

现代电能质量技术丛书

电网中电压暂降 和短时间中断

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
徐永海 陶顺 肖湘宁 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电能质量技术丛书

电网中电压暂降 和短时间中断

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
徐永海 陶顺 肖湘宁 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了电网中电压暂降和短时间中断的相关问题,反映了该领域最新的研究成果,简明扼要,内容丰富。

全书共 12 章,分别阐述了电压暂降和短时间中断的基本问题,电压暂降和短时间中断的起因,电压暂降对敏感用电设备的影响,电压暂降分类及其在变压器间的传递,电压暂降的随机预估、检测方法、监测统计与集合方法、监测调查案例分析,电压暂降的缓解措施,电压暂降的监测、发生与补偿装置,电压暂降的经济性评估,电压暂降与短时间中断的标准与评估指标。

本书适合于从事电力工程和电力系统分析,电能质量分析、治理和标准制定的技术人员、工程师和企业管理者使用,也适合于高等院校电气工程专业的教师 and 研究生阅读参考,并可作为电力职业院校的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电网中电压暂降和短时间中断 / 徐永海, 陶顺, 肖湘宁编著; 亚洲电能质量联盟中国合作组组编. —北京: 中国电力出版社, 2015.12

(现代电能质量技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8058-5

I. ①电… II. ①徐… ②陶… ③肖… ④亚…
III. ①电压稳定—研究 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 160800 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 14 印张 182 千字

印数 0001—3000 册 定价 58.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



丛书前言

电能质量问题近年来受到更多的关注。究其缘由，想来有三：第一，大量的非线性和冲击性负荷的广泛应用，对供电系统电能质量造成了严重的污染，恶化了电气设备的电磁环境；第二，以微电子控制技术为核心的高度自动化和智能化设备极其敏感，抗扰度能力不足，对电能质量的要求越来越高；第三，伴随行业的发展，相关组织和单位举办了各类交流会议以及展览，吸引大量媒体关注报道电能质量。在这样的大背景下，电能质量问题从冷门慢慢热了起来。

行业的健康发展，离不开理论的指导和技术经验的交流分享。但是，国内关于电能质量的书籍不是很多，系列丛书更是没有。基于这样的现状，亚洲电能质量联盟中国合作组（简称合作组）发起编写“现代电能质量技术丛书”，这个倡议当时获得了业内很多专家学者的支持。大家共同推选了林海雪教授担当丛书的牵头人，中国电力出版社也欣然应允出版这套丛书，并作为重点图书报送国家新闻出版总署（现为国家新闻出版广电总局），获批列入“‘十二五’国家重点图书出版规划项目”。原计划两年内完成的这套丛书，因多位作者身体抱恙，直至今天才最终陆续付梓，真是好事多磨。

姗姗来迟的这套丛书，从不同的维度介绍了电能质量，以及相应的

测量与控制技术。以基本理论与方法为主的，有《电力系统中电磁现象和电能质量标准》和《电能质量数学分析方法》；以介绍现代测量与实用控制为主的，有《现代电能质量测量技术》和《电能质量实用控制技术》；还有以热点或新问题为主的，有《电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术》、《分布式电源接入电网的电能质量》、《电网中电压暂降和短时间中断》、《电力系统直流干扰》及《交流配电系统的接地方式及过电压保护》。

这套丛书整体适合从事电能质量工作的工程师和管理人员作为理论和实践的指引，也适宜对于电能质量问题感兴趣的相关人士阅读，从不同的侧面了解电能质量问题及其影响。希望我们编著的这套丛书可以更好地促进电能质量知识及技能的传播，使读者有所收获，这也是合作组与作者最希望达到的效果。另外，丛书也将成为由合作组作为主办方之一，并由国家人力资源和社会保障部教育培训中心考核认证的“高级电能质量工程师”培训的指定参考书。

最后特别感谢美国国际铜专业协会对于亚洲电能质量联盟中国合作组编著丛书的大力支持，感谢牵头人林海雪教授多年来的辛勤工作，感谢所有丛书作者的认真与执著，感谢编辑们的耐心与信任，感谢丛书审稿专家们提出的建设性的意见和建议。亚洲电能质量联盟将继续努力耕耘，为读者带来更多的接地气的电能质量专著。

亚洲电能质量联盟秘书长 黄炜



本书前言

在各类电能质量问题中，电压暂降和短时间中断是发生频率最高、影响最为严重的一类。有监测数据表明，80%以上电能质量问题是由电压暂降引起的。对于现代工业用户来说，电压暂降和短时间中断已逐渐成为影响许多用电设备正常、安全运行的最严重的电能质量扰动。严重的电压暂降和短时间中断可能导致企业生产率和产品质量下降、成本增加、计划阻碍等，从而造成严重的经济损失。在我国，电压暂降和短时间中断问题越来越受到相关部门和研究人员的重视，但目前系统地介绍电压暂降和短时间中断的书籍还较为缺乏，本书就电压暂降和短时间中断多方面的问题进行了介绍，以供开展相关研究和工作实践的读者借鉴使用。该书的主要特点表现在：

(1) 本书在国内首次针对电压暂降和短时间中断暂态电能质量现象进行了系统全面地分析与介绍。

(2) 本书集合了国内外近年来围绕此主题的起因分析、设备敏感分析、类型特征、监测与评估、治理措施及经济性分析等方面的研究成果。

(3) 本书各章节紧密结合实际案例进行分析，便于读者了解电压暂降和短时间中断的基本问题，掌握相关的分析方法。

本书中的部分研究工作得到了国家自然科学基金项目（电压暂降特

性分析与评估指标研究，编号 51277069）的资助，在编写过程中还得到了研究生章雪萌、袁媛、刘颖英、丁宁、高倩倩、郁祎琳等的帮助，在此一并表示感谢。

由于编者知识水平的不足，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 1 月

目 录

丛书前言

本书前言

1	概述	1
1.1	定义与描述	1
1.2	电压暂降与短时间中断的相关性	5
1.3	电压暂降与供电可靠性的相关性	8
2	电压暂降和短时间中断的起因	11
2.1	短路故障	12
2.2	感应电机	14
2.3	大容量变压器投运	17
2.4	雷击	19
2.5	其他原因	21
2.6	电压暂降典型案例	22
3	电压暂降对敏感用电设备的影响	28
3.1	CBEMA、ITIC 与 SEMI47 曲线	29
3.2	计算机与电子设备	32
3.3	可编程逻辑控制器	35
3.4	接触器和继电器	37
3.5	可调速驱动	38
3.6	直流电机驱动	39

4	电压暂降分类及其在变压器间的传递	41
4.1	故障类型与电压暂降分类	41
4.2	电压暂降在电力系统变压器中的传递	49
5	电压暂降的随机预估	55
5.1	电压凹陷域	56
5.2	临界距离法	58
5.3	故障点法	62
5.4	蒙特卡罗法	64
5.5	电压暂降的电磁暂态仿真	67
6	电压暂降的检测方法	69
6.1	方均根值计算方法	69
6.2	缺损电压计算方法	71
6.3	瞬时电压 dq 分解法	73
6.4	单相电压变换平均值法	78
6.5	基于 $p-q-r$ 变换和数学形态滤波的电压暂降检测算法	79
7	电压暂降监测统计与集合方法	87
7.1	测量原理	87
7.2	监测结果集合方法	89
7.3	监测结果报告方法	99
8	电压暂降的监测调查案例分析	107
8.1	美国 DPQ 项目	107
8.2	国际大电网会议组织 (CIGRE) 调查结果	114
8.3	国际发配电联合会 (UNIPED) 统计结果	116
8.4	测量结果受影响因素	118
9	电压暂降的缓解措施	120
9.1	缓解电压暂降的基本原则	120
9.2	供电侧缓解电压暂降的管理措施	122
9.3	用户侧接口处的缓解措施	124

9.4	设备制造方的缓解措施	126
9.5	敏感用户系统接入点选择	128
9.6	缓解措施应用案例	129
10	电压暂降监测、发生与补偿装置	135
10.1	电压暂降监测装置	135
10.2	电压暂降源定位方法	137
10.3	电压暂降发生装置	142
10.4	电压扰动补偿装置及其补偿策略	149
11	电压暂降的经济性评估	167
11.1	敏感设备电压暂降敏感度评估	167
11.2	经济损失调查与评价	169
11.3	工厂级单次电压暂降事件的构成	171
11.4	缓解方案成本与有效性分析	175
11.5	经济分析比较	178
12	电压暂降与短时间中断的标准与评估指标	184
12.1	电压暂降相关的典型标准	184
12.2	评估指标的选择	188
12.3	电压暂降与短时间中断的评估	199
	参考文献	208

随着用电设备的技术更新,特别是数字式自动控制在工业生产中的大规模应用,如变频调速器、可编程逻辑控制器、各种自动生产线以及计算机系统等敏感性用电设备的大量使用,对供电系统的电压质量提出了更高的要求,短时间的电压降低就可能导致上述用电设备非正常工作,严重时引起设备的停运,从而使企业遭受巨大的经济损失,造成人民生活不便或引起相关的社会问题等。这种电压变化现象即是本书中将要阐述的电压暂降与短时间中断,电压暂降与短时间中断是数字化社会对供电质量提出的挑战,已成为欧美发达国家等面临的最重要的电能质量问题,在我国工业界及经济发达地区,该问题的影响也越来越突出。

1.1 定义与描述

电压暂降(voltage sag/dip)是指供电电压方均根值突然下降到设定的暂降阈值以下(持续时间不小于10ms),且经过短暂时间间隔后又重新恢复的现象。在电压暂降的分析中,通常将暂降时的残余电压方均根值与额定电压的比值定义为暂降幅值,将电压暂降从发生到结束之间的时间定义为持续时间。电压暂降的典型持续时间为0.5~30个周波。此外,电压暂降往往还伴随有电压相位的突然改变,称之为相位跳变。电压出现相位跳变,是由系统和线路的电抗与电阻的比值不同,或不平衡电压暂降向低压系统传递引起的。暂降幅值、持续时间和相位跳变是标

称一次电压暂降扰动最主要的三个特征量。

在电压暂降的分析中，还经常会用到暂降阈值（sag/dip threshold）、残（剩）余电压（residual voltage，简称残压）、电压暂降深度（depth of voltage sag/dip）等术语。暂降阈值是指为检测电压暂降的起始点或结束点而规定的电压幅值；残（剩）余电压是指电压暂降或者短时间中断过程中记录的电压最小值，也即暂降幅值；电压暂降深度是指参考电压与残（剩）余电压的差值，通常用参考电压的百分比表示。电压暂降相关特征量的表示如图 1-1 所示。

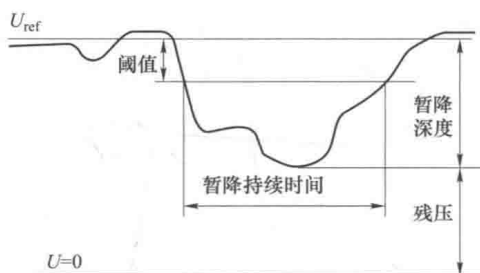


图 1-1 电压暂降相关特征量

图 1-1 中参考电压（ U_{ref} ）是电压暂降深度、阈值及其他值指定的基准值，通常选择标称电压，或供电方与用电方协商的供电电压。

由以上定义可知，暂降深度和暂降幅值是一对相对于参考电压的定义相反的参量，读者在阅读本书及其他参考文献时需要注意区分。

一般情况下，可设定电压暂降的结束阈值与起始阈值相同。但在进行某些电压暂降问题分析时，也可设定电压暂降的结束阈值略高于起始阈值（典型值是比起始阈值高出参考电压的 1%~2%），若结束阈值与起始阈值不同，则将两者之间的幅值差称之为迟滞电压。

在单相系统中，当电压方均根值降低到暂降阈值（起始阈值）以下时，记作电压暂降的开始；当电压方均根值上升到等于或大于暂降阈值与迟滞电压之和（结束阈值）时，记作电压暂降的结束。

在三相系统里，通常假设一个三相电压暂降是发生在最先受扰动相的方均根值电压低于暂降起始阈值的时刻，只有各相方均根值电压都等

于或高过暂降结束阈值时，该暂降才结束（见图 1-2）。

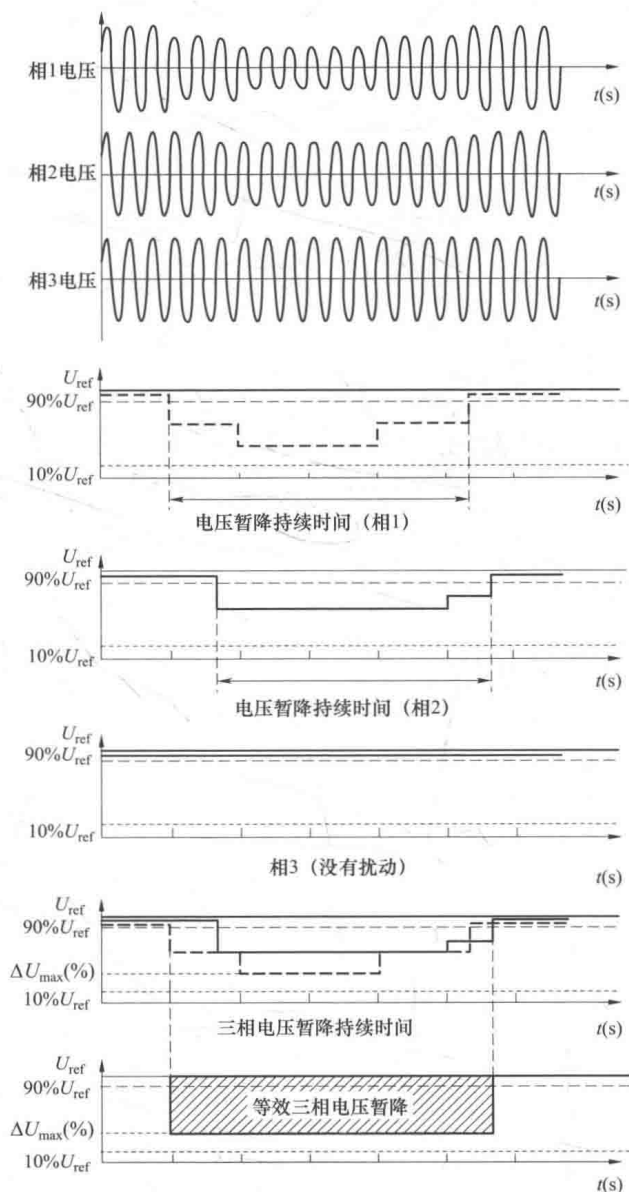


图 1-2 三相系统电压暂降的持续时间（假定阈值为 $90\%U_{ref}$ ）

暂降阈值和迟滞电压大小可由电压暂降监测项目执行者根据监测的目的和用途来进行设定。在故障检修或统计分析应用中，暂降阈值通常为固定参考电压的 $85\% \sim 90\%$ ，迟滞电压通常为参考电压的 2% 。电

压暂降持续时间取决于设定的阈值。在实际测量仪器或相应分析中可对应不同的暂降幅值给出相应的持续时间,即将电压方均根值低于指定电压门槛值的一段时间定义为与特定暂降幅值对应的持续时间。

当电压方均根值降低到接近于零时,称为中断。持续时间较长的中断称为长时间中断,而持续时间较短的中断则称为短时间中断。由于对电压暂降下降幅度定义的不同,“接近于零”也有不同的定义。IEC 定义“接近于零”为“低于额定电压的 1%”,IEEE 的定义则为“低于 10%”(IEEE Std.1159—1995)。对于长时间中断与短时间中断的持续时间,其定义也尚未统一。如 IEC 定义长时间中断持续时间最少为 3min,小于 3min 的中断称为短时间中断;在 IEEE 标准(IEEE Std.1250—1995)中将大于 2min 的中断称为长时间中断,而在 IEEE 的另一标准(IEEE Std.1159—1995)中,则将大于 1min 的中断称为长时间中断。

电压暂降发生的次数可用电压暂降发生频次进行描述。暂降频次是表征电压暂降对敏感电力用户影响频繁程度的重要指标。暂降频次的增加无疑将加重电压暂降对敏感用户的危害。为更确切地分析电压暂降的影响,在统计结果中常将电压暂降发生频次与暂降幅值及持续时间统一考虑。图 1-3 所示为某 115kV 系统大约一年内实测电压暂降的发生情况(图 1-3 中残压按额定电压的百分比给出)。由图 1-3 可知,多数电压暂降幅值为额定电压的 90%~70%。图 1-4 给出了与图 1-3 对应的暂降频次、暂降幅值及持续时间之间的三维柱状图。

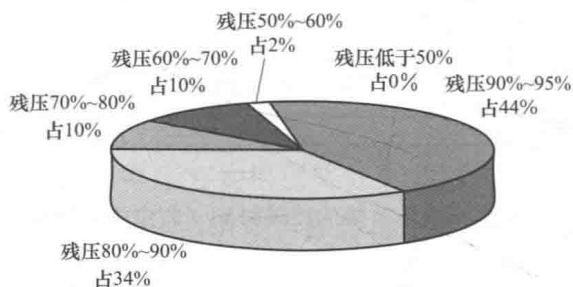


图 1-3 某 115kV 系统实测电压暂降发生情况

电压暂降是供电电压方均根值在短时间突然下降的事件,与之相

反, 可将电压方均根值在短时间突然上升的事件称为电压暂升, 该问题的分析方法与电压暂降相似。

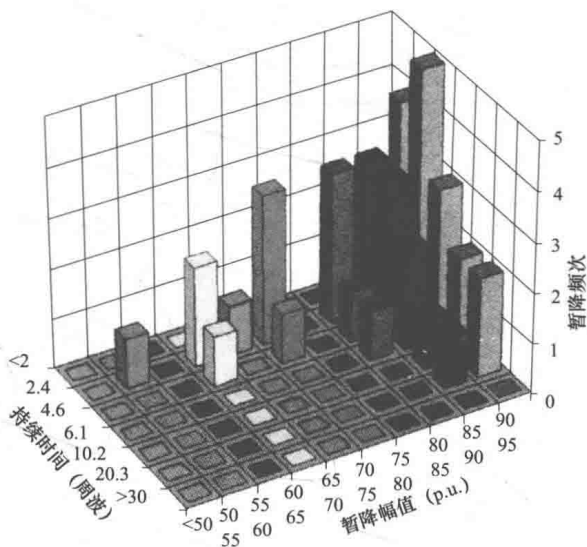


图 1-4 与图 1-3 对应的暂降频次、暂降幅值与持续时间之间的关系

1.2 电压暂降与短时间中断的相关性

短时间电压中断一般是指线路由于故障, 或者继电保护误动作、操作人员误操作而将断路器断开, 但在极短的时间内重新恢复供电的电压中断现象。与长时间中断相比, 短时间中断发生的频次高, 在技术处理上也有所不同, 表 1-1 给出了两者之间的比较。

表 1-1 短时间中断与长时间中断的起因、控制措施的比较

中断类型	短时间中断	长时间中断
起因	(1) 瞬时性故障清除前, 故障相线路经历短时间电压中断; (2) 保护误动时, 非故障相也会经历短时间电压中断; (3) 运行人员误操作	(1) 永久性故障; (2) 瞬时性故障时, 重合闸拒动; (3) 线路检修

续表

中断类型	短时间中断	长时间中断
故障恢复方法	自动恢复	手动恢复
具体措施	(1) 重合断路器, 主要用于架空配电线; (2) 自动切换至正常供电母线, 多用于工业用电系统	手动切换至正常供电母线

电压暂降与电压的短时间中断往往是相伴产生的。如对于图 1-5 所示的一具有架空线路的配电系统。假设图 1-5 所示的分支线路中采用慢速熔断器保护, 当主线路断路器 (重合闸装置) 清除暂态故障时, 熔断器不动作。将重合闸设定为瞬时动作和延迟动作两种情况, 即对所有可能的故障电流, 保护动作的时间顺序依次为: 主线路断路器 (重合闸) 瞬时动作、熔断器动作、主线路断路器 (重合闸) 延迟动作。这样, 当故障发生时, 主线路上的所有用户承受的将为短时间电压中断。

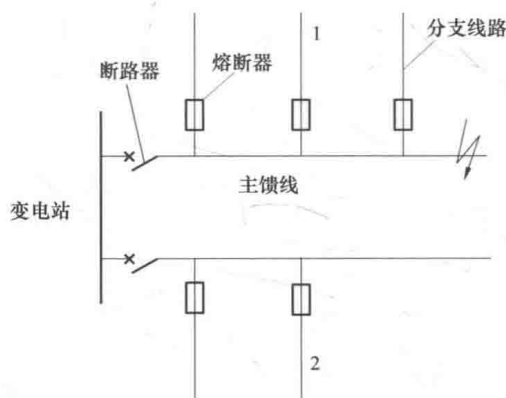


图 1-5 带有熔断器和重合闸架空线路的配电系统

保护装置按上述方式配合时, 将会对不同的用户带来不同的影响。假设图 1-5 中“1”处发生故障, 则“1”处与非故障的“2”处电压方均根值的变化情况如图 1-6 所示。图 1-6 中, A 为故障切除时间, B 为重合闸重合所需时间。故障发生后, 故障线路上的用户将承受一次电压暂降 (实线), 并将承受随之而来的由于断路器切除故障所引起的电压中断的影响。如果实际发生的故障是短时间的, 则重合闸应重合成功,

电压中断将是短时间的。这种情况下，非故障线路 2 上的用户将仅承受一次电压暂降（虚线）。如果在重合闸第一次重合之后，故障仍然存在，则非故障线路 2 上的用户将承受第二次电压暂降，故障线路 1 上的用户将承受第二次短时间电压中断或长时间中断。

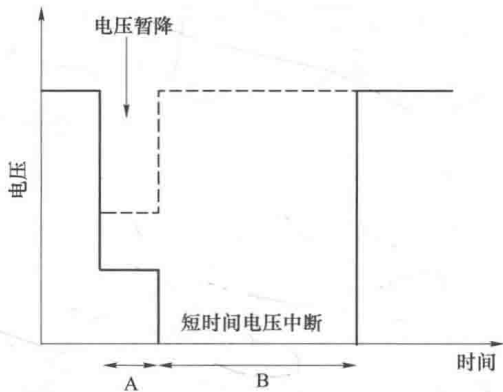


图 1-6 重合闸时故障线路（实线）和非故障线路（虚线）电压方均根值

A—故障切除时间 B—重合闸重合时间

电压发生短时间中断时，虽然电压方均根值可能并不为零，但很“接近于零”（电压方均根值降低到设定的中断阈值以下），这种事件可引起停电、灯光熄灭、显示屏幕空白、电机减速等。更为严重的是，它还会破坏正常的生产过程，使计算机丢失内存信息，使控制系统失灵等。电压中断往往给用户带来不便或严重的经济损失，并可能产生不良的社会影响。

与电压的短时间中断相比，电压暂降发生时虽然电压方均根值较高一些，但当电压暂降的幅值和持续时间超过敏感负荷中关键控制设备的耐受能力时，会影响它们的正常工作，造成计算机与数字式控制器等运行异常，从而引起由它们控制的自动化生产线停止工作，甚至无序重新启动等。

与电压的短时间中断相比，电压暂降发生的频次更高，两者所引起的相关损失均较大。短时间中断可以视为严重的电压暂降，其分析方法与电压暂降相似。