



GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

INFLUÊNCIA DA FAST VALVING DE UNIDADES TÉRMICAS NA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Fernando Buzzulini Prioste*
GESis, UNIFEI - MG

Pedro Paulo de Carvalho Mendes
GESis, UNIFEI - MG

Cláudio Ferreira
GESis, UNIFEI - MG

RESUMO

A estabilidade de sistemas elétricos de potência pode ser consideravelmente melhorada com o uso da *Fast Valving* (Válvula Rápida) em turbinas térmicas a vapor. Sua atuação garante que a potência mecânica de turbinas seja reduzida rapidamente na ocorrência de faltas e rejeições de carga, diminuindo a área (P- ω) de aceleração e aumentando a área de desaceleração. Este estudo apresenta os efeitos da atuação da *Fast Valving* em um circuito de treze barras do sistema elétrico brasileiro e análises de sua atuação nas turbinas termonucleares de Angra I e Angra II, considerando todo o sistema elétrico brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade, Turbinas a Vapor, *Fast Valving*, Sistemas Elétricos de Potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Estudos de estabilidade avaliam o de comportamento eletromecânico dos sistemas elétricos de potência. Modelos usados nesses estudos tornam-se cada vez mais complexos devido ao tamanho e topologia dos sistemas atuais, exigindo a criação de novos métodos para garantir a estabilidade, prevendo o seu comportamento dinâmico.

Existem dois tipos de estudos de estabilidade: de regime permanente, que examina a estabilidade do sistema sob pequenas variações e de regime transitório, que examina a estabilidade do sistema sob grandes variações.

A estabilidade de uma unidade geradora e do sistema ao qual ela está conectada pode ser melhorada de maneira significativa, após a

ocorrência de uma grande oscilação, usando técnicas de controle das válvulas pré-existentes das turbinas a vapor chamadas de *Fast Valving*, (também *Early Valve Actuation*).

O controle da *Fast Valving-FV* das turbinas a vapor tem atraído mais e mais a atenção devido ao sistema estar operando cada vez mais próximo de seu limite de estabilidade e à dificuldade de se conseguir a expansão do sistema de transmissão.

Sua atuação consiste em uma rápida redução de potência mecânica da turbina quando uma significativa oscilação de potência ocorre. Esta rápida redução de potência é originada pelo fechamento das válvulas de controle CV e/ou interceptação IV da turbina a vapor, que deve ser iniciada no mais curto intervalo de tempo possível após a detecção de um defeito e então a sua reabertura imediata. O fechamento somente das válvulas de interceptação é conhecido como *Early Valve Actuation* EVA. Estudos de campo e simulações (1) têm mostrado que a FV afeta pouco os eixos das turbinas e suas palhetas além de poder melhorar o limite de estabilidade, particularmente em sistemas fracos.

2.0 - MODELOS DE TURBINAS

Os modelos estudados foram: turbina a vapor *tandem compound*, utilizado no sistema de 13 barras, (Figura 1) e o modelo típico de termonucleares (Figura 2).

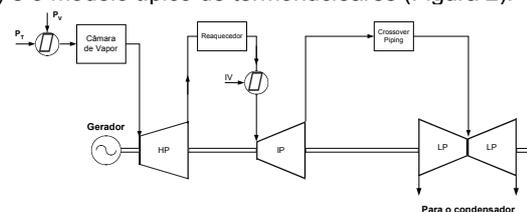


FIGURA 1 – MODELO TANDEM COMPOUND.

Angra I e Angra II não são necessariamente iguais ao modelo da Figura 2, que é ilustrativo. Nas simulações foram considerados somente o fechamento das válvulas de interceptação IV, ou seja, as atuações do tipo EVA.

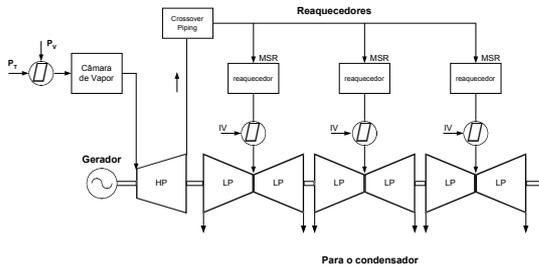


FIGURA 2 – MODELO TERMONUCLEAR TÍPICO.

3.0 - FAST VALVING

Sabe-se que um grande distúrbio, como uma falta, em um sistema elétrico de potência produz uma queda brusca na potência elétrica do gerador, que será seguida pela aceleração de seu rotor. A equação de oscilação de uma máquina síncrona é baseada no princípio da dinâmica que estabelece que o torque acelerante é o produto do momento de inércia do rotor pela aceleração angular:

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_a = T_m \square T_e$$

Portanto havendo uma redução da potência elétrica do gerador o torque elétrico também se reduzirá, mas o torque mecânico produzido pela turbina tende a se manter constante por algum tempo devido ao atraso causado pelo seu sistema de controle.

Quando isto ocorre há um aumento no torque acelerante que pode causar uma sobre velocidade do eixo turbina-gerador e instabilizar o sistema.

Uma ação natural para compensar esta queda na potência elétrica seria reduzir rapidamente a potência mecânica da turbina, limitando assim o torque acelerante. O efeito de tais ações pode ser exemplificado pelo critério de igualdade de áreas mostrado na Figura 3. Se uma área acelerante 1-2-3-4, Figura 3 - (a) é maior que a máxima área possível de desaceleração 4-5-7, o sistema perderá o sincronismo quando a falta for eliminada.

A partir desse princípio, pode-se assumir que se a potência mecânica for reduzida no menor intervalo de tempo possível, Figura 3 - (b), a área de aceleração 1-2-3-4 será menor que a área de desaceleração 4-5-6-6', permitindo que o sistema permaneça estável.

Mudanças rápidas de potência mecânica necessitam de uma resposta muito rápida da turbina, da ordem de décimos de segundo. As respostas de turbinas a vapor podem ser controladas para serem quase tão rápidas quanto se deseja e o dispositivo utilizado para diminuir o tempo de resposta e potência mecânica é conhecido como *Fast Valving*.

Existem dois tipos de *Fast Valving*, a *Momentary* e a *Sustained*, que podem ser diferenciadas pelo posicionamento das válvulas ilustrados pela Figura 4. Quando as válvulas são fechadas e reabertas totalmente, a FV ou EVA é conhecida como *Momentary*, a potência mecânica é restabelecida a

um valor final que é igual ao valor pré-falta, e quando são fechadas e reabertas parcialmente, conhecida como *Sustained* e o valor final da potência mecânica é menor que o valor pré-falta (4).

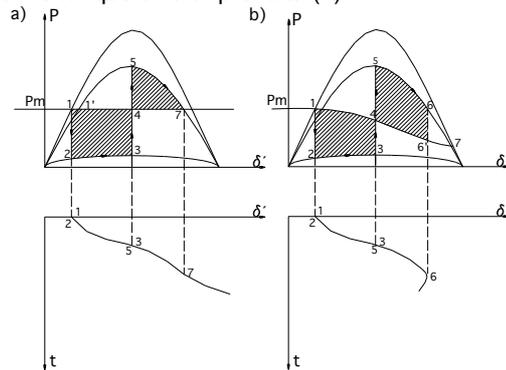


FIGURA 3 – IGUALDADE DE ÁREAS.

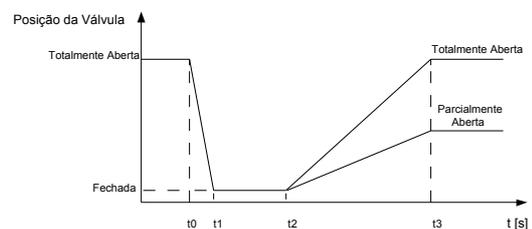


FIGURA 4 – SINAIS DA FAST VALVING.

Considerando os modelos de turbinas usados, um rápido fechamento das válvulas de controle CV's não produzirá uma grande redução da potência da turbina instantaneamente, pois o fator de participação de potência do estágio de alta pressão FHP corresponde, na maioria dos casos, a somente 30% da potência total da turbina. Como o reaquecedor possui uma grande dimensão física, uma grande quantidade de vapor está armazenada em seu interior, mesmo com o fechamento das CV's a turbina ainda estará gerando 70% de sua potência total devido ao fluxo da massa de vapor do reaquecedor que se expandirá nos estágios de pressão intermediária e/ou de baixa pressão, dependendo do tipo de turbina. Portanto uma redução de potência mais efetiva pode ser obtida somente com o fechamento rápido das válvulas de interceptação IV's, que controlam o fluxo de vapor para os estágios de pressão intermediária e/ou de baixa pressão, correspondendo a 70% da potência total da turbina.

4.0 - ATUAÇÃO DA FV TIPO EVA

A *Fast Valving* pode ser acionada por vários tipos de monitoramento, dependendo do projeto do controle. A característica de atuação da válvula dá-se da seguinte forma: inicialmente as IV's estão totalmente abertas permitindo a passagem total do fluxo de vapor, após ter sido detectada uma condição crítica por algum tipo de monitoramento as IV's fecham-se parcialmente ou totalmente em aproximadamente 0,1s, permanecendo nesta posição por um tempo preestabelecido pela dinâmica do sistema. Após este tempo inicia-se o processo de reabertura que pode durar pouco mais de 10s, devido aos fatores de

segurança do conjunto caldeira-turbina. Logo o tempo total de atuação pode durar de 12 a 15s dependendo das dimensões físicas do conjunto, resistência a pressão e temperatura.

O mecanismo que aciona as válvulas é um solenóide especial que libera o fluido hidráulico de dentro dos pistões causando o seu fechamento e reabertura.

Existem duas chaves de comando que dão a opção de habilitação ou não da FV, localizadas na sala de operação da usina, isto dá a liberdade de escolha se o mecanismo deve atuar ou não. A responsabilidade para a operação destas chaves fica com os responsáveis pelo despacho de carga do sistema, que fornecem as instruções de operação. Geralmente a posição dessas duas chaves é monitorada via controle supervisão do escritório de despacho, isto permite que os operadores de despacho do sistema tenham o conhecimento a cada instante do estado dessas chaves. A escolha da lógica de iniciação, da FV *Momentary* ou *Sustained* e do tempo de atuação são feitos monitorando-se todos os tipos de falhas e condições de distúrbio que podem levar à instabilidade, separando-as em dois grupos, as moderadas e as severas e a partir daí iniciam-se os estudos levando-se em conta as condições de estrangulamento do vapor, as características térmicas do ciclo a vapor, os tempos de fechamento e reabertura das válvulas e o seu tipo borboleta ou gaveta, sendo que válvula do tipo borboleta possui um tempo de resposta mais rápido. Como a FV funciona pelo princípio do controle em malha aberta, para uma condição crítica detectada ela executará sua tarefa de fechar e reabrir definida pelo tempo preestabelecido no seu ajuste, independentemente do tipo de condição de carregamento do circuito, o que pode causar instabilidade mesmo com sua atuação. Para isto é preciso fazer-se um estudo bem rigoroso do sistema em que será implementada ou uma otimização do controle, que não será abordada neste estudo. O principal problema que leva à instabilidade é o atraso no tempo de reabertura das válvulas que causa um aumento de pressão no reaquecedor, pois o fechamento das IV's interrompe o fluxo de vapor para os próximos estágios de pressão inferior. Quando uma sobrepressão de 10% é detectada no interior do reaquecedor as suas válvulas de segurança liberam vapor contido em seu interior para a atmosfera ou condensador, prejudicando a dinâmica da própria turbina. O atraso no tempo de reabertura também aumenta a magnitude de oscilação do rotor, causando um *overshoot* de Pmec. devido ao acúmulo de vapor no reaquecedor que é liberado na reabertura. De acordo com (2), o tempo ótimo de reabertura da FV deve ser após a extinção da falta, no instante em que a velocidade angular é nula e a aceleração angular é negativa. Alguns autores citados em (2) sugerem que a válvula seja reaberta o mais rápido possível após o seu fechamento total, por duas razões: a primeira é conter o aumento de pressão no reaquecedor e a segunda é que o atraso na reabertura da válvula pode causar instabilidade.

Portanto o instante ótimo selecionado para a reabertura da válvula depende da máquina em particular e do sistema para onde a FV foi projetada.

O número de atuações da FV fica limitado em uma a cada dez minutos devido aos impactos causados à turbina, podendo levar à fadiga térmica e portanto redução da sua vida útil.

Com relação à proteção a FV não opera em faltas ocorridas no gerador e no transformador elevador da usina, pois nestes casos a unidade geradora é retirada do sistema. Quando se deseja observar os efeitos da FV, principalmente em simulações, os relés das linhas de transmissão ligadas à usina devem ser ajustados na segunda zona de proteção a fim de não inibir os efeitos de sua atuação. Os elementos de proteção situados na zona compreendida entre o gerador e o transformador elevador devem ser ajustados com cuidado especial para que não haja desligamento indesejável durante a ação da FV, lembrando que a sua implantação deve ser feita em todas as turbinas existentes em uma mesma usina, para não prejudicar a estabilidade.

A sua utilização provoca ganhos significativos no tempo crítico de eliminação das faltas, sob estes pontos de vista os geradores síncronos são comumente construídos para suportar estresses causados pelos altos picos de corrente e torques pulsantes que aparecem nestas situações.

5.0 - SIMULAÇÕES

As simulações mostradas a seguir foram feitas no programa *ANATEM*, desenvolvido pelo CEPEL, onde pôde-se incluir o modelo da FV, através de um CDU (Controle Definido pelo Usuário), em um sistema de 13 barras, ilustrado pela Figura 5 e nas usinas termonucleares (UTN's) de Angra I e Angra II.

No caso das UTN's, foi considerado o sistema elétrico brasileiro completo para o cenário de carga pesada de Dezembro de 2003 com o sudeste exportador.

5.1 Sistema de 13 barras

Este sistema foi extraído do sistema elétrico brasileiro, levando-se em conta todas as variáveis das simulações, com exceção da atuação das proteções.

A FV tipo EVA, acionada por sobrevelocidade, foi introduzida em duas máquinas fictícias alocadas em Poços de Caldas. Em seguida foram aplicados defeitos trifásicos na barra de Poços para se atingir o limite de estabilidade do sistema sem a atuação da FV. A falta foi extinta em 397ms com a retirada de uma linha de transmissão que liga Poços a Furnas. Em seguida foram comparados os resultados com a atuação da FV e sem sua atuação. As simulações mostram que a atuação da FV melhorou a estabilidade do sistema.

As curvas em azul contínuas mostram a atuação da FV e as tracejadas em vermelho sem atuação da FV.

Os tempos de atuação considerados foram: 0,1s de atraso do transdutor de velocidade, 0,12s para o fechamento da IV, 0,6s que a válvula permaneceu totalmente fechada e 1s para a reabertura total da IV.

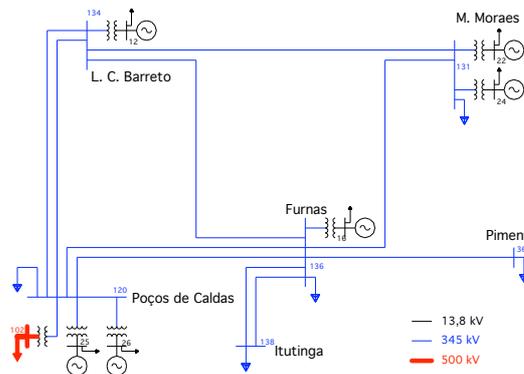


FIGURA 5 – SISTEMA DE 13 BARRAS.

As variações angulares das máquinas de Poços são idênticas.

A Figura 6 mostra que a atuação da FV reduz o pico do ângulo delta na primeira oscilação e atinge seu novo valor de regime permanente em menos tempo.

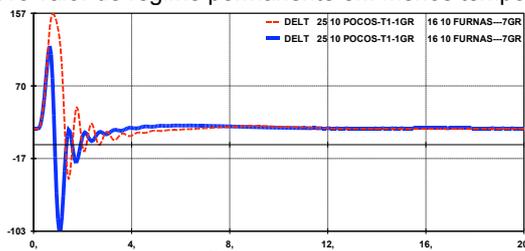


FIGURA 6 – VARIAÇÕES ANGULARES EM POÇOS.

Na Figura 7 pode ser observada a redução de potência mecânica praticamente instantânea causada pela atuação da FV, após a detecção da sobrevelocidade pré determinada de 2%.

A queda de potência mostra que os estágios de pressão intermediária e de baixa pressão, cuja soma de seus fatores de participação corresponde a 70% da potência total, foram cortados de acordo com o previsto e além disso, o estágio de alta pressão também teve sua potência reduzida devido à atuação do sistema de controle da turbina.

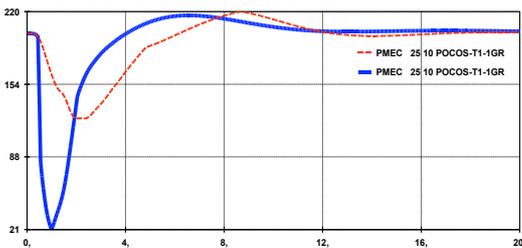


FIGURA 7 – VARIAÇÕES DE PMEC. EM POÇOS.

A Figura 8 mostra que a máquina teve uma potência acelerante que variou mais durante a atuação da FV, mas apresentou maior amortecimento.

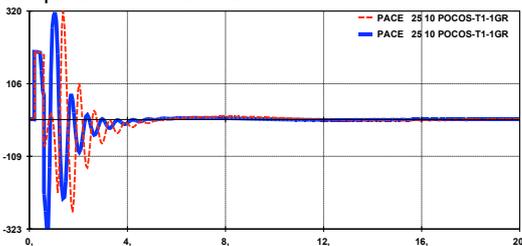


FIGURA 8 – POTÊNCIA ACELERANTE EM POÇOS.

Na Figura 9 observa-se que a frequência da máquina de Poços teve sua variação reduzida, permanecendo bem próxima da frequência nominal a partir de 5s.

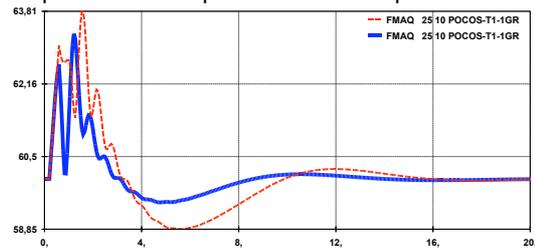


FIGURA 9 – FREQUÊNCIA DA MÁQUINA - POÇOS.

A Figura 10 mostra como a tensão da máquina estabilizou mais rápido que sem a FV.

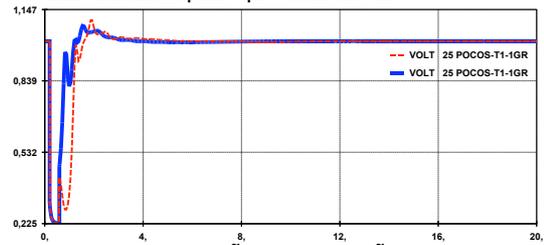


FIGURA 10 – VARIAÇÃO DE TENSÃO EM POÇOS.

Através da Figura 11 pode-se observar que houve menor variação de potência mecânica das máquinas pertencentes ao sistema, ilustrado pela usina de Furnas.

É importante notar que se uma usina térmica de capacidade de geração mais expressiva fosse instalada neste sistema, a atuação da FV nesta mesma usina, teria efeito diferente da Figura 11.

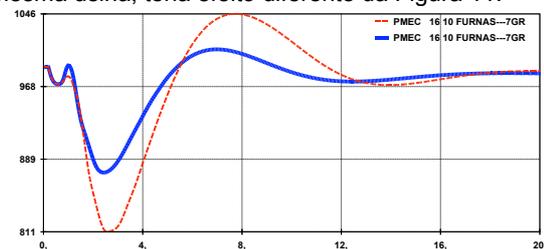


FIGURA 11 – VARIAÇÃO DE PMEC. EM FURNAS.

A atuação poderia acarretar em déficit de potência mecânica na área durante o funcionamento da FV, aumentando a magnitude positiva de oscilação de potência mecânica das outras usinas.

A duração da falta que levou o sistema, sem FV, a seu limite de estabilidade foi de 397ms, que representa um tempo de eliminação inferior ao tempo de eliminação com falha de disjuntor para 345 KV. Os tempos de eliminação sem falha e com falha de disjuntor são 100 e 400ms. Com a implementação da FV nas duas máquinas da usina, o sistema suporta o mesmo tipo de defeito, mas com duração superior a 1000ms, logo se houver uma falha de disjuntor o sistema suportará.

5.2 Fast Valving nas UTN's de Angra I e Angra II

Os resultados da implementação fictícia da FV tipo EVA, acionada por sobrevelocidade, nas UTN's de Angra I e Angra II são apresentados a seguir.

A central de Angra apresenta particularidades, pois existem atualmente duas máquinas de potência e inércia diferentes ligadas ao mesmo barramento, logo oscilam de modo diferente em regime transitório.

Primeiramente foi achado o tempo de duração de uma falta trifásica franca que levaria o sistema a seu limite de estabilidade, sem a implementação da FV.

O cenário considerado foi o de Dezembro de 2003 com carga pesada e o Sudeste exportador (FSE).

A falta considerada foi no barramento de Angra e a eliminação do defeito feita com a retirada da linha de transmissão que liga Angra à São José em 500 KV.

Os despachos de potência considerados são: 650 MW para Angra I e 1350 MW para Angra II.

A primeira tentativa foi instalar a FV somente na máquina de Angra II. Os ajustes comumente recomendados para acionamento por sobrevelocidade são 2 ou 3%, mas para o tempo de defeito que leva o sistema a seu limite de estabilidade foi observado que as máquinas não atingiam nem 2% de sobrevelocidade, logo a FV em Angra II foi ajustada para atuar com 1%.

Esta alternativa mostrou-se sem efeito, pois o limite de estabilidade do sistema permaneceu o mesmo para a usina sem a FV. Notou-se que Angra I, por ter menor inércia acelerava-se mais, atingindo velocidades maiores, ajudando a instabilizar o sistema. A atuação só em Angra II foi insuficiente.

Foi instalada a FV em Angra I, acionada por sobrevelocidade de 1% e desligada a FV de Angra II, o resultado foi mais animador, pois o tempo de eliminação do defeito pode ser aumentado sem o sistema se instabilizar.

Partiu-se para um terceiro caso em que a FV das duas unidades poderiam atuar quando cada uma delas atingisse 1% de sobrevelocidade, esta tentativa recaiu no caso anterior, pois somente a FV de Angra I atuou. Logo o tempo máximo de duração do defeito foi o mesmo. Quando ele foi aumentado a FV das duas unidades atuaram, mas o sistema divergiu. Foi observado que devido ao fato das duas máquinas possuírem inércias diferentes, a FV de cada uma delas era acionada em instantes diferentes, podendo causar oscilações e trocas de potência entre as máquinas da própria UTN.

O próximo passo foi fazer com que quando a FV de Angra I fosse acionada, um sinal de comando fosse enviado para acionar a FV de Angra II, isto eliminaria a possível troca de potência entre as duas unidades.

O resultado obtido, Figura 12, foi o melhor possível considerando somente a atuação por sobrevelocidade, sem otimização e atuação específica em conjunto com outros tipos de reguladores, como o sistema de excitação.



FIGURA 12 – VARIACÃO DE PMEC. ANGRA I E II.

Os tempos utilizados para a atuação da FV foram: tempo de atraso do transdutor de medição de velocidade 0,1s, tempo de fechamento das válvulas 0,25s, tempo que as válvulas permanecem fechadas 0,1s e tempo de reabertura 0,85s (8).

Os tempos máximos de duração dos defeitos que levam aos limites de estabilidade, para os tempos de atuação de válvula, estão representados na Tabela 1. A coluna Atraso representa se o tempo do transdutor de velocidade foi ou não considerado.

TABELA 1: RESUMO DOS LIMITES 1 - FSE

FAST VALVING				Curto 3 []
Angra I	Angra II	Atraso	Angra I aciona Angra II	Duração [ms]
				113
x		x		116
	x	x		113
x	x	x		116
x	x			119
x	x	x	x	122
x	x		x	143

Pode-se observar que quanto menor o tempo em que a válvula se fecha, maior será o aumento do limite de estabilidade do sistema, comparando-se as duas últimas linhas da Tabela 1. Foram encontrados novos tempos máximos de duração de defeitos que levam o sistema a seu limite de estabilidade, representados na Tabela 2, mas agora considerando o tempo de atraso do transdutor de velocidade de 0,05s e o tempo de fechamento das válvulas de 0,12s (6), os outros tempos foram mantidos.

TABELA 2: RESUMO DOS LIMITES 2 - FSE

FAST VALVING				Curto 3 []
Angra I	Angra II	Atraso	Angra I aciona Angra II	Duração [ms]
				113
x		x		116
	x	x		113
x	x	x		116
x	x			122
x	x	x	x	134
x	x		x	155

Mais uma vez pode-se observar a importância da velocidade de atuação da válvula, comparando-se as duas últimas linhas da Tabela 2 e também confrontando as Tabelas 1 e 2.

As Figuras 13 e 14 mostram as variações angulares das máquinas de Angra I e II, respectivamente com e sem a atuação da FV, para o caso em que a FV de Angra I aciona a de Angra II com atraso de transdutor de 0,05s, tempo de fechamento de 0,12s e defeito com duração de 134ms.

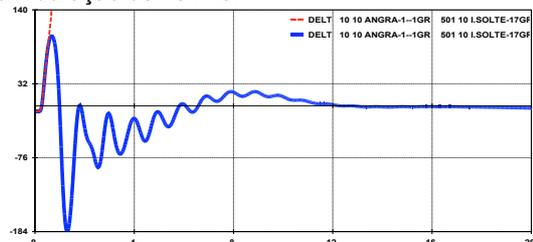


FIGURA 13 – VARIACÃO ANGULAR EM ANGRA I.

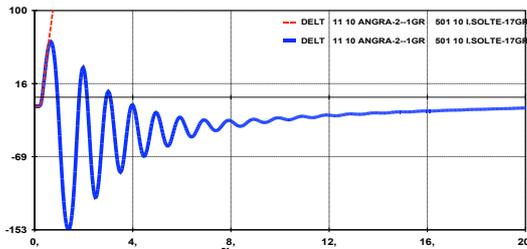


FIGURA 14 – VARIAÇÃO ANGULAR EM ANGRA II.

As Figuras a seguir comparam as diferenças entre as atuações da FV quando a FV de Angra II é acionada pela de Angra I. As linhas em azul contínuas representam a atuação para atraso de transdutor de 0,05s e tempo de fechamento de 0,12s e as linhas vermelhas tracejadas para atraso de transdutor de 0,1s e tempo de fechamento de 0,25s.

A duração do defeito foi de 122ms, as comparações indicam a sensibilidade da estabilidade do sistema em relação aos diferentes tempos de atuação das válvulas.

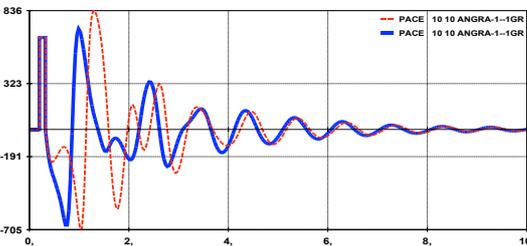


FIGURA 15 – POT. ACELERANTE EM ANGRA I.

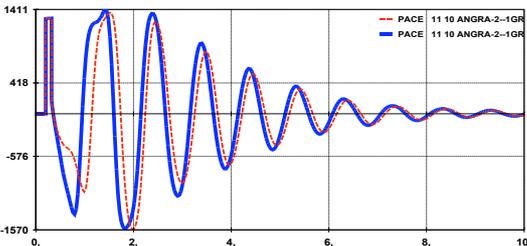


FIGURA 16 – POT. ACELERANTE EM ANGRA II.

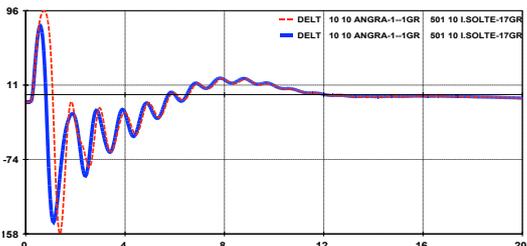


FIGURA 17 – VARIAÇÃO ANGULAR EM ANGRA I.

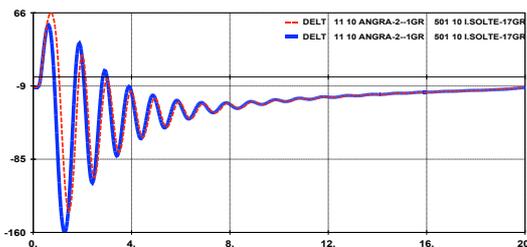


FIGURA 18 – VARIAÇÃO ANGULAR EM ANGRA II.

6.0 - CONCLUSÃO

A atuação da FV mostrou-se eficiente tanto no sistema de 13 barras como nas UTN's de Angra I e II. Pôde-se notar que as implementações feitas em Angra apresentaram melhora, apesar da severidade do defeito para o sistema interligado brasileiro.

Os tempos de acionamento e fechamento da FV devem ser os menores possíveis, pois aumentam a estabilidade do sistema e dão maior folga para os ajustes de proteção. Os tempos de fechamento e de reabertura das válvulas, devem ser ajustados de modo a evitar possíveis sobrepressões não admissíveis em cada conjunto caldeira - turbina onde a FV será instalada.

Devido a estas considerações, tornam-se necessários mais estudos, e para melhorar o desempenho aplicar técnicas de controle coordenados com a FV e possíveis otimizações.

7.0 - REFERÊNCIAS

- 1) G.X. Liu, X.S. Lin, Q.X. Yang, L.L. Lai, B.W. Hogg. Investigation of Turbine Valving Control with Lyapunov Theory; Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, Hong Kong, November 1997.
- 2) F.F. Hassan, R. Balasubramanian and T.S. Bhatti. Fast valving scheme using parallel valves for transient stability improvement; IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 3, may 1999.
- 3) F.P. de Mello *et al.* Dynamic models for fossil fueled steam units in power system studies; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 1991.
- 4) J. Machowski, J. Bialek, J.R. Bumby. Power System Stability and Dynamics; 1996.
- 5) E.W. Cushing *et al.* Fast valving as an aid to power System transient stability and prompt resynchronization and rapid reload after full load rejection, IEEE Transactions on Power System Apparatus and Systems; Vol. 91, pp. 1624-1636, July/August 1972.
- 6) IEEE Discrete Supplementary Controls Working Group. Turbine fast valving to aid system stability; benefits and other considerations; IEEE Transactions on Power System , Vol. PWRS-1, No. 1, February 1986.
- 7) B. Delfino, G.B. Denegri, P. Picenti, R. Marconato, P. Scarpellini. Impact of turbine fast valving on generator and transformer protective relays; IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, Greece, Sept. 5-8, 1993.
- 8) P. Kundur, J. P. Bayne. A STUDY OF EARLY VALVE ACTUATION USING DETAILED PRIME MOVER AND SYSTEM SIMULATION; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS - 94, no. 4, July/August 1975.
- 9) P.P. Mendes. F. B. Prioste, C. Ferreira. Avaliação da influência da fast valving no comportamento dinâmico de sistemas elétricos de potência; IX Congresso Brasileiro de Energia, vol. 3, p 1090-1103, Rio de Janeiro, 2002.