

DOI: 10.7667/PSPC161610

基于信息物理系统融合的广域互联电网阻尼控制策略

李霞, 李勇, 曹一家, 施星宇

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 随着信息通信技术在电网中的广泛应用, 紧密融合电网与信息通信的电力信息物理系统(Cyber-Physical Power System, CPPS)为广域互联电网间的低频振荡抑制提供了便利。在电力系统海量运行数据的基础上, 提出CPPS广域阻尼控制(Wide-Area Damping Control, WADC)策略。其采用可变遗忘因子最小二乘法来辨识物理系统模型, 并基于此模型由广义预测控制算法(Generalized Predictive Control, GPC)生成决策控制指令。进一步地, 建立通信补偿机制来补偿信息系统延时、丢包、乱序对物理系统运行的不利影响。通过 Matlab 和 Visual Studio 建立CPPS联合仿真平台来分析电力系统和信息系统的交互影响。以16机5区系统为例进行仿真, 结果表明建立的CPPS联合仿真模型能够有效地模拟物理系统与信息系统的交互影响。所提出的CPPS广域阻尼控制策略, 在信息系统的负面影响下, 能够有效抑制电力系统低频振荡。

关键词: 电力信息物理系统; 广域阻尼控制; 广义预测控制; 通信补偿机制; 联合仿真

Wide-area damping control strategy of interconnected power grid based on cyber physical system

LI Xia, LI Yong, CAO Yijia, SHI Xingyu

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the widely application of information and communication technology in the grid, the Cyber-Physical Power System (CPPS) tightly integrating power grid and cyber communication will facilitate the low frequency oscillation Control of wide-area power system. Based on the mass data of power system, this paper proposes a Wide-Area Damping Control (WADC) strategy of CPPS. It first uses variable forgetting factor least square method to identify the physical system model online. Then a Generalized Predictive Control (GPC) algorithm is employed to generate predict instructions based on the identified model. At the same time, a communication compensation mechanism is built to overcome the adverse impacts of cyber system, such as delay, packet loss, and out-of-order. Later, a CPPS co-simulation model combined Matlab with Visual Studio is established to analyze the interaction between power system and cyber system. At last, simulation studies undertaken on a 16-machine 5-area power system show that the proposed co-simulation model can emulate the interaction in CPPS. Also, the proposed CPPS controller can damp inter-area oscillations effectively, even under the negative impact of information system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61233008 and No. 51520105011).

Key words: cyber-physical power system; wide-area damping control; generalized predictive control; communication compensation mechanism; co-simulation

0 引言

深度融合信息通信技术、传感技术与先进控制技术的智能电网正在成为未来电网的主要形态^[1-2], 具备了信息物理系统(Cyber-Physical System, CPS)的基本特征。CPS的提出与发展为智能电网稳定性控制提供了新的思想途径^[3]。

电力信息物理系统(Cyber-Physical Power System, CPPS)是CPS在电力工业中的应用, 通过电网物理空间和信息空间的反馈循环, 以安全、可靠、高效和实时的方式监测并控制物理电网。目前国内外对CPPS展开了一系列的研究, 文献[4-6]提出CPPS的基本架构及可能面临的技术挑战, 并讨论了信息系统的建模理论, 指出建模需要考虑通信网络和信

基金项目: 国家自然科学基金(61233008, 51520105011)

分区控制相结合的混合控制方法^[4-5]。文献[7]提出智能配电网信息物理融合保护系统。由于信息系统易受到网络攻击,通过对计算机和数据网络的可靠性估计^[8-9],一种端对端的实时 CPPS 测试平台研究了不同信息攻击下的反应^[10]。能够准确地模拟 CPPS 动态行为的测试平台成为 CPPS 中信息系统与电力系统交互影响分析的最佳工具。通过信息通信技术^[11-12]和时间同步策略^[13]等方法,建立信息物理联合仿真平台将电力系统仿真器和离散事件信息仿真器融合在一起,实现电力系统和信息通信系统的协调仿真^[14],为 CPPS 安全控制策略研究提供有效的测试和校验工具。

信息物理系统可以实现对大规模复杂系统和广域环境的实时感知与动态监控,并提供相应的网络信息服务。以 PMU 为基础的广域测量系统(Wide-Area Measurement Systems, WAMS)具有近实时同步测量、通信、状态监测与在线控制等功能,为 CPPS 在输电网络中的实现奠定了软硬件基础。随着电网互联和新能源发电并网等电网技术的不断发展,基于 WAMS 的 CPPS 技术研究成为当前的热点问题,为区域电网互联后系统阻尼降低^[15-16]和广域继电保护与控制^[17]等诸多问题提供可靠而有效的解决途径。针对大电网互联后系统阻尼降低问题,许多学者提出了基于广域测量信息的互联电网分析方法,文献[18]利用 WAMS 历史数据分析联络线功率扰动机理及其概率,文献[19]提出了基于广域信息的发电机电压控制方法来抑制区间低频振荡。本文利用 WAMS 测量数据辨识出电力系统物理信息模型,并基于预测控制算法在线优化阻尼控制器输出值,来抑制区间低频振荡。

目前,对广域电网阻尼控制的研究大部分都考虑了确定网络延时对控制性能的影响,但不能真实反映信息系统的随机行为。本文将从 CPPS 理论出发,结合系统建模、广域阻尼控制器设计并联合仿真分析,研究 CPPS 中信息系统对广域电网阻尼控制性能的影响。考虑到信息通信质量会影响整个 CPPS 的控制性能,本文还针对通信延时、数据包丢失和乱序等现象设计了补偿机制。

1 CPPS 广域控制系统结构

实际电网中,广域控制系统基于广域测量信号实时跟踪检测和分析电网动态过程,进行广域保护与自适应控制^[20]。依据文献[4-6]对 CPPS 基本架构的详细讨论,一般将 CPPS 分为物理层、通信网络层和电网监测控制中心的三层结构, CPPS 广域控制系统的结构如图 1 所示。物理层即实际电力系统,

实现感知和执行控制决策功能;控制中心扮演着电力系统调度中心的角色,进行决策分析;通信网络连接着物理系统和信息系统。

CPPS 电网监测控制中心通过通信网络获得电力系统的广域测量信息,并进行电网稳定分析与智能协调决策。决策命令通过网络反馈回电力系统保护控制单元,实现信息空间虚拟网络和物理空间实体网络的协调与控制。CPPS 将通信、计算、控制技术与物理系统进行了深度融合,实现对物理系统可靠、实时和高效的监测与控制。

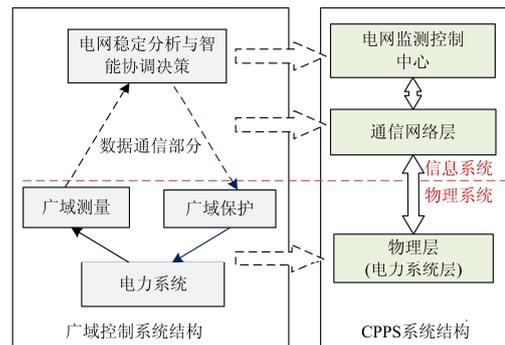


图 1 CPPS 广域控制系统结构图

Fig. 1 Architecture of wide-area control system under CPPS

2 CPPS 广域阻尼控制策略与联合仿真

2.1 CPPS 广域阻尼控制策略

图 2 所示为 CPPS 广域阻尼闭环控制系统。监测控制中心采集电力系统广域测量信息,并予以状态分析和控制决策,得到的控制信号返回电力系统,从而构成感知、决策和控制的闭环反馈系统,实现物理-信息-物理过程的交互。本文的广域阻尼控制(Wide-Area Damping Control, WADC)策略由模型参数在线辨识模块和预测控制模块组成,并结合通信补偿机制来应对信息通信系统的不良影响。

2.1.1 模型参数在线辨识

基于电力系统实时输入输出数据,本文采用可变遗忘因子的递推增广最小二乘估计对电力系统模型参数进行在线辨识,能实时跟踪不同运行条件下系统参数的变化,从而不断修正系统模型^[21]。模型参数在线辨识算法公式为

$$\begin{cases} \eta(k) = y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \\ K(k) = P(k-1)\varphi(k)[1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)]^{-1} \\ \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)\eta(k) \\ P(k) = [I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1) / \lambda(k) \\ \lambda(k) = 1 - [1 - \phi(k)^T K(k)][\eta(k)]^2 / \sum_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

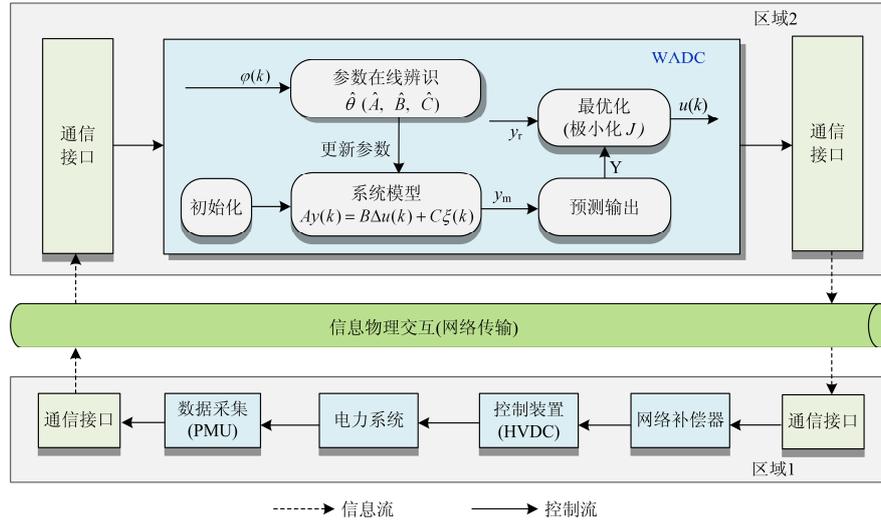


图2 CPPS 广域阻尼闭环控制系统

Fig. 2 Wide-area damping closed-loop control system of CPPS

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varphi}(k) = [-y(k-1), \dots, y(k-n_a), \Delta u(k-d), \dots, \\ \Delta u(k-n_b-d)] \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{n_a}, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_{n_b}]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\boldsymbol{\varphi}(k)$ 为输入、输出组成的数据向量； $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 为待估计参数向量。

2.1.2 GPC 算法

广义预测控制(Generalized Predictive Control, GPC)以其良好的鲁棒性和适应性广泛应用于工业过程控制中。通常采用受控自回归滑动积分模型(Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average, CARIMA)来描述被控系统的动态行为^[21-22]

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})\Delta u(k) + C(z^{-1})\xi(k) \quad (3)$$

且有多项式

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

式中： d 为被控对象的纯延时； $y(k) \in R^{n_a \times 1}$ ， $\Delta u(k) \in R^{n_b \times 1}$ ， $\xi(k) \in R^{n_c \times 1}$ ，分别为系统的输出、控制输入增量和白噪声序列；多项式 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 的阶次分别为 n_a 、 n_b 和 n_c ，且 $b_0 \neq 0$ 。

为了简化处理，令 $C(z^{-1})=1$ ，通过求解 Diophantine 方程可以得到系统未来时刻的输出预测模型为

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}_m + \mathbf{G}\Delta \mathbf{U} \quad (4)$$

式中：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Y}} &= [\hat{y}(k+d|k), \hat{y}(k+d+1|k), \dots, \hat{y}(k+d+N|k)]^T \\ \mathbf{Y}_m &= [y_m(k+d), y_m(k+d+1), \dots, y_m(k+d+N)]^T \\ \Delta \mathbf{U} &= [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+N_u-d)]^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{N-d+1} & b_{N-d} & \dots & b_1 \end{bmatrix}$$

其中： N 为预测长度； N_u 为控制长度。

定义目标函数如式(5)。

$$J = E\{(\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}_r)^T \mathbf{R}(\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}_r) + \Delta \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{U}\} \quad (5)$$

式中： \mathbf{R} 、 \mathbf{Q} 为加权矩阵； \mathbf{Y}_r 为输出参考轨迹。

通过极小化上述目标函数，得到最优控制输入增量 $\Delta \mathbf{U}$ 和当前时刻的控制输出 $u(k)$ 为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{U} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{Y}_r - \mathbf{Y}_m) \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (6)$$

2.1.3 网络补偿机制

由于数据在传输过程中可能会出现数据延时、丢包和乱序等现象，这会降低电力系统的控制性能，严重时甚至会威胁到电力系统的稳定运行。为此，本文建立了延时、丢包及乱序的通信补偿机制。

延时补偿机制包括两个部分：一是在信息系统中时序序列的循环产生方法；二是在物理系统中的网络补偿器。文献[23]中定义了往返通信延时(Round-Trip Time delay, RTT)，通过比较电网侧当前时间 t 和最新时序序列的时标 t_s ，得到 RTT 延时 t_r 为

$$t_r = \left\lceil \frac{t - t_s}{T_s} \right\rceil, \quad [\] \text{为取整函数} \quad (7)$$

物理系统中的网络补偿器依据 RTT 延时, 从接收到的控制序列 $U(t_s)$ 中选择合适的控制信号如式(8)。

$$u(t) = u(t_s + t_r | t_s) = u(t | t_s) \quad (8)$$

本文中, 若数据在传输过程中产生丢包, 意味着当前时刻物理系统接收不到最新控制序列。为应对这一问题, 当系统产生间隔丢包或者连续丢包时, 将它等效为延时问题处理, 系统将从缓存中已存在的最新控制序列中选择控制信号。选择方法如图 3 所示, i 为连续丢包个数, 且 $i \leq N_u - t_r$ 。

针对数据传输过程中的乱序现象, 将当前数据包的采样时刻与缓存中已有数据包的采样时刻进行比较, 只有当前者在时间上晚于后者时, 数据包才被采用。

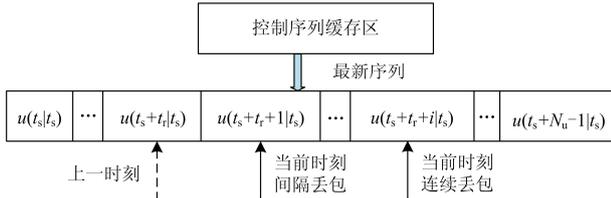


图 3 丢包时的控制信号选择方法

Fig. 3 Control signal selection method for packet loss

2.2 CPPS 广域阻尼控制联合仿真

由于电力系统是连续时间模型, 而信息系统是离散事件模型, 传统的仿真是割裂开的, 无法考虑它们之间的联系。目前, 一种更实际可行的 CPPS 仿真方法就是集成已有的电力系统和信息通信系统仿真, 通过协同运作, 实现连续时间系统和离散事件系统动态过程独立仿真和信息交互的功能^[10,13]。

依据 CPPS 结构与信息耦合的特点, 本文采用 Matlab 和 Visual Studio 搭建联合仿真平台, 分别仿真电力系统动态行为和信息通信系统的监测与控制功能, 实现 CPPS 广域阻尼控制联合仿真。目前, WAMS 主站与其他系统的通信方式采用 TCP/IP 的方式^[24]。鉴于此, 本文通过 Internet 实现信息物理系统之间的数据传输。由于 Matlab 和 Visual Studio 基于不同的触发方式进行工作, 它们之间还存在时间同步问题。本文中, 以物理系统时间为主, 采用主从方式的时间同步机制^[25], 来确保物理系统和信息系统时间上同步, 时间同步机制如图 4 所示。该联合仿真模型不需要事先规划好操作行程, 事件可以在任意时刻被触发或执行, 能有效模拟实际电力信息系统策略。

CPPS 广域阻尼控制流程如图 5 所示。物理电

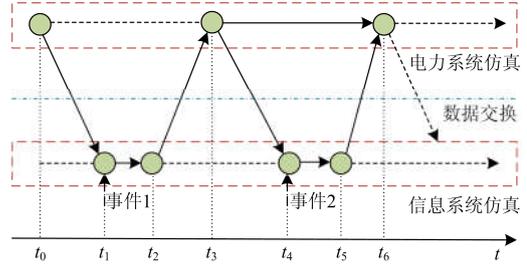


图 4 主从时间同步机制

Fig. 4 Master-slave time synchronization mechanism

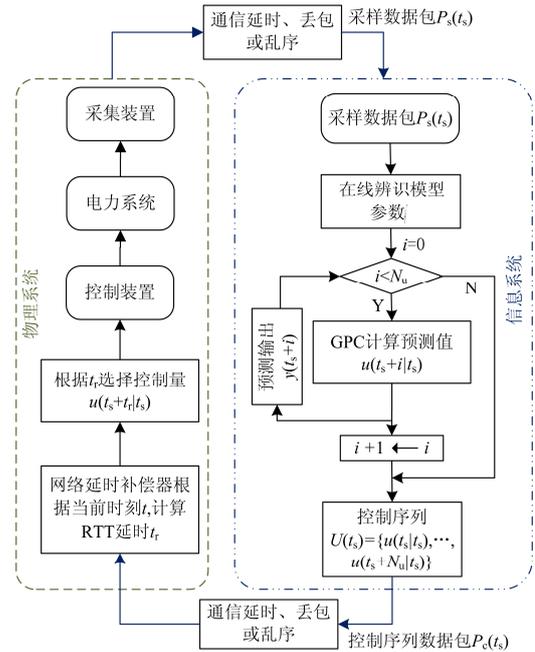


图 5 CPPS 广域阻尼控制流程

Fig. 5 Wide-area damping control flowchart of CPPS

网将当前与历史时刻的输入输出及采样时间压缩成数据包 $P_s(t_s)$ 进行传送, 控制中心根据接收到的数据包进行分析。主要分为以下步骤:

- 1) 选择接收到的最新采样数据包 $P_s(t_s)$, 利用第 2.1.1 节的辨识算法在线辨识电力系统模型参数。
- 2) 更新系统模型, 根据第 2.1.2 中的广义预测控制算法, 产生当前时刻的控制输出 $u(t_s | t_s)$, 并预测下一时刻的系统输出 $y(t_s + 1)$, 更新系统的输入输出数据。
- 3) 重复步骤 2), 继续预测下一时刻的输出, 直至产生完整的控制序列 $U(t_s)$, 即 $[u(t_s | t_s), u(t_s + 1 | t_s), \dots, u(t_s + N_u - 1 | t_s)]$ 。
- 4) 将控制序列 $U(t_s)$ 与采样时间一起打包成数据包 $P_c(t_s)$, 发往电力系统, 由第 2.1.3 节中的网络补偿器选择合适的控制信号给控制装置。

3 仿真算例

为了验证 CPPS 联合仿真平台的可行性及广域

阻尼控制策略的有效性, 本文采用含 HVDC 输电线路的 16 机 5 区互联电力系统进行仿真, 如图 6 所示, 该系统的参数详见参考文献[26]。

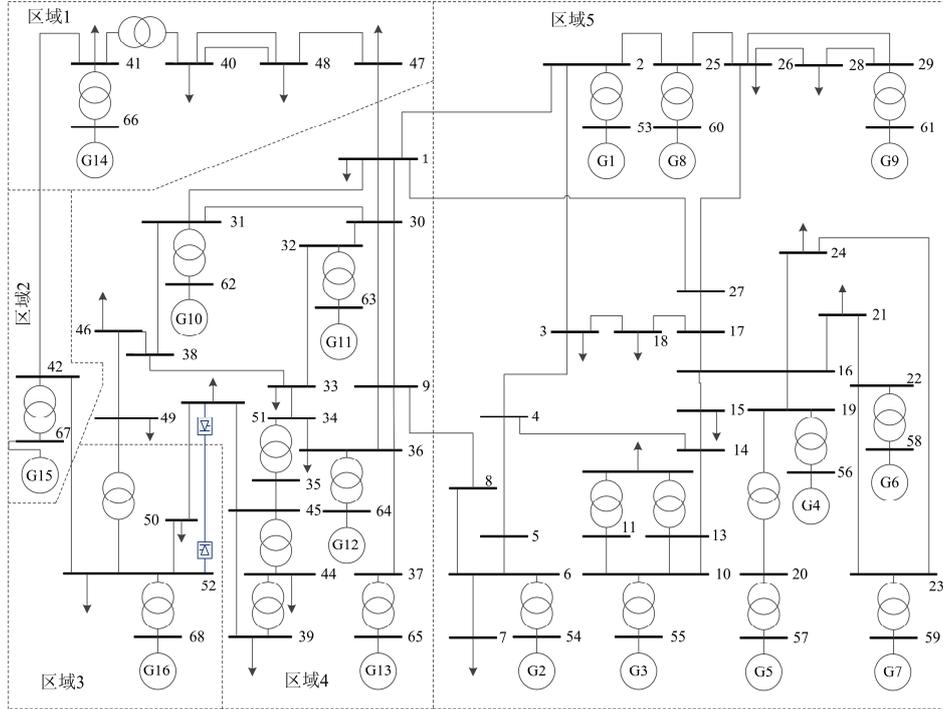


图 6 含 HVDC 输电线路的 16 机 5 区测试系统

Fig. 6 16-machine 5-area interconnected system with HVDC interconnector line

为了便于控制器设计, 本文采用模态分析法获得包含主要振荡模态的 16 机 5 区系统的线性化模型^[26]。线性化后的模型阶次为 202 阶, 存在振荡频率 $f=0.5777$ Hz 和阻尼比 $\rho=0.0152$ 的不稳定低频振荡模态。为了进一步减少仿真计算量, 采用平衡截断模型降阶方法^[26]得到了 8 阶的线性降阶模型。系统降阶模型与全阶模型的幅频特性比较如图 7 所示, 在低频区域 ($f < 10$ Hz), 降阶模型与全阶模型的幅频响应基本一致。因此, 可用降阶模型进行广域阻尼控制器的设计。

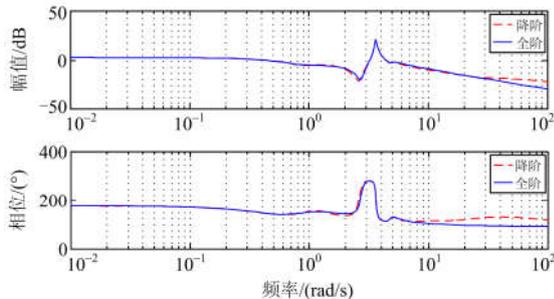


图 7 降阶前后系统的幅频特性比较

Fig. 7 Comparison of bode diagram of the full- and the reduced-order system

本文采用线路 52-68 上的有功功率 $P_{\text{line52-68}}$ 作为被控系统的输出 y , WADC 产生的控制量 u 作为被控系统的输入, 并将 u 以补偿控制信号的形式施加给 HVDC 换流器, 通过调节线路功率来抑制系统中的低频振荡。本文选取 WADC 的控制参数为: 预测长度 $N=20$, 控制加权矩阵 $R=Q=I_{N-d+1}$, 采样周期 $T_s=0.1$ s, 最大控制长度 $N_u=15$, $\sum_0=1$, 辨识参数初值为 -0.2 。为了避免对 HVDC 换流器产生过度的干扰, WADC 的控制输出限制为 ± 0.1 p.u.。

为了进一步说明本文提出的 WADC 的控制效果, 将它与参考文献[27]中的模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)方法进行比较。其中, MPC 不考虑通信延时, 即在系统无延时情况下进行仿真, 控制参数参考文献[27]。

在 HVDC 靠近节点 52 处的换流站定电流控制器上施加一个小扰动。扰动于 3.0 s 时刻投入, 持续时间 0.1 s。系统模型参数在线辨识的结果如图 8 所示, 图 8(a)、图 8(b)分别为式(3)所述模型的多项式参数 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 辨识结果, 当外部扰动投入系统后, 参数在线辨识模块能迅速辨识并更新模型参数, 过渡到一个新的稳定值。可以看出, 本文采用的模型参数在线辨识算法能动态地跟踪系统变化, 为

WADC 控制器提供更为精确的预测模型。

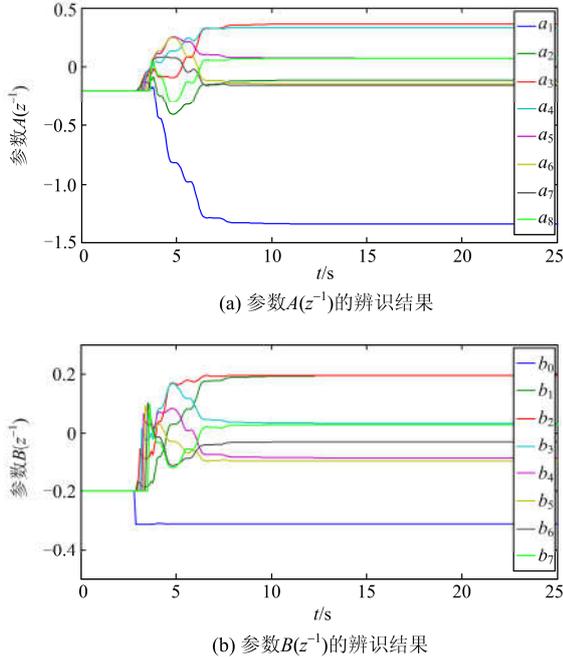


图 8 系统参数在线辨识结果

Fig. 8 Online identification of system parameters

由于电力系统和监测控制中心位于不同区域，它们之间通过实际的 Internet 网络进行数据交换。因此，监测控制中心和电力系统控制装置接收的信息都存在时变时滞。联合仿真测得的随机通信延时如图 9 所示，扰动发生时，系统采样数据骤增，延时比较大，当系统逐渐稳定下来后，系统通信量减少，延时也相对减小了，通常在 1 s 内动态变化。由于 Matlab 不能实时仿真动态电力系统，以至于实际通信网络带来的延时体现不出对电力系统的影响。因此，在电力系统仿真中加入一个随机延时模块来模拟通信延时的变化。

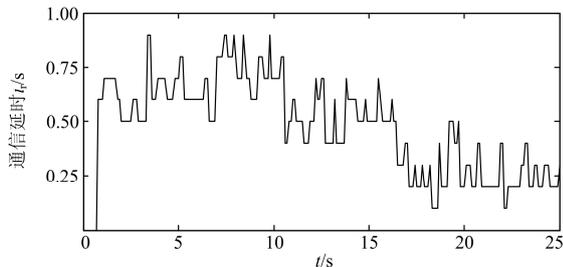


图 9 通信网络随机时滞测量结果

Fig. 9 Random time-delay measurement of communication network

系统在随机时滞下的动态响应仿真结果如图 10 和图 11 所示。在 $t=3$ s 时，加入扰动，若不对系统进行任何控制，线路 52-68 上的功率 $P_{\text{line}52-68}$ 会一

直振荡。若系统有控制器投入，扰动发生后，控制器将开始不断输出预测控制量。当系统存在时滞时，具有延时补偿机制的 WADC 能使线路功率振荡在 $t=13$ s 之后重新稳定在 40.3 p.u.。同时，在延时补偿机制的作用下，WADC 完全能达到系统无延时情况下 MPC 的控制效果。由此表明，WADC 能很快地抑制扰动引起的区间低频振荡，具备良好的阻尼性能。但是，若系统存在时滞但不采取任何补偿措施，扰动发生之后，系统的低频振荡则不能较快地被抑制，还会引发更大的振荡，如图 10 所示。由此可见，时滞对 CPPS 的控制性能至关重要，有必要对时滞加以补偿，而本文设计的延时补偿机制恰好能大大提升系统的稳定控制。

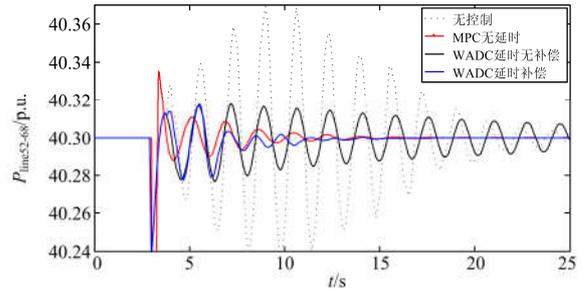


图 10 联络线上潮流 $P_{\text{line}52-68}$ 的响应曲线

Fig. 10 Power flow response of tie line $P_{\text{line}52-68}$

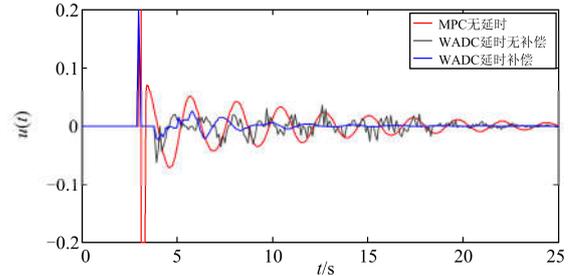


图 11 控制器的输出值

Fig. 11 Output of wide-area damping controller

4 结论

CPPS 以物流与信息流高度耦合为特征，其稳定性控制方法必须考虑物理系统与信息通信系统的交互影响，联合仿真是分析其交互影响的有效方法。因此，本文根据 CPPS 的特征，利用 Matlab 以及 Visual Studio 工具，搭建了 CPPS 联合仿真模型，来验证提出的电网广域阻尼控制策略。该策略不仅能在在线修正系统模型参数，还能对通信系统的延时、丢包以及无序现象进行补偿。16 机 5 区系统的 CPPS 联合仿真结果表明，通信网络延时会严重降低系统的控制性能，但具有延时补偿机制的广域阻尼控制

策略能有效克服其带来的不利影响。同时也验证了CPPS联合仿真模型的有效性,可用该联合仿真模型来研究信息系统对物理系统的影响。但是,对不同网络以及网络严重阻塞的情况还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等.中国未来电网的发展模式和关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 张根周.大数据在智能电网领域的应用[J].电网与清洁能源,2016,32(6):114-117.
ZHANG Genzhou. Applications of big data in the field of smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 114-117.
- [3] SHI X, LI Y, CAO Y, et al. Cyber-physical electrical energy systems: challenges and issues[J]. Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 36-42.
- [4] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等.CPPS的架构及其实现技术与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(16):1-7.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. The architecture of cyber-physical power systems and its realisation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.
- [5] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等.电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J].电力系统自动化,2011,35(16):1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [6] XIN S, GUO Q, SUN H, et al. Cyber-physical modeling and cyber-contingency assessment of hierarchical control systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2375-2385.
- [7] 庄伟,牟龙华.智能配电网信息物理融合保护系统的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(4):113-118.
ZHUANG Wei, MU Longhua. Study on cyber-physical relaying protection system of intelligent distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 113-118.
- [8] 黎斌,杨小梅.计算机网络对智能电网安全的有效保护机制分析[J].电网与清洁能源,2016,32(7):101-105.
LI Bin, YANG Xiaomei. Analysis of effective security protection mechanism of smart grid in computer network[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 101-105.
- [9] 李俊刚,张爱民,张杭,等.广域保护系统数据网络可靠性评估[J].电工技术学报,2015,30(12):344-350.
LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.
- [10] VELLAI THURAI C B, BISWAS S S, SRIVASTAVA A K. Development and application of a real-time test bed for cyber-physical system[J]. IEEE Systems Journal, 2015: 1-12.
- [11] STEFANOV A, LIU C. ICT modeling for integrated simulation of cyber physical power systems[C] // Proceedings of 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), Berlin, Germany, 2012.
- [12] GEORG H, MULLER S, REHTANZ C, et al. Analyzing cyber-physical energy systems: the INSPIRE co-simulation of power and ICT systems using HLA[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2364-2373.
- [13] 盛成玉,高海翔,陈颖,等.信息物理电力系统耦合网络仿真综述及展望[J].电网技术,2012,36(12):100-105.
SHENG Chengyu, GAO Haixiang, CHEN Ying, et al. Summary and prospect of cyber physical power system simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 100-105.
- [14] HUA L, VEDA S, SHULKA S, et al. GECO: global event-driven co-simulation framework for interconnected power system and communication network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1444-1456.
- [15] 程云峰,张欣然,陆超.广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J].电力系统保护与控制,2014,42(4):145-153.
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [16] 赵妍,李志民,李天云.低频振荡模态参数辨识的共振稀疏分解 SSI 分析方法[J].电工技术学报,2016,31(2):136-144.
ZHAO Yan, LI Zhimin, LI Tianyun. Low frequency oscillation modal parameter identification using resonance-based sparse signal decomposition and SSI method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 136-144.

- [17] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0023-z
- [18] 赵红生, 刘源, 陈伟彪, 等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1-9.
ZHAO Hongsheng, LIU Yuan, CHEN Weibiao, et al. Fluctuation mechanism of tie-line active power of interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 1-9.
- [19] 项丽, 鲍颜红, 耿天翔, 等. 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 18-22.
XIANG Li, BAO Yanhong, GENG Tianxiang, et al. Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 18-22.
- [20] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122.
LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.
- [21] 庞中华, 崔红. 系统辨识与自适应控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 137-174.
- [22] YAO W, JIANG L, WEN J, et al. Wide-area damping controller for power system inter-area oscillations: a networked predictive control approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(1): 27-36.
- [23] HU W, LIU G, DAVID R. Networked predictive control over the internet using round-trip delay measurement[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(10): 2231-2241.
- [24] 王英涛. 智能电网广域监测分析与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 3-22.
- [25] LI W, FERDOWSI M, STEVIC M, et al. Co-simulation for smart grid communications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2374-2384.
- [26] ROGERS G. Power system oscillations[M]. Norwell, MA: Kluwer, 2000.
- [27] SHI X, LI Y, CAO Y, et al. Model predictive control considering cyber-physical system to dampen low frequency oscillation of interconnected power systems[C] // Power and Energy Engineering Conference: IEEE, 2015.

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2016-12-13

作者简介:

李霞(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为广域电网稳定性控制; E-mail: 970191113@qq.com

李勇(1983—), 男, 通信作者, 博士研究生, 教授, 研究方向为电力系统优化与控制, 电能质量分析与控制。E-mail: liyong1881@163.com

(编辑 葛艳娜)