

I SisPot
Encontro Interno de Pesquisadores em Sistemas de Potência
09 e 10 de Abril de 2001
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC – UNICAMP

RELATÓRIO FINAL

Carlos A. Castro

Publicação FEEC 001/2001

Campinas, abril de 2001.

Sumário

Prefácio	4
Programa final	5
Resumos dos trabalhos apresentados	8
Time assíncrono inicializador para algoritmos combinatórios aplicados ao planejamento da expansão da transmissão, S.A. De Oliveira , C.R.T. De Almeida , A. Monticelli	9
Técnicas de parametrização para o método da continuação, Dilson A. Alves , L.C.P. da Silva , C.A. Castro , V.F. da Costa	10
Modelos FACTS para simulação de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica, Waldir de Freitas Filho , André L. Morelato França	11
Influência do modelo estocástico no desempenho da programação dinâmica estocástica no planejamento da operação energética, L. Martinez , S. Soares	12
Análise de sensibilidade da simulação de sistemas hidrotérmicos, Marcelo Augusto Cicogna	13
Algoritmos para a estimação dinâmica de parâmetros da carga, Lia Toledo Moreira , Alcir José Monticelli	14
Análise e resultados de simulação da implementação do fluxo de carga ótimo na malha terciária do controle automático de geração, Dilson A. Alves , C.R. Minussi , G.R.M. da Costa	15
Cálculo de curto-circuito probabilístico utilizando cluster de microcomputadores, Eduardo N. Asada , Fujio Sato , Alcir J. Monticelli , Ariovaldo V. Garcia	16
Algoritmos genéticos paralelos aplicados ao planejamento da expansão da transmissão, S.A. De Oliveira , R.A. Romero , R.A. Gallego , A. Monticelli	17
Método eficiente de cálculo da margem de segurança ao colapso de tensão, Luis Alberto Llacua Zarate , Carlos Alberto de Castro Junior	18
Pré-despacho de sistemas de energia elétrica através de métodos de pontos interiores, Aurelio Ribeiro Leite de Oliveira , Secundino Soares Filho	19
Um simulador do controle em tempo real de sistemas de energia elétrica, R.M. Kawakami , A.V. Garcia	20
Índice de proximidade ao colapso de tensão baseado no fluxo de potência ativa no ramo: verificação da sua utilização como meio de seleção de contingências em tempo real, Mário de Almeida e Albuquerque , Carlos Alberto de Castro Junior	21
Visualização do estado de sistemas de energia elétrica utilizando interfaces gráficas de usuário, Alexandre de Assis Mota , Alcir José Monticelli	22
Um sistema gerenciador de dados para o planejamento energético da operação de sistemas hidrotérmicos, Marcelo Augusto Cicogna	23

Controle vetorial de geradores síncronos para melhorar a estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica usando FACTS, Walmir de Freitas Filho , André L. Morelato França	24
Implementação de centro de controle de energia elétrica utilizando rede UNIX de baixo custo, Lia Toledo Moreira , Alexandre de Assis Mota , Eduardo N. Asada , Alcir J. Monticelli	25
Avaliação do impacto dos geradores na capacidade de transferência de potência de sistemas de energia elétrica via fatores de participação modal, Luiz C.P. da Silva , Vivaldo F. da Costa , Wilsun Xu	26
Metaheurísticas aplicadas ao planejamento da expansão da transmissão em ambiente de processamento distribuído, S.A. De Oliveira , R.A. Romero , R.A. Gallego , A. Monticelli	27
Análise de um sistema elétrico poluído sob condições de falta, Francisca Aparecida de Camargo Pires , Maria Isabel Cuenca Alegria	28
Estratégias de conservação e qualidade de energia aplicadas na indústria, Francisca Aparecida de Camargo Pires , José Carlos da Costa Campos	29
Estratégias de controle corretivo em situações de infactibilidade da operação de sistemas elétricos de potência, André Gustavo Campos da Conceição , Carlos Alberto de Castro Jr.	30
Políticas de controle malha aberta e malha fechada no planejamento energético de sistemas de energia elétrica, L. Martinez , S. Soares	31
Cálculos de curto-circuito probabilístico em sistemas de distribuição para estudos de avaliação de riscos, João Ricardo B. Duran , Fujio Sato	32
Um procedimento para o redespacho ativo da geração visando aumento da margem de estabilidade de tensão via fator de participação modal, Frederico S. Moreira , Takaaki Ohishi , Luiz P. da Silva , Vivaldo F. da Costa	33

Palestrantes convidados

34

Prefácio

O I SisPot – Encontro Interno de Pesquisadores em Sistema de Potência – foi realizado nos dias 09 e 10 de abril de 2001, na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas. Os principais objetivos do evento foram:

- divulgar os trabalhos de pesquisa em andamento ou recentemente concluídos na área de sistemas de potência;
- criar uma oportunidade para que os alunos apresentassem seus trabalhos de pesquisa, preparando-os para futuras apresentações em congressos e defesas de dissertações e teses;
- criar uma oportunidade para que os alunos novos tomassem um primeiro contato com o ambiente de pesquisa no qual estão se inserindo;
- estimular a interação entre docentes e alunos em um ambiente que propiciasse o desenvolvimento de trabalhos conjuntos.

O evento contou com a participação de aproximadamente 50 pessoas, entre ouvintes, autores de trabalhos e palestrantes convidados. Além de alunos e professores da FEEC, representantes de empresas do setor elétrico também estiveram presentes. Entendemos que uma maior aproximação entre a universidade e as empresas do setor elétrico é extremamente importante para ambas as partes e o I SisPot também teve o papel de ser uma mostra do potencial de pesquisa da nossa faculdade e de sua capacidade de fornecer produtos e soluções para serem aplicados no setor.

Foram submetidos 25 resumos de trabalhos de pesquisa em andamento ou recentemente concluídos. Estes foram apresentados nos dois dias de duração do evento. As apresentações, na sua grande maioria realizadas por alunos, foram de alto nível.

Foram também proferidas três palestras do maior interesse para os participantes. A primeira, proferida pelo prof. Dr. Newton G. Bretas (Escola de Engenharia de São Carlos – USP), tratou de uma experiência na formação de engenheiros eletricitas. A segunda foi proferida pelo Eng. José Eduardo Tanure (Anel) e teve como tema principal o financiamento de pesquisa e desenvolvimento pelas empresas do setor elétrico. A terceira palestra, proferida pelo prof. Dr. Ariovaldo V. Garcia (DSEE/FEEC), tratou da implementação de funções de análise de redes em centros de controle de empresas concessionárias de energia elétrica.

A realização do I SisPot só foi possível devido ao incentivo e apoio irrestritos recebidos da diretoria (prof. Dr. Leo P. Magalhães), da coordenação de pós-graduação (prof. Dr. Reginaldo Palazzo Jr.) e da chefia do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica (prof. Dr. Ariovaldo V. Garcia) da FEEC, aos quais expressamos o nosso mais profundo agradecimento.

Desejamos também agradecer aos seguintes funcionários da FEEC que, com sua ajuda, contribuíram para o sucesso do evento: Edna Servidoni, Juraci S. de Souza, Ieda Maria A. Eberlin, Pedro de Paula Dias, Josefina I. da Silva, Antonio E.P. Carnauba, Eliete T.R. Modesto e Edmundo F. Gomes.

Prof. Dr. Carlos A. Castro, coordenador do I SisPot.

Programa final

Local e data

O I SisPot será realizado nos dias 09 e 10 de Abril de 2001, na sala LE-48 (sala de reuniões da Congregação) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP.

09 Abr 2001 – Segunda-feira

Início	Término	Atividade
09:00	10:00	Abertura: Prof. Dr. Carlos A. Castro Prof. Dr. Leo P. Magalhães: “Visão geral da UNICAMP e da FEEC” Prof. Dr. Reginaldo Palazzo Jr.: “A Pós-graduação na FEEC”
10:00	10:20	Time assíncrono inicializador para algoritmos combinatórios aplicados ao planejamento da expansão da transmissão, S.A. De Oliveira , C.R.T. De Almeida , A. Monticelli
10:20	10:40	Técnicas de parametrização para o método da continuação, Dilson A. Alves , L.C.P. da Silva , C.A. Castro , V.F. da Costa
10:40	11:00	Intervalo
11:00	11:20	Modelos FACTS para simulação de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica, Walmir de Freitas Filho , André L. Morelato França
11:20	11:40	Influência do modelo estocástico no desempenho da programação dinâmica estocástica no planejamento da operação energética, L. Martinez , S. Soares
11:40	12:00	Análise de sensibilidade da simulação de sistemas hidrotérmicos, Marcelo Augusto Cicogna
12:00	12:20	Algoritmos para a estimação dinâmica de parâmetros da carga, Lia Toledo Moreira , Alcir José Monticelli
12:20	14:00	Almoço
14:00	15:00	Palestra: “Metodologia de ensino de Engenharia Elétrica para formação de profissionais com boa capacidade de adaptação”, Prof. Dr. Newton G. Bretas (EESC/USP)
15:00	15:20	Análise e resultados de simulação da implementação do fluxo de carga ótimo na malha terciária do controle automático de geração, Dilson A. Alves , C.R. Minussi , G.R.M. da Costa
15:20	15:40	Cálculo de curto-circuito probabilístico utilizando cluster de microcomputadores, Eduardo N. Asada , Fujio Sato , Alcir J. Monticelli , Ariovaldo V. Garcia
15:40	16:00	Intervalo

09 Abr 2001 – Segunda-feira (continuação)

Início	Término	Atividade
16:00	16:20	Algoritmos genéticos paralelos aplicados ao planejamento da expansão da transmissão, S.A. De Oliveira , R.A. Romero , R.A. Gallego , A. Monticelli
16:20	16:40	Método eficiente de cálculo da margem de segurança ao colapso de tensão, Luis Alberto Llacua Zarate , Carlos Alberto de Castro Junior
16:40	17:00	Pré-despacho de sistemas de energia elétrica através de métodos de pontos interiores, Aurelio Ribeiro Leite de Oliveira , Secundino Soares Filho
17:00	17:20	Um simulador do controle em tempo real de sistemas de energia elétrica, R.M. Kawakami , A.V. Garcia
17:20	17:40	Índice de proximidade ao colapso de tensão baseado no fluxo de potência ativa no ramo: verificação da sua utilização como meio de seleção de contingências em tempo real, Mário de Almeida e Albuquerque , Carlos Alberto de Castro Junior

10 Abr 2001 – Terça-feira

Início	Término	Atividade
09:00	10:00	Palestra: "Aplicação de recursos em pesquisa e desenvolvimento decorrentes da edição da Lei 9991", Eng. José Eduardo P.S. Tanure (Superintendente de Regulação dos Serviços de Distribuição, ANEEL)
10:00	10:20	Visualização do estado de sistemas de energia elétrica utilizando interfaces gráficas de usuário, Alexandre de Assis Mota , Alcir José Monticelli
10:20	10:40	Um sistema gerenciador de dados para o planejamento energético da operação de sistemas hidrotérmicos, Marcelo Augusto Cicogna
10:40	11:00	Intervalo
11:00	11:20	Controle vetorial de geradores síncronos para melhorar a estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica usando FACTS, Walmir de Freitas Filho , André L. Morelato França
11:20	11:40	Implementação de centro de controle de energia elétrica utilizando rede UNIX de baixo custo, Lia Toledo Moreira , Alexandre de Assis Mota , Eduardo N. Asada , Alcir J. Monticelli
11:40	12:00	Avaliação do impacto dos geradores na capacidade de transferência de potência de sistemas de energia elétrica via fatores de participação modal, Luiz C.P. da Silva , Vivaldo F. da Costa , Wilsun Xu
12:00	12:20	Metaheurísticas aplicadas ao planejamento da expansão da transmissão em ambiente de processamento distribuído, S.A. De Oliveira , R.A. Romero , R.A. Gallego , A. Monticelli

10 Abr 2001 – Terça-feira (continuação)

Início	Término	Atividade
12:20	14:00	Almoço
14:00	15:00	Palestra: “Controle em tempo real de sistemas de energia elétrica”, Prof. Dr. Ariovaldo V. Garcia (DSEE/FEEC/UNICAMP)
15:00	15:20	Análise de um sistema elétrico poluído sob condições de falta, Francisca Aparecida de Camargo Pires , Maria Isabel Cuenca Alegria
15:20	15:40	Estratégias de conservação e qualidade de energia aplicadas na indústria, Francisca Aparecida de Camargo Pires , José Carlos da Costa Campos
15:40	16:00	Intervalo
16:00	16:20	Estratégias de controle corretivo em situações de infactibilidade da operação de sistemas elétricos de potência, André Gustavo Campos da Conceição , Carlos Alberto de Castro Jr.
16:20	16:40	Políticas de controle malha aberta e malha fechada no planejamento energético de sistemas de energia elétrica, L. Martinez , S. Soares
16:40	17:00	Cálculos de curto-circuito probabilístico em sistemas de distribuição para estudos de avaliação de riscos, João Ricardo B. Duran , Fujio Sato
17:00	17:20	Um procedimento para o redespacho ativo da geração visando aumento da margem de estabilidade de tensão via fator de participação modal, Frederico S. Moreira , Takaaki Ohishi , Luiz P. da Silva , Vivaldo F. da Costa
17:20	17:40	Encerramento

Resumos dos trabalhos apresentados

TIME ASSÍNCRONO INICIALIZADOR PARA ALGORITMOS COMBINATÓRIOS APLICADOS AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

De Oliveira, S.A.

De Almeida, C.R.T.

Monticelli, A.

grilo@dsee.fee.unicamp.br

O planejamento da expansão de redes de transmissão de sistemas de energia elétrica determina *quando*, *onde* e *que* tipos de linhas e/ou transformadores devem ser instalados na rede a fim de que o sistema opere adequadamente para uma demanda futura predeterminada e realizando o menor investimento possível. O planejamento dinâmico (*quando*) em geral é decomposto em subproblemas estáticos que tratam das questões *onde* e *que tipo* (planejamento em um estágio, de um ano inicial a um ano final, dados). Quando o sistema elétrico é modelado pelo fluxo de carga DC, o problema de planejamento estático é um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM). Dadas as dimensões que o problema assume para casos práticos em geral observa-se o fenômeno da explosão combinatória (problema NP-completo). Para uma alternativa de investimento, o problema se reduz a um problema de programação linear cujo objetivo é verificar a factibilidade da alternativa. Soluções deste problema são obtidas via métodos combinatórios, tais como Algoritmos Genéticos, “Simulated Annealing”, Busca Tabu, entre outros. Sendo que uma parte importante desse processo é a determinação de famílias de soluções iniciais contendo características atrativas, isto é, configurações com linhas e transformadores e conjuntos de linhas e transformadores (blocos construtivos) que podem formar parte das soluções ótimas, ou quase ótimas.

Por outro lado, em uma época na qual os recursos computacionais eram mais limitados, foram desenvolvidos métodos heurísticos como por exemplo os métodos de Garver, Mínimo Esforço e Mínimo Corte de Carga. Essas metodologias ainda são utilizadas por concessionárias como parte de procedimentos iterativos que exigem uma participação ativa dos planejadores. E atualmente, as concessionárias têm em seu parque computacional inúmeras estações de trabalho que podem ser utilizadas, com o auxílio de bibliotecas para processamento paralelo, como uma máquina paralela virtual, onde é possível o processamento concorrente de diversos programas computacionais.

Neste trabalho, que trata especificamente da fase estática do planejamento, foi implementado um modelo de programação multiagente conhecido como Times Assíncronos (*Times-A*) para resolver o problema de inicialização do problema de planejamento da expansão da transmissão. Um *Time-A* consiste de uma rede computacional fortemente cíclica, onde agentes autônomos (aqui, os métodos heurísticos construtivos) cooperam, trabalhando todo o tempo em paralelo, com a partilha permanente de resultados (configurações candidatas) entre os membros do time. Em outras palavras, *Time-A* é um conjunto de processos independentes que trabalham em paralelo todo o tempo, onde as soluções geradas por um processo podem ser reutilizada por outros.

Foram desenvolvidos *Times-A* com variantes dos algoritmos baseados no método de Garver e variantes dos algoritmos de Mínimo Esforço e Mínimo Corte de Carga. Foram feitos testes para três sistemas: Garver (6 barras/15 linhas), Sul brasileiro (46 barras/79 linhas) e Norte-Nordeste brasileiro (89 barras/179 linhas), em uma rede heterogênea de estações SUN, sistema operacional Solaris 2.5.1, com a biblioteca para processamento paralelo PVM 3.3.5. Os resultados foram aplicados aos Algoritmos Genéticos, “Simulated Annealing” e Busca Tabu, como soluções iniciais factíveis, obtendo-se assim soluções ótimas e quase-ótimas para os sistemas testados. A diversidade e qualidade das soluções obtidas com o uso dos times assíncronos inicializadores, comprovam sua eficácia em gerar soluções iniciais factíveis para os algoritmos combinatoriais.

TÉCNICAS DE PARAMETRIZAÇÃO PARA O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

Dilson A. Alves
DEE – CISA – UNESP; C.P. 31
CEP 15385-000, Ilha Solteira, SP- Brasil

L. C. P. da Silva, C. A. Castro e V. F. da Costa
FEEC – UNICAMP; C.P. 6101
CEP 13081-970, Campinas, SP - Brasil

A estabilidade de tensão tem se tornado uma questão crítica para a operação dos sistemas de potência em consequência do crescimento contínuo da demanda que, associado as restrições econômicas e ambientais, tem levado o sistema a operar próximo de seus limites. As equações do FC são essenciais para a análise estática da estabilidade de tensão (AEET), já que representam um limite para a região de operação estável. Quando as equações do FC não apresentam solução para uma dada condição de carregamento, conclui-se que a geração e a rede não são fisicamente capazes de suprir esta demanda, exigindo modificações ou no despacho da geração ou na topologia da rede de transmissão, ou em ambas, para que tal demanda possa ser atendida com segurança. Assim, conhecer o quão distante o atual ponto de operação encontra-se do limite de estabilidade é crucial para o operador, o qual poderá avaliar, p. ex., se para um dado distúrbio, tais como a saída de uma linha de transmissão ou uma variação súbita do carregamento do sistema, existirá um ponto de operação factível e seguro para as novas condições. A AEET em sistemas de potência pode ser realizada através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento (curvas PV, QV, e SV). Estas curvas possibilitam a compreensão das condições de operação do sistema para diferentes carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico [1, 2], para avaliação das margens de estabilidade de tensão. Estes perfis são usados para determinar os limites de transferência de potência entre áreas de um sistema, ajustar margens, observar o comportamento das tensões das barras do sistema em análise, e comparar estratégias de planejamento.

Para sistemas com cargas de potência constante, o aumento gradual de carga conduzirá a uma bifurcação do tipo sela-nó que corresponde ao ponto de máximo carregamento (PMC). O PMC define a fronteira entre as regiões de operação estável e instável, sendo sua obtenção importante tanto para o cálculo de margens de estabilidade quanto para a realização da análise modal, que neste ponto, fornecerá as informações para a determinação de medidas efetivas para o reforço do sistema. Entretanto, a matriz Jacobiana (J) torna-se singular neste ponto e o método convencional apresentará dificuldades numéricas, mesmo quando do uso de cálculos com dupla-precisão e algoritmos anti-divergentes. Embora os métodos de FC convencional permitam o cálculo de pontos de operação muito próximos ao PMC, sempre será necessário ponderar se os problemas de não convergência são devidos aos problemas numéricos ou às limitações físicas do sistema. Em geral, as diferenças não são óbvias. Métodos da continuação são ferramentas úteis para se gerar curvas de solução para equações algébricas não lineares em geral, através da variação automática do valor de um parâmetro. Diferentes implementações do método da continuação foram propostos na literatura para se evitar as dificuldades acima e possibilitar o cálculo do PMC nos sistemas de potência. A adição de equações parametrizadas têm-se tornado um procedimento padrão. Entre os muitos métodos descritos na literatura, o mais amplamente utilizado têm quatro elementos básicos: um passo preditor, um passo corretor, um controle de passo, e uma parametrização, necessária para se eliminar a singularidade da matriz Jacobiana no PMC [3]. Em [4] é utilizada uma técnica de previsão pelo vetor tangente associada a um passo corretor considerando a equação do vetor perpendicular ao vetor tangente. Este procedimento possibilita a determinação do PMC sem a necessidade da parametrização, entretanto, exige um bom controle de passo. Em [5] foi proposto o uso de um preditor secante e uma parametrização através do comprimento de arco. Neste trabalho são apresentadas, juntamente com os critérios para a escolha automática dos parâmetros, as novas formas de parametrização para determinação do PMC propostas em [6]. A singularidade de J no PMC é eliminada pela adição de equações baseadas ou nas conhecidas equações de perdas de potência (ativa ou reativa), ou na potência na barra slack (ativa ou reativa), ou na potência reativa das barras PV, ou nas perdas de potência ativa ou reativa das linhas de transmissão. Além da remoção local da singularidade, deve-se enfatizar que as características inerentes do FC convencional são melhoradas e a região de convergência ao redor do PMC é ampliada. A aplicação destas novas metodologias, utilizando tanto o preditor tangente quanto o secante, aos sistemas teste do IEEE (14, 30, 57, e 118 barras) mostraram que as curvas PV completas, e em particular o PMC, podem ser obtidas com a precisão desejada sem quaisquer dificuldades numéricas.

Referências

- [1] Força Tarefa "Colapso de Tensão". Critérios e Metodologias Estabelecidos no âmbito da Força-Tarefa "Colapso de Tensão" do GTAD/SCEL/GCOI para Estudos de Estabilidade de Tensão nos Sistemas Interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros, XV SNPTTE, 1999, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.
- [2] WSCC-Reactive Power Reserve Work Group (RRWG). Final Report, Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology, May 1998.
- [3] V. Ajjarapu and C. Christy, "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 1, February 1992, pp. 416-423.
- [4] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, no. 1, February 1993, pp. 1-8.
- [5] H.D. Chiang, A.J. Flueck, K.S. Shah, and N. Balu, "CPFLOW: A practical tool for tracing power systems steady-state stationary behavior due to load and generation variations", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 2, May 1995, pp. 623-633.
- [6] D. A. Alves, L. C. P. da Silva, C. A. Castro and V. F. da Costa, Continuation Load Flow Method Parameterized by Transmission Line Power Losses, IEEE-PES/CSEE – International Conference on Power System Technology – POWERCON 2000, Perth, Australia, , pp. 763-768.

MODELOS FACTS PARA SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Walmir de Freitas Filho, André L. Morelato França

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

E-mails: walmir@dsee.fee.unicamp.br, morelato@dsee.fee.unicamp.br

Resumo: Dispositivos que empregam eletrônica de potência, denominados genericamente de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), estão sendo cada vez mais utilizados nos sistemas de energia elétrica, seja pela necessidade de maior flexibilidade desses sistemas em virtude da desregulamentação do setor, seja pela diminuição de custos desses equipamentos por causa da produção em maior escala. Entre os diversos dispositivos FACTS destacam-se os que utilizam conversores CC-CA usando GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*), em conseqüência da rápida característica de resposta e do grau de independência das variáveis desses equipamentos em relação às variáveis da rede como tensões nodais e correntes de linha. Uma das áreas que poderá ser mais beneficiada com o emprego de FACTS é a melhoria *on-line* das margens de estabilidade transitória, *i.e.* a capacidade dos geradores permanecerem em sincronismo após a ocorrência de um grande distúrbio na rede. Portanto, para verificar a influência desses equipamentos é necessário utilizar modelos adequados para simulação que encontrem um compromisso entre precisão, facilidade de implementação em programas já existentes e tempo de simulação. Com esses objetivos, neste trabalho, desenvolve-se modelos para representar o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) e o UPFC (*Unified Power Flow Controller*), cuja interface com as variáveis de rede de transmissão CA é efetuada por intermédio de injeções de corrente em barras apropriadas. A dinâmica desses dispositivos é levada em consideração através da equação diferencial de energia. Além disso, nos modelos desenvolvidos optou-se por eliminar a barra fictícia que normalmente é empregada na representação da parte série desses equipamentos, facilitando o *bypass* dos FACTS, seja por uma questão de filosofia de controle, seja pela atuação da proteção contra correntes de linha elevadas, além de preservar a estrutura topológica da rede original.

Influência do Modelo Estocástico no Desempenho da Programação Dinâmica Estocástica no Planejamento da Operação Energética

L. Martinez, S. Soares

Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP

13083-970 Campinas-SP, BRASIL

E-mails: {martinez, dino}@dennis.fee.unicamp.br

Por mais de duas décadas o setor elétrico brasileiro tem adotado a Programação Dinâmica Estocástica (PDE) na solução do problema de planejamento da operação energética. Esta metodologia tem sido considerada pelo setor elétrico como a melhor metodologia no tratamento da estocasticidade do problema de planejamento energético, associada às incertezas da vazão afluente ao sistema. Na PDE, as decisões são feitas sem o conhecimento prévio das afluências futuras, mas em função de sua distribuição de probabilidade.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da representação estocástica das afluências na performance da PDE quando aplicada no planejamento energético de sistemas hidrelétricos. Desta maneira, estratégias de operação foram calculadas considerando três diferentes tipos de representação da estocasticidade das vazões no modelo de PDE:

- (a) Representação estocástica correlacionada de ordem 1 (Modelo Markoviano), onde a estocasticidade das vazões afluentes é considerada através de um modelo estocástico auto-regressivo de ordem 1 (Modelo Markoviano). Neste caso, a informação necessária para se obter a função distribuição de probabilidade da afluência no estágio é a afluência ocorrida no estágio anterior. Portanto esta informação é também uma das variáveis de estado do modelo. A consideração de um modelo estocástico de ordem superior acarretaria a necessidade de se considerar mais variáveis de estado na PDE, o que é inviável computacionalmente. Assim, a aleatoriedade em cada período é representada por uma função distribuição de probabilidade condicional aos dados de afluência do período anterior.
- (b) Representação estocástica não correlacionada, onde a afluência em um dado período não depende da afluência ocorrida no período anterior. Neste caso a estratégia de operação da PDE é obtida substituindo a função distribuição de probabilidade condicionada de (a), por uma função distribuição não condicionada, ajustada aos dados históricos mensais de afluência. Com base em trabalhos de hidrologia e ajuste de série temporais para a previsão de vazão e precipitação, a função distribuição de probabilidade gamma foi considerada neste caso.
- (c) Representação pelo valor esperado, onde a afluência em um dado período é dada pelo valor esperado não condicionado de vazão afluente.

A PDE com as representações (a)-(c) foi aplicada na operação de sistemas constituídos de uma única usina hidrelétrica. Neste caso, como não há necessidade de agregação do sistema hidrelétrico, apenas a questão da representação estocástica é considerada. A avaliação das políticas de operação determinadas é feita através de simulações da operação sob dados históricos de afluência do sistema hidrelétrico brasileiro.

Resultados foram comparados em termos de gerações hidráulicas média, máxima e mínima obtidas no período de simulação. Em termos de geração hidráulica média, a maior variação verificada foi em média de 3% favorável a representação correlacionada, para caso particular da operação isolada da usina hidrelétrica de Furnas, no sistema Sudeste brasileiro.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Marcelo Augusto Cicogna

O sistema hidrotérmico brasileiro possui características que o diferencia dos demais existentes no mundo. As principais características nesta diferenciação são: a grande extensão em área de suas bacias hidrográficas, o regime de vazões plurianual, a grande quantidade de usinas hidrelétricas e a grande participação das fontes hidrelétricas na geração elétrica nacional.

Um sistema com esse porte e importância coloca-nos frente a desafios frequentes. A operação e planejamento do sistema brasileiro estabelecem que um sistema hidrotérmico isolado é influenciado pelos seguintes aspectos: disponibilidade hidrológica do período de estudo, configuração topológica da cascata, o parque térmico de complementação, o mercado a ser atendido e os custos de déficit de energia. Além disso, o ONS justifica sua atuação no setor elétrico afirmando que somente a operação coordenada do sistema obtém o aproveitamento racional dos recursos naturais, sendo que o ganho em relação à operação descentralizada é de 20%.

Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade da simulação de um sistema hidrotérmico isolado. A análise busca identificar o grau de interferência que cada um dos aspectos citados anteriormente têm na solução obtida com a simulação. Estuda-se também a afirmação do ONS sobre o ganho da operação coordenada, buscando-se encontrar validação para esta relevante questão e analisando-se o impacto dos resultados para as empresas atuantes no novo modelo organizacional do setor elétrico.

Em se tratando da simulação de um sistema hidrotérmico, a política operativa a ser utilizada é uma decisão importante. Com intuito de estender a análise feita com os resultados da simulação, escolheu-se três categorias de políticas operativas, sendo uma delas a adotada pelo setor elétrico brasileiro. A simulação foi realizada com os seguintes tipos:

Otimização Determinística (OD): A política OD é obtida por meio de um modelo de otimização determinístico que utiliza fluxo em rede não linear com arcos capacitados [Oliveira e Soares, 1995]. Sendo um otimizador determinístico que pressupõe conhecidas as vazões, a política OD obtém uma estimativa otimista da geração para as vazões consideradas.

Programação Dinâmica Estocástica (PDE): A política PDE representa o sistema de usinas por meio de um modelo equivalente que transforma as variáveis hidráulicas do sistema hidrelétrico em variáveis energéticas. O sistema real de usinas e reservatórios é representado por um único reservatório de energia. Após esta agregação, um modelo estocástico (PAR(1)) é ajustado à série de energias afluentes ao reservatório equivalente. Por fim, utiliza-se um método de programação dinâmica estocástica para obter as decisões ótimas de operação do sistema. Essa política operativa é, em linhas gerais, a adotada pelo setor elétrico brasileiro nas últimas décadas [Silva et al., 1985].

Otimização Determinística com Vazões Previstas (ODVP): A política ODVP é composta pelo modelo de otimização determinístico da política OD alimentado por vazões previstas usando um modelo estocástico PAR(1). Este procedimento de previsão-otimização é repetido a cada intervalo de tempo (mês) durante a simulação para corrigir as decisões hidráulicas em função dos erros cometidos pelo previsor de vazões.

Os estudos de caso utilizaram cascatas passíveis de isolamento do Sistema Sudeste, como por exemplo, a cascata do Rio Paranapanema. Os resultados obtidos afluem conclusões muito importantes para a nova configuração do setor elétrico brasileiro. Ao contrário do que era aceito pelo setor, a análise de sensibilidade mostra que o mercado de energia, o parque térmico complementar e os custos de déficit não têm influência na operação do parque hidrelétrico. Este aspecto indica que um sistema hidrelétrico isolado pode ser operado independentemente do sistema restante, uma vez que a configuração da cascata e a disponibilidade hidrológica são grandezas fixas ou fora do controle do coordenador central, respectivamente.

Conclui-se que, os resultados do presente trabalho têm um profundo impacto nas decisões de planejamento e operação das empresas presentes no novo modelo do setor elétrico. Isto se deve, principalmente, à possibilidade de uma operação descentralizada que mantém o uso racional dos recursos naturais.

Referências Bibliográficas para o resumo

- Silva, L.F.C.A.; Sales, P.R.H.; Araripe Neto, T.; Terry, L.A.; Pereira, M.V.F., *Coordinating the Energy Generation of the Brazilian System*, Interfaces, The Institute of Management Sciences (1985).
- Oliveira, G.G., e Soares, S. A. (1995). *A Second-Order Network Flow Algorithm for Hydrothermal Scheduling* – IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, n.3, pp. 1635–1641.

Algoritmos para a Estimação Dinâmica de Parâmetros da Carga

Lia Toledo Moreira

Alcir José Monticelli

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
DSEE/FEEC/UNICAMP – Brasil

Em sistemas de energia elétrica, a função de estimação de estado, responsável por determinar a melhor aproximação para a tensão complexa nas barras do sistema, desempenha um papel fundamental. Esta importância decorre do fato de os modelos obtidos para a rede de energia serem baseados nos resultados derivados desta função e destes resultados serem, posteriormente, utilizados em outras aplicações responsáveis pelo controle e supervisão da rede elétrica nos centros de controle das concessionárias de energia. Entretanto, esta função sofre uma significativa influência exercida pela estimação de parâmetros da rede. É demonstrado que quando a estimação de parâmetros não é empregada conjuntamente com a estimação de estado, pode-se obter erros significativos no estado estimado. Além disso, quando da utilização da estimação de parâmetros junto com a estimação de estado, imprecisões nos parâmetros estimados podem causar limitações na estimação de estado. Para evitar estes problemas é necessário o desenvolvimento de modelos mais precisos para os componentes do sistema de energia.

É justamente nesta busca por melhores modelos que o conceito deste projeto se insere, uma vez que este trabalho visa a implementação e avaliação da eficiência de métodos acerca da estimação dinâmica de parâmetros de um dos componentes da rede elétrica: a carga. Através desta estimação, será possível também avaliar, mais precisamente, a carga existente em sistemas de energia elétrica supervisionados, utilizando-se, para isto, diferentes modelos de carga.

Os três métodos de estimação, cujos desempenhos são comparados neste trabalho, são baseados na estimação recursiva de mínimos quadrados ponderados e no Filtro de Kalman, que consiste, inicialmente, de um processo de filtragem baseado nas medidas realizadas a partir do sistema de energia elétrica e, posteriormente, de uma etapa de predição através da modelagem da dinâmica do sistema.

O primeiro método, denominado Método do Vetor de Estados Estendido, é baseado na extensão do vetor de estados através da inclusão dos parâmetros que se deseja estimar, no caso os parâmetros de um determinado modelo de carga, neste vetor. O segundo método a ser analisado é baseado na decomposição da estimação de estado/parâmetros em dois subproblemas, o de estimação de estado e o de estimação de parâmetros, sendo denominado Método de Estimação de Estado/Parâmetros Alternada. Finalmente, o terceiro método, denominado Método de Estimação Dinâmica de Estados/Parâmetros, fornece estimativas de um vetor de estados estendido. Além disso, são incluídos valores preditos do vetor de estados como pseudo-medidas adicionais que têm como função auxiliar na filtragem de dados com erros grosseiros que possam surgir durante o processo de estimação de parâmetros. Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP.

ANÁLISE E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO FLUXO DE CARGA ÓTIMO NA MALHA TERCIÁRIA DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE GERAÇÃO

Dilson A. Alves, C. R. Minussi
DEE – CISA – UNESP

G. R. M. da Costa
EESC – USP

A operação automática e econômica do sistema de energia elétrica vem sendo realizada pelo Controle Automático de Geração (CAG), o qual é composto pelo Controle de Carga e Frequência (CCF), e Despacho Econômico (DE). O CCF, que corresponde à malha de controle secundário, tem por objetivo básico manter o equilíbrio dinâmico entre a geração e a demanda, corrigindo os desvios de frequência e de intercâmbio. O CAG também é utilizado como “função executiva”, por intermédio da qual são efetuadas as ações solicitadas pelo DE. O DE, que corresponde à malha de controle terciária, tem como objetivo distribuir economicamente as alterações de geração necessárias ao atendimento da demanda. Desde que não se consideram as restrições impostas pela rede, podem ocorrer sobrecargas nos ramos (linhas de transmissão e transformadores), prejudicando a operação segura do sistema. Para as aplicações “on-line”, a reprogramação da geração visando os aspectos de segurança estão se tornando cada vez mais importantes, e a manipulação eficiente das restrições de rede e equipamentos é a principal característica necessária para atender tal objetivo. Com os recentes avanços alcançados pelos atuais Sistemas de Gerenciamento de Energia (EMS – “Energy Management Systems”), o uso do Fluxo de Carga Ótimo (FCO), tanto para o planejamento quanto para a aplicação em tempo real, passou a ser uma realidade. O seu uso em tempo real possibilita otimizar as operações do sistema tanto em condições normais de operação quanto de emergência. Diversos enfoques têm sido apresentados objetivando a aplicação do FCO na malha terciária do CAG, sendo a maioria das implementações baseada numa combinação do FCO completo e o DE clássico. A substituição por completo do DE por um FCO, que leve em conta tanto os aspectos econômicos quanto os de segurança, vem sendo a meta de diversos estudos.

Neste trabalho procurou-se observar os efeitos dinâmicos da substituição do DE pelo FCO, avaliando-se o que isto acarretaria sobre o CAG. Com este objetivo foi desenvolvido primeiramente um modelo, a partir do apresentado nas referências [1,2,3] e denominado por modelo de sensibilidade de potência (MSP), que permitisse a simulação dinâmica distribuída do CCF levando em conta os efeitos, até então não considerado, das perdas de potência ativa das linhas de transmissão as quais, por sua vez, compõem a função objetivo do FCO. Em seguida implementou-se o FCO apresentado na referência [4], e usado aqui para o cálculo dos fatores de participação (fp's). Estes fp's, que levam em conta o efeito de minimização de perdas de potência ativa na transmissão e das restrições impostas pela rede (tais como os limites nas magnitudes de tensão das barras de carga e nos fluxos de potências ativa e reativa das linhas de transmissão), são fornecidos ao CCF.

Os resultados com as respectivas análises foram subdivididos em duas partes. Na primeira, estão os resultados e as análises efetuadas considerando o novo modelo MSP, sem a atuação da malha terciária. Os objetivos foram o de avaliar o seu desempenho em regime permanente através da comparação do estado final do processo dinâmico com o obtido por um Fluxo de Carga (FC), e o de mostrar suas características e diferenças com relação ao anterior, face à representação das perdas de potência ativa das linhas de transmissão. Na segunda, encontram-se as análises referentes à inclusão da malha terciária, na qual se considera o FCO, ao invés do DE, para se obter os novos pontos base e fp's. Também analisou-se o problema apresentado pelo fluxo de circulação durante a transferência de potência entre dois pontos da rede. A circulação de fluxo de potência por outras áreas obriga-as a aumentarem (ou diminuïrem) as suas gerações para suprir as perdas. O aumento (ou diminuição) da geração será comandado pelo controle TLB (“Tie – Line load Bias frequency control”), que enxergará uma diferença negativa (ou positiva) entre o montante de fluxo que entra e o que sai da área. Utilizou-se dois sistemas para a simulação, sendo que um, constituído por dois geradores e duas cargas interligados por uma linha de transmissão, foi usado basicamente para ajustar o passo de integração quanto à sua influência nos valores de regime. O outro sistema (WSCC “Western System Coordinating Council”), é constituído por 3 geradores, 3 transformadores, 9 barras e 9 linhas, e foi concebido especialmente para testes de programas de estabilidade [5]. Os parâmetros dos geradores, bem como das malhas de controle de frequência (primária) e de tensão (sistema de excitação IEEE tipo 1), foram obtidos da referência [5].

Referência Bibliográfica

- [1] D. A. Alves, S. M. Deckmann, V. F. da Costa, A. V. Vinhas, “Estudo sobre Controle Automático de Geração Utilizando Modelo Dinâmico com Parâmetros Distribuídos”, VIII SNPTE; São Paulo, 1986, Grupo X- Operação de Sistemas Elétricos (GOP); e XI COPIMERA, Montreal, November 1987.
- [2] A. V. Vinhas, D. A. Alves, S. M. Deckmann, V. F. da Costa, “Numerical Results with Dynamic Simulation of Interconnected Power Systems”, IFAC – Power Systems and Power Plant Control, pp. 590-596, Beijing, August 12-15, 1986.
- [3] S. M. Deckmann e V. F. da Costa, “A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 9, no. 2, 1994, pp. 965 – 971.
- [4] G. R. M. da Costa, K. Langona e D. A. Alves, “A New Approach to the Solution of the Optimal Power Flow Problem Based on the Modified Newton's Method Associated to an Augmented Lagrangian Function”, Proceedings of the International Conference on Power System Technology, Beijing, China, August 18 – 21, 1998, pp. 909.
- [5] P. M. Anderson, A. A. Fouad, “Power System Control and Stability”, IEEE Press, 1994.

Cálculo de Curto-Circuito Probabilístico Utilizando Cluster de Microcomputadores

Eduardo N. Asada, Fujio Sato, Alcir J. Monticelli e Ariovaldo V. Garcia
{asada,sato,alcir,ari}@dsee.fee.unicamp.br

DSEE/FEEC/UNICAMP

Simulações de curto-circuito probabilístico, utilizando o método de Monte Carlo, envolvem milhares de testes computacionais em uma determinada região de interesse do sistema elétrico. O objetivo básico é a obtenção das funções densidade de probabilidade das correntes de curtos-circuitos para posterior análise de risco.

A análise dos casos de curto-circuito pode ser realizada de forma independente, e este fato representa uma característica atraente para o emprego da programação paralela. Com o objetivo de testar a eficiência da programação paralela sobre a convencional, foram realizados testes sobre ambientes e plataformas de computação diferentes. Entre os objetivos, encontra-se também a comparação de performance de estações SUN, com sistema operacional Solaris e um sistema de computadores pessoais dedicados (*Cluster Beowulf*) para a execução de programas paralelos em um ambiente que simula um computador paralelo que utiliza o sistema Gnu/Linux. Este tipo de abordagem é particularmente interessante do ponto de vista econômico e de desempenho, propiciando uma estrutura de análise com a relação custo/benefício extremamente atraente para um ambiente de pesquisa.

Com relação ao paradigma de programação paralela ou concorrente, foram utilizados dois modelos de programação: o *SPMD* (*Single Process Multiple Data*) e o *Mestre/Escravo*.

Testes foram efetuados com vários sistemas elétricos, destacando-se dentre eles um sistema da região sudeste brasileira com 1176 barras, 2250 ramos e 37 ramos com acoplamentos mútuos. O sistema de computadores testado (*cluster*) é composto de 8 máquinas (PCs) interligadas por um *switch* com portas com taxa de envio de 100Mbits/s.

ALGORITMOS GENÉTICOS PARALELOS APLICADOS AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

De Oliveira, S.A., Romero, R.A.

Gallego, R.A.

Monticelli, A.

grilo@dsee.fee.unicamp.br

O planejamento da expansão de redes de transmissão de sistemas de energia elétrica determina *quando*, *onde* e *que* tipos de linhas e/ou transformadores devem ser instalados na rede a fim de que o sistema opere adequadamente para uma demanda futura predeterminada e realizando o menor investimento possível. O planejamento dinâmico (*quando*) em geral é decomposto em subproblemas estáticos que tratam das questões *onde* e *que tipo* (planejamento em um estágio, de um ano inicial a um ano final, dados). Este trabalho trata especificamente da fase estática do planejamento da transmissão.

Quando a rede de transmissão é modelada pelo fluxo de carga DC, o problema de planejamento estático é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Dadas as dimensões que o problema assume para casos práticos em geral observa-se o fenômeno da explosão combinatória (problema *NP-completo*). Para uma alternativa de investimento conhecida, o problema se reduz a um problema de programação linear cujo objetivo é verificar a factibilidade da mesma.

Atualmente, este tipo de problema é resolvido pelos chamados métodos combinatórios, cujas características fundamentais são as de serem aplicáveis a sistemas de grande porte, chegar a soluções ótimas globais ou próximas destas e obter soluções em razoáveis tempos de processamento. Dentre esses métodos destaca-se os *Algoritmos Genéticos* (“Genetic Algorithm” - **GA**), técnica de busca baseada nos mecanismo da seleção natural e na genética, onde indivíduos melhor dotados têm maior chance de sobrevivência e capacidade de adaptação às alterações do meio ambiente.

Por outro lado, devido aos avanços tecnológicos dos últimos anos, as concessionárias de energia possuem em seu parque computacional um grande número de estações de trabalho que, com o auxílio de uma biblioteca de domínio público para processamento paralelo e distribuído, podem ser utilizadas como uma máquina paralela virtual.

Neste contexto, o trabalho propõe versões paralelas de **GA** para a resolução do problema do planejamento da expansão da transmissão. São apresentados resultados dos algoritmos propostos para os sistemas: Garver (6 barras/15 linhas), Sul brasileiro (46 barras/79 linhas) e Norte-Nordeste brasileiro (89 barras/179 linhas). Os testes foram realizados em uma rede heterogênea de estações SUN, sistema operacional Solaris 2.5.1, utilizando-se a biblioteca PVM 3.3.5.

MÉTODO EFICIENTE DE CÁLCULO DA MARGEM DE SEGURANÇA AO COLAPSO DE TENSÃO

Luis Alberto Llacua Zarate , Carlos Alberto de Castro Junior

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

E-mail : luis@dsee.fee.unicamp.br , ccastro@dsee.fee.unicamp.br

Este trabalho apresenta uma abordagem que tem como objetivo obter um método simples, eficiente, robusto e confiável para a obtenção das condições de máximo carregamento em problemas de fluxo de carga.

Margem de segurança e a distância existente entre o ponto de operação considerado e o ponto de colapso de tensão, esta distância é dada em termos físicos como aumento de potência consumida ou admitâncias de cargas, etc.

Assim o presente projeto, está relacionado com o desenvolvimento de métodos de obtenção de margens de segurança ao colapso de tensão utilizando abordagens estáticas, ou seja, o sistema é modelado por equações algébricas não lineares.

Existem vários métodos baseados em princípios diversos, assim o método de cálculo de margem de estabilidade de tensão usando análise de sensibilidade propõe determinar o quanto se pode aumentar a carga do sistema até o ponto de instabilidade de tensão, dada uma direção de incremento de potências demandadas. Tognete A. [1] propôs um método eficiente do ponto de vista computacional que utiliza este enfoque, calcula margem de estabilidade de tensão de barras, fazendo acréscimos sucessivos de cargas até a situação em que o sistema não encontra um ponto de operação. Fluxo de carga Newton com otimização passo a passo e considerado no caso em que o sistema está próximo ao colapso de tensão.

Galiana e Zeng [2], apresentaram um método simples e eficiente que visa a obtenção das condições de máximo carregamento. Fornece um modelo matemático que descreve o comportamento das tensões da rede num ponto de operação próximo a singularidade da matriz jacobiana. O método baseia-se na solução de um certo número de problemas de fluxo de carga para diferentes cargas incrementadas em uma direção predeterminada. Das soluções dos fluxos de carga são extraídas informações e através de cálculos simples que demandam um tempo computacional muito menor que os cálculos de fluxo de carga chega-se a obter o estado da rede no ponto crítico e ao máximo carregamento possível.

O plano de trabalho propõe-se incorporar o método de Galiana ao de A.Tognete, buscando obter uma significativa melhoria no cálculo de margens proposto em [1], desenvolver assim uma ferramenta que reduzindo tempo e esforço computacional possa ser utilizada em aplicações de tempo real.

No conjunto de tarefas previstas pretende-se efetuar avaliações do método Galiana em redes de grande porte para verificar a eficiência, e efetuar um estudo da influência quanto a distância entre os pontos de cálculo dos fluxos de carga e o ponto crítico nos resultados finais. Adicionalmente, discutir a influência que possa ter sobre o método considerar os limites de geração de potência reativa dos geradores ou a atuação dos transformadores com ajuste automático de tap.

Foram realizados os seguintes passos:

- 1.- Estudo do método proposto por Galiana.
- 2.- Simulações em Matlab do método.
- 3.- Programa implementado em Fortran.
- 4.- Teste em redes elétricas reais.

Após estes passos evidencia-se dificuldades na obtenção da estimativa do ponto crítico, isto pela característica da função envolvida no cálculo do parâmetro estimador λ . Está sendo analisada a utilização do multiplicador ótimo como uma possível solução, além de outras alternativas.

[1] Tognete A. Um novo método de cálculo de margem de segurança ao colapso de tensão utilizando análise de sensibilidade. Tese de Mestrado Universidade Estadual de Campinas

[2] Galiana, Zeng, Yorino. A simplified approach to estimate maximum loading conditions, IEEE Transactions on Power System, vol.8, n2, 1993

Pré-Despacho de Sistemas de Energia Elétrica Através de Métodos de Pontos Interiores

Aurelio Ribeiro Leite de Oliveira, Secundino Soares Filho
aurelio@densis.fee.unicamp.br, dino@densis.fee.unicamp.br

Resumo

Os métodos de pontos interiores primal-dual e preditor-corretor são aplicados a um modelo de fluxos em redes na minimização das perdas de geração e transmissão do problema de pré-despacho DC e a estrutura matricial resultante é explorada.

Na formulação do sistema de transmissão por modelos de fluxo em redes os fluxos de potência são representados explicitamente, permitindo a consideração direta dos limites de transmissão como restrições e também das perdas de transmissão como critério de desempenho.

Os métodos de pontos interiores, por sua vez, têm sido utilizado com sucesso em vários problemas envolvendo os sistemas de potência e tem se mostrado bastante robustos e eficientes especialmente para aplicações de grande porte.

A abordagem utilizada combina as vantagens da formulação do modelo DC por fluxo em redes com a eficiência e robustez dos métodos de pontos interiores permitindo explorar em profundidade a estrutura matricial particular do problema.

A estrutura matricial resultante da aplicação dos métodos de pontos interiores a este modelo leva a uma iteração bastante rápida pois é possível reduzir a dimensão dos sistemas lineares a serem resolvidos, ao número de barras ou ao número de laços, independente da quantidade de intervalos de tempo adotada. Além disto, a matriz destes sistemas é invariante ao longo das iterações podendo ser decomposta a priori. Para cada intervalo de tempo devem ser resolvidos dois sistemas lineares, com a dimensão do número de geradores. Uma heurística eficiente foi desenvolvida para obter uma matriz de reatância esparsa. Esta matriz também é calculada a priori.

Resultados numéricos, para sistemas testes do IEEE e sistemas brasileiros de grande porte, em um horizonte de planejamento de 24 horas, são apresentados. O método de pontos interiores se mostra robusto convergindo rapidamente para todos os casos testados. Uma generalização do modelo incluindo a geração termoe elétrica também é discutida.

Um Simulador do Controle em Tempo Real de Sistemas de Energia Elétrica

Kawakami, R.M.

Garcia, A.V.

regina@dsee.fee.unicamp.br

ari@dsee.fee.unicamp.br

A complexidade do controle em tempo real de sistemas de potência é tão grande que muitas ferramentas devem estar disponíveis de modo a ajudar no treinamento de operadores de sistemas de gerenciamento elétrico e também no ensino de estudantes de engenharia. Sistemas de treinamento baseados em computador têm exercido um papel importante ao fornecer aos usuários um melhor entendimento da operação do sistema de potência. Como resultado dos rápidos avanços em *hardware* e *software*, as ferramentas educacionais de sistemas de potência baseadas em computador passaram de implementações muito simples, fornecendo ao usuário pouco mais que uma série de saídas numéricas até representações muito detalhadas do sistema de potência em uma complexa interface gráfica com o usuário (GUI). Exemplos de tais programas incluem simuladores para treinamento de despachantes (DTS) para instrução do operador. O presente trabalho tem por objetivo apresentar um simulador do controle em tempo real de sistemas de energia elétrica com funções avançadas de análise de rede em tempo real para treinamento e análise, com interface gráfica ao usuário baseada em Tcl/Tk (Tool Command Language/ Tool Kit). Os usuários podem interagir dinamicamente com o sistema em estudo através do diagrama unifilar, alterando as medidas do sistema (MW, MVar e kV) e também mudando os taps de transformadores e os estados dos dispositivos seccionadores (chaves e disjuntores).

O simulador proposto apresenta duas partes distintas: uma que apresenta a interface gráfica, desenvolvida com a linguagem Tcl/Tk e outra que engloba as funções avançadas (aplicativos) de análise de rede com os programas desenvolvidos na linguagem Fortran. A interação entre as partes é feita através de arquivos de dados que são compartilhados e atualizados frequentemente. O desenvolvimento do programa principal do simulador de treinamento para sistemas de potência, foi realizado com o auxílio da linguagem Tcl/Tk, no ambiente Unix das estações de trabalho Ultra 1, da Sun Microsystems, existentes nos laboratórios do DSEE. As funções avançadas de análise de rede que foram incorporadas ao simulador foram: configurador de topologia de rede e estimador de estado.

O usuário tem a seu dispor no simulador desenvolvido as seguintes opções de simulação: Módulo Estudo e Módulo Execução Automática. A principal característica do módulo estudo é o de possibilitar ao usuário efetuar diversos tipos de acionamentos no sistema. Neste módulo, o usuário tem a possibilidade de se exercitar no que diz respeito ao item modificações na configuração topológica do sistema. Já no módulo execução automática, a idéia básica foi a de apresentar ao usuário a simulação automatizada, ou seja, a verificação de como o sistema reagiria com as injeções de potência seguindo as curvas de carga, com o instante de tempo t de simulação variando de uma maneira pré-definida.

Título : Índice de Proximidade ao Colapso de Tensão Baseado no Fluxo de Potência Ativa no Ramo : Verificação da sua Utilização como Meio de Seleção de Contingências em Tempo Real

Autor : Mário de Almeida e Albuquerque – marioaa@dsee.fee.unicamp.br

Orientador : Professor Doutor Carlos Alberto de Castro Junior

Resumo :

Cada vez mais torna-se imprescindível efetuar a análise da possibilidade da ocorrência do colapso de tensão num Sistema Elétrico pelas equipes de tempo real dos Centros de Operação das Empresas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Este é um processo que requer um grande esforço computacional, podendo ser inviável a sua implementação como ferramenta de análise nas salas de controle dessas empresas.

Para contornar este problema de implementação, estão sendo pesquisados métodos para se determinar índices de proximidade ao colapso de tensão para o ponto em que o Sistema Elétrico está operando. Este pode ser usado como um indicativo dessa proximidade ou como um meio selecionar contingências de uma lista de possibilidades para que seja idealizado pelas equipes uma estratégia de atuação caso a mesma ocorra.

Portanto, o objetivo do trabalho é mostrar como está sendo avaliado a adequacidade desse índice para verificar a proximidade ao colapso de tensão como também a sua aplicabilidade na seleção de contingências em tempo real.

Visualização do Estado de Sistemas de Energia Elétrica Utilizando Interfaces Gráficas de Usuário

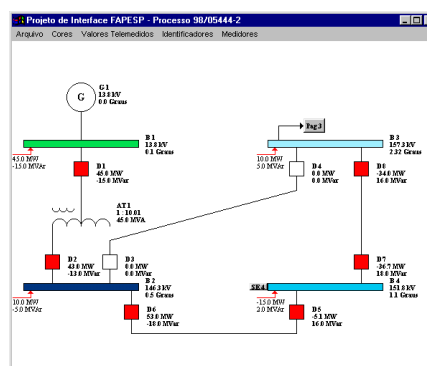
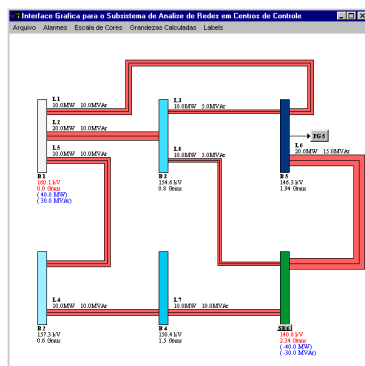
Alexandre de Assis Mota

Alcir José Monticelli

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
DSEE/FEEC/UNICAMP – Brasil

Existe uma crescente necessidade de modernização dos centros de controle das concessionárias de energia elétrica, visando a melhoria da qualidade de seus serviços. Esta modernização, que abrange o aumento da capacidade de análise em tempo real do centro de controle, torna-se viável através da inclusão das funções de análise de rede, de um ambiente computacional adequado e de interfaces gráficas, que proporcionem ao operador do sistema uma idéia mais geral, precisa e imediata do atual estado da rede de energia. Este trabalho trata da implementação destas interfaces gráficas para a visualização do estado da rede elétrica, para a utilização em ambientes de supervisão e controle. Estas interfaces contam com recursos de visualização avançados, tais como escalas de cores, animações, representações tridimensionais e efeitos de zoom.

A linguagem computacional escolhida para a implementação do software foi a linguagem *Java*, que permite a utilização de qualquer plataforma computacional, depois da compilação de seus programas. Além disso, esta linguagem apresenta outras características que levaram à sua escolha, tais como sua robustez (imunidade a erros), seu dinamismo (facilidade de adaptação a ambientes que evoluem com frequência), sua simplicidade (é uma linguagem semelhante a C e C++) e a possibilidade de seus programas terem, simultaneamente, mais de uma linha de execução. Esta última vantagem possibilita ao usuário de um algoritmo escrito em *Java* reutilizar o programa enquanto este continua o seu fluxo normal de execução anterior. O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, da UNICAMP. Nesta abordagem foi utilizada uma plataforma computacional em microcomputadores do tipo PC, com os sistemas operacionais Windows e LINUX. Esta escolha está ligada diretamente ao custo destes equipamentos, relativamente baixo quando comparado ao custo de máquinas de grande porte e estações de trabalho. Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP.



Representações unifilares estáticas do ponto de vista barras/ramos e chaves-disjuntores/secção de barras

UM SISTEMA GERENCIADOR DE DADOS PARA O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Marcelo Augusto Cicogna

O grande porte do sistema brasileiro de energia elétrica tem como característica persistente a imposição de desafios aos seus engenheiros e pesquisadores. Dentre eles, o armazenamento e gerenciamento dos dados envolvidos nas etapas de planejamento e operação do sistema ganharam grande importância após a reestruturação do setor elétrico. Este trabalho apresenta um novo sistema computacional para o gerenciamento dos dados necessários ao planejamento energético da operação de sistemas hidrotérmicos.

A etapa de planejamento energético conta com um programa gerenciador de dados chamado SIPOT (Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro). O sistema desenvolvido neste trabalho – *WinHydro* – pretende fornecer aos engenheiros do setor elétrico brasileiro uma evolução computacional do SIPOT. Para construir um programa que realmente atingisse esse objetivo, a estrutura interna dos dados foi reformulada, seguindo técnicas avançadas de projeto de banco de dados, a interface gráfica foi totalmente reavaliada e adequada aos modernos recursos gráficos do sistema operacional *Windows* e o sistema computacional inovou com novas ferramentas de cálculo, usualmente requisitadas por engenheiros das empresas geradoras.

O programa *WinHydro* tem sido desenvolvido segundo sugestões dos engenheiros de planejamento e operação da empresa concessionária da cascata do Rio Paranapanema. Por isso, afirma-se a sintonia entre as características técnicas do programa e as necessidades reais de uma empresa atuante no setor elétrico. Abaixo, faz-se uma breve descrição das principais características deste novo sistema:

- O sistema gerenciador de banco de dados (*Interbase*) encontrado internamente no programa é considerado parte integrante da família de sistemas DBMS (*Database Manager System*) líderes do mercado. O sistema tem performance *multitarefa* e *multiusuário*, o que vem atender às necessidades das empresas do setor, considerando o trabalho integrado de suas equipes de planejamento e operação.
- A interface gráfica entre o gerenciador de dados descrito acima e o usuário traz inovações com relação ao método de busca e a visualização dos dados das usinas. Utilizando recursos gráficos avançados do sistema operacional *Windows*, o programa apresenta as usinas na forma de uma árvore. Com apenas um clique do mouse, o usuário pode visualizar um grupo particular de usinas, conforme sua vontade. Este novo arranjo gráfico das usinas elimina uma característica desagradável de outros sistemas na qual o usuário era forçado a lembrar-se de nomes, codinomes e o código das usinas pelas quais procurava. O programa permite agrupar as usinas em cinco categorias principais: Código, Nome, Rio, Empresa ou algum outro critério fornecido pelo usuário. Esta última categoria propicia ao usuário a criação de uma seleção particular de usinas. Isto pode ser feito através de restrições ao conjunto de dados. O programa, utilizado-se de componentes amigáveis, permite transcrever questões para serem pesquisadas no banco de dados. Por exemplo, estas questões vão desde "Quais são as usinas brasileiras com potência instalada acima de 1000 MW?" até questões como "Quais usinas do sistema Sudeste possuem representação detalhada de sua curva Potência máxima x Altura de Queda Líquida?".
- O programa traz uma evolução na visualização dos dados de uma usina hidrelétrica. Os dados são organizados sob as categorias: Identificação, Reservatório, Vertedouro, Casa de Máquinas / Canal de Fuga e Histórico de Vazões Naturais. Todas as categorias estão disponíveis na janela principal do programa, ao lado da árvore dos grupos de usinas. Com essa nova organização, o usuário tem em mãos uma ferramenta intuitiva, confiável e eficiente para as tarefas de busca e visualização de dados.
- O sistema possui recursos gráficos avançados, como por exemplo, a visualização de gráficos em três dimensões da curva de produção hidráulica (função do volume e da vazão turbinada) e da curva de rendimento da turbina (Curva Colina). Outra característica importante é a criação de relatórios gráficos e tabulares que facilmente são exportados para outros programas, como planilhas eletrônicas e editores de texto.

Além da nova estrutura de apresentação dos dados, o sistema computacional fornece uma inovação com relação ao que se pode obter dos dados. Muitas vezes, a simples pesquisa e visualização dos dados não são suficientemente úteis nas tarefas corriqueiras de uma empresa. Dessa forma, o programa *WinHydro* possui um conjunto de ferramentas que, agrupadas, formam uma calculadora especializada em cálculos envolvendo dados de usinas hidrelétricas. Através de recursos gráficos, essa calculadora pode realizar tarefas simples como a determinação do nível do reservatório para um dado valor de volume, até procedimentos mais complexos, como o cálculo de energia armazenada em uma cascata de usinas.

Referências Bibliográficas para o resumo

Eletrobrás; *SIPOT – Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – Manual do Usuário*. 1999
Elmasri, R. e Navathe, S.B. *Fundamentals of Database Systems*, Third Edition – Addison Wesley, 2000.

CONTROLE VETORIAL DE GERADORES SÍNCRONOS PARA MELHOR A ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO FACTS

Walmir de Freitas Filho, André L. Morelato França

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica

E-mails: walmir@dsee.fee.unicamp.br, morelato@dsee.fee.unicamp.br

Resumo: Neste trabalho investiga-se uma nova metodologia de controle para melhorar a estabilidade angular de sistemas de energia elétrica, cuja idéia principal fundamenta-se em aplicar a teoria de controle vetorial de máquinas de corrente alternada para atuar diretamente no torque dos geradores síncronos, após a ocorrência de um grande distúrbio na rede – estabilidade transitória. Controle vetorial de máquinas de corrente alternada visa desacoplar as produções de torque e de fluxo eletromagnéticos através de ações de controle nas fases e nas magnitudes das correntes e/ou das tensões da máquina, por isso o nome vetorial. A característica de resposta rápida e precisa são as principais vantagens dessa técnica. Para modular a corrente do estator do gerador síncrono optou-se por utilizar dispositivos FACTS que empregam conversores estáticos CC-CA. Os dispositivos estudados são: o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) e o UPFC (*Unified Power Flow Controller*). O algoritmo de controle para determinar o torque eletromagnético que o gerador deve seguir inspira-se no critério de igualdade de áreas. Apresentam-se os resultados de implementação do controle proposto em um sistema multimáquinas para verificar a sua viabilidade e eficácia.

Implementação de Centro de Controle de Energia Elétrica Utilizando Rede UNIX de Baixo Custo

Lia Toledo Moreira Alexandre de Assis Mota, Eduardo N. Asada, Alcir J. Monticelli
{lia,assis,asada,alcir}@dsee.fee.unicamp.br

DSEE/FEEC/UNICAMP

A principal motivação deste projeto é implementar um centro de controle simulado para estudos e desenvolvimento de aplicações relacionadas ao processamento de funções de análise de rede, aquisição e processamento de dados telemedidos, interfaces homem-máquina e estudos relacionados à pesquisa de novas técnicas de processamento paralelo e distribuído em sistemas de energia elétrica, utilizando uma rede de microcomputadores tipo PC.

O desenvolvimento em centros de controle de energia das funções de análise de rede e de outras aplicações associadas ao estudo do sistema, tais como o planejamento da expansão, podem ser facilitados dispondo-se de um ambiente no qual seja possível simular a operação em tempo real de um centro de controle, favorecendo, então, o desenvolvimento de pesquisas na área. Entretanto, a criação desse ambiente deve atender as limitações de recursos disponíveis nos dias atuais. Em geral, grandes empresas de energia dispõem de estruturas computacionais avançadas e caras, geralmente baseadas em estações de trabalho que utilizam o sistema operacional UNIX, ou de sistemas de desenvolvimento próprio. Enfim, de ferramentas de difícil acesso para laboratórios de pesquisa de pequenas instituições e indústrias.

Visando abordar justamente a questão da criação de um ambiente computacional de baixo custo e de alto desempenho, surge a possibilidade da implementação de uma rede de computadores pessoais que possui grande estabilidade e desempenho baseado em um sistema operacional de livre acesso: o GNU-LINUX. É possível o desenvolvimento, sobre essa plataforma, de aplicativos computacionais de alto desempenho, inclusive, da montagem de super-computadores de baixo custo através da aglomeração de várias unidades de processamento (*clustering*).

Na etapa inicial de implementação do projeto, estão sendo realizadas as seguintes atividades:

- Construção de um banco de dados contendo informações acerca dos parâmetros de redes elétricas comumente utilizadas na área (como os sistemas do IEEE) e dados de redes reais, através de informações obtidas da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz).
- Implantação e estudo de rotinas computacionais de fluxo de carga, estimação de estado, análise de chaveamentos, modelagem da carga, previsão da carga e interfaceamento gráfico.
- Implantação de um computador de arquitetura paralela da classe BEOWULF, utilizando oito CPUs de microcomputadores Pentium de 233 MHz interconectados entre si.

Para o desenvolvimento do projeto foi empregado um sistema operacional UNIX de domínio público, o GNU-LINUX. Este trabalho conta com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, através de suas linhas de auxílio à pesquisa.

Avaliação do Impacto dos Geradores na Capacidade de Transferência de Potência de Sistemas de Energia Elétrica via Fatores de Participação Modal

Luiz C.P. da Silva e Vivaldo F. da Costa

DSCE/FEEC/UNICAMP; C.P. 6101

CEP 13081-970; Campinas, SP - Brasil

Wilsun Xu

Department of Electrical and Computer Engineering

University of Alberta, T6G 2G7, Edmonton, Alberta, Canada

Com a reestruturação dos sistemas de energia elétrica, todos os geradores podem, a princípio, injetar potência ativa na rede de transmissão em um processo não discriminatório [1]. Devido às diferenças em localização, capacidade de geração, e outros fatores, no entanto, alguns geradores precisam de mais suporte de potência reativa do que outros para que possam transmitir suas gerações de potência ativa através do sistema. Cada gerador, portanto, requer uma quantidade diferente de suporte de reativos. Sob este aspecto, torna-se muito importante o desenvolvimento de um índice quantitativo, capaz de medir as necessidades de serviços de reativos dos vários geradores. Aplicações potenciais para tal índice incluem: a) um esquema de compensação financeira justo para os geradores que são, efetivamente, fornecedores de serviços de suporte de reativos e b) um sinal de mercado adequado para a definição de um redespacho de geração ativa, visando o aumento das margens de segurança do sistema. Neste artigo, mostra-se que o fator de participação modal para os geradores, proposto em [2], é adequado para a solução deste problema.

A introdução de competição na geração de energia elétrica vem tornando-se uma realidade devido à reestruturação do mercado de eletricidade [3,4]. Uma das estruturas de mercado emergentes é o esquema de transações de potência em formato de *pool*¹, onde os vários produtores de eletricidade injetam a sua geração de potência ativa na rede de transmissão através de um processo de espera (*bidding process*: todos os potenciais vendedores e compradores de energia esperam em uma fila até que o operador independente do sistema libere uma lista de autorizações) [5]. Cabe ao operador do sistema a contratação de uma série de serviços de suporte para facilitar a transmissão da potência ativa injetada na rede pelos geradores.

É fato em engenharia de potência que a transmissão de potência ativa necessita de suporte de potência reativa [6]. Suporte de reativos vem, portanto, tornando-se um tipo de serviço fundamental para a operação do sistema de energia elétrica em ambiente competitivo [7]. Evidentemente, há um custo envolvido na contratação dos serviços de suporte realizadas pelo operador do sistema, custo este que deve ser de alguma forma repassado para os vendedores e compradores de energia envolvidos no processo [8-10]. A partir de uma perspectiva de segurança do sistema, o serviço de suporte de reativos mais importante é o fornecido pelas fontes dinâmicas ou variáveis de potência reativa, tais como compensadores síncronos e geradores. Uma vez que os geradores também requerem suporte de potência reativa para injetar sua produção de potência ativa na rede de transmissão, torna-se inteiramente possível que alguns geradores, na verdade, consumam mais potência reativa do que produzem. Isto mostra, portanto, a importância de um índice quantitativo que possa medir as necessidades de suporte de reativos dos vários geradores. Baseado neste índice, compensação (ou penalidade) financeira pode ser atribuída a cada gerador, pelo operador do sistema.

Neste trabalho, utiliza-se um fator de participação modal dos geradores para abordar este problema [2]. Este índice é desenvolvido a partir da técnica de análise modal convencional para avaliação da estabilidade de tensão [11]. Expandindo-se a técnica de análise modal para incluir a parte de potência ativa da matriz Jacobiana do fluxo de carga, estabelece-se um método sistemático para quantificar as necessidades de suporte de reativos dos diferentes geradores. Baseado neste índice pode-se efetuar um redespacho dos geradores com o propósito de aumentar a capacidade de transferência de potência do sistema. O índice modal pode também ser usado para medir a eficiência da saída de reativos de cada gerador em termos de suporte efetivo fornecido ao sistema. Neste trabalho, um sistema de 5 barras é usado para a demonstração de conceitos e aplicações decorrentes dos fatores de participação dos geradores. Estudos adicionais são realizados usando-se um sistema real de grande porte. Análises de sensibilidade da margem de estabilidade são conduzidas para a confirmação da validade do índice proposto.

Referências

- [1] Ilic, M., Galiana, F., Fink, L., "Power Systems Restructuring: Engineering and Economics", (Kluwer Academic Publishers, 1998).
- [2] L.C.P. da Silva, V. F. da Costa and W. Xu, "Preliminary Results on Improving the Modal Analysis Technique for Voltage Stability Assessment", Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Seattle, USA, July, 2000.
- [3] Hunt, S., and Shuttleworth, G.: 'Unlocking the grid', *IEEE Spectrum*, 1996, 33 (7), 20-25.
- [4] Schweppe, F.C., Caramanis, M.C., Tabors, R.D., and Bohn, R.E.: 'Spot Pricing of Electricity', (Kluwer Academic Publishers, 1988).
- [5] Power System Operations Committee, Panel session: 'Transmission Security Issues in a Deregulated Environment', *IEEE PES Winter Meeting*, 1997, New York.
- [6] Kundur, P.: 'Power System Stability and Control', (McGraw-Hill, 1994).
- [7] Xu, W., Zhang, Y., da Silva, L.C.P., and Kundur, P., 2000, 'Competitive Procurement of Dynamic Reactive Power Support Service for Transmission Access', Proceedings of the IEEE-PES'2000 Summer Meeting, Seattle, USA.
- [8] Li, Y.Z., and David, A.K.: 'Pricing reactive power conveyance', *IEE-Proceedings, Part-C: Generation, Transmission and Distribution*, 1993, **140** (3), 174-180.
- [9] Hao, S., and Papalexopoulos, A.: 'Reactive power pricing and management', *IEEE Trans. on Power Systems*, 1997, **12** (1), 95-104.
- [10] Kaye, R.J., Wu, F.F., and Varaya, P.: 'Pricing for system security', *IEEE Trans. on Power Systems*, 1995, **10** (2), 575-583.
- [11] Gao, B., Morison, G.K., and Kundur, P.: 'Voltage stability evaluation using modal analysis', *IEEE Trans. on Power Systems*, 1992, **7** (4), 1529-1542.

¹ *pool*: Uma combinação de negócios proximoamente interrelacionados para viabilizar o lucro comum, ou um acordo entre empresas competidoras para o estabelecimento de certos controles em prol do lucro de todas.

METAHEURÍSTICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO EM AMBIENTE DE PROCESSAMENTO DISTRIBUÍDO

De Oliveira, S.A., Romero, R.A.

Gallego, R.A.

Monticelli, A.

grilo@dsee.fee.unicamp.br

O problema de planejamento da expansão da transmissão dos sistemas de energia elétrica determina *quando*, *onde* e *que tipos* de linhas e/ou transformadores devem ser instalados na rede a fim de que o sistema opere adequadamente para uma demanda futura predeterminada, com o menor investimento possível. O planejamento dinâmico (*quando*) em geral é decomposto em subproblemas estáticos que tratam das questões *onde* e *que tipo* (planejamento em um estágio, de um ano inicial a um ano final, dados). Quando o sistema elétrico é modelado pelo fluxo de carga DC, o planejamento estático é um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM), e dadas as dimensões que o problema assume para os casos práticos em geral observa-se o fenômeno da explosão combinatória (problema NP-completo, de difícil tratamento). Sendo que, para uma alternativa de investimento (uma dada configuração), o problema se reduz a um problema de programação linear cujo objetivo é verificar a factibilidade desta alternativa.

Nas décadas passadas, quando os recursos computacionais eram mais limitados, foram desenvolvidos métodos construtivos para a resolução do problema, como por exemplo os métodos de Garver, Mínimo Esforço e Mínimo Corte de Carga. Posteriormente, foram desenvolvidas metodologias baseadas na decomposição de Benders (os chamados métodos clássicos), a qual explora a decomposição natural do problema em dois subproblemas: de investimento e de operação. Mais recentemente, para resolver aqueles problemas de grande porte não resolvidos pelas metodologias anteriores, apareceram os chamados métodos combinatórios cuja características fundamentais são as de serem aplicáveis a sistemas de grande porte, chegar a soluções próximas ao ótimo global e obter soluções em razoáveis tempos de processamento. Tem-se então, uma nova classe de heurísticas chamadas *metaheurísticas*; classe de métodos que são projetados para atacar problemas "hard" de otimização combinatória onde heurísticas clássicas tem falhado em eficiência. Dentre eles se destacam: "Simulated Annealing", Algoritmos Genéticos e Busca Tabu.

Por outro lado, as concessionárias de energia já possuem em seu parque computacional um grande número de estações de trabalho que podem ser utilizadas como uma máquina paralela virtual. Sendo possível, portanto, o processamento concorrente de diversos programas computacionais num ambiente computacional heterogêneo. Como também, surgiu uma nova metaheurística para a modelagem de problemas de grande porte via programação multiagente, os chamados *Times Assíncronos* - (*Times-A*), onde agentes autônomos (algoritmos computacionais) cooperam, trabalhando todo o tempo em paralelo, com a partilha permanente de resultados (por exemplo, configurações da rede) entre os membros do time. Ou seja, um time assíncrono consiste em uma organização de agentes autônomos (de maneira que novos agentes podem ser inseridos sem necessidade de gerenciamento) que se comunicam assincronamente (todos agentes podem trabalhar em paralelo todo o tempo) através de memórias compartilhadas, e contém um fluxo de dados cíclico (possibilitando iteração e "feedback"). Desta forma, os algoritmos podem fornecer soluções que podem ser compartilhadas por todos, levando a soluções ótimas ou próximas do ótimo.

Como uma seqüência de trabalhos anteriores, neste trabalho está sendo desenvolvido um *Time-A* para o planejamento da expansão da transmissão sob o ponto de vista estático, cujos agentes são versões paralelas das metaheurísticas "simulated annealing" e algoritmos genéticos. A implementação paralela do *Time-A* usa o paradigma Mestre-Escravo, aonde um programa mestre dá início ao processamento, partindo um grupo de agentes predeterminado pelo usuário, sendo possível a inclusão e/ou exclusão dos agentes durante o processamento. Estão sendo feitos diversos testes para os sistemas: Garver (6 Barras/15 Linhas), Sul brasileiro (46 Barras/79 Linhas) e Norte-Nordeste brasileiro (89 Barras/ 179 Linhas), em uma rede heterogênea de estações SUN, sistema operacional Solaris 2.5.1, com biblioteca para processamento paralelo PVM 3.3.5. Espera-se encontrar resultados que comprovem a eficácia da metodologia proposta quando comparados com os resultados das versões seriais de cada metaheurística isoladamente, bem como uma redução significativa nos tempos de processamento.

Análise de um Sistema Elétrico Poluído sob Condições de Falta.

Autores: Prof.Dr. Francisca Aparecida de Camargo Pires

e-mail:chica@dsce.fee.unicamp.br

Eng. Maria Isabel Cuenca Alegria

e-mail:alegria@dsce.fee.unicamp.br

Os regimes harmônicos de sistemas de potência sob condições operacionais normais foram ampla e profundamente estudados, mas ainda há pouco conhecimento dos efeitos da distorção harmônica sob condições de curto circuito. Uma distorção harmônica desprezível em tensões e correntes sob condições operacionais normais pode dar lugar a correntes harmônicas de falta consideravelmente altas devido a que o circuito sob condições de falta pode apresentar ressonâncias indesejáveis no rango da frequência harmônica de interesse. Isto pode determinar a intervenção incorreta dos dispositivos de proteção.

Neste trabalho se realiza uma análise de um sistema de potência sob condições de falta com uma carga produtora de harmônicos instalada na rede de media tensão tendo como objetivo estudar o comportamento das proteções do sistema quando acontece um curto circuito nas barras de media tensão.

O desenvolvimento do trabalho foi feito de acordo com os seguintes passos:

1. Modelagem harmônico do sistema.
2. Cálculo do fluxo harmônico com injeção harmônica nas barras de media tensão.
3. Cálculo das correntes de curto circuito com e sem injeção harmônica.
4. Comparação dos resultados e conclusões.

Nos estudos de fluxo harmônico as cargas ligadas ao sistema de potência desempenham um importante papel nos cálculos harmônicos e devem ser consideradas cuidadosamente, elas são o principal elemento de amortecimento do sistema, mas devido a presença de capacitores para melhorar o fator de potência podem também afetar as condições de ressonância às frequências harmônicas ocasionando falhas nos equipamentos.

No sistema analisado foi calculado o curto circuito trifásico e monofásico a terra nas barras de media tensão considerando uma injeção harmônica nestas barras sem carga e com carga considerando ou não a presença de capacitores. Os resultados foram comparados com os valores das correntes de curto circuito sem injeção harmônica constatando-se que para uma ressonância de quinta harmônica no sistema o valor eficaz da corrente de curto circuito aumentam consideravelmente o que pode ocasionar a operação inadequada das proteções da barra dado que a maior parte dos relés respondem ao valor eficaz da corrente ou tensão de operação.

Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria

Prof.Dr. Francisca Aparecida de Camargo Pires

e-mail:chica@dsce.fee.unicamp.br

Eng. José Carlos da Costa Campos

e-mail:campos@dsce.fee.unicamp.br

São seis as condições que garantiriam um atendimento idealizado de qualquer carga prevista para operar em um sistema de corrente alternada na frequência industrial :

- 1) Tensões e correntes alternadas com formas de onda senoidais puras;
- 2) Amplitudes constantes nos valores nominais;
- 3) Frequência da rede constante no valor síncrono;
- 4) Tensões trifásicas equilibradas;
- 5) Fator de potência unitário nas cargas;
- 6) Perdas nulas na transmissão.

No entanto, atualmente, é praticamente impossível a ocorrência simultânea destas seis condições. Isto, em grande parte, é devido ao aparecimento de certos distúrbios no sistema.

Segundo a recomendação da IEEE Std 1159-1995, os distúrbios aos quais o sistema elétrico está exposto podem ser caracterizados de diversas maneiras: em função da duração do evento (curta, média ou longa duração), da faixa de frequências envolvidas (baixa, média ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa, erro de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou da intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande).

Este trabalho aborda uma análise de caso em ambiente industrial, onde se procurou traçar o perfil do comportamento das diversas cargas e conhecer a natureza de cada máquina que integra o sistema elétrico industrial para, em seguida, se observar a rede de alta tensão.

Neste sentido, buscou-se implementar neste trabalho a classificação dos fenômenos de distorção, que podem ter origem a partir da concessionária ou nos equipamentos da indústria, podendo haver também casos oriundos da interação de ambos.

Também se procurou atender as recomendações das técnicas de medição. Os dados foram monitorados pelo instrumento BMI modelo 7100 e as interpretações foram feitas com base na recomendação IEEE Std 1159-1995.

Entretanto, o maior desafio proposto neste trabalho consiste em buscar as causas das distorções de forma a atenuar os seus efeitos. Através dos dados e análises realizadas é possível elaborar um planejamento adequado no sentido de melhorar a operação desta indústria. Algumas soluções e sugestões envolvendo baixo custo poderão ser implementadas em curto prazo, tais como:

- melhorar a distribuição das cargas no sistema elétrico mediante a análise do comportamento transitório e das demandas obtidas destes equipamentos, e
- realizar uma discussão ampla na questão de operação de certas máquinas.

Outras, demandando custo e prazo médios poderão ser implementadas a seguir, como:

- melhorar o sistema de aterramento, pois através da análise de várias curvas constatou-se esta necessidade;
- compensação da potência reativa em pontos estratégicos ; e
- sistematizar um controle de demanda automático.

Título: Estratégias de Controle Corretivo em Situações de Infactibilidade da
Operação de Sistemas Elétricos de Potência
Autores: André Gustavo Campos da Conceição⁽¹⁾
Carlos Alberto de Castro Jr.⁽²⁾
E-mail: andregcc@elektro.com.br⁽¹⁾
ccastro@ieee.org⁽²⁾

Este trabalho propõem um método para lidar com situações de infactibilidade da operação de sistemas elétricos de potência. Estas situações estão relacionadas a condições de carregamento da rede cujas equações do fluxo de carga não possuem solução real. Devido ao aumento significativo da demanda e, ao mesmo tempo, falta de investimentos em geração e transmissão, os equipamentos do sistema ficam sujeitos a operar próximos de seus limites. Logo, caso ocorram contingências e/ou aumentos inesperados da demanda em horários de pico surgirão situações infactíveis. Uma vez ocorridas estas situações, ações de controle apropriadas devem ser eficientemente obtidas e rapidamente implementadas. Para se conseguir isto é necessário (a) quantificar o *grau de infactibilidade* (GI) do sistema e, (b) determinar uma estratégia de controle corretivo para trazer o sistema de volta a região de operação factível.

O *grau de infactibilidade* é determinado através da menor distância (norma Euclideana) entre o ponto de operação infactível (instável) e a fronteira de factibilidade (Σ) no espaço de parâmetros de carga. As estratégias de controle podem ser obtidas por dois métodos, denominados de *método das proporcionalidades* (MP) e *método baseado em programação não-linear* (MPNL). Banco de capacitores, mudança em *tap* de transformadores e corte de carga foram os controles considerados neste trabalho. Para validar a eficiência do método proposto foram realizadas simulações para pequenos e grandes sistemas, sob contingências e situações de carga pesada. O método proposto mostrou-se uma ferramenta muito útil para estudos de planejamento da operação, particularmente em análise da estabilidade de tensão.

Políticas de Controle Malha Aberta e Malha Fechada no Planejamento Energético de Sistemas de Energia Elétrica

L. Martinez, S. Soares

Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP

13083-970 Campinas-SP, BRASIL

E-mails: {martinez, dino}@densis.fee.unicamp.br

No setor elétrico brasileiro, a determinação de estratégias de operação dos sistemas interligados tem como base a Programação Dinâmica Estocástica (PDE). O objetivo da PDE, caracterizada como uma política de controle malha fechada, é determinar uma política de decisões ótimas que forneça, a cada estágio de planejamento, a decisão ótima para cada possível estado do sistema.

No entanto, na PDE a dimensão do problema cresce exponencialmente com o número de variáveis de estados considerado, e a abordagem é limitada pela chamada “maldição da dimensionalidade”. Nesse caso, algumas abordagens sugerem a agregação do sistema hidrelétrico em um sistema equivalente [1], onde variáveis hidráulicas são transformadas em variáveis energéticas. Abordagens alternativas sugerem o uso da programação dinâmica dual, baseada na decomposição de Bender [2].

Uma alternativa a política de controle malha fechada são os métodos de otimização determinísticos integrados a modelos de previsão de vazão [3]. Este tipo de metodologia assume que as vazões afluentes ao sistema são conhecidas ao longo do horizonte de planejamento, tendo como objetivo determinar uma trajetória que corresponde a evolução ótima dos reservatórios para a sequência de vazões pré estabelecida. Neste caso, a estocasticidade das vazões é considerada de forma implícita, através de previsões permanentemente atualizadas ao longo do horizonte de planejamento, caracterizando a solução como uma política de malha aberta.

A otimização determinística permite a representação individualizada das usinas hidrelétricas e a representação da aleatoriedade das vazões afluentes através de modelos estocásticos de qualquer ordem e específicos para cada usina, o que permite representar a diversidade hidrológica entre rios e bacias.

O objetivo deste trabalho é comparar as políticas de controle malha aberta e malha fechada através de simulações com usinas isoladas do sistema hidroelétrico brasileiro. As simulações foram realizadas sob dados históricos de afluência do sistema hidrelétrico brasileiro e sob séries sintéticas geradas por modelo estocástico auto-regressivo de ordem 1. Esse mesmo modelo estocástico foi utilizado na política de controle malha fechada, fornecendo as funções densidade de probabilidade condicionada das vazões afluentes, e na política de controle malha aberta, como previsor de vazões.

Os resultados mostraram que quando o mesmo modelo estocástico é utilizado nas duas abordagens, o desempenho das políticas de controle malha aberta e malha fechada é similar. No entanto, em períodos secos, que são os mais importantes no planejamento, já que correspondem aos períodos onde são verificados os maiores custos operacionais e os mais altos riscos de déficit, a política de controle malha aberta mostrou-se superior em relação a política de malha fechada.

Referências

- [1] L. A. Terry and outros, “Modelo a sistema equivalente - descrição geral,” Tech. Rep., CEPEL-Eletróbrás, 1980.
- [2] M. V. Pereira and L. M. V. G. Pinto, “Stochastic optimization of a multireservoir hydroelectric system: a decomposition approach,” *Water Resources Research*, vol. 21, no. 6, pp. 779–792, 1985.
- [3] G. G. Oliveira and S. Soares, “A second-order network flow algorithm for hydrothermal scheduling,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1635–1641, 1990.

Cálculos de Curto-circuito Probabilístico em Sistemas de Distribuição para Estudos de Avaliação de Riscos

João Ricardo B. Duran e Fujio Sato
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas

Resumo

Cálculos de curtos-circuitos são efetuados rotineiramente em sistemas elétricos para subsidiar vários tipos de estudos. Considerando-se que estes estudos são baseados em cálculos determinísticos, que impõem a utilização de fatores de segurança conservativos devido ao reduzido conhecimento das aleatoriedades das variáveis envolvidas, alguns questionamentos podem surgir, tais como:

- qual a probabilidade de ocorrência da pior situação?
- os riscos de falha são aceitáveis?

Responder a estas questões implica em ter o domínio sobre os riscos, que como consequência pode trazer economias consideráveis pela adoção de fatores de segurança realistas em novas instalações ou adiamento de substituição de equipamentos em instalações já existentes. Para que isso seja possível exige-se uma análise sob a ótica probabilística. Assim sendo, o desenvolvimento de um programa de cálculos de curtos-circuitos probabilístico é essencial.

Este trabalho descreve o estudo de curto-circuito probabilístico nas redes de distribuição (média tensão), para verificar a influência da interligação do autoprodutor na rede da concessionária nos esforços mecânicos nas barras e determinar as probabilidades de falhas.

A implementação do programa de curto-circuito probabilístico foi baseada no método de Monte Carlo e por demandar milhares de simulações foi utilizado o processamento paralelo.

A curva da densidade de probabilidade das corrente de curto-circuito é transformada na curva de densidade de probabilidade do esforço mecânico. A curva da densidade de probabilidade da resistência mecânica dos componentes pode ser aproximada por uma curva normal, com média 10% maior do que a informação do fabricante e o desvio padrão igual a 10% da média.

A probabilidade de falha é obtida através da convolução das duas curvas acima citadas.

Um Procedimento Para o Redespacho Ativo da Geração Visando Aumento da Margem de Estabilidade de Tensão Via Fator de Participação Modal

Frederico S. Moreira, Takaaki Ohishi, Luiz P. da Silva e Vivaldo F. da Costa
fred@densis.fee.unicamp.br

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
C.P. 6101 - CEP 13081-970 Campinas, SP - Brasil

Neste trabalho é apresentado um procedimento para a programação da operação capaz de levar em consideração ambos aspectos: econômicos e de segurança, fornecendo-se como resultados despachos de geração que atendam requisitos mínimos de estabilidade de tensão, com afastamento mínimo da solução economicamente ótima. A partir de uma solução ótima para o sub-problema econômico/energético, determina-se a margem de estabilidade de tensão do sistema através de métodos de curvas PV. Através de métodos de análise modal estática obtém-se fatores de participação para os geradores, os quais proporcionam os meios para formular um redespacho da geração ativa que acarrete em aumentos na margem de estabilidade de tensão do sistema.

Para abordar este problema, é utilizado um fator de participação modal dos geradores. Este índice é desenvolvido a partir da técnica de análise modal convencional para avaliação da estabilidade de tensão. Expandindo-se a técnica de análise modal para incluir a parte de potência ativa da matriz Jacobiana do fluxo de carga, estabelece-se um método sistemático para quantificar o impacto da saída de potência ativa dos diferentes geradores nas margens de estabilidade de tensão do sistema. Baseando-se neste índice pode-se efetuar um redespacho dos geradores, com o propósito de aumentar a capacidade de transferência de potência do sistema. Os geradores com baixos fatores de participação são os que mais afetam, negativamente, as margens de estabilidade do sistema. Portanto, este índice pode ser usado para definir fatores de penalidade para as saídas de potência ativa desses geradores. Consequentemente, a re-execução do fluxo de carga ótimo, penalizando-se estes geradores, conduz a um redespacho ativo com maiores margens de estabilidade de tensão.

Palestrantes convidados

Prof. Dr. Newton Geraldo Bretas é engenheiro eletricista pela UFMG. Obteve os títulos de Mestre pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) e Doutor pela University of Missouri, Columbia, EUA. Obteve também a Livre-Docência pela EESC-USP. Realizou pós-doutorado na Virginia Polytechnic Institute & State University, Virginia, EUA. É professor titular na EESC (1989), onde atua desde 1976. É autor de livro texto sobre estabilidade em sistemas de potência, e de mais de 120 artigos em conferências e periódicos arbitrados. Orientou mais de quarenta trabalhos de Iniciação Científica e mais de vinte trabalhos de mestrado/doutorado.

Eng. José Eduardo Pinheiro Santos Tanure é Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica (Sistemas Elétricos de Potência) pela Escola de Engenharia Elétrica de Itajubá (EFEI). Trabalhou durante 17 anos na COELBA no setor de Planejamento e Estudos e está há 3 anos na ANEEL, onde é atualmente Superintendente de Regulação dos Serviços de Distribuição.

Prof. Dr. Ariovaldo Verandio Garcia obteve os títulos de engenheiro eletricista, Mestre e Doutor pela UNICAMP. É docente da FEEC desde 1975, sendo atualmente professor titular. O prof. Ariovaldo tem estado intensamente envolvido tanto com o desenvolvimento de funções de análise de redes bem como com a implementação dessas funções em centros de controle em empresas concessionárias de energia elétrica.