

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS ASSOCIADO À AÇÃO DOS CONTROLADORES DE VELOCIDADE DAS TURBINAS

André Moreira Mota¹; Antonio Manoel Batista da Silva²; Geraldo Caixeta Guimarães³

¹Universidade de Uberaba - UNIUBE, Uberaba - Minas Gerais, andre.m.mota@hotmail.com

²Universidade de Uberaba - UNIUBE, Uberaba - Minas Gerais e Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, Barretos - São Paulo, antonio@feb.br, antonio.manoel@uniube.br

³Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – Minas Gerais, gcaixeta@ufu.br

Resumo - No sistema elétrico de potência a demanda da carga varia constantemente provocando modificações na potência gerada e na frequência da rede as quais causam a atuação do controlador de velocidade de cada conjunto turbina-gerador. Assim, é fundamental realizar estudos para compreender o desempenho de um sistema elétrico em função da ação dos controladores de velocidade. Neste contexto, este trabalho considera as regulações primária e secundária e a operação tanto de uma turbina hidráulica como também de uma turbina a vapor. É mostrado que quando os controladores de velocidade trabalham apenas com regulação primária ocorre desvio de frequência em regime permanente no sistema de potência após variação de carga. Entretanto, quando é incluída a regulação secundária, o desvio de frequência é eliminado devido à ação integral do controlador que atua para corrigir o erro de frequência.

Palavras-Chave - Controlador de Velocidade; Regulação Primária, Regulação Secundária, Transitórios Eletromecânicos; Turbina a Vapor; Turbina Hidráulica.

ELECTRICAL POWER SYSTEM PERFORMANCE ANALYSIS ASSOCIATED TO THE TURBINE GOVERNOR ACTION

Abstract – Load demand varies constantly in electrical power system provoking changes in power output and grid frequency which cause the actuation of the speed governor of each turbine-generator set. Thus, it is essential to conduct studies to understand the electrical system performance under the action of speed controllers. In this context, this work takes into account primary and secondary regulations and the operation of a hydraulic turbine as well as a steam turbine. It is shown that, when the speed controllers only work with primary regulation, steady state frequency deviation occurs in power system after load variation. However, when the secondary regulation is included, such frequency deviation is eliminated due to the integral action of the controller which acts to correct the frequency error.

Keywords - Speed governor, Primary Regulation, Secondary Regulation, Electromechanical Transients, Steam Turbine, Hydraulic Turbine.

NOMENCLATURA

D	Amortecimento.
ΔP_c	Variação da carga.
ΔP_g	Variação da potência gerada.
ΔF	Variação da frequência.
ΔT	Variação da potência ativa de intercâmbio entre áreas.
ΔF_1	Variação da frequência na área 1.
ΔF_2	Variação da frequência na área 2.
P_s	Coefficiente de potência sincronizante.
T_s	Constante de tempo da câmara de vapor.
T_w	Constante de tempo de inércia da água.
ΔA	Variação de abertura do palheta/válvula da turbina.
T	Constante de tempo do sistema elétrico
T_1	Constante de tempo com queda de velocidade.
R	Constante de regulação de velocidade.
T_g	Constante de tempo compensação de queda transitória.
T_t	Constante de tempo da regulação transitória.
R	Constante de regulação de velocidade.
r	Regulação transitória.
K	Ganho da regulação secundária.
ECA	Erro de controle de área.
B	Fator de inclinação ou bias.

I. INTRODUÇÃO

No sistema elétrico de potência a demanda de energia solicitada por consumidores varia ininterruptamente, fazendo com que o ponto de equilíbrio entre carga e geração seja constantemente alterado. Por isso é necessário que um sistema de controle detecte essas variações e execute uma ação de controle que vise suprir a demanda solicitada e, além disso, mantenha a frequência da rede em seu valor nominal de operação. Este controle é exercido pelo regulador de velocidade da turbina cuja função principal é controlar a velocidade da máquina e consequentemente a potência ativa gerada. Para melhor compreender o funcionamento do sistema elétrico quando ocorre um distúrbio na demanda de carga é preciso focar elementos individuais que compõem a estrutura: turbinas, mecanismos, controladores de velocidade, interligações. Os modelos utilizados para estudo são disponíveis na literatura da área e foram extraídos de (Fabri, 2003)[1]. Dentro desse contexto, este trabalho tem o objetivo



XIICEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

de analisar o desempenho do sistema elétrico em função da ação dos controladores de velocidade de duas turbinas, uma hidráulica e outra a vapor sem reaquecimento.

II. MODELO DO SISTEMA DE POTÊNCIA E INTERLIGAÇÃO DE ÁREAS

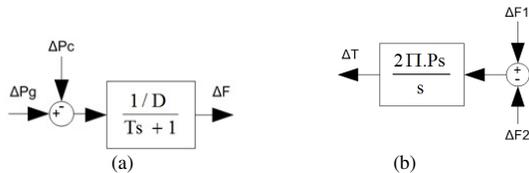


Figura 1 – sistema elétrico e a interligação de áreas

O sistema elétrico pode ser representado utilizando-se da função de transferência apresentada no diagrama de blocos da figura 1(a), sendo que este pode ser dividido em várias áreas de controle interligadas em função de suas características de geração e mercado. A interligação entre áreas de controle é representada na figura 2(b).

III. MODELO DAS TURBINAS

São dois os modelos utilizados no estudo em questão: um para a turbina a vapor sem reaquecimento e outro para a hidráulica.

A. Turbina a vapor sem reaquecimento

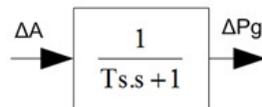


Figura 2 - Diagrama de blocos da turbina a vapor sem reaquecimento

Considerando que o suprimento de vapor permaneça estável a resposta da potência gerada pela turbina a uma variação na posição da válvula pode ser representada pela função de transferência mostrada na figura 2.

B. Turbina hidráulica

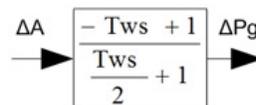


Figura 3 - Diagrama de blocos da turbina hidráulica

Na turbina hidráulica acontece um fenômeno interessante. Após a abertura do sistema de alimentação via dutos há queda de pressão na turbina e uma variação negativa em sua potência nos instantes iniciais. Isto se dá por conta que a pressão está sendo usada para acelerar a massa de água na tubulação. Admitindo-se uma tubulação inelástica e o fluido incompressível chega-se a função de transferência exibida na figura 3.

IV. REGULAÇÃO PRIMÁRIA

Embora o sistema de potência tenha inerentemente regulação própria é necessário que haja ação de controle

visando suprir a demanda da carga. Assim, as unidades geradoras são dotadas de controladores de velocidade visando ajustar a potência ativa gerada e frequência. Essa ação de controle é conhecida como regulação primária e tem como principal desvantagem o desvio de frequência em regime permanente, após um distúrbio.

A. Regulador com queda de velocidade

Condições transitórias são difíceis de controlar devido à limitada capacidade de calor armazenada no fluido (Fouad et al., 2003) [2].

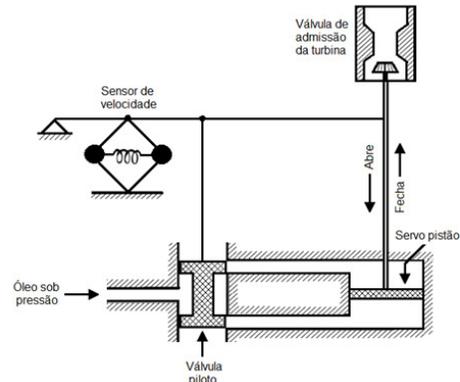


Figura 4 - Controlador com queda de velocidade

Assim, com o intuito de construir um controlador de velocidade com resposta rápida e estável para uma variação na demanda estabelece-se uma conexão entre a válvula piloto e um servo-motor, chegando desta maneira na estrutura do controlador com queda de velocidade representada na figura 4. Um aumento repentino da demanda provocará queda na frequência. O sensor de velocidade do controlador da figura 4, percebe e tende a deslocar-se para cima, promovendo a abertura da parte superior da válvula que permite a entrada de óleo no servo-motor. O servo-pistão move-se para baixo, proporcionando a abertura da válvula. No entanto, o deslocamento do servo-pistão para baixo fará pela conexão entre válvula e servo-motor para que a válvula se feche. O estado de equilíbrio será atingido antes que frequência alcance seu valor inicial de operação. Desta maneira, o controlador com queda de velocidade ocasiona desvio de frequência em regime permanente.

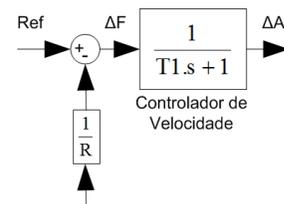


Figura 5 - Controlador com queda de velocidade

A função de transferência do controlador com queda de velocidade é representada no diagrama de blocos (figura 5). Por apresentar uma resposta rápida, o controlador com queda de velocidade geralmente é utilizado no controle de velocidade de turbinas a vapor.

B. Controlador com compensação de queda transitória

Devido ao seu comportamento peculiar, as turbinas hidráulicas precisam de controladores com características especiais de queda transitória para que o controle de velocidade se torne estável. Queda transitória significa que para variações rápidas na frequência, o controlador tem um ganho reduzido. Para desvios mais lentos o controlador tem um ganho alto. Por causa desse comportamento da turbina hidráulica o controlador de velocidade com compensação de queda transitória tem uma resposta muito lenta do ponto de vista da estabilidade transitória.

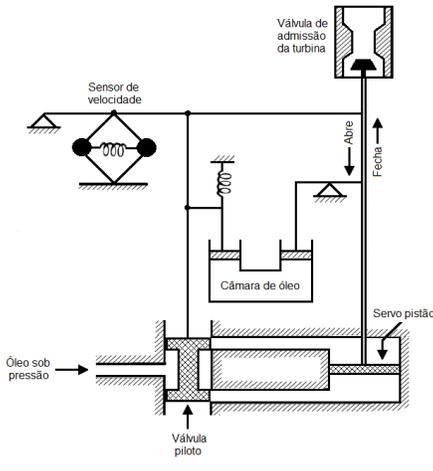


Figura 6 - Controlador de velocidade com compensação de queda transitória

Um esquema desse regulador é mostrado na figura 6. Um aumento súbito da demanda de carga acarretará diminuição da frequência do sistema. O sensor de velocidade começa deslocar para cima, provocando a abertura da válvula que libera a entrada de óleo. Com a entrada de óleo o servo-pistão se desloca para baixo e abre a válvula de admissão aumentando a potência mecânica disponível. Mas o deslocamento do servo-pistão promove uma reação fazendo que a câmara de óleo exerça uma oposição às variações rápidas na abertura da válvula. Enquanto que a conexão entre válvula e servo-motor exerce oposição aos desvios mais lentos. E novamente sistema entrará em regime permanente antes de a frequência atingir seu valor inicial de operação.

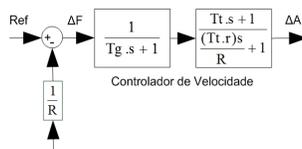


Figura 7 - Controlador de velocidade com compensação de queda transitória

O diagrama de blocos da figura 7 corresponde à função de transferência com compensação de queda transitória.

C. Estatismo

O estatismo permite ao controlador de velocidade variar a abertura da válvula proporcionalmente ao desvio de frequência. Fisicamente pode ser interpretado como a

porcentagem de mudança na velocidade requerida para mover as válvulas da condição aberta para fechada (Bumby et al. 2008) [3]. Um controlador de velocidade com estatismo em 5% significa que um desvio de frequência de 5% provoca uma variação de 100% na saída da válvula de admissão ou uma variação de 100% na potência gerada. Essa característica do estatismo garante que cada máquina responda ao desvio de frequência proporcionalmente à sua capacidade nominal de geração.

V. REGULAÇÃO SECUNDÁRIA

Quando os controladores de velocidade trabalham somente com regulação primária, a área em que o controlador se encontra entra em equilíbrio antes da frequência voltar ao valor inicial de operação. Com a finalidade de eliminar esse erro de frequência, um controle com ação integral é adicionado. Esse controle é denominado controle secundário ou controle automático de geração.

A. Regulação secundária em áreas isoladas

A regulação secundária garante a eliminação do desvio de frequência. Por isso, quanto mais lenta a resposta da frequência do sistema para uma variação na demanda de carga, mais lenta deve ser a ação da regulação secundária.

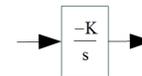


Figura 8 - Controle Secundário

O diagrama de blocos mostrado na figura 8 corresponde à função de transferência referente à regulação secundária.

B. Regulação secundária em áreas interligadas

Um desequilíbrio entre geração e carga em áreas interligadas resulta na variação da frequência e do fluxo de potência ou potência de intercâmbio nas linhas de interligação entre as áreas. O sinal de erro é gerado sendo denominado de erro de controle de área ou ECA. Que é a soma da variação de potência de intercâmbio das linhas de interligação com o produto do desvio de frequência por um fator de inclinação B, chamado de bias. Este modo de operação do controle secundário é chamado de *tie line bias* (TLB) e visa garantir desvios nulos de frequência e de potência ativa de intercâmbio entre áreas.

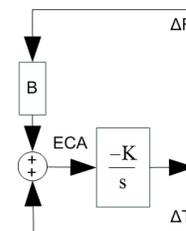


Figura 9 - Controle secundário para áreas interligadas

O diagrama de blocos referente ao controle secundário em áreas interligadas está exposto na figura 9.

VI. CASOS ABORDADOS NA SIMULAÇÃO

A modelagem para a simulação computacional valendo-se do sistema de software Matlab/Simulink foi obtida pela associação dos modelos expressos acima na forma de diagrama de blocos. Englobando o sistema elétrico de potência, a turbina a vapor sem reaquecimento, a turbina hidráulica, o controlador com queda de velocidade e o controlador de velocidade com compensação de queda transitória. Os seguintes casos foram simulados:

1. Área isolada com geração térmica;
2. Área isolada com geração hidráulica;
3. Área com geração térmica interligada a área com geração hidráulica.

VII. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os resultados e as análises de desempenho do sistema elétrico em função da ação do controlador de velocidade para os casos simulados envolvendo a regulação primária e a regulação secundária.

A. Regulação primária

Inicialmente é analisado o desempenho das áreas com geração térmica e hidráulica, isoladas e depois, estas são interligadas, considerando apenas a regulação primária.

A1. Análise com as áreas isoladas

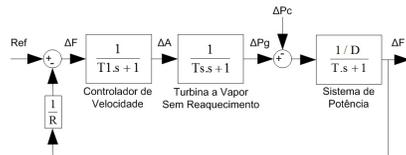


Figura 10 - Área térmica com regulação primária

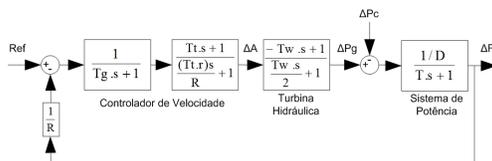


Figura 11 - Área hidráulica com regulação primária

Tabela I - Parâmetros das áreas térmica e hidráulica isoladas

Parâmetros	Térmica	Hidráulica
R (pu)	0,05	0,05
D (pu)	1	1
T (s)	10	10
T1 (s)	0,2	-
Ts (s)	0,25	-
Tg (s)	-	0,6
Tt (s)	-	6
Tw (s)	-	1
r (pu)	-	0,5

Os diagramas de blocos das figuras 10 e 11 mostram duas áreas de controle isoladas com controle primário com, respectivamente, geração térmica e geração hidráulica. A tabela I traz os valores de parâmetros utilizados, extraídos Fabri (2003) [1]. Aplicando-se um degrau de aumento de

10% na demanda de carga nas duas áreas, ambas apresentam desvio de frequência em regime permanente de aproximadamente 0,5%.

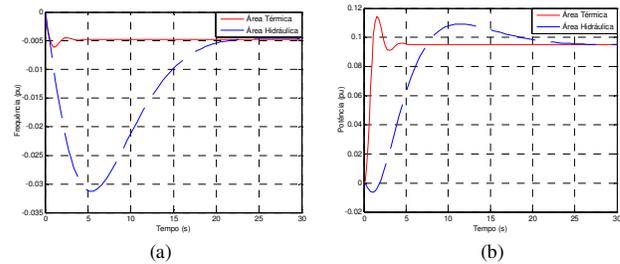


Figura 12 - Resposta do desvio de frequência e potência gerada

Mas a área com geração térmica tem resposta mais rápida e com menor variação de frequência durante o regime transitório (figura 12). Essa diferença de desvio de frequência durante o regime transitório é decorrente da pequena constante de tempo de carregamento da turbina a vapor sem reaquecimento (Lima, 2008)[4] e da elevada constante de tempo de inércia da água nos condutos forçados agregados a turbina hidráulica. Para a mesma situação a potência gerada por ambas as áreas é menor que a potência solicitada pela carga, pois há um desvio na potência gerada decorrente do desvio de frequência. A área com geração térmica estabiliza-se muito antes que a área com geração hidráulica. E inicialmente há uma tendência do torque da turbina hidráulica variar na direção oposta ao torque de regime permanente e conseqüentemente uma variação negativa da potência gerada nos instantes iniciais (Kundur, 1994) [5].

A2. Análise com as áreas interligadas

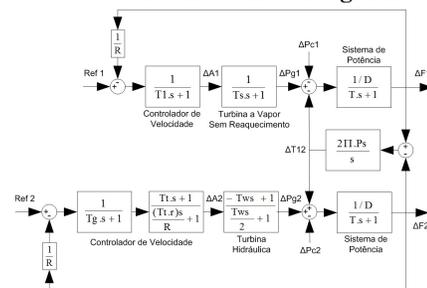


Figura 13 - Áreas térmica e hidráulica interligadas e com regulação primária

Tabela II - Parâmetros das áreas térmica e hidráulica interligadas

Parâmetros	Valores
R (pu)	0,05
D (pu)	1
T (s)	10
T1 (s)	0,2
Ts (s)	0,25
Tg (s)	0,6
Tt (s)	6
Tw (s)	1
r (pu)	0,5
Ps	4

O diagrama de blocos mostrado (figura 13) representa uma área com geração térmica interligada a uma área com

geração hidráulica, sendo ambas com regulação primária. E seus parâmetros são expostos na tabela II extraídos Fabri (2003) [1].

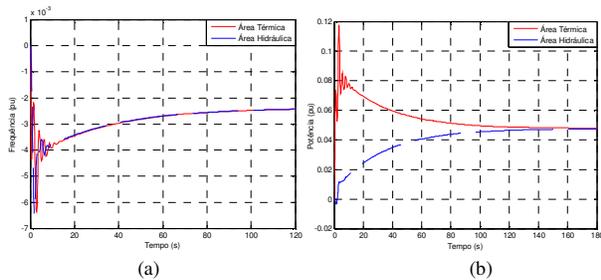


Figura 14 - Resposta do desvio de frequência e potência gerada

Para uma elevação de 10% na demanda solicitada pela carga o desvio de frequência em regime permanente, tanto da área térmica como da hidráulica, cai pela metade em relação ao caso de áreas isoladas e torna-se um pouco menor que 0,25%, como mostrado na figura 14(a). Isso acontece por causa do estatismo dos controladores, que faz com que as duas áreas contribuam para suprir a variação da demanda de carga, mesmo que o distúrbio tenha ocorrido somente na área com geração térmica. O estatismo garante a distribuição adequada de carga entre todas as máquinas interligadas, quando ocorrer uma variação na demanda de carga (Kundur, 1994) [5]. Repetindo o resultado do caso anterior, a variação da potência gerada na área com geração térmica é em torno de 0,5%. O restante é suprido pela área com geração hidráulica como mostra o gráfico da figura 14(b). Ou seja, a variação da potência gerada é dividida igualmente entre as duas áreas posto que ambas têm a mesma capacidade nominal de geração e estatismo ajustado em 5%.

B. Regulação secundária

Neste item são analisados os desempenhos das áreas com geração térmica e hidráulica nas situações isoladas e interligadas, considerando agora a regulação secundária.

B1. Análise com as áreas isoladas

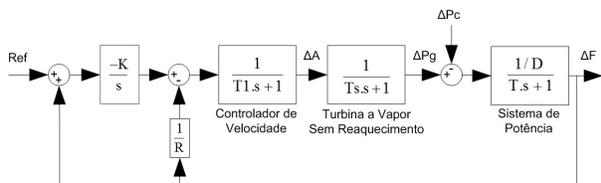


Figura 15 - Área térmica com regulação secundária

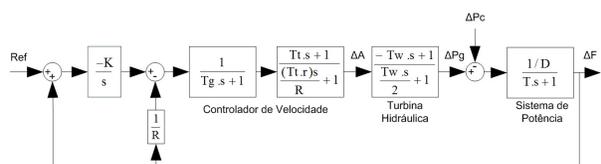


Figura 16 - Área hidráulica com regulação secundária

Duas áreas isoladas com regulação secundária, uma com geração térmica e outra com geração hidráulica, são representadas pelos diagramas de blocos nas figuras 15 e 16.

Tabela III – Parâmetros das áreas térmica e hidráulica isoladas

Parâmetros	Térmica	Hidráulica
R (pu)	0,05	0,05
D (pu)	1	1
T (s)	10	10
T1 (s)	0,2	-
Ts (s)	0,25	-
Tg (s)	-	0,6
Tt (s)	-	6
Tw (s)	-	1
r (pu)	-	0,5
K	1,5	1,5

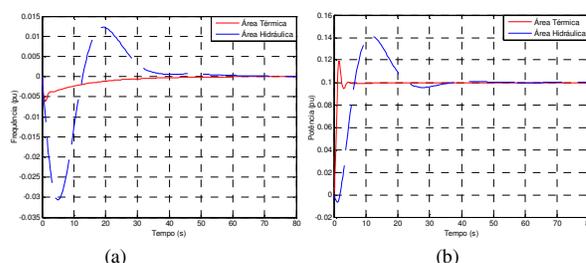


Figura 17 - Resposta do desvio de frequência e potência gerada

A tabela III apresenta os valores dos parâmetros utilizados extraídos Fabri (2003) [1]. Ao aplicar um aumento de 10% na demanda de carga de ambas as áreas o desvio de frequência em regime permanente é eliminado nas duas áreas, conforme indica a figura 17(a). A ação integral da regulação secundária garante desvio de frequência nulo em regime permanente para variações na demanda de carga (Lima, 2008)[4]. Mas a área com geração hidráulica continua apresentando maior variação de frequência durante o regime transitório e maior tempo de resposta estabilização. Com o desvio de frequência nulo, a variação da potência gerada nas duas áreas é proporcional ao aumento da demanda solicitada pela carga. Assim, não há desvio na potência gerada em regime permanente conforme corrobora o resultado expresso na figura 17(b).

B2. Análise com as áreas interligadas

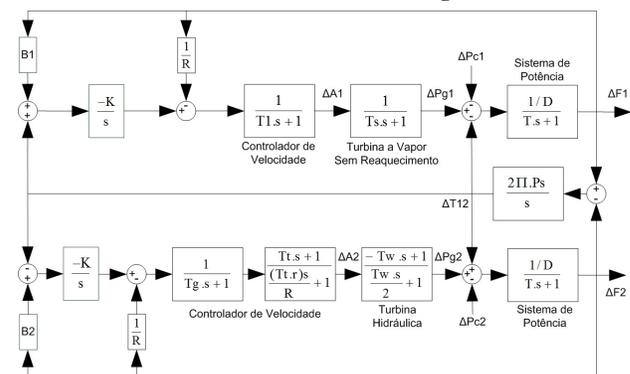


Figura 18-Área térmica e hidráulica interligada e com regulação secundária

O diagrama de blocos de uma área com geração térmica interligada a uma com geração hidráulica é mostrada na figura 18.

Tabela IV - Parâmetros das áreas térmica e hidráulica interligadas

Parâmetros	Valores
R (pu)	0,05
D (pu)	1
T (s)	10
T1 (s)	0,2
Ts (s)	0,25
Tg (s)	0,6
Tt (s)	6
Tw (s)	1
r (pu)	0,5
K	1,5
B1	21
B2	21
Ps	4

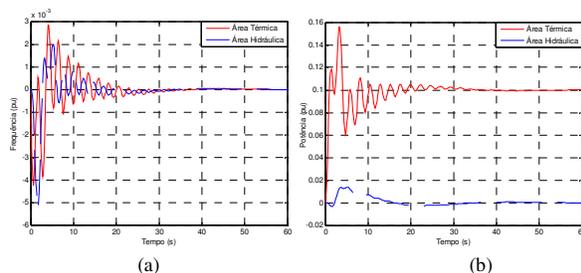


Figura 19 - Resposta do desvio de frequência e potência gerada

Os parâmetros utilizados são exibidos na tabela IV, extraídos de Fabri (2003) [1]. Para uma elevação de 10% na demanda de carga da área com geração térmica obtém-se que as duas áreas apresentam grande variação de frequência durante o regime transitório, como mostrado no gráfico da figura 19(a), mas rapidamente essa é estabilizada com desvio de frequência nulo. A figura 19(b) aponta que a variação da potência gerada acontece somente na área em que ocorre o aumento de demanda de carga. Isso se dá por causa da ação do fator de inclinação (B) ou bias, que faz a regulação secundária operar em TLB eliminando os desvios de frequência e de potência ativa de intercâmbio em regime permanente em função das variações de carga (Fabri, 2003)[1]. As duas áreas entram em equilíbrio mais rapidamente. Isso se deve ao ajuste do fator de inclinação (B), que melhora o comportamento dinâmico do controle secundário das duas áreas.

VIII. CONCLUSÃO

O controlador de velocidade com compensação de queda transitória apresenta uma resposta mais lenta para uma variação de carga se comparado com o controlador com queda de velocidade simples. Mas isso não é uma desvantagem do controlador de velocidade com compensação de queda transitória, pois o fato de ser mais

lento decorre da característica da turbina hidráulica e não de deficiência do controlador de velocidade.

Na ocorrência de um distúrbio na demanda de carga em uma área isolada com regulação primária, seja com geração hidráulica ou geração a vapor e independentemente do tempo de resposta da área, sempre haverá um desvio de frequência em regime permanente. E conseqüentemente a potência gerada será menor que a potência solicitada pela carga. Mas quando essa área opera com regulação secundária, a frequência consegue voltar ao seu valor inicial de operação. Ademais a potência gerada é proporcional à potência solicitada pela carga. Isso se deve à ação integral do controlador que atua corrigindo o desvio de frequência.

Quando duas áreas com regulação primária são interligadas e ocorre uma variação na demanda de carga em uma das áreas, o desvio de frequência e a potência gerada são divididos igualmente entre as duas áreas. Esse fato ocorre, pois seus controladores de velocidade foram ajustados com o mesmo valor de estatismo e a capacidade de geração das áreas é a mesma. Porém, quando essas duas áreas interligadas operam com regulação secundária, somente a área que sofreu variação de carga contribui para suprir essa variação na demanda. Isso acontece devido à ação do fator de inclinação (B), fazendo com que a regulação secundária resulte em desvio nulo de frequência e de potência ativa de intercâmbio.

De qualquer maneira, diante dos resultados obtidos pode-se constatar que, tanto as áreas isoladas como as áreas interligadas apresentam melhor desempenho quando seus controladores de velocidade operam com regulação secundária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido de todas as instituições de ensino envolvidas neste trabalho (UFU, UNIFEB e UNIUBE).

REFERÊNCIAS

- [1] D.F. Fabri, Características Operatrizes do Controle Automático de Geração em Um Cenário Competitivo. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.
- [2] A.A. Fouad, P.M. Anderson, Power System Control and Stability, USA: John Wiley&Sons Ltd, 2003.
- [3] J. Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby, Power Sytem Dynamics: Stability and Control, Chippenhan: John Wiley&Sons Ltd, 2008.
- [4] F.A.M. Lima, Aspectos Básicos do Controle Carga-frequência em Sistemas de Potência. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [5] P. Kundur, Power System Stability and Control. USA: McGraw-Hill, Inc., 1994.