

电力系统全数字仿真装置在河北电网的应用调试

叶廷路¹, 王晓蔚², 高骏², 范辉²

(1. 武汉大学, 湖北 武汉 430074; 2. 河北省电力研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 介绍了电力系统全数字仿真装置 (ADPSS) 在河北南网的调试和应用情况。电力系统全数字仿真装置的硬件配置包括 PC 机群、功率放大器和物理接口箱。应用电力系统全数字仿真装置可以进行电网稳定分析和安全预警, 可以用于电力系统的各种分析计算。电力系统全数字实时仿真装置的安装和联调工作包括: 机群管理及监控软件功能测试、仿真系统功能测试、仿真装置物理接口箱与接口板卡功能测试、仿真装置外接物理装置试验功能测试。文中详细介绍了仿真装置的联调工作并指出在调试中发现的问题及其解决办法。

关键词: 电力系统全数字仿真装置; 调试; 并行算法; 混合仿真; 问题

Applying and debugging of ADPSS in Hebei electric power grid

YE Ting-lu¹, WANG Xiao-wei², GAO Jun², FAN Hui²

(1. Wuhan University, Wuhan 430074, China; 2. Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The applying and debugging of ADPSS in Hebei electric power grid is presented. The Advanced Digital Power System Simulator (ADPSS) can be applied in the electric power stability analysis and dynamic security assessment system. ADPSS includes PC cluster and power supply amplifier system. The debugging of ADPSS includes the test of PC cluster management software and monitor software. The experiment is carried on when the simulator is connected with physical devices. The problem encountered when debugging and their solutions are introduced in detail. At present the installation and debugging of power system digital simulation laboratory in Hebei have been finished. It is to be made use of and it will be running -in test for one year.

Key words: ADPSS; debugging; parallel algorithms; hybrid simulation; problem

中图分类号: TM743 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)13-0104-05

0 引言

在特高压电网建设和全国互联电网形成的背景下, 为了深入开展大电网互联问题的研究, 提高电力系统稳定分析计算的能力, 争取在大规模互联电网运行动态特性分析、区间电能交换与控制技术和区域电网稳定性与安全性预测等研究领域有所作为, 河北省电力公司决定建设河北南网全数字实时仿真实验室^[1~3]。河北南网全数字实时仿真实验室可以进行电网稳定分析和安全预警、电网规划的运行方式校核和承担电网二次系统的性能评估, 可以用于电力系统的各种分析计算, 如: 潮流、暂态稳定、电压稳定、小干扰稳定等批量任务的并行计算, 可以在机器级和 CPU 级上并列执行。和过去的单个计算机单进程串行执行计算的相比, 极大地提高了电力分析计算的效率, 有效提升对电网稳定分析计算的能力^[4,5]。

1 仿真实验室的硬件配置

河北南网全数字实时仿真实验室的核心设备为电力系统全数字仿真装置 (ADPSS)。河北南网全数字实时仿真实验室的外观图和电力系统全数字仿真装置硬件架构图如图 1、图 2 所示。

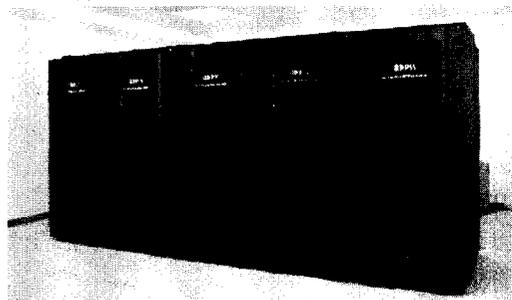


图 1 河北南网数字仿真实验室外观图

Fig.1 The appearance of power system digital simulation laboratory

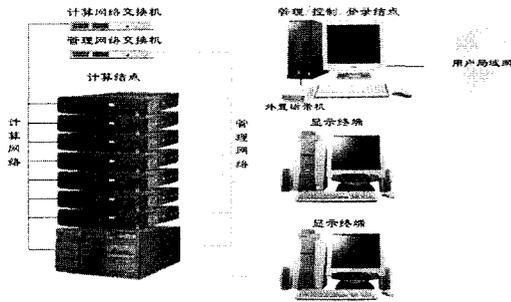


图 2 电力系统全数字仿真装置硬件架构

Fig.2 The hardware structure of advanced digital power system simulator

电力系统全数字仿真装置是基于高性能 PC 机群的全数字仿真系统。该仿真装置利用机群的多节点结构和高速本地通讯网络,采用网络并行计算技术对计算任务进行分解,并对进程进行实时和同步控制,实现了大规模复杂交、直流电力系统机电暂态和电磁暂态的实时和超实时仿真以及外接物理装置实验。利用该仿真装置可以进行 1000 台机组,5000 至 10000 个节点的大系统交、直流电力系统机电暂态仿真以及机电、电磁暂态混合仿真研究,可以联接 SCADA 和 EMS 系统以接收系统远方实时数据、联接相量测量装置以接收经全球定位的系统实测物理量(电量和数字量),接入继电保护、稳定控制装置和直流输电控制装置等实际物理装置进行实时仿真试验,接入 MATLAB 等商用软件进行局部和子任务计算,接入用户自定义模型以完成用户指定功能和任务^[6,7]。

1.1 PC 机群

电力系统全数字实时仿真装置的硬件主要使用高性能 PC 机群(PC-cluster),造价低,扩展性好,用户如果需要扩展节点,只需增加节点和变更配置文件即可完成。通信网络系统采用通用局域网连接且管理网络和管理网络分离的双网结构,管理网和数据网的分离大大提高了网络可用性,同时保障了数据的传输带宽。系统软件采用 Linux 操作系统,该系统附加费低、稳定可靠、兼容性好、性能优异。应用软件的核心仿真软件是基于成熟的商用软件电力系统分析综合程序(PSASP),具有很高的可信度。

1.2 功率放大器

功率放大器作为仿真系统的最终输出一直是实时数字仿真系统中重要的组成部分。电网数字仿真实验室购买的 PAC2000、PA60B 等系列放大器是专为电力系统仿真研究的高性能线性功率放大器。河北南网数字仿真实验室功率放大器配置如下: PAC-120B 一台,六路电压输出, PAC-2000B 三台,

共三路电流输出, PAC60B 一台, PA60B 一台, 三路电流输出, 四路电压输出。功率放大器共有九路电流输出, 十路电压输出, 能满足励磁调节装置和一般线路保护装置的测试要求。实验室还配置了断路器模拟装置, 可模拟实际断路器的延时动作。

1.3 物理接口箱

物理接口箱为电力系统实时仿真装置提供物理试验接口, 以便与外接物理装置进行开环和闭环测试。物理接口箱通过 SCSI-2 连接线与仿真机群上的 DAQ2501、DAQ2502 和 PCI7396 板卡相连。这些板卡提供了 AD/DA、DI/DO 通道, 实现物理接口箱与仿真机群之间的数据交互。同时, 物理接口箱通过接线端子与功率放大器、外接物理装置及录波仪等连接, 这样在机群与外部物理装置之间建立了信号交互的通道。对模拟输入信号、物理接口箱进行滤波, 然后送入 AD 卡; 对模拟输出信号, 物理接口箱进行滤波后送入外部物理装置; 对数字信号, 物理接口箱则提供电平、节点接口和光电隔离。

2 电力系统全数字仿真装置联调说明

河北省电力研究院完成实验室的基础建设后, 在中国电力科学研究院技术人员的配合下完成了电力系统全数字实时仿真装置的安装和联调工作。联调工作包括: 机群管理及监控软件功能测试、仿真系统功能测试、仿真装置物理接口箱与接口板卡功能测试、仿真装置外接物理装置试验功能测试。

2.1 机群管理及监控软件功能测试

(1) 机群管理软件测试

依据机群管理软件中的菜单项: 机群设置、系统管理、网络管理、机群工具、查看、帮助等及其各个 2 级、3 级子菜单逐项测试验证。能够正常实现: 机群服务器配置管理、用户管理、配置文件系统、实现对机群服务器并行命令。

(2) 机群监控系统功能测试

依据机群监控软件中的菜单项: CPU、内存、网卡 1、网卡 2、IO 信息、节点信息等菜单逐项测试验证。能够正常实现: 查看机群服务器运行相关信息、正确显示机群服务器负载状态。

(3) 机群计算网络管理网络功能测试

依据网络测试软件机群计算网络管理网络功能测试包括: MYRINET、CICSO 网络能够正常 ping 通、MYRINET 网络 GM 协议运行正常、MYRINET 网络 >1900 MB/s、千兆以太网 >900 MB/s。

2.2 仿真系统功能测试的内容

仿真系统功能测试的内容包括: 机电暂态仿真测试、电磁暂态仿真测试、机电-电磁混合仿真测试

试^[8-17]。

(1) 机电暂态测试

a. 机电暂态仿真正确性测试

进行机电暂态串并行计算, 在本机和后台机均能正常运行。

b. 机电暂态实时仿真规模和速度测试

分别使用 5 000 节点机和 10 000 节点机数据进行 10 s 的三永故障设置, 计算步长 10 ms, 查看其最快仿真计算时间。

c. 机电暂态实时仿真功能测试

使用测试数据, 在机电暂态中进行复杂故障设置、安稳装置动作(切机、切负荷、切线路等)设置和仿真。

1 000 台机、5 000 节点的大型电力系统中, 某条支路发生三永故障, 系统分成 4 个子网, 计算时间为 2.915 s。仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 发电机之间的功角经过一段时间的振荡, 功角差趋于零, 由此可判断系统恢复稳定。母线电压在发生故障的时刻降低, 然后逐渐恢复正常。

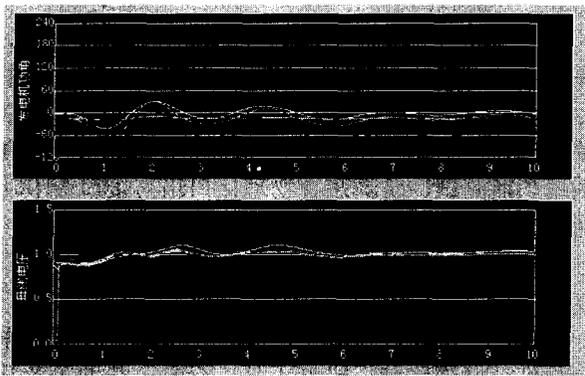


图 3 机电暂态仿真结果图

Fig.3 Result of power system electromechanical transient stability simulation

(2) 电磁暂态仿真测试

a. 电磁暂态仿真正确性测试

使用测试数据进行电磁暂态仿真串行、并行计算, 在本机和后台机均能正常运行。

b. 电磁暂态实时仿真规模和速度测试

使用 5 台发电机、20 条线路规模的网络数据进行 10 s 仿真, 计算步长 100 μs, 查看其最快仿真计算时间为 2.85 s。仿真计算结果如图 4 所示。在 5 s 时发生一个持续 0.2 s 的三相短路故障。

(3) 机电-电磁混合仿真测试

使用测试数据进行机电-电磁暂态混合仿真测试。将系统分为两个子网, 分别由机电暂态和电磁

暂态计

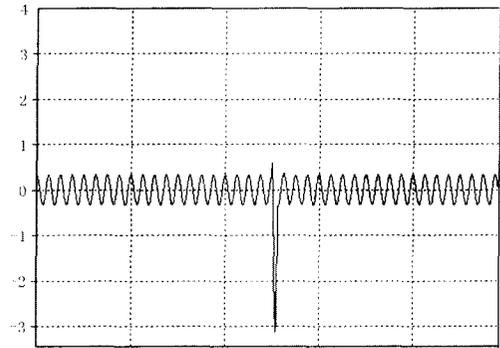


图 4 电磁暂态结果曲线

Fig.4 Result of power system electromagnetic transient stability simulation

算。系统进行 15 s 仿真, 其中电磁暂态计算步长 100 μs, 机电暂态计算步长 0.01 s。仿真计算时间 2.0 s。设支路_4 在 10 s 发生三相短路, 10.1 s 切除故障, 仿真结果如图 5、图 6 所示。图 5 是进行机电-电磁暂态混合仿真时机电暂态程序计算结果图, 图 6 是进行机电-电磁暂态混合仿真时电磁暂态计算程序结果图。发生短路故障时支路_4 电流剧增。通过图 5、图 6 的比较可以看出, 在 0.1 s 的短路过程中, 电磁暂态仿真能将短路过程详细仿真出来, 而机电暂态由于仿真步长较长, 只能对短路过程作一个粗略的仿真。

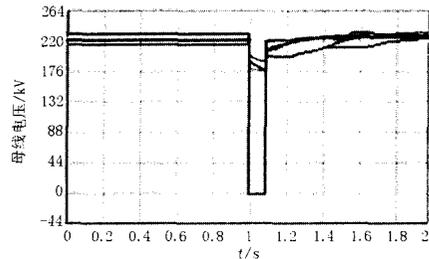


图 5 机电-电磁暂态混合仿真中机电暂态仿真结果图

Fig.5 Result of power system electromechanical transient stability simulation in hybrid simulation

2.3 仿真装置物理接口箱与接口板卡功能测试

进行仿真装置物理接口箱与接口板卡功能测试。要求模拟量输入正常, 模拟量输出正常, 开关量输入正常, 开关量输出正常。

(1) 模拟量输入测试

外接信号发生器, 产生可调的电平信号, 检查接口测试程序的采样结果。采样精度: 误差小于 ± 0.005 V。

(2) 模拟量输出测试

接口测试程序产生可调的电平信号, 使用万用

表测量物理接口箱的实际输出结果。输出精度: 误差小于 ± 0.005 V。

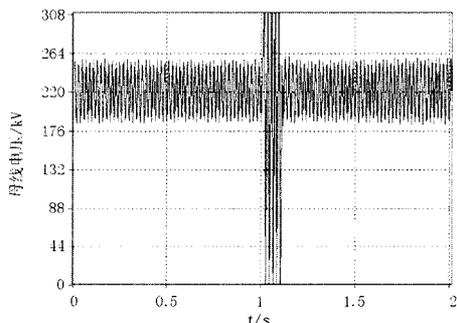


图 6 机电-电磁暂态混合仿真中电暂态仿真结果图

Fig.6 Result of power system electromagnetic transient stability simulation in hybrid simulation

(3) 开关量输入测试

外接电平(空节点)信号, 检查接口测试程序的输出结果。当输入高电平(或节点闭合信号)时, 接口测试程序输出 1; 当输入低电平(或节点断开信号)时, 接口测试程序输出 0。

(4) 开关量输出测试

接口测试程序输出数字信号, 使用万用表测量物理接口箱的实际输出结果。当测试程序输出 1 时, 接口箱输出高电平(或节点闭合); 当测试程序输出 0 时, 接口箱输出低电平(或节点断开)。

2.4 仿真装置外接物理装置试验功能测试

通过外接物理装置试验, 将机群系统、物理接口箱、功率放大器进行联调。仿真模型的数字信号通过 DAQ 板卡转换成模拟信号, 经过物理接口箱进行滤波, 送入功率放大器将信号放大, 最后送入外部物理装置。外部物理装置处理后的反馈信号输入仿真机群, 实现物理装置的闭环控制。

(1) 继电保护(线路保护)试验功能测试

采用 LFP-941A 型高压线路成套保护装置, 进行继电保护试验。测试项目: 接地距离保护和零序方向过流保护, 预设故障类型: 线路首端 A 相保护。系统反应: A 相跳闸。

(2) 励磁控制系统试验功能测试

仿真装置外接励磁控制系统。仿真装置输出机端 A、B、C 三相电压, 送入发电机的励磁系统, 励磁功率系统向发电机转子励磁绕组提供直流励磁电流。对发电机励磁控制系统进行空载 5% 阶跃响应试验。

3 电力系统数字仿真装置调试中发现问题

3.1 防火墙固定 IP 碰到的问题

分析: 电力系统全数字仿真装置设置专门的机群管理网络。设置本机 IP 为 192. 168. 1. 1 -- 192.

168. 1. 199, 设置子网掩码为 255. 255. 255. 0, 设置网关为 192. 168. 1. 250。设置后即可访问机群内节点机。防火墙进行合理设置后, 通过机群管理网络也可正常访问院网。计算网中管理节点 IP 为 192. 168. 1. 251, 计算节点 c0101--c0110 的 IP 为 192. 168. 1. 1--192. 168. 1. 10, io 节点的 IP 为 192. 168. 1. 21。通过设置本机路由, 也可通过院网访问计算网。但计算网的 IP 地址与院网冲突, 网络中心不便管理。

解决: 将机群管理网络与外网完全分开。在线数据接口固定 IP, 通过中调传送数据。其它工作终端均分别配置外网网线与计算网网线。

3.2 UPS 使用中碰到的问题

分析: 6、7、8、9、10 号机柜电源指示灯不亮, UPS 隔两分钟鸣叫一次。

解决: UPS 工作于旁路模式, 市电指示灯与旁路指示灯亮。UPS 工作在旁路模式时, 不具后备功能。此时负载所使用的电源是直接通过电力系统经滤波供应的。持续按开关键 1s 以上, 开启逆变器。UPS 处于市电模式下运行, 正常供电。

3.3 PSAPSP 程序更新

分析: 机电暂态程序中的两个文件 PCNODE. CFG 和 STPARA. CFG IP 地址设置不当, 电磁暂态程序中的两个文件 PCNODE. CFG 和 EMTPARA. CFG IP 地址设置不当, 机电暂态程序和电磁暂态程序中 PHYITF. CFG 文件需要根据河北南网物理接口箱的实际配置情况进行修改。

解决: 将机电暂态程序中的三个文件和电磁暂态中的三个文件进行更新。

3.4 软件调试中碰到的问题

分析: 调试外带物理装置的电磁暂态程序时, 出现无法将程序提交到后台机的错误, 并经常出现死机。

解决: 调试外带物理装置的电磁暂态程序时, 网络选择实时 MYRINET 网络, 并将曲线阅览室关闭。

3.5 功率放大器调试中发现的问题

分析: 功率放大器上电后, 功率放大器 PAV-120B 应该有六相电压输出, 但 AB 两相电压没电。

解决: 运输过程中碰撞导致功率放大器内部接线松了, 应注意运输中轻拿轻放。

分析: 功率放大器 PA60B, 警示灯亮。

解决: 电流功率放大器开路时警示灯亮, 短接电流回路则警示灯灭。

3.6 物理接口箱调试中发现的问题

分析: 机群的 DAQ 卡与接口箱接线不方便。

解决:科林公司作端子排,将接口箱的线引到端子排上。

分析:物理接口箱工作不正常,服务器未开机时1号接口箱的1号灯亮,9号节点机开机时,1号接口箱的7号灯亮。服务器未开机时,1号接口箱有1.5V的电压输出。调试外带物理装置的电磁暂态程序时,2号接口箱无法正常传送程序。

解决:2号接口箱内部板卡有问题,返厂修理。

3.7 在线数据接口的问题

分析:在线实时显示界面数据没有实时更新,整合数据与实时数据的无功数值相差较大,离线数据的下庄与在线数据的夏庄未正确映射。

解决:电科院技术人员完善整合程序,整合数据已能实时更新,且与在线数据很接近。

3.8 综合程序的问题

分析:静态安全分析模块不能实现全网扫描。不能实现潮流断面回放。MATLAB接口功能不完善。

解决:请电科院完成相应程序开发。

3.9 混合仿真算例无法正常计算

分析:机电暂态程序更新后,机电与电磁暂态程序的接口程序没有更新,导致机电与电磁暂态混合仿真程序无法正常计算。

解决:后台机群更新接口程序。

4 结论

河北电网数字仿真实验室已经完成ADPSS的安装和联调工作,进入为期一年的试运行和实用化阶段。利用电力系统全数字仿真装置将持续开展如下的科研工作:电网分析计算和系统稳定性评估、基于实际运行参数的电网稳定分析、电力系统故障的再现和分析、继电保护及安全自动装置的检验和试验研究、风电场接入系统的影响研究、河北南网“十一五”后三年电磁解环研究及适应性分析等。

参考文献

[1] 程华,徐政.PSASP与PSS/E稳定计算的模型与结果比较[J].电网技术,2004,28(5):1-4.
CHENG Hua, XU Zheng. Comparison of Mathematical Models for Transient Stability Calculation in PSASP and PSS/E and Corresponding Calculation Results[J]. Power System Technology, 2004, 28(5):1-4.

[2] Msrti J R, L R Linares. Real-time EMTP-based Transients Computation[J].IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1309 - 1317.

[3] Kezunovic M, Aganagic M, Skendzic V, et al. Transients Computation for Relay Testing in Real-time[J].IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1298-1307.

[4] 吴中习,周泽昕,张启沛,等.电力系统分析综合程序

用户接口(PSASP/UI)的开发和应用[J].电网技术, 1996, 20(2): 15-20.

WU Zhong-xi, ZHOU Ze-xin, ZHANG Qi-pei, et al. The Development and Application of User Program Interface Based on Power System Analysis Software Package(PSASP/UI) [J].Power System Technology, 1996, 20(2): 15-20.

[5] 电力系统分析综合程序用户手册(6.1版)[Z].北京:中国电力科学研究院,2001.

[6] 电力系统全数字仿真装置使用说明[Z].北京:中国电力科学研究院,2007.

[7] 吴军,吴中习.最优潮流在PSASP/UI环境下的研究和开发[J].电网技术,1997,21(2):70-72.
WU Jun,WU Zhong-xi.Reseach 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.

[8] 李亚楼,周孝信,吴中习.一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J].中国电机工程学报,2003,23(12):1-5.
LI Ya-lou, ZHOU Xiao-xin, WU Zhong-xi. A Parallel Complex Fault Computation Algorithm for Large Scale Power System Digital Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(12):1-5.

[9] Chai J S, Bose A. Bottlenecks in Parallel Algorithms for Power System Stability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 9-15.

[10] Institute of Electric and Electronic Engineer. Parallel Processing in Power Systems Computation[J].IEEE Trans on Power Systems, 1992,7(2):629-638.

[11] 李亚楼,周孝信,吴中习.基于PC机群的电力系统机电暂态仿真并行计算[J].电网技术,2003,27(11):6-12.
LI Ya-lou, ZHOU Xiao-xin, WU Zhong-xi. Personal Computer Cluster Based Parallel Algorithms for Power System Electromechanical Transient Stability Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 27(11):6-12.

[12] IEEE. Parallel Processing in Power Systems Computation[J].IEEE Trans on Power Systems, 1992,7(2):629-638.

[13] Zhu N,Anjan B. A Dynamic Portioning Scheme for Parallel Transient Stability Analysis[J].IEEE Trans on Power Systems,1992,7(2):940-946.

[14] Lin S L, Van J E. Parellel Solution of Sparse Algebraic Equations[J].IEEE Trans on Power Systems,1994,9(2): 743-749.

[15] 薛巍,苏继武,等.基于集群机的大规模电力系统暂态过程并行仿真[J].中国电机工程学报,2003,23(8):38-43.

- Two-terminal Transmission Lines Based on Voltages[J]. IEE Proceedings Gener Transm & Distrib, 1996, 143(1):1-6.
- [36] Zamora I, MiAambres J F. A New Technique Based on Voltages for Fault Location on Three-terminal Transmission Lines[J]. Electric Power Systems Research, 1996,37: 143-151.
- [37] Abe M, Otsuzuki N, Emura T, et al. Development of a New Fault Location System for Multi-terminal Single Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,10(1):1516-1532.
- [38] 田羽, 范春菊, 龚震东. 带同杆双回线的T型线路故障分支判定算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21):71-76. TIAN Yu, FAN Chun-ju, GONG Zhen-dong. Faulted Line Selecting Method of T Circuit of Parallel Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21):71-76.
- [39] Girgis A A, Hart D G, Peterson W L. A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992,7(1): 98-107.
- [40] 施世鸿, 何奔腾. 一种T形高压输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11):49-54. SHI Shi-hong, HE Ben-teng. New Fault Location Method for HV T-connection Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11):49-54.
- [41] Lien Kai-ping, Liu Chih-wen, Jiang Joe-air. A Novel Fault Location Algorithm for Multi-Terminal Lines Using Phasor Measurement Units[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 21(10):576-581.
- [42] Lin Ying-hong, Liu Chih-wen, Jiang Joe-Air. An Adaptive Fault Locator for Transmission Lines Tapped with a Source of Generation-Using Synchronized Voltage and Current Phasors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,13(4):1379-1385.
- [43] Lin Ying-hong, Liu Chih-wen, Yu Chi-shan. A New Fault Locator for Three-Terminal Transmission Lines—Using Two-Terminal Synchronized Voltage and Current Phasors[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002,17(2):452-460.
- [44] Yu Chi-shan, Liu Chih-wen, Lin Ying-hong. A Fault Location Algorithm for Transmission Lines with Tapped Leg—PMU Based Approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 7(1):915-920.
- [45] Yu C S, Liu C W, Yu S L et al. A New PMU-based Fault Location Algorithm for Series Compensated Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1):33-46.
- [46] LUO S S, Kzunovic M, Sevick D R. Locating Faults in the Transmission Network Using Sparse Field Measurements, Simulation Data and Genetic Algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2004,71: 169-177.
- [47] Galijasevic Zijad, Abur Ali. Fault Location Using Voltage Measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2):441-445.

收稿日期: 2008-08-18; 修回日期: 2009-04-22

作者简介:

王波(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于WAMS的故障诊断等; E-mail: zjuwangbo@gmail.com

王伟(1983-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统分析;

陈超(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电路系统。

(上接第 108 页 continued from page 108)

- XUE Wei, SHU Ji-wu, et al. PC Cluster Based Parallel Simulation for Large-scale Power System Transient Stability Study[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 38-43.
- [16] 岳程燕, 周孝信, 李若梅. 电力系统电磁暂态实时仿真中并行算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 1-7. YUE Cheng-yan, ZHOU Xiao-xin, LI Ruo-mei. Study of Parallel Approaches to Power System Electromagnetic Transient Real-time Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):1-7.
- [17] 贺仁睦, 周庆捷, 郝玉国. 电力系统机-网暂态仿真的并行算法[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(3):179-184. HE Ren-mu, ZHOU Qing-jie, HAO Yu-guo. Parallel Algorithm Used in the Machine-network Transient Stability Simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(3):179-184.

收稿日期: 2008-08-10; 修回日期: 2009-04-10

作者简介:

叶廷路(1964-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统仿真、电力系统调度通信及管理工作;

王晓蔚(1970-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事电力系统继电保护及电力系统数字仿真方面的研究工作。

E-mail: wxwhwp@163.com