

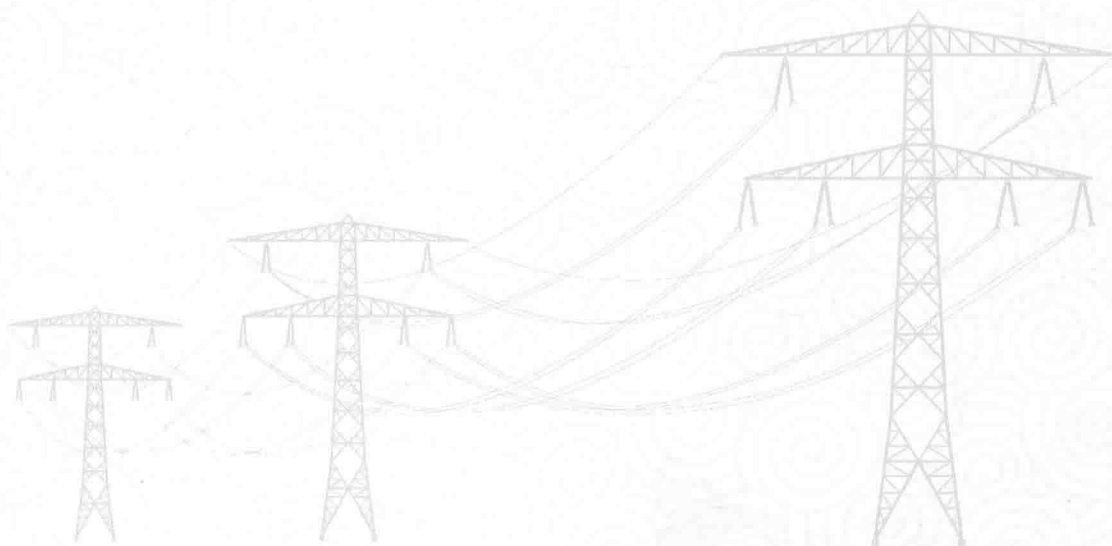


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目

电力系统 在线动态安全监测 与预警技术

严剑峰 周孝信 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”国家重点图书
出版规划项目

7M769

11

电力系统 在线动态安全监测 与预警技术

严剑峰 周孝信 史东宇 于之虹 陈 勇 编著
丁 平 鲁广明 吕 颖 邱 健 江兴凌



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从系统框架、关键技术、实用化等多个角度对电力系统在线动态安全监测与预警技术进行论述,详细讲解了数据接入与监测、计算在线化、辅助分析等关键技术问题以及在线数据整合、大规模并行计算、可视化、稳定算法在线化、输电断面传输裕度评估和调度运行辅助决策等工程应用问题。该书凝聚了电力系统在线动态安全监测与预警技术团队多年的成果,既有理论算法,更侧重最新的工程应用,是国内外第一本理论联系实际的在线动态安全监测与预警技术的著作,体现了国内外该领域的最新研究成果。

本书可供电力系统调度运行人员、电力系统及其自动化专业的研究人员以及电力系统相关专业人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统在线动态安全监测与预警技术/严剑峰,周孝信
主编. —北京:中国电力出版社,2015.8

ISBN 978-7-5123-6333-5

I. ①电… II. ①严…②周… III. ①电力系统—动态监测—
安全监测 IV. ①TM769

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 189396 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 421 千字

印数 0001—2000 册 定价 86.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

致 谢

电力系统在线动态安全监测与预警技术基于多种已有技术发展而来，其成果是“站在巨人的肩膀上”获得的。在此感谢辛耀中、陶洪铸、田芳、李亚楼、才洪全、温伯坚、边二曼、余志文等人在总体结构、关键技术和软件开发等方面的指导和帮助。

在线动态安全监测与预警的实现不是依靠个人力量能够解决的，本书内容是团队智慧的体现。在此感谢电力系统在线动态安全监测与预警团队的每一位成员多年的共同奋斗。

序

电力系统在线动态安全监测与预警技术

电力系统是关系国家能源安全和国民经济命脉的重要支柱。伴随着中国超大型交直流混合互联电网的出现，电网运行越来越复杂，其安全稳定运行问题日趋突出，电力调度控制难度增加。传统依靠年度离线计算指导电网运行的方法已不足以应对新形势下电网安全经济运行面临的挑战。

《电力系统在线动态安全监测与预警技术》是一部系统论述电网在线安全分析技术的专著，书中所述新一代的电力系统在线动态安全监测与预警技术是基于电网在线运行数据，按照确定时段（如每 15min 为周期）对电力系统进行数字仿真计算，做电网安全评估，给出预警信息、辅助决策和裕度评估结果。该技术实现了万节点级电网的在线安全预警，推动了电网安全计算从传统离线方式向在线方式的进步，为大电网在线安全诊断和智能化调度提供了有效技术手段。

本书全面系统地介绍了电力系统在线动态安全监测与预警技术的相关理论与方法，叙述了工程实践经验，并就该技术的现状与前景进行了分析和预测。

本书是作者团队 10 余年在电力系统分析领域的自主创新成果，体现了在线动态安全监测与预警技术的最新进步。其中“电

力系统在线动态安全评估和预警系统”曾获国家能源科学技术进步一等奖和国家电网公司科学技术进步一等奖，并在省级以上调度运行中心得到广泛应用，成为现代电网安全稳定运行控制的重要组成部分。

本书是国内外第一本理论联系实际的在线动态安全监测与预警技术的著作，本书的出版能够给从事电力系统分析、调度自动化和在线分析技术的研究和运行人员提供有益的参考，帮助他们全面了解电力系统在线动态安全监测与预警技术，促进电网分析控制技术的更新换代，提升电网安全经济运行水平。

周孝信

前言

电力系统在线动态安全监测与预警技术

2003年8月14日,美国和加拿大发生大范围停电事故,造成5回345kV线路在2h内相继故障跳闸,导致北美电力系统崩溃。这次大停电事故促进了国际上电网在线动态安全监测与预警技术的研究。目前国内外在电力系统在线动态安全监测与预警技术方面已取得大量研究成果,但是还缺乏一本真正意义上的专门著作。

在线动态安全监测与预警技术基于电力系统在线实时数据和动态信息,通过多种电力系统分析计算,在15min间隔内,对电力系统在线运行方式的稳态、动态和暂态特性进行自动分析和计算,给出稳定极限和调度策略,以保障电力的安全稳定运行。该技术用于分析大型电力系统各种在线运行方式下对扰动的承受能力,计算其潜在危险性,提供潜在危险的预防控制措施和稳定运行边界,使电网运行状态处于安全区域内,实现了电网由传统的离线方式计算向在线稳定分析的技术进步,为大电网在线安全诊断和智能化调度提供了有效的技术手段。

电力系统在线动态安全监测与预警技术是一项长期复杂的系统工程,技术本身涉及面广,涵盖了多学科、多专业领域的理论技术,包括电网运行控制、电力系统稳定分析、广域相量测量及并行计算等领域的新技术。中国电力科学研究院于2004年依托国家973项目“大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统”开展了电力系统在线动态安全监测与预警技术研究,此后,结合多项863计划和国家电网公司科技专项,经过10多年的深入研究和探索,已取得了一系列研究成果。电力系统在线动态安全监测与

预警技术已经被纳入国家电网调度运行的核心业务，成为电网运行的必备环节，在电网运行的日常运行监视、重大操作安全校核、严重事故分析等方面发挥了大量的实际作用，成为电网安全运行的重要技术保障。

《电力系统在线动态安全监测与预警技术》由中国电力科学研究院从2008年开始，历时6年编纂完成的。全书共11章，第一章介绍了技术总体情况，第二～六章阐述了在线数据整合、并行计算、在线稳定分析、在线可用传输容量计算以及调度辅助决策等关键技术，第七～十章介绍了系统运行模式、人机交互、工程实施方法和典型案例等实践经验，第十一章阐述了未来发展方向。

本书由严剑峰和周孝信担任主编，由严剑峰和鲁广明完成统稿，周孝信完成框架编写和定稿。第一章由严剑峰编写，第二章由邱健和江兴凌编写，第三章由陈勇编写，第四章由严剑峰、丁平、于之虹、吕颖、鲁广明编写，第五章由丁平和吕颖编写，第六章由严剑峰、于之虹、丁平、吕颖和鲁广明编写，第七章由史东宇编写，第八章由严剑峰编写，第九章由史东宇编写，第十章由严剑峰和史东宇编写，第十一章由于之虹、吕颖、严剑峰和鲁广明编写。

本书凝聚了团队多年的成果，不仅有理论算法，而且更侧重最新的工程应用。本书不仅可以做电力工程技术人员、电力科学研究人员、电力系统专业院校的参考书，而且对电力系统分析、调度自动化、在线分析技术等相关专业具有一定指导作用。限于编者水平，书中内容难免有不妥之处，恳请同仁批评指正，提出宝贵意见。

编者

2015.6

目 录

电力系统在线动态安全监测与预警技术

序	
前言	
1 概述	1
1.1 在线动态安全监测与预警系统简介与背景技术	1
1.2 在线动态安全监测与预警系统结构	7
1.3 关键技术问题	12
2 在线数据整合	17
2.1 在线数据整合简介	17
2.2 公共处理方法	20
2.3 以离线数据为基础的在线数据整合方法	29
2.4 以在线数据为基础的在线数据整合方法	30
3 并行计算	32
3.1 并行计算简介	32
3.2 分配机制	35
3.3 通信机制	37
3.4 流程管理	46
3.5 通用应用环境	49
4 在线稳定分析	54
4.1 在线稳定分析简介	54
4.2 在线暂态稳定分析	55
4.3 在线电压稳定分析	58
4.4 在线小干扰稳定分析	65
4.5 在线静态安全分析	75
4.6 在线短路电流分析	85
4.7 离线/在线分析一体化	92
5 输电断面传输裕度评估	95
5.1 潮流调整算法	95

5.2	稳定校核原则	99
5.3	并行校核方法	102
5.4	关键技术问题	106
6	调度辅助决策	108
6.1	在线暂态稳定辅助决策	108
6.2	在线静态电压稳定辅助决策	116
6.3	在线小干扰稳定辅助决策	120
6.4	在线静态安全辅助决策	129
6.5	短路电流限制辅助决策	138
7	在线运行与在线研究	150
7.1	在线运行态与在线研究态的定义	150
7.2	在线运行态	150
7.3	在线研究态	156
8	在线动态安全监测与预警系统展示与人机交互	174
8.1	在线动态安全监测与预警系统展示	174
8.2	电网拓扑图形	176
8.3	分析结论可视化	178
8.4	综合信息	181
9	工程实施	183
9.1	工程实施条件	183
9.2	工程实施关键问题	185
9.3	工程实施步骤	189
9.4	典型问题	196
9.5	系统维护	199
10	工程实施案例	201
10.1	跨区级电网实施	201
10.2	区域电网实施	211
10.3	省级电网实施	223
11	技术展望	231
11.1	安全评价体系	231
11.2	综合辅助决策	237
11.3	新能源在线分析	242
11.4	在线趋势分析	250
	参考文献	257
	索引	262

1.1 在线动态安全监测与预警系统简介与背景技术

1.1.1 系统简介

随着国民经济和电力工业的发展,电网作为关系国家能源安全和国民经济命脉的重要支柱,肩负着十分重要的经济责任、政治责任和社会责任。伴随我国超大型互联电网的出现,以及可持续发展的未来能源体系的建设^[1],电网的动态运行越来越复杂,电网运行裕度减小,电力调度的控制难度增加,电网的动态安全问题日趋突出。为此,为了保证电网的安全稳定与经济运行,需要不断跟踪国内外新技术的发展,将最新的电力系统安全分析和仿真技术应用于电网调度运行管理,这对于加强电网的分析能力,全面提高人员素质、科研手段和调度水平具有重要意义。

2003年8月14日,美国和加拿大发生的停电事故,促进了国际上电网在线动态安全监测与预警系统(Dynamic Security Assessment, DSA)的研究^[2]。在那次事故中,5回345kV线路在2h内相继故障跳闸,导致北美电力系统崩溃。自此,如何在线跟踪处理多重相继故障成为各国电网研究的热点。近10年来,我国电力工业迅猛发展,到2014年底,全国装机总容量达13.6亿kW,电网规模已成为全球第一。与快速发展的电源建设相比,我国电网结构相对薄弱,动态稳定、暂态稳定、热稳定问题并存,特别是大量间歇性风电等可再生能源电源接入电网,给电网安全运行带来巨大挑战,原有的调度自动化系统只进行在线静态分析,电网稳定分析只有离线方式,难以适应大电网运行需求。

在线动态安全监测与预警系统基于电力系统在线实时数据和动态信息,通过多种电力系统分析的计算手段,在给定的时间间隔(一般为15min)内,对电力系统在线运行方式的稳态、动态和暂态特性进行自动分析和计算,给出稳定极限和调度策略,以保障电网的安全稳定运行,亦称在线动态安全评估。

电力系统在线动态安全监测与预警实现了对当前运行状态的快速安全评估,主要在电力系统安全监视、调度操作影响预估和事故分析三个方面发挥作用,并为未来电网在线分析控制提供技术基础。

(1) 电力系统安全监视。传统电压、电流、功角和功率等运行量的监测可以判断当前运行点是否正常,在线动态安全监测与预警可以进一步判断当前运行点的潜在危险性、抗干扰能力以及与安全稳定边界的距离。

(2) 调度操作影响预估。对调度即将进行的操作进行安全稳定性校验,评估操作后的电力系统安全稳定性的变化情况,提前预知操作产生的安全影响。

(3) 事故分析。提供电力系统稳定分析用的事故前后数据,为事故分析提供快速真实的



基础数据。

(4) 提供在线分析控制基础。实现电网运行控制约束的在线分析计算, 为未来电网实现在线监视—分析—控制提供基础。

电力系统在线动态安全监测与预警实现了电网传统的离线方式计算向在线稳定分析的技术飞跃, 为大电网在线安全评估和智能化调度提供了有效的技术手段。其中, 在线稳定分析评估与预警功能根据电力系统在线潮流和稳/动态模型计算信息, 实现大规模电网在线安全评估、预警和调度辅助决策; 离线研究功能采用并行计算方式, 极大提高了运行分析人员进行系统方式计算的速度。

在线动态安全监测与预警系统的开发建设是一项长期复杂的系统工程, 系统本身涉及面广, 涵盖多学科、多专业领域的理论技术, 涉及电网运行控制、电力系统稳定分析、广域相量测量及并行计算等领域的新技术。同时, 在实际开发建设中还要综合考虑对现有资源的充分利用和有机集成, 包括目前的已有能量管理系统 (Energy Management System, EMS)、广域测量系统 (Wide Area Measurement System, WAMS)、继电保护及故障信息管理系统、安全自动控制系统、离线安全分析计算软件及并行计算平台等。系统建成后将通过在线稳定分析及预警、调度辅助决策和计划校核, 实现在线监测电网运行的安全隐患, 评估电网的稳定程度, 提高各级电网运行决策的科学性和预见性, 从而进一步挖掘电网输送潜力, 更加合理地安排和优化电网运行方式, 提高电网的安全稳定水平以及电力市场环境下的调度能力, 并为未来实现闭环稳定控制奠定基础。

1.1.2 国外背景技术

2005 年 2 月, 美国电力系统工程研究中心 (PSERC) 发布的一项关于在线暂态稳定评估的技术报告 *On Line Transient Stability Assessment Scoping Study* 表明, 当时国际上已有 6 个电力系统在线软件生产厂家^①可以提供不同程度的在线暂态稳定评估软件。这些软件的主要功能是在 EMS 高级应用的基础上, 实现采用实时数据的时域仿真, 并配合扩展等面积法或暂态能量函数法的暂态稳定评估。同时进行的使用调研表明, 电网运行部门强烈希望这些软件能早日达到实用要求, 但当时只有 2 家公司的软件在试用和调试, 并未达到大规模实际应用的程度。

1.1.2.1 美国 EPRI 的 DSA 系统^[3]

美国 EPRI (Electric Power Research Institute) 联合西门子公司将较为实用化的 DSA 系统嵌入了美国北方州电力公司的 EMS, 并对 DSA 系统实现不间断的安全评估。

DSA 系统可以定时每隔几分钟从 EMS 在线系统获取实时数据, 判断 DSA 系统当前的稳定状态, 决定当前 DSA 系统在各种扰动条件下的运行极限, 同时判断出让 DSA 系统失稳的故障, 给出稳定裕度或者不稳定的程度。

DSA 系统分为三层, 主要包括:

(1) 实时数据采集层。从 EMS 中获得电网当前状态, 包括网络拓扑结构和发电负荷数据, 通过变化监测器 (Change Monitor) 动态更新 DSA 的基础数据。变化监测器主要是监视系统的变化, 决定在何种条件下需要驱动 DSA 模块的运行, 排除不需要做稳定分析的情

^① 这些厂家是 Areva T&D Corporation、Bigwood Systems、Powertech Labs Inc.、Siemens EMTS、University of Liege 和 V&R Energy System Research Inc.。



况，这样可以提高整个系统的运行效率。

(2) DSA 层。包括事故扰动排序、动态仿真和安全监测。如果系统安全，则继续下一个循环的分析；如果系统存在安全性缺陷，则发出警告并进行控制措施的选择。DSA 层的主要功能是：将各种高效的动态安全分析算法模块化，根据系统的实际情况或调度员的意向选择适当的分析模块，对当前电网进行计算。

(3) 控制层。包括校正控制和预防控制。该模块是 DSA 结果对电网控制作用的体现。DSA 计算系统稳定裕度和运行极限，给出稳定控制措施并施效于原电网，使系统可以运行在安全区域。

EPRI 在美国北方州的 DSA 系统采用能量函数方法进行动态安全分析以达到快速分析的目的。为了利用多机并行处理的优点，使用客户服务器模式实现了 DSA，将此称之为机群 (Cluster) 结构。其目的是通过在多个工作站上并行处理大量的事件，以用来快速评估系统的稳定状况。DSA 的功能块分为输入、进程管理、事件筛选、模拟和安全监视五个子系统。DSA 要求输入下述模型：网络模型、设备静态模型、设备/系统动态模型、负荷模型和故障/控制模型。该系统可以在 10min 之内做约 30 个 5~10s 的实时仿真，系统规模为 2000 个节点，250 台发电机，使用一个 CPU 进行计算。

1.1.2.2 北美 WSCC 的广域测量系统

1989 年，美国能源部联合邦纳维尔电力局 (BPA) 和美国西部电力局 (WAPA)，为美国西部电网系统开发了广域测量系统 (Wide Area Measurement System, WAMS)。WAMS 的开发项目和美国西部动态信息网络 (West System Dynamic Information Network, Wes-DINet) 项目共同构成电力系统动态信息的框架结构。研究内容包括三个阶段：

- (1) 广域测量系统的实施；
- (2) 开发在线电压安全评估和动态安全评估软件包；
- (3) 利用柔性交流输电系统 (FACTS) 的元件来控制电网运行。

该项目的可能应用领域包括：

- (1) 实时确定输电容量；
- (2) 预测电力系统的潜在问题；
- (3) 优化规划、运行、控制过程；
- (4) 检验电力系统动态行为和控制装置性能；
- (5) 解决电力系统规划、分析、设计的困难问题；
- (6) 检验电网动态模型。

自从 1992 年美国西部电力联盟 (WSCC) 安装并运行世界上第一台商品化的相量测量装置以来，电力系统实时动态监测技术已经被证实是维护电力基础设施可靠与安全运行的重要工具。

1.1.2.3 加拿大 Hydro-Quebec 的稳定控制系统

Hydro-Quebec 电网的特点是长距离输送，输送距离可达 1000km。在 2000 年底投运动态稳定控制系统，该系统有严重扰动检测子系统、远程系统减负荷子系统、发电机切除子系统和可编程减负荷子系统 4 个子系统。涉及的稳定问题包括电压崩溃和暂态稳定等，系统的反应时间约为 200ms。

Hydro-Quebec 利用相角测量作为发电机的电力系统稳定器 (Power System Stabiliza-



tion, PSS) 控制输入, 以改善区域电网的振荡衰减性能。相角采集系统由一个数据集中器和 9 个远程电网的相量测量设备组成。数据集中器则为各发电机的 PSS 提供所需信息。结果证明, PSS 反馈信号加入远程联动频率测量后, 可改善电网的振荡衰减速度; 当系统发生不稳定时, 电压支持也得到改善。这种控制方式可以抑制一系列以前分析的不稳定事件, 并且还可以改善不稳定事件的母线电压。如果 PSS 进一步使用远方的测量频率, 电网对远方母线的支持能力可得到明显的改善。

1. 1. 2. 4 韩国的暂态稳定控制

韩国在 2002 年 9 月投运了暂态稳定控制系统, 该系统是由 8 台同步相量测量装置 (Phasor Measurement Unit, PMU) 组成集中式系统, 数据更新速率为 10Hz, 每 15min 完成一次预想事故的稳定计算, 稳定计算算法为单机等值法 (Single Machine Equivalent Method, SMIE)。

1. 1. 2. 5 美国的 PJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland) 系统

美国 PJM 系统是基于大电网在线数据的安全稳定分析系统。其具有成熟的计算系统支持, 基于 Powertech 计算软件构建。为了有效的利用机群系统的计算能力, 还具有海量故障筛选的能力, 采用了基于稳定域边界的主导不稳定平衡点算法 (Boundary of Stability Region Based Controlling Unstable Equilibrium Point method, BCU) 筛选计算方案。为了处理不同情况下的应用需求, PJM 还具有在线运行方式和研究方式两种模式。总体来说, PJM 更加关注系统的暂态稳定性, 具有很高的效率表现。

1. 1. 2. 6 日本的 TEPCO-BCU 系统^[4]

TEPCO-BCU 在线动态安全监测与预警系统由日本东京电力公司和美国 Bigwood 公司联合开发研制。该系统采用了 BCU 法和详细的时域仿真法相结合的方法, 具体通过 BCU 分类器实现。TEPCO-BCU 系统能够进行动态安全评价、能量裕度的计算和控制。对分类器确定的不稳定事故和难以确定的事故通过 BCU 辅助的时域仿真法 (BCU-guided TDS method) 来进行完全的稳定性分析; 对分类器确认稳定的事故, 则不需要进行进一步的分析。该系统能够捕获所有不稳定事故, 能尽量排除不影响系统稳定的事故, 在线计算能够适应运行工况的不断变化, 鲁棒性好, 筛选速度快。

1. 1. 3 国内背景技术

1. 1. 3. 1 动态安全评估、预警和决策系统^[5]

中国电力科学研究院自主研发的动态安全评估、预警和决策系统是跨区电网动态稳定监测预警系统的重要组成部分, 于 2007 年 11 月和 12 月通过原国家电力调度通信中心第一、二阶段功能现场验收。

该系统开发的并行计算平台针对电力系统计算特点, 利用先进的大规模机群服务技术, 在离线并行计算平台技术的基础上, 发挥任务并行的优势, 实现电网当前运行工况下安全问题的在线分析。

该系统开发的动态数据平台综合使用国调中心 EMS 的 330kV/500kV 电网实时数据和分散在区域电网调控中心 EMS 的 220kV 数据, 实施基于 330kV/500kV 主网数据约束的整合潮流计算, 整合后数据和电网运行数据吻合, 形成准确合理的电网实时运行工况, 为后续的电网友全分析提供统一的数据来源。

按计算功能阶段该系统可划分为预警计算阶段和辅助决策计算阶段, 集成了多类稳定分

析计算功能,能够实现暂态稳定计算、小干扰稳定、电压稳定、调度辅助决策计算及输电断面传输裕度评估计算等多种稳定分析和决策功能。

2007 年底,该系统对国家电网公司 10000 节点系统扫描故障总数约 400 个,分析评估及辅助决策周期(每周期包含 4 个厂家合计 4 轮次计算)在 900s 以内。

1.1.3.2 暂态安全定量分析离线/在线软件^[6]

暂态安全定量分析离线/在线软件(Fast Analysis of Stability Using the Extended Equal Area Criterion and Simulation Technologies, FASTEST)是原国网南京自动化研究院在扩展等面积准则(Extended Equal Area Criterion, EEAC)研究基础上设计开发的。FASTEST 能够系统全面地快速定量评估电网的暂态功角、电压和频率安全性,满足在线动态安全分析的要求。该软件的潮流计算和暂态稳定计算能够处理复杂模型,提前终止积分计算;一次仿真计算能够同时给出暂态功角稳定裕度、暂态电压稳定裕度和暂态电压/频率偏移可接受裕度;具有全网故障表或特定故障扫描、算例严重程度的排队功能,满足不同需求的扫描筛选准则,可靠地捕捉严重的故障;能够进行各种极限计算。

此外,清华大学开发了电网控制中心安全预警和决策支持系统。该系统能够在线运行,自动跟踪系统运行状态的变化,随时根据当时电网的状况给出电网存在的潜在问题,同时给出预防控制的对策,供决策人员参考。

1.1.3.3 实时动态监测系统

同步相量测量装置(Phase Measurement Unit, PMU)的研究在我国起步于 1995 年,中国电力科学研究院、清华大学、华北电力大学、山东工业大学、西安交通大学和华中理工大学等单位都开展了相关研究,其中清华大学得到了国家自然科学基金的支持。

1996 年以后,我国陆续在南方、西北、华东、四川等区域电网建立了实时动态监测系统。这些系统都由 PMU、调制解调器、中央监控站、网络服务器及资料分析站等组成。其中,PMU 的采集时钟同步误差不超过 $1\mu\text{s}$,相角测量精度 0.1° ,通信速度 $20\sim 50$ 次/s,通信延迟 $10\sim 30\text{ms}$;上送数据包括电压及电流相量、线路机组功率、发电机内电动势、频率、频率变化率和重要开关信号等。PMU 子站和中央主站均具备长期连续记录动态数据的能力。主站已经实现了实时频率特征分析、扰动识别、全网录波触发、仿真曲线对比等应用功能。这些系统应用于电力系统后,一是可以使运行管理人员直观地了解到电力系统的稳态运行情况 and 动态过程,为调度人员的运行决策提供帮助,并积累观测电力系统动态过程的运行经验;二是可以同步记录电力系统的动态扰动过程。

截至 2005 年,我国 PMU 和实时动态测量系统的主要生产厂家及其产品有:中国电力科学研究院生产的 PAC-2000 电力系统同步相量测量装置(东北、华东),四方继保自动化股份有限公司生产的 CSS-200 系统(国调、华北、东北、江苏),上海南瑞电气有限公司生产的 SMU 同步相量测量装置(江苏、华东)。

1.1.3.4 安全稳定控制系统

在我国,安全稳定控制系统应依据 DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》的规定进行配置。按满足电力系统同步运行稳定性分级标准的要求,设置不同功能的安全稳定控制系统,建立起保持电力系统安全稳定运行的三道防线,使电力系统在某一特定严重程度的扰动下,保持在某一规定的安全水平(状态),并保证电力系统满足安全稳定的可靠性要求。



目前,国内外稳定控制系统(国外称 Special Protection Schemes)使用的决策方式有三类:离线决策、在线准实时决策和在线实时决策^[7]。其中,离线决策是国内应用较早和较普遍的方式,也有比较成熟的运行经验;在线准实时决策在国外某些电力系统已有使用,我国在这方面虽有类似的研究和开发,但投入商业运行的不多;由于对计算模型、计算手段、通道等的制约条件较多,在线实时决策系统尚无实际应用。

现有区域安全稳定控制系统控制策略是针对局部电网的暂态稳定而设置的。对交流同步联网系统在联网初期多采用点对点的交流弱联系,大故障扰动下功率振荡特征更为复杂,系统可能分成两个或以上的同调机群,使得系统电压、电流等电气量大幅度周期性波动,并在薄弱环节形成振荡中心,即长过程的动态稳定。系统的网架结构、运行方式及故障扰动形式等对振荡中心的形成和发展会进一步产生影响。原有的区域安全稳定控制装置大多基于“离线计算、在线匹配”的方式,由于联网后方式变化更为复杂,局部区域的网络结构变化对相邻联网系统的稳定水平影响较大,而且由于功率振荡的不确定性因素较多,给控制策略表的整定增加了困难。

由于跨区电网规模庞大,运行方式千变万化,离线制定策略表不仅非常困难,而且很难与实际工况相符合。在线预决策系统根据电力系统当前的运行工况,搜索最优的稳控策略,定期刷新策略表。因此,可以及时把握任何特殊运行方式下的系统安全,这对避免全国跨区电网这样的大电网发生大面积停电事故非常重要。2003年,美加电网发生“8·14”大停电事故,由于在事故缓慢恶化阶段电网缺乏在线分析软件,在快速恶化阶段缺乏自适应的紧急控制装置,在临界振荡阶段缺乏自适应的解列装置,使系统错失了恢复稳定的多个时机。如果实现了快速的定量分析,就能有效支持控制策略,避免发生连锁反应事故。

国内电力系统安全稳定控制所采用的方式主要分为就地控制型和集中控制型两类。就地控制型一般用于小范围控制,各控制装置相互独立,互不联系,控制策略简单;集中控制型则相反,各控制装置之间联系较紧密,中央控制站收集各点的数据,然后进行统一的运算,得出控制量后再向各控制子站发出控制命令,由控制子站执行控制命令。就地控制型安全稳定控制装置由于发展较早,国内已成功投入运行的安全稳定控制装置绝大多数为此类;而集中控制型安全稳定控制装置由于技术复杂,发展较晚,因而投入运行的很少。

除上述两类安全稳定控制装置外,现还有一类介于就地控制型和集中控制型之间的区域控制型安全稳定控制装置。此类安全稳定控制装置没有中央控制站,各安全稳定控制装置安装点以就地判断控制为主,适当采集周边站点的运行信息和工况,当经过计算后发现仅在本站采取控制措施不足以保证系统稳定时,可向周边站点发出控制命令;当安全稳定控制装置接收到周边站点发来的控制命令时,加上本站的一些就地判断条件,即可发出控制命令。区域控制型安全稳定控制装置集中了就地控制型和集中控制型安全稳定装置的优点,既可以对较大范围的电力系统进行安全稳定控制,又保持了各控制站安全稳定控制装置之间的相对独立性,使每一个控制站的运算工作量大为减少。截至2001年,发达国家电力系统中的安全稳定控制装置多采用此类。国内天广交直流输电系统安全稳定控制装置 EMWK2000 以及广西电网在线稳定分析和预防控制系统即为此类。

(1) 天广交直流输电系统安全稳定控制装置 EMWK2000。

EMWK2000 由 4 个控制站组成,即马窝换流站、天生桥二级电站、平果变电站和来宾变电站。4 个站的安全稳定控制装置分别独立地对本站的运行状态进行监视,同时,马窝换



流站也接收天生桥二级电站的部分数据（通过光纤数字通道），天生桥二级电站接收马窝换流站和平果变电站的部分数据（通过光纤数字通道），平果变电站接收来宾变电站的部分数据（通过微波或载波通道）。4个站的安全稳定控制装置分别有自己的控制策略，在对所得到的数据进行计算后发出控制命令（包括解列线路、切机等），若本站的控制措施达不到保持稳定的要求时，则向其他站发出控制请求。安全稳定控制装置在接收到其他站发来的控制请求后需与本站计算结果相结合，得出本站的控制命令并出口执行。EMWK2000投入运行后连续正确动作，保证了向广东大负荷送电时系统的稳定，使南方电网向广东送电的稳定极限提高到了一个新的水平。

此套安全稳定控制装置采用开放式结构，当系统结构发生变化时，只需对相关站点安全稳定控制装置的控制策略稍做修改或增加部分硬件即可实现，当天广三回线建成后，利用现有的安全稳定控制装置进行扩展也很方便，在天广三回线上必要的地点增加新的安全稳定控制装置，同时对现有的安全稳定控制装置进行简单的改造即可构成天广三回线的安全稳定控制装置。

（2）广西电网在线稳定分析和预防控制系统（OAP）。

OAP根据广西电网EMS定时刷新的状态估计后的在线数据，连续地动态分析广西电网离线制定的预想故障集和在线制定的附加故障集下的暂态功角稳定性、暂态电压和频率偏移可接受性和静态电压安全性，同时评估离线制定的各种预想控制措施的有效性。OAP侧重于系统全局安全域的求取和离线制定的控制预案的评估，不涉及在线控制策略的优化搜索和在线闭环控制的实施。选用保留外部系统完整数据的在线潮流匹配的计算方案，即：系统根据事先定义的时段规则，选取南方电网的典型方式，根据各个区域之间的交换功率，调整外网典型方式数据，最后将广西网EMS数据与外网调整后的典型方式数据合并，形成反映运行工况的潮流数据。以南方电网的详细模型进行在线稳定分析和预想控制策略评估，系统设置预想故障和在线附加故障总数约为85个，分析评估周期小于5min。

1.1.3.5 保护及故障信息管理系统

我国自2000年起，陆续在全国各区域电网构筑了保护及故障信息管理系统。系统的主要功能是采集继电保护、录波器、安全自动装置等智能装置的实时/非实时运行、配置和故障信息，对这些装置进行运行状态监视、配置信息管理和动作行为分析。在电网故障时快速进行故障分析，为运行人员提供处理提示，使调度人员可以迅速准确地掌握电网故障情况以及继电保护装置的動作行为、故障地点、故障相别等第一手资料，及时处理电网故障，加快对事故及继电保护异常的处理，提高电网事故分析的技术水平以及继电保护系统管理和故障信息处理的自动化水平。

1.2 在线动态安全监测与预警系统结构

1.2.1 基本思路

在线动态安全监测与预警系统的基本思路如图1-1所示。该系统通过电力系统状态评估获取在线运行方式，与电网的设备模型参数进行在线数据整合，形成完整的计算分析数据，并结合预想扰动和运行限额信息，调用在线安全稳定分析、调度辅助决策和输电断面传输裕度评估模块完成在线计算，实现在线数据整合、在线安全稳定分析、调度辅助决策和输