

**AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DOS CONTROLADORES DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS E SEUS IMPACTOS NA ESTABILIDADE ANGULAR DO SISTEMA**

André Luiz M. M. Alves<sup>1</sup> (IC), Ivan P. Faria (PQ)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.

**Palavras-chave:** Sistemas Elétricos de Potência. Estabilidade Eletromecânica. Compensador Estático de Reativos.

**Introdução**

Devido à crescente demanda energética nacional, que exigem do sistema um aumento de capacidade de geração e de maior interconexão do sistema, o SEP tem se tornado cada vez mais complexo. O estudo da estabilidade angular é uma das maneiras mais eficientes de se prever situações que possam ser perigosas ao processo. Assim, o uso de ferramentas computacionais para simulação dos parâmetros da máquina e seus controles tornou-se aspecto indispensável para auxiliar nos estudos e análises da estabilidade. Diante desse contexto, propôs-se adaptar um sistema 14 barras disponível na base de dados do software ANATEM no intuito de avaliar como o mesmo se comporta para diferentes ajustes dos compensadores estáticos de reativos (SVC – Static Var Compensator).

Via comandos no ANATEM, submeteu-se o sistema a um curto-circuito, com posterior remoção da linha com maior carregamento. O intuito foi aferir quais os polos mais críticos do Sistema, e definir a eficácia da implementação do SVC na estabilidade angular dos mesmos. Os polos mais críticos são apresentados na tabela 1.

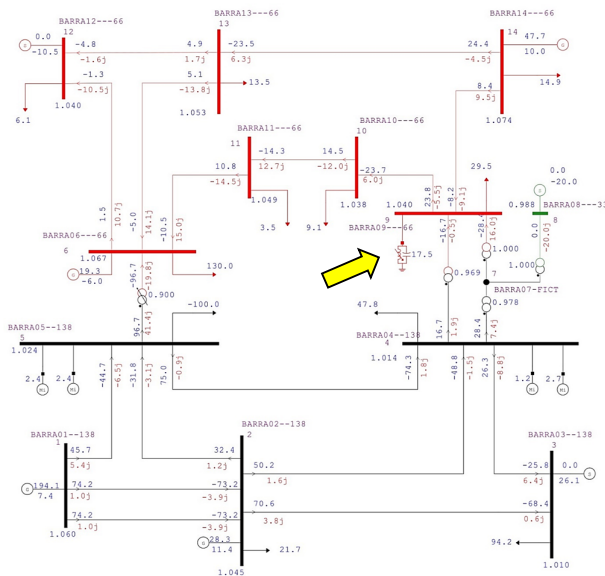
**Tabela 1 – Polos mais críticos sob análise**

	Real	Imaginário	Amortecimento (%)	Frequência (Hz)	Origem
1	-1,0904	9,5570	11,336	1,5210	Ângulo de carga máquina barra 14
2	-2,1090	13,142	15,534	2,1345	Ângulo de carga máquina barra 3
3	-2,0340	11,425	17,528	1,8183	Ângulo de carga máquina barra 12
4	-2,8255	14,299	19,476	2,2647	Ângulo de carga máquina barra 2
5	-2,1239	10,222	20,343	1,6269	Ângulo de carga máquina barra 8
6	-2,9849	13,075	22,256	2,0810	Ângulo de carga máquina barra 6

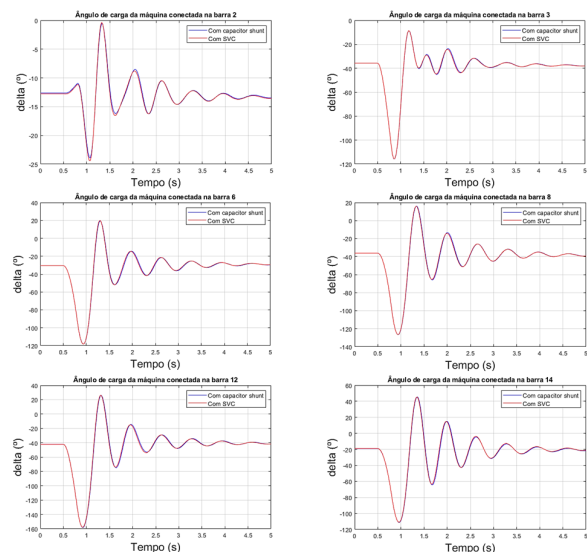
**Metodologia**

A Fig. 1 apresenta o sistema 14 barras no ANAREDE, adaptado da base de dados do ANATEM, no qual o banco shunt capacitivo conectado à barra 9 foi substituído por um SVC.

Aferiu-se a eficiência da substituição de um banco shunt capacitivo por um SVC a partir de comparações visuais entre gráficos plotados no MATLAB, tal qual a Fig. 2, cujas curvas representam o ângulo de carga das máquinas conectadas às barras perante a situação de contingência.



**Fig. 1 – Sistema 14 barras adaptado**



**Fig. 2 – Comparação entre uso de banco shunt capacitivo e SVC**

É possível afirmar, após analisar atentamente a Fig.2, que a simples substituição de um banco shunt capacitivo por um SVC não promove melhorias significativas na estabilidade angular. O compensador estático de reativos possui em seu interior um controle proporcional integrativo, cujos ganhos devem ser variados conforme a necessidade.

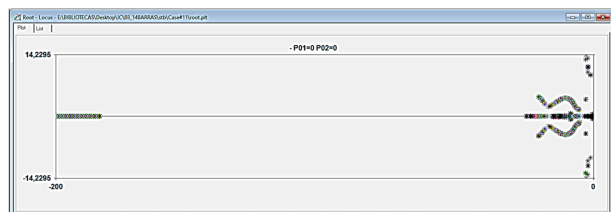
Utilizou-se o software PACDYN para variar os ganhos proporcional e integrativo através do método do lugar das raízes, definindo assim qual o melhor conjunto de parâmetros K2 e K3 (ganhos integrativo e proporcional, respectivamente).

Após alguns experimentos variando um parâmetro e fixando o outro, definiu-se que o mais prudente seria variar ambos parâmetros juntos, visto que ambos ganhos promovem mudanças no amortecimento apenas quando aumentam ou diminuem juntos. A tabela 2 apresenta o resultado obtido após diminuir ambos parâmetros simultaneamente.

**Tabela 2 – Mudanças no lugar das raízes com diminuição dos dois parâmetros**

Origem	K3 = 100; K2 = 0,05		K3 = 0; K2 = 0	
	Polo	Amort. (%)	Polo	Amort. (%)
Ângulo de carga da máquina barra 14	-1,090+ j9,5570	11,336	-1,079 + j9,5003	11,295
Ângulo de carga da máquina barra 3	-2,109+ j13,142	15,534	-2,106 + j13,402	15,530
Ângulo de carga da máquina barra 12	-2,034+ j11,425	17,528	-2,027 + j11,392	17,520
Ângulo de carga da máquina barra 2	-2,825+ j14,299	19,476	-2,829 + j14,228	19,502
Ângulo de carga da máquina barra 8	-2,123+ j10,222	20,343	-2,122 + j10,231	20,315
Ângulo de carga da máquina barra 6	-2,984+ j13,075	22,256	-2,983 + j13,077	22,257

A Fig. 3 explicita os resultados apresentados na tabela 2. É perceptível que o amortecimento dos polos sob análise praticamente não se altera, quando os ganhos integrativo e proporcional diminuem. Os seis polos sob análise, mais afastados do eixo real, praticamente não se movem enquanto os demais apresentam o comportamento de se afastar da origem.



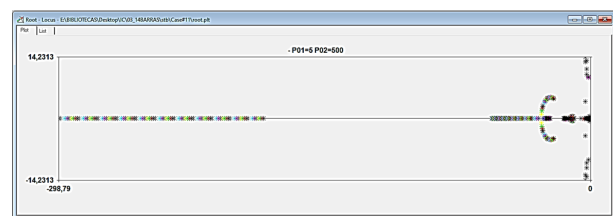
**Fig. 3 – Comportamento do lugar das raízes quando ambos parâmetros diminuem**

A Tabela 3 apresenta o resultado obtido após aumentar ambos parâmetros simultaneamente.

**Tabela 3 – Mudanças no lugar das raízes com aumento dos dois parâmetros**

Origem	K3 = 100; K2 = 0,05		K3 = 500; K2 = 5	
	Polo	Amort. (%)	Polo	Amort. (%)
Ângulo de carga da máquina barra 14	-1,090+ j9,5570	11,336	-1,1095 + j9,5519	11,538
Ângulo de carga da máquina barra 3	-2,109+ j13,142	15,534	-2,1139 + j13,410	15,572
Ângulo de carga da máquina barra 12	-2,034+ j11,425	17,528	-2,0475 + j11,420	17,649
Ângulo de carga da máquina barra 2	-2,825+ j14,299	19,476	-2,8266 + j14,231	19,481
Ângulo de carga da máquina barra 8	-2,123+ j10,222	20,343	-2,1204 + j10,222	20,311
Ângulo de carga da máquina barra 6	-2,984+ j13,075	22,256	-2,9840 + j13,076	22,249

A Fig. 4 explicita os resultados apresentados na tabela 3. É possível concluir que o amortecimento da maioria dos polos sofre aumento significativo quando os ganhos proporcional e integrativo sofrem aumento. Os seis polos sob análise, mais afastados do eixo real, praticamente não se movem enquanto os demais apresentam o comportamento de se afastar da origem.



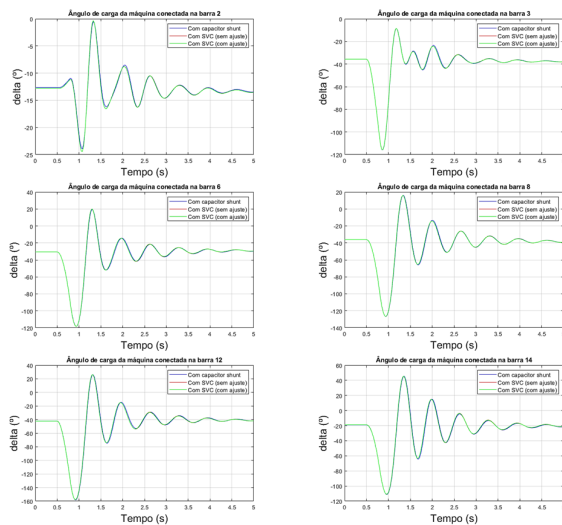
**Fig. 4 – Comportamento do lugar das raízes quando ambos parâmetros aumentam**

Após análise das tabelas 2 e 3, é perceptível que quanto mais se aumenta os ganhos proporcional e integrativo, maior a estabilidade angular alcançada, quando se compara com o resultado obtido com a diminuição de ambos parâmetros.

No presente trabalho, por limitações físicas (hardware e software), selecionou-se apenas 100 pontos no mapa do lugar das raízes, também definindo um modesto aumento/diminuição dos ganhos do controlador.

## Resultados e discussão

Aliado ao método do lugar das raízes, cada um dos parâmetros possíveis foi testado manualmente, e comparado graficamente para aferir a melhor combinação de ganhos para a configuração adotada no trabalho (substituição do banco shunt capacitivo por um SVC na barra 9 do sistema). De posse dos melhores parâmetros testados, substituiu-se os valores default do compensador estático de reativos pelos otimizados. A Fig. 5 expõe os resultados obtidos, por meio da comparação entre o sistema original (banco shunt capacitivo), o sistema adaptado inicial (SVC default) e o sistema adaptado final (SVC ajustado).



**Fig. 5 – Comparação final entre o banco shunt capacitivo, SVC default e SVC ajustado**

A partir da Fig. 5 conclui-se que os ajustes promoveram alterações insignificantes na estabilidade angular do sistema.

## Conclusões

No caso estudado, a substituição de um banco shunt capacitivo por um SVC não produziu o resultado esperado. Conforme a teoria apresentada, era desejado que a estabilidade angular do sistema melhorasse com a troca, o que não aconteceu. Apesar do resultado inicial (pouca diferença de desempenho na comparação banco shunt capacitivo versus SVC default), ajustou-se os parâmetros internos do compensador estático de reativos para aferir qualitativamente os efeitos dessas variações na estabilidade da rede perante situação de contingência.

Na configuração estudada, a variação dos parâmetros internos do SVC provoca mudanças tão insignificantes no desempenho do equipamento que é inviável substituir o banco shunt capacitivo por um compensador estático de reativos em um sistema idêntico ao analisado.

Com embasamento teórico, é possível afirmar que em outra configuração o resultado obtido seria diferente. Não é correto generalizar um resultado, visto que em outros sistemas ou configurações no SEP o compensador estático de reativos poderia ter um desempenho muito superior ao esperado, diferentemente do apresentado nesse trabalho.

## Agradecimento

O autor gostaria de expressar seus agradecimentos ao órgão de fomento Fapemig, responsável pela bolsa de estudos fornecida.

Sinceros agradecimentos ao professor orientador Ivan Paulo de Faria, pela oportunidade fornecida.

## Referências

- [1] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, “Balanço Energético Nacional: Relatório Final”, Rio de Janeiro (RJ), 2021.
- [2] A. C. Caminha, “Introdução à Proteção de Sistemas Elétricos”, Editora Edgard Blucher, São Paulo (SP), 1999.
- [3] SEN, P. C.. Principles of Electric Machines and Power Electronics. 2a Edição. Editora John Wiley and Sons. 2006, ISBN: 471022950
- [4] LIMA, J. C. M., “Aspectos de Proteção e Controle do Gerador Síncrono Subexcitado”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2002.
- [5] MARUJO, Diogo. “ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM A PRESENÇA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVAS”, Itajubá (MG), 2017
- [6] ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. Power System Control and Stability. Danvers: John Wiley & Sons, 2003.
- [7] G. Kindermann, Proteção de Sistemas de Potência, volume 3, 1ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis (SC), 2008.
- [8] J. M. Lima, “Usinas Hidrelétricas: Diretrizes Básicas para Proteção e Controle”, Editora Synergia, Rio de Janeiro (RJ), 2009.
- [9] IEEE PES, “IEEE Guide for AC Generator Protection”, IEEE Std. C37.102TM, 2006.
- [10] Berdy, J. (1975). Loss of excitation protection for modern synchronous generators, IEEE Transactions.
- [11] Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), “Multifunction Generator Relay”, SEL300G Instruction Manual.
- [12] COELHO, A. L. M. Um Sistema Integrado de Testes de Funções de Proteção de Geradores Síncronos Associadas aos Limites de Excitação de um Modelo de AVR Implementado em Ambiente de Simulação Digital em Tempo Real. Tese de Doutorado, UNIFEI, Itajubá (MG), 2016.
- [13] FRONTIN, S. O. et al. “Equipamentos de alta tensão-prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas”, Finatec 1ª Edição, Brasília, 2013
- [14] GENE F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naieni. Sistemas de Controle para Engenharia, Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [15] KUNDUR, P. (1994). Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill