



国际电气工程先进技术译丛

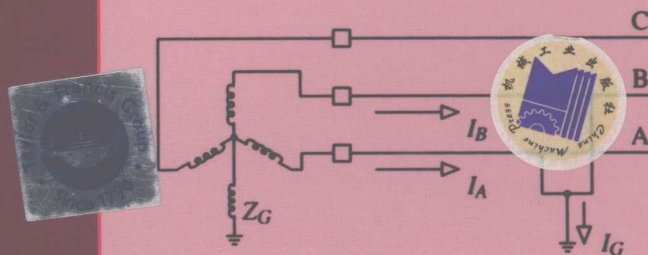
CRC Press
Taylor & Francis Group

配电可靠性 与电能质量

DISTRIBUTION
RELIABILITY AND
POWER QUALITY

(美) T. A. Short 著
徐 政 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM72/27

2008

国际电气工程先进技术译丛

配电可靠性与电能质量

DISTRIBUTION RELIABILITY AND POWER QUALITY

(美) T. A. Short 著

徐政译

机械工业出版社

本书对配电系统可靠性和电能质量问题进行了集中而全面的阐述。主要内容包括：可靠性的概念、可靠性评估和改进的方法、影响可靠性的因素；电能质量的两个根本问题——暂时断电和电压暂降的概念、评估方法和解决方案；谐波和电压不平衡等电能质量及监测的问题；导致可靠性和电能质量问题的各种故障特性；提高可靠性和电能质量的措施。书中含有大量实际工程数据，为解决实际问题提供了参考。

本书可供从事配电系统科研、规划、设计、运行的工程师和技术人员参考，也可供高等学校电气工程及自动化专业的学生和教师阅读学习。

图书在版编目 (CIP) 数据

配电可靠性与电能质量 / (美) 邵特 (Short, T. A.) 著；徐政译. —北京：机械工业出版社，2008.5

(国际电气工程先进技术译丛)

DISTRIBUTION RELIABILITY AND POWER QUALITY

ISBN 978-7-111-24040-2

I. 配... II. ①邵...②徐... III. ①配电系统—可靠性
②电能—质量分析 IV. TM72 TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 061276 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：牛新国 责任编辑：靳平 版式设计：霍永明

责任校对：申春香 封面设计：马精明 责任印制：洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市明辉装订厂装订)

2008 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 15 印张 · 292 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-24040-2

定价：35.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

关于本书

电力分配和电能质量仍然是电力工业所面临的关键挑战。仅仅从技术上不能对电能质量问题提供解决方案，但存在多种可以实施的规程和计划，用来保证电能供给的可靠性和高质量。本书的前4章是从畅销书《配电网手册》(**Electric Power Distribution Handbook, 2004**)中精心挑选出来的，可为配电领域的工程师和技术人员提供短小精悍而重点突出的技术参考。

本书介绍了可靠性的概念，概述了可靠性评估和改进的各种方法，同时也讨论了影响可靠性的各种因素；详细论述了电压暂降和暂时断电以及相应的解决方案；讨论了诸如谐波和电压不平衡等其他电能质量问题以及电能质量的监测问题；由于故障是断电和其他电能质量问题的根源，本书专辟一章来论述故障的各方面特性；本书新增的第5章专门讲述提高可靠性和电能质量的措施，为达到更好的供电性能和更高的供电效率指明了方向。



译者的话

美国学者 T. A. Short 编写的《配电可靠性与电能质量》一书，于 2006 年由 CRC 出版社出版，本书是从作者所编《配电网手册》(Electric Power Distribution Handbook, 2004) 中精心抽取出来的，包含了该手册中关于可靠性和电能质量的相关内容，另外还新加了一章：提高可靠性和电能质量的措施。本书尽管篇幅不大，但关于可靠性和电能质量问题的阐述却非常清晰和深刻。因此将本书翻译出来，希望能对我国同行有所帮助。

原书中一些明显的笔误或印刷错误，改正以后并未加以说明。原书的部分符号不符合我国的使用习惯或国家标准，为保持与原书一致，翻译过程中没有加以改变。原书使用了部分英制单位，与国际单位的换算关系列出如下。

与长度相关的单位：

$$1 \text{ 英里 (mile, mi.)} = 1.6093 \text{ 千米 (km)}$$

$$1 \text{ 英尺 (foot, ft.)} = 0.3048 \text{ 米 (m)}$$

$$1 \text{ 英寸 (inch, in.)} = 2.5400 \text{ 厘米 (cm)}$$

$$1 \text{ 密耳 (mil)} = \frac{1}{1000} \text{ 英寸} = 2.5400 \times 10^{-3} \text{ 厘米 (cm)}$$

与导线截面积相关的单位：

$$1 \text{ 圆密耳 (circular mil, cmil)} = \text{直径 1 密耳的圆面积} = 5.0671 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ 千圆密耳 (kcmil)} = 5.0671 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

另外还有一个常用的导线规格名称奥脱 (ought)，1/0 表示 1 个奥脱的导线，2/0 表示 2 个奥脱的导线，奥脱数越多，表示导线越粗。

本书的翻译得到了“十一五”国家科技支撑计划重大项目 2006BAA02A21 的资助。翻译过程中，吕洋、屠卿瑞、潘伟勇、管敏渊、徐琼璟、裘鹏、韩俊、张琪祁等同学做了大量工作，在此深表谢意。另外，特别感谢我的妻子封洲燕对部分译稿进行了仔细的校读并

IV 配电可靠性与电能质量

提出了许多中肯的修改意见。

限于译者水平,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。译者联系方法是,电话:0571-87952074,电子信箱:hnx-uzheng@yahoo.com.cn。

徐 政

2008 年 2 月

于浙江大学求是园

原 书 前 言

在工业化国家，配电网可将电力送往几乎任何地方。配电网的作用是，一方面接受很多地方发出的电力，另一方面将电力送到终端用户。在发电、输电和配电这三大电力基础设施单元中，配电网是最不受重视的。但是，就对供电可靠性和供电服务的质量、电能成本以及景观影响的作用来说，配电网是最关键的。

就像电力工业中的大部分领域一样，政治上、经济上和技术上的多种变化正在压缩配电网建设和运行的灵活空间。放松监管使电力公司在降低成本方面承受了更大的压力，同时使得电力公司更加重视供电的可靠性和供电服务的质量。对放松监管的最大担心是，由于降低成本可能会使服务质量下降。管理者和电力消费者正十分关注供电的可靠性和电能质量。电力消费者要求降低成本，提高供电的可靠性和电能质量。配电网的性能对终端用户供电可靠性的作用在 90% 以上（其余部分决定于发电系统和高压输电系统）。如果可靠性提高了，那一定是在配电网实现的。

本书是从《配电网手册》(Electric Power Distribution Handbook, 2004) 中抽取出来的，包含了该手册中关于可靠性和电能质量的相关内容。本书的主要关注点是最为关键的供电质量问题：暂时中断、长时中断以及电压暂降。本书提供了分析这些问题的方法以及限制这些问题对终端用户影响的措施。书中包含了 2004 年手册中所没有的一章，其标题为“提高可靠性和电能质量的措施”，这是我与 Duke 电力公司的 Lee Taylor 一起撰写的，它为制定可靠性和电能质量改善计划提供了一些实用的建议。

我希望读者能从本书中找到有用的信息，如果该信息不在这里，也许所附的很多参考文献中的一种能够引导您找到所要的信息。您对本书的意见、评论，以及本书的错误，或者新的信息源，请随时发电子邮件告诉我。另外，如果您在感兴趣的问题上和可研究的点上需要帮助的话，我会非常乐意提供帮助。

Tom Short

EPRI Solutions, Inc.

Schenectady, NY

t.short@ieee.org

原书致谢

首先,我要感谢我的妻子 Kristin,感谢你的坚强,感谢你的帮助,感谢你的耐心,感谢你的爱;我的宝贝, Logan 和 Jared,给我力量,逗我发笑;我的家人,是我灵感的源泉。我还要感谢我的父母, Bob 和 Sandy,这些年来给我的影响和教育。

美国电科院的 EPRI Solutions 公司(即以前的 EPRI PEAC),对此项目提供了大量的支持,我很赞赏纽约 Schenectady 的 Phil Barker 和 Dave Crudele 以及田纳西州 Knoxville 的 Arshad Mansoor、Mike Howard、Charles Perry、Arindam Maitra 和其余充满活力的同伴所给予的评论、思路和支持。

其他很多人对本书草稿的很多部分进行了审阅并提出了意见和建议,包括 Dave Smith (Power Technologies, Inc.)、Dan Ward (Dominion Virginia Power)、Jim Stewart (Consultant, Scotia, NY)、Conrad St. Pierre (Electric Power Consultants)、Karl Fender (Cooper Power Systems)、John Leach (Hi-Tech Fuses, Inc.) 和 Rusty Bascom (Power Delivery Consultants, LLC)。

感谢 PTI 公司 (Power Technologies, Inc.) 在我早期职业生涯中所给予的机会和指导,特别是得到了多位富有才华、乐于助人的工程师的帮助,包括 Jim Burke、Phil Barker、Dave Smith、Jim Stewart 和 John Anderson。多年以来,有多位客户也在很多方面给予了我教育,突出的是 Ron Ammon (Keyspan, 已退休) 和 Clay Burns (National Grid) 两位。

美国电科院 (EPRI) 对此项目一直给予了支持,包括由 Luther Dow 对全书进行了审阅。该公司还主持了数项有趣的配电网研究项目,而我非常幸运地参与了这些项目,并得到允许将其中的部分研究成果用于此书中。

Duke 电力公司 (Duke Power) 的 Lee Taylor 和我一起撰写了关于提高可靠性和电能质量的措施一章(本书第 5 章)。Lee 和 Duke 电力公司在识别和消除 Duke 电力系统的故障源方面提出了开创性的策略。通过做这些工作, Duke 电力公司保持了高的可靠性指标,尽管 Duke 电力公司的服务区域天气条件恶劣,且 Duke 电力公司以架空线为主,放射式线路占绝对主导地位。Lee 使用可靠性数据库和制定计划提高可靠性的经验使本书大为增色。Duke 电力公司还提供了数张教学用照片作为本书中的有用实例。

另外,我要感谢电力工业中广大线路工人所付出的辛勤劳动,是他们建造了输电线路并保持线路畅通。作为对他们的称赞,每章的末尾都有一小段反映线路工人性格和观点的文字。

关于作者

Tom Short 大部分的职业生涯从事帮助电力公司提高其可靠性和电能质量的工作。1990~2000 年,他在 PTI 公司 (Power Technologies, Inc.) 工作,为很多电力公司的配电系统进行了雷击保护、可靠性和电能质量的研究。他运用多种软件工具,对输电和配电系统做过大量的数字仿真研究,采用 EMTP 来模拟架空线路和地下电缆的雷电冲击,以及分布式发电机、铁磁谐振、故障和电压暂降、电容器投切等。自从 2000 年他加盟 EPRI Solutions 公司后,Short 先生已领导了该公司的多项配电网研究项目,包括关于电容器可靠性的一个提案,一部针对配电公司的电能质量手册,一部分分布式发电的工作手册和一系列针对提高配电网可靠性和电能质量的研究项目。

作为 IEEE 配电线路雷电性能工作组的主席,Short 先生领导起草了 IEEE Std. 1410-1997 “提高架空配电线路雷电性能”的标准。为表彰他的辛勤工作,2002 年他获得了 IEEE 电力工程学会 (PES) 学术委员会授予的杰出服务奖。

Short 先生还从事过多种其他方面的研究,包括铁路系统对公用电力公司的影响(闪变、不平衡和谐波),潮流分析,电容器应用,损耗估计和导线烧毁等。他还承担过可靠性、电能质量、雷电保护、过电流保护、谐波、电压调节、电容器应用和配电网规划等方面的课程教学工作。

Short 先生开发了 Rpad 工程分析交互式接口 (www.Rpad.org), EPRI Solutions 公司将此接口用于解决电力公司的工程、信息、地图和数据库等方面的问题。Rpad 是一个交互式的、基于互联网的分析程序,它具有基于 R 的工作簿型的页面,R 是 S 语言(本书中的很多图片是用此语言实现的)一个原码开放的实现。Rpad 是一个分析的软件包,一个网页设计器,一个图形设计器,所有的东西都集成在了一起。采用该软件,开发功能强大的数据分析应用程序非常方便,并可以很容易在公司的局域网上共享。

Short 先生 1988 年和 1990 年分别在美国蒙大拿州 (Montana) 州立大学获电气工程学士学位和硕士学位。

目 录

译者的话	1
原书前言	2
原书致谢	3
关于作者	4
第 1 章 可靠性	1
1.1 可靠性指标	2
1.1.1 基于用户的可靠性指标	2
1.1.2 基于负荷的指标	5
1.2 暴风雨和天气	5
1.3 影响可靠性指标的参量	10
1.3.1 线路暴露长度与负荷密度	10
1.3.2 供电结构	12
1.3.3 电压等级	13
1.3.4 可靠性的长期趋势	14
1.4 放射式配电线路的模拟	15
1.5 并联配电系统	16
1.6 提高可靠性的措施	20
1.6.1 识别和定位故障原因	21
1.6.2 识别和定位线路	21
1.6.3 开关和保护装置	21
1.6.4 自动化	25
1.6.5 维护和检查	27
1.6.6 恢复	29
1.6.7 减少故障	30
1.7 断电的损失	31
参考文献	33
第 2 章 电压暂降和暂时断电	36
2.1 故障点位置	37

2.2	暂时断电	39
2.3	电压暂降	41
2.3.1	单相与三相的不同影响	46
2.3.2	负载的响应	47
2.3.3	电压暂降的分析	48
2.4	电压暂降和暂时断电的特征描述	49
2.4.1	工业标准	49
2.4.2	特征描述的细节	51
2.5	电压暂降的发生	52
2.5.1	电能质量随地点的变化	54
2.5.2	输电网上的电能质量	56
2.6	电压暂降与暂时断电的相关性	57
2.7	影响电压暂降和暂时断电发生率的因素	58
2.7.1	地点	58
2.7.2	负荷密度	60
2.7.3	电压等级	61
2.7.4	各种因素的比较和排序	61
2.8	基于现场参数的电能质量指标预测	63
2.9	设备敏感度	65
2.9.1	计算机和开关电源	65
2.9.2	工业过程和设备	68
2.9.3	家用电器	75
2.10	解决方案	76
2.10.1	供电侧解决暂时断电的措施	76
2.10.2	供电侧解决电压暂降的措施	77
2.10.3	供电侧采用非传统设备解决电压暂降的措施	80
2.10.4	用户侧/设备端的解决方案	82
2.11	电能质量监视	83
	参考文献	85
第3章	其他电能质量问题	88
3.1	过电压与用户设备损坏	88
3.1.1	低压侧与设施接地	89
3.1.2	重合闸瞬态	91
3.2	操作冲击	93

X 配电可靠性与电能质量

3.2.1 电压放大	96
3.2.2 变速传动装置的跳闸	97
3.2.3 电容器瞬态的预防	98
3.3 谐波	99
3.3.1 谐振	105
3.3.2 电话干扰	107
3.4 闪变	111
3.5 电压不平衡	123
参考文献	126

第4章 故障

4.1 故障的一般特性	130
4.2 故障计算	135
4.2.1 变压器的联结	139
4.2.2 短路电流分布图	140
4.2.3 X/R 比值的作用	140
4.2.4 低压侧故障	145
4.2.5 高压侧和低压侧之间短路	147
4.2.6 配电线路与上方输电线路的短路故障	150
4.2.7 短路点的计算	153
4.3 限制短路电流	156
4.4 电弧特性	157
4.5 高阻抗故障	162
4.6 外部故障的原因	165
4.6.1 树木	165
4.6.2 天气和雷电	171
4.6.3 动物	172
4.6.4 其他外部原因	173
4.7 设备损坏引起的故障	173
4.8 设备内的故障	175
参考文献	178

第5章 提高可靠性和电能质量的措施

5.1 改善保护的措施	183
5.1.1 采用熔断器	183

5.1.2 熔断器作后备保护模式与熔断器作速断保护模式的比较	185
5.1.3 重合闸措施	188
5.1.4 单相保护装置	191
5.1.5 改善相互配合	193
5.1.6 确定分段设备的安装位置	194
5.2 故障源	198
5.2.1 树木	199
5.2.2 雷电	204
5.2.3 动物	210
5.2.4 电缆和设备损坏	213
5.3 减少故障率的计划	215
5.4 事故追踪	216
5.5 问题线路监察	218
5.6 结构升级计划	219
5.7 使用事故数据库	220
参考文献	225

第1章 可靠性

断电所造成的影响比任何其他因素都大，如图 1-1 所示。断电时，我可能损失 2h 在计算机上的工作，Jane Doe 可能被困在电梯里，Intel 公司可能损失几百万美元的计算机芯片，炼油厂可能起火、生产过程停止并将污染物喷入大气，等等。终端用户期望有好的可靠性，并且这种期望值越来越高。供电中断和电压暂降是大多数断电损失的原因。本章我们将研究“长时”断电这一问题，长时断电通常定义为持续时间超过 1~5min 的断电现象。下一章我们将研究暂时断电和电压暂降问题。基于长时断电的可靠性统计数据，是电力公司和管理机构用来衡量供电质量的主要基准。配电系统上的故障是造成长时断电的主要原因，熔断器、断路器、重合器或分段器等都可用于将故障线段隔离。

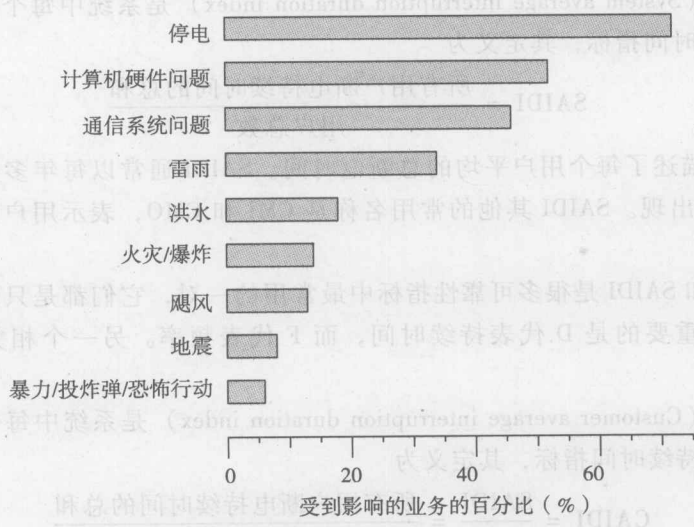


图 1-1 特定事件下各种业务受影响的百分比（美国）

很多电力公司采用可靠性指标来跟踪一个电力公司、一个地区或一条线路的运行性能。管理机构要求大多数由投资者拥有的电力公司报告他们的可靠性指标。管理的趋势是转向基于性能的评估，即基于对可靠性指标的量化来实施处罚或奖励。有些电力公司也部分基于可靠性指标给管理者和其他人员发奖金。有些商业或工业用户在选择设施地点时会向电力公司索取其可靠性指标。

1.1 可靠性指标

1.1.1 基于用户的可靠性指标

电力公司用于衡量可靠性的最常用指标是两个,即 SAIFI 和 SAIDI。这两个指标描述了考核期内(通常为 1 年)断电的频率和持续时间(见 IEEE Std. 1366-2000)。

SAIFI (System average interruption frequency index) 是系统中每个用户的平均断电频率指标,其定义为

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{用户断电的总次数}}{\text{用户总数}}$$

典型情况下,电力公司每个用户的每年长时断电次数平均值为 1~2 次。SAIFI 同时也用来表示平均故障率,此时常用 λ 来标记。另一个有用的度量指标是平均故障间隔时间 (MTBF),它是故障率的倒数: $\text{MTBF} = 1/\lambda$,单位为年。

SAIDI (System average interruption duration index) 是系统中每个用户的平均总断电持续时间指标,其定义为

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{所有用户断电持续时间的总和}}{\text{用户总数}}$$

SAIDI 描述了每个用户平均的总断电时间。SAIDI 通常以每年多少小时或每年多少分钟出现。SAIDI 其他的常用名称是 CMI 和 CMO,表示用户断电的分钟数。

SAIFI 和 SAIDI 是很多可靠性指标中最常用的一对,它们都是只取首字母的缩写词,最重要的是 D 代表持续时间,而 F 代表频率。另一个相关的指标是 CAIDI。

CAIDI (Customer average interruption duration index) 是系统中每个用户每次断电的平均持续时间指标,其定义为

$$\text{CAIDI} = \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIFI}} = \frac{\text{所有用户断电持续时间的总和}}{\text{用户断电的总次数}}$$

CAIDI 是“视在”修复时间(从用户的角度来看)。通常它比实际的修复时间要短得多,因为电力公司一般将线路分段,使尽可能多的用户在工作人员修复实际的损坏对象之前就能重新用上电。

另外一个指标在其他工业部门中也很常用,是刻画可用率的指标 ASAI (Average service availability index),即平均供电可用率指标,其定义为

$$\text{ASAI} = \frac{\text{用户可以用电的小时数}}{\text{用户需要用电的小时数}}$$

我们可以根据 SAIDI (以 h 为单位) 求得 ASAI, 即

$$\text{ASAI} = \frac{8760 - \text{SAIDI}}{8760}$$

注意, 闰年时用 8784h/年代替 8760h/年。

关于 SAIFI 和 SAIDI 的调查结果如表 1-1 所示。图 1-2 展示了根据加拿大 CEA 的调查所得出的电力公司可靠性指标的分布情况。这些可靠性指标数据中的大部分来自 Short (2002 年)。

表 1-1 根据工业调查得到的可靠性指标

	SAIFI			SAIDI		
	/ (断电次数/年)			/ (断电小时数/年)		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%
IEEE Std. 1366-2000	0.90	1.10	1.45	0.89	1.50	2.30
EEl (1999) (排除灾害性天气)	0.92	1.32	1.71	1.16	1.74	2.23
EEl (1999) (包括灾害性天气)	1.11	1.33	2.15	1.35	3.00	4.38
CEA (2001) (包括灾害性天气)	1.03	1.95	3.16	0.73	2.26	3.28
PA Consulting (2001) (包括灾害性天气)				1.55	3.05	8.35
IP&L 大城市比较 (Indianapolis Power & Light, 2000)	0.72	0.95	1.15	1.02	1.64	2.41

注: 25%、50% 和 75% 表示受调查电力公司中的下四分位、中值和上四分位。

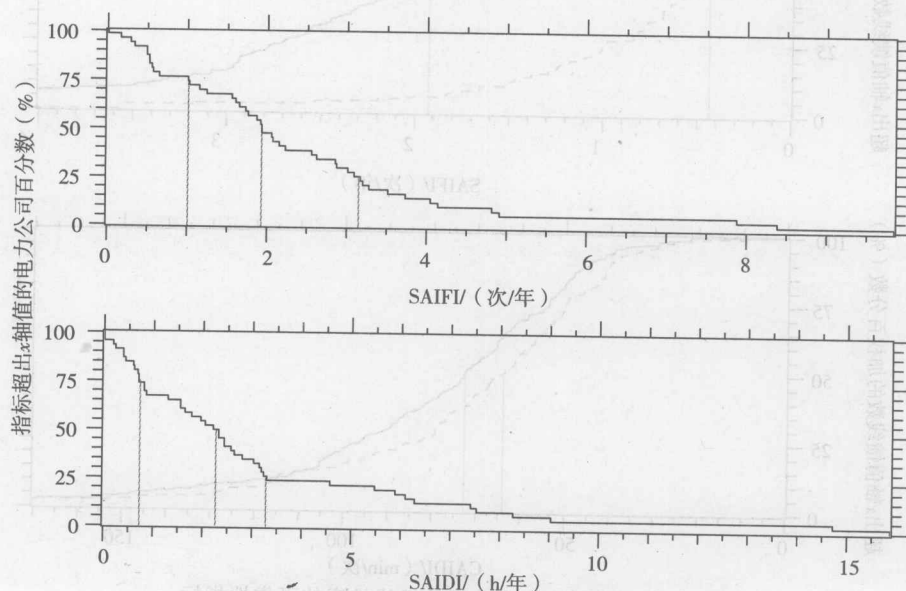


图 1-2 加拿大电力公司可靠性指标的分布情况

注: 加拿大 CEA 调查, 36 个电力公司, 两年的平均值。

电力公司之间的可靠性指标会在很大范围内变化，因为有很多不同的因素起作用，主要包括：

- (1) 天气；
- (2) 自然环境（主要是树木覆盖的程度）；
- (3) 负荷密度；
- (4) 配电电压；
- (5) 使用年限；
- (6) 地下部分比例；
- (7) 断电的记录方法。

在一个电力公司内部，各条线路的性能指标也会因各种不同的原因而有很大的差别，这些原因与造成电力公司之间性能指标差异的原因基本上是相同的，包括：为了给不同负荷密度的地区供电因而线路长度不同，一部分线路的使用年份比另一部分长，一个地区的树木覆盖率比另一个地区小等。根据两个电力公司两年的数据，图 1-3 展示了单条馈线可靠性指标的分布情况。即使这两个电力公司

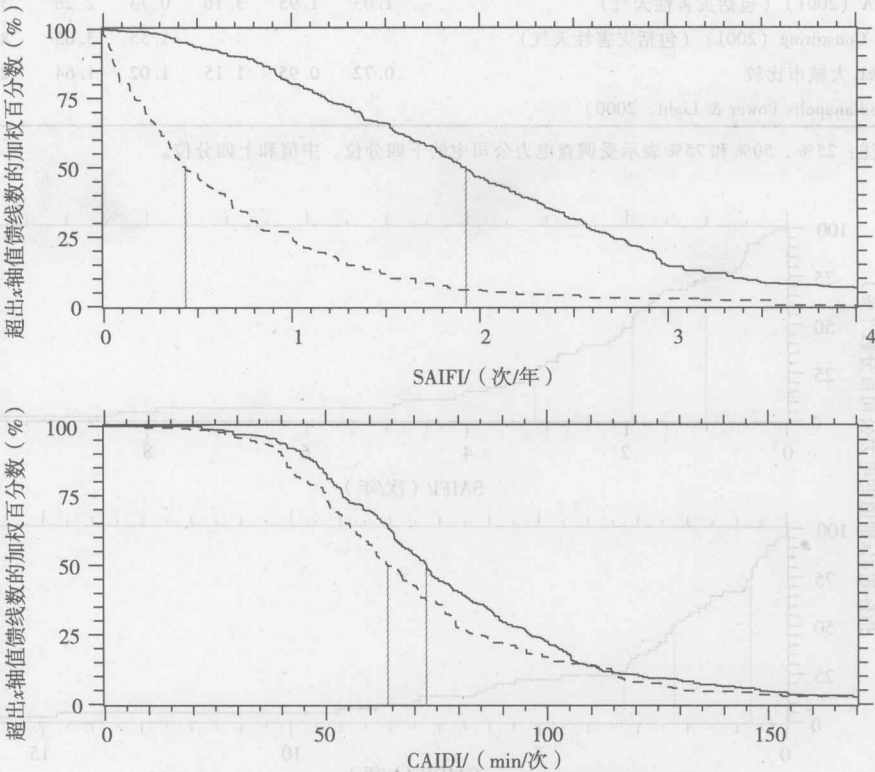


图 1-3 对应两个电力公司按馈线排序的可靠性指标

注：只考虑了严重事件，不考虑计划事件和输电系统或变电站等外部原因引起的事件。
包括所有事件的 SAIFI 值为：A 公司的 SAIFI = 0.79 次/年，B 公司的 SAIFI = 3.4 次/年。