

基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制

肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 韩英铎

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 提出了利用多路广域测量信号作为反馈量的新型电力系统广域阻尼控制(WADC)方法。首先, 推导了基于改进 Prony 算法的动态降阶等值系统参数的辨识方法; 利用该辨识方法对受控系统进行辨识, 在辨识结果的基础上运用线性二次型方法设计 WADC 的参数。广域闭环控制必须考虑通信延迟的影响, 文中利用线性矩阵不等式方法讨论了控制参数在时滞下的稳定性问题。MATLAB 数值仿真验证了辨识方法的准确性。WADC 的控制效果在 36 节点的多机系统中得到了仿真验证。结果证明, 应用广域信号作为反馈的 WADC 可以更有效地阻尼区间低频振荡, 同时提高了联络线的传送容量极限。

关键词: 广域测量系统; 在线辨识; 广域阻尼控制; 线性矩阵不等式; 通信延时

中图分类号: TM712

0 引言

复杂电网区域间的低频振荡已成为制约互联系统传输容量的瓶颈^[1]。现有的电力系统稳定器(PSS)虽然对抑制功率振荡起到了重要作用;但是, 一方面囿于本地信号反馈的约束, 不能很好地抑制互联电网的区间低频振荡, 另一方面仅针对特定工况离线设计难以适应电网运行方式的变化, 适应性差^[2]。

随着能量管理系统(EMS)技术的成熟, 以及广域测量系统(WAMS)技术的迅速发展与广泛应用, 新一代的电网安全监测系统已经能够实现对电网动态特性, 包括低频振荡的在线监视与分析^[3]。如国内投运的 WAMS 能以 50 Hz 的频率实时同步采集电网的动态运行参数^[4], 为稳定分析和监控提供高速数据平台, 在此基础上发展广域控制将是电网自动化技术的必然趋势。文献[5]提出应用广域测量信号进行区间阻尼控制的方法, 但其控制器参数的设计依赖于详细系统的模型和参数, 限制了它在实际系统中的应用。阻尼控制主要关注电网中易被激发的低频振荡模式, 因此可以利用包含系统主导振荡模式的低阶辨识结果来设计阻尼控制参数。文献[6]提出在辨识结果的基础上使用极点配置法设计 PSS 参数的方法。利用冲击响应 Prony 算法可对大规模动态系统实行降阶等值。文献[7]将 Prony 辨识方法扩展到任意输入响应, 但该方法的辨识精度低, 难以满足控制器设计的需要。

利用改进 Prony 算法可以实现低频振荡主导模式的在线分析^[8]。通过 EMS 和 WAMS 能够获得电网的实际运行信息, 再结合快速时域仿真可以实现广域阻尼控制器(WADC)参数的在线设计。

本文推导了已知有限激励及其系统响应下辨识系统参数的方法; 利用辨识结果运用线性二次型方法设计控制器的参数; 针对广域测量系统存在的通信延迟的特点, 用线性矩阵不等式(LMI)讨论了控制参数的鲁棒稳定性问题。8 机 36 节点的多机系统仿真证实了所述方法的有效性。

1 基于改进 Prony 算法的动态系统辨识

1.1 单输入多输出系统的辨识

一般 n 阶单输入多输出(SIMO)的线性时不变动态系统, 其状态方程描述为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为状态变量; $u(t) \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$ 为系统输入; $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 为系统输出; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 为相应的系数矩阵。

令 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为系统的特征值, 引入模态矩阵 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$ 变换系统状态方程, 对零状态系统进行拉普拉斯变换得到系统的传递函数矩阵如式(2)所示, 其中 ϕ_i 是特征值 λ_i 关联的右特征向量:

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{Y}(s)}{u(s)} = \mathbf{C}_d [s\mathbf{I} - \mathbf{A}_d]^{-1} \mathbf{B}_d \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}_d = \Phi^{-1} \mathbf{A} \Phi = \text{diag}(\lambda_i)$; $\mathbf{C}_d = \mathbf{C} \Phi$; $\mathbf{B}_d = \Phi^{-1} \mathbf{B}$ 。

因为 \mathbf{A}_d 为对角矩阵, 所以式(2)可变换为:

$$\mathbf{G}(s) = \sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{R}_i}{(s - \lambda_i)} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_i = \mathbf{C}_{d,i} \mathbf{B}_{d,i}$; $\mathbf{C}_{d,i}$ 为 \mathbf{C}_d 第 i 列的列向量; $\mathbf{B}_{d,i}$ 为矩阵 \mathbf{B}_d 的第 i 行的行向量。

可见,当 SIMO 的多变量系统用 P 规范型传递函数矩阵描述时,可以化为多个单输入单输出(SISO)的子模型进行分别辨识。

设多路一维输出信号的 n 阶 Prony 模型为:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n A_i e^{j\theta_i} e^{(a_i+j2\pi f_i)k} \quad (4)$$

对式(4)做拉普拉斯变换可以得到形如式(3)的频域描述,那么当 $u(s)=1$,即 $y(t)$ 为冲击响应时,系统状态方程参数的辨识可以转化为 Prony 模型参数的辨识。由式(3)可见,仅当满足所有模式其对应的留数 $\mathbf{R}_i \neq 0$,原系统状态方程的系数矩阵才可能通过辨识得到。然而,实际系统的各种模式并非同时“可观测”,因此辨识方法得到的将是被输入激发模式所代表的原系统的低阶等值模型。

1.2 有限激励下 Prony 模型参数的辨识

考虑如图 1 所示具有贯通(feed-through)参数的 SISO 动态系统,在有限激励 $u(s)$ 的作用下具有可测量的输出为 $Y(s)$ 。可见,当 $u(s) \neq 1$ 时,Prony 方法辨识得到的信号模型 $Y(s) \neq G(s)$ 。文献[8]给出了改进 Prony 算法的步骤,其中特征值与对应留数的计算可以分别解耦进行,非冲击信号激励对系统模型辨识结果的影响也同时存在于这两方面。特征值结果中,除具有 $G(s)$ 的特征值外,还包含了输入信号的特征值,可记为 η_j ;对留数结果的影响相对复杂,下文将在文献[9]的基础上,得到非冲击输入信号对留数辨识的影响因子。

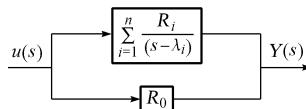


图 1 以 Prony 模型描述并含有贯通参数的系统

Fig. 1 Dynamic system with feed-through parameter formulated by Prony model

为不失一般性,假设激励信号的时域表示 $u(t)$ 为如下的分段函数形式:

$$u(t) = \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^M c_{k,j} e^{\eta_j(t-D_{k-1})} \cdot [\epsilon(t-D_{k-1}) - \epsilon(t-D_k)] \quad (5)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为单位阶跃; D_k ($k=1, 2, \dots, q$) 为常数; η_j 为信号对应时段的特征值。

在频域得到的系统输出包括贯通参数的响应和动态特性响应:

$$\hat{Y}(s) = R_0 U(s) + \sum_{i=1}^p R_i \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^M c_{k,j} \cdot$$

$$\left[\frac{e^{-sD_{k-1}} - e^{-sD_k + \eta_j(D_k - D_{k-1})}}{(s - \lambda_i)(s - \eta_j)} \right] \quad (6)$$

对式(6)进行拉普拉斯反变换,得到对应的时域关系式:

$$\hat{y}(t) = R_0 u(t) + \sum_{i=1}^p R_i h_i(t) \quad (7)$$

式中: $p < n$ 是改进 Prony 算法得到的系统阶数的估计值; $h_i(t)$ 是一个分段函数,可表示如下:

$$h_i(t) = \begin{cases} 0 & t < D_{k-1} \\ \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^M \frac{c_{k,j}}{\lambda_i - \eta_j} [e^{\lambda_i(t-D_{k-1})} - e^{\eta_j(t-D_{k-1})}] & t \in [D_{k-1}, D_k) \\ \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^M \frac{c_{k,j}}{\lambda_i - \eta_j} [1 - e^{(\eta_j - \lambda_i)(D_k - D_{k-1})}] e^{\lambda_i(t-D_{k-1})} & t \geq D_k \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可见,在求得系统特征值后,函数 $h_i(t)$ 在求解 R_0 和 R_i 时可以事先求得。如果利用 $t \geq D_k$ 时段的响应进行留数辨识,那么输入信号对留数 R_i 结果的影响可以归结为一个复数影响因子 ζ_i 。对式(7)进行离散化,可以得到超定线性方程组为:

$$\Phi R = Y \quad (9)$$

式中: $\Phi \in \mathbb{R}^{n \times (p+1)}$; $R = [R_0, R_1, \dots, R_p] \in \mathbb{R}^{(p+1) \times 1}$; $Y \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 。

使用最小二乘法可得到方程(8)的最优解。

如使用图 2 所示方波作为待辨识系统激励,留数计算时的影响因子 ζ_i 如下式所示:

$$\zeta_i = \frac{U_0}{\lambda_i} [1 - e^{\lambda_i D}] \quad (10)$$

式中: U_0 为方波的幅值; D 为方波持续的时间。

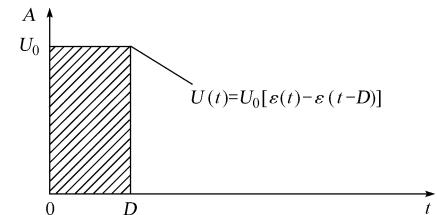


图 2 方波激励信号
Fig. 2 Input square wave

2 广域阻尼控制器的设计

2.1 WADC 控制器的结构

采用相对功角差、角速度差以及区间联络线的功率变化($\Delta\delta_{\text{remote}}$, $\Delta\omega_{\text{remote}}$, ΔP_{line})构成反馈,能够直接针对区间模式实现广域阻尼控制。图 3 为 WADC 控制器的结构,其中 $\mathbf{K}_{\text{WADC}} = [K_{\Delta P}, K_{\Delta\omega}, K_{\Delta\delta}]$ 。它是一个平行于本地 PSS 控制器的附加控

制环节。控制器的输出信号 V_s 作用到励磁控制器, 通过调节机组励磁来阻尼特定模式的区间振荡。

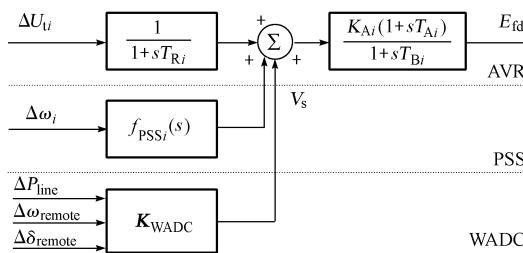


图 3 包含 PSS 和 WADC 的快速励磁系统

Fig. 3 Fast exciter with PSS and WADC

2.2 基于 LQ 的最优控制设计

由 WADC 的结构可知, 在没有投入 WADC 时, 从 V_s 输入到 ΔP_{line} , $\Delta \omega_{\text{remote}}$ 和 $\Delta \delta_{\text{remote}}$ 输出的动态系统为待辨识的开环受控系统。用图 2 所示的方波信号 V_s 激励该系统, 通过辨识系统响应能得到原系统包含其主导低频振荡模式的动态等值系统的参数。辨识得到的参数反映了电网运行的真实结构和平衡点信息。

用辨识得到的 Prony 模型参数可以进一步写出系统状态方程; 进而 WADC 参数的设计可以转化为标准的部分输出反馈的最优控制问题。给定 Q, R 权系数矩阵及一个能使闭环系统稳定的控制 K , 用直接迭代法求解 Levine-Athans 矩阵方程组, 得到 WADC 的线性二次(LQ)最优控制 K ^[10]。整个参数设计过程以辨识结果为基础摆脱了详细电力系统模型和参数的困扰。

3 通信延迟下闭环系统的稳定性分析

广域闭环控制器设计必须考虑通信延迟的影响, 计及延迟的网络闭环控制系统是一个典型的非线性、多时滞控制问题。LMI 理论是研究动力系统稳定性的重要方法, 通过求解指定的矩阵不等式可以解决确定控制下的允许时延问题^[10]。

由图 3 可知, 闭环系统的控制策略为:

$$u(t) = K_{\text{WADC}} y(t) \quad (11)$$

其中, 3 个反馈通道的延迟相等, 设为 d 。引入时滞后, 式(11)为:

$$u(t) = K_{\text{WADC}} y(t-d) \quad (12)$$

将式(12)代入系统状态方程, 得到典型的时滞控制系统描述:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + A_{\text{dl}}X(t-d) \quad (13)$$

式中: $A_{\text{dl}} = BK_{\text{WADC}}C$ 。

定理 1^[11] 对形如式(13)的系统, 已知 A 和 A_{dl} , 如果存在标量 $d_0 > 0$, 对称正定矩阵 P, Q, V 和

矩阵 W , 使得

$$f(K, d_0) =$$

$$\begin{bmatrix} S & -W^T A_{\text{dl}} & A^T A_{\text{dl}}^T V & d_0 (W + P) \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_{\text{dl}}^T V & 0 \\ VA_{\text{dl}} A & VA_{\text{dl}} A_{\text{dl}} & -V & 0 \\ d_0 (W^T + P) & 0 & 0 & -V \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

$$S = (A + A_{\text{dl}})^T P + P(A + A_{\text{dl}}) + W^T A_{\text{dl}} + A_{\text{dl}}^T W + Q$$

对于所有的 $d < d_0$, 系统(13)均能渐近稳定。

使用 LQ 方法求得的最优控制 K , 应用定理 1 可以求出对应该控制下闭环系统稳定所允许的时滞上限, 用该方法验证闭环系统的时滞鲁棒稳定性。

4 WADC 应用实现方法

图 4 给出了在线的 WADC 参数设计系统的结构。整个系统构建在由 EMS 和 WAMS 提供系统实时运行信息并完成状态估计的数据平台之上, 快速时域仿真程序是进行在线参数设计的重要工具。WADC 协调设计模块根据设置要求利用实际系统运行数据进行 WADC 参数的设计, 并将控制器参数下发到实际控制器, 用于被控系统的广域控制。WADC 的反馈量均来自于 WAMS, 最终达到“在线参数计算, 实时下发控制”的目的。

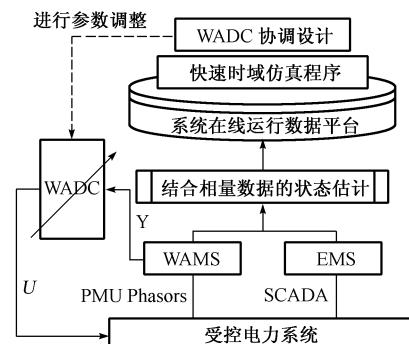


图 4 WADC 在线应用的实现框架

Fig. 4 Framework of online application on WADC

图 4 中 WADC 协调设计的流程如下: ①给定 V_s 方波激励, 获取系统响应信号; ②利用响应辨识得到降阶的动态等值参数; ③用 LQ 方法设计 WADC 参数; ④求解 LMI, 校验设计的控制在时滞下的闭环稳定性; ⑤下发控制参数。

5 仿真算例

5.1 MATLAB 数值仿真

带有贯通参数的动态系统结构为:

$$G(s) = R_0 \sum_{i=1}^4 \frac{R_i}{s - \lambda_i}$$

参数如下: $\lambda_{1,2} = 0.1 \pm j8$, $\lambda_{3,4} = -0.1 \pm j4$; $R_0 = 0.6$, $R_{1,2} = 1 \pm j1$, $R_{3,4} = 2 \pm j1$ 。

输入信号定义为:

$$U(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_0 t) & t \in [0, 2) \\ 0 & t \in [2, +\infty) \end{cases}$$

式中: $f_0 = 2$ Hz。

根据式(7)易得: $D_1 = 2$, $c_{1,1} = 0.5$, $\eta_{1,2} = \pm j12.566$ 。图5分别给出了输入信号与系统响应信号。

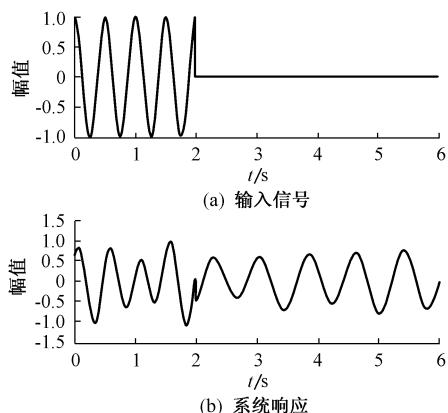


图5 施加到系统的输入激励及对应的系统响应曲线

Fig. 5 Input signal and corresponding response

改进 Prony 算法对响应信号阶数估计结果为 6,除去输入信号的模式,特征值辨识结果为: $\lambda_{1,2}' = 0.0981 \pm j7.9996$, $\lambda_{3,4}' = -0.0873 \pm j3.7981$ 。

用最小二乘求解对应的留数结果为: $R_0' = 0.6$, $R_{1,2}' = 0.9983 \pm j0.9989$, $R_{3,4}' = 1.9980 \pm j0.9974$ 。由算例可见,本文给出的辨识算法精度高,能够适应控制器参数设计的要求。

5.2 EPRI 36 节点电网仿真

EPRI 36 节点电网结构如图 6 所示。其中除了平衡机 1 和调相机 6 以外,其他发电机均安装了 PSS,其 PSS 参数的中心频率整定为 1.13 Hz。通过调节部分线路参数,并合理安排系统的机组出力与负荷分布,使得系统成为一个典型的多区域互联系统。其中区域 1,2 均为送电端,特别是区域 3 通过 2 条长线路向区域 2 传送大量的有功功率。表 1 给出了各发电机的出力情况。

表 1 系统主要发电机有功出力
Table 1 Power output of major generators

机组	有功功率/MW	机组	有功功率/MW
2	360	5	430
3	310	7	430
4	160	8	326

通过离线分析可知:该运行点下的系统其主要不稳定模式包括 0.9 Hz 左右的区域 1 与区域 2 之间的振荡模式(3 号、5 号机为主要参与机组)以及 0.47 Hz 的区域 2 与区域 3 之间的低频区间模式,且 7 号、8 号机是该低频区间模式的主要参与机组。仿真中 WADC 控制器安装在 7 号机组。WADC 控制器的结构如图 3 所示,反馈信号 $\Delta\omega_{\text{remote}}$ 和 $\Delta\delta_{\text{remote}}$ 的参考点均为 1 号机。

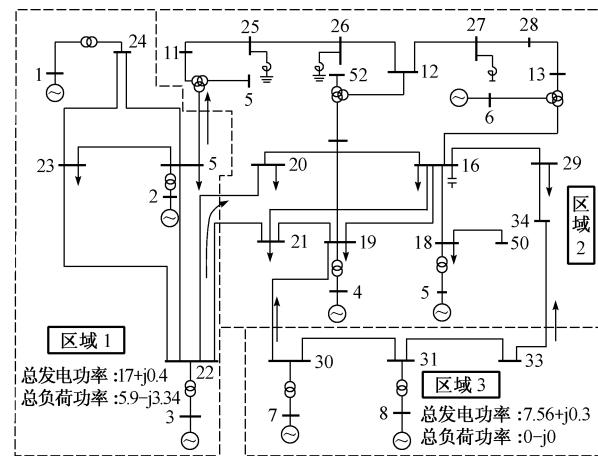


图6 EPRI 36 节点系统单线图

Fig. 6 Single-line diagram of EPRI 36-node system

在 7 号机组的 V_s 输入形如图 2 所示的方波激励,其中 $D = 0.1$ s, $U_0 = 0.2$ (标么值)。然后测量 WADC 的反馈信号并分别辨识得到输入到输出的开环系统状态方程,其中系数矩阵如下:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -30.94 & -1.406 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -108.4 & -12.49 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -8.774 & 0.22 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

$C =$

$$\begin{bmatrix} -2.478 & 1.289 & 52.56 & 5.92 & 0.5546 & -1.581 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.05855 & -0.0102 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4.101 & 1.954 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3)$$

给定权矩阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{C}^T \mathbf{Q}_0 \mathbf{C} = \mathbf{C}^T \text{diag}(0.01, 200, 0.01) \mathbf{C}, \mathbf{R} = \mathbf{I}$ 。

通过求解 Levine-Athans 方程组优化控制,得到最优增益矩阵为 $\mathbf{K} = [0.0015, 18.9144, -0.2580]$ 。进而使用定理 1 的方法,通过变形并求解矩阵不等式(14)得到系统的允许时滞 $d = 225$ ms。经测试,投运的 WAMS 双向通信延迟可

以保证在 100 ms 以内^[12], 所以得出的控制参数满足现场广域闭环控制的要求。

a. 三相短路故障下系统的动态特性

在给定的运行点下, 节点 16 与节点 19 之间设置一个 50 ms 的三相对地瞬时故障。图 7、图 8 给出了传统本地 PSS、不计通信延迟的 WADC 和最大值等于 100 ms 的随机时滞影响下的 WADC 这 3 种情况下系统响应曲线的比较, 曲线包括 7 号机-1 号机的功角摇摆曲线以及区间联络线的功率振荡曲线。

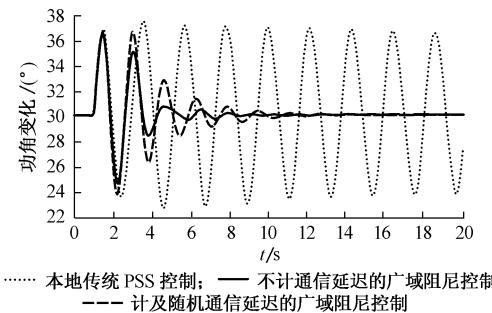


图 7 大扰动下区间(7号、1号机间)功角的摇摆

Fig. 7 Inter-area power angle swing during disturbance

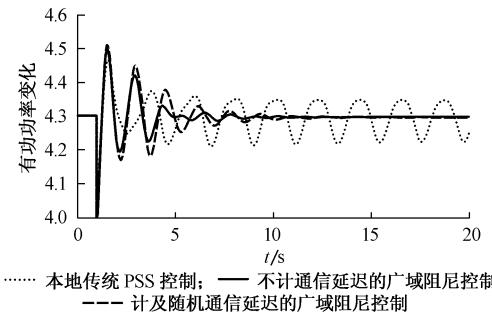


图 8 大扰动下区间联络线(30-19)有功功率的振荡

Fig. 8 Active power oscillation during disturbance

图 9 为 WADC 中的随机通信延迟, 延迟最大值为 100 ms。

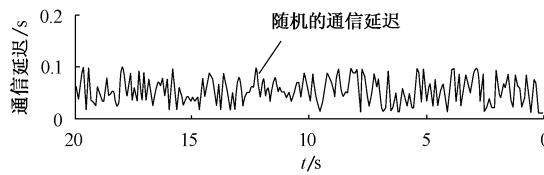


图 9 作用于 WADC 的随机通信延迟信号 $d_{\max} = 0.1$ s

Fig. 9 Concerned communication delay in simulation

仿真实证: 整定在 1.13 Hz 的本地 PSS 对频率为 0.9 Hz 的振荡有较好的控制效果, 但是对 0.47 Hz 的区间低频振荡几乎没有阻尼作用; WADC 比传统的本地 PSS 在抑制区间低频振荡方面效果更好, 通信延迟的存在对 WADC 的控制性

能有不利影响,但在最大延迟不超过一定限制的条件下,仍具有良好的阻尼控制作用。

b. 联络线最大传送功率

在保持区域 2 发电机出力、母线电压基本不变的情况下,不断提高区域 3 机组的有功输出,并相应增加区域 2 的负荷,从而实现提升区域联络线传送功率的目的。不重新在线整定 WADC 的参数,在遭受与 a 中同样扰动的情况下,仿真发现 WADC 能提升区域间的传输容量极限,如表 2 所示。在不计通信延迟下提高幅度为 12.1%, 约 85 MW; 考虑最大值为 100 ms 的通信延迟,依然能够提高传输容量 5.8%, 约 41 MW。

表 2 不同控制下联络线的最大传输功率

Table 2 Power limitations of tie line with different control

控制规律	P_{\max} /MW
本地 PSS	703
WADC(无延迟)	788
WADC($d_{\max} = 0.1$ s)	744

6 结语

基于改进 Prony 算法的动态系统辨识技术在已知激励下能够实现对系统参数的在线辨识; 以相对功角、角速度差和联络线功率变化作为反馈的 WADC 克服了现有本地 PSS 的固有缺陷; 运用 LMI 方法验证后的控制参数能在允许时滞内保证 WADC 的有效性和稳定性。基于广域测量的新一代电力系统动态监测系统能够实时提供全局测量的机组相对功角及角速度差等信息, 为 WADC 的实际应用提供了重要的基础。仿真实证, 在系统辨识结果基础上应用 LQ 设计方法得到的 WADC 能更好地抑制区间振荡和提高互联系统的传输极限。

参考文献

- Hui Ni, Heydt G T, Farmer R G. Autonomous Damping Controller Design for Power System Oscillations. In: Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting, Vol 2. Piscataway (NJ): IEEE, 2000. 1133~1138
- Kundur P. 电力系统稳定与控制 (Power System Stability and Control). 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2002
- Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Han Yingduo, et al. Dynamic Tracking of Low-frequency Oscillations with Improved Prony Method in Wide-area Measurement System. In: Proceedings of 2004 IEEE PES General Meeting. Denver (CO): 2004
- 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等 (Luo Jianyu, Wang Xiaoying, Lu Tingrui, et al). 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用 (An Application of Power System Real-time Dynamic Monitoring System Based on Wide-area Measurement). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(24):

78~80

- 5 谢小荣,肖晋宇,童陆园,等(Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, Tong Luyuan, et al). 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制(Inter-area Damping Control of Interconnected Power Systems Using Wide-area Measurements). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2004,28(2):37~40
- 6 Trudnowski D J, Smith J R, Short T A, et al. An Application of Prony Method in PSS Design for Multimachine Systems. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 118~126
- 7 苟北,提兆旭,陈陈(Gou Bei, Ti Zhaoxu, Chen Chen). Prony算法在大规模线性系统中的应用——动态模型的辨识与降阶(An Application of Prony Method in Large-scale Linear System——Identification and Order-reduction). 上海交通大学学报(Journal of Shanghai Jiaotong University),1996,30(12):85~90
- 8 肖晋宇,谢小荣,胡志祥,等(Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Hu Zhixiang, et al). 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法(Improved Prony Method for Online Identification of Low-frequency Oscillation in Power Systems). 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University (Science & Technology)),2004,44(7):883~887
- 9 Pierre D A, Smith J R, Trudnowski D J, et al. General Formulation of a Prony Based Method for Simultaneous Identification of Transfer Functions and Initial Conditions. In:

Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, Vol 2. Piscataway (NJ): IEEE, 1992. 1686~1691

- 10 韩英铎,王仲鸿,陈淮金(Han Yingduo, Wang Zhonghong, Chen Huaijin). 电力系统最优分散协调控制(Power Systems Decentralized-coordinate Control). 北京: 清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),1996
- 11 PooGyeon Park. A Delay-dependent Stability Criterion for Systems with Uncertain Time-invariant Delays. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 44(4):876~877
- 12 胡志祥,谢小荣,肖晋宇,等(Hu Zhixiang, Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, et al). 广域测量系统的延迟分析及其测试(Analysis and Test on Delays in the Wide-area Measuring System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2004,28(15):39~43

肖晋宇(1977—),男,博士研究生,主要从事基于广域测量的电力系统动态监测与稳定控制的研究。E-mail: xiaojinyu@tsinghua.org.cn

谢小荣(1975—),男,助理研究员,目前研究方向为电力系统广域动态监测与稳定控制。

胡志祥(1975—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统广域动态监测与控制及电力通信。

POWER SYSTEMS WIDE-AREA DAMPING CONTROL BASED ON ONLINE SYSTEM IDENTIFICATION

Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Hu Zhixiang, Han Yingduo
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new wide-area damping control (WADC) scheme based on wide-area measurements and online system identification is proposed. The identification method applied to single-input-multi-output system is presented. By using an improved Prony algorithm, it can obtain the reduced-order state equation model of the concerned system from the output responses. Parameters of the WADC are designed with linear quadratic (LQ) method in the identified model. The communication delay is then considered in the resulted close-loop control system, and the local maximum guarded-delay is derived by solving a linear matrix inequality (LMI). Finally, MATLAB simulation validates the accuracy of the system identification method and simulation results with a 36-node power system demonstrate the effectiveness of the proposed wide-area damping control scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50323002, 50407001).

Key words: wide-area measurement system; online identification; wide-area damping control (WADC); linear matrix inequality (LMI); communication delay