



INFLUÊNCIA DE REDES ATIVAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Caio César Branco Nunes*¹, Antônio Carlos Zambroni de Souza², Lucas Simões Borges¹, Rafael Silva Mateus¹, Renan Souza Moura¹

¹IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Formiga

²UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

Resumo - Este trabalho busca apresentar uma discussão a respeito da influência do fluxo de potência reverso na margem de potência reativa da curva QV em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Com esse propósito, é mostrado o cálculo da curva QV com e sem a presença do fluxo de potência reverso em dois sistemas elétricos de potência, sistema do IEEE 57 barramentos e um sistema real brasileiro. De acordo com os cálculos realizados foi visto que o fluxo de potência reverso aumenta as margens negativas de potência reativa das curvas QV, o que resulta em uma melhora na estabilidade da tensão dinâmica. Os limites operacionais foram considerados em todas as simulações realizadas.

Palavras-Chave - curva QV, estudos de estabilidade de tensão, fluxo de potência reverso.

INFLUENCE OF ACTIVE NETWORKS IN VOLTAGE STABILITY STUDIES

Abstract - This work analyzes the influence of the reverse power flow in voltage stability studies. With this purpose, the QV curve is calculated with and without the presence of the reverse power flow in two electrical power systems, IEEE 57 bus system, and a Brazilian real system. The results demonstrated that the reverse power flow increases the negative reactive power margins of QV curves which means an improvement in dynamic voltage stability. In all simulations, the operational limits were considered.

Keywords - QV curve, reverse power flow, voltage stability studies.

I. INTRODUÇÃO

A área de estabilidade de tensão se preocupa com as tensões terminais dos barramentos após a ocorrência de um distúrbio [1]. Distúrbio é qualquer evento que altera o ponto de equilíbrio do sistema. Um distúrbio é classificado como pequeno se puder ser analisado por meio de equações algébricas como as do cálculo do fluxo de potência [2]. Um aumento na carga elétrica, uma comutação de transformadores

e a ativação de bancos de capacitores são exemplos de pequenos distúrbios. Um grande distúrbio é geralmente descrito usando equações algébricas diferenciais em simulações no domínio do tempo. A análise de um curto-circuito é um exemplo de um grande distúrbio.

Como forma de medir a robustez de um sistema elétrico em termos de estabilidade de tensão, foram criados índices como curva PV e curva QV. A curva PV permite determinar o ponto de colapso da tensão [3]. Vários trabalhos na Literatura Técnica propõem postergar o ponto de colapso de tensão usando a curva PV [4,5]. A margem de potência reativa da curva QV permite quantificar a robustez de uma barra em relação ao sistema elétrico [4]. Essa margem da curva QV também pode ser usada para determinar a melhor posição para instalar dispositivos que fornecem energia reativa ao sistema elétrico de potência [4,6,7].

Este artigo tem como objetivo analisar a influência do fluxo de potência reverso na margem de potência reativa fornecida pela curva QV. O fluxo de potência reverso ocorre quando a geração fornecida pelos sistemas de geração distribuída não é consumida, o que provoca absorção de potência pelo barramento de interface entre os sistemas de transmissão e distribuição. Estudos na literatura têm mostrado que o fluxo de potência reverso resulta em problemas operacionais para os sistemas de distribuição de energia elétrica [8,9,10]. A principal contribuição deste artigo é analisar a influência do fluxo de potência reverso em sistemas de transmissão. A curva QV será usada como índice de análise.

Este artigo está dividido da seguinte forma: A Fundamentação teórica é apresentada na Seção 2 para que a Metodologia, descrita na Seção 3, possa ser compreendida. Os resultados da influência do fluxo de potência reverso na curva QV em sistemas de transmissão são indicados e discutidos na Seção 4. As conclusões são descritas na Seção 5.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Método de continuação

A curva PV indica o comportamento da tensão terminal de um barramento sobre o fator de carga, como mostrado na Figura 1. O maior fator de carga é a carga elétrica máxima que pode ser fornecida por um sistema elétrico de potência. Neste artigo, a curva PV é obtida utilizando-se o Método de

Continuação [11,12]. A etapa preditiva do Método de Continuação é realizada utilizando equações (1), (2), (3) e (4):

$$P_{g(i)} = P_{g0(i)} \times (1 + \Delta\lambda) \quad (1)$$

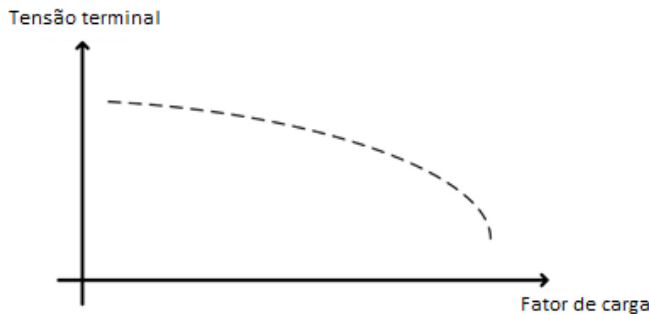
$$P_{l(i)} = P_{l0(i)} \times (1 + \Delta\lambda) \quad (2)$$

$$Q_{l(i)} = Q_{l0(i)} \times (1 + \Delta\lambda) \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = \frac{1}{\|VT\|} \quad (4)$$

Onde $P_{g0(i)}$, $P_{l0(i)}$, $Q_{l0(i)}$, $\Delta\lambda$ and $\|VT\|$ são, respectivamente, a potência ativa nominal gerada a partir de um barramento i , a potência ativa nominal consumida a partir do barramento i , a potência reativa nominal consumida a partir de um barramento i , a variação do fator de carga e a norma vetorial tangente. A etapa corretiva do Método de Continuação é obtida pelo cálculo do fluxo de potência após a aplicação de Equações (1), (2), (3) e (4).

Figura 1 – Curva PV Genérica [1].



A identificação de um barramento crítico de um sistema elétrico é obtida pela técnica Vetor Tangente [4,5], Equação (5).

$$VT = J^{-1} \times \begin{bmatrix} P_{i0} \\ Q_{i0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde J e $\begin{bmatrix} P_{i0} \\ Q_{i0} \end{bmatrix}$ são, respectivamente, a matriz jacobiana e a matriz de potência injetada.

B. Curva QV

A curva QV, uma ferramenta usada em estudos de estabilidade de tensão, descreve a relação entre a potência reativa e o nível de tensão de um barramento conectado a um sistema elétrico. A Figura 2 ilustra uma curva QV genérica. O ponto A na Figura 2 é considerado estável devido ao aumento da potência reativa que resulta em um aumento no nível de tensão. As regiões operacionais em torno do ponto de operação B devem ser evitadas. Com essa preocupação, os autores de [6] propuseram uma maneira de transformar pontos instáveis na curva QV em pontos estáveis.

Figura 2 – Curva QV Genérica



A margem de potência reativa mostrada na Figura 2 pode ser classificada como positiva ou negativa. Em [7] é mostrado que a margem positiva da curva QV está associada a instabilidades dinâmicas de tensão. A curva QV é calculada mantendo as cargas constantes. Neste artigo, é apresentado o cálculo das curvas QV para diferentes fatores de carga. Estes diferentes fatores de carga foram obtidos pela curva PV (carga leve, carga média e carga pesada).

C. Fluxo de potência reverso em sistema de distribuição

A Figura 3 ilustra a direção convencional do fluxo de potência no sistema de distribuição de energia elétrica. No entanto, quando o valor da geração distribuída excede o consumo, há a ocorrência do fluxo de potência reverso como mostrado na Figura 4. Durante o fluxo de potência reverso, o barramento entre o sistema de distribuição e transmissão recebe o excesso de potência não consumida pelo sistema de distribuição de eletricidade.

A modelagem do fluxo de potência reverso foi realizada considerando cargas ativas com sinais negativos durante o cálculo das curvas QV nos sistemas de transmissão.

Figura 3 - Fluxo de potência convencional

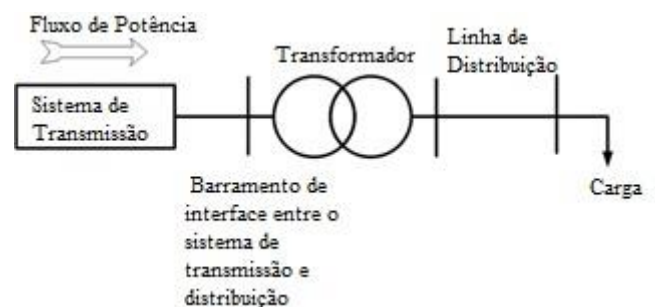
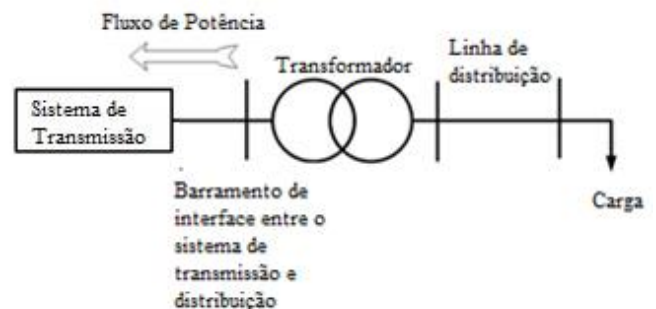


Figura 4 – Fluxo de potência reverso



III. METODOLOGIA

A metodologia usada para determinar a influência do fluxo de potência reversa na curva de QV é a seguinte:

1. Cálculo da curva QV sem a presença de fluxo de potência reverso em sistemas elétricos de potência.
2. Cálculo da curva QV com a inserção do fluxo de potência reverso na barra crítica de cada sistema elétrico de potência analisado.
3. Cálculo da curva QV com a inserção do fluxo de potência reverso na primeira vizinhança crítica de cada sistema elétrico analisado.
4. Cálculo da curva QV com a inserção do fluxo de potência reverso na segunda vizinhança crítica de cada sistema elétrico analisado.

A barra crítica de cada sistema elétrico de potência é obtida pelo Método do Vetor Tangente [11,12]. A primeira vizinhança é formada pelo barramento crítico e todos os barramentos que têm uma conexão elétrica ao barramento crítico. A segunda vizinhança é formada por todos os barramentos da primeira vizinhança e os barramentos externos que têm uma conexão elétrica com algum barramento da primeira vizinhança.

Por fim, é realizada uma comparação entre as margens de potência reativa das curvas QV com e sem a presença do fluxo de potência reverso.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As tabelas I, II, III e IV indicam as margens de potência reativa da curva QV sem e com a presença do fluxo de potência reverso no sistema de barramento IEEE 57.

Tabela I- Margem de potência reativa da curva QV sem o fluxo de potência reverso no sistema IEEE 57 barramentos.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.2	1.5
1	-0.2783	0.9139	X
2	-8.3379	-7.8754	X
3	-3.6828	-1.8956	X
6	-2.2237	-1.3769	X
8	-0.9109	0.3623	X
9	-2.7118	-1.5018	X
12	-2.2164	-0.9165	X

Tabela II- Margem de potência reativa da curva QV com o fluxo de potência reverso na barra crítica no sistema IEEE 57 barramentos.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.2	1.5
1	-0.3742	0.7481	2.7639
2	-8.6860	-8.2909	-1.3076
3	-3.7868	-3.1240	0.00815
6	-2.2860	-1.8372	-0.0816
8	-1.0146	-0.3075	1.6762
9	-2.8106	-2.1529	-0.2210
12	-2.3139	-1.6553	1.1767

Tabela III- Margem de potência reativa da curva QV com o fluxo de potência reverso na primeira vizinhança no sistema IEEE 57 barramentos.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.2	1.5
1	-0.4656	0.5963	2.4933
2	-8.3722	-8.3337	-3.8766
3	-3.8377	-3.2471	-0.5436
6	-2.3179	-1.8509	-0.4818
8	-1.0571	-0.4152	1.2889
9	-2.8549	-2.2183	-0.5842
12	-2.4821	-1.6551	0.5309

Tabela IV- Margem de potência reativa da curva QV com o fluxo de potência reverso na segunda vizinhança no sistema IEEE 57 barramentos.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.2	1.5
1	-0.4597	0.68888	2.5229
2	-8.3749	-8.3039	-3.0481
3	-3.8099	-2.2849	-0.0917
6	-2.2917	-1.5731	-0.2012
8	-1.0062	0.1281	1.5369
9	-2.8229	-1.7554	-0.3556
12	-2.3544	-1.0302	0.8872

De acordo com as Tabelas I, II, III e IV, a inserção do fluxo de potência reverso na barra crítica, na primeira vizinhança e na segunda vizinhança resultou em margens das curvas QV mais negativas em relação aos resultados sem a presença do fluxo de potência reverso.

Após os testes realizados no sistema de 57 barramentos padronizado pelo IEEE, deu-se início aos testes em um sistema real, sendo o sistema Sul-Sudeste o escolhido para realizar este estudo. Na Tabela V, é apresentada as margens de potência reativa de diferentes geradores do respectivo sistema

em sua condição de operação sem a inserção do fluxo de potência reverso. Para cada gerador é apresentado as margens da curva QV para diferentes configurações de carga, sendo leve, média e pesada.

Tabela V- Margem de potência reativa da curva QV sem o fluxo de potência reverso no sistema real Sul-Sudeste.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.06	1.11
1	-11.516	-10.8762	-6.6482
2	-6.5386	-3.6020	0.6770
3	-4.2824	-1.3200	2.6319
17	-8.8353	-8.2003	-7.5778
18	-4.6042	-4.5258	-4.3266
19	-7.1653	-7.0007	-6.6589
20	-10.1595	-9.7742	-8.2448
26	-13.2306	-10.1341	-2.5813
29	-4.7779	-0.1564	4.9854
30	-6.4323	-4.1145	1.371
31	-8.7695	-4.5050	3.7849
43	-4.5344	-0.9324	3.6517
44	-5.1686	-2.1979	2.4244
45	-2.3587	-1.7795	0.0844
46	-8.3828	-5.5806	1.2638

Na Tabela VI, são apresentadas as margens de potência reativa para os mesmos geradores com a inserção do fluxo de potência reverso no barramento crítico. O Barramento crítico é definido pelo barramento que apresenta o menor valor de tensão.

Tabela VI- Margem de potência reativa da curva QV com o fluxo de potência reverso na barra crítica no sistema real Sul-Sudeste.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.06	1.11
1	-11.5964	-11.0160	-10.4086
2	-7.4402	-5.4892	-2.9602
3	-5.8649	-3.3860	-0.8268
17	-8.8582	-8.2453	-7.7908
18	-4.6081	-4.5319	-4.4623
19	-7.1754	-7.0167	-6.8678
20	-10.243	-9.9138	-9.5615
26	-13.8421	-11.9318	-8.9954
29	-7.0577	-3.2271	0.9959
30	-6.6428	-5.0942	-2.8058
31	-9.5779	-6.8623	-1.8705
43	-5.3347	-2.3368	1.1261
44	-5.8534	-3.4447	-0.5704
45	-2.4531	-1.9394	-1.3614
46	-8.7781	-7.2149	-3.243

Comparando as duas tabelas, é visto que a margem de potência positiva se tornou menos positiva com a inserção do fluxo de potência reverso.

Em seguida são mostrados na Tabela VII os valores de margem de potência reativa obtidos pela inserção do fluxo de potência reverso na primeira vizinhança, a qual apresenta barramentos conectados diretamente a barra crítica.

Tabela VII- Margem de potência reativa da curva QV com o fluxo de potência reverso na primeira vizinhança no sistema real Sul-Sudeste.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.06	1.11
1	-11.5964	-11.0160	-10.4086
2	-7.4402	-5.4892	-2.9602
3	-5.8649	-3.3860	-0.8268
17	-8.8582	-8.2453	-7.7908
18	-4.6081	-4.5319	-4.4623
19	-7.1754	-7.0167	-6.8678
20	-10.243	-9.9138	-9.5615
26	-13.8421	-11.9318	-8.9954
29	-7.0577	-3.2271	0.9959
30	-6.6428	-5.0942	-2.8058
31	-9.5779	-6.8623	-1.8705
43	-5.3347	-2.3368	1.1261
44	-5.8534	-3.4447	-0.5704
45	-2.4531	-1.9394	-1.3614
46	-8.7781	-7.2149	-3.243

Por fim, a Tabela VIII apresenta valores das margens de potência reativa da curva QV após a inserção do fluxo de potência reverso na segunda vizinhança, que são os barramentos que de alguma forma estão conectadas as barras da primeira vizinhança.

Tabela VIII- Margem de potência reativa da curva QV com o fluxo de potência reverso na segunda vizinhança no sistema real Sul-Sudeste.

GERADORES	FATOR DE CARGA		
	1.0	1.06	1.11
1	-11.5507	-10.9396	-9.9344
2	-6.8930	-4.3831	-0.9815
3	-5.1736	-2.5202	0.3578
17	-8.8454	-8.2208	-7.7455
18	-4.6059	-4.5286	-4.4565
19	-7.1697	-7.0079	-6.8525
20	-10.1956	-9.8369	-9.4005
26	-13.4984	-10.9150	-7.4454
29	-6.8130	-2.7958	1.6363
30	-6.6159	-4.9551	-2.2415
31	-9.4848	-6.4763	-0.8732
43	-5.1798	-2.1329	1.5267
44	-5.7377	-3.1559	0.0115
45	-2.4407	-1.9173	-1.2729
46	-8.7297	-7.0431	-2.563

Como uma margem de potência reativa positiva está associada à instabilidade dinâmica [14], pode-se afirmar que embora o fluxo de potência reverso cause transtornos operacionais para os sistemas de distribuição de energia [8], existem benefícios para os sistemas de transmissão em estudos de estabilidade de tensão.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise que aborda a influência do fluxo de potência reverso em estudos de estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica, em que a curva QV foi utilizada como ferramenta de análise.

Sendo o fenômeno do fluxo de potência reverso um motivo de preocupação para os operadores do sistema elétrico de distribuição, os resultados apontam que o fluxo de potência reverso é benéfico para estudos de estabilidade de tensão quando a área de análise é a transmissão de eletricidade.

Portanto, com base nos resultados analisados, é sugerido que sejam realizadas mais discussões sobre o tema para obter um ponto operacional ideal de todas as partes pertencentes ao sistema de energia elétrica (geração, transmissão e distribuição).

VI. REFERÊNCIAS

- [1] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Anderson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, issue 3, 2004.
- [2] Lynn Powell, Power System Load Flow Analysis, 1st ed., vol. 1, McGraw-Hill Education, 2004.
- [3] A. C. Zambroni de Souza, V.H. Quintana, "Identification of voltage collapse margins in power systems". Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vancouver, BC, Canada, 14-17 de Sep. 1993.
- [4] Rahul Kumar, Apurav Mittal, Nikhil Sharma, I Vinay Duggal, Ashwani Kumar, "PV and QV curve analysis using series and shunt compensation". 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), SONEPAT, India, India, 28 Feb-1 March 2020.
- [5] Lopes, B.I.L. ; Souza, A.C.Z. ; Marujo, D. ; Moura, R.S., "Blocking reactive power generation as a voltage control measure". 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, 2013.
- [6] Bukola Babatunde Adetokun, Joseph Olorunfemi Ojo, Christopher Maina Muriithi, "Reactive Power-Voltage-Based Voltage Instability Sensitivity Indices for Power Grid with Increasing Renewable Energy Penetration", IEEE Access, vol. 8, pp. 85401-85410, 13 may 2020.
- [7] Neha Manjul, Mahiraj Singh Rawat, "PV/QV curve based optimal placement of static var system in power network using DigSilent power factory". 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), Kurukshetra, India, India, 10-12 Dec. 2018.
- [8] Shahinur Rahman, Haneen Aburub, Masood Moghaddami, Arif I. Sarwat, "Reverse Power Flow Protection in Grid Connected PV Systems". SoutheastCon 2018, St. Petersburg, FL, USA, 19-22 April 2018.
- [9] Hamidreza Nazaripouya, Hemanshu Roy Pota, Chi-Cheng Chu, Rajit Gadhu, "Real-time model-free coordination of active and reactive powers of distributed energy resources to improve voltage regulation in distribution systems". IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, issue 3, pp.1483-1494, 2020.
- [10] Zeina Al Rammal, Nivine Abou Daher, Hadi Kanaan, Imad Mougharbel, Maarouf Saad, "Optimal PMU placement for reverse power flow detection". 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Beirut, Lebanon, 1-2 Nov. 2018.
- [11] F.W. Mohn, A.C.Z. de Souza, "Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC continuation method". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, issue 3, pp.1115-1122, 2006.
- [12] A.C.Z de Souza, C.A. Canizares, V.H. Quintana, "New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, issue 3, pp.1380-1387, 1997.

[13]Diogo Marujo, A.C. Zambroni de Souza, B. Isaias Lima Lopes, Marcos V. Santos, Kwok L. Lo, “On Control Actions Effects by Using QV Curves”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, issue 3, pp. 1298-1305, 2015.

[14]Renan S. Moura, Antonio Carlos Zambroni de Souza, Benedito Isaias Lima Lopes, Fritz Walter Mohn, “Effects of QV curves in the dynamic behaviour of power systems”. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, issue 12, pp. 2861-2870, 2016