

METODOLOGIA PARA REPRESENTAÇÃO DO CONTROLE DE INTERCÂMBIO DE POTÊNCIA REATIVA NO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA

PAULA O. LA GATTA^{1,2}, PAULO SÉRGIO DE C. NASCIMENTO¹, JOÃO ALBERTO PASSOS FILHO¹,
JOSÉ LUIZ R. PEREIRA¹, ABÍLIO M. VARIZ¹, BRÁULIO C. DE OLIVEIRA¹

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora¹
Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil*

*Departamento de Redes Elétricas, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL²
Av. Horácio de Macedo, 354, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

*E-mails: paulalg@cepel.br, castro.paulo@engenharia.ufjf.br, jopass@ieee.org,
jluiz@ieee.org, abilio@ieee.org, braulio.oliveira@engenharia.ufjf.br*

Abstract— This paper presents an augmented power flow formulation for reactive power interchange control among power system areas. The net reactive power interchange equations among areas represent the set of additional equations in which the new corresponding additional variables are related to the existing reactive power sources available in a given area in order to match the net reactive power interchanges. The Newton-Raphson method is used to solve the augmented system of equations in which the voltage magnitudes, angles and the reactive power generations are the power flow state variables. If there is more than one reactive power source in a given area, which participates of the reactive power interchange control, then the participation factors among them must be defined. The proposed model was tested in an 11-bus tutorial test system to validate the methodology as well as to evaluate the impacts of the proposed approach in the voltage security evaluation by using a continuation power flow based on the proposed approach.

Keywords— Ancillary Services, Reactive Power Interchange Control, Power Flow, Newton-Raphson Method, Continuation Power Flow

Resumo— Este trabalho apresenta uma formulação aumentada do problema de fluxo de potência aplicada ao controle de intercâmbio de potência reativa (CIPR) entre áreas em um sistema de potência. As equações de intercâmbio líquido de potência reativa entre áreas representam o conjunto adicional de equações em que as novas variáveis de estado são as fontes de potência reativa disponíveis para atenderem os intercâmbios de potência reativa. A solução da formulação proposta é obtida utilizando-se o método de Newton-Raphson, onde as variáveis de estados são tensões em módulo e fase, bem como as potências reativas geradas. Caso exista mais de uma fonte de potência reativa em uma dada área participando do CIPR, fatores de participação relativos de potência reativa são definidos. O modelo matemático proposto foi testado em um sistema teste tutorial de 11 barras de forma a validar a formulação proposta. Além disso, procurou-se avaliar os impactos desta estratégia de controle em estudos de segurança de tensão a partir da utilização de um fluxo de potência continuado modificado.

Palavras-chave— Serviços auxiliares, Controle de Intercâmbio de Potência Reativa, Fluxo de Potência, Método de Newton-Raphson, Fluxo de Potência Continuado

Nomenclatura

Os seguintes símbolos foram utilizados.

- V_i : Módulo da tensão na barra i ;
 θ_i : Ângulo da tensão na barra i ;
 Q_{G_i} : Potência reativa gerada na barra i ;
 P_{km} : Fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;
 Q_{km} : Fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;
 QI_{ij} : Fluxo de potência reativa da área i para j ;
 $Q_{G_i}^{lim}$: Limite de pot. reativa gerada no gerador i ;
 $Q_{G_i}^{esp}$: Potência reativa especificada na barra i ;
 Q_i^{cal} : Potência reativa calculada para barra i ;
 g_{km} : Condutância do ramo $k-m$;
 b_{km} : Susceptância do ramo $k-m$;

- b_{km}^{sh} : Susceptância *shunt* do ramo $k-m$;
 b_k^{sh} : Susceptância *shunt* da barra k ;
 h : Contador de iterações;
 α_{ij} : Fator de Participação do gerador i em relação ao gerador j ;
 ng : Núm. de geradores que participam do CIPR;
 ϕ : Conjunto de todos os ramos que conectam a área i com a j .

Além disso, variáveis escalares são representadas em *itálico*, matrizes em *itálico e em negrito*, e os vetores em *itálico sublinhados*.

1 Introdução

O crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) devido ao aumento da demanda de energia elétrica, diversificação de fontes de geração e à necessidade de maior segurança dos sistemas, aliado à

constante busca de redução de custos, tem resultado em uma interligação cada vez maior entre as diversas regiões de geração existentes.

Com o aumento destas interligações, a operação coordenada do sistema torna-se bastante complexa e os riscos de blecautes na rede aumentam de forma significativa. É, portanto, necessário um conhecimento detalhado de seu planejamento da expansão e operação para que o desempenho alcançado na prática seja compatível com os requisitos de qualidade e segurança esperados pela sociedade. Desta forma, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais avançadas que facilitem as análises rápidas das suas condições de regime permanente, segurança de tensão e estabilidade eletromecânica.

A operação de um sistema elétrico de forma interligada traz vantagens para as empresas concessionárias de energia elétrica, tais como confiabilidade e segurança operacional, permitindo também a contabilização do intercâmbio de energia elétrica (dos Santos, et al., 2004) entre as empresas ao longo de um determinado período de tempo.

Por outro lado, o gerenciamento da geração de potência reativa entre as áreas varia de acordo com as regras de mercado de cada país, sendo sua contabilização financeira, de uma forma geral, complexa de ser mensurada. Neste sentido, é geralmente considerada como serviços auxiliares, podendo estes receber uma compensação financeira, como destacado em (Sauer, et al., 2001) e (Taylor, 2006). Algumas empresas, no entanto, realizam contratos bilaterais com empresas geradoras de energia elétrica ou através do intercâmbio de potência reativa com outras empresas. Porém as empresas geradoras contratadas são remuneradas por sua capacidade de potência ativa, mas nenhuma remuneração é feita pelo suporte de potência reativa (Zhong & Bhattacharya, 2002).

A partir deste contexto pode-se verificar de uma forma ampla a necessidade da representação de dispositivos de controle e limites no problema de Fluxo de Potência (Monticelli, 1983) (Passos Filho, 2000). Dentre os dispositivos de controle comumente utilizados, destaca-se o controle de tensão local e remoto através da variação da geração de potência reativa ou através da variação de taps de transformadores do tipo OLTC (*On Load Tap Changer*) (Passos Filho, 2000); controle de fluxo de potência ativa em transformadores defasadores (Passos Filho, et al., 2012) (Variz, 2000); controle de intercâmbio de potência ativa entre áreas (dos Santos, et al., 2004); equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), sendo os mais comuns os compensadores estáticos de potência reativa (CER) (Chopade, et al., 2011) (Taylor, et al., 1994) e os compensadores série controlados a tiristores (CSCT) (Lu & Abur, 2001), usados para controlar o fluxo de potência de uma linha de transmissão, entre outros.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo principal a proposição de uma nova metodologia para o controle do intercâmbio de potência reativa entre áreas

(CIPR), de forma similar ao controle de intercâmbio de potência ativa. Tal metodologia consiste na inserção de novas equações e novas variáveis de estado no problema. As equações adicionais são relativas ao controle do fluxo de potência reativa entre áreas e as variáveis de estado representam as grandezas controladoras. A metodologia proposta foi testada em um sistema teste tutorial de 11 barras (Kundur, et al., 1994). Além disso, procurou-se avaliar os impactos desta estratégia de controle em estudos de segurança de tensão a partir da utilização de um fluxo de potência continuado (Ajjarapu & Christy, 1992).

2 Metodologia Proposta

O intercâmbio líquido de potência reativa de uma área é definido como a soma algébrica dos fluxos de potência reativa de todas as linhas que interligam essa área com as demais. Para isto é necessário deixar pelo menos uma barra (PV ou V θ) com tensão livre. Estas barras são reclassificadas como sendo do tipo P, onde somente a potência ativa é especificada. O objetivo do CIPR é controlar o intercâmbio líquido de potência reativa de uma área para outra, ou seja, as injeções de potência reativa dos geradores participantes do CIPR são ajustadas de forma a manter os intercâmbios líquidos da área no seu valor especificado. A formulação do método consiste na inclusão de novas equações referentes ao CIPR no problema original de Fluxo de Potência, detalhado em (Monticelli, 1983).

A equação adicional referente ao controle de intercâmbio de potência reativa de uma área i para outra área j é descrita pela equação (1).

$$QI_{ij}^{esp} - \sum_{km \in \phi} Q_{km}^{cal} = 0 \quad (1)$$

Sendo que o fluxo de potência reativa é calculado através da equação em (2).

$$Q_{km} = -V_k^2(b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m(b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2)$$

As derivadas parciais da nova equação de controle em relação às variáveis de estado são dadas por:

$$\frac{\partial QI_{ij}}{\partial \theta_k} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = V_k V_m(b_{km} \sin \theta_{km} + g_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial QI_{ij}}{\partial V_k} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = 2V_k(b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_m(b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial QI_{ij}}{\partial \theta_m} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} = -V_k V_m(b_{km} \sin \theta_{km} + g_{km} \cos \theta_{km}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial QI_{ij}}{\partial V_m} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = -V_k(b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km}) \quad (6)$$

O conjunto de equações é solucionado pelo método iterativo de Newton, em que na nova formulação a matriz jacobiana aparece com linhas e colunas adicionais relacionadas às derivadas parciais da equação adicional em relação às variáveis de estado original do problema (V e θ) e derivadas das equações de potência originais em relação às novas variáveis de estado. Assim, o controle é feito através do método de Newton completo, onde as equações adicionais são resolvidas de forma simultânea com as equações originais do problema.

A equação (7) mostra o sistema linearizado a ser resolvido a cada iteração do método, sendo que ao final do processo iterativo o fluxo de potência reativa da área i para a área j é mantido em Q_{ij}^{esp} , considerando-se uma tolerância de convergência.

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \\ \Delta \underline{QI}_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{H} & \underline{N} & 0 \\ \underline{M} & \underline{L} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{Q}_G} \\ \frac{\partial \underline{QI}_{ij}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{QI}_{ij}}{\partial \underline{V}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \\ \Delta \underline{Q}_G \end{bmatrix} \quad (7)$$

Os vetores e submatrizes $\Delta \underline{P}$, $\Delta \underline{Q}$, $\underline{H}$, $\underline{M}$, $\underline{N}$, $\underline{L}$, $\Delta \underline{\theta}$ e $\Delta \underline{V}$ são definidos de acordo com a formulação tradicional do problema de Fluxo de Potência, definidos em (Monticelli, 1983). E tem-se ainda que:

- $\Delta \underline{Q}_{-ij}$: Vetor de resíduos das equações do CIPR conforme definido em (1);
- $\frac{\partial \underline{QI}_{ij}}{\partial \underline{\theta}}$, $\frac{\partial \underline{QI}_{ij}}{\partial \underline{V}}$: Vetores das derivadas dos intercâmbios de potência reativa em relação aos ângulos e módulos, respectivamente das tensões;
- $\frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{Q}_G}$: Vetor referente às derivadas das equações de potência reativa injetada nas barras em relação às novas variáveis de estado referentes ao CIPR;
- $\Delta \underline{Q}_G$: Vetor das novas variáveis de estado das potências reativas geradas referentes ao CIPR;

A equação (8) descreve a potência reativa injetada em uma barra k .

$$Q_k^{cal} - Q_k^{esp} = Q_k^{cal}(\theta, V) - (Q_{G_k} - Q_{D_k}) = 0 \quad (8)$$

Desta forma, linearizando-se (8) determina-se (9):

$$\Delta Q_k = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial Q_k}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial Q_k}{\partial Q_{G_k}} \Delta Q_{G_k} \quad (9)$$

A cada iteração h do método de Newton, além das demais variáveis de estado do problema de fluxo de potência, a potência reativa gerada na barra k é atualizada como mostra a equação (10).

$$Q_{G_k}^{(h+1)} = Q_{G_k}^{(h)} + \Delta Q_{G_k}^{(h)} \quad (10)$$

3 Múltiplos Geradores em uma Mesma Área

Quando em um SEP existem áreas que possuem mais de um gerador participando do CIPR, devem ser incluídas novas equações na formulação do problema de fluxo de potência. Estas equações têm por objetivo definir como cada gerador irá participar do suporte de potência reativa para manter o controle de intercâmbio em um valor especificado. Desta forma, incluem-se as equações mostradas em (11). Será apresentada, portanto, uma metodologia similar à de intercâmbio de potência ativa entre áreas desenvolvida em (dos Santos, et al., 2004), onde os autores descrevem uma metodologia em que há uma expansão do sistema matricial, com inserção de novas equações.

$$\begin{aligned} Q_{G_1} - \alpha_{12} \cdot Q_{G_2} &= 0 \\ Q_{G_2} - \alpha_{23} \cdot Q_{G_3} &= 0 \\ &\vdots \\ Q_{G_{(ng-1)}} - \alpha_{(ng-1)ng} \cdot Q_{G_{ng}} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

O parâmetro α representa o fator de participação de cada gerador ou compensador síncrono (dos Santos, et al., 2004). Em outras palavras, os fatores de participação determinam a participação relativa entre os geradores. Normalmente adota-se a capacidade da máquina em sua determinação (Passos Filho, 2000). A Figura 1 ilustra um sistema genérico, em que se objetiva controlar o fluxo de potência reativa da área i para j , sendo responsável para tal controle os geradores 1, 2, ..., ng .

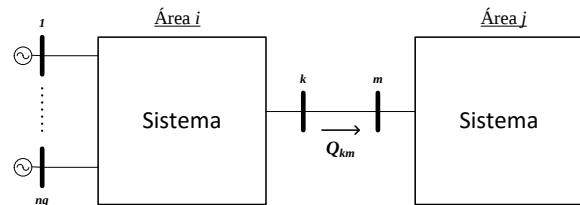


Figura 1. Exemplo de Múltiplos Geradores Participando do CIPR

O sistema linear resolvido a cada iteração do método de Newton, para este exemplo genérico, é dado por (12).

A matriz J_{ca} representa a matriz original da formulação tradicional do problema de fluxo de potência (Monticelli, 1983), assim como os resíduos e variáveis de estado originais. Os demais termos representam as derivadas parciais das equações

incluídas no problema em relação às variáveis de estado originais e novas.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{ng} \\ \Delta QI_{ij} \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y_{(ng-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & J_{ca} & & -1 & & & \\ & & & & & -1 & & \\ & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & -1 \\ \hline J' & L' & L'_1 & L'_2 & L'_{ng} & & & \\ & & & & -1 & \alpha_{12} & & \\ & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & \alpha_{(ng-1)ng} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{ng} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \vdots \\ \Delta Q_{G_{ng}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Os resíduos das equações adicionais são calculados de acordo com as equações (13) e (14).

$$\Delta QI_{ij} = \sum_{km \in \phi} Q_{km}^{cal} - QI_{ij}^{esp} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= \alpha_{12} \cdot Q_{G_2} - Q_{G_1} \\ \Delta y_2 &= \alpha_{23} \cdot Q_{G_3} - Q_{G_2} \\ &\vdots \\ \Delta y_{(ng-1)} &= \alpha_{(ng-1)ng} \cdot Q_{G_{ng}} - Q_{G_{(ng-1)}}\end{aligned}\tag{14}$$

Consequentemente, uma área contendo ng geradores participando do controle, além da equação de controle de fluxo de potência reativa, são inseridas adicionalmente ng equações. Desta forma, tem-se o mesmo número de equações e variáveis.

4 Tratamento dos Limites Operacionais

Os geradores absorvem ou injetam potência reativa de modo a manter o módulo da tensão constante na barra que estão conectados. No caso dos geradores e/ou compensadores síncronos que participam do CIPR, o valor da tensão terminal é liberado para variar e os equipamentos tendem a manter o controle de intercâmbio em um valor especificado. Entretanto, as máquinas possuem limites operacionais, definidos pela curva de geração de potência reativa (Garcia & Monticelli, 2003), que devem ser considerados no processo de solução para que se tenha uma solução realista do problema.

Se uma área i contém ng barras geradoras participantes do CIPR, os limites de geração de potência reativa dados pela curva de geração de cada máquina podem ser monitorados durante o processo iterativo. Se um dos geradores atingir um destes limites, fixa-se sua potência reativa especificada no seu limite atingido. Em outras palavras, a barra cujo gerador atingiu o limite de geração de potência reativa muda seu tipo de P para PQ. Matematicamente, isto é feito retirando-se a equação adicional correspondente à participação desse gerador do sistema de equações, e os fatores de participação são recalculados a partir dos demais geradores da área que participam do CIPR.

Neste caso, pode-se notar que o gerador que atingiu o limite não poderá mais participar do CIPR, a não ser que, durante o processo iterativo, possa se tornar do tipo P novamente. Desta forma, os outros geradores da área i devem absorver ou gerar reativos para manter o intercâmbio no valor especificado.

Se a área i contiver apenas uma barra de geração para realizar o CIPR, ou se esta for a última entre o conjunto de geradores participantes do intercâmbio, e esta atingir um dos limites de geração de potência reativa, o controle não poderá ser realizado. Portanto, a equação de controle é retirada do problema de fluxo de potência e o intercâmbio não poderá mais ser controlado naquela interconexão.

5 Resultados

Nesta seção, a metodologia proposta será avaliada através da solução do sistema teste de 11 barras da Figura 2, cujos dados podem ser consultados em (Kundur, et al., 1994). O objetivo é controlar o intercâmbio líquido de potência reativa QI_{12} da Área 1 para a Área 2 em um valor especificado.

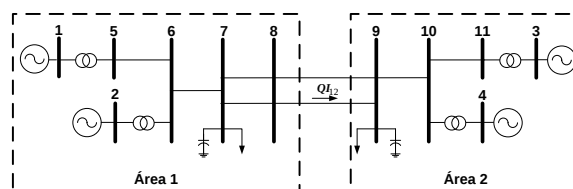


Figura 2. Topologia do sistema de 11 barras (Kundur, et al., 1994)

Para o critério de convergência foi utilizada a tolerância de 10^{-5} p.u. para os resíduos máximos de potência ativa, reativa e equações adicionais associadas com o CIPR.

Foi efetuado o cálculo do fluxo de potência considerando os geradores das barras 1 e 2 com tensão livre de forma a zerar o fluxo de potência reativa nas linhas que conectam as barras 8 e 9, ou seja, a Área 1 não exportará potência reativa para a Área 2. O fator de participação entre as duas máquinas (α_{12}) foi considerado unitário. A solução após o processo iterativo é apresentada na Tabela 1. Os fluxos de potência ativa e reativa são apresentados na Tabela 2.

As Tabelas 1 e 2 mostram o ponto de operação obtido através da solução do fluxo de potência com CIPR. Através das linhas destacadas na Tabela 1, pode-se observar que as gerações de potência reativa dos geradores conectados nas barras 1 e 2 são iguais devido à escolha dos fatores de participação no controle de intercâmbio de 50 %. Por outro lado, as linhas destacadas na Tabela 2 mostram que a formulação é capaz de manter o fluxo de potência de intercâmbio da Área 1 para a Área 2 igual ao seu valor especificado. É importante destacar que, neste caso, não houve o controle de intercâmbio da Área 2 para a Área 1 e, devido a isso, o fluxo de potência reativa neste sentido não é igual ao valor especificado.

Tabela 1. Valores convergidos das barras sistema 11 barras

Barra	Tipo	V (p.u.)	θ (°)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)
1	P	1,099	14,93	700,0	180,5
2	P	1,070	6,47	700,0	180,5
3	PV	1,030	-6,81	719,1	151,3
4	V θ	1,010	-17,00	693,4	142,0
5	PQ	1,077	9,28	0,0	0,0
6	PQ	1,047	0,49	0,0	0,0
7	PQ	1,032	-6,84	-967,0	-100,0
8	PQ	0,997	-19,11	0,00	0,0
9	PQ	0,989	-31,81	-1767,0	-100,0
10	PQ	0,993	-23,62	0,0	0,0
11	PQ	1,012	-13,41	0,0	0,0

Tabela 2. Fluxo de potência nos circuitos do sistema 11 barras

De	Para	P_{km} (MW)	Q_{km} (Mvar)	P_{mk} (MW)	Q_{mk} (Mvar)
1	5	700,0	180,5	-700,0	-108,4
2	6	700,0	180,5	-700,0	-104,4
3	11	719,1	151,3	-719,1	-66,5
4	10	693,4	142,0	-693,4	-60,1
5	6	700,0	108,4	-689,2	-5,1
6	7	1389,2	109,5	-1371,5	65,7
7	8	202,2	23,6	-197,9	0,0
7	8	202,2	23,6	-197,9	0,0
8	9	197,9	0,0	-193,5	24,5
8	9	197,9	0,0	-193,5	24,5
9	10	-1379,9	193,2	1399,8	3,7
10	11	-706,4	56,4	719,1	66,5

A trajetória de convergência do método de Newton para o sistema teste de 11 barras é apresentada na Figura 3. É importante destacar a manutenção da característica quadrática de convergência. Neste caso, com a tolerância adotada o sistema convergiu em três iterações.

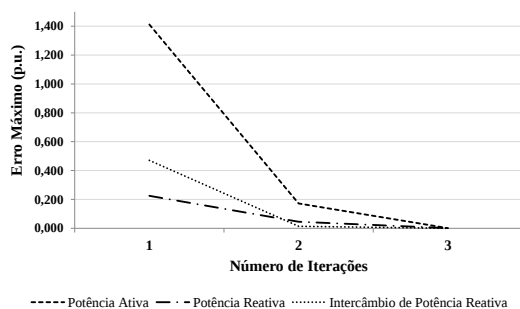


Figura 3. Trajetória de convergência – sistema 11 barras

6 Avaliação da Margem de Carregamento

Diversas ferramentas são utilizadas para análise de segurança de tensão, sendo que essas ferramentas possuem vantagens e desvantagens. Neste trabalho, procura-se avaliar os impactos da utilização do CIPR na margem de carregamento do sistema de 11 barras utilizado na seção anterior, utilizando-se do fluxo de potência continuado (Ajjarapu & Christy, 1992). Tal metodologia é de grande importância na análise de estabilidade de tensão de SEP, permitindo avaliar o comportamento das tensões das barras em função do

aumento do carregamento do sistema, além de calcular a margem de carregamento e indicar suas barras críticas através da análise do vetor tangente.

Utilizando-se novamente o sistema de 11 barras, cuja topologia é mostrada na Figura 2, será mostrada a característica PV para três situações específicas, uma em que não se utiliza o controle de intercâmbio de potência reativa e outras duas em que esse intercâmbio é controlado em diferentes valores. Considerou-se adicionalmente a situação em que uma empresa A, responsável pela Área 1 realizou investimento em compensação de potência reativa. Para tanto, neste exemplo hipotético, utilizou-se uma compensação adicional na barra 7 no valor de 500 Mvar. A empresa B responsável pela Área 2 investiu um pouco menos, sendo considerada uma inserção de banco *shunt* de 50 Mvar na barra 9. A seguir são descritas as duas situações analisadas.

O carregamento foi aplicado a todas as barras do sistema, mantendo fixo o fator de potência. Além disso, foi utilizada a mesma tolerância de 10^{-5} p.u. para a solução das equações.

6.1 Condição de 0 Mvar de intercâmbio

A Figura 4 ilustra a curva PV para o sistema de 11 barras sem a atuação do CIPR, obtendo-se a curva do gerador 2 (curva em verde escuro). Como durante o carregamento do sistema ele não atinge o limite de geração de reativo, ele não perde a capacidade de controle de tensão. A outra curva mostrada é associada à barra 9 (curva em azul escuro). Esta barra foi escolhida baseando-se no vetor tangente, que apresenta o maior módulo dentre todas outras, por conseguinte sendo a barra crítica do sistema.

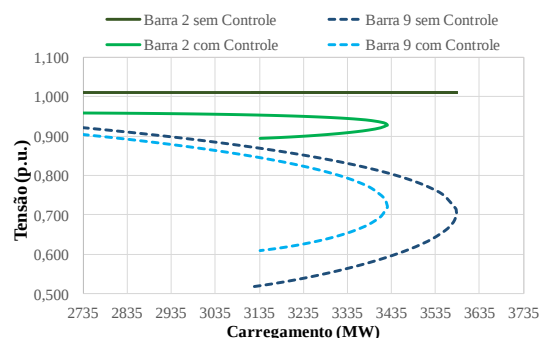


Figura 4. Curva PV considerando o CIPR no valor de 0 Mvar

A segunda situação, visando manter o fluxo de potência reativa da Área 1 para a Área 2 nulo, traça-se a curva do gerador 2 (curva em verde claro). Neste caso, há queda de tensão na barra 2 pois o reativo gerado na barra é utilizado para manter o controle de intercâmbio no valor especificado. Para a barra 9 (em azul claro) a curva é similar ao caso anterior, contudo com margem de carregamento menor.

A Figura 4 mostra que, para a situação de intercâmbio nulo, a margem de carregamento do sistema é consideravelmente inferior quando comparado ao

carregamento do mesmo sistema sem a atuação do controle. Pode-se então observar que o suporte de potência reativa proveniente da Área 1 para a Área 2 é importante para a manutenção da estabilidade de tensão do sistema de 11 barras.

6.2 Condição de 100 Mvar de intercâmbio

A Figura 5 apresenta as curvas PV para as mesmas barras do caso mostrado anteriormente. Como pode ser observado neste resultado, o sistema com controle de intercâmbio no valor de 100 Mvar possui margem de carregamento superior ao caso sem controle.

A diferença de carregamento entre os dois cenários de intercâmbio de potência reativa analisados é considerável. Para o cenário de 0 Mvar de intercâmbio, o máximo carregamento ocorre em aproximadamente 3426 MW. Porém, para o cenário de intercâmbio de 100 Mvar, o valor de carregamento máximo é de 3667 MW, tendo uma variação de 241 MW (7% superior). O carregamento sem consideração do controle de intercâmbio de potência reativa ocorre em 3583 MW.

Esta variação de carregamento máximo devido ao valor especificado de intercâmbio ocorre porque, sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, o CIPR se mostra como um controle alternativo para melhorar o suporte de potência entre áreas e, assim, aumentar a margem de carregamento do sistema.

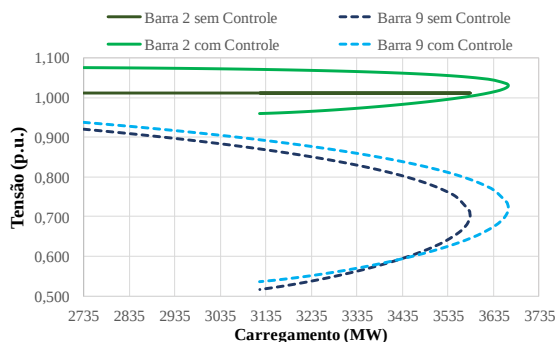


Figura 5. Curva PV considerando o CIPR no valor de 100 Mvar

7 Conclusão

Este artigo descreveu uma nova metodologia para o controle de intercâmbio de potência reativa entre áreas no problema de fluxo de potência, resolvido pelo método de Newton completo. As gerações de potência reativa são utilizadas como grandezas controladoras (novas variáveis de estado) e as equações do fluxo de potência reativa entre as áreas são utilizadas para o controle (novas equações de controle). Avalia-se que a metodologia tem potencial para contribuir em estudos de planejamento e operação de SEP, uma vez que foi mostrado que o valor definido de intercâmbio de potência reativa pode ter influência

significativa na condição operativa do sistema, influenciando as perdas elétricas, perfil de tensão, margem de carregamento, entre outros.

Os testes, realizados a partir do estudo de um sistema teste tutorial de 11 barras demonstraram a robustez e viabilidade de utilização da metodologia proposta em sistemas reais de grande porte, que serão objeto de estudos futuros, incluindo como variáveis controladoras outros recursos de suporte de potência reativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, FAPEMIG, ao CNPq e ao INERGE pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Ajjarapu, V. & Christy, C., 1992. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 7(1), pp. 416-423.
- Chopade, P., Bikdash, M., Kateeb, I. & Kelkar, A. D., 2011. *Reactive power management and voltage control of large Transmission System using SVC (Static VAR Compensator)*, pp. 85-90.
- dos Santos, M. J. et al., 2004. A new approach for area interchange control modeling. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 19(3), pp. 1271-1276.
- Kundur, P., Balu, N. J. & Lauby, M. G., 1994. *Power system stability and control*. s.l.:McGraw-hill New York.
- Lu, Y. & Abur, A., 2001. *Improving system static security via optimal placement of thyristor controlled series capacitors (TCSC)*, pp. 516-521.
- Monticelli, A. J., 1983. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. s.l.:E. Blucher.
- Passos Filho, J. A., 2000. *Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2000.
- Passos Filho, J. A., Henriques, R. M. & Alves, F. R. M., 2012. *Representação de Transformadores Defasadores no Problema de Fluxo de Potência*. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, 2012, Goiânia. Anais do IV SBSE, 2012.
- Sauer, P. et al., 2001. Reactive power support services in electricity markets. *Power System Eng Res Center (PSERC) Report*.
- Taylor, C., Scott, G. & Hammad, A., 1994. Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems (Institute of Electrical and Electronics Engineers);(United States)*, 9(1).
- Taylor, C. W., 2006. *Reactive Power and "Deregulation": System Engineering, Best Practices, Reliability, and Simplicity*.
- Variz, A. M., 2000. *Modelagem de Dispositivos de Controle em Fluxo de Potência Segundo uma Formulação de Injeção de Corrente*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2000.
- Zhong, J. & Bhattacharya, K., 2002. *Reactive power management in deregulated electricity markets-A review*. s.l., s.n., pp. 1287-1292.