

基于改进自由权矩阵与广义特征值的时滞稳定 上限计算方法研究

马静¹, 李俊臣², 李益楠¹, 王增平¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;
2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 提出了一种利用改进自由权矩阵与广义特征值(Generalized Eigenvalue Problem, GEVP)判定系统时滞稳定上限的方法。首先构造一类新的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 并求解该泛函沿系统的导函数。然后, 在导函数中加入必要的松散项以降低该方法保守性。在此基础上, 利用 gev 求解系统的时滞稳定上限。IEEE 4 机 11 节点系统和 16 机 68 节点系统时域仿真结果验证了该方法能够有效求解电力系统所能承受的最大时滞。

关键词: 改进自由权矩阵; L-K 泛函; 时滞上限; 广义特征值

Research on time-delay upper-bound of power system wide-area damping controllers based on improved free-weighting matrices and generalized eigenvalue problem

MA Jing¹, LI Jun-chen², LI Yi-nan¹, WANG Zeng-ping¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Shaanxi Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China)

Abstract: A method to determine the time-delay upper-bound of the existing wide-area controller of low frequency oscillation based on improved free-weighting matrix and generalized eigenvalue problem (GEVP) is proposed. Firstly, a new class of Lyapunov-Krasovskii functional is constructed. Secondly, the derivation function along the system is solved. On this basis, necessary loose items are added to the derivation function in order to reduce the conservative, and a set of matrix linear inequalities is formed. Then the upper-bound of delay stability of wide-area controller is solved by means of GEVP. Finally, the time-domain simulation of the IEEE 4-machine 11-bus test system and IEEE 16-machine 68-bus test system demonstrate that the method of solving time-delay stability upper-bound of power system wide-area controller based on improved free-weighting matrices can be applied to different control methods and different types of power systems.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215200), National Natural Science Foundation of China (No. 51277193), the Chinese University Scientific Fund Project (No. 2014ZZD02), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of State Education Ministry ([2011] No. 1139), Hebei Natural Science Foundation (No. E2012502034), Beijing Metropolis Beijing Nova Program (No. Z141101001814012), the Excellent Talents in Beijing City (No. 2013B009005000001), and the Fund of Fok Ying Tung Education Foundation (No.141057).

Key words: improved free-weighting matrices; L-K functional; time-delay upper bound; generalized eigenvalue problem

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0001-08

0 引言

广域信息反馈控制器的设计存在时滞问题, 而

这必然会造成控制器的控制效果降低, 甚至出现负阻尼的情况^[1-8]。因此, 研究系统的时滞稳定上限具有重要意义。

目前, 已有的方法大致可以分为三类: 时域法、频域法和直接法^[9]。时域法可判定系统在特定场景下是否稳定, 但在稳定程度、时滞稳定上限等信息的获取方面还需要进一步研究。频域法通过在实数空间中搜索时滞系统的关键特征根, 能够在一定程度上揭示时滞系统的变化规律, 但计算量较大, 求

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2012CB215200); 国家自然科学基金项目(51277193); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014ZZD02); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011] 1139号); 河北自然科学基金项目(E2012502034); 北京市科技新星支持计划(Z141101001814012); 北京市优秀人才支持计划(2013B009005000001); 霍英东教育基金(141057)

解速度有待提升。直接法借助 Lyapunov 理论和线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)技术,可同时考虑时滞的随机变动、存在切换环节等情况,适用范围更为广泛,但该方法具有一定的保守性,降低其保守性已成为该领域研究热点之一^[9-18]。

为了进一步降低直接法的保守性,本文提出了一种基于改进自由权矩阵与广义特征值的时滞稳定上限求解方法。首先构造了一类新的 Lyapunov-Krasovskii 泛函,并求解该泛函沿系统的导函数,然后,在该导函数中加入一些必要的松散项以降低保守性,在此基础上,形成一组矩阵线性不等式,并利用广义特征值(Generalized Eigenvalue Problem, gev)求解系统的时滞稳定上限。IEEE4 机 11 节点系统和 16 机 68 节点系统的时域仿真结果验证了该方法的正确性和有效性。

1 电力系统时滞模型

多输入多输出电力系统的状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_1\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态向量; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 为控制输入向量; $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^p$ 为系统输出向量; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为系统状态矩阵; $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为系统控制矩阵。

通过状态反馈后得到相应的闭环系统为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

其中, \mathbf{C} 为闭环状态矩阵,当系统经过状态反馈时,闭环状态矩阵为 $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_1$, 其中, $\mathbf{K}_1 \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 为各附加控制器的综合状态反馈矩阵。

在实际电力系统中,控制输入向量通过 SCADA/WAMS 系统向各控制器传达,信号传递过程必然存在一定时滞,则相应闭环系统可描述为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{K}_1\mathbf{x}(t-d(t)) \quad (3)$$

由式(3)可知,电力系统时滞矩阵 $\mathbf{A}_d = \mathbf{B}\mathbf{K}_1$ 。对于含时滞环节的系统,其状态方程有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(t-d(t)), t > 0 \\ \mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\varphi}(t), t \in [-h, 0] \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 是状态向量; 矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{A}_d 分别为状态矩阵和时滞矩阵; h 为时滞稳定上限。

式(4)中时滞 $d(t)$ 满足条件:

$$0 \leq d(t) \leq h \quad (5)$$

$$\dot{d}(t) \leq \mu \quad (6)$$

2 时滞稳定判据

构造如下形式的 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$\begin{aligned} V(\mathbf{x}) = & \mathbf{x}^T(t)\mathbf{P}\mathbf{x}(t) + \int_{t-d(t)}^t \mathbf{x}^T(s)\mathbf{Q}\mathbf{x}(s)ds + \\ & \int_{t-h}^t \mathbf{x}^T(s)\mathbf{R}\mathbf{x}(s)ds + \\ & \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\mathbf{x}}^T(s)(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2)\dot{\mathbf{x}}(s)dsd\theta \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$; $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$; $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T \geq 0$; 和 $\mathbf{Z}_i\mathbf{Z}_i^T \geq 0 (i=1,2)$, 是待定矩阵。

由文献[10]可得式(4)表征的时滞系统稳定判据如下。

对于给定标量 $h > 0$ 和 μ , 若存在 $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq 0$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T \geq 0$, 和 $\mathbf{Z}_i = \mathbf{Z}_i^T \geq 0 (i=1,2)$, $\mathbf{N}^T = [\mathbf{N}_1^T \quad \mathbf{N}_2^T \quad \mathbf{N}_3^T]$, $\mathbf{S}^T = [\mathbf{S}_1^T \quad \mathbf{S}_2^T \quad \mathbf{S}_3^T]$ 和 $\mathbf{M}^T = [\mathbf{M}_1^T \quad \mathbf{M}_2^T \quad \mathbf{M}_3^T]$ 使得如下 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi} & h\mathbf{N} & h\mathbf{S} & h\mathbf{M} & h\mathbf{A}_c^T(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2) \\ h\mathbf{N}^T & -h\mathbf{Z}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ h\mathbf{S}^T & \mathbf{0} & -h\mathbf{Z}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ h\mathbf{M}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -h\mathbf{Z}_1 & \mathbf{0} \\ h(\mathbf{Z}_1^T + \mathbf{Z}_2^T)\mathbf{A}_c & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -h(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2) \end{bmatrix} < 0 \quad (8)$$

其中:

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi}_1 + \boldsymbol{\Phi}_2 + \boldsymbol{\Phi}_2^T;$$

$$\boldsymbol{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} + \mathbf{R} & \mathbf{P}\mathbf{A}_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_d^T\mathbf{P} & -(1-\mu)\mathbf{Q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{R} \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\Phi}_2 = [\mathbf{N} + \mathbf{M} \quad -\mathbf{N} + \mathbf{S} \quad -\mathbf{M} - \mathbf{S}];$$

$$\mathbf{A}_c = [\mathbf{A} \quad \mathbf{A}_d \quad \mathbf{0}]; \quad \mathbf{N}^T = [\mathbf{N}_1^T \quad \mathbf{N}_2^T \quad \mathbf{N}_3^T];$$

$$\mathbf{S}^T = [\mathbf{S}_1^T \quad \mathbf{S}_2^T \quad \mathbf{S}_3^T];$$

$$\mathbf{M}^T = [\mathbf{M}_1^T \quad \mathbf{M}_2^T \quad \mathbf{M}_3^T];$$

\mathbf{N} 、 \mathbf{S} 和 \mathbf{M} 为改进自由权矩阵。

3 时滞稳定上限

式(8)表征的线性矩阵不等式仅能判定系统是否稳定,而无法获取系统时滞稳定上限等信息。考虑到 gev 方法能够求解优化问题的全局最小值,因此,本文提出利用 gev 方法计算系统的时滞稳定上限。由于式(8)不是标准的 gev 形式,无法直接利

用 `gevp` 方法进行求解, 因此, 做如下变换, 将式(8)同时左乘与右乘式(9):

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ih & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ih & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ih & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Ih \end{bmatrix} > 0 \quad (9)$$

可得

$$\begin{bmatrix} \Phi & N & S & M & A_c^T(Z_1 + Z_2) \\ N^T & -vZ_1 & 0 & 0 & 0 \\ S^T & 0 & -vZ_1 & 0 & 0 \\ M^T & 0 & 0 & -vZ_1 & 0 \\ (Z_1^T + Z_2^T)A_c & 0 & 0 & 0 & -v(Z_1 + Z_2) \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

其中, $v=1/h$ 。

为了求解最大时滞稳定上限 h , 即最小的 v , 本文引入附加矩阵 $Y_i = Y_i^T \geq 0$ ($i=1, 2$), 该矩阵需满足式(11)。

$$\begin{bmatrix} Y_1 & 0 \\ 0 & Y_2 \end{bmatrix} < v \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)可得

$$\begin{bmatrix} \Phi & N & S & M & A_c^T(Z_1 + Z_2) \\ N^T & -Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ S^T & 0 & -Y_1 & 0 & 0 \\ M^T & 0 & 0 & -Y_2 & 0 \\ (Z_1^T + Z_2^T)A_c & 0 & 0 & 0 & -(Y_1 + Y_2) \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

时滞稳定上限问题即可转化为以下优化问题:

$$\begin{aligned} & \min v \\ & P, Q, R, Z_i, Y_i \\ & \text{s.t. 式(11), 式(12)} \end{aligned} \quad (13)$$

通过求解式(13), 可以计算出以 P 、 Q 、 R 、 Z_i 、 Y_i 为变量, 以式(12)和式(13)为约束的最小 v , 最终, 利用 $h=1/v$ 可以推导出时滞稳定上限。

4 仿真验证

本文利用 IEEE4 机 11 节点系统和 16 机 68 节点系统验证该方法的正确性和有效性。

4.1 四机系统

基于 H_2/H_∞ 控制方法^[19]对四机两区域的 IEEE

系统^[20]进行阻尼控制器设计, 系统如图 1 所示, 其中发电机采用 6 阶详细模型, 励磁系统采用快速励磁, 基准模型下的负荷采用 50%恒阻抗和 50%恒电流模型。首先, 通过模态分析法得到四机系统的状态矩阵, 并利用 SMA 方法分别对开、闭环状态矩阵进行降阶^[21], 如图 2 所示。

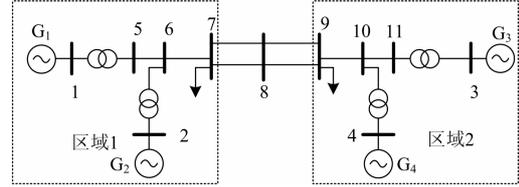


图 1 4 机 2 区域电网结构图

Fig. 1 Four-generator two-area test system

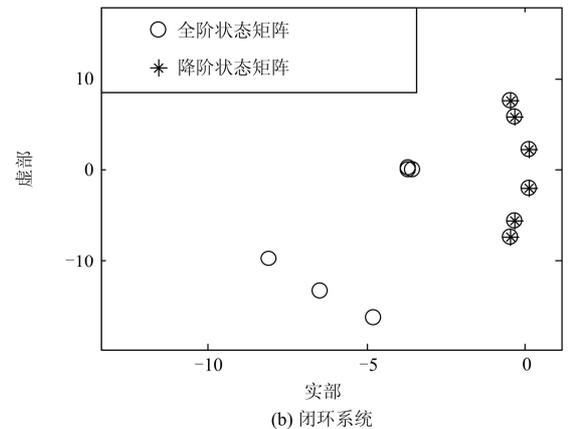
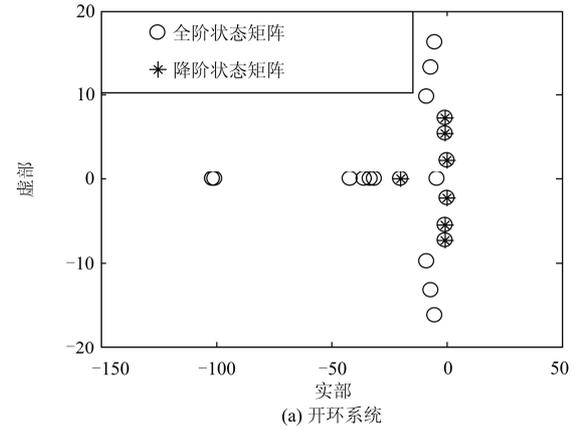


图 2 SMA 降阶前后特征根

Fig. 2 Eigenvalues of open-loop state matrixes with and without SMA

图 2(a)为全阶开环状态矩阵和降阶矩阵的特征根, 图 2(b)为全阶闭环状态矩阵和降阶矩阵的特征根。可以看出, 开、闭环状态矩阵在利用 SMA 进行降阶后, 均保留了系统中低频振荡成分。因此, 可以利用降阶后系统矩阵求解能够允许最大时滞。将降阶后状态矩阵 A 和时滞矩阵 A_d 代入式(13),

求得最大时滞边界 $h=288.88$ ms。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 376.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 376.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 376.9 \\ -0.073 & 0.065 & 0.004 & -0.730 & 0.272 & 0.076 \\ 0.058 & -0.087 & 0.009 & 1.160 & -0.343 & -0.134 \\ 0.008 & 0.011 & -0.082 & -0.020 & 0.047 & -0.554 \end{bmatrix}$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.234 & -0.839 & 0.010 \\ 0 & -0.0011 & 0.0010 & -0.348 & -1.362 & -0.138 \\ 0 & 0.00100 & 0 & 0.049 & -0.290 & -0.638 \end{bmatrix}$$

时滞分别设置为 $h_1 = 50$ ms, $h_2 = 100$ ms, $h_3 = 288.88$ ms 和 $h_4 = 350$ ms。所观察的物理量为发电机 G1 和 G4 之间的功角差, 以及 G2 和 G3 之间的功角差, 分别如图 3 和图 4 所示。

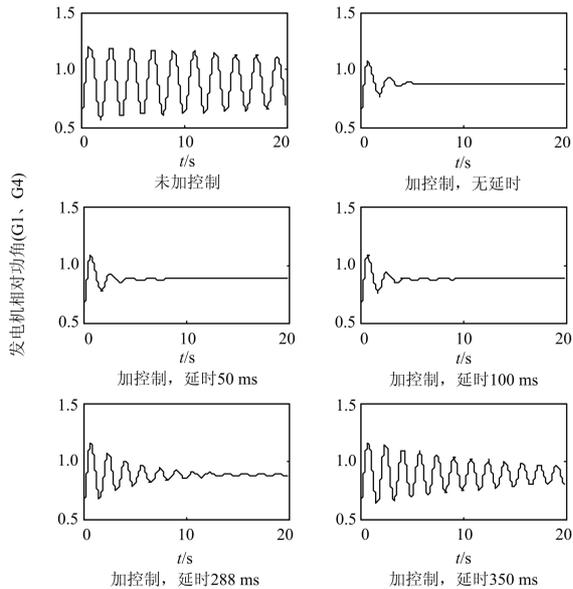


图 3 不同时滞下发电机 1、4 相对功角的动态响应

Fig. 3 Dynamic responses of relative angular separations between G1 and G4 with different time delays

由图 3 和图 4 均可看出, 在未加广域阻尼控制时, 发电机之间的功角发生了严重的低频振荡。加入广域阻尼控制后, 在不考虑时滞的情况下, 低频振荡可得到有效抑制; 然而随着时滞的增加, 阻尼效果随之减弱, 在最大时滞 288 ms 的情况下, 虽然仍存在一定的阻尼, 但其阻尼比已经降到 10% 以下, 说明此时控制器已经不满足控制要求^[21]。利用

prony 算法^[22-23]对各时滞下的功角差曲线进行阻尼比分析, 结果如表 1、表 2 所示。

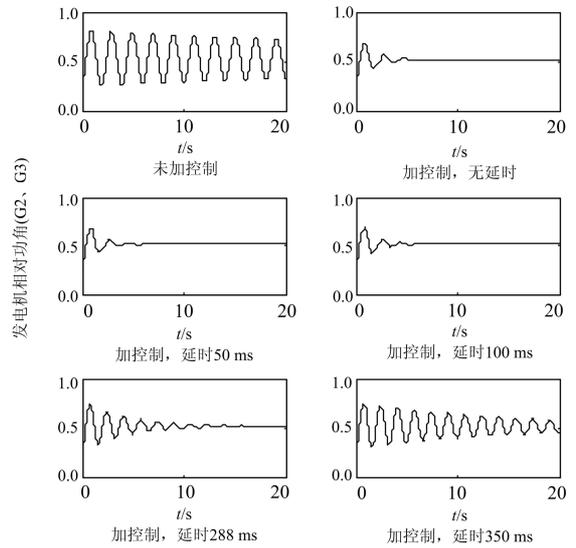


图 4 不同时滞下发电机 2、3 相对功角的动态响应

Fig. 4 Dynamic responses of relative angular separations between G2 and G3 with different time delays

表 1 4 机系统 G1 与 G4 功角差各时滞时间下的阻尼比
Table 1 Damp ratio of four-generator system of different time-delay of power angle difference between G1 and G4

延时/ms	阻尼比
0	0.247 7
50	0.221 3
100	0.203 8
288	0.087 3
350	0.041 3

表 2 4 机系统 G2 与 G3 功角差各时滞时间下的阻尼比
Table 2 Damp ratio of four-generator system of different time-delay of power angle difference between G2 and G3

延时/ms	阻尼比
0	0.232 0
50	0.228 4
100	0.183 9
288	0.057 3
350	0.017 2

4.2 十六机系统

基于 H_2/H_∞ 控制方法^[19]对 IEEE 16 机 68 节点系统^[20]进行阻尼控制设计, 系统如图 5 所示, 进一步考查基于改进自由权矩阵的最大时滞求解方法的有效性和通用性。首先利用 Schur 平衡降阶方法^[24], 在保证所关心频带的输入输出特性保持不变的前提下, 对系统进行降阶, 如图 6 所示。

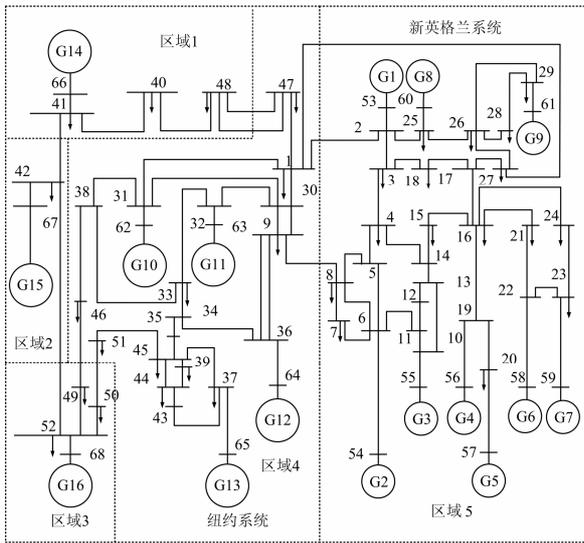


图 5 16 机 68 节点电网结构图

Fig. 5 16-machine 68-bus test system

图 6(a)中实线为开环全阶系统的频率响应, 虚线为开环降阶系统的频率响应, 可以看出, 降阶系统和全阶系统的输入输出特性相同。图 6(b)中实线为闭环全阶系统的频率响应, 虚线为闭环降阶系统

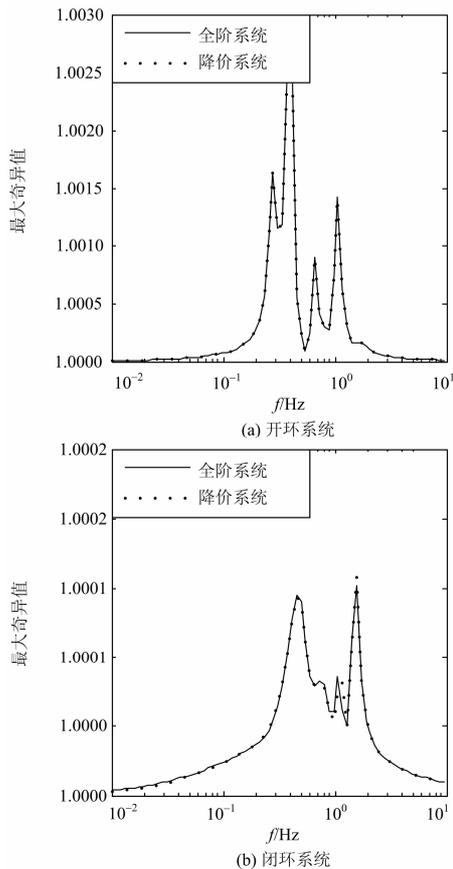


图 6 Schur 降阶的频率响应

Fig. 6 Frequency responses of Schur reduction

的频率响应, 可以看出, 闭环降阶系统同样保留了全阶系统的特性。因此, 利用降阶后的系统矩阵求解全阶系统的时滞稳定上限具有有效性和可行性。

降阶后的状态矩阵 A_{re} 与降阶后的时滞矩阵 A_{dre} 具体数值分别见附录式(A-1)和式(A-2)所示。将 A_{re} 和 A_{dre} 代入式(13), 可得最大的时滞上限为 $h = 93 \text{ ms}$ 。时滞分别设置为 $h_1 = 50 \text{ ms}$ 和 $h_2 = 93 \text{ ms}$ 。以发电机 G1 和 G16 之间的功角差, G3 和 G14 之间的功角差与 G10 和 G15 之间的功角差为所观察的物理量, 分别如图 7~图 9 所示。

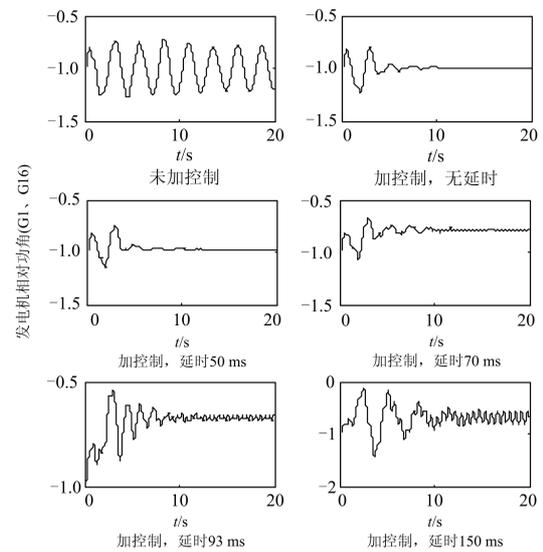


图 7 不同延时情况下发电机 1、16 相对功角动态响应曲线

Fig. 7 Dynamic responses of angular between Generators 1 and

16 under different time delays

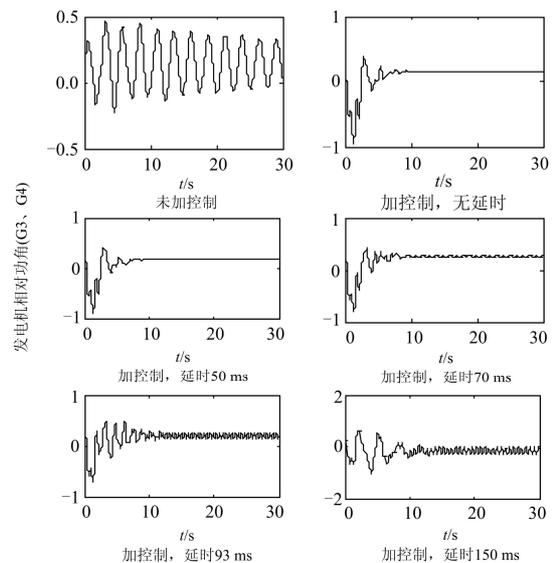


图 8 不同延时情况下发电机 3、14 相对功角动态响应曲线

Fig. 8 Dynamic responses of angular between Generators 3 and

14 under different time delays

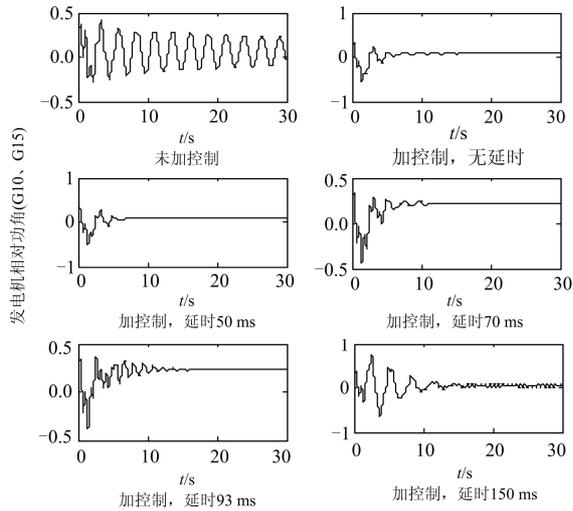


图 9 不同延时情况下发电机 10、15 相对功角动态响应曲线
Fig. 9 Dynamic responses of angular between Generators 10 and 15 under different time delays

随着时滞的增加, 阻尼效果随之减弱, 在最大时滞 93 ms 的情况下, 虽然存在一定的阻尼效果, 但是其阻尼比已经降到 10% 以下, 此时控制器同样也不能满足控制的要求^[20]。利用 prony^[22-23]方法对各时滞下的功角差曲线进行阻尼比分析, 结果如表 3~表 5 所示。

表 3 16 机系统 G1 与 G16 功角差各时滞时间下的阻尼比
Table 3 Damp ratio of sixteen-generator system of different time-delay of power angle difference between G1 and G16

延时/ms	阻尼比
0	0.336 4
50	0.257 6
70	0.103 8
93	0.081 4
150	0.0175

表 4 16 机系统 G3 与 G14 功角差各时滞时间下的阻尼比
Table 4 Damp ratio of sixteen-generator system of different time-delay of power angle difference between G3 and G14

延时/ms	阻尼比
0	0.260 8
50	0.137 2
70	0.106 1
93	0.033 9
150	0.010 2

表 5 16 机系统 G10 与 G15 功角差各时滞时间下的阻尼比
Table 5 Damp ratio of sixteen-generator system of different time-delay of power angle difference between G10 and G15

延时/ms	阻尼比
0	0.247 2
50	0.194 1
70	0.129 0
93	0.081 7
150	0.063 3

5 结论

针对电力系统时滞稳定性问题, 提出了一种利用改进自由权矩阵与广义特征值相结合的分析方法。首先, 构造了一类新的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 求解其沿系统的导函数, 并在其导数推导的过程中引入必要的松散项, 形成基于改进自由权矩阵的时滞稳定判据。在此基础上, 将时滞稳定判据等价变换, 并利用 gevp 方法求解系统的时滞稳定上限。最后, 通过 IEEE 4 机 11 节点系统和 16 机 68 节点系统算例, 验证了本方法的正确性和有效性。

附录

$$A_{ce} = \begin{bmatrix} -16.1234 & 191.6215 & -34.7234 & -93.6034 & -46.9813 & -40.7245 & 148.6905 & -9.4037 & 0.5458 & -0.1871 \\ -8.5822 & 73.8511 & 38.3796 & 28.2807 & -31.1118 & -3.5328 & 3.0915 & -0.8165 & 0.4670 & 0.3871 \\ 8.6901 & -56.6390 & -119.0312 & -154.2303 & 89.4859 & 8.3981 & 7.6545 & 47.8142 & -16.0572 & 20.4179 \\ -16.3933 & 128.3466 & 100.7138 & 91.8190 & -63.4074 & 1.0582 & -30.2333 & -5.4016 & 1.8643 & -2.0558 \\ -21.5589 & 183.0718 & 41.8903 & -25.8071 & -3.0065 & 15.5680 & -58.5954 & 54.2491 & -17.9821 & 24.6753 \\ 8.9164 & -85.9699 & 41.1758 & 105.8473 & -47.0510 & -8.1517 & 54.5981 & 35.2028 & -2.4424 & 8.9442 \\ -3.3296 & 27.0818 & 6.4952 & -4.4047 & 2.3259 & 5.3976 & -8.7728 & 33.8530 & -9.1379 & 13.1160 \\ 0.6362 & -4.3077 & -5.9066 & -6.7725 & 3.3248 & -1.2021 & -0.6273 & -11.9533 & 5.6377 & -0.8597 \\ 0.3450 & -3.4204 & 2.0537 & 4.4665 & -1.9128 & -0.9482 & 0.6125 & -6.2861 & 4.3435 & 6.7691 \\ 0.4673 & -4.1903 & 0.9437 & 3.9651 & -2.1654 & -0.7490 & 2.0926 & -2.3038 & -5.0688 & -4.4607 \end{bmatrix} \quad (A-1)$$

$$A_{dre} = \begin{bmatrix} -0.0168 & 0.1387 & 0.0401 & 0.0041 & -0.0139 & 0.0056 & -0.0470 & -0.0035 & 0 & 0.0023 \\ 0.1610 & -1.3994 & -0.2093 & 0.2968 & 0.0753 & -0.0122 & 0.3261 & 0.1445 & -0.0264 & 0.0095 \\ 0.0414 & -0.2064 & -0.5163 & -0.6159 & 0.2242 & -0.0837 & 0.2789 & -0.2764 & 0.0783 & -0.0886 \\ -0.0247 & 0.3531 & -0.7123 & -1.1881 & 0.4669 & -0.0484 & -0.1044 & -0.5840 & 0.1524 & -0.1677 \\ 0 & 0.0947 & 0.4236 & 0.6927 & -0.5043 & -0.0954 & 0.6054 & 0.4081 & -0.1020 & 0.1251 \\ 0.1159 & -0.6120 & 0.4210 & 1.2198 & -0.9955 & -0.3345 & 1.9667 & 0.7972 & -0.1851 & 0.2245 \\ -0.1383 & -0.0010 & 0.5268 & -0.0149 & 1.2620 & 0.8615 & -4.0937 & -0.4567 & 0.0720 & -0.1352 \\ -0.5098 & 3.6470 & -2.0410 & -5.4194 & 3.2488 & 0.7903 & -5.5637 & -3.1691 & 0.7561 & -0.8615 \\ 0.5506 & -3.8102 & 1.9174 & 5.4325 & -3.4277 & -0.9281 & 6.2442 & 3.2459 & -0.7673 & 0.8833 \\ 1.0523 & -7.1184 & 4.5809 & 11.8740 & -7.5930 & -1.9539 & 13.1229 & 7.0687 & -1.6838 & 1.9525 \end{bmatrix} \quad (A-2)$$

参考文献

- [1] 廖晓昕. 动力系统的稳定性理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] WU Hong-xia, TSAKALIS K S, HEYDT G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1935-1941.
- [3] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多项式拟合补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 29-34.
HU Zhi-xiang, XIE Xiao-rong, TONG Lu-yuan. Characteristic analysis and polynomial fitting based compensation of the time delays in wide area damping control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 29-34.
- [4] 李晓慧, 吴华仁, 刘晶晶. 广域阻尼控制器和 STATCOM 控制器协调设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 121-125.
LI Xiao-hui, WU Hua-ren, LIU Jing-jing. Coordinated design of wide area damping controllers and STATCOM controller[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 121-125.
- [5] 戚军, 江全元, 曹一家. 采用时滞广域测量信号的区间低频振荡阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 154-159.
QI Jun, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Design of damping controller for inter-area low-frequency oscillation using time-delay wide-area measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 154-159.
- [6] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.
YAO Wei, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [7] 江全元, 邹振宇, 曹一家, 等. 考虑时滞影响的电力系统稳定分析和广域控制研究进展[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 2-7.
JIANG Quan-yuan, ZOU Zhen-yu, CAO Yi-jia, et al. Overview of power systems stability analysis and wide-area control in consideration of time delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 2-7.
- [8] YU Xiao-dan, JIA Hong-jie, ZHAO Jin-li. A LMI based approach to power system stability analysis with time delay[C] // Proceedings of Tencon, Hyderabad, India, November 18-21, 2008, 1: 1-6.
- [9] 贾宏杰, 安海云, 余晓丹. 电力系统改进时滞依赖型鲁棒稳定判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 15-19.
JIA Hong-jie, AN Yun-hai, YU Xiao-dan. An improved delay-dependent stability criteria for power system with multiple time delays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 15-19.
- [10] 孙继涛, 王国庆, 高含俏. 具有时变滞后的随机系统的时滞依赖鲁棒稳定性与 H_∞ 分析[J]. 应用数学和力学, 2010, 31(2): 236-244.
SUN Ji-tao, WANG Guo-qing, GAO Han-qiao. Delay-dependent robust stability and H_∞ analysis of stochastic systems with time-varying delay[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(2): 236-244.
- [11] 蔡超豪. 存在时滞影响的发电机励磁的 H_∞ 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 5-9.
CAI Chao-hao. H_∞ control of generator excitation with time-delay[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 5-9.
- [12] 罗珂, 吕红丽, 霍春岭, 等. 基于 LMI 的时滞电力系统

- 双层广域阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 16-22.
- LUO Ke, Lü Hong-li, HUO Chun-ling, et al. Two layer inter-area damping control of power systems considering time-delay based on LMI[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 16-22.
- [13] HE Y, WU M, SHE J H, et al. parameter-dependent Lyapunov functional for stability of time-delay systems with polytopic-type uncertainties[J]. IEEE Trans on Automation Control, 2004, 49(5): 828-832.
- [14] WU M, HE Y, SHE J H, et al. Delay-dependent criteria for robust stability of time-varying delay systems[J]. Automatica, 2004, 40(8): 1435-1439.
- [15] PARK P. A delay-dependent stability criterion for systems with uncertain time-invariant delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(4): 876-877.
- [16] BOUKAS E K, LIU G X. Delay-dependent robust stability and H_∞ control of jump linear systems with time-delay[C] // Proceedings of the 39th IEEE Conference on, 2000, 2(2): 1521-1526.
- [17] 李国庆, 李江, 高世鹏. 考虑饱和环节影响的电力系统小扰动稳定域[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 14-17.
- LI Guo-qing, LI Jiang, GAO Shi-peng. Power system small signal stability region with saturation element considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 14-17.
- [18] 方勇杰. 跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 1-6.
- FANG Yong-jie. Analysis on trends in emergency control Technology of cross-regional inter connected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 1-6.
- [19] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [20] ROGERS G. Power system oscillations[M]. MA: Kluwer, 2000.
- [21] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [22] TRUDNOWSKI D J, JOHNSON J M, HAUER J F. Making Prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 226-231.
- [23] 郭成, 李群湛. 基于改进PSO算法的SSSC广域阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 151-158.
- GUO Cheng, LI Qun-zhan. SSSC wide-area damping controller design based on improved particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 151-158.
- [24] SAFONOV M G, CHIANG R Y. A Schur method for balanced-truncation model reduction[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1989, 34(7): 729-733.

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-03-01

作者简介:

马静(1981-), 男, 博士后, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: hdmajing@aliyun.com

李俊臣(1988-), 男, 硕士, 主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究;

李益楠(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定与控制等方面的研究。