

电力系统运行可靠性 评估方法及其支持系统

贾燕冰/著
严正/主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力系统运行可靠性 评估方法及其支持系统

贾燕冰/著
严正/主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分为6章,主要内容包括考虑自然环境的线路可靠性评估模型、发电系统运行可靠性评估、发输电系统运行可靠性评估、备用容量对电力市场稳定性的影响、大电网运行可靠性评估信息系统等。本书着重阐述了电力系统运行可靠性评估中元件状态模型确定方法、故障集快速筛选方法、运行可靠性评估与传统可靠性评估方法和评估指标的区别与联系,并给出了大电网运行可靠性评估信息系统部分源代码,以供读者参考。

本书可以作为电力系统可靠性评估研究领域人员的参考用书,也可以作为研究生和本科生相关课程的拓展阅读教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统运行可靠性评估方法及其支持系统/贾燕冰著.
—北京:中国电力出版社,2016.5
ISBN 978-7-5123-8752-2

I. ①电… II. ①贾… III. ①电力系统运行-可靠性-评估方法 IV. ①TM732

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第004668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>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年5月第一版 2016年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 8印张 172千字

定价 28.00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

当前,随着全球经济的持续增长,大电网向着远距离、超高压,甚至特高压的方向发展,网络规模更趋庞大,结构更趋复杂。电力系统在取得巨大联网效益的同时,也不得不承受更大的潜在风险。加上电力市场化改革的推进,管理机构的更迭和新成员参与市场,人们所难以控制的不确定因素及其对电网的影响更为深广,使得电力系统的规划、运行、维修和资产管理工作的挑战日益加剧。停电事故引起的后果也越来越严重,大面积电网崩溃造成了严重的社会损失和经济损失,给人们的生产和生活造成了极大的影响。许多大停电事故的诱因是电力系统运行的不确定性,例如发电机、线路等电力系统元件的随机故障、负荷的随机变化、电力市场的随机波动等。为了在电源发生强迫停运和失效事件,以及预防性计划检修而退出运行期间均能保证用户满意的持续供电,发电和电网设备应当具有备用或冗余容量,而冗余的程度又必须同时满足经济性的约束条件,因此面临着冗余度大小与资金投入量和可用资源之间的权衡关系。自电力系统出现及其随后发展的数十年中,研究者始终不断地在为解决这一根本问题进行着设计、规划和运行准则及相关技术的研究。

在电力网络日益复杂的情况下,研究电力系统运行可靠性评估方法,研究快速的故障筛选方案和电力系统可靠性评估方案,向系统的生产、运行及调度部门提供建议,向管理决策层提供电网的跟踪信息,向市场运营商提供市场的稳定信息,对于提高现代电力系统的抗风险能力,促进国家电网建设和市场化改革的健康发展有重要意义。

本书由太原理工大学电气与动力工程学院贾燕冰副教授著。本书是作者基于近十年的研究工作,参阅了大量的论著论文,精心撰写而成,研究了考虑自然环境影响的线路可靠性评估模型、发电系统运行可靠性评估的改进快速排序算法、计及区域备用共享的互联电力系统运行可靠性评估模型、发输电系统运行可靠性评估模型,探讨了备用容量对电力市场稳定性的影响,并在上述研究的基础上,开发完成了电力系统运行可靠性评估系统。本书可作为电力系统可靠性研究方面的参考书。

在本书的撰写过程中,得到了上海交通大学电子信息与电气工程学院的严正教授、太原理工大学电气与动力工程学院宋建成教授、新加坡南洋理工大学王鹏教授的悉心指导和“电力系统运行与控制”山西省重点实验室及太原理工大学电气与动

力工程学院韩肖清教授等老师的大力支持。本书撰写过程中还参阅了国内外著名电力系统可靠性专家们的研究成果和著作，在此一并表示感谢。

本书的编写得到了山西省煤基重点科技攻关项目（MD2014-06）和博士点基金新教师类课题基金（20121402120007）的支持。

借此机会，向上述关心、支持、帮助本书完成的各位表示最衷心的感谢和感谢。

谨以此书献给我的家人，我今天所获得的一切都来自于他们一直以来无私的关怀、帮助、鼓励和教诲。

限于作者阅历和水平，不足和不妥之处在所难免，恳请广大读者和同仁批评指正。

作者

2016年1月

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.3 研究意义	8
第 2 章 考虑自然环境的线路可靠性评估模型	10
2.1 线路可靠性模型	10
2.2 污区等级的影响	14
2.3 雷电密度的影响	18
2.4 灰色关联度分析法	20
2.5 预测模型	23
2.6 算例分析	27
2.7 小结	29
第 3 章 发电系统运行可靠性评估	30
3.1 系统模型	31
3.2 状态选择	34
3.3 状态分析	40
3.4 评估指标	43
3.5 共享备用成本分摊	47
3.6 评估流程	48
3.7 算例分析	50
3.8 小结	59
第 4 章 发输电系统运行可靠性评估	60
4.1 系统模型	60
4.2 状态选择 (重要抽样法)	61
4.3 状态分析	64
4.4 评估指标	68
4.5 评估流程	70
4.6 算例分析	71
4.7 小结	73

第 5 章 备用容量对电力市场稳定性的影响	75
5.1 小扰动稳定分析模型	75
5.2 大扰动稳定性分析	88
5.3 算例分析	89
5.4 小结	92
第 6 章 大电网运行可靠性评估信息系统	94
6.1 系统设计	94
6.2 系统逻辑功能	96
6.3 网络环境	115
6.4 软件操作界面	116
6.5 小结	120
参考文献	121

概 述

1.1 研究背景

随着电力系统向超高压、远距离、大容量和区域联网的方向发展,大量新技术、新设备的应用以及电力市场机制的逐步确立,停电事故引起的后果也越来越严重。2003年震惊世界的美国“8·14”大停电造成了逾300亿美元的经济损失,近5000万人的生活受到不同程度的影响,航空、通信、供水、交通甚至社会治安等诸多方面出现了混乱甚至瘫痪。2006年“11·8欧洲大停电”事故,由于从Conneforde到Diele的380kV双回线开断,引起线路潮流越限,随之出现了大量的切机切负荷并导致欧洲输电协调联盟电网解列,波及人口超过100万。随着负荷的增大和运行条件日趋复杂,我国电网大停电事故也时有发生,宁夏1995年9月9日发生的大面积停电事故,造成负荷损失420MW;1997年2月27日的西北电网故障,造成西安东部、咸阳、渭南地区大量切负荷,商洛地区全部停电;2005年9月26日,气象灾害——台风“达维”导致的海南电网停电事故,电厂连续跳机解列,直到全网崩溃,造成严重后果。2008年初,我国南方遭遇了百年不遇的罕见冰雪灾害,大面积电网崩溃造成了严重的社会损失和经济损失,给人们的生产和生活造成了极大的影响。

许多大停电事故的诱因是电力系统运行的不确定性。例如发电机、线路等电力系统元件的随机故障、负荷的随机变化、电力市场的随机波动等。为了在电源发生强迫停运和失效事件,以及预防性计划检修而退出运行期间均能保证用户满意的持续供电,发电和电网设备应当具有备用或冗余容量,而冗余的程度又必须同时满足经济性的约束条件,因此面临着冗余度大小与资金投入量和可用资源之间的权衡关系。自电力系统出现及其随后发展的数十年里,研究者始终不断地在为解决这一根本问题进行着设计、规划和运行准则及相关技术的研究。

随着国外对私有公司解除管制和政府企业的私有化,以及我国国有企业引进市场化竞争机制,电力系统已将各主要功能部分分开管理,并允许过网交易。这样不仅增加了用电方和发电方的参与,而且也增加了电能交易方的参与。于是随着整个电力系统各个层面上交易的开展,形成了一种“市场激励”的概念,同时形成了“用户”而非“用电”的概念(因为有些用户不一定用电,而是进行电能这一商品的专卖)。这一变化促进了地区发电和新能源发电形式的发展。显然,这些变化将对电力系统可能的发展方式、运行方式、维修策略和资产管理,以及将来的可靠性水平和标准等带来重大影响。

当前,随着全球经济的持续增长,大电网向着远距离、超高压,甚至特高压方向发

展,网络规模更趋庞大,结构更趋复杂。电力系统在取得巨大联网效益的同时,也不得不承受着更大的潜在风险。加上前述电力市场化改革的推进,管理机构的更迭和新成员参与市场,人们所难以控制的不确定因素及其对电网的影响更为深广,使得电力系统的规划、运行、维修和资产管理工作面临的挑战日益加剧。

研究电力系统运行可靠性评估方法及其对电力市场稳定性的影响,向系统的生产、运行及调度部门提供建议,向管理决策层提供电网的跟踪信息,向市场运营商提供市场的稳定信息,对于提高现代电力系统的抗风险能力,促进国家电网建设和市场化改革的健康发展有重要意义。

1.2 研究现状

1.2.1 备用与可靠性的关系

电力系统可靠性是指在电网的各种运行条件下,向用户持续提供符合一定质量要求的电能的能力。电力系统可靠性包括充裕度和安全性两个方面。充裕度是指在考虑电力元件计划与非计划停运以及负荷波动的静态条件下,电力系统维持连续供应电能的能力,因此又被称为静态可靠性。安全性是指电力系统能够承受如突然短路或未预料的失去元件等事件引起的扰动并不间断供应电能的能力,安全性又称为动态可靠性。严格地说,安全性是对系统过去时段的描述,可靠性则用于规划和预测系统未来运行时段的安全。

在电力系统运行中,必须预测期望负荷(短期负荷预测),并且必须相应地安排出足够的发电容量。考虑到负荷预测的不确定性和发电设备的可能停运,还必须安排一定的备用容量。同步旋转并准备带负荷的备用容量通常称为旋转备用。实际的旋转备用中再计入以下的一个或几个因素:诸如燃气轮机或水电机组等快速起动机组、可停电的负荷、取自互联系统的支援以及电压和(或)频率的降低等,总称为运行备用。

工程上最初使用的都是基于确定性的准则和方法,也称为备用裕度准则,典型的有:①装机备用法:数值上等于预计的最大负荷功率加上一个固定百分数;②运行备用容量:数值上等于负荷需求加上一固定百分数或一台最大机组容量作为备用;③输电网络的 $N-1$ 规则:在所选定的1回输电元件故障跳闸后应能保持负荷的连续供电,在可靠性要求较高的场合,可采用 $N-2$ 规则甚至 $N-K$ 规则。确定性方法主要是对几种确定的运行方式和故障状态进行分析,不能反映当前机组的数量、性能、功率变化、输电网约束以及负荷的不确定性等因素的影响,同时也没有明确的指标衡量备用水平。实际上电力系统的备用容量与可靠性备用容量紧密相关,可通过电力系统可靠性评估来分析备用容量对系统可靠性的影响。

1.2.2 可靠性评估

电力系统可靠性评估方法可以分为确定性方法和概率性方法两类。确定性准则的局限主要在于没有考虑系统的随机行为,忽略了各种参数的不确定性和事件的概率属性,

常常不能反映系统的真实风险度。随着对电力系统可靠性要求的提高,利用确定性准则来确定电力系统备用容量显得过于粗糙,越来越多的电网公司采用可靠性概率分析法确定系统的备用容量。其优点在于获得的可靠性指标比确定性指标对事故风险的估计更为准确。但是,由于确定性方法简单易行而且长期使用,而概率性方法需要较复杂的分析方法和高新技术的支撑,尤其是运行领域目前尚难实现工业应用,因此两种准则应当互补,并进一步探讨二者结合的可行方法。

研究者在广泛应用和发展马尔可夫(Markov)模型法、故障树分析法等方法的同时,积极研究适用于超大规模电网的可靠性评估方法。目前主要采用的两种大规模电力系统可靠性评估方法是状态枚举法和蒙特卡洛模拟法,解析法和模拟法结合的混合法也被很多学者关注。解析法在北美和英国比较流行,蒙特卡洛法在欧洲应用较多。在备用容量可靠性评估过程中,二者的区别在于选择系统状态和最后计算概率指标。通常,如果元件的失效概率很小,或不考虑复杂的运行工况,则状态枚举法效果较好;如果严重事件的数量相对较大,或计及复杂运行工况时,蒙特卡洛模拟法将更为方便。解析法的主要优点是物理概念明确且计算精度较高,但其计算量随系统规模增大而增大,且不能反映系统中一些实际情况。蒙特卡洛法相对而言比较直观,而且能够发现一些难以预料的情况,计算结果可更为丰富,其主要不足在于模拟时间和模拟精度之间存在矛盾。为加快蒙特卡洛抽样法的收敛速度,Kahn在1954年提出了统计估计抽样方法、重要性抽样方法、相关抽样方法、分裂和轮盘赌抽样方法、系统抽样方法、分层抽样方法六种抽样方法;1956年,Hammersley和Morton又提出了对偶变数法。电力系统规模日趋扩大,元件总数、控制策略日趋复杂,因此蒙特卡洛抽样法在可靠性评估中获得了日益广泛的使用。

潮流计算是充裕度评估的基础。在进行系统潮流计算时,直流潮流法因为计算速度上的优势而仍在一些场合被采用,但为了在充裕度评估中可计及系统静态安全约束和电压稳定问题,交流潮流法已逐步取代了直流潮流法,为了解决潮流计算方法受计算规模、潮流计算模型和实际工程应用的限制的问题,将电力系统分析程序BPA嵌入可靠性分析中。为了降低大电网可靠性评估的复杂性,研究者先后提出了许多近似简化方法,如减少解析法所要计算的状态数或蒙特卡洛法的方差、采用充裕度等效法以减小计算规模、用敏感度指标筛选对可靠性影响较大的元件、基于神经网络的各类方法等,简化方法虽然减少了计算时间,但却会带来计算误差,或者在系统规模较大时计算时间仍然太长。近年来,并行计算机系统上的集群系统由于特有的优势受到越来越广泛的重视,因此并行和分布式算法得到了广泛的应用。

可靠性评估中切负荷计算是获得充裕度指标的关键,直接影响到充裕度评估的计算速度和指标精度。在超大规模实际系统充裕度评估中,可采用基于潮流灵敏度分析的负荷控制策略,在只考虑发电机出力约束的条件下,效果与基于直流潮流的优化方法进行的切负荷方案相同,但速度较快,提高了充裕度评估的指标精度和计算速度。而在超大规模系统中,矩阵求逆变比较困难,可采用基于区域潮流灵敏度分析的切负荷控制策略。

电力市场的不断发展引入了更多不确定性因素，对可靠性评估提出了新的要求，增加了其分析难度。市场环境下可靠性评估首先要解决的问题就是可靠性费用的计算，国内外专家提出了许多方法，如用户停电损失函数法（Combined Customer Damage Function, CCDF）、损失负荷价值法（Value of Lost Load, VOLL）、缺电损失评价率法（Interrupted Energy Assessment Rate, IEAR）、产电比法、电价折算倍数法等。市场发展要求实现可靠性与经济性的最优化，基于“可靠性边际成本”与“可靠性边际效益”的概念，分析市场环境下电网规划的可靠性成本与效益问题，以用户缺电成本的大小衡量可靠性效益高低，将规划的可靠性成本与可靠性效益统一在对电网的经济性评估上。电力市场条件下，传统可靠性指标已经不足以满足新的要求，一些指标和概念，如EUP (t)（Expected Un-served Power）、社会效益损失期望（Loss of Social Benefit Expectation, LOSBE）、可靠性经济当量，先后被提出以解决不同的问题。在市场环境下研究可靠性时，应摆脱对可靠性进行收费的思想，而是将其看作一种稀缺资源，探索利用市场机制来保证系统运行可靠性的途径，这种思路的转变很有启发意义。此外，新的电力市场体制也带来诸如计算机网络的可靠性、人员的行为可靠性、用户电力技术及需求侧管理等许多值得研究的可靠性问题，如电力市场环境下电力系统可靠性分析的框架，从市场角度重新审视传统可靠性分析的特点，尝试将电力市场与电力系统可靠性分析两个课题融合在一起进行探索性研究，这对做好市场环境下可靠性分析与评估工作具有重要的参考价值。

1.2.3 运行可靠性评估

运行可靠性是指电力系统在实时运行状态和外界工作环境下，能够持续满足系统运行约束和电力负荷需求的能力。对运行系统进行可靠性评估就可以在可接受的风险度下建立和实施各种运行方式，确定运行备用容量，安排计划检修，确定购入和售出电量，确定互联系统的输送电力和电能量。

随着电力系统的发展，实时运行条件对系统运行的可靠性影响也越来越大，传统的可靠性评估方法针对规划或较长时间的可靠性进行评估，系统模型采用系统的典型运行方式，而元件模型采用元件的长期运行统计值，其评估结果已经无法满足运行可靠性评估的要求，运行可靠性的研究已经引起了国内外研究学者的重视。

随着计算机技术和通信技术的飞速发展，能量管理系统（Energy Management System, EMS）、广域测量系统（WAMS）为电力系统在线运行评估提供了重要的技术和数据支持。1999年，美国电力可靠性技术方案研究合作组织（CERTS）开展了输电网可靠性项目的研究，重点研究实时电网可靠性管理。2000年，美国电力科学研究院（EPRI）发起了电力传输可靠性（Power Delivery Reliability Initiative）项目，主要成果为概率可靠性（PRA）评估方法。我国在2004年由电力科学研究院（CEPRI）发起，由多家科研单位和高校参与的“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”项目，提出了电力系统运行可靠性评估理论和运行风险评估理论，借助WAMS/EMS等实时量测技术和不确定性评估的方法，对大电网进行实时可靠性评估和调度决策。当前

电力系统运行评估技术的发展出现了如下显著的趋势：

(1) 从离线分析到在线分析。过去许多调度运行的计算分析都是离线计算，随着计算机技术的发展，静态安全评估和动态安全评估都基本实现了在线的实时计算。过去传统可靠性评估主要应用于离线的规划计算，近年来又出现了基于并行计算的在线可靠性评估。基于风险的安全评估也逐步实现了在线应用。

(2) 从确定性分析到概率性分析。电力系统规划和运行中， $N-1$ 可靠性准则在电力工业界被广泛接受。随着人们对故障发生和负荷变化等不确定性因素带来的影响的逐步认识，概率方法被逐步引入到安全评估领域，并提出了风险评估、脆弱性评估和运行可靠性评估等建立在不确定性分析基础上的运行评估方法，而健康性分析 (Well-being Analysis) 则是一种考虑了确定性准则的概率评估方法。

运行可靠性评估与传统的安全评估相比，其最大的特点在于应用了不确定思想，综合考虑了故障发生的可能性以及严重性，能够避免基于确定性评估的片面性。运行可靠性评估与传统可靠性评估的主要不同可从目的、应用场景、研究时间段、元件可靠性模型、故障后果分析、指标等方面进行比较，如表 1-1 所示。

表 1-1 运行可靠性评估与传统可靠性评估的比较

比较项目	传统可靠性评估	运行可靠性评估
目的	为系统规划人员提供决策依据，以帮助他们决定如何加强电网建设	为运行调度人员提供决策依据，以帮助他们决定如何改变系统的运行方式
应用场景	主要应用于离线评估	主要应用于在线评估
研究时间段	研究长期运行条件下的可靠性水平，时间区间往往是数年甚至数十年，一般作为可修复系统研究	研究短期内的可靠性水平，时间区间是数分钟，可以看作是不可修复系统
元件可靠性模型	元件故障率是长期统计的平均值，元件故障概率是平稳状态概率	元件故障率会随运行条件的变化而变化，元件故障概率是瞬时状态概率
故障后果分析	模拟调度员操作	模拟调度员操作
指标	主要以切负荷指标来度量系统可靠性水平，包括切负荷的概率、期望时间、期望概率及期望数量等	以各种层次的指标，全面度量系统短期内的可靠性水平

1.2.4 多区域互联电网可靠性评估

大型多区域互联电力系统的形成是经济发展的必然结果，当各区域通过联络线互联时，由于负荷的错峰效益和备用共享等原因，可以显著提高系统的可靠性和资源优化配置程度。准确评估区域互联为电力系统可靠性带来的影响，对于改善系统运行的经济性和可靠性具有非常重要的意义。

从电力系统的发展历程来看，自 20 世纪 80 年代始，北美、欧洲已形成多区域互联的大型电力系统，我国也逐渐建立起由各省级电网连接而成的各大区电网。电力系统的规模在这一时期出现了快速的增长。此时，若将电力系统视为一个整体进行可靠性评

估，在当时的计算条件下需要耗费大量的计算时间。这一问题促使当时的研究者关注多区域互联系统中各个区域的可靠性评估问题，希望可以得到更快速、更有针对性的可靠性评估方法。这一类的研究取得了大量成果。

将整个大系统分为所要研究的区域 (Area of Interest, AI) 和与之互联的区域 (Interconnected Area, IA) 两个部分，将多区域互联系统变成两区域互联系统，在理论上可以应用于任何结构的互联电力系统的可靠性计算。然而，这种方法也有一些缺陷：①当系统的拓扑结构、负荷类型、事故紧急程度等因素发生变化时，需重新计算 AI 和 IA 各自的停运容量概率表，方法的灵活性较低；②这种方法并没有提到当各个系统的负荷具有相关性时如何计算各自的停运概率；③该方法的效率对 AI 和 IA 的相对大小十分敏感，当 AI 与 IA 相比非常小时，计算效率很高，反之，若 AI 的规模和 IA 相当，则计算效率很低。

“双风险评价指标”概念，分别为孤立系统风险 (Single System Risk, SSR) 和互联系统风险 (Interconnected System Risk, ISR)。其中 SSR 是指不考虑区域间电力支援的情况下，即各个区域孤立运行时，每个区域的风险指标；ISR 是指考虑区域间的电力支援之后，各个区域的风险指标。将双风险评价指标应用于不同的输电、受电合同约定，以及不同的联络线约束下的两区域互联电力系统的旋转备用充裕度评估，并推广到多区域互联电力系统的旋转备用充裕度评估。互联系统风险评价综合指标即互联系统运行状态综合风险度 (Composite System Operating States Risk, CSOSR)，利用概率方法进行旋转备用的分配。

基于系统状态分解和网流法计算互联电力系统各区域的 LOLP 值的解析方法，可以准确计算出任何结构的互联电力系统的可靠性指标，但是计算时间和数据存储量都很大。采用改进分解模拟法，以区域峰值负荷为负荷初始状态，可以得到更加稳定的结果。扩展分解模拟法通过建立多区域负荷状态空间，首先计算各个负荷状态下的可靠性指标，然后将其合并起来，得到了更加准确的 LOLP 值，还计算了电量不足的频率指标 LOLF。改进扩展分解模拟法通过设定参考负荷状态，得到改进的发电模型，使得针对多种负荷状态的可靠性指标计算可以同时进行，计算时间明显减少。还有尝试使用计算直流潮流的方法来判断分解得到的每种状态应该归属的集合，可以得到更加准确的结果。同步分解模拟方法可推广应用于任意系统结构的网络，该类方法对于系统状态选择这一环节并没有进行有效的改进，而这一环节是使用解析法评估大型互联电力系统可靠性的主要时间瓶颈。因此，这种方法的主要意义在于提供了一种使用解析法评估多区域互联电力系统可靠性的系统的思路，并提供了进一步改进的可能。

还有研究者从另一个角度考虑互联电力系统的可靠性评估问题：计算电力系统之间的互联支援电量 (Interconnection Assistance, IA)。定义 IA 为在输电线传输容量的范围内，并且保持系统的可靠性水平，系统之间可以传输的功率。研究者提出一种概率的方法，用来评估在不影响其可靠性水平的条件下，任一选定区域可以提供的 IA。系统通过互联的获益不仅体现在容量不足的情况下，同时也体现在正常运行的情况下。这种获益可通过为保持相同的可靠性水平，系统的备用容量的减少量来体现。

采用 Gram-Charlier 分布的概念, 计算系统中各条支路的潮流概率分布, 并且得到各节点或某指定区域的注入功率的概率分布。若已知系统的负荷状态, 便可以直接计算得到系统的 LOLP 或其他可靠性指标。采取伽佛尔公式中关于系统风险和备用容量的近似指数函数关系, 推广到多区域系统, 提出基于区域可靠性的发电可靠性指数解析模型。建立了考虑备用容量、联络线传输容量以及备用容量价格因素的三种数学模型。该方法利用元件的历史运行数据得到近似的概率分布表达式, 并没有考虑不同系统的运行特点和动态特性。因此, 计算结果与真实数据总是存在着误差, 并且当系统规模越大时, 误差就越明显。所以这种方法通常只能对小型测试系统进行理论分析, 提供一些有参考价值的结论, 并不能用于大型实际互联系统的可靠性评估。

采用多区域互联电力系统的贝叶斯网络模型, 可以准确描述系统的发电量、负荷状态、联络线约束、网络拓扑结构等信息, 进而可以快速计算出系统的可靠性指标, 如 LOLP 等。

进入了 20 世纪 90 年代, 由于计算机处理能力的飞速发展, 可以在极短的时间内进行大量的计算。在这种背景下, 很多电力研究人员提出了一些将互联电力系统视为一个发输电组合系统整体进行研究的方法。相应地, 在这一时期, 针对多区域互联型电力系统特点的可靠性评估的研究工作明显减少。然而, 在电力系统实际运行中, 常常需要了解互联系统中各个区域的可靠性水平和运行状况。特别是近年来电力市场的引入, 为了满足系统运行的经济性和可靠性要求, 各运营商和调度机构希望了解在考虑区域间互联的情况下, 自身运营区域的备用容量确定和区域电价等问题。这些崭新的问题使得区域系统可靠性研究的必要性重新得到了重视。

1.2.5 电力市场下的可靠性评估

目前对电力市场的研究大多集中在竞价上网、辅助服务、输电定价等问题上, 而很少研究其稳定性。市场具有潜在的不稳定性这个问题已经为人们所认识, 19 世纪 30 年代起在经济学中就提出了蛛网理论进行市场稳定性的静态分析, 进而采用微分方程理论对市场的稳定性进行动态分析。Alvarado 首次提出电力市场稳定性的问题, 利用微分方程理论建立了一种电力市场动态模型, 而后与 Meng、Mota 等人合作, 在动态市场模型中考虑了电能不平衡因素以及电力系统本身的动态因素的影响, 得到新的市场动态模型。

目前对于电力市场的稳定性还没有明确的定义, 根据上述文献的研究内容, 可以将电力市场的稳定性按照时间长短分为两类: 第一类为短期电力市场稳定性, 不考虑系统扩建, 在现有系统条件下, 模拟市场参与者策略及电力系统运行状态对市场稳定性的影响。该方法用电价描述市场的稳定性, 若出现电价快速飙升或较长期维持在“价格帽”附近, 则认为市场不稳定。第二类为长期电力市场稳定性, 考虑现有电价机制是否可以正确引导市场投资, 以价格为导向指导系统扩建。该方法用较长时间(通常为几年)内电价的变化, 以及发输电设备的扩建趋势来描述市场的稳定性。若系统扩建与需求变化趋势相一致, 且电价不会长时间维持在“价格帽”附近, 则认为市场是稳定的。由于我

国电力市场尚处于发展阶段，发电和输电设备的扩建仍然集中规划，而且市场规则对长期投资激励的效果较难以模型的方式简单描述，因此，现在国内的研究仍主要集中于短期的电力市场稳定性研究。

1.2.6 评估软件

国内外已开发出多种发输电可靠性评估软件，虽然各类软件在建模、算法、指标等方面都各有所长，但总的来说，北美国家多采用故障枚举法，并采用了故障重数限制、截断概率、故障分类等技术以减少计算量；欧洲和南美洲国家多采用蒙特卡洛法，采用重要抽样法、分层抽样法、控制变量法等技术减少计算量。基于故障枚举法开发的较有影响力的程序主要有 EPRI 开发的 SYREL、PTI 开发的 TPLAN、Billiton 等人开发的 COMREL 等，基于蒙特卡洛法开发的较有影响力的程序有 EPRI 开发的 CREAM 等。上述软件的早期版本都面对许多共同的问题：如何对停电损失进行经济性评估、如何模拟直流系统、如何提高计算速度以满足在线可靠性评估的要求、如何将充裕度与安全性统一到一个框架内等。我国的许多学者在上述领域做了大量的探索工作，对于推动可靠性理论的实用化做出了很大贡献。由于所采用模型、方法等多方面的差异，不同软件对同一系统的评估结果可能存在差距，在应用于大规模实际电网时更是如此。

1.3 研究意义

为保证电力系统运行的经济性和可靠性，调度机构根据负荷预测值、系统安全约束和调度目标，确定发电机组组合，预先安排第二日的机组出力，预留备用容量过大，不仅导致某一运行点经济性变差，甚至可能会导致不同的机组组合，从而导致全天的运行经济性变差；若备用不足，则由于机组启停时间和爬坡率约束，实时运行时将无法弥补这部分功率缺额。因此，编排发电计划时保证发电子系统满足适当的充裕度是保证电力系统实时运行经济性和可靠性的必要前提。运行经验表明，在实时运行阶段备用容量的可靠性除了受到发电系统充裕度的影响外，很大程度上还受到备用在各机组上的分配方案、输电线路故障及输电线路传输容量约束、节点电压约束等的制约，对实时电力系统运行可靠性评估必须考虑发输电组合系统的可靠性。而随着全国联网的推进，我国将建成世界上最大的互联电网，互联电网有相对独立又相互支援的运行特点，除互联后整个电力系统的可靠性之外，调度人员还希望获得更多各子区域的可靠性信息，以及子区域之间备用支援的情况，从而发现实际运行时全网运行的薄弱环节，并定量确定各子区域对全网可靠性所做出的贡献，而传统的可靠性评估方法及评估指标不能够解决该问题。现有的运行可靠性评估方案大多针对整个电力系统进行可靠性评估，而忽略了各子区域可靠性与全网可靠性之间的关系；而多区域互联电网可靠性评估方法，虽然考虑了区域可靠性评估，但由于模型只适用于小系统或计算量偏大而无法应用于大规模多区域互联电网在线运行可靠性评估。为了解决上述问题，本书研究了发电计划运行备用可靠性评估模型、实时运行备用可靠性评估模型，并根据调度人员的实际需求，提出了针对互联

电网的运行可靠性评估指标体系，以定量地评估各子区域及全系统的可靠性。根据备用可靠性评估结果，研究了各区域共享备用的计算方法，并给出共享备用成本分摊方法，以期解决在电力市场环境区域共享备用成本分配问题。

随着电力工业市场化，备用容量市场逐步开展，各子区域按照调度规程确定并购买所需的备用容量，但现有调度规程及市场规则中均未规定如何确定共享备用（区域之间支援的备用）。因此，导致共享备用的容量成本由支援区域单独承担，被支援区域只有在运行中调用共享备用容量，才支付使用成本，而没有考虑其所应承担的共享备用容量成本部分。如何确定系统的共享备用量，并实现其在各子区域之间合理的分摊的问题，还没有得到解决。

随着备用容量市场与实时市场或辅助服务市场相结合，实时或不平衡市场中的交易电量，实际就是系统的最大可用备用容量。备用容量的确定和分配策略不仅影响着电力系统的可靠性，而且会对电力市场的稳定性产生影响。随着电力市场的发展，备用容量的大小不仅涉及电力系统的稳定性，还会影响到电力市场的稳定性。国外电力市场运行经验表明，当系统发电装机容量不足时，会引起电价飙升，甚至引起整个电力市场崩溃。而随着实时市场的开展，实时运行阶段的电力市场也会遇到同样的问题，为了探讨备用容量对电力市场稳定性的具体影响，本书根据电力市场运行特点，建立了电力市场小扰动稳定分析模型和大扰动稳定分析模型，并分析了备用容量的大小对电力市场在平衡点附近的小扰动稳定性，及电力市场受到大扰动（如机组故障等）后的稳定性的影响。

只有建立一个完整的可靠性评估信息系统，才能充分发挥可靠性评估的作用。电力系统运行可靠性评估涉及实时运行数据的获取、日前调度计划的获取、实际调度策略、元件历史运行记录、系统元件参数等信息，由于电网信息化是逐步完成的，这些原始数据分布在能量管理系统（Energy Management System, EMS）、日计划系统、调度日志等子系统中，并没有整合在一起。为进一步深入分析备用对运行可靠性及市场稳定性的影响，识别网络瓶颈，需要及时从 EMS、管理信息系统（Management Information System, MIS）和数据采集与监视控制系统（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）等自动采集与可靠性有关的信息，利用网络拓扑、元件电气参数、市场参与者信息等，对电网和电力市场的运行状态进行分析，研究开发符合在线运行要求的新的理论与技术、基于概率分析的大电网在线运行可靠性评估信息系统，实现对电网运行的准确统计评价，已成为保障电网安全和经济运行的重要手段。本书提出建立一个数据整合平台，并在此平台之上搭建基于运行可靠性评估理论的可靠性评估信息系统，实时更新电网的运行可靠性信息，向系统的生产、运行及调度部门提供建议，向管理决策层提供电网的跟踪信息，对保障电力系统安全、稳定、可靠、经济运行有重大意义，目前该软件已成功应用于我国某大区电网公司日常运行可靠性评估中。

考虑自然环境的线路可靠性评估模型

灵敏度分析研究表明,电力系统元件可靠性数据对系统可靠性评估的结果有重要影响。可靠性评估结果实际价值的大小,很大程度上取决于基础数据的可信程度。传统可靠性评估时,元件的可靠性参数都已事先给定,但在实际工程项目可靠性评估中,如何获取准确的元件可靠性参数往往是很关键、同时也是很困难的,现场统计数据是实际工程中可靠性数据的一个重要来源。

对我国而言,实际系统运行时,不同地区其气候特点不同,必须针对不同地区的统计数据,考虑其自然环境对线路可靠性的影响。以华东地区为例,如雷击跳闸,主要发生在每年 7、8 月的多雷季节,而污闪事故主要发生在 12 月和 1 月。若将该因素简单地归至恶劣天气的影响,全年采用统一的恶劣天气影响因子则过于粗糙;且不同的线路由于其地理位置不同,受周围自然环境的影响,其可靠性差别较大,若采用现有的只按照电压等级进行线路可靠性分类,将降低元件可靠性模型的可信程度,进而降低实时运行可靠性评估的可信度。运行实践表明,自然环境对线路的影响主要体现为污闪和雷击跳闸,线路所处自然环境下污秽等级及雷电密度对线路的可靠性有很大的影响,且该影响值随着全年天气的变化而不同,而发电机组由于基本在厂房内运行,受到自然环境的影响较小。本章重点考虑工程实际中易获取的运行时间、污秽等级和落雷密度三组参数对输电线路可靠性的影响,基于灰色预测和支持向量机回归算法,提出了两种实用的电力系统元件可靠性预测模型。华东电网 500kV 输电线路预测结果与实际历史运行数据对比表明,本书提出的算法可以较为精确地预测输电线路的可靠性,且所需分析数据在实际工程中较易获得,在工程上具有较广阔的应用前景。

2.1 线路可靠性模型

2.1.1 可靠性定义

元件的损坏度 $F(t)$,可以解释为元件的损坏程度,它应满足初始条件和终值条件。在元件开始运行时,元件是完好的,故有

$$F(t) = 0, t = 0$$

在元件工作到无穷大时间之后,元件必然全部损坏,故有

$$F(t) = 1, t = \infty$$

从 $t = 0$ 到 $t = \infty$ 的过程中,设元件的损坏度按指数规律变化,即