

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ALGORITMO PARA MELHORIA DE SEGURANÇA EM
PROBLEMAS DE DESPACHO ECONÔMICO

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

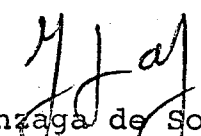
TERESINHA CADORIN OLIVO SAVI

FLORIANÓPOLIS, 25 DE MAIO DE 1981

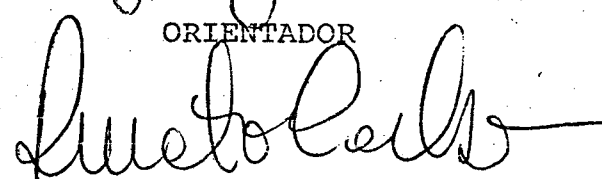
UM ALGORITMO PARA MELHORIA DE SEGURANÇA EM
PROBLEMAS DE DESPACHO ECONÔMICO

TERESINHA CADORIN OLIVO SAVI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA. ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

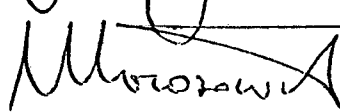
ORIENTADOR


Prof. Renato Carlson, Dr. Ing.

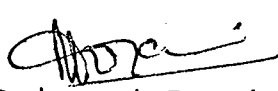
Coordenador do Curso de Pós-Gradua
ção em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.


Prof. Marciano Morozowski, M.Sc.


Prof. Cornelio Celso de Brasil Camargo, M.Sc.


Prof. Rajamani Doraiswami, Ph.D.

À Estela, Hanilson,
Amábile e Oracídio:
minha filha, esposo
e pais.

A G R A D E C I M E N T O S

Em especial ao Prof. Luis Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação e incentivo dado no decorrer deste trabalho.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, principalmente ao Prof. Cornelio Celso de Brasil Camargo e Eng^o Marcio Augusto Pereira de Souza pelo apoio recebido.

A CNEN e ELETROSUL pelo apoio financeiro.

R E S U M O

Foi desenvolvida uma metodologia para abordagem do problema de despacho econômico associado a uma análise e melhoria de segurança, baseadas na estabilidade transitória.

O problema de despacho econômico é formulado como um problema de programação não linear com restrições lineares e é utilizado o método dos gradientes projetados para sua solução. Para análise de segurança utiliza-se a energia do sistema como função de Liapunov e são calculados domínios de estabilidade. São definidos índices de segurança e sobrecarga que indicam a situação do sistema. Através dos limites inferiores, definidos a partir da função energia do sistema, é proposto um procedimento para melhoria da segurança, através de um remanejamento de geração, usado quando a solução do problema de despacho econômico é insegura.

São incluídos exemplos que ilustram o algoritmo.

A B S T R A C T

An approach was developed to economic dispatch problem associated with system security improvements based on transient stability constraints.

It was formulated as a problem of nonlinear programming with linear restrictions and the gradient projection method was used for the solution.

In the security analysis the system energy is used as a Liapunov function and the stability domains are calculated. Indexes of security and overload are defined to indicate the situation of the system. Through the inferior limits, defined by means of the system energy function, is proposed a procedure to improve the security, through a generation redistribution when the solution of the economic dispatch is unsafe.

Illustrative examples are included.

S U M Á R I O

SIMBOLOGIA	s.1
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 - DESPACHO ECONÔMICO	05
2.1 - Introdução	05
2.2 - Definição do problema de despacho econômico	05
2.2.1 - Função objetivo	06
2.2.2 - Restrições sobre o problema de despacho	06
2.3 - Considerações sobre o modelo utilizado	08
2.3.1 - Hipóteses utilizadas na linearização de restrições	08
2.3.2 - Restrição de segurança estática no modelo linearizado	10
2.4 - Cálculo de perdas	12
2.5 - Modelo do problema de despacho econômico com restrição de segurança estática	13
2.6 - Algoritmo para solução do problema	15
2.7 - Conclusões	19
CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	20
3.1 - Introdução	20
3.2 - Modelo matemático do sistema de potência	20
3.3 - Função de Liapunov	25
3.4 - Determinação dos domínios de estabilidade	27
3.5 - Algoritmo utilizado na análise e determinação dos domínios de estabilidade	29

3.6 - Conclusões	32
CAPÍTULO 4 - ESQUEMA DE MELHORA DE SEGURANÇA	33
4.1 - Introdução	33
4.2 - Limites inferiores	33
4.3 - Definição de índices de segurança e sobrecarga	35
4.4 - Algoritmo para melhora de segurança	37
4.5 - Exemplo	45
4.6 - Conclusões	54
CAPÍTULO 5 - DESPACHO ECONÔMICO COM RESTRIÇÃO DE ESTABILIDA- DE TRANSITÓRIA	55
5.1 - Introdução	55
5.2 - Algoritmo de despacho econômico com restrição de esta- bilidade transitória	56
5.3 - Exemplo	62
5.4 - Conclusão	65
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS..	66
6.1 - Conclusões	66
6.2 - Sugestões para futuros trabalhos	69
BIBLIOGRAFIA	71

S I M B O L O G I A

- P_{Gi} - potência ativa gerada na barra i .
 P_p - perda total de transmissão.
 $\underline{P_{Gi}}$ - limite mínimo de geração da unidade i .
 $\overline{P_{Gi}}$ - limite máximo de geração da unidade i .
 L - número de linhas de transmissão.
 V_i - tensão na barra i .
 G_{ij} - condutância da linha compreendida entre as barras i e j .
 $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ é a diferença angular entre a i -ésima e j -ésima barra.
 B_{ij} - susceptância da linha compreendida entre as barras i e j .
 X_{NN} - matriz reatância de barra.
 θ_N - vetor de ângulos de barra.
 P_N - vetor das injeções de potências de barra.
 NC - número de barras de carga do sistema.
 M_i - constante de inércia.
 d_i - constante de amortecimento.
 b_{ij} - constante de amortecimento assíncrono entre a i -ésima e j -ésima máquina.
 P_{ei} - potência elétrica entregue pela i -ésima máquina.
 P_{mi} - potência mecânica entregue a i -ésima máquina.
 δ_i - ângulo entre o eixo da i -ésima máquina e um eixo que gira a velocidade de referência.

- G_{ii} - carga equivalente na i -ésima barra de geração.
- B_{ij} - susceptância de transferência entre a barra interna da i -ésima e j -ésima máquina.
- E_i - tensão na barra interna da i -ésima máquina.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Com o crescimento dos sistemas de potência e o conseqüente aumento de complexidade devido ao aumento de cargas e interligação entre subsistemas, mais e mais estudos tem sido necessários para garantir uma melhor operação do sistema, procurando assegurar desta forma, a continuidade de serviços e uma operação a mínimo custo.

O problema de despacho econômico surgiu quando se defrontou com o problema de alocar a geração entre duas usinas alimentando uma mesma carga. Desde então, muito se tem feito e vários métodos foram propostos [1]. O método primitivo consistia em carregar a unidade mais eficiente, seguida da segunda unidade mais eficiente, e assim por diante. Um outro método utilizado baseava-se no fato das unidades serem carregadas sucessivamente até seu ponto de menor taxa de aquecimento, começando com a unidade mais eficiente.

O método baseado em custos incrementais surgiu por volta de 1930 [1]; verificou-se que a sua utilização representava uma grande economia na operação do sistema, embora não considerasse perdas de transmissão. Um avanço no problema de despacho econômico deu-se por volta de 1943 com a fórmula de perdas de transmissão baseada em superposição [2]. Certas simplificações foram consideradas, como fator de potência, tensão e ângulo constantes, resultando que a distribuição de carga numa base percentual permane

ce quase constante no período de ponta e fora de ponta.

Kirchmayer e Stagg [3] através dos trabalhos de Kron, baseados em análise tensorial, desenvolveram o método dos coeficientes B, utilizado no despacho primitivo que considera as usinas operando com custos incrementais iguais sendo incluídas as perdas. Este problema não considera nenhuma restrição sobre o sistema, com exceção da equação de balanceamento de potências ativas.

O despacho econômico exato, [4], [5] o qual nada mais é do que um programa de fluxo de potência onde os custos de operação são minimizados, considera o despacho de potência ativa e reativa. Devido ao grande número de variáveis envolvidas e ao grande número de restrições impostas sobre o sistema, obtém-se uma boa precisão na resposta porém com uma convergência bastante lenta, tornando inviável sua utilização na operação.

A segurança foi inicialmente introduzida por Carpentier [4] no problema de despacho econômico exato, através da consideração de diferenças angulares. Atualmente vários autores tem considerado a segurança, geralmente em termos de fluxo de potência máxima nas linhas de transmissão, introduzida no problema como uma restrição de desigualdade dependente das variáveis do sistema.

Do modelo clássico até os modelos atuais, a formulação de despacho econômico tem evoluído no sentido de se obter uma resposta com precisão razoável num tempo mínimo de processamento, considerando para isso, um menor número de variáveis. Dependendo do tipo da função objetivo e das restrições consideradas, técnicas diferentes são utilizadas na sua solução, como programação li

near [6],[7], programação não linear 8, 9 ou quadrática [10], [11].

O problema de despacho econômico utilizando no presente trabalho, capítulo 2, faz uso de programação não linear com o método dos gradientes projetados para sua resolução. Este método considera a função objetivo não linear sujeita a restrições lineares. É considerada a restrição de segurança em termos de fluxo de potência máximo nas linhas de transmissão. As linearizações das restrições são feitas com o auxílio das hipóteses válidas no fluxo de potência linear, sendo que há uma grande redução no número de variáveis, resultando num problema dependente somente da potência ativa do sistema.

No capítulo 3, para um ponto de operação estável em regime, são simuladas contingências sobre o sistema, com o objetivo da verificação da estabilidade transitória.

A análise de estabilidade transitória do sistema é realizada com o auxílio do algoritmo desenvolvido em [12], baseado no segundo método de Liapunov, utilizando-se a função energia do sistema. São calculados também, os domínios de estabilidade.

No caso de um ponto de operação não suportar a contingências, mostra-se no capítulo 4, que através do remanejamento de gerações pode-se obter uma distribuição das mesmas, de modo que o sistema torne-se seguro. Este remanejamento está relacionado com parcelas da energia potencial do sistema, chamadas limites inferiores. Neste capítulo é fornecido também, o algoritmo de remanejamento de gerações.

No capítulo seguinte é mostrado que, apesar da res

trição de segurança envolvida no problema de despacho econômico, nada se pode afirmar sobre a estabilidade transitória do sistema, pois o objetivo do mesmo é a distribuição de geração que fornece os mínimos custos numa condição estática. É apresentado o algoritmo de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória. Para um sistema de potência é encontrada a distribuição de gerações que fornece os mínimos custos e sobre este ponto de operação o algoritmo analisa a estabilidade. No caso do sistema não resistir às contingências, a geração é remanejada, obtendo-se então, um ponto seguro, se existir. É apresentado um exemplo para melhor ilustrar o desenvolvimento do algoritmo. As conclusões sobre o trabalho são apresentadas no capítulo seguinte.

C A P Í T U L O I I

DESPACHO ECONÔMICO COM SEGURANÇA

2.1 - Introdução

Neste capítulo é analisado o problema de despacho econômico considerando, além das restrições quanto a equação de balanceamento de potências e de limites de geradores, a restrição de segurança estática que compreende a limitação de fluxos nas linhas de transmissão.

Inicialmente são analisadas as componentes do problema numa forma geral, progredindo para a forma simplificada adotada neste trabalho e fazendo-se uso do método dos gradientes projetados. A seguir, é apresentado o algoritmo do mesmo.

2.2 - Definição do problema de despacho econômico

O termo despacho econômico é associado a problemas em que se determina as potências ativas a serem geradas, com os mínimos custos de operação. No problema, a demanda P_{Di} e a configuração da rede devem ser conhecidas. Considera-se ainda, a geração hidráulica fixada.

2.2.1 - Função objetivo

A função objetivo num problema de otimização representa a quantidade a ser otimizada. No problema de despacho ela é colocada como o somatório dos custos individuais de operação das usinas térmicas. É dada como uma função das potências ativas geradas e geralmente apresenta a forma abaixo:

$$f = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i + P_{Gi}^2) \quad (2.2.1)$$

onde:

- a_i, b_i, c_i são parâmetros calculados empiricamente para cada gerador.
- F é uma função escalar $F: R^{NG} \rightarrow R$ e representa os custos de operação dos geradores em Cr\$/hora.
- NG é o número de geradores.

2.2.2 - Restrições no problema de despacho econômico

Num problema de despacho, não basta que no ponto ótimo a função objetivo dê os mínimos custos de operação. Ele também deve satisfazer certas condições que são impostas ao sistema. Os geradores devem ser operados de modo a suprir a demanda e as perdas e sua potência máxima deve ser limitada por sua potência nominal. Os fluxos das linhas não devem ultrapassar os limites determinados pela temperatura máxima suportável nas mesmas, e limites de flexa impostos pelo projeto.

Estas condições constituem restrições sobre a operação do sistema e determinam uma região de operação permissível, dita região viável. Um ponto de operação contido nesta região é dito um ponto viável.

São então considerados três tipos de restrições [8]:

- a) A equação de balanceamento de potências ativas do sistema, expressa como restrição de igualdade:

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{Nc} P_{Di} + P_p \quad (2.2.2)$$

- b) Os limites de operação das unidades geradoras, expressos como restrição de desigualdade:

$$\underline{P_{Gi}} \leq P_{Gi} \leq \overline{P_{Gi}} \quad i = 1, 2, \dots, NG \quad (2.2.3)$$

- c) A segurança do sistema, relacionada com os limites máximos de temperatura suportável nas linhas de transmissão e com as defasagens máximas permitidas tendo em vista considerações de estabilidade [13].

Considerando o fluxo positivo numa direção, pode-se escrever esta restrição na forma:

$$\underline{F_{Li}} \leq F_{Li} \leq \overline{F_{Li}} \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (2.2.4)$$

com $\overline{F_{Li}} = \min\{\overline{F_{LTi}}, \overline{F_{LEi}}\}$

onde:

- $\overline{F_{LTi}}$ é o fluxo máximo devido ao limite térmico

- $\overline{F_{LEi}}$ é o fluxo máximo devido a estabilidade

e

- $\underline{F_{Li}} = \max\{\underline{F_{LTi}}, \underline{F_{LEi}}\}$

onde:

- $\underline{F_{LTi}}$ é o fluxo mínimo devido ao limite térmico ou restrição de projeto.

- $\underline{F_{LEi}}$ é o fluxo mínimo devido a estabilidade.

2.3 - Considerações sobre o modelo utilizado

Com o objetivo de obter maior rapidez na obtenção de resultados, algumas considerações são feitas para o sistema.

2.3.1 - Hipóteses para a linearização das restrições

É permitida a linearização das restrições [8], [14] visto que elas se apresentam numa forma quase linear.

- a) Os módulos das tensões de barras estão próximos a 1,0 pu e podem ser colocados como:

$$|V_i| \cong |V_j| \cong 1,0 \text{ pu} \quad (2.3.1)$$

- b) As condutâncias das linhas de transmissão são pequenas comparadas com as reatâncias e podem ser desprezadas.

$$G_{ij} \approx 0 \quad (2.3.2)$$

- c) Considerando que a defasagem angular entre barras é pequena, em radianos tem-se:

$$\text{sen } \theta_{ij} \approx \theta_{ij} \quad (2.3.3)$$

$$\text{cos } \theta_{ij} \approx 1 - \frac{1}{2} \theta_{ij}^2$$

Em vista das considerações acima, a equação das injeções de potências ativas nas barras

$$P_i = [V_i] \sum_j [V_j] (B_{ij} \text{sen} \theta_{ij} + G_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) \quad (2.3.4)$$

torna-se:

$$P_i = \sum_j B_{ij} \theta_{ij} \quad (2.3.5)$$

Esta equação é utilizada para o problema de fluxo de potência linear. A rede é representada por suas reatâncias e são consideradas as potências ativas (fluxo de potência ativa).

Expandindo a eq. (2.3.5):

$$P_i = -B_{i1}\theta_1 - B_{i2}\theta_2 - \dots + (B_{i1} + B_{i2} + \dots + B_{iN})\theta_i - \dots - B_{iN}\theta_N \quad (2.3.6)$$

obtem-se na forma matricial:

$$P = B\theta \quad (2.3.7)$$

2.3.2 - Restrição de segurança no modelo linearizado

Considerando-se as simplificações do item (2.3.1), pela equação (2.3.7) obtêm-se para os ângulos de barras:

$$\theta_N = X_{NN}P_N \quad (2.3.8)$$

A partir dos ângulos de barras, θ_N , podem ser obtidos os ângulos de linhas, θ_L , através de uma matriz $A(L \times N)$ que relaciona os ângulos de barras com ângulos de linhas. Então

$$\theta_L = A_{LN}\theta_N \quad (2.3.9)$$

Os fluxos nas linhas, F_L , são dados por:

$$F_L = B_{LL}\theta_L \quad (2.3.10)$$

onde B_{LL} é a matriz de susceptância de linha.

Substituindo-se (2.3.8) em (2.3.9) e depois em (2.3.10) obtêm-se os fluxos nas linhas F_L em função das potências das barras.

$$F_L = B_{LL} A_{LN} X_{NN} P_N \quad (2.3.11)$$

Sabendo-se que:

$$P_N = P_G - P_D \quad (2.3.12)$$

e substituindo-se (2.3.12) na equação (2.3.11), obtêm-se a equação geral dos fluxos nas linhas, função de variáveis independentes:

$$F_L = B_{LL} A_{LN} X_{NN} P_G - B_{LL} A_{LN} X_{NN} P_D \quad (2.3.13)$$

Para um melhor manuseio, os termos constantes da equação (2.3.10) são colocados na forma:

$$S_{LG} = B_{LL} A_{LN} X_{NN} \quad (2.3.14)$$

$$R_{LD} = -B_{LL} A_{LN} X_{NN} P_D$$

A constante R_{LD} tem um importante significado. Ela representa os fluxos nas linhas se o sistema fosse suprido somente pela barra de folga.

A restrição de segurança estática do sistema é dada agora pela desigualdade:

$$\underline{F}_{Li} \leq S_{LG} P_G + R_{LD} \leq \overline{F}_{Li} \quad (2.3.15)$$

2.4 - Cálculo das perdas de transmissão

Num sistema de potência as perdas podem ter importância significativa e se forem desprezadas, pode-se incorrer em erros, principalmente se o sistema é composto por linhas de transmissão longas.

A fórmula de perdas adotada foi apresentada por Podmore [15] e depende das condições de carga do sistema e das potências de geração, exceto da geração da barra de folga, que entra no problema como variável dependente. O cálculo de perdas é baseado no fluxo de potência linear, envolve as hipóteses anteriores e é dada por:

$$P_P = P_G^T E_{GG} P_G + P_G^T E_{GO} + E_{OO} \quad (2.4.1)$$

Onde :

$$E_{GG} = Z_{NG}^T G_{NN} Z_{NG}$$

$$E_{GO} = 2Z_{NG}^T G_{NN} Z_{NN} P_D$$

$$E_{OO} = P_{NL}^T Z_{NN} G_{NN} Z_{NN} P_D$$

Com a equação (2.4.1) as perdas incrementais utilizadas no programa de despacho podem ser obtidas [15]:

$$\frac{\partial P_P}{\partial P_G} = 2E_{GG} P_G + E_{GO} \quad (2.4.2)$$

2.5 - Modelo do problema de despacho econômico com restrição de segurança estática

Com as simplificações do item (2.3.1) o problema assume a seguinte forma:

$$\min F = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$$

Sujeito às restrições lineares:

a) Sobre os limites de operação dos geradores:

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad i = 1, 2, \dots, NG$$

b) Sobre os limites de segurança das linhas:

$$\underline{F}_{Li} \leq S_{LG} P_G + R_L \leq \overline{F}_{Li} \quad i = 1, 2, \dots, L$$

c) Da equação de balanceamento do sistema:

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} = \sum_{i=1}^{Nc} P_{Di} + P_P$$

A potência de geração da barra de folga atua como uma variável dependente, pois sua função é suprir as perdas do sistema e a carga que não foi suprida pelos demais geradores. Considerar a potência da barra de folga como uma variável dependente

torna o problema mais simples, já que reduz o número de restrições.

Então, para a barra de folga:

$$P_{GF} = \sum_{i=1}^{NC} P_{Di} + P_P - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq F}}^{NG} P_{Gi} \quad (2.5.1)$$

Substituindo (2.5.1) na função objetivo e na restrição de desigualdade (a), é eliminada a restrição de igualdade e o problema torna-se:

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq F}}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2) + a_F + b_F \left(\sum_{i=1}^{NC} P_{Di} + P_P - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq F}}^{NG} P_{Gi} \right) + \\ & + c_F \left(\sum_{i=1}^N P_{Di} + P_P - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq F}}^{NG} P_{Gi} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.5.2)$$

sujeito às restrições lineares sobre as variáveis independentes:

$$- \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad i = 1, \dots, NG, i \neq F$$

$$- \underline{P}_{GF} \leq \sum_{i=1}^{NC} P_{Di} + P_P - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq F}}^{NG} P_{Gi} \leq \overline{P}_{GF}$$

$$- \underline{F}_L \leq S_{LG} P_G + R_L \leq \overline{F}_L$$

2.6 - Algoritmo para solução do problema

Para aplicação do algoritmo, deve-se conhecer, a priori, os seguintes dados:

1. Parâmetros das linhas de transmissão através do seu equivalente π
2. Limites de fluxo nas linhas (mínimo entre os fluxos correspondente aos limites térmico, projeto e estabilidade).
3. As cargas do sistema
4. Limites de geração das unidades
5. Valores iniciais das potências de geração
6. Parâmetros da função custo de cada gerador (a_i, b_i, c_i)
7. Passo inicial S a ser dado numa determinada direção calculada no programa.

Com os dados de entrada citados acima, as seguintes etapas constituem o algoritmo de despacho econômico:

1. Montagem da matriz admitância de barras do sistema
2. Cálculo das constantes S_{LG} e R_{LD} , componentes da equação (2.3.15), que representa os fluxos nas linhas de transmissão
3. Cálculo das constantes E_{GG}, E_{GO}, E_{OO} da equação (2.4.1) que fornece as perdas do sistema.

4. Cálculo das perdas incrementais e perdas do sistema (eq. 2.4.1)

5. Cálculo da direção D_i , para minimização unidirecional. Esta direção é obtida [22] da seguinte forma:

- Se o ponto de operação atual está contido na região e distante da fronteira viável:

$$D_i = \frac{\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}}}{\left[\sum_{i=1}^{NG} \frac{\partial^2 F}{\partial P_{Gi}^2} \right]^{1/2}} \quad i \neq F$$

- Se o ponto de operação atual se encontra fora da região viável ou está contido e pertence a uma vizinhança de algum ponto da fronteira da região viável, então:

$$D_i = \frac{- \left[\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} + \sum_{k=1}^{\ell} \lambda_k \frac{\partial G_k}{\partial P_{Gi}} \right]}{\left[\sum_{i=1}^{NG} \left(\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} + \sum_{k=1}^{\ell} \lambda_k \frac{\partial G_k}{\partial P_{Gi}} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad i \neq F$$

onde:

$\ell = n^\circ$ de restrições ativas

e λ_k é calculado [22] a partir de:

$$\sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1}^{\ell} (\lambda_j \frac{\partial G_j}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial G_k}{\partial P_{Gi}}) = - \sum_{i=1}^{NG} (\frac{\partial G_k}{\partial P_{Gi}} \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}})_{i \neq F}$$

6. Com as direções obtidas, um novo ponto de operação P_{Gi}^k é calculado:

$$P_{Gi}^k = P_{Gi}^{k-1} + SD_i^k \quad i = 1, \dots, NG, i \neq F$$

$$P_{GF} = \sum_{i=1}^{NC} P_{Di} + P_P - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq F}}^{NG} P_{Gi}$$

7. Testar se o novo ponto de operação P_{Gi}^k pertence à região viável do problema (2.4.2)

- não, passo 11
- sim; passo seguinte

8. Calcular os novos custos de operação através da fórmula:

$$F^k = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi}^k + c_i (P_{Gi}^k)^2)$$

9. Comparar o valor dos custos atuais, F^k , com o anterior, F^{k-1} ,
se menor - passo seguinte

se maior - passo 11

10. Dobrar o valor de S e voltar ao passo 4.

11. Fazer $P_{Gj}^k = P_{Gj}^{k-1}$

12. Comparar o valor atual de S com uma tolerância

- Se menor, passo seguinte

- Se maior, reduzir o valor de S e retornar ao passo 11

13. Testar a convergência.

Se convergiu - Fim

Se não convergiu - passo 5

2.7 - Conclusão

Como foi visto neste capítulo, o objetivo de um problema de despacho econômico é encontrar uma determinada distribuição de gerações que dê os mínimos custos de operação. Para o ponto de operação ser viável, ele deve satisfazer certas restrições. O despacho econômico com restrição de segurança possui uma restrição adicional de fluxo máximo sobre as linhas de transmissão.

O problema de despacho econômico, conforme dado na literatura, considera somente restrições estáticas não se levando em conta a estabilidade transitória do sistema. Poderão então existir situações onde, apesar da otimalidade do ponto de operação em relação a custos, o sistema sofra perda de sincronismo face a alguma contingência. No sentido de se garantir a continuidade da operação é necessário então que se tenha certeza de que o sistema satisfaça a uma análise de contingência. No caso do ponto de operação ótimo não ser seguro deste ponto de vista, deve-se escolher outro ponto de operação, próximo do ótimo, porém seguro. Isto será objeto de análise em capítulo posterior.

C A P Í T U L O I I I

ANÁLISE DA ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 - Introdução

O objetivo deste capítulo consiste numa rápida apresentação do método utilizado para análise de estabilidade transitória. Inicialmente são apresentadas as hipóteses simplificadoras sobre o sistema que possibilitam a utilização do modelo clássico. Em seguida apresenta-se a função energia do sistema e é feita a delimitação de uma região em que a função pode ser utilizada como função de Liapunov. Finalmente, é apresentado o algoritmo para análise de estabilidade e cálculo do domínio.

3.2 - Modelo matemático do sistema de potência

No presente trabalho é utilizado o modelo clássico do sistema [16], [17], [18], [19] no qual se faz uso de certas hipóteses simplificadoras, assim enumeradas:

- a) A potência mecânica de todas as máquinas no sistema permanece constante durante o período transitório, tendo em vista que as constantes de tempo dos reguladores de velocidade são elevadas face ao tempo de duração do transitório.

- b) Cada máquina é representada por uma fonte de tensão constante em série com sua reatância transitória de eixo direto. Para esta representação considera-se a máquina como sendo de rotor liso e que o enlace de fluxo do rotor permanece constante.
- c) O ângulo mecânico do rotor de cada máquina coincide com o ângulo da tensão atrás da reatância transitória.
- d) Os efeitos dos reguladores de tensão são desprezados, visto que suas constantes de tempo são superiores ao tempo considerado na análise.
- e) As inércias são tomadas como um valor constante.
- f) As cargas são representadas como impedâncias constantes; em consequência, o número de barras do sistema é reduzido ao número das barras internas das máquinas.
- g) As potências de amortecimento são consideradas como sendo compostas de duas parcelas: a primeira é proporcional às velocidades de escorregamento, e a segunda proporcional às diferenças de velocidade de escorregamento.

Com estas hipóteses, obtém-se uma grande redução do número de variáveis do problema, bem como alguma simplificação na sua resolução. As hipóteses acima são justificadas, considerando-se que o objetivo é a análise do transitório do sistema na primeira oscilação.

Considerando-se que com a hipótese (f) o número de barras do sistema é reduzido ao número de barras das máquinas, as equações representativas do movimento dos ângulos dos rotores das

n máquinas interligadas podem ser escritas como:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} \left[\frac{d \delta_i}{dt} - \frac{d \delta_j}{dt} \right] + P_{ei} - P_{mi} = 0 \quad (3.2.1)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

A potência elétrica entregue pela i-ésima máquina ao sistema, P_{ei} , é dada por:

$$P_{ei} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [E_i E_j] B_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \quad (3.2.2)$$

Em [19] são definidos coeficientes de sincronização como sendo:

$$F_{ij} = [E_i E_j] B_{ij} \quad (3.2.3)$$

A injeção de potência na barra i é dada por:

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad (3.2.4)$$

As variáveis δ_i e $\dot{\delta}_i$ são definidas como variáveis de estado com $\dot{\delta}_i = \frac{d \delta_i}{dt} = w_i$, onde $i = 1, 2, \dots, n$. Fazendo a substituição de (3.2.3), (3.2.4) e (3.2.2) em (3.2.1), obtêm-se:

$$\dot{w}_i = - \frac{d_i}{M_i} w_i - \frac{1}{M_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (w_i - w_j) + \frac{P_i}{M_i} - \frac{1}{M_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \quad (3.2.5)$$

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

Uma observação deve ser feita quanto ao amortecimento do sistema. Considerando-se que $\frac{d_i}{M_i} = \frac{d_j}{M_j}$, isto é, para amortecimento uniforme, tem-se $2(n-1)$ variáveis de estado [19], [20], enquanto que para amortecimento não uniforme $\frac{d_i}{M_i} \neq \frac{d_j}{M_j}$ tem-se $(2n-1)$ variáveis de estado.

Considerando-se a dependência das variáveis na equação (3.2.5), e qualquer tipo de amortecimento, toma-se um ângulo como referência, por exemplo, a máquina n . Conseqüentemente são analisados os afastamentos dos ângulos restantes em relação ao ângulo de referência.

Definindo-se [18], [19]:

$$\alpha_i = \delta_i - \delta_n \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.2.6)$$

Pode-se reescrever (3.2.5) na forma matricial.

$$\dot{w} = -M^{-1}Rw - M^{-1}T^t f(P, F, \alpha) \quad (3.2.7)$$

onde:

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} \vdots & -1 \\ I_{n-1} & \vdots \\ \vdots & -1 \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \end{bmatrix}$$

e:

$$M = \text{diag}(M_i) \quad R = [r_{ij}] \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$r_{ij} = \begin{cases} b_{ij} & \text{se } i \neq j \\ d_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n b_{ik} & \text{se } i=j \end{cases}$$

$$f = \begin{bmatrix} f_1(P, F, \alpha) \\ \vdots \\ f_{n-1}(P, F, \alpha) \end{bmatrix}$$

$$F = [F_{12} \dots F_{1n} \quad F_{23} \dots F_{2n} \dots F_{n-1n}]$$

$$f_i(P, F, \alpha) = -P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} F_{ij} \sin(\alpha_i - \alpha_j) + F_{in} \sin \alpha_i \quad (3.2.8)$$

Para encontrar os pontos de equilíbrio de (3.2.7) faz-se $\dot{\alpha} = \dot{w} = 0$ o que equivale a $f(P, F, \alpha) = 0$. Os pontos de equilíbrio são da forma $[0 \quad \alpha^e]^t$ com $0 \in \mathbb{R}^n$ e $\alpha^e \in \mathbb{R}^{n-1}$, considerando amortecimento não uniforme.

A estabilidade na origem de (3.2.7) é analisada fazendo-se um deslocamento de variáveis, ou seja, introduzindo uma variável auxiliar z como sendo:

$$z_i = \alpha_i - \alpha_i^e \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.2.9)$$

Substituindo-se (3.2.9) em (3.2.7) tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{w} &= -M^{-1} R w - M^{-1} T^t f(P, F, z + \alpha^e) \\ \dot{z} &= T w \end{aligned} \quad (3.2.10)$$

Então o novo ponto de equilíbrio é obtido fazendo-se $\dot{z} = \dot{w} = 0$. Desse modo, analisar a estabilidade do equilíbrio de

(3.2.1) é equivalente a analisar o equilíbrio de (3.2.10)

3.3 - Função de Liapunov

Dentre os vários métodos para análise da estabilidade de um sistema de potência, o segundo método de Liapunov surge como um método rápido e eficiente para análise da estabilidade transitória na origem. Diversas funções são utilizadas como sendo de Liapunov, porém em geral ela é uma generalização da energia interna do sistema.

Considerando uma função escalar de variáveis de estado $V(x)$, ($x \in R^m$) e uma região conexa ψ , para que esta função seja considerada de Liapunov, ela deve satisfazer as seguintes condições [17].

1. Sua primeira derivada parcial com respeito as variáveis de estado, deverá existir e ser contínua na região ψ .
2. O valor da função $V(x)$ deverá ser zero para o ponto de equilíbrio ($x=0$) e diferente de zero para os outros pontos contidos na região ψ .
3. Sua derivada em relação ao tempo deverá ser negativa para todos os valores contidos em ψ , exceto para o ponto de equilíbrio, no qual deverá ser zero.

Em [19] mostra-se que a função energia total do sistema é uma função de Liapunov para a estabilidade assintótica do ponto de equilíbrio do sistema. A função energia total do sistema é dada por:

$$V = E_p + E_c \quad (3.3.1)$$

onde:

E_p representa a energia potencial do sistema

E_c representa a energia cinética do sistema.

Utilizando as variáveis do sistema (3.2.10) tem-se que:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{w}_i^2 + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} (-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e) - z_{ij} \sin \alpha_{ij}^e + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} (-\cos(z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e) - z_i \sin \alpha_i^e \quad (3.3.2)$$

sendo que:

$$z_{ij} = z_i - z_j \quad e \quad \alpha_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e$$

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{w}_i^2$$

$$E_p = V - E_c \quad (3.3.3)$$

Observa-se que $\nabla E_p = f(P, F, \alpha)$, logo os pontos de equilíbrio de (3.2.7) são pontos extremos da energia potencial.

Uma condição suficiente para que o equilíbrio de (3.2.7) seja estável no sentido de Liapunov é que $\alpha^e \in L$ onde:

$$L = \{ \alpha / |\alpha_i| < \frac{\pi}{2} \text{ e } |\alpha_i - \alpha_j| < \frac{\pi}{2}, \quad i, j = 1, \dots, n-1 \} \quad (3.3.4)$$

Se $\alpha^e \in L$, o equilíbrio de (3.2.7) é dito assintoticamente estável no sentido de Liapunov.

Da equação (3.3.2) observa-se que:

$$\dot{V} = -w^t R w \quad (3.3.5)$$

- Em [19] mostra-se que, apesar da função (3.3.5) ser semidefinida negativa, ela é ainda assim, válida como função de Liapunov, uma vez que nenhuma trajetória de (3.2.10) exceto a origem, fica inteiramente contida no conjunto onde a (3.3.5) se anula.

Mostra-se ainda que esta função é válida como função de Liapunov na região:

$$G = \{ [w, z]^t / z \in L_2 \} \quad (3.3.6)$$

onde:

$$L_2 = \{ z / (-\pi - 2\alpha_k^e) < z_k < (\pi - 2\alpha_k^e) \text{ e } (-\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) < z_{kp} < (\pi - 2(\alpha_k^e - \alpha_p^e)) \text{ k, p = 1, \dots, n-1, k \neq p} \} \quad (3.3.7)$$

De (3.3.4) e (3.3.7) conclui-se que:

$$\text{se } \alpha^e \in L \Rightarrow L_2 \supset L$$

3.4 - Determinação dos domínios de estabilidade

Para determinação dos domínios de estabilidade, vários métodos foram apresentados e geralmente utilizam o ponto de

equilíbrio instável com menor energia potencial, delimitando uma região e determinando assim, um domínio de estabilidade. A desvantagem deste método é a dificuldade na obtenção dos pontos instáveis e que consomem elevado tempo de processamento para sua obtenção.

Em [19] é sugerido um método para determinação do domínio de estabilidade baseado na decomposição da energia potencial do sistema. Neste método, a determinação do domínio de estabilidade pode ser solucionada através de um problema de otimização não linear, sujeito a restrições lineares. Considerando as características da função objetivo, este problema pode ser decomposto em subproblemas onde o método de Newton-Raphson fornece a solução dos subproblemas em poucas iterações.

A região de validade da função de Liapunov é dependente somente das variáveis z , ou seja, de $[0, z]^t$ e nesta região a energia total do sistema é dependente apenas da energia potencial. Desta forma a função objetivo passa a ser a energia potencial do sistema e o problema então é enunciado na seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & E_p(P, F, z) \\ \text{s.a} \quad & z \in \delta L_2 \end{aligned} \tag{3.4.1}$$

onde δL_2 representa a fronteira de L_2 .

A solução do problema (3.4.1) fornece um z^* que especifica a tangência entre uma superfície de nível da energia potencial com a fronteira de L_2 , determinando assim o domínio de estabilidade que é representado por:

$$D = \{(w, z)^t \in R^{n-1} \mid V(w, z) < V(0, z^*)\} \quad (3.4.3)$$

Em [19] mostra-se que E_p pode ser decomposta a partir de (3.3.2) em parcelas do tipo,

$$g_k = F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \operatorname{sen} \alpha_{ij}^e] \quad (3.4.4)$$

onde:

$k = 1, 2, \dots, m$; onde m é o número de faces do politopo L_2 e g_k é denominado limite inferior da energia potencial da face k .

3.5 - Algoritmo utilizado na análise e determinação de domínios de estabilidade

O algoritmo utilizado para análise da estabilidade em sistemas de potência pelo método de Liapunov e para a determinação de domínios de estabilidade, de acordo com [12], segue os seguintes passos:

1. Determinação das condições normais de operação. Nesta etapa, é processado um programa de fluxo de potência considerando a configuração do sistema anterior ao defeito. O fluxo de potência fornece o balanço de potências do sistema através do cálculo dos ângulos das barras, permitindo então o cálculo dos ângulos internos das máquinas e da matriz reduzida do sistema, resultando num sistema reduzido

ãs n-barras internas das máquinas. Este ponto de operação será a condição inicial para análise do sistema pós defeito.

2. Simulação de um defeito no sistema. O defeito a ser simulado neste trabalho, consiste da perda de uma linha de transmissão e é simulado retirando-se a linha e coluna da matriz Y barra do sistema correspondente a esta linha.
3. Estudo de estabilidade pós defeito e cálculo do domínio de estabilidade. Esta etapa pode ser dividida em subetapas:

3.a - Cálculo do ponto de operação pós defeito.

É processado novamente um programa de fluxo de potência com a nova configuração do sistema, ou seja, com a matriz susceptância pós defeito. São calculados novamente, os ângulos internos das máquinas. Considerando-se a elevada constante de tempo dos reguladores face ao tempo de análise, considera-se ainda que a potência mecânica e módulo das tensões permanecem as mesmas de antes do defeito.

3.b - Testar se o novo ponto de operação pertence a L_2 . Se não pertence, nada se pode afirmar sobre a estabilidade do sistema e o processamento é interrompido.

3.c - Calcular os limites inferiores. Os limites inferiores são calculados com o auxílio da expressão (3.4.4), os valores menores são separados num grupo de certo nº de elementos previamente especificado e armazenados juntamente com os indicadores das faces correspondentes. Comparar com a energia total do siste

ma pós defeito. Se maior, o sistema é estável pelo limite inferior e então o próximo passo é o cálculo do domínio. Se menor, passo seguinte.

3.d - Teste com a cota superior e cálculo do domínio de estabilidade

Para os indicadores da face onde ocorre o menor limite inferior, é resolvido o problema (3.4.1) que fornece o valor de E_p mínimo absoluto na fronteira de L_2 . Os valores de energia potencial sobre a fronteira de L_2 são chamados de cotas superiores. Qualquer valor de energia na fronteira de L_2 é maior ou igual que o valor de energia calculada no ponto de mínimo absoluto, portanto, se a energia total do sistema for maior que uma cota superior, esta condição inicial não pertence ao interior do domínio de estabilidade e então nada se pode afirmar sobre a estabilidade do sistema.

Se o ponto de tangência do problema (3.4.1) não for encontrado, despreza-se o limite inferior correspondente a esta face, toma-se o segundo menor valor do limite inferior, e a operação é repetida.

Para o cálculo do domínio de estabilidade, o valor de energia potencial calculado no ponto de tangência é testado com o próximo valor da lista de limites inferiores. Se for maior, o limite inferior é substituído por E_p , a lista é reordenada, e a operação é repetida. Se menor, o valor do domínio de estabilidade de dado em (3.4.3) fica definido por este valor.

3.6 - Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o segundo método de Liapunov, resumidamente, e sua aplicação em sistemas de potência, tomando-se a função energia como função de Liapunov.

Descreveu-se o procedimento apresentado em [12] para a obtenção de domínios de estabilidade.

Estes domínios tem grande aplicação na análise de contingências para a determinação da estabilidade da origem de um sistema e para a verificação da alcançabilidade da origem pela trajetória que começa em uma condição inicial tomada igual ao estado no instante final de atuação de uma perturbação.

As contingências são constituídas pela perda de linhas no sistema e mostrou-se um procedimento para análise da estabilidade face a uma contingência deste tipo.

Observa-se que, para uma situação em que o sistema não suporta uma análise de contingência, o algoritmo não toma nenhuma medida para eliminação da situação insegura, apenas indicando o fato.

No capítulo seguinte mostra-se um procedimento para melhora da segurança do sistema.

C A P Í T U L O I V

ESQUEMA PARA MELHORA DE SEGURANÇA

4.1 - Introdução

Do capítulo anterior observa-se que, embora seja analisada a estabilidade pós defeito, detectando-se casos inseguros, o método é omissivo no que diz respeito a melhora de segurança do sistema. Portanto, há necessidade de um procedimento em que, além de permitir uma análise do comportamento do sistema quando submetido a contingências, permita que se melhore a estabilidade do ponto de operação, aumentando o domínio de estabilidade sob defeito.

Em vista do exposto, será apresentado neste capítulo um algoritmo que, utilizando o conceito dos limites inferiores, permita que seja feito um remanejamento de gerações, de modo a melhorar a segurança do sistema. Em primeiro lugar será dada mais ênfase ao conceito de limites inferiores e limites de segurança do sistema para finalmente, ser apresentado o algoritmo que, permita que se obtenha pontos de operação mais seguros.

4.2 - Limites inferiores

Como foi visto no capítulo anterior, a energia potencial, E_p , do sistema, pode ser escrita como:

$$E_p(P, F, z + \alpha^e) = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \sin \alpha_{ij}^e] + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos(z_i + \alpha_i^e) + \cos \alpha_i^e + z_i \sin \alpha_i^e] \quad (4.2.1)$$

Em [19] mostra-se que a energia potencial pode ser decomposta em m parcelas, correspondendo as m faces do politopo L_2 . Estas parcelas são chamadas limites inferiores. Reescrevendo a equação (3.4.4):

$$G_k = F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos \alpha_{ij}^e - z_{ij} \sin \alpha_{ij}^e] \quad (4.2.2)$$

A partir da equação (4.2.2) observa-se que z_{ij} representa as defasagens angulares entre duas máquinas i e j conectadas através de uma linha de transmissão equivalente. O limite inferior está, portanto, associado a ligação entre máquinas do sistema e representam uma parcela da energia potencial associada a duas máquinas relacionadas com uma determinada face de L_2 . Pode-se afirmar que o valor da energia potencial no ponto de tangência a esta face, se existir, é maior ou igual ao limite inferior correspondente. O limite inferior fornece portanto, um domínio de estabilidade.

Com o auxílio da equação (4.2.2) observa-se que os limites inferiores dependem basicamente do ponto de operação e da topologia do sistema. Então para uma determinada topologia e pontos de operação diferentes, tem-se limites inferiores diferentes. Quanto mais fracas são as ligações de um sistema (menor F_{ij}), menores são seus limites inferiores e conseqüentemente, menor o domí-

nio de estabilidade.

Uma forma de aumentar o domínio de estabilidade consiste em redistribuir as gerações, diminuindo o fluxo de potência nas linhas mais fracas e carregando as linhas mais fortemente ligadas do sistema. Com a nova distribuição de gerações, a defasagem entre as barras anteriormente mais carregadas, torna-se menor, aumentando o limite inferior. Conclui-se que, quanto menor a defasagem dos ângulos de barras adjacentes, maiores são seus respectivos limites inferiores e, conseqüentemente, maior o domínio de estabilidade. Assim o sistema suportará melhor, em princípio, as contingências.

4.3 - Definição de índices de segurança e sobrecarga

Tendo-se analisado os limites inferiores e sua dependência com o ponto de operação de um sistema de potência, torna-se necessário, definir certos índices que indicarão o estado do sistema sob o efeito de alguma contingência, no caso, a perda de uma linha de transmissão. Estes índices serão úteis posteriormente quando da introdução do algoritmo de redistribuição de gerações que fornece um ponto de operação seguro.

- Índice de segurança

Considerando um sistema de potência submetido a uma dada contingência i , o índice de segurança I_{se}^i é definido como [21]:

$$I_{se}^i = V(x^{t,i}) - V(x^0) \quad (4.3.1)$$

onde:

$V(x^{t,i})$ é o valor da função de Liapunov correspondente ao domínio de estabilidade do novo ponto de equilíbrio.

$V(x^0)$ é o valor da função de Liapunov correspondente ao ponto de operação anterior.

Realizadas as I contingências e calculado o índice de segurança para cada uma delas, tem-se o índice de segurança do sistema como sendo:

$$I_{se} = \min_{i \in I} (I_{se}^i) \quad (4.3.2)$$

Dependendo dos valores de $V(x^{t,i})$ e $V(x^0)$ o índice de segurança pode ser negativo. Neste caso é mais conveniente utilizar-se a denominação 'Índice de Sobrecarga', como definido abaixo.

- Índice de sobrecarga

O cálculo do índice de sobrecarga é importante para a utilização do algoritmo que redistribui as gerações, pois para uma dada configuração ele dá uma idéia do afastamento do novo ponto de operação em relação ao ponto de equilíbrio do sistema. Desta forma, ele fornece as contingências mais críticas do sistema.

Para uma dada contingência i, o índice de sobrecarga é dado por:

$$I_{so}^i = V(x^0) - V(x^{t,i}) \quad (4.3.3)$$

Sendo que $V(x^0)$ e $V(x^{t,i})$ são como definidos anteriormente.

4.4 - Algoritmo para melhora de segurança

Tendo-se feito uma interpretação dos limites inferiores e definidos os índices que traduzem uma margem de segurança para o estado do sistema, pode-se utilizar um algoritmo que, a partir da análise da estabilidade e constatada uma condição crítica, permita que, fazendo-se um remanejamento de gerações, a segurança do sistema seja melhorada.

Para a utilização do algoritmo de melhora de segurança são necessários os seguintes dados:

1. Diagrama unifilar do sistema com a localização das gerações, cargas e linhas de transmissão.
2. Parâmetros das linhas de transmissão, através de seu equivalente π .
3. Dados das máquinas: reatância transitória, constante de inércia e limites sobre a potência de geração.
4. Valores das potências de geração e cargas.

Com os dados de entrada citados acima, a análise de estabilidade é realizada da mesma forma que apresentada no algoritmo do capítulo 3. Quando nenhum caso crítico é detectado, não é necessário melhorar a segurança e o programa para.

O algoritmo de melhora da segurança segue os seguintes

tes passos:

1. Determina-se o ponto de operação do sistema.
2. São simuladas contingências. A contingência considerada é constituída pela perda de uma linha de transmissão.
3. Para cada contingência é analisada a estabilidade e calculado o domínio de estabilidade de acordo com o capítulo 3, e o índice de sobrecarga, no caso de haver sido detectado que a condição não pertence ao domínio.
4. Após simuladas as contingências, as mesmas são enumeradas em ordem decrescente quanto a sua severidade, sendo que a pior contingência fica sendo a primeira da lista.
5. Para cada contingência são identificadas as faces correspondentes aos menores limites inferiores. Cada limite inferior está associado a duas máquinas ligadas por uma linha de transmissão equivalente. O fluxo de potência nesta linha, se diferente de zero, será considerado, sem perda de generalidade, da barra i para a barra j . Neste caso deve-se retirar geração da máquina ligada à barra i e aloca-la nas outras máquinas. Para todas as contingências que causam sobrecarga, pode-se identificar, procedendo-se como acima, as máquinas que devem ter suas gerações diminuídas. Assim, em geral, a parcela a ser remanejada será a soma das parcelas retiradas.

A parcela a ser retirada da máquina correspondente à contingência que proporciona maior sobrecarga, é especificada no início do programa. Através do processamento de casos, observou-

-se que o valor desta parcela, ξ , situa-se, em geral, entre 3 a 10% da geração da máquina. Nas outras máquinas, correspondente à indicação dos limites inferiores e relativas às outras situações de sobrecarga, retira-se uma parcela:

$$\Delta P_G^h = \frac{\xi \cdot I_{so}^h}{100 I_{so}^l} P_G^h$$

onde:

I_{so}^l é o índice de sobrecarga da contingência mais grave.

I_{so}^h é o índice de sobrecarga associado a máquina relativa ao menor limite inferior da contingência h.

Desta forma, precisa-se garantir que as máquinas mais sobrecarregadas (maior índice de sobrecarga) sejam aliviadas com um percentual maior de sua geração do que as máquinas menos sobrecarregadas.

Então a parcela total a ser alocada nas outras máquinas será:

$$\Delta P = \sum_h \Delta P_G^h + \Delta P_G^l$$

Para a redistribuição do excesso de geração nas demais máquinas é necessário uma indicação da contribuição de cada máquina ao sistema, de modo que, com o novo carregamento, ela não passe de uma situação segura, para uma situação insegura. Os limites inferiores dão esta indicação e, portanto, fornecem uma forma de distribuir a geração. Isto é feito através da fórmula:

$$\Delta P_{G_l} = \frac{\sum_{k \in H} G_k \cdot \Delta P}{\sum_{p \in H} G_p}$$

onde:

H_ℓ é o conjunto de índices dos limites inferiores cuja face correspondente está relacionada com a máquina ℓ .

H é o conjunto de todos os índices dos limites inferiores associados às máquinas não pertencentes ao conjunto daquelas das quais foi retirada geração, ou $H = \bigcap H_\ell$

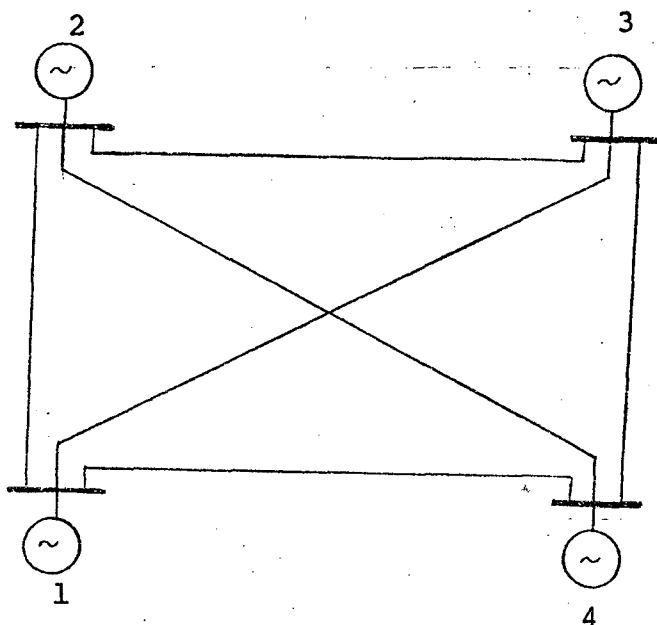
- Se com a nova parcela de potência recebida a geração da máquina ℓ ultrapassar o seu limite máximo de geração, então o novo valor de geração da máquina ℓ é fixado igual ao seu limite máximo e o restante da potência é redistribuída nas demais máquinas, proporcional aos limites inferiores.
- Se com a retirada de potência a máquina l que causou a pior contingência ultrapassar seu limite mínimo de geração, então a parcela de potência a ser retirada desta máquina é igual a diferença entre a geração anterior e seu limite mínimo ou seja $P_G^{k-1} - P_{G_l}$ e passa-se as demais máquinas, se houver.

O algoritmo prossegue até que, fazendo-se a redistribuição de geração, não seja detectada nenhuma sobrecarga ou, se não existir, que pelo menos seja diminuído o número de casos com sobrecarga.

Para melhor descrever o algoritmo será apresentado um exemplo que ilustra o seu uso.

Seja um sistema de potência composto de quatro máquinas e com seu sistema de transmissão reduzido às barras inter

nas, como mostrado abaixo:



O algoritmo de remanejamento de geração pode ser resumido nos quatro passos abaixo:

1. Determinar o ponto de operação.
2. Simular contingências, consistindo na abertura de linha de transmissão.

Para cada abertura de linha são encontrados:

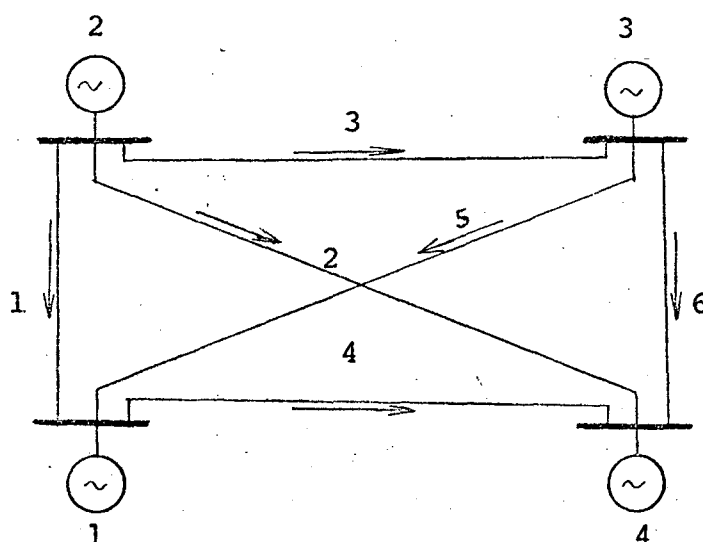
- O sistema reduzido às barras internas.
- O ponto de operação pós- defeito.
- O domínio de estabilidade.
- O índice de sobrecarga, no caso de haver sobrecarga.

Considerando a máquina 4 como referência, o polítopo L_2 (eq. 3.3.7) que determina o domínio de estabilidade, pode ser representado no espaço dos ângulos e tem o aspecto de uma fi

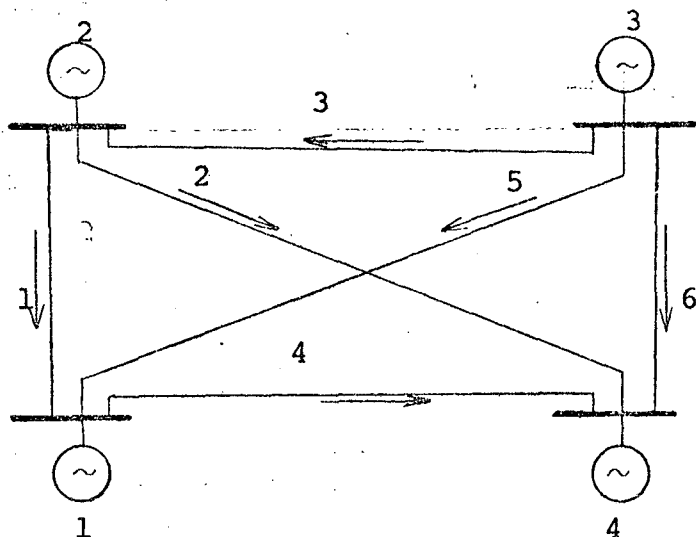
gura geométrica convexa com faces opostas paralelas, duas a duas e que no R^3 possui duas faces ortogonais a cada eixo coordenado.

Hipótese 1: Houve sobrecarga para duas contingências no sistema.

Hipótese 2: Supor que para a primeira contingência o sentido dos fluxos nas linhas equivalentes sejam como dados na figura abaixo e que a superfície que determina o domínio de estabilidade tangencia a face perpendicular ao eixo de α_2 .



Hipótese 3: Para a segunda contingência supor que o sentido dos fluxos seja como dado na figura abaixo e que a superfície que determina o domínio de estabilidade tangencia a face tipo $\alpha_1\alpha_3$ (não ortogonal a nenhum eixo).



3. Ordenar as contingências.

Hipótese 4: Supor que a primeira contingência seja a mais crítica; então ela é enumerada como a primeira da lista.

4. Aliviar as máquinas que causaram sobrecarga.

Considerando o sentido do fluxo conforme apresenta do na figura, as máquinas são aliviadas segundo o esquema a seguir:

4.1. Para a contingência mais crítica:

A face α_2 está relacionada com a máquina 2 e a máquina 4 (referência). O sentido do fluxo é da máquina 2 para a máquina 4, o que indica que a máquina 2 está causando sobrecarga, então é aliviada a geração da máquina 2, da seguinte forma:

$$\Delta P_G^1 = \frac{\xi}{100} P_G$$

4.2. Para a segunda pior contingência:

A superfície tangencia a face α_1, α_3 indicando as máquinas 1 e 3. Como o sentido do fluxo é da máquina 3 para a máquina 1 é aliviada a máquina 3 de acordo com:

$$\Delta P_G^2 = \frac{\xi}{100} \frac{I_{so}^2}{I_{so}^1} P_{G3}$$

O total de geração, retirado das máquinas é, então:

$$\Delta P = \Delta P_G^1 + \Delta P_G^2$$

Este total retirado é redistribuído nas demais máquinas

quinás de acordo com:

$$\Delta P_{G\ell} = \frac{\sum_{k \in H} G_k \Delta P}{\sum_{p \in H} G_p}$$

onde:

$$H_1 = \{G_4\}$$

$$H_3 = \{G_3, G_5, G_6\}$$

e:

$$H = \bigcup H\ell \{G_3, G_4, G_5, G_6\}$$

A parcela a ser recebida pela máquina 1 será:

$$\Delta P_{G_1} = \frac{G_4 \Delta P}{G_3 + G_4 + G_5 + G_6}$$

e a parcela a ser recebida pela máquina 3

$$\Delta P_{G_2} = \frac{(G_5 + G_6 + G_3) \Delta P}{G_3 + G_4 + G_5 + G_6}$$

Com esta nova distribuição é feito novamente uma análise de contingências e, caso ainda haja sobrecarga, o processo é repetido.

4.5. - Exemplos

Neste ítem serão apresentados exemplos da aplicação do algoritmo proposto através de tabelas, as quais apresentam os dados do sistema utilizado e os resultados obtidos. As tabelas mostram o ponto de operação inicial do sistema sobre o qual foram simulados contingências e a evolução deste ponto de operação até obtenção de uma distribuição de gerações que satisfaça a uma análise de contingências. Os dois exemplos derivam de uma mesma estrutura básica mostrando que, para um sistema enfraquecido, através de um remanejamento de gerações ainda é possível que o sistema suporte uma análise de contingências.

Exemplo 1 -

O sistema de potência deste exemplo possui dez máquinas, quarenta e quatro barras e setenta e duas linhas de transmissão, conforme diagrama da figura 4.1. Os transformadores serão tratados como linhas de transmissão.

Na tabela 1 são apresentados os dados das máquinas, na tabela 2, as barras com as respectivas cargas e potência de geração inicial e na tabela 3, os parâmetros das linhas de transmissão.

São apresentados na tabela 4, os índices de sobrecarga com as respectivas contingências e, finalmente na tabela 5, a nova distribuição de gerações.

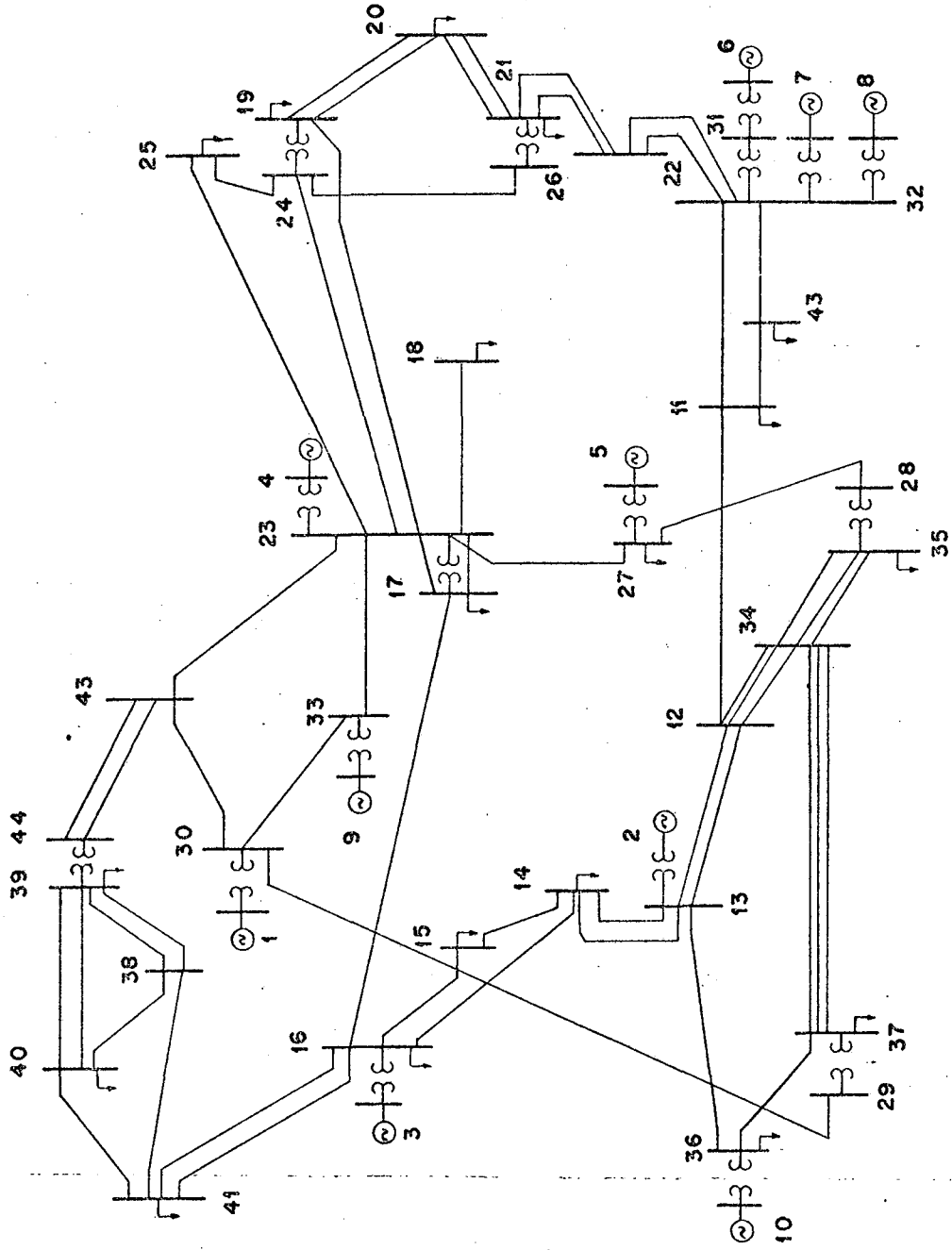


Fig. 4.1 - Diagrama unifilar.

BARRA	$x'd$ (pu)	H (MWS/MVA)
1	0,0243	55,24
2	0,1039	10,56
3	0,0284	38,34
4	0,0241	62,25
5	0,0367	30,44
6	0,1352	4,37
7	0,1534	6,80
8	0,800	12,50
9	0,0216	62,46
10	0,0432	20,24

Tabela 1 - Dados das máquinas

BARRA	GERAÇÃO (MW)	LIMITE MÁXIMO DE GERAÇÃO (MW)	LIMITE MÍNIMO DE GERAÇÃO (MW)	CARGA (MW)
1	1062,3	1050,0	1780,00	0,0
2	215,0	110,0	275,00	0,0
3	1050,0	880,0	1150,0	0,0
4	1110,0	1000,0	1676,0	0,0
5	650,0	530,0	780,0	0,0
6	90,0	80,0	150,0	0,0
7	120,0	80,0	160,0	0,0
8	241,0	200,0	570,0	0,0
9	1391,0	750,0	1400,0	0,0
10	490,0	250,0	650,0	0,0
11	0,0			117,0
12	0,0			190,7
13	0,0			171,0
14	0,0			126,0
15	0,0			46,0
16	0,0			280,6
17	0,0			279,0
18	0,0			130,0
19	0,0			427,0
20	0,0			317,0
21	0,0			424,0
22	0,0			117,0
23	0,0			0,0
24	0,0			0,0
25	0,0			368,0
26	0,0			0,0
27	0,0			174,0
28	0,0			0,0
29	0,0			0,0
30	0,0			0,0
31	0,0			126,0
32	0,0			0,0
33	0,0			0,0
34	0,0			813,0
35	0,0			612,0
36	0,0			403,6
37	0,0			393,3
38	0,0			262,0
39	0,0			229,0
40	0,0			184,0
41	0,0			139,0
42	0,0			90,1
43	0,0			0,0
44	0,0			0,0

Tabela 2 - Dados de barras

BARRA	BARRA	X%
27	5	1,36
11	12	19,85
11	32	4,91
11	42	1,67
12	13	23,78
12	13	27,78
12	34	9,1
12	34	9,1
13	2	4,6
13	37	11,29
14	13	8,35
14	13	8,35
14	15	8,35
14	16	16,21
15	16	8,61
16	3	1,14
16	41	17,6
16	41	17,6
17	18	12,56
17	19	4,15
19	20	9,35
19	20	9,35
20	21	7,76
20	21	7,76
21	22	11,05
21	22	11,05
22	32	9,2
23	4	0,67
23	24	2,8
23	33	0,7
23	17	3,0
24	25	0,69
24	26	1,75
19	24	0,62
21	26	0,62
16	17	15,23

BARRA	BARRA	X%
27	28	3,09
27	23	1,95
35	28	0,62
29	30	4,95
37	29	0,62
30	1	1,14
30	43	2,04
30	33	0,70
31	6	8,71
31	32	5,90
32	7	7,01
32	8	4,5
32	42	6,57
33	9	0,68
34	35	1,11
34	35	1,11
34	37	9,84
36	10	2,36
36	37	11,29
38	41	11,74
38	40	11,84
38	39	6,41
38	39	6,41
39	40	8,84
39	40	8,84
40	41	9,29
43	44	1,45
44	39	0,63
22	32	9,20
23	25	2,74
23	44	2,27
34	35	1,11
34	37	9,84
34	37	9,84
34	12	9,10

Tabela 3 - Dados de linhas

CONTINGÊNCIA		IND. SOBRECARGA
BARRA	BARRA	
23	34	0,512

Tabela 4 - Índices de sobrecarga

BARRA	GERAÇÃO (MW)
1	1183,35
2	232,26
3	1060,16
4	1130,91
5	698,84
6	103,15
7	133,67
8	247,33
9	1182,35
10	500,38

Tabela 5 - Novas gerações

Exemplo 2 -

O sistema de potência do exemplo 2 é do exemplo 1 no qual foram retiradas as linhas de transmissão entre as barras 23 e 25, 34 e 37, 34 e 37, 34 e 12, resultando sessenta e oito linhas, conforme diagrama da figura 4.2.

Os dados de máquinas, barras e parâmetros de linhas são os mesmos das tabelas 1, 2 e 3 respectivamente.

Na tabela 6 são apresentados os índices de sobrecarga e na tabela 7 as gerações resultantes do remanejamento, resultando num sistema seguro.

CONTINGÊNCIA		ÍNDICE DE SOBRECARGA
BARRA	BARRA	
23	33	1,0352
27	28	0,4767
23	27	0,3035
23	24	0,1653

Tabela 6 - Índices de sobrecarga

BARRA	GERAÇÃO (MW)
1	1169,56
2	270,00
3	1112,56
4	1322,71
5	744,64
6	136,97
7	153,56
8	267,16
9	776,87
10	518,36

Tabela 7 - Novas gerações

4.6 - Conclusões

Como foi visto neste capítulo, para um sistema que seja detectada uma situação insegura, é possível que, a partir de uma redistribuição de gerações, o sistema evolua para um ponto de equilíbrio sem sobrecarga.

A redistribuição de gerações utilizando-se conceitos de limites inferiores, é realizada de modo a aumentar o domínio de estabilidade. Com isso evidencia-se a relação entre domínio de estabilidade e a geração, sendo que, quanto mais potência flui em determinadas linhas, menor o domínio de estabilidade.

No caso em que, devido as condições do sistema, não seja possível a obtenção de uma situação segura, o algoritmo fornece um ponto de operação menos inseguro que o inicial. Neste caso o sistema poderá suportar a um maior número de contingências.

CAPÍTULO V

DESPACHO ECONÔMICO COM RESTRIÇÃO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

5.1 - Introdução

Foi mostrada no capítulo 2, a modelagem de um problema de despacho econômico, com as restrições usuais e restrições de limitação de fluxo nas linhas de transmissão. O problema de despacho considera o sistema em regime, ignorando seu comportamento quando submetido a perturbações que porventura venham a ocorrer.

No capítulo anterior foi visto que, dependendo da distribuição de potências, um dado sistema pode resistir a maior número de contingências. Evidencia-se com isto, uma relação entre os limites inferiores, o nível de geração, e domínio de estabilidade e os fluxos de potência nas linhas de transmissão. Mostra-se que há independência entre a distribuição de gerações que resultam num menor custo e a distribuição que origina maior segurança para o sistema.

É importante que um sistema de potência opere com menores custos e ao mesmo tempo que resista às contingências, mas se a distribuição de gerações que fornecem o ponto de operação ótimo em termos de custos, torna o sistema fraco em termos de estabilidade transitória, sua operação com mínimos custos deixa de ser prioritária.

O objetivo deste capítulo é a apresentação do algoritmo de despacho econômico com restrição de segurança onde, para o ponto de mínimos custos é feita uma análise de contingência. Se a distribuição de geração que fornece os mínimos custos não satisfaz às contingências, um novo ponto é procurado na vizinhança do ótimo.

5.2 - Algoritmo de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória

Para utilização do algoritmo de despacho econômico com restrição de segurança estática, juntamente com a análise de estabilidade transitória, são necessários os dados de entrada dos algoritmos base dos capítulos 2 e 4. Com esses dados de entrada o problema resume-se a:

1. Encontrar a distribuição de gerações ótima em termos de custos, com o auxílio, por exemplo, do algoritmo apresentado no capítulo 2.
2. Testar se o ponto de operação ótimo em termos de custos satisfaz a análise de estabilidade transitória. Esta análise é feita a partir de contingências sobre o sistema consistindo na retirada de cada linha do sistema ou apenas das linhas julgadas importantes.
3. Se satisfaz a todas as contingências o ponto de operação ótimo em termos de custos satisfaz às condições de esta

bilidade transitória e o algoritmo termina.

4. Se alguma contingência foi violada, são feitos ajustes na vizinhança do ponto ótimo conforme apresentado no algoritmo do capítulo 4. Ajustando-se o novo ponto de operação na vizinhança do ótimo há garantias, em geral, de que o custo de operação não seja muito elevado. Se não for possível encontrar um ponto na vizinhança do ótimo que satisfaça as contingências, o fator custo é desprezado e a prioridade passa a ser a continuidade de serviços, procurando-se então um ponto que satisfaça as condições de estabilidade transitória.

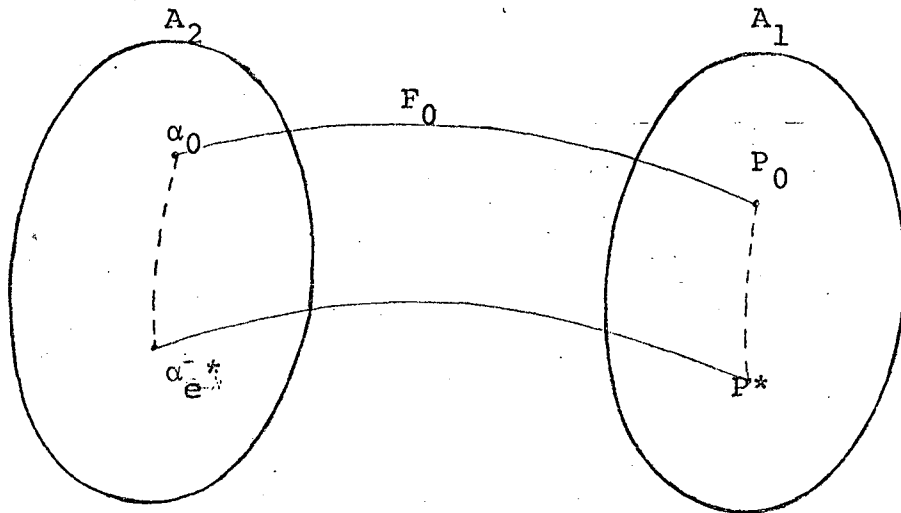
O algoritmo de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória pode ser ilustrado com o auxílio das figuras dadas a seguir.

Seja A_1 o espaço das potências de geração, A_2 o espaço dos ângulos e F a configuração do sistema.

- Para o problema de despacho econômico

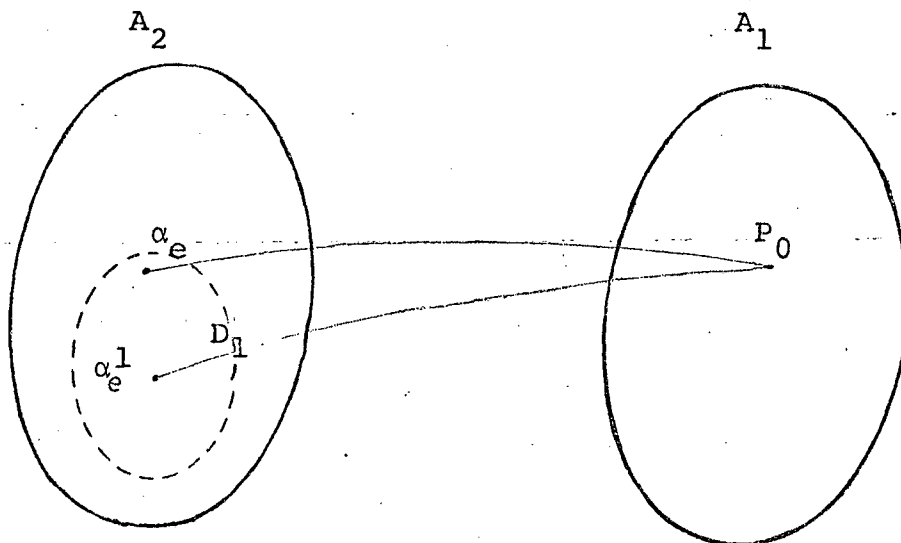
Supondo um despacho de geração inicial P^0 , correspondente ao ponto de operação inicial α_e^0 e uma dada configuração F_0 do sistema de transmissão. O problema de despacho econômico consiste em encontrar um despacho P^* que fornece um novo ponto de operação α_e^* onde o custo de operação seja mínimo. A figura abaixo ilustra o problema.

O ponto de operação α_e^* encontrado no problema de despacho econômico deve satisfazer a critérios de segurança.



- Análise de uma contingência

Para uma determinada condição do sistema é encontrado P_0 e o ponto de operação α_e^0 . Com o sistema submetido a uma contingência, a configuração é alterada, resultando num novo ponto de operação α_e^1 . Então, para uma dada distribuição de gerações P_0 , uma mudança na configuração do sistema resulta em defasagens angulares diferentes, como mostra a figura.



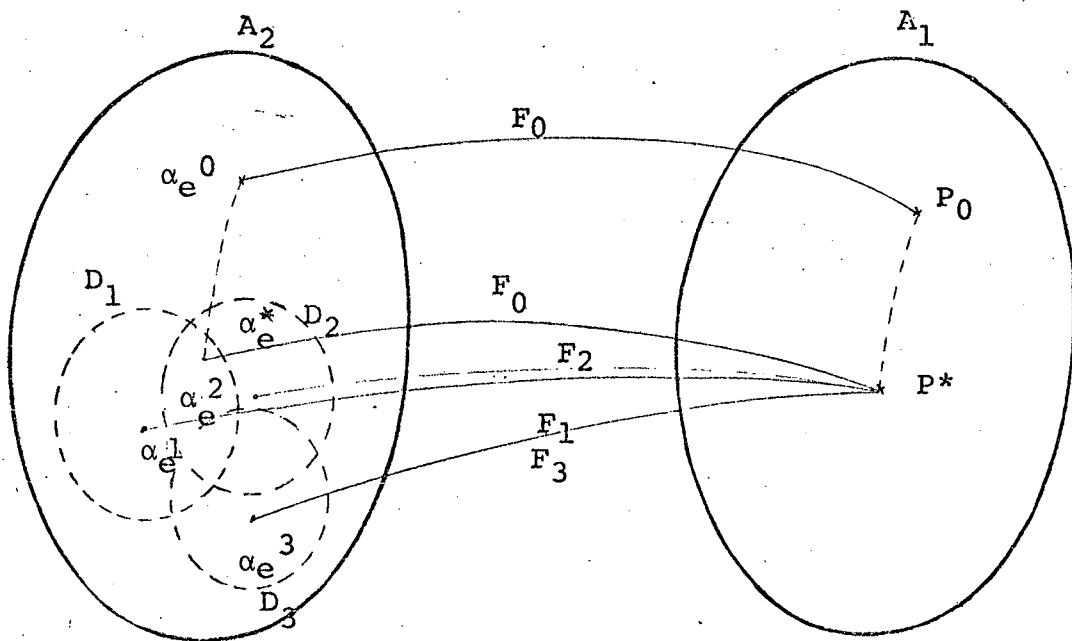
Seja D_1 o domínio de estabilidade do ponto de operação α_e^1 . O sistema satisfaz a uma análise de contingência se $\{\alpha_e^0\} \subset D_1$.

- Problema de despacho econômico com análise de segurança

Para uma dada configuração, F_0 , do sistema, a partir de uma condição inicial, P_0 , é encontrado um despacho, P^* , correspondente ao ponto de operação α_e^* , no qual o custo de operação seja mínimo. Para esta situação, são simuladas contingências, onde para cada contingência é encontrado:

- o ponto de operação α_e^i
- o domínio de estabilidade D_i para α_e^i

Supõe-se que para o ponto α_e^* três contingências como mostra a figura:



O sistema satisfaz a uma análise de contingência se:

$$\alpha_e^* \in \bigcap_{i \in I} D_i$$

onde:

I = número de contingências simuladas.

No presente caso supõe-se que $\alpha_e^* \notin D$, isto é,

$\{\alpha_e^*\} \not\subset \bigcap_{i \in I} D_i$. Então o sistema não satisfaz a uma análise de contingências.

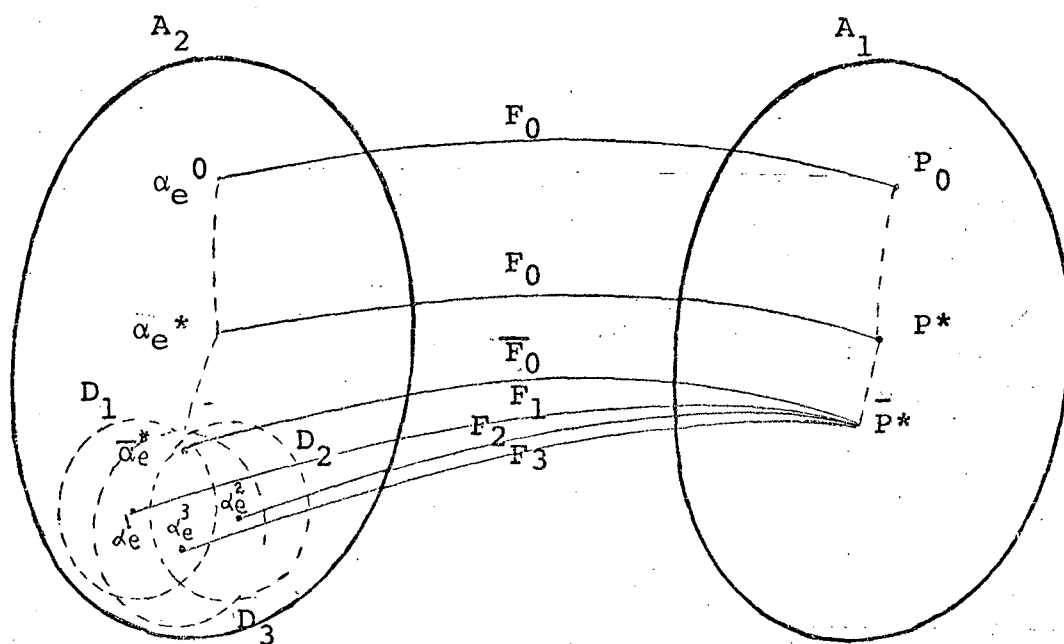
- Problema de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória

Em situações como apresentadas, no item anterior é desejável encontrar um novo despacho \bar{P}^* e o correspondente ponto de operação $\bar{\alpha}_e^*$ de forma que todas as contingências sejam satisfeitas. Para isto, a partir de P_0^* e do ponto de operação α_e^* a mínimos custos, deve ser feito um remanejamento de geração e encontrado um novo ponto de operação $\bar{\alpha}_e^*$, que satisfaça a uma análise de contingência. A figura abaixo ilustra este problema.

Na figura tem-se $\alpha_e^* \in \bigcap_{i \in I} D_i$, e portanto o sistema satisfaz à análise de contingência.

Desse modo o problema de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória pode ser resumido através dos itens abaixo:

1. Dado um despacho inicial P_0 , para uma configuração F_0 , determinar P^* , cujo custo de operação seja mínimo.



2. Simular contingências.

3. Remanejar a geração se necessário, isto é, encontrar se necessário, \bar{P}^* , que especifique $\bar{\alpha}_e^*$, tal que:

$$\{\bar{\alpha}_e^*\} \subset \bigcap_{i \in I} D_i$$

5.3 - Exemplo

Para ilustração do algoritmo de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória, é apresentado neste item, um exemplo de um sistema de potência composto de quatro máquinas, cinco barras e sete linhas de transmissão, de acordo com o diagrama unifilar da figura 5.1.

Os dados referentes ao sistema constam nas tabelas 1 a 6. Na tabela 1 são apresentados os dados das máquinas. Os parâmetros a_i , b_i e c_i são da função custo apresentada no capítulo II. Na tabela 2 são apresentadas as barras com as respectivas cargas e potência de geração inicial com os custos correspondentes e na tabela 3, os parâmetros das linhas de transmissão. Na tabela quatro é mostrado o novo ponto de operação correspondente aos mínimos custos e na tabela 5, os índices de sobrecarga calculados a partir da análise de contingências e de acordo com a equação 4.3. Na tabela 6 é mostrada a nova distribuição de gerações que garanta ao sistema uma análise de contingências e os custos correspondentes a este novo ponto de operação.

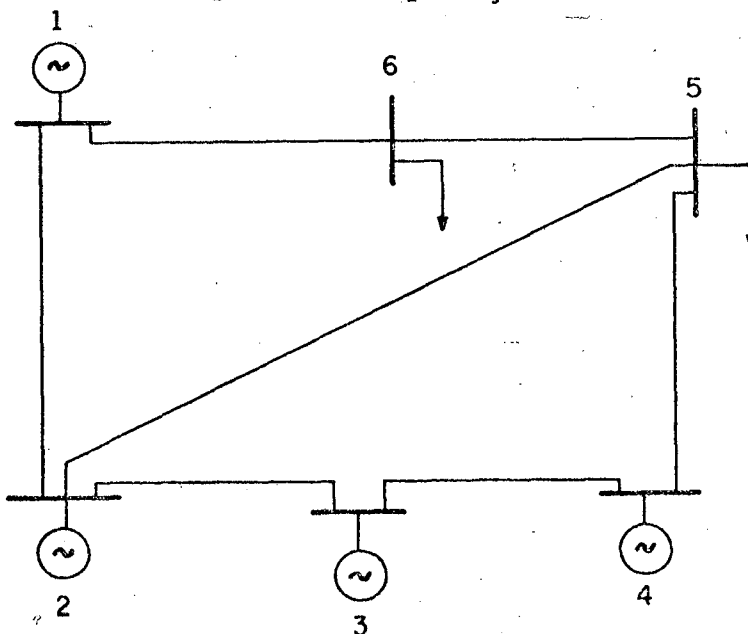


Fig. 5.1 - Diagrama unifilar.

BARRA	H (MWS/MVA)	X'_d (pu)	a_i	b_i	c_i
1	99,94	0,004	0,004	2,2	90,0
2	1,50	1,00	0,0035	2,5	100,0
3	3,00	0,50	0,004	2,2	80,0
4	2,00	0,40	0,007	2,3	110,0

Tabela 1 - Dados de máquina

BARRA	P_G (MW)	P_D (MW)	\underline{P}_G (MW)	\overline{P}_G (MW)
1	60,0	0,0	20,0	80,0
2	20,0	0,0	5,0	40,0
3	70,0	0,0	30,0	80,0
4	40,0	0,0	15,0	70,0
5	0,0	100,0	-	-
6	0,0	90,0	-	-

$F = \text{US\$ } 854,6/\text{hora}$

Tabela 2 - Dados de barras

BARRA	BARRA	X (%)
1	2	30,0
2	3	50,0
3	4	85,0
4	5	35,0
5	6	60,0
6	1	22,5
2	5	45,0

Tabela 3 - Parâmetros das linhas de transmissão

GERADOR	P_G (MW)
1	65,37
2	21,99
3	67,84
4	34,79

$F = \text{US\$ } 853,75/\text{hora}$

Tabela 4 - Ponto de operação a mínimos custos

CONTINGÊNCIAS		INDICE DE SOBRECARGA
BARRA	BARRA	
2	3	0,0512
4	5	0,0330

Tabela 5 - Índices de sobrecarga

GERADOR	P_G (MW)
1	72,50
2	22,70
3	63,47
4	31,33

$F = \text{US\$ } 853,76/\text{hora}$

Tabela 6 - Nova distribuição de gerações

5.4. Conclusão

Observa-se, com o auxílio do exemplo, que a partir de um determinado sistema cuja operação seja inviável em termos de estabilidade transitória, pode-se a partir de um remanejamento de gerações, obter-se uma operação viável.

A distribuição ótima de gerações, em termos de custos, não é totalmente desprezada, pois o programa procura inicialmente remanejar as gerações em torno do ponto de operação obtido através do programa de despacho econômico.

Para um sistema cujas ligações são fracas, o objetivo do programa deixa de ser minimizar os custos de operação para maximizar a segurança do sistema, fornecendo como resultado um ponto de operação seguro em termos de estabilidade transitória, garantindo a continuidade de suprimento, ou se não for possível tal distribuição de gerações, que pelo menos garanta continuidade de serviços quando o sistema for submetido a um maior número de contingências.

C A P Í T U L O V I

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 - Conclusões

Foi tratado neste trabalho, do problema de despacho econômico com restrições de segurança. Inicialmente foi abordado o problema de despacho econômico com restrições de desigualdades sobre os limites dos geradores e restrições funcionais sobre as linhas de transmissão do sistema. O método adotado, dos gradientes projetados, permite simplificações sobre as variáveis do sistema, resultando num baixo tempo de processamento. As perdas no problema de despacho econômico foram incluídas, porém podem ser desprezadas se for considerado como um sistema com as gerações próximas ao centro de carga. Neste trabalho, somente as gerações térmicas foram consideradas, pois a geração hidro, num problema de despacho econômico, é determinada previamente. Consequentemente, os custos a serem minimizados referem-se aos custos de operação das usinas térmicas.

Apesar das restrições envolvidas, mostrou-se que o problema de despacho econômico é incompleto, pois a distribuição de gerações que fornece os mínimos custos está dissociada da distribuição de gerações que fornece o maior domínio de estabilidade do sistema. Então, se para uma determinada distribuição de gerações que fornece os mínimos custos de operação, o sistema for submetido a uma perturbação, pode haver perda de sincro

nismo ou outro evento que cause descontinuidade na operação.

No capítulo 3 mostrou-se que um ponto de operação estável em regime pode ou não satisfazer uma análise de contingência. É apresentado, então, um algoritmo [12] que faz esta verificação e fornece o domínio de estabilidade neste caso. Assim conclui-se que, caso o sistema não satisfaça a um teste de contingência, há necessidade de um algoritmo adicional que forneça um ponto de operação viável, isto é, um ponto de operação estável em regime que satisfaça a uma análise de contingência. Em razão disto foi desenvolvido, no capítulo 4, um algoritmo baseado em [12], que acoplado ao apresentado no capítulo 3, fornece uma distribuição de gerações que garanta ao sistema suportar contingências ou, no caso da não existência deste ponto, que pelo menos o sistema resista ao maior número delas, melhorando o ponto de operação em termos de segurança. O algoritmo desenvolvido difere do apresentado em [21] basicamente pelo fato das correções serem feitas considerando-se todas as situações de sobrecarga ou apenas algumas. Isto introduziu algumas dificuldades de formulação do algoritmo, mas apresentou melhor eficiência na convergência do que aquele com a correção apenas na pior máquina. Mostrou-se também que este algoritmo faz uso da energia do sistema através de parcelas chamadas limites inferiores, como definidos em [19]. Os limites inferiores dão uma indicação do carregamento das linhas de transmissão e portanto, estão diretamente relacionados com a distribuição de geração do sistema. O algoritmo também faz uso de determinados índices, que indicam a situação do sistema em termos de segurança. Assim, o índice de sobrecarga foi definido como sendo o valor da energia

do sistema, calculado no ponto de operação anterior à retirada da linha em relação ao nível de energia correspondente ao domínio de estabilidade do novo ponto de equilíbrio. Foram calculados índices de sobrecarga para todas as situações que não satisfazem aos testes de contingências. O maior índice de sobrecarga fornece a pior contingência e indica a ligação mais fraca do sistema. Serve como ponto de partida ao algoritmo, indicando a máquina da qual deve ser aliviada a geração. Os índices de sobrecarga são enumerados em ordem decrescente sendo que o maior deles é colocado como o primeiro da lista. A partir do maior índice de sobrecarga são aliviadas as gerações das máquinas que causaram instabilidade e é aliviada em maior percentagem a geração da primeira máquina da lista, seguindo das outras em menor percentual de acordo com seu índice de sobrecarga. No caso do novo ponto encontrado não satisfazer às contingências, o processo é repetido. No algoritmo foram considerados os limites de operação dos geradores e se a distribuição de gerações atingiu algum limite, a geração é fixada no seu limite e o restante da geração é redistribuída nas máquinas restantes.

Foi apresentado no capítulo 5, o algoritmo de despacho econômico com restrição de estabilidade transitória. O algoritmo calcula o ponto de operação econômico de acordo com o algoritmo apresentado no capítulo 2. A partir deste ponto, fazem-se testes de contingências. No caso de ser detectada instabilidade procede-se de acordo com o algoritmo apresentado no capítulo 4. Assim, a nova distribuição de gerações fornece um ponto de operação que não se afasta demasiadamente do ponto de operação ótimo em termos de custos, encontrado no primeiro passo do algo

ritmo. Se o ponto de operação encontrado não satisfaz ao teste de contingências, a cada passo é encontrado um novo ponto de operação que se afasta cada vez mais do de mínimo custo. Há, desta forma, uma mudança de objetivos, não importando mais que o sistema opere com os mínimos custos, mas que seja garantida a continuidade de serviços.

É dado, no capítulo 5, um exemplo para ilustrar a utilização do algoritmo.

O exemplo mostra um sistema em que, para o ponto de operação a mínimos custos, a análise de contingência não é satisfeita. Para este ponto são calculados índices de sobrecarga e enumerados, indicando as piores contingências em ordem de crescente de sua severidade. A partir destes índices, são mostradas as sucessivas distribuições de gerações até encontrar um ponto que satisfaz uma análise de contingência. Através do exemplo pode-se observar que na primeira correção de gerações o ponto de operação encontrado ainda permanece na vizinhança do ponto de operação a mínimos custos e a medida que novas correções vão sendo efetuadas o ponto se afasta mais.

6.2 - Sugestões para futuros trabalhos

O algoritmo de redistribuição de geração exige que seja fixado antecipadamente um critério no que diz respeito ao percentual de geração a ser retirada da máquina que causou o maior índice de sobrecarga, considerada a pior máquina do sistema. Uma melhoria do algoritmo seria obtida se se encontrar a

quantidade ótima de geração a ser retirada da pior máquina, melhorando com isso, a eficiência do algoritmo. Com essa implementação o ponto de operação encontrado se afastaria o mínimo possível do ponto de mínimos custos.

Uma outra melhora no algoritmo consiste em incluir uma análise de contingência mais eficiente. Pode-se, por exemplo, fazer uma seleção das contingências mais críticas que, se satisfeitas, garantissem a verificação das outras. Com isso há um aumento na eficiência computacional.

No sentido da sugestão acima, pode-se usar no algoritmo, testes de estabilidade estática acoplados com os testes de estabilidade dinâmica, utilizando-se domínios de estabilidade para avaliação das contingências. Esta medida reduz sensivelmente o tempo computacional, conforme [13].

B I B L I O G R A F I A

- [1] - HAPP, H.H. "Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey".
IEEE PAS, nº 96, Maio/Junho 1977, pg. 841 a 854.
- [2] - GEORGE, E.E. "Intrasystem Transmission Losses". A.I.E.E.
Trans., nº 62, Março 1943, pg. 153 a 158.
- [3] - KIRCHMAYER, L.K. e STAGG, G.W. "Analysis of Total and Incremental Losses in Transmission Systems". A.I.E.E. Trans.,
nº 70; Part II, 1951, pg. 1197 - 1205.
- [4] - CARPENTIER, J., "Contribution a l'Etude du Dispatching Economic". Bulletin de la Société Française des Electriciens,
ser. 8, nº 3, Agosto/1962.
- [5] - DOMMEL, H.W. e TINNEY, W.F. "Optimal Power Flow Solutions",
IEEE. PAS, nº 87, Outubro/1968, pg. 1866 a 1876.
- [6] - WOLLENBERG, B.F. e STADLIN, W.O. "A Real Time Optimizer
for Security Dispatch". IEEE PAS, nº 93, Setembro/Outubro/1974, pg. 1640 a 1649.
- [7] - Lugtu, R. "Security Constrained Dispatch". IEEE PAS, nº 98,
Janeiro - fevereiro/1979, pg. 270 a 274.

- [8] - PODMORE, R. "Economic Power Dispatch With Line Security Limits". IEEE PAS, nº 93, Janeiro - Fevereiro/1974, pg. 289 a 295.
- [9] - PESCHON, J. e BREE, D.W., e HAJDU, L.P. "Optimal Solutions Involving System Security". Proc. 7th PICA Conf. (Boston, Mass., 1971), pg. 210 a 218.
- [10] - REID, G.F. e HASDORFF, L. "Economic Dispatch Using Quadratic Programming". IEEE Trans. PAS, nº 92, Março-Abril/1973, pg. 644 a 654.
- [11] - NABONA, N. e FRERIS, L.L. "Optimisation of Economic Dispatch through Quadratic and Linear Programming". IEEE, nº 120, Maio/1973, pg. 574 a 579.
- [12] - FONSECA, L.G.S., DORAISWAMI. R., BORENSTEIN, C.R., MARQUES, G.B., CAMARGO, C.C.B., RIBEIRO, J., "Determinação de situações críticas de estabilidade transitória em sistemas de potência de grande porte". V SNPTEE, RE/GSP/40-1979.
- [13] - COLVARA, L.D., "Planejamento do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica com aplicação de critério de estabilidade transitória de Liapunov". Dissertação de M.Sc., UFSC, Abril/81.

- [14] - ADLER, R.B. FISCHL, R, "Security Constrained Economic Dispatch with Participation Factors Based on Worst Case Bus Load Variations". IEEE PAS, Vol. 96, nº 2, março/abril 1977, pg. 347-356.

- [15] - PODMORE, R. "A Simplified and Improved Method for Calculating Transmission Loss Formulas". Proc.PICA Conference, Minneapolis, Minn., 1973, pg. 433,440.

- [16] - EL-ABIAD, A.H., NAGAPPAN, K. "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems". IEEE Trans. PAS, Vol. 85, nº 2, Fev/1966, pg. 169-179.

- [17] - GLESS, G.E. "Direct Method of Liapunov Applied to Transient Power System Stability". IEEE Trans. PASS, Vol. 85, nº 2, Fev/1966, pg. 159-168.

- [18] - KIMBARK, E.W. "Power System Stability". Vol. I e II, New York, John Willey and Sons, Inc., 1955.

- [19] - FONSECA, L.G.S. "Domínios de Estabilidade para Uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência". Tese de D.Sc. - COPPE/UFRJ, Abril/1976.

- [20] - EL-ABIAD, A.H. PRABHAKARA, F.S. "A Simplified Determination of Transient Stability Regions for Liapunov Methods". IEEE Trans. PAS, Vol. 94, nº 2, Março-Abril/1975, pg. 672 à 689.

- [21] - FONSECA, L.G.S., BORENSTEIN, C.R., "Uso de Domínios de Estabilidade na Análise de Segurança "On-Line" de Sistemas de Potência". III Congreso Chileno de Ingeniería Elétrica, Concepcion-Chile, Mayo 1979.
- [22] - KUESTER, J.L., MIZE, J.H., "Optimization Techniques With Fortran". McGraw-Hill, 1973.