

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MÉTODOS DE PROJETO DE CONTROLADORES EM DOIS NÍVEIS USANDO SINCRÓFASORES

MURILO E. C. BENTO*, DANIEL DOTTA†, RODRIGO A. RAMOS*

*Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Centro, 13566-590
Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo
São Carlos, SP, Brasil

†Avenida Albert Einstein, 400, Distrito Barão Geraldo, 13083-852
Universidade Estadual de Campinas
Campinas, SP, Brasil

Emails: murilocasteroba@gmail.com, dotta@fee.unicamp.br, ramos@sc.usp.br

Abstract— In this paper, three different Wide-Area Damping Control design methods are considered for a two-level control scheme. The important challenges involved in this control design are output-feedback, communication time-delays, loss of remote signals and multivariable control design. Three different control design methods, found in the literature, are analyzed: Riccati equation solution, Linear Matrix Inequalities and Genetic Algorithms. The performance of the three different controllers is discussed and compared using modal analysis and time-domain simulations of the multimachine Southern/Southeastern Brazilian equivalent power system.

Keywords— Two-Level Control, Genetic Algorithm, Linear Matrix Inequalities, Riccati Equation, Small-Signal Stability, Synchronized Phasor Measurement System.

Resumo— Neste artigo, três diferentes métodos de projeto de controladores em dois níveis usando sincrofases são considerados para uma estrutura de controle em dois níveis. Os desafios importantes envolvidos neste projeto de controle são realimentação de saída, atrasos de tempo de comunicação, perda de sinais remotos e projeto de controle multivariável. Três métodos de projeto de controle, encontrados na literatura, são analisados: solução da equação de Riccati, Desigualdades Matriciais Lineares e Algoritmos Genéticos. O desempenho dos três controladores projetados é discutido e comparado usando análise modal e simulações no domínio do tempo do sistema elétrico equivalente Sul/Sudeste Brasileiro.

Palavras-chave— Controle em Dois Níveis, Algoritmos Genéticos, Desigualdades Matriciais Lineares, Equação de Riccati, Estabilidade a Pequenas Perturbações, Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.

1 Introdução

Oscilações são fenômenos característicos da operação de sistemas de energia elétrica. Essas oscilações podem ser altamente amortecidas e de alta frequência (chaveamentos) até oscilações sustentadas de baixa frequência. Oscilações eletromecânicas de baixa frequência podem limitar o fornecimento de energia elétrica entre áreas e, em casos extremos, levar o sistema elétrico ao *blackout*. O problema de EPP (Estabilidade a Pequenas Perturbações) tem sido resolvido com sucesso pelo uso de controladores locais (estabilizadores de sistema de potência nos geradores). Porém, a inclusão de geração distribuída e remota, bem como limites de expansão dos sistemas de transmissão, podem resultar em oscilações com baixo amortecimento.

Como exemplo prático, na parte oeste do sistema elétrico americano (*western North American* (wNAPS)), os controladores locais tem efeito limitado nos modos de oscilação inter-área. Diferentes medidas foram implementadas para mitigar oscilações inter-área como a avaliação e re-sintonia dos controladores dos geradores, melhorias de modelo e identificação de modos de oscilação de baixo de amortecimento. Recentemente, como uma alternativa promissora, a Bonneville Power Administration conduziu extensas pesquisas para ava-

liar um controlador de amortecimento de oscilação usando Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) (Trudnowski et al., 2013).

Nos últimos anos, vários pesquisadores focaram seus trabalhos em projetos de controladores para o amortecimento de oscilações usando dados de medição fasorial sincronizadas (Kishor et al., 2014). Diversas estruturas de controle foram consideradas tais como a quasi-descentralizada, centralizada e em dois níveis. Entre elas, a estrutura em dois níveis apresenta potencial para aplicação em sistemas elétricos (Annaswamy and Amin, 2013).

A estrutura de controle em dois níveis compreende controladores locais e um controlador centralizado. Os controladores locais, correspondendo aos convencionais regulador automático de tensão - estabilizador de sistemas de potência (RAT-ESP) nos geradores, garantem um desempenho mínimo do sistema. O controlador centralizado permite a otimização do desempenho global do sistema, especialmente em situações onde configurações topológicas críticas exigem a re-sintonia do controle local ou tal controle local apresenta efeito limitado para os modos de oscilação inter-área. Os desafios importantes envolvidos no projeto de controle multivariável de estruturas em dois níveis são o controle de realimentação de saída e

atrasos de tempo envolvidos nos canais de comunicação. Além disso, projetos de controle devem garantir um nível de desempenho dinâmico satisfatório quando há perda de sinais remotos seja na entrada ou saída do controle central.

As exigências de projeto e o método escolhido para o projeto de controladores podem ter influência no desempenho do sistema elétrico. Entre os métodos encontrados na literatura, este artigo foca em três deles: solução da equação de Riccati (Dotta et al., 2009), Desigualdades Matriciais Lineares (DML) (Chaudhuri et al., 2004) e Algoritmos Genéticos (AG) (Yuan et al., 2007).

As principais contribuições deste artigo são a aplicação e avaliação de desempenho destes três métodos de controle multivariável para o projeto de um controlador centralizado. Os controladores resultantes devem ser robustos a variações de carga e topológicas, bem como perdas de canais de comunicação. Análise de EPP e simulações no domínio do tempo são usados para validação e avaliação de desempenho.

O artigo é organizado como se segue. Seção 2 apresenta o modelo do sistema elétrico e estrutura de controle. Seção 3 apresenta os métodos de projeto selecionados para o controle central. Na Seção 4, os desempenhos dos controladores propostos são avaliados através de análise em EPP e simulações no domínio do tempo. Finalmente, as conclusões são dadas na Seção 5.

2 Modelo do Sistema

2.1 Modelo do Sistema de Potência

O modelo do sistema de potência é linearizado ao redor de um ponto de operação nominal. Eliminando as variáveis algébricas e definindo x , u e y como os vetores de estado, entrada e saída respectivamente, o sistema de potência pode ser definido como (Kundur et al., 1994):

$$\dot{x}_j = A_j x_j + B_j u_j \quad (1)$$

$$y_j = C_j x_j \quad (2)$$

onde $j = 1, \dots, L$, representando os L pontos de operação e $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ e $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$.

2.2 Atrasos de Tempo

Atrasos de tempo são melhores modelados por uma aproximação de Padé de segunda ordem (Dotta et al., 2009). A função de transferência é dada por

$$G_d(s) = \frac{6 - 2Ts}{6 + 4Ts + (sT)^2} \quad (3)$$

onde T é o atraso de tempo. As equações em espaço de estados são

$$\dot{x}_d = A_d x_d + B_d u_d \quad (4)$$

$$y_d = C_d x_d + D_d u_d \quad (5)$$

onde x_d é o vetor de atraso de tempo em segundos, u_d é o vetor de entrada, y_d é o vetor de saída.

Os atrasos podem ser incluídos no modelo usando (1-2) e (4-5), levando às seguintes matrizes do sistema, onde os índices i e o denotam os atrasos de entrada e de saída respectivamente

$$\bar{A}_j = \begin{bmatrix} A_j & B_j C_{d_i} & 0 \\ 0 & A_{d_i} & 0 \\ B_{d_o} C_j & 0 & A_{d_o} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\bar{B}_j = [B_j D_{d_i} \quad B_{d_i} \quad 0]^T \quad (7)$$

$$\bar{C}_j = [D_{d_o} C_j \quad 0 \quad C_{d_o}] \quad (8)$$

onde $j = 1, \dots, L$, $\bar{A} \in \mathbb{R}^{r \times r}$, $\bar{B} \in \mathbb{R}^{r \times p}$ e $\bar{C} \in \mathbb{R}^{q \times r}$. O modelo em espaço de estados é

$$\dot{\bar{x}}_j = \bar{A}_j \bar{x}_j + \bar{B}_j u_{d_i} \quad (9)$$

$$y_{d_o} = \bar{C}_j \bar{x}_j \quad (10)$$

onde $\bar{x}_j = [x_j \quad x_{d_i} \quad x_{d_o}]$.

2.3 Sistema de Controle

A fim de projetar um controlador de realimentação de saída para o sistema representado por (9-10) pode-se utilizar a estrutura

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u_c \quad (11)$$

$$y_c = C_c x_c + D_c u_c \quad (12)$$

onde x_c , u_c e y_c são os vetores de estados, entradas e saídas do controlador respectivamente e $A_c \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $B_c \in \mathbb{R}^{m \times q}$, $C_c \in \mathbb{R}^{p \times m}$ e $D_c \in \mathbb{R}^{p \times q}$.

2.4 Sistema de Malha Fechada

Usando (9-10) para representar o sistema de potência com atrasos de tempo e incluindo o controlador dado por (11-12), o sistema de malha fechada pode ser representado por

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_j \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_j + \bar{B}_j D_c \bar{C}_j & \bar{B}_j C_c \\ B_c \bar{C}_j & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_j \\ x_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

O objetivo de desempenho é projetar um controlador central para que o sistema de malha fechada, eq. (13), apresente um amortecimento mínimo superior à margem de segurança de 5% (Gomes et al., 2003).

3 Métodos de Projeto de Controle

Os métodos considerados neste artigo são baseados na solução da equação de Riccati (Dotta et al., 2009), DML (Ramos et al., 2004) e AG (Yuan et al., 2007). Deve ser notado que estes métodos apresentam diferentes recursos de projeto. O método proposto em (Dotta et al., 2009) não considera projeto de controle robusto. O método proposto em (Ramos et al., 2004) considera somente robustez a variações de carga e topológicas. O

método AG (Yuan et al., 2007) considera robustez a variações de carga e topológica assim como perda de canais de comunicação. Estes métodos são apresentados brevemente como se segue.

3.1 Solução da Equação de Riccati

O problema de regulador quadrático linear (RQL) tem sido aplicado em diversas vertentes de sistemas elétricos. O índice de desempenho é um funcional e sua minimização é alcançada pela solução da equação de Riccati (Dotta et al., 2009).

O uso deste método para o projeto de controladores em dois níveis foi apresentado em (Dotta et al., 2009). Este método leva em consideração restrições estruturais práticas impostas nas estratégias de controle, tais como descentralização e realimentação das variáveis somente que são medidas. O sistema controlado é dado por um sistema equivalente e a constante de realimentação de saída deve ser determinada. Este problema pode ser resolvido por um problema ótimo de restrições estruturais. Tal problema consiste em determinar uma estratégia de controle que minimiza um índice de desempenho quadrático

$$J(x_a, u_a) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_a^T Q x_a + u_a^T R u_a) dt \quad (14)$$

onde a matriz semi-definida positiva Q e a matriz definida positiva R são matrizes ponderadas.

A solução é obtida através da equação generalizada de Riccati

$$A_a^T P + P A_a - P B_a R^{-1} B_a^T P + Q + L^T R L = 0 \quad (15)$$

onde L é uma matriz que utilizada para direcionar a solução até que as restrições estruturais sejam satisfeitas.

3.2 Desigualdades Matriciais Lineares

A solução das DML pode ser resolvida como um problema de otimização por algoritmos de pontos interiores. O problema de síntese de controle robusto pode ser formulado como um problema DML. Porém, o problema é não convexo se a ordem ou controlador são fixados. Para sistemas elétricos, controladores da mesma dimensão do sistema não são realísticos e a redução da ordem do controlador é exigida. Soluções para controladores de ordem fixa podem ser resolvidos por uma solução alternativa de uma DML mas sem garantias de convergência (Bento et al., 2015).

O algoritmo usando neste artigo está descrito em (Ramos et al., 2004) e (Ramos et al., 2005) e é baseado no mapeamento do sem-plano esquerdo que permite uma especificação de amortecimento mínimo (ζ_0) para todos os modos ($\theta =$

$\arccos(\zeta_0)$), eq. (16).

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)(A^T P + P A) & \cos(\theta)(A^T P - P A) \\ \cos(\theta)(A^T P - P A)^T & \sin(\theta)(A^T P + P A) \end{bmatrix} \prec 0 \quad (16)$$

O método também considera robustez para diferentes condições de operação. Diferente de muitos algoritmos presentes na literatura (Bento et al., 2015), o algoritmo escolhido não exige a imposição de uma condição inicial.

Na convergência do algoritmo, as matrizes do controlador são obtidas (A_c, B_c, C_c). Porém, este controlador é da mesma ordem da planta e deve ser reduzido a fim de ser fisicamente implementável. Utilizou-se nesta pesquisa o truncamento balanceado (Safonov and Chiang, 1989).

3.3 Algoritmos Genéticos

AG é uma meta-heurística que imita a evolução natural. A evolução usualmente inicia de um conjunto de soluções iniciais criadas e executadas através de gerações. Em cada geração, a adaptação de cada solução é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração e passam pelos processos de recombinação e mutação para formar uma nova população. A nova população é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo. O algoritmo continua a ser executado até que a especificação de projeto seja alcançada (Yuan et al., 2007).

Nesta pesquisa, a função objetivo $F()$ fornece o amortecimento mínimo (ζ_0) dentre todos os pontos ($\bar{A}_j, \bar{B}_j, \bar{C}_j$) para uma determinada candidata a solução ($A_{ck}, B_{ck}, C_{ck}, D_{ck}, k = 1, \dots, N$). As matrizes A_c, C_c e D_c são fixadas na forma canônica observável onde D_c é uma matriz de zeros. O algoritmo busca pelos valores da matriz B_c (indivíduos) que alcancem as exigências de controle do sistema de malha fechada.

4 Resultados da Aplicação

4.1 Sistema Teste

O desempenho destes métodos propostos é avaliado através de sua aplicação no sistema multimáquinas Sul/Sudeste brasileiro mostrado na Figura 1. O sistema consiste de 7 barras e 5 modelos equivalentes de geradores síncronos. Os geradores são descritos por um modelo de quinta ordem. O mesmo modelo de RAT, incluindo limites, é usado para todos os 5 geradores. As entradas e saídas dos controladores locais e centrais são limitados em $\pm 0,2$ p.u. Dados completos do sistema podem ser obtidos de (Martins and Lima, 1989).

Análise modal deste sistema foi realizada e dois modos inter-área foram encontrados. Um corresponde ao Equivalente do Sudeste oscilando contra o gerador de Itaipu (Tabela 1, Modo 1) e o sistema Sul (Salto Santiago, Salto Segredo e Foz do

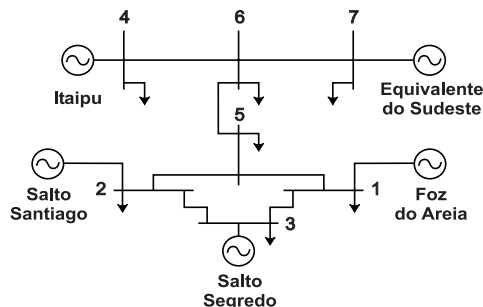


Figura 1: Sistema Equivalente Sul-Sudeste Brasileiro

Areia) contra o Equivalente do Sudeste e Itaipu (Tabela 1, Modo 2).

Tabela 1: Modos de Oscilação Dominantes

Modo	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
1	$0,64 \pm 5,39i$	0,86	-11,9
2	$-0,22 \pm 5,87i$	0,93	3,84

4.2 Projeto de Controle

O sistema de controle é em dois níveis. O nível de controle local é formado por 4 ESPs localizados em 4 geradores usando desvio de velocidade como entrada. O nível central é formado por um controlador de quatro entradas (desvios de velocidade) e quatro saídas. O primeiro nível (local) deve garantir a estabilidade e um desempenho mínimo do sistema.

Decidiu-se utilizar os mesmos 4 ESPs projetados em (Martins and Lima, 1989) para o nível local. Os ESPs estão localizados em Itaipu, Salto Segredo, Foz do Areia e Salto Santiago resultando em um sistema estável com o modo de menor de amortecimento igual a 6,39% (Tabela 2, linha 1).

Tabela 2: Modos de Oscilação Dominantes

Caso	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
Base	$-0,33 \pm 5,20i$	0,82	6,39
Pior de 72	$0,09 \pm 4,96i$	0,79	-1,71

A fim de projetar um controlador central robusto a diferentes condições de operação foram consideradas variações de carga e topológicas. As variações de carga seguiram um dia típico do sistema brasileiro resultando em 24 pontos de operação ($\pm 24\%$ do caso base). Variações topológicas tais como a remoção das linhas de transmissão 1-3 e 2-3 foram também consideradas. Como resultado, há um total de 72 pontos diferentes de ope-

ração e cujo menor amortecimento foi de -1,71% (Tabela 2, linha 2).

O principal objetivo é projetar um controlador central robusto, considerando os 72 pontos de operação, garantir um amortecimento mínimo e, além disso, deve ser robusto a perdas de canais de comunicação na entrada e saída do controlador central sendo que perde-se somente um canal de comunicação ou na entrada ou na saída.

4.3 Desempenho do Controlador

Um único ponto de operação apresentado em (Dotta et al., 2009) foi utilizado para o projeto do controlador central a fim de aumentar seu amortecimento mínimo. Atrasos de tempo de 200 ms foram introduzidos na entrada e na saída do sistema para todos os métodos resultando em um atraso de tempo total de 400 ms.

Tabela 3 apresenta os modos de menor amortecimento para os controladores centrais de segunda ordem projetados pelos três diferentes métodos. Como resultado, o amortecimento do sistema elétrico é melhorado quando comparado com o controle local.

Tabela 3: Modos de Oscilação Dominantes

Método	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
RQL	$-0,49 \pm 5,02i$	0,80	9,65
DML	$-0,46 \pm 5,25i$	0,84	8,79
AG	$-1,36 \pm 12,23i$	1,95	11,08

O desempenho dos controladores foi avaliado através de simulações no domínio do tempo utilizando o *software* ANATEM (CEPEL, 2014) a fim de verificar a eficácia de projeto no sistema não linear. Limites do RAT-ESP foram considerados. Uma falta trifásica franca de 30 ms foi aplicada na barra 4. O ângulo do gerador de Itaipu é mostrado na Figura 2.

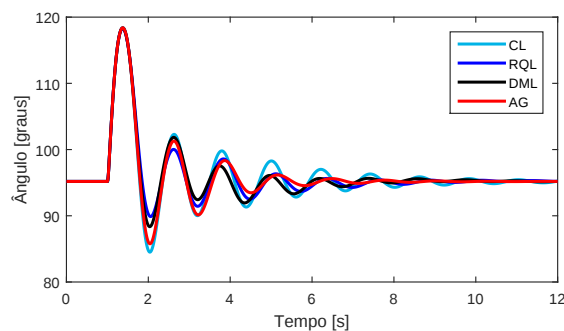


Figura 2: Ângulo de Itaipu para o caso base.

Figura 2 mostra a resposta do sistema para o controle local (CL) e para os três métodos de

projeto de controle em dois níveis. As respostas do sistema para os três controladores em dois níveis apresentaram desempenho similares.

4.4 Desempenho do Controlador Robusto

Nesta seção, o projeto de controle robusto a variações de carga e topológicas é aplicado. Os 72 diferentes pontos de operação foram incluídos no projeto de controle. Deve-se notar que o projeto de controle robusto é considerado somente nos métodos DML e AG. O método RQL, considerado neste trabalho, não inclui projeto de controle robusto. No entanto, o controlador do método RQL da seção anterior foi avaliado para os 72 pontos de operação.

A Tabela 4 apresenta os modos de menor amortecimento para a condição de operação (Tabela 2, linha 2) para os três métodos de projeto de controle. É evidente a melhoria de amortecimento para as 72 condições de operação para os métodos DML e AG. O método RQL apresenta um amortecimento elevado, mas não há garantias de que isto sempre ocorra uma vez que robustez não é considerada.

Tabela 4: Modos de Oscilação Dominantes

Método	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
RQL	$-0,36 \pm 4,72i$	0,75	7,69
DML	$-0,38 \pm 4,97i$	0,79	7,59
AG	$-0,44 \pm 4,86i$	0,77	9,07

O desempenho dos controladores foi também avaliado em simulações no domínio do tempo no *software* ANATEM. Limites do RAT-ESP foram considerados. Foi aplicado uma falta trifásica franca de 30 ms na barra 4. A Figura 3 apresenta o ângulo do gerador de Itaipu para a condição (Tabela 2, linha 2) com o controle em dois níveis.

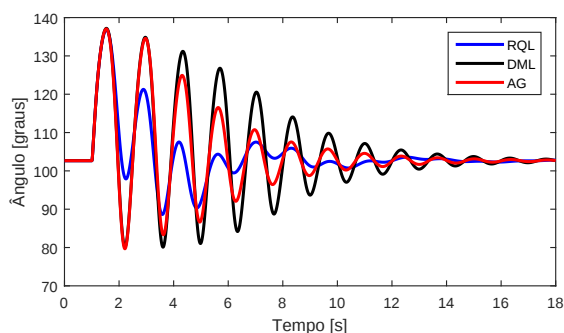


Figura 3: Ângulo de Itaipu para variações de carga e topológica.

4.5 Desempenho do Controlador Considerando Perda de Sinais Remotos

Nesta seção, além dos 72 pontos de operação da seção anterior, perdas dos canais de comunicação foram levados em consideração. O método AG foi o único dentre os métodos utilizados nesta pesquisa onde este tipo de robustez foi considerado pois permite a mudança de tamanho das matrizes (em virtude de perda de um canal de comunicação) durante o processo de projeto de um único controlador centralizado.

A Tabela 5 apresenta o menor amortecimento para os 72 pontos de operação e perda do canal de comunicação da barra 4 (desvio de velocidade). O método AG é o único que forneceu um amortecimento mínimo superior a 5%.

Tabela 5: Modos de Oscilação Dominantes

Método	Autovalor	Freq. (Hz)	Amort. (%)
RQL	$-0,04 \pm 4,84i$	0,77	0,76
DML	$-0,12 \pm 5,04i$	0,80	2,37
AG	$-0,26 \pm 5,16i$	0,82	5,05

O desempenho do controlador foi avaliado em simulações no domínio do tempo. Limites do RAT-ESP foram considerados. Um falta trifásica franca de 30 ms foi aplicado na barra 4. O ângulo do gerador de Itaipu para o caso (Tabela 2, linha 2) onde há perda do sinal de entrada do controlador central (desvio de velocidade) da barra 4 é mostrado na Figura 4. Isto mostra a importância de robustez a perda de canais de comunicação. O método AG é o único capaz de manter a estabilidade do sistema a perda do sinal de desvio de velocidade de Itaipu.

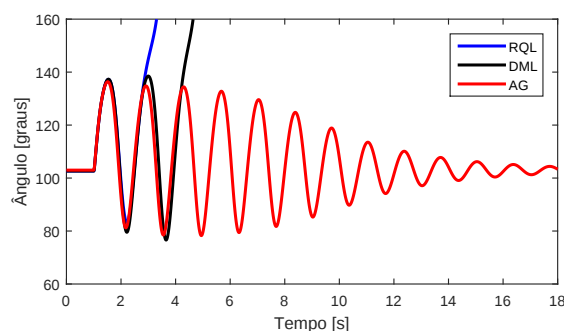


Figura 4: Ângulo de Itaipu para variações de carga e topológica e perda do sinal de desvio de velocidade de Itaipu.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo principal deste artigo foi avaliar o desempenho de uma estrutura de controle em dois

níveis utilizando três diferentes métodos. O controlador central permite a otimização do desempenho global do sistema, especialmente em situações onde configurações topológicas críticas exigem a re-sintonia dos controladores locais ou os controladores locais apresentam efeito limitado nos modos de oscilação.

Os desempenhos dos três métodos de projeto de controle foram avaliados através de análise modal e simulações no domínio do tempo. As simulações foram úteis para a validação do projeto e avaliação de desempenho. Os métodos de AG e DML permitiram o projeto de controladores robustos para diferentes condições de operação. Além disso, o método de AG permite a consideração de perda de sinais remotos durante o projeto de controle.

Os três métodos apresentaram desempenho de controle similar quando as mesmas exigências de projeto de controle foram aplicadas. Quando robustez a variações de carga e topológicas é considerada, os métodos de AG e DML apresentaram desempenho satisfatório por considerarem no momento de projeto estes tipos de robustez. Embora o método RQL tenha fornecido um desempenho similar, não há garantias de que isto sempre ocorra uma vez que não foram considerados no projeto estes tipos de robustez. O método AG apresentou desempenho superior quando robustez a perda de sinais remotos é considerado no momento do projeto.

Como próximos passos da pesquisa estão o projeto de controle central considerando robustez a variações de atrasos de tempo, inclusão de robustez no projeto de controle RQL e consideração de sistemas elétricos de maior porte.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela CAPES e FAPESP, processos 2015/02569-6 e 2015/18806-7.

Referências

- Annaswamy, A. M. and Amin, M. (2013). IEEE vision for smart grid controls: 2030 and beyond, *IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond* pp. 1–168.
- Bento, M. E. C., Ramos, R. A. and Castoldi, M. F. (2015). Design of Power Systems Stabilizers for distributed synchronous generators using Linear Matrix Inequality solvers, *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, pp. 1–5.
- CEPEL (2014). Anatem user's manual version 10.5.2. Available: <http://www.dre.cepel.br/>.
- Chaudhuri, B., Majumder, R. and Pal, B. (2004). Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(4): 1971–1979.
- Dotta, D., e Silva, A. S. and Decker, I. C. (2009). Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay, *IEEE Transactions on Power Systems* **24**(1): 208–216.
- Gomes, S., Martins, N. and Portela, C. (2003). Computing small-signal stability boundaries for large-scale power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **18**(2): 747–752.
- Kishor, N., Haarla, L., Turunen, J., Larsson, M. and Mohanty, S. (2014). Controller design with model identification approach in wide area power system, *Generation, Transmission Distribution, IET* **8**(8): 1430–1443.
- Kundur, P., Balu, N. and Lauby, M. (1994). *Power system stability and control*, EPRI power system engineering series, McGraw-Hill.
- Martins, N. and Lima, L. T. G. (1989). Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems, *Proceedings of the IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance*, pp. 17–33.
- Ramos, R. A., Alberto, L. F. C. and Bretas, N. G. (2004). A new methodology for the coordinated design of robust decentralized power system damping controllers, *IEEE Transactions on Power Systems* **19**(1): 444–454.
- Ramos, R. A., Martins, A. C. P. and Bretas, N. G. (2005). An Improved Methodology for the Design of Power System Damping Controllers, *IEEE Transactions on Power Systems* **20**(4): 1938–1945.
- Safonov, M. and Chiang, R. (1989). A Schur method for balanced-truncation model reduction, *IEEE Transactions on Automatic Control* **34**(7): 729–733.
- Trudnowski, D., Kosterev, D. and Undrill, J. (2013). PDCI damping control analysis for the western north american power system, *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*, pp. 1–5.
- Yuan, Y., Sun, Y. and Cheng, L. (2007). Design of delayed-input wide-area facts controller using genetic algorithm, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1–6.