



电网规划

风险评估理论与实践

刘开俊 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网规划

风险评估理论与实践

刘开俊 主编



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着我国电力需求的快速增长,电网建设规模不断扩大,电力系统的安全可靠问题日益成为用户和电力部门共同关注的焦点。目前,我国的电网规划设计阶段,并没有制定明确的可靠性准则,规划设计工作中对于系统可靠性的评估主要通过潮流计算、 $N-1$ 原则、短路电流计算等手段,并结合工程经验以校核的方式实现。

本书结合工程案例的静态、暂态风险评估,对电力系统风险评估基础概念及其在实际电网规划设计中的应用进行生动说明,并给出程序开发的基本流程,论证了风险评估方法在输电网规划设计中应用的可行性和实用性,为完善和发展传统的输电网规划设计方法提供了一种新的思路,填补国内电力系统风险评估理论在实际电网规划设计中应用的空白。

本书可作为从事电网规划及电网风险评估工作的广大技术和管理人员的培训教材,也可高等院校电气工程专业师生了解实际电网工程中风险评估的实用化技术提供参考和有益帮助。

图书在版编目(CIP)数据

电网规划风险评估理论与实践/刘开俊主编. —北京:
中国电力出版社, 2014.10
ISBN 978-7-5123-6355-7

I. ①电… II. ①刘… III. ①电网—电力系统规划—风险评估
IV. ①TM715

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 189688 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月北京第一次印刷
710 毫米×980 毫米 16 开本 14.75 印张 224 千字
印数 0001—2000 册 定价 68.00 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

《电网规划风险评估理论与实践》

编 委 会

主 编 刘开俊

副 主 编 韩 丰 李 隽

编写人员 高 艺 宋福龙 曾 沅

秦 超 李 晖 罗金山

贾宏杰 张 艳 许寒冰

前言

电网是能源供应体系的重要组成部分，是现代经济发展和社会进步的重要基础和保障。随着电力工业发展和技术进步，我国电网经历了从小机组、低电压的地区电网逐步发展成为以大机组、超高电压、跨大区互联为特征大电网的过程，电网不仅是传统意义上的电能输送载体，还是能源转换、高效配置和互动服务的平台，是保障国家能源安全和经济社会可持续发展的重要基础。

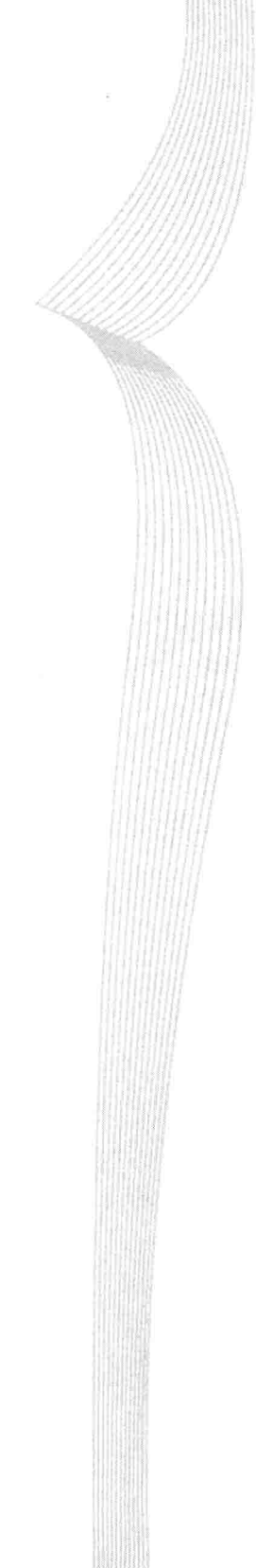
当前，我国经济社会的持续稳健发展，带动了电力需求快速增长，电网进入高速发展时期，电网规模不断扩大，网架结构日益复杂。目前我国已形成华北—华中、华东、东北、西北、南方五大同步电网格局，大规模交直流电网混合运行特征日趋明显。在获得大电网规模效益的同时，也不得不承受潜在风险的威胁，特别是随着经济社会对电力供应依赖性的不断提高，对电网的发展以及安全、可靠、经济运行提出了更高的要求。如何进一步提高电网建设和投资决策水平，控制电网风险水平，保障电网的安全稳定运行，是电网规划设计工作者面临的一项重要课题。

电网主要包括输电网和配电网。输电网的功能是将发电厂发出的电力送到消费电能的地区，或进行相邻电网之间的电力互送，形成互联电网或统一电网。配电网的功能

是在消费电能的地区接受输电网输送的电力，然后进行再分配，输送到城市和农村，进一步分配和供给工业、农业、商业、居民以及有特殊需要的用电部门。电网规划常分为输电网规划和配电网规划。

输电网规划的主要任务是根据规划期内的电力需求预测水平和电源建设规划确定最佳的输电网方案，并在保证将电力安全、可靠地输送到邻近负荷中心的枢纽变电站或大容量用户的前提下使电网的建设和运行费用最小。目前我国输电网规划设计主要采用确定性 $N-1$ 可靠性准则，通过对满足 $N-1$ 要求的几类方案进行技术经济比较选择出推荐的规划设计方案。这种对电网可靠性的处理方法，仅考虑事故的安全约束和后果，忽视了事故发生的概率。由于电网行为具有随机特性，客观存在电气设备故障、系统停电事故的发生、负荷预测、发电机出力预测等不确定因素，在电网规划中需要考虑这些事件发生的可能性，因此，引入风险评估技术是电网发展的迫切需要。

国际上已有国家采用概率性方法开展电网规划设计，根据不同的可用发电装机得到不同的风险指标，以风险指标为参考标准指导发电装机和网络扩展。这对我国在电网规划设计阶段引入风险指标是一个重要启示。现阶段国内外所取得的成果集中在静态风险评估方面，主要应用在发电系统、配电系统和电气主接线可靠性评价。相对而言，对输电网的风险评估起步较晚，考虑动态和暂态的风险评估更是涉及较少，仍处在探索阶段。



本书立足我国电网规划实际，旨在规划设计阶段对电网进行基于风险的分析，量化评估电网规划方案的风险水平，提高电网的安全性、可靠性和适应性。本书将风险评估理论应用于输电网规划设计，提出了对电力系统事故发生概率和事故后果进行综合评估的模型和实用算法，通过工程案例分

析，论证了风险评估方法在输电网规划设计中应用的可行性和实用性，为完善电网规划设计方法提供了一种新的思路。

本书编写的重点是电力系统风险评估理论在大型输电网规划设计中的实际应用。通过对电网规划方案在不同故障下的静态、暂态风险分析，明确相关概念，加深对电力系统风险评估理论的理解，加强对规划方案进行基于风险遴选的应用。通过局部和相对风险信息量化分析，寻找电网薄弱环节，比选规划方案，提高方案的合理性与可信性。

本书共分九章。首先介绍了电力系统风险评估的基本概念、分类，电网规划风险评估的内容和方法，风险评估的概率理论基础，风险评估的常用模型，风险评估的基本方法和指标。阐述了静态风险评估基本流程和静态安全最优控制方法，暂态风险评估基本流程和暂态稳定控制方法，连锁故障风险评估基本流程与计算方法。然后通过电网规划风险评估应用，给出了风险评估应用流程，介绍了参数选取及估算方法、风险评估综合分析内容和常用的辅助分析软件。最后列举了在电网规划方案比选、网架建设时序分析、网架加强分析、变电站布点规划以及输变电工程建设效果分析五个方面的应用实例。

展望未来，电网规划风险评估理论和技术将更趋完善。

本书仅是我国应用风险评估理论开展电网规划方案风险分析实践的总结，旨在给电网规划设计工作者开展相关工作提供指导和借鉴，也可高等院校电气工程专业师生了解实际电网工程中风险评估的实用化技术提供参考和有益帮助。书中不足之处，敬请读者提出宝贵意见和建议。

编 者

2014 年 8 月

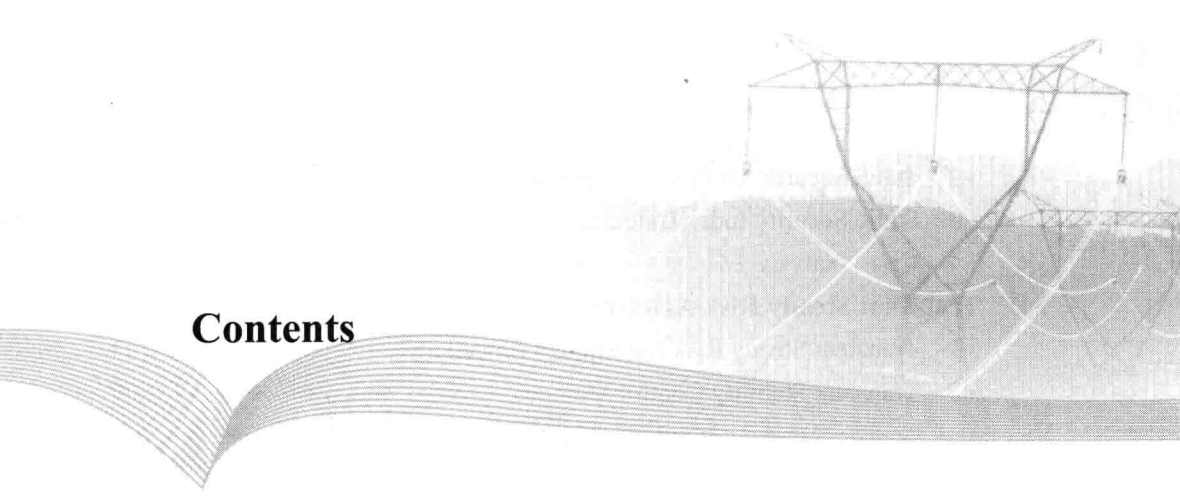


目 录

前言

第一章 电力系统风险评估基础	1
第一节 基本概念	1
第二节 风险评估分类	4
第三节 风险评估方法	10
第四节 电网规划风险评估	13
第二章 风险评估概率理论	21
第一节 基本概率理论	21
第二节 概率分布	24
第三节 常用分布函数	28
第四节 马尔可夫随机过程	35
第三章 风险评估模型	37
第一节 元件停运模型	37
第二节 系统评估模型	50
第三节 负荷评估模型	57
第四章 风险评估方法	66
第一节 简单系统风险评估方法	66
第二节 复杂系统风险评估方法	71
第三节 电力系统风险评估指标	78
第五章 静态风险评估	88
第一节 静态风险评估流程	88
第二节 基于灵敏度的静态安全最优控制方法	90

第三节	静态风险指标计算	97
第四节	算例分析	99
第六章	暂态风险评估	107
第一节	暂态风险评估流程	107
第二节	基于轨迹灵敏度的暂态稳定最优控制方法	109
第三节	暂态风险指标计算	116
第四节	算例分析	118
第七章	连锁故障风险评估	125
第一节	连锁故障分析方法与模型	125
第二节	连锁故障风险评估思路	128
第三节	算例分析	132
第八章	电网规划风险评估应用	139
第一节	电网规划风险评估流程	139
第二节	风险评估参数选取	141
第三节	风险评估综合分析	148
第四节	风险评估分析工具	155
第九章	工程应用实例	161
第一节	电网规划方案比选应用	161
第二节	输电通道建设时序风险评估应用	183
第三节	网架加强应用	191
第四节	单一工程对电网风险影响	198
附录 A	稳定分析结果	202
索引		213
参考文献		218



Contents

Preface

1	Power System Risk Assessment Foundation	1
1.1	Basic Concepts	1
1.2	Risk Assessment Classification	4
1.3	Risk Assessment Methods Introduction	10
1.4	Power Planning Risk Assessment	13
2	Risk Assessment Probability Theory	21
2.1	Probability Theory Foundation	21
2.2	Probability Distribution	24
2.3	Common Distribution Functions	28
2.4	Markov Stochastic Process	35
3	Risk Assessment Models	37
3.1	System Components Outage Models	37
3.2	System Evaluation Models	50
3.3	Load Assessment Models	57
4	Risk Assessment Methods	66
4.1	Simple System Risk Assessment Methods	66
4.2	Complex System Risk Assessment Methods	71
4.3	Power System Risk Assessment Index	78
5	Static Risk Assessment	88
5.1	Static Risk Assessment Procedure	88

5.2	Static Security Optimal Control Methods based on Sensitivity.....	90
5.3	Static Security Index Calculation	97
5.4	Case Analysis.....	99
6	Transient Steady Risk Assessment	107
6.1	Transient Steady Risk Assessment Procedure.....	107
6.2	Transient Stability Control Methods.....	109
6.3	Transient Steady Risk Index Calculation.....	116
6.4	Case Analysis.....	118
7	Cascading Outage Risk Assessment	125
7.1	Methods and Models of Cascading Outage	125
7.2	Principles of Cascading Outage Risk Assessment	128
7.3	Case Analysis.....	132
8	Risk Assessment Application in Transmission Network Planning...	139
8.1	Power Grid Planning Risk Assessment Procedure.....	139
8.2	Configuration Selection.....	141
8.3	Risk Assessment Comprehensive Analysis	148
8.4	Analysis Tools of Risk Assessment	155
9	Examples of Risk Assessment in Engineering Application.....	161
9.1	Power Grid Planning Case Comparison Application	161
9.2	Transmission Channel Construction Application.....	183
9.3	Power Grid Reinforcement Application.....	191
9.4	Transmission Project Application.....	198
	Appendix A Stability Analysis Results.....	202
	Index	213
	References	218



第一章

电力系统风险评估基础

电力系统的根本任务是尽可能经济且可靠地将电力供给用户，安全、经济、优质、可靠是对电力系统的根本要求。随着现代电力系统的不断完善，系统结构日益复杂，系统元件数量增多，且不断向远距离、大容量的方向发展，这都使得系统存在的风险日趋严重。将风险评估引入电网规划，可在电网规划过程中既考虑电力需求，又充分考虑电网中诸多不确定性因素，从而使电网规划方案更加经济、合理。因此，对电力系统风险评估的研究，不仅具有理论价值，而且具有重要的现实意义。

本章主要介绍了与风险评估相关的基本概念和两类风险评估方法，对电力系统风险评估进行了分类，阐述了计及风险评估的电网规划方法。

第一节 基 本 概 念

一、电力系统概念

电力系统是由发电、输电、变电、配电和用电等环节组成的电能生产、传输、分配和消费的系统。电力系统应向用户提供充足、可靠和优质的电能。

电力系统由发电厂、各级变电站及输电线路、配电线路、各类用电设备和辅助设备构成。其中，输配电线路和变电站构成的网络通常称为电力网（或电网）。电力系统结构如图 1-1 所示。

电力系统的主要功能是将自然界的一次能源转化成二次能源，即电能，再传输供应给各类负荷用户。

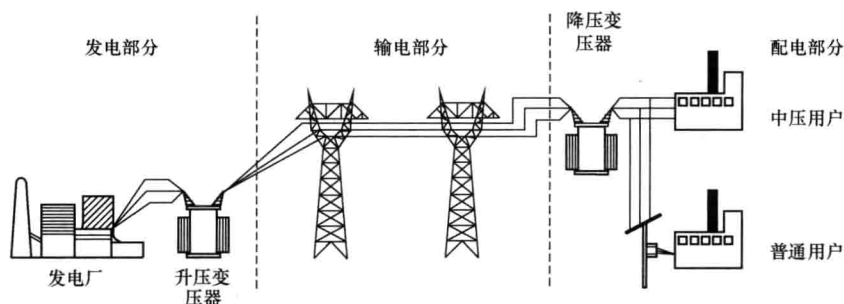


图 1-1 电力系统结构示意图

电力系统作为一个整体，是能源供应体系的重要组成部分，电力系统安全与否将直接影响一个国家的整体能源供应安全和社会经济的发展。随着现代电力工业发展，电力系统规模不断扩大，结构日益复杂，自动化程度越来越高，带来显著的经济和社会效益，但与此同时停电事故带来的经济和社会损失越来越大。

2006 年 7 月 1 日，华中（河南）电网由于线路保护装置故障引起误动，造成河南 5 市停电，并影响周边湖北、湖南、江西等各省电网，损失电力超过 6000MW。2008 年我国南方受冰雪灾害影响，造成国家电网公司直接财产损失达 104.5 亿元、中国南方电网有限责任公司直接经济损失 50 亿元。此外，国外也发生过大规模停电事故，如 2003 年美加“8·14”大停电事故，负荷损失达 61800MW，严重影响了美国和加拿大近 5000 万人的生产生活；2012 年印度“7·30”、“7·31”大停电，导致印度全国近一半地区的供电出现中断，超过 6.7 亿人受到了停电的影响。提高电力系统可靠性，降低系统风险水平，确保系统安全、经济运行受到越来越广泛的关注。

二、可靠性与风险评估

（一）可靠性与风险的关系

可靠性是元件或系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力，通常采用概率量来描述。

风险是客观存在的，国际标准化组织 ISO 31000 定义“风险”是不确定性对目标的影响。衡量风险的两个基本要素是事件的概率和产生的后果。

可靠性与风险在本质上均是概率随机性问题，是描述同一事实的两个方面，其内涵存在若干相通的部分。可靠性注重系统内在的能力，风险更加关注结果和影响，更高的风险意味着更低的可靠性，反之亦然。

（二）风险评估定义

风险评估是对风险发生的可能性及其造成影响的估计。风险评估不仅评估事故发生的概率，还计及事故产生的后果。评估过程包括风险识别、风险分析和风险评价。

三、电力系统风险评估

（一）电力系统风险评估定义

电力系统风险的根源是其行为的不确定性和随机性，系统中设备的随机故障往往超出人力控制范围，电力负荷的不确定性导致无法对其准确预测。电力系统风险评估是通过辨识系统失效事件发生的可能性，分析这些事件导致后果的严重程度。

电力系统风险评估是在风险分析的基础上，确定相应的风险评价标准，对相关因素进行量化分析，进而计算出各类风险指标，判断系统风险程度。

在 DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》中，可靠性被定义为电力系统供给所有用户符合质量标准和所需数量的电力的能力。电力系统风险评估和可靠性分析在实际应用中实质是一致的。

（二）电力系统风险评估目的

在电力系统的规划、设计和运行等阶段，坚持系统全面的风险评估是提高电力系统效能的有效方法。在风险评估中，除了对可能出现的故障进行故障分析，采取相应控制措施，以减少故障造成的影响外，还可对投资风险与相应的经济效益进行综合分析，以确定合理的可靠性水平，并使电力系统的综合效益达到最佳。具体来说，电力系统风险评估目的主要有两方面，一方面，通过在工程规划、设计和运行等阶段中采取风险管理，使系统的风险水平保持在一个可以接受的范围内；另一方面，对系统进行量化风险评估，为电力用户提供可能遭遇的停电事件平均发生的频率、持续时间以及严重程度等风险水平的有关信息。

（三）电力系统风险评估内容

充裕性和安全性是电力系统风险评估两个基本内容。充裕性是一种“长期可靠性”，即更多地从规划角度来看，在长时期内，系统容量不间断地满足负荷需求的能力，是对系统静态特性进行概率评价；安全性可称为“短期可靠性”，即系统受到突然扰动，短暂时段内在动态条件下系统容量满足负荷需求的能力，是对系统动态特性进行评价。从对电力系统运行可靠性的影响来看，充裕性不足可能引起局部停电，而安全性不足将造成停电的蔓延或整个系统的停运。

20 世纪 60 年代末至 90 年代初，国际上的研究工作一直是以充裕性为主，在 90 年代以后出现了改进的充裕性评估以及安全性评估。我国于 1983 年成立了中国电机工程学会可靠性专业委员会，推动了电力系统可靠性管理和理论研究工作。1985 年在水利电力部成立了电力可靠性管理中心，开展了发电设备、输变电设备和系统的可靠性统计工作。随着电力系统规模的不断扩大，国民经济对电力的依赖程度加深，电力系统可靠性和基于概率分析的风险评估逐渐引起各方面的重视。目前，电力系统风险评估所取得的成果主要集中在离线风险评估，而在线风险评估尚处于研究发展阶段。相比较而言，对发电系统、配电系统和电气主接线风险评估的研究比较深入，并逐步进入实用阶段。对输电系统和发输电合成系统的风险评估相对起步较晚，近年来国内外许多专家学者做了大量的努力，取得了一定进展，但是在基础数据、模型、算法等方面仍面临很多困难，需要不断探索。

第二节 风险评估分类

一、按功能层次分类

电力系统具有发电、输电（变电）、配电三个基本功能。不论过去还是现在的电力工业体制下，实际上只能对每一个功能范围分别进行风险评估，对包括发电、输电和配电在内的整个电力系统进行风险评估是不现实的。一方面，每个功能范围内系统的风险评估在计算模型和算法上存在很大的差异；另一方面，对这样的系统评估计算量过于庞大。因此，

电力系统风险评估一般分为三个层次：第一层次仅包括发电系统，第二层次包括发电和输电系统，而第三层次包括发电、输电和配电系统。由于问题的复杂性，通常不直接进行第三层次的研究，取而代之的是以配电系统作为一个单独的部分进行风险评估，利用从第二层次研究得出的节点指标作为配电系统风险分析的输入数据，进行第三层次的指标估计。变电站是发输电系统的重要环节，其电气主接线表征了变电站内部的变压器、无功补偿设备以及各电压等级线路等主要电气设备的连接关系。变电站电气主接线方案与电力系统整体及变电站本身运行的可靠性、灵活性、经济性密切相关，通常可单独进行风险评估。

（一）发电系统风险评估

发电—负荷需求系统通常称为发电系统。一个简单的发电—负荷需求系统如图 1-2 所示。由于忽略发电和负荷之间的电网部分，发电系统风险评估提供的是充裕性总体指标，而不是单个负荷点的指标，主要处理发电和负荷两个随机变量，二者均包括对各自发生概率的多级功率水平，系统分析的逻辑关系相对简单。对应于一个有发电机失效的系统状态，如果总负荷大于总发电容量，则需要削减负荷以保持功率平衡。



图 1-2 发电—负荷需求系统

发电系统评估的目的是量化分析发电机随机失效引起的风险。将系统所有可能状态对应的负荷削减及其发生的概率进行组合，建立起发电系统风险指标。

（二）发输电系统风险评估

发输电系统中的发电机和负荷位于不同地点，通过电网连接。一个简单的发输电系统如图 1-3 所示。

发输电系统风险评估的系统分析主要涉及潮流计算、故障分析以及诸如消除元件过载、发电机出力调整、负荷削减和切换操作等校正措施。系统状态选择中许多问题的考虑也导致了评估中更大的复杂性。这些问题包括：系统元件的独立停运，同一原因引起多个元件的同时停运，气候影响，母线负荷的不确定性和相关性，大容量机组降额运行状态模拟以及系统的