UMA METODOLOGIA DE PRÉ-DESPACHO AC COM BASE EM UM MODELO DE FPO NEWTON

Leonardo Nepomuceno, Takaaki Ohishi, Secundino Soares

DENSIS-FEEC-UNICAMP
Caixa Postal 6101
CEP 13081-970 - Campinas SP

Resumo Este trabalho propõe uma nova formulação para o problema de Pré-Despacho (PD) que visa incorporar no problema as restrições associadas à parte reativa do sistema de transmissão. O modelo de PD é subdividido nos sub-modelos de Pré-Despacho Ativo (PDA) e Reativo (PDR). No PDA, procura-se estabelecer uma geração ativa inicial através de um modelo de PD tradicional. No PDR, o pré-despacho proposto pelo PDA é avaliado do ponto de vista reativo, através do modelo de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) Newton proposto. O modelo de PDR é constituído de **T** problemas de FPO, que são resolvidos separadamente mas de maneira incremental, fazendo um acompanhamento de carga entre intervalos consecutivos, o que diminui consideravelmente o tempo de avaliação reativa do problema de PDR como um todo. Caso seja necessário, o PDR é capaz de propor redespachos na geração ativa, de modo a contornar problemas reativos nos intervalos críticos (nos quais todos os recursos reativos já foram utilizados, e ainda assim persistem os problemas reativos). A formulação e a metodologia de solução proposta é avaliada no sistema IEEE30 em dois estudos de caso e tem se mostrado bastante robusta no que diz respeito à incorporação da parte reativa ao problema de PD.

Palavras Chaves: Modelos de Pré-Despacho, Despacho de Geração, Fluxo de Potência Ótimo.

Abstract: This paper proposes a new formulation to the Predispatch (PD) problem aiming to incorporate constraints associated to the reactive portion of the transmission system. The proposed PD model is subdivided in the Active (PDA) and Reactive (PDR) Predispatch models. PDA model establishes an initial active generation predispatch through a traditional PD model. In the PDR the predispatch proposed by the PDA model is evaluated from the voltage/reactive points of view, through the proposed non-linear Newton Optimal Power Flow (OPF). The PDR is formulated as a sequence of **T** OPF problems, solved separately but taking into account load tracking between consecutive time intervals. This approach considerably diminishes computational effort to perform the reactive analysis of the PDR problem as a whole. When necessary, the PDR model is capable of proposing redispatches in the active generation, such that critical reactive problems (in which all reactive sources have been insufficient to control the reactive problems) can be overcome. The formulation and solution methodology proposed are evaluated in the IEEE30 system in two case studies. These studies show that the methodology is robust enough to incorporate the reactive aspects to the PD problem.

Keywords: Predispatch Models, Generation Dispatch, Optimal Power Flow.

1 INTRODUÇÃO

O Pré-despacho (PD) de um sistema de potência determina uma programação de produção de energia elétrica para um horizonte de curto prazo, em geral de um dia a uma semana à frente. Esta programação visa, de um lado, a discretização das metas energéticas determinadas através do planejamento que contempla horizontes maiores, e, de outro lado, serve como uma referência operativa para a operação em tempo real do sistema. Como para a operação em tempo real os aspectos operativos, principalmente do sistema elétrico, tais como controle de tensão e sobrecargas no sistema de transmissão, são em geral os mais críticos, então é importante que a solução proposta pelo PD leve em conta tais características de modo a assegurar a operacionalidade e a segurança do sistema. Para tal fim é necessário que nos modelos de PD o sistema de transmissão seja representado através de modelos AC, de forma que tanto a parte ativa como também a parte reativa sejam adequadamente equacionadas; a este tipo de problema de PD denominaremos de PDAC. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de PDAC para um sistema hidrotérmico, no qual os aspectos relativos ao sistema de transmissão são considerados em detalhe.

A inclusão dos aspectos elétricos no problema de PD dificulta a sua resolução principalmente em função das não-linearidades e não convexidades que são adicionadas ao problema. Na literatura há vários trabalhos que consideram a rede elétrica através de modelos AC. Um dos primeiros e mais completos modelos foi apresentado por Bonart at all (1981), no qual o sistema hidroelétrico é modelado em detalhe, bem como o sistema de transmissão através de um modelo AC. O modelo é tratado via decomposição do problema nos subproblemas hidroelétrico e termoelétrico. Os trabalhos apresentados por Luo (1989) e Nanda (1981) tratam basicamente do mesmo problema mas utilizando técnicas de resolução diferentes. Já no trabalho apresentado por El Hawary (1986) é resolvido um problema semelhante aos anteriores mas com uma abordagem

Artigo submetido em 17/11/1999
1a. revisão em 20/03/2000
Aceito sob recomendação do Ed. Cons. Prof. Dr. José Luiz Resende Pereira

que não utiliza decomposição, e as condições de Kuhn-Tucker são resolvidas através do método de Newton.

Nas empresas de energia elétrica os modelos de PD não tratam em geral os aspectos de potência ativa e reativa conjuntamente. A maioria destes modelos trata somente da parte ativa da modelagem. Em geral os aspectos reativos são analisados separadamente contemplando alguns cenários básicos tais como carga baixa, média e alta, através de modelos de fluxo de carga AC.

Em sistemas hidrotérmicos com predominância hidráulica, como o caso brasileiro, a operação do parque térmico é mais simplificada, pois em geral opera-se na base, enquanto que a flutuação da demanda é atendida através das usinas hidrelétricas, que apresentam menos restrições de partidas e de tomadas de carga. Embora em geral a operação do sistema hidrelétrico seja mais complicada devido aos acoplamentos temporais e espaciais entre as unidades situadas em uma mesma bacia hidrográfica, a operação deste sistema, quando analisada a partir de uma perspectiva de curto prazo, mostra-se menos acoplada, dado que a influência da operação de uma unidade sobre o estado do reservatório imediatamente a jusante é em geral desprezível ao longo de um dia, e também os limites de armazenamentos dos reservatórios não são violados durante a operação diária, desde que as metas energéticas sejam respeitadas.

Do ponto de vista do sistema de transmissão em tais sistemas hidrotérmicos, tem-se o problema da transferência de grandes blocos de energia a longas distâncias, de forma que os controles sobre o carregamento das linhas e do perfil de tensão são aspectos críticos principalmente em relação à segurança do sistema.

A metodologia desenvolvida neste trabalho visa considerar de forma detalhada os aspectos relativos ao sistema de transmissão, através da resolução iterativa de dois modelos de PD, um tratando somente da parte relacionada com a geração, transmissão e consumo de potência ativa, denominado modelo de Pré-despacho Ativo (PDA), e um outro modelo, denominado Pré-despacho Reativo (PDR), que considera conjuntamente a parte reativa e ativa. No PDA são levadas em conta as restrições de geração de potência ativa, as restrições térmicas e hidráulicas, o sistema de transmissão será representado por um modelo DC e os limites de transmissão de potência ativa serão considerados. Os aspectos relativos à potência reativa, tais como geração de reativos e controle de tensão serão analisados pelo subproblema PDR. Neste subproblema a rede de transmissão será representada pelas equações de fluxo de carga AC, além dos limites na geração ativa e reativa e nos taps dos transformadores.

O problema de PDA está sujeito a uma série de restrições dinâmicas tais como metas energéticas e restrições de rampa, de modo que a operação em um dado instante é dependente da operação de outros intervalos. O problema reativo, por sua vez, não está sujeito a restrições dinâmicas, podendo ser decomposto em subproblemas independentes, o que resulta em um problema de fluxo de potência ótimo (FPO) para cada intervalo de tempo.

Prioritariamente o FPO procura um despacho que atenda as restrições, mantendo inalterada a solução ativa definida pelo PDA. Nos casos em que somente o despacho reativo não for suficiente para atender as violações de tensões/potência reativa, reprograma-se a geração ativa para atender tais restrições. Na literatura não é comum reprogramar a geração ativa em função de problemas de tensão. Entretanto, em trabalho recente Bell e Kirschen (1999) investigam esta possibilidade e a apresentam como uma alternativa em sistemas elétricos desregulamentados.

2 O PROBLEMA DE PDAC

O problema de programação deve considerar os aspectos operativos dos sistemas de geração termelétrica e hidrelétrica, e de transmissão. Uma formulação básica para este problema é apresentada a seguir.

$$\mathbf{PDAC}\begin{cases} Min \quad \sum_{t\in\mathbf{T}} f_a^t(\mathbf{x}^t) \\ s.a.: \\ \quad \sum_{t=1}^{\mathbf{T}} \mathrm{P}_i^t = \mathrm{M}_i & i\in\Omega_{hid} \quad (1) \\ \quad \underline{F}_j \le F_j^t(\mathbf{x}^t) \le \overline{F_j} & j\in \grave{U}_{ram},\ t\in\mathbf{T} \quad (2) \\ \quad \underline{\Delta \mathrm{P}_i} \le \mathrm{P}_i^t - \mathrm{P}_i^{t-1} \le \overline{\Delta \mathrm{P}_i} & i\in\Omega_{ger},\ t\in\mathbf{T} \quad (3) \\ \quad \mathbf{g}^t(\mathbf{x}^t) = \mathbf{0} & t\in\mathbf{T} \quad (4) \\ \quad \underline{\mathbf{x}} \le \mathbf{x}^t \le \overline{\mathbf{x}} & t\in\mathbf{T} \quad (5) \\ \quad \underline{Q}_i \le h_i^t(\mathbf{x}^t) \le \overline{Q_i} & i\in \grave{U}_{ger},\ t\in\mathbf{T} \quad (6) \end{cases}$$

onde:

$\mathbf{x}^t = [\mathbf{\grave{E}}\ ,\mathbf{V}\ ,\mathbf{tp}\ ,\mathbf{P},\mathbf{Bsh}]^t$

$\mathbf{\grave{E}}$: vetor composto pelos ângulos das tensões nas barras

$\mathbf{V}$: vetor composto pelos módulos das tensões nas barras

$\mathbf{tp}$: vetor composto pelos taps de transformadores

$\mathbf{P}$: vetor composto pelas gerações de potência ativa nas unidades geradoras;

Bsh : vetor composto pelos bancos de capacitores/reatores;

$h_i^t(\mathbf{x}^t)$: função de geração de potência reativa da unidade *i* no intervalo *t*;

$F_j^t(\mathbf{x}^t)$: função de fluxo de potência ativa no ramo *j* no intervalo *t*;

$\mathbf{g}^t(\mathbf{x}^t)$: vetor associado às equações de fluxo de carga do intervalo *t*;

P_i^t: geração de potência ativa na unidade *i* no intervalo *t*;

M_i: meta energética fixada para a unidade *i*;

$\grave{U}_{hid}$: conjunto definido pelas unidades hidráulicas;

$\grave{U}_{term}$: conjunto definido pelas unidades térmicas;

$\grave{U}_{ger}$: conjunto definido pelas unidades de geração;

$\grave{U}_{ram}$: conjunto definido pelos ramos (linhas e transformadores) do sistema;

T : conjunto definido pelos intervalos de discretização de tempo do problema de Pré-Despacho.

$\underline{\mathbf{x}}$, $\overline{\mathbf{x}}$: vetor de limites inferior e superior associados a $\mathbf{V}$, $\mathbf{tp}$, $\mathbf{P}$ e $\mathbf{Bsh}$.

$\underline{F}_j$, $\overline{F_j}$: limites inferior e superior no fluxo de potência ativa no ramo *j*.

$\underline{\Delta \mathrm{P}_i}$, $\overline{\Delta \mathrm{P}_i}$: limites inferior e superior de variação na geração de potência ativa entre intervalos consecutivos para a unidade *i*.

$\underline{Q}_i$, $\overline{Q_i}$: limites inferior e superior na geração de potência reativa da unidade *i*.

A restrição (1) está relacionada às metas energéticas das usinas hidrelétricas; As restrições (2)representam os limites de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão. As restrições (3) representam os limites de rampa de tomada de carga nas unidades de geração. As restrições (4) são as equações de fluxo de carga AC. As restrições (5) e (6) são relativas respectivamente aos limites nas variáveis elétricas e de geração reativa. A função objetivo $f_a^t(\mathbf{x})$ em um dado intervalo *t* pode incorporar custos de produção, partidas de unidades geradoras, perdas de transmissão e outros objetivos. Em sistemas de predominância hidráulica, a questão da partida de unidades térmicas deixa de ser relevante pois, em geral, opera-se estas unidades geradoras na base. Neste caso, objetivos outros podem ser considerados tais como otimização da produtividade hidráulica proposta por Soares (1997) e/ou perdas de transmissão. Em relação ao sistema hidrelétrico, a representação acima não contempla a parte "hidráulica" (o armazenamento nos reservatórios e os acoplamentos hidráulicos entre as usinas hidrelétricas de uma mesma bacia hidrográfica). Em sistemas constituídos de grandes reservatórios como é o caso brasileiro, o estado dos reservatórios apresenta em geral pouca variação em um horizonte de curto prazo, tornando-se pouco relevante a sua representação no problema de PD. Este detalhamento, no entanto, pode ser incluído no modelo sem grandes dificuldades (Ohishi ett all (1991) e (1995)). A representação das variáveis volume e turbinagem é feita de forma implícita nos limites de geração mínima e máxima (restrições 5). A geração mínima de cada usina hidroelétrica é calculada através de sua função de produção supondo-se a turbinagem mínima e o volume médio armazenada previsto para o próximo dia; para a geração máxima, supõe-se a turbinagem máxima.

A metodologia desenvolvida neste trabalho obtém uma solução sub-ótima para o problema de PDAC formulado. Esta metodologia se baseia na resolução iterativa dos subproblemas PDA e PDR formulados a seguir.

3 O MODELO DE PDA

O subproblema PDA é um problema de PD onde são consideradas as disponibilidades de geração termelétrica e hidrelétrica e suas restrições operativas, e, em relação à rede elétrica, somente os aspectos relativos à potência ativa são considerados. A seguir é apresentada uma formulação ao problema de PDA.

$$
\mathbf{PDA}\begin{cases}
\text{Min} \sum_{t\in\mathbf{T}} f_c^t \\
\text{s.a.} \\
\sum_{t=1}^{\mathbf{T}} \mathrm{P}_i^t = \mathrm{M}_i & i\in\Omega_{hid} \quad (1)\\
\mathrm{P}_j^{\min} \le \mathrm{P}_j^t \le \mathrm{P}_j^{\max} & i\in \grave{U}_{ger},\ t\in\mathbf{T} \quad (2)\\
\underline{\Delta \mathrm{P}_i} \le \mathrm{P}_i^t - \mathrm{P}_i^{t-1} \le \overline{\Delta \mathrm{P}_i} & i\in\Omega_{ger},\ t\in\mathbf{T} \quad (3)\\
\mathbf{f}^t = \mathbf{D}^t\ \mathbf{p}^t & t\in\mathbf{T} \quad (4)\\
\mathbf{f}^{\min} \le \mathbf{f}^t \le \mathbf{f}^{\max} & t\in\mathbf{T} \quad (5)
\end{cases}
$$

$\mathbf{f}^t$ **:** o vetor dos fluxos de potência ativa linearizados nas linhas para o intervalo de tempo *t*;

$\mathbf{D}^t$: a matriz de fatores de distribuição no intervalo de tempo *t*. A i-ésima linha desta matriz fornece a contribuição de cada injeção de potência sobre o fluxo de potência ativa na linha i;

$\mathbf{p}^t$: vetor constituído das injeções de potência líquidas nas barras no intervalo de tempo *t*.

A restrição (1) é idêntica àquela apresentada no problema de PDAC e representa as metas energéticas. A restrição (2) está relacionada aos limites mínimo e máximo de geração em todas as unidades geradoras. No problema de PDAC anterior esta restrições estava embutida na restrição (5). A restrição (3) trata as restrições em rampa das unidades geradoras (idêntica à restrição 3 do PDAC). A restrição (4) representa a rede elétrica através de um modelo DC (linearização das equações dadas em 4 no problema de PDAC), e a restrição (5) representa limites de transmissão de potência ativa (restrição 2 do problema de PDAC linearizada). Em sistemas hidrotérmicos com predominância hidráulica, em geral não faz sentido usar como função objetivo $f_c^t(\mathbf{x})$ a minimização de custo de produção térmica. Nestes casos pode-se utilizar como critério de otimização por exemplo a minimização de perdas na transmissão e/ou critérios de produtividade hidráulica (Soares (1997).

O problema de PDA formulado acima é também um problema de grande dimensão para sistemas reais, e para resolvê-lo é geralmente utilizada alguma técnica de decomposição tal como em Nanda (1981), Luo (1989). No presente trabalho o problema foi tratado através de uma metodologia híbrida (Ohishi ett all, 1991 e 1995), que utiliza um modelo de fluxo de carga linear ótimo e um simulador para a operação do sistema hidrelétrico. A resolução do PDA fornece um programa de operação dos sistemas térmicos e hidráulicos, a produção de energia elétrica (potência ativa) para cada usina em cada intervalo de tempo do próximo dia. Esta solução é factível tanto do ponto de vista da geração como também de transmissão (Modelo DC).

4 O MODELO DE PDR

O subproblema PDR enfoca o problema reativo e o seu objetivo é despachar as fontes geradoras de modo a obter uma solução adequada, principalmente em relação ao controle de tensão. Prioritariamente, o PDR irá despachar as fontes de reativos (geradores de reativos e tap dos transformadores), deixando inalteradas as gerações de potência ativa determinadas pelo PDA.

$$
\mathbf{PDR}\begin{cases}
Min \sum_{t\in\mathbf{T}} f_b^t(\mathbf{x}^t) \\
s.a.: \\
\mathbf{g}^t\left(\mathbf{x}^t\right) = 0 & t\in\mathbf{T} \quad (1)\\
\underline{\mathbf{x}} \le \mathbf{x}^t \le \overline{\mathbf{x}} & t\in\mathbf{T} \quad (2)\\
\underline{Q}_i \le h_i^t(\mathbf{x}^t) \le \overline{Q_i} & i\in \grave{U}_{ger},\ t\in\mathbf{T} \quad (3)
\end{cases}
$$

Neste problema tem-se as equações de fluxo de carga AC para cada intervalo, representadas através das restrições (1). No PDR também a geração de potência ativa é variável, a princípio, sendo também mais um controle do problema. O

PDR não apresenta restrições dinâmicas e sua função objetivo é aditivamente separável temporalmente; assim sendo, o PDR é constituído de **T** subproblemas de FPO independentes. A função objetivo do PDR pode contemplar a minimização de perdas de transmissão, perdas de geração, custos de geração, desvio de tensão, e desvio em relação a um dado ponto operacional. Com esta última parcela pode-se por exemplo minimizar o desvio da geração de potência ativa em relação à solução (em termos de potência ativa) fornecida pelo PDA para o respectivo intervalo de tempo. Os desvios podem ser controlados através dos valores dos correspondentes coeficientes de penalização.

4.1 Técnica de Solução

Na técnica de solução utilizada para a resolução de cada um dos **T** problemas de FPO as restrições nas variáveis são tratadas por políticas de penalidades (Sun ett all, 1987). Esta metodologia consiste em introduzir na função objetivo termos de penalidade quadráticas somente para as variáveis que tiverem seus limites violados. A restrição funcional de limites de potência reativa é tratada utilizando-se a técnica de parametrização (Nepomuceno e Santos, 1997). Esta técnica consiste em introduzir, em cada iteração, funções homotopia parametrizadas em γ somente para as gerações reativas violadas. Para um dado intervalo de tempo *t*, em cada iteração de solução do problema de PDR , resolve-se o problema $\mathbf{FPO}_t$ dado a seguir:

$$\mathbf{FPO}_t \begin{cases} Min\, C = f_b^t(\mathbf{x}^t) + \sum_{j\in\Omega_{xviol}} \mathrm{P}_j \\ s.a.: \\ \qquad \mathbf{g}^t\left(\mathbf{x}^t\right) = 0 \\ \qquad \mathrm{H}_i^t(\mathbf{x}^t,\gamma) = 0 \quad i \in \Omega_{qviol} \end{cases}$$

sendo que as funções homotopia e de penalidade são definidas como:

$$\mathrm{H}_i^t(\mathbf{x}^t,\gamma) = h_i^t\left(\mathbf{x}^t\right) - (1-\gamma)\, Q^{viol} \qquad i \in \Omega_{qviol}$$

$$\mathrm{P}_j = \frac{w}{2}\left(x_j - x_j^{\lim}\right)^2 \qquad j \in \Omega_{xviol}$$

onde:

Q^{viol} : valor limite inferior $\underline{Q}_i$ ou superior $\overline{Q_i}$ violado.

Ω_{qviol} : conjunto definido pelas violações nas gerações de potência reativa;

Ω_{xviol} : conjunto definido pelas componentes do vetor ***x*** que estão violadas.

w: termo de ponderação para a função de penalidade.

$x_j^{\lim}$: valor limite superior ou inferior violado.

Para cada intervalo de tempo *t*, a solução do problema acima se constitui em uma série de problemas parametrizados a partir de um ponto inicial arbitrário $\mathbf{x}_0$. A partir deste ponto as restrições de geração de potência reativa *h*(**x**) que estejam infactíveis são incorporadas ao problema através das funções homotopia e as violações nas variáveis são incorporadas introduzindo-se termos de penalidade quadrática na função objetivo. Os problemas parametrizados são resolvidos excursionando-se o parâmetro γ de 0 a 1, o que eqüivale a percorrer o caminho definido pelos pontos $(\mathbf{x}^t,\gamma)$ tais que

$$\mathrm{H}_i^t(\mathbf{x}^t,\gamma) = 0$$

Para um dado valor de γ a função Lagrangeana do problema é dada por**:**

$$L\left(\mathbf{x}^t, \ddot{e}, \grave{\imath}\right) = C + \lambda' \mathbf{g}^t\left(\mathbf{x}^t\right) + \sum_{i\in\Omega_{qviol}} \grave{\imath}_i \mathrm{H}_i^t(\mathbf{x}^t,\gamma)$$

A condição necessária de otimalidade irrestrita corresponde à estacionariedade da função Lagrangeana ou seja:

$$\nabla L\left(\mathbf{x}^t, \ddot{e}, \grave{\imath}\right) = 0$$

A solução é dada através de linearizações das equações do gradiente dado acima através do método de Newton (Sun ett all 1984 e 1987).

4.2 Solução do PDR por Acompanhamento de Carga

Conforme já discutido, o FPO é o modelo de solução básica utilizado pelo PDR. Também se discutiu que, com a metodologia de solução adotada, os processos de otimização para cada intervalo de tempo partem de um ponto inicial arbitrário $\mathbf{x}_0$. Observa-se ainda que as soluções dos FPO de intervalos consecutivos são geralmente muito próximas, uma vez que as cargas são ligeiramente alteradas de um intervalo a outro. Este fato é tanto mais verdadeiro quanto menores forem os intervalos do problema de PD (sendo menores as variações de carga entre os intervalos).

Na metodologia de solução utilizada, optou-se portanto por tirar proveito destas pequenas variações de carga entre os intervalos (consequentemente com pequenas alterações nas soluções do FPO) da seguinte forma: fazendo um acompanhamento de carga ("load tracking") nas soluções entre os intervalos consecutivos. Ou seja, a solução de um determinado subproblema parte da solução do intervalo anterior e somente ajusta a sua solução às variações incrementais de cargas que ocorreram de um intervalo ao outro.

Tal metodologia diminui consideravelmente o número de iterações para a solução de cada problema de FPO, uma vez que dada a solução de um determinado intervalo, apenas algumas iterações são necessárias para ajustar a solução para o próximo intervalo. O impacto da solução inicial no processo de convergência do problema de FPO é avaliado nos resultados apresentados.

5 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta resolve iterativamente os subproblemas de PDA e PDR acima descritos. Sucintamente, a metodologia pode ser resumida nos seguintes passos :

i) Resolve-se inicialmente o PDA mantendo as metas energéticas fixadas por estudos de médio prazo (ver

Figura 1). Com isso obtém-se a geração de potência ativa para cada unidade geradora para cada intervalo de tempo.

ii) Resolve-se um problema de PDR, procurando inicialmente não alterar o despacho de geração de potência ativa dado pelo PDA. Ou seja, a geração de potência ativa será considerada conhecida e igual à solução do PDA, e o PDR irá despachar somente as fontes de geração reativa. Se as soluções do FPO de todos os intervalos são apresentarem nenhuma violação reativa, então obteve-se uma solução factível para o PDAC (esta solução será submetida à operação em tempo real). Pare. Caso contrário vá para (iii).

iii) Se em algum intervalo a solução do PDR apresentar alguma violação, libera-se a geração de potência ativa e resolve-se novamente o PDR do correspondente ao intervalo de tempo. Em outras palavras, faz-se uma reprogramação da geração ativa de modo a contribuir na obtenção de uma solução eletricamente factível. Repetir este procedimento para todos os intervalos nos quais constatar alguma violação. Vá para (iv). Caso contrário, se mesmo assim não for possível obter uma solução sem nenhuma violação, então dadas as condições do problema não foi possível obter nenhuma solução factível. Pare.

iv) A solução inicial do PDA obtido no passo (i) atende às restrições de metas energéticas. Com as reprogramações de geração de potência ativa no passo (iii) estas metas possivelmente foram violadas. Para novamente atender as restrições de metas, as gerações de outros intervalos determinados pelo PDA serão reprogramadas. Nesta reprogramação não participam os intervalos reprogramados no passo (iii). Ou seja, para aqueles intervalos mais críticos do ponto de vista reativo em que houve reprogramação de geração ativa, esta nova solução permanecerá inalterada. Após a reprogramação e as metas energéticas atendidas, volta-se para o passo (ii) para se obter a nova solução do PDR, e repete-se o processo.

As restrições dinâmicas estão todas relacionadas com a operação dos sistemas de geração de potência ativa. Desse modo, a decomposição em um subproblema de PD ativo e um subproblema de PD reativo procura separar estes dois aspectos, aproveitando ainda o tradicional desacoplamento em potência ativa e reativa usual em estudos com sistemas de potência. A metodologia proposta é sintetizada na Figura 1.

6 RESULTADOS OBTIDOS

A metodologia foi aplicada ao sistema IEEE30. Para tal, um sistema de geração hidrelétrico foi adaptado a tal sistema. Foram feitos dois estudos de caso, apresentados a seguir. Os estudos diferem apenas pelo perfil diário de carga. No primeiro estudo, o perfil de carga diário é mais leve. No segundo procurou-se aumentar o perfil de carga diário de modo a estudar uma situação de carga mais crítica. Os objetivos básicos dos estudos são: avaliar em mais detalhe as inter-relações entre os despachos ativo e reativo no sistema e a adequação da decomposição adotada, ressaltando a importância de introduzirmos a representação reativa em estudos de PD.

No primeiro caso, com um perfil diário menos carregado, fez-se inicialmente um estudo de PDA envolvendo o sistema. O despacho de geração inicial do PDA foi obtido e está apresentado nas colunas Gerações (MW) da Tabela 1. Na parte mais inferior da tabela destacam-se as metas energéticas para cada gerador, que foram atendidas no estudos de PDA. Fixando-se este despacho de geração, fez-se um estudo de PDR denominado avaliação reativa (uma vez que os despachos de geração estão fixos). Esta avaliação reativa também está dada na Tabela 1. São mostradas as violações ocorridas nas gerações (Mw), tensões (V), nos capacitores e reatores (C), e ainda nos taps de transformadores (Tp) em cada intervalo (t). Também é mostrado o número de variáveis (as mesmas anteriores, mais a geração de potência reativa – Mvar) que estão nos limites após cada processo de otimização. Conforme a metodologia proposta, na solução inicial do PDR o perfil diário de potência ativa é mantido igual à solução calculada pelo PDA . Ou seja, o modelo de PDR é utilizado simplesmente para calcular os controles reativos do problema. Se a solução do PDR não apresentar violações, então a solução inicial proposta pelo PDA mais a solução reativa obtida pelo PDR é a solução final para o problema de PDAC. Como se pode ver, no caso 1 a solução do PDR não apresenta nenhuma violação, logo o despachos dados na Tabela 1 são os despachos finais a serem implementados na operação do sistema. Neste caso menos carregado não houve necessidade de fazermos iterações entre os modelos PDA e PDR.

Tabela 1 – Solução do PDA/PDR (caso 1)

	Violações				Restrições no Limite					Gerações (MW)					
t	Mw	V	C	Tp	Mw	V	C	Tp	Mvar	Ger1	Ger2	Ger5	Ger8	Ger11	Ger13
1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	26,19	41,33	49,6	44,59	46,95	28,06
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	25,86	40,64	47,8	43,48	45,83	27,39
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	24,53	37,85	40,6	39,08	41,35	24,69
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	23,2	35,07	33,4	34,71	36,87	21,99
5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	26,19	41,33	49,6	44,59	46,95	28,06
6	0	0	0	0	0	0	2	0	1	29,3	47,96	66,72	55,16	57,63	34,42
7	0	0	0	0	0	0	2	0	1	30,98	51,45	75,74	60,79	63,29	37,73
8	0	0	0	0	0	0	2	0	1	32,02	53,55	81,15	64,19	66,7	39,7
9	0	0	0	0	0	0	2	0	2	32,2	53,9	82,06	64,75	67,27	40,03
10	0	0	0	0	0	0	2	1	3	32,56	54,6	83,86	65,89	68,41	40,69
11	0	0	0	0	0	0	2	1	3	32,75	54,95	84,77	66,46	68,98	41,01
12	0	0	0	0	0	0	2	1	3	32,94	55,3	85,67	67,03	69,55	41,34
13	0	0	0	0	0	0	2	1	3	33,13	55,65	86,57	67,6	70,12	41,67
14	0	0	0	0	0	0	2	1	3	33,52	56,34	88,38	68,74	71,27	42,32
15	0	0	0	0	0	0	2	1	4	33,7	56,69	89,28	69,31	71,84	42,65
16	0	0	0	0	0	0	2	1	4	34,23	57,74	91,99	71,02	73,56	43,62
17	0	0	0	0	0	0	2	1	4	34,61	58,44	93,8	72,17	74,71	44,27
18	0	0	0	0	0	0	2	1	5	35,47	59,84	97,42	74,46	77,02	45,57
19	0	0	0	0	0	0	2	1	5	35,71	60,19	98,32	75,04	77,6	45,89
20	0	0	0	0	0	0	2	1	4	34,05	57,4	91,09	70,46	72,98	43,3
21	0	0	0	0	0	0	2	1	3	33,13	55,65	86,57	67,6	70,12	41,67
22	0	0	0	0	0	0	2	0	1	30,63	50,75	73,93	59,66	62,16	37,07
23	0	0	0	0	0	0	2	0	1	29,3	47,96	66,72	55,16	57,63	34,42
24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	27,18	43,42	55	47,91	50,32	30,08
										743.37	1228	1800	1449.8	1509.1	897.63

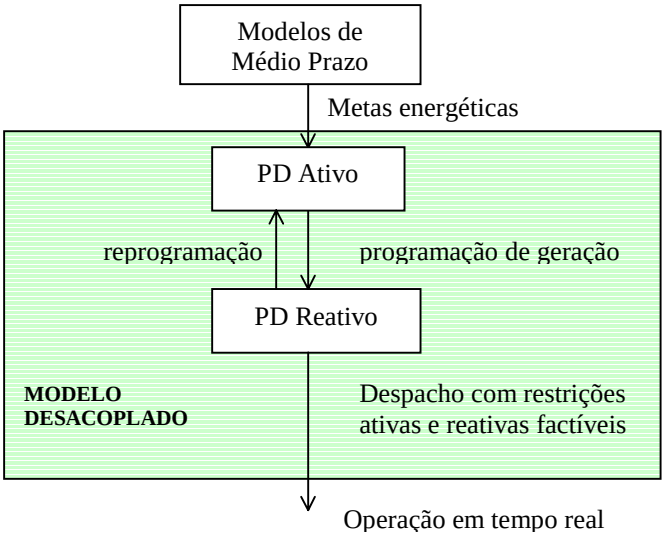
No segundo estudo de caso avaliado a solução inicial para o PDA foi obtida, e está apresentada nas colunas Gerações (MW) da Tabela 2 a seguir. A partir desta solução ativa inicial foi executado o modelo de solução do PDR que corresponde à solução de um FPO para cada intervalo de tempo. A solução do PDR é também mostrada na Tabela 2. Percebe-se desta Tabela que foram constatadas violações nos intervalos correspondentes às 18 e 19 horas.

Tabela 2 – Solução PDA/PDR (avaliação reativa – caso 2)

	Violações				Restrições Lim.					Gerações (MW)					
Int.	Mw	V	C	Tp	Mw	V	C	Tp	Mvar	Ger1	Ger2	Ger5	Ger8	Ger11	Ger13
1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	46.13	34.58	18.77	51.02	40.00	47.60
2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	45.80	33.88	16.95	49.91	38.87	46.97
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	44.43	31.06	9.68	45.46	34.39	44.44
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	42.83	27.56	4.00	40.83	29.55	41.71
5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	46.13	34.58	18.77	51.02	40.00	47.60
6	0	0	0	0	0	0	2	0	1	49.34	41.29	36.07	61.73	50.71	53.48
7	0	0	0	0	0	0	2	0	2	51.05	44.84	45.19	67.43	56.38	56.52
8	0	0	0	0	0	0	2	0	2	52.12	46.97	50.67	70.87	59.81	58.33
9	0	0	0	0	0	0	2	0	2	52.30	47.32	51.58	71.45	60.38	58.63
10	0	0	0	0	0	0	2	1	3	52.68	48.03	53.41	72.60	61.52	59.22
11	0	0	0	0	0	0	2	1	3	53.07	48.74	55.24	73.75	62.67	59.82
12	0	0	0	0	0	0	2	1	3	52.88	48.39	54.32	73.18	62.10	59.52
13	0	0	0	0	0	0	2	1	4	53.25	49.10	56.15	74.33	63.25	60.12
14	0	0	0	0	0	0	2	1	4	53.60	49.81	57.98	75.49	64.40	60.71
15	0	0	0	0	0	0	2	1	4	54.16	50.87	60.72	77.23	66.13	61.60
16	0	0	0	0	0	0	2	1	4	54.74	51.94	63.47	78.97	67.86	62.48
17	0	0	0	0	0	1	2	1	4	55.40	53.01	66.21	80.71	69.60	63.36
18	0	1	0	0	0	3	2	3	5	56.81	54.79	70.79	83.64	72.51	64.81
19	0	4	2	3	0	4	2	3	5	58.23	56.62	75.50	86.69	75.44	66.24
20	0	0	0	0	0	0	2	1	4	54.16	50.87	60.72	77.23	66.13	61.60
21	0	0	0	0	0	0	2	1	4	53.25	49.10	56.15	74.33	63.25	60.12
22	0	0	0	0	0	0	2	0	2	50.71	44.13	43.37	66.29	55.25	55.92
23	0	0	0	0	0	0	2	0	1	49.34	41.29	36.07	61.73	50.71	53.48
24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	47.15	36.70	24.23	54.39	43.37	49.47
										1229.56	1075.48	1086.01	1620.26	1354.24	1353.74

Conforme descrito na seção 4.2 utilizou-se uma estratégia de ajuste das soluções dos processos de FPO para intervalos consecutivos, de modo que inicialização de um processo de FPO para um dado intervalo é feita a partir da solução do intervalo anterior. O impacto deste ajuste no processo de solução do PDR como é mostrado na Figura 2 a seguir. Percebe-se uma diminuição bastante significativa do número de iterações Newton com o uso da técnica de acompanhamento de carga. Repare que a solução do FPO correspondente ao primeiro intervalo de tempo (1:00h da manhã) levou 27 iterações para obter a convergência. Já o processo das 2:00h, inicializado a partir da solução do FPO de 1:00h, levou apenas mais uma iteração para atingir a solução ótima. Os intervalos que se seguem são ajustados consecutivamente desta forma, o que diminui consideravelmente o esforço de solução do PDR como um todo. Percebe-se ainda na figura um aumento no número de iterações nos intervalos correspondentes às 18:00h, 19:00h e 20:00h. Nestes intervalos as soluções de um intervalo a outro possuem variações maiores, devido a introdução de

Figura 1- Modelo Desacoplado PDA - PDR



novas restrições retardando o processo de solução do FPO para tais intervalos.

Dado que a solução do PDR inicial mostrada na Tabela 2 apresenta algumas violações nos intervalos correspondentes às 18:00h e 19:00h, executou-se novamente para tais intervalos o processo de solução do FPO, agora com a geração de potência ativa liberada, e obteve-se a solução mostrada na Tabela 3. Percebe-se que as todas as violações nestes dois intervalos foram contornadas, entretanto, conforme se pode ver na parte inferior da Tabela, as metas energéticas ficaram desbalanceadas. Nota-se ainda desta tabela que foi necessária uma modificação razoável no despacho ativo para acomodar as restrições reativas. Como as metas ficaram desbalanceadas, é necessário reprogramar os demais intervalos, de modo a redistribuir as variações de geração originadas pela reprogramação dos intervalos correspondentes às 18:00h e 19:00h.

Figura 2 – Evolução do PDR

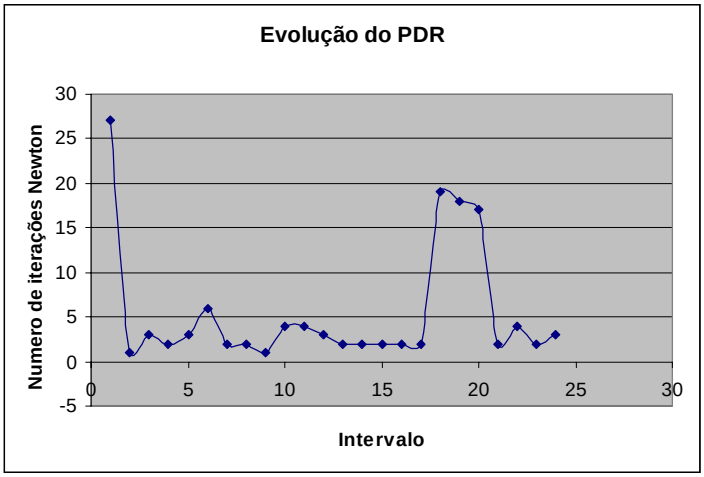


Tabela 3 – Solução do PDR (com redespachos – caso2)

	Violações				Restrições Lim.					Gerações (MW)					
Int.	Mw	V	C	Tp	Mw	V	C	Tp	Mvar	Ger1	Ger2	Ger5	Ger8	Ger11	Ger13
1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	46.13	34.58	18.77	51.02	40.00	47.60
2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	45.80	33.88	16.95	49.91	38.87	46.97
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	44.43	31.06	9.68	45.46	34.39	44.44
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	42.83	27.56	4.00	40.83	29.55	41.71
5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	46.13	34.58	18.77	51.02	40.00	47.60
6	0	0	0	0	0	0	2	0	1	49.34	41.29	36.07	61.73	50.71	53.48
7	0	0	0	0	0	0	2	0	2	51.05	44.84	45.19	67.43	56.38	56.52
8	0	0	0	0	0	0	2	0	2	52.12	46.97	50.67	70.87	59.81	58.33
9	0	0	0	0	0	0	2	0	2	52.30	47.32	51.58	71.45	60.38	58.63
10	0	0	0	0	0	0	2	1	3	52.68	48.03	53.41	72.60	61.52	59.22
11	0	0	0	0	0	0	2	1	3	53.07	48.74	55.24	73.75	62.67	59.82
12	0	0	0	0	0	0	2	1	3	52.88	48.39	54.32	73.18	62.10	59.52
13	0	0	0	0	0	0	2	1	4	53.25	49.10	56.15	74.33	63.25	60.12
14	0	0	0	0	0	0	2	1	4	53.60	49.81	57.98	75.49	64.40	60.71
15	0	0	0	0	0	0	2	1	4	54.16	50.87	60.72	77.23	66.13	61.60
16	0	0	0	0	0	0	2	1	4	54.74	51.94	63.47	78.97	67.86	62.48
17	0	0	0	0	0	1	2	1	4	55.40	53.01	66.21	80.71	69.60	63.36
18	0	0	0	0	0	1	2	1	4	13.89	48.23	127.37	111.21	61.62	38.88
19	0	0	0	0	2	4	2	3	4	3.99	4.00	154.16	177.74	40.26	37.71
20	0	0	0	0	0	0	2	1	4	54.16	50.87	60.72	77.23	66.13	61.60
21	0	0	0	0	0	0	2	1	4	53.25	49.10	56.15	74.33	63.25	60.12
22	0	0	0	0	0	0	2	0	2	50.71	44.13	43.37	66.29	55.25	55.92
23	0	0	0	0	0	0	2	0	1	49.34	41.29	36.07	61.73	50.71	53.48
24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	47.15	36.70	24.23	54.39	43.37	49.47
										1132.41	1016.29	1221.25	1738.89	1308.19	1299.27

Para compensar este desvio nas metas, os outros intervalos foram reprogramados pelo processo de solução de um novo PDA. Conforme metodologia proposta, neste novo processo de solução do PDA os despachos de geração foram fixados nos intervalos correspondentes às 18:00h e 19:00h e liberados nos demais intervalos. A solução do PDA é mostrada nas colunas Gerações MW dada na Tabela 4. Comparando com a solução apresentada na Tabela 3, nota-se que a reprogramação necessária para compensar o desvio foi pequena.

Tabela 4 - solução Final PDA/PDR (caso 2)

	Violações				Restrições Lim.					Gerações (MW)					
Int.	Mw	V	C	Tp	Mw	V	C	Tp	Mvar	Ger1	Ger2	Ger5	Ger8	Ger11	Ger13
1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	50.52	37.49	12.31	45.57	42.33	50.27
2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	50.18	36.78	10.49	44.45	41.21	49.64
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	48.69	33.62	4.00	39.88	36.55	47.06
4	0	0	0	0	1	0	1	0	0	46.25	27.65	4.00	34.46	30.46	43.74
5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	50.52	37.49	12.31	45.57	42.33	50.27
6	0	0	0	0	0	0	2	0	1	53.74	44.22	29.65	56.31	53.01	56.08
7	0	0	0	0	0	0	2	0	2	55.45	47.78	38.79	62.03	58.68	59.08
8	0	0	0	0	0	0	2	0	2	56.53	49.91	44.28	65.49	62.09	60.86
9	0	0	0	0	0	0	2	0	2	56.72	50.27	45.19	66.07	62.66	61.15
10	0	0	0	0	0	0	2	1	3	57.10	50.98	47.02	67.23	63.80	61.74
11	0	0	0	0	0	0	2	1	4	57.48	51.69	48.86	68.38	64.95	62.33
12	0	0	0	0	0	0	2	1	3	57.29	51.34	47.94	67.80	64.37	62.03
13	0	0	0	0	0	0	2	1	4	57.65	52.05	49.77	68.96	65.52	62.62
14	0	0	0	0	0	0	2	1	4	58.00	52.76	51.60	70.13	66.67	63.20
15	0	0	0	0	0	0	2	1	4	58.56	53.83	54.35	71.87	68.39	64.08
16	0	0	0	0	0	0	2	1	4	59.16	54.90	57.10	73.62	70.12	64.95
17	0	0	0	0	0	2	2	1	5	59.83	55.97	59.85	75.37	71.85	65.81
18	0	0	0	0	0	1	2	1	4	13.89	48.23	127.37	111.21	61.62	38.88
19	0	0	0	0	0	4	2	3	4	3.96	4.00	154.17	177.75	40.27	37.72
20	0	0	0	0	0	0	2	1	4	58.56	53.83	54.35	71.87	68.39	64.08
21	0	0	0	0	0	0	2	1	4	57.65	52.05	49.77	68.96	65.52	62.62
22	0	0	0	0	0	0	2	0	2	55.10	47.06	36.96	60.89	57.54	58.48
23	0	0	0	0	0	0	2	0	1	53.74	44.22	29.65	56.31	53.01	56.08
24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	51.54	39.61	17.78	48.94	45.70	52.12
										1228.09	1077.75	1087.58	1619.13	1357.04	1354.89

Este novo perfil de geração, estabelecido pelo PDA foi outra vez submetido à avaliação reativa feita pelo PDR. A solução desta avaliação reativa é também sintetizada na Tabela 4, sendo que todo o perfil de geração atualmente calculado pelo PDA foi fixado. Nesta solução final, obtida a partir da iteração entre as soluções dos modelos de PDR e PDA, percebe-se que não há violação alguma. Tal perfil de geração atende portanto às restrições ativas e reativas do problema de PDAC além de atender as restrições de metas energéticas.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho é proposta uma nova formulação para o problema de pré-despacho, que representa de forma mais acurada os aspectos ativos e reativos do sistema de transmissão. O novo modelo proposto subdivide o problema nos subproblemas de Pré-Despacho Ativo (PDA) e Reativo (PDR). Neste tipo de subdivisão procurou-se tirar proveito de dois aspectos básicos: o desacoplamento ativo-reativo, presente nos sistemas de transmissão, e a incorporação das restrições dinâmicas (que retardam o processo de solução) apenas no modelo de PDA (computacionalmente mais simples). Uma das principais características desta formulação é a sua capacidade de despachar a geração levando em conta problemas de tensão/reativos, apontados como responsáveis por instabilidades nos sistemas. O trabalho propõe ainda uma metodologia de resolução do subproblema de PDR que minimiza consideravelmente seu esforço de solução. A abordagem proposta foi avaliada em um sistema teste em dois estudos básicos, comprovando sua capacidade de calcular despachos de geração factíveis com relação às principais restrições operacionais dos sistemas de geração e de transmissão, incorporando seus aspectos ativo e reativo.

AGRADECIMENTOS

Este artigo contou com apoio financeiro da FAPESP, através do projeto 97/00414-5.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Bell, K. R. W. and Kirschen, D. S. (1999) “Improved Sensitivities for MW Dispatch for Control of Voltage” , *International Conference on Power Industry Computer Applications – PICA 99*.

Bonaert, A. P., and El-Abiad, A.H., Koivo and A. J. (1971) “Optimal Scheduling of Hydrothermal Power Systems”, *AIEE Trans. on Power Apparatus and System*, vol. PAS-91, pp.263-271.

El-Hawary, M. E. and Tsang D. H. (1986) “The Hydrothermal Optimal Load Flow, a Practical Formulation and Solution Techniques Using Newton´s Approach”, *IEEE trans. On Power Syst.*, vol PWRS-1, no. 3, pp 157- 167, August.

Hong, Y. Y. and Liao, C. M. (1995) “Short-Term Scheduling of Reactive Power Controlers " , *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp 860-868, May.

Luo, G. X.; Habibollahzadeh, H. and Semlyen, A. (1989) “Short-Term Hydro-Thermal Dispatch Detailed Model and Solutions”, *IEEE/PES Winter Meeting*, WM 169-4 PWRS, New York.

Nanda, J. and Bijwe, P. R. (1981) “Optimal Hydrothermal Scheduling With Cascaded Plants Using Progressive Optimality Algorithm”, *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, N. 4, pp. 2093-2099.

Nepomuceno, L. and Santos Jr., A. (1997) Equivalent Optimization Model For Loss Minimization: Suitable Analysis Approach ; *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 1403 – 1412, November.

Ohishi, T. and Soares, S. and Carvalho, M. F. H. (1991), “A Short-Term Hydrothermal Scheduling Approach for Dominantly Hydro Systems”, *IEEE Trans on Power Syst.* vol 6,. n.2, May.

Ohishi, T. and Soares, S. (1995) "Hidro-Dominated Short-Term Hydrotermal Scheduling Via a Hybrid Simulation – Optimisation Approach: a Case Study", *IEE Proc. – C*, vol. 142, no. 6, pp 569-575, November.

Soares, S. and Salmazo, C. T. (1997) “Minimum Loss Predispatch Model for Hidroelectric Power Systems” , *IEEE Trans. On Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1220 – 1228, August.

Sun, D.I.; Ashley B.; Brewer, B.; Hugues, A. and Tinney , W. F. (1984) "Optimal Power Flow by Newton Approach" , *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS 103, no. 10, October.

Sun,, D. I. B.; Hugues, A.; Tinney, W. F.; Bright, J. M. and Lamont, J. (1987) "Optimal Power Flow Solution by Newton's Method", *IEEE Tutorial Course Reactive Problems: Basics, Problems and Solutions*, pp 35-48.