

OTIMIZAÇÃO DA FASE FLUENTE DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

EDUARDO M. VIANA, EDIMAR J. OLIVEIRA, NELSON MARTINS, LEONARDO W. OLIVEIRA E JOSÉ L. R. PEREIRA

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora
Campus da UFJF, Fac. de Engenharia, CEP 36015-400, Juiz de Fora, MG
em.viana@gmail.com, edimar.oliveira@ufjf.edu.br, nelson@cepel.br,
leonardowiller@yahoo.com.br, jluiiz@ieee.org*

Abstract— This work describes a methodology for automating the studies related to the restoration of long transmission corridors. The proposed tool aims at the establishment of network procedures for leading to a minimum reactor configuration connected to the system and the maximum load pick-up during this initial phase of restoration. The restoration scenarios are represented through sub problems. Benders decomposition technique associated with primal-dual interior points method is used to solve the proposed non-linear optimization problem. Case studies are conducted and analyzed to verify the effectiveness of the proposed methodology.

Keywords— Power System Restoration, Optimal Power Flow, Benders Decomposition, Capability Curve, Sustained Overvoltages, Shunt Reactors.

Resumo— Este trabalho descreve uma metodologia para auxiliar os estudos relacionados à recomposição de longos corredores de transmissão. A ferramenta proposta visa o estabelecimento de procedimentos para a rede que conduza a uma configuração mínima de reatores conectados ao sistema e a máxima tomada de carga durante esta fase inicial de recomposição. Os diversos cenários de recomposição são representados através de subproblemas. A técnica de decomposição de Benders associada à metodologia primal-dual de pontos interiores é utilizada para solução do problema de otimização não-linear proposto. Estudos de caso são conduzidos e analisados para verificar a eficácia da metodologia proposta.

Palavras-chave— Recomposição de Sistemas de Potência, Fluxo de Potência Ótimo, Decomposição de Benders, Curva de Capacidade, Sobreensões Sustentadas, Reatores.

1 Introdução

O aumento da dimensão do sistema elétrico resulta em maior complexidade de sua operação em tempo real. Falhas no sistema de potência podem afastá-lo do ponto de operação original, comprometendo o fornecimento de energia elétrica, ou ainda retirá-lo totalmente de operação (blecaute) (Wu *et alii*, 1988). Após a ocorrência de um blecaute inicia-se o processo de recomposição do sistema elétrico, cujo objetivo é atingir, no menor tempo possível, as condições normais de operação.

A recomposição de um sistema elétrico é um processo complexo que envolve inúmeras questões (Adibi, 2000), desde estudos de fluxo de carga até transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. Os estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos são feitos somente após a análise de regime permanente.

No Brasil, até a segunda metade da década de 70 os procedimentos de recomposição eram efetuados de forma centralizada pelos Centros de Operação (Gomes *et alii*, 2003). Estes procedimentos não eram suficientemente ágeis e o tempo necessário para recomposição do sistema era elevado. A partir do final da década de 70, as concessionárias do setor elétrico brasileiro iniciaram os estudos no sentido de descentralizar os procedimentos de recomposição. O processo de recomposição foi então estruturado em duas etapas, denominadas fase fluente e fase coordenada.

A fase coordenada envolve o fechamento de anéis ou paralelos entre as áreas já restabelecidas na fase fluente. Durante o fechamento de anéis ou paralelos entre os sistemas, podem ocorrer esforços torsionais nos eixos dos geradores (Martins *et alii*, 2004 e Oliveira *et alii*, 2008). Os impactos causados pelo fechamento em anel são proporcionais à diferença angular entre os pólos dos disjuntores que efetuarão o fechamento do anel (Martins *et alii*, 2008). Essa grandeza é conhecida na literatura como *standing phase angle* (SPA). Os fechamentos realizados com alto valor de SPA são perigosos, pois podem causar danos às unidades geradoras mais próximas do ponto de fechamento em anel.

A fase fluente corresponde ao início do processo de recomposição, onde é suposto que o sistema está completamente desenergizado. Nesta fase cabe aos operadores tomar as decisões seguindo um conjunto de instruções encontradas nos manuais de operação, havendo mínima comunicação entre os operadores envolvidos (ONS, 2001).

Nesta fase é definida a compatibilização de carga e geração das áreas geoeletricas e a transição entre fase fluente e coordenada ocorre quando as empresas controladoras da geração e transmissão de uma área geoeletrica informam ao Centro de Operação o término da execução de procedimentos pré-estabelecidos.

Durante a fase fluente de recomposição, têm-se corredores energizados radialmente e os procedimentos adotados visam a recomposição de áreas geoeletricas sempre compatibilizando carga e geração. A

recomposição do sistema inicia-se a partir de usinas hidrelétricas com capacidade de auto-restabelecimento, também denominado *black-start*. A partir do número mínimo de unidades geradoras *black-start* determina-se a disponibilidade inicial de geração de uma área geoeletrica (Gomes *et alii*, 2003).

A recomposição fluente deve preferencialmente evoluir mantendo-se todo o corredor a vazio (ONS,2001) com tomada de carga somente após o corredor estar totalmente restabelecido (Alves *et alii*, 2005 e Alves *et alii*, 2007). Nesta configuração, o sistema está sujeito à ocorrência de sobretensões que devem ser controladas utilizando-se os recursos disponíveis (Adibi *et alii*, 1992) tais como reatores, ajustes de tapas de transformadores, ajustes da tensão de geração e a potência reativa dos geradores, calculada em função de sua curva de capacidade (Monticelli *et alii*, 2000).

Desta forma, deve ser definida uma configuração mínima de rede capaz de viabilizar o processo de recomposição mantendo a tensão em limites aceitáveis que variam de 90% a 110% da tensão nominal (ONS, 2001). Esta faixa de variação depende do nível de tensão do sistema em análise.

Durante a fase fluente, não é possível atender toda a carga do sistema e desta forma, é importante definir o montante máximo de carga que pode ser suprido com segurança.

Nos estudos de recomposição do Sistema Elétrico Brasileiro, a definição da configuração mínima de reatores e da carga tomada é feita através estudos de rejeição de carga, em programas de fluxo de potência e de transitórios eletromecânicos (Gomes *et alii*, 2002) e (Gomes *et alii*, 2004). A definição desta configuração é feita em procedimentos de tentativa e erro e ainda não existe uma ferramenta que determine de forma automática a configuração mínima de reatores conectados nesta fase de recomposição.

Neste sentido, a metodologia apresentada neste trabalho visa determinar de forma automática a configuração mínima de reatores conectados ao sistema bem como o montante máximo de carga que pode ser tomado durante a fase fluente da recomposição. A metodologia permite ainda o ajuste da tensão de geração para estabelecimento do corredor de recomposição. A ferramenta proposta é baseada em fluxo de potência ótimo (Granville, 1993) associado à decomposição matemática de Benders (Benders, 1962).

Neste artigo não são levados em conta os efeitos transitórios de tensão assim como qualquer fenômeno associado ao desempenho de frequência do sistema. Aspectos relativos ao desempenho de frequência do sistema em regime permanente, durante a recomposição fluente serão objetos de futuros trabalhos.

2 Metodologia Proposta

No modelo proposto consideram-se os diversos cenários de recomposição fluente, correspondentes à energização de novos trechos de linhas de transmissão. A modelagem proposta por técnica de decomposição de Benders é mostrada na Figura 1.

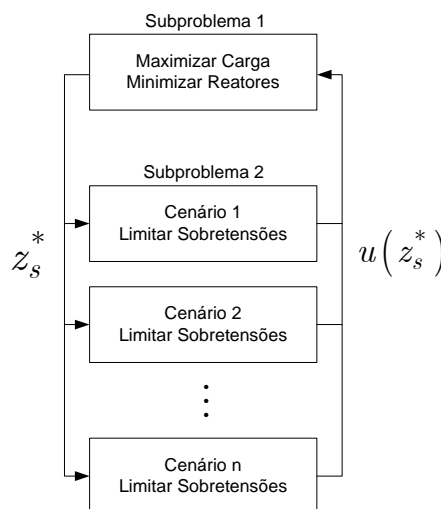


Figura 1 – Decomposição de Benders.

Neste esquema, o subproblema 1 corresponde ao sistema completo, onde o objetivo é maximizar a carga atendida e minimizar o número de reatores conectados. A carga tomada neste estágio deve obedecer a critérios de tensão mínima. O subproblema 2 corresponde aos diversos cenários de recomposição, obtidos do sistema completo, simulando-se rejeição de carga nas barras do sistema de transmissão.

Neste ponto deve ser feita uma observação a respeito do subproblema 1. Este subproblema é dividido em duas etapas, sendo uma contínua e outra discreta. Na etapa contínua é definida a mínima alocação de potência reativa, em barras e circuitos. Esta etapa é formulada como:

$$\text{Max } \alpha_i + \text{Min } \sum QA^i + \sum QA^{ij} \quad (1)$$

$$\text{sa/} \\ PG_i - (1 + \alpha_i) PL_i - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0 \quad (1.1)$$

$$QG_i - (1 + \alpha_i) QL_i - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} - QA^i = 0 \quad (1.2)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (1.3)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (1.4)$$

Restrições do Modelo de Máquina Síncrona

Restrições da Curva de Capacidade.

Restrição do Corte de Benders.

Onde:

QA^i Potência reativa alocada na barra i .

QA^{ij} Potência reativa alocada no circuito $i-j$.

α_i Carregamento na barra i , onde se deseja

	suprir a máxima carga.
PG_i	Geração de potência ativa na barra i .
QG_i	Geração de potência reativa na barra i .
P_{ij}	Fluxo de potência ativa no ramo $i-j$.
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa no ramo $i-j$. Este termo engloba o termo QA^{ij} .
PL_i	Carga ativa na barra i .
QL_i	Carga reativa na barra i .
Ω_i	Conjunto de barras adjacentes à barra i .

Após esta etapa, o algoritmo seleciona o valor de alocação de potência reativa que mais se aproxima da capacidade nominal do reator, para que este reator seja fechado. O caso contínuo é executado novamente, com este reator fechado, e esse processo continua até que não haja mais reatores a serem fechados. Esta etapa configura a etapa discreta

O problema de recomposição requer uma representação detalhada da máquina síncrona já que neste processo a máquina é forçada a absorver potência reativa gerada pelo corredor em vazio, sendo esta absorção limitada pela curva de capacidade. As restrições de máquinas síncronas, curva de capacidade e corte de Benders são mostradas em itens subsequentes.

Na Figura 1, os cenários 1, 2,... n são os estágios de recomposição correspondentes às energizações feitas no sistema. Nestes cenários o objetivo é limitar as sobretensões resultantes do sistema a vazio. A Figura 2 mostra um esquema de recomposição em três cenários ou estágios.

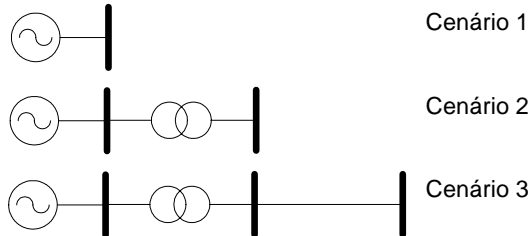


Figura 2 – Recomposição em estágios.

No esquema apresentado na Figura 1, o subproblema 1 fornece as decisões sobre reatores conectados, tensão de geração, e carga tomada, representado pelo termo z_s^* . As decisões do subproblema 1 podem não ser viáveis para a recomposição do corredor, originando sobretensões no sistema.

Desta forma, é incluída nestes cenários uma função objetivo de mínima alocação de potência reativa fictícia, necessária para garantir a convergência do subproblema 2. Esta alocação de potência reativa fictícia se faz necessária para manter as tensões dentro dos limites do FPO, dados pela restrição (2.1). A ocorrência desta alocação indica que na prática não é possível restabelecer o corredor com as decisões obtidas do subproblema 1.

Os cenários de recomposição são formulados como:

$$\text{Min} \sum_{i \in \Omega_n} C_Q QF_i^n \quad (2)$$

$$\text{s.a} \\ PG_i^n - PL_i^n - \sum_{j \in \Omega_i^n} P_{ij} = 0 \quad (2.1)$$

$$QG_i^n - QL_i^n - \sum_{j \in \Omega_i^n} Q_{ij} - QA_i^* - QF_i^n = 0 \quad (2.2)$$

$$V_{i_{\min}}^n \leq V_i^n \leq V_{i_{\max}}^n \quad (2.3)$$

Restrições do Modelo de Máquina Síncrona
Restrições da Curva de Capabilidade.

Onde:

C_Q	Custo de alocação de potência reativa fictícia, neste caso adotado o valor de 10.
QF_i^n	Potência reativa fictícia alocada na barra i no cenário n .
PG_i^n	Geração de potência ativa na barra i no cenário n .
QG_i^n	Geração de potência reativa na barra i no cenário n .
PL_i^n	Carga ativa na barra i no cenário n .
QL_i^n	Carga reativa na barra i no cenário n .
QA_{ij}	Fluxo de potência reativa no circuito ij . Neste termo está incluso os reatores de linha conectados no subproblema 1, fixos no subproblema 2.
QA_i^*	MVar nominal de reator alocado na barra i no subproblema 1, fixo no subproblema 2.
Ω_n	Conjunto de barras no cenário n .
Ω_i^n	Conjunto de barras adjacentes à barra i no cenário n .

A simulação dos cenários de recomposição produz um corte de Benders ao subproblema 1, na Figura 1, representado pelo termo $u(Z_s^*)$. Este corte é incorporado ao problema como uma nova restrição no sentido de alterar as decisões sobre reatores conectados, tensão de geração e carga tomada.

Os cenários são avaliados a cada iteração do processo de Benders e sempre que ocorre alocação de potência reativa fictícia, um novo corte de Benders é enviado ao subproblema 1. O processo continua até que todos os cenários sejam viáveis, ou seja, sem alocação de potência reativa fictícia, estabelecendo o corredor de recomposição fluente.

A expressão (3) apresenta a equação de corte de Benders (Benders, 1962) obtida através das simulações dos cenários.

$$\sum_{n \in N} \left[\sum_{s \in \Omega_{z_{s2}}} \left[\sum_{r \in \Omega_{z_{r2}}} (\pi_{nr2} E z_{s2r}) z_{s2} \right] \right] \geq \sum_{n \in N} \left[w_{n2} + \sum_{s \in \Omega_{z_{s2}}} \left[\sum_{r \in \Omega_{z_{r2}}} (\pi_{nr2} E z_{s2r}) z_{s2}^* \right] \right] \quad (3)$$

Onde:

- N Número de cenários de recomposição inviáveis.
- $\Omega_{z_{s2}}$ Conjunto de variáveis de decisão do subproblema 1.
- $\Omega_{z_{R2}}$ Conjunto de restrições dos cenários associadas com z_{s2}^* .
- w_{n2} Valor da função objetivo no cenário n .
- Ez_{s2r} Derivada parcial da restrição r em relação a variável z_{s2} .
- π_{nr2} Multiplicador de Lagrange obtido dos subproblemas associado com a restrição r , para o cenário n .

Ao final do processo tem-se como resposta, os reatores conectados ao sistema, a carga tomada, e a tensão de geração da usina participante do processo de recomposição.

2.1. Modelo de Máquina Síncrona

O modelo de máquina utilizado é o modelo de pólos salientes, utilizado na modelagem das usinas de geração hidráulicas. As máquinas são modeladas como fonte de tensão constante ($E\angle\delta$) atrás da reatância, neste caso a reatância de eixo direto e reatância de eixo quadratura (X_d, X_q) (Bretas *et alii*, 2003). Tem-se:

$$PG_i = \frac{V_i E a_i}{X d_i} \text{sen } \delta_i + \frac{V_i^2}{2} \left(\frac{1}{X q_i} - \frac{1}{X d_i} \right) \text{sen } 2\delta_i \quad (4)$$

$$QG_i = \frac{V_i E a_i}{X d_i} \cos \delta_i - V_i^2 \left(\frac{\text{sen}^2 \delta_i}{X q_i} + \frac{\cos^2 \delta_i}{X d_i} \right) \quad (5)$$

Onde:

- PG_i Potência ativa gerada pelo gerador i .
- QG_i Potência reativa gerada pelo gerador i .
- $E a_i$ Tensão interna do gerador i .
- δ_i Ângulo da tensão interna do gerador i .
- V_i Tensão terminal do gerador i .
- $X d_i$ Reatância de eixo direto do gerador i .
- $X q_i$ Reatância de eixo quadratura do gerador i .

2.2. Modelo de Curva de Capabilidade

Tradicionalmente, utiliza-se um modelo linear para os limites de potência reativa das máquinas síncronas nos problemas de fluxo de potência ótimo. No entanto, em estudos de recomposição é necessário um modelo mais detalhado destes limites, dados pela curva de capabilidade, tendo em vista que o gerador pode ser solicitado a operar em condições extremas de subexcitação. A curva de capabilidade completa é composta por cinco limites, sendo cada um deles descrito por uma equação específica.

O limite de corrente de armadura é considerado na literatura (Lof *et alii*, 1995) como o lugar geométrico para a corrente de armadura máxima constante, o qual corresponde a um círculo com centro na origem do plano PG-QG. A equação deste círculo é dada por:

$$PG_i^2 + QG_i^2 \leq (V_i I_{a_{\max_i}})^2 \quad (6)$$

A máxima capacidade da máquina primária é representada no plano PG-QG através de uma reta paralela ao eixo QG e passando pelo ponto $Pmec_{\max_i}$, correspondendo à máxima potência mecânica da turbina.

$$PG_i \leq Pmec_{\max_i} \quad (7)$$

As equações (6) e (7) são obtidas de maneira simples e direta (Monticelli *et alii*, 2000). Os três limites restantes da curva de capacidade são representados por equações analíticas obtidas da manipulação das equações (4) e (5). O limite excitação mínima é dado por:

$$PG_i^2 + \left(QG_i + \frac{V_i^2}{X q_i} \right)^2 \geq \left(\frac{V_i E a_{\min_i}}{X d_i} + V_i^2 \left(\frac{1}{X q_i} - \frac{1}{X d_i} \right) \cos \delta_i \right)^2 \quad (8)$$

Onde:

$E a_{\min_i}$ Mínima tensão interna do gerador i .

O limite de excitação máxima é uma curva concêntrica com a curva do limite de excitação mínima. Esta curva é obtida de (8) apenas substituindo o termo $E a_{\min_i}$ pelo termo $E a_{\max_i}$.

$$PG_i^2 + \left(QG_i + \frac{V_i^2}{X q_i} \right)^2 \leq \left(\frac{V_i E a_{\max_i}}{X d_i} + V_i^2 \left(\frac{1}{X q_i} - \frac{1}{X d_i} \right) \cos \delta_i \right)^2 \quad (9)$$

Onde:

$E a_{\max_i}$ Máxima tensão interna do gerador i .

Na literatura encontram-se trabalhos (Lof *et alii*, 1995) que tratam o limite de estabilidade do gerador como uma reta onde o valor mínimo de geração é função do ângulo interno máximo, δ_{\max} . Na prática, para uma máquina de pólos salientes, o ângulo máximo em que pode operar o gerador não é fixo, mas sim, uma função da excitação da máquina. Considerando este fato, o limite de estabilidade estática é representado pela equação.

$$PG^2 \left(\frac{V^2}{X_d} + QG \right) \leq - \left(\frac{V^2}{X_q} + QG \right)^3 \quad (10)$$

2.3. Reatores

Os reatores de barra e de linha são modelados como impedância constante. A potência reativa entregue por este dispositivo é função do quadrado da tensão, sendo descrita pela expressão (11).

$$Q_{sh}^i = b_{sh}^i V_i^2 \quad (11)$$

Os reatores de linha operam em conjunto com as linhas de transmissão de forma que só entram em operação através da recomposição da linha.

3 Estudo de Casos

A metodologia proposta é testada na recomposição da área Rio de Janeiro, mostrada na Figura 4. O principal procedimento de recomposição desta área baseia-se na usina de Marimbondo e no sistema de transmissão 500 kV conectando esta usina à área Rio de Janeiro, e também do sistema de 138 kV da LIGHT (Gomes *et alii*, 2003).

Foram consideradas cinco unidades geradoras conectadas em Marimbondo conforme (Gomes *et alii*, 2002 e Gomes *et alii*, 2004).

Para a recomposição desta área, tem-se como opção de suporte de potencia reativa os reatores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Opções de reatores no corredor Marimbondo – Rio de Janeiro

Localização	Valor
Linha 500KV - Marimbondo - Araraquara, lado de Araraquara	73,4 MVar
Linha 500KV - Araraquara – Poços de Caldas, lado de Araraquara	73,4 MVar
Linha 500 KV LT Poços de Caldas - Itajubá, lado de Poços de Caldas.	136 MVar
Barra 500 KV – Cachoeira Paulista	136 MVar
Linha 500 KV - Cachoeira Paulista Adrianópolis, lado de Cachoeira Paulista.	136 MVar
Linha 500 KV - Cachoeira Paulista Adrianópolis, lado de Adrianópolis.	136 MVar
Barra 500 KV – Adrianópolis	136 MVar

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram os resultados obtidos através da primeira execução do subproblema 1.

Tabela 2 – Subproblema 1 – 1ª Iteração.

Tensão de geração (pu)	Carga tomada (MVA)
0,929	365,15 + j120,14

Tabela 3 – Reatores – 1ª Iteração.

Localização	Valor
Linha 500 kV – Poços de Caldas – Itajubá	136 MVar

A Figura 3 mostra o ponto de operação da máquina na primeira execução do subproblema 1. Destaca-se, que os geradores estão operando em uma região de subexcitação e próximo a um de seus limites operacionais e desta forma é importante a representação detalhada dos limites de geração de potência reativa para análise de recomposição fluente.

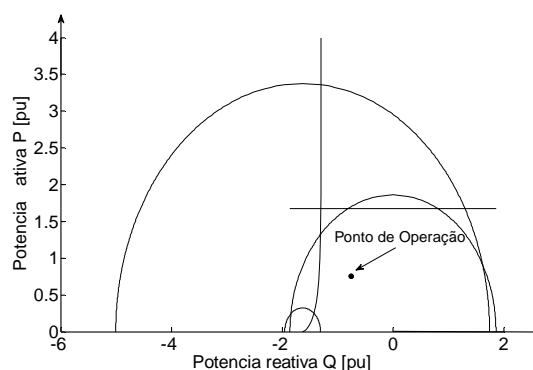


Figura 3 – Ponto de Operação.

As simulações dos diversos cenários, correspondentes às diversas etapas de recomposição do corredor, resultaram na alocação de potência reativa fictícia. Portanto, somente com um reator e com tensão de geração de 0,929 pu, os cenários de recomposição não são viáveis e foram necessárias mais quatro iterações do algoritmo de Benders para a convergência global. A Tabela 4 e a Tabela 5 mostram os resultados finais.

Tabela 4 – Subproblema 1 – 2ª Iteração.

Tensão de geração (pu)	Carga tomada (MVA)
0,905	159,44+j52,45

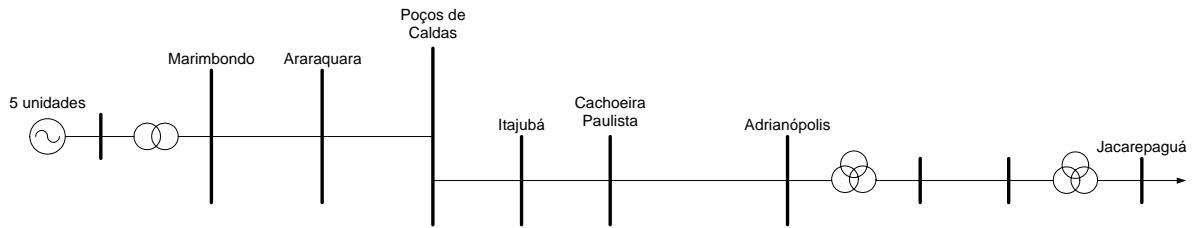


Figura 4 – Diagrama de Recomposição da área Rio de Janeiro

Tabela 5 – Reatores – 2ª Iteração.

Localização	Valor
Linha 500KV - Marimbondo - Araraquara, lado de Araraquara	73,4 MVar
Linha 500 KV LT Poços de Caldas - Itajubá, lado de Poços de Caldas.	136 MVar
Barra 500 KV – Cachoeira Paulista	136 MVar
Linha 500 KV - Cachoeira Paulista Adrianópolis, lado de Adrianópolis.	136 MVar

A Figura 5 mostra a evolução da carga tomada pelo sistema e da quantidade de potencia reativa fornecida pelos reatores.

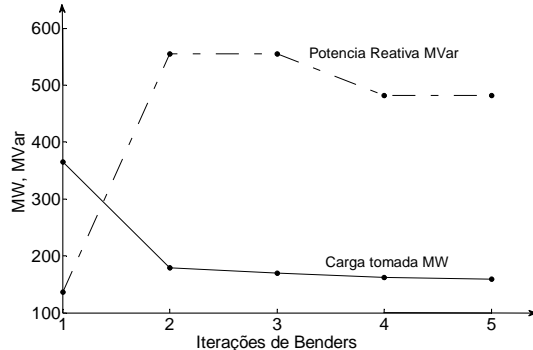


Figura 5 – Comportamento da carga e da potência reativa do sistema.

Na Figura 5, pode ser visto que inicialmente o sistema toma mais carga e tem um número reduzido de reatores conectados. Entretanto, esta não é uma condição viável pois não atende a todos os cenários de recomposição. Desta forma, ao final do processo iterativo tem-se um maior número de reatores conectados e uma menor carga suprida.

No caso do sistema totalmente a vazio, sem conexão dos reatores, resultaria maior tomada de carga. No entanto, esta configuração provocaria sobretensões elevadas no corredor de recomposição em caso de rejeição de carga.

A Figura 6 mostra a evolução da tensão de geração durante o processo iterativo.

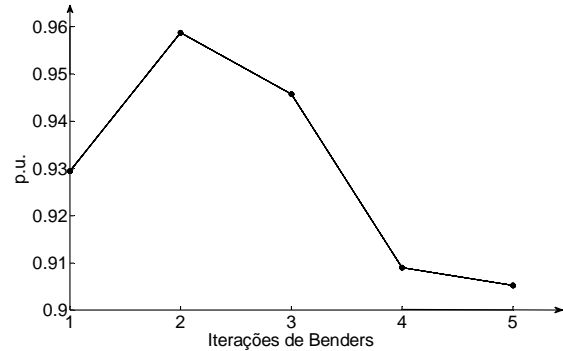


Figura 6 – Tensão de geração em Marimbondo.

A Figura 7 mostra a alocação de potência reativa fictícia durante o processo.

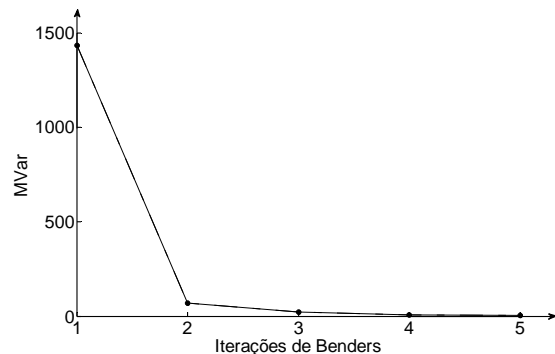


Figura 7 – Potência reativa fictícia durante a convergência.

Uma vez determinada a configuração final de reatores no sistema, pode-se proceder ao desmembramento destes resultados numa seqüência de procedimentos a serem adotados para a recomposição fluente da área geoeletrica.

1. Ajuste da tensão de geração de Marimbondo em 0,905 pu.
2. Energização do Transformador elevador.
3. Conexão do Reator de 73,4 MVar na linha Marimbondo – Araraquara, lado de Araraquara
4. Energização da linha Marimbondo – Araraquara 500 kV.
5. Conexão do Reator de linha de 136 MVar na linha Poços de Caldas – Itajubá 500 kV, no terminal de Poços de Caldas.
6. Energização da linha Araraquara – Poços de Caldas 500 kV.
7. Energização da linha Poços de Caldas – Itajubá 500 kV.

8. Conexão do reator de barra de 136 MVar em Cachoeira Paulista 500 kV.
9. Energização da linha Itajubá – Cachoeira Paulista 500 kV.
10. Conexão do reator de 136,0 MVar na linha Cachoeira Paulista – Adrianópolis 500 kV, no terminal de Adrianópolis.
11. Energização da linha Cachoeira Paulista – Adrianópolis 500 kV.
12. Energização do transformador 500 – 345 kV de Adrianópolis.
13. Energização da linha Adrianópolis – Jacarepaguá 345 kV.
14. Energização da linha Jacarepaguá 345 kV - Jacarepaguá 138 kV.
15. Tomada de carga de 159,44+j52,45 MVA na barra 138 kV de Jacarepaguá.

Destaca-se que os procedimentos obtidos através de simulações de FPO são semelhantes aos encontrados em (Gomes *et alii*, 2002) onde o resultado é obtido através de diversas simulações em regime permanente, transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. Este resultado indica que a metodologia proposta poderá tornar-se ferramenta promissora de auxílio aos operadores na difícil tarefa de recomposição, no menor tempo possível e com segurança.

4 Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho permitiu definir uma configuração mínima de reatores que deve ser conectada ao sistema para a viabilização de um corredor de recomposição fluente. Tal configuração é necessária para combater sobretensões de Efeito Ferranti, e tornar viável todos os estágios de recomposição fluente. Ainda nesta fase, a tomada de carga é efetuada após a recomposição do corredor em vazio. Durante esta fase da recomposição não é possível atender toda a carga do sistema, devendo esta ser fixada em um valor máximo.

A metodologia apresentada determinou também a máxima carga que pode ser conectada ao sistema. Destaca-se, que o aspecto mais importante da metodologia foi a definição da configuração mínima de reatores, necessários para viabilização do corredor de recomposição.

Espera-se que a metodologia apresentada, após melhorias diversas, possa contribuir para otimizar os procedimentos da fase fluente de recomposição dos sistemas de potência, com características similares ao sistema brasileiro.

Desenvolvimentos Futuros

Os desenvolvimentos futuros estarão focados na determinação do número mínimo de unidades geradoras e da modelagem dos compensadores síncronos e

dos Compensadores Estáticos de Reativos como elementos de controle de tensão no processo de recomposição.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro do CNPq, CAPES e FAPEMIG.

Referências Bibliográficas

- Adibi, M. M., “Power System Restoration Issues”, IEEE Power System Restoration – Methodologies and Implementations. IEEE Press, 2000.
- Adibi, M. M., Alexander, R. W., Avramovic, B., “Overvoltage control during restoration”, IEEE Transactions on Power System, November, 1992.
- Alves, F. R. M., Falcão, D. M., Guarini, A. P., Henriques, R. M., Passos Fº, J. A., Recomposição Fluente de Sistemas Elétricos de Potência – Uma Abordagem Via Grafos e Buscas Heurísticas”, XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro de 2007.
- Alves, F. R. M., Henriques, R. M., Passos Fº, J. A., Gomes, P., Guarini, A. P., Guarini, M. C., Gomes, F. V. “Equipando um Programa de Fluxo de Potência para Estudos de Recomposição de Sistemas Elétricos”. In: Anais do XVIII SNPTEE, Curitiba, PR, Brasil, Outubro, 2005.
- Benders, J. F., “Partitioning Procedure for Solving Mixed Variables Programming Problems”, Numerische Mathematik, pp. 238 – 262, 1962.
- Bretas, N. G., Martins, A. C. P., Alberto, L. F. C. Guedes, R. B. L., “Static Simulation of Voltage Collapse Considering The Operational Limits of The Generators” In: IEEE Power System General Meeting, Toronto, 2003.
- Gomes, P., de Lima, A. C. S., de Padua Guarini A., “Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System”, IEEE Transactions on Power Systems, May, 2004.
- Gomes, P., de Lima, A. C. S., Guarini, A. P. “Guidelines for Power System Restoration in the Brazilian System”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume:19, Issue:2, pp. 1159 – 1164, May, 2002.
- Gomes, P., Guarini, A. P., de Lima, A. C. S., Guarini, M. C. “Otimização do processo de recomposição para o sistema interligado nacional”, XVII SNPTEE, outubro, 2003.
- Granville, S., “Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Method”, IEEE Power Engineering Society, n. 93, February 1993.
- Lof, P-A., Anderson, G., Hill, D. J., “Voltage Dependent Reactive Power Limits for Voltage Stability Studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, n.1, 1995.

- Martins, N., Oliveira, E. J., Moreira, W. C., Pereira, J. L. R., Fontoura, R. M., Redispatch to Reduce Rotor Shaft Impacts upon Transmission Loop Closure. In: General Meeting 2008 PES, 2008, Pittsburgh. 2008. v. 1. p. 1-8.
- Martins, N., Oliveira, E. J., Pereira, J. L. R., Ferreira, L. C. A., "Reducing Standing Phase Angles via Interior Point Optimum Power Flow for Improved System Restoration". In: PSCE2004 2004 Power Systems Conference & Expo, 2004, New York, v. 1. p. 1-6
- Monticelli, A., Garcia, A., Introdução a Sistemas de Energia Elétrica, Editora da Unicamp, 2000.
- Oliveira, E. J., Martins, N. ; Pereira, J. L. R., Silva, E. D., Ferreira, L. C. A., "Análise de Fechamento de Anel Via Fluxo de Potência Ótimo e Estabilidade Dinâmica". In: Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, 2004, Rio de Janeiro. IX SEPOPE, 2004. v. 1. p. 1-6
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, Julho, 2001.
- Wu, F. F. , Monticelli, A. J., "Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, Issue 1, February, pp. 10-26, 1988.