

SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GAT – 055 19 a 24 Outubro de 2003 Uberlândia - Minas Gerais

GRUPO IV ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

CONTROLE COORDENADO DE TENSÃO APLICADO A USINAS NUCLEARES ELETRICAMENTE PRÓXIMAS

José R. B. Marinho*	Júlio C. R. Ferraz	Nelson Martins	Ricardo B. Prada	Carlos H. C. Guimarães
ELETRONUCLEAR	CEPEL	CEPEL	PUC-RJ	UFF

RESUMO

Neste trabalho são apresentados resultados da aplicação de um esquema de controle coordenado de tensão na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (Usinas de Angra 1 e Angra 2).

A melhoria no desempenho quanto à tensão e quanto à geração de potência reativa do conjunto é evidenciada através de simulações mostrando o comportamento do complexo quando há variação da carga no sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Controle Coordenado de Tensão. Controle Secundário de Tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O problema de Controle Coordenado de Tensão vem despertando interesse cada vez maior por parte das empresas de geração e transmissão do país e do exterior. Países como França, Itália, Bélgica e Espanha têm esquemas hierárquicos de controle de tensão bastante desenvolvidos (Controle Primário, Secundário e Terciário) [1, 2, 3, 4]. O interesse atualmente também tem sido grande nos EUA, tendo havido um Painel no IEEE Summer Meeting em Seattle (julho de 2000) [5] bastante concorrido e com alta participação. No âmbito do CIGRÉ, a Força - Tarefa TF 38.02.23 "Coordinated Voltage Control in Transmisssion Networks" está em fase de conclusão de seus trabalhos, visando a publicação de um livro sobre o estado-da-arte no tema.

O Controle Coordenado de Tensão visa melhorar o desempenho da tensão do sistema aumentando as margens de carregamento da rede, e fazendo melhor utilização das reservas reativas do sistema. Ele introduz um maior grau de automação no controle de tensão, reduzindo o trabalho repetitivo dos operadores, que podem então se dedicar à monitoração do sistema em mais alto nível.

Neste artigo são apresentados os resultados da utilização de um Controle Secundário em malha fechada da tensão da barra de 500 kV de Angra, envolvendo a participação das unidades 01 e 02 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

São apresentados as simulações dinâmicas efetuadas considerando-se a configuração básica de geração das usinas. Estas simulações mostram os benefícios desta modalidade de controle coordenado de tensão, num sistema elétrico de teste de pequena escala composto de 7 (sete) barras e 3 (três) linhas de transmissão.

Somente as usinas geradoras de Angra 1 e 2 foram consideradas como atuantes no Controle Secundário de Tensão. Esquemas de controle coordenado de tensão (primário, secundário ou terciário) implantados em outros sistemas não excluem a utilização dos diversos equipamentos de compensação de potência reativa da rede de transmissão.

A validação dinâmica do desempenho deste sistema de controle foi obtida utilizando o programa ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL. Foram avaliadas diversas grandezas como as tensões e potência ativa e reativa.

* Estrada Velha de Tribobó, 285 – C10 - CEP 24755-490 - Niterói - RJ - BRASIL Tel.: (21) 2617-6970 - E-MAIL: jrbonat@eletronuclear.gov.br

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto tem sua ligação com o restante do sistema esquematicamente descrita na Figura 1.



FIGURA 1 – CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA DOS REIS.

O sistema teste utilizado nas simulações é apresentado na Figura 2. Este sistema é composto por 7 barras, dentre elas duas barras de geração, uma barra conectada a um compensador síncrono, uma barra de carga e uma barra infinita. Os dados do sistema são apresentados na Tabela 1.



FIGURA 2 - SISTEMA TESTE.

As unidades geradoras 1 e 2 apresentam capacidades e parâmetros diferentes, sendo suas potências nominais iguais a 760 MVA e 1458 MVA, respectivamente. As constantes de amortecimento mecânico D de todas máquinas envolvidas nas simulações foram consideradas como sendo iguais a zero.

As linhas de transmissão do sistema teste têm sua susceptância capacitiva representada.

TABELA 1 – DADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA.

Dados de Geração									
N ^º da		Tensão				Geração			
Barra Módu		ılo	o Ângulo		MW	MVAr		Q _{Max}	
1	0,995 pu		9,1 [°]		500	-0,9		360	
2	0,995 pu		8,9 [°]		1000	-1,7		650	
3	1,016 pu		-5.9 °		0,0	172,4		400	
4	1,000 pu		(0,0 [°]	15,2	-70,9		-	
Dados de Carga									
N ^⁰ da		Tensão			Carga				
Barra	Módu	Módulo		ódulo MW		MVAr		/IVAr	
20	1,000	pu 3		3,4°	0		0		
30	1,000	1,000 pu		5,9 [°]	1500	150			
40	1,005	1,005 pu		0,1 ° 0		0			
Dados das Linhas									
De	Para	Circ	uito	Impedância Série (%)		Admitância Shunt (Mvar)			
20	1	1	1	j 1,970		-			
20	2	1	1	j 0,952		-			
3	30	1	1	j 0,950		-			
4	40	1	1	0,045 + j 0,77		-			
20	30	1	1	0,092 + j 1,48			119,6		
20	40	1	1	0,092 + j 1,48			119,6		
30	40	1	1	0,152 + j 2,39		202,7			

Os modelos dos sistemas de controle de excitação dos geradores utilizados nas máquinas são os apresentados no banco de dados do ONS referentes a Outubro de 2002. Os modelos dos reguladores de velocidade dos turbo-geradores de Angra foram obtidos do mesmo banco de dados.

Foi adotado um modelo estático, do tipo potência constante para a carga representada na Barra 30. O valor inicial considerado para esta carga foi de 1500 MW e 150 MVAr. A Barra 20 (Angra 500 kV) foi considerada como nó-piloto nas simulações, denominação dada àquela barra que tem sua tensão controlada pelo Controle Secundário de Tensão.

Os tapes dos transformadores T1 (com OLTC) e T2 (com LTC) foram considerados, nos casos onde o Controle Secundário de Tensão (CST) não estava presente, como sendo (1:1,1) e (1:1), respectivamente. Já nos casos onde havia ação do CST os valores foram iguais a (1:1) para os dois transformadores.

A Figura 3 apresenta a estrutura básica de controle da tensão no sistema teste. Além do Controle Primário de Tensão, realizado pelos Reguladores Automáticos de Tensão (RAT) das usinas, é descrito o esquema do Controle Secundário de Tensão (CST). Este último visa a manutenção da tensão do nó-piloto (Barra 20 – Angra 500 kV) no valor especificado.



FIGURA 3 – DIAGRAMA DO SISTEMA DE CONTROLE.

O diagrama da Figura 3 é derivado do Controle Secundário de Tensão (CST) originalmente apresentado em [6]. Esta estrutura compõe-se de controladores do tipo proporcional-integral (PI) com o propósito de manter a tensão do nó-piloto no valor estipulado. O sistema de controle utiliza-se de uma estrutura controladora central tendo como sinais de entrada a tensão do nó-piloto e as potências reativas instantâneas das usinas participantes do controle de tensão.

O controlador central envia para os controladores de cada máquina participante do Controle Secundário o sinal de potência reativa total (Q_{total}) e o sinal de tensão a ser injetado no regulador de tensão.

Em cada uma das unidades participantes do CST são utilizados controladores PI que regulam as suas saídas individuais de potência reativa. Estes controladores recebem os dois sinais enviados pelo controlador central e a este enviam o sinal instantâneo de saída de potência reativa da usina.

Neste esquema de controle, a participação de cada unidade no suprimento de potência reativa é definida pelos ganhos *a*, designados fatores de participação. Eles definem a relação entre as potências reativas geradas em regime permanente pelas unidades participantes do CST (Q_{G1} : Q_{G2}). Neste artigo, foram utilizados os coeficientes proporcionais à potência máxima de cada máquina: $a_1 = 0.33$ e $a_2 = 0.67$.

Os fatores de participação podem ser estabelecidos por ação do Controle Terciário de Tensão (CTT), controle com nível hierárquico superior ao CST. Isto pode ser feito conforme processo de otimização associado ao CTT. Uma das possíveis estratégias de controle do CTT pode contemplar, por exemplo, a maximização das margens de potência reativa dos geradores participantes do CST.

Os fatores de participação podem ser, também, ajustados manualmente pelos operadores das usinas, em face de alguma restrição operacional do sistema após entendimentos prévios com o despacho regional de carga.

No caso presente, foi considerada a restrição operacional caracterizada pela indisponibilidade do acionamento do comutador de tapes sob carga do transformador elevador T2. Desta forma, não há alteração de tapes durante as simulações.

Os valores dos parâmetros utilizados neste esquema de controle secundário de tensão foram os mesmos apresentados em [6] e descritos na Tabela 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS NOS CONTROLADORES DO TIPO PI.

K _{I1}	K _{P1}	K _{l2}	K _{P2}	K _{I3}	K _{P3}
0,05	0,005	0,05	0,005	0,05	0,005

3.0 - RESULTADOS

Esta Seção apresenta resultados do desempenho dinâmico de potência reativa e tensão das usinas nucleares de Angra 1 e 2 na ausência e presença de esquema de controle coordenado de tensão.

Nas simulações, a barra de carga tem sua potência (ativa e reativa) variada conforme a Figura 4 e a Figura 5. O horizonte de tempo é de 2400 segundos, e as alterações de carga acontecem a cada 200 segundos. Este intervalo é suficiente para que os transitórios dinâmicos modelados estejam completamente atenuados. Desta forma, pode ser feita uma analogia entre as curvas apresentadas na Figura 4 e na Figura 5 com a curva de variação da carga do sistema durante, por exemplo, 12 horas.



FIGURA 4 – POTÊNCIA ATIVA DA CARGA.



FIGURA 5 – POTÊNCIA REATIVA DA CARGA.

O despacho de potência ativa das duas usinas da Central Nuclear de Angra é mantido constante durante todo o processo, independentemente da existência de controle coordenado. Este comportamento pode ser observado na Figura 6 e reflete a prática operativa de centrais nucleares, cujo despacho ativo não deve ser afetado por variações de freqüência do sistema (desde que esta se mantenha dentro de faixas operativas normais).



FIGURA 6 – POTÊNCIA ATIVA GERADA PELAS USINAS DE ANGRA 1 E 2 (COM E SEM CST)

Os resultados apresentados neste item mostram a capacidade do esquema de CST de regular a tensão de um nó-piloto do sistema. Além disso, o CST ajusta

as potências reativas das unidades participantes de acordo com as suas capacidades.

Os esquemas de CCT podem ser simulados por programas de estabilidade de médio prazo que possuem capacidade de modelar controladores definidos por usuário. As simulações apresentadas neste artigo foram obtidas com o programa ANATEM. Desta forma os resultados são suficientemente precisos tanto para as dinâmicas rápidas (ação dos RAT's e oscilações eletromecânicas) quanto para a dinâmica de tensão de médio prazo associada a ação do CST.

Este artigo apresenta resultados da análise de duas situações: variação da carga da Barra 30 conforme os patamares descritos na Tabela 2, na ausência e presença do CST.

A Figura 7 e a Figura 8 mostram o desempenho da tensão na presença e na ausência do Controle Secundário de Tensão. Na primeira situação (Figura 7) as tensões nas barras terminais das usinas são reguladas em aproximadamente 0,96 pu e 1,00 pu. A tensão da barra de alta (Angra 500 kV) varia em torno de 1,00 pu e não tem sua tensão regulada.

Com o CST presente (Figura 8), as tensões das barras terminais são alteradas de forma que a tensão da barra de alta seja mantida em 1,00 pu.



FIGURA 7 – DESEMPENHO DAS TENSÕES SEM CST.



FIGURA 8 – DESEMPENHO DAS TENSÕES COM CST

O desempenho de potência reativa é visivelmente superior na presença de CST, como demonstrado a seguir. Na Figura 9 são apresentadas as curvas de potência reativa de cada usina, na ausência do CST. O comportamento observado é altamente indesejado: enquanto Angra 1 fornece praticamente o máximo que pode de potência reativa, Angra 2 absorve cerca de 200 Mvar durante a maior parte do tempo.



FIGURA 9 – DESEMPENHO DE POTÊNCIA REATIVA DE CADA USINA SEM CST.

Na Figura 10, além das curvas de geração de potência reativa de cada usina, é mostrada a variação de potência reativa total fornecida pela central nuclear (Angra 1 + Angra 2).





Um dos objetivos do CST é melhorar a distribuição de geração de potência reativa na central. A situação de fluxo de potência reativa entre as usinas deve ser eliminada. Como mostra a Figura 11, o CST obteve sucesso ao distribuir a geração de potência reativa de forma proporcional ao tamanho de cada usina.

A Figura 12 apresenta além das curvas de geração de potência reativa de cada usina, a variação de potência reativa total fornecida pela central nuclear (Angra 1 + Angra 2).



FIGURA 11 – DESEMPENHO DE POTÊNCIA REATIVA DE CADA USINA COM CST.





A Figura 13 compara o desempenho de potência reativa das usinas com e sem CST.





A Figura 14 apresenta o desempenho da central (Angra 1 + Angra 2) nas duas situações. Pode ser notado que com o CST ativo, a potência reativa fornecida pelas usinas é menor. Na Figura 15 a diferença entre as situações (com ou sem CST) é mostrada.



FIGURA 14 – DESEMPENHO DA CENTRAL COM E SEM CST.



FIGURA 15 – POTÊNCIA REATIVA QUE DEIXA DE SER GERADA/CONSUMIDA NA CENTRAL ATRAVÉS DA IMPLEMENTAÇÃO DE CST.

4.0 - CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram como a utilização de um esquema de Controle Coordenado de Tensão pode melhorar o desempenho de tensão e de potência reativa da Central Nuclear de Angra dos Reis.

A situação de fluxo de potência reativa entre as usinas é eliminada, sendo evitadas perdas inerentes desse fluxo indesejado. Como o CST apresentado não utiliza nenhum chaveamento de tapes dos transformadores, não há o desgaste desses equipamentos.

A potência reativa que na ausência do CST é gerada pela Usina 1 e consumida pela Usina 2, fica disponível para melhorar o desempenho de tensão do sistema da Área Rio.

As vantagens de utilização do CST ficarão ainda mais evidentes, e economicamente mais atrativas, quando do comissionamento da usina de Angra III.

- 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
- S. Corsi, "The Secondary Voltage Regulation in Italy", Panel Session on Power Plant Secondary (High-Side) Voltage Control, IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000.
- [2] H. Lefebvre, D. Fragnier, J. Y. Bouisson, P. Mallet, M. Bulot, "Secondary Coordinated Voltage Control System: A Feedback of EDF" – Panel Session on Power Plant Secondary (High-Side) Voltage Control, IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000.
- [3] H. Vu, P. Pruvot , C. Launay e Y. Harmand, "An Improved Voltage Control on Large Scale Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.11,No.3, pp 1295-303, Aug.1996.
- [4] P. Panciatici, F. Bena, N. Janssens, J. Deuse e M. Stubbe, "Centralized Voltage Control: A Key Point for Optimal Operation of Power Systems" CIGRÉ 39 -116, Session 1998.
- [5] N. Martins, "The New CIGRÉ Task Force on Coordinated Voltage Control in Transmission Networks", Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA. July 2000.
- [6] N. Martins, J. C. R. Ferraz, S. Gomes Jr, P. E. M. Quintão e J. A. Passos F^o, "A Demonstration Example of Secondary Voltage Regulation: Dynamic Simulation and Continuation Power Flow Results", IEEE/PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 2001.
- [7] M. M. Adibi, D. P. Milanicz e T. L. Volkman, "Optimizing Generator Reactive Power Resources", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14,No.1, pp 319 -326, Feb. 1999.
- [8] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [9] C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, Inc. 1994.