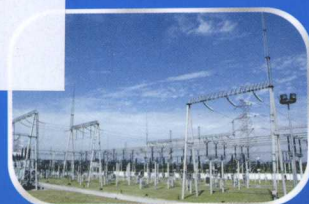
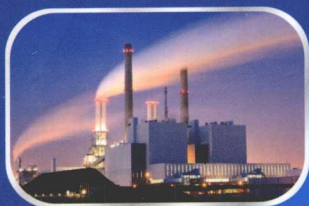


电力系统恢复 理论与技术

刘玉田 王洪涛 叶华 著



科学出版社

014033497

TM711
37

内 容 简 介

电力系统恢复理论与技术

刘玉田 王洪涛 叶 华 著



科学出版社

北 京



北航

C1722058

TM711

37

内 容 简 介

电力系统恢复是电力系统在面对大停电时通过各级调度单位、发电厂与变电站共同协作把电力系统重新恢复到正常运行状态的一系列操作的总称。本书系统地介绍了电力系统恢复理论的最新研究进展,力求全面介绍电力系统恢复技术的实际应用情况。全书共分7章,主要内容包括绪论、电力系统恢复中的安全校验与调控、黑启动中的控制决策与现场试验、网架重构阶段的路径寻优与多目标优化、负荷最大投入量与投入顺序优化、主从递阶式分区协调恢复技术、恢复决策支持系统的设计开发等。

本书内容新颖,覆盖面广,系统深入,注重理论联系实际。本书可作为高等院校电力系统专业的研究生教材,以及从事电力系统运行与控制的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统恢复理论与技术 / 刘玉田,王洪涛,叶华著. —北京:科学出版社,2014.3

ISBN 978-7-03-039897-0

I. ①电… II. ①刘…②王…③叶… III. ①电力系统-系统恢复-研究 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 037537 号

责任编辑:余 江 李岚峰 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2014年3月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:342 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

20 世纪 90 年代以来,国内外相继发生了多次大停电事故,给电力系统恢复控制提出了一系列的新问题。近十几年来,电力系统科技人员努力运用现代科学的理论、技术和工具去研究、分析和解决这些问题,并取得了丰硕的成果。这些成果一方面有助于电力系统在大停电后的快速、安全恢复,另一方面也促进了电力系统恢复理论和技术的发展。

电力系统恢复的理论和技术是应对大规模停电事故调度运行和操作控制的基础,对电力系统安全稳定运行有重要的意义和指导作用。在这一领域国内外尚无专著出版。本书既总结了前人的成果,又汇入了作者所在科研小组多年来所取得的研究成果,它是作者多年来科研与工程实践的总结。

本书对电力系统恢复理论与技术及其新进展作了系统、全面和深入的阐述和介绍。全书分为 7 章。第 1 章对电力系统恢复的基本概念、特点、阶段划分、研究内容和技术发展趋势作了较系统的阐述,以期读者对电力系统面对大停电时所面临的技术问题有深入的了解;第 2 章对电力系统恢复过程相关的安全问题的机理与校验方法进行了介绍,包括操作过电压、发电机励磁系统过电压、发电机自励磁、谐振过电压以及火电厂大型辅机启动等问题;第 3 章从黑启动电源的确定、被启动机组的选择、恢复路径及恢复策略的选择四个方面给出黑启动方案的优化策略,并结合黑启动实际案例,介绍了开展黑启动现场试验相关技术经验;第 4 章介绍整个恢复控制过程中承上启下的网架重构阶段,提出了三段式的网架恢复策略,并针对目标网架的确定、机组恢复优化、网架重构阶段恢复路径寻优方法以及网架恢复的多目标决策与评估技术展开论述;第 5 章在建立变电站单次最大负荷恢复量的通用模型的基础上,将负荷恢复任务细分为机组启动过程与网架重构后期两个阶段,在区分负荷恢复所发挥的作用、目标与约束条件的情况下,提出了不同阶段负荷恢复的优化策略与求解方法;第 6 章以满足大面积停电后分层分区恢复协调调度决策为背景,介绍各级恢复调度决策单元之间的协作、协调技术,包括分区协调恢复任务中的分区技术、子系统并列、高压直流接入技术,并给出一种主从递阶式的恢复决策方法的体系架构;第 7 章介绍了一种面向大停电后电力系统恢复的实时辅助决策支持系统的设计方法,该系统通过集成在现有 EMS 中并获取电网实时数据,基于一种交互式的协调恢复控制策略和多时空导航式的决策服务流程,可为调度员提供全过程的恢复操作指导。

本书所介绍的各种分析方法绝大多数都由作者所在的科研小组编写了相应的

计算机软件,这些软件形成了电力系统恢复辅助决策系统软件包,并已在一些电力系统恢复研究中得到了应用和验证。

本书中的许多研究成果是由刘玉田教授、王洪涛教授、叶华副教授等所组成的科研团队以及他们指导的许多研究生共同工作所取得的。在本书的编著过程中周孝信院士、薛禹胜院士等给予了热情鼓励和悉心指导,顾雪平教授提出了许多宝贵的意见,王春义、瞿寒冰、朱海南、曹曦等博士研究生和安鹏、何宝灵、袁在吉、陈红、谭冰雪、滕玮、陈彬、孙蓬勃等硕士研究生参与了部分研究并进行了校对,山东大学电气工程学院和电力系统及其自动化研究所的领导和老师给予了大力支持,在此谨表示衷心的感谢。

本书有关的研究工作得到国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划(863计划)、国家重点基础研究计划(973计划)、教育部留学回国基金、中国博士后基金、山东省中青年科学家奖励基金的支持,并得到国家电网公司和山东省电力公司等生产部门的帮助,在此一并表示感谢。

在本书的编写过程中,作者虽对体系的安排、材料的取舍、文字的叙述作了努力,但由于水平有限,书中缺点在所难免,恳切期望读者给予批评和指正。

作者

2013年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统恢复的意义	1
1.2 电力系统恢复的基本概念和相关问题	3
1.2.1 电力系统恢复控制的定义	3
1.2.2 电力系统恢复的特点	5
1.2.3 电力系统恢复的阶段划分	5
1.2.4 电力系统恢复的技术问题	8
1.3 电力系统恢复的研究内容	9
1.3.1 电力系统恢复问题的研究范畴	9
1.3.2 黑启动安全校验技术	11
1.3.3 黑启动方案制定与优选	12
1.3.4 网架重构优化	12
1.3.5 负荷恢复优化	13
1.3.6 子系统划分	15
1.3.7 系统并列与合环	17
1.3.8 直流系统恢复	18
1.3.9 恢复控制的辅助决策技术	18
1.4 电力系统恢复研究的发展趋势	22
参考文献	23
第 2 章 电力系统恢复中的安全校验与调控	31
2.1 概述	31
2.2 操作过电压	31
2.2.1 影响合闸过电压的因素	33
2.2.2 操作过电压的限制措施	34
2.3 发电机励磁系统过电压	36
2.3.1 励磁电流的暂态特性	37
2.3.2 空载线路合闸过程的建模仿真	39
2.4 发电机自励磁	43

2.4.1	同步电机自励磁现象的机理	43
2.4.2	发电机自励磁的分析判据	51
2.5	谐振过电压	52
2.5.1	变压器励磁涌流基本原理	53
2.5.2	励磁涌流激发的高次谐波电压的暂态过程	55
2.5.3	黑启动中避免励磁涌流激发谐波过电压	57
2.6	火电厂大型辅机启动	58
2.7	小结	65
	参考文献	66
第3章	黑启动	68
3.1	概述	68
3.2	黑启动电源及发电机机组启动特性分析	68
3.3	黑启动中的优化控制与决策	71
3.3.1	黑启动电源的选择	71
3.3.2	被启动机组的选择	72
3.3.3	黑启动路径搜索方法	80
3.3.4	黑启动阶段的基本恢复策略	81
3.3.5	基于分层分级思想的黑启动方案制定	83
3.3.6	基于分层案例推理的黑启动决策	91
3.4	黑启动试验	97
3.4.1	黑启动机组经 220kV 线路启动 300MW 机组	99
3.4.2	基于 PDCA/SDCA 循环的黑启动试验动态循环管理模式	106
3.5	小结	109
	参考文献	109
第4章	网架重构	111
4.1	概述	111
4.1.1	网架重构的基本策略	111
4.1.2	网架重构阶段的主要研究内容	112
4.2	网架重构阶段目标网架的确定	113
4.2.1	基于节点重要度评价的目标网架确定	113
4.2.2	以负荷恢复为目标的目标网架确定	116
4.3	网架重构阶段机组恢复优化	117
4.3.1	基于层次分析法安排火电机组启动顺序	117
4.3.2	基于数据包络分析的机组启动顺序优化	121

4.3.3 基于混合整数线性规划的机组启动顺序优化	125
4.4 网架重构阶段恢复路径寻优方法	131
4.4.1 基于图论的路径寻优方法	131
4.4.2 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法	136
4.4.3 网架重构后期的路径寻优方法	140
4.5 网架重构的多目标优化方法	144
4.5.1 数学模型的建立	144
4.5.2 多目标优化问题的 NSGA-II 算法	145
4.5.3 基于 NSGA-II 的网架重构算法设计	147
4.5.4 算例仿真	149
4.6 小结	152
参考文献	152
第 5 章 负荷恢复	154
5.1 概述	154
5.2 负荷恢复能力计算的通用模型	154
5.2.1 频率约束	155
5.2.2 暂态电压下降约束	157
5.2.3 冷负荷启动特性	160
5.2.4 负荷恢复能力计算的通用模型	162
5.2.5 模型求解	164
5.2.6 算例仿真	165
5.3 机组启动过程的负荷恢复优化	175
5.3.1 机组启动过程中的负荷恢复内容	175
5.3.2 平衡机组出力的负荷恢复优化	177
5.3.3 线路充电时的负荷恢复优化	179
5.3.4 算例仿真	183
5.4 网架重构后期的负荷恢复优化	191
5.4.1 网架重构后期负荷恢复特点	192
5.4.2 数学模型	193
5.4.3 自适应 PSO 算法	195
5.4.4 算例仿真	197
5.5 小结	202
参考文献	203

第 6 章 分区协调恢复技术与主从递阶恢复决策方法	205
6.1 概述	205
6.2 分区协调恢复的基本技术	205
6.2.1 恢复子系统的适应性划分	205
6.2.2 子系统并列	215
6.2.3 环网并列	216
6.2.4 高压直流输电系统的恢复	227
6.3 主从递阶恢复决策调度模式	230
6.3.1 主从递阶决策的概念	230
6.3.2 基于承诺和约定的主从递阶协调方法	231
6.3.3 主从递阶模式的分区协调恢复调度	232
6.4 主从递阶恢复决策模型与优化算法	233
6.4.1 电力系统恢复的主从递阶决策模型	233
6.4.2 基于回溯算法的主从递阶决策优化	241
6.4.3 实例分析	246
6.5 小结	250
参考文献	251
第 7 章 电力系统恢复决策支持系统设计开发	253
7.1 概述	253
7.2 总体设计	254
7.2.1 设计思路	254
7.2.2 系统恢复的总体协调框架	254
7.2.3 子系统恢复的局部对象优化流程	256
7.3 系统开发	258
7.3.1 总体技术方案	258
7.3.2 核心功能模块设计	260
7.4 小结	269
参考文献	269

第1章 绪论

1.1 电力系统恢复的意义

随着经济的发展,用电需求不断增加,依赖于电网互联和远距离交直流输电技术的发展,电力系统的规模日益扩大,其网络结构和动态特性也更加复杂。近年来,随着可再生能源的大规模接入,其固有的波动性、间歇性和随机性,也给电力系统的安全、稳定运行带来更大的不确定性和更严峻的挑战。特别地,在市场环境下,电力系统的运行条件更加接近于稳定极限。若局部故障处理不当,极易导致事故扩大,甚至可能引发恶性连锁反应,最终酿成大面积停电的严重事故。

由于现代社会对电力供应的依存度越来越高,大范围、长时间的停电事故会给社会、经济带来非常严重的负面影响。20世纪60年代以来,世界范围内大停电事故时有发生,并造成了严重的社会影响和经济损失^[1]。1965年11月9日美国东北部停电事故损失了21GW用电负荷,影响居民人数约3000万。1978年12月19日法国大停电事故造成全国近3/4的负荷区域停电,中断负荷29GW,累计损失电量100GW·h,事故造成的经济损失约2~3亿美元。1983年12月27日瑞典发生大面积停电,损失负荷约11.4GW^[2]。1994~1996年,美国西部电网多次发生大停电事故,每次均造成约百万用户停电,甚至波及与美国西部交界的加拿大的多个地区^[3]。2003年8月14日,美国、加拿大发生了北美历史上最严重的停电事故,涉及美国北部8个州以及与美国交界的加拿大南部2省,停电事故累计损失负荷61.8GW,造成美国、加拿大中东部地区近5000万人失去了电力供应,而用户供电的完全恢复历时近两周^[4~6]。在随后的两个月内,英国、瑞典、丹麦以及意大利等多个欧洲国家也相继发生大停电事故。2005年5月25日、2006年11月4日、2009年11月10日莫斯科、西欧8国、巴西分别发生了大停电事故^[7~9]。2011年3月11日,日本发生大地震并引发海啸,导致东京电网大停电,损失电源容量达22GW,并导致约10GW的电力缺口。事故期间,紧急停堆的福岛核电站由于缺少外来电力和足够的应急电源来支撑冷却系统,发生了严重的核泄漏危机,导致了灾难性的后果^[10]。2012年7月30日和31日,印度电网相继发生两次大停电事故^[11,12],此次停电事故创下了世界大型停电规模纪录,其直接经济损失巨大,社会影响深远。这些大停电事故的发生,引起了人们对大规模电力系统安全防御的深入思考以及对事故发生后系统恢复控制的重视。

近年来,随着“西电东送、南北互供、全国联网”的逐步实现,我国电力系统的规模迅速增大,电网结构得到显著增强。即便如此,我国电网也发生了一些停电事故,如2005年海南电网“9·26”大停电^[13]、2006年河南电网“7·1”大停电事故^[7]。2008年初,我国南方诸省因罕见雨雪冰冻天气使得输电线路覆冰严重,导致电网发生大面积断线、倒塔和停电事故^[14, 15],严重影响了经济社会的发展和人民的正常生活。由于我国能源资源和负荷中心的逆向分布,西北部的水力、风力、太阳能和坑口电力需要远距离大规模输送到中部和东南部沿海地区。因此,我国将建成世界上电压等级最高、规模最大的交流同步电网,同时高压直流输电在东南部沿海地区的落点将十分密集。如何安全、稳定地运行这个世界上规模最大和最为复杂的电网,面临前所未有的挑战,发生意想不到的安全、稳定问题的风险较大。

国内外电力系统的实际运行经验表明,新技术和新设备的应用,虽然能在一定程度上和一定范围内提高系统的安全性及可靠性,但由于电网的复杂性和可再生能源发电的不确定性,仍无法从根本上避免大停电事故的发生。因此,做好电网停电事故发生后的处理预案和电网崩溃后的恢复方案具有十分重要的意义^[5]。

合理、可行的系统恢复方案,能有效加快大停电后的系统恢复进程,减少事故损失。在2003年9月意大利电网的大停电事故中,按照事先制定的系统恢复方案,运行人员仅用了4h就恢复了主要地区的供电^[16]。在2006年西欧电网“11·4”大停电事故中,由于具有良好的故障恢复机制,电网在事故发生的38min后重新并网,并将损失控制在最小范围内^[17]。在2005年海南电网“9·26”大停电事故中,事先编制的系统黑启动方案也有效地保证了电网黑启动的成功和加快了灾后全面恢复供电的进程^[13]。相反地,如果系统缺乏合理、可行的恢复方案,则系统的恢复进程可能被延缓,导致事故影响范围的扩大,并造成更为严重的后果。北美电力可靠性委员会(NERC)对1979~1983年发生的48起大停电事故进行了详细分析后指出,其中多次系统恢复进程由于缺乏完善、有效的恢复方案被延误^[18]。在2011年日本“3·11”自然灾害引发的大停电事故中,应急措施的不完善加上连续的管理和决策失误,使得大停电后的系统恢复进程非常缓慢,重要机组的供电问题长时间得不到解决,核电站的冷却系统仅靠有限的备用电源来支撑,最终引发后果严重的核泄漏危机^[10]。

鉴于系统恢复方案对于大停电事故发生后系统恢复进程的重要性,国内外电力部门以标准的方式增加了关于大停电后系统恢复控制的内容^[19~21]。国内省级电力公司也相继制定了相应的黑启动方案^[22, 23],并成功完成了多次现场试验^[24~26]。许多专家学者在系统恢复过程中的机组启动、网架恢复和负荷恢复等方面作了深入分析和研究,取得了大量理论和技术成果,开发了一些辅助决策支持系统,并逐步应用于电力系统恢复方案的制定、黑启动试验、调度运行人员操作培训、

重大事故以及紧急情况下的仿真训练或事故演练。然而,不同电力系统的电源构成、电网结构、负荷特性和调度管理机制等差别很大,目前的研究成果还很初步,仍然缺乏通用的系统恢复技术和工具,现有工具远不能满足实际需要,实用的辅助决策支持系统尚未出现。

制定大停电后系统的恢复方案时,应充分考虑本系统的实际情况,以便快速、有序地实现系统的重建和恢复用户的供电。恢复方案中应包括组织措施、技术措施、恢复步骤和恢复过程中应注意的问题,其保护、通信、远动、开关及安全自动装置均应满足自启动和逐步恢复其他线路和负荷供电的特殊要求^[27]。大停电后的恢复控制几乎涉及电力系统调度、运行与控制的方方面面,还往往伴随着通信不畅和能量管理系统不可用的实际情况,问题极其复杂。

由于大停电事故发生的概率极小,调度员缺乏实战经验。事故发生后,为使其在时间紧、任务重和压力大的情况下,能够给出正确的恢复决策,保证系统的安全快速恢复,调度部门迫切需要切实可行的电力系统恢复控制优化决策方法,以及能为调度员提供辅助决策和恢复培训的软件系统。因此,应当分析电力系统恢复问题的特点,完善系统恢复策略,研究能够综合协调系统安全和恢复速度的系统恢复优化决策方法,以解决现有方法在处理大规模电力系统恢复问题时灵活性和综合协调能力方面的不足;设计开发具有统一数据平台,且可与 EMS/DTS 系统接口的电力系统恢复辅助决策支持与培训仿真系统,以弥补现有电力系统恢复辅助决策系统在数据一致性、仿真分析工具的完备性、图形和数据维护工作量大等方面的不足,拓展 DTS 系统在电力系统恢复培训方面的理论和功能;研究开发实用的电力系统恢复辅助决策自动生成、校验和优化系统,并使之成为现有的调度控制系统的一部分,最终实现自适应恢复控制。上述工作的开展对于丰富电力系统的恢复控制理论,完善电力系统的应急指挥系统,提高电力系统应对停电事故的能力和减少停电损失都具有极其重要的理论意义和应用价值。

1.2 电力系统恢复的基本概念和相关问题

1.2.1 电力系统恢复控制的定义

电力系统正常运行时应同时满足两种约束条件:等式约束和不等式约束。其中,等式约束反映了用户的负荷需求与系统发电量间的功率平衡关系(包括有功功率和无功功率);不等式约束是指在保证电能质量合格的前提下,系统内设备的运行状态应处于其运行限值范围以内,如频率、电压、元件电流、机组出力和发电机功角差等不应超出允许的范围。

根据上述两种约束的满足情况,可以将电力系统分为四种运行状态:正常安全

状态、正常不安全状态、紧急状态和恢复状态。经过控制或事故扰动,四种状态的相互转化过程如图 1-1 所示^[28]。

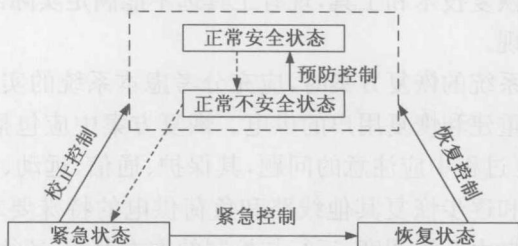


图 1-1 电力系统运行状态分类及其转化过程

----->偶然事件状态转移 ——>安全控制状态转移

正常安全/不安全状态:正常运行的系统如果能够承受单一的预想事故扰动后而不违反两种约束条件,则认为系统处于正常安全状态,否则称系统处于正常不安全(警戒)状态。对处于正常不安全状态的系统实施预防控制,可以使其转移到正常安全状态。

紧急状态:在此状态下,系统只满足等式约束但不满足不等式约束。若不采取措施,运行情况将会进一步恶化,甚至造成系统崩溃。该状态又分为两类:①系统中存在过负荷现象,但持续时间尚在允许范围内的状态,或者系统中存在电压越限现象,但未发生电压失稳的状态,或者系统中出现电压失稳的趋势,但尚未失去稳定性质的紧急状态,这类状态下,一般可以通过校正控制使系统回到安全状态;②系统中发生故障后引起严重低电压或过负荷,且持续时间超出允许范围的状态,也称为可能失去稳定性的紧急状态,该状态下,需要进行紧急控制或稳定性紧急控制才能防止系统失去稳定。

恢复状态:针对系统紧急状态实施控制后,系统参数一般符合运行约束条件,但可能造成部分地区存在失电负荷、形成供电孤岛甚至全网停电的情况。对于已经处于该状态的系统,一般应通过恢复控制来恢复对用户的供电,以及实现已解列系统的重新并列,使系统转移到正常状态。

按图 1-1 的划分方式,电力系统的控制可分为预防控制、校正控制、紧急控制和恢复控制四种类型。其中,电力系统恢复控制主要涉及系统在恢复状态下的控制方式和恢复策略,即系统局部停电或大面积停电后,如何通过系统内具有自启动能力的黑启动电源或外部电源为系统内其他机组提供启动功率,逐步恢复系统主干网架和负荷,在较短的时间内,将系统安全、有效地恢复至新的正常运行状态^[29, 30]。

1.2.2 电力系统恢复的特点

在系统恢复过程中,需要考虑系统的运行状态、设备的可用性、恢复时间、操作的成功率以及系统的运行安全等众多因素。其中,既包括大量的分析校验,又需要调度人员的判断决策。电力系统的恢复问题具有多目标、多变量、多约束、连续和整型变量混杂以及不确定等特点,难以用明确的数学形式对整个恢复过程准确建模,是典型的半结构化问题,具体如下。

(1)在“时间”上,各个操作顺序有很强的时间依赖性。需要根据机组特性、线路以及周边负荷的重要程度决定机组的启动顺序与时间,需要根据变电站与网架的重要等级决定不同电压等级的变电站和线路的送电顺序与时间。更小的时间粒度上包括:发电机端电压调节时间和幅度,变压器分接头调节时间和幅度,电容/电抗器投切时间和容量,调压负荷的投入时间、位置和大小;为了维持系统的频率,不同类型机组的投入时间,调频负荷的投入时间、位置和大小;小系统恢复后的并网时间、位置及交换功率的大小;小系统重新分区的时间和位置。

(2)在“空间”上,是按照电网结构逐渐扩展、合并的一个网架恢复过程。需要考虑电力系统分层、分地理区域管理的特点,整个电网首先按照一定的地理、电气条件进行动态分区,各分区或者独立并行操作或者进行区域间的协作。区域内部需要在安全稳定的约束下动态确定每一步的恢复目标;对某些由于不确定因素引起设备故障或恢复失败的区域,结合其相邻区域的恢复状况进行动态重新分区;在相邻分区恢复状况满足某些条件时进行并网操作,合并分区,并逐步完成整个网架的恢复。

(3)在“行为”上,是一个包含很多不确定性,需要随着恢复的进程动态调整优化的问题。在系统恢复过程中,发电机的启动、开关操作、线路送电、无功补偿设备的投切、负荷带电和子系统并网等操作都会给脆弱的小系统带来冲击,当某一步恢复失败时,系统应具有足够的灵活性,能够根据当前的电网状态重新确定下一步的恢复方案,减小个别操作失败对整个系统恢复进程的影响。

(4)在“目标”上,是在综合考虑系统的失稳风险、操作风险、机组运行极限和线路传输容量等约束的基础上,对所有发电机组、网架和部分重要负荷快速而安全恢复供电的一个多目标优化问题。

1.2.3 电力系统恢复的阶段划分

电力系统发生区域性停电或全网停电事故后,整个系统的恢复是一个漫长且非常复杂的过程,图 1-2 给出了事故发生前后电力系统恢复控制的实施过程。事故发生前需要针对预想事故制定系统恢复计划,通过设置电力系统发生区域性停电或全网停电事故等典型场景,以快速恢复供电和减少停电损失为目标,制定符合

实际的分区恢复计划和恢复预案。当系统发生严重的故障后,运行调度人员应当及时采取适当控制措施,通过切机、切负荷、解列等控制手段尽量减少停电范围。一旦发生大停电事故,应当立即获取电网状态,迅速评估停电范围和影响,并及时启动恢复预案,逐步恢复系统供电。

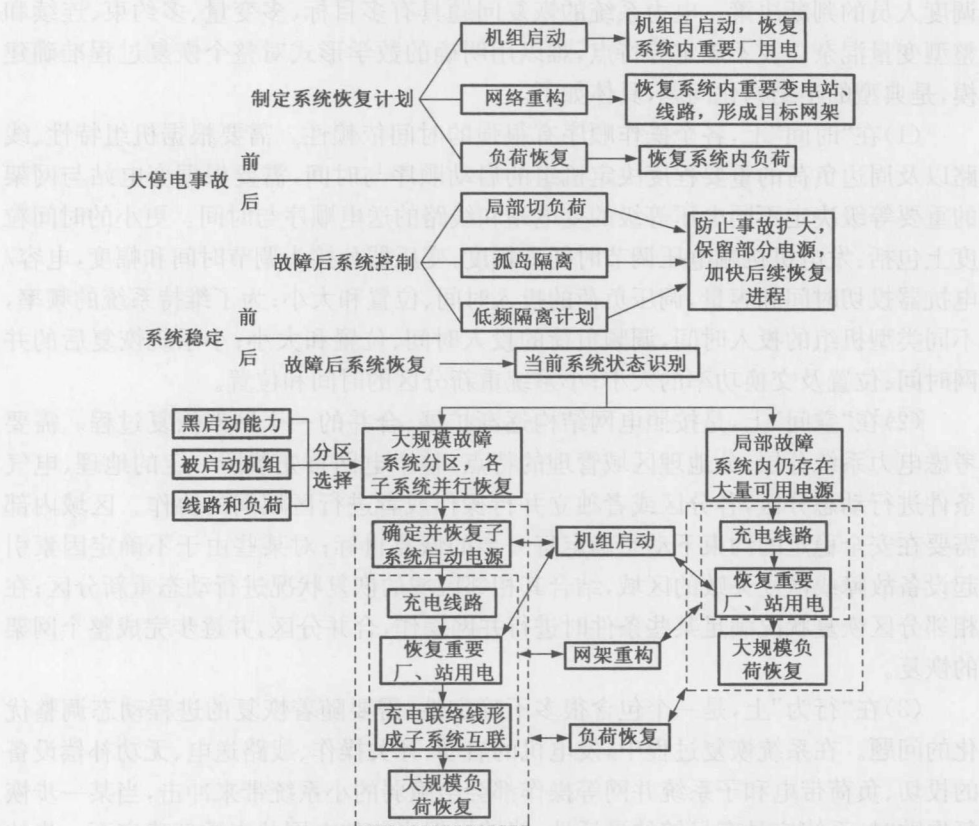


图 1-2 电力系统恢复控制的实施过程

根据不同恢复时期主要优化目标的不同,系统恢复控制过程一般分为机组黑启动、网架重构和负荷恢复三个阶段^[31, 32]。

1) 机组黑启动阶段

电力系统大停电后恢复过程的初始阶段称为黑启动,主要指通过系统中具有黑启动能力的机组或外来电源向临近的、具有临界时间限制的火力发电厂(或不具备自启动能力的其他大型发电厂)提供启动功率,待其恢复发电能力后,重新并网形成独立子系统的过程。各分区子系统能够成功黑启动,是减少重要负荷停电时间、快速恢复电网的首要条件,因此黑启动阶段十分关键。

系统的黑启动电源包括水轮发电机、燃气轮发电机、事故后带自身厂用电运行的发电机、解列后的孤立子系统或外部系统的功率支援等。在黑启动电源确定的情况下,需要综合考虑机组恢复成功率和机组容量等因素的影响,快速优选出黑启动阶段的待恢复机组和相应的恢复路径^[33]。黑启动阶段的恢复操作主要包括黑启动电源启动、充电相关恢复路径(线路和变压器等)、启动发电厂大型辅机、被启动机组并网以及投入一定量的负荷以保证系统的稳定运行等。黑启动阶段一般历时 30~60min。

由于大停电后的系统状态与正常运行下的系统状态有很大差别,恢复控制过程中会面临一些特殊运行方式下的安全技术问题。黑启动阶段应特别关注以下问题:机组的启动和运行特性、空载线路和变压器充电时可能发生的自励磁和过电压问题、空载变压器投入时的励磁涌流问题、变压器饱和引起的谐振问题、发电厂大型辅机启动时的频率和电压跌落问题以及孤立小系统的调频、调压问题等^[34~38]。

2) 网架重构阶段

该阶段通过送电系统内重要厂站以及主要的输电线路来逐步恢复系统主干网架。网架重构的作用主要体现在两个方面。一方面,子系统内部主干网架的逐步恢复,增强了机组之间的联系,从而可以提高系统运行的安全性与可靠性;另一方面,子系统之间的并列,加强了已恢复网架的强度,从而为负荷的全面恢复奠定了基础。

该阶段的恢复目标是系统内的主力机组和主干网架,主要涉及网架结构、发电机启动顺序和恢复路径优化等。整个过程一般持续 3~4h。当停电范围较大或子系统划分不适当时,该过程的持续时间甚至更长。

此过程中,为提高系统恢复的效率和保证系统的安全与稳定性,可暂缓投入一些地区系统间的联络线或向偏远地区供电的负荷线路。此外,由于网架恢复过程中的系统整体负荷水平较低,应特别注意无功功率平衡问题,避免出现发电机吸收的无功功率超过其进相能力以及大量容性无功功率流过线路所造成的电压升高等问题^[39~41]。

3) 负荷恢复阶段

系统的主干网架形成之后,主力机组均已启动并网,此时应进行大规模的负荷投入操作。该过程中应根据负荷点的重要程度对负荷的投入顺序和大小进行优化。为了避免引起低频或低压减载装置动作,负荷投入时应保证系统的频率下降和电压跌落都不能超过允许值。负荷恢复还应该保证负荷投入后线路上流过的功率不过载,节点电压满足要求^[42~44]。

实际系统停电后的恢复过程并非严格遵循上述三个阶段,如机组启动阶段需要恢复适量的负荷来平衡机组出力;若故障后系统的主干网架仍保持供电,则可以直接进行负荷的恢复操作。因此,实际的电力系统恢复应根据系统的状态灵活进行。

1.2.4 电力系统恢复的技术问题

北美电力可靠性委员会对连续十年中发生的 117 起电力系统事故的统计显示^[45],有多次恢复过程由于一种或多种技术问题而被延误。其中,有 23 次是由于无功不平衡,包括发电机欠励磁,电容和电抗器的投切引起的问题;有 11 次是由于负荷与发电不平衡,原因包括负荷突增和低频甩负荷;有 29 次是由于负荷发电协调不当,包括缺乏黑启动功率,以及由开关操作、线路过载或控制中心间协调不当引起的问题;有 56 次是由于监控系统的缺陷;有 15 次是由于保护系统;有 20 次是由于耗尽储能装置的能量;有 41 次是由于系统恢复方案不完备。上述事实表明,电力系统恢复控制面临很多技术问题,需要在恢复方案的形成与安全校验时予以适当考虑,主要包括黑启动电源选择^[46]、机组启动顺序、有功功率平衡和频率控制、无功功率平衡和电压控制^[47]、继电保护和自动装置整定、大型辅机启动对系统电压和频率的影响、负序电流以及系统并列与合环^[48, 49]等。

在黑启动阶段,系统处于恢复初期,充电空载长架空线路或地下电缆时可能出现的过电压问题,包括自励磁现象、持续工频过电压、操作过电压和铁磁谐振过电压。恢复空载或轻载线路时,由于线路的电容效应和充电电流的作用,相当于系统引入了无功电源,如果缺乏足够的无功负荷则会造成无功不平衡,使得系统电压水平升高,特别是在充电线路末端会产生持续工频过电压,这将直接影响电气设备绝缘和运行性能以及操作过电压的水平。发电机在过大容性负荷下,机端电压会自发上升,这种自励磁现象也会导致过电压的产生。大容量变压器在空载投入时,会产生励磁涌流现象,引起黑启动机组机端电压发生严重畸变,当黑启动机组采用自并励的励磁方式时,极易引起励磁系统异常而导致黑启动机组跳闸。常用的控制手段主要是通过控制发电机、补偿装置等设备来吸收线路产生的无功功率,具体包括调整机组端电压、改变变压器分接头位置、投入并联电抗器、恢复滞后功率因数的负荷等措施。

在网架重构阶段,系统恢复涉及大量的线路投切操作。特别是在超高压甚至特高压输电网架的恢复过程中,一些空载或轻载长线路的投入会产生大量的无功功率,从而导致系统的暂态或稳态过电压问题。因此,无功功率平衡和电压控制是保证系统顺利恢复的重要条件。

负荷的恢复贯穿电力系统恢复的全过程。在黑启动和网架重构阶段,负荷的接入主要用于平衡系统有功,维持发电机和系统的安全稳定运行。当系统内主力机组已经启动并网,主网架也已恢复后,需尽快恢复对剩余负荷的供电。负荷投入的过程中应保证系统频率和节点电压满足要求,实际工程应用中通常从频率的角度来确定负荷投入大小,认为负荷的单次投入量不超过当前系统容量的 5%,则系统频率的下降程度满足工程要求(不超过 0.5Hz)。但是在某些情况下,这种经验