

CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE UNIDADES GERADORAS HIDRELÉTRICAS UTILIZANDO CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

HENRIQUE AUGUSTO MENARIN*, RODRIGO PEREIRA GOSMANN*, JOÃO MARCOS CASTRO SOARES*, JULIO ELIAS NORMEY-RICO†

**Reivax Automação e Controle S/A*

†*Universidade Federal de Santa Catarina*

Emails: ham@reivax.com.br, rpg@reivax.com.br, jms@reivax.com.br, julio@das.ufsc.br

Abstract— The voltage and speed control of a hydraulic generating unit is accessed using a nonlinear MIMO model predictive controller. Predictions are computed using a simplified nonlinear model. Operational constraints are considered along the prediction horizon. Simultaneously weighting of the control objectives by means of an unified control algorithm resulted in excellent control performance, without the need of additional control loops. The proposed strategy is found to be applicable from the simulation results, and can be used to substitute conventional controllers for improved performance.

Keywords— Predictive Control, Power Generation Control, Power System Stability

Resumo— Uma proposta de controle preditivo MIMO não linear para o controle de velocidade e tensão de uma unidade de geração de energia hidrelétrica é apresentada. O controle proposto utiliza um modelo não linear simplificado da unidade para o cálculo das predições. Restrições operacionais são aplicadas ao longo do horizonte. A ponderação simultânea dos objetivos de controle num cálculo integrado do controle possibilitou a obtenção de excelente desempenho de controle, sem o uso de malhas adicionais de controle. Verifica-se pelos resultados de simulações que a estratégia proposta é viável e permite melhorar o desempenho dos controladores tradicionais.

Palavras-chave— Controle Preditivo, Controle de Geração de Energia, Estabilidade de Sistemas de Potência

1 Introdução

Numa unidade geradora hidráulica, a energia armazenada na coluna d'água é convertida em energia cinética rotacional por uma turbina. A passagem de água na turbina é restringida pela abertura determinada por um conjunto de atuadores hidráulicos. A frequência do sinal de saída e a potência ativa entregue dependem de tal abertura. Acoplado à turbina encontra-se um gerador síncrono, onde a energia é convertida em energia elétrica. O campo do gerador é excitado de forma a definir a tensão terminal e a potência reativa de saída (Kundur et al., 1994).

Tradicionalmente, utilizam-se dois controladores para a geração. O regulador de velocidade (RV) manipula o fluxo de água pela turbina para controlar a potência ativa, e colabora para manter a frequência do sistema no valor desejado. O regulador de tensão (RT) controla a tensão terminal e a potência reativa manipulando a tensão de excitação do gerador (Kundur et al., 1994).

O RT também mantém o gerador operando dentro de uma região segura de operação, definida por limites de sobreaquecimento, fluxo magnético e estabilidade. Para isso, um conjunto de 5 malhas de controle auxiliares modificam a referência da malha principal (Kundur et al., 1994).

A interação da unidade geradora com o sistema provoca oscilações que reduzem a estabilidade e a capacidade de transmissão. O estabilizador de sistemas de potência (ESP) é um controlador de pré-alimentação do RT que gera um torque elétrico amortecedor no eixo da máquina.

Uma sintonia eficiente e robusta a variações da rede requer testes e noções de projeto no domínio da frequência (Kundur et al., 1994).

As dinâmicas do RT e do RV são distintas, porém há um acoplamento entre elas. Neste cenário, o uso de um controlador MIMO pode resultar em menor influência entre as variáveis controladas. Dentre as tecnologias de controle avançado empregadas na indústria, o controle preditivo baseado em modelo (MPC) se destaca pela abordagem sistemática no tratamento de processos multivariáveis, restrições e objetivos de controle (Camacho and Bordons, 2004). A representação de variáveis limitadas, oscilações eletromecânicas e acoplamento entre as malhas por um modelo interno torna o MPC particularmente interessante para esta aplicação. Além disso, o RV também pode ser usado para amortecimento das frequências baixas como as dos modos interárea, geralmente na faixa dos 0,2 Hz (Soares, 1982).

Alguns trabalhos têm mostrado o uso promissor do controle MPC em sistemas de geração de energia. O RT adaptativo desenvolvido em (Finch et al., 1999) utiliza um controlador GPC para o cálculo do sinal de controle, com a inserção da potência ativa na função objetivo para o amortecimento de oscilações. Em (Munoz-Hernandez and Jones, 2006), um algoritmo GPC MIMO foi utilizado para o controle de potência ativa de seis máquinas que compartilham a mesma coluna d'água. Em (Barreiros et al., 1998), um ESP adaptativo baseado em GPC gera o sinal de pré-alimentação do RT. Outro ESP adaptativo baseado em GPC

foi desenvolvido em (Wu and Malik, 2006), com geração de sinais estabilizadores tanto para o RT como para o RV. Em (Zachariah et al., 2009), apresenta-se uma solução de controle GPC adaptativo de tensão e velocidade de turbogeradores.

Não se encontra na literatura aplicação de um regulador que limite o ponto de operação da máquina, de forma integrada ao cálculo do controle. Para fins de comparação justa, procedimentos de sintonia mais apurados para os controladores clássicos poderiam ter sido utilizados nos trabalhos descritos acima. O uso de controladores baseados em modelos não lineares também não foi explorado para este tipo de sistema.

O controle do sistema de geração por um controlador MPC multivariável é investigado neste trabalho, visando a obter bom seguimento das referências, amortecimento de oscilações eletromecânicas, e atendimento das restrições operacionais. Esta abordagem é inédita neste campo de aplicação, e apresenta-se as vantagens em comparação com controladores convencionais.

O problema de controle, juntamente com o modelo do processo, é apresentado na Seção 2. Estratégias MPC encontram-se bem descritas na literatura (Camacho and Bordons, 2004) e uma explicação das especificidades do algoritmo implementado é realizada na Seção 3. Na Seção 4, discutem-se os resultados obtidos nos testes de simulação.

2 Geração de Energia Hidrelétrica

Um esquema da geração é mostrada na Figura 1.

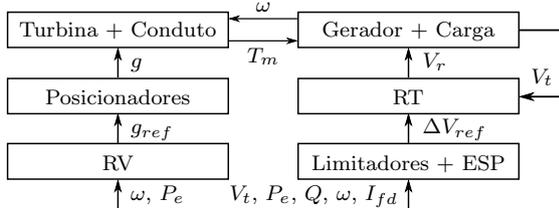


Figura 1: Esquema do modelo de geração

O RV controla a frequência ω e a potência ativa P_e determinando a referência de abertura g_{ref} dos posicionadores. Estes são atuadores hidráulicos controlados em cascata por malhas de controle PI+D. A abertura g resultante determina o torque mecânico T_m no eixo do conjunto turbina-gerador, que apresenta a dinâmica de fase não mínima do conjunto. A máquina acelera conforme a inércia do conjunto e a diferença entre T_m e o torque elétrico resultante da potência ativa entregue (Kundur et al., 1994).

O sinal de excitação V_r gerado pelo RT gera uma tensão E_{fd} no campo da máquina, determinando um fluxo magnético e a corrente de campo I_{fd} . A interação deste fluxo com o sistema ao qual a unidade está conectada gera as variáveis termi-

nais da máquina – tensão terminal V_t , potências ativa P_e e reativa Q (Kundur et al., 1994).

Para modelar o processo nas simulações deste trabalho, utiliza-se um modelo de simulação que representa as dinâmicas de atuadores hidráulicos, suas malhas de controle e um modelo não linear da coluna d'água, conforme (Zimmermann, 2012). Considera-se a máquina síncrona conectada a uma barra infinita por uma linha de reatância X_e , utilizando o modelo descrito em (Zeni Jr, 1987). Os valores de parâmetros utilizados encontram-se descritos no Apêndice.

O modelo completo de simulação foi simplificado para o desenvolvimento do controlador MPC. As equações (1-17) representam o modelo interno não linear utilizado. Todas as variáveis encontram-se expressas no sistema *por unidade* (pu), i.e., normalizadas por seus valores nominais.

$$g = \frac{1 + sT_{yz}}{1 + sT_{yp}} \frac{1}{(1 + sT_y)^3} g_{ref} \quad (1)$$

$$T_m = f_{Tm} \left(\frac{1 - sT_w}{1 + sT_w/2} g \right), \quad T_w = gT_W \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{2Hs + D_n} (T_m - P_e/\omega) \quad (3)$$

$$\delta = (2\pi\omega_0/s)(\omega_\infty - \omega) \quad (4)$$

$$\Psi_{kd} = \frac{1}{1 + sT_{do}''} (E_q' - I_d(X_d' - X_l)) \quad (5)$$

$$sT_{do}' E_q' = E_{fd} - E_l \quad (6)$$

$$E_l = E_q' + A_g e^{B_g(E_q' - 0,8)} +$$

$$(X_d - X_d') \left[I_d + \frac{X_d' - X_d''}{(X_d' - X_l)^2} sT_{do}'' \Psi_{kd} \right] \quad (7)$$

$$E_q'' = \left(\frac{X_d'' - X_l}{X_d' - X_l} E_q' + \frac{X_d' - X_d''}{X_d' - X_l} \Psi_{kd} \right) \omega \quad (8)$$

$$\Psi_q'' = -\frac{1}{1 + sT_{qo}''} I_q (X_q - X_q'') \quad (9)$$

$$E_d'' = -\Psi_q'' \omega \quad (10)$$

$$I_d = (E_q'' - E_\infty \cos \delta) / (X_d'' + X_e) \quad (11)$$

$$I_q = (-E_d'' + E_\infty \sin \delta) / (X_d'' + X_e) \quad (12)$$

$$V_q = E_q'' - X_d'' I_d \quad (13)$$

$$V_d = E_d'' + X_q'' I_q \quad (14)$$

$$V_t = \sqrt{V_q^2 + V_d^2} \quad (15)$$

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q \quad (16)$$

$$Q = V_q I_d - V_d I_q \quad (17)$$

- T_y é a dinâmica dominante dos atuadores, T_{yz} e T_{yp} são usadas para representar o sobressinal resultante da malha fechada;
- a dinâmica de fase não mínima aumenta proporcionalmente com g (Kundur et al., 1994), conforme o tempo da coluna d'água T_W ;
- f_{Tm} é um polinômio ajustado a partir de dados experimentais e representa a característica estática $T_m \times g$;
- a velocidade ω varia conforme a inércia $2H$ e um fator de amortecimento D_n ;

- δ é o ângulo de carga, a diferença angular entre os vetores do campo e a barra infinita. ω_0 é a frequência nominal em Hz;
- A_g, B_g modelam a curva de saturação magnética do entreferro (Kundur et al., 1994);
- E_∞, ω_∞ são a tensão e a frequência da barra.
- as constantes de tempo $T'_{do}, T''_{do}, T''_{qo}$ e as reatâncias X_d, X'_d, X''_d, X_q e X_l de máquina descritos em (Kundur et al., 1994);

3 Controle Preditivo Baseado em Modelo

O controle MPC é uma estratégia que utiliza um modelo dinâmico explícito para prever a resposta futura do processo. A cada iteração, é calculada uma sequência de ações de controle durante o *horizonte de controle* de forma a minimizar um critério de otimização, que pondera o seguimento das referências ao longo do *horizonte de predição*, a energia do sinal de controle e o atendimento a restrições. O primeiro termo de controle é aplicado no processo, e o cálculo é repetido nos instantes subsequentes (Camacho and Bordons, 2004).

Para determinar a resposta futura do processo, o algoritmo se utiliza de três modelos:

- *Modelo de Predição*: determina a resposta devido às ações de controle passadas;
- *Modelo de Otimização*: resposta devido à sequência de controle que está sendo calculada, a *resposta forçada*;
- *Modelo de Perturbação*: representa como as diferenças observadas entre as medições do processo e o modelo de predição evoluem, provendo realimentação ao controlador.

Num sistema linear, a predição é a soma das respostas dos três modelos, pelo princípio da superposição. Tem-se utilizado com êxito essa suposição também em processos não lineares, para que se possa reduzir a complexidade do problema de otimização com o uso de um modelo linear de resposta forçada. Assim, o modelo de predição é não linear, e sua resposta resulta da sua iteração pelo número de passos do horizonte.

O modelo de otimização é representado por coeficientes resultantes da aplicação de degraus nas entradas do modelo de predição, que é atualizado conforme a mudança do ponto de operação. Dado um processo com saídas y_i , $1 \leq i \leq n$ e entradas u_l , $1 \leq l \leq m$, os coeficientes g_{kil} representam a resposta da saída y_i ao degrau na entrada u_l , aplicado há k iterações. A predição j passos à frente, calculada no instante t , é dada por

$$y_i(t+j|t) = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^j g_{kil} \Delta u_l(t+j-k|t) + f_i(t+j|t)$$

onde $\Delta u_l(t+j|t) = u_l(t+j|t) - u_l(t+j-1|t)$ são os incrementos do controle calculado no instante t , e $f_i(t+j|t)$ é a soma da saída dos modelos de predição e de perturbação. Agrupando as predições ao longo do horizonte, a influência da sequência de controle calculada é determinada pela matriz de resposta ao degrau \mathbf{G}_i :

$$\hat{\mathbf{y}}_i = [\mathbf{G}_{i1} \cdots \mathbf{G}_{im}] \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix} + \mathbf{f}_i = \mathbf{G}_i \mathbf{u} + \mathbf{f}_i \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_i = [y_i(t+N_{1i}|t), \dots, y_i(t+N_{2i}|t)]^T$$

$$\mathbf{u}_i = [\Delta u_i(t|t), \Delta u_i(t+d_{ul}|t), \dots, \Delta u_i(t+d_{ul}N_{ul}|t)]^T$$

N_{1i} e N_{2i} definem os instantes inicial e final do horizonte de predição em que a variável y_i é ponderada na função objetivo. Após certo instante no horizonte, o controle é constante e $\Delta u_i(t+k|t) = 0, k > d_{ul}N_{ul}$. N_{ul} é o horizonte de controle e representa o número de graus de liberdade da sequência de controle calculada. Os incrementos de controle são permitidos apenas nos instantes do horizonte de controle múltiplos do período d_{ul} . Isso possibilita que o controle seja aplicado em pontos mais distantes do horizonte sem aumentar a dimensão do problema de otimização. Assim, as matrizes \mathbf{G}_{il} são dadas por:

$$\mathbf{G}_{il} = \begin{bmatrix} g_{N_{1i},i,l} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{N_{1i}+1,i,l} & g_{N_{1i},i,l} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N_{2i},i,l} & g_{N_{2i}-1,i,l} & \cdots & g_{N_{2i}-d_{ul}N_{ul}+1,i,l} \end{bmatrix} \mathbf{d}_{\mathbf{G}_{il}}$$

$\mathbf{d}_{\mathbf{G}_{il}}$ é uma matriz $(N_{2i} - N_{1i} + 1) \times N_{ul}$ que seleciona as colunas das ações de controle múltiplas de d_{ul} , pois as ações de controle nos instantes intermediários será nula.

Os termos da *resposta livre* \mathbf{f}_i são dados por

$$f_i(t+j|t) = \tilde{y}_i(t+j|t) + e_i(t+j|t) \quad (19)$$

onde \tilde{y}_i resulta da simulação do modelo de predição. e_i é a saída do modelo de perturbação, que considera o erro de predição constante ao longo do horizonte:

$$\begin{aligned} e_i(t|t) &= y_i(t) - \tilde{y}_i(t|t-1) \\ e_i(t+j|t) &= e_i(t|t), \quad j = N_{1i}, \dots, N_{2i} \end{aligned} \quad (20)$$

O valor do controle u_l é limitado entre u_l^{\min} e u_l^{\max} , e sua variação, entre Δu_l^{\min} e Δu_l^{\max} , na forma de *restrições duras*. Esse tipo de restrição não pode ser violada pela solução do problema de otimização. Os limites das variáveis de saída podem ser ultrapassados, e são considerados como *restrições brandas*. Nesse caso, insere-se uma ponderação sobre o quanto a variável y_i excede o limite, a variável de folga ϵ_i . O limite é expresso da seguinte forma:

$$\begin{cases} y_i(t+j|t) + \epsilon_i(t+j|t) \geq y_i^{\min} \\ y_i(t+j|t) - \epsilon_i(t+j|t) \leq y_i^{\max} \\ \epsilon_i(t+j|t) \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

O cálculo da ação de controle é realizado pela solução do problema de otimização da eq. (22):

$$\begin{aligned} \min J &= (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{w})^T R (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{w}) + \mathbf{u}^T Q \mathbf{u} + \boldsymbol{\epsilon}^T S \boldsymbol{\epsilon} \\ \text{s.a : para } l &= 1, \dots, m, j = 0, \dots, N_{ul} : \\ u_l^{\min} &\leq u_l(t + j|t) \leq u_l^{\max} \\ \Delta u_l^{\min} &\leq \Delta u_l(t + j|t) \leq \Delta u_l^{\max} \end{aligned} \quad (22)$$

onde $\mathbf{w} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n)$ são as referências futuras, $\hat{\mathbf{y}} = (\hat{\mathbf{y}}_1, \dots, \hat{\mathbf{y}}_n)$, e $\boldsymbol{\epsilon} = (\boldsymbol{\epsilon}_1, \dots, \boldsymbol{\epsilon}_n)$. A ponderação de cada termo na função objetivo é determinada pelas matrizes $R = \text{diag}(R_1, \dots, R_n)$ e $Q = \text{diag}(Q_1, \dots, Q_m)$. As matrizes diagonais R_i e Q_i assumem valores positivos no horizonte.

Com o uso da resposta ao degrau como modelo de otimização, o problema de controle apresentado na eq. (22) torna-se um problema de programação quadrática, para o qual há métodos eficientes de solução (Camacho and Bordons, 2004), entre os quais o método do conjunto ativo, que se adapta bem às necessidades da estratégia MPC.

4 Resultados

4.1 Controladores convencionais para comparação

Controladores convencionais foram ajustados para comparação com a solução proposta. O RV implementado é um controlador PI em série à saída do qual é somada a saída de uma curva que determina qual abertura deve ser usada de acordo com a referência de potência, (Figura 2).

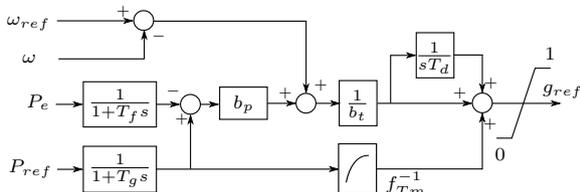


Figura 2: RV convencional

O ajuste do PI foi realizado conforme as relações recomendadas em (IEEE, 1992): $b_t = 0,3$, $T_d = 6$ s. A curva utilizada foi a mesma do modelo interno do controlador MPC. O filtro de referência não foi usado, e o de realimentação foi fixado em $T_f = 1$ s, com estatismo permanente b_p de 5%.

O RT utilizado é um controlador PI série. O ganho proporcional $K_p = 150$ deriva de especificações de resposta determinadas pelo operador do sistema, e o tempo integral $T_i = 2,2$ s é igual à constante de tempo efetiva do campo em carga.

Um ESP do tipo PSS2B foi sintonizado para que a compensação de fase ficasse próxima à da fase da função $GEP(s)$ (Kundur et al., 1994), com os parâmetros detalhados no Apêndice.

Os controladores convencionais foram discretizados com período de amostragem de 5 ms, passo

coerente com o utilizado pelos controladores digitais disponíveis no mercado. O modelo de simulação também foi discretizado nessa taxa, que é suficiente para reproduzir as dinâmicas do sistema.

4.2 Controlador MPC

O controle MPC é implementado a partir da ponderação das seguintes variáveis:

- Tensão terminal;
- Frequência;
- Potência ativa, cuja ponderação é uma razão de 5% a da frequência, resultante do estatismo permanente;
- Potência acelerante P_a , sintetizada a partir da mesma estrutura usada no ESP baseado na integral de potência acelerante (IEEE, 2005). Esta compreende filtros passa alta e passa baixa que restringem a variável à faixa de atuação do ESP, e combinam as oscilações observadas na frequência e na potência;
- Sinal de controle de abertura g_{ref} , com um período de atualização $d_{ug} = 3$;
- Sinal de controle de excitação V_r .

Os horizontes foram selecionados para que abrangessem de forma suficiente os transitórios das variáveis de saída e controle. As ponderações foram sintonizadas por simulação, como mostrado na Tabela 7.

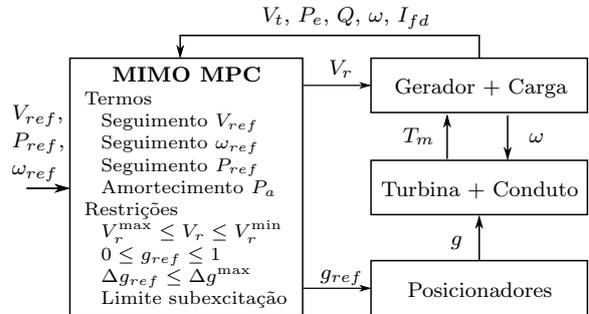


Figura 3: Esquema do controle MIMO MPC

4.3 Resposta ao degrau

A resposta ao degrau na referência de tensão terminal é apresentada na Figura 4, para uma reatância externa X_e de 20% na base da máquina. Os índices de tempo de estabilização a 5% da tensão terminal, taxa de amortecimento efetiva (EDR)¹ da potência ativa, integral do erro absoluto (IAE) de seguimento à referência de potência e a soma dos incrementos de controle da abertura, estão

¹effective damping ratio: razão entre o valor pico a pico entre o primeiro pico inferior e o segundo pico superior e o valor pico a pico entre o primeiro pico inferior e o primeiro pico superior de uma resposta oscilatória

mostrados na Tabela 1. Os índices apresentados por ambos os controladores são representativos de bons ajustes reais. O controle MPC apresenta um amortecimento em torno de 3% melhor, sendo 2,4% mais rápido em tempo de estabilização. A movimentação dos posicionadores ficou abaixo de 60% da obtida com o RV convencional, demonstrando a redução no acoplamento das malhas.

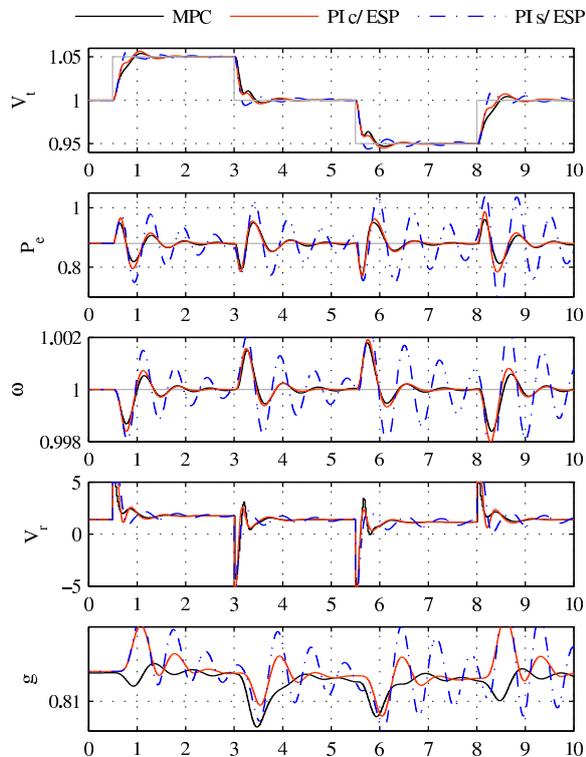


Figura 4: Resposta ao degrau de tensão terminal

	MPC	PI c/ ESP	PI s/ ESP
$t_{5\%}(V_t)$	0,70 s	0,73 s	1,04 s
$EDR(P_e)$	0,619	0,634	1,016
$IAE(P_e)$	32,75	36,34	111,96
$\sum \Delta g$	0,023	0,039	0,111

Tabela 1: Índices da resposta ao degrau de V_t

Na resposta ao degrau de potência (Figura 5), verifica-se que o ESP provoca uma perturbação acima de 0,5% no controle da tensão. Isso não ocorre com o controlador MPC, cujo índice IAE do erro de seguimento da referência de tensão terminal é mais de 15 vezes menor (Tabela 2).

4.4 Restrição de Subexcitação

A restrição de subexcitação define uma condição operacional que evita que a potência reativa fique abaixo de um limite de estabilidade. Ela pode ser temporariamente excedida, mas deve ser respeitada em regime permanente. A restrição é expressa pela seguinte condição:

$$y_{UEL} = Q - (Q_0 V_t^k - A_{UEL} P_e) > 0 \quad (23)$$

A malha UEL2 (IEEE, 2005) foi ajustada com os parâmetros do Apêndice para comparação. A condição foi implementada no algoritmo MPC como restrição branda, com horizonte $N_{UEL} = 50$, ponderação fixa de $s_{UEL} = 500$. O resultado da aplicação de um degrau de -0,1 pu na tensão terminal é mostrado na Figura 6. O controlador MPC atendeu a restrição sem levar a um sobressinal da variável limitada, com um índice IAE de atendimento à restrição igual a 53% do obtido com o controlador convencional (Tabela 3).

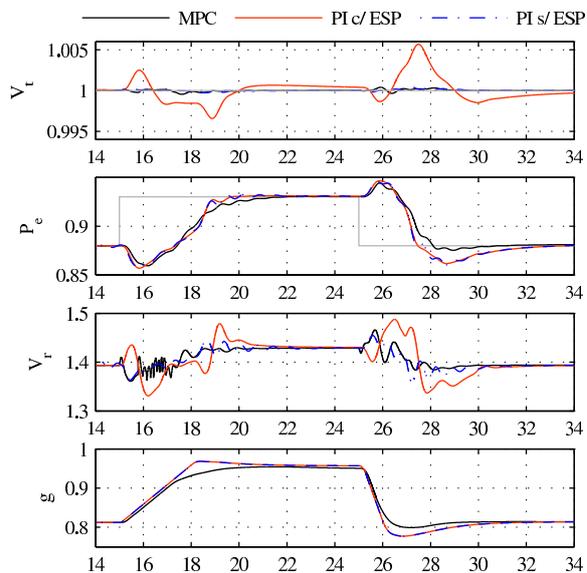


Figura 5: Resposta ao degrau de potência ativa

	$t_{5\%}(P_e)$	$IAE(P_e)$	$IAE(V_t)$
MPC	5,13 s	68,03	0,29
PI c/ ESP	5,62 s	72,00	4,44

Tabela 2: Índices da resposta ao degrau de P_e

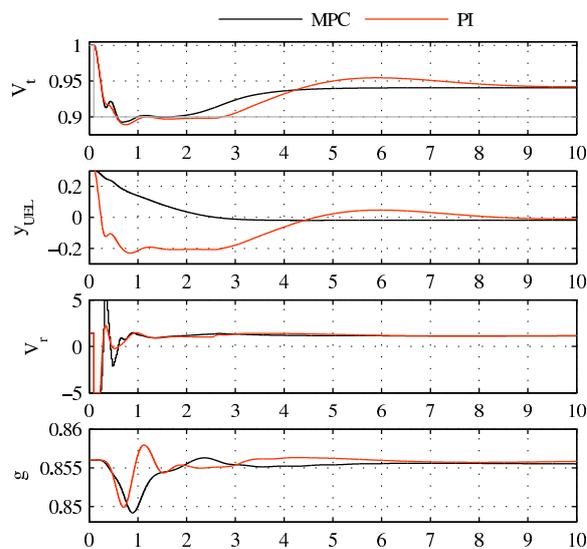


Figura 6: Resposta da restrição de subexcitação

	IAE(y_{UEL})	$\sum \Delta g$
MPC	89,63	0,0157
PI c/ ESP	169,05	0,0213

Tabela 3: Índices da restrição de subexcitação

5 Conclusões

Verifica-se que a estratégia de controle preditivo baseado em modelo é adequada para o controle MIMO de geração hidrelétrica. Obteve-se uma excitação rápida mantendo bom amortecimento das oscilações eletromecânicas, com o cálculo integrado da ação de controle, sem malhas adicionais. A principal vantagem disso é que o ajuste por ponderações é mais intuitivo que os procedimentos utilizados com o controlador convencional, principalmente no projeto do ESP.

O acoplamento entre as malhas de controle foi reduzido, tanto no efeito do transitório de carga sobre a malha de tensão como no sentido de os posicionadores não serem afetados pelas dinâmicas de potência quando a excitação é alterada.

Necessita-se estudar a influência de incertezas de modelagem, tanto paramétricas como estruturais. Exemplos de testes que serão executados em trabalhos futuros é a investigação dos efeitos de compartilhamento do conduto forçado, resposta a modos intraplanta e interárea na operação em ambiente multimáquinas.

Apêndice

Posicionadores e turbina							
T_W	1,8	T_y	0,26	T_{yz}	3	T_{yp}	2,5
Máquina Síncrona							
X_d	0,87	X'_d	0,31	X''_d	0,25	X_q	0,65
X_l	0,12	A_g	0,015	B_g	7,9	2H	7,8
T'_{do}	4,17	T''_{do}	0,05	T''_{qo}	0,1	D_n	1

Tabela 4: Parâmetros do modelo

T_{W1}	10	T_{W2}	10	T_r	0,15	K	6
T_3	0,08	T_4	0,01	T_5	0,06	T_6	0,1

Tabela 5: Parâmetros do ESP

Q_0	-0,4	k	2	A_{UEL}	0,2	K_i	0,5
T_{Up}	3 s	T_{Uq}	3 s	K_p	0,25		

Tabela 6: Parâmetros do limitador UEL2

$N_{2,Vt}$	50	r_{Vt}	300	$N_{2,\omega}$	300	r_ω	50
$N_{2,Pa}$	50	r_{Pa}	10	q_g	2000	q_{Vr}	0,02

Tabela 7: Parâmetros do algoritmo MPC

Referências

- Barreiros, J., e Silva, A. and Simões Costa, A. (1998). A self-tuning generalized predictive power system stabilizer, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **20**(3): 213–219.
- Camacho, E. F. and Bordons, C. (2004). *Model predictive control*, Springer.
- Finch, J. W., Zachariah, K. J. and Farsi, M. (1999). Turbogenerator self-tuning automatic voltage regulator, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **14**(3): 843–848.
- IEEE (1992). Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies, *IEEE Transactions on Power Systems* **7**(1): 167–179.
- IEEE (2005). 421.5-2005 IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies.
- Kundur, P., Balu, N. J. and Lauby, M. G. (1994). *Power system stability and control*, McGraw-Hill.
- Munoz-Hernandez, G. A. and Jones, D. (2006). MIMO generalized predictive control for a hydroelectric power station, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **21**(4): 921–929.
- Soares, J. M. C. (1982). *Identificação experimental, simulação e ajustes de reguladores de velocidade de usinas hidrelétricas com verificação em testes de campo*, Dissertação de mestrado, UFSM, Santa Maria.
- Wu, B. and Malik, O. P. (2006). Multivariable adaptive control of synchronous machines in a multimachine power system, *IEEE Transactions on Power Systems* **21**(4): 1772–1781.
- Zachariah, K. J., Finch, J. W. and Farsi, M. (2009). Multivariable Self-Tuning control of a turbine generator system, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **24**(2): 406–414.
- Zeni Jr, N. (1987). *Controle da excitação de geradores de usinas hidrelétricas: Modelagem, identificação e ajustes de campo*, Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis.
- Zimmermann, G. G. (2012). Desenvolvimento de um controlador MPC para regulação de velocidade e potência ativa de turbinas hidráulicas, *Projeto de fim de curso*, UFSC, Florianópolis.