



Gian Paulo Ramalho de Deus

**Análise Comparativa entre a Maximização da Margem de
Potência e a Minimização das Perdas Técnicas em Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro
junho de 2007



Gian Paulo Ramalho de Deus

Análise Comparativa entre a Maximização da Margem de Potência e Minimização das Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Ricardo Bernardo Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Antonio Padilha Feltrin

UNESP

Dr. Antonio Luiz Bergamo do Bomfim

ELETROBRÁS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de junho de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Gian Paulo Ramalho de Deus

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Pará em 2004.

Ficha Catalográfica

Deus, Gian Paulo Ramalho de

Análise comparativa entre a maximização da margem de potência e a minimização das perdas técnicas em sistemas de distribuição de energia elétrica / Gian Paulo Ramalho de Deus ; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2007.

91 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Sistemas de distribuição. 4. Otimização. 5. Busca tabu. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais, Paulo Medeiros de Deus e Gertrudes Ramalho de Deus,
pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador Professor Ricardo Bernardo Prada pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À minha família, especialmente Lina, Karina e minhas irmãs Giselle e Girllene.

Aos meus amigos, Amanda, Jorge, David, Felipe, Fernando Machado, Leonardo Xavier e Lindomar que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Aos membros da Comissão examinadora.

A todos os amigos do curso de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pelo estímulo e pela amizade.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos e pela ajuda.

Resumo

Deus, Gian Paulo Ramalho; Prada, Ricardo Bernardo. **Análise Comparativa entre a Maximização da Margem de Potência e a Minimização das Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro, 2007. 91p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O aumento do consumo de energia elétrica leva os sistemas de distribuição a operar próximo do seu limite, podendo ocorrer situações de máximo fluxo de potência ativa e reativa nos ramos, ou seja, problemas de estabilidade de tensão. A mudança da topologia da rede permite encontrar uma configuração em que os índices de estabilidade de tensão estão distantes do ponto de máximo carregamento do sistema, reduzir as perdas técnicas e tornar a distribuição de carga nos alimentadores mais uniforme. Contudo, o número de possibilidades de chaveamento cresce com o aumento da dimensão da rede elétrica e a busca pela solução ótima requer esforço computacional elevado. O uso do algoritmo heurístico de Busca Tabu permite direcionar a busca por novas configurações de qualidade, armazenando suas características e proibindo a adição e/ou remoção de atributos por um período, evitando que a busca termine em um valor mínimo (máximo) local. Os resultados das análises em diferentes níveis de carregamento, que representam a operação do sistema radial de distribuição com carga leve, pesada e crítica, mostram que o algoritmo de Busca Tabu adotado neste trabalho consegue maximizar a margem de potência da barra crítica do sistema, levando o ponto de operação original à uma distância maior do ponto de máximo carregamento do sistema, na região normal de operação e minimizando as perdas técnicas. Com isso, evita-se que o sistema opere no ponto de máximo carregamento ou, na pior das hipóteses, na região anormal de operação, onde as ações de controle têm efeito oposto ao esperado.

Palavras - chave

Estabilidade de tensão, sistemas de distribuição, otimização, busca tabu.

Abstract

Deus, Gian Paulo Ramalho; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Comparative Analysis between the Maximization of Voltage Stability Margin and Loss Reduction in Distribution Systems**. Rio de Janeiro, 2007. 91p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The increase of the consumption of electric energy takes the distribution systems to operate next to its limits, which might cause situation of maximum active and reactive power flow in the branches, that is, problems of voltage stability. The change of the topology of the network allows to find a configuration where the voltage stability indexes are far from the maximum loading point, improve voltage profile, reduce power losses and load balancing. However, the number of possible switching grows with the dimension of network and searching for optimal solution requires high computational effort. Using Tabu Search heuristics allows guiding the search for new configuration of high quality, being storing its characteristics and forbidding the addition and/or removal of attributes for a period, avoiding that the search finishes in a local minimum (maximum) value. The results in different loading levels, that represent the operation of radial distribution system with normal, weighed and critical load, show that the Tabu Search algorithm maximizes the voltage stability margin, leading the original operation point to a new one that is far from the maximum loading point, in the normal region of operation. With this, it is prevented that the system operates next to the maximum loading point or, in the worse case, in the abnormal region of operation, where the actions of control have opposing effect to the waited one.

Keywords

Voltage stability, distribution systems, optimization, tabu search.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Considerações Gerais	12
1.2	Objetivo.....	13
1.3	Estrutura da Dissertação	13
2	Estabilidade de Tensão	15
2.1	Introdução.....	15
2.2	O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	15
2.2.1	Curvas P, Q e ϕ constantes.....	19
2.3	Máxima Potência Transmitida.....	21
2.4	Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão	24
2.4.1	Magnitude do determinante da matriz $[D']$	26
2.4.1.1	Sistema de duas barras	26
2.4.1.2	Sistema multi-nó	27
2.4.2	Sinal do determinante da matriz $[D']$	30
2.4.3	Margem de potência.....	33
2.5	Influência do Carregamento na Margem de Potência.....	34
2.6	Índices de Estabilidade de Tensão em Redes Radiais de Distribuição ...	35
3	Algoritmo de Busca Tabu.....	38
3.1	Introdução.....	38
3.2	Histórico.....	38
3.3	Definição.....	39
3.4	Escolha da Configuração Inicial.....	43
3.5	Representação e Codificação do Problema.....	43
3.5.1	Fluxo de carga em sistemas radiais de distribuição	43
3.5.1.1	Método de soma de correntes	44
3.5.1.1.1	Cálculo das injeções de corrente nodais	44
3.5.1.1.2	Atualização para trás (<i>backward sweep</i>)	45
3.5.1.1.3	Atualização para frente (<i>forward sweep</i>)	46

3.5.1.1.4	Critério de convergência	46
3.5.1.2	Método de soma de potências.....	47
3.5.1.2.1	Atualização para frente (<i>forward update</i>).....	47
3.5.1.2.2	Atualização para trás (<i>backward update</i>)	48
3.5.1.2.3	Critério de convergência	49
3.5.2	Geração das configurações vizinhas.....	49
3.5.3	Estruturas de memória utilizadas em Busca Tabu	50
3.5.3.1	Memória de curto prazo	51
3.5.3.2	Lista Tabu com memória de curto prazo	51
3.5.3.3	Memória de longo prazo	52
3.5.4	Estratégias adicionais utilizadas em Busca Tabu	54
3.5.4.1	Configurações de elite	54
3.5.4.2	Path relinking	54
3.5.4.3	Oscilação estratégica	55
3.5.5	Busca Tabu na maximização da margem de potência.....	56
4	Otimização de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica por Busca Tabu	58
4.1	Sistema de Distribuição com Carregamento Leve	58
4.2	Sistema de Distribuição com Carregamento Pesado	68
4.3	Sistema de Distribuição com Carregamento Crítico	77
4.4	Conclusão.....	87
5	Conclusões Finais e Propostas para Trabalhos Futuros	88
6	Referências Bibliográficas	90

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Margem de potência em função do aumento do carregamento	34
Tabela 4.1 - Índices de estabilidade de tensão no carregamento leve.....	59
Tabela 4.2 - Carregamento Leve.....	60
Tabela 4.3 - Aumento da margem de potência no carregamento leve.....	62
Tabela 4.4 - Índices de estabilidade de tensão carregamento leve.....	64
Tabela 4.5 - Redução das perdas técnicas no carregamento leve.....	66
Tabela 4.6 – Distância ao máximo carregamento das barras crítica e adjacentes	68
Tabela 4.7 – Índices de estabilidade de tensão no carregamento pesado.....	69
Tabela 4.8 - Carregamento Pesado	70
Tabela 4.9 - Aumento da margem de potência no carregamento pesado.....	71
Tabela 4.10 - Índices de estabilidade de tensão no carregamento pesado	73
Tabela 4.11 – Redução das perdas técnicas no carregamento pesado.....	75
Tabela 4.12 – Índices de estabilidade de tensão no carregamento crítico.....	78
Tabela 4.13 – Carregamento Crítico	79
Tabela 4.14 - Aumento da margem de potência no carregamento crítico.....	81
Tabela 4.15 – Ponto de operação após maximização da margem de potência	84
Tabela 4.16 - Redução das perdas técnicas no carregamento crítico.....	85

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Circuito de duas barras do limite de estabilidade de tensão	16
Figura 2.2 - Circuito de duas barras da potência injetada na barra terminal	19
Figura 2.3 - Curvas P e Q constantes no plano θ_1 versus V_1 na barra terminal	22
Figura 2.4 – Curva PV referente ao sistema de duas barras	23
Figura 2.5 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no plano $V\theta$	31
Figura 2.6 - Magnitude do $\det[A]$ do sistema e do $\det[D']$ de uma barra remota. ...	32
Figura 2.7 – Sinal da margem de potência na curva PV	34
Figura 3.1 – Pseudo-código genérico do método de descida simples	40
Figura 3.2 - Transição de configurações no algoritmo de Busca Tabu	42
Figura 3.3 - Espaço de busca entre busca local e Busca Tabu.....	42
Figura 3.4 – Sistema radial de distribuição de cinco barras	44
Figura 3.5 – Laço formado ao se fechar a chave i-j	50
Figura 3.6 - Exemplo de armazenamento da Lista Tabu em vetor.....	52
Figura 3.7 - Intensificação e diversificação em Busca Tabu	53
Figura 3.8 - Path relinking em Busca Tabu	55
Figura 3.9 – Pseudo-código Busca Tabu aumento da margem de potência.....	57
Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema de distribuição	61
Figura 4.2 – Maximização da margem de potência no carregamento leve	62
Figura 4.3 - Diagrama unifilar após o aumento da margem (Leve)	63
Figura 4.4 - Perfil de tensão antes e depois da reconfiguração (Leve)	65
Figura 4.5 – Minimização das perdas técnicas com carregamento leve	66
Figura 4.6 – Diagrama unifilar após a redução das perdas técnicas (Leve).....	67
Figura 4.7 – Maximização da margem de potência com carregamento pesado ...	71
Figura 4.8 - Perfil de tensão antes e depois da reconfiguração (Pesada).....	72
Figura 4.9 – Diagrama unifilar após o aumento da margem (Pesado)	74
Figura 4.10 - Minimização das perdas técnicas com carregamento pesado.....	76
Figura 4.11 – Maximização da margem de potência com carregamento crítico....	80
Figura 4.12 – Diagrama unifilar após o aumento da margem (Crítico).....	82
Figura 4.13 - Perfil de tensão antes e depois da reconfiguração (Crítico).....	83
Figura 4.14 – Diagrama unifilar após a redução das perdas técnicas (Crítico)	86