ANTONIO CARLOS LEAL DE CASTRO JR.

Estudo de Controle Preventivo para análise do Colapso de Tensão

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Newton Geraldo Bretas

São Carlos
2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C355e Castro Júnior, Antonio Carlos Leal de
Estudo de controle preventivo para análise do colapso
de tensão / Antonio Carlos Leal de Castro Júnior ;
orientador Newton Geraldo Bretas. -- São Carlos, 2009.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Estabilidade de
tensão. 3. Colapso de tensão. 4. Fluxo de carga
continuado. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro ANTONIO CARLOS LEAL DE CASTRO JUNIOR.

Dissertação defendida e julgada em 04/09/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **NEWTON GERALDO BRETAS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA**
(Universidade Estadual Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Associado **LUIS FERNANDO COSTA ALBERTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Escola de Engenharia de São Carlos/USP
Tratado em 04/09/2009
Assinado por

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio Carlos e Ana Lúcia, às minhas irmãs Livia e Juliana, à minha noiva Isabella e a todos que direta ou indiretamente me ajudaram na conclusão deste trabalho.

Agradecimentos

À Deus, principal responsável por tudo que tenho, pela saúde e alegria que Ele me dá.

Ao professor Dr. Newton Geraldo Bretas pela orientação, ensinamentos e conselhos profissionais e pessoais e por ter me aceito no grupo do LACO.

Ao professor Dr. Luiz Fernando C. Alberto, pelo ensinamento, co-orientação, paciência e amizade, sempre apto à ajudar, tirando todas as dúvidas.

Aos professores e colegas do LACO (Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência), pelo companheirismo.

Aos amigos Raphael Augusto e Carlisson Santos, que estiveram sempre me ajudando na pesquisa e nas inúmeras dificuldades e pela amizade.

Aos amigos Saulo Piereti, Carolina Rodrigues, Aline Bianco, Elmer Cari, Rafael Borges, Marcelo Nanni, Marcelo Castoldi, Samuel Lourenço, Moussa Mansour, Fabíolo Amaral, Wallisson Figueiredo, Roberto Inoue, Etienne Biasotto, Weliandrei Campelo, Ivaldo França Jr, Oswaldo Torrezan Jr, Everthon Fonsesa, Diego Bisinoto, Daniel Vilela, Luis Fernando Silva, Pedro Miranda e a todos de São Carlos que me proporcionaram uma ótima vida e alegria.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

**"Nem olhos viram, nem
ouvidos ouviram, nem
jamais penetrou em coração
humano, o que Deus tem
preparado àqueles que o
amam."**

1 Coríntios 2:9

Resumo

CASTRO JR., A. C. L. **Estudo de Controle Preventivo para a análise do Colapso de Tensão**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Até meados da década de setenta a atenção dos técnicos do setor elétrico estava voltada aos problemas advindos da chamada instabilidade de ângulo, onde perturbações mais severas, tais como curtos-circuitos, levam os sistemas a perderem estabilidade. À medida que os sistemas foram ficando mais sobrecarregados, algumas não linearidades tornaram-se mais evidentes e problemas que até então não eram observados passaram a ocorrer. Um desses problemas que passou a despertar maior atenção dos engenheiros de potência foi justamente o problema de colapso de tensão.

Tal fenômeno está relacionado à incapacidade do sistema elétrico de prover o balanço entre a potência gerada e a requisitada pelas cargas, devido, principalmente, à limitada capacidade de transmissão, ou ainda, devido a um suporte de potência reativa local inadequada. Neste trabalho pretende-se avaliar o grau de impacto que uma contingência ou uma ação de controle teria sobre um sistema de potência. Para avaliar este grau de impacto pretende-se utilizar os conceitos de coerência de cargas, a partir da matriz de impedância nodal, determinando-se quais barras seriam mais influenciadas por uma certa perturbação no sistema. Quando este número de barras é elevado, indica que a contingência deveria ser classificada como mais grave do que uma contingência com margem baixa, porém de impacto local e de fácil solução.

Durante o funcionamento do sistema podem ocorrer eventos que afetam as características de tensão e frequência, causando inclusive a interrupção do fornecimento de energia. Portanto, o engenheiro de operação deve dispor de ferramentas que controlem e que permitam prever esta situação de risco e tomar medidas para evitá-las. Assim, é de extrema importância, a análise de estabilidade do sistema, a fim de em um futuro próximo, prevenir distúrbios no seu funcionamento normal.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência, Estabilidade de Tensão, Colapso de Tensão, Fluxo de Carga Continuado.

Abstract

CASTRO JR., A. C. L. Study of Preventive Control for **Estudo de Controle Preventivo para a análise de Tensão**. 2008. Dissertation (Mestrado) – (Máster study) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Until the middle of the seventies the attention of the technicians of the electricity sector was focused on the problems arising from instability of the call-angle, where the most severe, such as short circuits, take the systems to lose stability. As the systems were getting overloaded, some nonlinearities have become more evident and problems that were not seen until then began to occur. One such problem that has awoken the attention of power engineers was precisely the problem of voltage collapse.

This phenomenon is related to the inability of the electric system to provide the balance between power generated and required by the loads, mainly due to the limited transmission capacity, or because a local reactive power support inadequate. This work aims to assess the degree of impact that a contingency or an action of control would have on a system of power. To assess the degree of impact is intended to use the concepts of consistency of loads from the nodal impedance matrix, it was determined that bars would be more influenced by a disturbance in the system. When this number of bars is high, indicates that the contingency should be classified as more serious than a contingency margin with low, but the local impact and easy solution.

During operation of system events may occur that affect the characteristics of voltage and frequency, causing even the interruption of power supply. Therefore, the operating engineer should have the tools to monitor and to predict that this situation of risk and take steps to avoid them. It is therefore of extreme importance, the analysis of system stability, so that in the near future, to prevent disturbances in their normal operation.

Keywords: Electrical Power Systems, Voltage Stability, Voltage Collapse, Load Flow Continued, Preventive Control.

Lista de Figuras

Figura 2.1:	Figura 1: Curva PV da margem de carregamento do sistema.	6
Figura 3.1	Gráfico do funcionamento do fluxo de carga continuado.	16
Figura 7.1	Sistema Sul Brasileiro 45 barras.	42
Figura 7.2	Curva λ -V do sistema.	49
Figura 7.3	Curva λ -V com a saída da linha 378-379.	49
Figura 7.4	Curva λ -V com a saída da linha 371-372.	50
Figura 7.5	Curva λ -V com a saída da linha 432-433.	50
Figura 7.6	Curva λ -V com a saída da linha 377-378.	51
Figura 7.7	Sistema IEEE 5 barras.	54
Figura 7.8	Funcionamento do método <i>Look-Ahead</i> .	57
Figura 7.9	$\Delta\lambda$ em relação a u para as barras PQ de maior sensibilidade.	59
Figura 8.1	Esquema de mudança da margem com a inserção do controle.	62

Lista de Tabelas

Tabela 7.1:	Dados de barra do fluxo de carga convergido do Sistema Sul Brasileiro.	46
Tabela 7.2	Dados de linha do sistema Sul Brasileiro.	47
Tabela 7.3	Dados dos Geradores.	48
Tabela 7.4	Análise de estabilidade para algumas contingências.	51
Tabela 7.5	Dados de Barra do Sistema IEEE 5 barras:	54
Tabela 7.6	Dados de Linha do Sistema IEEE 5 barras:	54
Tabela 7.7	Dados dos Geradores	55
Tabela 7.8	Comparação do máximo carregamento dos métodos para o IEEE 5 barras.	55
Tabela 7.9	Tabela comparativa entre o método proposto e o método da continuação (39 barras).	56
Tabela 7.10	Valores de $\Delta\lambda$ em relação a u.	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

SEP	-	Sistemas Elétricos de Potência.
CPFLOW	-	Continued Power Flow
FACTS	-	Flexible Alternating Current Transmission System.
FC	-	Fluxo de Carga.
PMC	-	Ponto de Máximo Carregamento.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Colapso de Tensão	1
1.2	Problema de Seleção de Contingências	3
1.3	Organização da Dissertação	4
2	Revisão Bibliográfica das Técnicas para Cálculo e Estimativa da Margem de Estabilidade	5
2.1	Curvas PV	6
2.1.1	Fluxo de Carga Convencional	7
3	Fluxo de Carga Continuado	13
3.1.	Formulação do Fluxo de Carga Continuado	14
3.1.1	Incremento de Carga	16
3.1.2	Incremento de Geração	20
4	Método <i>Look Ahead</i>	23
5	Revisão de Literatura	29
5.1	Considerações Gerais	29
5.2	Trabalhos na área de segurança de sistema de potência	30
6	Proposta de Seleção de Controle baseado em análise de Sensibilidade do método <i>Look Ahead</i>	37
6.1	Parametrização da variável do controle (banco de capacitores)	39
7	Testes e Análises de Resultados	41
7.1	Introdução	41
7.2	Algoritmo	43
7.3	Testes e Resultados	45
7.3.1	Sistema em Análise	45
7.3.2	Análise dos Resultados	52
7.3.3	Comparação entre o <i>Look Ahead</i> e o Método da Continuação	53
7.3.4	Teste com a inserção do banco de capacitores de 2pu.	57
8	Conclusões e Perspectivas Futuras	61
8.1	Perspectivas Futuras	62
	Referências Bibliográficas	63

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, nos sistemas elétricos de potência, um objetivo importante é o fornecimento de energia elétrica com qualidade, ou seja, atender à demanda de forma contínua, mantendo a tensão e frequência do sistema dentro das margens de variação permitidas. Contudo, durante o funcionamento do sistema, podem ocorrer eventos que afetam os níveis de tensão e frequência, causando inclusive a interrupção do fornecimento de energia. Assim, o engenheiro de operação deve dispor de ferramentas que permitam prever a ocorrência dessas situações de risco e tomar ações para evitá-las. Para isso os estudos de estabilidade são de fundamental importância, pois o conhecimento dos mecanismos de falha do sistema pode auxiliar a prevenir eventuais distúrbios no seu funcionamento normal.

1.1 Colapso de Tensão

Até meados da década de setenta, a atenção dos técnicos do setor elétrico estava voltada aos problemas advindos da chamada instabilidade de ângulo, onde perturbações mais severas, tais como curtos-circuitos, levam os sistemas a perderem estabilidade. À medida que os sistemas foram ficando mais sobrecarregados, algumas não linearidades tornaram-se mais evidentes e problemas que até então não eram observados passaram a ocorrer. Um desses problemas que passou a despertar maior atenção dos engenheiros de potência foi justamente o problema de colapso de tensão.

Tal fenômeno está relacionado à incapacidade do sistema elétrico de prover o balanço entre a potência gerada e a requisitada pelas cargas, devido, principalmente, à limitada capacidade de transmissão, ou ainda, devido a um suporte de potência reativa em local inadequado. Também possuem um papel

importante na dinâmica do colapso de tensão, os controles dos limites de geração de reativo dos geradores, a atuação dos taps dos transformadores e a maneira como as cargas reagem às variações de tensão.

É importante salientar que o fenômeno do *colapso de tensão* é consequência usual de uma seqüência de eventos que acompanham a instabilidade de tensão, causando a queda de perfil de tensão a níveis inaceitáveis em uma determinada região do sistema. Entretanto, o termo *instabilidade de tensão* é mais geral e pode estar relacionado tanto a queda quanto a elevação no perfil da tensão (Taylor, 1994).

Os mecanismos de instabilidade de tensão são muito variados e complexos. Um cenário que é muito comum, e que é o principal objetivo de estudo deste trabalho, é o problema de instabilidade de tensão provocado por variações lentas dos parâmetros (em geral variações de carga). Neste caso, o problema de instabilidade de tensão está associado à ocorrência de bifurcações locais (Hale & Koçak, 1991) das equações que modelam o sistema de potência. O objetivo da análise de estabilidade de tensão para este problema é avaliar o quão distante do ponto de bifurcação encontra-se o ponto de operação atual do sistema, ou seja, medir a margem de estabilidade do mesmo. Se a margem não for adequada, então é necessário obter um conjunto de ações de controle (alocação de banco de capacitores, redespacho de geradores, etc.) que elimine a criticidade do sistema.

Existem diversas proposições na literatura para avaliar a distância do ponto de operação ao ponto de bifurcação. Dentre elas, pode-se citar o cálculo de valores singulares (Lof et al., 1992), vetores tangentes (Souza et al., 1997) e funções teste (Chiang & Jumeau, 1995). Uma comparação entre diversos índices pode ser encontrada em Canizares et al. (1996).

A medida da margem de estabilidade por intermédio destes índices tem sido utilizada para classificar contingências em termos de sua severidade. Embora importante para caracterizar a proximidade que o sistema está de um problema de estabilidade de tensão, estes índices não conseguem, em geral, caracterizar o impacto da contingência. Uma contingência com baixa margem de estabilidade pode gerar um problema local e não desencadear um problema de colapso de tensão generalizado no sistema. Além do mais, problemas localizados são quase sempre resolvidos com compensações locais de reativo.

1.2 Problema de Seleção de Contingências

A análise de estabilidade de tensão em tempo real requer o cálculo da margem de carregamento não somente para o ponto de operação atual do sistema, mas para um número muito grande de contingências.

Uma contingência consiste em um ou mais eventos acontecendo simultaneamente ou em instantes de tempo diferentes, com cada evento resultando em uma mudança de estado de um ou mais elementos do sistema de potência, podendo evoluir de tal forma a ponto de levar o sistema ao colapso de tensão. Ela pode ser iniciada por uma perturbação pequena, uma falta ou uma ação de chaveamento (abertura-fechamento de disjuntores, inserção ou remoção de capacitor, corte de carga, troca de taps em transformadores, conexão e operação de dispositivos FACTS).

O propósito da seleção de contingências é avaliar a segurança do sistema determinando quais contingências podem causar violações de limites operativos e/ou causarem instabilidade de tensão.

O tempo computacional exigido no processo de análise e seleção de contingências deve atender aos requisitos da operação em tempo real, tornando-se necessário o desenvolvimento de técnicas rápidas para determinação da margem de estabilidade. Utiliza-se neste trabalho, uma técnica rápida denominada *Look-Ahead*, entre as várias existentes na literatura, para estimar a margem de carregamento do sistema.

As ações de controle efetuadas durante a operação em tempo real de um SEP não devem somente objetivar um melhor aproveitamento dos recursos de geração e de capacidade de transmissão, mas também devem evitar que o sistema seja levado a operar próximo a uma condição crítica onde, por exemplo, um pequeno aumento de carga ou uma contingência possa causar o colapso de tensão. Assim, nas etapas de operação de um SEP, devem ser definidas as margens de estabilidade de tensão e as ações de controle necessárias não só para as condições normais de operação (caso base), mas também para diferentes condições de contingência.

Portanto, neste trabalho pretende-se avaliar o grau de impacto que uma contingência ou uma ação de controle teria sobre um sistema de potência,

selecionando com rapidez as contingências mais críticas, levando-se em que conta que seria inviável (alto esforço computacional) avaliar a ação de controles em todas as contingências em um curto intervalo de tempo.

1.3 Organização da Dissertação

O capítulo 2 apresenta alguns métodos para estimativa da margem de estabilidade e as respectivas comparações entre eles. O capítulo 3 apresenta as características do método CPFLOW. No capítulo 4, o método *look ahead* é descrito com suas vantagens e rapidez em tempo real e sua utilização para estimar a margem de carregamento do sistema. O capítulo 5 descreve os tipos de controles preventivos e uma revisão bibliográfica dos métodos para seleção destes. Alguns exemplos são mostrados. O capítulo 6 apresenta a proposta de seleção de controle preventivo, baseada na formulação do *look ahead*. Por fim, o capítulo 7 mostra alguns resultados, comparando o fluxo de carga continuado e o *look ahead*, para o sistema sul brasileiro 45 barras e apresentando um tipo de controle para cada situação de contingência. Conclusões e as perspectivas de pesquisas futuras estão expostas também neste capítulo.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica das Técnicas para Cálculo e Estimativa da Margem de Estabilidade

Neste capítulo serão apresentados alguns métodos para cálculo da margem de estabilidade e serão detalhados os métodos da continuação e de *Look-Ahead* usados neste trabalho nos capítulos 3 e 4.

A operação dos sistemas elétricos próxima aos limites de capacidade de transferência de potência, devido ao rápido crescimento da demanda, investimentos insuficientes e reestruturação do setor, pode não garantir alguns requisitos mínimos de segurança. Nesse novo contexto, tornou-se importante conhecer quão distante encontra-se um determinado ponto de operação de seu limite de estabilidade de tensão (margem de estabilidade). Algumas pesquisas nesta área buscam o desenvolvimento de métodos e ferramentas que possam indicar o quão próximo o sistema está operando do ponto de colapso de tensão, bem como quais medidas corretivas e/ou preventivas são mais eficientes para manter uma distância segura do mesmo.

A margem de estabilidade indica a distância do ponto de operação a um evento que causa a instabilidade e deve ser bem definida para o operador. A margem de carregamento para o colapso de tensão é definida como o maior aumento de carga que o sistema pode ter, sem provocar o colapso de tensão. Existem várias formas para medir a mudança no carregamento, sendo uma delas a soma das variações absolutas na potência da carga. Uma das vantagens do uso da margem de carregamento é o fato dela ser bem aceita e facilmente entendida e ela não é baseada num modelo particular do sistema (requer apenas modelo estático do sistema). Outra vantagem é que, uma vez obtida, é fácil calcular sua sensibilidade com relação a qualquer parâmetro ou controle do sistema de potência.

Já uma das desvantagens é que o método numérico para o cálculo de pontos requer que uma direção de crescimento de carga seja definida, o que exige alto esforço computacional.

2.1 Curvas PV

Inicialmente, os estudos de colapso de tensão estavam principalmente preocupados com a máxima potência que poderia ser suprida a uma carga, mantendo a tensão dentro de limites operacionais. Um dos resultados destes estudos gerou a conhecida curva PV. Ela tem sido amplamente utilizada nos estudos operacionais, tendo em vista que sua análise é eficaz. O método para obtenção da mesma consiste basicamente na solução sucessiva de fluxos de carga conforme se incrementa a carga e a geração do sistema, segundo uma direção pré-estabelecida, para a obtenção dos pares de pontos de tensão e carregamento.

Através da curva PV, pode-se visualizar o comportamento da tensão em função do carregamento da rede (potência ativa). A parte da curva que corresponde à região de operação *estável* é aquela onde as tensões são superiores à tensão correspondente ao “nariz” da curva PV. A parte da curva que corresponde à região de operação *instável* é aquela onde as tensões são inferiores à tensão correspondente ao “nariz” da curva PV. A Figura 2 ilustra o comportamento típico de uma curva PV.

Segue abaixo a figura 1 mostrando uma curva PV.

Figura 2.1: Curva PV da margem de carregamento do sistema.

2.1.1 Fluxo de Carga convencional

O cálculo do fluxo de potência é uma das mais poderosas ferramentas na análise de Sistemas Elétricos de Potência em regime permanente. É usada para se analisar condições operacionais dos Sistemas Elétricos de Potência que podem ocorrer na prática, de modo que se possa conhecer de antemão qual será o seu desempenho e se possam definir ações corretivas a serem tomadas. Visa-se assim, que os consumidores sejam atendidos com qualidade de fornecimento de energia elétrica, sem que os equipamentos das concessionárias de energia elétrica fiquem submetidos a condições operacionais inadmissíveis.

A importância do fluxo de potência é tanto maior quanto mais interligados se encontrarem os Sistemas Elétricos. A interligação de Sistemas Elétricos tem sido crescente desde o seu surgimento em função da necessidade de se aumentar a confiabilidade de fornecimento de energia elétrica aos consumidores pela existência de diversas alternativas para sua alimentação, bem como para se permitir um melhor aproveitamento dos recursos energéticos pela possibilidade que as interligações trazem de transferência de energia elétrica de uma região para outra.

Dentre as aplicações mais usuais do fluxo de potência, pode-se citar:

a) Simulação de Sistemas Elétricos considerando diferentes despachos das usinas geradoras de energia elétrica, de modo a se prever de antemão quais as condições operacionais decorrentes desses despachos;

b) Simulação de Sistemas Elétricos operando sob condições anormais decorrentes da saída de operação de equipamentos como linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras. A saída de operação desses equipamentos pode se dar devido à necessidade de manutenção preventiva ou corretiva, ou ainda, em se tratando de linhas de transmissão, ao desligamento automático devido a presença de descargas atmosféricas;

c) Simulação de Sistemas Elétricos com finalidade de planejamento da sua expansão. Como se sabe, a demanda por energia elétrica é crescente no tempo em função do aumento da população ou da melhoria do seu nível de vida, ou ainda, devido ao crescimento da atividade econômica. Para atender ao crescimento da demanda, é necessário não só aumentar a sua oferta mediante a construção de

novas linhas de transmissão e subestações para levá-la até os locais de consumo. Também neste caso o fluxo de potência atua como uma ferramenta poderosa para auxiliar na definição das obras que permitam o cumprimento desse objetivo de forma tecnicamente correta.

Existem vários métodos propostos para a obtenção da margem de carregamento, sendo que a idéia mais natural e imediata é a utilização das técnicas de fluxo de carga convencional (Gup 90, Bast 94, Chao 95) uma vez que estas estão sempre disponíveis e fáceis de usar. Para isso, considere as equações de fluxo de carga na forma mais geral:

$$G(x, \lambda) = 0 \quad x \in R^n, G \in R^n \times R \rightarrow R^n, \lambda \in R \quad (2.1)$$

Aqui x representa o vetor correspondente aos módulos (V) e os ângulos de fase (θ) das tensões das barras do sistema e o parâmetro λ representa o fator de carregamento do sistema. Na formulação usual do FC, as dimensões de G e x são as mesmas e com a inclusão de λ passam a representar um conjunto de n equações e $n+1$ variáveis que definem uma curva unidimensional $x(\lambda)$, curva PV, passando através dos pontos de operação do sistema de potência. O problema é irrestrito porque existe uma variável a mais que o número de equações. Entretanto pode ser resolvido através de uma especificação para λ . Assim para cada valor fornecido para o parâmetro λ , um ponto de solução pode ser obtido.

Então, a curva PV é gerada realizando uma série de soluções de FC e as tensões são mostradas em função do parâmetro λ . A representação das curvas PV por parte dos engenheiros do sistema de potência é bem aceita, principalmente em função dos estudos realizados na área de colapso de tensão, sendo esta de fácil compreensão e análises satisfatórias.

Este método da obtenção da curva PV pelo fluxo de carga convencional apresenta problemas pelo fato da matriz jacobiana ficar próxima da singularidade (matriz tem autovalor nulo), caracterizando uma bifurcação sela-nó (Kawtny, 1986). Embora na prática o uso desse método permita o cálculo de pontos muito próximos do ponto de máximo carregamento, sempre será necessário ponderar se a divergência se deu como consequência de problemas numéricos ou da limitação física do sistema, tarefa nem sempre trivial. Por essa razão, na prática o limite de estabilidade de tensão é associado a não convergência do fluxo de potência.

Chiang e Jean-Jumeau (1995) desenvolveram um índice baseado no modelo da variedade central para o colapso de tensão. Este índice consiste em um carregamento máximo acima do qual se dá a ocorrência do colapso. O cálculo deste índice não envolve operações matemáticas complicadas, mas deve-se obter uma função teste empírica que indica a ocorrência do colapso. A obtenção da função teste pode ser complicada, o que acaba limitando a aplicação do método.

Greene *et al.* (1997) propuseram um método para avaliar a margem de carregamento do sistema baseado em estimativas lineares e quadráticas. Através dessas estimativas, verifica-se qual é o efeito na margem de carregamento quando se variam alguns parâmetros ou controles do sistema, tais como redespacho de geração, susceptância da linha de transmissão, cargas, capacitor shunt etc. Embora seja um método rápido, e, portanto, razoável para aplicação na seleção de contingências, os resultados mostraram que as margens obtidas eram praticamente inaceitáveis (resultados enganosos) para algumas das contingências analisadas.

Cañizares *et al.* (1996) mostraram que o menor valor singular não é um bom indicativo para medir a proximidade do colapso de tensão, uma vez que podem aparecer descontinuidades nas maiorias das curvas que medem este índice, por esta razão, pode acarretar em resultados enganosos. Além disso, os autores propõem uma nova função teste para determinar o colapso de tensão. Essa metodologia apresenta duas desvantagens. É necessário o conhecimento prévio do barramento mais crítico (mais sensível) do sistema, pois, apenas este barramento possui a característica esperada para a função teste. A função teste pode ser aplicável apenas muito próximo do colapso de tensão.

Os métodos de função energia foram inicialmente empregados em SEP's em análise de estabilidade transitória (Chiang, 1989). Esses métodos são baseados nos teoremas de Lyapunov e consistem em avaliar a energia total (cinética e potencial) de um sistema durante um distúrbio. Em estudos de estabilidade transitória, existe o interesse em se determinar o tempo crítico de abertura de disjuntores para eliminação do distúrbio, de modo que o sistema se mantenha estável. Para isso, é necessário que a energia máxima que o sistema pode vir a ter, no instante de abertura, seja no máximo igual a um nível de energia crítico associado a um ponto de equilíbrio instável do sistema pós-falta. Esta metodologia determina o tempo crítico de abertura para qual o sistema se mantém estável.

Os métodos energéticos surgem como uma boa alternativa de análise para o problema de estabilidade de tensão, haja vista que são mais precisos que os métodos estáticos e mais rápidos que os métodos dinâmicos. Eles baseiam-se no cálculo de uma função energia entre o ponto de equilíbrio estável e um ponto de equilíbrio instável.

Chiang *et al.* (1997) desenvolveram um novo índice que calcula a margem de carregamento do SEP. O método é baseado na solução do fluxo de potência e na teoria de bifurcação sela-nó. Este índice é obtido através do ajuste das curvas (λ -V) e (θ -V). O artigo também calcula a tensão crítica (tensão correspondente ao ponto de bifurcação sela-nó da curva PV) da barra de carga mais sensível do sistema. Os autores deste trabalho comparam os resultados obtidos do método proposto com os resultados do fluxo de potência continuado e chegaram à conclusão, que o método proposto é eficiente e pode ser aplicado em tempo real, porque possui um baixo esforço computacional. Por ser rápida, a metodologia pode auxiliar os operadores do sistema na tomada de decisões.

Ajjarapu e Feng (1998) implementaram uma metodologia para identificar o ponto de colapso de tensão (ponto de bifurcação sela-nó) utilizando um fluxo de carga modificado que incorpora as características dinâmicas do sistema, ao longo de aumentos quase estáticos de cargas. O ponto de colapso é identificado como sendo o ponto de equilíbrio associado à situação de máximo carregamento. Convém lembrar que num modelo de carga dependente da tensão, o ponto de máximo carregamento não é necessariamente o ponto de maior consumo de potência. A metodologia calcula a margem de carregamento do sistema com precisão, apesar, de possuir elevado esforço computacional.

JEAN-JUMEAU & CHIANG (1993) apresentaram um estudo do método de continuação parametrizada e propuseram um novo algoritmo para o fluxo de carga continuado. O algoritmo proposto incorporou uma mudança na parametrização das cargas de modo que a bifurcação não coincidisse mais com o colapso. Assim o mal condicionamento passava a ocorrer após o ponto de colapso, e não se fazia necessário o uso de expedientes que garantissem convergência na região. CHIANG *et al* (1995) apresentaram um estudo detalhado de um programa de fluxo de carga continuado padrão. No artigo foram apresentados e discutidos três métodos diferentes de se fazer a parametrização das equações não lineares do fluxo de carga.

Estes trabalhos indicam a conveniência e eficácia do uso do método de continuação para a análise estática do colapso de tensão, quando o sistema é representado por um conjunto de equações não-lineares parametrizadas.

Leite e Costa (2003) apresentaram a utilização da formulação de injeção de corrente na análise do fluxo de potência continuado. Além da formulação de injeção de corrente apresentar as mesmas características de convergência da formulação polar convencional, tanto no processo de predição quanto no de correção, sua utilização proporciona uma grande redução no esforço computacional devido principalmente ao cálculo da matriz jacobiana a cada passo iterativo. A principal vantagem desta formulação frente à metodologia polar convencional está no fato da estrutura e na montagem da matriz jacobiana, a qual é formada basicamente pelos elementos da matriz admitância modal. O método proposto apresentou uma redução no esforço computacional, mesmo assim, não pode ser usado para aplicação em tempo real, pois o tempo computacional envolvido ainda é relativamente alto, quando se deseja analisar grandes cenários de contingências.

Garcia *et al.* (1999) apresentaram um método capaz de identificar ramos críticos para análise de estabilidade de tensão também através da análise modal da matriz de sensibilidade entre a injeção de potência reativa e a amplitude da tensão nas barras de carga. A análise é feita através dos autovalores e autovetores associados. Os autovalores fornecem uma medida relativa da proximidade do colapso de tensão e os autovetores dão informações relativas ao mecanismo da perda da estabilidade de tensão e fatores de participação dos ramos, com os quais é possível determinar ações corretivas em termos de redistribuição de fluxo de potência para aliviar o carregamento nos ramos. Quanto menor forem os autovalores, mais próximo o sistema estará do colapso de tensão. Ramos com altos fatores de participação indicam quais são os ramos mais sensíveis do sistema.

O método possui uma vantagem, mantém a esparsidade das matrizes envolvidas na resolução das equações do fluxo de potência. A dificuldade encontrada neste método é a determinação de rotinas mais adequadas no cálculo dos autovalores e autovetores de interesse, uma vez que nesta etapa é consumida a maior parte do tempo de processamento. A matriz sensibilidade proposta, por ser esparsa, viabiliza a implementação de rotinas rápidas, tornando promissora a aplicação em tempo real.

Neste trabalho será apresentado o método “*look ahead*”, que estima a margem de carregamento com apenas dois pontos e para isso será feita a comparação com o método da continuação, que toda a sua formulação será explicada no próximo capítulo.

Capítulo 3

Fluxo de Carga Continuado

Os métodos de continuação, também conhecidos como *path following*, têm sido utilizados por longa data na análise de sistemas de equações algébricas não lineares (Sey 94), e mais recentemente para a obtenção do ponto de colapso de tensão em sistemas elétricos de potência (Ajarapu 92, Cãizares 93, Ajarapu 94).

A denominação de fluxo de carga da continuação vem do uso das equações do fluxo de carga convencional como modelo das redes elétricas (Kun 93, Cut 98).

A idéia básica deste método consiste na obtenção de sucessivas soluções do fluxo de carga com o objetivo de traçar os perfis de tensão através do caso base até o ponto de colapso (Ponto de Máximo Carregamento). Além de obter-se a margem de carregamento, obtêm-se também informações adicionais sobre as tensões das barras do sistema em análise.

Uma das características desejáveis para este método seria a de possuir uma região de convergência tão ampla quanto possível, evitando assim um possível erro de convergência.

Assim, o método da continuação supera a dificuldade da não convergência próxima ao ponto de colapso, mostrando o traçado completo do perfil de tensão e variando automaticamente o valor do parâmetro de carregamento, sem preocupação com a singularidade das equações dos sistemas de potência.

Galiana *et. al.* (1985) foram uns dos primeiros pesquisadores a propor o uso dos métodos de continuação em sistemas de potência, embora aplicados a problemas de despacho econômico. Em Ajarapu e Christy (1992) o método foi proposto para a solução do fluxo de potência com carga parametrizada. O algoritmo traçava as curvas PV de um sistema elétrico, inclusive na região de mau condicionamento, onde a matriz jacobiana do fluxo de carga está próxima da singularidade. O fluxo de carga continuado foi implementado através de uma parametrização local, sendo que as variáveis do sistema eram corrigidas. Chiang

et.al. (1995) apresentaram um estudo detalhado de um programa de fluxo de carga continuado padrão. Neste artigo foram mostrados e discutidos três métodos diferentes de se fazer a parametrização das equações não lineares do fluxo de carga.

Destacam-se nas secções abaixo, a formulação do fluxo de carga continuado (usado neste trabalho) e os modos de incremento de carga e de geração do mesmo.

3.1 Formulação do Fluxo de Carga Continuado

O fluxo de carga continuado resolve a eq.(2.2) por meio de um processo iterativo composto de uma previsão e uma correção para cada situação de carga. Na eq.(6) o parâmetro de carga λ também é tratado como uma variável a ser determinada.

$$\underline{G}(\underline{x}, \lambda) = \underline{0} \quad (2.2)$$

A previsão pode ser feita tomando-se um incremento na direção tangente ao ponto de operação atual. No entanto, como existem $2NPQ+PV-1$ equações e $2PQ+NPV$ variáveis a se determinar, parâmetro λ incluso, precisa-se especificar uma das componentes dessa direção tangente. O vetor que dá esta direção pode ser calculado tomando-se a linearização da eq.(2.2) e especificando uma das componentes do vetor como unitária, conforme eq.(2.3):

$$\begin{bmatrix} J_{\underline{h}}(\underline{x}, \lambda) \\ \underline{e}_k^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d\underline{x} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{0} \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde $J_{\underline{h}}(\underline{x}, \lambda)$ é a matriz jacobiana da equação (2.3) e o vetor $\underline{e}_k$ é um vetor de zeros, exceto na posição k onde ele vale 1. Este vetor especifica o valor da k -ésima componente do vetor tangente. Este artifício não altera a direção do vetor tangente, mas apenas sua norma. O sinal + ou – no vetor independente e a componente do vetor tangente especificada são escolhidos da seguinte forma:

- se o ponto de operação atual for o ponto de operação inicial, a componente especificada do vetor tangente é $d\lambda$ e, uma vez que a carga irá aumentar, o sinal é positivo;
- senão, o elemento da posição k corresponderá à uma tensão, essa tensão será a que possuir a componente mais negativa no vetor tangente calculado na previsão anterior e, uma vez que essa tensão irá diminuir, o sinal é negativo.

Dessa maneira, a previsão para a nova solução pode ser encontrada a partir do ponto de operação atual, $[\underline{x}_0 \ \lambda_0]^T$, e de um passo, σ , e é dada pela eq.(2.4).

$$\begin{bmatrix} \underline{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{x}_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} d\underline{x} \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

O passo σ é estipulado de modo que o aumento de carga, ou a diminuição da tensão, seja de tamanho conveniente. Caso o passo fosse unitário, a previsão poderia levar ao aumento de 1 pu nas cargas ou à diminuição de 1 pu nas tensões, que são variações muito grandes. Assim, no caso do ponto de operação atual ser também o ponto de operação inicial, o passo pode variar de 0,03 a 0,3 pu, conforme o sistema esteja mais ou menos carregado, pois o parâmetro de continuação está relacionado a uma carga. Caso contrário o passo pode variar de 0,002 a 0,02 pu, conforme se queira mais ou menos pontos calculados, pois nesse caso o parâmetro de continuação está relacionado ao módulo de uma tensão.

A correção da solução prevista, para encontrar a solução exata, é feita expandindo a eq.(2.2) pelo acréscimo de uma equação adicional que especifica uma das variáveis. Dessa maneira o novo conjunto de equações será dado pela eq.(2.5).

$$\begin{bmatrix} \underline{G}(\underline{x}, \lambda) \\ x(k) - \eta \end{bmatrix} = [\underline{0}] \quad (2.5)$$

A eq.(2.5) pode então ser resolvida iterativamente por meio de um método de Newton-Raphson usual. O índice k utilizado na correção pode ser escolhido como o mesmo da previsão, isso equivale a especificar o valor da k -ésima variável, $x(k)$, como o valor previsto para a mesma na eq.(2.4), valor indicado por η .

A grande vantagem desse método é permitir que haja um decremento no parâmetro λ corrigindo uma previsão de carga não factível, o que decorre do tratamento do parâmetro λ , como variável. Assim evita-se a não convergência do método de Newton-Raphson quando a etapa de previsão fornecer um ponto de operação com carga maior que o máximo carregamento suportado pelo sistema. Assim, se observa que a matriz jacobiana das equações do fluxo de carga continuado não se aproxima da singularidade, mesmo muito próximo do ponto de bifurcação.

O gráfico abaixo mostra o funcionamento do método, que mostra uma curva PV e as etapas de previsão e correção das soluções atuais.

Figura 3. 1-Gráfico do funcionamento do fluxo de carga continuado.

3.1.1 Incremento de carga

A modelagem das cargas é essencial na análise de estabilidade de tensão, mas se torna uma tarefa difícil porque a carga numa barra é um agregado de diferentes tipos de carga. As cargas podem ser classificadas como cargas estáticas, as quais respondem instantaneamente a uma variação nos estados do sistema, ou como cargas dinâmicas, que apresentam um comportamento dinâmico na presença de alterações no ponto de operação do sistema.

De maneira a possibilitar o estudo de estabilidade de tensão do sistema elétrico de potência em várias formas de crescimento de cargas possíveis, a cada barra de carga é associado um parâmetro de crescimento de potência K_B , também conhecidos como fator de participação de barra, que controlam a velocidade com que as cargas crescem durante o processo de análise, a medida que os sucessivos fluxos de cargas vão sendo executados (Guedes, 2000).

Além dos fatores de participação das barras, existem também os fatores de participação das áreas, que podem junto com o parâmetro de crescimento de carga (λ) influenciar na determinação da potência ativa das cargas.

A expressão da potência total então é dada por:

$$P_T = \lambda P_{oT} \quad (2.6)$$

Sendo:

- λ o parâmetro de carregamento do sistema.
- P_T a potência total do sistema.
- P_{oT} a potência total inicial do sistema

Considera-se então o parâmetro de crescimento no caso base como sendo igual a 1, ou seja, a direção de crescimento de carga parte de $\lambda = 1 (P_T = P_{oT})$.

O incremento de carga é definido em função dos fatores de participação, tais como:

- Fator de participação de Barra Ativo e Reativo (K_B).
- Fator de participação de Área. (K_A).

Sabendo que:

- P_{A_i} é a potência total da área i.
- P_{B_i} é a potência da barra.

.

Temos que:

$$P_{A_i} = \sum_{i \in A_i} P_{B_i} \quad (2.7)$$

$$P_{oT} = \sum_{i \in A_i} P_{oAi} \quad (2.8)$$

O crescimento de carga na área i será dado por α , que é um parâmetro a ser calculado. Assim, tem-se:

$$P_{A_i} = P_{oA_i} (1 + K_{A_i} \alpha) \quad (2.9)$$

Assim, igualando (2.6) e (2.9):

$$\lambda P_{oT} = \sum_{i \in A_i} P_{Ai} = \sum_{i \in A_i} P_{oAi} (1 + k_{A_i} \alpha) = \sum_{i \in A_i} P_{oAi} + \left(\sum_{i \in A_i} P_{oAi} k_{A_i} \right) \alpha \quad (2.10)$$

Daí tem-se:

$$\alpha = \frac{\sum P_{oA_i} (\lambda - 1)}{\sum P_{oA_i} K_{A_i}} \quad (2.11)$$

Chamando a parcela dos somatórios de $\beta_{\text{área}}$, temos:

$$\beta_{\text{área}} = \frac{\sum P_{oA_i}}{\sum P_{oA_i} K_{A_i}} \quad (2.12)$$

A expressão da potência numa área i fica então:

$$P_{A_i} = P_{0_{A_i}} \left[1 + K_{A_i} \beta_{\text{área}} (\lambda - 1) \right] \quad (2.13)$$

Desta forma, a potência nas áreas cresce de maneira proporcional aos fatores de parâmetro de crescimento de carga de área (K_{A_i}).

As potências nas barras dentro de uma área devem ser incrementadas de forma proporcional aos parâmetros de crescimento de carga de barra naquela área.

Seja a equação abaixo onde γ é uma constante a ser determinada e B_i é a barra que pertence à área A_j .

$$P_{B_i} = P_{0_{B_i}} \left[1 + K_{B_i} \gamma \right] \quad (2.14)$$

$$\sum_{i \in A_j} P_{B_i} = P_{A_j} = P_{0_{A_j}} \left[1 + K_{A_j} \beta_{\text{área}} (\lambda - 1) \right] \quad (2.15)$$

$$\sum_{i \in A_j} P_{oB_i} (1 + K_{B_i} \gamma) = P_{0_{A_j}} \left[1 + K_{A_j} \beta_{\text{área}} (\lambda - 1) \right] \quad (2.16)$$

Daí resulta em:

$$\gamma = \frac{P_{0_{A_j}} \left[K_{A_j} \beta_{\text{área}} (\lambda - 1) \right]}{\sum_{i \in A_j} P_{oB_i} K_{B_i}} \quad (2.17)$$

Considerando que a barra $i \in A_j$ e chamando :

$$\beta_j = \frac{P_{0_{A_j}} \left[K_{A_j} \beta_{\text{área}} \right]}{\sum_{i \in A_j} P_{oB_i} K_{B_i}} \quad (2.18)$$

$$P_{B_i} = P_{0_{B_i}} \left[1 + K_{B_i} \beta_j (\lambda - 1) \right] \quad (2.19)$$

Dessa maneira o incremento de carga torna-se mais viável, pois se for necessário que uma determinada área cresça mais que a outra, é só ajustar o fator de participação da área.

3.1.2 Incremento de geração

A direção de crescimento da geração é fornecida e realizada pelos operadores do sistema baseado no processo de previsão de carga.

Neste trabalho adota-se que o incremento de geração é definido em função do momento de inércia da máquina e da variação da carga:

$$\Delta P_{GER_i} = \frac{M_i}{M_T} \Delta P_{CARGA_{TOTAL}} \quad (2.20)$$

Onde: M_i representa o momento de inércia de cada gerador.

M_T representa o momento de inércia total das máquinas.

ΔP_{carga_total} representa a variação de carga nas barras PQ's.

ΔP_{Ger_i} é o incremento de potência ativa assumida pelo gerador i

No entanto se as barras PV's possuírem cargas, estas devem ser consideradas e, portanto incrementadas. Então a ΔP_{carga_total} é calculada da seguinte maneira:

$$\Delta P_{CARGA_TOTAL} = \sum_{j=1}^{NB-1} \Delta P_{CARGA_j} \quad (2.21)$$

Onde NB é o número de barras do sistema e ΔP_{carga_j} é a variação da carga do sistema. A variação é definida como sendo a diferença entre a carga incrementada e a carga base.

$$\Delta P_{CARGA_j} = P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0) \quad (2.22)$$

Substituindo a expressão (2.22) em (2.21), temos:

$$\Delta P_{CARGA\ TOTAL} = \sum_{j=1}^{NB-1} [P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0)] \quad (2.23)$$

Em seguida substitui-se a expressão (2.23) em (2.20), encontra-se a expressão para a variação de potência ativa do gerador i :

$$\Delta P_{GER_i} = \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^{NB-1} [P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0)] \quad (2.24)$$

A potência ativa gerada pelo gerador i é dada em função do parâmetro de carregamento (λ), conforme a expressão (2.25). É definida como sendo a diferença entre a potência ativa gerada incrementada e a potência ativa gerada do caso base, como mostra a expressão (2.26).

$$P_{Ger_i} = P_{Ger_i}(\lambda) \quad (2.25)$$

$$\Delta P_{GER_i} = P_{GER_i}(\lambda) - P_{GER_i}(\lambda_0) \quad (2.26)$$

Substituindo a expressão (2.26) em (2.24), chega-se a uma nova expressão para a potência ativa gerada em função do parâmetro de carregamento (λ) do sistema.

$$P_{GER_i}(\lambda) = P_{GER_i}(\lambda_0) + \frac{M_i}{M_T} \sum_{j=1}^{NB-1} [P_j(\lambda) - P_j(\lambda_0)] \quad (2.27)$$

OBS: Os incrementos de carga devido ao aumento de perdas serão compensados pelo gerador slack.

Capítulo 4

Método “*Look Ahead*”

Utilizou-se neste trabalho, um método proposto por Chiang (1997), conhecido por *Look-Ahead Voltage*. Este método tem como finalidade estimar o PMC (Ponto Máximo de Carregamento) e pela sua rapidez, pode ser utilizado para avaliação da margem de carregamento em tempo real no problema de análise e seleção de contingências. O intuito de usar esse método na operação em tempo real é que o tempo computacional envolvido é bem menor do que o tradicional fluxo de carga continuado.

Esse método usa apenas a solução de dois fluxos de carga e a teoria de bifurcação sela-nó para estimar o máximo carregamento de um sistema dado. O método explora o fato de que, próximo ao ponto de bifurcação, a curva $(\lambda-V)$ possui propriedade quadrática para obter uma estimativa da margem de carregamento.

Para isto, primeiramente escolhe-se a barra piloto como sendo aquela que apresenta maior variação de tensão, devido a um crescimento de carga estipulado. Dados dois valores de carregamento λ_1 e λ_2 , com $\lambda_2 > \lambda_1$, define-se:

$$\Delta V_i = \frac{(V_i|_{\lambda=\lambda_1} - V_i|_{\lambda=\lambda_2})}{V_i|_{\lambda=\lambda_2}} \quad (2.28)$$

Onde ΔV_i é a variação relativa de tensão da i -ésima barra de carga do sistema, $V_i|_{\lambda=\lambda_1}$ é a tensão da i -ésima barra de carga, correspondente ao valor de carregamento λ_1 e $V_i|_{\lambda=\lambda_2}$ é a tensão da i -ésima barra de carga, correspondente ao valor de carregamento λ_2 . A barra que possuir a maior variação de tensão será escolhida como sendo a barra piloto.

Para as barras PV, a variação de tensão é zero e, portanto devem-se considerar apenas as barras de cargas do tipo (PQ) para a escolha da barra piloto. A barra que tiver a maior variação de tensão entre as barras de carga será escolhida como sendo a barra piloto. Aliás, nem sempre a barra piloto terá maior variação de tensão e ângulo ao mesmo tempo, sendo que às vezes uma barra possuirá maior variação de tensão e outra barra terá maior variação de ângulo.

A propriedade quadrática garante que próximo ao ponto de bifurcação, a curva PV pode ser aproximada pela seguinte expressão:

$$\lambda = \alpha + \beta V_i + \gamma V_i^2 \quad (2.29)$$

Onde α , β e γ são os parâmetros a determinar e V_i é a tensão da barra piloto do sistema. Dado um nível de carregamento (λ_1) é possível obter através do fluxo de potência a variável de estado x_1 . Este ponto representa o ponto de operação base do sistema. Considerando que se tenha um aumento do nível de carregamento do sistema, representado pelo parâmetro (λ_2) é possível novamente determinar a variável de estado x_2 , através do fluxo de potência. Conhecidas as variáveis de estado x_1 e x_2 tem-se:

$$\lambda_1 = \alpha + \beta V_{i,1} + \gamma V_{i,1}^2 \quad \text{1º fluxo de carga} \quad (2.30)$$

$$\lambda_2 = \alpha + \beta V_{i,2} + \gamma V_{i,2}^2 \quad \text{2º fluxo de carga} \quad (2.31)$$

Estas duas equações são insuficientes para determinar os três parâmetros alpha, beta e gama. Uma terceira equação linearmente independente é obtida derivando-se a segunda eq. Com relação a lambda:

$$1 = \beta \dot{V}_{i,2} + 2\gamma \dot{V}_{i,2}^2 V_{i,2} \quad (2.32)$$

Com os resultados do fluxo de carga e o incremento de carga, os parâmetros λ_1 , λ_2 , $V_{i,1}$ e $V_{i,2}$ são calculados. Basta agora encontrar os parâmetros da equação auxiliar ($\dot{V}_{i,2}$). Para isso basta fazer uma análise de sensibilidade das variáveis de estado com relação a variação do parâmetro lambda. Seja a equação do fluxo de carga $F(x,\lambda)=0$ e considere o desenvolvimento em série de Taylor a seguir:

$$F(x,\lambda)=0 \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Delta \lambda = 0 \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x = - \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Delta \lambda \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \Big|_{(x,\lambda)} = - \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Big|_{(x,\lambda)} \quad (2.36)$$

Onde a matriz dos coeficientes $\frac{\partial F}{\partial x}$ é a matriz jacobiana do fluxo de potência. O termo $\frac{\partial F}{\partial \lambda}$ representa as variações do fluxo de carga em função do crescimento de carga e $\frac{\partial x}{\partial \lambda}$ é conhecido por vetor tangente e é o que deseja-se calcular. Portanto, se a função $F(x,\lambda)$ é definida da seguinte forma:

$$F(x,\lambda) = \begin{pmatrix} F_1(x,\lambda) \\ F_2(x,\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{\text{esp}}(\lambda) - P_{\text{calc}}(x) \\ Q_{\text{esp}}(\lambda) - Q_{\text{calc}}(x) \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Então basta derivar essa equação em função do parâmetro (λ) para obter a derivada de F(em relação ao parâmetro) da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{\text{esp}}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q_{\text{esp}}}{\partial \lambda} \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial P^{esp}}{\partial \lambda} = \frac{\partial (P^{gerado} - P^{carga})}{\partial \lambda} \quad (2.39)$$

$$P_{esp_i} = \left\{ P_{G_i}(\lambda_0) + \frac{M_i}{M_T} \sum_{K=1}^{NB-1} [P_K(\lambda) - P_K(\lambda_0)] \right\} - P_{0B_i} [1 + K_{B_i} \beta_j (\lambda - 1)] \quad (2.40)$$

Portanto, a derivada é dada por:

$$\frac{\partial F_1}{\partial \lambda} = \frac{\partial P_{esp}}{\partial \lambda} = \left[\frac{M_i}{M_T} \sum_{K=1}^{NB-1} P_{0B_i} K_{B_i} \beta_j \right] - P_{0B_i} K_{B_i} \beta_j \quad (2.41)$$

A derivada $\frac{\partial Q_{esp}}{\partial \lambda}$ é similar à derivada $\frac{\partial P_{esp}}{\partial \lambda}$, sendo que a diferença é a não dependência do momento de inércia.

$$\frac{\partial F_2}{\partial \lambda} = \frac{\partial Q_{esp}}{\partial \lambda} = -Q_{0B_i} K_{B_i} \beta_j \quad (2.42)$$

(somente para barras de carga).

Depois de encontrada a derivada de $F(x, \lambda)$ em relação ao parâmetro, basta resolver o sistema linear da equação 2.36 para obter os valores das variáveis de estado. Logo o sistema está formado e temos três equações e três incógnitas.

Para determinar o índice $\bar{\lambda}_{V_{MAX}}$ (estimativa do máximo carregamento antes do surgimento da bifurcação sela-nó), necessita-se encontrar o ponto de máximo da expressão (2.29). A demonstração é feita a seguir.

$$\frac{d\lambda}{dV_i} = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{d}{dV_i} (\alpha + \beta V_i + \gamma V_i^2) = 0 \quad (2.44)$$

$$\beta + 2\gamma V_i = 0 \quad (2.45)$$

$$V_{i_{MAX}} = \frac{-\beta}{2\gamma} \quad (2.46)$$

Substituindo a expressão (2.46) em (2.29), obtém-se o valor estimado de $\bar{\lambda}_{V_{MAX}}$.

$$\bar{\lambda}_{V_{MAX}} = \alpha + \beta \left(\frac{-\beta}{2\gamma} \right) + \gamma \left(\frac{-\beta}{2\gamma} \right)^2 \quad (2.47)$$

$$\bar{\lambda}_{V_{MAX}} = \alpha - \frac{\beta^2}{2\gamma} + \gamma \frac{\beta^2}{4\gamma^2} \quad (2.48)$$

$$\bar{\lambda}_{V_{MAX}} = \alpha - \frac{\beta^2}{2\gamma} + \frac{\beta^2}{4\gamma} \quad (2.49)$$

$$\bar{\lambda}_{V_{MAX}} = \frac{4\gamma\alpha - 2\beta^2 + \beta^2}{4\gamma} \quad (2.50)$$

$$\bar{\lambda}_{V_{MAX}} = \frac{4\gamma\alpha - \beta^2}{4\gamma} \quad (2.51)$$

$$\bar{\lambda}_{V_{MAX}} = \alpha - \frac{\beta^2}{4\gamma} \quad (2.52)$$

Todo esse procedimento feito para a tensão deve ser feito no ângulo da barra piloto, logo se obtém o seguinte parâmetro:

$$\bar{\lambda}_{\theta_{MAX}} = \phi - \frac{\omega^2}{4\tau} \quad (2.53)$$

O índice $\bar{\lambda}_{V_{MAX}}$ é obtido através do ajuste da curva λ -V. Este índice, como será mostrado através dos resultados posteriormente, geralmente oferece uma estimativa conservadora da margem de carga, pelo fato da curva ficar dentro da margem exata (Método da Continuação). Por outro lado, o índice $\bar{\lambda}_{\theta_{MAX}}$ obtido através do ajuste da curva λ - θ , oferece uma estimativa otimista da margem de carga.

Uma estimativa melhor da medida da margem de carga pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\bar{\lambda}_{\max} = \frac{\bar{\lambda}_{V_{\max}} + \bar{\lambda}_{\theta_{\max}}}{2} \quad (2.54)$$

Faz-se uma média aritmética entre o valor obtido das curvas de tensão e de ângulo.

O resultado torna-se muito próximo do real (CPFLOW), quanto mais próximo estiver do ponto de colapso.

No capítulo 4, são mostrados alguns resultados da comparação entre os métodos da continuação e o método proposto por Chiang (1997).

Capítulo 5

Revisão da Literatura

Este capítulo mostra o estado da arte sobre os métodos usados para seleção de controle do tipo preventivo aplicado no SEP (Sistemas Elétricos de Potência), a fim de alcançar a estabilidade de tensão nos sistemas estudados.

5.1 Considerações Gerais

Para suprir o crescimento da carga, os sistemas elétricos atuais estão operando, em geral, próximos dos limites de estabilidade.

A determinação das condições operativas limites requer uma análise detalhada devido à existência de alguns cenários operativos, somado ao aumento do nível de complexidade oriundo da permanente expansão do sistema.

Este é mais um dos motivos pelo qual a avaliação de segurança tem se tornado fundamental, evidenciada quando da ocorrência de diversos blecautes no mundo inteiro.

O conceito de controle de segurança apareceu na metade dos anos 60(Dy Liacco). Anteriormente, dispunha-se de centro de despacho e supervisão, e a quantidade de dados recebidos era estritamente necessária para o despacho de geração.

A operação de sistemas de potência em tempo real consiste na execução periódica de funções de análise e controle de rede. A execução das funções de supervisão e controle na operação de redes em tempo real está sujeita a uma restrição severa de tempo, ou seja, as funções devem ser executadas o mais rápido possível. Por exemplo, a análise de segurança deve ser executada ciclicamente a intervalos de 15 a 30 minutos. Já o monitoramento do estado de operação da rede (configurador, estimador de estado) é executado a cada 15 segundos em média.

Portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de funções de supervisão e controle cujas execuções sejam rápidas, sem, no entanto perder a precisão necessária. A análise de segurança do sistema pode ser dividida em três funções principais que são executadas em centros de controle de operação:

- 1) Monitoração do sistema
- 2) Análise de contingências
- 3) Otimização de ações de controle preventivo e corretivo

Assim, com o aumento das interligações aliado a operação das redes com altos níveis de carregamento torna-se mais provável a ocorrência de incidentes que podem levá-las à instabilidade de tensão, culminando com o colapso de tensão e, como consequência, grandes prejuízos à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Ações de controle preventivo e/ou corretivo devem ser tomadas para melhorar a segurança de sistemas de potência.

Na seção a seguir, são apresentados alguns trabalhos importantes dentro da área de segurança de sistemas, em sua maioria, quanto ao controle preventivo para mitigar o colapso de tensão.

5.2 Trabalhos na área de segurança de sistema de potência

Para controle corretivo, o corte de carga é um dos principais mecanismos utilizados por causa das capacidades de regulação destes com respeito à alta velocidade da estabilidade de tensão. As outras medidas de controle, tais como redespacho da geração, regulação (Regulador Automático de Tensão), chaveamento capacitor/reator, mudança do tape do transformador (LTC), ângulo de fase defasador, bem como recursos SVC que contribuem significativamente para a prevenção do colapso de tensão (Ajjarapu, 2001).

São citados nesta seção alguns trabalhos importantes dentro da área de segurança de sistemas para mitigar o colapso de tensão.

Greene *et al.* (1996) generalizaram o vetor normal (Dobson, 1993) objetivando calcular a eficácia da mudança de vários parâmetros do sistema, aumentando assim

a margem de estabilidade de tensão do sistema. É fornecido então, um método de cálculo de índices para consideração de estabilidade no problema de controle corretivo e preventivo.

Gao *et al.* (1992) aplicaram a análise modal nas vizinhanças do ponto de colapso da curva PV para identificar a melhor localização para um dispositivo de compensação de reativo estático (*static Var compensation* (SVC)) para aumentar a margem de estabilidade de tensão pós-contingência. Para casos em que o critério da margem não é satisfeito, a análise modal tem sido usada para identificar a melhor localização de medidas corretivas buscando aumentar a margem de estabilidade.

Na ação de controle corretivo e preventivo, a localização do dispositivo de controle às vezes é muito importante, embora possa não parecer quando da formulação da otimização (Ajarapu, 2001).

Tuan *et al.* (1994) propuseram dois algoritmos baseados em sensibilidade para cálculo rápido da carga a ser cortada. Os limites da estabilidade são considerados pela informação da sensibilidade. Também em (Tuan, 1994), outro algoritmo de corte de carga foi apresentado baseado em um índice de risco de estabilidade de tensão. O objetivo destes métodos foi alcançar um perfil mais baixo do índice em relação a um valor limiar através do corte de carga para assegurar que o sistema de potência permaneça afastado do ponto de instabilidade de tensão. As análises consideram modelos estáticos e os aspectos dinâmicos associados com a estabilidade de tensão não foram levados em conta (Ajarapu, 2001).

Kumano *et al.* (1991,1994) propuseram uma nova metodologia para monitorar e replanejar os ajustes dos controles on-line e evitar a instabilidade de tensão. Esta metodologia é baseada em múltiplas soluções de fluxo de carga e análises de sensibilidade. O controle preventivo para acomodar o aumento de carga inicia-se quando um par de soluções próximas do fluxo de carga é detectado, sob condições de carregamento muito pesado do sistema. Então, formula-se um problema de otimização e soluciona-se através de técnicas seqüenciais de minimização não restritas. Entretanto, foram encontradas soluções sub ótimas e não ótimas. Além do mais, antes da implementação do controle preventivo, o vetor normal à superfície dos fluxos de carga críticos estendidos tinha que ser calculado, o que foi complicado e consumiu muito tempo computacional.

Todos estes métodos citados utilizam algum tipo de sensibilidade como indicador de estabilidade. É comum que as restrições de estabilidade do sistema

sejam representadas na sensibilidade obtida através de vários métodos disponíveis e incorporadas na função objetivo ou nas restrições de igualdade/desigualdade (Ajjarapu, 2001).

Para restabelecer a factibilidade do sistema de potência devido a contingências severas, Overbye (1994) usou a característica especial de convergência de amortecimento do método de Newton e o conceito de vetor normal (Dobson, 1993) para obter o ponto mais próximo da fronteira da factibilidade do fluxo de potência. Então, a aproximação linear juntamente com as sensibilidades dos controles, são usadas para determinar a quantidade de controles.

Wang *et al.* (1998) aplicaram o método dos pontos interiores diretamente para solucionar o problema de controle preventivo e corretivo. Os limites da margem de estabilidade de tensão são acrescentados nas restrições de desigualdade para aumentar a confiabilidade operacional do sistema. Métodos de programação não linear, em geral, são computacionalmente intensivos ao formar e fatorar a matriz Hessiana. Também, quanto à solução ótima, é necessário obter uma redução do grande número de ações de controle para a implementação prática (Ajjarapu, 2001).

Feng *et al.* em (1998) mostraram um método para a determinação de corte de carga mínimo e assim restabelecer a factibilidade da operação de um sistema descrito por equações algébricas e diferenciais. Através da parametrização de uma determinada estratégia de controle (direção de controle no espaço de parâmetro), o método da continuação é aplicado para determinar o ponto de equilíbrio associado com o limite pós-contingência do sistema. Então a sensibilidade paramétrica do subespaço invariante (*invariant subspace parametric sensitivity*) é usada para determinar a estratégia de controle mais eficiente de forma que o corte de carga seja mínimo.

Feng *et al.* em (2000) apresentaram uma metodologia que combina ações de controle corretivo e preventivo em sistemas de potência estressados. Para casos com margem de estabilidade de tensão insuficiente, a sensibilidade da margem é primeiro calculada para identificar os controles preventivos mais efetivos, então através de otimização linear minimiza-se o custo do controle para coordenar as ações de controle. Para casos quando nenhum ponto de equilíbrio de regime permanente existe, a maioria das vezes resultante de contingências severas, uma estratégia de controle parametrizado é primeiro utilizado para restabelecer a factibilidade do sistema (Feng, 1998). O problema do controle preventivo é

solucionado baseado na informação da sensibilidade da margem através da solução de equações algébricas e diferenciais do sistema. Primeiro, o equilíbrio do sistema é traçado até o ponto crítico ser atingido. A referência (Feng, 2000) apresenta uma das equações algébricas e diferenciais do fluxo de carga com técnicas da continuação, que pode rapidamente identificar o ponto de colapso de tensão durante o processo de traçar o equilíbrio direto sem a reconstrução da matriz de estado dinâmico do sistema e sem a verificação custosa da singularidade. Depois, no ponto crítico, o método introduzido em (Greene, 1996) é usado para calcular as sensibilidades da margem de cada controle. Geralmente, no controle preventivo e corretivo, as restrições de igualdade (EFC, incluindo o cenário de mudança de carga) devem ser consideradas na formulação do problema. Contudo, análises de sensibilidade lineares assumem que as restrições de igualdade são sempre atendidas de modo que as equações do fluxo de potência são eliminadas (Ajarapu, 2001). Finalmente, a otimização linear é aplicada para obter a solução ótima ou sub-ótima do problema. Se restrições de desigualdade são violadas, o equilíbrio e a sensibilidade da margem devem ser recalculados iterativamente.

Em Cañizares (2000), o efeito da dependência do tempo das ações de controle (corte de carga e compensação reativa) para evitar o colapso de tensão é estudado em um cenário real de um colapso de tensão do sistema interconectado chileno (modelo reduzido do sistema). As análises apresentadas mostram que os tipos, quantidade e tempo da atuação dos controles são críticos para o sucesso dos controles de emergência. Este aspecto do tempo é muito importante para o desenvolvimento de estratégias para minimizar a interrupção de carga. Mecanismos práticos para determinar tempos e níveis críticos para evitar o colapso em sistemas reais estão sendo estudados pelos autores.

Conceição *et al.* (2001) indicaram estratégias de controle corretivo em situações de infactibilidade da operação de sistemas elétricos de potência. Primeiramente o grau de infactibilidade (GI) do sistema é quantificado e depois uma estratégia de controle corretivo é determinada de modo a colocar o sistema de volta à região de operação factível. GI é determinado através da menor distância entre o ponto de operação infactível (instável) e a fronteira de factibilidade no espaço de parâmetros (de carga). As estratégias de controle foram obtidas por dois métodos, métodos das proporcionalidades (MP) e método baseado em programação não

linear. A busca dos controles mais apropriados é baseada na idéia da localização adaptativa.

Em (Berizzi, 1996) um método de estado permanente, útil para avaliar a estabilidade de tensão em um ambiente em curto prazo é apresentado. É baseado em índices de sensibilidade (área e global) obtido através da solução de um fluxo de potência e análises do autovetor associado ao autovalor singular. A análise modal é executada nas matrizes Jacobiana e na matriz de controle que contém as relações lineares entre gerações reativa e cargas nas áreas pré-definidas. É realizado um planejamento de ações de controle corretivas a serem tomadas em estados de emergência de maneira preventiva. A metodologia utiliza um esquema de controle de tensão hierárquico e uma função de programação de potência reativa no ponto a ser adotado, objetivando satisfazer critérios econômicos e de segurança. A economia é proposta com a adoção de um programa de despacho de potência reativa com a função objetivo de minimizar as perdas de potência ativa, enquanto a segurança da operação é baseada no esquema de controle de tensão (três níveis) hierárquico. O procedimento é aplicado com sucesso na ENEL Spa.

Em (Obadina, 1989) um método é apresentado para a identificação do fornecimento distribuído de potência reativa no intuito de manter o perfil de tensão dentro de limites especificados e aumentar a margem de segurança. O objetivo é minimizar o custo do fornecimento de VAR sujeito a restrições técnicas e econômicas. O problema é formulado em dois estágios, o primeiro envolve um problema de otimização que minimiza a quantidade de fornecimento de reativos. O segundo estágio aplica um programa linear misto-inteiro que otimiza o número de barras candidatas para o suporte VAR. O número de restrições é elevado, correspondendo a um fluxo de potência ótimo.

Yoshida *et al.* (2002) usaram a teoria de RIDGE para julgar a estabilidade transitória para o controle preventivo rapidamente. Essa teoria pode prever o gerador mais instável. Se essa teoria não for satisfeita, então o sistema está estável para a falta e sendo satisfeita, torna-se instável para a falta.

Capitanescu *et al.* (2002) trataram o controle preventivo para restaurar a margem em um nível desejado, mostrando o problema de mudança do ponto de operação no sistema de potência, a fim de manter a margem de estabilidade segura com respeito a contingências. A ênfase foi dada na injeção de potência como variável de controle. Entre as características do método destacam-se: a

determinação da margem de sensibilidade pré-contingência para controles usando informações pós-contingência; uma técnica para compensar a aproximação linear (dois fluxos de potência ótimos são suficientes para que o sistema fique seguro sem necessidade de correção); controles simultâneos para todas as contingências severas.

Outro trabalho é mostrado em Zhao (2006), em que um novo mecanismo de controle preventivo é acionado para mitigar as contingências em que a tensão está instável. Este problema é decomposto em dois subproblemas e resolvido alternadamente e iterativamente. Um subproblema é que o ponto de bifurcação para uma dada contingência é computado usando a parametrização do fluxo de carga continuado e a sensibilidade da margem de instabilidade com respeito aos controles é obtida. Outro subproblema é que a sensibilidade baseada em programação linear é construída e resolvida para obterem-se as ações do controle preventivo.

Capítulo 6

Proposta de Seleção de Controle baseada em análise de sensibilidade do método *Look-Ahead*

Neste trabalho, um método de seleção de controle baseada na análise de sensibilidade do método *Look Ahead* será proposto.

O objetivo é avaliar a sensibilidade da estimativa da margem de carregamento obtida pelo método *look-ahead* em função da variação de um parâmetro de controle u . Calculando-se esta sensibilidade para cada elemento de controle, pode-se ordenar os controles de acordo com o grau de sensibilidade e selecionar os controles mais efetivos para aumentar a margem de carregamento do sistema para um certo conjunto de contingências críticas.

Seja u uma variável de controle parametrizada de tal forma que $u=0$ significa variável de controle no valor mínimo e $u=1$ representa variável de controle no seu valor máximo.

Considere a expressão da estimativa do máximo carregamento fornecida pelo método *look ahead*:

$$\lambda_{\max} = \alpha - \frac{\beta^2}{4\gamma} \quad (6.1)$$

Derivando esta equação com relação a u obtem-se:

$$\frac{d\lambda_{\max}}{du} = \frac{d\alpha}{du} - \frac{d\beta}{4\gamma} \cdot \frac{d\beta}{du} + \frac{\beta^2 d\gamma}{4\gamma^2 du} \quad (6.2)$$

Para calcular a sensibilidade $\frac{\partial \lambda_{max}}{\partial u}$, precisam-se calcular as sensibilidades dos parâmetros α, β, γ do método *look ahead* com relação a variações na variável de controle u .

Para o cálculo destas derivadas de α, β, γ em relação a u , tem-se as funções:

$$\alpha = f(V_o, V_1, \dot{V}_1, \lambda_0, \lambda_1) \quad (6.3)$$

$$\beta = g(V_o, V_1, \dot{V}_1, \lambda_0, \lambda_1) \quad (6.4)$$

$$\gamma = h(V_o, V_1, \dot{V}_1, \lambda_0, \lambda_1) \quad (6.5)$$

Assim, as derivadas são calculadas em função das equações acima:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial u} = \frac{\partial f}{\partial V_o} \cdot \frac{\partial V_o}{\partial u} + \frac{\partial f}{\partial V_1} \cdot \frac{\partial V_1}{\partial u} + \frac{\partial f}{\partial \dot{V}_1} \cdot \frac{\partial \dot{V}_1}{\partial u} \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial u} = \frac{\partial g}{\partial V_o} \cdot \frac{\partial V_o}{\partial u} + \frac{\partial g}{\partial V_1} \cdot \frac{\partial V_1}{\partial u} + \frac{\partial g}{\partial \dot{V}_1} \cdot \frac{\partial \dot{V}_1}{\partial u} \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial u} = \frac{\partial h}{\partial V_o} \cdot \frac{\partial V_o}{\partial u} + \frac{\partial h}{\partial V_1} \cdot \frac{\partial V_1}{\partial u} + \frac{\partial h}{\partial \dot{V}_1} \cdot \frac{\partial \dot{V}_1}{\partial u} \quad (6.8)$$

6.1 Parametrização da variável do controle (banco de capacitores)

Nesta seção será apresentada a formulação matemática para o cálculo de $\frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial u}$.

Sendo u parâmetro de controle:

u=0 sem capacitor

u= 1 banco completo

$F(x, \lambda, u)=0$, sendo as equações de fluxo de potência, com cargas variando de acordo com o parâmetro λ , onde x é o vetor das variáveis de estado do sistema e u o controle inserido.

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial u} = -\frac{\partial f}{\partial u} \quad (6.9)$$

Essa equação é calculada duas vezes para o valor dos dois primeiros fluxos de carga. (obtenção de $\frac{dx}{du}$ para dois fluxos).

Considerando-se a equação (6.10) abaixo e fazendo-se u fixo, a derivada em relação a u fica:

$$\frac{df}{dx} \cdot \frac{dx}{d\lambda} - \frac{df}{d\lambda} = 0 \quad (6.10)$$

$$\frac{d^2 F}{dudx} \cdot \left(\frac{dx}{d\lambda} \right) + \frac{dF}{dx} \cdot \frac{d}{du} \left(\frac{dx}{d\lambda} \right) + \frac{d^2 F}{dud\lambda} = 0 \quad (6.11)$$

A expressão $\frac{d^2 F}{dud\lambda}$ é igual a zero, pois considerando u como um banco de capacitores (adotado neste trabalho), a derivada segunda não depende de u (P_{esp} e Q_{esp} não dependem de u).

Na derivada $\frac{d^2 F}{dudx}$, a única derivada que depende de b_{sh} (shunt) é a:

$$\frac{dQ}{dV} = -2V_k u b_{k \max}^{sh} - 2V_k b_{k \min}^{sh} + 2V_k u b_{\min}^{sh} \quad (6.12)$$

A derivada segunda chamada hessiana deste modo ficará cheia de zeros e pode influenciar negativamente na obtenção de $\frac{\partial \dot{V}_1}{\partial u}$.

Abaixo, tem-se a formulação completa do cálculo desta derivada, considerando “Deriv”, como a hessiana que é em sua maior parte composta por zeros, exceto na submatriz “L”, que depende do shunt. ($\frac{dQ}{dV}$ é a única derivada que depende de b_{sh}).

$$\frac{d\dot{V}_1}{du} \cdot \frac{dF}{dx} = \text{Deriv} \cdot \frac{dx}{d\lambda} \quad (6.13)$$

Depois de resolvida esta expressão, obtém-se $\frac{\partial \dot{V}_1}{\partial u}$ e pode-se calcular:

$$\frac{d\alpha}{du} = \frac{df}{dV_0} \cdot \frac{dV_0}{du} + \frac{df}{dV_1} \cdot \frac{dV_1}{du} + \frac{df}{d\dot{V}_1} \cdot \frac{d\dot{V}_1}{du} \quad (6.14)$$

Tem-se esta expressão também para β e γ em relação a u . Depois então de calculadas estas derivadas de α, β e γ em relação a u , pode-se extrair os valores dos parâmetros alpha, beta e gama, já calculados no método *look ahead*.

$$\begin{pmatrix} 1 & V_0 & V_0^2 \\ 1 & V_1 & V_1^2 \\ 0 & \dot{V}_1 & 2\dot{V}_1 V_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.15)$$

Por fim, depois de calculadas todas as derivadas e os parâmetros, calcula-se a expressão final de $\frac{\partial \lambda_{\max}}{\partial u}$:

$$\frac{d\lambda_{\max}}{du} = \frac{d\alpha}{du} - \frac{d\beta}{4\gamma} \cdot \frac{d\beta}{du} + \frac{\beta^2 d\gamma}{4\gamma^2 du} \quad (6.16)$$

Capítulo 7

Testes e Análise de Resultados

Neste capítulo serão mostrados os resultados da margem de carregamento do método da continuação para um sistema de 45 barras. Este método foi implementado para efeito de comparação com o método *Look-Ahead*. Serão mostradas também as ações de controle, como a instalação de banco de capacitores, analisando as mudanças na margem de carregamento.

7.1 Introdução

Para mostrar a eficiência do método proposto por Chiang (1997), mostram-se aqui alguns resultados comparativos entre o método da continuação (exato) e o “*look - ahead*”(estimado), implementados em C++ *Builder*, a fim de analisar-se a consequência de algumas contingências no sistema Sul Brasileiro de 45 barras e ainda relacioná-las com alguns tipos de controle preventivos em propostas futuras (capítulo 5).

Apresenta-se a seguir este sistema com sua topologia.

Figura 7.1 Sistema Sul Brasileiro 45 barras.

Nos testes que se seguem a tolerância adotada para os *mismatches* foi de 10^{-2} . O primeiro ponto de cada curva foi obtido com a inicialização *flat start*. (Módulo de tensão = 1pu e Fase=0°). O parâmetro λ foi usado para simular o incremento de carga ativa e reativa, seguido ainda por um aumento de geração.

7.2 Algoritmo

O algoritmo do programa do Método da Continuação desenvolvido neste trabalho é mostrado a seguir:

1. Leitura dos dados do sistema: $V_i, \delta_i, P_{G0i}, Q_{G0i}, P_{L0i}, Q_{L0i}, A_i, K_{Bi}, K_{Aj}, R, X, B_C \Rightarrow Y^{BUS} \Rightarrow G_{ij} \text{ e } B_{ij}$

- V_i = módulo de tensão na barra i.
- δ_i = fase da tensão na barra i.
- P_{G0i} = potência ativa gerada na barra i.
- Q_{G0i} = potência reativa gerada na barra i.
- P_{L0i} = potência ativa da carga na barra i.
- Q_{L0i} = potência reativa da carga na barra i.
- A_i = área da barra i.
- K_{Bi} = fator de participação da barra i.
- K_{Aj} = fator de participação da área j.
- R = resistência da linha.
- X = reatância da linha.
- B_C = susceptância da linha.
- Y^{BUS} = matriz admitância do sistema.
- G_{ij} = matriz condutância do sistema
- B_{ij} = matriz susceptância do sistema.

2. Especificação do parâmetro de continuação inicial e do elemento não nulo do vetor e_k e do sinal do elemento não nulo do vetor b_k :

$$\begin{matrix} x_k^n = d\lambda \\ n = 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} \sin a l + \\ k = NPQ + NPV + 1 \end{cases}$$

OBS: • e_k é um vetor de dimensão $NPQ + NPV + 1$, cujo único elemento diferente de zero é o elemento 1 na posição k.

- b_k é um vetor de dimensão $NPQ+NQV+1$, da forma $(0, \dots, 0, \pm 1)^T$, cujo sinal + ou - é determinado conforme o parâmetro de continuação é uma tensão, sinal -, ou um ângulo ou o fator de carga λ , sinal +.

3. Encontrar o vetor tangente, pela equação abaixo:

$$[J_{ij}] \cdot \begin{bmatrix} dV_i \\ d\delta_i \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Ri}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{Ri}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial P_{Ri}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q_{Ri}}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_{Ri}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial Q_{Ri}}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dV_i \\ d\delta_i \\ d\lambda \end{bmatrix} = [b_k] = \begin{bmatrix} 0_i \\ 0_i \\ \pm 1 \end{bmatrix}$$

OBS: • a ordem das submatrizes que compõe a matriz jacobiana $[J_{ij}]$ são, respectivamente:

$(NPQ) \times (NPQ)$	$(NPQ) \times (NPQ+NQV)$	$(NPQ) \times (1)$
$(NPQ+NQV) \times (NPQ)$	$(NPQ+NQV) \times (NPQ+NQV)$	$(NPQ+NQV) \times (1)$
$(1) \times (NPQ+NQV+1)$		

- existem NPQ variáveis de tensão e $NPQ+NQV$ variáveis de ângulo.

4. Verificação do critério de parada $\Rightarrow d\lambda < 0$.

5. Verificação do parâmetro de continuidade para o próximo passo e determinação dos parâmetros dos vetores e_k e b_k :

$$x_k = \max \{ |dV_i| \quad |d\delta_i| \quad |d\lambda| \} \Rightarrow \begin{cases} \text{sinal } \pm \\ k \end{cases}$$

6. Cálculo da previsão da solução:

$$\begin{bmatrix} V_i^{n+1} \\ \delta_i^{n+1} \\ \lambda^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^n \\ \delta_i^n \\ \lambda^n \end{bmatrix} + \sigma \cdot \begin{bmatrix} dV_i \\ d\delta_i \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad \sigma = \begin{cases} \text{passo de} \\ \text{convergência} \end{cases}$$

7. Correção da solução através do Método de Newton-Raphson e retorna passo 4:

$$[F_i(V_i, \delta_i, \lambda)] = \begin{bmatrix} P_{Ri}(V_i, \delta_i, \lambda) \\ Q_{Ri}(V_i, \delta_i, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0]$$

obs: • x_k é a variável referente ao parâmetro de continuidade atual (V_i, δ_i ou λ_i).
• η é o valor previsto (passo 6) para a variável referente ao parâmetro de continuidade atual.

7.1. Leitura do ponto inicial: $(V_i^0, \delta_i^0, \lambda^0)$

7.2 Cálculo do resíduo de $[F_i(V_i, \delta_i, \lambda_i)]$ no ponto inicial:

$$[\Delta F_i(V_i^0, \delta_i^0, \lambda^0)] = \begin{bmatrix} P_{Ri}(V_i^0, \delta_i^0, \lambda^0) \\ Q_{Ri}(V_i^0, \delta_i^0, \lambda^0) \\ 0 \end{bmatrix}$$

e teste da convergência:

$$\left| \max \{ \Delta F_i(V_i^0, \delta_i^0, \lambda^0) \} \right| \leq \varepsilon$$

7.3 Calcular a matriz jacobiana:

$$[J_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_i}{\partial V_j} & \frac{\partial F_i}{\partial \delta_j} & \frac{\partial F_i}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial(x_k - \eta)}{\partial x_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Ri}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{Ri}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial P_{Ri}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q_{Ri}}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_{Ri}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial Q_{Ri}}{\partial \lambda} \\ e_k \end{bmatrix}$$

7.4 Calcular o incremento das variáveis e retornar ao passo 2:

$$[J_{ij}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_i \\ \Delta \delta_i \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = -[\Delta F_i(V_i^n, \delta_i^n, \lambda^n)]$$

$$\begin{bmatrix} V_i^{n+1} \\ \delta_i^{n+1} \\ \lambda^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^n \\ \delta_i^n \\ \lambda^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_i \\ \Delta \delta_i \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$

7.3 Testes e Resultados

Abaixo serão mostrados os resultados do fluxo de carga continuado para o Sistema Sul Brasileiro de 45 barras.

7.3.1 Sistema em Análise

Tendo como modelo uma representação simplificada do Sistema Elétrico de Potência (SEP) da região sul do Brasil, será realizada a análise dos pontos mais vulneráveis do sistema, levando em consideração o critério N-1, sendo este detalhado ao decorrer deste trabalho.

O SEP em análise é composto de 45 barras, onde 35 barras são do tipo PQ (potência ativa e reativa constantes), 9 barras do tipo PV (potência ativa e módulo de

tenção constantes), e uma barra Slack do tipo V θ (módulo e ângulo da tensão constantes). O sistema está disposto em dois níveis de tensão, uma parte do sistema está em 525 kV e a outra parte em 230 kV.

Os dados de barra e de linha do sistema são mostrados na tabela 4.1 e 4.2, a seguir, sendo zero para indicar barras do tipo PQ's, 1 para PV's e 2 para a barra *slack*.

Tabela 7.1: Dados de barra do fluxo de carga convergido do Sistema Sul Brasileiro.

Barras						
Nº da Barra	Tipo da Barra	Nome da Barra	Módulo da Tensão (p.u)	ângulo (rad)	Potencia Ativa Gerada (p.u)	Potencia Reativa Gerada (p.u)
343	0	IVAIPORA	1,03383	-0,12045	0	0
344	0	LONDRINA	1,02525	-0,16623	0	0
366	1	ITA	1,02	-0,11677	6,4999	-0,3826
367	0	SIDEROPO	0,97384	-0,55497	0	0
368	0	FARROUPI	1,0202	-0,58689	0	0
369	1	P.FUNDO	1,04	-0,24409	2,1499	0,5133
370	0	P.FUNDO	1,02172	-0,3373	0	0
371	0	XANXERE	0,99856	-0,28057	0	0
372	0	P.BRANCO	0,99647	-0,18289	0	0
373	1	S.OSORIO	1,02	0,05393	8,9499	0,8884
374	0	S.OSORIO	1,01501	-0,04477	0	0
375	0	AREIA	1,01635	-0,1893	0	0
376	0	S.MATEUS	1,01435	-0,35967	0	0
377	0	CURITIBA	1,02567	-0,3629	0	0
378	0	JOINVILE	0,97191	-0,47337	0	0
379	0	BLUMENAU	1,00203	-0,45239	0	0
380	0	PALHOCA	0,99262	-0,49349	0	0
381	2	GBMUNHOZ	1,022	0	15,2938	-1,29936
382	0	AREIA	1,03538	-0,09698	0	0
383	0	CURITIBA	1,02898	-0,32217	0	0
384	0	C.LARGO	1,03305	-0,29735	0	0
385	0	BLUMENAU	1,01053	-0,41782	0	0
386	0	ITA	1,02866	-0,2005	0	0
387	0	GRAVATAI	1,02583	-0,50729	0	0
388	0	V.AIRES	1,02668	-0,39467	0	0
389	0	C.NOVS	1,03214	-0,16942	0	0
390	1	S.SANTIA	1,018	0,12096	13,2499	-0,5601
391	0	S.SANTIA	1,03496	-0,02289	0	0
392	1	J.LAC.A	1,03	-0,41976	0,8999	0,39
393	0	J.LACERD	0,99991	-0,49595	0	0
394	1	J.LAC.B	1,03	-0,39407	1,1999	0,4124
395	1	J.LAC.C	1,03	-0,37047	2,4099	0,693
396	0	J.LACERD	1,00525	-0,4754	0	0
397	1	SEGRED	1,02	0,04755	10,9999	-1,4058
398	0	SEGRED	1,03198	-0,02356	0	0
399	0	SECI	1,02856	-0,57858	0	0
402	0	GRAVATAI	1,0386	-0,56644	0	0
407	1	ITAUBA	1,02	-0,25041	4,5999	1,0444

408	0	ITAUBA	1,0015	-0,35688	0	0
414	0	V.AIRES	1,03282	-0,44027	0	0
430	0	APUCARAN	0,99243	-0,26803	0	0
431	0	LONDRINA	1,01039	-0,19986	0	0
432	0	MARINGA	0,98151	-0,26464	0	0
433	0	C.MOURAO	0,97871	-0,22898	0	0
437	0	FORQUILH	0,97222	-0,55001	0	0

Tabela 7.2: Dados de linha do sistema Sul Brasileiro.

Barra de Origem	Barra de Destino	Resistiva (%)	Reativa (%)	Capacitiva (Mvar)
343	344	0,035	0,725	332,2
343	382	0,18	2,27	227,21
343	391	0,14	2,04	244,75
344	431		0,63	
366	386		1,35	
367	368	3,86	19,85	34
367	396	0,96	4,91	8,42
367	437	0,33	1,67	28,59
368	370	2,315	16,89	81,68
368	399	0,59	3	47,55
369	370		4,6	
370	371	0,815	4	28,8
370	408	2,5	16,48	46,9
371	372	1,63	8,35	14,4
371	374	3,16	16,21	27,84
372	374	1,53	8,61	13,44
373	374		1,14	
374	375	3,06	15,23	27,02
374	433	1,72	8,8	60,8
375	376	2,45	12,56	20,41
375	382		3	
376	377	0,88	4,15	52,11
377	378	0,91	5	31,9
377	383		0,62	
378	379	0,77	3,88	27
379	380	1,08	6	37,26
379	385		0,62	
380	396	0,9	4,6	31,06
381	382		0,67	
382	383	0,19	2,8	335,76
382	384	0,19	2,74	328,67
382	386	0,14	1,95	239,68
382	398	0,05	0,7	83,92
383	384	0,05	0,69	82,15
383	385	0,12	1,75	209,7
386	387	0,21	3,09	371,83
387	402		0,62	
388	389	0,22	3	383
388	414		0,62	
389	391	0,14	1,95	239,7
390	391		1,14	
391	398	0,05	0,7	83,92
392	393		8,71	
393	396		5,9	
394	396		7,01	
395	396		4,5	
396	437	1,29	6,57	11,28

397	398		0,68	
399	402	0,07	0,358	6,68
399	414	0,613	3	
407	408		2,36	
408	414	2,02	11,29	20,62
430	431	0,528	3	19,05
430	432	1,1	11,84	20,27
430	433	2,29	11,74	20,27
431	432	0,86	4,42	28,68
432	433	1,81	9,29	16,07

Tabela 7.3: Dados dos Geradores.

**Momento de Inércia das
Máquinas(H)**

Barras	Valores (pu)
381	0,744
366	0,3732
369	0,113
373	0,3947
390	0,5728
392	0,0356
394	0,0506
395	0,09680
397	0,51630
407	0,2034

Para cada contingência, será utilizado o método da continuação para solução do fluxo de carga. Adotou-se um critério de 10 iterações para um sistema ser divergente, ou seja, com margem negativa. Serão feitas algumas simulações de contingências para verificar o comportamento do sistema frente a essa perturbação. Será feita a análise da margem de estabilidade para o caso base e para algumas situações de contingências.

A margem é obtida através de sucessivos fluxos de carga, até que o parâmetro λ decresça, e então o método pára, achando assim o máximo carregamento. Considera-se também o fator de participação das barras iguais a 0,3 e o fator de participação da área 1(igual a 1,0 e área 2 igual a 0,5, ou seja, a área 1 cresce duas vezes mais que a área 2.

Adotou-se a barra 378 como a barra piloto, por ser a barra mais sensível do sistema apresentado.

Seguem abaixo as curvas λ -V das barras do sistema Sul Brasileiro em condições normais (caso base):

Figura 7.2-Curva λ -V do sistema.

O parâmetro máximo de carregamento é de 1,3323 pu. Já a tensão no ponto de bifurcação é de 0,9033 pu para a barra 378.

Aplicando uma contingência na linha 378-379, que liga Joinville a Blumenau, tem-se a seguinte curva λ -V:

Figura 7.3-Curva λ -V com a saída da linha 378-379.

Percebe-se claramente que com a contingência da linha 378-379, a margem de estabilidade diminuiu, chegando a 1,2108 pu. A barra com a tensão mais afetada é a barra 378, chegando a 0,58 pu no ponto de colapso.

Analisando-se a contingência da linha 371-372, que liga Xanxere à Pato Branco, tem-se o gráfico abaixo:

Figura 7.4-Curva λ -V com a saída da linha 371-372.

A margem de carregamento neste caso atingiu a máxima de 1,2421 pu, ou seja, não afetou tanto quanto a contingência da linha 378-379. Novamente a barra 378 teve a sua tensão mais afetada, chegando a 0,66 pu.

Aplicando-se uma contingência na linha 432-433, que liga Maringá a C.Mourão, tem-se a seguinte curva λ -V:

Figura 7.5-Curva λ -V com a saída da linha 432-433.

A margem de carregamento para esta contingência é de $\lambda_{\text{máx}}=1,2517$ pu, tornando o sistema menos afetado que a contingência anterior (linha 371-372).

Uma contingência crítica pode ser vista analisando-se a figura na perda da linha 377-378, que liga Curitiba a Joinville.

Figura 7.6-Curva λ -V com a saída da linha 377-378.

Percebe-se a diminuição drástica da margem de carregamento para a perda da linha 371-372. O valor de máximo carregamento é de $\lambda_{\text{máx}}=1,1242$ pu. As tensões também foram bem afetadas, chegando até a 0,56 pu na barra 378.

No caso da perda da linha 399-402, que liga Seci à Gravataí, tem-se uma contingência ainda mais drástica, sendo que o sistema diverge (não encontra solução) para esta determinada contingência. É o caso também da linha 382-383 e da linha 388-389, que causaram a divergência do fluxo de carga.

Segue abaixo uma tabela contendo a análise de estabilidade para algumas contingências do sistema Sul brasileiro 45 barras:

Tabela 7.4: Análise de estabilidade para algumas contingências.

Linhas Desligadas (Da Barra – Para a Barra)	Transmissões violadas (Linha – Fluxo)
343 – 344	FC diverge.
343 – 391	Não houve instabilidade.
377 – 378	Não houve instabilidade.
382 – 383	FC diverge.
382 – 384	Não houve instabilidade.
382 – 398	Não houve instabilidade.
383 – 385	FC diverge.
386 – 382	Não houve instabilidade.
386 – 387	FC diverge.
388 – 389	FC diverge.
389 – 391	FC diverge.
399 – 402	FC diverge.
399 – 414	Não houve instabilidade.
430 – 433	Não houve instabilidade.
431 – 432	Não houve instabilidade.
471 – 374	Não houve instabilidade.

7.3.2 Análise dos Resultados

Como foi mencionado anteriormente, o sistema pode ser dividido em dois subsistemas, um com tensão de 525 kV, e outro com 230 kV.

O sistema na tensão de 525 kV apresenta os maiores fluxos de potência e é radial, o que implica que na perda de uma linha deste sistema, não haverá outra em paralelo para suprir a perda, e com isso, o sistema de 230 kV não conseguirá atender a demanda.

Isto pode ser visto nos dados de simulações, pois para quase todas as contingências nas linhas de 525 kV, o programa não convergiu.

O sistema de 230 kV apresenta fluxos de potência mais modestos do que o sistema de 525 kV e é onde os centros de cargas estão ligados diretamente. Apresenta uma topologia mais malhada, o que possibilita que outras linhas transmitam a energia enquanto há alguma linha desligada.

Na maioria dos casos, quando ocorre um desligamento destas linhas, não resultam em violação dos limites determinados acima, sendo que em apenas alguns pontos em específicos uma contingência irá resultar em instabilidade para o sistema, como é o caso das linhas entre as barras 377-378, 399-414 e 431-432.

Durante as simulações observou-se que para a maioria das contingências, as barras de Maringá e Campo Mourão ultrapassaram o limite de tensão inferior. Ao analisar o nível de tensão desta região para o sistema completo, notou-se que neste ponto operativo as tensões já se apresentam perto do limite inferior, o que torna esta região propícia a violar os limites de tensão.

Destacam-se ainda algumas linhas de transmissão que são de grande importância para o SEP em análise. As linhas que ficam entre as barras 399-414 e 399-402 interligam uma grande quantidade de carga com o sistema de 525 kV, devido a isso a perda das mesmas leva o sistema a um ponto operativo instável.

Devido a sua topologia radial do sistema de 525 kV, e ao grande fluxo de potência que passa por suas linhas, a perda do mesmo pode levar o sistema todo à instabilidade.

Observou-se também durante as simulações que não ocorreram violações aos fluxos máximos das linhas. Isto ocorre, pelo fato do sistema estar pouco carregado. Sendo assim, ao perder uma linha, as linhas em paralelo não terão

dificuldade em suprir a demanda. Dentre os casos analisados obtiveram-se apenas instabilidades de tensão.

Levando em consideração a divisão do SEP em dois subsistemas e as definições de Kundur (1994), temos que:

a) O subsistema de 525 kV encontra-se no estado de alerta, pois todos os desligamentos de linhas realizados levam o sistema à uma situação crítica, sendo que na grande maioria leva a divergência das simulações.

b) Pode-se considerar que o subsistema de 230 kV encontra-se no estado normal, pois a grande maioria das contingências não faz com que o SEP viole alguma restrição operativa, sendo que apenas o desligamento de três linhas faz com que o sistema entre no estado de emergência.

7.3.3 Comparação entre o *Look Ahead* e o Método da Continuação

Como já foram mostrados os resultados do método da continuação, que usa diversos fluxos de carga para a obtenção da margem de carregamento, pode-se agora mostrar os resultados do método “*Look Ahead*” que utiliza dois fluxos de carga e estima o ponto de bifurcação através da propriedade quadrática.

Dado um sistema IEEE de 5 barras, onde 3 barras são do tipo PQ (potência ativa e reativa constantes), uma barra do tipo PV (potência ativa e módulo de tensão constantes), e uma barra Slack do tipo V θ (módulo e ângulo da tensão constantes), far-se-á a comparação da margem de carregamento obtida pelo método proposto por Chiang (1997) e o método da continuação descrito neste trabalho.

Segue abaixo a topologia do sistema IEEE 5 barras:

Figura 7.7-Sistema IEEE 5 barras.

Seguem abaixo os dados de barra, os dados de linha e os momentos de inércia usados neste sistema:

Tabela 7.5: Dados de Barra do Sistema IEEE 5 barras:

N° da Barra	Tipo de Barra	Módulo da Tensão de Barra	Ângulo	Potencia Ativa Gerada(pu)	Potência Reativa Gerada(pu)
1	2	1,060	0	0	0
2	1	1,042	-2,7°	20,0	10,0
3	0	1,016	-4,9°	45,0	15,0
4	0	1,015	-5,2°	40,0	5,0
5	0	1,010	-6,1°	60,0	10,0

Tabela 7.6: Dados de Linha do Sistema IEEE 5 barras:

Barra de Origem	Barra de Destino	Resistiva (%)	Reativa (%)	Capacitiva (Mvar)
1	2	2	6	3
1	3	8	24	2,5
2	3	6	18	2
2	4	6	18	2
2	5	4	12	1,5
3	4	1	3	1
4	5	8	24	2,5

Tabela 7.7: Dados dos Geradores

Momento de Inércia das Máquinas (H)	
Gerador - Barra 1	0,49949 pu
Gerador - Barra 2	0,09424 pu
Momento Total de Inércia	0,59373 pu

Para este sistema foram executados diversos fluxos de carga para a obtenção da máxima margem de carregamento do sistema (Método da Continuação). Com o intuito de reduzir o esforço computacional, apenas dois fluxos são necessários, fazendo-se proveito do método proposto por Chiang (1997), explorando a propriedade quadrática mostrada anteriormente.

Assim, faz-se uma comparação na tabela abaixo, mostrando resultado dos dois métodos, com os respectivos erros para uma barra piloto escolhida (barra 3).

Tabela 7.8: Comparação do máximo carregamento dos métodos para o IEEE 5 barras.

Caso	Contingência	Margem de Carregamento <i>CPFLOW</i> (Método da Continuação)	Margem de Carregamento <i>Look Ahead</i>	$V_{\min}$ <i>CPFLOW</i>	$V_{\min}$ <i>Look Ahead</i>	Erro (%)
0	Normal	4,88291	4,89132	0,58099	0,52352	0,17223
1	1-2	1,67686	1,60127	0,75531	0,79777	4,50783
2	1-3	3,69506	3,50253	0,54139	0,49236	5,21047
3	2-3	3,21098	3,08704	0,57637	0,57042	3,85988
4	2-4	2,95086	2,93079	0,62031	0,60953	0,68014
5	2-5	diverge	diverge	diverge	diverge	-
6	3-4	4,43195	4,7089	0,80199	0,77183	-6,24894
7	4-5	4,71434	4,58917	0,67584	0,67333	2,65509

Estes resultados das simulações revelam que as porcentagens de erro entre a margem de carregamento estimada e a exata variam de 0,17% a 6,24%, mostrando que o método proposto por Chiang dá um resultado razoavelmente exato, comprovando assim a eficiência do método, devido ao baixo esforço computacional (apenas dois fluxos de carga).

O segundo sistema comparado é composto por 39 barras, onde 29 são barras do tipo PQ (potência ativa e reativa constante) e 10 são barras do tipo PV (potência ativa e modulo da tensão constante), com fator de participação das barras de 0,4 e

fator de participação das áreas 1 e 2 iguais a 1. Este sistema é conhecido por Sistema *New England*. Mostra-se a comparação entre os métodos na tabela 4.9 abaixo:

Tabela 7.9: Tabela comparativa entre o método proposto e o método da continuação (39 barras).

Caso	Falta na Linha	Carregamento Máximo Estimado (γ_{MAX})	Carregamento Máximo (CPFLOW)	Erro (%)
1	Normal	1,494592	1,495754	0,077686
2	1-2	1,190609	1,191183	0,048187
3	15-16	1,464087	1,462172	-0,13096
4	25-26	1,436608	1,439111	0,173926
5	12-11	1,492039	1,493431	-0,093208
6	9-39	1,213776	1,216166	0,196519
7	5-8	1,468622	1,4697007	0,07339
8	6-31	Divergiu	Divergiu	-
9	22-35	Divergiu	Divergiu	-
10	5-6	1,477590	1,478865	
11	13-14	1,477537	1,477582	0,00304
12	26-27	1,469735	1,470887	0,07832
13	10-32	Divergiu	Divergiu	-
14	4-5	1,483660	1,4836009	-0,003983
15	6-7	1,460721	1,4619011	-0,640404
16	28-29	1,487148	1,476190	-0,742316

Verifica-se que o erro também foi mínimo de 0,003% à 0,74% e mais uma vez o método “*Look Ahead*” foi eficiente, com valores expressivos e ainda de maneira rápida.

Mostra-se abaixo, o gráfico do funcionamento do método “*Look Ahead*”, onde apenas dois fluxos de carga são necessários para a predição do ponto de máximo carregamento, usando a propriedade quadrática próximo ao ponto de bifurcação.

Figura 7.8-Funcionamento do método *Look-Ahead*.

7.3.4 Teste com a inserção do banco de capacitores de 2pu.

Serão feitos alguns testes com a inserção de um controle nas barras de carga PQ, almejando ter uma margem de carregamento maior e avaliando quais barras são mais sensíveis à inserção de banco de capacitores de 2pu instalado.

Será feito a correlação entre o parâmetro de crescimento de carga e o controle inserido $\left(\frac{\partial \lambda_{max}}{\partial u} \right)$.

Tabela 7.10: Valores de $\Delta\lambda$ em relação a u.

Barra	$\Delta\lambda$ relação a u (%)
344	0,014
343	0,099
367	0,150
368	0,030
370	0,009
371	0,008
372	0,055
374	0,003
375	0,023
376	0,027
377	0,035
378	0,037
380	0,025
383	0,035
385	0,037
391	0,008
393	0,006
396	0,020
398	0,009

Figura 7.9- $\Delta\lambda$ em relação a u para as barras PQ de maior sensibilidade.

Pelo gráfico, viu-se que as barras mais sensíveis ao controle inserido no sistema foram as barras 367, 343, 372, 378, 383, 385, 377, 376, sendo a 367 a de maior sensibilidade.

Capítulo 8

Conclusões e Perspectivas Futuras

A motivação principal para o desenvolvimento deste trabalho foi verificar a possibilidade da obtenção de um método para cálculo da margem de estabilidade, de maneira rápida e eficaz, comparado com o método da continuação, que é mais exato, mas de alto esforço computacional.

Inicialmente foram estudadas todas as etapas do método da continuação, para assim então usarem-se as características do método “*Look-Ahead*” para redução do esforço computacional e ainda relacioná-las com os tipos de controle preventivo.

Conforme indicam as simulações efetuadas, o método da continuação consegue identificar a bifurcação estática das equações do sistema, evitando o mau condicionamento inerente à região próxima ao ponto de colapso de tensão. O método possui ainda a vantagem de que uma escolha conveniente do tamanho do passo na etapa de previsão permite controlar o desempenho do método.

Questiona-se então o método da continuação apenas no quesito tempo, apresentando-se então resultados promissores do método “*Look-Ahead*”, e concluindo-se que com dois fluxos de carga, consegue-se estimar o ponto de bifurcação, obtendo-se um erro razoavelmente considerável de 0,17% à 6%.

Em razão do sistema elétrico de potência estar operando sempre próximo dos limites, pode-se concluir ainda que o método “*Look-Ahead*” é absolutamente viável, pois ele tem maior exatidão à medida que se aproxima o ponto de bifurcação, comprovando a característica quadrática na vizinhança deste.

Fica bem mais fácil para o operador ter uma ferramenta, que gera um resultado estimado, é verdade, mas com erro bem pequeno e alta velocidade ao invés de ter uma ferramenta exata (método da continuação), mas com problemas de velocidade (vários fluxos de carga).

8.1 Perspectivas Futuras

Foi integrado o método “*Look-Ahead*” ao funcionamento do controle preventivo em um sistema elétrico de potência, analisando o comportamento da margem de carregamento junto ao uso de um tipo desses controles.

Segue abaixo um esquema mostrando um resumo ilustrativo para este trabalho, relacionando a margem de carregamento com controle (curva cheia) e sem controle (curva tracejada).

Figura 8.1: Esquema de mudança da margem com a inserção do controle.

Assim, precisa-se rodar o método “*Look-Ahead*” e usar os dois pontos dos fluxos de carga para, por técnicas de sensibilidade, conseguir-se obter os outros dois pontos com a inserção da variável de controle e então chegar ao ponto de bifurcação com o controle preventivo atuando.

Esta maneira torna-se mais eficiente do que ter que rodar quase cinco fluxos de carga (pelo método “*Look Ahead*”) para achar duas curvas da margem, uma com controle e outra sem controle.

Objetivou-se então calcular o $\Delta\lambda$, que seria o aumento da margem, devido à atuação do controle ativado.

Em um futuro, pode-se explorar a inserção de outros controles para a seleção destes, a fim de mitigar o colapso de tensão.

Referências Bibliográficas:

AJJARAPU V., C. CHRISTY, 1992, "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-7, pp. 416–423.

ALVES D. A. "Obtenção do ponto de máximo carregamento em sistemas elétricos de potência utilizando novas técnicas de parametrização para o método de continuação", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Brasil, 2000.

ALVES D.A., DA SILVA, L.C.P.; CASTRO, C.A. "Continuation Load Flow Method parameterized by Power Losses", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, 2000.

BERIZZI A., BRESESTI P., MARANNINO P., GRANELLI G.P., MONTAGNA M., "System-area operating margin assessment and security enhancement against voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(3):1451-1462, 1996.

BRETAS, N.G.; ALBERTO, L.F.C. (2000). "Estabilidade transitória em Sistemas Eletroenergéticos". São Carlos, EESC-USP.

CANIZARES C. A., F. L. ALVARADO, "Point of collapse and continuation methods for large AC/ DC systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRS-8, pp. 1–8, 1993.

CAÑIZARES, C.A. "Voltage Collapse and Load Modeling" , *IEEE Trans. On Power Systems*, *IEEE Transaction Power Systems* Vol.8, n°1, pp1-8, 1995.

CAÑIZARES, C.A. "Conditions for a Saddle-Node Bifurcations in AC/DC Power Systems", *Electric Power* Vol.17, n°1, pp.61-68, 1995. 8, 1995.

CAPITANESCU F., CUTSEM T.V. "Preventive Control of Voltage Security Margins: A

“Multicontingency Sensitivity-Based Approach”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, N°. 2, 2002.

CHIANG H.D., WANG S.C., FLUECK A.J., “Look Ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Functions for Large-Scale Power Systems” *IEEE Transactions on Power Systems*, v.12,n.1,p.173,1997.

CHIANG,H.D. *et al.*(1995). “Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems.” *IEEE Transactions on Power Systems*, v.10, n.2, p.584-90, May.

CONCEIÇÃO A.G.C., CASTRO C.A. “A new approach to defining corrective control actions in case of infeasible operating situations”, *IEEE Porto Power Tech*, 1(1):1-6, 2001.

DOBSON I., LU L. “New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse”, *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-8:905-913, 1993.

FENG Z., AJJARAPU V., MARATUKULAM D.J. “A comprehensive approach for preventive and corretive control to mitigate voltage collapse”, *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-15(2):791-798, 2000.

GALIANA,F.D. *et al.* “The continuation method in power systems optimization: applications to economy-security functions”. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v.PAS-104, n.1, p.114-24,1985.

GAO B., MORISON G., KUNDUR P. “Voltage stability evaluation using modal analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-7:1529-1542, 1992.

GRANVILLE S. MELLO J.C.O., MELO A.C.G. “Application of interior point methods to power flow unsolvability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-11:1096-1103, 1996.

GREENE S., DOBSON I., ALVARADO, F.L. "Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters", *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-11:845- 850, 1996.

HALE,J.K.; KOÇAK,H.(1991). "Dynamics and Bifurcations". New York, Springer Verlag.

IINUMA K., YOSHIDA T., OHTAKA T.IWAMOTO S. "Preventive Control with RIDGE Theory considering n-th swing stability", *IEEE Transactions on Power Systems* 2002.

KUMANO T., Yokoyama A., SEKINE Y. "Fast monitoring and optimal preventive control of voltage instability", *Electrical Power and Energy Systems*, 1(1):117-125,1994.

KUMANO T., Yokoyama A., SEKINE Y. "Detection of closest critical point and sub-optimal preventive control of stability", *Electrical Engineering in Japan*, 111(3):89-97, 1991.

KUNDUR P. "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc, 1994.

MARTINS A.C.P.M. "Simulação Estática do Colapso de tensão através da resolução continuada de um fluxo de carga modificado". Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo-USP,EESC, Brasil, 2000.

MONTICELLI A.J., Garcia A.V. "Introdução a sistemas de energia elétrica", Editora da UNICAMP, 1999.

MONTICELLI A.J. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.

OBADINA O.O., BERG G.J. "VAR planning for power system security", *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2):677-686, 1989.

OVERBYE T.J. "A power flow measure for unsolvable cases", *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-9:1359-1365, 1994.

OVERBYE T.J. "Computation of a practical method to restore power flow solvability", *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-10:280-287, 1995.

QUINTELA A.S. "Estudo de índices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingências", Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Brasil, 2002.

QUINTELA A.S. "Estratégias de controle preventivo para a manutenção de margens de segurança com relação à estabilidade de tensão em tempo real". Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas-Unicamp, Brasil, 2006.

TAYLOR C.W. "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill Inc, 1994.

TUAN T.Q., FANDINO J., SABONNADIÈRE J.C. "Emergency load shedding to avoid risks of voltage stability using indicators", *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-9, 1994.

VARGAS L.S., CAÑIZARES C.A. "Time dependence of controls to avoid voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(4):1367-1375, 2000.

WANG X., EJEBE G.C., TONG J. WAIGHT J.G. "Preventive/corrective control for voltage stability using direct interior point method", *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3):878-883, 1998.

ZHAO J., HSIAO-DONG CHIANG H.D., LI H., ZHANG B. "A Novel Preventive Control Approach for Mitigating Voltage Collapse" *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.17, N° 2, 2006.