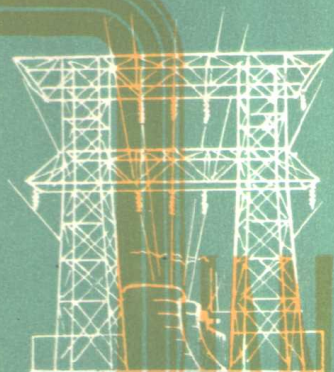


电力系统可靠性 原理和应用

郭 永 基



DIANLI XITONG KEKAOXING DE

YUANLI HE YINGYONG

清华大学出版社

72.185

8602044

电力系统可靠性原理和应用

上 册

郭永基 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是根据作者在清华大学从事电力系统可靠性的教学和科学研究及研究生培养等工作的经验和成果,结合近年来可靠性技术的发展编写而成的。全书分上、下两册共有十三章。上册着重讲述电力系统可靠性的基本理论和分析方法。下册着重讲述可靠性理论在电力系统各个环节、各个方面的具体应用,并介绍可靠性经济学的基本内容和电气元件可靠性数据的统计方法。

在上册的第一章介绍了电力系统可靠性的基本概念,不可修复元件和可修复元件的分析方法。第二章介绍了串联系统、并联系统、 $k/n(G)$ 系统等基本可靠性模型,介绍了用最小路集和最小割集分析通用网络系统可靠性的方法。第三章侧重讨论了故障树分析法和故障模式、后果和危险度分析法,并介绍了用结构函数分析计算可靠性的方法。第四章介绍了马尔柯夫过程和马尔柯夫链的基本概念和基本方程。第五章着重介绍马氏过程在电力系统可靠性估计方面的具体应用以及频率及持续时间法,状态合并法,最小割集状态法等。

本书上册可作为高等院校电力有关专业本科的电力系统可靠性的教本或参考书。全书上下两册则可作为电力有关专业研究生教本或参考书,并可供从事电力工程及电气设备制造工程的工程技术人员和教师参考。

电力系统可靠性原理和应用

郭永基 编著

*

清华大学出版社出版

北京 清华园

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: $11 \frac{1}{4}$ 字数: 288 千字

印数: 0—20000

书号: 15235·135 定价: 1.90元

前 言

可靠性技术是在第二次世界大战后首先从航天工业和电子工业发展起来的,目前已渗透到宇航、电子、化工、机械等许多工业部门。可靠性技术渗透到电力工业和电工设备制造业始于六十年代中期,以后发展得非常迅速,逐步形成了电力系统可靠性这门崭新的学科。电力系统的功能是向用户尽可能可靠地经济地提供合格的电能,它的可靠性可定义为向用户提供质量合格的、连续的电能的能力,这种能力通常用概率表示。所谓质量合格,就是指电能的频率和电压必须保持在规定范围以内。

自从1970年比灵顿发表第一部电力系统可靠性的专著——《电力系统可靠性估计》以来,许多有关电力系统可靠性的书刊相继问世,内容极为丰富,但是适合于我国高等院校电气工程有关专业的师生和科学技术人员参考的书刊仍然不多。

1980年9月至11月作者为水电部在北京举办的“全国第一届电力系统可靠性及最优控制理论”学习班上讲授电力系统可靠性时,首先编写了“电力系统可靠性理论和应用”的讲义,并先后在北京电机工程学会,浙江省电机工程学会,辽宁省电机工程学会,吉林省电机工程学会作为教材用过几遍。自1981年起,清华大学电机系开设了电力系统可靠性的选修课,随后又开始招收了电力系统可靠性方面的研究生。考虑到近二十年来可靠性技术迅速发展的状况,考虑到我国高等教育和科学技术迅速发展的需要,以及在职工程技术人员学习新技术进行知识更新的需要,深感有对上述讲义进行修改充实的必要。本书正是在这种情况下,总结了作者教学经验和科学研究成果编写而成的。

目前,利用可靠性理论分析电力系统可靠性的书籍日益增多,但是关于如何把数学理论分析与解决工程实际问题结合好的书籍仍显不足。在编著本书时,作者力求把可靠性基本理论和分析解决工程问题结合起来,既注意提高理论水平,又注意解决工程问题。在讨论系统可靠性的基本分析方法时,为了使读者能够得到较为清晰的概念和培养应用理论的能力,作者选择了具有不同特点的例题进行讲述,以期读者通过典型问题的分析,体会和掌握电力系统可靠性的分析方法。

本书共十三章,分上下两册出版。上册共五章,着重讲述可靠性的基本理论和分析方法。第一章介绍了电力系统可靠性的基本概念,研究电力系统可靠性的任务和意义以及不可修复元件和可修复元件的分析方法和基本的可靠性指标。第二章较系统地介绍了逻辑代数的基本概念和运算方法,介绍了串联系统、并联系统、 $k/n(G)$ 系统等基本可靠性模型,介绍了最小路集、最小割集的基本概念以及运用它们分析计算通用网络系统可靠性的基本方法。第三章侧重讨论了故障树分析法和故障模式、后果和危险度分析法。第四章介绍了马尔柯夫过程和马尔柯夫链的基本概念和基本方程式,讨论了瞬态状态概率和平稳状态概率的求解问题。在第五章中,应用马尔柯夫过程分析了可修复系统的可靠性,介绍了频率及持续时间法,状态合并法,最小割集状态法,状态空间截断法,这些方法是运用马氏过程解决电力系统可靠性问题的具体发展。

下册共分八章,着重讲述了如何运用可靠性的基本理论分析解决电力系统有关问

题。因为电力系统包括的内容太多,在研究可靠性时,我们把电力系统分成若干子系统。电源系统,输电系统,配电系统,电气主接线系统等都是子系统。第六章介绍了输电线的可靠性。因为输电线是露天的,所以在建立输电线的可靠性模型时,特别要考虑天气的影响,这是研究输电线可靠性的特点。第七章介绍了电气主接线系统的可靠性。在这一章中引入了美国和苏联的一些研究成果,例如用于分析主接线可靠性的逻辑表格法,逻辑代数法以及最小路集法。第八章介绍了电源系统的可靠性,其中包括停运容量概率表的建立,LOLP法,频率持续时间法(F&D法)。第九章介绍互联电力系统的可靠性。第十章介绍了配电系统的可靠性,包括配电系统的可靠性指标,配电系统的可靠性模型。第十一章介绍了大电力系统可靠性的估计方法。第十二章介绍了可靠性经济学的基本内容,其中包括停电损失的估计,可靠性与经济性综合评定的方法。第十三章介绍了电气元件可靠性参数的统计方法,包括随机变量分布的检验方法和参数的点估计和区间估计的基本方法。

本书主要是针对电力有关专业研究生学习的需要而编著的,同时考虑了大学本科学生学习的要求以及在职工程技术人员的学习要求。因此,在编著本书的过程中,力求由浅入深,以便使具有一定的概率论数理统计和电力系统基础知识的高年级大学生以及在职工程技术人员可以阅读。书中各章均有习题并附有习题答案,便于读者巩固所学知识,检查学习效果。

在编著本书的过程中,作者曾参阅和利用了已有著作的结果,其中的一部分已列入书末的参考文献,以便读者了解本书内容的主要来源和进一步查阅某些问题,同时也表示对原著作者的感谢。

在编著本书的过程中,电机系的领导给予了全面支持和帮助。黄眉教授、孙绍先教授给予了指导。研究生延发龙参加了部分章节的校阅和部分习题答案的整理,在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限和时间仓促,书中还会有一些缺点和不足,敬请读者批评指正。

编著者

1983年8月10日

于北京清华大学

目 录

第一章 电力系统可靠性的基本概念和主要指标	1
§ 1.1 什么是电力系统可靠性	1
§ 1.2 元件和系统	5
§ 1.3 可靠性指标	6
§ 1.4 不可修复元件的可靠性	7
§ 1.5 可修复元件的可靠性	12
§ 1.6 可修复元件各指标间的关系	18
习题	21
第二章 不可修复系统的分析	23
§ 2.1 概述	23
§ 2.2 集合	24
§ 2.3 串联系统与并联系统分析	30
§ 2.4 $k/n(G)$ 系统	38
§ 2.5 应用布尔展开定理分析复杂系统的可靠性	39
§ 2.6 应用全概率公式分析复杂系统的可靠性	41
§ 2.7 用最小路集法求系统的工作概率	43
§ 2.8 用最小割集法求系统的故障概率	52
§ 2.9 可靠度分配	61
习题	64
第三章 故障树分析法和故障模式、后果分析法	97
§ 3.1 概述	67
§ 3.2 FTA 法的基本实施步骤	67
§ 3.3 用结构函数描述网络系统	75
§ 3.4 用结构函数描述故障树	81
§ 3.5 故障模式和后果分析法 (FMEA)	86
习题	90
第四章 马尔柯夫过程	91
§ 4.1 随机过程的概念	91
§ 4.2 马尔柯夫过程	94
§ 4.3 应用马尔柯夫过程求可修复元件状态概率的一般方法	99
§ 4.4 马尔柯夫链	107
习题	115
第五章 状态空间分析法	117
§ 5.1 概述	117
§ 5.2 频率和持续时间法	118
§ 5.3 吸收状态及平均首次故障时间	125
§ 5.4 状态的合并	131

§ 5.5 非指数分布的修复时间	136
§ 5.6 故障后果分析法	141
§ 5.7 状态枚举法	144
§ 5.8 状态空间截断法	144
§ 5.9 最小割集状态法	150
§ 5.10 储备系统的分析	157
§ 5.11 不可修复系统的分析	160
§ 5.12 网络法和状态空间法的比较	163
习题	163
附录一 上册部分习题答案	166
附录二 主要可靠性名词中英俄文对照表	170
参考文献	173

第一章 电力系统可靠性的基本 概念和主要指标

§ 1.1 什么是电力系统可靠性

一、可靠性工程

可靠性 (Reliability) 是指一个元件、设备或系统在预定时间内, 在规定的条件下完成规定功能的能力。可靠度 (Reliability) 则用来作为可靠性的特性指标, 表示元件可靠工作的概率。可靠性贯穿在产品 and 系统的整个开发过程 (包括设计、制造、试验、运行、管理等环节), 形成可靠性工程这门新兴学科。可靠性工程涉及元件失效数据的统计和处理、系统可靠性的定量评定、运行维护、可靠性和经济性的协调等各方面, 是一门边缘学科, 它具有实用性、科学性和时间性三大特点。实用性是指可靠性工程从它诞生开始, 就和工程实践紧密联系与结合, 具有强大的生命力。科学性是指可靠性工程有一整套独特的科学理论和方法。时间性是指可靠性存在于产品或系统的整个开发过程, 不论在设计阶段、研制阶段、制造阶段、应用阶段可靠性都在起作用。如果在设计阶段不考虑可靠性, 到制造阶段就会出现事倍功半的情况。

把可靠性工程的一般原理和方法与电力系统中的工程问题相结合, 便形成了电力系统可靠性, 这是六十年代中期以后才发展起来的一门新兴应用科学, 它渗透到电力系统的规划、设计、运行和管理等各个方面。

二、研究电力系统可靠性的必要性和迫切性

电力系统可靠性蓬勃发展的主要原因有下述两个方面:

1. 电力系统不断向高电压、远距离、大容量方向发展, 在提高经济性的同时, 安全可靠的问题也突出起来。从七十年代初期以来, 许多国家的大电网相继发生重大事故, 引起大面积长时间停电, 不但造成巨大的经济损失, 而且危及社会秩序。因此, 定量评定和改善电力系统的可靠性便越来越受到人们的重视。下面举几个国内外发生的事故实例。

(1) 美国 1977 年纽约市大停电

美国纽约市电力公司供电区域包括纽约市五个区及北面的威斯彻斯特县, 共 1550 平方公里, 人口 832 万。事故前总负荷 613 万千瓦。供电线路包括 345 千伏 4 条、230 千伏 1 条和 138 千伏联络线 3 条, 并有备用容量 202 万千瓦。1977 年 7 月 13 日下午 8 点 37 分和 8 点 55 分 (相隔 18 分), 两次雷击相继发生在 345 千伏同杆双回线路上, 使 4 条 345 千伏线路跳闸。由于母线方式和继电保护有问题, 有的线路未进行重合闸或重合闸不成功, 引起其他对外联络线路严重过负荷, 陆续跳闸, 扩大了事故, 最后又因一系列设备和装置故障, 造成全市大停电。停电时间长达 4.5~25 小时, 使纽约市出现一片

混乱，损失惨重。

(2) 法国 1978 年大停电

1978 年 12 月 19 日上午 8 点，法国用电负荷达 3720 万千瓦，其中从外国输入 340 万千瓦，负荷已超过预安排值。当时因部分发电机强迫停运，出现低电压运行局面。运行人员曾采取提高电压和减轻线路负荷的措施，但无效，未减去负荷。结果，当比利时联络线路跳开后，造成全法国电网瓦解。法国大部分地区停电，停电负荷达 2900 万千瓦，占全国的 78%，四小时后电网才恢复正常。

(3) 我国湖北省 1972 年大停电

1972 年 7 月 27 日，湖北电网约有 200 万千瓦左右的负荷。丹江水电厂因继电保护误动，使 15 万千瓦的发电机误跳，引起系统周波、电压急剧下降，并出现强烈振荡。青山等火电厂因厂用母线电压太低，影响锅炉不能上水，扩大了事故。全省停电达十几小时，损失极大。

为了预防这类事故的发生，电力系统可靠性的研究势在必行。特别是随着火电机组单机容量不断增大，大型机组强迫停运率随之上升，可靠性研究更加迫切。

强迫停运率 (Forced Outage Rate) 是衡量机组可靠性的一个重要指标，它的定义是：

$$\text{强迫停运率 (FOR)} = \frac{\text{强迫停运小时}}{\text{运行小时} + \text{强迫停运小时}} \times 100\%$$

在美国，爱迪生电气学会 (The Edison Electric Institute) 和联邦电力委员会 (The Federal Power Commission) 都对大机组的可靠性做过研究工作。根据他们的研究成果，我们可以画出强迫停运率曲线如图 1.1-1。图中曲线 2 是联邦电力委员会 1963 年对 1970 年大容量机组可靠性的预测值。曲线 1 是爱迪生电气学会实地统计到的美国 1960~1969 年间大容量机组 FOR 实际值。从图中明显看出，随着单机容量的增大，强迫停运率直线上升，因此可靠性的研究显得更加必要和迫切。可以说，电力系统可靠性这门科学的形成和发展是电力工业本身发展的客观规律所决定的。

2. 其他工业部门对可靠性工程的研究和应用所取得的成果，推动了电力系统可靠性的发展。例如航天工业、电子工业、化学工业、原子能工业、机械工业等都在研究和应用可靠性技术方面取得了积极的成果，并且分别总结出一套保证元件和系统有效地完成其预定功能的科学方法。所有这些极大地推动了电力系统可靠性的发展。

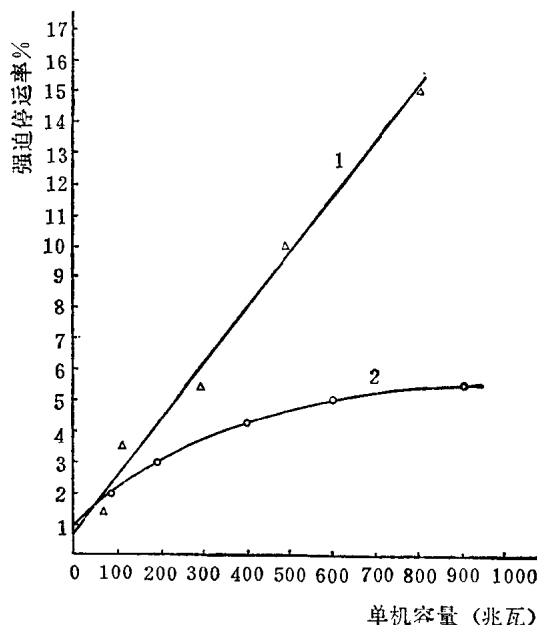


图1.1(-1) 强迫停运率与单机容量的关系

三、可靠性工程在电工领域中的应用简况

电工领域包括两个大的方面：电力工业和电气设备制造工业。可靠性工程在这两大工业部门都有着广泛的应用。见图 1.1-2。

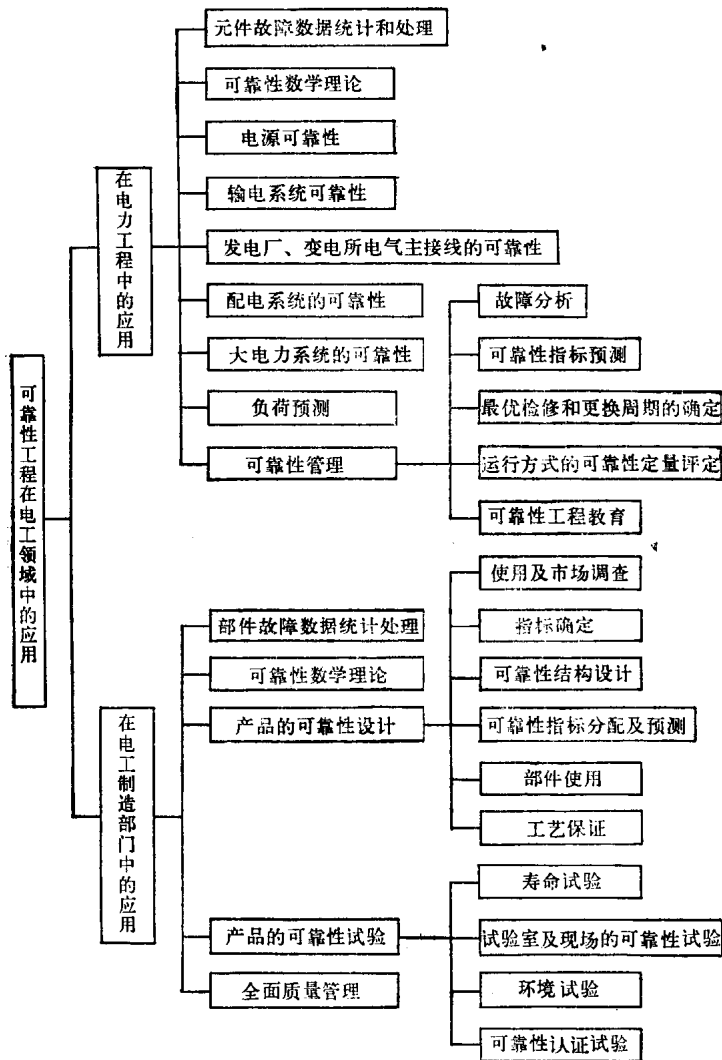


图1.1-2 可靠性工程在电工领域中的应用

四、研究电力系统可靠性的任务

电力系统可靠性可定义为向用户提供质量合格的、连续的电能的能力，而能力通常用概率表示。所谓质量合格，就是指电能的频率和电压必须保持在规定的范围以内。电力系统可靠性工程从各个方面、各个环节研究系统的故障现象，提出定量评定指标和提高可靠性的措施。具体地说，本学科的主要任务如下：

1. 研究单个元件和由元件组成的系统的计算模型，定量计算指标，研究如何应用统计的方法去获得元件的可靠性指标。

2. 鉴于电力系统的范围很大, 在研究可靠性时要根据不同环节(发电、输电、配电)的要求, 突出主要矛盾, 构成不同环节的可靠性数学模型和计算方法。例如电源可靠性主要研究发电机组和负荷之间的可靠性, 它假定输电环节的可靠度等于1。研究发电厂和变电所的电气主接线的可靠性则把组成主接线的断路器、变压器、母线等作为元件, 这些元件的总体便构成系统。这样一来, 电力系统可靠性便形成若干主要分支, 如: 电源可靠性、输电线路可靠性、电气主接线可靠性、配电系统可靠性等等。描述电力系统不同环节的可靠性的性能指标是不同的, 可靠与不可靠的标准也是有差别的。

3. 寻找提高电力系统可靠性的途径和方法。主要的有:

(1) 尽可能采用可靠性高的电力系统元件(如发电机、变压器、断路器等)。为了保证电力系统元件的可靠性, 需要进行产品的可靠性设计, 在生产过程中要实行全面质量管理(Total Quality Control), 严格进行部件筛选和检验, 采用标准化生产等等。在管理方面, 应坚持设计、生产、使用三方的信息交流, 还要注意对生产人员进行可靠性工程的宣传教育。

(2) 在保证系统能够完成预定功能的前提下, 把系统的复杂性降至最低限度。实际上, 非工作所需元件和不必要的复杂结构只会增加系统故障的概率。

(3) 在系统结构上采用贮备。典型的做法有工作贮备及非工作贮备。

(4) 进行修理。由工程师和工厂对故障元件进行修理, 以恢复元件的功能。

(5) 维护。定期地用新元件来替换旧元件, 使系统处在完成预定功能的良好状态。

4. 研究可靠性和经济性的最佳搭配。对元件来说, 要努力做到在规定的重量、体积或费用的条件下最大限度地提高系统的可靠性。或者, 在满足规定的可靠度的前提下尽量降低重量、体积、费用或其他要求。

在决定系统某一阶段的可靠性水平时, 考虑的也是较高的可靠性增益与为此而付出的成本之间的最佳平衡。系统要有较高的可靠度就要求安装可靠性高的元件或在结构上采用更多的冗余, 这样势必提高一次投资与运行费。反之, 如果系统的可靠性太低, 则将引起停电损失的增加, 而停电损失不仅包括停供负荷造成的工厂年总收入的净损失, 也包括工人窝工、产品报废造成的损失。一般说来, 停电损失是可靠度的减函数。图1.1-3表示一个系统的可靠度与成本的关系。

其中曲线C表示一次投资与可靠度的关系; 曲线D表示停电成本与可靠度的关系; $C+D$ 表示系统总成本与系统可靠度的关系。后者是一条下凹曲线, 有一个经济上的最佳点, 这就是系统可靠度的目标值。

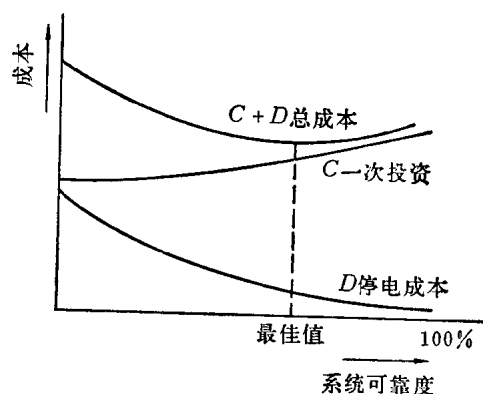


图1.1-3 系统可靠度与成本的关系

五、研究电力系统可靠性的意义

1. 提高电力系统元件(发电机、变压器、断路器等)的可靠性是提高电力系统可靠性的重要措施。因此, 需要开展关于产品的可靠性的研究, 要用可靠性理论指导产品

的设计、制造、使用的全过程。

例如,对于我国目前生产的断路器可靠性不高的状况,可以应用可靠性工程的方法加以改进。在这方面浙江省电力局提供了经验,他们专门成立了可靠性工作组,从1981年起选择了奉化和宁西变电所进行元件可靠性数据统计,积累了大量数据。根据他们的统计,国产SW₆-220断路器的平均故障率为1.08次/年;平均检修率为0.367次/年;平均无故障工作时间为2168.07小时。从另外的角度看,在断路器故障中,本体电气绝缘占2%;电气控制回路占12.2%;本体漏油占18.4%;操作机构或液压系统占62.2%;自然灾害占2%;人为过失占3.1%。通过开展元件的可靠性指标的统计,定量而科学地反映出元件的总体质量和工作能力,对促进运行部门和制造部门改进工作都起了重要作用。

2. 在电力系统中,应用可靠性技术的过程也是不断提高经济效益的过程。

以东北电网为例。1981年东北电网部属火电厂设备的可用率为78.92%,这个数字低于国际的一般标准(美国同年火电可用率为83.3%)。如果经过努力,将可用率提高2%,就相当于建成一个11万千瓦的发电厂。那么,每天便可多发264万度电,增加营业收入折合人民币23.76万元^[1],增加社会产值折合人民币1716万元^[2]。而建造这样一个11万千瓦的火电厂约需投资8800万元^[3]。目前东北电网中20万千瓦的机组已有许多台,一台20万千瓦的机组,强迫停运一天所造成的营业收入损失约为43万元,给社会造成的产值损失约3120万元。以全国为例,目前我国装机容量约6500万千瓦,如果经过努力,将可用率提高2%,就相当于建设一个71.5万千瓦的发电厂,那么每天就可以多发1716万度电,增加营业收入折合人民币154.4万元。对于全年来讲,便可以多发62.63亿度电,增加营业收入折合人民币5.64亿元,即增加社会产值约合187.89亿元^[4]。而建造这样一个71.5万千瓦的火电厂才需投资5.72亿元,所以我们说提高可靠性对提高经济效益是非常重要的。

在国外,例如美国,他们一方面致力于提高已投产的火电发电机组的可用率,同时也注意提高新建火电机组的可用率。美国电力研究协会(EPRI)估计,在今后十年内,如果每年平均提高可用率0.5%(这是可能做到的),那么到1990年共提高5%。如果在1980~1990年十年期间,包括已装和新装的火电和核电平均装机容量为62500万千瓦,当可用率提高后便可少装机3000万千瓦。按平均造价1300美元/千瓦计,则可节省投资400亿美元。由此可见,经济效益还是很大的。

§ 1.2 元件和系统

正如上述已指出的,可靠性是指“系统、设备或元件在规定的条件下和预定时间内完成规定功能的能力”。从这个定义可知,可靠性有四个要素:

1. 对象 要弄清所研究的问题是指元件还是指系统?

注:[1]东北地区及全国均按商业电价0.09元/度计算。

[2]东北地区每度电创造的产值按6.5元计算。

[3]火电造价800元/千瓦,不包括修建煤矿的投资。

[4]全国每度电创造的产值按3元计算。

2. 功能 要弄清元件、系统的功能是什么, 丧失功能又是如何具体规定的?
3. 时间 在研究可靠性时, 对时间要有明确的规定。
4. 使用条件 如户内外、温度、湿度、震动、冲击等, 这些对可靠性都有很大的影响。

研究电力系统可靠性时, 一般把研究对象区分为元件和系统。元件 (Component) 是构成系统的基本单位, 在一个具体的系统中, 元件不能再分割。系统 (System) 是由元件组成的, 它可看成是元件组成的总体。有时, 系统包容的范围太大, 又可分为若干子系统 (Subsystem)。这样划分的结果, 若干元件组成一个子系统, 若干子系统组成一个系统。例如配电系统可以看成是电力系统的一个子系统, 而断路器、线路则是构成该子系统的一些元件。

应该指出, 系统和元件这两个研究对象是相对而言的。在研究配电系统可靠性时, 断路器可作为一个元件考虑, 但在研究一个断路器的可靠性时, 断路器本身就成为一个系统, 而它的导电杆、瓷套管等部件则成为元件。

电力元件能按技术文件规定的参数完成规定功能的状态称为正常状态。故障 (Failure), 或称失效, 是指元件执行其规定的功能的终止。本书中按一般惯例, 把不可修复元件终止执行规定的功能称失效, 把可修复元件终止执行规定的功能称故障。

从可靠性观点来看, 元件可以分为可修复元件 (Repairable Component) 和不可修复元件 (Non-repairable Component) 两大类。如果元件使用一段时间后发生故障, 经过修理 (Repair) 就能再次恢复到原来的工作状态, 这种元件称为可修复元件; 如果元件工作一段时间后发生了故障, 不能修复或虽能修复, 但很不经济, 这种元件称为不可修复元件。从元件发生故障后, 寻找故障部位并进行修理, 直到最后验证已确实恢复到完好状态等等, 这一系列的工作叫做修复。电力元件大部分是可修复元件。由元件组成的系统也可以分为两大类, 即可修复系统 (Repairable System) 和不可修复系统 (Non-repairable System)。如果系统使用一段时间以后发生故障, 经过修复能再次恢复到原来的工作状态, 这种系统称为可修复系统; 如果系统发生故障后, 无法修复或无法恢复到原来的工作状态或这种修复很不经济, 就称这种系统为不可修复系统。电力系统属于可修复系统。

§ 1.3 可靠性指标

一、一般的可靠性指标

可靠性指标是用数值大小来表示可靠性各个方面性质的量, 它既可以从成功的观点出发, 也可以从失败的观点出发。

在可靠性理论中, 一般采用以下可靠性指标 (Reliability indices):

1. 概率, 如可靠度和可用率 (Availability)。
2. 频率, 如单位时间里发生故障的平均次数。
3. 平均持续时间 (Mean durations), 如首次故障的平均时间 (The mean time to the first failure), 故障的平均持续时间 (The mean duration of failures)。

4. 期望值 (Expectations)。如一年中电力系统发生故障的期望天数 (The expected number of days in a year)。

二、电力系统可靠性的一些专门指标

结合电力系统的特点, 还引入一些适合电力系统特点的可靠性指标, 主要是:

1. 电力不足时间概率LOLP (Loss of load probability) 它是在假定日尖峰负荷持续一整天的条件下, 系统负荷需要超过可用发电容量的时间概率的总和。

2. 电力不足时间期望值LOLE (Loss of load expectation)。指在被研究的一段时间内, 负荷需要超过可用发电容量的时间期望值。

3. 电力不足期望值ELOL (Expected loss of load)。指在被研究的一段时间内由于负荷需要超过可用发电容量而引起用户停电的平均值。

4. 电量不足概率LOEP (Loss of energy probability)。指在被研究的一段时间内, 由于供电不足而使用户停电的电量损失的期望值与该时间内用户所需全部电量的比值。

5. 电量不足期望值ELOE (Expected loss of energy)。指在被研究的时间段内, 由于供电不足引起用户停电而损失的电量的平均值。

6. 系统平均停电指标SAIFI (System average interruption frequency index)。它是指系统中运行的用户在一年时间里的平均停电次数。

7. 系统平均停电持续时间指标SAIDI (System average interruption duration index)。它是指系统中运行的用户在一年中经受的平均停电持续时间。

8. 用户平均停电频率指标 CAIFI (Customer average interruption frequency index)。它是指每个受停电影响的用户在一年时间里经受的平均停电次数。

9. 用户平均停电持续时间指标CAIDI (Customer average interruption duration index)。它是指在一年中被停电的用户经受的平均停电持续时间。

10. 平均运行可用率指标ASAI (Average service availability index)。它是指一年中用户的可用小时数与总的要求的用户小时数之比。

§ 1.4 不可修复元件的可靠性

不可修复元件的寿命(Life)是指从使用起到失效为止所经历的时间。因此, 描述这类元件最重要的量是寿命 T 。 T 是一个连续型随机变量, 服从一定的概率分布。 T 的累积概率分布函数 (Cumulative probability distribution function) 简称 CDF, 定义为:

$$F(t) = P\{T \leq t\} \quad (1.4-1)$$

t 为在规定条件下预定元件执行其功能的时间

它的概率密度函数 (Probability density function) 简称 PDF, 定义为:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P\{t < T \leq t + \Delta t\} \quad (1.4-2)$$

以上两个函数是由以下两个方程式联系的:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

一个元件的可靠性,是指一个元件在规定的时间内,在规定的条件下能执行规定功能的能力。这一术语也可以用来作为可靠性的特性指标,称为可靠度,表示元件能执行规定功能的概率。可靠度记为 $R(t)$,就是在给定环境条件下时刻 t 前元件不失效的概率,它可以用下式表示:

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.4-3)$$

$R(t)$ 是 t 的函数,又称可靠度函数(Reliability function)。当元件开始使用时,完全可靠,故 $t=0$, $R(t)=1$ 。当元件工作到无穷大时间之后,完全损坏,故 $t=\infty$, $R(t)=0$ 。

$R(t)$ 与积累概率分布函数的关系是:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.4-4)$$

$$R(t) + F(t) = 1$$

$F(t)$ 又可解释为元件的损坏程度,称元件的故障函数或不可靠函数。并且, $t=0$, $F(t)=0$, $t=\infty$, $F(t)=1$ 。

另一个描述元件可靠性的函数是故障率函数(Failure rate function) $h(t)$ 。在时间间隔 Δt 中, $h(t)\Delta t$ 是一个元件在时刻 t 以前正常工作的条件下,在 Δt 期间发生故障的概率,用公式表示为

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[\text{在}(t, t+\Delta t)\text{期间故障} | t\text{以前正常}] \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T \leq t + \Delta t | T > t] \end{aligned} \quad (1.4-5)$$

根据条件概率的基本公式

$$P[A|B] = \frac{P[A \cap B]}{P[B]} \quad (P[B] \neq 0)$$

上式可写为

$$\begin{aligned} P[t < T \leq t + \Delta t | T > t] &= \frac{P[(t < T \leq t + \Delta t) \cap (T > t)]}{P[T > t]} \\ &= \frac{P[t < T \leq t + \Delta t]}{P[T > t]} = \frac{f(t)\Delta t}{R(t)} + O(\Delta t) \end{aligned}$$

将此式代入(1.4-5)可得

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1.4-6)$$

$$\text{因为 } \frac{d}{dt} \ln R(t) = \frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{f(t)}{R(t)}$$

$h(t)$ 可表达为

$$h(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (1.4-7)$$

$h(t)$ 是元件在时刻 t 以前正常工作,在 t 后单位时间里发生故障的条件概率密度。

由式(1.4-7)可得:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t h(t) dt\right]$$

若 $h(t) = \lambda$ ，即元件的故障率是常数，则

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

即一个元件的故障率是恒定的，那么它的寿命服从指数分布。对于寿命服从指数分布的元件，如果元件在时刻 t 以前正常工作，则在 $(t, t + \Delta t)$ 期间故障概率是一样的，只有指数分布具有这种性质。

我们也可从另一个角度来理解指数分布的特点。若随机变量 T 的分布函数 $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ ，那么有如下关系：

$$\begin{aligned} P\{T > s + t | T > s\} &= \frac{P\{(T > s + t) \cap (T > s)\}}{P\{T > s\}} \\ &= \frac{P\{T > s + t\}}{P\{T > s\}} = \frac{e^{-(s+t)}}{e^{-s}} = P\{T > t\} \quad (1.4-8) \end{aligned}$$

式 (1.4-8) 表明，如果一个元件的寿命服从指数分布，那么元件在 s 以前可靠工作的条件下，在 $s + t$ 期间仍然正常工作的概率等于元件在时刻 t 正常工作的概率。与过去的工作时间 s 无关，这种特点称为无记忆性，只有指数分布具有这种特点。

不可修复元件的第三个可靠性指标是平均无故障工作时间 (Mean time to failure)，缩写为 MTTF，它是寿命 T 的数学期望值：

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t dR(t) \\ &= -tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt \end{aligned}$$

因为 $R(0) = 1$ ， $R(\infty) = 0$ ，所以上式中第一项等于 0，故可得：

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (1.4-9)$$

当故障率为常数， $R(t) = e^{-\lambda t}$ ，则可得：

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.4-10)$$

下面我们讨论元件的故障率曲线。假定一个由相同不可修复元件组成的母体，从其中取出一个容量非常大的子样在 $T = 0$ 时投入工作 (T 表示元件的年龄)。母体的故障率是随时间变化的曲线，如图 1.4-1 所示。故障率曲线通常按它的变化趋势划分为三个时期：元件投入运行的初期故障率由高到低，说明元件发生故障的机会逐渐减少；接着是恒定故障率阶段，元件在这段时间里发生故障的机会是相等的；最后是故障率上升的阶段，表明随着时间的推移，元件发生故障的机会增加。

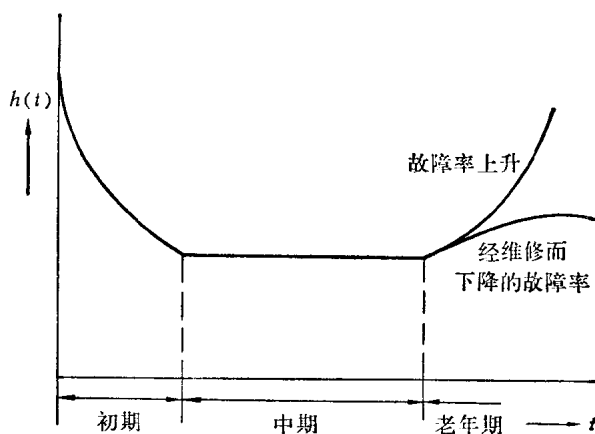


图1.4-1 故障率曲线

可选用适当参数的威布尔分布作为故障率曲线，表达式为：

$$h(t) = Kt^{\beta-1} \quad t > 0 \quad (1.4-11)$$

式中 K 和 β 是常数。当 $\beta > 1$ 时，函数具有上升的特性； $\beta = 1$ 时，函数是常数；当 $0 < \beta < 1$ 时，函数具有下降的特性。式(1.4-11)的图形就是图1.4-1。故障率曲线分初期(Initial period)、中期(Mid-period)和老年期(Old age period)。初期又称调整期(Debugging period)，这个期间故障率下降，发生故障的原因是设计的错误和工艺不完善而引起的。这个时期运行人员的主要任务是找出不可靠的原因，使故障趋于稳定。中期又称偶然故障期(Chance failure period)，这个期间故障率低且为常数，故障的产生是随机的。老年期又称耗损故障期(Wear-out failure period)，在此期间，元件已经老化，寿命趋于衰竭，因而故障率上升。若能在这个时期到来之前维修设备就可以将故障率降下来。

图1.4-1形状似浴盆，故称为浴盆曲线(Bathtub curve)。

当 $h(t) = \lambda$ 时

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.4-12)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.4-13)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1.4-14)$$

这表明故障率为常数时，寿命 T 服从指数分布。

例1.4-1 表1.4-1是对250只三极管做试验得到的失效数据，失效是在试验时发生的。要求从这些数据计算不可靠度 $F(t)$ ，故障率 $h(t)$ ，故障密度 $f(t)$ 和MTTF。

表1.4-1 三极管的失效数据

无故障工作时间 t (分)	积累失效数 $n(t)$	无故障工作时间 t (分)	积累失效数 $n(t)$
0	0	230	143
20	9	400	160
40	23	900	220
60	50	1200	235
90	83	2500	240
140	113	2500	250

解：记 N 为受试元件总数

$L(t)$ 为时刻 t 仍然完好的元件数

$n(t)$ 为时刻 t 以前失效的元件数

$n(t + \Delta t)$ 为时刻 $t + \Delta t$ 以前失效的元件数

$F(t)$ 为一个元件在时刻 t 以前失效的概率

$F(t + \Delta t)$ 为一个元件在时刻 $t + \Delta t$ 以前失效的概率

根据定义，

$$R(t) = \frac{L(t)}{N} \quad (1.4-15)$$

$$F(t) = 1 - \frac{L(t)}{N} = \frac{1}{N}(N - L(t)) \quad (1.4-16)$$

$$f(t) = \frac{1}{\Delta t} [F(t + \Delta t) - F(t)] \quad (1.4-17)$$