

电力系统低频振荡分析与控制仿真平台

叶 华,刘玉田

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:提出一种大规模电力系统的低频振荡分析与控制仿真平台的构建方法。利用 C++ 矩阵数学库,编写实现低频振荡特征提取、模型辨识和控制器设计等功能的用户程序。基于电力系统分析软件提供的用户程序接口功能模块,实现用户程序与分析软件暂态稳定仿真模块的交互。用户程序和分析软件共同完成电力系统低频振荡分析与控制的仿真。仿真平台具有较好的收敛性、准确性、可靠性和较快的计算速度。新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真结果验证了平台的可用性和正确性。

关键词:辨识; 阻尼控制; 自适应控制; 用户程序接口; 广域测量系统

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0037-05

0 引言

在电力系统低频振荡研究中,时域仿真法通常和其他分析方法(如平衡点特征值法和基于辨识(信号处理)的方法等)结合起来运用,从受扰轨迹中提取振荡特性^[1]或辨识模型^[2],或在非线性模型和大扰动条件下对基于线性化模型设计的阻尼控制器进行时域仿真校验。显然,前者属于开环情况,可以在仿真结束后离线进行;后者在每个积分时步内按照预设的控制策略计算控制量并实施反馈,属于闭环情况。

然而,在闭环情况下,复杂的阻尼控制策略往往难以嵌入仿真程序进行校验。按照所采用的数值仿真工具进行划分,主要有 2 种方法模拟阻尼控制策略:

a. 部分商业软件为了增加软件的开放性和使用的灵活性而提供的接口功能,如电力系统分析综合

程序(PSASP)和 PSCAD/EMTDC 的用户程序接口(UPI)^[3-4],PSS/E 的 IPLAN^[5]等;

b. Matlab Simulink 的 s 函数(s-function)^[6],和基于 Matlab 且代码完全开放的电力系统工具箱,如 PST^①和 PSAT^[7]。

方法 **a** 通过接口变量与用户程序 UP(User's Program)进行交互,形成“分别求解、交换变量、迭代收敛”的方式。在方法 **b** 中,UP 可方便灵活地与原有程序和模型实现联立或交替求解。对于中等及以上规模的电力系统,方法 **b** 可能会面临计算速度和可靠性方面的问题。

基于商业电力系统分析软件,本文为电力系统的低频振荡分析和控制研究建立了仿真平台。该平台可进行大规模电力系统的低频振荡分析、阻尼控制器设计和闭环校验仿真。基于 PSASP/UPI,结合 C++ 矩阵数学库,介绍了仿真平台的技术架构。最后

收稿日期:2010-03-30;修回日期:2010-06-19

基金项目:山东省博士后创新基金资助项目(200903062);山东大学自主创新基金资助项目

① ROGERS G. Power system toolbox user guide. Colborne, ON, Canada:Cherry Tree Scientific Software,1999.

用新英格兰 10 机 39 节点算例系统验证了仿真平台的可用性和正确性。

1 仿真平台设计

1.1 平台的基本功能模块

整个平台包含 2 个主要的功能模块:基于辨识方法的低频振荡分析(特征提取/模型辨识)和阻尼控制器设计。

基于辨识的低频振荡分析,是将受扰轨迹视为某些频率、振幅(或阻尼)按特定规律变化的信号组合,然后从中提取及识别各振荡分量的频率、振幅(或阻尼)。实测(或仿真)的时间响应曲线完整地反映了物理系统(或数学模型)及实际扰动(或仿真场景)中所有非自治和非线性因素对动态行为的影响^[8],因此,基于辨识的低频振荡分析成为传统的对系统在平衡点处进行特征值分析之外的另一种有效方法。根据不同的视角,如采样信号类型(扰动信号/运行数据/平稳/非平稳)、算法对数据的处理方式(块处理/递推)、辨识所得模型的类型(非参数模型/传递函数/状态空间)以及算法的应用环境(开环/闭环),可以将目前电力系统低频振荡分析和监控研究中常用的辨识算法进行分类^[9]。其中,对平台设计影响最大的是辨识算法的应用环境。如果算法应用在闭环情况下,在提取得到振荡特征和系统模型后,还可以运用一定的策略更新控制器参数,以获得更好的适应性。

控制器设计模块主要是利用离线辨识或降阶,以及在线辨识得到的系统模型,设计基于各种策略的阻尼控制器,并进行反馈控制,改善系统的动态性能。

1.2 平台的技术架构

图 1 展示了平台的技术架构。由图可知,平台包含了 3 个模块和 4 个接口。其中,电力系统仿真分析软件用来实现潮流计算和暂态仿真,是整个平台的基础。下面主要介绍 UPI、矩阵数学库和用户程序。

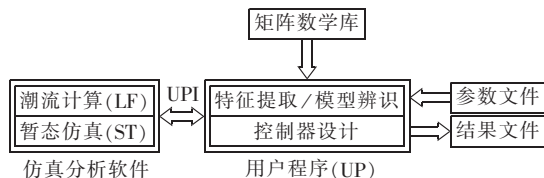


图 1 平台的技术架构

Fig.1 Architecture of simulation platform

UPI 指仿真分析软件 and 用户程序之间的接口,实现两者间的交替运行,以共同完成一个计算任务。图 2 展示了 PSASP 暂态稳定计算程序(ST)和 UP 在 1 个积分时段内的计算过程^①。图中, $F(\cdot)$ 、 $G(\cdot)$ 和 $H(\cdot)$ 分别表示描述系统中动态元件特性的微分方程组、描述电力网络及各元件电压和电流关系的代数方程组、用户方程; X 、 Y 和 U 分别表示系统的状态变量、运行参量和用户变量; M 为 ST 对 UP 的计算指示标记,其值为 1、-1 时分别表示迭代收敛和未

收敛; N_i 为积分时段数; K 为 1 个积分时段内迭代的次数; ε 为收敛常数。

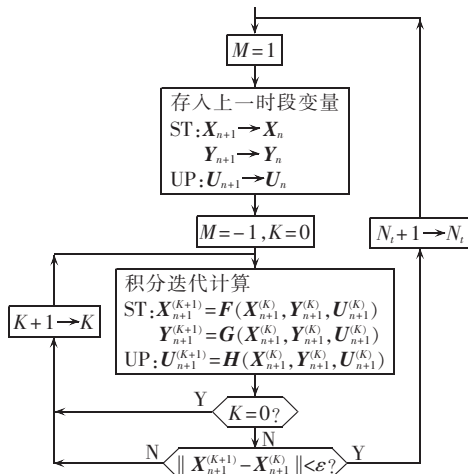


图 2 ST 和 UP 1 个积分时段的计算过程

Fig.2 Flowchart of ST and UP for an integral interval

矩阵数学库是指一组执行向量和矩阵运算的子程序集合。常见的数值计算库都含有矩阵数学库,如 LAPACK、BLAS 和 Intel MKL 等。C++ 矩阵数学库 Matrix <LIB> 是世界上最早的 Matlab 到 C++ 编译器 Matcom 的内核。该库函数重载了常用的运算符,如矩阵的加、减、乘、除运算符,并提供线性代数、多项式数学、信号处理、数值优化、绘图等方面的大量函数^[10]。使用 Matrix <LIB> 的优势主要有 2 点:其大多数函数的原型类似于 Matlab 函数,因此可以在 C++ 环境中直接按照 Matlab 的语法风格编写代码,实现高效率的矩阵运算;利用 Matcom 可实现 Matlab 的 M 代码向 C++ 代码的转换,从而实现代码的高效移植。

UP 用来实现仿真平台的 2 个基本功能模块。将图 2 所示的 1 个积分时段内 UP 的计算进行具体实现,可得如图 3 所示的主要流程。图中数组 F_1 和 F_2 分别存储 ST 传递给 UP 和 UP 传递给 ST 的数据。

当 $M=0$ (即对应仿真时刻为 0)时,UP 主要完成以下操作:

- 根据参数组号从参数文件中读取相应参数;
- 表 1 列出了几种仿真模式(S_{mode})和所实现的功能,当 S_{mode} 取 4~7 时,生成激励信号和测量噪声序列;
- 由数组 F_1 计算初始值,并初始化用户变量。

当 $M=-1$ 时,UP 主要完成以下操作:

- 对采样信号进行去直处理;
- 进行隐式梯形积分,计算电力系统稳定器(PSS)的输出 U_{sl} ;
- 根据控制器类型(C_{type} ,固定参数或自适应控制器)以及是否考虑反馈信号时滞的影响,计算附加阻尼控制量 U_{sg} ;

① 中国电力科学研究院. 电力系统综合分析程序用户使用手册. 2003.

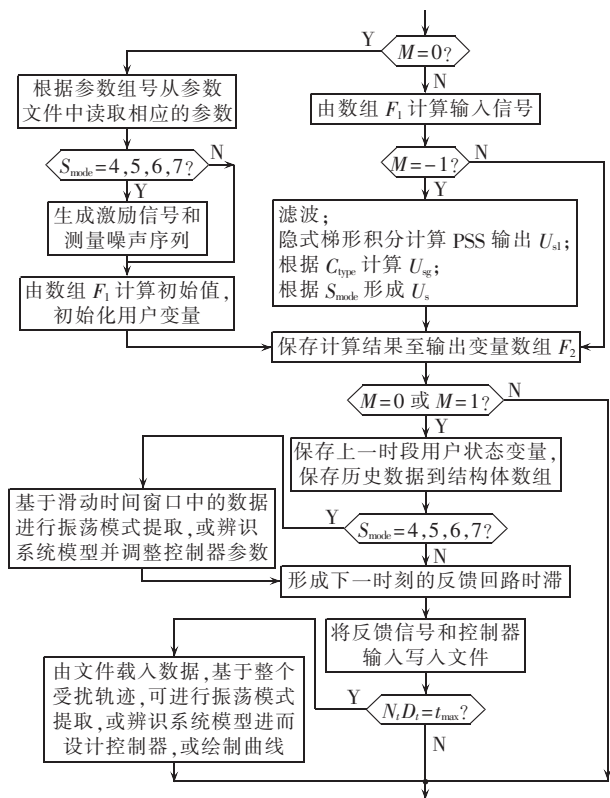


图 3 用户程序的流程

Fig.3 Flowchart of user's program

表 1 S_{mode} 参数说明

Tab.1 Parameter description of S_{mode}

S_{mode}	U_s	功能说明
1	U_d	PSS
2	U_q	固定参数控制器
3	$U_d + U_q$	PSS+固定参数控制器
4	激励信号	无控制器下的开环辨识
5	U_d +激励信号	有 PSS 下的开环辨识
6	U_q +激励信号	U_q 来自固定参数或自适应控制器, 若为前者仅进行开环模型辨识, 否则进行闭环辨识并调整控制器参数
7	$U_d + U_q$ +激励信号	
8	方波激励信号	Prony 分析

d. 根据 S_{mode} 形成总的控制输入 U_s , 如表 1 所示。

当 $M \geq 0$ 时, UP 主要完成以下操作:

a. 保存上一时段用户状态变量, 供下一时段积分计算使用;

b. 将采样信号和控制器输出保存至结构体数组, 用于基于滑动时间窗方式的振荡模式提取或模型辨识, 或用于考虑时滞影响的广域阻尼控制器的控制量计算;

c. 当 S_{mode} 取 4~7 时, 提取振荡模式, 或辨识模型后调整和更新控制器参数;

d. 随机形成下一积分时段内反馈回路的时滞;

e. 当达到仿真时限, 可以基于整个受扰轨迹提取振荡模式, 或辨识系统模型并设计控制器, 或绘制曲线。

由以上分析可知, 该仿真平台具有如下特点:

a. 可以方便地实现低频振荡模式的提取、模型

辨识、考虑时滞影响的固定参数和自适应阻尼控制器的设计与性能验证;

b. UPI 使得可以充分利用商用软件提供的数学模型和功能, 从而整个程序模块(分析软件+用户程序)的收敛性、准确性和可靠性都能得到保证;

c. 采用矩阵数学库 Matrix <LIB> 和 C++ 环境, 方便了既有的 Matlab 的 M 代码向 C 移植, 提高了程序的运行速度。

2 仿真算例

针对新英格兰 10 机 39 节点系统, 基于仿真平台设计了 2 种控制器, 即基于开环辨识设计的线性二次最优部分输出反馈控制器 OFC (Output Feedback Controller)^[11]和基于闭环辨识设计的模型预测控制器 MPC (Model Predictive Controller)^[12], 用以验证平台的可用性与正确性。系统单线图如图 4 所示。发电机采用双轴模型, 励磁系统采用 IEEE DC1A 型模型, 参数详见其用户手册^①。所有发电机都装设 PSS, 其参数见文献[13]。系统的基准容量为 100 MV·A。

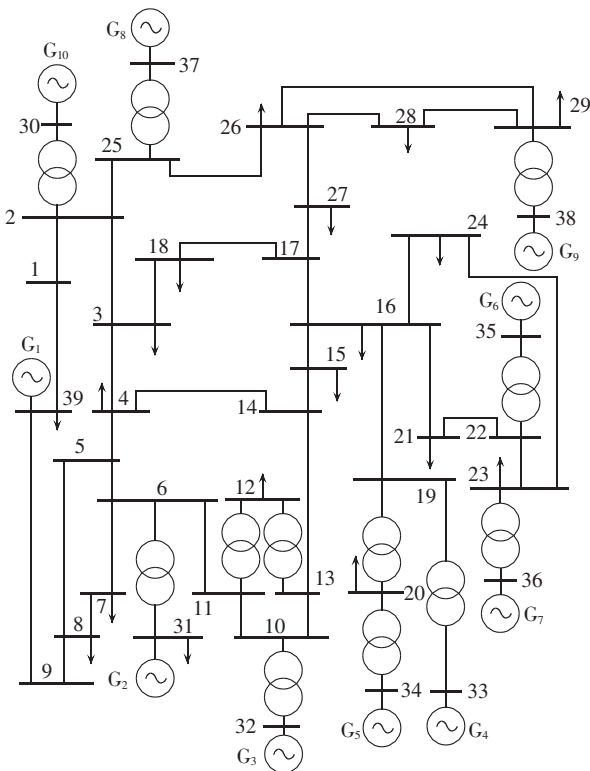


图 4 新英格兰 10 机 39 节点系统图

Fig.4 New England 10-machine 39-bus system

该系统存在 3 个同调机群, 即 (G_2, G_3) , (G_8, G_9, G_{10}) 和 (G_4, G_5, G_6, G_7) 。其中, 机群 (G_4, G_5, G_6, G_7) 所在的电网被联络线 16-15 和 16-17 与系统其他部分分开, 因此将这 2 条线路定义为一个断面。在基本方式下, 断面上的有功功率为 494 MW。经特征值分析

① ROGERS G. Power system toolbox user guide. Colborne, ON, Canada: Cherry Tree Scientific Software, 1999.

可知,系统存在 G_1 相对于 $G_2 \sim G_{10}$ 的区间振荡模式,频率为 0.55 Hz,阻尼比为 6.68 %。因此,考虑在装设 PSS 的基础上,首先选择在第 3 个机群中 G_7 的励磁系统上附加 OFC 或 MPC 以进一步提升系统阻尼。

通过可观和可控性分析^[14],发电机相对转速 ω_{7-1} 和联络线有功功率偏差 ΔP_{4-5} 、 ΔP_{16-17} 和 ΔP_{15-16} 2 类信号被选为反馈信号。2 类信号的尺度变换因子分别为 100 和 1。PSS、OFC 和 MPC 的限幅分别为 ± 0.1 p.u.、 ± 0.2 p.u. 和 ± 0.2 p.u.。在闭环辨识算法^[15]中,带通激励信号的周期为 10 s,频带为 $[0.1, 2]$ Hz,最大幅值为 0.1 p.u.,辨识模型阶数取为 3, Hankel 矩阵的块行数和列数分别为 20 和 300。在 MPC 的目标函数中,2 类输入信号和控制输出的权重分别为 1、5 和 100。信号采样频率为 20 Hz。通过开环辨识得到系统的降阶模型,然后求解矩阵方程组,得到 OFC 的反馈增益阵 $K = [-1.2262, -0.4433, 0.3355, 0.0]$ 。

2.1 系统主导低频振荡模式的辨识

下面以 MPC 中的在线递推闭环辨识算法^[15]为例,验证平台的低频振荡模式辨识、提取功能。

基本方式下, $t = 28$ s 时,线路 3-18 中间发生三相接地短路,0.06 s 后故障消失(记为扰动 1)。图 5 给出了系统矩阵 A 的特征值对应的频率(f)和阻尼比(ξ)。由图可知,闭环辨识算法能够较准确地辨识出系统的主导低频振荡模式对应的频率,而辨识得到的阻尼比与特征值分析存在一定的差异。 ω_{7-1} 和 ΔP_{16-17} 的测量值和估计值如图 6 所示。尽管在振荡

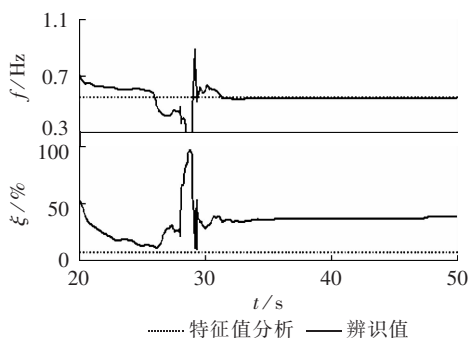


图 5 基本方式下频率和阻尼比的辨识结果

Fig.5 Identified frequency and damping ratio under base operating condition

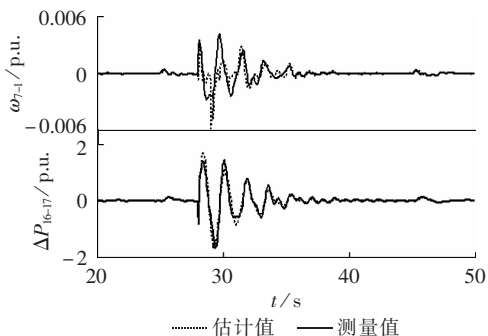


图 6 基本方式下相对转速和线路功率偏差的时域拟合

Fig.6 Time domain fitting of relative rotor speed and line power deviation under base operating condition

模式的辨识上存在一定的误差,但辨识算法通过输入、输出数据进行最小二乘意义下的拟合来求得矩阵 B ,使得辨识估计值和真实测量值之间的拟合误差较小。

2.2 控制器性能仿真

为了进行对比,考虑如下几种情况:

- 所有发电机仅装设 PSS;
- 在 G_7 上附加 OFC;
- 在 G_7 上附加 MPC;
- 在 G_7 上附加 MPC 基础上,在同调机群(G_8, G_9, G_{10})的 G_9 上附加类似的 MPC,反馈信号为 $\Delta\omega_{9-1}$ 、 ΔP_{16-24} 、 ΔP_{13-14} 和 ΔP_{15-16} 。

基本方式下,系统发生扰动 1。图 7 给出了 a、b、c 3 种情况下线路 9-39 上的有功功率曲线。由图可知,附加 MPC 的效果最好,其次是附加 OFC。考虑到闭环辨识算法需要一定长度的数据才能启动,故图中横轴从 $t = 28$ s 开始。

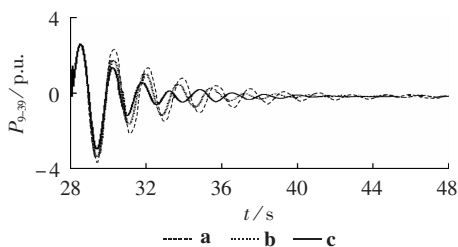


图 7 基本运行方式和扰动 1 下 G_7 在不同控制策略下线路有功功率曲线

Fig.7 Line power curves for different control strategies of G_7 under base operating condition with disturbance 1

当断面潮流为 885 MW 时(记为方式 2), $t = 28$ s 母线 17 发生三相接地短路,0.06 s 后故障消失后(记为扰动 2),图 8 给出了 b、c、d 3 种情况下线路 9-39 上的有功功率曲线。

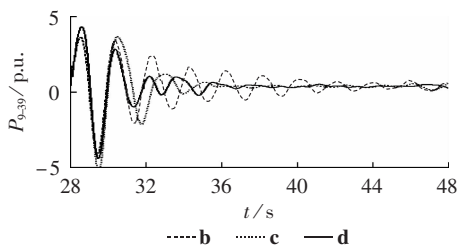


图 8 方式 2 和扰动 2 下 G_7 和 $G_7 + G_9$ 装设 MPC 后线路有功功率曲线

Fig.8 Line power curves for G_7 with MPC and both G_7 and G_9 with MPC under operating condition 2 with disturbance 2

由图可知:

- 在 G_7 和 G_9 上装设 MPC 的效果要优于仅在 G_7 上装设 MPC,这也验证了 MPC 之间具有的相互协调的能力;

- MPC 通过在线辨识模型和更新控制器参数,使得控制器对运行方式具有较好的适应性。

3 结论

基于电力系统分析软件,本文提出了一种大规模电力系统的低频振荡模式提取、模型辨识、阻尼控制器设计和闭环校验的仿真平台构建方法。基于PSASP/UPI,结合矩阵数学库Matrix <LIB>,在C++编程环境下实现了仿真平台。针对新英格兰系统,以2种控制器为例进行了对比仿真,结果表明了平台的可用性和正确性。仿真平台具有较好的可靠性和代码移植的方便性,因而建立的思想和方法可以推广至其他电力系统分析软件和编程环境。

参考文献:

- [1] 郭成,李群湛,王德林. 互联电力系统低频振荡的广域 Prony 分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):69-74.
GUO Cheng,LI Qunzhan,WANG Delin. Wide-area Prony analysis of low frequency oscillation in interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):69-74.
- [2] PIERRE D A,TRUDNOWSKI D J,HAUER J F. Identifying linear reduced-order models for systems with arbitrary initial conditions using Prony signal analysis[J]. IEEE Trans on Automatic Control,1992,37(6):831-835.
- [3] 吴军,吴中习. 最优潮流在 PSASP/UPI 环境下的研究和开发[J]. 电网技术,1997,21(2):70-72,75.
WU Jun,WU Zhongxi. Research and programming of optimal power flow based on power system analysis package with user program interface[J]. Power System Technology,1997,21(2):70-72,75.
- [4] 肖异,尹项根,张哲,等. PSCAD/EMTDC 程序与继电保护仿真模型接口技术及应用[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):64-70.
XIAO Yi,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Interface technique between PSCAD/EMTDC and relay protection simulation model and its application[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):64-70.
- [5] 罗中远,张沛超,郁惟镛,等. 基于 PSS/E 27 的大型电力系统故障分析平台[J]. 继电器,2004,32(9):57-59,67.
LUO Zhongyuan,ZHANG Peichao,YU Weiyong,et al. Fault analysis platform of large power system based on PSS/E 27[J]. Relay,2004,32(9):57-59,67.
- [6] VOURNAS C D,POTAMIANAKIS E G,MOORS C,et al. An educational simulation tool for power system control and stability[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(1):48-55.
- [7] 常勇,徐政,王超. 基于 Matlab 的电力系统分析工具包 PSAT 及

其有效性检验[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):102-105.

- CHANG Yong,XU Zheng,WANG Chao. Matlab-based power system analysis toolbox and its validity check[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(7):102-105.
- [8] 薛禹胜,郝思鹏,刘俊勇,等. 关于低频振荡分析方法的述评[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):1-8.
XUE Yusheng,HAO Sipeng,LIU Junyong,et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(3):1-8.
- [9] 叶华. 大规模电力系统低频振荡分析与广域自适应阻尼控制研究[D]. 济南:山东大学电气工程学院,2009.
YE Hua. Studies on low frequency oscillation analysis and wide-area adaptive control for large scale power systems[D]. Ji'nan: Shandong University,2009.
- [10] 刘维. 精通 Matlab 与 C/C++ 混合程序设计[M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [11] 肖晋宇,谢晓荣,胡志祥,等. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化,2004,28(23):22-27.
XIAO Jinyu,XIE Xiaorong,HU Zhixiang,et al. Power system wide-area damping control based on online system identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(23):22-27.
- [12] 叶华,刘玉田. 基于在线递推闭环子空间辨识的模型预测阻尼控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):55-61.
YE Hua,LIU Yutian. Model predictive damping control based on on-line recursive closed-loop subspace identification[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(28):55-61.
- [13] YUAN S Q,FANG D Z. Robust PSS parameters design using trajectory sensitivity approach[J]. IEEE Trans on Power Systems,2009,24(2):1011-1018.
- [14] YANG Z,BOSE A. Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations[J]. IEEE Trans on Power Systems,2008,23(3):1136-1143.
- [15] 叶华,刘玉田. 电力系统阻尼控制中的在线递推闭环子空间辨识[J]. 电工技术学报,2008,23(12):114-121.
YE Hua,LIU Yutian. On-line recursive closed-loop subspace identification for power system damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(12):114-121.

(编辑:李育燕)

作者简介:

叶华(1981-),男,湖北随州人,讲师,博士,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:yehua@sdu.edu.cn);

刘玉田(1964-),男,山东青州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:liuyt@sdu.edu.cn)。

Simulation platform for power system low frequency oscillation analysis and control

YE Hua,LIU Yutian

(School of Electrical Engineering,Shandong University,Ji'nan 250061,China)

Abstract: A simulation platform of low frequency oscillation analysis and control for large scale power system is constructed. The user's program for low frequency oscillation characteristics extraction, model identification and controller design is programmed with the C++ matrix math library. Based on the UPI(User Programming Interface) functional module of PSASP(Power System Analysis Software Package), user's program communicates with its transient stability simulation functional module. The simulation is cooperatively implemented by user program and PSASP. The simulation platform has excellent performance in convergency, accuracy, reliability and speed, which is verified by the results of the simulation for New England 10-machine 39-bus system.

This work is supported by the Innovation Foundation for Post-Doctor-Fellow of Shandong Province (200903062), and the Independent Innovation Foundation of Shandong University.

Key words: identification; damping control; adaptive control; user programming interface; wide-area measurement system