

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FORMULAÇÃO DE MODELOS PARA O CONTROLE
PREVENTIVO DINÂMICO DE SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA

Carlos Roberto Minussi

Tese submetida à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira - FEIS - UNESP como parte
integrante do concurso para obtenção do Título
de Livre Docente.

Ilha Solteira-SP, agosto de 1995.

1210001018



018



**FORMULAÇÃO DE MODELOS PARA O CONTROLE
PREVENTIVO DINÂMICO DE SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Carlos Roberto Minussi

1210001018



92/95 UNESP - ILHA SOLTEIRA

UNESP - "CAMPUS" DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE ENTRADA	DATA DE TOMBAMENTO
01/04/96	29/01/96
RECEBIMENTO	TOMBO
Carla Assis	Te. 1018
Doar	CLASSIFICAÇÃO
R\$ 10,00	
B. 1018	

Tese submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS - UNESP como parte integrante do concurso para obtenção do Título de Livre Docente.

Ilha Solteira-SP, agosto de 1995.

BCpIS
FEIS-UNESP

SUMÁRIO

	Página
APRESENTAÇÃO	01
1. INTRODUÇÃO	03
2. MODELO DO SISTEMA	08
2.1. Introdução	08
2.2. Modelo do Sistema referido ao Centro de Ângulos	09
2.3. Redução às Barras Internas de Geração	13
2.3.1. Cálculo da Matriz de Admitância Reduzida – Condição Pós-Falta	15
2.3.2. Cálculo da Matriz de Admitância Reduzida – Condição de Falta	17
2.3.3. Expressão Geral	18
2.4. Conclusão	19
3. ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	21
3.1. Introdução	21
3.2. Função Energia	21
3.3. Conclusão	27
4. O PROBLEMA DO CONTROLE PREVENTIVO DINÂMICO	28
4.1. Introdução	28
4.2. Formulação do Problema	28
4.3. Conclusão	30
5. CONTROLE PREVENTIVO ATRAVÉS DO CORTE DE CARGA	31
5.1. Introdução	31
5.2. Formulação do Problema	31
5.3. Aplicação	38
5.4. Conclusão	44
6. CONTROLE PREVENTIVO ATRAVÉS DE ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO	45
6.1. Introdução	45
6.2. Formulação do Problema – Mudança da Impedância do Sistema Através da Inclusão / Remoção de Linhas de Transmissão	46

6.2.1. Sensibilidade da Margem de Segurança	47
6.2.2. Sensibilidades da Posição e Velocidade Angulares	49
6.2.3. Sensibilidades da Condutância e Susceptância de Transferência Pós-Falta	50
6.2.4. Sensibilidades da Condutância e Susceptância de Transferência Sob-Falta	52
6.3. Formulação do Problema - Mudança da Impedância Através do Controle Sobre os Parâmetros do Sistema de Transmissão	54
6.3.1. Inclusão do Elemento <i>Shunt</i>	54
6.3.2. Alteração da Impedância Série	55
6.4. Conclusão	56
7. CONTROLE PREVENTIVO ATRAVÉS DO CONTROLE DA EXCITAÇÃO	57
7.1. Introdução	57
7.2. Formulação do Problema	57
7.3. Sensibilidade da Margem de Segurança	61
7.4. Sensibilidades da Posição e Velocidade Angulares	62
7.5. Aplicação	63
7.6. Conclusão	64
8. LIMITAÇÃO DOS MODELOS	65
8.1. Introdução	65
8.2. Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança	65
8.3. Conclusão	68
9. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
9.1. Conclusão	69
9.2. Sugestões Para Trabalhos Futuros	70
10. REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A	79



APRESENTAÇÃO

Apresenta-se, a seguir, a tese submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte integrante do concurso para obtenção do título de Livre Docente de Carlos Roberto Minussi.

Atualmente, o docente desenvolve suas atividades de ensino, pesquisa e extensão, sob regime de dedicação integral, na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Elétrica, como Professor Assistente Doutor.

O docente tem desenvolvido pesquisa em análise de estabilidade transitória e, também, em controle preventivo dinâmico de Sistemas de Energia Elétrica.

Os trabalhos sobre Análise de Estabilidade Transitória foram / estão sendo abordados através do emprego do método Direto de Liapunov com funções de Liapunov tipo energia e, mais recentemente, através de redes neurais artificiais. →

O controle preventivo dinâmico tem sido enfocado através do emprego do conceito de energia total do sistema e análise de sensibilidade. Neste contexto, foram / estão sendo formulados modelos que utilizam ações de controle tipo redespacho de geração; alívio de carga; potência reativa e controle estrutural – inclusão ou remoção de elementos do sistema de transmissão e emprego de FACTS (*Flexible AC Transmission System*) – e, ainda, a determinação de capacidade de intercâmbio em Sistemas Interligados com restrição de estabilidade transitória.



As pesquisas estão sendo conduzidas individualmente e em grupo – através de orientação em nível de iniciação científica e mestrado.

Serão apresentados, neste trabalho, um conjunto de modelos para o controle preventivo dinâmico de Sistemas de Energia Elétrica através do emprego do corte (alívio) de carga, controle da excitação e controle estrutural .

Os modelos aqui propostos serão objeto de estudo, implementação em computadores digitais e simulação por parte de alunos do CPGEE (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - FEIS - UNESP visando a elaboração de suas dissertações de mestrado.



INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) interligados constituem-se num dos maiores sistemas concebidos pelo homem. A interligação destes sistemas visa, basicamente, tornar o atendimento aos consumidores de modo confiável e com qualidade, permitindo a execução de intercâmbio entre áreas em função de interesses mútuos (falta ou excesso de recursos energéticos), principalmente, quando se trata de sistemas fortemente hidrelétricos - caso típico do sistema brasileiro. Entretanto, o funcionamento destes sistemas tem se tornado bastante complexo, tendo em vista, principalmente, seu comportamento não-linear, a aleatoriedade da demanda e os defeitos que são eventos de natureza endêmica.

Genericamente pode-se considerar como defeito ou falta em SEE toda perturbação voluntária ou não que proporcione modificação no seu estado de equilíbrio.

O comportamento não-linear exige permanente monitoração do desempenho do sistema frente à ocorrência de defeitos. Nos casos instáveis ou havendo violação dos limites de capacidade dos equipamentos, faz-se necessária a adoção de medidas que possibilitem conduzir o sistema ao estado seguro. Esta atividade é definida na literatura como CONTROLE PREVENTIVO ou CONTROLE DE SEGURANÇA.

Para a realização do controle preventivo dinâmico, é necessário, *a priori*, analisar a estabilidade transitória do sistema, a qual pode ser efetuada, por exemplo, através da solução numérica das equações diferenciais que descrevem o movimento do sistema e, posteriormente, pelo exame da solução obtida (curvas de oscilação das máquinas) - chamada simulação dinâmica do sistema. As técnicas para simulação são precisas e não apresentam restrições quanto ao tipo do modelo a ser utilizado. Exigem, porém, a participação de um especialista



no processo, o que eleva consideravelmente o tempo de análise. Além disso, não é fácil de se determinar quão estável / instável é o sistema associado à contingência sob avaliação. Por outro lado, o método direto de Liapunov (MDL) permite que se analise a estabilidade de modo sistematizado - com tempo de cálculo competitivo e com resultados considerados satisfatórios quando se tratar do modelo clássico ([36]). Para modelos mais elaborados os resultados são, ainda, *s.m.j.*, pouco expressivos.

Deste modo, este trabalho terá seu desenvolvimento baseado no MDL com função de Liapunov tipo energia. O MDL representa, no momento, talvez a única técnica que pode proporcionar uma base para o desenvolvimento de uma metodologia para o controle preventivo dinâmico. A função energia será utilizada como forma de se inferir o grau de estabilidade do sistema, através do emprego de um critério definido como margem de segurança ([17], [34]). A margem de segurança, associada a uma determinada contingência, pode ser interpretada como sendo uma "medida" da distância que o estado do sistema se encontra em relação à condição de instabilidade.

Os métodos para o controle preventivo dinâmico surgiram há pouco menos de dez anos, sendo que o número de publicações disponíveis é ainda pequeno ([5], [7], [8], [14], [15], [16], [19] - [21], [30], [41], [44], [46], [47]. Algumas referências encontradas na literatura técnica estão relacionadas e discutidas a seguir.

As técnicas baseadas em redespacho de geração são as seguintes: [7], [8], [14], [19], [20], [27], [30], [41], [44]. O redespacho de geração, especificamente, não está sendo tratado neste trabalho.

Trabalhos que utilizam ação tipo corte de carga que consideram os efeitos dos transitórios eletromecânicos, *s.m.j.*, não são encontrados na literatura.

A formulação do problema do controle preventivo baseado no controle de excitação é tratada nas referências [5] e [41]. Na referência [5] a solução proposta foi desenvolvida,



através de análise de sensibilidade, considerando o modelo clássico e preservação topológica da rede elétrica. A proposta apresentada na referência [41] utiliza, basicamente, os seguintes itens: função de Liapunov tipo energia avaliada supondo caminho de integração linear, de acordo com a proposição de Athay et. al. [3]; energia cinética baseada em um equivalente, composto por uma máquina síncrona contra barra infinita; determinação da energia crítica considerando pontos de equilíbrio instáveis ([9] - [11]). O cálculo da sensibilidade é efetuado considerando parâmetros associados a um conjunto de máquinas pré-definidas. A obtenção da sensibilidade com relação a cada parâmetro requer, além de outros cálculos, a inversão de uma matriz de ordem n . Por conseguinte, este procedimento torna-se oneroso caso deseje-se utilizar alterações com relação a todos os componentes do vetor que compõem a ação de controle e um conjunto de contingências.

Controle estrutural do sistema de transmissão é tratado nos trabalhos [15], [16], [41], [46] e [47]. As propostas apresentadas nas referências [15] e [16] não utilizam a análise de sensibilidade. São baseadas em técnicas heurísticas de determinação de estratégias de expansão do sistema de transmissão. O controle estrutural proposto na referência [46] segue o mesmo esquema adotado na [41]. Nestes dois trabalhos as previsões de mudança na matriz de admitância reduzida às barras internas são baseadas em fatorações matriciais utilizando o teorema de Householder ([33]), que apresenta um custo computacional relativamente alto. O esquema sugerido na referência [46] trata-se de uma formulação bastante interessante, porém, apresenta problemas na obtenção da sensibilidade das matrizes de admitâncias reduzidas às barras internas com relação às impedâncias do sistema de transmissão, ou seja, são formas aproximadas e de custo computacional elevado (baseadas na utilização de fórmulas de interpolação de Lagrange).

Em vista disto, este trabalho visa desenvolver modelos alternativos para o controle preventivo levando-se em conta os aspectos dinâmicos da rede, ou seja - os efeitos provocados por perturbações que causam oscilações acentuadas nos



ângulos das máquinas síncronas (estabilidade transitória) – e.g., saída de equipamentos elétricos, curto-circuito, etc. O Controle Preventivo, associado ao problema da estabilidade eletromecânica, é chamado CONTROLE PREVENTIVO DINÂMICO ([30], [44]). Utilizar-se-á ações de controle consideradas eficientes em análise de segurança e ainda pouco exploradas, e.g., CORTE DE CARGA, ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO e CONTROLE DA EXCITAÇÃO, as quais são essenciais para a operação, assim como para o planejamento de SEE ([15], [16], [32]). Tais modelos serão desenvolvidos tomando-se como base a metodologia proposta nas referências [20] e [30].

Serão, então, desenvolvidos os modelos que estabelecem as variações da margem de segurança do sistema em função das variações nas ações de controle ora mencionadas, sem ater-se aos procedimentos de determinação de suas magnitudes para cada problema específico. Ou seja, as soluções pertinentes poderão ser determinadas através de um problema de otimização convencional comumente abordado na literatura. O objetivo é, por conseguinte, proporcionar aos usuários um conjunto de modelos que levem em consideração os aspectos dinâmicos da rede.

Este texto encontra-se assim organizado: No Capítulo 2 apresenta-se o modelo do sistema – modelo clássico com variáveis de estado referidas ao centro de ângulos e redução às barra internas de geração. No Capítulo 3 apresenta-se um critério de análise de estabilidade transitória – via margem de segurança do sistema – baseado no conceito de energia total do sistema. No Capítulo 4 é apresentada a formulação do problema do controle preventivo considerando-se uma ação de controle genérica. Apresentam-se nos Capítulos 5, 6 e 7 a formulação do controle preventivo utilizando-se ações de controle, respectivamente, o corte de carga, mudança de impedância do sistema de transmissão (inclusão / remoção de linhas de transmissão, emprego de FACTS (*Flexible AC Transmission System*), compensador estático, capacitor série controlado) e modificação do perfil de tensões nodais (laço reativo). No Capítulo 8, apresentar-se-á um procedimento heurístico para se estabelecer a alteração máxima permissível dos



modelos linearizados. A solução final do problema poderá, então, ser determinada através de sucessivas linearizações até atingir o objetivo proposto. Finalmente, no Capítulo 9 apresentam-se a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

1.1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se o contexto da pesquisa e o objetivo do trabalho. O trabalho tem como objetivo principal a obtenção de uma solução ótima para um problema de programação linear, considerando as restrições e o objetivo da função.

A programação linear é uma técnica matemática utilizada para a otimização de recursos. Ela consiste em encontrar o valor máximo ou mínimo de uma função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições lineares. Este trabalho apresenta a aplicação da programação linear em um contexto específico, demonstrando a eficácia da técnica na resolução de problemas complexos. A metodologia utilizada envolve a formulação do problema em termos de programação linear, a escolha de um método de solução adequado e a implementação do algoritmo em um software especializado. Os resultados obtidos mostram que a programação linear é uma ferramenta poderosa para a otimização de recursos, permitindo a obtenção de soluções ótimas de forma eficiente e confiável.



MODELO DO SISTEMA

2.1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo o modelo dinâmico do sistema, para fins de estudo da estabilidade transitória, representado pelo modelo clássico, cujo estado encontra-se referido ao centro de ângulos. As cargas elétricas são consideradas como impedâncias constantes, permitindo, por conseguinte, reduzir o sistema às barras internas de geração.

A análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica pode ser efetuada, por exemplo, através da solução numérica das equações diferenciais não-lineares, que descrevem o movimento do sistema (simulação). Este procedimento não apresenta restrições quanto à qualidade do modelo analisado, contudo, o tempo que transcorre na execução da análise é consideravelmente alto. Um procedimento alternativo consiste em combinar o uso da simulação com algum método direto de análise, *e.g.*, o Método Direto de Liapunov (MDL). Neste caso, o MDL é empregado como um "filtro" dos casos mais críticos e a análise conclusiva poderá, então, ser efetuada via simulação. O MDL é um procedimento sistemático que apresenta resultados confiáveis, precisos e com tempo de cálculo muito inferior à simulação, quando se considera o modelo clássico ([36]). Para modelos mais elaborados não existem ainda, *s.m.j.*, resultados mais concretos. Porém, a literatura tem relatado esforços neste sentido. Espera-se a curto e médio prazos, poder dispor-se de técnicas de análise que levem em conta modelos mais realistas. Em vista disto, será adotado neste trabalho o modelo clássico.

Uma das suposições de sustentação do emprego do modelo clássico refere-se a consideração das cargas do sistema, representadas por impedâncias constantes, permitindo, desta forma,



"eliminar" todas as barras de cargas, resultando em um modelo reduzido às barras internas de geração. Neste caso, pode-se expressar a potência elétrica em função somente das interações entre as máquinas síncronas. Estas interações podem ser tratadas, basicamente, preservando-se a topologia da rede e, ainda, através da redução às barras internas de geração. Vários trabalhos foram desenvolvidos tratando o problema via preservação da topologia da rede, tanto em análise ([4], [17], [18],) como na correção de segurança ([5], [7], [8], [15], [20], [21], [30]). Neste trabalho, adotar-se-á o modelo reduzido às barras internas de geração tendo em vista a maior simplicidade do equacionamento e, principalmente, a determinação das matrizes de admitâncias nodais reduzidas (sob falta e pós-falta), de modo simples e rápido, se comparada à abordagem via preservação da topologia.

O modelo do sistema expresso em função de ângulos / velocidades, referidos ao centro de ângulos, constitui-se, *s.m.j.*, na melhor formulação quando se consideram as condutâncias de transferências (representação do efeito das perdas e cargas ativas do sistema no modelo reduzido), pois durante o transitório eletromecânico, cada máquina síncrona absorve as variações da carga total do sistema proporcionalmente às suas inércias. Esta representação é, certamente, mais pausável do ponto de vista físico.

Com estas considerações, a combinação da análise e controle de segurança dinâmica poderá ser implementada com tempo de cálculo competitivo e com resultados que podem ser considerados satisfatórios ([30]).

2.2. MODELO DO SISTEMA REFERIDO AO CENTRO DE ÂNGULOS

A equação diferencial não-linear que descreve a dinâmica da i -ésima máquina síncrona de um SEE (Sistema de Energia Elétrica) composto por n -máquinas síncronas (modelo clássico), pode ser expressa por ([2], [34], [36]):



$$\dot{\delta}_i = \omega_i$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}, \quad i \in N \quad (2.2.1)$$

sendo:

$$M_i = H_i / \pi f_0$$

$$H_i \triangleq \text{constante de inércia } (\Delta)$$

$$f_0 \triangleq \text{frequência nominal do sistema (Hertz)}$$

$$\delta_i \triangleq \text{posição angular da máquina síncrona medida com relação a um eixo que gira à velocidade síncrona (rad. elet.)}$$

$$\omega_i \triangleq \text{desvio de velocidade angular da máquina síncrona com relação à velocidade síncrona (rad. elet./\Delta)}$$

$$P_{mi} \triangleq \text{potência mecânica de entrada (pu)}$$

$$P_{ei} \triangleq \text{potência elétrica entregue pela máquina (pu)}$$

$$= \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} (B_{ij} F_{ij} + G_{ij} H_{ij}) + E_i^2 G_{ii} \quad (2.2.2)$$

$$F_{ij} \triangleq E_i E_j \sin \delta_{ij}$$

$$H_{ij} \triangleq E_i E_j \cos \delta_{ij}$$

$$E_i \triangleq \text{tensão interna da } i\text{-ésima máquina síncrona (pu)}$$

$$G_{ij} \triangleq \text{condutância de transferência}$$

$$B_{ij} \triangleq \text{susceptância de transferência}$$

$$\delta_{ij} \triangleq \delta_i - \delta_j$$

$$N = \{ 1, 2, \dots, n \} \triangleq \text{conjunto de índices das máquinas síncronas que compõem o sistema.}$$

O ponto sobre as variáveis do sistema de equações (2.2.1) representa o operador diferencial (d/dt), sendo:

$$t = \text{tempo } (\Delta).$$

No modelo (2.2.1) é desprezado o efeito de amortecimento.



A equação de potência elétrica (2.2.2) encontra-se expressa em função dos parâmetros G_{ij} e B_{ij} que são a parte real e imaginária, respectivamente, do (i,j) - ésimo elemento da matriz de admitância nodal do sistema reduzida às barras internas de geração. A obtenção destes elementos será tratada na seção (2.3).

Considerando-se que as condutâncias de transferência são preservadas no modelo, é conveniente adotar-se o CA (Centro de Ângulos) como referência do sistema.

Desta forma, o modelo poderá ser expresso por ([3], [5], [15], [17], [18], [20] - [22], [27], [30], [32]):

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_i &= \omega_i \\ M_i \dot{\omega}_i &= g_i(\theta), \quad i \in N\end{aligned}\quad (2.2.3)$$

sendo:

$$g_i(\theta) \triangleq P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{MT} PCA \quad (2.2.4)$$

$$\theta_i \triangleq \text{posição angular da } i\text{-ésima máquina síncrona referida ao CA (rad. elet.)}$$

$$= \delta_i - \delta_0$$

$$\delta_0 \triangleq MT^{-1} \sum_{i \in N} M_i \delta_i$$

$$\dot{\theta}_i \triangleq \text{velocidade angular da máquina referida ao CA}$$

$$= \omega_i$$

$$= \omega_i - \omega_0 \text{ (rad. elet./}\Delta\text{)}$$

$$\omega_0 \triangleq MT^{-1} \sum_{i \in N} M_i \omega_i$$

$$\theta_{ij} \triangleq \theta_i - \theta_j$$

$$PCA \triangleq \text{potência acelerante do CA}$$

$$= \sum_{j \in N} (P_{mj} - P_{ej})$$

$$MT \triangleq \sum_{j \in N} M_j$$



O modelo (2.2.3), referido ao centro de ângulos, possui as propriedades a seguir relacionadas.

PROPRIEDADE 1. O somatório do produto da inércia e ângulo (referido ao CA) de todas as máquinas síncronas que compõem o sistema é igual a zero ([34]), ou seja,

$$\sum_{j \in N} M_j \theta_j = 0. \quad (2.2.5)$$

PROPRIEDADE 2. O somatório do produto da inércia e velocidade angular (referida ao CA) de todas as máquinas síncronas que compõem o sistema é igual a zero ([34]), ou seja,

$$\sum_{j \in N} M_j \dot{\theta}_j = 0. \quad (2.2.6)$$

A demonstração das Propriedades 1 e 2 encontra-se na referência ([30]).

Da Propriedade 1 conclui-se que os ângulos θ_i 's são linearmente dependentes. O mesmo ocorre com relação às velocidades ω_i 's (equação 2.2.6). Portanto, o conhecimento de $2(n-1)$ variáveis de estado permite o cálculo das duas variáveis restantes usando-se as equações (2.2.5) e (2.2.6).

PROPRIEDADE 3. A potência acelerante do centro de ângulos, avaliada nos pontos de equilíbrio é nula ([34]).

Esta propriedade é equivalente à formulação convencional do cálculo de fluxo de potência, ou seja:

$$(P_m - P_e) = 0. \quad (2.2.7)$$



A PCA é diferente de zero quando houver deslocamento do estado do sistema em torno do ponto de equilíbrio, i.e., durante as oscilações eletromecânicas.

2.3. REDUÇÃO ÀS BARRAS INTERNAS DE GERAÇÃO

Considerando-se defeitos tipo curto-circuito seguidos da perda de linha de transmissão, para cada contingência analisada, será necessário o cálculo de duas Matrizes de Admitância Reduzidas (MAR) às Barras Internas de Geração, correspondentes às configurações de falta (aplicação do curto-circuito) e pós-falta (eliminação do curto-circuito) com retirada de linha de transmissão. Tendo em vista a elevada dimensão dos atuais Sistemas de Energia Elétrica e a grande quantidade de defeitos a serem analisados, o custo computacional para se determinar tais matrizes é efetivamente grande, pois envolve inversão de matrizes, ou processo similar, entre outras operações matriciais.

Na referência [43] os autores apresentam uma técnica para o cálculo das MAR usando fatoração LDU da matriz de admitância de barra pré-falta (não reduzida) e substituições direta e inversa. Neste caso, o tempo de cálculo tem sido inferior, se comparado ao método convencional.

Apresenta-se a seguir um procedimento simples, exato e rápido para o cálculo das MAR. A inversão de matrizes será efetuada utilizando-se o método apresentado na referência [28], o qual utiliza expansão por série infinita de potências. O tempo de cálculo é inferior a 3% do procedimento convencional, com redução ainda maior para sistema de grande porte. Os cálculos poderiam ser conduzidos, também, e.g., através do uso do lema de inversão de matrizes ([33]).

O resultado deste trabalho será útil, ainda, na análise de sensibilidade, como forma de se estimar os efeitos na estabilidade transitória procedentes de alterações nos parâmetros do sistema de transmissão ([15], [16]).



A matriz de admitância nodal reduzida às barras internas (Y_{red}), referente à configuração pré-falta, pode ser determinada por ([2]):

$$Y_{red}^a = Y_{gg}^a - Y_{gl}^a Z^a Y_{lg}^a \quad (2.3.1)$$

sendo: o superscrito (a) denota a configuração pré-falta. As sub-matrizes Y_{gg} , Y_{gl} , Y_{lg} e Y_{barra} correspondem às partições da matriz de admitância de barra do sistema incluídas as barras internas de geração ($\hat{Y}_{barra}$):

$$\hat{Y}_{barra} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & \vdots & Y_{gl} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{lg} & \vdots & Y_{barra} \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

sendo:

$$Z = [\hat{Y}_{barra}]^{-1} \quad (2.3.3)$$

Y_{barra} = matriz de admitância de barra com inclusão das admitâncias "shunt" equivalentes das cargas (modelo - impedância constante)

$$= A^T Y A + \text{Diag} (Y_{li}, i = 1, 2, \dots, M)$$

A Δ = matriz de incidência (elemento - nó)

$$A = [a_{ij}] \left\{ \begin{array}{l} a_{ij} = +1, \text{ se o elemento de índice } i \text{ é incidente} \\ \text{em relação ao nó } j \text{ e está orientado a} \\ \text{partir deste nó;} \\ a_{ij} = -1, \text{ se o elemento de índice } i \text{ é incidente} \\ \text{em relação ao nó } j \text{ e está orientado em} \\ \text{relação a este nó;} \\ a_{ij} = 0, \text{ se o elemento de índice } i \text{ não for} \\ \text{incidente em relação ao nó } j. \end{array} \right.$$

Y $\triangleq$ matriz de admitância primitiva

Y_{Li} = admitância *shunt* equivalente da i -ésima barra de carga
 $= (P_{Li} - j Q_{Li}) / V_{Li}^2$

P_{Li} , Q_{Li} , e V_{Li} = potência ativa, potência reativa e tensão da i -ésima barra de carga, respectivamente

M = número de barras do sistema.

Os subscritos (g) e (l) representam os índices relativos às barras de geração e de carga, respectivamente.

A matriz Y_{red}^a dada pela equação (2.3.1) pode ser determinada, modernamente, utilizando-se os conceitos de esparsidade e técnicas de processamento paralelo, como forma de reduzir o armazenamento de informações e tempo de cálculo.

2.3.1. CÁLCULO DA MATRIZ DE ADMITÂNCIA REDUZIDA - CONDIÇÃO PÓS-FALTA

Considera-se nesta análise, como condição pós-falta, a saída de uma linha de transmissão definida por $k(r,s)$. Ressalta-se que as sub-matrizes Y_{gg} , Y_{gl} e Y_{lg} são independentes da mudança dos parâmetros do sistema de transmissão. Então, a matriz Y_{red}^p será dada por:

$$Y_{red}^p = Y_{gg}^a - Y_{gl}^a Z^p Y_{lg}^a \quad (2.3.1.1)$$

sendo:

$k(r,s)$ = linha de transmissão k com nós terminais r e s . O superscrito (p) refere-se a configuração pós-falta.

Adaptando-se o método apresentado em [28] (inversão da matriz de susceptância de barra através de expansão por série de Taylor), pode-se expressar Z^p , em função dos parâmetros da topologia pré-falta, da seguinte forma:



$$Z^p = Z^a + \Delta Z \quad (2.3.1.2)$$

sendo:

$$\Delta Z = \sum_{\alpha=1}^{\infty} \frac{\partial^{\alpha} Z^a}{\partial Yk^{\alpha}} (-Yk)^{\alpha} / \alpha! \quad (2.3.1.3)$$

em que:

Yk = admitância da linha de transmissão k a ser removida.

A partir da equação (2.3.1.3) pode-se definir as derivadas parciais de Z com relação ao parâmetro Yk da seguinte forma ([28]):

$$\partial^{\alpha} Z^a / \partial Yk^{\alpha} = (-1)^{\alpha} \alpha! Z^a \lambda k^{\alpha-1} Z^a m_k m_k^T Z^a \quad (2.3.1.4)$$

Substituindo-se (2.3.1.4) em (2.3.1.3), obtém-se:

$$\Delta Z = b k^a Z^a m_k m_k^T Z^a \quad (2.3.1.5)$$

sendo:

m_k = k - ésima coluna da matriz A^T

$b k^a$ = $Yk / (1 - Yk \lambda k^a)$

em que:

λk^a = $z_{rr}^a + z_{ss}^a - 2 z_{rs}^a$

z_{ij}^a = (i, j) - ésimo elemento da matriz Z^a .

Efetuando-se as operações indicadas na equação (2.3.1.5), substituindo-se o resultado obtido em (2.3.1.2) e posteriormente em (2.3.1.1), obtém-se:

$$Y_{red}^{p i j} = [-j \delta_{ij} X d' j + z_{ij}^p] / (X' d_i X' d_j) \quad (2.3.1.6)$$



sendo:

$$z_{ij}^p = z_{ij}^a + b k^a (z_{ir}^a - z_{is}^a) (z_{jr}^a - z_{js}^a) \quad (2.3.1.7)$$

$X'di$ = reatância transitória de eixo direto

$j \triangleq$ operador $\sqrt{-1}$

$\delta_{ij} \triangleq$ delta de Kronecker

$$= \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases}$$

2.3.2. CÁLCULO DA MATRIZ DE ADMITÂNCIA REDUZIDA - CONDIÇÃO DE FALTA

Os seguintes resultados analíticos serão desenvolvidos considerando-se um curto-circuito trifásico sólido em uma barra de índice β . A matriz Y_{red}^f para a configuração sob-falta pode ser expressa por:

$$Y_{red}^f = Y_{gg}^a - Y_{gl}^a Z^f Y_{lg}^a \quad (2.3.2.1)$$

sendo:

o superscrito (f) representa a condição sob-falta.

A matriz Z^f pode ser avaliada a partir de Z^a , supondo-se a aplicação de uma admitância infinita do nó β para a terra. Em vista disto, os elementos da matriz Z^f podem ser calculados de modo semelhante utilizando-se a equação (2.3.1.4):

$$Z^f = Z^a + b\beta^a Z^a m_\beta m_\beta^T Z^a \quad (2.3.2.2)$$

sendo:

$$b\beta^a = Y_\beta / (1 - Y_\beta \lambda_\beta^a)$$



Y_{β} = admitância paralela introduzida da barra β para a terra

$$\lambda_{\beta}^a = z_{\beta\beta}^a$$

m_{β} = vetor cujos elementos são zeros, exceto o β -ésimo elemento que é igual a 1.

Efetuada-se as operações matriciais indicadas na expressão (2.3.2.2) e, levando-se em conta que a admitância Y_{β} (curto-circuito sólido) é infinita, assim, os elementos de Z^f podem ser calculados, em função de Z^a , através da seguinte expressão:

$$z_{ij}^f = z_{ij}^a - z_{i\beta}^a z_{\beta j}^a / z_{\beta\beta}^a \quad (2.3.2.3)$$

Substituindo-se (2.3.2.3) em (2.3.2.1), obtém-se Y_{red}^f da seguinte forma:

$$Y_{red}^f{}_{ij} = [-j \delta_{ij} X_{d'j} + z_{ij}^f] / (X'_{di} X'_{dj}) \quad (2.3.2.4)$$

sendo:

os parâmetros z_{ij}^f são determinados através da equação (2.3.2.4).

É importante ressaltar que as equações (2.3.1.6) e (2.3.2.4) são expressões exatas para o cálculo de Y_{red}^p e Y_{red}^f , respectivamente.

2.3.3. EXPRESSÃO GERAL

Considerando-se os resultados acima, pode-se estabelecer, após rearranjo, as seguintes equações gerais para o



cálculo das matrizes de admitância nodal reduzidas:

$$Y_{red} \triangleq [Y_{redij}] = \begin{cases} (z_{ij}^a + \psi_{ij} - j X'd_i) / X'd_i^2, & i = j \\ (z_{ij}^a + \psi_{ij}) / (X'd_i X'd_j), & i \neq j \end{cases} \quad (2.3.3.1)$$

sendo que o parâmetro ψ_{ij} vale:

■ CONFIGURAÇÃO PÓS-FALTA (SAÍDA DA LINHA DE TRANSMISSÃO k)

$$\psi_{ij} = Y_k^a (z_{ir}^a z_{jr}^a + z_{is}^a z_{js}^a - z_{is}^a z_{jr}^a - z_{ir}^a z_{js}^a) / (1 - Y_k \lambda k^a) \quad (2.3.3.2)$$

■ CONFIGURAÇÃO DE FALTA (CURTO-CIRCUITO NA BARRA β)

$$\psi_{ij} = - z_{i\beta}^a z_{j\beta}^a / z_{\beta\beta}^a \quad (2.3.3.3)$$

Então, as matrizes Y_{red}^p e Y_{red}^f podem ser calculadas de forma simples e exatas, através das equações acima e não necessitam ser armazenadas. Este procedimento tem proporcionado soluções precisas e rápidas. O tempo de cálculo é inferior a 3% do procedimento convencional, com redução ainda maior para sistemas de grande porte.

As expressões (2.3.3.1) - (2.3.3.3) serão, também, úteis no desenvolvimento do modelo de sensibilidade apresentado no Capítulo 6 (Controle Preventivo Dinâmico Através de Mudança Topológica da Rede Elétrica).

2.4. CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o modelo dinâmico do sistema (modelo clássico), cujo estado encontra-se



referido ao centro de ângulos. As interações entre as máquinas síncronas foram estabelecidas considerando-se as matrizes de redes (admitâncias de barras) reduzidas às barras internas de geração. Foi apresentado um esquema de determinação das matrizes reduzidas, referentes às configurações de falta e pós-falta, respectivamente, bastante eficiente (rapidez e precisão), se comparado aos procedimentos convencionais. Os resultados destas matrizes serão, ainda, utilizados no desenvolvimento do modelo de sensibilidade o qual será tratado no Capítulo 6 – Controle Preventivo Dinâmico Através de Alterações Estruturais do Sistema de Transmissão.



ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

3.1 INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica consiste em avaliar os efeitos procedentes de perturbações (contingências) que causem grandes e indesejáveis oscilações nos ângulos dos geradores (síncronos) de energia. Esta análise pode ser efetuada através da solução numérica (simulação) das equações diferenciais não-lineares que descrevem o comportamento dinâmico do sistema e, posteriormente, pelo exame da evolução da posição angular de cada máquina síncrona ao longo do tempo. Uma forma alternativa consiste em obter um diagnóstico sem a resolução destas equações. Neste contexto, encontra-se o Método Direto de Liapunov (MDL), cujos resultados têm sido confiáveis, com boa precisão e com tempo de cálculo bastante inferior à simulação, quando se emprega o Modelo Clássico, como já argumentado no Capítulo 2.

Neste capítulo apresenta-se um critério de análise de estabilidade transitória, utilizando-se como função de Liapunov, a Função Energia total do sistema.

3.2. FUNÇÃO ENERGIA

O diagnóstico da estabilidade transitória de um Sistema de Energia Elétrica, considerando uma contingência de índice n , pode ser feito utilizando o critério da Margem de Segurança ([5], [15], [16], [17], [20], [21], [30], [31], [36]):

$$M_n \triangleq (E_{critn} - E_{en}) / E_{critn} \quad (3.2.1)$$

sendo:

E_{critn} = Energia crítica total do sistema



E_{er} = Energia total do sistema avaliada no instante de eliminação do defeito (t_e).

A Margem de Segurança (3.2.1) associada à n -ésima contingência pode ser interpretada como sendo uma "medida" da distância em relação à condição de instabilidade do sistema ([30]):

CONSIDERAÇÃO 1. Considera-se como contingência, neste trabalho, o curto-circuito trifásico equilibrado, seguido pela retirada do elemento (componente) do sistema sob falta.

O conceito energia para o diagnóstico da estabilidade transitória pode ser empregado mediante o critério da margem de segurança ([17]):

■ se $M_n > (\geq) 0$, o SEE sujeito à n -ésima contingência é considerado estável (instável) do ponto de vista da estabilidade transitória.

Ressalta-se que quando são consideradas as condutâncias de transferência, o segundo membro das equações (2.2.3) não se caracteriza como força potencial, conseqüentemente, não será possível determinar uma função Energia Potencial do Sistema. Porém, por abuso de linguagem, o termo ENERGIA TOTAL DO SISTEMA será utilizado sempre que houver referência à função tipo energia.

Por conseguinte, a energia total do sistema para o modelo (2.2.3), pode ser expressa por ([17], [34]):

$$E(\theta, \omega) = E_c(\omega) + E_p(\theta) \quad (3.2.2)$$

sendo:

$$\begin{aligned} E_c(\omega) &\triangleq \text{energia cinética} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i \in N} M_i \omega_i^2 \end{aligned} \quad (3.2.3)$$



$E_p(\theta)$ Δ energia potencial

$$= - \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i \quad (3.2.4)$$

O superscrito (p) denota o estado de equilíbrio pós-defeito.

Considerando-se a definição (2.2.4), a energia total pode ser expressa por ([30]):

$$E(\theta, \omega) = E_C(\omega) - \sum_{i \in N} P_{mi} (\theta_i - \theta_i^p) + \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{ei}(\theta) d\theta_i + \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} (M_i/MT) PCA d\theta_i \quad (3.2.5)$$

A integral de PCA (quarto termo da equação (3.2.5)) pode ser expressa por:

$$\sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} (M_i/MT) PCA d\theta_i = (PCA/MT) \int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_{i \in N} M_i \omega_i \right] dt \quad (3.2.6)$$

Da propriedade 2 (equação 2.2.6) pode-se concluir que a integral (3.2.6) é nula, isto porque

$$\sum_{i \in N} M_i \omega_i = 0 .$$

Deste modo, pode-se concluir que a função energia total (3.2.5) é independente de PCA.

Como mencionado anteriormente, quando desconsideram-se as condutâncias de transferência, a integral (3.2.4) é dependente do caminho de integração. Portanto, para que



esta seja avaliada é preciso, *a priori*, se conhecer a trajetória de evolução do sistema durante o transitório eletromecânico. Em vista disto, pode-se adotar, basicamente, uma das três alternativas a seguir relacionadas ([30]).

- (i) Desconsiderar as condutâncias de transferência no modelo (2.2.3). Isto implica na inclusão de erro na solução encontrada. O erro é crescente com o aumento da demanda do sistema. Neste caso, para tornar o modelo consistente, são necessários alguns ajustes no mesmo, para, deste modo, restabelecer a condição de equilíbrio do sistema ([35]), através da correção na potência mecânica de entrada. Alternativamente, esta potência poderá ser mantida constante, porém, será necessário calcular um novo ponto de equilíbrio do sistema sem condutâncias de transferência;
- (ii) adotar formas aproximadas para a referida integral, tomando a função (3.2.4) integral;
- (iii) avaliar a integral à medida que se conhece a evolução dos ângulos e velocidades das máquinas síncronas ([17], [34]). O caminho de integração entre dois pontos quaisquer sobre a trajetória do sistema é, então, conhecido. Portanto, a integral será facilmente determinada, *e.g.*, utilizando-se a regra trapezoidal.

A alternativa (iii) será adotada neste trabalho, pois não é introduzido erro na solução, a não ser de aproximações numéricas.

A função energia definida pelas equações (2.2.2) - (3.2.4), tem sido tratada na literatura como uma função de Liapunov do sistema (2.2.3) ([3], [17], [30], [34]).

A análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica, via uso da função energia total do sistema (3.2.2) e margem de segurança (3.2.1) pode ser efetuada, combinando-se o Método Direto de Liapunov e a resolução das equações diferenciais, considerando-se defeitos tipo



curto-circuito com saída de operação de linha de transmissão. Neste caso, a análise da estabilidade é efetuada comparando-se a energia adquirida durante o transitório com uma energia crítica. A energia crítica corresponde à máxima energia que o sistema pode acumular, tal que, sua estabilidade seja preservada. Neste trabalho, a energia crítica e, conseqüentemente, o tempo crítico serão determinados baseados no conceito de Superfície Limite de Energia Potencial ([3], [17]) – em inglês: *Potential Energy Boundary Surface* – cujo algoritmo empregado corresponde ao apresentado na referência [17]. Este algoritmo tem sido adotado, neste trabalho, por ser a precisão comparável à simulação com custo computacional consideravelmente inferior.

DEFINIÇÃO 1. DERIVADA DIRECIONAL DA ENERGIA POTENCIAL. Define-se derivada direcional da energia potencial (3.2.3) como sendo ([3], [17], [30]):

$$D(\theta) = - \frac{1}{\|\theta - \theta^P\|_e} \langle g(\theta), (\theta - \theta^P) \rangle \quad (3.2.4)$$

sendo:

$$g(\theta) = [g_1(\theta) \ g_2(\theta) \ \dots \ g_n(\theta)]^T$$

$$\|\cdot\| = \text{norma Euclidiana.}$$

DEFINIÇÃO 2. Define-se SUPERFÍCIE LIMITE DE ENERGIA POTENCIAL (SLEP) ([3], [17], [30]) os pontos correspondentes aos zeros da derivada direcional (3.2.4), excetuando o ponto de equilíbrio estável do sistema.

Nota-se que a SLEP representa os pontos dos máximos direcionais da energia potencial, que circundam o ponto de equilíbrio estável ([30]).

PROPRIEDADE 4. A derivada direcional $D(\theta)$ possui a propriedade de manter-se SEMPRE POSITIVA PARA TRAJETÓRIAS ESTÁVEIS ([3], [17], [30]).



A partir da propriedade 4 conclui-se que a monitoração da derivada direcional $D(\theta)$ pode ser utilizada como um critério de avaliação da estabilidade transitória do sistema e, em particular, na determinação da energia e tempo críticos do sistema para faltas tipo curto-circuito.

Por conseguinte, o procedimento de determinação da energia e tempo críticos apresentado na referência [17] consiste na busca de um ponto na trajetória sob falta, por processo iterativo, tal que, a evolução pós-falta, que começa neste ponto, encontre a máxima aproximação com a Superfície Limite de Energia Potencial. A referência [31] é uma adaptação do SLEP iterativo ([17]), versão para microcomputadores, com modelo da rede reduzida às barras internas de geração. O programa é auto-explicativo. Permite a construção de banco de dados com instruções e dispositivos para críticas, evitando-se deste modo, a inclusão de dados errôneos ou incompatíveis, e conseqüentemente, interrupção do processamento. O relatório de saída apresenta um resumo dos principais resultados e uma tabela contendo a energia crítica, o tempo crítico e a margem de segurança para cada contingência. Durante o processamento o usuário poderá acompanhar, através do monitor, os principais cálculos efetuados, em destaque o processo iterativo referente à determinação da energia / tempo críticos. Isto permite ao usuário a tomada de decisão para eventual correção do perfil de segurança do sistema através do redespacho de geração, corte de carga, mudança dos níveis de tensão nos barramentos do sistema, etc.

Considerando-se um conjunto de contingências analisadas, a margem de segurança permite destacar aquelas mais severas, de acordo com a ordenação das mesmas por ordem crescente de seus valores, sendo, portanto, um índice de desempenho do sistema referente aos transitórios eletromecânicos ([17], [30]).

Em função disto, é conveniente apresentar as seguintes definições:

DEFINIÇÃO 3. MARGEM DE SEGURANÇA DO SISTEMA. Margem de segurança do sistema é definida como sendo ([30]):



$$M \triangleq \min_n \{M_n\} \quad (3.2.5)$$

DEFINIÇÃO 4. CONTINGÊNCIA CRÍTICA. Define-se contingência crítica aquela contingência em que o sistema apresenta margem de segurança inferior a um valor mínimo permissível (M_{min}).

A avaliação da estabilidade pode ser determinada, também, através de outros procedimentos encontrados na literatura. Por exemplo, utilizando o conceito de ponto de equilíbrio instável de interesse ([9] - [11]), que é um procedimento moderno de determinação da energia crítica e, ainda, através do critério da igualdade de áreas estendido ([42] - [45]), que embora tenha apresentado resultados bastantes imprecisos, é muito utilizado em análise de estabilidade.

Considerando-se um conjunto de contingências analisadas, a margem de segurança permite destacar aquelas mais severas, de acordo com a ordenação das mesmas por ordem crescente de seus valores, sendo, portanto, um índice de desempenho do sistema referente aos transitórios eletromecânicos ([17], [30]).

3.3. CONCLUSÃO

Foi apresentado neste capítulo um critério de análise da estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica baseado no uso da função energia total do sistema. Estes conceitos e resultados serão a base para o desenvolvimento dos modelos alternativos de controle de segurança dinâmica a serem apresentados nos Capítulos 5, 6 e 7.



O PROBLEMA DO CONTROLE PREVENTIVO DINÂMICO

4.1. INTRODUÇÃO

O controle preventivo dinâmico pode ser entendido como sendo toda a ação preventiva implementada no sistema que resulte na atenuação dos efeitos, do ponto de vista dos transitórios eletromecânicos, provocados por perturbações que freqüentemente ocorrem em Sistemas de Energia Elétrica.

Apresenta-se, a seguir, a formulação do problema do controle preventivo dinâmico baseado no critério da margem de segurança do sistema. Será apresentado um modelo incremental da margem de segurança utilizando-se a análise de sensibilidade, com relação a uma ação de controle genérica, que posteriormente será adaptada para as várias ações de controle que serão abordadas nos Capítulos 5, 6 e 7, correspondentes ao corte de carga, mudança estrutural da rede elétrica e laço reativo, respectivamente.

4.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para uma dada lista de S contingências, a Margem de Segurança (M) (Definição 3) dada pela equação (3.2.5) deve satisfazer a seguinte relação:

$$M \geq M_{\min} \quad (4.2.1)$$

sendo:

M = margem de segurança do sistema

$M_{\min}$ = margem de segurança mínima permissível (≥ 0).

As ações de controle devem promover modificações nas margens de segurança de modo que as seguintes relações sejam observadas ([30]):



$$M_r^0 + \Delta M_r \geq M_{min}, \quad r = 1, 2, \dots, S \quad (4.2.2.)$$

sendo:

M_r^0 = margem de segurança referente à r -ésima contingência.

Então, da expressão (4.2.2), obtém-se

$$\Delta M_r \geq M_{min} - M_r^0 \quad (4.2.3)$$

O acréscimo (ΔM_r) necessário para a solução do problema (4.2.2), em função da variação de um vetor genérico X ($X \in \mathbb{R}^n$), pode ser estimado através da ANÁLISE DE SENSIBILIDADE de primeira ordem ([6], [23], [30]):

$$\Delta M_r \cong \left\langle \frac{\partial M_r}{\partial X^0}, \Delta X^0 \right\rangle \quad (4.2.4)$$

sendo:

$\langle \cdot, \cdot \rangle \triangleq$ produto interno de vetores n -dimensionais

$\frac{\partial M_r}{\partial X^0}$ = sensibilidade da margem de segurança relativa ao vetor X avaliada na condição inicial (o)

ΔX^0 = acréscimo no vetor X em torno de X^0 .

O controle preventivo dinâmico pode ser efetuado, e.g., mediante a utilização de ações de controle do tipo:

1. realocação de geração;
2. corte de carga;
3. modificação estrutural do sistema de transmissão:
 - inclusão / remoção de linhas de transmissão
 - emprego de FACTS (*Flexible AC Transmission System*)
4. modificação do perfil de tensão nodal (laço reativo).



Estas ações de controle são as mais empregadas em Sistemas de Energia Elétrica. A realocação de geração, corte de carga, modificação estrutural do sistema de transmissão e alteração do perfil de tensões nodais são os procedimentos mais utilizados na operação. A modificação da topologia da rede é um procedimento empregado, basicamente, para o planejamento da expansão do sistema de transmissão.

4.3. CONCLUSÃO

Foi apresentado, anteriormente, o problema do controle preventivo dinâmico, usando-se ação de controle genérica, através da análise de sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança.

Os modelos incrementais da margem de segurança, para cada uma destas ações de controle, serão desenvolvidos nos capítulos seguintes. A utilização do controle, via realocação de geração, já foi abordada na referência [30], com a preservação da topologia da rede (sem redução às barras internas de geração). Neste trabalho, será tratado o problema de corte de carga conjuntamente com o problema da realocação de geração, considerando-se a rede elétrica reduzida às barras internas de geração.



CONTROLE PREVENTIVO ATRAVÉS DO CORTE DE CARGA

5.1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se, a seguir, o modelo matemático do controle preventivo dinâmico através do corte de carga. O modelo incremental será desenvolvido através da análise de sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança do sistema, expressa em função energia total do sistema.

5.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A metodologia apresentada nas referências [20] e [30] utiliza ações de controle do tipo redespacho de geração. Neste capítulo buscar-se-á incorporar àquela metodologia, o corte de carga para uso nos casos de soluções inviáveis, via redespacho de geração.

Supondo-se que para determinada contingência, identificada pelo índice r , tem-se $M_r \leq 0$, i.e., o sistema é instável do ponto de vista da estabilidade transitória. Deve-se torná-lo estável, se possível, através de ações de controle, tal que se obtenha

$$M_r^0 + \Delta M_r \geq M_{\min} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (5.2.1)$$

sendo:

M_r^0 = margem de segurança inicial da r -ésima contingência

$M_{\min}$ = margem de segurança mínima permissível.



Então, da expressão (5.2.1), obtém-se

$$\Delta M_r \geq M_{\min} - M_r^0 \quad (5.2.2)$$

O acréscimo (ΔM_r) necessário para a solução do problema (5.2.2), em função dos ângulos de equilíbrio pré-falta, pode ser estimado através da ANÁLISE DE SENSIBILIDADE de primeira ordem, como definida pela equação (4.2.4):

$$\Delta M_r \cong \left\langle \frac{\partial M_r}{\partial \theta^a}, \Delta \theta^a \right\rangle \quad (5.2.3)$$

sendo:

$\frac{\partial M_r}{\partial \theta^a}$ = sensibilidade da margem de segurança relativa à posição de equilíbrio pré-falta

$\Delta \theta^a$ = acréscimo no vetor de posições angulares de equilíbrio pré-falta e referidas ao centro de ângulos.

Considerando-se a definição de θ expressa em função de δ , pode-se estabelecer uma relação entre estas grandezas, da seguinte forma:

$$\Delta \theta^a = T \Delta \delta^a \quad (5.2.4)$$

sendo:

$$T \triangleq I - U \text{ Diag}(M_i/MT, i \in N)$$

em que:

I = matriz identidade

$$U = [U_{ij}], U_{ij} = 1, \forall i, j.$$

Substituindo-se (5.2.4) em (5.2.3), obtém-se:



sendo:

$$Fr \triangleq \text{sensibilidade da MS com relação às cargas do sistema} \\ = - (T H_{red}^{-1} H_d)^T \frac{\partial M_r}{\partial \theta^a},$$

que substituída em (5.2.2), fornece

$$\langle Fr, \Delta Pl \rangle \geq br^0 \quad (5.2.9)$$

sendo: $br^0 \triangleq M_{min} - Mr^0.$

Para se gerar a relação (5.2.9) faz-se necessário calcular $\partial M_r / \partial \theta^a$ e, também, a matriz $(T H_{red}^{-1} H_d)$ que é a responsável pela maior parcela do tempo de cálculo. Havendo mais de uma contingência em sobrecarga (violação da restrição (5.2.1)), o custo computacional adicional, basicamente, correspondente ao cálculo de $\partial M_r / \partial \theta^a$, tendo em vista que a referida matriz é avaliada considerando-se o estado de equilíbrio e topologia pré-falta, sendo, portanto, independentes da condição de defeito.

A sensibilidade da margem de segurança com relação a θ^a , pode ser expressa por:

$$\frac{\partial M_r}{\partial \theta^a} = \frac{IDr \frac{\partial E_{critr}}{\partial \theta^a} \Big|_{(\theta_r, \omega_r)^c} - \frac{\partial E_{er}}{\partial \theta^a} \Big|_{(\theta_r, \omega_r)^e}}{E_{critr}} \quad (5.2.10)$$

sendo:

$$\frac{\partial (\circ)}{\partial \theta^a} = \left[\frac{\partial (\circ)}{\partial \theta_1^a} \quad \frac{\partial (\circ)}{\partial \theta_2^a} \quad \dots \quad \frac{\partial (\circ)}{\partial \theta_n^a} \right]^T$$

$$\frac{\partial (\circ)}{\partial X} \Big|_{\chi} = \text{derivada parcial de } (\circ) \text{ com relação a } X \text{ e avaliada em } \chi$$

$$IDr \triangleq E_{er} / E_{critr}.$$

Os superscritos (c) e (e) denotam que as referidas grandezas são avaliadas no tempo crítico e no tempo de eliminação de defeito, respectivamente.



Observa-se que a energia cinética é dependente das velocidades angulares, enquanto que a energia potencial depende de θ^p , θ^e e ω^e . Porém, todas estas grandezas encontram-se relacionadas com θ^a . Assim, a seguir, buscar-se-á expressar (5.2.10) somente em função de θ^a . O superscrito (p) refere-se ao estado de equilíbrio pós-falta.

Para o cálculo de (5.2.10) serão desenvolvidas, inicialmente, as expressões referentes à segunda parcela do numerador.

As componentes dos gradientes são:

$$\frac{\partial E_{e\eta}}{\partial \theta_j^a} \bigg|_{(\theta^e, \omega^e)} = \frac{\partial E_{c\eta}}{\partial \theta_j^a} \bigg|_{\omega^e} + \frac{\partial E_{p\eta}}{\partial \theta_j^a} \bigg|_{\theta^e} \quad (5.2.11)$$

sendo:

$$\frac{\partial E_{c\eta}}{\partial \theta_j^a} = \left\langle \frac{\partial E_{c\eta}}{\partial \omega_\eta}, \frac{\partial \omega_\eta}{\partial \theta_j^a} \right\rangle$$

$$\frac{\partial E_{p\eta}}{\partial \theta_j^a} = \left\langle \frac{\partial E_{p\eta}}{\partial \theta_\eta}, \frac{\partial \theta_\eta}{\partial \theta_j^a} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial E_{p\eta}}{\partial \theta_\eta^p}, \frac{\partial \theta_\eta^p}{\partial \theta_j^a} \right\rangle$$

em que:

$$\frac{\partial E_{c\eta}}{\partial \omega_\eta} = \text{Diag} (M_\Delta, \Delta \in N) \omega_\eta$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{p\eta}}{\partial \theta_\eta} &= P_{e\eta} - P_m \\ &= 0 \text{ (da Propriedade 3)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial E_{p\eta}}{\partial \theta_\eta^p} = P_{e\eta}^p - P_m = 0.$$

$$\begin{aligned} \omega &= [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_n]^T \\ \theta &= [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T \\ \theta^a &= [\theta_1^a \ \theta_2^a \ \dots \ \theta_n^a]^T \\ \theta^p &= [\theta_1^p \ \theta_2^p \ \dots \ \theta_n^p]^T \\ P_m &= [P_{m1} \ P_{m2} \ \dots \ P_{mn}]^T \\ P_e &= [P_{e1} \ P_{e2} \ \dots \ P_{en}]^T. \end{aligned}$$

O ângulo $\theta_i(t)$ e a velocidade $\omega_i(t)$ podem ser determinados, via sucessivas aproximações por séries de Taylor ([20], [30]), da seguinte forma:

$$\theta_i(t) = \sum_{q=0}^s \theta_i^{(q)}(t) \left| \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \right|_{(t_{h-1})} \quad (5.2.12)$$

$$\omega_i(t) = \frac{d}{dt} \{ \theta_i(t) \} \quad (5.2.13)$$

$$i \in N; \quad t_{h-1} \leq t \leq t_h.$$

As séries (5.2.12) e (5.2.13) encontram-se truncadas para termos de ordens superiores a (s) e $(s-1)$, respectivamente, sendo expressas por:

$$\theta_i^{(1)} = \omega_i \quad (5.2.14)$$

$$\theta_i^{(2)} = M_i^{-1} g(\theta) \quad (5.2.15)$$

$$\theta_i^{(l)} = - M_i^{-1} P e_i^{(l-2)} + M T^{-1} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} P e_j^{(l-2)} \quad (5.2.16)$$

$i \in N, \quad l = 3, 4, \dots, \Delta$

sendo:

$$\{\circ\}^{(m)} = m\text{-ésima derivada temporal de } \{\circ\}$$

$$P e_i^{(m)} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \{ B_{ij} F_{ij}^{(m)} + G_{ij} H_{ij}^{(m)} \} \quad (5.2.17)$$

$$F_{ij}^{(m)} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \theta_{iq}^{(m-q+1)} H_{iq}^{(q-1)} \right\} \quad (5.2.18)$$

$$H_{ij}^{(m)} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \theta_{iq}^{(m-q+1)} F_{iq}^{(q-1)} \right\} \quad (5.2.19)$$



em que:

$$\tau_{m,1} = \tau_{m,m} = 1$$

$$\tau_{m,j} = \tau_{(m-1),j} + \tau_{(m-1),(j-1)}$$

A partir das equações (5.2.12) e (5.2.13) pode-se calcular os gradientes de $\theta_i(t)$ e $\omega_i(t)$, também através de sucessivas aproximações por séries de Taylor:

$$\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial \theta_j^a} = \sum_{q=0}^S \frac{\partial \theta_i^{(q)}(t)}{\partial \theta_j^a} \bigg|_{(t_{h-1})} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \quad (5.2.20)$$

$$\frac{\partial \omega_i(t)}{\partial \theta_j^a} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial \theta_i(t)}{\partial \theta_j^a} \right\} \quad (5.2.21)$$

$i \in N; \quad t_{h-1} \leq t \leq t_h.$

sendo:

$$\frac{\partial \theta_i^{(1)}}{\partial \theta_k^a} = \frac{\partial \omega_i}{\partial \theta_k^a} \quad (5.2.22)$$

$$\frac{\partial \theta_i^{(m)}}{\partial \theta_k^a} = - M_i^{-1} \frac{\partial P e_i^{(m-2)}}{\partial \theta_k^a} + M T^{-1} \sum_{j \in N} \frac{\partial P e_j^{(m-2)}}{\partial \theta_k^a} \quad (5.2.23)$$

$i \in N, m = 2, 3, \dots, S.$

em que:

$$\frac{\partial P e_i^{(m)}}{\partial \theta_k^a} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \left\{ B_{ij} \frac{\partial F_{ij}^{(m)}}{\partial \theta_k^a} + G_{ij} \frac{\partial H_{ij}^{(m)}}{\partial \theta_k^a} \right\} \quad (5.2.24)$$

$$\frac{\partial F_{ij}^{(m)}}{\partial \theta_k^a} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_i^{(m-q+1)}}{\partial \theta_k^a} H_{iq}^{(q-1)} + \theta_{iq}^{(m-q+1)} \frac{\partial H_{iq}^{(q-1)}}{\partial \theta_k^a} \right\} \quad (5.2.25)$$

$$\frac{\partial H_{ij}^{(m)}}{\partial \theta^a} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{iq}^{(m-q+1)}}{\partial \theta^a} F_{iq}^{(q-1)} + \theta_{iq}^{(m-q+1)} \frac{\partial F_{iq}^{(q-1)}}{\partial \theta^a} \right\} \quad (5.2.26)$$

$\frac{\partial \{\circ\}^{(m)}}{\partial \theta^a} \triangleq$ derivada parcial da m -ésima derivada temporal de $\{\circ\}$ com relação ao parâmetro θ^a .

O gradiente de E_{crit} será determinado considerando que, toda alteração promovida no sentido de aumentar E_{crit} , proporcionará uma diminuição na mesma razão, na energia total do sistema, quando avaliada em t_{crit} ([30]). Este procedimento representa uma aproximação do gradiente de E_{crit} e tem proporcionado resultados satisfatórios ([30]), com um custo computacional adicional praticamente nulo. Portanto,

$$\frac{\partial E_{crit}}{\partial \theta^a} \Big|_{(\theta^c, \omega^c)} \cong - \frac{\partial E}{\partial \theta^a} \Big|_{(\theta(t_{crit}), \omega(t_{crit}))} \quad (5.2.27)$$

Para se corrigir a margem de segurança para um valor mínimo permissível, é necessário resolver a equação (5.2.9) em termos de ΔPl . Esta equação tendo r variáveis (r = número de barras de cargas), apresenta infinitas soluções. Uma solução pode ser obtida através de um problema de otimização, e.g., minimizando-se algum critério.

5.3. APLICAÇÃO

Apresentam-se a seguir os resultados preliminares sobre a utilização do corte de carga, via modelo de sensibilidade desenvolvido anteriormente, para a solução do problema de controle de segurança.

Considera-se o sistema exemplo apresentado na

referência [2] - página 38. Os dados e diagrama unifilar do sistema encontram-se na Figura 1 e Tabelas 1, 2 e 3. Consideram-se faltas tipo curto-circuito com tempo de eliminação de defeito igual a $0,15\Delta$ seguido da perda da linha sob falta.

No processo de cálculo utilizam-se os seguintes dados:

- margem de segurança mínima (M_{in}) = 0,3
- número de termos das séries = 6
- tempo de atualização dos coeficientes das séries = $0,10\Delta$.

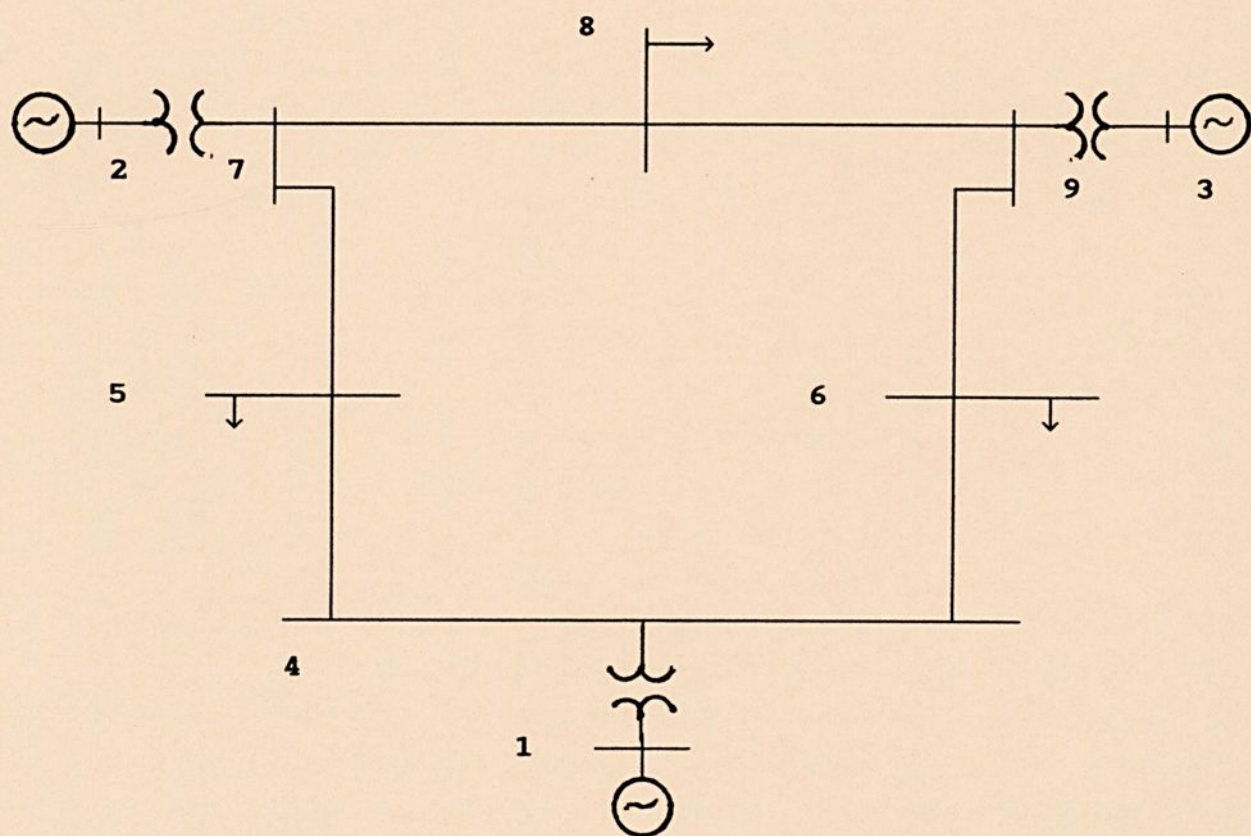


FIGURA 1. Diagrama unifilar e dados do sistema em estudos.

referência [2] - página 38. Os dados e diagrama unifilar do sistema encontram-se na Figura 1 e Tabelas 1, 2 e 3. Consideram-se faltas tipo curto-circuito com tempo de eliminação de defeito igual a $0,15\Delta$ seguido da perda da linha sob falta.

No processo de cálculo utilizam-se os seguintes dados:

- margem de segurança mínima (M_{in}) = 0,3
- número de termos das séries = 6
- tempo de atualização dos coeficientes das séries = $0,10\Delta$.

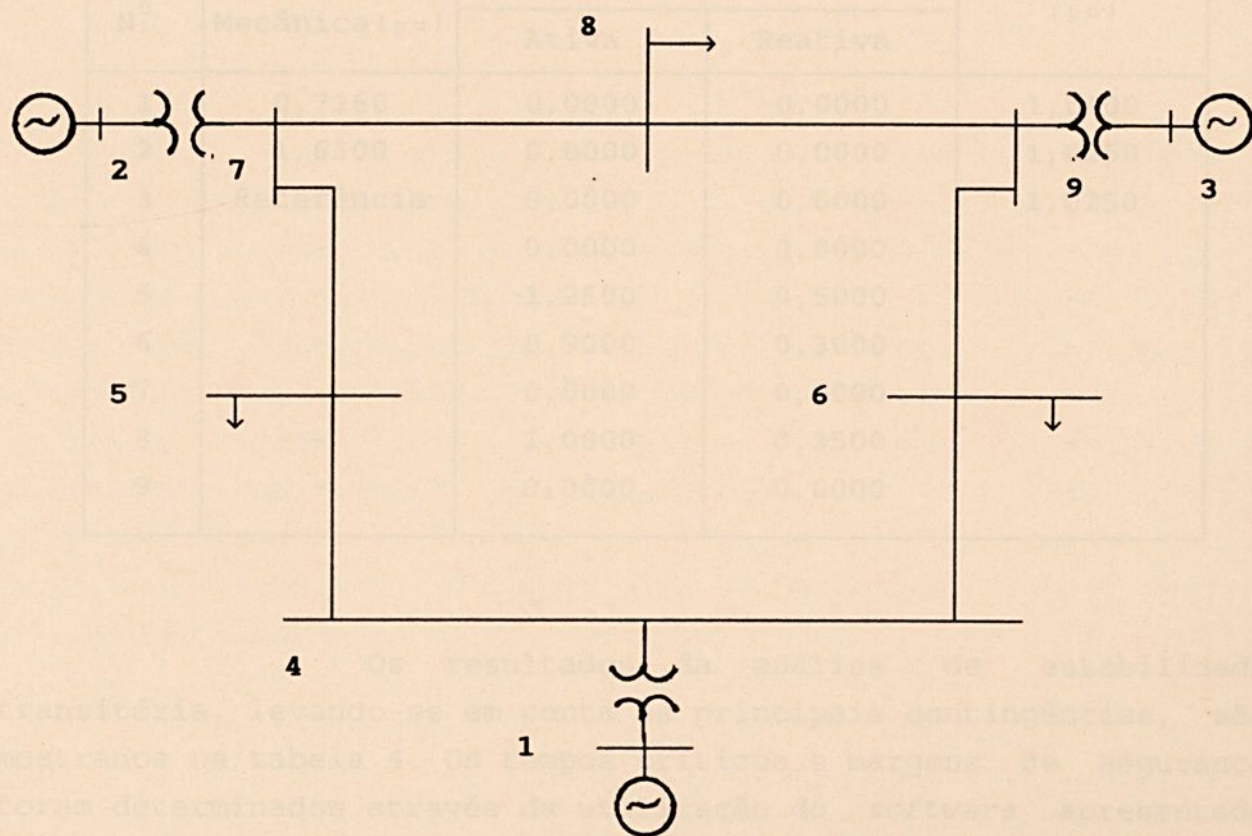


FIGURA 1. Diagrama unifilar e dados do sistema em estudos.

TABELA 1. Dados em pu das máquinas síncronas.

Máquina	$X'd$	$H(\Delta)$
1	0,0608	9,5567
2	0,1198	3,3363
3	0,1813	2,3561

TABELA 2. Dados dos barramentos do sistema.

Barra N.º	Potência Mecânica (pu)	Carga (pu)		Tensão (pu)
		Ativa	Reativa	
1	0,7160	0,0000	0,0000	1,0400
2	1,6300	0,0000	0,0000	1,0250
3	Referência	0,0000	0,0000	1,0250
4	-	0,0000	0,0000	-
5	-	1,2500	0,5000	-
6	-	0,9000	0,3000	-
7	-	0,0000	0,0000	-
8	-	1,0000	0,3500	-
9	-	0,0000	0,0000	-

Os resultados da análise de estabilidade transitória, levando-se em conta as principais contingências, são mostrados na tabela 4. Os tempos críticos e margens de segurança foram determinados através da utilização do *software* apresentado na referência [31]. Este *software* é uma implementação do algoritmo SLEP iterativo ([17]), versão para microcomputadores tipo IBM PC.

TABELA 3. Dados do sistema de transmissão em pu.

Linha de Transmissão N.º	Nó Inicial	Nó Terminal	Impedância Série		Admitância Shunt B/2
			R	X	
1	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
2	7	8	0,0850	0,0720	0,0745
3	8	9	0,0119	0,1008	0,1045
4	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
5	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
6	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
7	1	4	0,0000	0,0576	0,0000
8	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
9	6	9	0,0390	0,1700	0,1790

A contingência que se encontra no topo da tabela 4 (margem de segurança igual a $-0,7938$) é a mais crítica de acordo com o critério da margem de segurança. Deseja-se corrigir a margem de segurança do sistema (M) para igual ou superior a M_{min} . Deste modo, utilizando-se o modelo proposto, obtém-se os resultados de sensibilidade da margem de segurança com relação às cargas do sistema, por barramento, os quais encontram-se relacionados na Tabela 5. Estes resultados são referentes a contingência mais crítica (curto-circuito na barra 7 com saída da linha entre os nós 5 e 7). Para fins de corte de carga, deve-se considerar somente as barras que contêm carga, ou seja, as barras 5, 6 e 8. Neste caso, o melhor resultado é obtido através de um corte de carga na barra 8. Evidentemente, se efetuado um corte de carga, para se manter o balanço de potência será necessário efetuar um redespacho de geração. Escolhendo-se, arbitrariamente, um decréscimo na potência gerada na barra 2, cuja sensibilidade de realocação de geração, calculada através da metodologia apresentada na referência [20] de valor igual a $-5,21$, obtêm-se os



seguintes valores de corte de carga e redespacho de geração, valores por unidades:

- corte de carga na barra 5 : 0,5006
- diminuição de geração na barra 2: 0,5006

TABELA 4. Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Caso base.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade				
Barra sob Defeito	Elemento Retirado		Tempo Crítico (Δ)	Margem De Segurança
	Barra Origem	Barra Destino		
	Nº	Nº		
7	5	7	0,100	-0,7938
7	7	8	0,130	-0,3898
5	5	7	0,200	0,2350
9	6	9	0,190	0,3484
8	7	8	0,200	0,4374
6	6	9	0,250	0,5501
8	8	9	0,225	0,5809
9	8	9	0,220	0,6090
5	4	5	0,280	0,7295
6	4	6	0,300	0,7796

Os resultados finais da análise são apresentados na Tabela 6. Observa-se que todas as contingências satisfazem a condição de estabilidade pré-definida, cuja margem do sistema é $M = 0.3316$ ($M > M_{min}$). Este resultado foi obtido com um erro de aproximadamente 3% – valor previsto através do modelo linear ($M = 0,3$) X valor efetivamente obtido ($M = 0,3316$).



TABELA 5. Vetor sensibilidade da margem de segurança com relação às cargas do sistema (F_n) – contingência referente ao curto-circuito na barra número 7 com saída da linha entre os nós 5 e 7.

Sensibilidade da M. Segurança (F_n)					
B A R R A M E N T O					
4	5	6	7	8	9
-2,376	-3,017	-2.449	-4.141	-3,468	-2,472

TABELA 6. Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança - Após corte de carga e realocação de geração.

Ordenação das Contingências Segundo o Grau de Severidade				
Barra sob Defei- to	Elemento Retirado		Tempo Crítico (s)	Margem De Segu- rança
	Barra Origem	Barra Destino		
	Nº	Nº		
7	5	7	0,180	0,3316
9	8	9	0,185	0,4169
7	7	8	0,185	0,4216
9	6	9	0,205	0,5095
6	6	9	0,335	0,7473
5	5	7	0,415	0,7681
8	7	8	0,330	0,8024
8	8	9	0,340	0,8135
6	4	6	0,340	0,8318
5	4	5	0,510	0,9533



Os resultados finais da análise são apresentados na Tabela 6. Observa-se que todas as contingências satisfazem a condição de estabilidade pré-definida, cuja margem do sistema é $M = 0.3316$ ($M > M_{\min}$). Este resultado foi obtido com um erro de aproximadamente 3% - valor previsto através do modelo linear ($M = 0,3$) X valor efetivamente obtido ($M = 0,3316$).

5.4. CONCLUSÃO

Foi apresentado neste capítulo o modelo matemático que estabelece as relações de variação linear da margem de segurança com relação à variação da demanda do sistema. Foram apresentados, ainda, os resultados de uma aplicação, considerando-se um sistema de pequeno porte, o qual serviu para ilustrar a utilização do modelo desenvolvido. Novos resultados teóricos, implementação computacional, assim como, simulações com sistemas de grande porte serão desenvolvidos na sequência deste trabalho. Considerando-se os resultados aqui apresentados pode-se obter esquemas de alívio carga eficientes, e.g., como sugeridos nas referências [14] e [26].



CONTROLE PREVENTIVO ATRAVÉS DE ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

6.1. INTRODUÇÃO

A reconfiguração de rede e a alteração de parâmetros do sistema de transmissão, durante e após perturbação (curto-circuito), constituem-se em alternativas interessantes para o controle do sistema, também, do ponto de vista da estabilidade transitória ([46]).

O grande problema do emprego deste tipo de controle, principalmente com relação à alteração de parâmetros, é a baixa velocidade dos dispositivos de controles. Porém, recentemente, com o desenvolvimento da eletrônica potência, novos dispositivos têm sido introduzidos no sistema de transmissão, e.g., FACTS (*Flexible AC Transmission System*) – compensadores estáticos, capacitores séries controlados, etc. – que permitem um controle eficiente também quanto à velocidade.

Em vista disto, neste Capítulo desenvolver-se-á um modelo matemático incremental entre a margem de segurança do sistema e as alterações estruturais do sistema de transmissão através da inclusão / remoção de linhas de transmissão.

A inclusão / remoção de linhas de transmissão pode ser utilizada tanto na operação como no planejamento da expansão do sistema de transmissão. No planejamento da expansão esta atividade caracteriza-se como uma medida preventiva, ou seja, a rede elétrica ao ser expandida deve atender a demanda e os critérios de segurança e confiabilidade. As demais ações são utilizadas, basicamente, na atividade de operação.



6.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA - MUDANÇA DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA ATRAVÉS DA INCLUSÃO / REMOÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A mudança topológica da rede será abordada considerando-se a inclusão / remoção de linhas de transmissão. Esta metodologia visa aplicações em planejamento da expansão do sistema de transmissão, proporcionando, deste modo, resultados mais realistas, se comparados ao tratamento convencional, via emprego de critérios estáticos.

A ação de controle empregada será, então, do tipo mudança de impedância do sistema de transmissão.

Ressalta-se que, para fins práticos, a susceptância da linha a ser acrescida ao sistema tem uma maior magnitude (e maior influência) se comparada à condutância. Nos casos de compensação série ou *shunt* os efeitos são basicamente reativos, ou seja, as resistências podem, também, ser consideradas. Deste modo, no equacionamento a seguir, considerar-se-á somente o efeito das susceptâncias sobre a estabilidade do sistema. Porém, a inclusão dos efeitos das condutâncias, se necessária, pode ser efetivada de modo análogo, *mutatis mutandis*.

A variação da margem de segurança (ΔM_r), considerando-se a inclusão de uma linha de transmissão $l(u,v)$, em função da susceptância desta linha, pode ser estimada através da ANÁLISE DE SENSIBILIDADE de primeira ordem, utilizando-se a formulação dada pela equação (4.2.4), por:

$$\Delta M_r \cong \partial M_r / \partial B_l \quad (\Delta B_l) \quad (6.2.1)$$

sendo:

$l(u,v)$ = linha de transmissão de índice l com nós terminais u e v

$\partial M_r / \partial B_l$ = sensibilidade da margem de segurança com relação à susceptância B_l

ΔB_l = B_l .



Deve-se ressaltar que $\partial M_r / \partial B_l$ é um escalar. Isto justifica a representação da variação da margem de segurança como expressa na equação (6.2.1).

Do ponto de vista da mudança topológica, o problema será considerado resolvido se, para todos acréscimos de linhas de transmissão — efetuados mediante algum critério de expansão — a seguinte relação for satisfeita:

$$\left\langle \frac{\partial M_r}{\partial B_e}, \Delta B_e \right\rangle \geq b_r^0 \quad (6.2.2)$$

sendo:

$$b_r^0 \stackrel{\Delta}{=} M_{\min} - M_r^0.$$

$B_e, \Delta B_e$ = vetor contendo as susceptâncias e suas variações, respectivamente, das linhas de transmissão acrescidas ao sistema de transmissão.

6.2.1. SENSIBILIDADE DA MARGEM DE SEGURANÇA

Considerando a inclusão no sistema de transmissão, uma linha definida por $\ell(u, v)$, então, a sensibilidade da margem de segurança em relação à susceptância pode ser expressa, após rearranjo, por:

$$\frac{\partial M_r}{\partial B_l} = \frac{\|D_r \frac{\partial E_{critr}}{\partial B_l} \Big|_{(\theta_r^c, \omega_r^c)} - \frac{\partial E_{er}}{\partial B_l} \Big|_{(\theta_r^e, \omega_r^e)}}{E_{critr}} \quad (6.2.1.1)$$

sendo:

$$\frac{\partial \{\circ\}}{\partial X} \Big|_{\chi} = \text{derivada parcial de } \{\circ\} \text{ com relação a } X \text{ e avaliada em } \chi$$

$$\|D_r \stackrel{\Delta}{=} E_{er} / E_{critr}$$



$$\frac{\partial E_{er}}{\partial B\ell} \bigg|_{(\theta_r^e, \omega_r^e)} = \frac{\partial E_{cr}}{\partial B\ell} \bigg|_{\omega_r^e} + \frac{\partial E_{pr}}{\partial B\ell} \bigg|_{\theta_r^e} \quad (6.2.1.2)$$

em que:

$$\frac{\partial E_{cr}}{\partial B\ell} = \left\langle \frac{\partial E_{cr}}{\partial \omega}, \frac{\partial \omega}{\partial B\ell} \right\rangle$$

$$\frac{\partial E_{pr}}{\partial B\ell} = \left\langle P_e(\theta) - P_m, \frac{\partial \theta}{\partial B\ell} \right\rangle + \nabla(\theta)$$

$$\frac{\partial E_{cr}}{\partial \omega_r} = \text{Diag}(M_\Delta, \Delta \in N) \omega_r$$

$$\nabla(\theta) = \frac{\partial}{\partial B\ell} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{ei} d\theta_i \right\}.$$

Os superscritos (c) e (e) denotam que as referidas grandezas são avaliadas no tempo crítico e no tempo de eliminação de defeito, respectivamente. O superscrito (p) caracteriza o estado de equilíbrio pós-falta.

Utilizando-se as expressões acima, pode-se estimar o gradiente de Ecrit por:

$$\frac{\partial E_{critr}}{\partial B\ell} \bigg|_{(\theta_r^c, \omega_r^c)} \cong \nabla(\bar{\theta}) \quad (6.2.1.3)$$

sendo:

$\bar{\theta}$ = Ângulo sobre a SLEP.

Desprezando-se as condutâncias de transferência, pode-se expressar $\nabla(\theta)$ como:

$$\nabla(\theta) = - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j \{ \cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^p \} \frac{B_{ij}^p}{\partial B\ell} \quad (6.2.1.4)$$

Então, a sensibilidade da margem de segurança pode ser expressa por:

$$\frac{\partial M_r}{\partial B\ell} = \frac{\|D \nabla(\bar{\theta}) - \nabla(\theta^e) + \{P_m^T - P_e(\theta e^e)^T\} \frac{\partial \theta^e}{\partial B\ell} - \omega^{e^T} \text{Diag}(M_\Delta, \Delta \in N) \frac{\partial \omega^e}{\partial B\ell}\|}{\text{Ecrita}} \quad (6.2.1.5)$$

Para a conclusão do cálculo da sensibilidade da margem de segurança (6.2.1.5), faz-se necessário conhecer os gradientes de θ e ω , os quais são avaliados conforme é mostrado a seguir.

6.2.2. SENSIBILIDADES DA POSIÇÃO E VELOCIDADE ANGULARES

A partir das equações (5.2.12) e (5.2.13), pode-se calcular os gradientes de $\theta_i(t)$ e $\omega_i(t)$, também através de sucessivas aproximações por séries de Taylor:

$$\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial B\ell} = \sum_{q=0}^S \left. \frac{\partial \theta_i^{(q)}(t)}{\partial B\ell} \right|_{t=t_{h-1}} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \quad (6.2.2.1)$$

$$\frac{\partial \omega_i(t)}{\partial B\ell} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial \theta_i(t)}{\partial B\ell} \right\} \quad (6.2.2.2)$$

$i \in N; \quad t_{h-1} \leq t \leq t_h.$

sendo:

$$\frac{\partial \theta_i^{(1)}(t)}{\partial B\ell} = \frac{\partial \omega_i}{\partial B\ell} \quad (6.2.2.3)$$

$$\frac{\partial \theta_i^{(m)}}{\partial B\ell} = - M_i^{-1} \frac{\partial P e_i^{(m-2)}}{\partial B\ell} + M T^{-1} \sum_{j \in N} \frac{\partial P e_j^{(m-2)}}{\partial B\ell} \quad (6.2.2.4)$$

$$i \in N, m = 2, 3, \dots, s.$$

sendo:

$$\frac{\partial P e_i^{(m)}}{\partial B\ell} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \left\{ B_{ij} \frac{\partial F_{ij}^{(m)}}{\partial B\ell} + G_{ij} \frac{\partial H_{ij}^{(m)}}{\partial B\ell} + \frac{\partial B_{ij}}{\partial B\ell} F_{ij}^{(m)} + \frac{\partial G_{ij}}{\partial B\ell} H_{ij}^{(m)} \right\} \quad (6.2.2.5)$$

$$\frac{\partial F_{ij}^{(m)}}{\partial B\ell} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{iq}^{(m-q+1)}}{\partial B\ell} H_{iq}^{(q-1)} + \theta_{iq}^{(m-q+1)} \frac{\partial H_{iq}^{(q-1)}}{\partial B\ell} \right\} \quad (6.2.2.6)$$

$$\frac{\partial H_{ij}^{(m)}}{\partial B\ell} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{iq}^{(m-q+1)}}{\partial B\ell} F_{iq}^{(q-1)} + \theta_{iq}^{(m-q+1)} \frac{\partial F_{iq}^{(q-1)}}{\partial B\ell} \right\} \quad (6.2.2.7)$$

$\frac{\partial \{\circ\}^{(m)}}{\partial B\ell} \triangleq$ derivada parcial da m-ésima derivada temporal de $\{\circ\}$ com relação ao parâmetro $B\ell$.

6.2.3. SENSIBILIDADES DA CONDUTÂNCIA E SUSCEPTÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA PÓS-FALTA

Os elementos da matriz de admitância nodal reduzida às barras internas de geração, considerando-se a saída de uma linha de transmissão definida por $k(r,s)$, podem ser determinados através da equação (2.3.1.1):

$$Y_{red}^p i j = Y_{gg}^a i j + z_{ij}^p / (X' d_i X' d_j) \quad (6.2.3.1)$$

Adaptando-se a fórmula de inversão de matrizes de susceptância de barra ([28]), pode-se expressar Z^p , em função dos parâmetros da rede pré-falta, da seguinte forma:

$$Z^P = Z^a + b_k Z^a m_k m_k^T Z^a \quad (6.2.3.2)$$

sendo:

$$b_k^a = \frac{Y_k}{1 - Y_k \lambda_k^a}$$

Y_k = admitância série da linha de transmissão k

$$\lambda_k^a = z_{rr}^a + z_{ss}^a - 2 z_{rs}^a$$

z_{ij}^a = (i, j) -ésimo elemento da matriz Z^a .

O cálculo de Y_{red} pós-falta, considerando a inclusão de uma linha de transmissão $l(u, v)$ com susceptância B_l , pode ser idealizado de modo semelhante à equação (6.2.3.1), como:

$$Z^{P*} = Z^P + j b_l^P Z^P m_l m_l^T Z^P \{ B_l \} \quad (6.2.3.3)$$

sendo:

$$b_l^P = 1 / (1 - j B_l \lambda_l^P)$$

Z^{P*} = sub-matriz Z pós-falta considerando a inclusão da linha de transmissão l

$$\lambda_l^P = z_{uu}^P + z_{vv}^P - 2 z_{uv}^P.$$

Neste caso, a matriz Y_{red} será dada por:

$$Y_{red}^{P*} = Y_{red}^P - Y_{gl}^a \{ j b_l^P Z^P m_l m_l^T Z^P \} Y_{lg}^a (B_l) \quad (6.2.3.4)$$

Por conseguinte, da equação (6.2.3.4) conclui-se que $\partial B^P / \partial B_l$ e $\partial G^P / \partial B_l$ são iguais a:

$$\frac{\partial B^P}{\partial B_l} = \text{imag} \{ D \} \quad (6.2.3.5)$$

$$\frac{\partial G^P}{\partial B_l} = \text{real} \{ D \} \quad (6.2.3.6)$$



sendo:

$$D = - Ygl^a \{ j bl^p Z^p ml ml^T Z^p \} Ylg^a \quad (6.2.3.7)$$

Desenvolvendo a equação (6.2.3.7), obtém-se

$$\frac{\partial B^p}{\partial Bl} \triangleq \left[\frac{\partial Bij^p}{\partial Bl} \right] = \frac{\text{imag}(\sigma ij^p)}{x'di \ x'dj} \quad (6.2.3.8)$$

$$\frac{\partial G^p}{\partial Bl} \triangleq \left[\frac{\partial Gij^p}{\partial Bl} \right] = \frac{\text{real}(\sigma ij^p)}{x'di \ x'dj} \quad (6.2.3.9)$$

em que:

$$\sigma ij^p = j bl (ziu^p - ziv^p) (zju^p - zjv^p) \quad (6.2.3.10)$$

Os parâmetros zij^p podem ser calculados utilizando-se (6.2.3.3) (efetuadas as operações indicadas nesta equação) por:

$$zij^p = zij^a + bk (zir^a - zis^a) (zjr^a - zjs^a) \quad (6.2.3.11)$$

Observa-se que as equações (6.2.3.8) e (6.2.3.9) representam SENSIBILIDADES EXATAS.

6.2.4. SENSIBILIDADES DA CONDUTÂNCIA E SUSCEPTÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA SOB-FALTA

Supondo-se a inclusão da linha de transmissão $l(u,v)$ e aplicação de um curto-circuito em uma barra definida pelo índice β , então, através das expressões desenvolvidas na sub-seção (6.2.2.3), obtém-se $\partial B^f / \partial Bl$ e $\partial G^f / \partial Bl$ da seguinte forma:



$$\frac{\partial \mathbf{B}^f}{\partial \mathbf{B}l} \triangleq \left[\frac{\partial B i j^f}{\partial \mathbf{B}l} \right] = \frac{\text{imag}(\sigma i j^f)}{x' d i \ x' d j} \quad (6.2.4.1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}^f}{\partial \mathbf{B}l} \triangleq \left[\frac{\partial G i j^f}{\partial \mathbf{B}l} \right] = \frac{\text{real}(\sigma i j^f)}{x' d i \ x' d j} \quad (6.2.4.2)$$

sendo:

$$\sigma i j^f = j \ b l^f \ (z i u^f - z i v^f) \ (z j u^f - z j v^f)$$

$$b l^f = 1 / (1 - j \ B l \ \lambda l^f)$$

$$\lambda l^f = z u u^f + z v v^f - 2 \ z u v^f .$$

O superscrito (f) representa a condição sob-falta.

A matriz $\mathbf{Z}^f$ pode ser avaliada, em função de $\mathbf{Z}^a$, de modo semelhante, utilizando-se a equação (6.2.3.1):

$$\mathbf{Z}^f = \mathbf{Z}^a + b \beta^a \ \mathbf{Z}^a \ m \beta \ m \beta^T \ \mathbf{Z}^a \quad (6.2.4.3)$$

sendo:

$$b \beta^a = -1 / \lambda \beta^a$$

$$\lambda \beta^a = z \beta \beta^a$$

$m \beta$ = vetor cujos elementos são zeros, exceto o β -ésimo elemento que é igual a 1.

Efetuando-se as operações matriciais indicadas na expressão (6.2.4.3), os elementos de $\mathbf{Z}^f$ podem ser calculados, em função de $\mathbf{Z}^a$, através da seguinte expressão:

$$z i j^f = z i j^a - (z i \beta^a \ z \beta j^a) / z \beta \beta^a \quad (6.2.4.4)$$

Ressalta-se também, que as sensibilidades (6.2.4.1) e (6.2.4.2) são VALORES EXATOS.

Considerando-se um conjunto de linhas que podem ser adicionadas à rede, a contribuição de cada uma delas, sobre a estabilidade do sistema, pode ser estimada utilizando-se a equação (6.2.4). Soluções viáveis são aquelas que satisfazem as restrições (6.2.5) e que podem ser encontradas, por exemplo, através de um problema de otimização, visando minimizar algum critério pré-definido. Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo de sensibilidade da margem de segurança em relação à mudança de impedância do sistema de transmissão.

6.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA – MUDANÇA DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA ATRAVÉS DO CONTROLE SOBRE OS PARÂMETROS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A formulação do controle estrutural através do emprego de FACTS, segue o mesmo equacionamento desenvolvido para o caso de inclusão / remoção de linhas de transmissão, fazendo-se, apenas, os ajustes propostos como mostram-se a seguir.

6.3.1. INCLUSÃO DE ELEMENTO SHUNT

No caso do uso de um elemento *shunt* l conectado na barra u à terra (nó 0), o problema é determinado de modo idêntico à inclusão de linha de transmissão, porém, devendo-se adotar como ZERO os elementos da matriz impedância de barra $\{(\bar{Y})^{-1}\}$ de índice 0, ou seja:

$$Z_{i0} = Z_{0i} = Z_{00}, \forall i = 1, 2, \dots, M.$$



6.3.2. ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE

Supõe-se a alteração da impedância do elemento $h(\rho, \sigma)$ - compreendido entre os nós ρ e σ . A impedância e admitância iniciais, deste elemento, podem ser expressas, respectivamente, por:

$$Z_{\rho\sigma}^0 = R_{\rho\sigma}^0 + j X_{\rho\sigma}^0 \quad (6.3.2.1)$$

e

$$Y_{\rho\sigma}^0 = G_{\rho\sigma}^0 - j B_{\rho\sigma}^0 \quad (6.3.2.2)$$

sendo:

$$G_{\rho\sigma}^0 = R_{\rho\sigma}^0 / [(R_{\rho\sigma}^0)^2 + (X_{\rho\sigma}^0)^2]$$

$$B_{\rho\sigma}^0 = X_{\rho\sigma}^0 / [(R_{\rho\sigma}^0)^2 + (X_{\rho\sigma}^0)^2] .$$

Considerando-se a compensação série, a impedância do elemento passa a ser:

$$\bar{Z}_{\rho\sigma} = \bar{R}_{\rho\sigma} + j \bar{X}_{\rho\sigma} \quad (6.3.2.3)$$

Neste caso, é possível se obter a impedância final estabelecida pela equação (6.3.2.3), através da inclusão de uma linha de transmissão fictícia em paralelo com o elemento h , definida por:

$$Y_{\rho\sigma} \triangleq W_{\rho\sigma} - j U_{\rho\sigma} \quad (6.3.2.4)$$



sendo:

$W_{\rho\sigma} \triangleq$ condutância do elemento fictício em paralelo com o elemento h

$$= \bar{R}_{\rho\sigma} / [(\bar{R}_{\rho\sigma})^2 + (\bar{X}_{\rho\sigma})^2] - G_{\rho\sigma}^0$$

$U_{\rho\sigma} \triangleq$ susceptância do elemento fictício em paralelo com o elemento h

$$= \bar{X}_{\rho\sigma} / [(\bar{R}_{\rho\sigma})^2 + (\bar{X}_{\rho\sigma})^2] - B_{\rho\sigma}^0.$$

6.4. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido anteriormente o modelo matemático para estimativa da variação da margem de segurança com relação à variação da impedância do sistema por inclusão / remoção de linhas de transmissão e, ainda, através de compensação série e derivativa de elementos já existentes.



CONTROLE PREVENTIVO ATRAVÉS DO CONTROLE DA EXCITAÇÃO

7.1. INTRODUÇÃO

Esta formulação destina-se às aplicações em operação. Consiste na determinação de indicativos: onde e quanto alterar, do ponto de vista da estabilidade transitória, os níveis de tensão nos barramentos de geração (tensão controlada) e barramentos de carga através do uso de bancos de capacitores.

7.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Considera-se, aqui, o problema do controle de segurança dinâmica utilizando-se, como ação de controle, a alteração do perfil de tensão nodal do sistema. Neste caso, o problema pode ser formulado, através do modelo incremental (4.2.4) como é mostrado a seguir.

As ações de controle devem promover modificações nas Margens de Segurança de modo que as seguintes relações sejam observadas ([30]):

$$M_r^0 + \Delta M_r \geq M_{\min} \quad , \quad r = 1, 2, \dots, S \quad (7.2.1)$$

Então, da expressão (7.2.1), obtém-se



$$\Delta M_r \geq M_{min} - M_r^0 \quad (7.2.2)$$

O acréscimo (ΔM_r) necessário para a solução do problema (7.2.2), em função da variação do vetor de tensões internas, pode ser estimado (pela análise de sensibilidade) da seguinte forma:

$$\Delta M_r \cong < \frac{\partial M_r}{\partial \mathbf{E}^a}, \Delta \mathbf{E}^a > \quad (7.2.3)$$

sendo:

$\frac{\partial M_r}{\partial \mathbf{E}^a}$ = sensibilidade da margem de segurança com relação ao ao vetor de tensões internas das máquinas síncronas, avaliadas na condição pré-falta;

$\mathbf{E}^a \triangleq$ tensão interna das máquinas síncronas
 $= [E_1^a \ E_2^a \ E_3^a \dots E_n^a]^T$

$\Delta \mathbf{E}^a$ = acréscimo no vetor $\mathbf{E}$ em torno de $\mathbf{E}^a$.

Deve-se notar que a redefinição do perfil de tensão deve ser feita considerando-se as tensões terminais ($\mathbf{V}$) – tensão controlada – ao invés de $\mathbf{E}$. Assim, deve-se expressar (7.2.3) em função de $\Delta \mathbf{V}^a$. O vetor $\Delta \mathbf{E}^a$, em função de $\Delta \mathbf{V}^a$, pode ser dado pelo seguinte sistema de equações (modelo linearizado):

$$\Delta \mathbf{E}^a = \mathbf{H}^a \Delta \mathbf{V}^a \quad (7.2.4)$$

sendo:

$\mathbf{H}^a \triangleq [H_{ij}] = \partial E_i / \partial V_j^a$;

$\mathbf{V}^a \triangleq$ tensão terminal (módulo) das máquinas síncronas;
 $= [V_1^a \ V_2^a \ V_3^a \dots V_n^a]^T$.



Substituindo-se (7.2.4) em (7.2.3), obtém-se

$$\Delta M_r \cong < \partial M_r / \partial E^a, H^a \Delta V^a > \quad (7.2.5)$$

A i -ésima componente da tensão interna complexa pode ser escrita da seguinte forma:

$$e_i \text{ (complexo)} = c_i + j d_i = E_i / \underline{\beta_i} \quad (7.2.6)$$

sendo:

e_i = tensão interna complexa da i -ésima máquina síncrona;

$$c_i = V_i + Q_{ei} X'_{di} / V_i \quad ([2]) \quad (7.2.7)$$

$$d_i = P_{ei} X'_{di} / V_i \quad ([2]) \quad (7.2.8)$$

em que:

$$\begin{aligned} Q_{ei} &\stackrel{\Delta}{=} \text{potência reativa da } i\text{-ésima máquina síncrona;} \\ &= \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} (-B_{ij} H_{ij} + G_{ij} F_{ij}) - E_i^2 B_{ii} \end{aligned} \quad (7.2.9)$$

P_{ei} = potência ativa da i -ésima máquina síncrona;

X'_{di} = reatância transitória de eixo direto da i -ésima máquina síncrona.

O módulo da tensão interna da i -ésima máquina síncrona pode ser expressa por:

$$E_i = (c_i^2 + d_i^2)^{1/2} \quad (7.2.10)$$



Derivando-se parcialmente E_i , definida pela equação (7.2.10), com relação a V_j , obtém-se:

$$\begin{aligned}\partial E_i / \partial V_j &= 1/2 (c_i^2 + d_i^2)^{-1/2} \partial (c_i^2 + d_i^2) / \partial V_j \\ &= E_i^{-1} (c_i \partial c_i / \partial V_j + d_i \partial d_i / \partial V_j)\end{aligned}\quad (7.2.11)$$

Deve-se ressaltar que c_i e d_i são dependentes de V_i , Q_{ei} e P_{ei} . Então, considerando-se as definições de c_i e d_i pelas equações (7.2.7) e (7.2.8), tem-se então:

$$\partial c_i / \partial V_j = 1 - Q_{ei} X' d_i / V_i^2 + (X' d_i / V_i) \partial Q_{ei} / \partial V_j \quad (7.2.12)$$

$$\partial d_i / \partial V_j = - P_{ei} X' d_i / V_i^2 + (X' d_i / V_i) \partial P_{ei} / \partial V_j . \quad (7.2.13)$$

Substituindo-se (7.2.12) e (7.2.13) em (7.2.11) resulta em:

$$\begin{aligned}\partial E_i / \partial V_j &= [c_i V_i^2 / X' d_i - c_i Q_{ei} - d_i P_{ei}] X' d_i / (E_i V_i^2) + \\ &+ [c_i \partial Q_{ei} / \partial V_j + d_i \partial P_{ei} / \partial V_j] X' d_i / (E_i V_i)\end{aligned}\quad (7.2.14)$$

A equação (7.2.14) encontra-se expressa em função de $\partial P_{ei} / \partial V_j$ e $\partial Q_{ei} / \partial V_j$:

$$\partial P_{ei} / \partial V_j = \begin{cases} P_{ei} / E_i & , i = j \\ B_{ij} E_i \sin \theta_{ij} + G_{ij} E_i \cos \theta_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (7.2.15)$$

$$\partial Q_{ei} / \partial V_j = \begin{cases} Q_{ei} / E_i & , i = j \\ - B_{ij} E_i \cos \theta_{ij} + G_{ij} E_i \sin \theta_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (7.2.16)$$

Então, para se determinar o modelo incremental, faz-se necessário obter o gradiente de M com relação ao vetor E^a , como é mostrado a seguir.

7.3. SENSIBILIDADE DA MARGEM DE SEGURANÇA

A j -ésima componente do gradiente da margem de segurança (3.2.1) com relação a E^a pode ser expressa por:

$$\partial M_r / \partial E_l^a = (\parallel_r \partial E_{critr} / \partial E_l^a \mid_c - \partial E_{er} / \partial E_l^a \mid_e) / E_{critr} \quad (7.3.4)$$

sendo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \{ \cdot \}}{\partial X} \mid_\chi &= \text{derivada parcial de } \{ \cdot \} \text{ com relação a } X \text{ e} \\ &\text{avaliada em } \chi \\ \parallel_r &\triangleq E_{er} / E_{critr} \\ \frac{\partial E_{er}}{\partial E_l^a} \mid_e &= \frac{\partial E_{cr}}{\partial E_l^a} \mid_\omega^e + \frac{\partial E_{pr}}{\partial E_l^a} \mid_\theta^e \end{aligned} \quad (7.3.5)$$

em que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{cr}}{\partial E_l^a} &= \left\langle \frac{\partial E_{cr}}{\partial \omega}, \frac{\partial \omega}{\partial E_l^a} \right\rangle \\ \frac{\partial E_{pr}}{\partial E_l^a} &= \left\langle P_e(\theta) - P_m, \frac{\partial \theta}{\partial E_l^a} \right\rangle + \nabla(\theta) \\ \frac{\partial E_{cr}}{\partial \omega_r} &= \text{Diag}(M_s, s \in N) \omega_r \\ \nabla(\theta) &= \frac{\partial}{\partial E_l^a} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{ei} d\theta_i \right\} \end{aligned}$$

Os superscritos (c) e (e) denotam que as referidas grandezas são avaliadas no tempo crítico e no tempo de

eliminação de defeito, respectivamente. O superscrito (p) caracteriza o estado de equilíbrio pós-falta.

Utilizando-se as expressões acima, pode-se estimar o gradiente de E_{crit} por:

$$\left. \frac{\partial E_{crit}}{\partial E l^a} \right|_c \cong \nabla l(\bar{\theta}) \quad (7.3.6)$$

sendo:

$\bar{\theta}$ = ângulo sobre a SLEP.

$$\nabla l(\theta) = - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i^a E_j^a \{ \cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^p \} / E l^a \quad (7.3.7)$$

7.4. SENSIBILIDADES DA POSIÇÃO E VELOCIDADE ANGULARES

A partir das equações (5.2.12) e (5.2.13), pode-se calcular os gradientes de $\theta_i(t)$ e $\omega_i(t)$ também através de sucessivas aproximações por séries de Taylor:

$$\frac{\partial \theta_i(t)}{\partial E l^a} = \sum_{q=0}^S \left. \frac{\partial \theta_i^{(q)}(t)}{\partial E l^a} \right|_{(t_{h-1})} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \quad (7.4.1)$$

$$\frac{\partial \omega_i(t)}{\partial E l^a} = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial \theta_i(t)}{\partial E l^a} \right\} \quad (7.4.2)$$

$i \in N; \quad t_{h-1} \leq t \leq t_h.$

sendo:

$$\frac{\partial \theta_i^{(1)}}{\partial E l^a} = \frac{\partial \omega_i}{\partial E l^a} \quad (7.4.3)$$



$$\frac{\partial \theta_i^{(m)}}{\partial El^a} = - M_i^{-1} \frac{\partial Pe_i^{(m-2)}}{\partial El^a} + MT^{-1} \sum_{j \in N} \frac{\partial Pe_j^{(m-2)}}{\partial El^a} \quad (7.4.4)$$

$i \in N, m = 2, 3, \dots, \Delta.$

em que:

$$\frac{\partial Pe_i}{\partial El^a} = \begin{cases} Pe_i / El^a & , \quad l = j \\ (B_{il} F_{il} + G_{il} H_{il}) / El^a & , \quad i \neq j \end{cases} \quad (7.4.5)$$

$$\frac{\partial Pe_i^{(m)}}{\partial El^a} = \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \left\{ B_{ij} \frac{\partial Fi_j^{(m)}}{\partial El^a} + G_{ij} \frac{\partial Hi_j^{(m)}}{\partial El^a} \right\} \quad (7.4.6)$$

$$\frac{\partial Fi_j^{(m)}}{\partial El^a} = \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{iq}^{(m-q+1)}}{\partial El^a} H_{iq}^{(q-1)} + \theta_{iq}^{(m-q+1)} \frac{\partial Hi_q^{(q-1)}}{\partial El^a} \right\} \quad (7.4.7)$$

$$\frac{\partial Hi_j^{(m)}}{\partial El^a} = - \sum_{q=1}^m \tau_{m,q} \left\{ \frac{\partial \theta_{iq}^{(m-q+1)}}{\partial El^a} F_{iq}^{(q-1)} + \theta_{iq}^{(m-q+1)} \frac{\partial Fi_q^{(q-1)}}{\partial El^a} \right\} \quad (7.4.8)$$

$\frac{\partial \{\circ\}^{(m)}}{\partial El^a} \triangleq$ derivada parcial da m -ésima derivada temporal de $\{\circ\}$ com relação ao parâmetro El^a .

7.5. APLICAÇÃO

Este tipo de ação de controle tem se mostrado eficiente para a solução do problema de correção de segurança como é observado na referência [5], considerando-se os estudos efetuados em sistemas baseados nas configurações da região sul (10 máquina síncronas / 45 barras / 10 principais contingências) e nas

regiões sul-sudeste do Brasil (25 máquinas síncronas / 496 barras / 18 principais contingências). As soluções têm sido buscadas considerando-se o espaço de restrições de tensões terminais das máquinas síncronas - comumente utilizado na prática - compreendido entre os valores 0,95 e 1,05. No primeiro sistema as margens de segurança do sistema (M) inicial e final são iguais a -0,356 e 0,248, respectivamente; enquanto que para o segundo sistema, com M inicial igual a -0,571, após redefinição do perfil de tensão, obteve-se M final igual a 0,510.

No Apêndice A encontra-se o artigo [5].

7.6. CONCLUSÃO

Foi apresentado neste capítulo o modelo de sensibilidade da margem de segurança com relação à alteração do nível de tensão nas barras terminais de geração. Este modelo permite avaliar a influência da tensão terminal na estabilidade transitória das máquinas síncronas.

O modelo de sensibilidade, através do controle da excitação, apresentado neste capítulo, segue a mesma idéia do apresentado na referência [5], porém, aqui o equacionamento é mais simples e com custo computacional menor.



LIMITAÇÃO DOS MODELOS

8.1. INTRODUÇÃO

Os modelos de sensibilidade da margem de segurança apresentados nos Capítulos 5, 6 e 7 são lineares (obtidos a partir da linearização da margem de segurança), tendo por objetivo a solução de um problema essencialmente não-linear. Deste modo, deve-se promover alterações dentro de uma faixa de valores que não comprometam a precisão dos resultados. Caso ΔM_r seja expressivo, a solução do problema pode ser encontrada, e.g., por processo iterativo, através de sucessivas linearizações.

A seguir apresenta-se um critério de determinação do passo para o processo iterativo, com desenvolvimento baseado no conceito de ESFORÇO DE DESLOCAMENTO DA MARGEM DE SEGURANÇA ([30]). Trata-se de um procedimento heurístico para se estimar, de modo automático, o número de linearizações a serem executadas.

8.2. ESFORÇO DE DESLOCAMENTO DA MARGEM DE SEGURANÇA

Visando-se, então, orientar o usuário quanto ao deslocamento máximo da margem de segurança permissível do modelo linearizado, de tal modo que os resultados obtidos, a partir da ação de controle, tenham precisão considerada satisfatória, apresenta-se, a seguir, um procedimento heurístico baseado no conceito de Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança.



DEFINIÇÃO 5. Define-se ESFORÇO DE DESLOCAMENTO DA MARGEM DE SEGURANÇA (EDMS) ([30]) como sendo uma função que relaciona as margens de segurança inicial e final (objetivo a ser atingido), da seguinte forma:

$$\varepsilon \triangleq (1 - M^0) / (1 - M_A) - 1 \quad (8.2.1)$$

sendo:

ε = EDMS (Esforço de Deslocamento da Margem de Segurança);

M^0 = margem de segurança inicial;

M_A = margem de segurança final a ser obtida - margem de segurança alvo).

A Figura 2 mostra o comportamento de ε em função da M_A , tomando-se, como exemplo, margens de segurança iniciais iguais a (-3), (-2) e (-1).

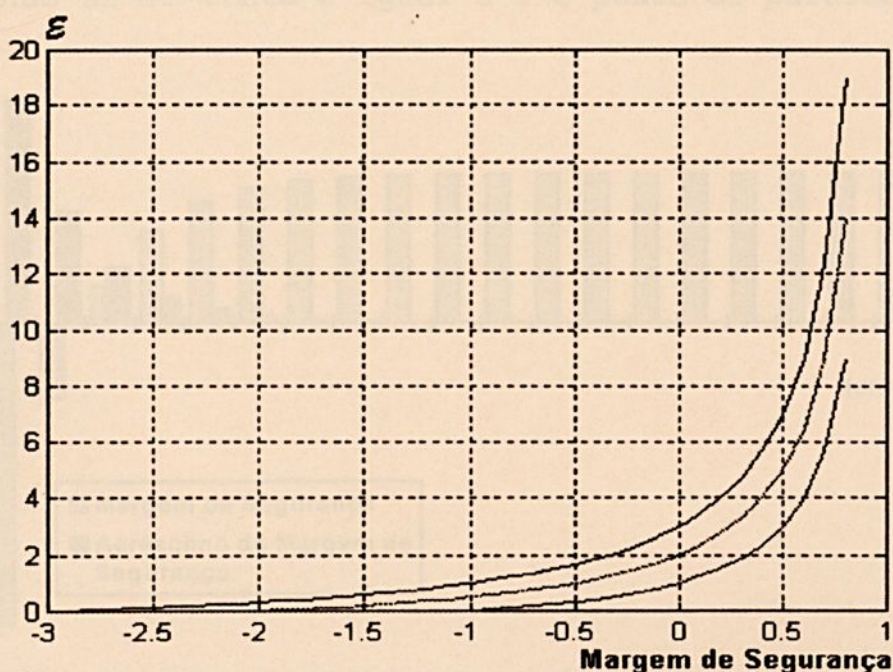


FIGURA 2. Esforço de deslocamento da margem de segurança em função da margem de segurança a ser atingida (M_A), considerando M^0 igual a (-3), (-2) e (-1), respectivamente.

A equação (8.2.1) fornece uma idéia de quanto a relação (E_e/E_{crit}), referente ao objetivo a ser atingido (M_A), é menor que o valor desta mesma relação calculada na condição inicial (M^0). A unidade subtraída em (8.2.1) é utilizada com o propósito de ajustar esta equação de tal modo que se tenha $\varepsilon = 0$, quando $M_A = M^0$ (neste caso, nenhum esforço é observado). Nota-se que, ε é definido no intervalo $[0, +\infty)$ e tem crescimento significativo à medida que M_A se aproxima de 1.

CRITÉRIO 1. Propõe-se como critério de determinação do passo do processo iterativo, A ADOÇÃO DE ε CONSTANTE ([30]).

A idéia básica contida no critério 1 é a manutenção da precisão, dentro de uma mesma faixa de valores a cada passo do cálculo iterativo.

A Figura 3 mostra o comportamento da margem de segurança alvo (M_A) em função do número de iterações do processo iterativo e acréscimo da margem obtida a cada iteração, considerando-se em conta ε igual a 1 e ponto de partida $M^0 = -2$.

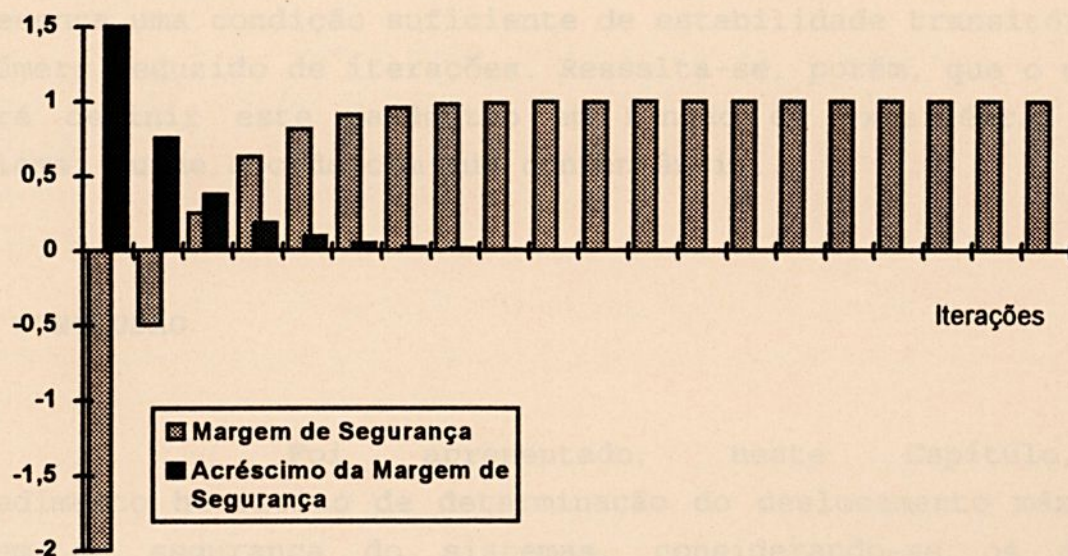


FIGURA 3. Comportamento da margem de segurança alvo em função do número de iterações, adotando-se $\varepsilon = 1$ e ponto de partida $M^0 = -2$.

Da Figura 3, observa-se que, considerando-se $\varepsilon = 1$ e $M^0 = -2$, com duas iterações obtém-se M_A igual a 0,2. Para se obter M_A igual a 0,95 são necessárias 6 iterações. Portanto, o maior ganho, na margem de segurança, é obtido nas duas primeiras iterações. Nas iterações subseqüentes o ganho torna-se pouco expressivo.

Considerando-se os resultados acima, pode-se arbitrar dois parâmetros importantes para a realização do controle preventivo dinâmico, que são: a magnitude de ε e margem de segurança final a serem obtidas.

Através da experiência com este tipo de problema, tem-se observado que o ε deve situar-se entre 1 e 1,5. Abaixo de 1, o número de iterações torna-se elevado, aumentando conseqüentemente o custo computacional, enquanto que para valores acima de 1,5, o erro introduzido pode se tornar significativo.

Ressalta-se que o objetivo do controle preventivo é encontrar uma nova margem de segurança positiva. Entretanto, à medida que M_A cresce, crescerá também o número de iterações, e a ação de controle será mais dispendiosa. Deste modo, é conveniente adotar-se $M_{\min}$ em torno de 0,3 ([30]). Este número representa uma condição suficiente de estabilidade transitória com um número reduzido de iterações. Ressalta-se, porém, que o usuário poderá definir este parâmetro em função da experiência com o problema, ou de acordo com sua conveniência.

8.3. CONCLUSÃO

Foi apresentado, neste Capítulo, um procedimento heurístico de determinação do deslocamento máximo da margem de segurança do sistemas, considerando-se os modelos linearizados desenvolvidos nos capítulos anteriores.



CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

9.1. CONCLUSÃO

A análise de estabilidade transitória constitui-se num dos principais estudos realizados em SEE (Sistemas de Energia Elétrica). Trata-se de um procedimento que visa avaliar os efeitos provocados por perturbações consideradas de larga escala. Neste caso, o modelo do sistema é descrito por um conjunto de equações algébricas e diferenciais não-lineares.

Como mencionado anteriormente, o comportamento não-linear exige permanente monitoração do desempenho do sistema frente à ocorrência destes defeitos. Nos casos instáveis, ou havendo violação dos limites de capacidade dos equipamentos, é imperativo a adoção de medidas que possibilitem conduzir o sistema ao estado seguro, que constitui o Controle Preventivo.

Deste modo, este trabalho teve por objetivo a formulação de modelos para o controle preventivo de SEE, utilizando-se as várias alternativas disponíveis de ações, e.g., corte de carga, alterações estruturais do sistema de transmissão e controle da excitação.

O modelo da dinâmica do sistema adotado neste trabalho corresponde ao modelo clássico com variáveis de estado referidas ao centro de inércia.

Os modelos foram desenvolvidos através da análise de sensibilidade ([6], [23], [29]) da margem de segurança com relação às variáveis de ação de controle. A margem de segurança, expressa em função da energia total do sistema, pode ser interpretada como uma medida de "distância" em relação à condição de instabilidade do sistema. Deste modo, através da análise de estabilidade pôde-se determinar as correções



necessárias à eliminação ou atenuação de problemas de instabilidade referentes aos transitórios eletromecânicos.

O procedimento para o cálculo da sensibilidade da margem de segurança foi baseado no uso de séries de Taylor, cuja precisão do resultado pode ser controlada através da magnitude do período de atualização dos coeficientes das séries, bem como, pelo número de termos das séries.

Os modelos que estabelecem as variações da margem de segurança do sistema em função das variações nas ações de controle ora mencionadas, foram desenvolvidos sem ater-se aos procedimentos de determinação de suas magnitudes para cada problema específico. Ou seja, as soluções pertinentes poderão ser determinadas através de um problema de otimização convencional comumente abordado na literatura. O objetivo foi, por conseguinte, proporcionar aos usuários um conjunto de modelos que levem em consideração os aspectos dinâmicos da rede.

9.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se os modelos desenvolvidos neste trabalho são sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- implementação computacional do modelo de sensibilidade da margem de segurança referente ao corte de carga;
- implementação computacional do modelo de sensibilidade da margem de segurança considerando o controle de excitação;
- implementação computacional do modelo de sensibilidade da margem de segurança referente às alterações estruturais do sistema de transmissão, em especial, a utilização de FACTS;



- finalmente, o desenvolvimento de um procedimento eficiente e capaz de integrar as várias alternativas de controle acima mencionadas e, ainda, o redespecho de geração.

A solução destes problemas deve ser buscada através de formulações de problemas de otimização. Neste caso, sugere-se o emprego de técnicas baseadas em redes neuronais ([12], [13], [25], [37], [38], [40], [42]) e lógica nebulosa ([24], [39]), as quais são conceitos modernos de otimização.

As redes neuronais, destinadas à solução de problemas de otimização, são circuitos elétricos dedicados que simulam o conjunto de restrições e a função objetivo de um problema de otimização. A vantagem da utilização destas redes, a princípio, é a maior velocidade na obtenção das soluções, se comparadas aos algoritmos convencionais, tendo em vista, principalmente, a grande razão de convergência do processo e a facilidade de paralelização do método.



CAPÍTULO 10

REFERÊNCIAS

- [01] AGGOUNE, M.; EL-SHARKAWI, M. A.; PARK, D. C.; DAMBORG, M. J. and MARKS II, R. J. "Preliminary Results on Using Artificial Neural Networks For Security Assessment", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 6, No. 2, May 1991, pp. 890 - 896.
- [02] ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A. - **Power System Control And Stability**, Iowa State University Press, 1977.
- [03] ATHAY, T.; SHERKET, V. R.; PODMORE, R.; VIRMANI, S. and PUECH, C. "Transient Energy Stability Analysis", **Conference on 'System Engineering For Power'** Davos, Switzerland, 1979.
- [04] BERGEN, A. L. and HILL, D. J. "A Structure Preserving Model Power System Stability", **IEEE Transactions on Power Apparatus Systems**, 1981, Vol. PAS - 100, No. 1 pp. 25 - 35.
- [05] BETTIOL, A.L.; FONSECA, L.G.S. & MINUSSI, C.R. "Melhoria de Segurança Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Através do Controle de Excitação", **9.º Congresso Brasileiro de Automática**, Vitória - ES, 1992, Vol. 1, pp. 274 - 279.
- [06] BREWER, J. W. "Kronecker Products And Matrix Calculus in System Theory", **IEEE Trans. PAS**, Vol. PAS - 103, No. 7, 1984, pp. 1629 - 1636.
- [07] CHANDRASHEKHAR, K. S. "Online Correction Dispatch Algorithm For Dynamic Security", **IEE Proceedings**, 1985, Vol. 132, Pt. C, No. 1, pp. 20 - 22.



- [08] CHANDRASHEKHAR, K. S. and HILL, D. J. "Dynamic Security Dispatch: Basic Formulation", **IEEE Trans. PAS**, 1983, Vol. PAS - 102, No. 7, pp. 2145 - 2152.
- [09] CHIANG, H-D. and THORP, J. S. "The Closest Unstable Equilibrium Point Method For Power System Dynamic Security Assessment", **IEEE Transactions on Circuits And Systems**, Vol. 36, No. 9, Sept. 1989, pp. 1187 - 1199.
- [10] CHIANG, H-D.; WU, F. F. and VARAIYA, P. P. "A BCU Method For Direct Analysis of Power System Transient Stability", **IEEE / PES 1991 Summer Meeting**, San Diego, California, August 1991, Paper 91 SM 423-4 PWRs.
- [11] CHIANG, H-D.; WU, F. F.; VARAIYA, P. P. and TAN, C-W. "Theory of The Potential Energy Boundary Surface", 2.nd CDC - **IEEE**, Dec. 1985, pp. 49 - 69.
- [12] CHIU, C. MAA, C-Y. SHANBLATT, M. A. "Energy Function Analysis of Dynamic Programming Neural Networks", **IEEE Transactions on Circuits And Systems**, Vol. 2, No. 4, July 1991, pp. 418 - 426.
- [13] CHUA, L. O. and LIN, G. N. "Nonlinear Programming Without Computation", **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, Vol. CAS-31, No. 2, February 1984, pp. 182 - 188.
- [14] DJUKANOVIC, M. B.; SOBAJIC, D. J. and PAO Y-H. "Neural Net Based Determination of Generator-Shedding Requirements in Electric Power Systems", **IEE Proceedings - C**, Vol. 139, No. 5, Sept. 1992, pp. 427 - 436.
- [15] FONSECA, L. G. S. e CARDOSO, E. N. "Correção da Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Via Alterações Topológicas da Rede", **LATINCON'92**, Santiago - Chile, Agosto - 92, pp. 58 - 64.



- [16] FONSECA, L. G. S., COLVARA, L. D. e MINUSSI, C. R. "Planejamento Automático do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Considerando Programação Heurística de Busca em Grafos e Análise de Estabilidade Transitória", **4.º Congresso Brasileiro de Automática**, 1982, pg. 445 - 450.
- [17] FONSECA, L. G. S. and DECKER, I. C. - Iterative Algorithm For Critical Energy Determination in Transient Stability of Power System, **IFAC - Symposium Planning & Operation in Electric Energy System**, 1985, Rio de Janeiro - RJ, Brazil, pp. 483 - 489.
- [18] FONSECA, L. G. S.; DECKER, I. C. and PEDROSO, A. S. "Estudo Comparativo de Métodos de Avaliação da Estabilidade Transitória", **ERLAC - CIGRE**, 1989, Foz do Iguaçu, PR. Brasil.
- [19] FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Correção de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Considerando-se Falhas Tipo Curto-Circuito, **VIII Congresso Chileno de Engenharia**, Chile.
- [20] FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Redespacho de Geração Para Controle de Segurança Dinâmica em Sistema de Energia Elétrica Através de Análise de Sensibilidade, **8.º Congresso Brasileiro de Automática**, 1990, Belém - PA.
- [21] FONSECA, L.G.S.; MONTOYA, N. & MINUSSI, C.R. "Cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo em Sistemas Interligados Com Restrição de Estabilidade Transitória", **9.º Congresso Brasileiro de Automática**, Vitória - ES, 1992, Vol. 2, pp. 892-897.
- [22] FOUAD, A. A. "An Expert System For Security Trend Analysis-Limited Power System", **IEEE Transactions on**



Power Systems, vol. 6, No. 3, August 1991, pp. 1077 - 1084.

- [23] FRANK, P. M. "Introduction To System Sensitivity Theory", **Academic Press**, 1978, N. York.
- [24] KAUFMANN, A. and GUPTA, M. M. "Fuzzy Mathematical Models In Engineering And Management Science", Elsevier Science Publishers B. V., New York, 2.nd Edition, 1991.
- [25] KENNEDY, M. P. and CHUA, L. O. "Neural Networks For Nonlinear Programming", **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, Vol. 35, No. 5, May 1988, pp. 554 - 562.
- [26] KURUDA, K.; TAKEGOSHI, Y.; YAMASHITA, K.; ITO, M. and FUKUI, S. "Verification of a Knowledge-Based Restoration Guidance System in a Local Dispatching Centre", **Electrical Power & Energy Systems**, Vol. 15, No. 3, 1993, pp. 185 - 192.
- [27] LEMMON, W. W.; MAMANDUR, K. R. C. and BARCELO, W. R. "Transient Stability Prediction And Control in Real-Time By QUEP", **IEEE Trans. Power Systems**, 1989, Vol. 4, No. 2, pp. 627 - 642.
- [28] MIKOLINAS, T. A. And WOLLENBERG, B. F. " An Advanced Contingency Selection Algorithm, **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-100, no. 2, 1981, pp. 747 - 755.
- [29] MINUSSI, C. R. - Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica: Uma abordagem de Análise Via Análise Modal, 7.^o Congresso Brasileiro de Automática, 1988, pp. 801 - 806.
- [30] MINUSSI, C. R. "Controle de Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica", Tese D.Sc., UFSC, Brasil, Nov. 1990.



- [31] MINUSSI, C. R. & PEREIRA, M. "Um Programa Computacional Para o Ensino de Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Energia Elétrica", **19^o Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**, João Pessoa, 1991, Vol. 1, pp. 113 - 122.
- [32] MINUSSI, C.R. "Desenvolvimento de Alternativas Para o Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica", **Relatório de RDIDP - UNESP**, junho-90 a junho-93.
- [33] NOBLE, B. and DANIEL, J. W. "Applied Linear Algebra", Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 19977.
- [34] PAI, M. A. "Power System Stability", North Holland Control Series, 1981.
- [35] PARK, J. H.; KIM, Y. S. EOM, I. K. and LEE, K. Y. "Economic Load Dispatch For Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Network", **IEEE/PES Summer Meeting**, 1992, paper 92 SM 412-7 PWRS.
- [36] RIBBENS-PAVELLA, M. and EVANS, P. J.- Direct Methods For Studying Dynamics Of Large-Scale Electric Power Systems - A survey, **Automatica**, 1985, vol. 21, pp. 1 - 21.
- [37] SASAKI, H.; WATANABE, M.; KUBOKAWA, J.; YORINO, N. and YOKOYAMA, R. "A Solution Method of Unit Commitment By Artificial Neural Networks", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 7, No. 3, August 1992, pp. 974 - 981.
- [38] SENDAULA, M. H.; BISWAS, S. K.; ELTOM, A.; PATEN, C. and KAZIBWE, W. "Simultaneous Solution of Unit Commitment And Dispatch Problems Using Artificial Neural Networks", **Electrical Power & Energy Systems**, Vol. 15, No. 3, 1993, pp. 193 - 199.



- [39] TERANO, T.; ASAI, K. and SUGENO, M. "Fuzzy Systems Theory And Its Applications", Academic Press, Inc., 1987.
- [40] UESAKA, Y. " Mathematical Aspects of Neuro-Dynamics For Combinatorial Optimization", **IEICE TRANSACTIONS**, Vol. E 74, No. 6, June 1991, pp. 1368 - 1372.
- [41] VITTAL, V.; ZHOU, E. Z.; HWANG, C. and FOUAD, A. A. "Derivation on Stability Limits Using Analytical Sensitivity of The Transient Energy Margin", **IEEE Trans. Power Systems**, vol. 4, No. 4, 1989, pp. 1363 - 1372.
- [42] WANG, J. "Analysis And Design of a Recurrent Neural Network For Linear Programming", **IEEE Transactions on Circuits And Systems - 1: Fundamental Theory And Applications**, Vol. 40, No. 9, September 1993, pp. 613 - 618.
- [43] XUE, Y.; VAN CUTSEN, Th. and RIBENS-PAVELLA, R. "A Simple Direct Method For Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 3, No. 2, 1988, pp. 400 - 412.
- [44] XUE, Y.; VAN CUTSEN, Th. and RIBENS-PAVELLA, R. "Real-Time Analytic Sensitivity Method For Transient Security Assessment And Preventive Control", **IEEE Trans. Power Systems**, 1989, Vol. 4, No. 4, pp. 1363 - 1372.
- [45] XUE, Y.; WEHENKEL, L.; BELHOMME, R.; ROUSSEAU, P.; RIBBENS-PAVELLA, M.; EUXIBIE, E.; HEILBRONN and LESIGNE, J. F. "Extended Equal Area Criterion Revised", **IEEE / PES 1991 Summer Meeting**, San Diego, California, August 1991, Paper 91 SM 422-6 PWRs.
- [46] ZHAO, J.; ISHIGANE, A.; KAWAMOTO, S. and TANIGUCHI, T. "Structural Control of Electric Power Networks For Transient Stability", **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 3, August 1994, pp. 1575 - 1581.



- [47] CHADALAVADA, V. and VITTAL, V. "Transient Stability Assessment For Network Topology Changes: Application of Energy Margin Analytical Sensitivity", **IEEE Trans. on Power Systems**, Vol. 9, No. 3, August 1994, pp. 1658 - 1664.

APÊNDICE A

Artigo:

"Melhoria da Segurança Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Através do Controle de Excitação"



APÊNDICE A

Artigo:

"Melhoria de Segurança Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Através do Controle de Excitação"

MELHORIA DE SEGURANÇA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
ATRAVÉS DO CONTROLE DE EXCITAÇÃO

Arlan Luiz Bettiol
ELETROSUL - DPL/DVPT
Pantanal - C.P. D-17
88048-Florianópolis-SC

Luiz G. de S. Fonseca
UFSC - Depto. E. E.
Trindade - C.P. 476
88049-Florianópolis

Carlos Roberto Minussi
DEE - FEIS - UNESP
Av. Brasil, 56 - C.P. 31
15378-Ilha Solteira-SP

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se um método para Melhoria de Segurança Dinâmica em Sistemas Elétricos de Potência, considerando-se a estabilidade transitória para defeitos tipo curto-circuito trifásico e modelo dinâmico que preserve a topologia da rede. O diagnóstico da estabilidade transitória é efetuado através do método SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial). O método de Melhoria de Segurança Dinâmica é desenvolvido através da análise de sensibilidade da margem de segurança, baseada nas indicações do método SLEP. Desta forma, propõe-se uma metodologia que estima a mudança de tensão nas barras externas de geração de modo que os efeitos dos transitórios eletromecânicos sejam minimizados para níveis considerados seguros. A alteração de tensão é determinada através de um procedimento heurístico.

Para testar a metodologia proposta, apresenta-se uma aplicação considerando-se um sistema de 10 máquinas.

Palavras-chave : Sistemas Elétricos de Potência, Métodos Diretos de Liapunov, Estabilidade Transitória, Otimização, Controle de Excitação, Análise de Segurança.

POWER SYSTEM DYNAMIC SECURITY ASSESSMENT BY EXCITATION CONTROL

ABSTRACT

In this work, a method for Power Systems Dynamic Security Assessment is proposed, considering the transient stability to three-phase short-circuit fault type and a model preserving the network topology. The transient stability diagnostic is accomplished by the PEBS (Potential Energy Boundary Surface) method. The dynamic security assessment method is developed via sensitivity analysis of the security margin based on PEBS method indication. In this way, we construct a methodology to estimate the voltage profile change in external generation buses necessary for minimizing the effects produced by electromechanical transients for secure levels. The voltage profile change is determined through a heuristic procedure.

To test the proposed methodology, it is presented an application considering a 10 machine system.

Keywords : Electric Power Systems, Liapunov's Direct Methods, Transient Stability, Optimization, Excitation Control, Security Analysis.

1. INTRODUÇÃO

A elevada dimensão física dos atuais Sistemas Elétricos de Potência (SEP), bem como seu comportamento não-linear, exigem uma permanente análise da segurança frente a possíveis perturbações. Para se garanti-la, deve-se analisar o comportamento do sistema para uma lista de contingências e, em caso de violação dos limites de segurança ditos seguros, devem ser tomadas ações de controle que propiciem a eliminação ou atenuação dos efeitos. Tais ações devem indicar onde atuar no sistema de maneira a ter sua segurança melhorada.

Até pouco tempo, a questão da Melhoria de Segurança Dinâmica (MSD) era abordada considerando-se os aspectos estáticos da rede, já tendo atingido a maturidade ideal. Contudo, tal análise não garante a segurança para perturbações mais severas tipo curto-circuito trifásico seguido de perda de equipamento. Desta forma, torna-se necessário efetuar estudos que envolvam também a estabilidade transitória.

Os métodos para MSD surgiram há pouco menos de 10 anos, sendo pequeno o número de publicações disponíveis (Fonseca e outros, 1982; Chandrashekar & Hill, 1983; Xue & Ribbens-Pavella, 1989; Fonseca & Minussi,

1990; Minussi, 1990 e outros).

Com o intuito de se apresentar um método com desempenho satisfatório do ponto de vista de qualidade das soluções e tempo de cálculo, propõe-se um procedimento para MSD através da análise de sensibilidade da margem de segurança. A margem de segurança pode ser interpretada como sendo uma "medida da distância em relação à situação de instabilidade do sistema". A partir do modelo obtido, sugere-se um procedimento heurístico para quantificar a alteração das tensões terminais das máquinas necessária à MSD. Como a alteração das tensões terminais das máquinas não ocasiona mudanças significativas no ponto nominal de operação, resultado da otimização global dos recursos energéticos e elétricos do sistema, esse tipo de ação de controle pode se mostrar eficiente na MSD, sem "custo" significativo para o sistema.

A análise de estabilidade é efetuada pelo método SLEP, considerando o modelo clássico sem redução às barras internas de geração (Fonseca & Decker, 1985).

A aplicação da metodologia proposta é ilustrada na MSD de um sistema multimáquinas.

2. Modelos Matemáticos do Sistema

A equação diferencial que descreve o movimento relativo ao centro de ângulos da i-ésima máquina síncrona de um SEP, constituído por n máquinas, é expressa através do modelo clássico por (Fonseca & Decker, 1985 ; Minussi, 1990)

$$M_i \ddot{\theta}_i - g_i(\theta) = 0, \quad i \in N \quad (2.1)$$

onde:

$$g_i(\theta) = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{MT} PCA$$

$$M_i = H_i / \pi f_0$$

$$H_i = \text{constante de inércia [s]}$$

$$f_0 = \text{frequência nominal da rede [60 Hz]}$$

$$\theta_i = \text{posição angular referida ao centro de ângulos [rad. elét.]}$$

$$\dot{\theta}_i = \text{velocidade angular referida ao centro de ângulos [rad. elét.]} \\ = \omega_i$$

$$P_{mi} = \text{potência mecânica de entrada [pu]}$$

$$P_{ei} = \text{potência elétrica ativa entregue pela máquina ao sistema [pu]}$$

$$PCA = \text{potência acelerante do centro de ângulos}$$

$$MT = \sum_{j \in N} M_j$$

$$N = \{1, 2, \dots, n\} = \text{número de máquinas.}$$

As potências elétricas ativa e reativa fornecidas pela i-ésima máquina podem ser expressas, respectivamente, por (Fonseca & Decker, 1985)

$$P_{ei} = -C_i f_i + D_i e_i \quad (2.2)$$

$$Q_{ei} = E_i^2 / X_d' i - C_i e_i - D_i f_i \quad (2.3)$$

onde:

$$C_i = E_i \cos \theta_i / X_d' i \quad (2.4)$$

$$D_i = E_i \sin \theta_i / X_d' i \quad (2.5)$$

$$E_i = \text{tensão interna da máquina} = A_i + jB_i$$

$$X_d' i = \text{reatância transitória de eixo direto da máquina.}$$

Modelando-se as cargas por impedâncias constantes, pode-se expressar as tensões e_i e f_i , respectivamente, por (Fonseca & Decker, 1985)

$$e_i = \sum_{k \in N} [R_{ik} D_k + X_{ik} C_k] \quad (2.6)$$

$$f_i = \sum_{k \in N} [-R_{ik} C_k + X_{ik} D_k] \quad (2.7)$$

onde:

R e X são as partes real e imaginária da submatriz Z_{gg} , sendo esta a solução do seguinte sistema de equações lineares

$$\begin{bmatrix} v_g \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_g \\ i_l \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde:

$$v_g = [v_{g1} \ v_{g2} \ \dots \ v_{gn}]^T$$

$$v_{gl} = \text{tensão da barra externa de geração} \\ = e_i + jf_i$$

$$v_l = [v_{l,n+1} \ v_{l,n+2} \ \dots \ v_{l,m}]^T$$

$$v_{ll} = \text{tensão das barras restantes do sistema}$$

$$i_g = [i_{g1} \ i_{g2} \ \dots \ i_{gn}]^T$$

$$i_{gl} = \text{corrente da máquina} = D_i - jC_i$$

$$n = \text{número total de barras do sistema.}$$

(g), (l) = subscritos que representam os índices relativos às barras de geração e de carga, respectivamente.

As partes real e imaginária da tensão interna da i-ésima máquina síncrona podem ser expressas por (Anderson & Fouad, 1977)

$$A_i = v_{gi} + (Q_{ei} X_d' i) / v_{gi} \quad (2.9)$$

$$B_i = (P_{ei} X_d' i) / v_{gi} \quad (2.10)$$

3. Análise de Estabilidade Transitória

A margem de segurança dinâmica associada à r-ésima contingência, pode ser interpretada como sendo uma "medida" da distância em relação à condição de instabilidade do sistema, constituindo-se numa quantificação do grau de estabilidade/instabilidade transitória do sistema, sendo expressa por (Fonseca & Decker, 1985)

$$M_r = (E_{critr} - E_{er}) / E_{critr} \quad (3.1)$$

onde:

$$E_{critr} = \text{energia crítica total do sistema}$$

$$E_{er} = \text{energia total correspondente ao tempo de eliminação de defeito.}$$

A energia crítica (E_{critr}), bem como o tempo crítico (t_{crit}), são determinados através do método SLEP.

A energia total associada ao sistema (2.1) é expressa por (Fonseca & Decker, 1985)

$$E(\theta, \omega) = E_c(\omega) + E_p(\theta) \quad (3.2)$$

onde:

$$E_c(\omega) = \frac{1}{2} \sum_{i \in N} M_i \omega_i^2 \quad (3.3)$$

$$= \text{energia cinética do sistema}$$

$$E_p(\theta) = - \sum_{i \in N} \int_{\theta_i}^{\theta_i} p_i g_i(\theta) d\theta_i \quad (3.4)$$

$$= \text{energia potencial do sistema.}$$

Desta forma, a estabilidade transitória do sistema para a r-ésima contingência é avaliada mediante o seguinte critério:

Se $M_r > 0$, o sistema associado à

r-ésima contingência é dito estável e

Se $M_r \leq 0$, o sistema associado à r-ésima contingência é dito instável.

A derivada direcional da energia potencial é expressa por (Athay, 1979)

$$D(\theta) = - \frac{1}{\| \theta - \theta^p \|_e} < g(\theta), (\theta - \theta^p) >$$

onde:

$$< a, b > = \text{produto escalar de } a, b \in \mathbb{R}^n$$

$$p = \text{superescrito que denota o estado de equilíbrio pós-falta.}$$

Definição: a Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) (Fonseca & Decker, 1985) é o conjunto de pontos $\theta \in \mathbb{R}^n$ correspondentes aos zeros da derivada direcional, excetuando-se o ponto de equilíbrio estável do sistema, que primeiro são alcançados quando se percorre uma direção radial a partir da origem.

Propriedade: A derivada direcional se mantém sempre positiva para trajetórias estáveis (Athay, 1979 ; Fonseca & Decker, 1985).

Portanto, o método SLEP consiste na busca de um ponto na trajetória sob defeito, tal que a evolução pós-defeito, começando neste ponto, encontre a máxima aproximação à SLEP.

4. Melhoria de Segurança Dinâmica Através da Análise de Sensibilidade

O problema de MSD associado ao critério da margem de segurança é assim enunciado:

Problema: Supondo-se que, para uma lista de S contingências analisadas, encontram-se R contingências em sobrecarga ($M_r \leq M_{\min}$, $r=1, R$, $R \leq S$). Então, para conduzi-lo ao estado dito seguro, se possível, deve-se impor ações de controle tal que se obtenha

$$M \geq M_{\min}$$

onde:

$$M = \text{margem de segurança do sistema} \\ = \min \{ M_r \}$$

$$M_{\min} = \text{margem de segurança mínima permissível } (\geq 0).$$

Tais ações de controle ocasionam incrementos ΔM_r nas margens de segurança, de modo que:

$$M_r + \Delta M_r \geq M_{\min}, \quad r=1, R \quad (4.1)$$

onde:

$$M_r = \text{margem de segurança da } r\text{-ésima contingência.}$$

4.1. Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão Interna de Geração

Da equação (4.1), tem-se que

$$\Delta M_r \geq M_{\min} - M_r^0 \quad (4.1.1)$$

O acréscimo ΔM_r necessário à MSD em função da alteração da tensão interna pré-falta das máquinas, pode ser determinado através da análise de sensibilidade por

$$\Delta M_r \approx < \partial M_r / \partial E^a, \Delta E^a > \quad (4.1.2)$$

onde:

$$\partial M_r / \partial E^a = \text{sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão interna pré-falta}$$

$$\Delta E^a = \text{acréscimo de tensão interna pré-falta}$$

$$(a) = \text{superescrito que denota o estado de equilíbrio pré-falta.}$$

A sensibilidade da r -ésima margem de segurança em relação à tensão interna pré-falta é expressa por

$$\frac{\partial M_r}{\partial E^a} = \frac{K_r \frac{\partial E_{critr}}{\partial E^a} \Big|_{(\theta_r^c, \omega_r^c)} - \frac{\partial E_{er}}{\partial E^a} \Big|_{(\theta_r^e, \omega_r^e)}}{E_{critr}} \quad (4.1.3)$$

onde:

$$K_r = E_{er} / E_{critr}$$

$$\partial(.) / \partial E^a = [\partial(.) / \partial E_1^a, \partial(.) / \partial E_2^a, \dots, \partial(.) / \partial E_n^a]^T$$

$$\partial(.) / \partial X \Big|_{\chi} = \text{derivada parcial de } (.) \text{ em } n$$

$$\text{relação a } X \text{ e avaliada em } \chi$$

$$(c), (e) = \text{superescritos que correspondem aos estados crítico e de eliminação de defeito.}$$

Desenvolvendo-se, inicialmente, as expressões referentes à segunda parcela do numerador, tem-se as componentes dos gradientes expressas por

$$\frac{\partial E_{er}}{\partial E_j^a} \Big|_{(\theta^e, \omega^e)} = \frac{\partial E_{cr}}{\partial E_j^a} \Big|_{\omega^e} + \frac{\partial E_{pr}}{\partial E_j^a} \Big|_{\theta^e} \quad (4.1.4)$$

onde:

$$\frac{\partial E_{cr}}{\partial E_j^a} = < \frac{\partial E_{cr}}{\partial \omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial E_j^a} >$$

$$\frac{\partial E_{pr}}{\partial E_j^a} = < \frac{\partial E_{pr}}{\partial P_m} \cdot \frac{\partial P_m}{\partial E_j^a} > + < \frac{\partial E_{pr}}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial E_j^a} > + < \frac{\partial E_{pr}}{\partial \theta^p} \cdot \frac{\partial \theta^p}{\partial E_j^a} > + \frac{\partial}{\partial E_j^a} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{ei} d\theta_i \right\}$$

sendo:

$$\frac{\partial E_{cr}}{\partial \omega} = \text{Diag} (M_s, s \in N) \cdot \omega, \quad \frac{\partial E_{pr}}{\partial P_m} = \theta^p - \theta$$

$$\frac{\partial E_{pr}}{\partial \theta} = P_e - P_m, \quad \frac{\partial E_{pr}}{\partial \theta^p} = 0$$

$$\frac{\partial P_{mi}}{\partial E_j^a} = \begin{cases} P_{mi}/E_i^a + R_{ii} \cdot E_i^a / X_{di}^2, & i = j \\ R_{ij} \cdot (C_i^a \cdot C_j^a + D_i^a \cdot D_j^a) + X_{ij}^a (D_i^a \cdot C_j^a - C_i^a \cdot D_j^a) / E_j^a, & i \neq j \end{cases}$$

$$\frac{\partial}{\partial E_j^a} \left\{ \sum_{i \in N} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} P_{ei} d\theta_i \right\} = \sum_{i \in N} \left\{ \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} [R_{ij}^a (C_i^a \cdot C_j^a + D_i^a \cdot D_j^a) / E_j^a + X_{ij}^a (D_i^a \cdot C_j^a - C_i^a \cdot D_j^a) / E_j^a] d\theta_i \right\} + \int_{\theta_j^p}^{\theta_j} \frac{P_{ej}}{E_j^a} d\theta_j + R_{jj}^a \cdot E_j^a \cdot (\theta_j - \theta_j^p) / X_{dj}^2, \quad i \neq j$$

$$\theta^p = [\theta_1^p \ \theta_2^p \ \dots \ \theta_n^p]^T, \quad \theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T \\ P_e = [P_{e1} \ P_{e2} \ \dots \ P_{en}]^T, \quad \omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_n]^T \\ P_m = [P_{m1} \ P_{m2} \ \dots \ P_{mn}]^T$$

O estado (θ^e, ω^e) é determinado através da solução das equações diferenciais (2.1), considerando-se a configuração sob defeito e avaliada em t_e (tempo de eliminação de defeito). Como uma alternativa à solução numérica passo a passo, emprega-se a expansão por séries de Taylor na solução destas equações (Fonseca & Decker, 1985). Assim, dado dois instantes distintos t_{h-1} e t_h , dentro deste intervalo, os ângulos e velocidades serão funções unicamente do tempo, com os coeficientes das séries avaliados em t_{h-1} . Deste modo, os gradientes de θ^e e ω^e , em qualquer instante, são determinados derivando-se parcialmente os coeficientes das séries sucessivamente da seguinte forma

$$\partial \theta_i(t) / \partial E_j^a = \sum_{q=0}^{\infty} \frac{\partial \theta_i(t)}{\partial E_j^a} \Big|_{t_{h-1}} \frac{(t - t_{h-1})^q}{q!} \quad (4.1.5)$$

$$\partial \omega_i(t) / \partial E_j^a = \frac{d}{dt} \left[\partial \theta_i(t) / \partial E_j^a \right], \quad i, j \in N$$

A precisão destas aproximações depende de fatores como duração da falta, ordem das aproximações, tipo de trajetória (sob ou pós-defeito), etc..

Da equação (2.1), deduz-se que

$$\begin{aligned} (1) \quad \dot{\theta}_1 &= \omega_1 \\ (2) \quad \dot{\theta}_1 &= M_1^{-1} [P_{m1} - P_{e1} - M_1 \sum_{j \in N} (P_{mj} - P_{ej})] \\ &\vdots \\ (q) \quad \dot{\theta}_1 &= -M_1^{-1} \cdot P_{e1} (q-2) + M_1^{-1} \sum_{j \in N} P_{ej} (q-2), \\ &\quad i \in N, \quad q=2, 3, s \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

As derivadas temporais da potência elétrica ativa (2.2) são determinadas por

$$Pe_i = \sum_{q=1}^{m+1} \tau(m+1), q \left[D_i \cdot e_i - C_i \cdot f_i \right] \quad (4.1.7)$$

onde : $\tau(m+1), 1 = \tau q = 1$
 $\tau(m+1), q = \tau m, q + \tau m, (q-1), (m+1) \cdot q.$

As derivadas temporais de C_i, D_i, e_i e f_i podem ser expressas por

$$C_i^{(1)} = -D_i \cdot \theta_i^{(1)} \quad (4.1.8)$$

$$C_i^{(m)} = -\sum_{q=1}^m \tau m q \cdot \theta_i^{(m-q+1)} \cdot D_i \quad (4.1.9)$$

$$D_i^{(1)} = C_i \cdot \theta_i^{(1)} \quad (4.1.10)$$

$$D_i^{(m)} = \sum_{q=1}^m \tau m q \cdot \theta_i^{(m-q+1)} \cdot C_i \quad (4.1.11)$$

$$e_i^{(1)} = \sum_{k \in N} [R_{ik} \cdot D_k^{(1)} + X_{ik} \cdot C_k^{(1)}] \quad (4.1.12)$$

$$f_i^{(1)} = \sum_{k \in N} [-R_{ik} \cdot C_k^{(1)} + X_{ik} \cdot D_k^{(1)}] \quad (4.1.13)$$

que são determinadas de forma recursiva.

Portanto, a sensibilidade de θ_i e ω_i , em determinado instante da trajetória, com relação à tensão interna E^a , é calculada por

$$\frac{\partial Pe_i}{\partial E_j^a} = \sum_{q=1}^{m+1} \tau(m+1), q \left[\frac{\partial D_i}{\partial E_j^a} \cdot e_i + D_i \cdot \frac{\partial e_i}{\partial E_j^a} - \frac{\partial C_i}{\partial E_j^a} \cdot f_i + C_i \cdot \frac{\partial f_i}{\partial E_j^a} \right] \quad (4.1.14)$$

onde:

$$\frac{\partial D_i}{\partial E_j^a} = \sum_{q=1}^m \tau m q \cdot \left[\frac{\partial \theta_i}{\partial E_j^a} \cdot C_i + \theta_i \cdot \frac{\partial C_i}{\partial E_j^a} \right] \quad (4.1.15)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial E_j^a} = -\sum_{q=1}^m \tau m q \cdot \left[\frac{\partial \theta_i}{\partial E_j^a} \cdot D_i + \theta_i \cdot \frac{\partial D_i}{\partial E_j^a} \right] \quad (4.1.16)$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial E_j^a} = \sum_{k=1}^n \left[R_{ik} \cdot \frac{\partial D_k}{\partial E_j^a} + X_{ik} \cdot \frac{\partial C_k}{\partial E_j^a} \right] \quad (4.1.17)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial E_j^a} = \sum_{k=1}^n \left[-R_{ik} \cdot \frac{\partial C_k}{\partial E_j^a} + X_{ik} \cdot \frac{\partial D_k}{\partial E_j^a} \right] \quad (4.1.18)$$

Para o cálculo final das sensibilidades $\partial \theta_i(t)/\partial E_j^a$ e $\partial \omega_i(t)/\partial E_j^a$, faz-se necessário determinar as condições de partida do processo recursivo. Admitindo-se um fraco acoplamento elétrico entre θ^a e E^a , pode-se dizer que $\partial \theta_i^a/\partial E_j^a \approx 0$ e $\partial \omega_i^a/\partial E_j^a \approx 0$. (4.1.19)

Para a conclusão do cálculo da sensibilidade da margem de segurança, resta a sensibilidade da energia total crítica, a qual pode ser avaliada, com boa precisão, através da seguinte aproximação (Fonseca & Minussi, 1990)

$$\frac{\partial E_{crit}}{\partial E^a} \Big|_{(\theta^c, \omega^c)} \approx \frac{\partial E_{er}}{\partial E^a} \Big|_{(\theta(tc), \omega(tc))} \quad (4.1.20)$$

a qual é facilmente determinada através do uso em séries de potência, sem aumento de custo computacional, bastando-se apenas armazenar o valor da sensibilidade no instante t_{crit} na trajetória pós-defeito.

4.2. Sensibilidade da Margem de Segurança em Relação à Tensão das Barras Externas de Geração

Na operação de SEP, a tensão interna da máquina síncrona não se apresenta como uma indicação usual do perfil de tensão global do sistema. Ao contrário disto, a tensão das barras externas de geração constituem-se em parâmetros mais expressivos no controle de tensão nodal, sendo sua monitoração de uso corrente em estudos de estabilidade.

Estabelecendo-se uma relação linear entre a variação da tensão interna da máquina ΔE^a e a variação de tensão da barra externa de geração ΔVg^a , obtém-se :

$$\Delta E^a = H^a \cdot \Delta Vg^a \quad (4.2.1)$$

onde:

$$H^a = [H_{ij}] = \partial E_i^a / \partial Vg_j^a.$$

Os coeficientes da matriz H^a são determinados pelas expressões

$$\frac{\partial E_i}{\partial Vg_j} = \left\{ v g_i - (Q e_i^2 \cdot X d_i'^2 / v g_i^2) - (P e_i^2 \cdot X d_i'^2 / v g_i^2) + [X d_i' + (Q e_i \cdot X d_i'^2 / v g_i^2)] \cdot [2 \cdot v g_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin \psi_{ij} + \sum_{j \in N} v g_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin (\psi_{ij} + \delta_i - \delta_j)] \right\} / E_i^a \quad (4.2.2)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial Vg_j} = \left\{ [X d_i' + (Q e_i \cdot X d_i'^2 / v g_i^2)] \cdot v g_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin (\psi_{ij} + \delta_i - \delta_j) \right\} / E_i^a, \quad i \neq j. \quad (4.2.3)$$

onde :

$v g_i, v g_j$ = tensões externas das máquinas

Y_{ij} = condutância de transferência entre as máquinas

ψ_{ij} = defasamento angular entre as máquinas

δ_i, δ_j = posição angular das máquinas.

Com isso, a sensibilidade da r -ésima margem de segurança em relação à tensão externa de geração pode ser expressa por

$$< \partial M_r / \partial E^a, H^a \cdot \Delta Vg^a > \geq M_{min} - M^p. \quad (4.2.4)$$

Esta equação é composta por n variáveis, possuindo infinitas soluções. Portanto, deve-se estabelecer um procedimento de otimização que conduza à soluções viáveis.

5. Alteração das Tensões Externas de Geração

Uma solução viável para a equação (4.2.4) pode ser determinada através da minimização de alteração da tensão das barras externas de geração (barras PV).

Como a tensão das barras PV afeta muito pouco o despacho das usinas, o desvio do ponto nominal de operação é pequeno. Contudo, devem ser respeitadas as restrições estáticas inerentes do sistema, como níveis de tensão nas barras PV, carregamento das linhas de transmissão e transformadores, curva de capacidade das máquinas, etc.,

Desta forma, a solução da MSD, caso essa seja viável, é tratada como um problema de controle preventivo com restrições estáticas e dinâmicas, podendo ser encontrada através de um procedimento heurístico de alteração da tensão das barras externas de geração que objetiva melhorar a margem de segurança da contingência mais severa. Tal procedimento iterativo procura satisfazer a equação (4.2.4), usando a indicação de quais barras apresentam maior sensibilidade de margem de segurança.

Algoritmo De Alteração Das Tensões Terminais

Passo 1. Inicialização

- Se o número máximo de iterações não foi excedido na k -ésima alteração, vá para o Passo 2.
- Do contrário, finalizar o procedimento.

Passo 2. Leitura dos dados das contingências em sobrecarga na k -ésima modificação, da tensão das barras externas de geração da modificação anterior $V_{gj}(k-1)$, dos limites inferior V_{gmin} e superior V_{gmax} admissíveis para as barras externas e do maior incremento de tensão ΔV_{gmax} .

Passo 3. Cálculo da sensibilidade da margem de segurança em relação à tensão das barras externas de geração para as contingências em sobrecarga.

Passo 4. Para as contingências em sobrecarga na k -ésima modificação, classificar a contingência que apresenta a menor margem de segurança (contingência mais severa), a qual passa a ser contingência a ser monitorada para a MSD

$$M^o = \min M_i$$

Passo 5. Ordenar as sensibilidades da margem de segurança $S_j(k)$ relativos à contingência mais severa da k -ésima modificação, denotando-se por máxima sensibilidade àquela de maior módulo

$$MS(k) = \max_k |S_i(k)|$$

Passo 6. Para cada barra externa de geração :

$$\Delta V_{gj}(k) = S_j(k) / MS(k) \cdot \Delta V_{gmax}$$

$$V_{gj}(k) = V_{gj}(k-1) + \Delta V_{gj}(k)$$

Se $V_{gj}(k) > V_{gmax}$, então $V_{gj}(k) = V_{gmax}$

Se $V_{gj}(k) < V_{gmin}$, então $V_{gj}(k) = V_{gmin}$

Passo 7. Processar o Fluxo de Potência da $(k+1)$ -ésima alteração com as modificações de tensão nas barras de geração indicadas no Passo 6.

Portanto, a MSD através da modificação da tensão das barras externas de geração pode ser entendida através da ilustração abaixo

Sistema Pré-Falta Sistema Pós-Falta

$$V_g^a \longrightarrow M \leq 0$$

$$V_g^a + \Delta V_g^a \longrightarrow M + \Delta M > 0$$

6. Aplicação da Metodologia

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos empregando-se a metodologia proposta na MSD do sistema Sul-Brasileiro, cujos dados encontram-se na referência (Minussi, 1990).

Consideram-se faltas tipo curto-circuito trifásico com tempo de permanência de defeito de 9 ciclos, seguido de perda da linha em falta. Para fins de MSD, considera-se a margem de segurança mínima permissível de 0.3, estando os resultados da análise de estabilidade, para o caso base, mostrados na Tabela 1.

Para todas as máquinas, tem-se os limites máximo e mínimo de tensão externa iguais a 1.05 e 0.95 pu, respectivamente. O incremento de tensão máximo adotado em cada iteração é de 0.02 pu.

Na Tabela 2 são mostrados os resultados da análise de estabilidade após o emprego da metodologia em 6 iterações. Na aplicação do método SLEP, foram utilizadas séries de potência com aproximação de sexta ordem.

A margem de segurança do sistema inicial era de -0.356, caracterizando a instabilidade do sistema para a pior contingência. Com a alteração de tensão através do algoritmo proposto, foi obtida uma nova margem igual a 0.248 após 6 iterações (limitada por restrições de tensão), o que caracteriza a estabilidade do sistema para a pior contingência. Apesar da margem alcançada ser ainda inferior a margem desejada (0.3), o algoritmo proposto mostra ter um desempenho satisfatório na MSD.

Tabela 1 - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança (Caso Base)

Barra	Circuito	Retirado	Tempo	Margem de
Curto	De	Para	Critico	Segurança
			(Ciclos)	
374	374	375	8.4	-0.356
374	374	371	10.2	0.156
374	374	433	10.2	0.249
408	408	414	11.4	0.341
391	391	398	18.6	0.816
370	370	368	21.0	0.875
391	391	343	22.8	0.901
382	382	386	22.2	0.903
391	391	389	21.6	0.908
382	382	343	27.0	0.942

Tabela 2 - Contingências ordenadas segundo o critério da margem de segurança (Caso Após 6 Alterações)

Barra	Circuito	Retirado	Tempo	Margem de
Curto	De	Para	Critico	Segurança
			(Ciclos)	
408	408	414	10.8	0.248
374	374	375	10.8	0.260
374	374	371	12.0	0.444
374	374	433	12.0	0.494
391	391	398	17.4	0.781
370	370	368	20.4	0.862
391	391	389	20.4	0.891
382	382	386	21.6	0.892
391	391	343	22.2	0.894
382	382	384	26.4	0.942

7. Conclusão

Neste trabalho, foi apresentado um método para Melhoria de Segurança Dinâmica considerando-se a estabilidade transitória para faltas tipo curto-circuito trifásico seguido de perda de equipamento.

Esta melhoria consiste na determinação de uma equação incremental, através de análise de sensibilidade, entre a margem de segurança e a ação de controle exercida pela alteração da tensão das barras externas de geração. A partir deste modelo, foi proposto um algoritmo heurístico para determinação dos incrementos de tensão necessários à melhoria da margem de segurança.

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia em um sistema de 10 máquinas, mostram resultados satisfatórios alcançados com o uso do método proposto.

8. Referências Bibliográficas

ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A. - Power System Control And Stability, Iowa State University Press, 1977.

ATHAY, T.; SHERKET, V. R.; PODMORE, R. ; VIRMANI, S. and PUECH, C. - Transient Energy Stability Analysis, Conference on 'Systems Engineering For Power', 1979, Davos, Switzerland.

CHANDRASHEKHAR, K. S. and HILL, D. J. - Dynamic Security Dispatch : Basic Formulation, IEEE Trans. PAS, 1983, Vol. PAS-102, No. 7, pp. 2145-2152.

FONSECA, L. G. S. and DECKER, I. C. - Iterative Algorithm for Critical Energy Determination in Transient Stability of Power System, IFAC - Synposium Planning & Operation In Electric Energy Systems, Rio de Janeiro-RJ, Brazil, 1985, pp. 483-489.

FONSECA, L. G. S.; MINUSSI, C. R. e COLVARA, L. D. - Melhoria da Segurança Dinâmica em Sistemas de Potência Considerando a Estabilidade Transitória, IV CBA, 1982, Campinas-SP, Brasil, pp. 433-438.

FONSECA, L. G. S. e MINUSSI, C. R. - Correção de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Considerando-se Faltas Tipo Curto-Circuito, VIII Congresso Chileno de Ingenieria, 1989, Chile.

MINUSSI, C. R. - Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica, Tese DSc., 1990, UFSC.

XUE, Y. and RIBBENS-PAVELLA, M. - Extended Equal Area Criterion : An Analytical Ultra-Fast Method For Transient Stability Assessment And Preventive Control of Power Systems, Electrical Power & Energy Systems, 1989, Vol. 11, No. 2, pp. 131-149.



