

# 电力系统可靠性分析 基础及应用

杨蔚百 戴景宸 孙启宏 编

水利电力出版社



## 内 容 提 要

本书比较全面地阐述了电力系统可靠性分析的基础理论及应用。全书共十一章。前五章包括研究电力系统可靠性的主要数学基础、概率论、马尔科夫过程和主要分析方法（网络法及状态空间法）。第六章到第十章介绍了电力系统可靠性的基本原理在电力系统各主要组成部分，包括发电、输电、配电和电气主接线系统方面的应用。最后第十一章介绍了模拟法的一些主要特点和原理。

本书可供从事电力系统可靠性研究的工作人员及高等学校的学生、研究生参考。

## 电力系统可靠性分析基础及应用

杨蔚百 戴景宸 孙启宏 编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 12.5印张 275千字

1986年7月第一版 1986年7月北京第一次印刷

印数0001—5610册 定价2.60元

书号 15143·5989

## 前 言

近20年来,随着电力系统规模的不断扩大,系统结构日趋复杂,电力系统的可靠性问题越显突出。应用传统的直观方法来分析电力系统的可靠性,已远不能满足现实的需要,而逐渐为定量的计算方法所代替。所有定量研究可靠性方法的最基本的要求是,建立一种合适的数学模型来描述所研究的系统。这个模型随着研究对象的不同,或为简单或是复杂,但都应满足易于进行数字处理的要求。本书即针对上述要求,论述建立可靠性数学模型和进行数字计算的基本概念、原理和方法。

本书第二章对概率论基础知识作了扼要的概述,并对随机过程中的马尔科夫过程作了较为详细的讨论。这些内容是研究可靠性问题的主要数学基础。第三章分析电力系统元件的可靠性。第四、五章着重讨论了系统可靠性分析中最常用的两种方法:网络法和状态空间法,并简要地叙述了故障树分析法的特点。从第六章到第十章,介绍了前述基本原理、方法在电力系统各主要组成部分(发电系统、互联系统、输电系统、配电系统以及发变电站电气主接线)的具体应用。最后第十一章对模拟法的特点作了简单的叙述。

在电力部召集的电力系统可靠性会议上(1982年),与会单位的代表对本书的编写提纲提出了宝贵的意见。水电部电力科学研究院王德生高级工程师对书稿进行了详细的审阅。在此一并致以衷心的感谢。

---

本书第一、三、六章由孙启宏编写，第九、十、十一章由戴景宸编写，其余各章由杨蔚百编写，杨蔚百任主编。

我国开展电力系统可靠性研究工作的时间还不长，这方面的实践经验积累也不够。不过，近年来由于水利电力部的领导和各有关方面的重视，这方面的研究工作也有了迅速的发展。本书编写目的之一，就是为电力工业的工程技术人员在从事电力系统可靠性研究工作时提供一定的理论基础和应用借鉴。并可作为高等学校学生和研究生的参考书。限于著者的水平，书中错误不妥之处在所难免，请读者随时予以批评指正。

# 目 录

## 前 言

第一章 绪论 .....	1
第一节 可靠性的基本概念 .....	1
第二节 电力系统可靠性指标 .....	3
第三节 电力系统可靠性问题研究的方法 .....	4
第二章 预备知识 .....	6
第一节 随机事件的概念 .....	6
第二节 概率的定理和性质 .....	8
第三节 条件概率 .....	11
一、条件概率的定义和计算公式 .....	11
二、条件概率的 3 个重要公式 .....	11
第四节 随机变量及其分布 .....	13
一、随机变量的概念 .....	13
二、分布的概念 .....	14
三、机率函数 .....	16
四、随机变量的数字特征 .....	18
第五节 几种离散型分布 .....	22
一、二项分布 .....	22
二、泊松分布 .....	23
第六节 几种连续型分布 .....	27
一、指数分布 .....	27
二、威布尔分布 .....	31
三、正态分布 .....	33
第七节 随机过程的基本概念与性质 .....	35

一、随机函数的概念 .....	35
二、随机过程按状态和参数空间的分类 .....	37
三、随机函数的概率分布 .....	37
第八节 马尔科夫链 .....	40
一、概述 .....	40
二、转移矩阵和转移方程 .....	43
三、吸收状态及吸收时间 .....	49
第九节 时间连续状态离散的马尔科夫过程 .....	54
一、转移概率矩阵和转移密度矩阵 .....	56
二、无条件状态概率 .....	57
三、长期状态概率 .....	61
本章小结 .....	62
<b>第三章 元件可靠性</b> .....	<b>63</b>
第一节 概述 .....	63
第二节 不可修复元件 .....	64
一、元件寿命的分布函数 .....	64
二、故障率 .....	66
三、 $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 和 $\lambda(t)$ 之间的关系 .....	68
四、故障率曲线 .....	68
五、寿命的指数分布 .....	69
六、寿命时间的均值 .....	71
第三节 可修复元件 .....	72
一、工作寿命及故障率 .....	73
二、修复率 .....	74
三、可用度 .....	76
四、元件的状态分析 .....	77
五、瞬时可用度和稳态可用度 .....	80
第四节 预防性维修 .....	81
第五节 数据收集与参数估计 .....	84
一、元件的状态划分及定义 .....	84

二、元件可靠性参数的点估计 .....	86
三、区间估计 .....	87
本章小结 .....	89
<b>第四章 系统可靠性——网络法</b> .....	<b>90</b>
第一节 概述 .....	90
第二节 网络法的一般问题 .....	91
一、建立网络结构图和逻辑图 .....	92
二、逻辑图存在的条件及求系统可靠度的方法 .....	94
第三节 逻辑图简化法 .....	95
一、串联系统 .....	95
二、并联系统 .....	100
三、 $m/n$ 并联结构 .....	107
四、复杂系统 .....	109
第四节 最小连集和最小割集法 .....	121
一、有关定义 .....	122
二、用最小连集和最小割集法求系统的工作函数和非工作函数 .....	123
三、用最小连集和最小割集法求系统可靠性指标 .....	126
第五节 故障树分析法 .....	131
本章小结 .....	143
<b>第五章 系统可靠性——状态空间法</b> .....	<b>144</b>
第一节 概述 .....	144
第二节 状态概率、状态频率和状态持续时间 .....	147
一、状态概率 .....	147
二、状态频率和状态持续时间 .....	151
第三节 故障后果分析和系统状态的合并 .....	154
一、状态合并的条件 .....	156
二、组合状态的等值转移率 .....	157
第四节 状态穷举法 .....	163
一、准确公式 .....	163
二、截断状态空间法 .....	167

第五节	最小割集状态法	171
一、	用最小割集状态计算系统可靠性指标	172
二、	应用最小割集状态简化故障后果分析工作	179
本章小结		181
<b>第六章</b>	<b>发电系统可靠性分析</b>	<b>182</b>
第一节	概述	182
第二节	发电容量模型	184
一、	一台机容量模型	185
二、	两台机容量模型	188
三、	3台机容量模型	192
四、	相同容量机组的状态模型	195
五、	容量模型的递推公式	196
六、	递推公式应用举例	199
七、	减少机组时停运容量模型	202
八、	机组降额运行时的容量模型	206
第三节	电力不足概率法 (LOLP法)	208
一、	负荷模型	208
二、	电力不足概率 (LOLP) 指标的计算	209
第四节	电量不足概率法 (LOEP法)	214
第五节	频率及持续时间法 (F&D法)	216
一、	日负荷曲线的两级表示法	216
二、	发电和负荷模型相结合——裕度状态法	218
三、	发电和负荷模型相结合——卷积法	223
四、	年表负荷模型	225
第六节	几种可靠性指标的比较	226
第七节	发电系统发展规划	229
一、	有效载荷容量	230
二、	不同可靠性标准对有效载荷容量的影响	231
三、	发展规划方案的制定——图解法	232
四、	发展规划方案的制定——等备用系数法	235
第八节	发电系统的检修计划	241



一、等备用容量法 .....	241
二、等风险度法 .....	243
第九节 原始数据不确定性问题简介 .....	250
本章小结 .....	251
<b>第七章 互联发电系统的可靠性分析 .....</b>	<b>253</b>
第一节 概述 .....	253
第二节 基本原理 .....	253
第三节 实例及实用算法 .....	256
第四节 两个以上的系统互联 .....	272
本章小结 .....	276
<b>第八章 输电系统的可靠性分析 .....</b>	<b>277</b>
第一节 概述 .....	277
第二节 不考虑发电设备故障时的输电系统可靠性分析 .....	279
一、分析原理 .....	279
二、输电系统可靠性分析的 $n-1$ 规则和指标 .....	287
三、实例 .....	293
第三节 考虑发电设备故障时的输电系统可靠性分析 .....	306
一、系统状态及状态概率的计算 .....	307
二、LOLE的计算和分析 .....	309
本章小结 .....	314
<b>第九章 配电系统的可靠性分析 .....</b>	<b>316</b>
第一节 概述 .....	316
第二节 简单辐射型配电系统的可靠性分析 .....	318
第三节 环型配电系统的可靠性分析 .....	324
一、串联系统 .....	325
二、并联系统 .....	326
第四节 复杂配电系统的可靠性分析 .....	331
一、无负荷转移的全部负荷断电 .....	331
二、无负荷转移的局部停止供电 .....	336
三、有负荷转移的停止供电 .....	338

本章小结 .....	341
<b>第十章 配电装置可靠性的分析 .....</b>	<b>342</b>
第一节 概述 .....	342
第二节 一些基本概念 .....	343
第三节 元件组的可靠性分析 .....	345
一、 $n$ 个串联元件的等效参数 .....	345
二、并联元件的等效参数 .....	346
三、计划维修对可靠性的影响 .....	348
四、变电站的供电可靠性 .....	350
第四节 用表格法分析配电装置可靠性 .....	354
第五节 配电装置对电力系统可靠性的影响 .....	358
本章小结 .....	365
<b>第十一章 模拟法在电力系统可靠性分析中的应用 .....</b>	<b>366</b>
第一节 概述 .....	366
第二节 模拟法的基本概念 .....	367
第三节 均匀分布随机数的产生 .....	369
一、随机数表 .....	370
二、使用电子计算机产生伪随机数 .....	370
第四节 特殊分布随机数的形成 .....	377
一、离散随机数的模拟 .....	377
二、连续随机数的模拟 .....	378
三、应用聂曼法模拟连续随机数 .....	381
第五节 电力系统可靠性的分析 .....	382
一、发电机运行状态的模拟 .....	383
二、线路、变压器运行状态的模拟 .....	385
三、负荷的模拟 .....	385
本章小结 .....	386
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>387</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 可靠性的基本概念

长期以来，在人们的生活和技术领域中常常遇到对一种事物的可靠和不可靠的评论——这已成为一种共同的概念。实际上，这种评论总是和事物是否达到某一预期的功能（或指标）联系在一起的。例如一台设备预期能连续工作 $10a$ ；如果使用到 $7a$ 或更短的时间内就已损坏，那它是不可靠的；反之，如能连续工作 $10a$ 以上，它就是可靠的。但这种对可靠性问题的认识，还只是停留在模糊的定性阶段，而缺乏数量上的标准和严格的计算方法，因而还不能称为有用的科学。

可靠性理论的发展，可以追溯到第二次世界大战时期。当时德国为了对导弹的可靠性作出估计，提出了关于系统可靠性的一个重要理论：任一元件故障可能导致系统故障的系统（即串联系统），其可靠性等于各独立元件可靠性的乘积。因此，系统的可靠性要比这些元件中最坏的一个还要低。战后，可靠性理论在电子、核子、空间技术以及其他技术领域里得到了越来越广泛的应用，并迅速发展成为一门独立的学科。

目前，能为大家所承认的关于可靠性的定义是：“元件、设备、系统等在规定的条件下和预定的时间内，完成其规定功能的概率。”这和过去人们已形成的对可靠性的概念是完全一致的，不同之点是应用了“概率”这个数学概念来

**定义**，使得可靠性有了一个可以测度和计算的定量标准。

上述对可靠性的定义，在不同的应用场合就“完成规定功能”这一含意而言并不相同。因此，还需要有更具体的可靠性指标。例如：一般设备可区分为不可修复和可修复的两大类。对不可修复设备的可靠性指标是指在预期的时间（平均寿命）内未发生故障这一事件的概率，通常叫可靠度；对可修复设备，由于它在故障后还可以修复，再投入工作，且长期经历着这种循环，所以除计及设备发生故障的概率外，还要计及故障后修复的概率——在情况下的可靠性指标叫可用率，并定义为“可修复设备在长期运行中，处于或准备处于工作状态的时间所占的比例。”这实际上仍然是一概率尺度。

关于不可修复设备和可修复设备的两种可靠性指标——可靠度和可用率，同样适用于元件和系统。电力系统是可修复系统，其中主要元件是可修复元件。为了满足不同应用场合的需要和便于进行可靠性预测，已提出大量的指标，其中应用较多的有以下几类：

1. 概率 如上述的可靠度、可用率。
2. 频率 在单位时间内的平均故障次数。
3. 平均持续时间 有首次故障的平均持续时间、两次故障间的平均持续时间、故障的平均持续时间等。
4. 期望值 如一年中系统发生故障的期望天数。

在这些指标中，有的（如概率指标）既可用于不可修复元件和系统，也可以用于可修复元件和系统，但频率和平均持续时间指标多用于可修复元件及系统。

必须指出，可靠性是对未来事件的预测（正如其他预测一样不可能以确切的数字来表明），所以这4类指标都是概

率量。也就是说，对未来随机事件的描述，只能根据各种可能性的均值和机率来说明。因而也确定了在可靠性理论中概率论所具有的突出地位。

## 第二节 电力系统可靠性指标

电力系统是由发电机、变压器、输电线路、开关等主要元件组成的。在可靠性研究中通常分为发电系统、输电系统和配电系统 3 大部分。电力系统的任务是向用户提供连续不断的合乎质量的电能——不论是工业用电或生活用电都要求有很高的可靠性。为此，电力系统的规划设计、运行和维修均把可靠性列为重要标尺之一。但令人遗憾的是，长久以来并没有一个定量标准和检验方法，而只是凭借设计和运行人员的经验来衡量。随着电力系统发展规模的越来越大，凭借经验进行判断，做出决策，变得越来越困难。因此，近20a来许多国家特别注意研究可靠性分析的定量方法和制定能充分反映影响系统可靠性诸因素的指标。

如上所述，用户对供电的要求，一是保证电能的质量（频率和电压须保持在规定的偏差之内）；二是能连续不断地供电。前者一般在潮流计算中解决，后者主要是在可靠性计算和分析中确定。因此，电力系统的可靠性指标主要是以负荷是否得到充分的电力供应作为判据。为了适应电力系统的特点，已提出并得到应用的可靠性指标有：

电力不足概率（LOLP）——指系统负荷（一天中最大负荷）超过系统中有效发电容量的概率。

电力不足频率（FLOL）——单位时间（一般为一年）系统用户平均停电的次数。

**电力不足持续时间 (DLOL)** ——在指定的时期内, 用户停电的平均持续时间。

**电力不足期望值 (LOLE)** ——在研究的时间内, 由于供电不足而产生的负荷停电时间 ( $d$ ) 的均值。

**电量不足期望值 (EENS)** ——在研究的时间内, 由于设备随机停运所造成负荷损失的电量期望值。

这些指标的定义和计算方法在以后的章节里还要讨论。由于电力系统供电问题的复杂性, 在分析其可靠性时, 往往不是固定使用一个指标, 而是根据问题的性质选择其一或两个及以上的指标。

### 第三节 电力系统可靠性问题研究的方法

电力系统可靠性问题的研究, 是对整个系统(发电系统、输电系统和配电系统)进行可靠性分析。遗憾的是, 由于电力系统结构过于庞大和复杂, 迄今只能把发电系统、互联系统、输电系统和配电系统分割开来进行可靠性问题的研究, 而未能进行统一的计算。本书各章也是这样来讨论的。

电力系统可靠性问题的研究有两方面的目的: 一是为电力系统的发展规划而进行长期可靠性估计; 二是为制定每天或周运行计划而进行短期可靠性预测(包括评价系统的安全性以及考虑突然扰动的影响)。这两类问题研究所需要的数学模型和计算方法是很不相同的。目前对长期可靠性估计的研究已达到实用阶段, 并在许多国家广为应用, 而对短期可靠性的预测还处于探索阶段而不够成熟。因此本书暂未包括这一内容。

提高系统可靠性的途径, 一是提高组成系统各元件的可

可靠性，二是增加冗余度。发电系统的冗余度表示，系统中安装的发电机容量要大于系统负荷，这就是所谓备用容量。大家都知道，没有备用容量的电力系统供电是不可靠的。输、配电系统的冗余度表示，输、配电线路的传输容量要大于负荷，而且在一条（或两条）线路发生故障或计划维修而退出运行时，其他线路不致过负荷。由此可见，系统可靠性总是和冗余度联系在一起的（也是和经济性密切相联的，本书暂不讨论电力系统可靠性和经济性的关系问题）。

目前研究电力系统可靠性有两种基本方法：一种是解析法，另一种是模拟法。这是两个完全不同的研究方法——解析法是将元件或系统的寿命过程加以合理的理想化，并用一数学模型来描述这一寿命过程，而后通过计算机运算程序求解，得出所要求的可靠性指标；模拟法是在计算机上模拟上述寿命过程的实际现实，并通过对此模拟过程进行若干时间的观察，估计所要求的可靠性指标。因此，模拟法是把过程当作系统的真实试验来处理。本书将在最后一章讨论电力系统可靠性研究的模拟法，其他章均为解析法。

## 第二章 预 备 知 识

如前所述，可靠性是应用概率这一数学概念来定义的。实际上，为了考察呈随机现象的系统可靠性，只能根据概率法则来建立有关的数学模型和进行必要的计算。因此，为了更好地理解本书以后各章的内容，首先将概率数学中的有关基本理论作一扼要的叙述。

### 第一节 随机事件的概念

自然界的现象根据其在一定条件下是否出现，可以分为3类：必然出现的称为必然事件（如在1标准大气压下，水冷到 $0^{\circ}\text{C}$ 必定结冰）；必然不出现的称为不可能事件（如同性电荷互相吸引）；可能出现也可能不出现的称为随机事件（如在某一特定时刻电力系统中的故障）。而概率论研究的对象就是随机现象（事件）的规律性。

实践证明，虽然随机事件似乎具有复杂与紊乱性，但观察大量同类随机事件后，通常总可揭露出一种完全确定和简单的规律性。这种类型的特殊规律，称为统计规律。例如，在一定长时间内进行观察，电力系统中某一设备发生故障的次数或电力系统负荷的变化都具有稳定的统计规律（因此可以对它们进行估计或预测）。事实上，正是这种集体随机事件的稳定统计规律，才确定了概率方法的应用基础（由于概率论研究的对象总是随机事件，所以以后就简称为事件）。



事件通常是通过随机试验来观察的。所谓随机试验是指不能正确预测它的结果，而在相同条件下可以重复进行的试验。例如，我们将“对两条输电线的运行状态进行观察”作为随机试验，则一次随机试验观察的结果称为一个基本事件，如“两条输电线都处于工作状态”（用 $U$ 表示工作状态）或“两条输电线都处于停运状态”（用 $D$ 表示停运状态），都是基本事件。某一随机试验可能出现的全体基本事件的集合，通常叫做样本空间（显然，样本空间是必然事件）。例如前例中的样本空间 $\Omega$ 由4个基本事件组成，即

$$\Omega = \{(1U, 2U), (1U, 2D), (1D, 2U), (1D, 2D)\} \quad (2-1)$$

一般我们研究的事件，总是由若干基本事件组成的复杂事件。例如，我们设前例中两条输电线中只要任一条在工作即属系统正常。则“系统正常”这一事件 $A$ 由下列基本事件组成：

$$A = \{(1U, 2U), (1U, 2D), (1D, 2U)\} \quad (2-2)$$

同理，如设保持系统正常必须两条输电线工作，则

$$B = \{(1U, 2D), (1D, 2U), (1D, 2D)\} \quad (2-3)$$

表 2-1 事件与集合的对应关系

事 件	集 合
基本事件	集合中的元素
样本空间	全 集
随机事件	全集中的子集
必然事件	全 集
不可能事件	空 集