

11230

1141
7400



配电系统可靠性实用基础

陈文高 编著

电力科技专著出版基金资助项目

中国电力出版社

序

吴竞昌同志送来陈文高同志编写的《配电系统可靠性实用基础》书稿，并要我写序，我感到责无旁贷，只能从命。

原因之一，这本书是1994年经电力科技专著基金委员会，以无记名投票通过赞助出版的，当时吴竞昌同志和我都投了赞成票，现在，经过两年反复修改补充，脱了稿，我总得说说当初赞成的理由。

原因之二，当年我在原水利电力部生产司工作时，曾与吴竞昌等同志共同推动电力可靠性管理工作。

70年代后期，国内有些同志已开始研究电力可靠性问题，他们着重试算水电站升压变电所的断路器接线方式的可靠性。此时，在中国科学院和军工部门也开始出版了可靠性工程、可靠性试验、可靠性数学等著作，然而，电业的可靠性问题究竟由何处入手，一时拿不准主意。从过去几十年的经验看，我们坚持“安全第一”是做对了的，问题是在今后电业现代化的过程中，在逐步出现大机组、大电厂、大电网、高参数、高电压、高度自动化时，所谓“安全第一”究竟应该具有什么新的内容、新的形式。1978年，我有幸随李代耕副部长带领的考察团，到美、日转了一圈，亲眼见到他们的一些做法，似乎还是要从实际管理工作入手。

1982年11月，在杭州，国内各方面对电力可靠性感兴趣的积极分子，共同开会研究，最后认为不管理论上怎么解说，要做到向用户供电可靠，总是要从各个方面，包括发供电设备和人员素质等方面做好管理工作，才能保证用户的用电可靠。1962年，在整顿大跃进引起的管理紊乱时，刘澜波同志曾套用毛主席的话说过：“兵要精，武器要好”，古今中外，同此一理。于是，会议商定，抓电力可靠性问题应从抓电力可靠性管理入手，提出“逐步建立电力可靠性管理”，并同时分头负责，搜集国外电力可靠性管

理的资料，看看人家是怎么具体管理的，以便于选择样板，进行学习。此前，1981年吴竞昌同志去英国考察时曾带回英国配电方面的可靠性导则和完整的统计表格，在杭州会议后几天。云南省电力局召开了电力可靠性会议，邀请了我与吴竞昌同志赴会，在这次会上，我们就委托云南省电力局先按照英国的表格和办法进行试点研究。

至于整个电力系统的可靠性管理，考虑到我国地域广阔，与之相似的只有美国和苏联，经过一年的了解和考虑之后，我们选择了美国的“北美电力可靠性协会”（NERC）作为学习的样板。但NERC只抓大电力系统的可靠性准则，对于配电系统则由各家电力公司各自为政，所以，我们在配电方面则一直采用英国的做法。

水利电力部撤销后，吴竞昌和我都从工作岗位上下来了。能源部又对上述办法又另行作了规定，选择了一些大中城市对一部分有代表性的用户进行停电统计。又几年，能源部撤销之后，又成立了电力工业部。至今，仍在继续推行可靠性管理，并在逐步深入，其方向仍是进一步向国外已经成熟的管理方法学习，一方面避免走弯路，另一方面，也好将我们在电业可靠性方面的成果与国外达到的水平进行比较。如果我们闭门造车，所统计出来的数字与国外口径不一致，是好是坏，无从判别，则有悖于我们推行可靠性管理的初衷。至于在配电方面是继续采用英国的方法，还是采用法国电力公司（EDF）的方法，还可以进一步研究。

陈文高同志是从1982年云南试点开始，就一直参与配电可靠性管理工作的，15年来，他亲自调查研究，制订规程，参与可靠性推动工作，已经成为这方面的专家。在编制本书的过程中，从理论到实际，从国内到国外，客观地、详尽地阐明了有关配电系统可靠性问题的各个方面，使读者可以得到一个全面的、符合生产实际的认识。在进一步推动我国电力可靠性管理的工作中，这本书将会起到十分有益的作用。

祝贺这本书的出版，并以此为序。

沈根才

1997 年 1 月

前 言

这是一本综合论述配电系统可靠性工程和管理技术的书。

全书共 10 章。书中，作者以近十多年来国内各地区供电部门及各级电力生产管理部门开展配电系统可靠性统计、分析、评价和研究的实践为基础，广泛参考国内外有关配电系统可靠性研究和管理的文献资料，结合生产实际，全面地介绍和阐述了配电系统可靠性研究和管理的基本原理、方法、应用及其发展，并提供了大量有实用价值的的数据。本书既有理论的阐述，又有实践经验的总结，既讨论了当前在开展配电系统可靠性工作中接触的若干实际问题，又可为今后进一步深化和发展的技术理论提供借鉴，为配电系统可靠性管理和研究提供了比较全面和完整的实用基础知识。

本书由吴竞昌同志审稿。沈根才同志审阅了全部书稿，提出了许多宝贵的意见和建议，还直接对文字作了修改，并写了序。在此谨对两位专家表示诚挚的谢意。

本书在编写提纲时，秦守仁同志曾提供了若干宝贵的建议。在整理书稿过程中还得到一些同志的帮助。在此一并表示感谢！由于作者水平所限，书中难免存在着缺点、错误和不足之处，敬请读者阅后不吝赐教。谢谢！

编 者

1997 年 3 月

目 录

序

前言

第一章 绪论 (1)

第一节 可靠性的概念与可靠性工程 (1)

一、可靠性的概念 (1) 二、可靠性工程 (2)

第二节 电力系统可靠性 (3)

一、一般概念 (3) 二、电力系统可靠性发展的重要原因 (5) 三、电力系统可靠性工作的任务、内容和方法 (7)

第三节 配电系统可靠性 (8)

一、研究配电系统可靠性的重要性和必要性 (8) 二、配电系统可靠性研究的对象、特点、方法和内容 (9) 三、我国配电系统可靠性工作的进展 (11) 四、我国配电系统可靠性工作的前景 (17)

第二章 国外配电系统可靠性评价 (19)

第一节 英国配电系统可靠性管理 (19)

一、配电系统可靠性的发展进程 (19) 二、关于配电系统可靠性的规定 (20) 三、配电系统可靠性指标及其统计分析和应用 (22)

第二节 加拿大配电系统可靠性管理 (26)

一、配电系统可靠性研究和发展的进程 (26) 二、配电系统供电可靠性的规定 (27) 三、配电系统可靠性指标、数据的收集、统计评价及信息的利用情况 (31)

第三节 日本配电系统可靠性管理 (35)

一、配电系统可靠性研究的发展进程 (35) 二、配电系统可靠性指标及统计实绩 (37) 三、配电系统可靠性统计分析、预测评估及提高配电系统可靠性的措施 (37)

第四节 其他国家的配电系统可靠性管理 (41)

一、美国(41) 二、法国(44) 三、前苏联和独联体
国家(46)

第五节 关于各国配电系统可靠性的综合评述 (49)

一、各国的配电系统可靠性指标(49) 二、国外配电
系统可靠性的发展(51)

第三章 配电系统可靠性统计评价指标 (54)

第一节 配电系统的概念、结构及运行特性 (54)

一、配电系统的概念(54) 二、配电系统的结构
(55) 三、配电系统的运行特点(55)

第二节 配电系统供电可靠性及系统可靠性 的概念 (58)

一、配电系统供电可靠性的概念(58) 二、配电系统
的系统可靠性的概念(59) 三、配电系统可靠性的定
义(60)

第三节 配电系统可靠性指标的建立 (60)

一、配电系统可靠性统计与可靠性预测(60) 二、配
电系统可靠性指标建立的基本原则(61) 三、建立配
电系统可靠性指标考虑的因素及分析方法(61)

第四节 配电系统可靠性统计指标的定义和 计算公式 (68)

一、我国配电系统可靠性指标建立的两个基本点(68)
二、10kV 配电系统可靠性指标的定义及计算公式(69)
三、具有多级高压电压城市配电系统可靠性统计指标的
定义及计算公式(69) 四、供电系统用户供电可靠性
统计办法(74)

第六节 影响配电系统可靠性指标的因素 (77)

第四章 配电系统可靠性的统计、计算 与分析 (79)

第一节 配电系统可靠性的统计范围及统计单位 (79)

一、配电系统可靠性统计范围(79) 二、配电系统可
靠性的统计单位(80) 三、配电系统设备统计的分类
(85) 四、名词术语的定义(85)

第二节 配电系统可靠性信息及编码 (87)

- 一、配电系统可靠性的信息 (87)
- 二、配电系统可靠性信息分类 (88)
- 三、配电系统可靠性信息编码 (89)

第三节 配电系统可靠性数据的收集和处理 (94)

- 一、配电系统可靠性统计表格设计的原则 (94)
- 二、配电系统可靠性统计表格的基本形式和作用 (94)
- 三、原始数据的收集和处理 (96)
- 四、停电、停运事件按原因和设备分类的统计及指标数据的处理 (103)

第四节 配电系统可靠性数据指标分析

- 评价方法..... (105)

第五节 关于几个重要概念及问题的讨论..... (107)

第五章 以元件组合关系为基础的配电系统

可靠性预测方法 (111)

第一节 概述..... (111)

第二节 配电系统可靠性预测评估指标..... (112)

- 一、配电系统可靠性预测评估的主要故障分析指标 (112)
- 二、与用户有关的配电系统可靠性预测评估指标 (114)
- 三、与负荷和电量有关的指标 (115)

第三节 简单放射状网络的评价..... (117)

- 一、简单放射状配电系统的特点 (117)
- 二、单端供电网络的可靠性评价 (118)
- 三、有备用电源、手动分段配电系统的评价 (120)
- 四、不同配电方式下放射状配电系统可靠性分析 (122)

第四节 复杂网络的评价..... (124)

- 一、复杂网络的特点 (124)
- 二、停运模式重叠时的故障分析 (125)
- 三、双回路配电系统可靠性计算方法及步骤 (127)
- 四、气候条件对配电系统可靠性的影响 (129)
- 五、复杂网络故障停运失负荷指标的评估及负荷转移的影响 (132)

第五节 以元件组合关系为基础的其他

- 评价方法概要..... (137)

- 一、状态空间图法 (137)
- 二、近似法 (138)
- 三、网络简化法 (137)

第六章 以“裕度”概念为基础的配电系统

可靠性预测方法 (139)

第一节 概述 (139)

第二节 配电系统的结构状况分析 (139)

一、配电系统结构模型 (139) 二、配电系统的标准结构 (140)

第三节 系统运行率和裕度指标 (142)

一、配电系统结构与联络率 (142) 二、配电系统馈线运行率 (144) 三、馈线的裕度 (144) 四、整个地区高压配电系统的裕度 (145)

第四节 系统可靠度预测法 (145)

一、计算可靠度的基本公式及计算的前提条件 (145)
二、以馈线为单位的可靠度计算 (146) 三、以地区为单位的可靠度计算 (147) 四、关于故障率的计算 (151) 五、各种因素对可靠度的影响 (153) 六、可靠度预测法在实际配电系统中的应用 (158)

第五节 电力用户个别可靠度的微观极限值管理、 评价及预测方法 (161)

一、配电系统可靠性管理的新发展 (161) 二、个别可靠度微观极限值管理的方法 (162) 三、根据系统结构预测停电时间的方法 (164)

第七章 配电系统可靠性准则及城市电网

可靠性的规定 (169)

第一节 配电系统可靠性准则 (169)

一、电力系统可靠性准则的一般概念 (169) 二、配电系统可靠性准则的概念及各国建立准则的情况 (171)

第二节 我国城市电力网可靠性的规定 (176)

一、概述 (176) 二、城市电力网对可靠性的一般要求 (178) 三、城市电力网可靠性标准 (179)

第三节 我国城市电力网的现状及可靠性在城市电力网 工作中的应用 (184)

一、我国城市电力网的现状 (184) 二、当前城市电力

网工作的主要任务(185) 三、可靠性在城市电力网规划、建设、改造和运行方面的应用(187)

第八章 提高配电系统可靠性的措施

及其实施效率 (195)

第一节 国内外配电系统可靠性发展的现状 (195)

第二节 提高配电系统可靠性的措施 (198)

一、防止故障的措施(198) 二、改善系统可靠度的措施(203) 三、加速故障探测及故障修复,缩短停电时间,尽早恢复送电的措施(205)

第三节 提高配电系统可靠性措施实施效果

的计算 (210)

一、提高配电系统可靠性措施的效果分析(211) 二、提高可靠度措施效果分布的计算方法(214) 三、提高可靠度措施实施效果分布计算方法的应用(216)

第九章 配电设备诊断技术 (218)

第一节 概述 (218)

一、设备诊断技术的概念及其与可靠性的关系(218) 二、配电设备的特征、使命及其设备诊断技术的考虑方法(218)

第二节 架空配电线路设备的诊断 (219)

一、利用探测器寻找绝缘未完全破坏的故障点诊断(219) 二、架构劣化的诊断(219) 三、绝缘子的预诊断(220) 四、导线和架空地线的设备诊断(222)

第三节 地下配电线路及电缆设备的诊断 (223)

一、管路和孔道的诊断(223) 二、电缆本体的诊断(223) 三、其他电缆附件的诊断(226)

第四节 变压器的诊断 (226)

一、绝缘油的分析(226) 二、局部放电监测(227) 三、分接头切换机构的监测(227)

第五节 开关装置的诊断 (228)

一、气体绝缘开关装置的诊断技术(229) 二、柱上式油断路器的诊断(230) 三、断路器动作机构的诊断(231) 四、断路器内故障点的定位(232)

第六节	氧化锌避雷器的诊断.....	(233)
第七节	配电设备诊断技术的难点及今后的 发展方向.....	(234)
第十章	可靠性经济学在配电系统中的应用	(236)
第一节	概述.....	(236)
第二节	在配电系统中常用的可靠性经济评价 方法.....	(237)
	一、绝对可靠性评价法 (237) 二、可靠性排列法 (237) 三、可靠性比较分析法 (238) 四、成本—效 益分析法 (238) 五、可靠性优化法 (238)	
第三节	几个常用的经济分析概念及货币时值 的计算.....	(239)
	一、货币时值的划分及折算 (239) 二、经济分析中两 种常用的比较方法 (241) 三、应用等年值作经济分析 比较中引入的两个概念 (242)	
第四节	配电系统缺电和停电损失的计算.....	(243)
	一、缺电损失 (243) 二、停电损失 (244)	
第五节	配电系统可靠性的经济评价.....	(248)
	一、经济评价的原则 (248) 二、应用实例 (249)	
参考文献		(254)

第一章 绪 论

第一节 可靠性的概念与可靠性工程

一、可靠性的概念

可靠性是一个早已存在于人们生产和生活之中的基本概念。它是一个衡量系统和产品质量及功能的重要指标。人们无论生产一种产品或者做一件事，总是有一定的目的。生产灯泡是为了照明，生产电动机是为了带动机器运转，建立通信系统是为了传递信息，建立电力系统是为了向需要电能的用户传输和供应电能。但是，事物往往并不一定总是按照人们预想的目的顺利实现。一封电报，可能因一字之差而误了事。究其原因可能由于机械故障引起，也可能由于工作人员操作疏忽引起，亦或者由于其他原因引起。一台电动机停止运转，其原因也是多种多样的。但是，不管是什么原因，总是“没有起到应有的作用”，“没有达到或者没有完全达到预想的目的”。为了反映产品或系统所起作用的大小，实现预想目的的程度，人们就引入了可靠性的概念。

长期以来，由于科学技术和生产发展水平以及其他各种条件的限制，人们对可靠性的认识基本上是停留在定性的水平上，缺乏严格的定量标准和系统的科学的分析方法。但是，随着科学技术的发展，产品和系统的结构越来越复杂，对可靠性的要求越来越高，可靠性的作用也越来越大，特别是自 40 年代以来，随着一些现代化的大型工程系统，如导弹、航天、核电等工程控制系统的发展，影响可靠性的因素变得十分复杂，一旦发生故障，就会造成巨大的经济损失和难以估计的社会影响。而要避免这些严重的后果，完成对产品和系统从设计、制造、安装到运行等一系列生产过程的可靠性分析，并使其各个环节协调一致达到最佳的经

济效果，仅仅依靠可靠性定性的概念，已远远不能满足现代生产发展的需要。为了研究和解决这些问题，可靠性工程就逐步发展，形成为一门独立的学科，并应用于各个技术领域。

所谓可靠性 (Reliability)，是指一个元件、设备或系统在预定的时间内、规定的条件下完成规定功能的能力。量度可靠性特性的指标则称为可靠度 (Reliability)，它是表示元件、设备或系统成功的概率。可靠度高，就意味着寿命长，故障少，维修费用低；可靠度低，就意味着寿命短，故障多，维修费用高。消费产品发生故障，会给用户造成不便和损失；工业自动化系统发生故障，生产就会混乱，甚至停产；交通控制系统发生故障，会使交通混乱，甚至发生交通事故；军事装备发生故障，会使装备失去效能，甚至造成军事失利；电力系统发生故障，不仅会给用户造成不便，给使用电力能源的工农业生产造成严重损失，而且有可能对社会造成混乱和不良影响；舰船、飞机、宇航系统发生故障，就有可能造成灾难性的事故。从市场经济的角度来看，产品可靠度高，可以使企业在市场竞争中处于有利的地位，获得信誉、利润和社会效益；可靠度低，会使企业在市场竞争中失败，给社会造成更大的损失。不论哪一种系统，哪一种行业，都存在着可靠性问题，只是表征的方式不同罢了。

二、可靠性工程

可靠性工作是一个涉及多种学科的复杂的系统工程，也是系统工程进行技术经济评价的一个重要内容，通常称之为可靠性工程，它贯穿在产品和系统的整个开发过程之中。从时间顺序来看，包括了研究、设计、制造、试验、运输、贮存、建设安装、使用及维修等各个阶段；从产品和系统的形成来看，包括了原材料、元器件、零部件、组件、设备及系统等各个环节；从工作内容来看，可靠性工程的主要工作内容如图 1-1 所示，包括理论、设备、标准、技术、教育和管理等各个方面，其中技术又包括了设计、制造工艺、使用与维护、试验评估与失效分析等；从工作性质来看，通常又分为可靠性工程技术与可靠性管理两个方面。

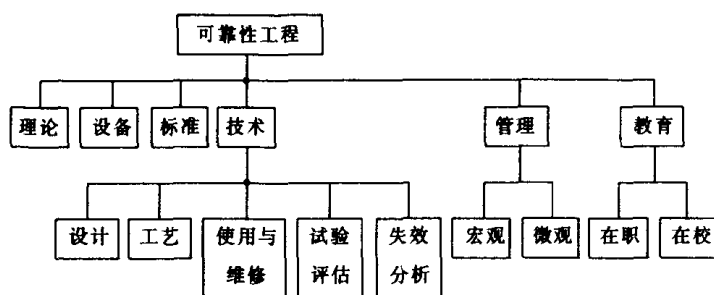


图 1-1 可靠性工程的主要工作内容

可靠性工程技术，就是为了使产品和系统达到可靠性要求而进行的有关设计、制造、建设安装、试验、维修及保养等一系列工程技术工作。

所谓可靠性管理，就是从系统的观点出发，对产品或系统全寿命周期中的各项可靠性工程技术活动进行规划、组织、协调、控制与监督，以求实现既定的可靠性目标，并保持全寿命周期费用最省。它是一切可靠性活动的领导和核心。

可靠性工程具有三大特点，即实用性、科学性和时间性。实用性是指可靠性工程从诞生之日开始就和工程实践紧密联系和结合，具有强大的生命力；科学性是指可靠性工程有一套独特的科学的理论和方法；时间性是指可靠性存在于产品或系统整个开发过程之中，不论设计、研究、制造、应用等各阶段都起作用，其中任何一个阶段对可靠性问题考虑不周，都将对其整个的各个阶段及过程产生影响。

第二节 电力系统可靠性

一、一般概念

60年代中期以后，随着电力工业的发展，可靠性工程理论开始逐步引入电力工业，电力系统可靠性也应运而生，并逐步发展成为一门应用学科，成为电力工业取得重大经济效益的一种重要

手段。目前已渗透到电力系统规划、设计、制造、建设安装、运行和管理等各方面，并得到了广泛的应用，如图 1-2 所示。

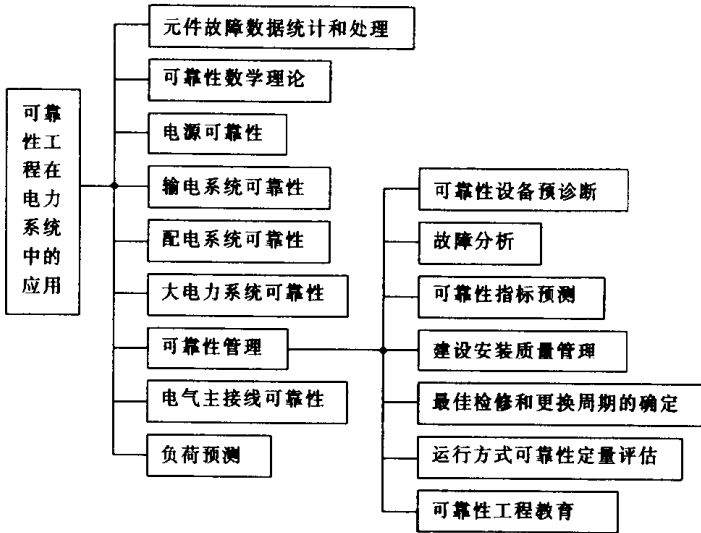


图 1-2 可靠性工程在电力系统中的应用

所谓电力系统可靠性，就是可靠性工程的一般原理和方法与电力系统工程问题相结合的应用科学。电力系统可靠性也包括电力系统可靠性工程技术与电力工业可靠性管理两个方面。所谓电力系统可靠性工程技术，就是为了使电力系统及其设备达到预定的可靠性要求所进行的设计、制造、建设安装、运行、试验、维修和保养等一系列工程技术活动。所谓电力工业可靠性管理，就是从电力系统整体出发，按照一定的可靠性目标，对电力系统全寿命周期中的各项工程技术活动进行规划、组织、协调、控制和监督，并保持其费用最省的现代化电力工业管理方法。

电力系统可靠性的实质就是用最科学、最经济的方式，充分发挥发、供电设备的潜力，保证向全部用户不断供给质量合格的电力，从而实现全面的质量管理和全面的安全管理。因此，一切为提高电力系统、设备健康水平和安全经济运行水平的活动都属于电力工业可靠性工作的范畴，都是为了提高电力工业可靠性水

平所从事的服务活动。

二、电力系统可靠性发展的重要原因

可靠性工程理论应用于电力工业，并蓬勃发展，形成电力系统可靠性这门科学的时间，是在 60 年代中期之后。其发展的主要原因如下。

(1) 随着电力系统不断向超高压、远距离、大机组、大容量方向发展，不但要求提高系统的经济性，而且对系统的安全可靠性也提出了新的更高的要求。

60 年代以后，许多国家的大电网相继发生了重大的事故，引起大面积长时间的停电，如表 1-1 所示。这些停电事件不但造成了巨大的经济损失，而且危及社会秩序，对整个社会的影响非常深刻，同时也给从事电力系统规划和运行的人员以极大的教训。为了预防这些事故的发生，定量地评价和改善电力系统可靠性的研究，便越来越受到人们的重视。

(2) 随着现代电力系统向超高压、远距离、大机组、大容量不断发展，新技术和新设备的试制与开发，系统可靠性的某些指标将变坏。就发电设备来说，据美国爱迪生电气学会和联邦电力委员会研究，由于新的单机容量的不断增大，作为机组可靠性重要指标之一的强迫停运率（指机组强迫停运小时数占运行小时总和的百分比）将随单机容量的增大而直线上升。就供电系统来说，随着负荷的不断增长，负荷密度及供电范围不断增大，干线不断增长，分支数量不断增多，供电电压不断提高。虽然供电容量获得了显著的增长，但发生故障的因素和可能也相应增大。为了避免电力系统超高压、远距离、大机组、大容量的优越性被不利因素的影响所抵销，对可靠性的研究也日益迫切。

(3) 自 60 年代以来，随着国民经济的发展，社会的高度信息化，城市功能的现代化和复杂化，生活方式的多样化，办公设备、工厂设备、高层建筑设备的自动化，电子设备机械和装置已逐步由高精技术产业、生产事业单位逐步普及到一般的家庭，人们对电力的依赖越来越深，任何短时间的停电、频率偏差、瞬时电压

停电事故一览表

表 1-1

事故系统	英国南部电网	纽约市电网	美国密利系统	日本中部系统	加拿大-美国东北部系统	美国宾泽马(PJM)系统	纽约市电网	法国电网	中国湖北电网	瑞典电网	美国西部电网	美国佛罗里达州电网	美国西部电力系统(WSCC)
发生时间	1961年5月15日21时26分	1961年6月13日17时5分	1965年1月28日13时20分	1965年6月22日8时16分	1965年11月9日17时16分	1967年6月5日	1977年7月13日20时37分	1978年12月19日8时	1972年7月27日	1983年12月27日12时58分	1984年2月29日17时43分	1984年2月28日10时45分	1994年12月14日0时30分
停电范围	220万户	纽约市曼哈顿中心区	美国中部5个州,约35万km ²	关西大分、北九州、中国一部分	美国东部8个州和加拿大,约20万km ²	宾夕法尼亚、新泽西、马里兰州,共20万km ²	纽约5个区及威斯彻斯特县,共1550km ² ,832万人	全法国电网	湖北省	瑞典东南部及丹麦的部分地区	美国西部6个州(加利福尼亚州、内华达州、亚利桑那州、新墨西哥州、爱德蒙顿州)	美国佛罗里达州南部	美国西部各州及加拿大,墨西哥的一部分,冲击影响达14个州
供电故障容量	约150万kW	约40万kW	约200万kW	约340万kW	约2500万kW	约1000万kW	613万kW	2900万kW	约200万kW	约700万人口	770万kW 300万用户	约100万用户	约200多万人
停电时间	32min~2h55min	2h30min~4h30min	最长停电时间2h30min	最长停电时间2h7min	最长停电时间13h32min	最长停电时间12h	4.5~25h	4h	十几小时	1h30min	1个多小时	30min	从几秒至4h