

智能化广域决策及 预控保护技术研究与应用

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

智能化广域决策及 预控保护技术研究与应用

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

智能化广域决策及预控保护技术研究与应用 / 贵州电网

任公司组编. — 贵阳: 贵州大学出版社, 2015.12

(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)

ISBN 978-7-81126-841-6

I. ①智… II. ①贵… III. ①智能控制—电网—安全技术
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 321619 号

编 者: 贵州电网有限责任公司

责任编辑: 但明天

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵州思捷华彩印刷有限公司

开 本: 720 毫米×1000 毫米 1/16

印 张: 13

字 数: 270 千字

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2016 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-841-6

定 价: 57.00 元

版权所有 侵权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换。

电话: 0851-85981027

编 委 会

主 编

康 鹏

副主编

高昌培

王永刚

王宇恩

参 编

白加林

赵武智

万春竹

戴万武

陈 刚

齐 岳

戴 宇

戴席伟

王增平

秦红霞

黄少锋

李继晟

娄霄楠

颜 霞

前 言

自 20 世纪 90 年代初期, 基于全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的同步相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU) 的成功研制, 标志着同步测量技术的诞生。随后的 20 多年时间里, 广域测量系统 WAMS 在世界范围内得到了广泛的应用。与此同时, PMU 的应用也从广域测量领域延伸到广域保护和广域控制领域, 在同一时间参考轴下获取电网的实时动态信息和稳态信息, 为运行决策、预防控制保护提供了新的途径和方法。

本书在结合电力生产的基础上, 系统地介绍了电网保护与控制技术的发展现状和不足; 提出了广域保护预防及控制系统的架构以及功能配置, 并从功能层面按照广域和站域进行了划分; 详细介绍了广域保护预防及控制系统的若干关键技术; 为验证广域保护控制系统的准确性和可靠性, 提供了严格的 RTDS 测试和现场测试方法和手段, 以及在贵州电网中开展广域保护及预防控制系统的工程实例。

本书主要针对贵州电网广域保护和预防控制系统建设及其应用工程实践情况进行撰写, 注重实用性是本书的一大特色。本书在编写过程中吸收了国内外近年来相关领域的最新研究成果, 同时包含贵州电网有限责任公司电力调度控制中心与北京四方继保自动化股份有限公司在贵州电网广域保护和预防控制系统设计与应用过程中的工程经验和总结。

贵州电网有限责任公司电力调度控制中心和科技部等部门对本书的编写给予了大量支持和帮助, 此外, 北京四方继保自动化股份有限公司、贵州电力设计研究院、都匀供电局、六盘水供电局、凯里供电局、华北电力大学等单位也给予了大量的帮助, 在此一并表示感谢。

本书提供了大量的技术理论和工程实践，可供电网公司、系统运行管理人员及相关技术人员参考，也可作为电力系统专业和保护专业研究生和本科生的参考资料。

本书由康鹏主编，高昌培、王永刚、王宇恩副主编，白加林、赵武智、万春竹、戴万武、陈刚、齐岳、戴宇、戴席伟、颜霞、王增平、秦红霞、黄少锋、李继晟、娄霄楠等参加了编写，最后白加林对全书进行了校阅。

由于编者水平有限，虽经多次校阅，错误、疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论.....	1
1.1 简述.....	1
1.2 常规继电保护的不足.....	2
1.3 广域保护简介.....	4
1.4 广域保护的意义.....	7
第2章 广域保护预防与控制系统架构.....	9
2.1 广域保护系统架构.....	9
2.1.1 集中式决策控制系统架构.....	9
2.1.2 分布式决策控制系统架构.....	10
2.2 广域保护及控制功能配置.....	13
2.3 站域保护及控制功能配置.....	14
2.4 工程实例.....	15
第3章 时间同步和实时数据交互技术.....	19
3.1 时间同步技术.....	19
3.1.1 广域保护系统对时间同步的要求.....	20
3.1.2 传统保护装置采用的时间同步方法.....	20
3.1.3 基于 UTC 的时间同步技术.....	25
3.1.4 IRIG-B 时间同步技术.....	27
3.1.5 IEEE 1588 时间同步技术.....	28
3.2 电力系统通信网络.....	35

3.2.1	SDH 光同步传输网络	36
3.2.2	PTN 包交换网络	38
3.3	基于高速通信通道的实时数据交换	42
3.3.1	广域保护系统站内数据交换	43
3.3.2	广域保护系统站间数据交换	45
3.3.3	PMU 通信技术	48
3.4	实际工程时间同步方案	52
第 4 章	广域保护与控制技术	55
4.1	广域电流差动保护	55
4.2	T 接线路的快速保护	57
4.3	基于权重的综合方向保护	58
4.4	广域开关失灵远跳	61
4.5	自动适应旁路保护	63
4.6	广域故障录波及故障测距	65
4.7	广域备用电源自动投切	67
4.7.1	广域备自投原理	68
4.7.2	广域备自投控制策略	73
4.8	故障解列小电源	77
4.9	广域过载联切	80
4.10	基于 IEC 61850 标准的广域保护模型	81
4.10.1	广域保护 IED 的信息模型	82
4.10.2	广域保护 IED 的通信服务模型	84
4.10.3	基于 IEC 61850-90-1 的广域保护建模探讨	89
4.10.4	工程应用	91
第 5 章	集合式站域保护与控制技术	95
5.1	站域保护与控制	95
5.2	集合式站域保护	96
5.3	母线保护	100

5.3.1	比率制动式电流差动保护	101
5.3.2	虚拟比相式电流突变量保护	102
5.3.3	TA 变比的自动调整	105
5.3.4	电压闭锁	106
5.4	变压器保护	107
5.4.1	差动速断保护	107
5.4.2	比率差动保护	108
5.4.3	简易母线保护	114
5.5	冗余线路后备保护	116
5.5.1	距离保护	116
5.5.2	TV 断线后两段过流保护	122
5.5.3	零序电流保护	122
5.5.4	重合闸	123
5.5.5	检测功能和其他判别	123
5.6	就地低频低压减载紧急控制	124
5.6.1	低周减载功能	124
5.6.2	低压减载功能	125
5.7	广域保护在数字变电站的实现及应用	126
5.7.1	工程实现	126
5.7.2	工程应用	129
第 6 章	广域保护与控制系统试验	131
6.1	RTDS 实时数字仿真试验	131
6.1.1	试验目的	132
6.1.2	试验系统的构成	133
6.1.3	试验实例	133
6.2	站域保护 RTDS 测试项目	137
6.2.1	变压器保护测试	137
6.2.2	母线保护测试	137

6.2.3	站域线路后备保护测试	138
6.2.4	就地低频低压减载紧急控制测试项目	139
6.3	广域保护 RTDS 测试项目	139
6.3.1	线路保护测试	139
6.3.2	广域备自投测试	140
6.3.3	过载联切测试	141
6.3.4	故障解列小电源测试	142
6.3.5	故障录波功能测试	142
6.3.6	系统操作测试	142
6.3.7	信息传输测试	142
6.3.8	闭锁功能测试	143
6.4	现场调试	143
6.4.1	子站现场调试	144
6.4.2	主站现场调试	145
6.4.3	现场系统联调	147
第 7 章	广域保护与控制系统工程设计	149
7.1	设计原则	149
7.1.1	总体原则	149
7.1.2	系统的配置原则	151
7.2	设计中需注意的问题	152
7.3	工程应用中遇到的问题及解决方案	154
7.4	主要设备清册	160
第 8 章	工程应用前景展望	165
8.1	广域保护及控制系统工程实现及应用	165
8.1.1	都匀区域电网广域保护及控制系统	165
8.1.2	六盘水区域电网广域保护与控制系统	171
8.2	广域保护与控制系统运行情况	174
8.3	其他广域保护系统应用实例	178

8.3.1 广州区域电网广域保护系统	178
8.3.2 凯里区域电网广域保护系统	181
8.4 应用前景展望	186
参考文献	189

第 1 章

绪 论

1.1 简 述

传统继电保护是分布式布置的，主要利用本地和就近信息构成继电保护判据，用于在电力系统发生故障后实现对故障元件的自动和快速切除、隔离故障，以保证人身和设备安全以及无故障部分的正常运行。另外，传统的二次安全自动装置与继电保护装置相互独立，两者无法有效协同配合，使得电网网络重组等缺乏最优控制策略。随着智能电网建设的开展，由智能电网的特征带来的数据共享、分布式电源接入、微网运行等技术，对继电保护提出了新的要求。由于基于本地和就近测量信息的常规保护在解决这些问题时面临较大的困难，因此需要我们更加深入地研究新一代的继电保护系统。

随着计算机技术的飞速发展及计算机在电力系统继电保护领域的普遍应用，新的控制原理和方法被不断应用于微机继电保护中，以期取得更好的效果，从而使微机继电保护的研究向更高层次发展。网络通信技术的发展，特别是光纤的大量敷设，使得获得电网区域多点电气量的信息成为可能。从信息论的角度来看，基于多点的电气信息而进行区域保护方案的设计，将比传统的“点”“线”保护具有天然的原理优势。在具备充分的广域信息的情况下，广域保护可以比较容易地识别电网的拓扑状态和运行状态，进而通过利用广

域信息来提高继电保护的性能。可以预见，基于电网多点电气信息的“面”保护——广域保护，将成为继电保护的发展方向。

我国电力系统依据《电力系统安全稳定导则》所规定的安全稳定标准，建立起保持电力系统安全稳定运行的三道防线。通常，电力系统安全稳定控制三道防线的控制装置是相互独立的，人为地将电力系统从受到扰动到后续发展的动态过程割裂为“三个独立的控制阶段”，并且每个阶段基于局部区域有限的信息判断，不能反映电网的安全运行水平，无法实现相互配合。继电保护装置只解决故障识别和故障隔离，不关心故障隔离后系统稳定趋势，可能导致由于继电保护装置动作而恶化了系统的稳定性。安全稳定控制装置只解决继电保护正确动作后系统的稳定问题，弱化引起继电保护动作的原因，不关心继电保护误动或拒动的过程，可能导致安全稳定控制装置误动或拒动，或者控制措施失效，失去保证系统稳定的宝贵时间。

依据《电力系统安全稳定控制技术导则》规定的内容，普遍意义的广域保护实际包含了电力系统安全紧急控制的全部“三道防线”。实际上，处于“第一道防线”的继电保护功能是整个安全紧急控制的基础，所以利用广域或区域信息来改善继电保护性能的研究是真正实现广域保护的重要步骤，利用系统广域信息完成智能继电保护功能，应该是一个逐步发展的过程。继电保护不同技术发展阶段，随着技术不断进步，继电保护“四性”不断提高，继电保护作为电网安全稳定运行的第一道防线，其重要性得到越来越充分的体现，任何技术的实现不能以降低继电保护“四性”为代价。因此，广域保护的发展必须紧紧围绕继电保护“四性”而开展，以提高继电保护“四性”为努力方向。

1.2 常规继电保护的不足

继电保护用于在电力系统发生故障后实现对故障元件的自动和快速切除、隔离故障，以保证人身和设备安全以及无故障部分的正常运行。利用局

部信息构成继电保护判据的常规继电保护主要存在以下不足。

- 常规的后备保护虽然有比较大的保护范围，但为了保证选择性，其时限整定遵循阶梯原则，实际的动作时限可能高达数秒，可见其选择性的获得是以牺牲快速性为代价的。在电网规模和复杂程度越来越大的情况下，要做到后备保护之间的相互配合非常困难。
- 对于采用远后备由上一级保护实现后备的系统，线路故障时变电站相关进线线路保护拒动、开关拒动，故障切除时间延长，故障切除范围扩大。
- 在一些特定的电网结构下，线路保护为了保证其灵敏度，保护范围伸出主变中压侧时，为了避免下一电压等级系统故障时线路保护越级跳闸，上下级保护整定配合也比较困难。
- 继电保护动作判据都是基于本地测量数据，其选择性要求继电保护只能保护本地设备，没有考虑故障对整个电网的影响，难以对运行方式不断变化的客观系统作出全面的反映。保护装置相互之间缺乏有效的协调，难以实现系统全局的安全稳定运行，在某些情况下（如发生连锁故障）会恶化系统的运行状况。
- 目前使用的继电保护和安全自动装置控制判据，主要是基于本地和就近量构成，反映的只是系统某点或局部区域有限的运行状态，而不能反映较大区域电网的安全运行水平。继电保护系统以切除就地故障为目标，对故障切除以后系统的运行情况不予反映，无法起到保护故障后电力系统的作用，甚至可能出现因为继电保护装置正确动作切除故障元件而造成其他元件工作异常，并且可能出现保护装置正确动作连锁切除故障，使得系统瓦解的情况。
- 安全自动装置种类较多，但每种装置通常只能完成一种或少数几种功能，多数反映本地运行状况，不同装置之间缺乏配合，无法准确反映整个系统的变化情况。
- 随着智能电网的发展，分布式电源和微网广泛出现，负荷端经常包含电源，传统的以距离保护原理为基础的主保护和后备保护将不能正常实施。

1.3 广域保护简介

基于电网多点电气量和状态量信息的广域（区域）保护，近年来引起了国内外电力系统继电保护工作者的关注。广域保护概念的提出，为解决大规模互联电网的保护和控制问题提供了新的思路和方法。借助通信系统，广域保护系统可以获得电力系统多点电气量的信息，可以快速、可靠、准确地切除故障。

同时，根据故障切除前后电网潮流分布和拓扑结构变化的情况，判断切除故障可能对系统安全稳定运行产生的影响，有选择地采取切机、切负荷、电网重构等预防性措施来对频率和电压进行控制，使系统从一个运行状态平稳地过渡到另一个稳定运行的状态，不必等待系统参数偏离正常值之后再采取措施。在预防性措施不能奏效的情况下，可采取协调一致的紧急控制措施，防止发生大规模的连锁跳闸和崩溃。

促使广域保护发展的主要原因是电网结构的复杂化和大规模停电事故的频繁发生。1965 年北美大停电后，开始了这类系统装置的开发和应用。北美早在 20 世纪 80 年代中期，就明确规定了稳控设备/系统的性能及运行维护的要求，在北美电力可靠性协会（North American Electric Reliability Council, NERC）制定的全北美规划标准中，专门有一章内容对电网使用稳控的必要性及必须遵循的原则进行了阐述，并对稳控进行了被广泛接受的定义，其定义是：特殊保护系统（Special Protection System, SPS）或补救控制系统（Remedial Action Scheme, RAS）监测系统非正常状态并采取预先制定的校正措施（而不是故障的切除），从而提供可接受的电网系统指标。在可接受的电压或者可接受的负荷水平下，SPS 和其他控制设备联合动作，通过改变电网需求（如切负荷）、发电量或电网结构来维持系统稳定。

起初，SPS 被定位于介于常规保护和 SCADA/EMS 之间的系统保护控制

手段。北美 1996 年、2003 年等大停电事故，促使其对上述控制系统的思考，并认识到当前事故状态紧急处理环节存在不足：对于电力系统中的不正常运行和故障状态，目前使用的继电保护和自动装置控制判据，主要是基于本地和就近量构成，反映的只是系统某点或局部区域有限的运行状态，而不能反映较大区域电网的安全运行水平，装置之间缺乏相互协调和配合，难以对系统进行优化控制。这样，当系统某点发生故障后，继电保护不正确动作的风险仍然存在，甚至可能引起其他继电保护装置的无配合动作和自动装置的不正确动作，进一步扩大故障影响范围。这种非预期的连续动作将导致大范围停电的严重事故。

随着计算机技术和通信技术的发展，新一代的稳控技术正在形成，这就是基于广域测量系统（Wide-Area-Measurements System, WAMS）及在线动态安全分析（On-Line Dynamic Assessment, DAS）的广域保护（Wide-Area Protection, WAP）技术。

广域保护的概念最早由瑞典学者 Bertil Ingelsson 于 1997 年提出，主要用来预防在严重故障下长期的电压崩溃。后来，广域保护被引申为以电力系统多点的信息，对故障进行快速、可靠、准确地切除（常规继电保护），分析故障切除后对系统安全稳定运行的影响，并采取相应的控制措施（类似于我国的第二道防线——安全稳定控制）。

自 1998 年 IEEE 国际会议设置“广域保护与紧急控制专题”，2005 年国际大电网会议设广域保护专题以来，大量文献介绍了广域保护系统的开发和应用，广域保护的主要作用为提高系统安全水平，增加稳定限额，提高输送能力。在动态安全评估方面，WAMS/PMU 主要应用于电力系统模型校核、功角稳定和电压稳定评估、稳控系统的校核、低频振荡的分析等，但在线控制方面鲜有报道。目前，国外应用的广域保护主要在加拿大、美国、法国等国家。

加拿大的 Hydro-Quebec 电力公司自行开发的可编程减负荷系统（Programmable Load Shedding System, PLSS）已有 20 年行业应用。Hydro-Quebec 电网是北美覆盖面积最大、最复杂的电网之一，主要由两条 735kV 的高压走廊组成，分别从西北部 James Bay Hydroelectric Complex

(15GW)、东北部的 Churchill-Falls (5.6GW) 和 Manic-Outardes Complex (8.1GW) 向南方送电, 输电距离超过 1000km。PLSS 系统由 4 个控制子系统组成, 主要解决电压稳定和暂态稳定问题。

美国 BPA、Ciber Inc. 以及华盛顿州立大学共同研制开发的广域稳定和电压控制系统 (Wide-Area Stability and Voltage Control System, WACS), 覆盖 7 个变电站和 15 台发电机, 目前只是离线运行。根据 PMU 采集的电压确定相应的切机、切负荷、串/并联电容器无功补偿投切等控制方法来改善系统的功角稳定性和系统阻尼。这种保护方式依赖于广域测量单元 PMU, 虽然 PMU 的技术趋于成熟, 但 PMU 本身是测量信息, 大多用于测量用电流互感器。如果用于保护控制, 需要更换为保护用电流互感器, 其测量可靠性还需要进一步验证。传统的 PMU 依赖于 GPS 的可靠性, 且同步数据缓冲区较大, 所引起的时滞也比较长, 不能用于快速保护。该保护方式中间环节较多, 可靠性较差。

DRS (Drucktasten-Relaisstellwerk-Siemens) 系统在法国 EDF 电力公司运行近 20 年, 将法国电网分成 19 个区域, 每个区域联络线两端配置失步解列控制装置。Syclopes 系统是对 DRS 系统升级, 利用 PMU 测量信息, 检测区域间功角稳定性, 由控制中心统一协调解列、切机和切负荷控制。

由此广域保护可被定义为: 以电力系统多点电气量的信息, 对故障进行快速、可靠、准确地切除, 同时分析故障切除对系统安全稳定运行的影响, 并采取相应的控制措施。这种同时实现继电保护和自动控制功能的系统称为广域保护系统, 它在电网保护控制中基本被定位于常规保护和 SCADA/EMS 之间的系统保护控制手段。

国际大电网会议将广域保护的功能和控制手段进行了定义, 其动作时间范围在 100ms~100s 之间, 如图 1-1 所示。

同国外的研究相比, 我国的广域保护研究还处于起步阶段, 多数仍然停留在一些概念和系统整体介绍的层面, 工程应用还比较少。应当指出的是, 利用系统广域信息完成继电保护功能, 应该是一个逐步发展的过程。