

# 电力系统在线动态安全评估和预警系统

严剑峰, 于之虹, 田芳, 周孝信

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Dynamic Security Assessment & Early Warning System of Power System

YAN Jian-feng, YU Zhi-hong, TIAN Fang, ZHOU Xiao-xin

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** This paper introduced the main components and features of power system analysis software package(PSASP) Dynamic Security Assessment & Early Warning System of Power System (PDSA). PDSA provides a complete toolset of on-line dynamic security assessment for large-scale power system, based on parallel simulation platform. The base data of PDSA is combined data from different energy management systems (EMSs), phasor measurement units (PMUs) and off-line calculations. By integrating algorithms from the PSASP calculation, PDSA can perform on-line assessments of transient stability, small signal stability and voltage stability, to promote dynamic security of power system. The PDSA has been applied to state grid, regional grids and provincial grids of China.

**KEY WORDS:** dynamic security assessment; parallel simulation; data integration; online security early warning; dispatch assistant decision; transfer limit

**摘要:** 介绍了电力系统在线动态安全评估和预警系统(PDSA)的主要组成和功能。PDSA 以并行计算平台作为运行支撑平台, 提供了大区互联电网的在线动态安全评估和预警的整套工具包。通过对能量管理系统/相角量测装置(EMSs/PMUs)收集到的在线数据和电网离线分析计算数据进行整合, 获得当前运行工况的计算数据。PDSA 集成 PSASP 计算软件功能, 可以实现在线暂态稳定、电压稳定、小干扰稳定等多种稳定分析。PDSA 系统在国、网、省 3 级电网中均已得到了应用。

**关键词:** 动态安全评估; 并行计算; 数据整合; 安全稳定在线预警; 调度辅助决策; 传输极限

## 0 引言

2003 年“8.14”美加大停电, 给我国电网的安全运行敲响了警钟。近几年来, 我国电力系统也发生了一系列的停电事故, 如海南电网 2005 年“9.26”

大停电、西藏藏中电网 2005 年“10.24”大停电以及河南电网 2006 年“7.1”大停电。这些事故暴露出我国电力系统在安全防御方面的严重隐患, 导致电网大面积停电的风险依然存在。因此, 客观分析我国电网的安全形势和存在的问题, 在跨大区电网互联和电力市场改革的新环境下, 以保证电网安全稳定运行为基础和前提, 尽快建立和健全保证电网安全的防御体系, 已经成为确保我国电网安全、稳定、经济运行, 避免给国民经济和人民生活造成重大损失, 维护公共安全的客观要求和当务之急<sup>[1]</sup>。

传统的 EMS 不能满足对电网进行全面安全预警和决策支持的要求。目前这种“分析型”调度模式存在以下几个问题:

1) 在实际运行调度中, 调度员仍然需要对大量数据进行人工分析和处理, 特别在异常或故障情况下, 大量数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)报警信息涌入调度控制中心, 调度员被大量数据“淹没”, 很难决策。

2) 暂态稳定评估、电压稳定评估和继电保护定值校核等繁重的研究任务主要通过离线分析完成。由于现代电网规模庞大, 存在组合爆炸问题, 人工指定的运行方式和预想事故集不可能完备, 因此, 在某些特殊运行方式下, 或者在异常/故障模式下, 可能存在严重的安全性隐患。

3) 大规模复杂电网的安全性侧面较多, 传统设计模式下 EMS 的计算能力有限, 无法对电网的安全性实施全面而综合的在线预警。

4) 在事故逐步恶化的过程中, 运行人员面对不断出现的新的运行方式, 由于无法完成繁重的分

析和研究任务,各种“分析型”和“研究型”应用软件很难凑效<sup>[2]</sup>。

电网事故的多发性和复发性说明当今电网安全运行技术已不能满足现代社会对电力供应高可靠性的要求,这已成为世界电网技术发展面临的共性问题。

在当前我国电力建设的有利时机下,充分利用已有资源,开展“电力系统在线动态安全评估和预警系统”方面的研究,对优化电网结构、提高输电能力和供电质量、缓解电力供应整体紧张局面,具有重要意义。

## 1 系统简介

### 1.1 总体结构

PSASP 动态安全评估和预警系统(dynamic security assessment system, PDSA)项目于2004年启动。系统以独立开发的 PSASP 分布式计算平台作为支撑运行平台,有效整合电网调度自动化 EMS 在线运行数据和电网离线计算数据,形成安全分析用数据;在此基础上,集成暂态稳定、小干扰稳定、电压稳定、N-1 静态安全分析等多种稳定计算功能,实现对电网在线稳定性的准确评估;进而,根据在线稳定分析的结果,给出迅速、有效的控制措施或调整策略。

PDSA 的主要目标是实现电网运行的在线监测与预警,及时发现系统的安全隐患,并提出解决措施。总体结构包括动态数据平台、在线计算平台、在线动态稳定分析预警与评估、调度辅助决策和传输功率极限计算、历史数据管理和可视化几个部分。整体结构如图1所示。

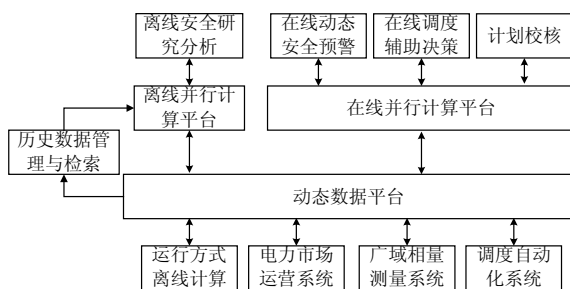


图1 动态安全评估系统整体结构

Fig. 1 Architecture of PDSA

### 1.2 硬件结构

硬件部分由调度服务器、数据服务器、计算节点机群和人工维护台组成,各个部分协调工作,完成系统所需要或所分配的各种计算分析,并将需要的结果返回给人机界面,硬件结构如图2所示。

调度服务器是计算平台实现数据传输与计算管理功能的中枢节点,提供潮流数据的广播、计算结果的回收、计算任务管理等功能,是所有计算节点的管理者和计算流程的组织者。其中通信数据源包括人机维护工作站、动态数据平台、计算节点等。通信数据目的地包括数据服务器、动态数据平台、计算节点等。

数据服务器负责数据文件存储和计算结果处理并转存到数据库。接收数据网关服务器发送来的潮流文件和调度服务器转发的计算结果文件数据,然后将上述文件数据按照规定的目录和文件格式存储到本地。保存监控台的日志文件,响应监控台的日志查询。

计算节点是计算平台实现稳定分析功能的执行者,由多台计算服务器组成,提供潮流数据的接收、稳定分析计算、计算结果上传等功能,受调度服务器的调配。计算节点从调度服务器接受计算输入数据或计算指令后开始计算,计算完毕后向调度服务器返回计算结果。计算节点上可包括多个计算进程或线程。

人工维护台是对计算平台系统应用进行配置、管理、监视、调整的人机图形界面程序。

调度服务器、数据服务器和人工维护台均配置2台服务器,互为冗余。每台服务器至少配置2张千兆网卡,并通过2个交换机连接起来,对网络和通信方式进行硬件冗余配置。

### 1.3 软件结构

PDSA 的软件结构如图3所示,其中:

1) 动态数据平台(即图3中的数据接口)是PDSA系统的数据来源。动态数据平台的主要功能是实现在线数据整合和数据交换。动态数据平台把各级电网的离线数据和EMS在线数据资源结合在一起,将电网在线运行数据引入到传统的离线分析计算当中<sup>[3-6]</sup>。一方面为PDSA系统提供数据来源;另一方面,也使电网的高级计算分析更加符合实际运行情况。图4为在线数据整合示意图。

2) 并行计算平台的软件功能包括在线数据广播、计算结果汇总、计算任务管理、出错处理、数据备份等。并行计算平台是PDSA系统的计算载体。并行计算平台分为在线并行计算平台和离线并行计算平台。前者主要完成电网稳定预警的在线计算及预警,后者主要完成交互式、研究型离线的电网稳定计算及预警<sup>[7-10]</sup>。

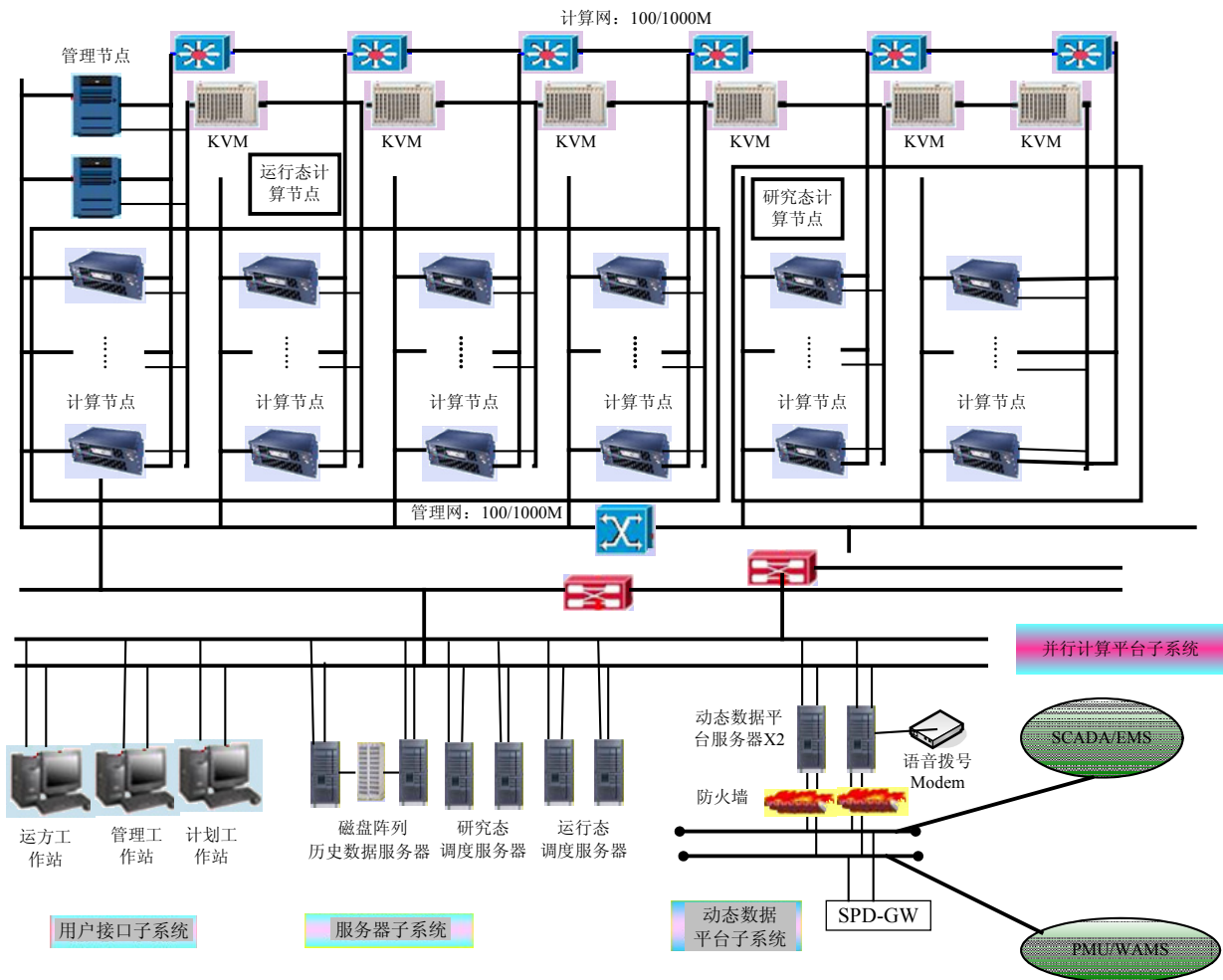


图 2 并行计算平台硬件结构图

Fig. 2 Hardware structure of parallel simulation platform

3) PDSA 系统的核心功能是实现电力系统全面的安全稳定评估、预警与决策。为此，PDSA 系统采用了多种稳定评估方法，实现在线稳定的全面分析<sup>[11-17]</sup>，功能主要包括：①在线暂态稳定评估；②在线静态电压稳定评估；③在线小干扰稳定评估；④在线潮流计算及 N-1 静态安全分析。图 5 为预警功能图。当在线稳定评估发现系统稳定水平不足时，针对不同的稳定问题，及时启动相应的调度辅助决策支持功能，为调度运行人员提供运行方式调整的辅助决策支持，以全面保证系统的稳定运行<sup>[18]</sup>；如果监测显示系统还处于稳定运行状态，则给出关键潮流断面的极限传输功率，为在线调度提供指导性意见<sup>[19]</sup>。为了满足在线计算应用，PDSA 系统对 PSASP 离线计算功能进行了在线化改造，具体包括表 1 所示的几个方面。PDSA 在软件功能上遵循在线/离线计算一体化的设计原则，实现了 PSASP 离线计算软件的在线化应用和在线/离线计算软件一体化。

4) 历史数据存储与管理。对在线收集到的的大量运行数据进行有效存储和管理，方便离线研究使用，结构如图 6 所示。可以实现功能为：①存储在线收集到的 1~2 年的系统运行方式数据；②为方便用户查询具有失稳隐患的历史运行方式，提供基于稳定分析结果的索引方式；③提供从在线数据到离线数据的转换接口，方便用户离线使用。

5) 可视化。通过人机界面的可视化显示，提供直观明了系统运行信息、稳定分析计算结果信息。同时为 PDSA 的使用者提供方便、灵活的操作手段。

## 2 主要功能

PDSA 系统主要功能包括：

1) 安全稳定在线预警。在线的全面稳定性分析和评估(包括暂态稳定评估、电压稳定评估、小干扰稳定评估、静态安全分析、直接法、数据挖掘等多种手段)，及时发现电网中存在的安全隐患。

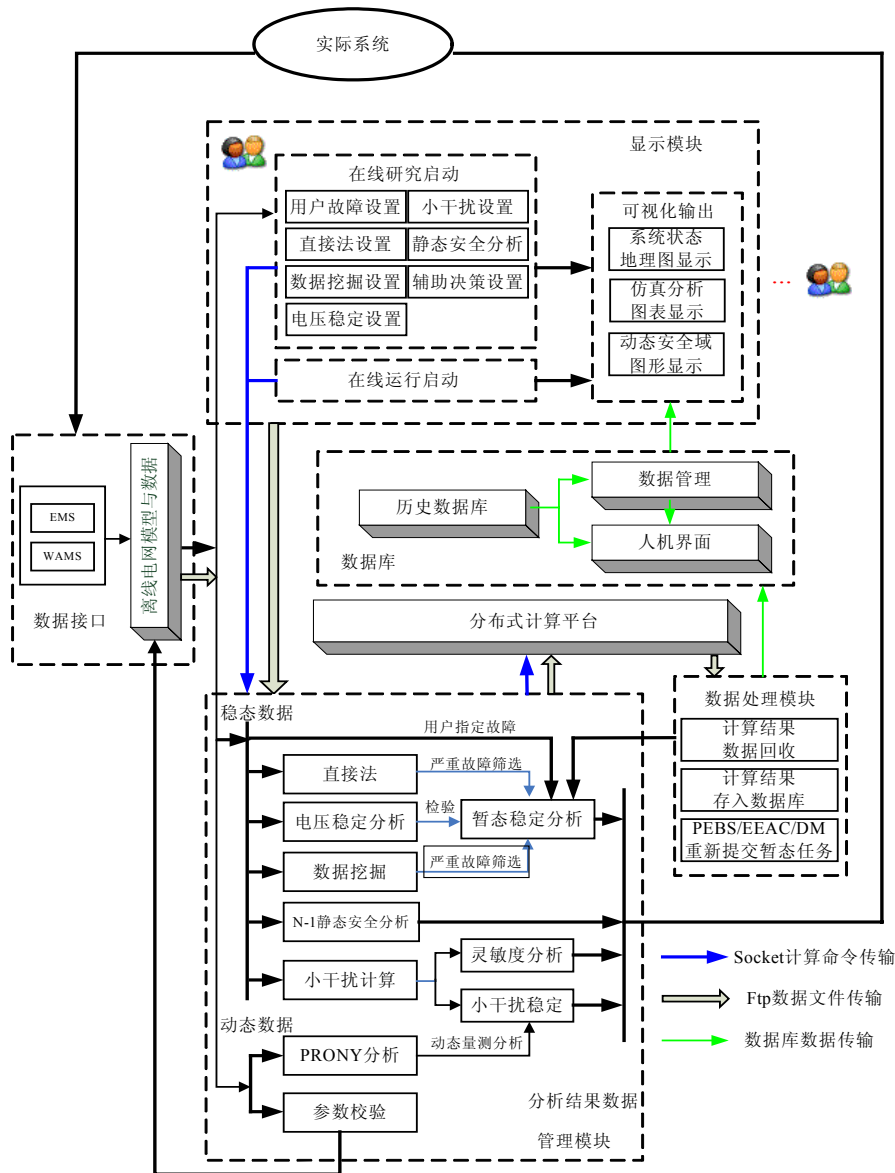


图3 PDSA 系统软件结构

Fig. 3 Software structure of PDSA

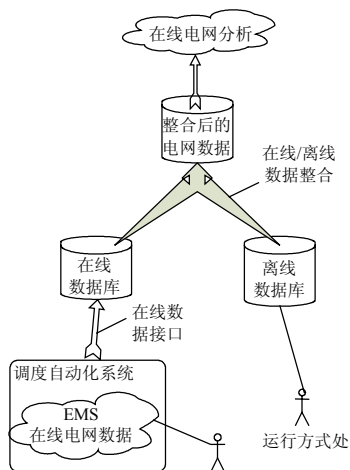


图4 在线数据整合示意图

Fig. 4 Online data integration

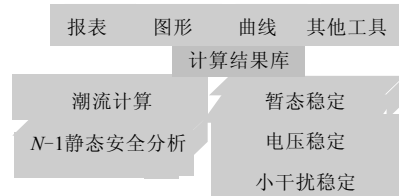


图5 PDSA 系统的预警功能

Fig. 5 Early-warning function of PDSA

表1 离线计算在线化改造

Tab. 1 Modifications in offline calculations to adapt online application

改造方面	离线计算	在线计算
输入输出	PSASP 格式	标准格式
拓扑变化	手工设定	自动适应
计算调用	计算完退出	重复调用运行
计算起停	手工设定	信号触发
出错处理	人工处理	自动报警

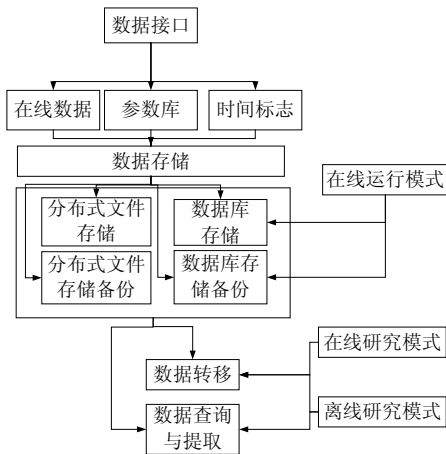


图 6 历史数据管理

Fig. 6 History data management

2) 调度辅助决策。当电力系统运行在稳定裕度不足的情况下时，及时自动给出合理的调度策略，供调度人员决策参考，提高电网应对风险的能力，避免稳定性事故的发生。

3) 稳定裕度在线计算。在线确定系统稳定裕度，当系统运行在稳定裕度较高情况下时，可适当提高输电断面输送功率，以期充分发挥电力系统的输送能力。

4) 低频振荡监测与分析。根据 WAMS 监测到的低频振荡数据，结合小干扰稳定计算功能，为运行调度人员提供有针对性的振荡机理信息。

5) 计划校核。根据短期系统负荷预测、发电计划、区域和省间联络线交易计划等数据对日前发电和输电计划进行校核。

6) 大批量离线方式计算。利用并行计算平台，进行大批量离线方式计算(如各级运方部门制定年度运行方式)，可以大幅度提高工作效率。

### 3 主要特点

#### 3.1 全面性

1) 全网在线数据的安全稳定分析。

图 7 为全网数据稳定分析。电网安全问题是全

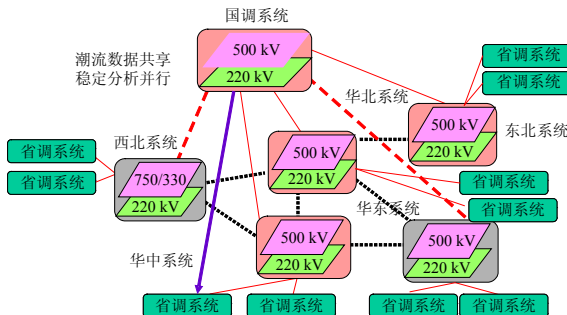


图 7 全网数据稳定分析

Fig. 7 Stability analysis based on detailed data of the grid

网的安全稳定问题。PDSA 基于在线整合数据开展后续评估预警工作，能够有效避免等值与简化给动态安全稳定分析带来的不可控甚至是灾难性的后果。

2) 全面的安全稳定分析功能。

PDSA 同时考虑暂态稳定、电压稳定、小干扰稳定等各类问题，能实现电力系统稳定问题的全面分析。

#### 3.2 唯一性

1) PDSA 是唯一满足国家电网在线动态安全稳定系统建设相关规范的完整解决方案。系统研发涉及的规范包括：①《在线安全稳定预警系统功能规范》；②《在线安全稳定预警系统技术原则》；③《在线安全稳定预警系统内部软件接口规范》；④《在线安全稳定预警系统内部数据规范》；⑤《在线安全稳定预警系统人机数据接口规范》。

2) PDSA 是唯一满足广域全景分布式一体化系统构建要求的在线动态安全分析系统完整解决方案：①实现“电网运行分析与评估应用”中的“电网动态分析”功能；②支持“电网调度计划”中的“安全校核”功能；③数据平台支持“广域”构建要求；④计算平台支持“全景”和“分布式”构建要求；⑤规范化支持“一体化”构建要求。

3) PDSA 是唯一实现离线计算/在线计算一体化系统构建要求的在线动态安全分析系统完整解决方案：①离线计算软件与在线计算软件一体化；②离线计算数据与在线计算数据一体化；③离线数据维护与在线数据维护一体化。

#### 3.3 先进性

领先的在线动态安全分析系统方案包括：1) 高效的计算平台，支持多达 400 个计算单元的同时并行计算，完成 10 000 节点的 400 个暂态稳定 20 s 过程仿真只需 25 s；2) 先进的数据平台提供支持 20 000 节点的多套 EMS 数据整合方案和方便的在线维护手段；3) 与离线计算对应的全套在线安全稳定分析计算软件和分析方法；4) 包括研究态/在线态在内的完整系统解决方案，提供高效稳定的在线运行、在线研究与离线研究功能。

#### 3.4 经济性

在节约投资，提高效率方面包括：1) 先进的软硬件设计方案，在保证最优性能的前提下，大大降低硬件系统的成本；2) 高效的计算效率，大大提高了离线分析计算人员的工作效率和日常在线应用计算效率；3) 规范化的设计满足未来系统的一体化要求，大大降低了系统改造费用；4) 可扩

充的系统方案,在保障原有硬件充分利用的情况下,可以方便地追加投资,接近线性增长方式提高系统性能。

### 3.5 规范性

在规范性方面包括:1)满足国家电网在线动态安全稳定系统建设规范;2)通过标准接口,支持包括电科院 PSASP 和 BPA、南瑞量化分析、天津大学安全域等各类稳定计算功能;3)满足正在开展的广域全景分布式一体化系统构建要求。

### 3.6 可维护性

在便于维护方面包括:1)支持 PSASP 离线软件方式下的离线部分数据维护,包括动态参数、计算设置、安全措施等;2)支持 XML/E 文件/SVG 等标准格式的调度在线部分数据维护,包括厂站设备投运/检修,图形维护等;3)支持在线历史数据功能,包括历史数据维护管理,图形数据一体化的在线数据的获取方法等。

## 4 应用现状及展望

### 4.1 应用现状

工程实践证明,PDSA 系统不但能提供电网运行的历史数据和在线信息,而且实现了对电网运行的在线监视、评估和预警。应用中表现出来的特点有:1)功能强,扩展方便,系统的可靠性相对较高;2)建模覆盖了现有运行调度计算分析工作中涉及到的各类元件,计算精度高,结果可靠;3)采用分布式结构,并行处理计算任务,计算速度显著提高,极大地提高了运行分析计算的速度;4)继承了单机版计算分析软件的特点,与原有软件平滑过渡,结构简单,易于使用,保证系统安全、稳定运行;5)能够有效揭示电网变化趋势,辅助分析潜在风险;6)可视化客户端能够动态显示电网运行状态,提供在线信息参考,为调度运行工作提供了新视角。

### 4.2 技术展望

在系统完善方面今后所做的主要工作有:

1)进一步整合大电网现有的 SCADA/EMS、PMU/WAMS、故障信息管理系统、安稳控制系统等资源,建立大电网在线安全防御系统,实现兼备正常运行操作指导和事故状态控制恢复的完全意义上电网自动闭环控制。

2)根据大电网特点,借鉴国外发达国家经验和教训,通过对“三道防线”的协调与整合,开发适合大电网具有广域测量—分析—保护控制功能

的安全防御系统,将为大电网构筑基于现代信息和计算机技术为基础的电力系统综合安全防御体系。

## 5 结论

PDSA 系统利用在线潮流整合数据进行综合稳定分析,如果存在隐患,在预警基础上给出解决措施;如果足够安全,则提供高效率的输电方案,发挥电网的运行潜力。

工程运行结果表明,PDSA 系统改变了传统的基于典型方式进行离线稳定分析的模式,依靠并行计算平台的高速计算能力和开放的集成性能,对系统的暂态稳定、电压稳定和小干扰稳定进行在线综合预警,实现了电网传统的离线方式计算向在线稳定分析的转变,为大电网的在线安全诊断和智能化调度提供了有效的技术手段。

## 参考文献

- [1] 杨以涵,张东英.大电网安全防御体系的基础研究[J].电网技术,2004,28(9):23-27.  
Yang Yi-han, Zhang Dongying. Study on the architecture of security and defense system of large-scale power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 23-27(in Chinese).
- [2] 张伯明,吴素农,蔡斌,等.电网在线安全稳定分析和预警系统[J].电力系统自动化,2006,30(6):1-5.  
Zhang Boming, Wu Sunong, Cai Bin, et al. Power grid on-line security and stability analysis and forewarning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 1-5(in Chinese).
- [3] 王继业.基于网格技术的电力信息资源整合方案[J].电力系统自动化,2006,30(20):84-87.  
Wang Jiye. An integration solution of power information resources based on grid technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 84-87(in Chinese).
- [4] 王继业,张崇见.电力信息资源整合方法综述[J].电网技术,2006,30(9):83-87.  
Wang Jiye, Zhang Chongjian. Survey on power information resources integration methods[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 83-87(in Chinese).
- [5] 严亚勤,陶洪铸,李亚楼,等.对电力调度数据整合的研究与实践[J].继电器,2007,35(17):37-40,71.  
Yan Yaqin, Tao Hongzhu, Li Yalou, et al. Research and practice of integration of information in power dispatching center[J]. Relay, 2007, 35(17): 37-40, 71(in Chinese).
- [6] 李育发,刘德斌,马立新.电力调度应用系统的数据整合[J].吉林电力,2006,34(5):24-25.  
Li Yufa, Liu Debin, Ma Lixin. System data conformity on dispatching application of electric power system[J]. Jinlin Electric Power, 2006, 34(5): 24-25(in Chinese).
- [7] Liu M L. 计算原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:32-39.
- [8] 李代平.分布式并行计算技术[M].北京:冶金出版社,2001:15-21.
- [9] 高传善.分布式系统设计[M].北京:机械工业出版社,2001:58-65.
- [10] Andrews G R. 多线程、并行与分布式程序设计基础[M].北京:

- 高等教育出版社, 2002: 3-7.
- [11] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 76-81.
- [12] 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 Yalou, Zhou Xiaoxin, Wu Zhongxi. A parallel complex fault computation algorithm for large scale power system digital simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 1-5(in Chinese).
- [13] 周勤勇. EEAC 直接法稳定的研究和程序开发及其在 PSASP 中的应用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003: 55-58.
- [14] 常乃超, 郭志忠. EEAC 解析灵敏度分析的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 38-40, 70. Chang Naichao, Guo Zhizhong. Research on analytical sensitivity analysis of extended equal-area criterion(EEAC)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 38-40, 70(in Chinese).
- [15] Fu S T, Chen J L, Hu J X et al . Implementation of an on-line dynamic security assessment program for the central China power system[J]. Control Engineering Practice, 1998(6): 1517-1524.
- [16] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较: (三) 定性判稳与定量分析 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 1-5. Xun Yusheng. A critical comparison of various methods for transient stability assessment : part one disturbed-measure functions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 1-5(in Chinese).
- [17] 郭琦, 张伯明, 王守相, 等. 基于计算机集群的电力系统暂态风险评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 13-17, 50. Guo Qi, Zhang Boming, Wang Shouxiang, et al. Personal computer cluster based power system transient risk assessment [J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 13-17, 50(in Chinese).
- [18] Yuan Zeng, Pei Zhang, Meihong Wang, et al. Development of a new tool for dynamic security assessment using dynamic security region [C]. International Conference on 2006 PowerCon, Chongqing, China, 2006.
- [19] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-4, 9. Xue Yushen. Co-ordinations of preventive control and emergency control for transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 1-4, 9(in Chinese).



严剑峰

收稿日期: 2008-09-20。

作者简介:

严剑峰(1977—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统在线安全预警与防御技术, yanjf@epri.ac.cn;

于之虹(1975—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析和控制。

(责任编辑 王庆霞)