

OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA CONSIDERANDO CORTES DE CARGA E DISPOSITIVOS DE CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA

LUIS M. MONROY, PAULA A. O. MOLINA, EDMARCIO A. BELATI, HAROLDO DE FARIA JR.

Laboratório de Análises de Sistemas de Energia Elétrica, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC

Av. dos Estados, 5001 - Bangú, Santo André - SP, 09210-580

E-mails: miguel.monroy@ufabc.edu.br, paula.andrea@ufabc.edu.br,
edmarcio.belati@ufabc.edu.br, haroldo.faria@ufabc.edu.br

Abstract— This paper proposes a methodology to ensure economical and safe operation of electrical transmission systems, aiming at reducing the active power losses and controlling the voltage profile by implementing an Optimal Power Flow (OPF) under contingencies. The proposed methodology considers minimum load shedding and insertion of FACTS devices ("Flexible AC Transmission Systems") for injection or compensation of reactive power. The FACTS devices along with the load shedding considered in the OPF, ensure a safe and economical operation of the system in situations of limitation of generation or contingency. The analyses are performed on a modified IEEE 30 bus test system in different operating conditions, seeking to demonstrate the advantages of optimizing the network using FACTS devices and minimum load shedding. The modelling is made in the programming environment AMPL and uses the optimization package Knitro.

Keywords— Minimum load shedding, FACTS device, Optimal power flow, AMPL, Knitro.

Resumo— Este trabalho propõe uma metodologia para garantir a operação econômica e segura nos sistemas elétricos de transmissão, visando a diminuição das perdas de potência ativa e o controle do perfil de tensão, mediante a implementação de um Fluxo de Potência Ótimo (FPO) sob contingências. A metodologia proposta considera cortes de carga e a inserção ao sistema de dispositivos FACTS ("Flexible AC Transmission Systems") para a injeção ou compensação de potência reativa. Os dispositivos FACTS juntamente com os cortes de carga, são considerados no FPO para garantir uma operação econômica e segura do sistema em situações de limitação da geração ou de contingência. As análises são realizadas no sistema teste IEEE de 30 barras modificado, em diferentes condições de operação, procurando demonstrar as vantagens em otimizar a rede utilizando dispositivos FACTS e cortes de carga. A modelagem é realizada em ambiente de programação AMPL e utiliza o pacote de otimização Knitro.

Palavras-chave— Mínimo corte de carga, Dispositivos FACTS, Fluxo de potência ótimo, AMPL, Knitro.

1 Introdução

O constante crescimento da demanda de energia elétrica leva a uma maior atenção para novos estudos focados na eficiência econômica dos sistemas elétricos de potência (SEP) para garantir o suprimento de seu mercado. Assim, a manutenção do perfil da tensão ou redução de perdas de potência, garante a operação econômica dos sistemas em operação normal.

Numa rede os perfis de tensão podem ser corrigidos ou otimizados através de uma operação eficiente de equipamentos capazes de influenciar e melhorar o fluxo de potência reativa e, conseqüentemente, a tensão, como exemplo os dispositivos FACTS ("Flexible AC Transmission Systems") em geral (Alves 2015). Além de controlar a tensão nas barras do sistema, os dispositivos FACTS podem aumentar a transferência de potência entre áreas ou subsistemas e diminuir as perdas de potência ativa nas linhas da rede (Sanmartin 2013). Estes dispositivos são geralmente vistos como uma nova tecnologia, mas há centenas de instalações em todo o mundo, especialmente de SVC (do inglês, *Static VAR Compensator*) desde início de 1970, com um total instalado de 90.000 MVar, o que mostra a aceitação deste tipo de tecnologia (Zhang, Rehtanz and Pal, 2012).

Porém, uma situação de operação sob emergência no sistema, impõe condições rigorosas para a estabilidade da rede e sua segurança. Assim, em caso de contingência, pode-se efetuar cortes de carga para aliviar

o sistema, operando somente com uma porcentagem das cargas. Portanto, o mínimo corte de carga estabelece a possibilidade de cortar a mínima quantidade de demandas para restabelecer a operação segura e confiável. Para o mínimo corte de carga, tem sido desenvolvidos diferentes estudos, como os cortes de carga nos sistemas de distribuição a fim de manter a estabilidade no perfil da tensão (Moradi and Abedini 2010), ou cortes de carga nos sistemas de transmissão permitindo violações nos limites operacionais para tentar diminuir a quantidade de carga desligada (Lenzi 2007).

Deste modo, a grande contribuição deste trabalho é centrada na operação econômica dos sistemas de transmissão, implementando um Fluxo de Potência Ótimo (FPO), com função multiobjetivo, considerando a minimização das perdas de potência ativa, o controle do perfil da tensão e a minimização dos cortes de carga, para cortes de carga totais das barras candidatas do sistema, sem violações nos limites ou restrições operacionais do sistema para qualquer uma das situações de contingência apresentadas neste trabalho, considerando a participação de dispositivos SVCs.

A sequência do trabalho está dividida da seguinte forma: o modelo desenvolvido do FPO na segunda seção; o dispositivo FACTS e sua modelagem na terceira seção; os aspectos computacionais na quarta seção; os testes e análises de resultados na quinta seção; e finalmente na seção seis as conclusões do trabalho são apresentadas.

2 Fluxo de Potência Ótimo

O FPO calcula um conjunto de variáveis ótimas de estado da rede, a partir de dados de carga e dos parâmetros do sistema e otimiza uma função objetivo sujeita a restrições de igualdade e desigualdade (Oliveira et al. 2015; Belati, Souza and da Costa 2010; de Souza et al. 2006; Baptista, Belati and da Costa 2005). As restrições de igualdade representam os balanços de potência nas barras do sistema e as restrições de desigualdade as restrições de operação dos sistemas de transmissão (Alves and Santos 2006).

Assim, defina-se o conjunto de Equações (1) que representa a formulação matemática geral do FPO.

Minimizar $f(x)$

Sujeito a:

$$g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$h_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, r$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max}$$

Em que:

$f(x)$	função objetivo que representa o desempenho do sistema;
$g_i(x)$	vetor das equações de balanço dos fluxos de potência;
$h_j(x)$	vetor das restrições funcionais do sistema;
$x^{\min}$ e $x^{\max}$	limites inferiores e superiores das variáveis x respectivamente;
$x(V, \theta, t)$	vetor das variáveis de estado, sendo V e θ a magnitude e o ângulo de fase do fator de tensão e t o tap do transformador.

A fim de garantir a operação econômica do sistema e uma operação segura sob contingência, determina-se a função multiobjetivo composta pelos termos da minimização do desvio da tensão e das perdas de potência ativa. A equação geral para descrever a função multiobjetivo é definida na Equação (2).

$$f'(x) = \gamma \sum_{i=1}^{NL} \left[g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \right] + \sum_{k=1}^N \alpha (V_k - V_o)^2 \quad (2)$$

Em que:

g_{km}	condutância da linha entre as barras k e m ;
V_k	magnitude da tensão da barra k ;
V_m	magnitude da tensão da barra m ;
θ_{km}	ângulo de fase entre as barras k e m ;
γ	peso da função perdas;
V_o	tensão de referência;
α	peso da função de desvio de tensão;
N	número de barras do sistema;
NL	número de linhas do sistema.

2.1 Formulação do Fluxo de Potência Ótimo com Mínimo Corte de Carga

Os cortes de carga ou alívio de carga, são medidas ou estratégias operacionais corretivas usadas para reestabelecer a segurança no sistema, após falhas ou contingência no sistema. Assim, diferentes estudos foram desenvolvidos nos SEPs considerando o mínimo corte de carga em conjunto com outras estratégias operacionais, por exemplo, fazendo um controle nos taps dos transformadores, tensões nos geradores e despacho de potência ativa (Granville, Melo and Mello 1996); mediante o relaxamento das restrições do problema como violações nos limites mínimos e máximos das tensões e carregamento dos transformadores (Lenzi 2007); ou elaborando o controle nos limites de nível de tensão, os limites de geração de potência reativa, os limites térmicos nas linhas de transmissão, e os limites de estabilidade de tensão, em conjunto com o modelo de carga variável (Charoenphan and Audomvongseeree 2010).

A função que será minimizada para o corte de carga é definida na Equação (3), a seguir:

$$f''(x) = \sum_i^{NL} \beta_i P_{li} C_{ti} \quad (3)$$

Em que:

β_i	variável binária associada ao corte de carga;
P_{li}	potência candidata a ser desligada na barra i ;
C_{ti}	custo da carga i ;
Nl	número de barras de carga candidatas para aplicar cortes de carga.

A função descrita na Equação (3), expressa a soma das potências das cargas P_{li} candidatas e que poderão ser desligadas, sendo o termo β_i , uma variável binária associada que poderá desligar ou não a potência da barra correspondente.

Dado que é importante desligar só a mínima quantidade de potência para recuperar a estabilidade do sistema, é possível considerar a Equação (3) somada na Equação (2) concluindo na Equação (4).

$$f(x) = \gamma \sum_{i=1}^{NL} \left[g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \right] + \sum_{k=1}^N \alpha (V_k - V_o)^2 + \sum_i^{NL} \beta_i P_{li} C_{ti} \quad (4)$$

Assim, a Equação (4), considera a função multiobjetivo total do FPO contendo a minimização das perdas, dos desvios da tensão e dos cortes de carga, sendo o FPO tratado como um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM) devido à inserção das variáveis inteiras.

Portanto, para o sistema analisado, ter-se-ão um conjunto de barras candidatas para o corte de carga e uma variável binária associada a cada barra do sistema para os cortes totais de carga.

3 Dispositivos FACTS

Os dispositivos FACTS são equipamentos estáticos usados para a transmissão de energia elétrica AC, criado para melhorar o controle e aumentar a capacidade de transferência de potência da rede, os quais são geralmente baseados em eletrônica de potência. O dispositivo selecionado para ser inserido no SEP será o SVC, usado para a prestação de ação rápida de potência reativa em redes de transmissão e que se comporta como uma reatância variável conectada em paralelo (capacitores e indutores em paralelo), com o objetivo principal de absorver ou injetar potência reativa e controlar o perfil da tensão na barra que o dispositivo está conectado (Acha et al. 2002).

3.1 Representação e restrições do SVC no Fluxo de Potência Ótimo

O SVC é modelado pelo método da susceptância variável (Ambriz-Perez, Acha and Fuerte-Esquivel 2000; Venkateswara Rao et al. 2009). Assim, a susceptância total do SVC será determinada pelas susceptâncias equivalentes paralelas dos módulos controlados separadamente. Essa susceptância terá um limite inferior $B_{SVC}^{\min}$ e um limite máximo $B_{SVC}^{\max}$, adotando assim uma modelagem contínua entre os limites estabelecidos. Assim, a potência fornecida pelo SVC para o sistema é calculada de acordo com a Equação (5).

$$Q_{SVC} = B_{SVC} V_k^2 \quad (5)$$

Em que:

Q_{SVC}	potência reativa fornecida pelo SVC;
B_{SVC}	susceptância equivalente do SVC;
V_k	tensão na barra de conexão do SVC.

Os limites determinados para os valores da susceptância influenciam a potência reativa fornecida pelo SVC ao sistema, inserindo assim uma restrição de desigualdade definida na Equação (6).

$$B_{SVC_i}^{\min} \leq B_{SVC_i} \leq B_{SVC_i}^{\max} \quad (6)$$

4 Aspectos Computacionais

A modelagem do problema é realizada em ambiente de programação AMPL (*Modeling Language for Mathematical Programming*) (Ampl.com, 2016) com auxílio do *solver* Knitro (Artelys.com, 2016). Para tratar as variáveis binárias do problema foi utilizado o método de *Branch & Bound* (B&B) disponível no *solver* Knitro.

4.1. Algoritmo de *Branch & Bound*

O algoritmo B&B (Land and Doig 2010) apresenta uma estratégia de separação do problema em subproblemas até que todos esses subproblemas sejam sondados. Os subproblemas gerados formam a árvore de B&B, em que os nós representam os subproblemas

e as arestas representam as variáveis inteiras escolhidas para fazer a separação dos subproblemas, neste trabalho as variáveis binárias. Durante o processo de busca, a melhor solução encontrada é dita como sendo a incumbente. Um subproblema é sondado quando é infactível ou apresenta uma solução de pior qualidade em relação a solução incumbente. Se a solução de um subproblema for melhor que a incumbente atual, ela passa a ser a nova incumbente e a anterior é sondada. O algoritmo B&B termina quando todos os subproblemas gerados forem sondados, sendo a solução incumbente a solução do problema.

5 Testes e Resultados

A abordagem proposta, foi aplicada no sistema IEEE de 30 barras com as seguintes modificações: custo fixo para cada carga definido em \$500 e dispositivos SVC conectados nas barras 10 e 24 (substituindo os dados iniciais dos valores das susceptâncias *shunt* que o sistema possuía inicialmente), pelos limites mínimos e máximos da susceptância do SVC, sendo o $B_{SVC}^{\min}$ igual a -5,0 p.u. e $B_{SVC}^{\max}$ igual a 5,0 p.u. Assim, garante-se a conexão dos dispositivos SVCs numa barra adequada.

As análises feitas são de forma puramente estática e não considera a dinâmica do sistema, excluindo assim os efeitos transitórios no processo de corte de carga. Porém, o SVC causa um melhoramento no fator de potência e no perfil da tensão para análises feitas considerando análises estáticas e dinâmicas do sistema (Gelen and Yalcinoz 2007).

Nas simulações realizadas os limites das tensões foram definidos entre 0,95 e 1,05 p.u. (faixa de tensões adequadas segundo o PRODIST, em seu módulo 8) e a tensão de referência para o desvio da tensão (DT), V_0 , foi definido em 1,0 p.u.. O peso da função de DT, α , é 10,5 e o peso da função perdas, γ , é 1,0, sendo estes dados empíricos selecionados arbitrariamente. As variáveis de peso α e γ podem ser redefinidas, encontrando diferentes alternativas de operação para o sistema de transmissão.

O termo β_i está associado à barra i do conjunto de barras candidatas ao corte de carga. Assim, β_i terá valores para cada cenário de 0 ou 1, sendo 1 nos casos onde toda a potência de carga P_{li} é cortada (não são permitidos cortes parciais de carga). O conjunto de barras candidatas para o corte de carga são todas as barras PQ do sistema.

A barra crítica do sistema é a barra mais susceptível ao corte de carga em uma situação de emergência do sistema. A carga crítica é a carga que está conectada à barra crítica.

Finalmente, para uma situação de contingência, é formulado um FPO que será resolvido com o auxílio do algoritmo B&B que determinará a(s) barra(s) crítica(s) do sistema e a quantidade de potência reativa fornecida pelos SVCs, a fim de garantir uma operação segura, confiável e econômica.

5.1 Caso 1

Simulou-se o sistema em operação normal com os dados iniciais sem SVC (susceptâncias fixas de 0,19 e 0,043 nas barras 10 e 24 respectivamente) e com os SVCs. Na Figura 1 apresentam-se as tensões nas barras do sistema para a operação normal.

Observam-se as tensões das barras dentro dos limites estabelecidos, sem violações dos mesmos ou respostas infactíveis, assim como um controle satisfatório das tensões após a conexão do SVC.

Na tabela 1 expõe-se a quantidade de potência reativa injetada no sistema, assim como o DT para cada caso, sendo menor para a operação com SVCs. Confirma-se que o SVC consegue controlar as tensões nas barras mantendo os valores finais próximos ao valor definido da tensão de referência.

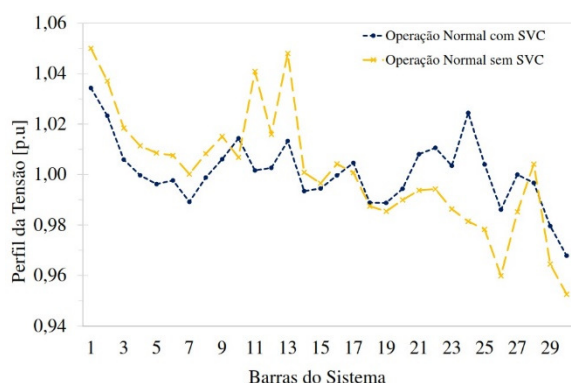


Figura 1. Perfil da Tensão - Operação normal com e sem SVC

Tabela 1. Resultados caso 1

	Operação Normal com SVCs	Operação Normal sem SVCs
Perdas de Potência Ativa	18,89 MW	17,93 MW
Potência Ativa Gerada	302,29 MW	301,33 MW
Potência Reativa SVCs	62,91 MVar	0 MVar
Soma do DT	0,00516 p.u.	0,01597 p.u.
Número de nós de B&B	1	1

5.2 Caso 2

Considerou-se uma falha na linha de transmissão entre as barras 2 e 5, sem e com dispositivos SVCs. Na Figura 2 apresenta-se as tensões nas barras do sistema para a operação normal e operação em contingência.

O perfil da tensão foi controlado nas barras do SEP, porém, devido a falha a tensão na barra 5 e 7 foi afetada e reduzida. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos para cada cenário simulado de falha na linha de transmissão.

De acordo com a Figura 2, observa-se que as tensões são elevadas quando os SVCs são conectados no sistema, ficando próximas ao limite máximo de tensão. Na tabela 2 pode-se conferir que neste caso as perdas são acrescentadas de 18,89MW (operação normal) até 26,36 MW. Igualmente, as perdas de potência para o sistema sob contingência sem SVC são menores, sendo apenas 19,47MW.

O resultado obtido é devido ao montante de carga cortada para cada cenário. A inserção dos SVCs no sistema gerou uma diminuição na quantidade de cortes, precisando seis cortes de carga para a operação sem SVCs e dois cortes com os SVCs conectados. Determina-se a barra 7 como uma barra crítica para esta contingência. Assim, demonstra que para a operação do sistema em contingência a participação dos SVCs contribui para redução de corte de carga. Porém, as perdas de potência e os perfis de tensão são elevados.

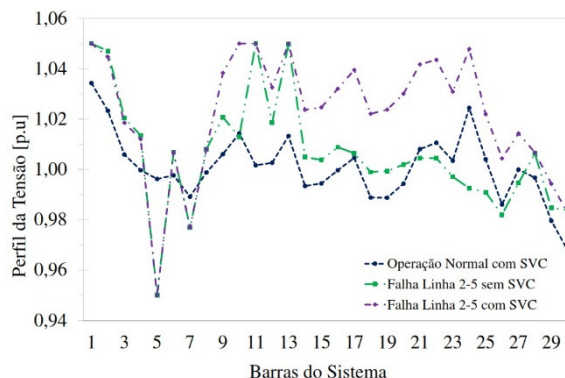


Figura 2. Perfil da Tensão - Falha numa linha de transmissão

Tabela 2. Resultados caso 2

	Falha na Linha 2-5 com SVCs	Falha na Linha 2-5 sem SVCs
Perdas de Potência Ativa	26,36 MW	19,47 MW
Potência Ativa Gerada	284,76 MW	235,77 MW
Potência Reativa Fornecida Bancos Compensadores	0 MVar	23,74 MV
Potência Reativa SVCs	74,12 MVar	0 MVar
Potência Ativa Cortada	25,00 MW	67,10 MW
# Barras com Corte de Carga	2	6
Barras com Carga Cortada	7 e 20	7, 19, 21, 23, 26 e 30
Soma dos Desvio da Tensão	0,03182 p.u.	0,01561 p.u.
Número de nós de B&B	35	453

5.3 Caso 3

Restrições na geração da barra *slack* em 95%, 90% e 85% da capacidade total de geração são simuladas. Neste caso, para cada subcaso simulado são considerados os SVCs conectados. A Figura 3 apresenta as tensões do sistema e na Tabela 3 têm-se os dados de perdas, potências geradas e cargas cortadas.

Conclui-se que o SVC controla as tensões nas barras do sistema dada a potência reativa fornecida e os cortes de carga restabelecem a segurança no sistema para todos os casos nos quais se tem restrição na geração. Uma limitação nas potências geradas provocará cortes de carga, sendo as cargas das barras 18 e 30 as cargas críticas para os casos que se tenham restrições na geração. As perdas de potência foram controladas e reduzidas para cada cenário definido.

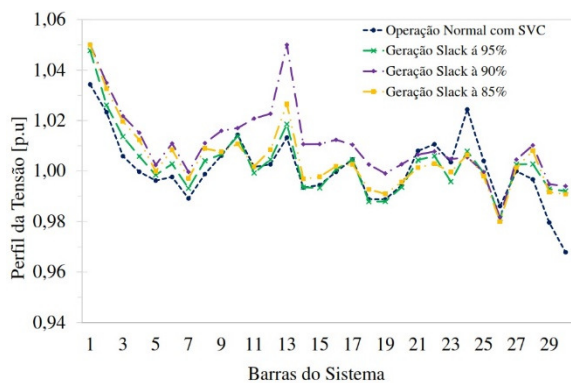


Figura 3. Perfil da Tensão – Restrições na geração slack

Tabela 3. Resultados caso 3

	Geração slack com 95%	Geração slack com 90%	Geração slack com 85%
Perdas de Potência Ativa	16,43 MW	14,72 MW	13,30 MW
Potência Ativa Gerada	289,23 MW	276,12 MW	263,00 MW
Potência Reativa SVCs	54,18 MVar	38,46 MVar	40,90 MVar
Potência Ativa Cortada	10,60 MW	22,00 MW	33,70 MW
# Barras com Corte de Carga	1	3	6
Barras com Carga Cortada	30	15, 18 e 30	10, 18, 20, 23, 24 e 30
Soma dos DT	0,00491p.u	0,00985p.u	0,00603p.u
Número de nós de B&B	425	265	1005

5.4 Caso 4

No último caso, foram definidas restrições nos fluxos de potência pelas linhas de transmissão do sistema. As tensões nas barras são apresentadas na Figura 4.

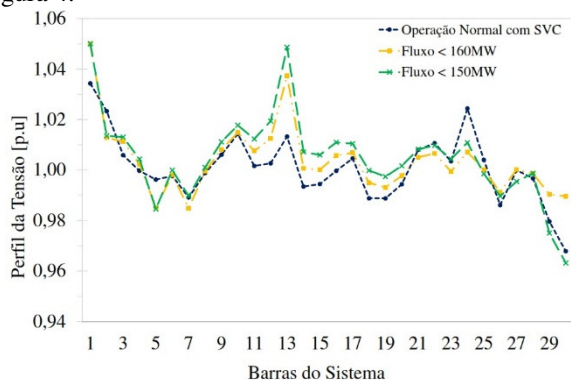


Figura 4. Perfil da Tensão - Restrições nos fluxos de potência

Os SVCs ajudam no controle efetivo do perfil da tensão. Na tabela 4, evidenciou-se que as perdas de potência foram controladas. Cortes de carga também foram efetuados para restabelecer a segurança no sistema, tendo diferentes cortes para cada cenário, conseguindo determinar as cargas na barra 18 e 26 como as cargas críticas.

Finalmente, o mínimo corte de carga no sistema restabelece os níveis de confiabilidade. Assim, dife-

rentes situações que causam operação de risco não afetam a totalidade do sistema evitando sofrer contingências maiores, respondendo de forma ótima sem afetar a segurança da rede, mantendo as tensões nos limites estabelecidos.

Tabela 4. Resultados caso 4

	Fluxo de Potência ≤ 160MW	Fluxo de Potência ≤ 150MW
Perdas de Potência Ativa	15,68 MW	14,19 MW
Potência Ativa Gerada	281,78 MW	268,09 MW
Potência Reativa SVCs	51,12 MVar	49,62 MVar
Potência Ativa Cortada	17,30 MW	29,50 MW
# Barras com Corte de Carga	3	3
Barras com Carga Cortada	18, 26 e 30	7, 18 e 26
Soma dos DT	0,00571 p.u	0,00929 p.u
Número de nós de B&B	507	197

6 Conclusões

A abordagem foi testada no sistema IEEE de 30 barras modificado, conferindo a viabilidade da proposta dos cortes de carga em conjunto com a participação dos FACTS para os casos de contingência na rede. O perfil da tensão do sistema foi controlado com o auxílio dos dispositivos SVCs para os cenários definidos. Os SVCs foram modelados utilizando o modelo de susceptância variável. Reduções nos cortes de carga foram obtidos mediante a conexão dos SVCs quando ocorreram contingências no sistema. O mínimo corte de carga ou alívio de carga apresenta benefícios para os sistemas de transmissão, restabelecendo a operação confiável no SEP. A abordagem de corte de carga junto com o FPO modelado como um problema de PNLIM conferiu ótimos resultados para o sistema nos testes realizados. O algoritmo *Branch & Bound* respondeu satisfatoriamente para o problema de PNLIM estudado, entregando respostas factíveis para cada caso simulado e com uma quantidade mínima de corte de carga.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), a Universidade Federal do ABC (UFABC) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

- Acha, E., Agelidis, V., Anaya-Lara, O. and Miller, T. (2002). *Power Electronic Control in Electrical Systems* 1st ed., London, England: Newnes.
- Alves, A.C.B. and Santos, F.B.B. (2006). Métodos de Otimização Linear e não-Linear Aplicados ao Fluxo de Potência Ótimo. *XXXIII Seminário Integrado de Software e Hardware*, [online] Campo Grande, MS, pp. 231–243.

- Alves, M.C., 2015. *Análise de Sistemas Elétricos de Potência com Alocação de Compensadores Estáticos de Reativos Utilizando Fluxo de Potência Ótimo*. M.Sc. Universidade Federal do ABC.
- Ambriz-Perez, H., Acha, E. and Fuerte-Esquivel, C.R. (2000). Advanced SVC models for Newton-Raphson load flow and Newton optimal power flow studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, [online], 15(1), pp.129–136. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=852111> [Accessed 4 May 2016].
- Ampl.com. (2016). AMPL | STREAMLINED MODELING FOR REAL OPTIMIZATION. [online] Available at: <http://ampl.com/> [Accessed 20 May 2016].
- Artelys.com. (2016). Artelys | Optimization solutions - Artelys Knitro - Nonlinear optimization solver. [online] Available at: <https://www.artelys.com/en/optimization-tools/knitro> [Accessed 20 May 2016].
- Baptista, E.C., Belati, E.A. and da Costa, G.R.M. (2005). Logarithmic barrier-augmented Lagrangian function to the optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [online], 27(7), pp.528–532. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061505000645> [Accessed 4 May 2016].
- Belati, E.A., de Souza, A.M. and da Costa, G.R.M. (2010). Influence of the Operational Constraint in the Active Transmission Losses Allocation Via Lagrange Multipliers. *IEEE Latin America Transactions*, [online], 8(1), pp.58–64. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5453947> [Accessed 4 May 2016].
- Charoenphan, B. and Audomvongseeree, K. (2010). Optimal load shedding scheme under contingency condition considering voltage stability problem. *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology*, [online], (4), pp.1006–1010. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5491627> [Accessed 4 May 2016].
- Granville, S., Mello, J.C.O. and Melo, A.C.G. (1996). Application of interior point methods to power flow unsolvability. *IEEE Transactions on Power Systems*, [online], 11(2), pp.1096–1103. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=496200> [Accessed 4 May 2016].
- Gelen, A. and Yalcinoz, T. (2007). Analysis of TSR-based SVC for a Three-Phase System with Static and Dynamic Loads. In *2007 International Conference on Electrical Engineering. IEEE*, [online], pp. 1–6. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4287305> [Accessed 15 August 2016].
- Land, A.H. and Doig, A.G. (2010). An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems. In *50 Years of Integer Programming 1958-2008*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 105–132.
- Lenzi, J.R., 2007. *Estratégias para corte de carga utilizando fluxo de potência ótimo com relaxamento de restrições*. M.Sc. Universidade Federal do Paraná.
- Moradi, M.H. and Abedini, M. (2010). Optimal load shedding approach in distribution systems for improved voltage stability. *2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference IEEE*, [online], 2(2), pp. 196–200. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5559241> [Accessed 4 May 2016].
- Oliveira, E.J., Oliveira, L.W., Pereira, J.L.R., Honório, L.M., Silva, I.C. and Marcato, A.L.M. (2015). An optimal power flow based on safety barrier interior point method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [online], 64, pp.977–985. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061514005419> [Accessed 4 May 2016].
- Sanmartin, J.P., 2013. *Ubicación óptima de dispositivos FACTS en sistemas de potencia implementando un algoritmo de búsqueda de la armonía*. M.Sc. Universidad Tecnológica de Pereira.
- de Souza, A.M., Belati, E.A., Bezerra, U.H., da Costa, G.R.M. (2006). Sensitivity Analysis Applied on the Electrical Power Systems Operation Planning. *IEEE Latin America Transactions*, [online], 4(5), pp.359–365. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4472136> [Accessed 4 May 2016].
- Venkateswara Rao, B., Nagesh Kumar, G.V., Ramya Priya, M. and Sobhan, P.V.S. (2009). Implementation of Static VAR Compensator for Improvement of Power System Stability. In *2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies. IEEE* [online], pp. 453–457. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5376570> [Accessed 4 May 2016].
- Zhang, X.-P., Rehtanz, C., Pal, B. (2006). *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control* 1st ed., Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.