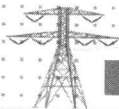


# 电力可靠性技术与 管理 培训教材

国家电力监管委员会电力可靠性管理中心 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)



# 前 言

电力工业是国民经济重要的基础产业，是社会发展的公用事业，由于产品自身的特点又是一个网络行业，因而保证电力工业的安全发展、安全生产和可靠供应显得尤为重要。改革开放特别是近几年来，我国电力工业取得了长足的发展，但是，随着我国电力工业步入大电网、大机组、大容量、超高压、交直流混合、远距离输电的发展阶段，电力系统的复杂性明显增加，电网的安全稳定问题日显突出，电力可靠性管理作为提升电力企业管理水平和设备健康水平的一种科学的管理方法，对电力系统的安全运行和连续可靠的供电所发挥的重要作用也将日益显著。

20多年来，在电力行业各级领导和有关部门的关心支持下，在全体可靠性管理工作者的共同努力下，我国电力可靠性管理以促进电力发展为宗旨，为促进电力行业发供电设备运行水平和生产管理水平的提高，为促进机电设备制造、基本建设和安装水平的提高以及可靠性技术和理论水平的提高开展了卓有成效的工作，为促进我国电力工业的健康、快速发展和人民生活水平的提高做出了巨大贡献。

随着我国电力体制改革的逐步深入，新的电力形势对我国的电力可靠性管理工作提出了很多新要求，加上每年基层可靠性专责岗位都有数百人的流动，为了保证新上岗人员能够顺利开展工作，全面提高电力企业可靠性专业人员的业务素质和工作能力，更好地发挥电力生产中可靠性管理的作用，我们组织编写了《电力可靠性技术与管理培训教材》。在进行的可靠性业务技术培训中，各级电力企业也都迫切要求编写一本适应目前我国电力形势的教材，以指导电力可靠性管理工作的实践。本教材根据上述要求，对多年来可靠性管理工作的经验进行了认真总结，对电力可靠性管理的基础理论、工作内容、工作方法等都作了比较详尽的论述。本书着重于实用性，同时也将电力可靠性理论与电力生产紧密联系。全书内容包括可靠性的基本概念、可靠性的发展概况、可靠性技术的适用范围、可靠性数学基础知识、电力系统可靠性评估、电力系统可靠性统计评价、电力系统可靠性管理、电力可靠性技术和管理的的发展等，力求全面，突出重点。相信本教材的出版，将会对提高可靠性管理人员的业务水平起到很好的促进作用。

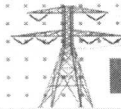
本教材中既有基础理论知识，又有实际经验或做法，既可作为电力可靠性管理人员的培训教材，也是一本实用价值较高的业务参考资料，同时可供有关院校师生和工程专业人员使用。

本教材由国家电力监管委员会电力可靠性管理中心编写，可靠性管理中心主任胡小正主编。参加编写的有电力可靠性管理中心左晓文、陈丽娟、贾立雄、王鹏、周宏、李霞，重庆大学电气工程学院周家启、谢开贵、王韶、熊小伏、赵渊，湖北省电力公司程建翼，全书由周家启教授统稿，李霞整理。本教材编写过程中还得到了各电力企业的大力支持和帮助，在此一并致谢。

由于时间仓促，教材中难免有疏漏与不当之处，亦恳请读者给予指正。

编 者

2007年6月26日

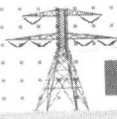


# 目 录

前言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 可靠性的基本概念.....	1
第二节 可靠性的发展概况.....	5
第三节 可靠性技术的适用范围.....	7
<b>第二章 可靠性数学基础知识</b> .....	12
第一节 集合与事件 .....	12
第二节 概率基本概念 .....	15
第三节 马尔可夫随机过程概念 .....	29
第四节 不可修和可修系统可靠性分析 .....	36
第五节 统计推断概念 .....	51
第六节 蒙特卡洛模拟概念 .....	53
<b>第三章 电力系统可靠性评估</b> .....	55
第一节 引言 .....	55
第二节 元件失效模型 .....	55
第三节 电力系统可靠性评估指标 .....	61
第四节 电力系统可靠性评估模型 .....	64
第五节 可靠性评估的数据要求 .....	67
第六节 应用举例 .....	71
<b>第四章 电力系统可靠性统计评价</b> .....	82
第一节 引言 .....	82
第二节 元件可靠性统计评价 .....	82
第三节 系统可靠性统计评价 .....	92
<b>第五章 电力系统可靠性管理</b> .....	102
第一节 引言.....	102
第二节 可靠性管理的工作内容.....	105
第三节 可靠性在电力生产管理中的应用.....	106
第四节 可靠性准则.....	109
<b>第六章 电力可靠性技术和管理的发展</b> .....	115
第一节 可靠性经济学.....	115
第二节 以可靠性为中心的维修.....	118
第三节 考虑老化失效的设备备用概率分析.....	122
第四节 基于可靠性的输电服务.....	131
第五节 运行风险概率评估.....	138

第六节	电网在线可靠性技术的应用及发展	140
附录		146
附录一	电力可靠性监督管理办法	146
附录二	发电设备可靠性评价规程（摘自 DL/T 793—2001）	148
附录三	输变电设施可靠性评价规程（摘自 DL/T 837—2003）	162
附录四	供电系统用户供电可靠性评价规程（摘自 DL/T 836—2003）	181
附录五	直流输电系统可靠性评价规程（摘自 DL/T 989—2005）	192
参考文献		198



# 第一章 概 述

## 第一节 可靠性的基本概念

### 一、引言

以研究事件随机属性为核心内容的可靠性领域，其基本目的是研究在不确定性环境下规划、设计和决策的理论以及工程应用基础。

电力系统由于具有规模大、覆盖面广、网际互联、电网潮流的非线性分布、电能不可能储存或不可能有效地大量储存、故障地点及其对系统行为的影响难于预测等特点，使其可靠性的分析、评估和管理决策较之其他工程系统更为复杂。

电力系统的根本任务是可靠而经济地满足用户的供电需求。为了在电源发生强迫停运和失效事件，以及预防性计划维修而退出设施期间均能保证用户满意的连续供电，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问题。

规划阶段或运行阶段或二者同时加大投资都可减小用户供电中断的概率。但是，过高的投资必然导致过大的运行成本，并最终反映在电价结构中。因此，系统可能会非常可靠，但不经济。反之，如果投资不足，又会发生严重的停电损失。显然，经济性和可靠性的相互制约带来了电力系统规划和运行管理决策的挑战和机遇。

自电力系统出现及其随后发展的数十年里，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。工程上最初使用的都是基于确定性的准则和方法，典型的有如：①发电容量规划——安装容量等于预测峰荷加该峰荷的一个固定百分数。②运行容量——旋转容量等于预测负荷加一台或多台最大机组容量的备用。③电网规划容量——构建与负荷连接的最小供电回路数（取决于冗余程度的要求，例如按  $N-1$  或  $N-2$  准则考虑）。这种准则的基本缺点在于没有，而且也不可能计及系统行为、负荷变化或元件失效等的随机性行为。

电力系统中典型的概率问题有如：①发电机组的强迫停运（概）率是机组形式和容量的函数，因此固定百分数的备用不可能保证方案间风险的统一评价标准。②架空线路失效率是长度、设计结构、位置和架设环境等的函数，因此固定的最低回路数不可能保证方案的同等风险水平。③所有规划和运行决策都是基于负荷预测资料的，而负荷预测不可能十分精确，并且总是存在不确定性。

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入市场化竞争机制，电力系统已将各主要功能部分分开管理，并允许过网交易。这样就不仅增加了用电和发电方面的参与，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，同时产生了“用户”而非“用电”的概念（因为有些用户并不一定用电，而是进行电能这一商品的转卖）。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，随着全球经济的继续增长，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。在电力系统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。加上前述市场化改革的推进，管理机构的更迭和新的成员参与市场，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、维修和资产管理都面临着日益加剧的挑战。20世纪60年代以来，全球范围内重大电网停电事故时有发生，尤其是新世纪之初，2003年8月14日的美加大停电给了人们历史性的警示。因此，迫切需要考虑大电网事件随机性质和计及各种不确定性影响的新思路与新方法，来补充、完善现行的确定性准则，以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。

## 二、基本概念

### 1. 可靠性定义

一个在早期普遍采用的工程可靠性定义是：可靠性是一个产品（或系统）在给定的运行条件下和在规定的时间内充分执行其预期功能的概率。

这个定义包含4个基本部分：概率、运行条件、运行期限和充分执行功能。其中概率用以表达系统可靠性水平的量化信息，随着可靠性技术在不同工程领域的广泛应用，各种系统的性质和要求的不同，派生出概率与具体性能要求相组合的，以数值参量的形式出现的行业专用指标。典型的可靠性指标有如：①规定时间期间内可能发生失效的期望次数。②系统的平均停运持续时间。③故障造成的期望收益损失。④可靠度（可靠率）——在规定的条件下和规定的时间区间内无故障持续完成规定功能的概率。⑤可用度（或可用率）——在规定的条件下和规定的时间区间内完成规定功能的累积时间百分比。而前述其余3个部分都是工程判据或规定的参数，需由系统所处环境和任务的目标要求来确定。

### 2. 充裕性和安全性

针对电力系统的特点，国际上普遍接受的电力系统可靠性定义是：电力系统按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力用户提供电力和电量的能力的量度。电力系统可靠性包括充裕性和安全性两个方面。

电力系统的充裕性和安全性分别定义为：①电力系统的充裕性（Adequacy of an Electric Power System）——电力系统稳态运行时，在系统元件额定容量、母线电压和系统频率等的允许范围内，考虑系统中元件的计划停运以及合理的非计划停运条件下，向用户提供全部所需电力和电量的能力。②电力系统的安全性（Security of an Electric Power System）——电力系统在运行中承受例如短路或系统中元件意外退出运行等突然扰动的能力。

电力系统可靠性必然涉及系统状态的分析，一般区分为充裕、安全、警告、紧急或不安全等状态。

充裕性的概念一般涉及系统中是否有足够的设施来满足用户对供电的需求。因此，不考虑扰动，而属于忽略状态之间转移的稳态工况范畴。安全性表征了对扰动的响应能力和保持整体性（即系统互联运行）的能力。安全性与对系统扰动的响应能力有关，因此涉及引起局部或大范围影响的工况以及失去大容量发电或输电设施的事件。充裕性的量化分析相对容易，至今已取得大量理论和工程应用成果。能够满足运行决策要求的安全性概率分析则十分困难，虽已取得若干理论成果，但工程应用上目前尚属开发阶段。

### 3. 确定性和概率性分析

现在电力系统大多数规划、设计和运行领域仍然在使用基于数十年沿用的，已长期发挥了重要作用的确定性准则。

从目前的研究成果归纳起来，确定性和概率性准则大致有以下特点：①确定性方法以条款规定的形式表述，简单易行，长期使用；概率性方法需要量化分析，对于大电网往往比较复杂，并需要高新技术的支撑，目前在工业界正在广泛研讨和逐步推行之中。②确定性方法不能区分故障事件发生的或然率，而且常常不区分元件的重要程度，按同等原则处理，例如电网规划目前广泛采用的 N-1 准则；概率方法可考虑事件发生的或然率，并可区分元件缺失对系统影响的严重程度。③确定性评估只针对最严重故障和相应的失效工况，即不鉴别严重程度较低故障或失效事件对安全水平的影响；概率性方法能够根据多重事件和多重失效条件将风险加以组合，并反映总的综合风险，而不只是考虑单个最严重事件。④确定性方法不提供安全域以外的风险概率信息。概率方法可提供各种量级的等风险信息，以利于有效地研究整个运行域的风险变化。当临界运行工况微小变化引起很大风险变化时，这种信息特别有用。⑤确定性方法不可能分析运行工况的不确定性，这就限制了确定性方法对未来工况的严密分析；概率方法可处理运行工况的不确定性，从而适用于未来工况的评估。⑥确定性方法难以进行电网薄弱环分析；概率方法可通过灵敏度分析提供改善电网安全和决策水平的针对性信息。

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。但是，由于确定性方法简单易行且长期使用；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，探讨二者结合的可行方法。

### 4. 可靠性评估方法

有两类电力系统可靠性分析的基本方法：状态枚举（即解析法）和模拟法（如蒙特卡洛模拟）。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。

解析方法利用数学模型来描述系统，并使用直接的数值解来评估可靠性指标。做出必要的假设简化后，计算量一般相对较小。但简化假设条件下的分析可能会丢失某些有价值的信息。模拟方法是通过对系统实际过程和行为的模拟来估计可靠性指标的。这种方法从理论上讲可以模拟电力系统规划、设计和运行的所有方面和随机性事件，它们包括元件停运和维修、相关事件和元件行为、失效元件的排序、负荷变化、水力发电发生的能源输入量改变，以及各种不同的运行策略等。

模拟法还可分为：①非序贯随机模拟。在所模拟的时期中，以随机方式选择时间段以后，对基本时间段进行检验。②序贯随机模拟。以时序方法检验仿真时期中的每一时间段。具体方法的选择取决于系统过去的运行是否影响系统的行为。如果过去对行为没有影响，则可选择非序贯方法；如果过去要影响现在的工况，则需要选择序贯模拟。具有水电站的系统就属于后一情况，在其中，过去时段对能源的使用将影响随后时段的发电能力。

不论何种方法，所预测指标的精度都要受到系统模型、方法以及使用数据质量的约束。

### 5. 统计评价和预测评估

在可靠性管理活动中，可以对电力系统可靠性进行两方面的分析，一个方面是对过去的行为做出统计评价；另一方面是根据过去的统计信息对未来的性能进行预测。

可靠性统计评价 (Historical Reliability Assessment) 是确定现有系统或系统组成成分的可靠性所达到的水平的过程。可靠性评价可以对现运行系统进行如下分析研究：①发现薄弱环节和输电瓶颈；②了解可靠性逐年的变化趋势；③制定将来可靠性标准的参考依据；④校验原来的预测值；⑤检测设计方案更改的影响。

可靠性评估 [Reliability Evaluation (or Assessment)] 是对元件或系统的工作或固有能力和性能改进措施的效果是否满足规定的可靠性准则而进行分析、预计和认定的过程。可靠性评估可以对系统进行如下预测研究：①运行方式和维修策略比较；②提供设计和增强性方案的决策依据；③识别输电瓶颈；④可靠性成本和价值分析比较。或者说，可靠性评估可以回答以下工程问题：①如何确定投资的额度、地点和时间？②投资价值如何估算？③增加、保持还是允许降低可靠性水平？④由哪些方面参与决策？⑤如何安排最佳运行方式和维修计划？

## 6. 可靠性价值

可靠性价值最直接的体现就是系统可靠性改善带来的停电损失减小。通过停电损失的计算即可将风险和经济因素放在统一的价值尺度上来衡量。

风险损失费用可以用单位停电费用损失乘以期望缺供电量来进行计算。但是停电费用损失的量化十分复杂，计算方法尚不成熟。目前，国际上已经提出了基于用户调查统计的用户损失函数法，并在风险评估中使用，但也一直存在争议。总之，停电损失费用是一个取决于许多非技术因素的复杂问题，这些因素包括管理体制、产权以及电费机制等。

下面举出三种可用的计算单位停电损失的方法：

(1) 基于用户损失函数的方法。用户损失函数即是通过用户对用户调查统计分析，获得某地区以元/(kW·h)计的平均单位停电损失，它相应于停电造成的平均社会损失费用。单位停电损失具有随地区、国家和系统不同而不同的属性。因之，电力公司应当使用基于自己系统及其供电用户调查统计分析的数据。这个方法具有普适性，尤其适用于以用户满意度为对策目标的电力公司。

(2) 基于投资核算的方法。电力系统的投资和系统可靠性指标之间存在着可量化的关系。通过对系统增强改造项目和相应系统风险评估的大量研究，可以得到基于投资的平均停电损失数据。非国有公司可能多使用这个方法。

(3) 基于国民生产总值的方法。一个简单而有效的方法是利用国民生产总值 (GDP) 的概念。一个省 (自治区) 或国家的国民生产总值除以该省 (自治区) 或国家的年用电量就得到每千瓦时的价值。这个数值反映了这个地区或这个国家缺供 1kW·h 电量的平均经济损失。这个方法适用于公有制公司，因为一个地区或国家必然从整体上来考虑总的经济效益。

## 7. 数据统计

图 1-1 是一个可靠性数据收集系统的框架示例，其中 SETR 指“系统设备故障报告”。

电力系统可靠性需要统计的基本数据包括各级各类设备及其所构成系统的运行和停运状态的原始记录，用于对元件性能及其对系统的影响、现运行系统和规划系统的可靠性进行分析评价或评估。

统计数据基本类型有：①系统结构和运行参数；②元件和系统的失效率和停电持续时间；③失效模式；④元件故障类型和原因；⑤修复方式；⑥恢复供电方式；⑦每次停电的持续时间；⑧不影响用户生产的临界最大停电时间；⑨用户全停后的恢复生产时间；⑩每次停



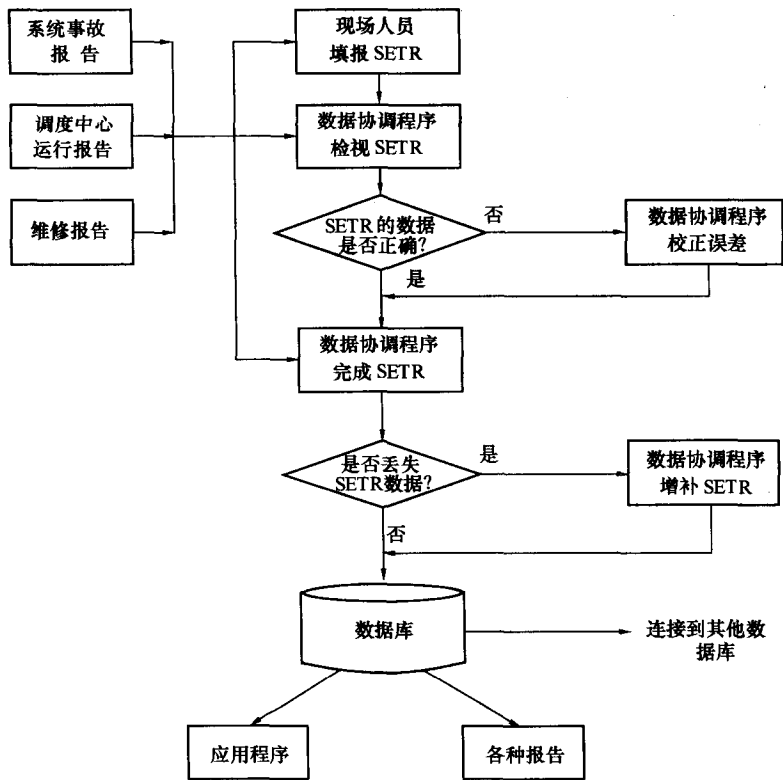


图 1-1 可靠性数据收集系统示例

电的用户停电损失。

典型的数据有如：①电机、变压器或开关设备的铭牌参数；②输电线路导线的型号、长度；③以上设备的运行参数；④各类元件的故障和停运记录；⑤系统或供电点的停运记录；⑥系统或供电点的平均失效频率、停运时间；⑦重大停电事件的原始记录。

对于电力系统可靠性评估所要求的可靠性数据则是元件停运模型中的参数。数据质量是数据收集要考虑的一个重要因素。通常，需要通过参数估计方法从原始统计资料中获取风险评估的输入数据，这就要求设计合适的数据统计模型。此外，可靠性数据具有动态性质的特点。停运记录的数据量将随着时间增加，从而一个设备或一组设备的平均失效频率和修复时间都将逐年改变。可靠性数据库应当有不断更新数据和计算结果的功能，还应足够、灵活地提供各种格式的报告。

## 第二节 可靠性的发展概况

### 一、可靠性的发展过程

可靠性的概念是很早就存在的，人们总是希望所使用的设备能经久耐用，所建立的系统不出故障，因此可靠性是衡量设备或系统质量的一个重要方面。以往由于条件的限制，人们对可靠性的认识还只是停留在模糊的定性阶段，而缺乏科学的分析方法和量化标准。引入概率理论进行应用研究，推动了可靠性这一学科和工程应用领域的迅速发展。

早在 1882 年英国电气工程师学会 IEE 即出版了第一个电气设备安全条例 (Code of Safe Electrical Installation Practice)。20 世纪 30 年代在《电世界》、《电气评论》等国外杂志上开始发表有关发电容量概率分析的学术论文。美国 IEEE 于 60 年代初期开始进行工业设备可靠性的广泛调查, 拟定了一套设备可靠性统计分析的规范性方法, 发布了第一批工程可用的设备可靠性统计数据。

系统性的工业可靠性研究始于 20 世纪 40 年代。随着军事工业、航空航天技术的发展, 特别是大规模电子元件集成设备的研制和应用, 相应系统日益庞大复杂, 随机因素增多, 既需要完善的可靠性工程技术支撑, 又需要周密的可靠性管理保障。因此, 可靠性工作在国外和一些技术密集型行业有了很大进展。

20 世纪 80 年代, 一些发达国家大都进行了可靠性立法, 遵循国际标准化组织 (ISO) 和国际电工委员会 (IEC) 的标准制定了较为完善的国家标准, 并设有国家级和行业级的可靠性中心和数据交换网络。

20 世纪 60 年代, 中国在通信、电子和航空等行业启动了可靠性工程。70 年代末, 前国家计委以电子工业部为重点推行可靠性工程, 所属工厂 90% 以上的工程技术干部都普及了可靠性知识。80 年代末, 中国开始可靠性立法, 颁布了 37 个可靠性国家标准和 18 个可靠性竣工标准。电子、军工和航空航天等行业全面开展可靠性管理, 成立可靠性组织并出台了实施规划, 如机电行业在全行业推广了部委颁发的《机械电子产品可靠性指标考核评定管理办法》。1981 年中国水利电力部颁布了有关电力系统安全稳定运行的《电力系统安全稳定导则》。1983 年成立中国电机工程学会可靠性专业委员会, 同年中国电工技术学会成立电工产品可靠性研究会。1985 年水电部成立了电力可靠性管理中心, 开展发、输、配电设备及系统的可靠性统计以及有关标准的研究制定工作。1978 年以来, 一些大学和科研机构陆续开展了电力系统可靠性的理论研究和教学工作。20 世纪 80 年代末至 90 年代初期, 中国电力系统可靠性的研究和应用有了较大发展, 开发了拥有自主知识产权的电源规划软件、发输电系统可靠性评估软件、配电系统可靠性评估软件、发电厂变电所电气主接线可靠性评估软件等, 并在中国三峡电站、三峡电力系统、东北电力系统中应用。这些工作进展同时推动了电力规划、设计、研究和制造部门在系统规划和工程设计中开始进行可靠性评估。

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、复杂。尤其是 2003 年 8 月 14 日美加大停电事故的警示, 进入 21 世纪以来, 国内外电力界不断加大力度发展大电网安全风险概率分析领域和应对措施的研究, 出现了许多可喜的成果。尤其是 2005 年 Dr. Wenyuan, Li (李文沅) 的《RISK ASSESSMENT OF POWER SYSTEMS》专著出版, 反映了电力系统可靠性学术和应用研究的最新进展。

目前我国的电力可靠性管理主要在于继续有效地拓展电力可靠性管理领域; 研究制定适应新的电力体制和技术要求的可靠性标准; 研究和推广适应新环境、新体制的可靠性理论、技术与方法; 进一步推动对可靠性信息分析和应用水平的提高; 继续积极探索市场经济环境中的电力可靠性监督与管理新模式, 致力于推动我国电力安全、可靠运行水平的提高。

国家电力监管委员会制定并于 2006 年 1 月 23 日发布了“国家处置电网大面积停电事件应急预案”。此外, 随着电网规模的迅速扩大, 反映电网状态的各种信息量在不断堆积, 但

却没有大电网可靠性状态的信息，这已引起了国家有关部门的高度重视。国家电力监管委员会电力可靠性管理中心已开始部署进行电网层次的可靠性研究工作。

## 二、相关学科的发展

20世纪30年代国外开始发表电力可靠性研究的学术文献以来，学术界和工业界的学者、专家们经过70多年的努力，促进并形成了可靠性理论和电力工业应用研究领域蓬勃发展的新局面。在取得大量工程应用成果的同时，又促进了学术研究和交叉学科的新增长点的发展。当今可靠性研究涉及的领域十分宽广，学术上大致有以下一些相关学科。

### 1. 可靠性管理

可靠性管理就是从系统的整体出发，按照一定的可靠性目标，对元件或系统全寿命周期中的可靠性技术活动进行规划、组织、协调、控制与监督，并保证全寿命周期费用最省，它是一切可靠性活动的核心。具体到电力系统的可靠性管理，其主要任务就是研究与制定单个元件和由元件组成的系统的可靠性指标与统计方法；根据可靠性计算指标，结合被管理对象的具体情况研究和制定可靠性的计算、预测、与评价方法；寻找提高被管理对象可靠性的途径和方法；研究可靠性与经济性的协调配合。

### 2. 可靠性技术

可靠性技术就是为了使产品和系统达到预定的可靠性要求所进行的有关设计、制造、安装、试验、维护和保养等一系列工程技术活动，它已经成为提高设备使用寿命、减少设备故障、实现安全生产的重要手段。电力系统是一个具有随机特性的大系统，负荷水平变化、元件故障、保护动作特性等都具有不确定性，因此经常需要采用概率仿真方法，对系统进行模拟、计算和可靠性评估。

### 3. 可靠性数学

可靠性数学是运用概率统计和运筹学等的理论和方法对产品（单元或系统）的可靠性作定量研究，它是可靠性理论的基础之一。在解决可靠性问题中所用到的数学模型，其宏观上大致可分为两类：概率模型和统计模型。概率模型是从系统的结构及部件的寿命分布、修理时间分布等有关信息出发，推断出与系统寿命有关的可靠性数量指标，如可靠性与失效率，修复率与有效度等，进一步可讨论系统的最优设计，使用维修策略等。统计模型是从观察数据出发，对部件或系统的寿命等进行估计与检验等。因此它既是应用概率与统计的一个分支，又是运筹学的一个分支。

### 4. 其他

电力元件、系统的可靠性不是孤立存在的，它受许多环节、因素的影响。因此可靠性技术和很多领域的技术密切相关，需要得到经济学、人工智能、最优化技术、材料工程等相关学科的支持。随着电力系统可靠性研究和应用水平的逐步提高，进一步扩大了可靠性的研究领域，进而又推动了这些学科的发展。

## 第三节 可靠性技术的适用范围

### 一、可靠性技术的一般应用范围

可靠性将贯穿于产品或系统的整个寿命周期，即从研究、设计、生产直至使用的各个阶段。因此，可靠性的活动涉及到设计、生产、运输、营运直至消费等极其广泛的领域，与其有关的工作项目大致上可归纳如表1-1所示。

表 1-1

可靠性有关工作项目

分 项	立 项	认 证	研 制	投 产	使 用
确定可靠性指标	—	—	—		
可靠性数学模型	—	—	—		
可靠性预计和分配	—	—	—		
失效模式和后果分析	—	—	—		
可靠性设计	—	—	—	—	
元件选用	—	—	—	—	
设计审查	—	—	—		
设计规范	—	—	—		
验收规范	—	—	—		
可靠性评价	—	—	—		
失效分析	—	—	—	—	—
维修管理	—	—	—	—	—
质量管理		—	—	—	—
环境试验		—	—	—	—
可靠性验收试验	—	—	—		
数据统计处理	—	—	—	—	—
可靠性教育培训	—	—	—	—	—

## 二、电力系统可靠性技术的应用领域

可靠性技术可在电力系统的规划、运行、维修和资产管理等领域发挥重要作用。具体应用大致上有以下一些方面。

### 1. 准则和标准的制定

电力系统可靠性准则指在规划设计或运行中为使发电和输配电系统达到所要求的可靠度所必须满足的指标、条件或规定。可靠性准则分为概率性指标或变量的准则和确定性行为或性能试验准则两类。电力市场条件下电力系统发生故障的风险增大了，首先是用户需求的不确定性增大，其次是多个市场贸易主体的分散决策过程导致电力和电能量贸易的不确定性增大，这使电力系统的运行条件广泛变化。电力市场要求可靠性提供技术支持，要求对原有的可靠性准则进行修订。目前许多国家都在研究如何制定符合电力市场要求的可靠性准则，其中比较典型的是 NERC 在 1997 年公布的《规划标准》和 1998 年公布的《执行细则》。

### 2. 规划或现运行系统可靠性评估

在电力系统规划、设计、运行的全过程中，应该坚持系统全面的可靠性定量评估制度以提高电力系统的效能，对可能出现的故障进行故障分析，采取措施减少故障造成的影响，对

可靠性投资与相应带来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。为了实现电力系统的可靠性评估就要确定可靠性目标，应用评估手段，确定故障准则，并对故障严重性做出估计。

规划系统的可靠性评估有以下方面的工作任务：对未来的电力系统和电能量需求进行预测，收集设备的技术经济数据；制定可靠性准则和设计标准，依据标准评估系统性能，识别系统的薄弱环节；选择优化方案。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。

### 3. 可靠性成本—效益分析

成本效益分析是指将反映投入的成本指标与反映产出的生产经营成果指标进行对比。因为成本升降并不是评价方案优劣的唯一标准，还需要考虑成本效益问题，因此通过成本效益分析，能够全面、准确地评价方案的可行性。例如，传统的电网规划是以在满足一定运行条件下使投资最小为原则，可靠性准则仅是确定性的“N-1”检验准则，没有将可靠性问题有机地结合到电网规划的优化目标中去，也没有考虑由于可靠性问题而造成的社会经济损失，因此，无法达到规划方案的经济性和可靠性的协调。随着电力市场的发展，电力系统在经营决策中计及可靠性价值，在投资与适当的可靠性水平之间加以平衡，常用成本—效益分析法研究电力系统可靠性与其建设和运行的经济性之间相互协调的关系，把损失列入规划方案的比较，使可靠性技术的应用发展到了一个新的层次。

### 4. 发电容量和电网最优规划

迄今为止，许多国家的电力部门仍然习惯于采用基于确定性的准则和方法进行发电容量和电网的规划。这种准则的基本缺点在于只能对系统在待定状态下性能的“好”与“坏”作定性的判断，不能表征出系统可靠性性能的数值特征，特别是随着现代电力系统规模的日益庞大，出现了用确定性方法难以解决的问题。正是实际问题的需要，促进了系统可靠性评估概率方法的发展。考虑了事件随机性质和计及各种不确定性影响的可靠性技术是对现行确定性准则的补充和完善。例如，输电网规划是一个典型的有约束的最优化问题，具有离散性和非线性以及规模大等特点。在实际工程中，如果仅仅依靠规划人员的经验人工进行电网规划，不仅工作量大，往往还会顾此失彼。对于各种可能的规划方案，应该通过包括进行供电可靠性定量评估在内的大量技术经济分析计算，进行规划方案之间的比较，得出更合理的方案。

### 5. 备用容量和位置分布

各国通过长期实践大都制定了相对成熟的备用容量评估方法及标准。典型的确定性备用容量评估方法不能反映当前机组的数量、性能、出力变化、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，可通过评估可靠性水平与调整备用容量来满足对可靠性的要求。与确定性方法相比，概率法能够全面地反映系统的状况，而且在国外已经有成熟的实际运行经验。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加，其不能反映系统中的一些实际情况（如日负荷变化）。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，计算结果也更为丰富，其主要不足在于模拟时间和模拟精度之间存在矛盾。由于我国电源和电网发展很快，规模逐年增加，系统还较为薄弱，因此更加适合用蒙特卡洛法。

## 6. 运行方式薄弱环节识别和优化调度

在电力系统中,运行在不同环境下的不同设备,其发生故障的可能性不同,不同故障引起的事故对系统影响的严重程度也不同。这些不同之处有经验的调度员有时甚至可以感觉到。而传统的基于确定分析的 EMS,最多在确定预想事故集时将最有可能发生的预想事故考虑进来,按经验来考虑事故发生的可能性,但并未进行量化分析。将传统可靠性研究与电网调度自动化有机结合与提升,建立不确定性数学模型,则不仅可以进行运行薄弱环节的识别,进而决策怎样增加设备(发电机、线路等)来增强电网的安全性,还能进一步决策如何运用合理的调度策略来改变运行方式。

## 7. 以可靠性为中心的维修

以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, RCM)是目前国际上流行的用于确定设备预防性维修工作、优化维修制度的一种方法。其基本思路是:对设备进行故障与功能分析,明确设备各故障的后果;用规范化的逻辑决断方法,确定各故障的预防性维修对策;通过现场故障数据统计、专家评估、量化建模等手段,计及维修停运对系统可靠性的影响,以总费用最小为目标对设备的维修策略进行优化。利用可靠性理论和方法最优安排预防性维修类型可以克服传统定期计划维修的弊端,达到尽可能好的维修效果。

## 8. 电力市场营运策略

电力市场环境下,可靠性从原来作为国家和社会的动力基础的可靠性转变成为电力市场上一种商品的可靠性。系统的安全性和可靠性将通过各自独立的发电公司和电网公司对利润追求的同时得到保障。技术可靠性与经济性具有默契配合的协调性,提高技术可靠性是提高经济性的基础和保障。所以,在电力市场环境下,电力行业对可靠性的关心将发生观念上的变化,即由可靠性管理给企业运营带来的商业价值的多少将成为人们极为关注的问题,也就是商业可靠性观念的建立。因此,系统及各环节的可靠性将是电力市场营运策略的重要依据。

## 9. 电力系统设备备用规划

在电力设备规划中,复杂的备用分析是极具挑战性的课题。虽然过去 20 多年来,在发、输、配系统的概率评估方面进行了大量的研究,但是对于电力设备备用规划的概率分析还没有得到应有的关注。至今,在该领域中,大多数电力公司采用的是基于工程判断的确定性方法。

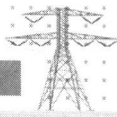
备用分析是针对一个设备组进行的,组中的每个元件都有各自的失效概率或不可用率,当其失效时,就必须投入备用设备以保证系统的正常运行。基于可靠性的电力系统设备备用规划方法可以对设备可修复失效和老化失效两个模式进行模拟。得出两个备用分析方法:一个是基于设备组可靠性判据;另一个是基于概率费用模型。两个方法可以互相配合,并合成一个统一的步骤。所获得的设备备用方案包括在长期规划期间应购置的备用设备数量和每个备用设备投入的时间,也可获得短期的设备备用方案。基于可靠性的电力系统设备备用规划方法的另一个特点是它还能对设备备用方案进行概率的成本—效益分析,因而可以在决策中对其经济上的合理性提供定量的判断。

## 10. 资产全寿命周期成本分析

电力资产的寿命周期成本是指资产在寿命周期内从投入使用到最后报废所需支付的设置费和维持费的总和。寿命周期费用分析法是在设备的使用目的和目标确定之后,计算出设备效率和费用,并在两者之间进行权衡,也在设置费用和维持费用之间进行权衡,以期找到最

佳方案。

大家都知道，可靠性高的设备采购费用要相对高一些，但从设备的全寿命周期来看，其后期的使用、维护费用会大大降低，而且在同样的使用条件下，可靠性高的设备使用寿命相对较长。所以，无论从全寿命成本或使用周期考虑，都应把设备的可靠性要求作为一个不可或缺的重要指标来衡量。电力资产寿命周期成本分析法的重要特点是进行有效的权衡分析。使系统在达到合理的可靠性水平的前提下，获得总体最大经济效益。



## 第二章 可靠性数学基础知识

### 第一节 集合与事件

概率是事件的一定属性，事件可以通过集合（简称“集”）来描述。因之，先引入一些集合的基本概念。

#### 一、集合的定义和符号

具有某种规定性质的事物的总体称为集（合）。组成集合的这些事物的每一个体称为集的元素或成员。只有有限个元素的集称为有限集，具有无限个元素的集称为无限集。例如，“A 城中 18 岁及以上的全体公民”是一个有限集，“所有正整数的全体”则是一个无限集。

集合常用大写字母表示，元素常用小写字母表示，如果某一个体  $x$  是集  $A$  的元素，则记为

$$x \in A$$

读作“ $x$  属于  $A$ ”。

而

$$x \notin A$$

则表示  $x$  不属于  $A$ 。

如果集  $A$  和集  $B$  具有完全相同的元素，即集  $A$  的每个元素都是  $B$  的元素，集  $B$  的每个元素也都是  $A$  的元素，则说  $A$  等于  $B$ ，记为  $A=B$ 。

有限集  $A$  中元素的数目叫  $A$  的基数，记为  $|A|$ 。

一个集  $S$  可以用列举出它的全部元素的方式来表示，例如

$$S = [2, 3, 5, 7]$$

与括号中元素的排列次序无关。

一个集  $P$  也可以按照它的元素某种特定的属性来表示，例如

$$P = [x \mid x \text{ 是质数}]$$

括号中垂直线左右的记号代表集的典型元素。

于是前面列出的集  $S$  也可写成

$$S = [x \mid x \in P \text{ 且 } x < 8]$$

或

$$S = [x \in P \mid x < 8]$$

有两个集  $A$  和  $B$ ，如果  $B$  的每个元素都是  $A$  的元素，则说  $B$  是  $A$  的子集，记为

$$B \subseteq A \text{ 或 } A \supseteq B$$

有时读成  $A$  包含  $B$ 。一个集  $A$  也总是它本身的一个子集，即  $A \subseteq A$ 。集  $A$  中任何一个不等于  $A$  的子集  $B$  称为  $A$  的真子集，记为

$$B \subset A \text{ 或 } A \supset B$$

如果  $A \subseteq B$  且  $B \subseteq A$ ，则  $A=B$ 。



## 二、集合的基本组合规则

通过集的运算可以将某些集合组合形成新的集合，一般有如下一些运算规则。

如果  $A$  和  $B$  是两个集，则它们的并  $(A \cup B)$  定义为

$$A \cup B = [x \mid x \in A \text{ 或 } x \in B \text{ 或 } x \in AB]$$

它们的交  $A \cap B$  定义为

$$A \cap B = [x \mid x \in A \text{ 且 } x \in B]$$

**【例 2-1】** 如果  $S = [2, 3, 5, 7]$  且  $T = [1, 2, 3]$ ，则

$$S \cup T = [1, 2, 3, 5, 7] \quad S \cap T = [2, 3]$$

如果集  $A$  和集  $B$  没有公共元素，则称它们为不相交的集。这两个不相交集之交得到一个不包含任何元素的集，称其为空集，以  $\phi$  表示。因之  $A \cap B = \phi$ ，而且  $\phi$  也是任意一个集  $N$  的子集。

集的并和交的运算服从以下规则：

(1) 幂等律。

$$A \cup A = A, A \cap A = A$$

(2) 交换律。

$$A \cup B = B \cup A, A \cap B = B \cap A$$

(3) 结合律。

$$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C), (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$$

(4) 分配律。

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C), A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

集  $A$  和集  $B$  的差  $(A - B)$  定义为

$$A - B = [x \mid x \in A \text{ 且 } x \notin B]$$

如果  $B$  是  $A$  的一个子集，则有时称  $A - B$  为  $B$  对于  $A$  的补集。

**【例 2-2】** 如果  $S = [2, 3, 5, 7]$  且  $T = [1, 2, 3]$ ，则

$$S - T = [5, 7]; \text{ 而 } T - S = [1]$$

## 三、集的集合的概念

在可靠性评估技术中常会碰到集中的元素本身也是一个集的情况。以下用所谓的幂集来说明这个概念。

定义任意集  $A$  的幂集  $p(A)$  为  $A$  的全部子集的集合，即

$$p(A) = [x \mid x \subseteq (A)]$$

**【例 2-3】** 令  $A = [x, y, z]$ ，则

$$p(A) = \{\phi, [x], [y], [z], [x, y], [x, z], [y, z], [x, y, z]\}$$

对于集的集合，其并和交的一般定义是：令  $\varphi$  为任意集的集合，则并

$$\cup \varphi = \{x \mid x \in A_i, \text{ 对于至少一个 } A_i \subset \varphi \text{ 成立}\} i = 1, 2, \dots$$

而交

$$\cap \varphi = \{x \mid x \in A_i, \text{ 对于任一 } A_i \subset \varphi \text{ 均成立}\} i = 1, 2, \dots$$

如果  $\varphi$  是有限个集的集合，例如  $\varphi = [A_1, A_2, \dots, A_n]$ ，则常可写出

$$\bigcup_{k=1}^n A_k, \text{ 或 } A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n$$

$$\bigcap_{k=1}^n A_k, \text{ 或 } A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n$$