoplamentos, as grandezas de uma fase induzem grandezas nas outras fases, e até mesmo nos cabos pára-raios (quando instalados). Tais fenômenos de indução dependem das características geométricas e físicas do circuito elétrico no qual a linha está inserida, isto é, a distância entre os condutores de fase e os pára-raios, e se os mesmos condutores estão abertos (indução de tensão), aterrados (indução de corrente) ou alimentando uma carga (indução de ambos), por exemplo.

No caso de defeitos no sistema de transmissão em linhas aéreas, estatisticamente o que tem maior índice de ocorrência, sem dúvidas, é o defeito monofásico fase-terra. Nestas circunstâncias, é um procedimento comum retirar as três fases de operação (abertura e religamento tripolar) por um breve período de tempo, para que elas não induzam, via acoplamento eletromagnético, uma corrente na fase defeituosa, o que impediria a extinção da falta. O procedimento está ilustrado na figura abaixo.

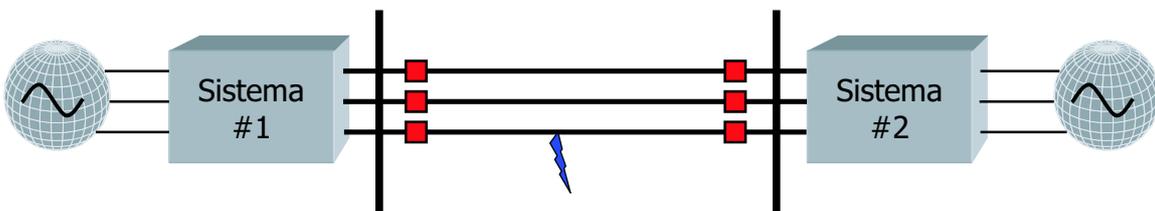


Figura 3.1: Abertura trifásica (disjuntores em vermelho) para uma falta monofásica (em azul) no meio da linha de transmissão.

Na abertura e religamento monopolar (apenas da fase sob defeito), ilustrada

na figura 3.2 a seguir, as fases intactas podem continuar transmitindo potência. Porém, em compensação, também continuam induzindo correntes na fase em curto. Assim, logo após a abertura dos disjuntores em vermelho, a corrente de falta dá lugar à corrente de arco secundário, induzida pelas fases ainda em funcionamento. A extinção ou não desta corrente é que determina o sucesso do religamento; caso ela ainda não tenha se extinguido no momento do religamento, há nova abertura devido à continuidade do defeito.

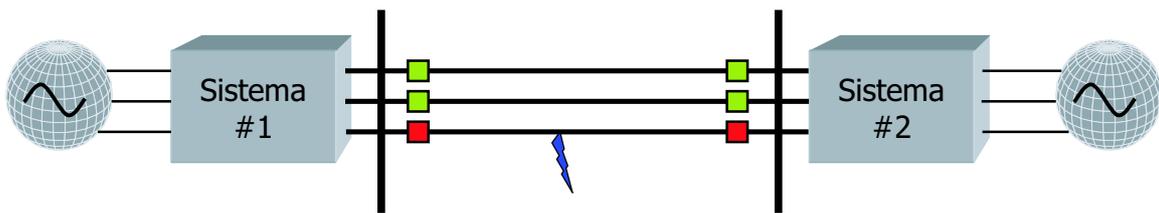


Figura 3.2: Abertura monofásica (disjuntor em vermelho) para uma falta monofásica (em azul) no meio da linha de transmissão.

Entretanto, o processo de extinção do arco secundário exige um estudo mais detalhado, tanto do sistema de transmissão em si, quanto das condições do sistema adjacente e da interação deste com a linha. O fenômeno pode acontecer em qualquer lugar de uma LT ou até próximo a subestações. É difícil a sua detecção, principalmente em ocorrências no centro de uma linha, pois os relés de distâncias provavelmente não conseguirão, por causa dos parâmetros concentrados, detectar a presença de corrente alguma.

Não é a finalidade deste trabalho desenvolver este estudo em detalhes, mas sim apresentar um pouco mais a fundo o problema do religamento monopolar nas linhas longas (acima de 240 *km* [1]).

Como as impedâncias e admitâncias das linhas são grandezas expressas em valores por unidade de comprimento, é razoável considerar que linhas longas possuam maiores valores de impedâncias e admitâncias mútuas. Neste sentido, LT's de grande comprimento teriam de fato maiores correntes induzidas no caso de defeitos monofásicos. Na realidade, é precisamente isto o que acontece.

Dessa forma, em linhas curtas, a corrente de arco secundário tem valor reduzido e elevada probabilidade de auto-extinção antes mesmo do religamento, motivo pelo qual não há preocupações reais da existência de corrente induzida nestes casos. Con-

tudo, com o aumento do comprimento da linha, a corrente de arco secundário passa a ser maior e sua probabilidade de auto-extinção se reduz, o que torna necessária uma ação externa, visando o sucesso do religamento monopolar.

Fica claro, portanto, que é inviável definir se uma corrente de arco secundário se auto-extingue ou não sem estudar a dinâmica da criação e estabelecimento do arco. Tal estudo e modelagem são relativamente complicados, devido às variáveis relevantes no fenômeno de ionização e regeneração do ar. No entanto, uma forma vantajosa de tratar o problema pode ser a descrita a seguir [18]:

- i. Estudo inicial das condições de regime permanente do sistema sob falta, após a abertura monopolar, para estimar a corrente de arco secundário. Isto envolve um estudo mais simples e, caso ela seja ínfima o suficiente (em geral, abaixo de 20 A), é plausível considerar auto-extinção e religamento com sucesso;
- ii. Se os estudos de regime permanente tenham conduzido a uma relativamente elevada corrente de arco secundário (maior que 100 A), é provável que não tenha acontecido a auto-extinção e aí sim é necessário um estudo mais aprofundado de transitórios eletromagnéticos. Neste caso, modelos detalhados da linha e do arco são requeridos;
- iii. Caso de fato não haja extinção do fenômeno após os estudos de regime transitório num programa de simulação de transitórios, é necessário o estudo de uma alternativa para alterar as características de impedância e admitância do sistema de transmissão, o que forçaria a extinção do arco. É justamente isto que este trabalho propõe: a realização de simulações de transitórios eletromagnéticos, com um compensador estático, para alteração das características da linha de modo a forçar a eliminação do arco secundário.

Em regime permanente, um estudo da corrente de arco secundário induzida pelo sistema poderia começar com uma análise de um trecho da linha de transmissão e suas impedâncias e admitâncias próprias e mútuas, conforme mostra a figura 3.3.

No entanto, o arco secundário deve-se muito mais ao acoplamento capacitivo entre as fases do sistema de transmissão, mostrado em maior enfoque na figura (em corte transversal) a seguir.

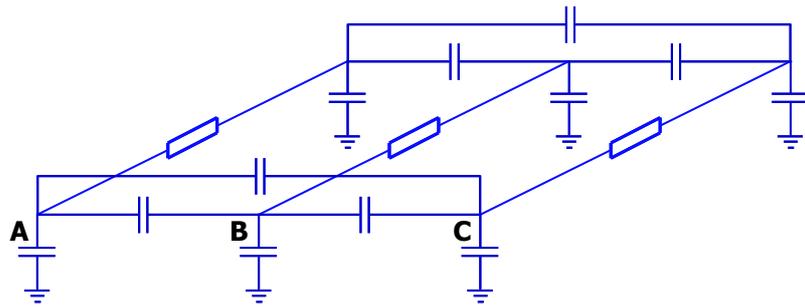


Figura 3.3: Segmento de linha de transmissão, com suas impedâncias e admitâncias (impedâncias longitudinais mútuas removidas da figura por facilidade).

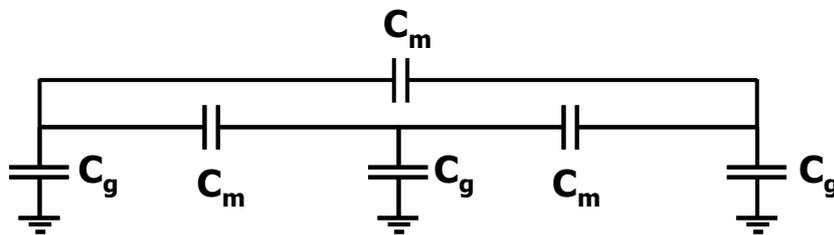


Figura 3.4: Capacitâncias próprias e mútuas de uma linha.

Com a ocorrência de uma falta monofásica na fase A, a corrente de arco secundário, em regime permanente, pode ser definida por meio da seguinte expressão:

$$\bar{I}_{\text{arco}} = j \cdot \omega \cdot C_m \cdot (\bar{V}_b + \bar{V}_c) \quad (3.1)$$

No entanto, para a determinação exata relativa à auto-extinção ou não do arco secundário (como já foi dito anteriormente), é necessária uma análise do mesmo em regime transitório. Esse processo de estudo inicia-se com a modelagem matemática do fenômeno.

## 3.2 Modelagem Matemática do Arco Secundário

O arco elétrico que surge em uma linha de transmissão quando da ocorrência de uma falta monofásica, como já discutido, possui dois estágios principais: o **arco primário**, que ocorre devido à alta corrente originária da falta; e o **arco secundário**, que surge a partir do isolamento da mesma pelos disjuntores terminais.

Existem diversas maneiras de representação do arco (modelos) em cálculos ou

simulações, e estas são classificadas nos seguintes grupos:

- i. Modelos caixa-preta, que relacionam a tensão e a corrente do arco por meio de equações matemáticas e funções de transferência;
- ii. Modelos físicos, que detalham a física do arco a partir das expressões de conservação de massa, quantidade de movimento e da energia;
- iii. Modelos experimentais, nos quais as expressões e diagramas que expressam relações entre os parâmetros característicos do fenômeno são obtidas por meio de testes e ensaios, conjuntamente com simulações computacionais.

Normalmente, são adotados modelos de caixa-preta nos estudos elétricos, dentre os quais são mais conhecidos os de A.M. Cassie [27] e O. Mayr [28], elaborados nas décadas de 1930 e 1940. Nestes, o arco é representado por uma condutância não-linear, relacionada com a corrente e a tensão por meio da seguinte expressão:

$$\frac{1}{g(t)} \cdot \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot \left( \frac{u(t) \cdot i(t)}{P_0} - 1 \right) \quad (3.2)$$

As variáveis  $P_0$  e  $\theta$  são constantes - a primeira é a potência do arco em equilíbrio, enquanto a segunda é a sua constante térmica.

Na década de 90, algumas contribuições [29] para a modelagem do arco foram desenvolvidas, e dentre estas inclui-se uma linha de pesquisa da COPPE que propõe mudanças nos modelos originais de Mayr. Neste caso, a representação do fenômeno se dá pela utilização de dois sub-arcos associados (ou em série ou em paralelo) - e não um só, conforme mostrado em (3.2).

Os dois sub-arcos deste estudo aperfeiçoado seriam representados por duas condutâncias  $g_1(t)$  e  $g_2(t)$ , acopladas entre si, e teriam constantes térmicas  $\theta_1$  e  $\theta_2$  diferentes. Levando em conta que o caminho por onde se estabelece o fenômeno do arco pode ser dividido em duas regiões com propriedades distintas - o centro, com temperatura elevada e muita facilidade de variação de temperatura, e o exterior, com temperaturas baixas e menor capacidade de variação térmica -, o modelo proposto parece ser mais adequado que os de Cassie e Mayr.

Portanto, a representação do arco secundário pelos sub-arcos - mais adequada tanto às medidas laboratoriais quanto à física do fenômeno - poderia ser expressa por:

$$\frac{d[\ln(g_1(t))]}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \cdot \left( \frac{u_1(t) \cdot i_1(t) + J \cdot \left( \frac{\varepsilon \cdot g_2(t)}{g_1(t)} - 1 \right)}{\xi \cdot P_0} - 1 \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{d[\ln(g_2(t))]}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \cdot \left( \frac{u_2(t) \cdot i_2(t) + J \cdot \left( \frac{g_1(t)}{\varepsilon \cdot g_2(t)} - 1 \right)}{\eta \cdot P_0} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Uma variante de (3.2) na qual  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$  são tensões e correntes, e  $\xi$ ,  $\varepsilon$  e  $\eta$  são constantes de acoplamento correlacionadas, está mostrada nas expressões abaixo:

$$P_0 = \begin{cases} B_1 \cdot g^{\beta_1}(t), & g(t) \leq g_{ind} \\ B_2 \cdot g^{\beta_2}(t), & g(t) > g_{ind} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$J = j_r \cdot P_0$$

onde  $g(t)$  é a condutância total do arco e  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $j_r$  são também constantes. A variável  $P_0$ , expressa em (3.5), é a potência do arco quando este se encontra em equilíbrio. De uma maneira geral, arcos em equilíbrio possuem uma relação E X I (campo elétrico longitudinal versus corrente) de forma semelhante à da figura 3.5 abaixo. Neste gráfico, há ainda a indicação de  $g_{ind}$ .

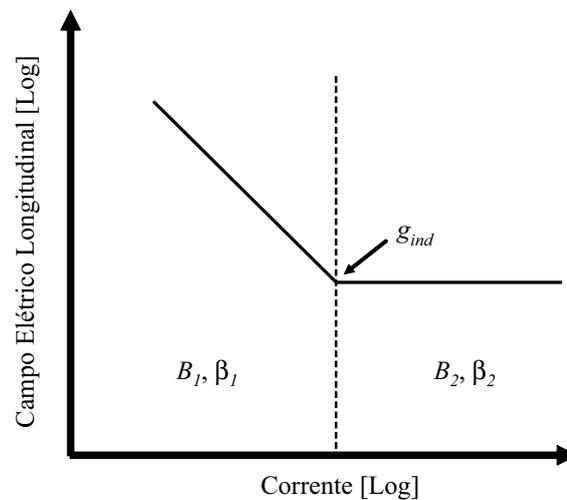


Figura 3.5: Característica estacionária do arco secundário.

A modelagem representada nas expressões (3.3), (3.4) e (3.5) e na figura 3.5 pode ser implementada num simulador no domínio do tempo (como o ATP ou o PSCAD/EMTDC) ou num programa matemático (como o Mathematica).

No caso de haver interesse na operação do arco secundário ocorrendo numa linha de transmissão que compõe um subsistema de maiores dimensões, a solução analítica das equações diferenciais num programa matemático tende a se tornar inviável. Portanto, é importante também a implementação do modelo descrito num simulador como o PSCAD/EMTDC.

### 3.3 Exemplos de Simulação do Arco Secundário

#### 3.3.1 Modelagem em PSCAD/EMTDC

Como já citado, o arco secundário matematicamente pode ser representado por meio de resistores não-lineares, cujos valores são os inversos das condutâncias calculadas pelas equações mostradas em (3.3) e (3.4).

São duas vantagens básicas que se têm na modelagem do arco secundário em um simulador que trabalha no domínio do tempo como o PSCAD/EMTDC:

- i. A simulação de subsistemas de pequeno ou médio porte é imediata, bastando juntar o modelo matemático do arco aos pré-existentes no programa;
- ii. Não há a necessidade de manipulação direta das complexas equações diferenciais.

Portanto, a modelagem é detalhada no programa com o uso de resistores variáveis cujos valores instantâneos de resistência são indicados por um sinal de controle. No PSCAD/EMTDC, blocos internos da biblioteca de controle do programa podem ser utilizados ou blocos editados (customizados) por meio das linguagens de programação C ou FORTRAN.

É conhecido que, para a resolução de um problema envolvendo equações diferenciais, requer-se o conhecimento das condições iniciais. Neste caso especificamente, é

necessário definir-se  $g_1(0)$  e  $g_2(0)$ , isto é, o valor inicial das condutâncias no instante inicial de surgimento do arco secundário.

Um das maneiras de se determinar estas condições é considerar o arco em equilíbrio no momento de seu aparecimento. Assim, utilizando a característica da figura 3.5 e, a partir do valor da corrente de falta no momento do aparecimento do arco  $i_{arco}(0)$ , determina-se sua tensão inicial  $v_{arco}(0)$ , que é igual ao seu campo elétrico longitudinal multiplicado pelo seu comprimento inicial. Com estes valores e assumindo os sub-arcos em paralelo, pode-se encontrar as condutâncias por meio das expressões:

$$\begin{aligned} g(0) &= \frac{i_{arco}(0)}{v_{arco}(0)} \\ g_1(0) &= \xi \cdot g(0) \\ g_2(0) &= \eta \cdot g(0) \end{aligned} \quad (3.6)$$

As equações (3.6) acima mostram as formas das condutâncias dos sub-arcos que modelam um arco secundário com as seguintes características, retiradas de [17]:

- i.  $\theta_{01} = 3,920 \mu s$ ;  $\theta_{02} = 76,56 \mu s$ ;  $g_{ref} = 2,5 \mu S$ ;  $\alpha = 0,2$ ;
- ii.  $J_r = 0,03$ ;  $\xi = 0,291667$ ;  $\eta = 1 - \xi$ ;  $\varepsilon = \xi/\eta$ ;
- iii.  $B_1 = 8,55929 \cdot 10^5$ ;  $\beta_1 = 0,215798$ ;  $B_2 = 26,5225 \cdot 10^6$ ;  $\beta_2 = 1,0$ ;  $g_{ind} = 12,5437$  mS;
- iv.  $g_1(0) = 10,75$  mS;  $g_2(0) = 26,0$  mS.

Como já foi dito anteriormente, o arco secundário pode acontecer ou não dependendo das características do sistema de transmissão. Assumindo a hipótese da ocorrência do fenômeno, é necessário um modelo elétrico que, em conjunto com as condutâncias descritas matematicamente nas equações (3.3) e (3.4), possa reproduzir com precisão a ocorrência do arco em uma simulação.

Portanto, em conjunto com as condutâncias já detalhadas anteriormente, é aplicado um equivalente de Norton com corrente da forma  $200 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t)$ , em Ampères, e impedância equivalente representada por um resistor de  $500 \Omega$ . Na

figura abaixo, é mostrado um gráfico da simulação do arco secundário modelado pelos valores descritos, com as condutâncias  $g_1$  e  $g_2$  variando ao longo do tempo.

Pode-se ver claramente que os dois sub-arcos mantêm-se naturalmente, mesmo após vários milissegundos, e suas condutâncias não decaem a zero. Se uma destas decaísse a zero, mesmo que por poucos instantes de tempo, anularia a outra também devido ao acoplamento matemático existente entre as mesmas, e o arco se auto-extingüiria.

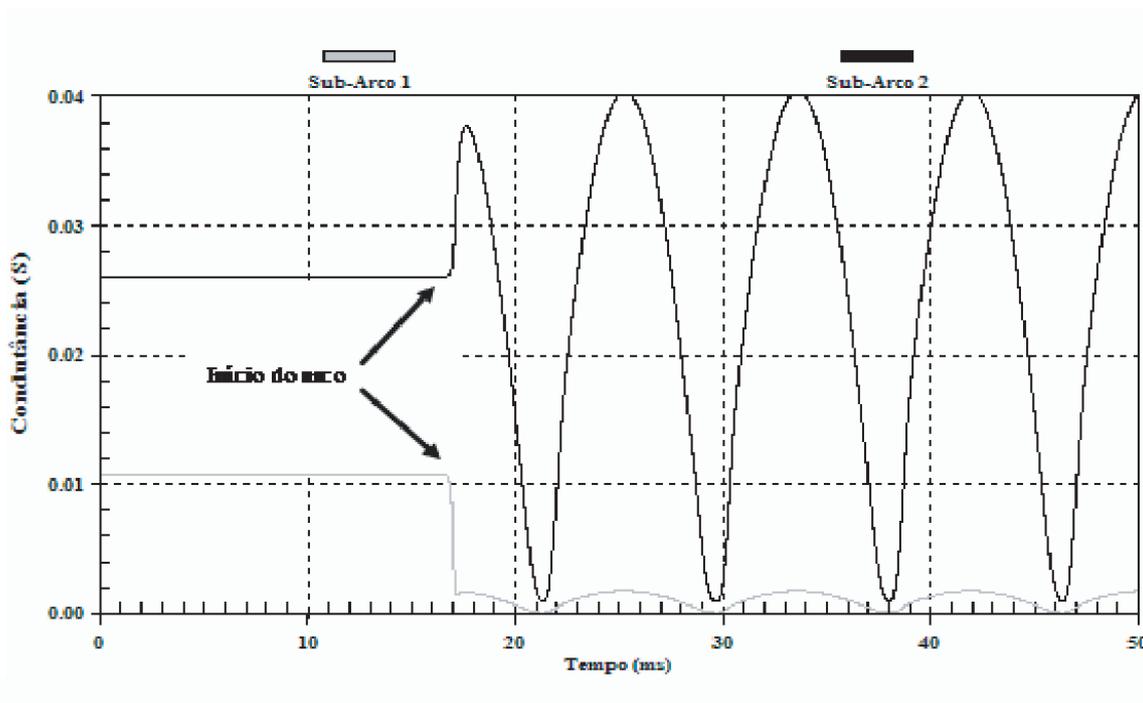


Figura 3.6: Simulação-exemplo de um arco secundário no software EMTDC/PSCAD

### 3.3.2 Tecnologias para auxiliar a Extinção do Arco Secundário

A configuração da linha de transmissão influencia diretamente na auto-extinção do arco secundário. Em determinadas configurações, como nos casos modelados pelas equações descritas na seção anterior, a auto-extinção não é favorecida, sendo necessária a adoção de medidas para promovê-la.

Um exemplo típico são as linhas de alta tensão longas (acima de 240 *km*) e com-

pactas. Nestes casos, os dispositivos comumente utilizados estão associados basicamente à alteração das componentes de seqüência (incluindo a seqüência zero) das redes terminais.

As tecnologias mais conhecidas são resumidas abaixo [17] [18]:

- Impedância de Neutro;
- Chaveamento de Elementos em Derivação;
- Chaveamentos em série;
- Chave de Aterramento Rápido;
- Equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Vale lembrar que a utilização de equipamentos de eletrônica de potência ainda não se tornou comum em manobras de religamento monopolar, sendo estes, entretanto, uma solução em potencial devido aos excelentes resultados que vêm apresentando em outras aplicações de sistemas de potência. Em linhas longas, por exemplo, um dispositivo FACTS pode ser utilizado para a compensação de reativos gerados pela linha.

Portanto, o enfoque deste trabalho é o estudo da utilização deste último item para a extinção de arco secundário e obtenção da manobra de religamento monopolar, além de manter a funcionalidade antiga de regular a tensão em uma dada barra do sistema elétrico.

## 3.4 Conclusões Parciais

Foi estudado, neste capítulo, como se dá a ignição do arco secundário e qual a sua importância em linhas de transmissão que utilizam a técnica de religamento monopolar.

Foi analisado também o valor da corrente de arco secundário em regime permanente. No entanto, para uma determinação mais exata a respeito da auto-extinção

do fenômeno, concluiu-se a necessidade da análise em regime transitório, que se torna possível, primeiramente, por meio da modelagem matemática do arco secundário.

Posteriormente, foram mostrados os tipos de modelagem do arco secundário, bem como as particularidades de cada um. As contribuições efetivas dadas aos modelos, ao longo de todo o tempo de estudo do fenômeno, também foram enunciadas.

Finalmente, por meio de uma simulação realizada no software PSCAD/EMTDC, foi possível observar que o arco secundário não se extingüía automaticamente em alguns casos de linhas de transmissão longas, já que as condutâncias que modelam o fenômeno não decaíram a zero naturalmente. Com isso, concluiu-se necessária a utilização de um método (nesse caso será um compensador estático, um equipamento FACTS) para a extinção do arco, de forma a permitir a execução da manobra de religamento monopolar e a manutenção das vantagens desse expediente.

# Capítulo 4

## Estudo do Compensador Estático

Neste capítulo são apresentados os princípios de operação dos compensadores estáticos, equipamentos associados ao controle de parâmetros e grandezas relevantes dos sistemas de potência, tipicamente tensões (módulo e ângulo) e impedância. O controle sobre estes permite interferir, por exemplo, nas transferências de potência ativa pelo sistema, nos totais de potência reativa presentes e, em regimes transitórios, em sobretensões e correntes de curto-circuito.

## 4.1 Aspectos Gerais sobre Compensação Reativa

O termo "compensação reativa" tornou-se comum na área de sistemas de potência para expressar a introdução de elementos - tradicionalmente bancos de capacitores ou indutores - cuja função básica é controlar a tensão ou a impedância (ou, ainda, a potência) em um ponto qualquer do circuito. Exemplos clássicos são a redução da tensão em linhas a vazio (ou com carga leve) por meio de bancos de indutores *shunt* ou, de forma dual, o aumento da tensão em barras do sistema com o uso de bancos de capacitores série, que também servem para reduzir a reatância equivalente longitudinal da LT.

A rigor, observa-se que as compensações podem ser feitas não apenas por meio de indutores ou capacitores em si, mas com qualquer dispositivo que forneça correntes em quadratura com suas tensões terminais, seja em avanço (comportamento capacitivo) ou em atraso de fase (comportamento indutivo) [16].

Esta característica mais genérica deu origem ao uso de outros elementos para a compensação reativa, como as máquinas síncronas, quando funcionam em vazio - ao funcionarem subexcitadas, comportam-se como indutores; quando funcionam sobexcitadas, comportam-se como capacitores.

Cada um destes tipos de compensação possui vantagens e desvantagens, sendo natural que as novas gerações de equipamentos eliminem as desvantagens progressivamente. A Tabela 4.1 ilustra algumas dessas características.

As principais desvantagens dos equipamentos ilustrados na tabela deram origem ao desenvolvimento de um novo grupo de compensadores, que pudessem aliar, em princípio, uma boa flexibilidade (isto é, a capacidade de se comportar tanto como indutores como capacitores) a uma dinâmica mais rápida, produzindo o mais rapidamente possível as correntes de compensação. Com a evolução da eletrônica de potência, foi possível a concepção de equipamentos com tais características, conhecidos atualmente como compensadores estáticos.

De forma genérica, são equipamentos capazes de fornecer correntes reativas, ora indutivas ou capacitivas, de forma contínua e controlada, com dinâmica rápida devido aos pequenos intervalos de comutação das chaves semicondutoras (da ordem de

Tabela 4.1: Vantagens e Desvantagens das Compensações Reativas Típicas

Tipo de Compensação	Vantagens	Desvantagens Típicas
Convencional Fixa (Capacitores e Indutores)	✓ Baixo custo.	✓ Baixa flexibilidade; ✓ Baixa capacidade de compensação.
Convencional Chaveada (Capacitores e Indutores)	✓ Baixo custo.	✓ Compensação "discreta"; ✓ Transitórios no chaveamento.
Dinâmica (Máquinas Síncronas)	✓ Compensação "contínua".	✓ Dinâmica lenta

microsegundos). É importante ressaltar que, embora correntes reativas não representem fornecimento (ou consumo) de potência ativa, há compensadores estáticos que também podem produzir fluxo de potência ativa, quando necessário [30].

## 4.2 O E-STATCOM

### 4.2.1 Aspectos Gerais

Na seção anterior, foram apresentados os principais aspectos relacionados à compensação reativa. Foi dito que uma das principais funções dos equipamentos destinados a essa finalidade é o controle sobre a tensão, impedância ou fluxo de potência em um determinado ponto do circuito.

Quanto ao controle, este pode ser feito de duas formas básicas, de acordo com a conexão dos equipamentos ao sistema: *série* e *shunt*. Embora tenham características e funções mais amplas, o primeiro tipo está intuitivamente relacionado à compensação dos parâmetros naturais das linhas de transmissão, enquanto o segundo é geralmente associado ao controle de tensão.

### 4.2.2 O STATCOM

O STATCOM é um compensador estático *shunt* baseado em conversor de tensão (VSC - Voltage Source Converter, que significa Conversor Fonte de Tensão) com chaves autocomutadas, cujos princípios de operação podem ser lembrados a partir do esquema simplificado da figura 4.1 [30].

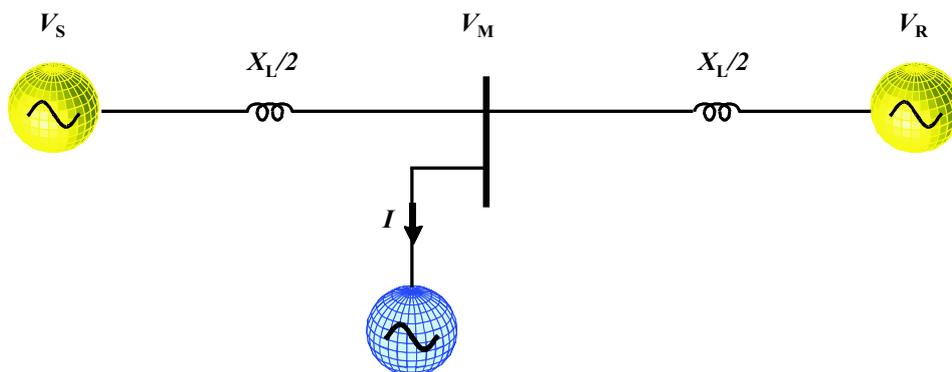


Figura 4.1: Compensador *shunt* ideal.

Neste esquema, a linha de transmissão foi simplificada representada pela sua reatância indutiva. Também por simplicidade, supõe-se que as tensões nos extremos emissor e receptor têm ambas módulo  $V$  e estão defasadas de um ângulo  $\delta$ .

Com a inclusão do compensador ideal (em azul) fornecendo uma tensão com módulo também igual a  $V$  e defasagem angular igual a  $\delta/2$ , a potência transmitida pela linha é dada por:

$$P = \frac{2V^2}{X_\ell} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (4.1)$$

O valor acima é maior que:

$$P = \frac{V^2}{X_\ell} \sin(\delta) \quad (4.2)$$

correspondente à situação sem o compensador. Como o valor de  $2 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$  é sempre maior que  $\sin(\delta)$  em todo o intervalo  $[0, 2\pi]$ , a potência transmitida pela linha pode ser de fato aumentada com o uso do STATCOM.

Além do controle de fluxo de potência, o equipamento também pode controlar a tensão em uma barra, injetando ou drenando uma corrente  $I$  em quadratura com a tensão  $V_M$  (ver figura 4.1). Este comportamento é típico de um capacitor (com  $I$  adiantada em relação a  $V_M$ ) ou de um indutor ( $I$  atrasada em relação a  $V_M$ ), o que proporciona - com baixa influência da potência ativa - o aumento ou a diminuição de  $V_M$ , respectivamente.

Para o desempenho das funções mencionadas, o STATCOM - cujo circuito de potência está apresentado na figura 4.2 - funciona basicamente como um condicionador de potência.

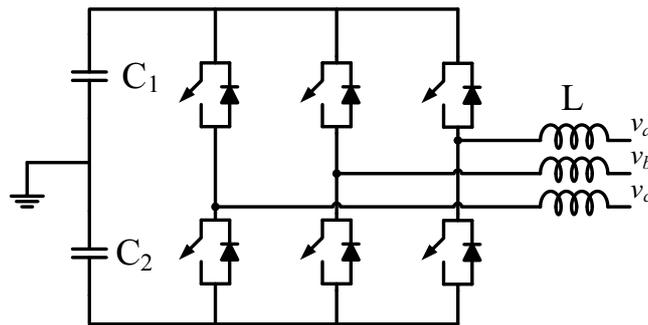


Figura 4.2: Circuito de potência do STATCOM.

As capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  formam o elo de corrente contínua do equipamento, fazendo o papel de manter uma tensão fixa e pré-determinada em seus terminais. Mais tarde ainda neste capítulo é dada a explicação de o porquê do elo CC ser formado por dois capacitores com o ponto central aterrado.

O emprego dos capacitores como armazenadores de energia é possível já que o equipamento em geral não fornece potência ativa para o sistema, não havendo, portanto, necessidade de uma fonte de tensão CC para prover energia constantemente ao circuito [31].

As chaves semicondutoras - em geral, IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) em anti-paralelo com diodos - são as responsáveis pela produção de tensões controladas no lado CA trifásico do equipamento, antes dos indutores L (representando, por exemplo, a reatância de dispersão de um transformador). O aumento ou redução desta tensão em relação à tensão da barra à qual o STATCOM se conecta ( $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  na figura 4.2, correspondente à  $V_M$  na figura 4.1) é que propicia a drenagem de correntes capacitivas ou indutivas, respectivamente, conforme ilustrado na figura 4.3.

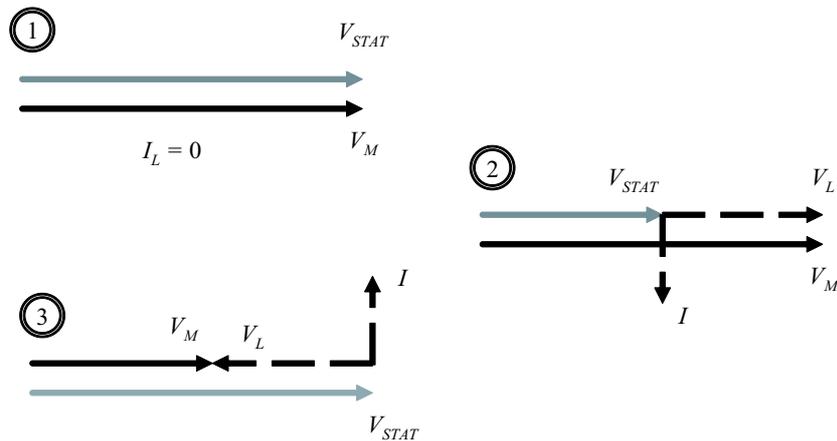


Figura 4.3: Geração de corrente indutiva e capacitiva pelo STATCOM.

Em resumo, pode-se dizer que o elo CC do STATCOM fornece a energia necessária à produção da tensão CA controlada, que por sua vez permite a injeção de correntes indutivas ou capacitivas no sistema.

#### 4.2.2.1 O Controle do STATCOM

Para se manter regulada a tensão  $V_M$  em um dado valor de referência, faz-se necessária a existência de um sistema de controle que regule a corrente reativa (indutiva ou capacitiva, de acordo com a necessidade de redução ou aumento de tensão) do conversor.

O referido sistema de controle é apresentado na figura 4.4, com as medidas elétricas necessárias para o pleno funcionamento do algoritmo e cada bloco representando uma função importante do mesmo.

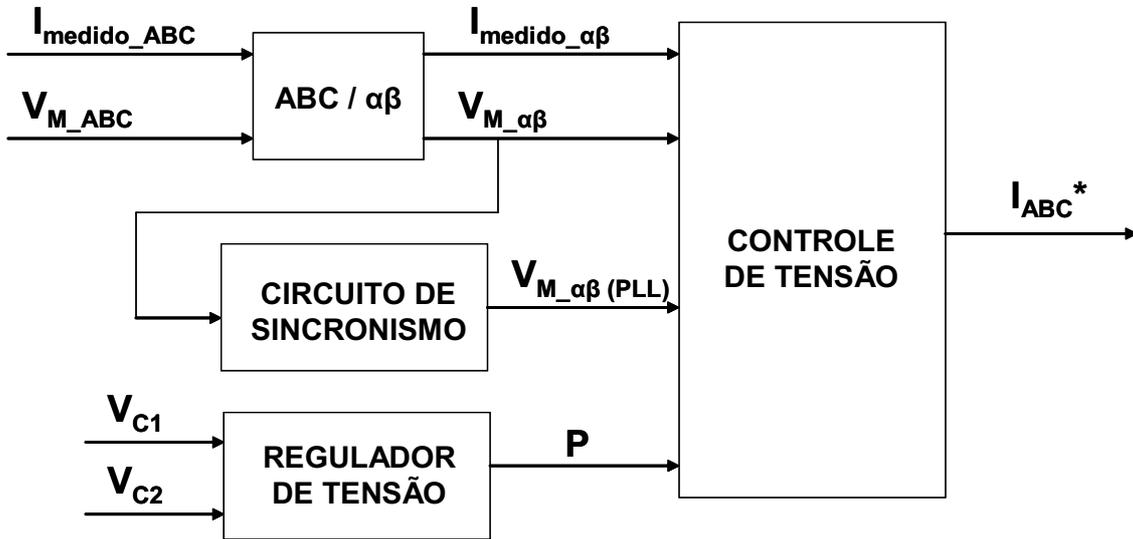


Figura 4.4: Representação esquemática em blocos do sistema de controle do STATCOM.

O primeiro bloco representativo da figura é o da transformação do sistema de coordenadas a-b-c para  $\alpha$ - $\beta$ , chamada também de transformada de Clarke. Esse cálculo é necessário pois diminui o esforço computacional do algoritmo de controle [31].

Nas equações (4.3) e (4.4), é descrita a transformada de Clarke comumente utilizada na Teoria pq [32], para tensões e correntes em sistemas trifásicos a três fios.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

O segundo bloco do sistema de controle, correspondente ao circuito de sincronismo (PLL - Phase Locked Loop), é utilizado com a finalidade de identificar a fase e

a frequência da componente fundamental de seqüência positiva das tensões medidas no sistema [33].

O circuito de sincronismo utilizado tem seu diagrama de blocos representado na figura abaixo, onde  $v_\alpha$  e  $v_\beta$  são sinais de tensões reais do sistema elétrico que passaram pela transformação de Clarke. As correntes  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  são sinais fictícios gerados internamente no PLL, e não devem ser confundidos com  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  obtidos das correntes reais medidas no sistema.

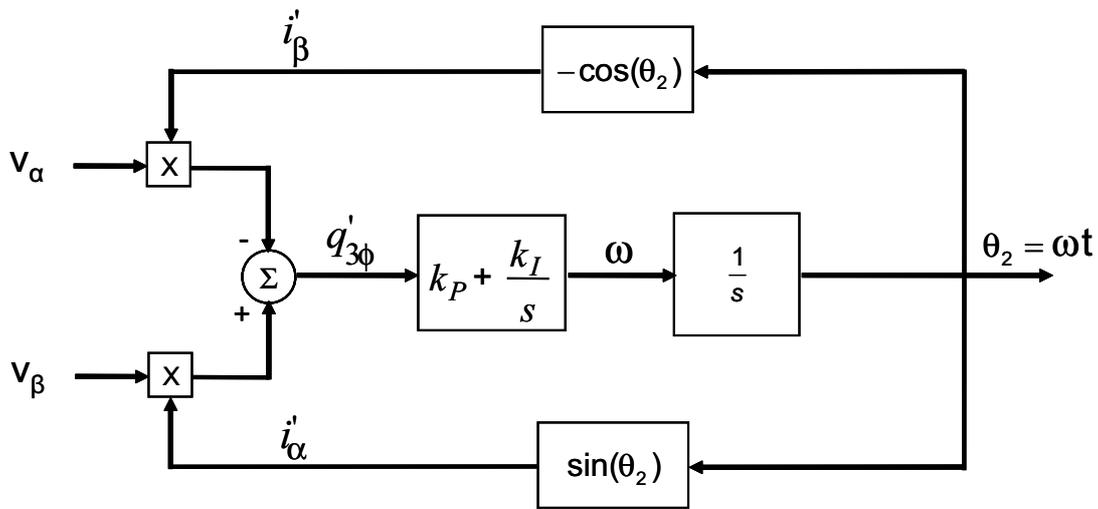


Figura 4.5: Diagrama em blocos do PLL.

O circuito de sincronismo permite a operação com formas de ondas de tensões distorcidas e desbalanceadas. Em regime permanente, o sinal de saída do controlador PI é constante e igual à frequência fundamental da tensão de seqüência positiva e é usado num gerador de senos como frequência de referência  $\omega$ , a qual produz dois sinais:

$$i'_\alpha = \sin(\omega t) \quad (4.5)$$

$$i'_\beta = -\cos(\omega t) \quad (4.6)$$

Esses dois sinais correspondem a correntes auxiliares fundamentais de seqüência positiva em coordenadas  $\alpha - \beta$ .

Abaixo do circuito de sincronismo, encontra-se o controle da tensão no capacitor do elo CC do conversor. A função do capacitor é servir como fonte de tensão contínua, possibilitando a atuação do inversor e servindo também como acumulador temporário de energia, permitindo trocas entre o sistema elétrico e o STATCOM.

Para que se mantenha um nível de tensão adequado à composição das correntes, introduz-se um controlador PI, cuja entrada é a diferença entre a tensão medida no capacitor e um valor de referência pré-definido. A saída é a componente média da potência ativa instantânea a ser drenada pelo compensador [16].

Este valor de potência ativa é em geral mínimo, apenas necessário ao suprimento de perdas no circuito do E-STATCOM, já que o fornecimento de potência unicamente reativa pelo equipamento não altera a tensão média nos capacitores do elo CC.

O diagrama para o controle de tensão no capacitor é apresentado na figura 4.6 abaixo.

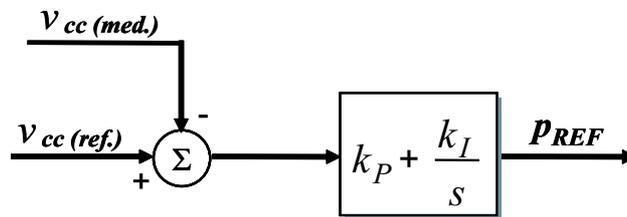


Figura 4.6: Diagrama de blocos do controle da tensão no capacitor do elo CC.

O mais importante bloco do sistema de controle do STATCOM (o maior de todos os mostrados) é o do controle de tensão. Nele, a partir das medições das tensões do sistema devidamente transformadas para as coordenadas  $\alpha - \beta$ , obtém-se o valor eficaz coletivo da tensão na rede, apresentado na equação (4.7) a seguir:

$$\left| v'_{\Sigma} \right| = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \quad (4.7)$$

Compara-se a tensão eficaz com um valor de referência desejado e aplica-se um controlador PI, tendo como resultado a potência imaginária a ser compensada. Em regime permanente, o valor RMS da tensão será igual ao valor de referência e a saída do PI corresponderá à potência reativa de compensação. A figura 4.7 apresenta o diagrama para o controle de tensão.

Na posse da potência média necessária para manter constante a tensão no elo CC e da potência reativa a ser compensada, é possível efetuar o cálculo das correntes de compensação. O mesmo é relativamente simples; basta-se utilizar as equações abaixo, que representam a transformada inversa de Clarke para o cálculo das cor-

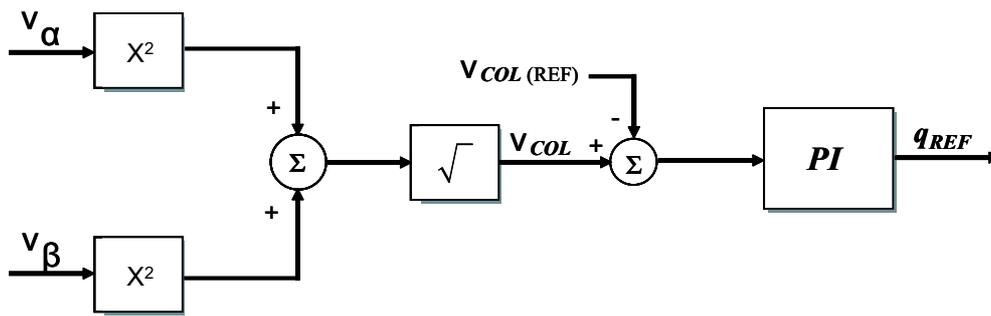


Figura 4.7: Diagrama em blocos do controle de tensão.

rentes, com Q e P (já obtidos) e as tensões  $V_\alpha$  e  $V_\beta$  medidas no ponto de conexão comum [34].

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha comp} \\ i_{\beta comp} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{ref} \\ q_{ref} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Em seguida, é necessária a utilização de uma estratégia de controle que calcule as tensões em cada fase que sintetizam as correntes de compensação desejadas. Neste trabalho, foi escolhida a estratégia vetorial, que tem a vantagem de transformar as correntes de referência do sistema de coordenadas  $\alpha - \beta$  senoidal para o sistema  $d-q$  síncrono, trabalhando com valores DC. Isso dá margem ao uso de controladores PI com ganhos bem razoáveis na obtenção das tensões de compensação, o que não acontece quando se trabalha com correntes de referência senoidais [35]. As tensões de compensação são chaveadas usando-se o método PWM senoidal.

A estratégia de controle de corrente vetorial acoplada ao chaveamento PWM senoidal está mostrada na figura abaixo:

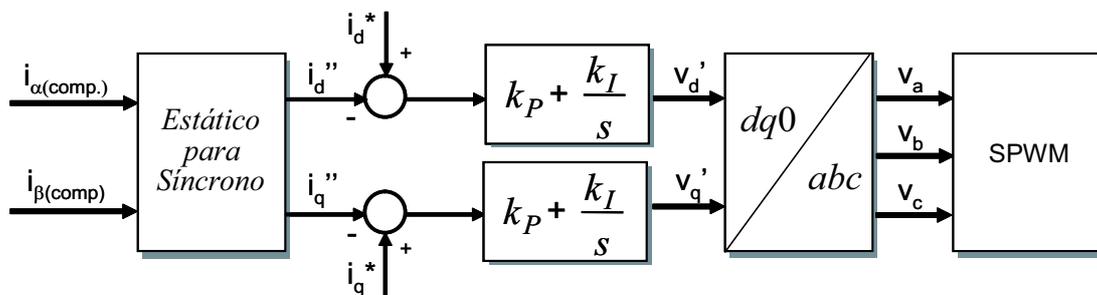


Figura 4.8: Diagrama em blocos que mostra a estratégia de controle de corrente vetorial e o chaveamento PWM senoidal do inversor.

As matrizes de transformação direta e inversa entre os sistemas de coordenadas estático  $\alpha - \beta$  e síncrono  $d - q$  estão mostradas nas equações abaixo:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

### 4.2.3 A Função *Enhanced*

No caso da necessidade da extinção do arco secundário, contudo, a situação se modifica ligeiramente em relação à operação descrita no parágrafo anterior, já que os disjuntores terminais da fase sob defeito estão abertos. Deste modo, a atuação do STATCOM simplesmente como um inversor trifásico não é adequada nem suficiente para resolver o problema, pois o circuito com uma fase aberta já não é mais simétrico.

Este trabalho propõe a criação do E-STATCOM (*Enhanced* STATCOM), que inicialmente contempla esta alteração e simultaneamente mantém a sua função antiga, no modo de operação normal, de regular o valor da tensão em um determinado ponto do sistema elétrico.

O E-STATCOM funciona da seguinte maneira:

- Durante a operação normal do sistema, o equipamento propiciaria o controle sobre a tensão e por consequência sobre o fluxo de potência, funcionando como um STATCOM convencional (inversor trifásico);
- Na ocorrência de um curto-circuito monofásico com posterior arco secundário, o controle passa a atuar em modo de extinção, a fim de extingui-lo.

No modo de extinção, o E-STATCOM funcionaria como uma fonte de corrente controlada na fase sob defeito, como ilustra a figura 4.9. Se esta fonte injetar uma corrente contrária à do arco, por exemplo, o fenômeno pode ser extinto.

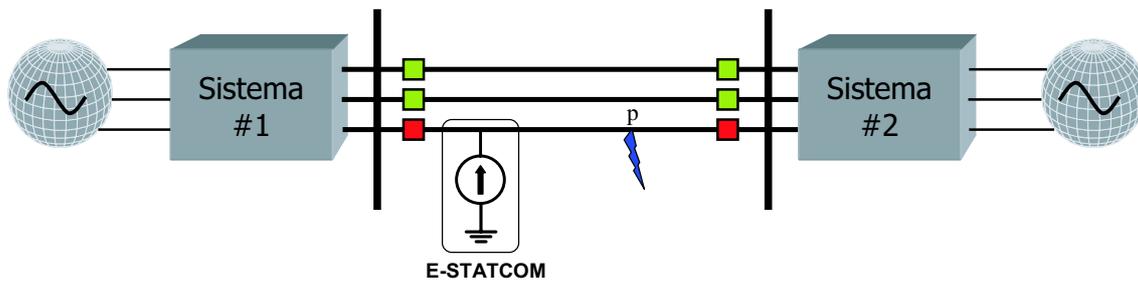


Figura 4.9: Injeção de corrente na fase defeituosa.

Contudo, deve-se lembrar que, com os disjuntores terminais abertos (em vermelho), o E-STATCOM não pode funcionar como um inversor trifásico simples como o STATCOM convencional, já que neste caso haveria fluxo de potência ativa e os capacitores CC seriam descarregados.

Assim, duas opções são possíveis: ou o E-STATCOM deve fazer uso de uma fonte CC ou, alternativamente, deve drenar das fases sãs a energia necessária para a injeção da corrente contrária ao arco.

Esta segunda opção é bastante atrativa e possui algumas vantagens, dentre as quais destaca-se a possibilidade de usar o mesmo circuito de potência do STATCOM convencional. A figura 4.10 mostra um simples rearranjo do circuito da figura 4.2, deixando claro que o E-STATCOM, no modo de extinção, deve funcionar como um conversor completo - retificador e inversor.

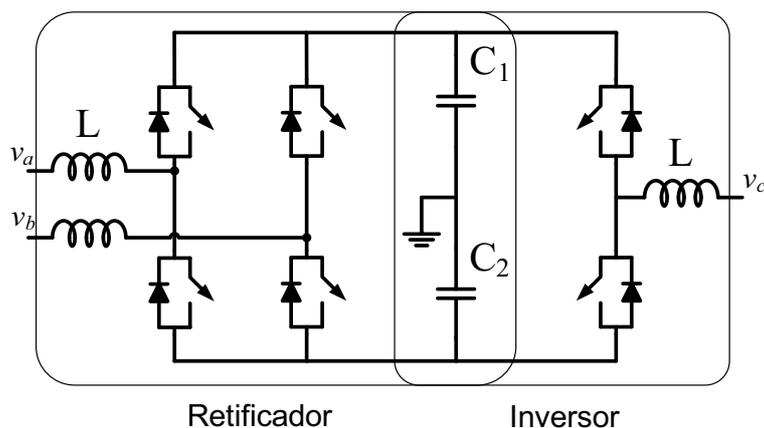


Figura 4.10: Configuração do E-STATCOM para extinção do arco secundário.

A topologia consiste em dois conversores monofásicos na configuração back-to-back, na qual o lado inversor (o ramo mais à direita na figura) é responsável por

injetar a corrente necessária para extinção do arco, enquanto que o lado retificador (os dois ramos do conversor à esquerda) fica encarregado de drenar energia das outras fases sãs. Destaca-se ainda que, neste trabalho, optou-se pela configuração em dois níveis, com o elo de corrente contínua composto por dois capacitores em série e o ponto central aterrado.

O controle do lado retificador, mostrado na figura 4.11, consiste em um circuito de sincronismo (PLL) monofásico [33] - com a finalidade de determinar a fase fundamental da tensão entre as fases sãs - e uma malha responsável por determinar a amplitude da corrente de referência, que varia de acordo com a tensão no elo CC do conversor. Na figura 4.12 é detalhado o circuito de sincronismo monofásico.

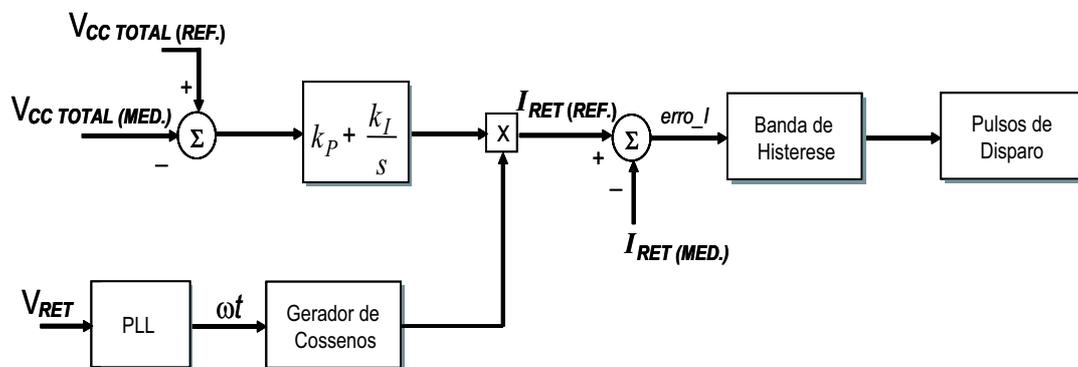


Figura 4.11: Controle do lado retificador do E-STATCOM operando no modo de extinção do arco secundário.

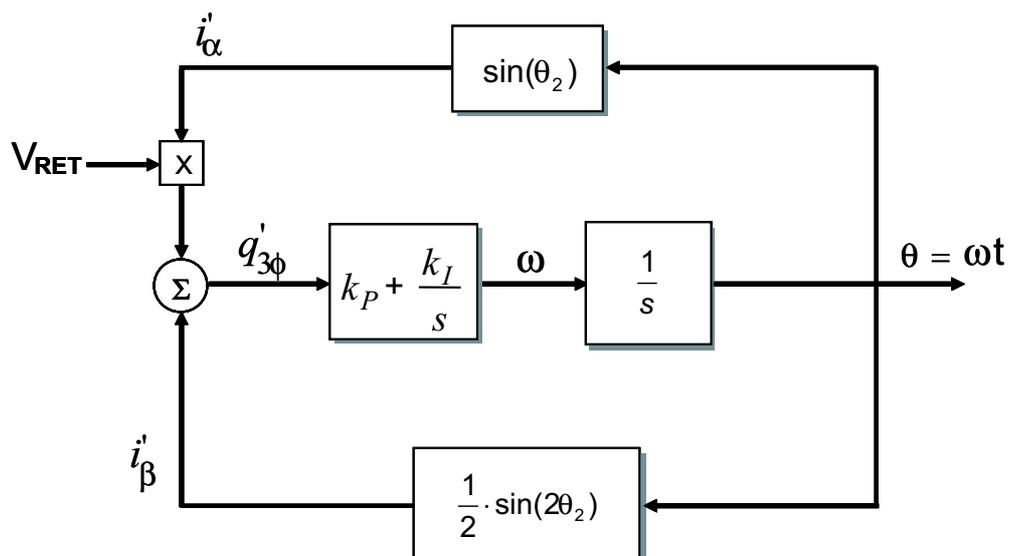


Figura 4.12: Diagrama de blocos do circuito de sincronismo (PLL) monofásico.

O lado inversor do conversor da figura 4.10 é equivalente a um conversor meia

ponte, isto é, composto por apenas um ramo do conversor trifásico original com o ponto médio dos capacitores aterrado, servindo de retorno. Essa é a explicação pelo fato de o elo CC ser formado por dois capacitores, e não apenas um, como acontece na maioria dos conversores.

Quanto ao chaveamento, foi utilizado no lado inversor o método por banda de histerese [36], mostrado na figura 4.13. O mesmo tem como referência de sintetização a medição instantânea da corrente de arco secundário, considerando a ocorrência do mesmo próximo à barra mais centralizada do sistema de transmissão, pois de acordo com [37], o estudo inicial do fenômeno possui uma relevância maior nesta região. Na prática, essa corrente de arco secundário seria medida instantaneamente por relés colocados próximos a esta barra mais centralizada.

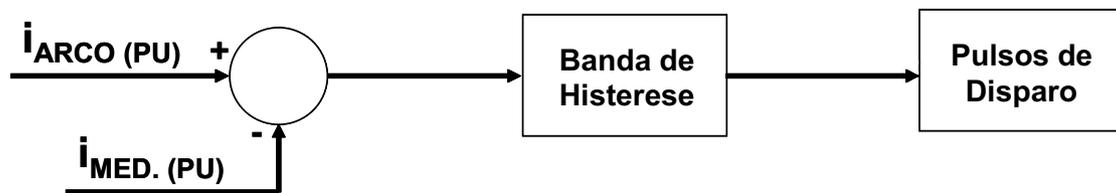


Figura 4.13: Controle do lado inversor do E-STATCOM operando no modo de extinção do arco secundário.

A transferência de energia das duas fases sãs para a fase em que ocorreu o defeito se dá através dos capacitores do elo CC (localizados mais no centro da figura). Como será visto no próximo capítulo, a energia armazenada nestes (os capacitores) permite a injeção de um impulso de corrente com amplitude suficiente para extinção do arco.

### 4.3 Conclusões Parciais

As novas estratégias de controle propostas neste capítulo agregam novas funcionalidades ao STATCOM, equipamento bastante utilizado em sistemas de potência de alta tensão. Dentre estas funções, destaca-se a possibilidade de extinção do arco secundário, útil na manobra monofásica de linhas de transmissão longas e/ou compactas.

O E-STATCOM (*Enhanced* STATCOM), como foi denominado o equipamento proposto, possui as mesmas funções do STATCOM convencional, funcionando

como conversor trifásico quando o sistema está em operação normal (sem falta monofásica). No momento da falta, entretanto, o controle do equipamento percebe a atuação dos disjuntores terminais e entra no modo de extinção, no qual o conversor se transforma em back-to-back.

Este conversor é responsável por extrair energia das fases sãs para injetá-la na fase defeituosa, sob a forma de um impulso correspondente à corrente de arco secundário, mas com sentido contrário, proporcionando sua extinção. Neste caso, os capacitores do elo CC se descarregam momentaneamente, no momento do impulso, para serem logo restabelecidos em sua tensão nominal para posterior utilização como STATCOM convencional novamente.

# Capítulo 5

## Resultados das simulações

Neste capítulo são apresentados o sistema em estudo neste trabalho, ou seja, o modelo elétrico no qual foi inserido o E-STATCOM, e os resultados gerados pelas simulações no software PSCAD/EMTDC. Alguns breves comentários concernentes aos gráficos também são realizados.

## 5.1 Sistema estudado na simulação

O caso escolhido para estudo é o da Interligação Norte/Sul, que atualmente conta com dois circuitos em 500 kV interligando uma série de subestações das regiões de FURNAS e ELETRONORTE.

Foram adotadas como barras de fronteira os setores de 500 kV das subestações de Imperatriz (IMP) e Serra da Mesa (SME), aos quais foram conectados equivalentes de curto-circuito. Foram representadas ainda as subestações de Colinas (COL), Miracema (MIR), e Gurupi (GUR), num comprimento total de mais de 1.000 km, conforme a lista a seguir:

- Imperatriz-Colinas: 342 km;
- Colinas-Miracema: 173 km;
- Miracema-Gurupi: 255 km;
- Gurupi-Serra da Mesa: 255 km.

Foram representados os elementos atualmente em operação nas subestações mencionadas, ou seja, os valores dos elementos que realizam as compensações série e *shunt*, bem como os TCSC's instalados em Imperatriz e Serra da Mesa. Vale ressaltar também que estes vêm agindo atualmente como capacitores fixos, conforme mostrado na figura a seguir. As indicações de 2x e 3x na figura 5.2 abaixo referem-se ao número de unidades em paralelo.

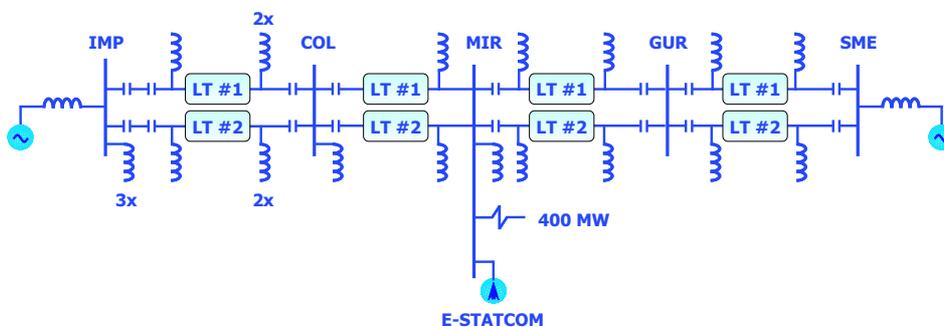


Figura 5.1: Esquema geral do caso estudado: Interligação Norte-Sul

Os elementos representados no esquema têm as seguintes características:

- Equivalente em Imperatriz: 0,116 H;
- Equivalente em Serra da Mesa: 0,131 H;
- Tensões nominais em Imperatriz e Serra da Mesa, com defasagens angulares entre si de 58°;
- Elementos *shunt* e série conforme a tabela abaixo.

Tabela 5.1: Elementos conectados às barras

Subestação	Reator <i>Shunt</i> (Mvar)	Capacitor Série (Mvar)	Carga (MW)
Imperatriz	3 x 136 (barra)	108 (TCSC)	0
	1 x 136 (saída LT's)	161 (saída LT's)	
Colinas	1 x 136 (entrada LT's)	161 (chegada LT's)	0
	2 x 136 (saída LT's)	161 (saída LT's)	
Miracema	1 x 136 (entrada LT's)	0	400 (f.p. = 1)
	1 x 136 (saída LT's)	161 (saída LT's)	
Gurupi	1 x 136 (entrada LT's)	161 (chegada LT's)	0
	1 x 136 (saída LT's)	161 (saída LT's)	
Serra da Mesa	1 x 136 (barra)	108 (TCSC)	0

## 5.2 Resultados

O sistema simulado indica uma tensão de 0,97 pu (queda de 3% da tensão de base) na subestação de Miracema. Neste cenário, o E-STATCOM injeta cerca de 170 Mvar de potência reativa capacitiva para regular a tensão para 1,0 pu, conforme mostra a figura 5.2.

Vale destacar que o sistema simulado é um sistema bastante forte, o que justifica os valores apresentados no parágrafo anterior. Em outras palavras, pode-se dizer que o E-STATCOM teria maior facilidade para compensar uma queda de tensão como a mostrada se o sistema fosse mais fraco.

De fato, sua atuação teria ainda maior destaque e relevância no conjunto em casos de sistemas mais fracos. Por outro lado, o E-STATCOM é atrativo também

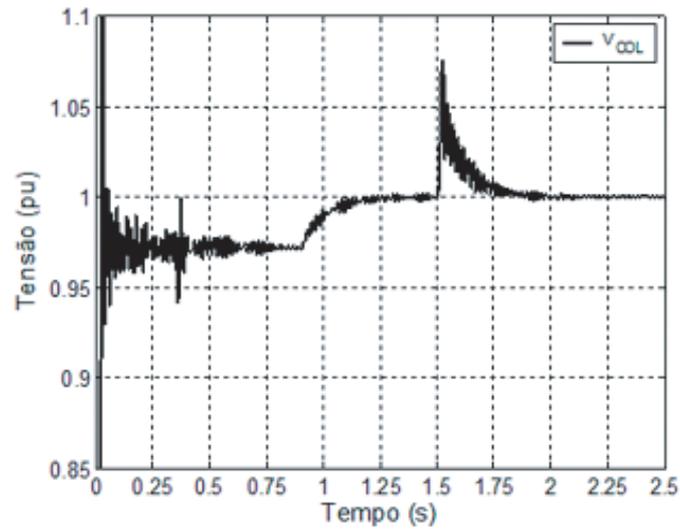


Figura 5.2: Tensão em Miracema com a atuação do E-STATCOM.

devido à possibilidade de injetar correntes indutivas, reduzindo tensões em cenários de carga leve.

A mesma figura 5.2 demonstra esse tipo de atuação do E-STATCOM, após a retirada dos reatores das barras de Imperatriz, Colinas e Miracema. Neste cenário, ocorrido a partir do instante 1,5 s, a tensão em Miracema atinge 1,07 pu, quando o E-STATCOM entra em ação injetando os mesmos 170 Mvar, dessa vez em correntes indutivas. Como se pode observar, a tensão é regulada com sucesso para 1,0 pu. A figura 5.3 ilustra a potência reativa fornecida pelo E-STATCOM.

Ainda que na prática os reatores de barra não possam ser efetivamente removidos, este cenário foi simulado com o objetivo de demonstrar a eficácia do equipamento em sistemas que necessitem de compensação reativa para o efeito Ferranti.

O E-STATCOM simulado trabalha com uma tensão no elo de corrente contínua de 50 kV em cada capacitor (100 kV no total do elo), e o compensador é ligado de forma a regular esse valor de tensão no instante 0,35 s. O transformador que o conecta na barra de Miracema reduz a tensão de 500 kV para 34,5 kV, um nível de tensão de distribuição convencional. A Figura 5.4 ilustra a tensão nos capacitores CC para os mesmos cenários apresentados na figura 5.2.

Quando da ocorrência do defeito monofásico e conseqüente aparecimento de um

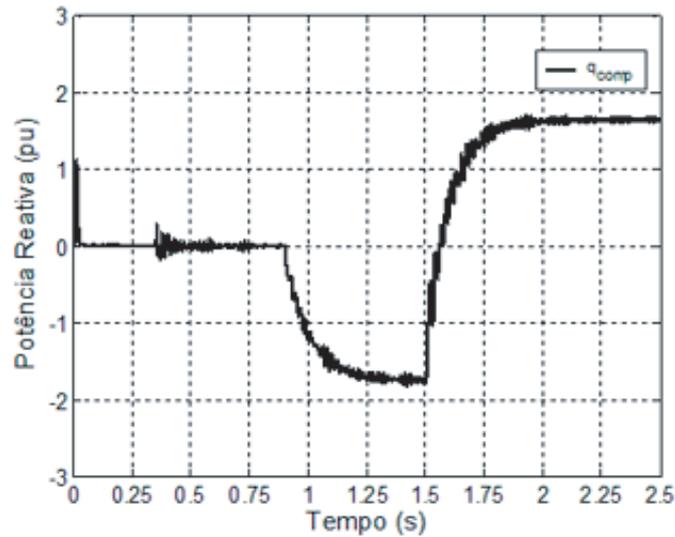


Figura 5.3: Potência reativa fornecida pelo E-STATCOM.

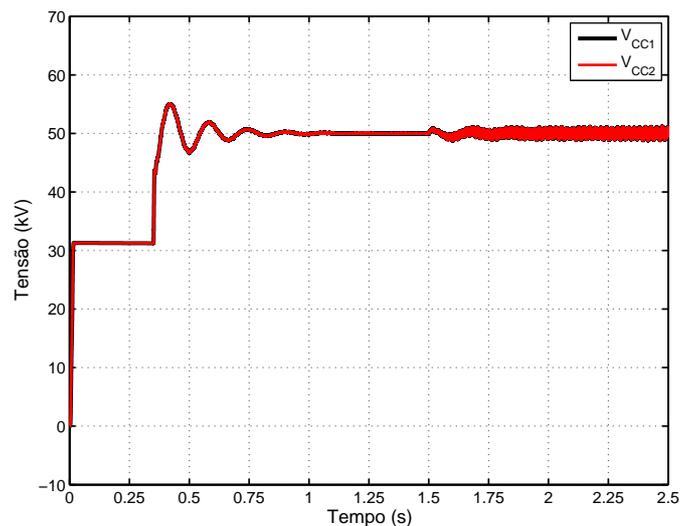


Figura 5.4: Tensão nos capacitores CC do E-STATCOM operando no modo normal.

arco secundário sustentado, o E-STATCOM altera automaticamente suas funções de controle para a drenagem de energia das fases sãs e concomitante injeção na fase sob defeito.

Neste caso, a mudança de controle é sensibilizada pela abertura dos disjuntores terminais da linha, em Imperatriz e Serra da Mesa. Assim, o controle acaba por propiciar uma súbita descarga nos capacitores do elo CC do equipamento, suficiente para a extinção do arco e posterior religamento.

A figura 5.5 apresenta as condutâncias dos sub-arcos que surgiram após a abertura de uma falta ocorrida em 0,9 s de simulação, sem a atuação do E-STATCOM, deixando clara a não extinção automática do fenômeno.

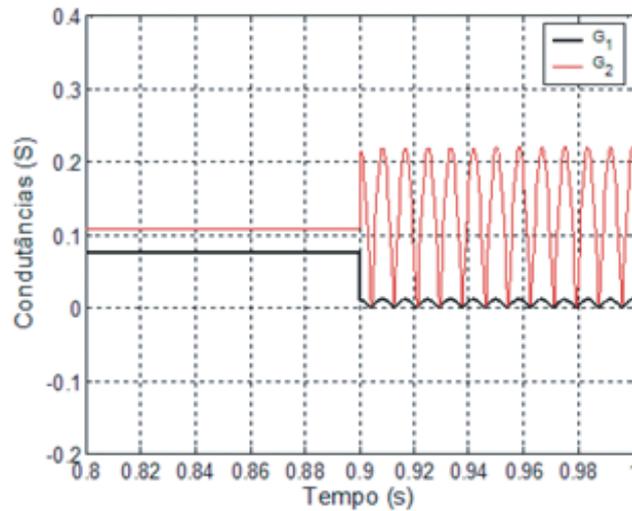


Figura 5.5: Condutâncias dos sub-arcos sem a atuação do E-STATCOM.

Com as condutâncias dos sub-arcos variando a todo momento e não se auto-extinguindo, a corrente de arco secundário também assume um valor não-nulo e variante no tempo. Isso torna inicialmente inviável a manobra de religamento monopolar, pois é deveras arriscado o religamento de um disjuntor, após uma falta, conduzindo uma corrente de arco com as magnitudes de suas componentes mostradas na figura 5.6.

Portanto, como já foi mencionado neste trabalho, para possibilitar a manobra de religamento monopolar, faz-se necessária a injeção de uma corrente contrária à do arco secundário por parte do E-STATCOM, de modo a anular o fenômeno e o levar a sua auto-extinção.

No caso deste trabalho, o modelo do arco secundário - na simulação dentro do sistema de transmissão, foram ajustados os valores de 1 kA e 100  $\Omega$  na amplitude da fonte de corrente e na resistência (respectivamente) que formam o equivalente de Norton do modelo - foi anexado eletricamente à barra de Miracema, mais centralizada da Interligação Norte-Sul, pois como já foi citado no capítulo anterior com a referência [37], o estudo inicial do fenômeno tem uma maior relevância considerando

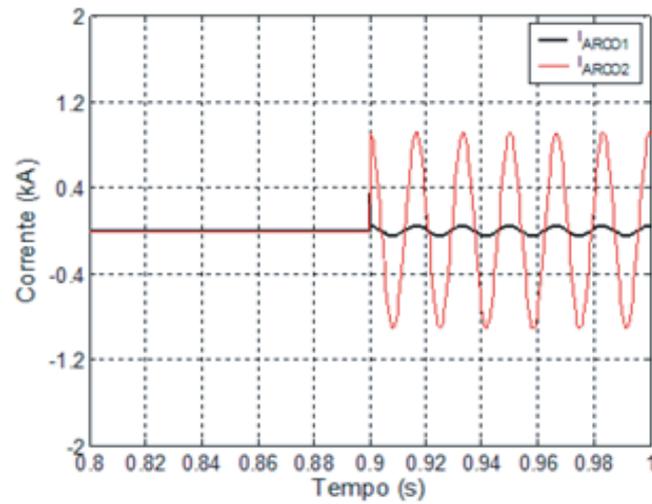


Figura 5.6: Correntes nas condutâncias  $g_1$  e  $g_2$  sem a atuação do E-STATCOM.

a ocorrência do mesmo na região central do sistema de transmissão.

Simulando o E-STATCOM com a função de extinção do arco e o mesmo começando a ocorrer no instante 0,9 s, as novas funções de controle permitem a extinção em cerca de 30 ms, conforme demonstrado na figura 5.7.

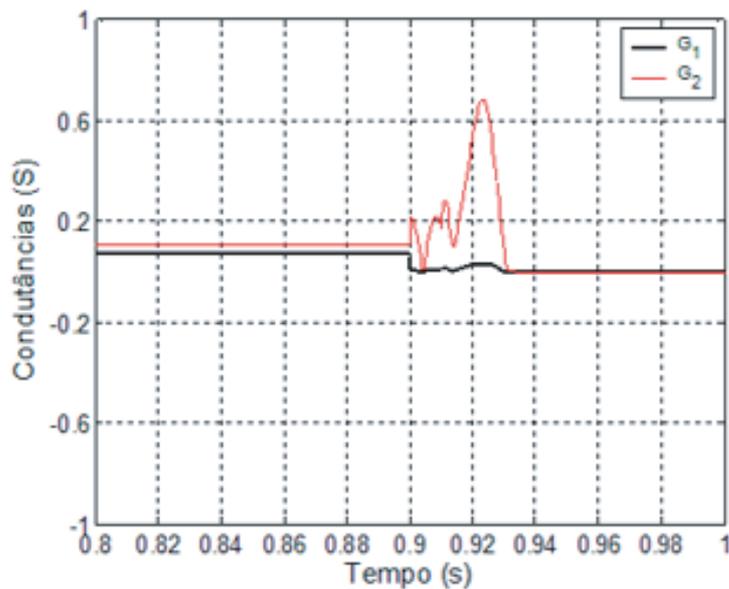


Figura 5.7: Condutâncias  $g_1$  e  $g_2$  com a atuação do E-STATCOM.

Corroborando a extinção do fenômeno ilustrada na figura anterior, com a queda a zero das condutâncias correspondentes aos sub-arcos, são mostradas na figura 5.8

as correntes correspondentes aos mesmos sub-arcos referidos acima.

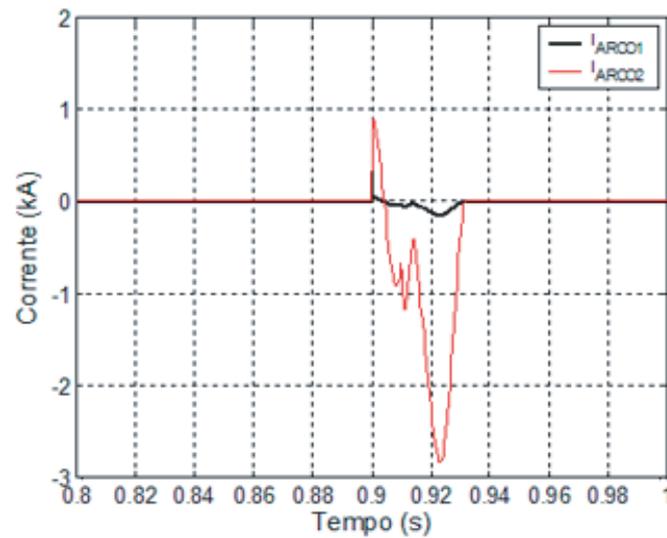


Figura 5.8: Correntes nas condutâncias  $g_1$  e  $g_2$  com a atuação do E-STATCOM.

Como mencionado, para haver a extinção, ocorre uma descarga súbita nos capacitores do link CC do equipamento, evidenciada na figura 5.9 perto do instante 1,0 s.

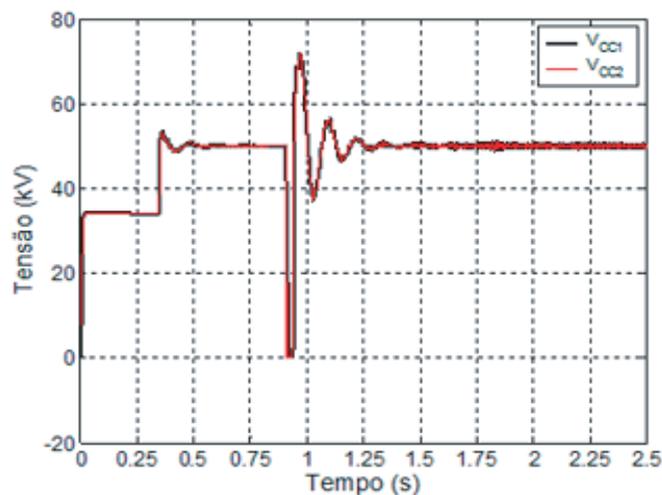


Figura 5.9: Tensão nos capacitores CC do E-STATCOM (modo Enhanced).

O gráfico a seguir transmite a idéia de que a descarga do capacitor do elo CC é súbita, com a tensão caindo a zero quase que instantaneamente. Conseqüentemente, isso significa que a corrente sintetizada para a extinção do arco teria amplitude infinita, o que não é possível na realidade.

A figura a seguir mostra um gráfico igual ao da figura 5.9, só que em intervalos de tempo menores, onde pode-se ver que a queda da tensão no capacitor não é instantânea, embora muito rápida, sucedendo-se em aproximadamente  $2,5\text{ ms}$ .

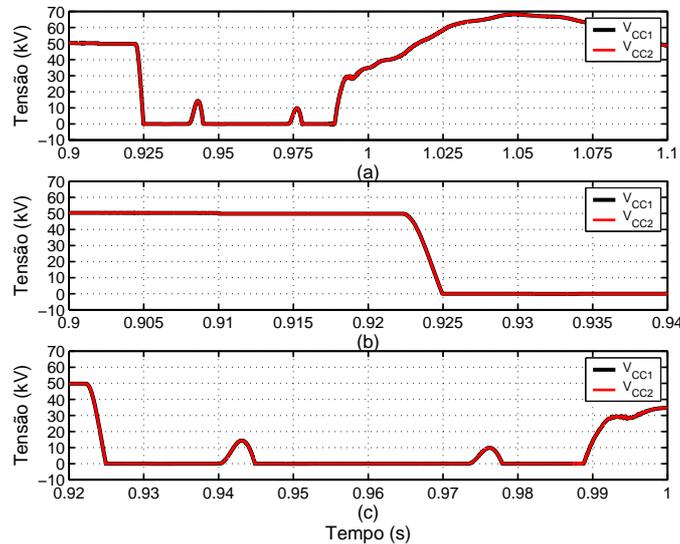


Figura 5.10: Tensão nos capacitores CC do E-STATCOM analisada em instantes de tempo menores.

Nesta figura também pode-se ver que a tensão no elo CC do conversor se mantém nula por  $65\text{ ms}$  (aproximadamente 4 ciclos de  $60\text{ Hz}$ ). Mesmo após a extinção do arco em  $0,93\text{ s}$ , a grandeza continua sem crescer por  $60\text{ ms}$ , e somente em  $0,99\text{ s}$  a tensão apresenta algum aumento. Porém, o conversor não apresenta controlabilidade alguma neste processo, com comportamento idêntico ao de um retificador trifásico a diodo. A controlabilidade só é recuperada quando a tensão no elo atinge o valor de  $30\text{ kV}$ .

Para efeito de análise, é ilustrado na figura 5.11 um gráfico com as correntes do conversor durante o processo de extinção do arco secundário. A ocorrência do fenômeno foi simulada na fase C. Como se pode ver, não há controle algum sobre as correntes das fases sãs A e B, que deveriam ser senoidais, em contra fase entre si e com  $I_A$  em fase com a tensão  $V_{AB}$  em todo o tempo de extinção. Portanto, a parte retificadora não funciona da maneira desejada durante o modo de religamento monopolar, e isso devido à ausência de tensão no elo CC.

Outro fato notável é a amplitude das correntes do conversor durante a extinção do arco, que é um pouco maior que o dobro do valor de pico destas mesmas grandezas

durante o modo de operação normal do E-STATCOM, quando compensando a potência reativa mostrada na figura 5.3. Isto ilustra que o dimensionamento do conversor, especificamente neste caso base, precisaria ser realizado considerando a hipótese das correntes de saída atingirem um valor um pouco acima do dobro do valor com o conversor operando em modo normal. Isto notoriamente é uma desvantagem advinda dessa nova funcionalidade do equipamento, e se dá pela alta quantidade de energia envolvida na extinção do arco secundário e consequente descarregamento do elo CC.

As correntes do conversor em modo de operação normal também são mostradas, na figura 5.12, para um estudo de comparação.

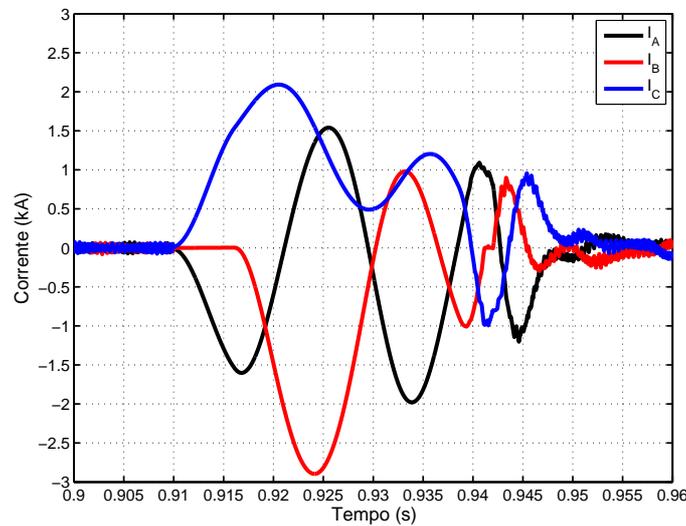


Figura 5.11: Correntes de saída do conversor durante a extinção do arco secundário.

Os resultados apresentados mostram que, em ambos os modos de operação - operação normal regulando a tensão na barra e extinguindo o arco secundário -, o E-STATCOM conseguiu atingir o seu objetivo, possibilitando dessa forma uma maior margem de estabilidade e capacidade do sistema se manter em operação, mesmo com o surgimento de fenômenos transitórios como o arco secundário.

## 5.3 Conclusões Parciais

Neste capítulo foram apresentados o caso escolhido sob estudo e os resultados obtidos nas simulações. Estes foram mostrados em duas situações diferentes: com

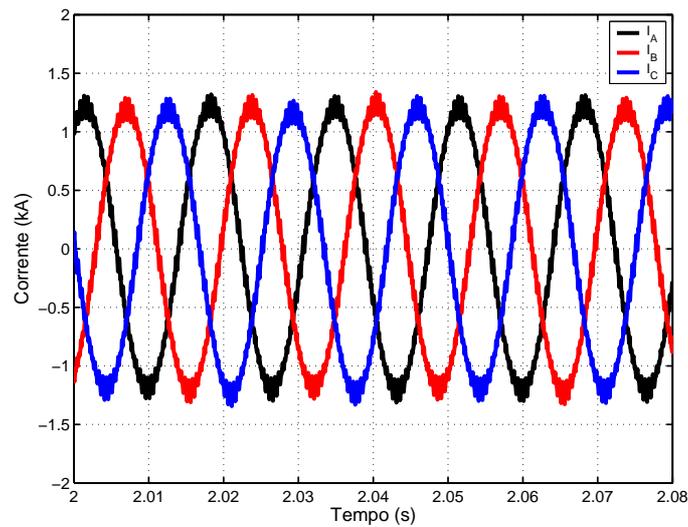


Figura 5.12: Correntes de saída do conversor com o E-STATCOM operando em modo normal e compensando uma potência reativa de 170 Mvar.

o E-STATCOM operando com sua funcionalidade antiga (regulação de tensão) e visando a extinção do arco secundário.

Em ambos os casos, foi mostrada a eficiência do E-STATCOM, que conseguiu atingir seus objetivos agindo sempre com uma dinâmica rápida. A única desvantagem notada nesta nova funcionalidade do equipamento é o fato de, no modo de extinção, o dispositivo apresentar correntes de saída muito altas, maiores que o dobro dos valores apresentados com o dispositivo operando no modo normal.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesse capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas desse estudo. São sugeridas também algumas propostas para a continuidade deste trabalho.

## 6.1 Conclusões e Apontamentos Finais

A proposta original deste trabalho foi a concepção de um compensador estático para a redução de problemas típicos das linhas de transmissão longas (acima de 240 km), tais como controle de tensão, potência, limites de estabilidade, efeito Ferranti e, além destes, a extinção do arco secundário para obtenção do religamento monopolar.

Com a exceção do último item listado, o STATCOM convencional é capaz de agir minimizando todos os problemas; isso se justifica pois, a princípio, o dispositivo não foi proposto com a finalidade de extinguir o arco secundário.

Desta forma, o estudo foi focado no desenvolvimento de um STATCOM que pudesse, além de desempenhar suas funções típicas, extinguir o arco secundário e permitir o religamento monopolar. A opção natural foi desenvolver um novo circuito de controle, com funções adicionais, e modificar ligeiramente o circuito de potência (com o uso de capacitores em split no elo CC).

Sob este conceito, foi concebido o E-STATCOM, cuja letra adicional quer dizer *Enhanced*. Trata-se de um equipamento FACTS com circuito de potência idêntico ao do STATCOM convencional, mas com um controle mais elaborado, preparado para propiciar a extinção do arco secundário.

Os itens listados a seguir incluem as principais conclusões obtidas com a finalização desse estudo:

- i. O E-STATCOM regula perfeitamente a tensão da barra no valor especificado, quando operando em modo normal. A dinâmica do dispositivo nessa função também foi bastante satisfatória.
- ii. Apesar de ser conectado a um sistema forte, foi possível mostrar a eficiência do E-STATCOM drenando correntes capacitivas (para a elevação da tensão) e indutivas (para a redução da tensão). Contudo, o equipamento também pode ser aproveitado em sistemas fracos, sujeitos a variações de tensão mais bruscas na ocorrência de distúrbios.
- iii. A tensão nos capacitores do elo CC, nesse modo, também foi regulada rapidamente, ainda que com um pequeno sobresinal. Mesmo após o dispositivo

começar a regular a tensão na barra, foi vista uma oscilação de aproximadamente 2 por cento (1 kV) na grandeza.

- iv. O equipamento teve pleno sucesso na tarefa de extinção do arco secundário, realizando-a em aproximadamente 30 *ms*. Isso pode ser visto nos gráficos relativos às condutâncias que modelam o fenômeno e às correntes nas mesmas.
- v. A tensão no elo CC cai rapidamente a zero durante o processo de extinção do arco, em alguns milisegundos. Nesse intervalo, o conversor perde a controlabilidade da tensão nos capacitores.
- vi. O lado retificador do E-STATCOM não funciona da maneira desejada durante o modo de extinção, com as correntes das fases sãs totalmente sem controle, e não conseguindo injetar potência ativa no elo CC. A parte retificadora do conversor só volta a funcionar quando a tensão em cada capacitor atinge o valor de 30 kV.
- vii. As correntes nas fases do conversor durante a extinção do arco atingem valores muito superiores em relação à operação em modo normal. Esta é uma desvantagem desta funcionalidade, que se dá pela alta energia envolvida no processo.

## 6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho surgiram temas que não foram suficientemente estudados. Nos itens seguintes, algumas dessas idéias são comentadas sucintamente com a intenção de propor novos caminhos de pesquisa no futuro:

- i. Estudar de maneira mais aprofundada e aperfeiçoar a simulação de um E-STATCOM três níveis.
- ii. Realizar um estudo de extinção do arco secundário levando em conta a ocorrência do fenômeno em vários trechos diferentes da Interligação Norte-Sul. As topologias de dois ou três níveis do E-STATCOM seriam consideradas.

- 
- iii. Melhorar o processo de extinção do arco secundário, de forma a torná-lo menos arriscado para o conversor - com a rápida e brusca queda da tensão no elo CC e grande crescimento das correntes nas fases do conversor durante o modo de extinção - e mais fácil de ser controlado.
  - iv. Estudar as implicações que o arco secundário pode ter na proteção de uma linha de transmissão.
  - v. Implementar um protótipo de um E-STATCOM com as mesmas funcionalidades apresentadas neste trabalho.

# Referências Bibliográficas

- [1] Grainger, J.J, Stevenson Jr., W. D., *Power System Analysis*, Ed. McGraw-Hill Ltda, 1994.
- [2] Pimentel, D. G. M., *Modelagem Matemática de um STATCOM para os regimes permanente e dinâmico*, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2006.
- [3] Gyugyi, L., *Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real Time Control AC Transmission Lines Emerging Practices in Technology*, IEEE-Transmission Lines, IEEE Standards Press, USA 1993.
- [4] Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., *Principle of Operation of FACTS Devices*, Revista Eletro Evolução: Sistema de Potência, No. 6, pp.73-82, 1996.
- [5] Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., Almeida, K. C., Taranto, G. N., *Tutorial em Tecnologia FACTS*, XI CBA, 1996.
- [6] Ekstrom, A., Lamel, P., Jiang, Y., Oliveira, M., Long, W., *Studies of the Performance of an Advanced Static Var Compensator, STATCON, as compared with a Conventional SVC*, EPRI Project RP 3023-4, 1994.
- [7] Sumi, Y., Harumoto, Y., Hasegawa, T., Yano, M., Ikeda, K., Matsuura, T., *New Static var Control Using Force-Commutated Inverters*, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No. 9, pp. 4216-4224, Setembro 1981.
- [8] Mori, S., Matsuno, K., Takeda, M., Seto, M., *Development of a large var generator using self-commutated inverters for improving power system stability*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, No. 1, pp. 371- 377, Fevereiro 1993.

- [9] Seki, N., Uchino, H., *Converter Configurations and Switching Frequency for GTO Reactive Power Compensator*, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, Julho/Agosto 1997.
- [10] Liang, Y., Nwankpa, C. O., *A New Type of STATCOM Based on cascading Voltage-Source Inverters with Phase-Shifted Unipolar SPWM*, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, Setembro/Outubro 1999.
- [11] Barbosa, P. G., Misaka, I., Watanabe, E. H., *Advanced Var Compensators using PWM Voltage Source Inverters*, COBEP 93, pp. 173-178, Uberlândia, Brasil, Dezembro 1993.
- [12] Barbosa, P. G., Lima, A. C. S., Watanabe, E. H., *Modeling of Thyristor and GTO based Shunt Compensators for FACTS Applications*, COBEP 97, pp. 455-460, Belo Horizonte, Brasil, Dezembro 1997.
- [13] Aredes, M., Santos, G. Jr., *A Robust Control for Multipulse STATCOMs*, Proceedings of IPEC 2000, Vol. 4, pp. 2163-2168, Tokyo 2000.
- [14] Chun, L., Qirong, J., Jianxin, X., *Investigation of Voltage Regulation Stability of Static Synchronous Compensator in Power Systems*, IEEE PES Winter Meeting, Singapore 2000.
- [15] Ooi, B. T., Dai, S. Z., Galiana, F. D., *A Solid-State PWM Phase-Shifter*, WM 260-0 PWDR, 1992.
- [16] Borré, A. C., Xavier, A. S., Ribeiro, F. G. C., Aredes, M., *Análise Comparativa entre o Controle Direto e Indireto de Injeção de Corrente em um D-STATCOM*, Eletrônica de Potência (Florianópolis), v. 11, p. 103-110, 2006.
- [17] Portela, C. M., Santiago, N. H. C., Oliveira, O. B., Dupont, C. J., *Arc Modeling in Circuit Breakers and its Application in the Determination of Extinction Conditions*, 4th ERLAC (CIGRE WG 13), Puerto Iguazu, Argentina, 1991.
- [18] Câmara, A. B. S., *Extinção de Arco Secundário em Religamento Monofásico. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise.*, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2003.

- [19] Santiago, N. H. C., *Modelo para Propagação de Surtos em Linhas de Transmissão Incluindo os Efeitos Corona, Pelicular e de Retorno pelo Solo*, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 1992.
- [20] Santos, Jr. G., *Análise de uma Linha de Transmissão de Meio Comprimento de Onda Controlada por um Dispositivo FACTS*, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ 122 pp., Rio de Janeiro, 2003.
- [21] Carson, J. R., *Wave Propagation in Overhead Wires with Ground*, Bell System Technical Journal.
- [22] Deri, A., Semlyen, A., Tevan, G., Castanheira, A., *The Complex Ground Return Plane - Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-100, n. 8, pp. 3686-3693, Aug 1981.
- [23] Arismunandar, A., *A. Capacitive Correction Factors for Transmission Lines to Include Finite Conductivity and Dielectric Constant of the Earth*, IEEE Power Apparatus and Systems, Special Supplement, pp. 436-456, 1963.
- [24] Fernandes, A. B., Lima, A. C. S., Silva, R. M., *Religamento Automático de Linhas de Transmissão: Distinções nos Resultados em Função do Modelo Computacional Utilizado*, XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, vol. 12, n.º. 4, pp. 1698-1703, October 1997.
- [25] Meier, A. V., *Electric Power Systems, A Conceptual Introduction*, IEEE Press, John Wiley and Sons, 2006.
- [26] Fuchs, R. D., *Transmissão de Energia Elétrica - 2ª edição*, IEEE Transactions on Power Delivery, Ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro 1979.
- [27] Cassie, A. M., *Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory*, Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension, França 1932.
- [28] Mayr, O., *Beitrag Zur Theorie Der Statischen Und Der Dynamischen Lichtbogens*, Archiv Fuer Elektrotechnik, Vol. 37, p. 588-608, 1943.
- [29] Portela, C. M., Dupont, C., Meireles, M. P., *Deterministic and Statistic Arc Modelling*, CIGRÉ 13-107, Sessão 1994.

- [30] Cavaliere, C. A. C., *Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados*, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, p. 12, Rio de Janeiro - RJ, 2001.
- [31] Aredes, M., *Active Power Line Conditioners*, PHD Thesis - Technische Universität Berlin, Berlin, 1996.
- [32] Watanabe, E. H., Stephan, R. M., Aredes, M., *New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, n. 2, pp. 697-703, Abril 1993.
- [33] Aquino, A.F.C., Santos, Jr. G., Miranda, U., Aredes, M., *Synchronizing Circuits Applied to Non-Linear Loads Models*, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, p.700-705, 2004.
- [34] Watanabe, E. H., Aredes, M., *Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações, Filtros Ativos e FACTS*, Conferência de Controle e Automação, Uberlândia, Setembro 1998.
- [35] Miranda, U., Aredes, M., Rolim, L. G. B., *A DQ Synchronous Reference Frame Control for Single Phase Converters*, PESC - IEEE Power Electronics Specialists Conference, Recife - PE, June 2005.
- [36] Barreto et. al, L. H. S. C., *The bang-bang Hysteresis Current Waveshaping Control Technique Used to Implement a High Power Factor Power Supply*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, nº 1, January 2004.
- [37] Santos, Jr. G., *Análise da Extinção do Arco Secundário em Linhas de Transmissão utilizando Equipamentos FACTS*, Exame de Qualificação - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 2006.