

# 面向广域阻尼控制的电力系统降阶辨识研究

陈科屹<sup>1</sup> 阮征<sup>1</sup> 何强<sup>1</sup> 贺静波<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国家电网公司, 北京 100031)

**摘要:** 广域阻尼控制是抑制电力系统区间低频振荡极具潜力的手段, 降阶辨识方法可用于获取广域阻尼控制器设计所需要的模型。电力系统的维数成千上万, 基于模式可控可观性分析提出了电力系统面向阻尼控制器设计的可降阶原理、降阶误差分析方法以及基于降阶原理估计和 BIC 准则的模型定阶方法, 并研究了降阶辨识实验的激励信号和预滤波器设计。四机系统的仿真算例表明了所提出的面向广域阻尼控制的电力系统降阶辨识原理与方法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 低频振荡; 广域阻尼控制; 降阶辨识

**Abstract:** Wide-area damping control is a great potential approach for the damping of inter-area low-frequency oscillations. Reduced order identification provides a feasible solution to get the system model for the design of damping controller. The principle of order reduction for damping controller design in power system is studied based on mode controllability and observability analysis. Then model reduction error is analyzed and a model order selection method is proposed according to reduction error analysis and BIC criterion. Then an input and pre-filter design method is proposed for damping control oriented identification experiments. The availability of proposed principle and methods are verified in a four-machine system.

**Key words:** power system; low-frequency oscillation; wide-area damping control; reduced order identification

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0033-06

## 0 引言

大区电网互联的形势下, 低频振荡问题已成为限制省间和区间功率传输极限的瓶颈, 即使安装了大量传统的励磁附加阻尼控制器 (power stability stabilizer, PSS), 区间低频振荡问题仍然没有得到有效解决<sup>[1]</sup>。广域测量技术的发展和普及使得采用广域信号作为阻尼控制的输入信号成为可能, 研究表明<sup>[1]</sup>, 对于抑制区间低频振荡, 广域阻尼控制与本地阻尼控制相比具有明显优势。

在广域阻尼控制中, 传统 PSS 设计中所采用的单机无穷大系统的假设已经不再适用。学者们陆续提出了基于极点配置、最优控制及鲁棒控制等现代控制理论的广域阻尼控制器设计方法, 然而这些方法都要基于系统模型, 因此系统模型的获取是设计广域阻尼控制器的关键。降阶辨识方法为获取电力系统控制器设计可用的模型提供了一种有效手段。

系统辨识的方法众多, 基于模型的方法主要有预报误差法 (prediction error method, PEM) 和子空间辨识法两种, 对于系统辨识的算法实现、辨识的收

敛性和一致性、辨识误差的分布、模型的定阶方法以及辨识实验的最优激励信号和最优预滤波器设计方法, L. Ljung 在其经典巨著<sup>[2]</sup>中做了系统的总结。相比之下, 电力系统中面向控制的辨识研究开展的较少, J. Kamwa 在这方面做了很多先驱性的工作, 他采用子空间辨识等方法为电力系统 MIMO 控制器设计提供模型, 获得了很好的仿真效果<sup>[3]</sup>。文献 [4] 采用 PEM 辨识方法获得了系统模型, 并在此基础上进行了 MIMO 最优控制器设计。系统辨识方法在电力系统中应用的同时, 在降阶原理及方法体系方面还有待研究, 包括: ① 电力系统面向阻尼控制器设计的可降阶原理: 电力系统的阶数有成千上万阶, 可以用几阶到十几阶的模型来表示的原因; 降阶的误差分析; 降阶模型阶数的确定等等; ② 电力系统的降阶辨识方法体系: 电力系统辨识可用的方法; 面向广域阻尼控制误差度量; 辨识实验的激励信号、预滤波器设计等等。

## 1 电力系统的可降阶原理与降阶误差分析

### 1.1 模式可控可观性与系统降阶

电力系统线性模型可以表示成解耦状态方程<sup>[6]</sup>为

$$\dot{z} = Az + B'u \quad (1)$$

$$y = C'z \quad (2)$$

其中  $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ ;  $z_i$  为对应模式  $\lambda_i$  的状态变量;  $b'_i$  为  $B$  的第  $i$  行, 对应输入  $u$  对模式  $\lambda_i$  的可控性;  $c'_i$  为  $C$  的第  $i$  列, 对应输出  $y$  对模式  $\lambda_i$  的可观性。先分析简单情况, 令  $u = Ky$   $K$  为常数。

此时系统可表示成

$$\dot{z} = Az + B'KC'z = (A + KB'C')z \quad (3)$$

其中  $A + kB'C'$  为闭环状态矩阵, 用  $A'$  来表示。当模式  $\lambda_i$  不可控, 即  $b'_i = 0$  时  $A'$  具有如下形式。

$$A' = \begin{bmatrix} \lambda_1 + Kb'_1c'_1 & Kb'_1c'_2 & \dots & Kb'_1c'_i & \dots \\ Kb'_2c'_1 & \lambda_2 + Kb'_2c'_2 & \dots & Kb'_2c'_i & \dots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_i & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (4)$$

经过矩阵行变换, 式(4)与式(5)的特征值相同为

$$PA'P^T = \begin{bmatrix} \lambda_1 + Kb'_1c'_1 & Kb'_1c'_2 & \dots & 0 & \dots \\ Kb'_2c'_1 & \lambda_2 + Kb'_2c'_2 & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_i & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $P$  为行变换矩阵。注意到, 式(5)所示矩阵即式(6)所示系统的闭环状态矩阵。

$$\begin{cases} \dot{z}_i = \lambda_i z_i \\ \dot{z}_j = \lambda_j z_j + b'_k \cdot K \cdot \sum_{k=1}^n c'_k z_k, j \neq i \end{cases} \quad (6)$$

式(6)所示系统由不受控和受控两解耦的子系统构成, 其中受控的子系统不含有与不可控模式相关的状态变量, 因此其阶数是原系统的阶数减去不可控的模式数。控制器设计可针对该受控子系统进行, 与在原系统上设计控制器是等同的。

由上述分析可知, 当系统存在不可控的模式时, 对于控制器设计而言, 可以对系统进行降阶, 降阶后的系统不含有不可控的模式。由对偶原理可知, 当存在不可观的模式时, 系统同样也可以被降阶。上述证明是在控制器为比例环节的假设下完成的, 对于一般情况, 通过将控制器表述成状态方程形式与

系统的解耦状态方程联立, 通过类似的证明过程可以得到相同的结论, 此处从略。

当存在不可控或不可观的模式时, 对于控制器设计而言, 被控系统可以被降阶而不损失有用的信息。由此可以推想, 当存在可控可观性相对很弱的模式时, 在承受一定的误差的前提下, 也可以对被控系统进行降阶。后一种情形在电力系统中更为常见。对于阻尼控制器设计而言, 以PSS设计为例, 虽然电力系统阶数很高, 但是单台发电机参与的模式有限, 且本地反馈信号也只对本地模式和部分区间模式可观性较强, 因此对于PSS的设计而言, 其对于系统的大部分模式是不可控不可观或者极弱可控、可观的, 因此可以对系统进行大规模的降阶。

引入广域信号作反馈后, 由于信号的选择不受限制, 可以挑选对区间模式具有强可观性的信号, 且由于控制点和反馈信号的选择可以分离, 对控制点可控的本地模式, 可以选择反馈信号使之不可观, 使得控制器既可控又可观的模式集中在区间振荡模式, 从而可以进一步降低系统的阶数。

### 1.2 降阶模型的误差

考虑单输入单输出系统  $G(s)$ 。 $G(s)$  的传递函数可写成如下形式(假设特征方程无重根)。

$$G(s) = \frac{R_1}{s - \lambda_1} + \dots + \frac{R_r}{s - \lambda_r} + \frac{R_{r+1}}{s - \lambda_{r+1}} + \dots + \frac{R_n}{s - \lambda_n} \quad (7)$$

其中  $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$ ,  $R_i = c'_i b'_i$  为模式  $\lambda_i$  的留数, 有  $|R_1| \geq |R_2| \geq \dots \geq |R_n|$ 。假设系统降为  $r$  阶。

$$G_r(s) = \frac{R_1}{s - \lambda_1} + \frac{R_2}{s - \lambda_2} + \dots + \frac{R_r}{s - \lambda_r} \quad (8)$$

当  $R_{r+1} = R_{r+2} = \dots = R_n = 0$  自然有  $G_r(s) = G(s)$ 。

如果  $R_{r+1} \neq 0$ , 降阶会带来误差。该误差为

$$\Delta G_r(s) = G(s) - G_r(s) = \frac{R_{r+1}}{s - \lambda_{r+1}} + \dots + \frac{R_n}{s - \lambda_n} \quad (9)$$

该误差是被舍去的模式所引入的误差之和。模型误差可以用  $H_\infty$  范数和  $H_2$  范数来评估。

用  $H_\infty$  范数来评估模型误差, 可以考察模型误差的幅频响应的峰值。模式  $\lambda_i$  在  $G(s)$  中对应的项为  $R_i/(s - \lambda_i)$ , 该项在频域上的最大幅值为  $|R_i|/|\alpha_i|$ , 舍去该模式所带来误差的  $H_\infty$  范数即为  $|R_i|/|\alpha_i|$ 。由于各模式对应幅频上的峰值不出现在同一频率,

因此式(9)所示误差范数的上限和近似的下限为

$$\max_{i=r+1, \dots, n} \{ |R_i| / |\alpha_i| \} \leq \| \Delta G(s) \|_{\infty} \leq \sum_{i=r+1}^n |R_i| / |\alpha_i| \quad (10)$$

该上限保守性太强, 下限更接近误差的真实值。用  $H_2$  范数来评估模型误差, 可以反映在整个频谱范围内误差的总体大小, 同时也对应模型与实际系统间单位冲激响应之差的能量。

模式  $\lambda_i$  对应项  $R_i/(s - \lambda_i)$  的  $H_2$  范数平方为<sup>[5]</sup>

$$\| (\lambda_i) \|_2^2 = \begin{cases} -\frac{(\operatorname{Re}\{R_i\} \lambda_i)^2 + (\operatorname{Re}\{R_i \lambda_i^*\})^2}{\alpha_i |\lambda_i|^2}, & \operatorname{Im}\{\lambda_i\} \neq 0 \\ -\frac{R_i^2}{2\alpha_i}, & \operatorname{Im}\{\lambda_i\} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

由于单位冲激脉冲响应的总能量近似等于各模式能量的和, 式(9)所示误差的  $H_2$  范数可近似由式(12)表示。

$$\| \Delta G_r(s) \|_2 \approx \left( \sum_{i=r+1}^n \| (\lambda_i) \|_2^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

无论是范数还是范数下的误差表示都反映出, 舍去留数小且阻尼大的模式所带来的模型误差较小。误差的大小是相对的, 误差范数相对于系统范数的相对大小更能准确地评价模型的质量。

### 1.3 基于降阶原理和 BIC 准则的模型定阶方法

模型定阶是辨识过程中非常重要的一环。令辨识的相对误差小于  $\varepsilon_0$ , 由降阶原理做出的模型阶数估计由式(13)给出。

$$\| \Delta G_r(s) \| \leq \varepsilon_0 \| G(s) \| \leq \| \Delta G_{r+1}(s) \| \quad (13)$$

其中,  $\| \cdot \|$  可以是  $H_{\infty}$  范数或  $H_2$  范数,  $\| \Delta G_r(s) \|$  的计算公式由式(9)、(10)和(11)给出。随着阶数的增加单调递减。 $\| G(s) \|$  为系统的总范数。

采用降阶理论给出了阶数的估计后, 在辨识过程中再采用传统的定阶准则来做调整和校核。传统的 BIC 定阶准则<sup>[87]</sup>为

$$\operatorname{BIC}(p) = N \ln V_N + p \ln N \quad (14)$$

其中  $p$  为模型阶数;  $N$  为采样点数;  $V_N$  为预报误差的方差。该准则包含了对拟合精度的评价和对模型阶数的惩罚两部分。降阶原理与 BIC 准则的结合, 赋予了定阶方法清晰的物理意义, 改变了传统 BIC 等方法依赖辨识拟合程度大量试算的局面。

## 2 电力系统的降阶辨识实验设计

降阶的可行性是用低阶模型来辨识系统的基础。系统辨识常用方法主要有预报误差法和子空间辨识法两大类<sup>[2]</sup>, 其中预报误差法使用最为广泛, 并可用于闭环辨识。这里以预报误差法为例讨论辨识实验中的激励信号和预滤波器设计。

待辨识的系统如下表示。

$$y(t) = G_0(q) u(t) + H_0(q) e(t) \quad (15)$$

其中  $q$  是移位算子;  $G_0$  是被控系统;  $u$  是激励信号输入;  $y$  是测量输出;  $e$  是方差为  $\lambda_0$  的白噪声;  $H_0$  是噪声模型。辨识模型与实际系统间总会存在误差, 其大小可以用模型与实际系统之差的方差和偏差来评价, 定义模型品质质量的准则函数<sup>[2]</sup>为

$$J(\theta) = \int_{-\pi}^{\pi} |G_0(e^{j\omega}) - G(e^{j\omega}, \theta)|^2 C(\omega) d\omega \quad (16)$$

其中  $G(e^{j\omega}, \theta)$  为辨识模型的频域表示;  $C(\omega)$  为品质加权函数, 对应在不同频率段对辨识精度的不同要求。 $J(\theta)$  近似可分解为“方差贡献” $J_V(\theta)$  与“偏差贡献” $J_B(\theta)$  之和。对于开环辨识情况,  $J_V(\theta)$  可表示为<sup>[2]</sup>

$$J_V(\theta) \approx n/N \int_{-\pi}^{\pi} C(\omega) \Phi_v(\omega) / \Phi_u(\omega) d\omega \quad (17)$$

其中  $n$  是模型阶数;  $N$  是采样数据点数;  $\Phi_v(\omega)$  为辨识中噪声的功率谱, 有  $\Phi_v(\omega) = \lambda_0 |H_0(e^{j\omega})|^2 \Phi_u(\omega)$  为激励信号的功率谱。

为使得  $J_V(\theta)$  最小, 最优激励信号设计<sup>[2]</sup>为

$$\Phi_u^{opt}(\omega) = \mu \sqrt{C(\omega) \cdot \Phi_v(\omega)} \quad (18)$$

其中  $\mu$  是可调常数。为使得偏差贡献项  $J_B(\theta)$  最小, 应满足式(19)<sup>[2]</sup>。

$$\Phi_u(\omega) |L(e^{j\omega})|^2 / |H(e^{j\omega}, \theta^*)|^2 = kC(\omega) \quad (19)$$

其中  $H(e^{j\omega}, \theta^*)$  为  $N$  趋于无穷时噪声模型的收敛值;  $k$  是可调常数。

对于以广域阻尼控制器设计为目的的电力系统降阶辨识, 推导相应的品质加权函数  $C(\omega)$  如下。

广域阻尼控制器的参考信号一般为零, 系统的输入和输出满足如下方程。

$$\begin{aligned} u(t) &= -K(q) y(t) \\ y(t) &= G_0(q) u(t) + v \end{aligned} \quad (20)$$

其中  $K$  为反馈控制器;  $v$  代表外部扰动。系统只受

外部扰动激励;  $y = S_0 v$ ,  $S_0$  为输出灵敏度函数,  $S_0 = 1 / (1 + G_0 K)$ 。令  $R(q)$  为

$$R(q) = G(q, \theta) / [1 + G(q, \theta) K(q)] \quad (21)$$

实际系统的  $S_0$  与所设计的  $\hat{S}_0$  之差  $\tilde{S}_0$  为

$$\tilde{S}_0 = \frac{1}{1 + G_0 K} - \frac{1}{1 + G(q, \theta) K} \approx \frac{RK [G(q, \theta) - G_0]}{G_0 (1 + G_0 K)} \quad (22)$$

为使得设计系统输出逼近实际系统输出, 必须极小化目标函数为

$$J(G) = \int_{-\pi}^{\pi} |G(e^{j\omega}, \theta) - G_0|^2 \left| \frac{RK}{G_0 (1 + G_0 K)} \right|^2 \Phi_v^{cl} d\omega \quad (23)$$

对比式(16), 可知此时的  $C(\omega)$  为

$$C(\omega) = |RK / [G_0 (1 + G_0 K)]|^2 \Phi_v^{cl} \quad (24)$$

$\Phi_v^{cl}$  是指闭环运行时的噪声谱。将式(24)代入式(18)和(19), 可以得到面向广域阻尼控制器设计的最优激励信号和最优预滤波器设计如下。

$$\Phi_u^{opt}(\omega) = \mu |RK / [G_0 (1 + G_0 K)]| \sqrt{\Phi_v^{cl} \cdot \Phi_v} \quad (25)$$

$$|L(e^{j\omega})|^2 = |H(e^{j\omega}, \theta^*)|^2 \sqrt{C(\omega) / \Phi_v(\omega)} \quad (26)$$

求解上两式需要已知真实系统  $G_0$ 、噪声谱  $\Phi_v^{cl}$  和  $\Phi_v$  以及  $K$  和  $R$ , 这些在辨识前都不会已知。一种可行的方法是采用迭代辨识, 每次辨识前用上次辨识得到的系统模型、噪声谱以及重新设计的控制器代入式(25)和(26)重新求解激励信号和预滤波器。对于实际系统中的辨识实验, 也可以采用仿真系统中的系统模型和控制器作为设计依据。

以上激励信号和预滤波器的设计方法在实际应用中显得非常复杂, 式(18)和(26)给出了一个结论: 在辨识精度要求高的频率段, 激励信号谱和预滤波器幅频响应都应该具有更大值。由于辨识出的模型会用于设计控制器以阻尼低频振荡,  $C(\omega)$  在低频段会有更大的值, 一种实用的简化设计方法是把激励信号谱和预滤波器设计成低通的形式, 将截止频率设置在一般振荡的最高频率 2 Hz 左右。

设计出激励信号的谱后, 滤波后的高斯白噪声是一种频域和时域特性都较为理想的激励信号实现方式, 此外还需要结合对激励信号的幅值和能量的限制来确定可调系数  $\mu$  [2]。

### 3 仿真算例分析

仿真算例在四机两区系统上进行, 仿真工具为 Matlab, 系统如图 1 所示, 各元件参数与文献 [6] 相同。

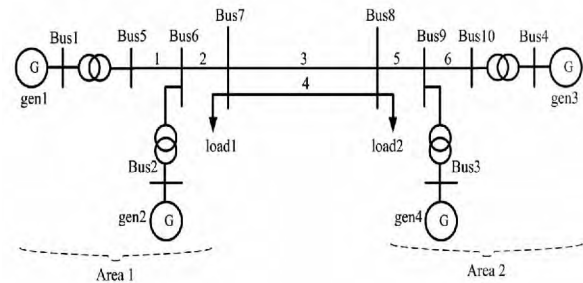


图 1 四机两区系统示意图

每台发电机都配备励磁和调速系统, 系统共 54 阶。以发电机 4 的励磁参考电压为控制点, 分别以机端功率和区域 1 与区域 2 间的交换功率作为反馈信号, 考查面向本地控制和广域控制的电力系统可降阶情况。分析的结果见表 1, 为简化篇幅, 省略了大量无关紧要的左半平面实轴上的非振荡模式。

由表 1 可知, 系统有 3 个弱阻尼的机电振荡模式, 其中 0.557 7 Hz 模式为区间振荡模式, 1.104 9 Hz 模式为 G3/G4 间的本地振荡模式, 1.131 6 Hz 模式为 G1/G2 间的本地振荡模式; 其他模式为阻尼情况很好的控制器及磁链模式。G4 对于 G3/G4 本地模式及区间模式的可控性较强, 对于 G1/G2 的本地振荡模式可控性很差, 且对于大量与 G4 不相关的控制器/磁链模式不具有很强的可控性; 同样 G4 机端功率信号对于 G1/G2 模式的可观性很差, 且对于大部分控制器/磁链模式基本不具有可观性; 相比本地信号, 广域的区域交换功率信号的模式可观性基本集中在区间振荡模式, 对于其他本地模式及控制器/磁链模式的都基本不可观。

结合前述基于模式可控可观性的可降阶原理可知, 此系统可以实现大规模的降阶来简化控制器的设计。以模型误差 10% 为限, 用  $H_2$  范数来评估误差, 本地控制需要保留的模型阶数为 8 阶, 广域控制为 3 阶; 用范数评估误差, 本地控制需要保留的模型阶数为 10 阶, 广域控制为 4 阶。该分析结果表明, 降阶的程度与控制点和反馈信号的选择相关, 而对电力系统的大规模降阶是可行的。

表 1 四机两区系统模式可控可观性分析

频率 /Hz	阻尼	G4 可控性	本地信号 可观性	广域信号 可观性	本地控制 $H_2$ 范数	广域控制 $H_2$ 范数	本地控制 $H_\infty$ 范数	广域控制 $H_\infty$ 范数
0.557 7	0.051 3	4.638 4	0.186 4	0.311 4	2.025 7	3.356 1	4.800 1	8.017 7
1.104 9	0.118 0	28.380	0.168 5	0.015 7	4.430 3	0.375 3	3.808 1	0.355 8
1.131 6	0.118 3	0.627 3	0.011 3	0.054 2	0.008 1	0.035 7	0.008 4	0.040 1
0.089 8	0.400 7	1.328 2	0.093 5	0.029 1	0.276 1	0.086 3	0.503 1	0.156 9
0.102 5	0.453 4	2.018 5	0.033 9	0.029 2	0.100 4	0.120 5	0.208 7	0.179 8
0.305 6	0.681 1	8.681 1	0.109 4	0.083 4	0.716 9	0.491 1	0.531 8	0.405 1
0.072 8	0.968 6	1.604 1	0.114 7	0.058 9	0.030 0	0.094 9	0.103 2	0.053 0
0.006 2	0.999 8	1.095 0	0.049 1	0.054 0	0.053 4	0.046 9	0.027 5	0.030 2
1.574 6	0.657 5	83.246	0.000 3	0.000 4	0.008 7	0.013 7	0.003 1	0.003 6
2.300 9	0.750 9	1 516.5	0.017 6	0.003 0	6.195 5	1.186 8	1.626 2	0.277 9
1.249 4	0.973 4	0.052 7	0.001 9	0.003 7	0.004 7	0.009 2	0.001 3	0.002 5
0.070 2	0.999 9	2.115 3	0.003 1	0.002 6	0.053 6	0.102 0	0.014 9	0.012 5
1.098 4	0.992 8	853.50	0.000 2	0.000 9	0.000 1	0.000 3	0	0
4.889 8	0.858 7	264.41	0	0	0.000 2	0.001 2	0.000 1	0.000 1
0	—	1.504 9	0.045 7	0	0	0	0	0.421 8
.	.	.	.	.	.	.	.	.

采用 PEM 的方法辨识从控制点到广域反馈信号的被控系统模型,采样率为 10 Hz,仿真时长为 40 s。由于实际系统模型未知,因此首先将激励信号谱和预滤波器设计成低通的形式,截止频率为 2 Hz,激励信号选用滤波后的高斯白噪声,滤波器为二阶巴特沃兹低通滤波器,衰减率取为 0.707。辨识得到的各阶模型拟合度如表 2 所示。

由上述基于降阶原理的估计可知,采用 3 阶模型已能较好地拟合系统。从表 2 可以看出,随着模型阶数从 3 阶上升到 11 阶,模型的拟合精度并没有显著提高,这反映了降阶理论对模型阶数做出的估计是合理的。辨识出的 3 阶模型含有一对频率为 0.58 Hz、阻尼比为 5.47% 的极点,与表 1 的小干扰分析结果基本相同。根据 BIC 准则进行最后的校验,确定模型的阶数为 3 阶。

表 2 不同模型阶数下的拟合度

模型阶数	3	5	7	11
拟合度 /%	81.4	82.4	81.8	84.2

根据辨识的 3 阶模型采用极点配置的方法<sup>[6]</sup>设计出广域阻尼控制器,与本地 PSS 控制相比较,控制效果如图 2 所示,其中 PSS 参数由文献[6]给定。可见,与本地 PSS 控制相比,广域阻尼控制对于区间

低频振荡的阻尼更强,该算例同时也表明广域阻尼控制器的设计可以基于降阶辨识模型进行。

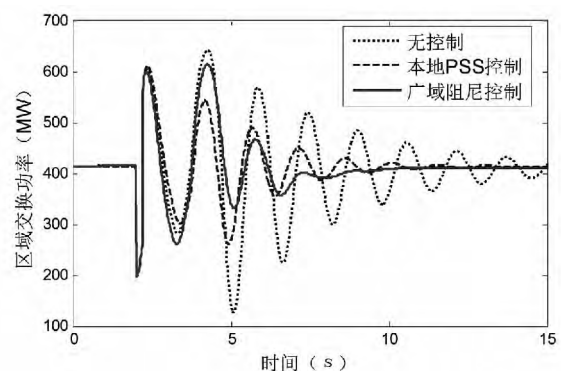


图 2 根据辨识模型设计广域阻尼控制器的控制效果

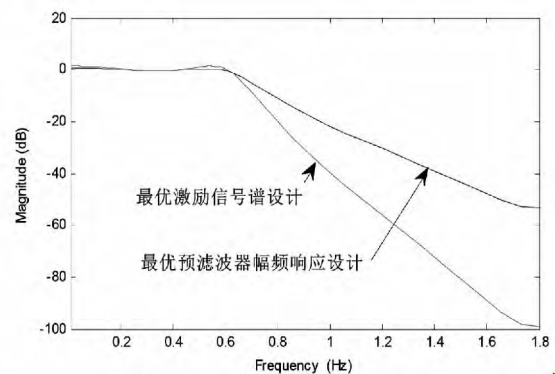


图 3 最优激励信号谱和最优预滤波器幅频响应设计

根据辨识出的系统模型和噪声模型,以及所设计的控制器,按照式(25)和式(26)重新设计得到如图3所示最优输入信号谱和最优预滤波器幅频特性。

两者都具有明显的低通特性,在主导振荡频率 0.58 Hz 及以下频率有较大值,截止频率在 0.8 Hz 左右,比本辨识实验中采用的截止频率 2 Hz 略低。可见,由于电力系统呈低通特性,且低频振荡频率小于 2 Hz,因此将输入信号谱和预滤波器设计为低通特性,截止频率取为高于低频振荡频率,是一种适用性较强的设计方案。

### 4 结 论

电力系统降阶的可行性是能够用低阶模型来辨识系统的基础。基于模式可控可观性分析,提出了面向广域阻尼控制器设计的电力系统可降阶原理,并提出了  $H_{\infty}/H_2$  范数下的降阶误差分析方法,以及降阶原理估计和 BIC 准则结合的模型定阶方法。进一步地,针对广域阻尼控制器设计,提出了辨识实验中的最优激励信号和最优预滤波器设计方法,并指出采用具有低通特性的激励信号谱和预滤波器是一种实用的设计方案。四机两区系统上进行的仿真表

(上接第 18 页)

### 3 结 论

基于智能电网调度支持系统的可视化平台,结合现有 WAMS 系统应用功能,设计并实现了电网运行动态监视完整的可视化功能。

通过实时获取电网运行相关的动态告警信息,该可视化功能将不同类型的电网动态运行信息与告警进行汇集与综合展示,实现对电力系统动态运行状态高效、精准的监视与告警。从实际应用中的效果来看,它能够使得运行人员快速、直观地掌握电网动态运行情况,提高调度运行人员对电网动态越限、电网扰动、低频振荡等重要电网事件以及机组并网性能评价等的响应速度与决策处理能力。

#### 参考文献

[1] 李丹,韩福坤,郭子明,等. 华北电网广域实时动态监测系统[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 52-56.

明了上述方法和理论的有效性。

#### 参考文献

[1] 谢小荣,肖晋宇,童陆园,等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.  
[2] Lennart Ljung. System Identification—Theory for the User(2nd ed) [M]. USA: Prentice Hall, 2002.  
[3] Kamwa I, Luc Gerin-Lajoie. State-space System Identification-toward MIMO Models for Modal Analysis and Optimization of Bulk Power Systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(1): 326-335.  
[4] Lu Chao, Li Licheng, He Jingbo, et al. Optimal Coordinate Design of Multiple HVDC Modulation Controllers based on MIMO System Identification [C]. 2007 IEEE PES General Meeting, 2007: 1-8.  
[5] Xie Xiaorong, Lu Chao. Optimization and Coordination of Wide-area Damping Controls for Enhancing the Transfer Capability of Interconnected Power Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 1099-1108.  
[6] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 2001.

(收稿日期: 2013-11-04)

[2] 曹路,汪德星,岑宗浩. 广域测量系统在华东电网中的应用[J]. 电力设备, 2005, 6(12): 38-41.  
[3] 干磊,康河文,何敏. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 152-155.  
[4] 周喜超,智勇,郑伟,等. 基于 WAMS 系统的甘肃陇南电网大负荷扰动试验[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 129-131.  
[5] 沈国辉,余东香,孙湃,等. 电力系统可视化技术研究及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 31-36.  
[6] 李大勇,马冬雪,王晓宁,等. 电网信息可视化应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 156-158.  
[7] 王庆红. 电力系统可视化技术及其在南方电网的应用[J]. 南方电网技术, 2006, 2(3): 40-44.

#### 作者简介:

王波(1981), 硕士, 高级工程师, 从事的主要工作为广域相量测量系统相关研究与开发;

杨洪耕(1949), 教授, 博导, 长期从事电能质量、电网扰动和谐波的研究工作。

(收稿日期: 2013-07-23)