

DOI: 10.7667/PSPC152106

地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统

乔亮¹, 杨丽², 郑亮², 饶钰¹, 王潇煜², 肖红玉¹

(1. 国网洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000; 2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106)

摘要: 通过对目前电网在线动态安全分析领域的研制背景分析, 提出了地区电网安全稳定实时预警系统的可行性, 详细介绍了系统的主要功能、关键技术和性能指标。地区电网安全稳定实时预警系统从 SCADA/EMS 实时获取在线数据, 利用分布式并行计算平台快速找出各类安全隐患, 给出综合智能告警信息, 展示给调度员, 可方便地实现地区电网与省级电网不同调度控制中心的信息集成。通过在洛阳电网的研发和实施验证了该系统不仅可以大幅度提高本地区电网的实时安全预警能力, 还能够及时发现本地电网模型和数据中的错误与异常信息, 自动报警并给出详细信息, 大大提高了系统模型的准确性, 是未来地区电网调度运行必不可少的工具。

关键词: 稳定性分析; 地区电网; 数据整合; 模型校正

On-line security and stability analysis with pre-alarm and decision-making supporting system for regional power grids

QIAO Liang¹, YANG Li², ZHENG Liang², RAO Yu¹, WANG Xiaoyu², XIAO Hongyu¹

(1. State Grid Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471000, China;

2. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: The main functions, key technologies and performance indicators of the on-line security and stability analysis with pre-alarm and decision-making supporting system for regional power grids are recommended in real-time grid monitoring and real-time pre-alarm. The development background of the field of dynamic security analysis of power network is analyzed, and the feasibility of regional power network security and stability is proposed. The system reads on-line data from SCADA/EMS and rapidly identifies all kinds of potential safety problems and the abnormal information from the model of power grids with the use of distributed parallel computing platform, it can quickly find out all kinds of potential safety problems, give a comprehensive intelligent alarm information, and provide accurate alarm correct treatment strategies for dispatch staff to adjust the different degrees of control center of information integration. The system is verified by power development and implementation in Luoyang, which not only greatly improves local grid real-time safety early warning ability, but also enhances the accuracy of the system model by finding data errors and abnormal information from the local power grid model. It has been proved that, this system is an essential tool for the future development of the regional power grid.

Key words: stability analysis; regional power grid; data integration; model correction

0 引言

随着社会用电需求快速增长, 电力系统规模迅速扩大, 负荷成分变化显著, 电网特性变得更加复杂, 以上诸多因素困扰着电力系统的安全与稳定^[1]。虽然区域电网的互联提高了运行可靠性和经济性, 但同时带来了一些新问题: 输电结构老化, 分布式电源大量注入, 新型控制设备投入使用^[2]; 加之电

力市场化进程的推进^[3], 经济利益与系统安全的博弈迫使系统在更多的时间内运行在其极限水平, 电力系统的运行环境被进一步恶化^[4]。如今, 局部故障的波及范围更大, 影响电网安全运行的因素也越来越多, 日益增多的管辖设备及运行方式使得调度员的工作压力和工作量越来越大, 一旦发生连锁性故障和大面积停电^[5], 调度运行人员则不可避免地陷入海量数据中, 难以做出快速、有效的决策。

目前, 调度自动化系统已在我国各级电力系统中广泛应用, 大大减轻了调度运行人员的工作难度和压力, 但是随着电力系统动态稳定问题日益成为影响系统安全稳定运行的主要因素^[6], 原有的 SCADA/EMS 系统已不能完全保证电网安全稳定运行的需求, 需要有一套系统能同时对电网的静态、暂态功角, 电压, 频率等安全稳定问题全面实时监控和预警、预控^[7]。在线安全稳定预警与辅助决策系统在稳态分析的基础上可以全面、准确地监控电网运行水平, 实时分析系统的安全性和稳定性, 目前已成功在全国各家网省级电网公司投入运行^[8], 成为建立高安稳度和高效率的电力系统运行保障体系^[9-10]的重要工具, 同样在地区电网运行中也发挥着重要作用。

本文介绍了地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统的基本原理、系统结构、关键技术、实现方法和性能指标, 详细阐述了该系统在洛阳地调的应用情况。系统从调度运行和运行方式规划两个方面增强了安全稳定分析与决策能力, 提升了调度运行人员对电网的掌控水平, 对地区电网的安全运行和科学调度起到有力的技术支撑。

1 总体框架

1.1 功能框架

地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统充分利用地调和省调 EMS 系统状态估计数据, 在线跟踪电网实际工况, 采用独立的支撑平台进行面向安全稳定分析的数据整合, 生成满足安全稳定计算使用的数据, 并进行大量的静态、暂态和动态安全稳定分析计算; 周期性地评估潜在故障对电力系统稳定性的影响, 发布风险预警; 指出电网在正常方式、非正常方式下可能存在的静态和暂态安全稳定问题和危险点, 计算断面安全稳定极限功率和地区电网受电能力, 并提出科学的具有实际指导意义的预防控制辅助决策。

1.2 硬件体系结构

依据电网运行管理的“统一调度、分级管理”原则^[11], 在线安全稳定预警与辅助决策系统与地区电网现有系统一体化建设, 采用统一的图形格式和界面风格, 实现系统的一体化运行、一体化维护和一体化使用。

系统硬件和网架结构如图 1 所示, 硬件平台主要由服务器、工作站、网络交换机、终端服务器等构成, 为提高运行的可靠性, 应用服务器采用双机

冗余备用机制, 当其中一台应用服务器不可用时, 由系统自动启动备用服务器上的相应应用, 保障系统内各应用的冗余运行; 由多个计算服务器组成计算机群, 构成高速并行计算子系统, 采用“1+N”功能机制, 协调计算资源在多个用户之间的优化分配; 通信服务采用双网络接口、双电源模块, 正常工作时, 网络信息在冗余网络上分流传输, 如发生网络故障, 则迅速切换到另外的网络, 可大大增加网络通信的可靠性。

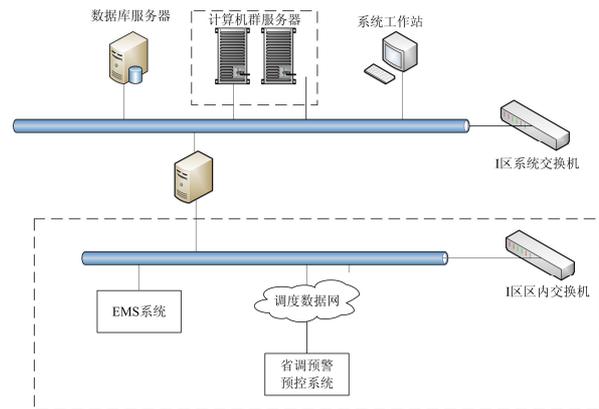


图 1 系统硬件和网架结构

Fig. 1 System hardware and network structure

2 系统关键技术

2.1 数据模型整合技术

目前各地区电网均建有本地的 SCADA/EMS 系统^[12], 地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统充分利用了本地区及上级电网公司的 SCADA/EMS 的在线模型, 并整合了多种监测数据源。对于地区电网外的大区或省调模型, 由于地区模型不能提供计算所需的全部数据, 为此本系统还考虑了在线数据和离线计算数据整合以及外网在线动态等值的问题^[13]。

2.2 分布式计算平台

在线稳定计算是一个计算数据量巨大的系统, 为了保证预警的实时性, 系统采用基于流程组态与多工作域动态优化的分布式并行计算平台支撑安全稳定并行计算, 以多用户集群计算平台支撑离线分析计算系统。通过基于组态的机群管理系统, 组成计算机群, 整个计算机群可协调计算资源在多个用户之间的优化分配: 根据登录用户数量、机群节点的运行状态、计算任务等信息, 对计算资源进行优化分配以充分利用系统资源, 从而提高离线研究效率。如此, 可以满足多个用户同时分析计算支持多

个使用人员同时进行研究,并能够根据离线计算服务器空闲情况和同时使用人员数量,动态分配计算资源,实现计算资源的充分利用。

2.3 智能化的在线预警预想故障集自适应筛选

随着电网规模的扩大,电网暂态安全稳定分析的计算故障数目具有较大规模,这将大大加重了系统的计算负担。为提高计算速度,减少计算规模,本系统提出了暂态安全稳定在线预警预想故障集的自适应筛选方法^[14],在每轮计算中不仅需要减少时域仿真计算的故障集数目,而且不能遗漏暂态安全稳定的关键故障。故障集的筛选主要包含以下两个步骤。

1) 预想故障集动态过滤:根据电网元件的投停信息,剔除预想故障集中实际不可能存在的故障;根据元件名称变化等信息对预想故障集中计算算例描述的正确性进行修正。

2) 预想故障集动态筛选:根据电网上一时间断面的各个预想故障的裕度、上一时间断面与当前时间断面的运行方式的比较结果以及其他筛选规则,将裕度较大的评估预想故障从相应预想故障全集中剔除,从而减小当前时间断面下在线暂态安全评估考察的预想故障集的算例规模,基于此进行动态筛选。

预想故障集动态筛选是该算法的核心:首先依据电网上一时间断面的各个预想故障的稳定裕度和稳定模式识别那些影响系统稳定性的关键电网元件;再根据当前这些元件运行状态的变化确定筛选预想故障的新门槛值;最后将本轮预想故障的预估裕度与该门槛值比较,将裕度较大的评估预想故障从相应预想故障全集中剔除,筛选出那些需要重新计算稳定裕度的故障,从而减小当前时间断面下在线暂态安全评估考察的预想故障集的规模,使得电网安全稳定模式随着电网运行状态的变化而变化,系统的预想故障集的计算规模也应随着改变,从而提高了在线暂态安全评估计算的效率和系统性能,具有一定的有效性和工程实用性。

2.4 电网运行稳定性量化指标

系统基于初始工况对电网安全全方面的评估,主要包括暂态安全稳定、动态安全稳定、静态安全稳定和短路电流在内的各类安全稳定进行量化评估,不仅给出了安全稳定裕度,而且能够给出调控措施的安全稳定控制的灵敏度或参与因子,为保障各类安全稳定要求的快速综合优化控制决策、满足在线控制对决策时间的要求提供了理论基础。

薛禹胜院士发明的EEAC算法^[15]是稳定性量化方法的核心,这是唯一经过严格证明,并投入工程实用的暂态稳定量化分析方法:首先通过时域仿真,得到预想故障下的系统运行轨迹;然后,通过保稳-降维变换,将多机系统的功角稳定问题转换为单机无穷大系统的同类问题;再利用等面积法则判断系统的稳定性,并计算暂态功角稳定裕度。

2.5 电网模型和状态估计数据的自动模型校正

在线安全稳定预警与辅助决策系统具备多级数据检查功能,对于模型和数据中错误与异常信息可自动报警,并给出详细信息;能够根据安全稳定分析的需要,利用省调EMS提供的模型和数据,自动补齐地调EMS缺少的模型和数据。

系统从EMS系统获得本地地区的模型数据后,将模型导入本系统的同时自动进行模型校验,可以发现CIM模型里由于人工维护或者信息错误等造成的模型设置问题,如变压器、交流线段、容抗器、刀闸等存在的设备参数问题;同时系统在使用实时数据的过程中还会发现状态估计模型的错误,如缺少电气岛信息、拓扑节点格式等错误。这些发现能有效提高电网模型的准确性,减少了人工纠错的工作量,促进了地区电网的建设。

3 系统应用

洛阳地区电网存在局部地区电网结构相对薄弱、电源分布不均,易造成地区电网失稳或引起连锁反应,导致大面积停电的风险。如果仅仅依赖于调度运行人员的知识、经验及反应速度来进行调控,具有很大的风险。尤其电力系统失稳的暂态过程十分短暂,要对暂态稳定进行全局性实时控制,目前的技术水平还达不到,这使得洛阳电网在线安全稳定预警与辅助决策系统研究势在必行。

3.1 系统架构

洛阳电网在线安全稳定预警与辅助决策系统于2009年开始建设,由于电网规模和故障仿真特性,为了保证系统实时性,系统硬件采用IBM X3550系列PC服务器和惠普DC7400系列商用机,服务器采用LINUX操作系统,为在线系统行海量运算提供硬件支持。当电网处于紧急情况时,将在6s内给出故障和异常智能报警报告,并在二三分钟内给出综合预警报告。以“8·14”美加大停电为例,当两重开断之间的间隔时间不小5min时,所设计的实时性能可以满足实用要求。

根据洛阳电网的实际应用需求,在线安全稳定

预警与辅助决策系统分为实时预警子系统和调度预案子系统, 各子系统可以同时独立运行, 相互之间没有影响。主系统结构如图 2 所示。

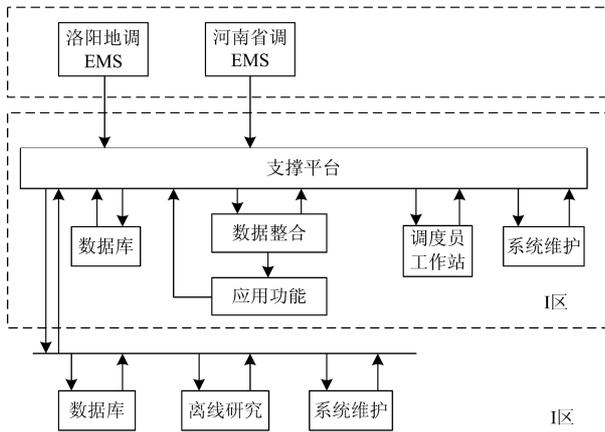


图 2 地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统结构
Fig. 2 Structure of online security and stability of power network in the area

实时预警子系统面向调度运行人员: 基于实时方式数据, 在线生成稳定计算所需要的潮流、稳定和故障表等计算数据, 实现电网实时安全稳定综合评估和预警、预防控制辅助决策; 调度预案子系统主要面向方式运行人员: 通过数据接口功能和操作开关, 获取实时状态估计、状态估计保存算例、DPF 结果、历史 CASE 保存算例等进行离线研究, 可以利用图形化手段实现方式的修改和调整, 进行电网正常方式、检修方式安全稳定分析和输电断面极限计算, 研究历史、未来电网不同方式的网络特性, 并提供辅助决策指导建议。

3.2 主要功能

为了满足洛阳电网调度运行的实际需求, 洛阳在线安全稳定预警与辅助决策系统配备了安全稳定在线监视、在线安全稳定分析和预警、调度运行辅助决策、稳定裕度评估、安全自动装置策略校核及辅助决策等功能。

3.2.1 安全稳定在线监视

针对地区电网的实际运行工况, 计算线路、主变等设备负载率和母线电压安全裕度, 并进行排序与电网安全预警; 同时还监视地调调管范围内的安自、第三道防线装置情况。

3.2.2 在线安全稳定分析和预警

根据地区电网结构的特点电网, 对本地区电网进行电网结构薄弱性分析、静态安全分析、静态电压稳定分析、短路电流分析、暂态安全稳定分析等

分析计算等, 在静态安全分析中还考虑了各自投装置动作策略。

3.2.3 调度运行辅助决策

针对以上两个功能的计算结果, 对当前电网和预想故障后不安全的情况计算辅助决策措施, 系统支持静态安全辅助决策、静态电压稳定辅助决策、短路电流辅助决策和暂态安全辅助决策; 可以有效地解决电网设备过载的辅助决策中支持负荷转供的控制措施, 为调度运行人员提供运行方式调整建议。

3.2.4 稳定裕度评估

分析计算断面的输电极限, 综合了静态安全、暂态安全稳定性的要求, 提供断面极限的约束故障及约束性稳定问题。该功能为调度运行人员提供实时断面控制建议, 并为运行方式人员基于历史运行数据进行分析提供技术手段。

3.2.5 安全自动装置策略校核及辅助决策

基于电网运行工况, 针对安稳系统覆盖的预想故障, 搜索离线策略表中对应的控制策略, 进行安全稳定分析, 校核安稳系统策略、第三道防线策略、各自投策略的适应性; 针对安稳系统覆盖的预想故障, 根据给定的候选控制措施, 在线进行安稳系统策略的优化计算。

3.3 技术指标

通过对洛阳电网在线安全稳定预警与辅助决策系统进行 168 h 连续运行考机, 没有出现死机、崩溃等现象, 系统可用率不小于 99.98%, 系统从 EMS 数据接口读取数据的周期 < 5 min, 在线计算故障扫描的平均周期(对 50 个故障, 含安全分析和极限功率计) < 10 min; 具有实时数据的画面调用响应时间 10 s; 画面实时数据刷新周期为 5~10 s。

在保证实时性的同时, 系统采用了目前最佳快速计算算法, 能够兼容 PSASP 6.28 潮流计算和稳定计算处理的模型。经验证, 主要计算指标可达到如下: 1) 枢纽变电站母线电压相对误差 < 2%; 2) 联络线功率相对误差 < 3%; 3) 稳定分析与预警的准确度 > 99.98%; 4) 220 kV 断面极限输送功率误差 < 20 MW; 5) 潮流和稳定计算程序允许节点数 > 2 000 个; 6) 潮流和稳定计算程序允许发电机数 > 150 个。

3.4 运行情况

系统自 2011 年正式上线运行以来, 已成为洛阳电网日常运行必不可少的工具, 对于推动电网计算分析科技进步和建立本地区电网的安全稳定防御系统意义重大。其重要意义主要表现在: 1) 系统可全

面、准确地监控电网运行水平,分析系统的安全性和稳定性,建立起一个系统级的安全预警检测体系; 2) 具备快速自动分析、发现和调控,避免线路开断事故导致的连锁反应,并给出消除隐患的控制措施,使得运行人员可以第一时间掌握电网运行的安全稳定水平,还能够为调度运行人员提供当前运行方式下的电网预防控制措施方案; 3) 系统为洛阳电网运行的精细化管理提供了技术手段,可提高输变电设备资源的利用率,直接创造经济和社会效益。

4 结论

本文介绍了地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统的功能框架和体系结构,详细阐述了所采用的关键技术、创新技术及应用情况,通过洛阳电网在线安全稳定预警与辅助决策系统建设和运行情况,证实了该系统已经成熟,能大幅度提高地区电网的实时安全预警水平,对于推动地区电网分析计算科技进步和建立地区电网级安全稳定防御系统意义重大。地区电网调度运行从离线电网潮流稳定计算分析进入到了在线稳定计算分析、预警、制定预防性控制策略的新阶段,形成了全方位电网安全防护体系,对地区电网的未来发展具有重要作用。

参考文献

- [1] MORISON K, WANG L, KUNDUR P, et al. 2004 IEEE PES power systems conference & critical requirements for successful on-line security assessment[C] // Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES. IEEE, 2004, 3: 1676-1680.
- [2] 陈春, 汪枫, 刘蓓, 等. 一种智能配电网安全运行控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 357-366.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A method of safe operation control of smart distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 357-366.
- [3] 文旭, 颜伟, 王俊梅, 等. 计及节能风险评估的随机规划购电模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 193-201.
WEN Xu, YAN Wei, WANG Junmei, et al. A stochastic programming power purchasing model considering energy-saving benefit risk assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 193-201.
- [4] SINGH S N, DAVID A K. Towards dynamic security-constrained congestion management in open power market[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(8): 45-47.
- [5] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [6] 马丽叶, 贾彬, 卢志刚, 等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网安全等级研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 229-237.
MA Liye, JIA Bin, LU Zhigang, et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 229-237.
- [7] 欧睿, 张琳, 杨渝璐. 重庆跨辖区一体化调度自动化系统建设分析与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 130-133.
OU Rui, ZHANG Lin, YANG Yulu. An analysis and research for power dispatching automation across jurisdictions in Chongqing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 130-133.
- [8] 林曦, 高文建, 何朝阳, 等. 广西电网在线动态安全性分析系统[C] // 广西电机工程学会第八届青年学术年会论文集. 2004.
LIN Xi, GAO Wenjian, HE Zhaoyang, et al. Guangxi power grid online dynamic security analysis system[C] // Guangxi Electric Power Engineering Society Eighth Annual Meeting of the Youth Academic Annual Meeting Set. 2004.
- [9] 卢强. 数字电力系统(DPS)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 1-4.
LU Qiang. Digital power system (DPS)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 1-4.
- [10] 郭炳庆, 孙元章, 卢强. 电力系统稳定性分析与控制实时仿真决策系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 5-7.
GUO Bingqing, SUN Yuanzhang, LU Qiang. Real-time simulation and decision making system for stability analysis and control of power system[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2000, 24(18): 5-7.
- [11] 曾祥玲. 如何通过电力调度实现电网经济运行分析[J]. 科技创新与应用, 2014(27): 171-172.
ZENG Xiangling. Analysis of how to realize the economic operation of power grid through power dispatch[J]. Technology Innovation and Application, 2014(27): 171-172.
- [12] 陈恩泽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 多重扰动下的跨区电网低频振荡研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 290-296.
CHEN Enze, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on low frequency oscillation of interconnected power grid based on multiple disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 290-296.
- [13] 孙宏斌, 胡江溢, 刘映尚, 等. 调度控制中心功能的发展——电网实时安全预警系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 1-6.
SUN Hongbin, HU Jiangyi, LIU Yingshang, et al. Evolution of the power dispatching control center-real time power security early warning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 1-6.
- [14] 徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 等. 暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 1-4.
XU Taishan, XUE Yusheng, LI Bijun, et al. On-line adaptive contingency screening for early-warning of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 1-4.
- [15] 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. $N-2$ 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126.
XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, et al. Online fast transient angle stability assessment of $N-2$ contingency set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 122-126.

收稿日期: 2015-12-03; 修回日期: 2016-02-22

作者简介:

乔亮(1978-), 男, 工程师, 主要研究方向为电网调度运行;

杨丽(1985-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统工程; E-mail: yangli2@sgepri.sgcc.com.cn

郑亮(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统在线分析与控制。

(编辑 魏小丽)