

Power System Risk Assessment
and Risk Based Dispatch

电力系统风险评估与 风险调度

郭创新 丁 一 张金江 董树锋◎著



科学出版社

电力系统风险评估与风险调度

Power System Risk Assessment and Risk Based Dispatch

郭创新 丁 一 张金江 董树锋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对现代电力系统处于源、网、荷以及环境等多重不确定性因素作用下运行风险不断加大的现状,在传统电力系统确定性调度理论的基础上综合考虑系统运行过程中所面临的不确定性,提出系统运行风险预测和防控的理论,通过量化各种不确定性风险因素,研究电力系统风险评估和风险调度方法,构建电力系统的风险防控体系,尽可能全面、客观地量化系统在遭受各类不确定因素下发生灾难性事件的概率性严重程度。本书内容包括电力系统风险评估与风险调度模型与基本理论、电力系统风险评估与风险调度方法、电力系统风险评估与风险调度实践等内容,形成一套从模型构建、评估调度方法、实践应用等风险评估与调度理论方法应用体系,支撑电力系统风险经济运行优化控制。

本书可作为电力系统调度、运行管理专业研究人员的技术资料,也可作为电气工程及其自动化专业本科生、电气工程相关学科研究生的教材或者参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统风险评估与风险调度=Power System Risk Assessment and Risk Based Dispatch/郭创新等著. —北京:科学出版社,2018.3

ISBN 978-7-03-056602-7

I. ①电… II. ①郭… III. ①电力系统-安全风险-风险评价②电力系统调度-安全风险-发电调度 IV. ①TM08②TM73

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第035303号

责任编辑:范运年 霍明亮/责任校对:彭 涛

责任印制:师艳茹/封面设计:铭轩堂

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>

天津市新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年3月第一次印刷 印张:33 1/4

字数:673 000

定价:178.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着化石能源储备枯竭的逐步迫近,环境污染和生态恶化问题也日益加剧,能源危机与需求增长之间的矛盾日益突出。而现代社会经济的发展对电能的需求却在不断提高,可再生能源大量接入电网和电能替代已成为当前发展的必然趋势,未来智能电网发输变配用各个环节在新能源渗透迫切要求的冲击下必将迎来新一轮的技术革新。对新能源的高效利用是未来智能电网必不可少的重要特征,以风能和太阳能为代表的新能源虽然在能源储备、环境友好性等方面具有传统化石能源无可比拟的优越性,但同时应该看到,其气候条件所决定的随机性本质为其能量的消纳和控制带来诸多困难,已成为智能电力系统运行调度所关心的焦点问题。

在智能电网环境下,电力系统面临电源、电网、负荷、环境气象条件等因素在空间和时间上呈现出的多重不确定性,电力系统运行控制的难度大为增加。基于 N-1 等确定性安全准则的调度方式难以反映系统的实际运行风险水平,往往偏于保守或激进,无法从安全、经济和风险的全局视角进行统筹协调并给出规避风险的控制策略。为此,研究智能电网风险调度的基础理论与关键技术,适应智能电网运行与管理形态的深刻变革,在风险“辨识—评估—控制”的统一框架下,实现安全可靠、经济高效、节能低碳的风险自治协调调度。作者希望通过本书对作者团队在这一领域的多年研究成果和实践经验进行总结并与读者分享。

本书的内容主要涵盖两个密切联系的方面,一是电力系统风险评估,其评估结果尽可能全面地客观量化系统在遭受各类不确定因素下发生灾难性事件的概率性严重程度;二是根据风险评估的结果以某些既定目标为导向进行系统运行方式的预调节和风险防范措施的调度部署。因此,电力系统风险评估为系统风险调度提供系统风险指标及其计算方法,而电力系统风险调度则根据系统风险的评估结果来调谐系统运行,所形成的决策方案在执行完毕后再次进入新一轮的评估与决策,从而连续滚动地支撑系统低风险经济运行。本书分为三篇,共 22 章。其中,第一篇电力系统风险评估与风险调度模型及基本理论,包括第 1~5 章,主要介绍风险评估的基本概念,发电设备、电网一次设备二次系统、可再生能源风险模型;第二篇电力系统风险评估与风险调度方法,包括第 6~16 章,主要介绍电力系统风险评估方法、后果评价方法、经济性评估方法、风险调度方法,并阐述基于风险分析的电力系统重构、计及 FACTS 的电网静态安全、最优潮流、时空解耦、互联微网协同自治、电网人为因素分析、风险约束的经济调度等问题;第三篇电力系统风险评估与风险调度实践,包括第 17~22 章,主要介绍电力系统风险调度体

系及架构设计、电网运行多维度风险管控系统、配电网风险规划、电网多维度运行风险调度与应急指挥系统、电网操作风险及事故预控系统、面向调度运行的动态风险评估与管控等内容。

本书所介绍的电力系统风险评估与风险调度是在传统电力系统确定性调度理论的基础上综合考虑系统运行过程中所面临的不确定干扰而进行系统运行风险预测和防控的理论,旨在通过科学量化各种随机干扰对系统的不利影响,结合不断积累的历史经验来筹划当代电力系统的风险防控体系,以期探寻应对各种不利因素条件的系统运行经济代价与系统低风险控制的平衡点,所述模型和方法对研究未来智能电力系统的运行控制具有前瞻性的借鉴意义。

本书由郭创新教授、丁一教授、张金江副教授、董树锋副教授共同撰写。丁一教授和张金江副教授对全书进行了审校。其中第1~4、6、7、16章由郭创新教授撰写,第5、8、10、11、13、14、20章由丁一教授撰写,第9、15、19、21章和附录由张金江副教授撰写,第12、17、18、22章由董树锋副教授撰写。作者还要特别感谢文云峰、王越、詹俊鹏、郭嘉博士以及施鹏佳、沈俭荣、暴英凯、熊世旺、李万启、张行、文东山、焦昊、夏伊乔、林优、何宇斌、韩宇奇、陈哲、曹煜等研究生对本书撰写所做出的贡献。

本书的撰写和出版得益于国家自然科学基金重点项目:多重不确定因素下的智能电网风险调度理论与方法研究(51537010)、浙江省自然科学基金重点项目:基于电力变压器可载性分析的智能电网状态调度方法研究(LZ14E070001)等基金项目的研究成果,也得益于在安徽、浙江、重庆、贵州、深圳等电力公司的科研实践。作者由衷地感谢相关专家的多方面建议,并向书中所有参考文献的作者表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在一些不足之处,恳请同行专家和各位读者不吝指正。

作 者

2018年1月

目 录

前言

第一篇 电力系统风险评估与风险调度模型及基本理论

第 1 章 概述	3
1.1 现代电力系统运行的时代背景	3
1.2 电力系统运行面临的主要问题	4
1.2.1 极端外部灾害事件频发	4
1.2.2 物理系统与信息系统高度融合	4
1.2.3 现有电力调度方式已落后于智能电网自身的发展	5
1.3 风险评估与风险调度的内涵	6
1.3.1 电力系统可靠性评估的概念	6
1.3.2 电力系统风险评估的概念	7
1.3.3 电力系统风险调度的概念	8
1.4 本书的内容结构	10
参考文献	10
第 2 章 发电机设备风险模型	13
2.1 概述	13
2.2 常规发电机时变停运模型	13
2.2.1 传统的发电机停运模型	13
2.2.2 考虑老化失效的发电机综合时变停运模型	14
2.3 快速启停机组停运模型	15
2.4 风机时变停运模型	16
2.4.1 风速模型	16
2.4.2 风机的出力与风速的关系	16
2.5 光伏发电机组时变停运模型	17
2.5.1 太阳能电池阵列的可靠性模型	17
2.5.2 逆变器的可靠性模型	18
2.6 本章小结	18
参考文献	19

第3章 电网一次设备风险评估模型	20
3.1 概述	20
3.2 一次设备风险概率建模	20
3.2.1 一次设备故障率建模思路	20
3.2.2 基于历史统计信息的故障率模型	21
3.2.3 基于检测量的故障率模型	21
3.2.4 基于老化和设备状态的故障率模型	22
3.3 架空输电线的时变停运模型	23
3.3.1 基于重负载潮流的输电线路停运模型	23
3.3.2 恶劣灾害条件下的输电线路停运模型	24
3.3.3 基于线路老化的停运模型	29
3.3.4 输电线路综合时变停运模型	31
3.4 变压器的时变停运模型	31
3.4.1 内部潜伏性故障的失效机理	32
3.4.2 内部潜伏性故障的油气特征	33
3.4.3 基于油气信息的变压器时变停运模型	34
3.4.4 基于 PHM 和油气信息的变压器时变停运模型	38
3.4.5 变压器综合时变停运模型	42
3.5 静态无功补偿装置时变停运模型	43
3.5.1 静态无功补偿设备的绝缘寿命模型	43
3.5.2 静态无功补偿设备的时变停运模型	46
3.6 高压断路器时变停运模型	50
3.6.1 断路器在线健康状态评估	50
3.6.2 考虑断路器状态的停运模型	52
3.7 本章小结	53
参考文献	54
第4章 电网二次系统的风险评估模型	55
4.1 概述	55
4.2 电力二次系统概述	55
4.3 电力二次系统共性	57
4.4 基于功能分解的电力二次系统信息模型	60
4.4.1 基本元素定义	60
4.4.2 系统功能树和功能图的构造	61
4.4.3 基于 FBM 的电力二次系统数学描述	63
4.5 电力二次系统功能风险建模	63
4.5.1 可靠性风险建模比较	63

4.5.2 基于可靠性框图的功能失效风险概率分析	64
4.6 二次系统对一次系统可靠性影响的风险模型	69
4.6.1 电力二次系统对一次系统的作用分类	69
4.6.2 考虑二次系统作用的一次系统可靠性分析	70
4.6.3 基于非序贯蒙特卡罗模拟法的风险评估	72
4.7 本章小结	75
参考文献	76
第 5 章 高风电渗透率下的电力系统短期和中期可靠性评估	78
5.1 概述	78
5.2 发电系统可靠性模型	79
5.2.1 风电场的可靠性模型	79
5.2.2 传统发电机的可靠性模型	83
5.2.3 快速启停机组的可靠性模型	86
5.2.4 混合发电和备用提供商的可靠性模型	87
5.3 考虑输电网络影响的系统可靠性模型	89
5.4 可靠性评估过程	90
5.4.1 可靠性指标	90
5.4.2 可靠性评估的计算步骤	91
5.5 算例分析	92
5.6 本章小结	95
参考文献	96

第二篇 电力系统风险评估与风险调度方法

第 6 章 电力系统运行风险评估方法	101
6.1 概述	101
6.2 随机过程	101
6.3 马尔可夫过程	101
6.4 解析法	103
6.5 模拟法	104
6.5.1 蒙特卡罗技术	104
6.5.2 交叉熵重采样技术	105
6.5.3 离散多状态空间非序贯仿真技术	107
6.5.4 考虑时齐马尔可夫过程的序贯仿真技术	110
6.5.5 考虑非时齐马尔可夫过程的序贯仿真技术	112
6.6 本章小结	114

参考文献	114
第7章 电力系统随机状态后果评价方法	116
7.1 概述	116
7.2 互联大电网的状态后果评价	116
7.2.1 安全稳定约束	116
7.2.2 静态安全分析	116
7.2.3 中断供电的能量损失	119
7.2.4 电网拓扑完整性	122
7.2.5 经济损失	124
7.2.6 控制代价	125
7.3 配电网的状态后果评价	125
7.3.1 概述	125
7.3.2 配电网可靠性指标	126
7.3.3 用户停电损失估算	128
7.4 后果严重度的定性描述	133
7.4.1 概述	133
7.4.2 一般计算流程	134
7.4.3 严重度评级	134
7.5 本章小结	137
参考文献	137
第8章 考虑可靠性的大规模光伏系统经济性评估方法	139
8.1 概述	139
8.2 光伏系统可靠性模型	140
8.2.1 太阳能电池板阵列可靠性模型	140
8.2.2 逆变器可靠性模型	142
8.2.3 产能单元可靠性模型	142
8.2.4 期望产能	143
8.3 光伏系统成本分析	143
8.4 光伏系统的可行配置鉴别	144
8.5 应用实例	145
8.6 本章小结	150
参考文献	150
第9章 电力系统风险调度方法	152
9.1 概述	152
9.2 基于风险的预防控制	153

9.2.1	基本概念	153
9.2.2	ROPC 模型	156
9.2.3	ROPC 问题的求解	157
9.2.4	DSMOPSO 算法流程	158
9.3	多阶段协调的风险调度	159
9.3.1	MCRD 基本概念	159
9.3.2	MCRD 数学优化模型	161
9.3.3	MCRD 的求解	162
9.4	多区互联电力系统的分散协调风险调度	166
9.4.1	CDRD 基本概念	166
9.4.2	分散协调风险调度的架构与区域分解机制	167
9.4.3	分散协调风险调度的优化模型	169
9.4.4	CDRD 的求解	170
9.5	智能电网背景下的风险调度	173
9.5.1	时间解耦协调的风险调度模型与方法	174
9.5.2	空间解耦协调的风险调度模型与方法	175
9.5.3	市场环境下的智能电网风险调度模型与方法	177
9.6	本章小结	178
	参考文献	179
第 10 章	重构电力系统的可靠性评估方法	181
10.1	概述	181
10.2	高风电渗透率下重构电力系统的可靠性分析方法	181
10.2.1	概述	181
10.2.2	发电系统可靠性网络等效	182
10.2.3	实时运行下的偶发故障管理模式	189
10.2.4	仿真步骤及可靠性分析	191
10.2.5	算例分析	194
10.3	基于最优减载技术的重构电力系统可靠性评估	198
10.3.1	概述	198
10.3.2	现有的负荷减载和发电再调度方法综述	199
10.3.3	用户对切负荷的响应	200
10.3.4	偶发事故管理模型	201
10.3.5	问题建模	202
10.3.6	可靠性指标	204
10.3.7	IEEE RTS 算例分析	208
10.4	本章小结	213

参考文献	213
第 11 章 计及 FACTS 校正控制策略的电网静态安全风险评估技术	216
11.1 概述	216
11.2 柔性交流输电的风险控制问题	216
11.3 基于风险灵敏度的 FACTS 设备位置配置	217
11.3.1 电网静态安全风险指标	217
11.3.2 FACTS 设备的功率注入模型	221
11.3.3 FACTS 设备的位置配置	224
11.4 FACTS 校正控制机理	227
11.5 FACTS 校正控制数学优化模型	228
11.6 计及 FACTS 校正控制的风险评估流程	230
11.7 算例分析	231
11.7.1 FACTS 校正控制对电网静态安全风险的影响	231
11.7.2 FACTS 配置位置对电网静态安全风险的影响	233
11.7.3 FACTS 配置容量对电网静态安全风险的影响	235
11.8 本章小结	235
参考文献	236
第 12 章 基于风险指标排序的安全约束最优潮流分析	237
12.1 概述	237
12.2 安全约束最优潮流	238
12.3 电力系统风险评估理论基础	239
12.3.1 概率性的评估方法	239
12.3.2 严重度指标	240
12.4 数学模型与相关指标	241
12.4.1 安全约束最优潮流数学模型	241
12.4.2 考虑天气状况的输电线路停运模型	242
12.4.3 考虑输电线路停运概率的改进过载风险指标	244
12.5 算法流程	245
12.5.1 传统 SCOPF 算法流程	245
12.5.2 基于故障风险指标排序的 SCOPF 算法流程	246
12.6 算例分析	247
12.7 本章小结	251
参考文献	252
第 13 章 基于时空解耦的自治系统风险调度模型与算法	253
13.1 概述	253

13.2 基于空间解耦的互联电力系统风险调度方法	253
13.3 基于时间解耦的自治电力系统风险调度方法	260
13.4 本章小结	264
参考文献	265
第 14 章 电力市场下互联微网协同自治调度形态与策略	267
14.1 概述	267
14.2 基于产消方式的互联微网分散能量管理方法	267
14.3 考虑风险因子的互联自治微网协同调度方法	278
14.4 本章小结	282
参考文献	283
第 15 章 电网人因可靠性分析及风险评估	284
15.1 概述	284
15.2 人因可靠性研究现状	284
15.2.1 人因可靠性理论研究现状	284
15.2.2 人因可靠性方法研究现状	285
15.2.3 电网人因可靠性和操作风险研究现状	286
15.3 电力系统中人为可靠性概述	287
15.3.1 电力操作可靠性概念	287
15.3.2 电力系统生产特点	288
15.3.3 电力系统安全生产中人为分析的重要性	289
15.3.4 CREAM 方法简介	291
15.3.5 CREAM 方法针对电力系统的改进	293
15.4 电力系统中的人为失误	302
15.4.1 电力系统中人为失误机理	302
15.4.2 电力系统中人为影响因素	304
15.5 电力运行操作人为可靠性分析	306
15.5.1 时间相关型场景下人为可靠性分析(TR-HRA)	306
15.5.2 过程相关型场景下人为可靠性分析(PR-HRA)	307
15.5.3 应急相关型场景下人为可靠性分析(ER-HRA)	309
15.5.4 算例分析	310
15.6 考虑人为失误的设备风险建模及可靠度评估	314
15.6.1 考虑人为失误的设备风险模型	314
15.6.2 算例分析(IEEE 9 节点测试系统可靠性评估)	315
15.6.3 考虑人为因素的设备可靠度评估	317

15.7 电力检修中的人为可靠性分析	320
15.7.1 人为因素导致的不完美检修	320
15.7.2 考虑人为因素的设备定期检修模型	321
15.7.3 算例分析	322
15.8 设备检修过程中人为失误管理	326
15.9 电力调度操作中人为可靠性分析	327
15.9.1 调度操作过程中的人为失误	327
15.9.2 考虑人为因素的紧急调度操作可靠性分析	327
15.9.3 人为因素对电力系统连锁故障影响	328
15.9.4 算例分析(IEEE 24 节点测试系统可靠性评估)	329
15.10 本章小结	331
参考文献	332
第 16 章 考虑风电和风险约束的经济调度	336
16.1 概述	336
16.2 含风电的 RCED 模型	336
16.3 含风电的 CEED 模型	338
16.4 仿真分析 1	340
16.5 仿真分析 2	345
16.6 本章小结	349
参考文献	350

第三篇 电力系统风险评估与风险调度实践

第 17 章 电力系统风险调度体系及架构设计	353
17.1 概述	353
17.2 电力系统风险调度体系介绍	354
17.2.1 风险跟踪	354
17.2.2 风险校核	356
17.2.3 风险控制	357
17.3 电力系统风险调度架构设计	359
17.3.1 硬件架构	361
17.3.2 软件架构	362
17.3.3 功能架构	365
17.4 电力系统风险调度指标定级体系	367
17.4.1 风险发生概率定级	368
17.4.2 风险严重程度定级	368

17.4.3 风险定级	370
17.4.4 多风险处理方法	370
17.5 本章小结	372
参考文献	372
第 18 章 电网运行多维度风险管控系统实现及应用	374
18.1 概述	374
18.2 互联大电网运行风险评估设计	374
18.3 多维度风险管控系统实现及应用	377
18.3.1 风险信息采集	377
18.3.2 风险辨识模块	379
18.3.3 风险评估模块	380
18.3.4 风险预警与管控模块	383
18.4 本章小结	387
参考文献	387
第 19 章 安徽省某地区配电网风险规划应用	388
19.1 概述	388
19.2 风险规划模型	388
19.2.1 风险规划含义	388
19.2.2 含分布式新能源的配电网风险规划数学模型	389
19.3 基于风险光水协调规划方法	391
19.4 风险规划理论应用	395
19.4.1 35kV 网络风险规划理论应用	397
19.4.2 10kV 网络风险规划理论应用	400
19.4.3 35kV 和 10kV 网络联合风险规划理论应用	402
19.5 本章小结	406
参考文献	406
第 20 章 电网多维度运行风险调度与应急指挥系统实现及应用	407
20.1 概述	407
20.2 电网防灾减灾工作	408
20.2.1 我国电网灾害防御方面已有的工程与项目	408
20.2.2 我国电网安全防御体系的探讨	409
20.2.3 主要解决的问题	412
20.3 电网多维度运行风险调度与应急指挥系统实现及应用	412
20.3.1 系统建设的意义	412
20.3.2 系统框架与功能	413

20.3.3 数据源与数据接口	414
20.3.4 主要的功能模块	414
20.3.5 系统的开发与实现	417
20.3.6 系统的主要功能界面设计	419
20.4 本章小结	422
参考文献	422
第 21 章 电网操作人因可靠性分析及事故预控系统	424
21.1 概述	424
21.2 需求分析	424
21.2.1 系统总体需求分析	425
21.2.2 系统体系结构需求	425
21.2.3 用户及权限需求	426
21.2.4 功能需求	427
21.2.5 用户界面需求	428
21.3 系统设计	428
21.3.1 系统架构设计	428
21.3.2 系统功能设计	430
21.3.3 系统功界面展示方案设计	434
21.3.4 系统数据库设计	434
21.4 系统展示及功能介绍	435
21.5 本章小结	439
参考文献	439
第 22 章 面向调度运行的动态风险评估与管控实现及应用	440
22.1 概述	440
22.2 面向调度运行的风险评估方法	441
22.2.1 基于事件树的调度操作状态模拟	441
22.2.2 调度操作风险指标计算	443
22.2.3 调度操作风险评估框架	445
22.2.4 算例分析	446
22.3 面向调度运行的风险定级方法	449
22.3.1 调度运行风险后果值量化评估	449
22.3.2 调度运行风险概率值量化评估	450
22.3.3 调度运行风险值量化评估	452
22.4 面向调度运行的风险评估平台实现	453
22.4.1 风险信息采集模块	453
22.4.2 设备风险辨识模块	456

22.4.3 调度操作风险评估模块	456
22.4.4 调度操作风险比较模块	458
22.4.5 电网运行风险评估模块	460
22.4.6 离线 Web 版风险管理工具	461
22.5 本章小结	463
参考文献	464
附录 A 风险评估基础知识	465
A.1 概述	465
A.2 概率论引论	465
A.2.1 样本空间与事件	465
A.2.2 概率的定义	467
A.2.3 条件概率	470
A.2.4 独立事件	473
A.2.5 贝叶斯公式	475
A.3 随机过程	477
A.3.1 随机过程	478
A.3.2 泊松过程	479
A.3.3 马尔可夫链	482
A.4 优化方法	486
A.4.1 整数线性规划	486
A.4.2 规划问题及其求解方法	495
A.4.3 分支定界方法	498
附录 B 风险评估测试模型	501
B.1 风险评估 IEEE RTS-79 模型	501
B.2 风险评估 IEEE RTS-96 模型	505
B.3 风险调度各下级调度中心的优化模型	505
附录 C 术语	508

第一篇 电力系统风险评估与风险 调度模型及基本理论