

莫汉·木纳辛格 著

毛钧焘 译



电力系统 可靠度和计划的经济性 理论和实例分析

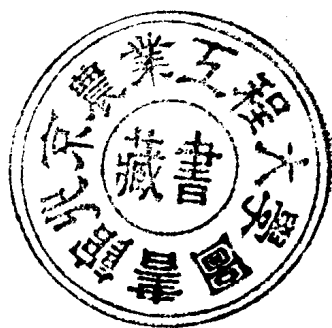
水利电力出版社

电 力 系 统

可靠度和计划的经济性

理 论 和 实 例 分 析

莫汉·木纳辛格 著 毛钩焘 译



水 利 电 力 出 版 社

20035/11

内 容 提 要

本书主要是广泛分析电力系统最优可靠度的有关问题,要求使包括供电成本与停电损失费用在内的社会总费用最低,作为最优可靠度计划设计的准则。同时还讨论了负荷预测、系统扩建计划、影子价格、最优电价政策等题目。全书分为两个部分。第一部分介绍了有关理论,包括可靠度优化方法,各种用户的停电损失,电力系统计划和供电成本等。第二部分为实例分析,以巴西卡斯卡佛尔市配电系统扩建为例,进行具体分析。附录中有可靠度分析的基本数学模型,影子价格的概念,对用户停电损失的调查表等。本书是世界银行研究出版的丛书之一。

本书可供从事电力系统计划、设计、建设和运行的广大科技人员以及高校师生和研究人员参考。

Munasinghe, Mohan
THE ECONOMICS OF POWER SYSTEM
RELIABILITY AND PLANNING
Theory and Case Study
Johns Hopkins University Press 1977

电力系统可靠度和计划的经济性 理论和实例分析

莫汉·木纳辛格 著 毛钧焘 译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8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 11印张 239千字

1987年2月第一版 1987年2月北京第一次印刷

印数0091—3620册 定价2.60元

书号 15143·6204

前 言

世界银行在评估所资助的投资项目的可行性时，通常采用全国性的观点，即不仅考虑借款单位的供应成本，而且还考虑这些投资对整个经济中的其他个人和企业的影响。由于现代经济越来越依靠电力，电力部门又有资金密集性质，而且发展中国家缺少经济资源，因此世界银行的更广泛关心，除其它方面外，集中于电力供应的提高的单位成本与供电可靠度或质量降低造成用户的损失费用之间的比较分析。

我相信，这本书是全面地和完整地阐述电力系统可靠度这个题目的经济和技术内容的第一本书。它证明，为了尽量扩大电力消费的净社会效益，必须使社会总费用减至最少，这个社会总费用既包括电业当局的供电成本费用，也包括缺电或停电使用户可能遭受的损失费用。这种建立全社会最优可靠度水平的做法，补充了仅按照系统费用最少的传统计划准则。因此，本书提出的方法，不仅对第三世界，而且对发达国家，都是及时的和有关的。

本书是世界银行在能源领域里连续的研究项目的组成部分，因而它与总的努力研究的其它内容互相联系，并对之作出贡献。这样，本书在更广阔的范围内分析了最优系统可靠度这个题目，讨论了一系列有更普遍应用的有关课题，包括负荷预测、系统扩建计划、影子价格和最优电价政策。

伊文思·罗伐尼

世界银行能源处处长

序 言

进行这项研究的最初动力，来自考查发展中国家的电力部门尽可能有效地使用不足的资源的各种机会的需要。世界银行一直通过两个主要途径解决在电力部门经济上有效地使用有限资源的课题。

在负荷侧，进行了边际成本电价的基本研究和实例分析。世界银行目前正在鼓励和帮助第三世界电业当局根据长期的边际成本来提出和实现电价结构。

在供电侧，世界银行研究并促进了系统计划和成本优化技术的采用。这项工作集中于从现有技术中选用的经济原则，而把新设备的研究与发展留给制造厂商和其它机构去做，这些单位有设备条件去对付有关问题。按照这种精神，世界银行的研究项目《城市供电可靠度的标准》（RES 670-67）原来的目的是考查通过改变供电可靠度标准来节约系统费用的可能性，而本书就是源出于此。

过去我从事于最小费用的系统扩建计划工作。由于发展中国家采用的供电可靠度标准通常是随意地借自工业国家，因而使我深感不满。以后，约两年前，当我们在应用最优电价规则方面做工作时，吉勒美·华富特要我注意迄今被忽视的有关系统可靠度的电力经济学的这一方面。他建议，考查一下扩大节省费用的做法可能是令人感兴趣的，这种做法中包括考虑由于可靠度很差和发生停电而产生的停电损失费用。

我感到，扩大研究项目RES 670-67的基本内容，把可靠度标准、系统计划和停电损失等结合起来分析研究，将是合乎逻辑的。理查·希汉是管理研究工作的，他迅速支持了这个意见。分析研究中提出的经济原则是计划电力系统时要尽量减少社会的总费用，其定义为系统费用加停电损失。这个电力系统计划准则要求发展经济上最优的可靠度水平。因此，这个更广泛的准则补充了更传统的只尽量减少电力系统费用来满足给定的（任选的）目标可靠性水平的原则。

这项研究项目的结果也说明了电力经济学不同方面间的密切联系，例如边际成本价格，最优可靠度水平，系统计划等。特别要指出，节省费用很重要，因为最近有一些因素使得发展中国家和发达国家的电力扩建需要有很大的增加。1973年石油输出国家组织提高石油价格，使得人们转向资金更多的水电、煤电和核电发电厂。同时，通过采用更大容量设备来节省资金以及采用先进技术节约资金的可能性已经减少，而农村及其它低用电密度地区的电气化正在加速，这些地区的单位用电量所需的成本是较高的。通过使用前面提到的新分析方法来使社会得到净节约是可能的，这就要求自愿地降低可靠度和系统建设和运行费用，有计划地改进可靠度并减少停电损失费用，或同时采用这两种方法，当然不同地理区域内要分别对待。

尽管本书的实例分析是指一个发展中国家城市的配电系统计划的，但所用的理论和原则是通用的，只要稍加调整就可应用于包括发电和输电系统优化的整个系统计划工作。本方法也适用于发达国家。本研究分析原本是为了改进发展中国家的可靠度标准，因为这些标准原来借自工业国家；但是本研究的结果对发达国家也是有用的。关于最优可靠度水平

的问题，最近受到北美和欧洲的重视，特别是在发生象1977年7月美国纽约市大停电和1978-1979年冬季西欧大面积停电这些重大停电事故以后，更是如此^①。

① 以下对各方面表示感谢的话，从略。——译者

定 义

ARI	<i>Accounting rate of interest</i>	会计利息率
AWG	<i>American Wire Gauge</i>	美国线规
CCL	<i>Critical consumption level</i>	临界消费水平
CES	<i>Constant elasticity of substitution</i>	恒定替代弹性系数
CF	<i>Conversion factor</i>	转换系数
Cr \$	<i>Cruzerio=US\$ 0.081(end 1976)</i>	巴西克鲁赛罗=0.081美元 (1976年末)
DU	<i>Dwelling unit</i>	居住单元
EHV	<i>Extra high voltage</i>	超高压
ESWR	<i>Efficiency shadow wage rate</i>	效率影子工资率
EUSE	<i>Expected unserved energy</i>	预期未供电量
FAD	<i>Frequency and duration of outage</i>	停运频率和持续时间
FC	<i>Factor cost</i>	因数费用
FTER	<i>Free trade exchange rate</i>	自由贸易汇率率
HV	<i>High voltage</i>	高电压
IFC	<i>Idle factor cost</i>	闲置因数费用
LDC	<i>Load duration curve</i>	负荷持续时间曲线

LF	<i>Load factor</i>	负荷率
LOEE	<i>Loss of energy expectation</i>	电量损失期望值
LOLP	<i>Loss of load probability</i>	电力不足时间概率
LRMC	<i>Long-run marginal cost</i>	长期边际成本
MCM	<i>Thousands of circular mills</i>	千圆密尔
MOC	<i>Marginal outage cost</i>	边际停电损失
MRS	<i>Marginal rate of substitution</i>	边际替代率
MSB	<i>Marginal social benefit</i>	边际社会效益
MSC	<i>Marginal social cost</i>	边际社会费用
MSC	<i>Marginal supply cost</i>	边际供电成本
NFC	<i>Nonfactor cost</i>	非因数费用
OC	<i>Outage cost</i>	停电损失
OCC	<i>Opportunity cost of capital</i>	资本的机会成本
CCF	<i>Outage cost function</i>	停电损失函数
OCK	<i>Outage cost per kilowatt-hour lost</i>	每损失 1 kW·h 的停电损失
OE	<i>Outage energy</i>	停电少送电量
OER	<i>Official exchange rate</i>	官方汇兑率
OLSQ	<i>Ordinary least squares (regression)</i>	平常的最小平方差 (回归法)
OR	<i>Outage rate</i>	停运率
PDV	<i>Present discounted value</i>	现在贴现值

<i>R</i>	<i>Reliability level</i>	可靠度水平
<i>R*</i>	<i>Reliability expectation of consumers</i>	用户预期的可靠度
<i>RC</i>	<i>Recovered cost</i>	恢复费用
<i>SC</i>	<i>System supply cost</i>	系统供电成本
<i>SCF</i>	<i>Standard conversion factor</i>	标准转换系数
<i>SER</i>	<i>Shadow exchange rate</i>	影子汇率
<i>SPC</i>	<i>Spoiled product cost</i>	损坏产品的损失
<i>SRMC</i>	<i>Short-run marginal cost</i>	短期边际成本
<i>SWR</i>	<i>Shadow wage rate</i>	影子工资率
<i>TC</i>	<i>Total cost</i>	总费用
<i>RVA</i>	<i>Reactive volt-amps</i>	无功功率 (var)
<i>ELOL</i>	<i>Expected loss of load</i>	预期损失负荷值 (电力不足预期值)

目 录

前言

序言

定义

第一部分 理 论

第一章	目标和方法	3
1.1	方法的提要和结论	4
第二章	可靠度简介	9
2.1	可靠度的概念	9
2.2	可靠度的测量	16
2.3	经济性准则的需要	23
第三章	优化可靠度的方法	32
3.1	模型的特点	32
3.2	可靠度优化计划模型	37
3.3	停电的模型和最优可靠度水平	41
第四章	停电损失的估算 (马克·加勒圣参加)	51
4.1	停电损失的性质	51
4.2	估算停电损失的方法	56
4.3	对过去分析的评论	60
4.3.1	停电损失的测量	60
4.3.2	各类用电户的处理	64
4.3.3	停电损失与停电时间的关系	66
4.3.4	结论	67

第五章	住宅停电损失	72
5.1	家庭活动	72
5.2	损失闲暇的价值	74
5.3	凭经验的估算	79
第六章	工业停电损失	83
6.1	停电损失的种类	83
6.2	损坏产品的价格	84
6.3	闲置因数费用	86
6.4	加班生产费用	88
第七章	其它停电损失	92
7.1	商业用户	92
7.2	公共服务部门	93
7.3	特殊单位	95
7.4	农村用电	97
7.5	派生的影响	98
第八章	电力系统计划和供电成本	100
8.1	投资决策	100
8.2	负荷预测	101
8.3	系统设计和计划	103
8.4	成本费用	114
第九章	影子价格	121
9.1	一般原则	121
9.2	共同计量单位	124
9.3	影子价格的应用	126

第二部分 实例分析

第十章	负荷需量预测 (华尔脱·G·司考特参加)	137
10.1	土地使用和每个地理小块的占用	138
10.2	住宅用电量	144

10.3	工业用电量	148
10.4	其它用电量	148
10.5	负荷需量预测值的汇编	149
第十一章 配电系统长期计划 (华尔脱·G·司考特参		
	加)	151
11.1	配电系统发展的各个阶段	151
11.2	定义和设计准则	152
11.2.1	配电系统	152
11.2.2	配电系统的电压标准	153
11.2.3	配电系统的可靠度准则	156
11.2.4	配电系统的建设设计准则	159
11.3	停运参数	162
11.3.1	过去的停运数据分析	162
11.3.2	负荷持续时间的分析	164
11.3.3	频率和持续时间系数	166
11.4	系统设计	169
11.5	可靠度、线损和系统费用	175
第十二章 停电损失测量 (马克·加勒圣参加)		
12.1	住宅用户	182
12.2	工业用户	188
12.3	其它用户	192
第十三章 配电系统优化和结论		
13.1	用于成本-效益分析的改进结构	196
13.2	停电损失和供电成本的一般考虑	197
13.3	混合系统和最优可靠度水平	202
13.4	社会加权的影响	210
13.5	摘要和结论	212
附 录		218
附录A 可靠度模拟的基本数学概念		218

A.1	概率定律 ¹	218
A.2	离散状态连续转移的马尔可夫过程	219
A.3	蒙特卡罗模型	225
附录B	影子价格概念	229
B.1	转换系数	229
B.2	收入的影响	232
附录C	负荷预测和配电一次模型(华尔脱·G·司考 特参加)	235
C.1	土地使用和人口分布	235
C.2	住宅用户的分配	235
C.3	商业部门的需要	239
C.4	路灯的需要	240
C.5	土地使用和负荷预测	243
C.6	配电一次模型	250
C.7	不同的系统结构	260
附录D	停电损失和供电成本计算	279
D.1	停电损失和少送电量	279
D.2	供电成本和敏感度校核	281
附录E	与过去分析的比较	315
附录F	调查表	320
F.1	住宅用户	320
F.2	工业用户	322
术语汇编		324
参考文献		328

第一部分 理 论

电力工业在二十世纪已成为几乎每个国家的经济中最重要和资金最密集的部门之一。1978年,美国用约 5.6 亿kW 发电设备容量发电2.2万亿kW·h电量,或按人均发电量为10,500kW·h,使其成为世界上最大的和在能源密集方面居第二位的经济¹。美国在1978年投资300亿美元于电力部门²。美国在八十年代的电量需要值可望以每年超过4%的平均速度增长,因此1990年可能需要资金700亿美元³。在发展中国家,1978年的装机容量和发电量分别为2.1亿kW和8200亿kW·h⁴。用电负荷增长速度可望达到每年平均约10%,预计以后十年,每年所需资金约达250亿美元,这将超过这些国家的全部公营部门投资的20%。

供电实际成本在世界范围内不断上涨的趋势大概将继续下去,这是因为负荷在迅速增长,而且在石油危机后发电转向设备更昂贵的烧煤和核电厂,能经济开发的水电资源则越来越少等。此外,进一步采用更大容量设备来减少单位容量投资的机会很少,系统则正在向人口密度较小的地区发展,单位用电量的供电成本较高。

电力部门需要大量投资这点同时表明,即使效率有少量改进,就可产生很大的节约。对于缺乏当地资源和外汇资源的发展中国家,这是尤其重要的。传统的做法是:主要重点放在系统扩建采用最小成本的长期计划,优化短期和中期系统运行,电业部门改进管理水平等,以改进技术上的和财政

方面的效率。这些在供电和负荷方程式中放在“供电侧”的考虑取得了相当大的成功，工程师们通常采用技术上的和财政金融方面的措施来促成这点。最近，电力经济学家已把注意力集中于全国范围内提高经济效率的目标。这些发展将对“负荷侧”产生更大的和重要的影响，主要是通过应用边际成本决定电价的原则来起作用。而对供电侧，接受这些经济观点，将反映于应用经济机会成本。这些费用将用影子价格表示，而不是用实际财务或会计价格表示，因为影子价格是经济资源的真实价格。

参考文献及注释

1. $1\text{GW} = 10^6\text{kW}$, $1\text{tWh} = 10^9\text{kW}\cdot\text{h}$.
2. "Twenty-ninth Annual Electrical Industry Forecast," *Electrical World*(September 15, 1978), pp.61-76.
3. 所有投资均用1978年美元不变价格表示。
4. Edward A. Moore, "Electricity Supply Forecast for the Developing Countries," Energy, Water, and Telecommunication Department, the World Bank(a restricted circulation document) (Washington, D.C., December 1978; processed).

第一章 目标和 方法

电力部门目前强调经济效率，特别在边际成本电价和改进电价政策等领域这样做，是值得欢迎的，但已是晚了些。可是，电力系统可靠度或供电的保证质量这个题目，过去只受到供电部门的详细考虑，采用了工程模型和分析的方法。而供电可靠度对用户的社会经济影响，迄今只是以较一般的和定性的方法来考查。因此，电力系统的传统设计和计划，是根据以最少的供电成本来满足某负荷水平的预定可靠度的原则来进行的。经济学家们正逐步认识到，电力系统用最少成本扩建设施的最复杂的计划模型，也通常是按照任意选定的可靠度标准提出的。这些标准只是根据过去的实际工作经验以及用户大众可能接受的供电质量的模糊概念来制订的。

直到最近以前，研究人员忽视了供电可靠度的经济价值对用户侧的影响。造成这种忽视的主要原因，则是改进供电质量后如何测定其经济效益时将遇到许多问题。本书所阐明的可靠度水平，被看成是一个变量，是在电力系统计划过程中分析成本与效益的不平衡中求得的最佳值，而不是任选的标准。为达到这个目标，要分析整个社会的成本-效益，以评估电力系统可靠度水平提高后所增加的供电成本以及停电损失的相应降低两者之间的平衡点，停电损失就是电力不足使电力用户遭受的经济损失。换言之，在电价不变的条件下，使用户用电时扣除供电费用后得到最大经济效益的最佳可靠度水平，应该位于这么一个交点，这里供电成本的边际增加值将完全为停电损失的边际减少值所抵消。在多数国家中，