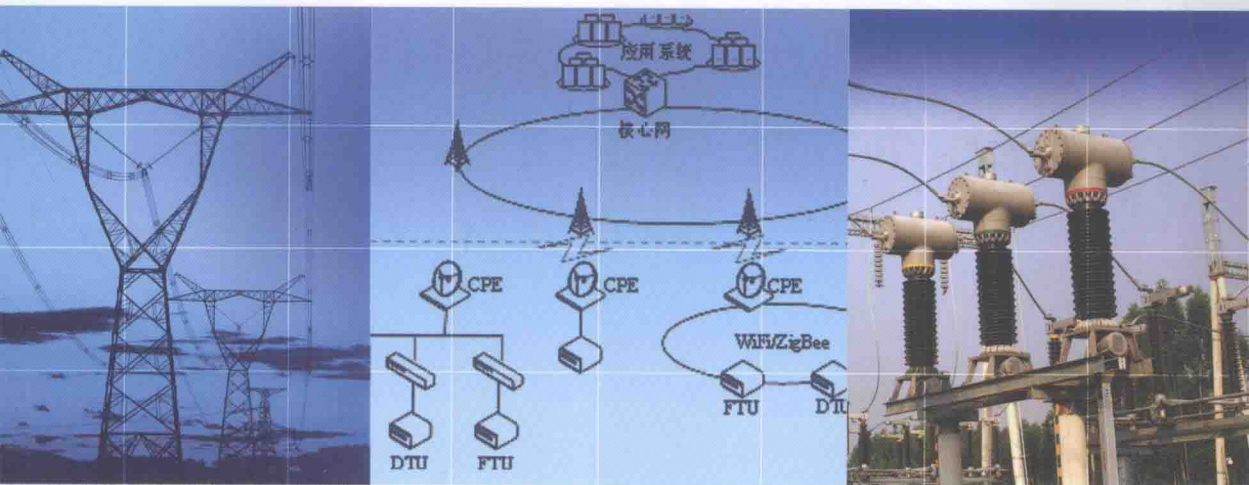


电力系统广域智能 控制保护技术及应用



中国南方电网电力调度控制中心 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力系统广域智能 控制保护技术及应用

中国南方电网电力调度控制中心 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

信息共享、自愈控制、供电可靠是智能电网的主要优势。随着计算机技术的飞速发展,通信、自动化等技术与电力系统的进一步融合,研究基于广域信息、具有自愈能力的智能控制保护技术,对保障拓扑结构复杂、运行方式多变的现代电网安全,支撑智能电网的发展具有重要意义。

本书共有7章,分别为广域智能控制保护系统概述、广域智能控制保护系统的信息交互技术、基于广域信息的快速后备保护技术、基于广域信息的快速自愈控制技术、电网广域智能控制保护系统构成方案、广域智能控制保护系统的工程应用实例、总结与展望。

本书可供从事广域智能控制保护系统配置、安装、调试、验收、运维、调度和科研、设备生产的相关从事人员使用,也可供大中专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统广域智能控制保护技术及应用/中国南方电网电力调度控制中心编. —北京:中国电力出版社,2016.4

ISBN 978-7-5123-9099-7

I. ①电… II. ①中… III. ①智能控制—电网—安全技术—研究 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第055423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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年4月第一版 2016年4月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 12.5印张 221千字

印数0001—1500 定价 50.00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



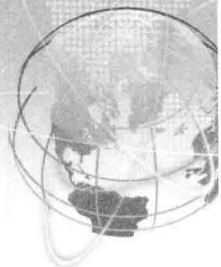
序

随着国民经济的发展，电网规模迅速扩大，特性愈发复杂。同时，由于经济发展和能源分布不均衡及逆向性的特点，电网结构也呈现出了复杂特性，主干输电网远距离大容量送电，部分地区电网在发展过程中，与主网联系还比较薄弱。通过对一些停电事故（事件）原因的深入分析，发现仅利用本地或有限的远方信息形成保护动作决策，是影响电网安全稳定运行及可靠供电的重要原因之一，给保障电网安全稳定运行和可靠供电带来了新挑战。如何结合这些情况继续巩固和完善“三道防线”，成为电网运行管理人员和科研人员的新课题。

与此同时，计算机、通信和自动控制技术飞速发展并与电力系统进一步融合，为我们提供了新的技术手段。基于区域电网信息，构建面向整体电网的全方位控制保护体系，正成为适应智能电网发展的一个新动向。从 2008 年开始，中国南方电网有限责任公司就组建专家团队研究广域智能控制保护技术，并先后在多个地区试点应用，积累了丰富的研究和运行经验。为了更好地总结经验和分享成果，中国南方电网电力调度控制中心组织编制了这本图书。本书将理论和实际有机结合，系统性地阐述了该技术的体系架构和关键技术，结合实际案例介绍了系统的配置原则和实现方式，是一本内容全面、实用性强的科技图书。通过本书，不仅可以学习 PTN 时间同步、广域电流差动保护、直流失电保护等新技术，还可以了解广域智能控制保护系统的现场安装、调试、验收等方法。希望本书的出版，能促进电力系统从业人员熟悉和理解广域智能控制保护技术，促进运行单位、设备生产厂家、科研机构及高等院校对该技术做进一步深入研究。

琅友

2015 年 10 月



前 言

信息共享、自愈控制、供电可靠是智能电网的主要优势。伴随着计算机技术的飞速发展,通信、自动化等技术与电力系统的进一步融合,研究基于广域信息、具有自愈能力的智能控制保护技术,对保障拓扑结构复杂、运行方式多变的现代电网安全,支撑智能电网的发展具有重要意义。近年国内外发生的多起大面积停电事故,更加凸显了开展这一研究的紧迫性。

本书主要讲述了广域智能控制保护系统的理论概述、通信方式、关键技术和工程应用,重点介绍了不同通信环境下的信息交互和时间同步技术,详细阐述了基于广域信息的快速后备保护和自愈控制技术,依托示范工程,对广域智能控制保护系统的构成方案和实施原则进行了细致讲解。

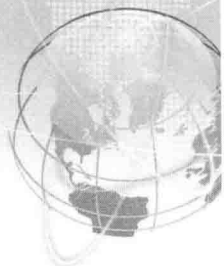
本书由中国南方电网调度控制中心组织国内相关设备生产厂家、高校老师共同编写而成,编写中还参阅了有关文献资料和技术说明书。在此,对涉及的有关单位及作者表示衷心的感谢。

全书由汪际峰主编,第1章由尹项根、赵曼勇、戚宣威、陈旭编写,第2章由金鑫、连伟华、田霖、黄盛、杨贵编写,第3章由周红阳、陈朝晖、陈志峰、李艳、张静伟、戚宣威编写,第4章由魏承志、李力、秦红霞、吴勇、刘年编写,第5章由叶皖、黄维芳、胡子珩、张胜宝、谭靖、牟敏编写,第6章由黄维芳、潘斌、罗劲松、刘波、田霖编写,第7章由尹项根、文安、雷二涛编写。本书第1~3章由赵曼勇统稿,第4~7章由文安统稿。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免存在纰漏或不妥之处,恳请各位专家和读者提出宝贵意见。

编 者

2015年10月



目 录

序
前言

第 1 章 广域智能控制保护系统概述	1
1.1 引言	1
1.2 广域智能控制保护系统的概念	4
1.3 广域智能控制保护系统的研究现状	7
1.4 广域智能控制保护系统的基本内容与原理	12
1.5 广域智能控制保护体系架构	27
第 2 章 广域智能控制保护系统的信息交互技术	33
2.1 引言	33
2.2 广域信息交互的目标及要求	34
2.3 区域电网广域控制保护系统的基础通信技术	40
2.4 区域电网广域控制保护系统的其他相关通信技术	56
第 3 章 基于广域信息的快速后备保护技术	64
3.1 引言	64
3.2 基于广域信息的电流差动保护技术	65
3.3 基于广域信息的快速距离保护 II 段技术	78
3.4 配电网广域过电流保护技术	82
3.5 配电网广域方向纵联保护技术	85
3.6 基于广域信息的直流失电保护技术	89
第 4 章 基于广域信息的快速自愈控制技术	97
4.1 引言	97

4.2	电网自愈控制技术的现状分析	98
4.3	基于广域信息的孤网稳定控制策略	99
4.4	智能再并网技术	108
第5章	电网广域智能控制保护系统构成方案	120
5.1	引言	120
5.2	区域电网的结构特性及系统需求	121
5.3	区域电网控制保护系统的功能配置	122
5.4	区域电网广域控制保护协同配合机制	124
5.5	配电网广域控制保护系统的构成方案	129
第6章	广域智能控制保护系统的工程应用实例	143
6.1	引言	143
6.2	韶关电网珠全片区电网广域智能控制保护系统	143
6.3	深圳某片区城市配网区域控制保护系统	174
第7章	总结与展望	183
	参考文献	189

广域智能控制保护系统概述

1.1 引言

在世界范围内，环境恶化与能源短缺这两大问题日益凸显，新能源革命已经悄然兴起，世界各国的能源和电力发展都面临着转型与挑战。智能电网技术有利于进一步提高电网接纳和优化配置多种能源的能力，推动清洁能源的利用，解决复杂电网安全运行的新问题，正在成为现代电网发展的重要趋势。世界上主要的发达国家都在加强智能电网的研究和建设，并借此占领新能源发电、电能高效利用和节能环保技术的制高点，以满足迅猛增长的供电需求，促进低碳经济发展，实现新能源变革。国家发展和改革委员会和国家能源局在 2015 年 7 月发布的《关于促进智能电网发展的指导意见》中确立了在 2020 年初步建成安全可靠、开放兼容、双向互动、高效经济、清洁环保的智能电网体系的发展目标。

当前我国电力工业的发展体现了我国的基本国情：快速发展的国民经济对电力的需求急剧扩张，形成了交直流混联大电网的布局；我国资源与负荷中心的不均衡分布，形成了远距离、大容量“西电东送”的格局；为了有效解决环境保护和能源短缺的问题，形成了多种形态的清洁能源发电大规模集中接入和分布式接入电网并存的局面。从这种基本国情出发，建设具有中国特色智能电网的任务具有如下特征：大规模开发以非化石能源为主的可再生能源，同时兼顾发展大型常规能源发电基地，为智能电网构建清洁、可靠和充裕的电源支撑；广泛采用特高压交直流混合联网、柔性交直流输电等新型输电技术，以实现能源的大容量、远距离外送和大范围消纳；加强建设供电网络的安全防护体系，并使其具有自愈恢复能力，以满足用户对于供电可靠性的严苛要求。这种情形促使我国电网正在持续发生前所未有的变化，譬如其规模迅速扩张、结构日益复杂、技术不断改进、运行灵活多变，由此对电网安全的保护与控制提出了更加严峻的挑战。

我国的电力工作者为电力系统的安全运行做出了大量的工作和杰出的贡献，设计并建设了电力系统安全稳定的“三道防线”^[1,2]，形成了我国特有的电力系统安全稳定防护体系，长期以来为保障电网的安全稳定运行发挥了巨大的作用。这“三道防线”主要包括以下内容和目标：第一道防线，在发生短路故障时由继电保护装置快速可靠切除故障元件，保持系统的稳定运行和电网的正常供电；第二道防线，采用安全稳定控制系统实施切机、切负荷、局部解列等控制措施，防止系统失去稳定；第三道防线，在电力系统发生失步振荡、频率异常、电压异常等事故时采取解列、切负荷、切机等控制措施，防止系统崩溃。

随着智能电网建设的快速推进，保障现代复杂电网安全稳定的“三道防线”面临着新的挑战，如果应对不当，有可能会导导致电网失稳或者大面积停电事故的发生。2006年，我国某跨省区域电网发生一起大面积功率振荡事故，导致多条500kV和200kV线路跳闸，多台发电机组被迫退出运行，造成某省5个城市停电，并影响到周边多个省份。分析表明，保护在隐性故障时的误动是引发事故的诱因，后备保护在潮流转移期间的连锁误动以及安全稳定装置在系统失稳初期的拒动是导致事故发展的主要原因。2008年我国南方冰灾期间，输电线路覆冰严重，频繁发生倒杆、倒塔、断线等严重事故，许多骨干输电线路被迫停运，形成了一些孤网，其中部分安全控制装置由于难以适应孤网运行状态，致使发电机频繁跳闸，使得电网的运行状况进一步恶化，甚至导致某些区域电网崩溃。

国外电网也面临着类似的甚至更为严重的安全问题，由于电网安全控制措施不当导致的大面积停电事故屡见不鲜。譬如，2003年8月14日，美国东北部部分地区以及加拿大东部地区出现了大范围停电，造成美国8个州以及加拿大安大略省的电力中断，63个电厂的531台机组停运，损失负荷61800MW，给5000多万人的生活造成了影响，带来的直接经济损失达60亿美元。在事故发展过程中，线路后备保护在大负荷转移情况下的非预期连锁跳闸是导致停电范围扩大的主要原因之一。2012年7月30日，印度发生大面积停电事故，停电范围覆盖了近一半的国土，直接影响6亿多人的生活。事故分析表明，后备保护在过负荷情况下的误动是导致停电事故的重要诱因，而在停电发生初期，由于紧急控制装置未选择恰当的系统解列点，使得电网崩溃加速，进一步扩大了停电范围。

近年来世界各国频发的大停电事故带来了交通瘫痪、通信中断、金融动荡，甚至社会秩序混乱等灾难性的社会影响，引起了各国政府与普通民众对电

网安全的高度重视。我国政府的监管部门相继出台了《电力安全事故应急处置和调查处理条例》（国务院令 第 599 号）、《关于加强电力安全工作防范电网大面积停电的意见》（电监安全〔2012〕60 号）等文件，以进一步加强电网安全管理，保证电力系统安全稳定运行，防范电网大面积停电事故的发生。这表明，现代电网安全防护在保障电网稳定运行的同时，还需要满足政府、社会对于供电可靠性的苛刻要求。

目前电网发生的停电事故普遍表明，仅能利用就地或者有限的远方信息、根据预设固定特性形成动作决策，是制约传统“三道防线”保障现代复杂电网安全稳定运行的重要原因。电力系统本质上是一个分布广域、元件众多、结构复杂和响应速度快的大系统，系统中所有的电量是相互影响关联的一个整体，利用广域信息实现继电保护的协调配合与可靠动作，实现安稳系统的自适应策略和智能化控制，进而实现“三道防线”的互动机制与优化决策，更加有效地保障系统的安全稳定运行。

现代广域信息及智能化技术的发展，为解决传统保护与控制所面临的难题提供了有力的技术支撑。采用广域同步测量和网络通信技术能够实现控制保护系统在电网快速演变过程中准确获取海量、多维、实时的广域信息，突破基于就地或者有限远方信息的保护控制技术的局限性；采用信息处理和智能化技术能够实现保护控制系统的智能化决策，使得“三道防线”能够从全局优化的角度为系统提供安全防护。另外，基于广域信息和智能化技术可以进一步完善拓展“三道防线”的功能，在进一步提高电力系统安全稳定水平的同时，有效地减少停电范围和负荷损失，并通过自愈控制技术实现故障后的快速供电恢复，减少事故造成的停电时间和范围，满足用户对于供电可靠性的严苛要求。近年来，国内外的专家学者从理论研究、工程应用等方面，围绕利用广域信息和智能化技术改善电网的安全防护性能开展了大量的工作，取得了丰硕的研究成果，有力推动了现代电网安全稳定运行技术的发展。

中国南方电网有限责任公司（简称南方电网公司）围绕电力系统广域智能控制保护技术及其工程实践开展了研究工作，这其中主要包括：基于 BMC 算法的 PTN 网络时间源故障切换算法，适用于广域智能控制保护业务的 PTN E-Tree 组播机制等广域通信技术；基于广域信息的电流差动保护、快速距离保护 II 段、过电流保护、方向纵联保护、直流失电快速远后备保护等保护新方法；利用多点电压实现孤网检测、基于广域信息的实时精确切机切负荷、快速再并网等自适应的电网安稳控制及自愈恢复技术。通过多区域的工程应用表明，这些新技术可以解决区域电网后备保护整定配合困难、动作延时长、潜在

误动风险、故障后区域电网难以稳定、停电时间长等问题，实现区域电网的快速故障隔离、快速稳定控制、孤网运行检测以及快速再并网自愈恢复等智能化控制保护功能，使得“三道防线”更为完善。同时，南方电网公司组织设备厂商和高校围绕由广域保护、站域保护等构成的层次化保护的原理和实现技术展开系统的研究，主要工作包括：基于信息共享的层次化保护的构建模式和技术方案、广域保护的分区方法、基于故障元件识别的多种广域及站域后备保护新原理、基于多源信息融合技术的广域保护智能化动作决策、广域和站域保护通信系统组网和网络故障重构技术、广域和站域保护可靠性分析方法。这些研究成果促进了层次化保护体系的建设，推进了广域控制保护技术的发展。

本书从支撑技术、系统构成方案以及工程应用等方面介绍南方电网公司围绕电力系统广域智能控制保护技术开展的理论和实践研究工作。

1.2 广域智能控制保护系统的概念

现代电网的快速发展使得系统的安全防护面临更加严峻的挑战。因此，迫切需要进一步完善“三道防线”的性能，同时加强各道防线之间的协调配合，以提高电网的安全防护水平。此外，随着社会经济的快速发展，用户对于电力的依赖程度越来越高。现有“三道防线”主要依赖就地或者有限的远方信息，且主要采用预先整定的固定特性形成动作决策，其性能难以满足现代电力系统安全稳定运行与供电可靠性的双重要求。广域通信和智能化技术的发展，为改善“三道防线”的安全防护性能提供有力的技术支撑，使得利用广域信息从全局优化的角度为电网提供更为理想的安全防护体系成为可能。

自1965年美国东北大停电以来，电力系统安全稳定运行研究领域备受关注，利用广域信息的智能保护控制技术得到了发展。其中，广域测量数据最早被引入静态状态估计中，但由于当时的技术条件尚无法实现同步测量，而未能实现广域控制保护功能。20世纪90年代以后，卫星授时系统的诞生、电力通信网络以及数字信号处理技术的发展为同步测量技术的应用奠定了基础，使得在控制保护系统中引入广域测量信息成为可能，有力地推动了广域保护和控制技术的进步。

国内外专家和学者围绕广域控制保护的基本原理、实现方案、工程应用等方面已经开展了大量的研究工作，获得了丰富的成果，并逐渐形成了“广域保护”这一新概念。为了对此更好的加以说明，需要简略介绍一下相关概念和名词。

故障发生后电力系统的处置过程属于安全紧急控制范畴，这其中包括继电

保护和安稳控制措施。在国外，继电保护常被认为是设备保护（Equipment Protection）；而安稳控制则属于系统保护（System Protection），其他称呼如特殊保护系统（Special Protection System, SPS）、补救控制系统（Remedial Action Scheme, RAS）等。由设备保护与系统保护构成完整的保护概念，是一种“广义保护”的概念，其范畴除了包括继电保护以外，还涵盖了系统的安稳控制与紧急控制。

广域保护概念较早出现在瑞典学者 Betril Ingelsson 1997 年发表的学术论文《应对电压崩溃的广域保护》（Wide-Area Protection Against Voltage Collapse）^[3]，该系统主要用于预防系统的电压崩溃。日本学者随后在 1998 年将广域保护的概念与继电保护相结合^[4]，提出了利用广域信息实现电流差动后备保护。广域保护的概念一经提出，就立即受到了广泛的关注，1998 年的 IEEE 会议专门设置了“广域保护与紧急控制”的专题，在会上曾提出利用广域信息改善后备保护的動作性能，以排除后备保护的潜在误动风险，预防后备保护连锁误动导致的大停电事故^[5]；此后，2001 年国际大电网会议（CIGRE）在 Task Force 38.02.19 报告^[6]中也提出大电网系统保护方案，该报告重点研究利用系统保护和紧急控制来保证系统的稳定运行，其主要目的是针对在系统出现不可预测事件时，如大范围潮流转移或线路极限运行时又发生严重故障，利用广域测量信息避免系统失稳。

到目前为止，广域保护在全世界范围内还没有形成一致的定义和描述，但是普遍认为广域保护包含了继电保护和紧急控制两方面的内容，具体涉及利用广域信息改善传统“三道防线”的性能。2014 年中国电力出版社出版的《中国电力百科全书》对广域保护给出了如下的表述^[7]：

广域保护主要由广域继电保护（Wide Area Relaying Protection）和广域安稳控制（Wide Area Emergency Control）共同构成。

广域继电保护是指基于广域测量及通信技术，综合利用多个变电站信息构成的继电保护系统。广域继电保护主要用来解决传统后备保护在现代大电网中的整定配合，在复杂多变的运行方式下可能因适应性差造成拒动或误动，以及在大负荷潮流转移时可能导致后备保护非预期连锁动作，进而引发大面积停电事故等缺陷。

广域安稳控制利用广域测量信息对电力系统实时运行状态进行分析和评估，进而采取相应的安全紧急控制措施（非故障隔离）维持电力系统的稳定性和完整性。当系统发生单一严重故障时，采用切机、切负荷、直流调制和串补强补等控制措施，防止运行参数严重越限和系统失稳；当系统发生多重严重故

障而造成失步振荡、频率异常、电压异常时，采取系统解列、低频/低压减负荷等控制措施，防止系统崩溃。基于同步相量测量的广域同步测量系统的应用为广域安全控制的实现提供了有力的技术支持。

在未来，广域继电保护将逐步承担“第一道防线”中的后备保护职能，实现在线故障元件判别和跳闸策略优化，并与传统主保护共同构成性能优良的保护系统。广域安稳控制将分别在“第二道防线”和“第三道防线”中实现电网稳定性的在线判别和紧急控制措施的在线优化决策等功能，更好地保障电网的安全稳定运行。

利用广域测量信息除了能够实现上述对“三道防线”的改进以外，还可以促进各道防线之间的协调配合，为系统提供全局最优的安全防护。此外，传统“三道防线”主要侧重于维护系统的安全稳定运行，而较少涉及故障后供电的快速恢复。基于广域信息能够扩展“三道防线”的功能，形成“第四道防线”，即在故障后结合广域备自投、智能重合闸等智能化技术实现供电的快速恢复，从而有效减少停电的时间和范围，满足用户对供电可靠性的要求。

为了改善控制保护系统的性能，除了获取海量的广域信息之外，还需要有效的分析处理测量得到的信息，这样才能充分发挥广域测量技术带来的优势。智能化技术的发展为广域测量信息的高效、优化处理，从而实现全局性能最优的控制保护动作决策提供支持。譬如，利用信息测度、D-S 证据理论等智能化信息处理技术，能够对广域信息进行综合分析、冗余处理，有效剔除信息错误、缺失对决策算法的干扰，从而保证广域控制保护动作的可靠性；基于遗传算法、神经网络等人工智能技术，可以在掌握系统实时运行状况的基础上，形成自适应的保护控制动作决策，从全局优化的角度为系统提高安全防护。

本书所介绍的基于广域信息的智能化保护和控制技术适用于中高压系统区域电网以及含分布式电源接入的配电网，并采用广域控制保护这一概念以概括基于广域信息的安稳控制、继电保护以及涉及故障紧急控制/处置的自动化技术，如备自投、重合闸、分布式电源的自适应解列与孤网的快速再并网技术等。这些技术可以在区域电网异常运行状态下，基于广域多维信息，协同保护和控制各环节的功能，采用智能化的方法和技术实现故障隔离、电网稳定控制以及孤网重新再并网等全过程的自愈恢复控制。该技术目前已经在南方电网投入工程应用，形成了区域电网的广域智能控制保护系统，其具体功能包括：在电网发生故障或运行方式变化时，快速准确辨识故障运行，在全站控制保护失去直流电源等极端情况下，实现系统故障的有选择性快速隔离；在故障切除后准确辨识系统的孤网运行状态，并根据区域电网各线路负荷的实时测量信息，

在线形成精确的切机/切负荷控制策略，实现孤网的稳定控制，为再并网奠定基础；利用广域后备投、长延时重合闸等智能再并网技术，快速恢复孤网与主电网的联系，从而减少停电的时间和范围，保障系统的安全稳定运行。

1.3 广域智能控制保护系统的研究现状

针对传统继电保护和安全控制难以满足电网安全防护需要的难题，电力工作者们一直致力于通过获取更多的信息资源以改善保护与控制系统性能。随着网络通信和测量技术的发展，数字化变电站技术已经逐步成熟，站域信息已较为广泛地应用于控制保护系统中，为克服传统保护与控制面临的技术瓶颈，提供了良好的契机与有力的支持。

近年来，结合数字化变电站建设的推进和广域信息测量技术的发展，我国的电力工作者们提出了层次化的电网控制保护体系设计理念，并已开展了工程试点应用工作。层次化控制保护体系涵盖就地层、站域层和广域层。就地层面向单独间隔，利用间隔单元的全部或部分信息实现传统间隔单元的保护和控制功能。站域层面向变电站，主要利用本站内的站域信息，整合并集成实现变电站继电保护和紧急控制的功能，以简化后备保护配置，改善保护及紧急控制的性能，同时也作为广域保护的子站接入广域保护系统，与广域保护配合，实现区域电网的保护与安全控制。广域层面向区域电网，利用多个变电站的综合信息，统一判别决策，以实现对整个区域电网的安全防护。间隔保护、站域保护和广域保护等不同层面，通过相互间的协同工作，实现全局保护控制的性能最优。基于层次化保护系统，系统的“三道防线”也能够通过时间上的相互衔接和动作信息的协同配合，进一步提高系统的安全防护水平，保障电力系统的安全稳定运行和供电可靠性。下文就广域继电保护以及广域安稳控制的研究现状展开介绍。

1.3.1 广域继电保护

国内外学者主要从基于广域信息的保护在线自适应整定、基于广域信息的潮流转移识别与过负荷控制、基于故障元件识别的广域后备保护等不同角度开展了相关研究工作。

在线自适应整定的研究始于 20 世纪 80 年代^[8,9]，旨在基于事件模式，自适应反映系统运行方式，通过快速计算并在线修改定值，以防止运行方式变化造成保护配合不当，进一步提高保护的灵敏度，近 20 年来的研究工作主要围绕故障后扰动域识别、最小断点集搜索和快速短路计算等方面内容展开^[10,11]。

在线自适应整定技术对提高后备保护的灵敏度和选择性方面有较大帮助，但在线整定计算量大，定值刷新速度难以满足继电保护的实时性要求，各保护间仍需采用逐级配合切除故障元件，动作速度较慢，此外，也难以有效解决大负荷转移引起的保护连锁动作的难题。

利用广域信息进行潮流转移识别与过负荷控制的目的在于通过广域信息对可能出现的大负荷转移进行在线辨识，以便及时进行负荷调整，并闭锁可能发生误动的后备保护，防止发生连锁跳闸事故，研究重点主要是如何利用广域信息对电网网架结构变化后的潮流转移情况进行预测分析，并据此区分线路内部故障与过负荷。上述研究对防止大负荷转移情况下保护连锁跳闸事故具有重要意义，但难以解决后备保护存在的整定配合复杂、当电网运行状态发生非预设变化时可能发生误动或拒动等问题。

基于故障元件识别的广域保护的基本核心是通过广域信息快速判别出故障元件，而一旦故障元件确定，相邻保护之间通过简单的动作时序配合，即可保证保护动作的正确性。其具有整定配合简单、后备保护动作速度快、适应系统运行方式变化能力强以及易于防止潮流转移发生连锁动作等突出优势，已成为广域保护研究中的重点发展方向。近年来，国内外专家学者围绕基于故障元件判别原理的广域继电保护展开了大量的研究工作，提出了多种保护原理和实现方案。

基于故障元件判别原理的广域继电保护的研究始于 20 世纪 90 年代末，如 Yoshizumi Serizawa 等人 1998 年提出的广域电流差动后备保护^[12]。该保护利用广域电流信息，将传统的单元件电流差动保护的作用范围扩大至包含多个元件（设备、线路）的封闭区域，即单元件差动主保护延伸为含相邻区域的差动后备保护，以实现延时小、选择性好的后备保护。该保护原理清晰、延时短、选择性好、反应各类内部故障。但是，比较依赖高精度同步采样，并且尚需解决好整定值计算方法、保证动作灵敏度。

为了减少对广域通信量以及同步精度的要求，提高保护方案实用性，也有专家提出了广域方向保护原理^[13,14,15]。该保护利用各测量点的广域方向信息，将方向比较扩大至某保护元件的相邻区域，结合利用方向信息的关联性，实现故障元件判别。该方法原理简单明确，通信量少，对同步精度要求低，判断迅速，但是对保护区域内的故障方向信息的准确性要求高，且方向元件受高阻接地、线路非全相运行和故障转换等因素影响较大。

为了提高在复杂故障条件下的性能，同时降低对广域同步采样的要求，有学者提出了基于线路故障电压分布的故障元件判别方法^[16,17]以及基于故障电

流分布的故障元件识别算法^[18,19]。故障电压分布的故障元件判别利用线路一侧电压、电流故障分量的测量值估算另一侧的电压故障分量，形成线路两侧电压故障分量的测量值和估算值，外部故障时线路任意一侧电压故障分量的测量值和估算值相一致，而内部故障时至少有一侧的测量值和估算值存在较大的差异。故障元件识别算法综合利用支路故障电流比幅判据和双端故障电流比幅判据，首先搜索准故障疑似线路，进而通过关联矩阵计算搜索故障疑似线路，进一步缩小故障区域。这些方法只要求远方的电压或电流幅值，不要求广域精确同步采样，原理上不受过渡电阻影响；在包括高阻接地、弱馈和非全相运行状态下故障、转换性故障及振荡中再故障等复杂情况下，该原理均能正确识别故障线路，并且不受潮流转移的影响。

针对广域电流差动保护较普通电流差动更易受线路分布电容的影响而降低灵敏度的问题，也有专家提出了基于广域综合阻抗的故障元件判别原理^[20]，利用区域多端电压和电流构造广域综合阻抗。广域综合阻抗定义为保护区边界电压相量和与电流相量和之比值。广域综合阻抗在区外故障时反应为区域容性阻抗，区内故障与系统阻抗、线路阻抗和接地电阻等有关，表现为感抗。基于阻抗不同特性实现故障元件的识别。该算法不受分布电容电流和过渡电阻影响，相比广域电流差动算法具有较高的灵敏度，且在各种内部故障，包括高阻接地、非全相运行状态下故障、转换性故障等复杂情况下，保护均能正确识别故障线路；而在外部故障及潮流转移情况下，保护将可靠不误动。

同时，信息范围的扩大也给广域保护的信息可靠性提出更高的要求，有学者引入多信息融合处理^[21,22]、D-S 证据理论^[23,24]、遗传算法^[25,26]等智能化技术，利用冗余信息间的互补性消除不良数据的影响，提高广域保护系统的可靠性。

1.3.2 广域安稳控制

2001 年国际大电网会议（CIGRE）在 Task Force 38.02.19 报告中也提出大电网系统保护方案（System Protection Scheme, SPS），该报告重点研究通过系统保护和紧急控制来保证系统的稳定运行，其主要目的是针对在系统出现不可预测事件时，如大范围潮流转移或线路极限运行时又发生严重故障，SPS 如何利用广域测量信息避免系统失稳。SPS 用广域保护相关动作时序图（见图 1-1）详细描述了其实现的功能及其控制手段、目标和时间的关系。

从历史和应用的角度来看，安稳控制功能既有采用就地信息，也有采用广域信息来实现的。近年来随着广域测量系统（WAMS）和通信数据单元（PDU）的发展和应用，很多研究主张使用实时广域信息来改善安稳控制性

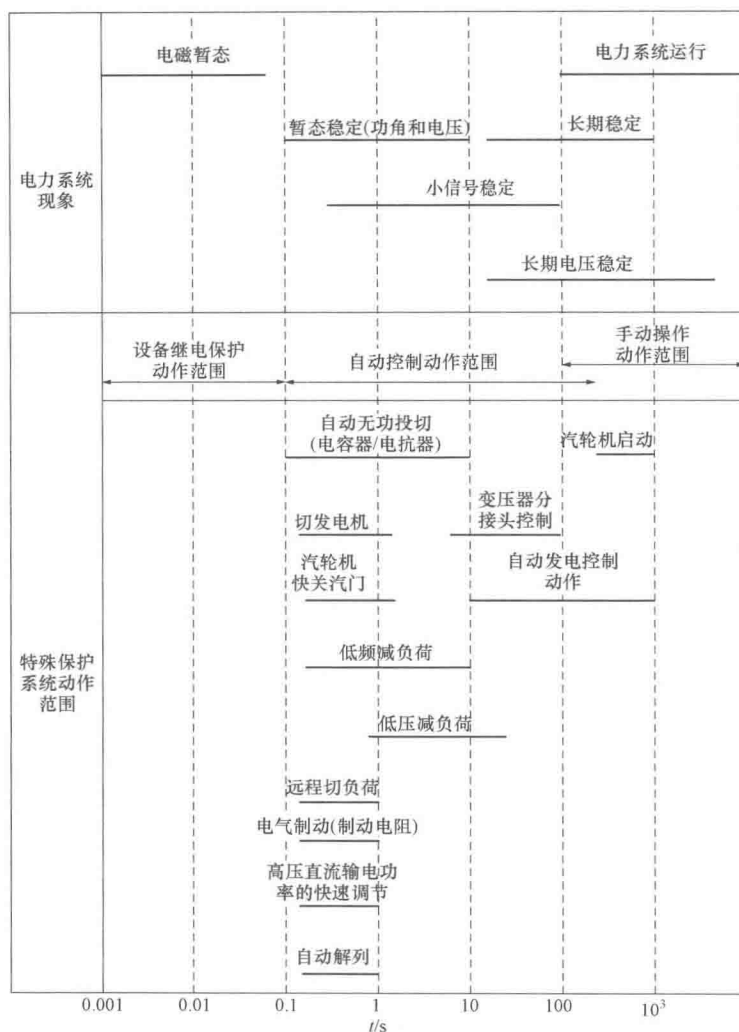


图 1-1 广域保护相关动作时序图

能^[27,28,29]，从广域信息方面丰富了广域安稳保护的概念。目前，各国电力工作者都致力于围绕广域安稳控制技术的研究，并且已有部分技术投入应用。

瑞典南部电网^[30]于 21 世纪初投运了一套应对电压崩溃的广域控制系统，该系统基于数据采集与监视控制系统（SCADA）收集电网内母线电压、发电机出力等信息，以判断系统的电压稳定状态，并在紧急情况下执行切除并联电抗器、投切电容、启动燃气轮机、直流调制、切负荷等控制措施，以保证系统