Unisanta Science and Technology, **2016, 16, December**
Published Online 2016 Vol.5 N°3 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Modelo de Controle Adaptativo de Excitação de Gerador Síncrono Baseado em Lógica Paraconsistente

Raphael Adamelk Bispo de Oliveira[1], Jair Minoro Abe[2], Alexandre Rocco[1], Mauricio Conceição Mario[1] e João Inácio da Silva Filho[1]

[1]UNISANTA - Universidade Santa Cecília
Departamento de Pós Graduação – Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica PPGEMec
Rua Oswaldo Cruz, 266 – Santos-SP, Brasil

[2] Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, ICET
UNIP – Universidade Paulista
R. Dr. Bacelar, 1212, São Paulo – SP – Brasil - CEP 04026-002

E-mail*:* adamelk@gmail.com

Received May, 2015

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC - *Model Predictive Control*) utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPAv2), com aplicação no controle de excitação de um gerador síncrono, avaliando-se o desempenho do Controlador Preditivo baseado na LPA2v (CP-LPA2v) na estabilidade a pequenos sinais em Sistemas Elétricos de Potência. Utilizando-se a ferramenta computacional MATLAB®, compara-se os resultados obtidos com a aplicação do CP-LPA2v, com relação aos controles AVR (*Automatic Voltage Regulator*) em conjunto com o PSS (*Power System Stabilizer*) e MPC convencional.

Palavras chave: Gerador Síncrono. Controle Preditivo. Lógica Paraconsistente. Controle Preditivo Paraconsistente. Controle de Excitação. Estabilidade a Pequenos Sinais

Adaptive Excitation Control for Synchronous Generator Based on Paraconsistent Logic

Abstract: This paper presents the development of a MPC (Model Predictive Control), using Paraconsistent Annotated Logic with annotation of two values (PAL2v), for a synchronous generator excitation control application, evaluating the performance of the Model Predictive Control based on PAL2v (MPC-PAL2v) for small signal stability analysis. Using the computational tool MATLAB®, from results obtained for the MPC-PAL2v, comparisons were made with respect of results presented by a combination of AVR (Automatic Voltage Regulator) and a PSS (Power System Stabilizer), and results presented by a conventional MPC.

Keywords*:* Synchronous Generator. Predictive Control. Paraconsistent Logic. Excitation Control, Stability.

1. Introdução

Segundo [1], um Sistema Elétrico de Potência (SEP) está eventualmente sujeito a perturbações que podem causar problemas de estabilidade no sistema elétrico. Perturbações de pequena escala, como variações de carga e de tensão na rede, que necessitam de controladores eficazes de excitação e de velocidade para manter o sistema dentro das condições adequadas para sua operação. O controle de excitação, além de proporcionar o controle da tensão nos terminais do gerador e o controle da potência reativa, tem um papel importante na manutenção da estabilidade a pequenos sinais. Com a adição do PSS (*Power System Stabilizer*) ao AVR (*Automatic Voltage Regulator*), pode-se eliminar qualquer efeito negativo ao amortecimento das oscilações pós-falta. No entanto, a combinação destes dois controles pode gerar situações de controle inconvenientes [2].

O AVR e o PSS são normalmente projetados separadamente. O AVR é desenvolvido para atender requisitos para regulação de tensão e o PSS é projetado para amortecer oscilações eletromecânicas. A coordenação dos dois objetivos podem apresentar problemas quando há mudança nas condições operacionais do sistema.

Uma variedade de técnicas modernas tem sido propostas para controladores de excitação, como exemplo têm-se, os controladores adaptativos, controladores baseados na lógica Fuzzy, controladores baseados em Redes Neurais e Inteligência Artificial.

Copyright © 2016 ISESC.

Um controle ótimo linear, utilizado para controle de excitação, foi desenvolvido por [3] para minimizar as variações de estado do sistema. Para que trabalhasse com desvios de tensão e velocidade o foco foi em formular uma função de custo. Minimizando-se a função de custo, obteve-se um controle otimizado. Comparado aos PSS, os blocos de compensação não foram necessários, e uma ampla banda de frequências pôde ser obtida no trabalho desenvolvido em [4]. No entanto, por basear-se em um ponto de operação específico, esse controlador não apresentou bom desempenho quando submetido a grandes variações do ponto de operação do sistema.

Os controles adaptativos podem mudar seus parâmetros de acordo com o novo ponto de operação, de acordo com regras pré-programadas. Porém, dependendo da quantidade de instruções e do hardware do controlador, o processamento pode não atender a velocidade requerida pelo o sistema controlado [5].

Os controladores preditivos consideram tanto os estados passados, quando estimativas de estados futuros, dado um horizonte finito de tempo em que estas estimativas apresentem o mínimo de incertezas possíveis. Com isso obtém-se um controlador de excitação capaz de, em um horizonte de predição de um passo, definir um valor otimizado para a tensão de campo [6]. Porém, necessita-se de uma estratégia de ajuste para as variáveis da matriz de custos da função de custos quadrática, de forma a extrair um melhor desempenho deste método de controle.

As teorias baseadas na lógica racional, como as lógicas como as paraconsistentes, não ignora as contradições, ao invés disso, extrai delas as informações importantes para a tomada de decisão.

A Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores - LPA2v é uma das lógicas não clássicas mais adequadas para o raciocínio com dados que podem trazer informações inconsistentes. Sendo assim, observa-se que a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de 2 valores (LPA2v) é a ferramenta adequada para a aplicação.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e análise de um controle de excitação integrando os elementos da LPAv2 [7] em um Controle Preditivo baseado em Modelo (CPBM) de forma a obter:

- Um mecanismo de auto ajuste inteligente ao CPBM clássico;
- Maior eficiência na manutenção da estabilidade do SEP, quando submetido à variações de carga e de tensão.

Para a análise do comportamento do método de controle baseado na LPA2v, desenvolve-se um algoritmo no MATLAB®, a partir do modelo matemático da máquina síncrona, a fim de expressar as variações dinâmicas do gerador síncrono, frente às variações de tensão e velocidade provocadas por pequenas perturbações aplicadas ao SEP. Serão analisados dois casos particulares para a avaliação do desempenho do controlador desenvolvido. São eles:

- Variação de 5% da potência mecânica do gerador;
- Variação de 2% na tensão de referência nos terminais do gerador.

3. Materiais e Métodos

As equações de espaço de estados geralmente utilizadas para o modelamento matemático de um sistema físico discreto no tempo podem ser descritas como:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k+1)$$

$$y(k+1) = Cx(k+1) \quad (1)$$

Onde, onde k=1,2,3...N é o passo definido em um intervalo de tempo de amostragem.

No conjunto de equações (1) é possível observar que, as variáveis em $k+1$, correspondem ao estado futuro, dado as condições do sistema no presente.

No CPMB, como pode se observa na figura 1, efetua em um instante de tempo t a medição da variável da saída da planta $y(k)$ e através do modelo matemático do sistema físico estudado, faz uma predição $y(k+1)$, e através desta e da referência r, em um horizonte de predição N, calcula-se valores futuros para a variável manipulada minimizando-se uma equação denominada função de custo quadrático [8].

A formulação da função de custo quadrático utilizada nesta pesquisa, somente envolve a predição do sinal de controle a um passo à frente, ou seja, considera-se o horizonte de predição $N = 1$. Um processo de predição CPMB é mostrado na figura 1

A função de custo quadrático é representada da seguinte forma:

$$J = [r - y(k+1)]^T Q[r - y(k+1)] + \Delta u^T R \Delta u \quad (2)$$

Onde, $\Delta u = u(k+1) - u(k)$, as matrizes Q e R são denominadas matrizes de pesos ou de custos, e são utilizadas para determinar graus de importância a determinadas entradas e saídas.

Copyright © 2016 ISESC

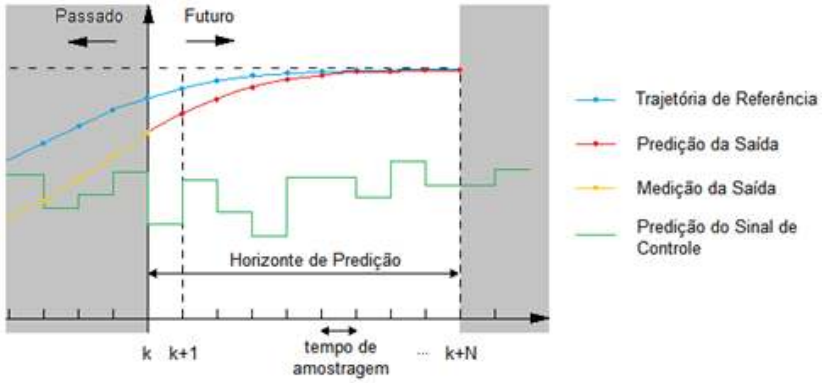


Figura 1. Processo de Predição do CPBM [8].

$$y(k+1) = CAx(k) + CBu(k) + CB\Delta u \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) em (2) obtém-se:

$$J = E^T QE - 2(CB)^T \Delta u^T QE + \Delta u^T [(CB)^T QCB + R]\Delta u$$

Aplicando-se a minimização da função J, ou seja:

$$\frac{\partial J}{\Delta u} = 0 \quad (4)$$

Conclui-se que:

$$\Delta u = \frac{(CB)^T QE}{[(CB)^T QCB + R]} \quad (5)$$

A matriz Q é uma matriz positiva definida relacionada aos estados e R é uma matriz positiva semi-definida relacionada à entrada.

As matrizes Q e R são normalmente diagonais com elementos positivos em sua diagonal.

O CP-LPA2v cumprir dois papéis: regulação da tensão nos terminais do gerador e amortecimento da oscilação eletromecânica diretamente relacionada às variações de velocidade do rotor.

A seleção das variáveis para se alcançar o desempenho ótimo na regulação da tensão nos terminais do gerador e do amortecimento de oscilações eletromecânicas são: torque eletromagnético T_e, tensão nos terminais do gerador V_t e velocidade do rotor ω_r. Essa variáveis, na representação do CPBM, geram através das saídas $y(k+1)$ previstas pelo modelo do gerador síncrono e dos valores de referência, as trajetórias de referência que são processadas no algoritmo de otimização LPA2v, como mostra a figura 2. As equações do quadro 1 mostra a obtenção da minimização da função custo.

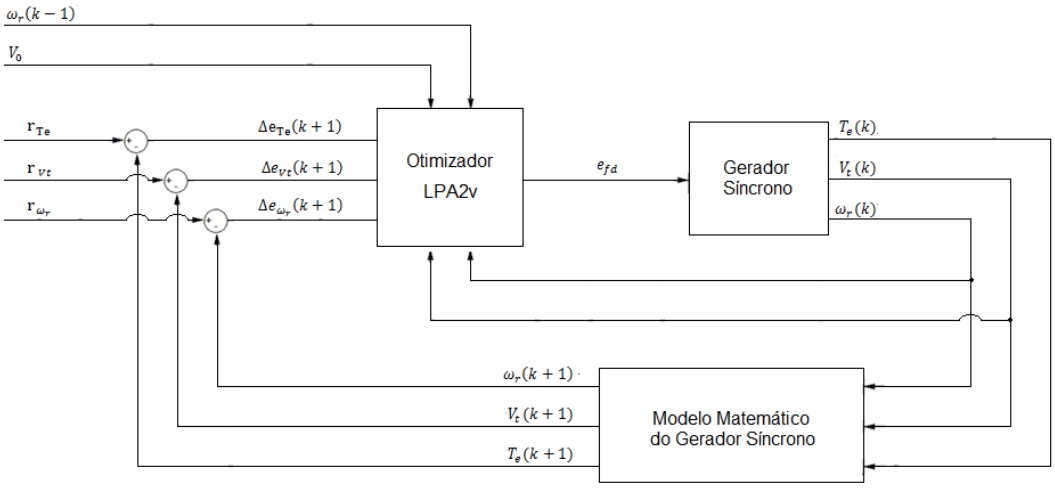


Figura 2. Diagrama de Blocos do Controlador de Excitação Preditivo LPA2v.

Copyright © 2016 ISESC

A função de custo quadrática

$$J = E_1{}^T Q E_1 + \left(E_1{}^T Q E_2 + E_2{}^T Q E_1\right)\Delta e_{fd} + \left(E_2{}^T Q E_2 + R\right)\Delta e_{fd}{}^2 \quad (6)$$

A minimização da função custo implica que:

$$\Delta e_{fd} = -\frac{\left(E_1{}^T Q E_2 + E_2{}^T Q E_1\right)}{2\left(E_2{}^T Q E_2 + R\right)} \quad (7)$$

Onde:

$$E_1 = A_1 \Delta\omega(k-1) + A_2 \Delta\omega_r(k) + A_3 \Delta V_t(k) \quad (8)$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} -K_4\omega_0\Delta t \\ -\frac{K_2\omega_0\Delta t^2}{2H} \\ -K_2\omega_0\Delta t \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ -\frac{2H}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -K_3\omega_0\Delta t \\ 2 - \frac{K_1\omega_0\Delta t^2}{2H} \\ \frac{2H}{\Delta t} - K_1\omega_0\Delta t \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Quadro 1. Equações da minimização da função custo e implicações.

Onde as constantes representadas nas equações das trajetórias são dependentes das condições iniciais e das indutâncias do sistema, e são obtidas no estudo de estabilidade a pequenos sinais em [1].

O bloco Otimizador LPA2v, como pode ser visto na figura 3, é constituído de uma RAP que faz a análise dos valores normalizados da velocidade do gerador e da tensão.

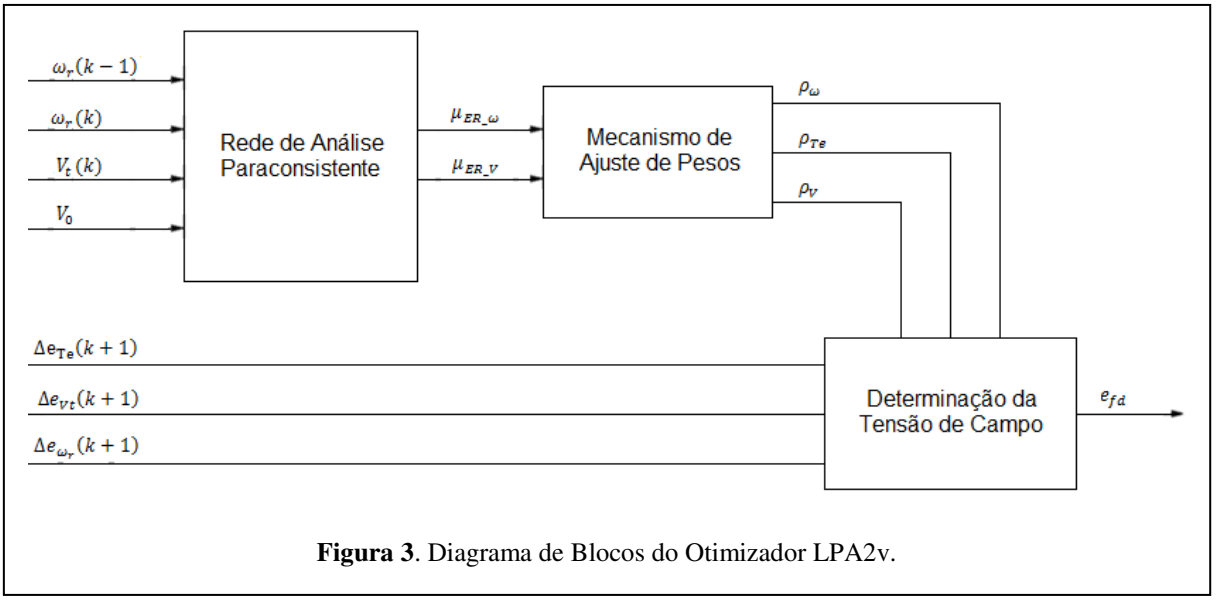


Figura 3. Diagrama de Blocos do Otimizador LPA2v.

Copyright © 2016 ISESC

A Rede de Análise Paraconsistente (RAP) para ajuste de pesos possui em sua entrada uma etapa de normalização onde as variáveis $\omega_r(k)$, $\omega_r(k-1)$ e $V_t(k)$ são transformadas em Graus de Evidência.

A estrutura da RAP é mostrada na figura 4.

Na tabela 1 consta a análise da variação da tensão de campo de acordo com as condições de variação da velocidade e da tensão nos terminais do gerador. Portando observam-se dois pontos de contradição: quando há aceleração do rotor e a tensão esta acima da tensão desejada V_0, e quando há desaceleração do rotor e a tensão esta abaixo do valor desejado V_0.

A função de cada NAP está descrita abaixo:

- NAP 1 ⇒ Análise da condição de aumento de e_{fd};
- NAP 2 ⇒ Análise da condição de diminuição de e_{fd};
- NAP 3 ⇒ Análise da variação de k_V ;

Após a análise feita pelos NAPs 1 e 2, os Graus de Evidência Resultantes μ_{ER1} e μ_{ER2}, que correspondem respectivamente à necessidade de aumento de e_{fd} e à necessidade de diminuição de e_{fd}, passam por um bloco chamado de Desnormalização, que é um comparador que decide qual Grau de Evidência Resultante que será dominante para a atuação do Mecanismo de Ajuste de Pesos.

A saída do bloco Desnormalização é composta pelo Grau de Evidência dominante e por um bit que, se na condição um, sinaliza para o Mecanismo de Ajuste que o Grau de Evidência Resultante Real considerado será o do NAP 1, e caso contrário o do NAP 2.

Quanto ao NAP 3, o Grau de evidência Resultante é entregue diretamente ao Mecanismo de Ajuste.

	Sinal	Condição	Valor de e_{fd}
$\Delta\omega_r$	Positivo	Aceleração	Aumenta
ΔV_t	Positivo	Sobretensão	Diminui
$\Delta\omega_r$	Positivo	Aceleração	Aumenta
ΔV_t	Negativo	Subtensão	Aumenta
$\Delta\omega_r$	Negativo	Desaceleração	Diminui
ΔV_t	Negativo	Subtensão	Aumenta
$\Delta\omega_r$	Negativo	Desaceleração	Diminui
ΔV_t	Positivo	Sobretensão	Diminui

Tabela 1. Análise das Variações de Tensão e Velocidade.

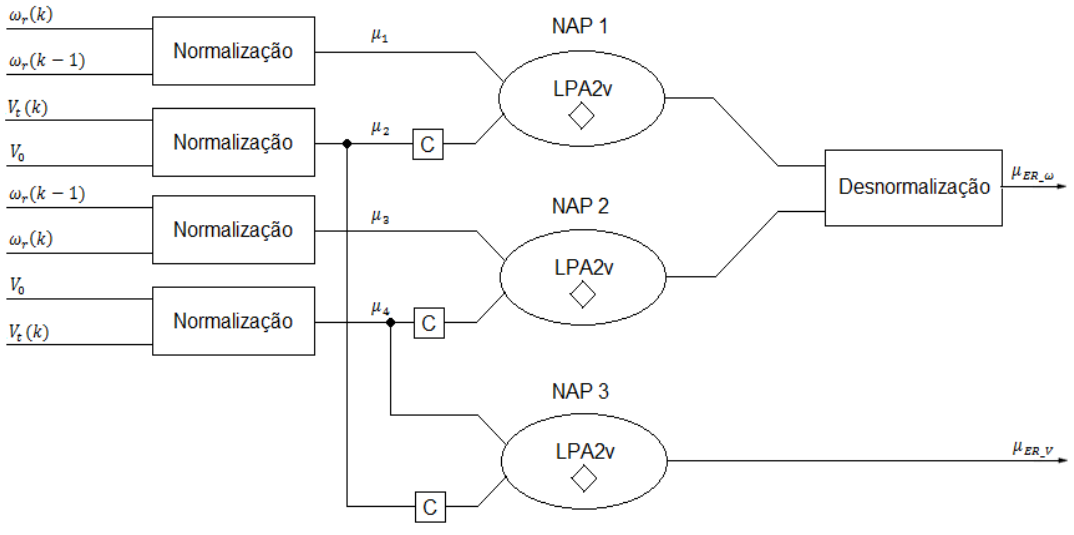


Figura 4. RAP para Determinação dos Fatores de Pesos.

Copyright © 2016 ISESC

A primeira normalização para o NAP 1, é feita considerando uma condição de aceleração acima do valor desejado. Vide Quadro 2 (a).

A segunda normalização para o NAP 1 é feita considerando o desvio máximo de 5% da tensão nos terminais do gerador acima da tensão desejada: Vide Quadro 2 (b).

A primeira normalização para o NAP 2, é feita considerando uma condição de desaceleração com valor máximo de tolerância de $20{,}41 \times 10^{-9}$ abaixo do valor desejado. Vide Quadro 2 (c).

A segunda normalização para o NAP 2 é feita considerando o desvio máximo de 5% da tensão nos terminais do gerador acima da tensão desejada. Vide Quadro 2 (d).

As entrada para o NAP 3, como se pode observar, é simplesmente μ_2 e μ_4. Sua saída é aplicada diretamente ao Mecanismo de Ajuste de Pesos.

A partir dos Graus de Evidência Resultante fornecidos pela RAP calculam-se os fatores multiplicadores ρ_ω, ρ_V e ρ_{Te}, os quais alteram respectivamente os pesos $k_\omega = 8$, $k_V = 1$ e $k_{Te} = 0{,}05$.

Sabendo-se que $\mu_{ER\,\omega}$ varia no intervalo $[0, 1]$, para os pesos k_ω e k_{Te}, quando a saída do bloco Desnormalização fornece bit de valor zero ou um, e os fatores multiplicadores variam de acordo com a equação (13).

$$\rho_\omega = \rho_{Te} = 2\mu_{ER\,\omega} + 1 \tag{13}$$

O fator multiplicador do peso referente à tensão ρ_V é expresso pela equação (14), tendo em vista que o valor do Grau de Evidência Resultante $\mu_{ER\,V}$ referente à tensão está dentro do intervalo $[0, 1]$.

$$\rho_V = -\mu_{ER\,V} + 2 \tag{14}$$

$$\begin{cases} \mu_1 = 0 & \text{, se } [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] \le 0 \\ \mu_1 = \dfrac{[\omega_r(k) - \omega_r(k-1)]}{20{,}41 \times 10^{-9}} & \text{, se } 0 < [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] \le 20{,}41 \times 10^{-9} \\ \mu_1 = 1 & \text{, se } [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] > 20{,}41 \times 10^{-9} \end{cases}$$

(a)

$$\begin{cases} \mu_2 = 1 & \text{, se } [V_t - V_0] \le 0 \\ \mu_2 = \dfrac{0{,}05 - [V_t - V_0]}{0{,}05} & \text{, se } 0 < [V_t - V_0] \le 0{,}05 \\ \mu_2 = 0 & \text{, se } [V_t - V_0] > 0{,}05 \end{cases}$$

(b)

$$\begin{cases} \mu_3 = 0 & \text{, se } [\omega_r(k-1) - \omega_r(k)] \le 0 \\ \mu_3 = \dfrac{[\omega_r(k-1) - \omega_r(k)]}{20{,}41 \times 10^{-9}} & \text{, se } 0 < [\omega_r(k-1) - \omega_r(k)] \le 20{,}41 \times 10^{-9} \\ \mu_3 = 1 & \text{, se } [\omega_r(k-1) - \omega_r(k)] > 20{,}41 \times 10^{-9} \end{cases}$$

(c)

$$\begin{cases} \mu_4 = 1 & \text{, se } [V_0 - V_t] \le 0 \\ \mu_4 = \dfrac{0{,}05 - [V_0 - V_t]}{0{,}05} & \text{, se } 0 < [V_0 - V_t] \le 0{,}05 \\ \mu_4 = 0 & \text{, se } [V_0 - V_t] > 0{,}05 \end{cases}$$

(d)

Quadro 2. Equações de determinação da Normalização para os NAPS da Rede.

Copyright © 2016 ISESC

Definidos os pesos e os fatores, é possível expressar a matriz Q em sua forma completa:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_\omega k_\omega & 0 & 0 \\ 0 & \rho_V k_V & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{Te} k_{Te} \end{bmatrix} \quad (15)$$

O modelo do sistema elétrico de potência utilizado nas simulações pode ser visto na figura 5. O gerador síncrono é conectado através de um transformador elevador de tensão a duas linhas de transmissão paralelas que, no outro extremo, estão conectadas ao barramento infinito. Os dados do gerador síncrono estão na tabela 2, e as reatâncias do transformador e das linhas de estão na tabela 3.

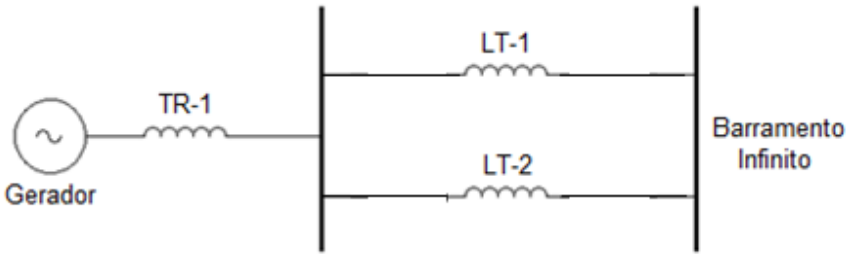


Figura 5. Modelo do Sistema Elétrico.

VALORES NOMINAIS		PARÂMETROS				SATURAÇÃO	
Potência Nominal	555 MVA	X_d	1,81 pu	X_l	0,15 pu	A_{sat}	0,031
Tensão Nominal	24 kV	X_q	1,76 pu	R_a	0,003 pu	B_{sat}	6,93
Frequência	60 Hz	X'_d	0,30 pu	T'_{d0}	8,00 s	Ψ_{T1}	0,80
N° de Polos	2	X'_q	0,65 pu	T'_{q0}	1,00 s		
Cte de Inércia	3,5 MWs/MVA	X''_d	0,23 pu	T''_{d0}	0.03 s		
Cte de Amortecimento	0	X''_q	0,25 pu	T''_{q0}	0.07 s		

Tabela 2. Dados do Gerador.

PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO	
X_{TR}	0,15
X_{LT1}	0,5
X_{LT2}	0,93

Tabela 3. Dados do Sistema Elétrico.

Copyright © 2016 ISESC

4. Resultados e Discussão

Caso 1: No instante 10s o gerador síncrono começa a sofrer um decréscimo no torque mecânico de 0,018 pu/min, que, em valores nominais do gerador equivale a 10 MW/min. Isso causa um desequilíbrio inicial entre torque mecânico e torque elétrico, e o rotor da máquina começam a desacelerar.

O resultado da simulação mostra, na figura 6, o instante em que o processo de redução do torque mecânico começa, e a figura 7 mostra o momento em que o torque mecânico atinge o seu valor final de -5% de seu valor inicial.

A figura 8 mostra o comportamento da tensão nos terminais do gerador síncrono no instante em que o torque inicia a rampa de descida no instante 10s. E na figura 9, observa-se o instante em que o torque mecânico aplicado ao gerador atinge a estabilização.

Caso 2: Um decremento de 2% da tensão de referência no barramento do gerador é realizado no instante de tempo 10s.

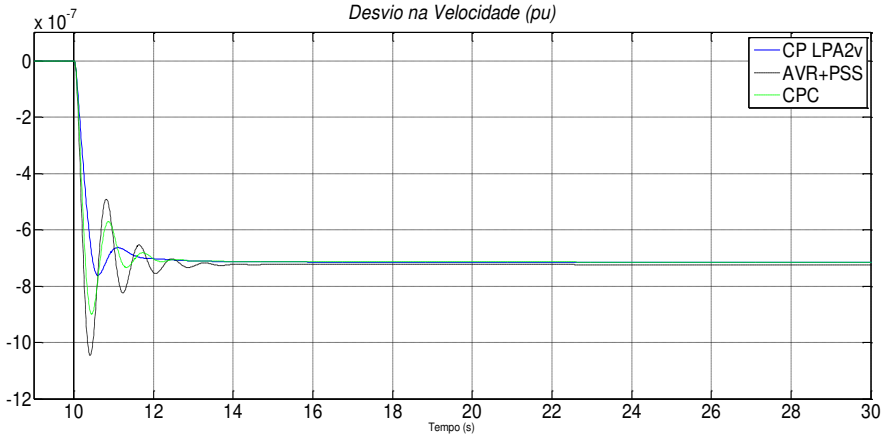


Figura 6. Comparação do Desvio na Velocidade (Inicial) – Caso 1.

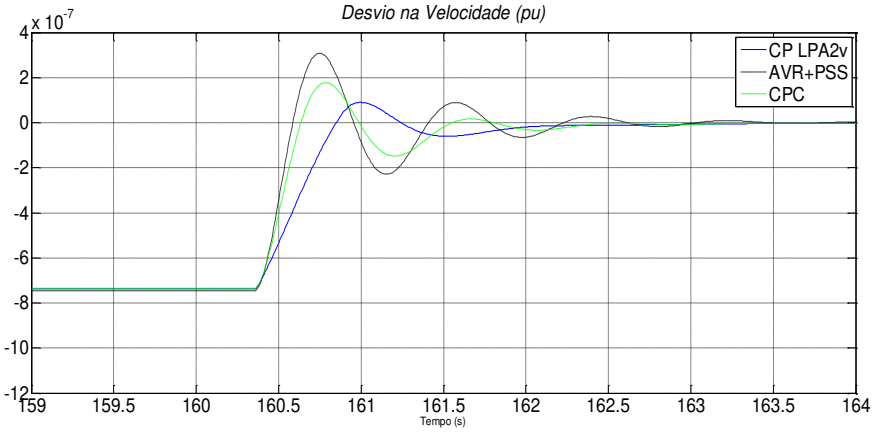


Figura 7. Comparação do Desvio na Velocidade (Final) – Caso 1.

Copyright © 2016 ISESC

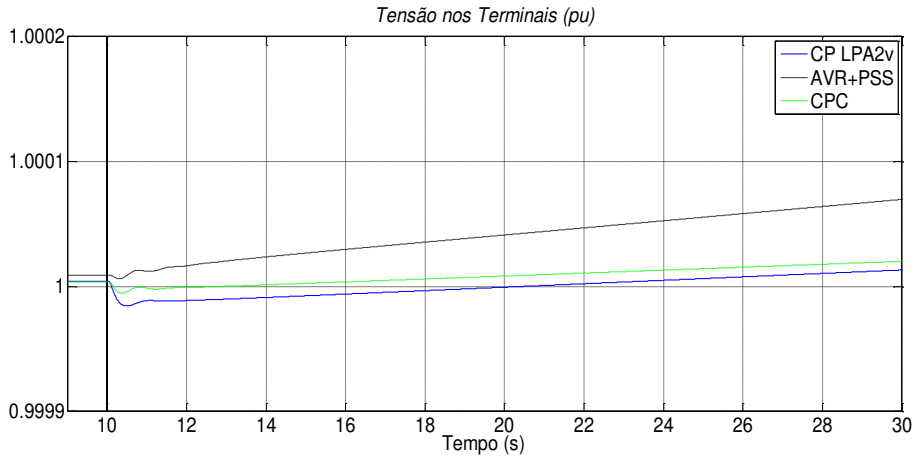


Figura 8. Comparação da Tensão nos Terminais (Inicial) – Caso 1.

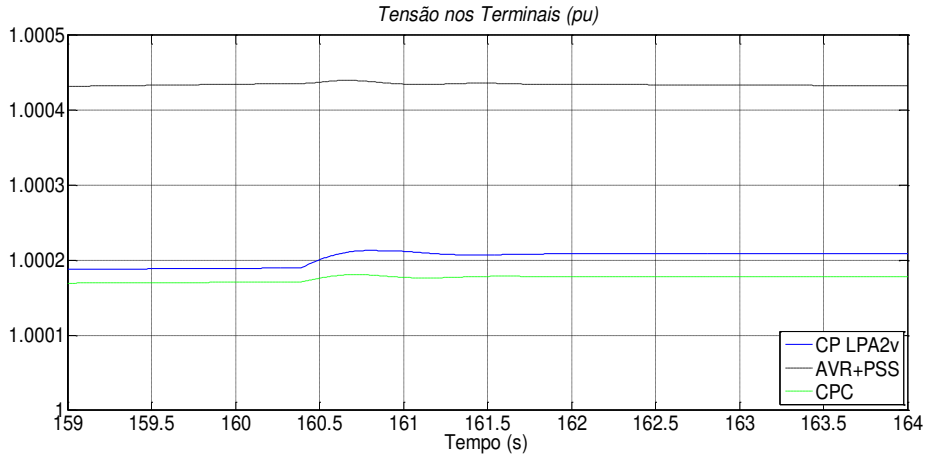


Figura 9. Comparação da Tensão nos Terminais (Final) – Caso 1.

4.1 Discussão

No caso 1, no instante inicial o desvio na velocidade, figura 6, os controladores CP-LPA2v e CPC apresentaram desempenho melhor que o AVR+PSS quanto aos valores de pico das oscilações e a rapidez no amortecimento das oscilações. Verifica-se que os controladores CP-LPA2v e o CPC atingem um valor praticamente constante após 12s, porém a velocidade se apresenta com valor menor que o nominal, enquanto que o controlador AVR+PSS tende a uma acomodação com velocidade menor que os outros dois. O desempenho do CP-LPA2v amortece a oscilação eletromecânica mais rapidamente em comparação com o CPC.

Na figura 7, em 160,4s o torque mecânico atinge o valor final, porém torque elétrico continua em decréscimo em um pequeno espaço de tempo, causando o rotor à acelerar. Sendo assim, sua velocidade aumenta, atingindo a estabilidade em 162s para o CP-LPA2v, 162,25s para o CPC e 163s para o AVR+PSS.

O desempenho da tensão nos terminais do gerador, no caso 1, mostrado nas figuras 8 e 9, quando o gerador síncrono inicia a descendência do torque mecânico, a tensão nos terminais do gerador sofre um decréscimo e logo após começa uma rampa de ascendência.

O controlador CPC começa sua subida em um valor acima do CP-LPA2v, e o controlador AVR+PSS possui

Copyright © 2016 ISESC

um coeficiente angular de subida maior que os outros dois controladores.

Quando o torque mecânico atinge seu valor final, com o aumento da velocidade do rotor, a tensão tende a subir em um pequeno degrau e se estabiliza dentro da banda de 5% de variação determinada pelos controladores, com o valor para CP-LPA2v um pouco acima do valor de acomodação para o CPC, e abaixo do valor para o AVR+PSS.

Observa-se na figura 10, que para o desvio na velocidade, os controladores CP-LPA2v e CPC apresentaram desempenho melhor que o AVR+PSS quanto ao amortecimento da oscilação.

Verifica-se que o CPC atinge a estabilidade após 12s, enquanto que o controlador CP-LPA2v se aproxima com maior rapidez ao valor desejado.

Quanto ao desempenho da tensão nos terminais do gerador no caso 2, mostrado na figura 11, até o instante 10,3s, o controlador AVR+PSS possui uma resposta mais eficaz no ajuste da tensão do que os controladores CP-LPA2v e o CPC, enquanto o controlador CPC caminha mais rapidamente para 0,98 pu do que o CP-LPA2v no instante inicial.

Após 10,6s, o CP-LPA2v cruza 0,98 pu, e acomoda-se rapidamente em comparação aos controladores AVR+PSS e CPC.

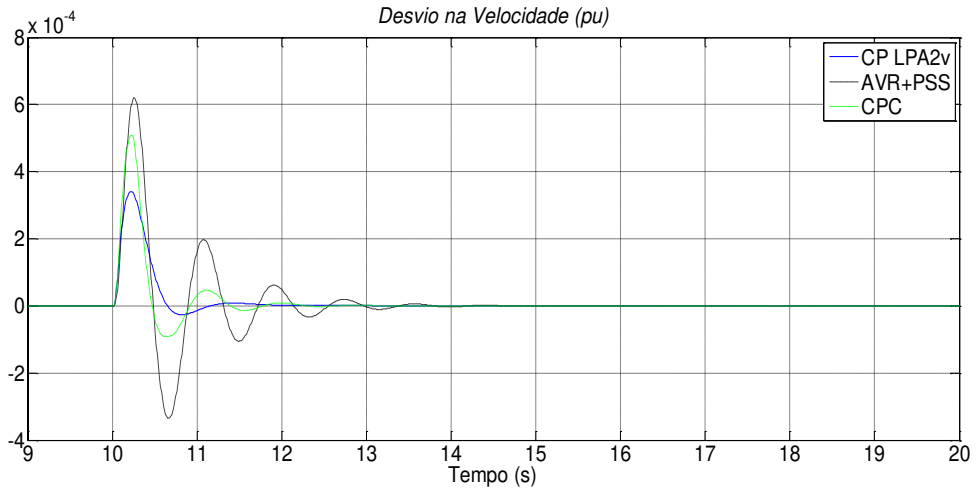


Figura 10. Comparação do Desvio na Velocidade – Caso 2.

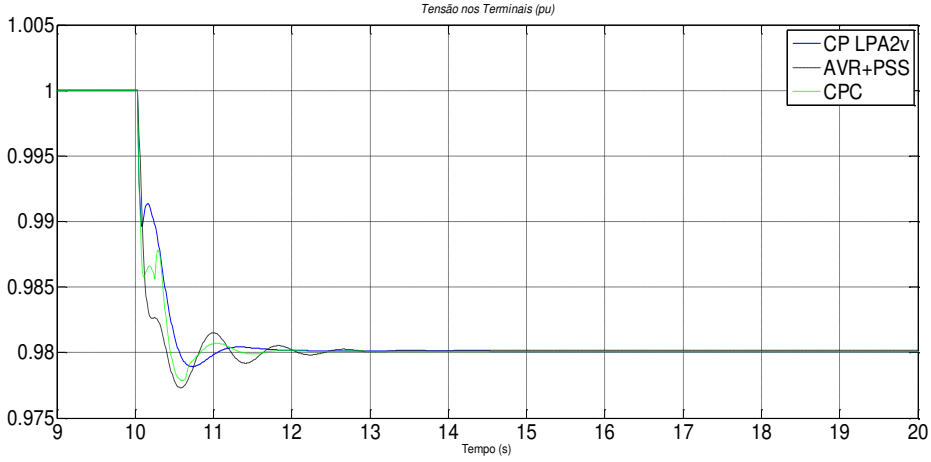


Figura 11. Comparação da Tensão nos Terminais – Caso 2.

Copyright © 2016 ISESC

5. Conclusões

A partir da simulação computacional do modelo proposto no *software* MATLAB®, verificou-se que o CP-LPA2v efetivamente apresentou um resultado superior ao controle clássico do AVR em conjunto com o PSS em todos os casos estudados. Com relação ao CPC convencional, o qual apresenta ajuste dos pesos em patamares constantes, o CP-LPA2v se mostrou também superior devido a sua característica de ajuste variável em um espaço continuo de valores com limites pré-determinados. O método de aplicação da LPA2v pretendido, se comportou de forma concisa no acréscimo sinais adicionais para quando necessário o amortecimento das oscilações eletromecânicas sem prejudicar, no entanto, o controle da tensão. A aplicação da LPA2v na estabilidade à pequenos sinais de sistemas de potência se mostrou muito promissora, e este trabalho abre caminho para outra abordagens da Lógica Paraconsistente neste assunto.

Referências

1. KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. Electric Power Research Institute. : McGraw-Hill, Power System Engineering Series, 1994.
2. ROGERS, G., **Power System Oscillations**, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 28-50.
3. YU, Y. N., MOUSSA, H. A. M., **"Optimal Stabilization of Multi-machine Systems"**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, May/June 1972, pp. 1174-1182.
4. YU, Y. N., **Electric Power System Dynamics**, Academic Press, 1983, pp. 95-137.
5. MAO, C., FAN, J., MALIK, O. P., HOPE, G. S., **"Studies of real-time adaptive optimal excitation controller and adaptive optimal power system stabilizer"**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.7, Issue: 3, Sept. 1992, pp. 598-605.
6. JIN, Q., **"Synchronous Generator Excitation Control Based On Model Predictive Control"**, Msc. Thesis, Ryerson University, Canada, 2005.
7. DA SILVA FILHO, J. I. & ABE, J. M., Fundamentos das Redes Neurais Paraconsistentes – Destacando Aplicações em Neurocomputação, (in Portuguese) Editora Arte & Ciência, ISBN 85-7473-045-9, 2001.
8. ***BAO-CANG, D.***, *Modern Predictive* **Control**, Boca Raton, CRC Press, 2010.

.

Copyright © 2016 ISESC