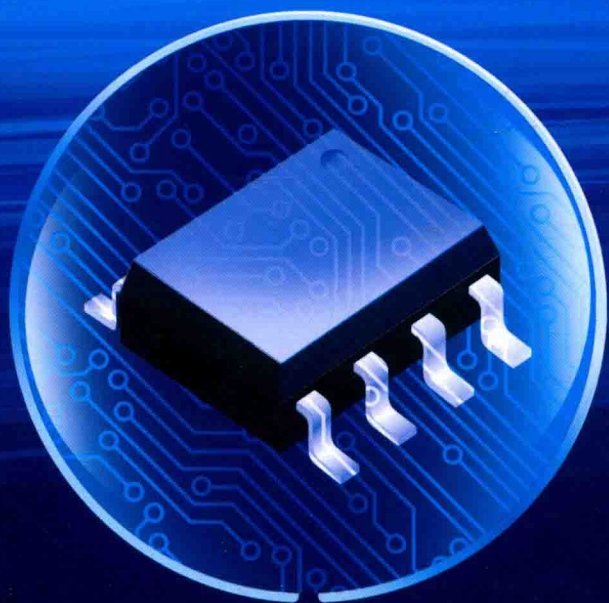




Understanding
Power Quality
Problems

VOLTAGE SAGS AND INTERRUPTIONS

理解电能质量问题： 电压暂降与短时中断

[荷兰]马思·博伦 (Math H.J. Bollen) 著
肖先勇 汪颖 李长松 徐方维 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

 Understanding
Power Quality
Problems

VOLTAGE SAGS AND INTERRUPTIONS

理解电能质量问题： 电压暂降与短时中断

[荷兰]马思·博伦 (Math H.J. Bollen) 著

肖先勇 汪颖 李长松 徐方维 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电压暂降和短时电压中断已成为电力企业和用户共同关注的重要问题。越来越多分布式电源、储能装置和敏感负荷接入电网,源、网、荷各环节存在大量敏感设备,迫切需要研究电压暂降与短时中断的产生原因、传播机制、评估方法、严重程度和应对措施等。

本书从扰动现象与事件的基本概念、现有标准出发,在简要介绍长时扰动的基礎上,重点介绍了短时中断的产生原因、分析方法、监测与预测方法,暂降特征及其提取方法,暂降对设备的影响,暂降估计方法,抑制措施,发展趋势等。全书内容丰富,深入浅出,是迄今为止国内外针对电压暂降和短时中断最系统的书籍。不仅可作为本科生、博硕士生教材,也是科研与工程技术人员的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

理解电能质量问题:电压暂降与短时中断/(美)马思·波伦(Math, H. J. Bollen)编;肖先勇等译. —北京:中国电力出版社, 2016.12

书名原文: UNDERSTANDING POWER QUALITY PROBLEMS: Voltage Sags and Interruptions

ISBN 978-7-5123-8956-4

I. ①理… II. ①马… ②肖… III. ①电能—质量 IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 277643 号

All Rights Reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition, entitled < Understanding Power Quality Problem: Voltage Sags and Interruption>, ISBN < 9780780347137 >, by < Math H. Bollen >, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder

© 2000 THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. 3 Park Avenue, 17th Floor, New York, NY 10016-5997 Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×1000 毫米 16 开本 28 印张 612 千字

印数 0001—1000 册 定价 109.00 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



作者序言

电力系统的主要目的可概括为将电能从发电机组传输到电气设备端，并将设备端电压维持在给定限值范围内，几十年来的研究和教育都集中于这样的第一目标，而很少将供电可靠性和供电质量看成一个专门的问题。存在争议的是，人们很早就认识到了供电可靠性的高低，这种认识的改变可能发生在 20 世纪 80 年代的某个时候，从工商业电力系统开始，并扩展到公用供电网，电能质量的危害开始出现。显然，因存在电压扰动，设备经常出现非正常中断，但同时，设备也对许多电压和电流扰动负有责任。用户更易理解可靠性定义是：停电就认为可靠性比想象的低。虽然开创电能质量最忙碌的年份似乎结束，但电能质量这个主题仍继续吸引着很多关注，可以肯定的是，电能质量问题在将来还会继续得到关注，因为在电力行业的改革过程中，用户需求已成为一个重要问题。

本书主要关注影响电力用户的电能质量现象：电压中断和电压暂降。在电压中断过程中，电压值完全为零，这可能是用户认识到的最差供电质量。在电压暂降过程中，电压值不为零，但明显低于正常运行电压。电压暂降和中断会导致用电设备发生多次不必要的跳闸。

本书前面几章中包含的材料是作者在 10 年时间内分别在埃因霍温、库拉索、曼彻斯特和哥德堡的 4 所大学（分别是：埃因霍温理工大学、安的列斯群岛大学、曼彻斯特大学理工学院和查尔姆斯理工大学）的研究成果，大部分材料最初用于国内和世界各地的研究生和工业讲座的教学中，这些材料当然也会（被作者，并希望被其他人）再次用于教学目的。

本书第一章是引言，对电能质量进行系统性综述后，引入电压幅值事件这个术语，电压暂降和中断是电压幅值事件的例子。第一章的第二部分讨论电能质量标准，重点介绍 IEC 电磁兼容标准和欧洲电压特征标准（EN 50160）。

在第二章讨论最严重的电能质量事件：长时中断。给出了获得电压中断监测次数结果的不同方法。第二章的大部分内容是长时电压中断的随机预测——该问题实际上就是更被大家熟悉的可靠性评估问题。在本章给出的很多技术可

以很好等效地应用于其他电能质量事件的随机预测。

第三章讨论短时电压中断——这样的电压中断因供电自动恢复而结束。本章介绍了短时电压中断的原因、监测、抑制、对设备的影响和随机预测方法等内容。

第四章是后面关于电压暂降的共三章内容的第一章，采用描述的方式探讨电压暂降问题，内容包括：怎样提取电压暂降特征、如何通过测量获得电压暂降特征以及如何计算这些特征。本章的重点是单相和三相设备经历的电压暂降幅值和相位跳变。

第五章讨论电压暂降对设备的影响问题，详细讨论了主要敏感设备受电压暂降的影响，包括：单相整流设备（如计算机、过程控制设备、用户电子设备等）、三相调速驱动设备和直流设备，并对其他类型设备也进行了简要讨论。在第四章中引入的暂降特征，在第五章中被用于描述设备的性能。

第六章对在第四、第五章中建立的理论和在第二章描述的统计法和随机方法进行综合。第六章一开始给出了供电侧电压暂降的性能，并将其与设备性能进行比较，然后给出获得供电侧电压暂降特性相关信息的两种方法：电能质量监测法和随机预测法，并对这两种方法进行了详细讨论。

第七章是本书的最后一章，对电压暂降和中断的抑制方法进行了概述，详细讨论了两种方法，即：电力系统设计和设备与系统接口处电力电子控制器。本章用比较可能获得的不同储能技术作为本章的结尾。

在第八章，作者对前面几章的结论进行了总结，给出了对未来的期望和希望。全书用三个附录作为本书的结尾：附录 A 和附录 B，分别给出了 IEC 和 IEEE 发布的 EMC（电磁兼容）与电能质量的标准，附录 C 给出了本书涉及的术语的定义，以及不同标准文件中给出的定义。

Math H.J. Bollen

于瑞典哥德堡

有关文件网站信息

除了出版本书外，作者还创建了提供本书中许多图形的 MATLAB 文件的 FTP 网站。获取这些文件可链接：<ftp://ftp.ieee.org/jupload/press/bollen>。

致 谢

任何一本书几乎不可能仅是一个人的成果，本书也绝不例外。有很多人对本书的出版做出了贡献，但在他们中，首先要感谢我的夫人 Irene Gu，是她鼓励我开始写作，并在我偶尔但太频繁地遇到一个又一个挑战时，她总是帮我把茶沏好。

能有本书给出的知识，我衷心感谢许多人，包括在埃因霍温、库拉索、曼彻斯特和哥德堡的老师、同事和学生们，以及遍及全世界的同事和朋友们！其中要特别提及的是：Matthijs Weenink、Wit van den Heuvel 和 Wim Kersten，感谢他们对我的教导！感谢两位 Larry（Conrad 和 Morgan），是他们不断为我提供了电能质量信息！还要感谢 Wang Ping、Stefan Johansson，以及负责校对、评阅本书的无名英雄们！最后，要感谢以不同方式为本书提供数据、图形和同意使用其材料的每个人！

Math H.J. Bollen

于瑞典哥德堡

voor mijn ouders

致我的父母



译者前言

译者从1998年起开展电能质量领域的研究,自2000年起重点研究电压暂降和设备敏感度问题,拜读了国内外电能质量领域诸多著作,其中Math Bollen教授所著《Understanding Power Quality Problems: Voltage Sag and Interruptions》是所读著作中针对电压暂降和短时电压中断最完整、最全面的,我也认为,是迄今为止世界上最权威的著作。

原作者Math Bollen教授,是世界上电压暂降领域的著名学者、IEEE Fellow,公开发表了电能质量领域上百篇学术论文,参加或主持制订了多项IEC、IEEE电能质量和电磁兼容标准,2006、2010年和2011年还分别出版了另外3本著作,是国际上很活跃的专家。

译者所在四川大学电能质量研究团队,继承了20世纪70年代张一中教授的研究方向,1998年起在杨洪耕教授的领导下对电能质量开展了较全面、持续的研究,同时,得到了国内、国际诸多专家、学者和业内同行的大力帮助和支持。译者及所在团队除了研究谐波等平稳扰动外,重点针对电压暂降和短时中断等非平稳扰动,以及敏感设备和过程所受影响开展了大量研究,对若干实际半导体、航空航天、核元件、核动力、石化企业开展了研究,参加了多项标准起草,这些工作始终能从本书中获取营养。因此,译者历经3年将本书翻译成中文,希望能将本书奉献给国内同行,为我国电压暂降、短时中断等问题的解决做一点贡献。

本书的翻译、出版过程中得到了华北电力大学肖湘宁教授、中国电力科学研究院(智能电网研究院,能源互联网研究院)林海雪教授级高工、哈尔滨工业大学郭志忠教授等的关心、帮助和斧正,并在此过程中,与Math Bollen教授进行了多次当面交流和讨论,并从他处得到了部分仿真程序和数据,最后才完成全书翻译工作。在编辑、出版过程中,中国电力出版社岳璐编辑和其他老师给予了极大支持和帮助。本书还得到了国家电网公司出版基金资助。在此一并表示衷心感谢!

本书原著出版时间虽略显久远，但仍是目前全世界电压暂降和短时中断领域最好的书之一，本书出版后，电压暂降和短时中断领域有了诸多新发展，但这些发展均离不开本书中的很多原理和方法。因此，希望本书在中国的出版能为更多国内学术界和工业界同行，尤其是为正在攻读博士、硕士学位的研究生提供帮助，并希望能将本书中的基本理论和方法应用到新环境，回答和解决新问题，如：与优质供电和优质电力园区、可再生能源并网与穿越能力、能源互联网、超导电力的应用等结合起来，有理由相信，通过本书和我国专家学者的共同努力，我国在此领域必将得到更大、更快发展。

本书翻译过程中，博士研究生马超、陈礼频、刘旭娜、张文海、郑子萱、刘阳、马愿谦、胡文熙，硕士研究生李皖、陈武、汪洋、杨达、李政光、李丹丹、赵泓、崔灿、刘凯、陈韵竹、谭秀美等做出了贡献，在此表示感谢。

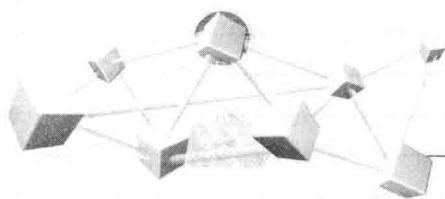
本书翻译工作由肖先勇、汪颖、李长松、徐方维完成，肖先勇统稿，其中，汪颖副教授翻译了20万字以上，对他们的艰苦努力表示感谢！

最后，祝愿我国在电能质量领域能取得更多成果，能不断提升在全球的地位！更好地服务于国家和地方经济建设！

肖先勇

成都 四川大学

2016年3月



目 录

作者序言	
有关文件网站信息	
致谢	
译者前言	

第1章 电能质量概述与标准	1
1.1 电能质量的意义	2
1.2 电能质量与电压质量	4
1.3 电能质量现象概述	5
1.3.1 电压与电流变化	6
1.3.2 事件	12
1.3.3 电压幅值事件概述	16
1.4 电能质量和电磁兼容标准	19
1.4.1 标准化的目的	19
1.4.2 IEC 电磁兼容标准	20
1.4.3 欧洲电压特征标准	24
第2章 长时电压中断与可靠性评估	30
2.1 引言	30
2.1.1 电压中断	30
2.1.2 电力系统可靠性评估	30
2.1.3 术语	30
2.1.4 长时中断的起因	31
2.2 系统性能的可观测性	31
2.2.1 基本指标	32
2.2.2 中断持续时间的分布	34
2.2.3 地区差异	35
2.2.4 中断的产生	38
2.2.5 更多信息	40
2.3 标准与规定	42
2.3.1 对中断频次的限制	42
2.3.2 中断持续时间限制	42
2.4 可靠性评估概述	43

2.4.1	发电可靠性	44
2.4.2	输电可靠性	46
2.4.3	配电可靠性	49
2.4.4	工业电力系统	51
2.5	基本的可靠性评估技术	54
2.5.1	可靠性评估技术的基本概念	54
2.5.2	网络法	59
2.5.3	基于状态和基于事件的方法	65
2.5.4	马尔可夫模型	68
2.5.5	蒙特卡罗仿真	76
2.5.6	元件老化	83
2.6	中断成本	86
2.7	观测和可靠性评估的比较	89
2.8	算例计算	90
2.8.1	基本选择性供电	90
2.8.2	恶劣天气	91
2.8.3	并联元件	92
2.8.4	含老化和维护的二元件模型	93
第3章	短时电压中断	96
3.1	引言	96
3.2	术语	96
3.3	产生短时电压中断的原因	97
3.3.1	基本原理	97
3.3.2	熔断器保护	98
3.3.3	由重合闸引起的电压幅值事件	98
3.3.4	中断过程中的电压	100
3.4	短时中断的监测	101
3.4.1	调查结果举例	101
3.4.2	中、低压系统的差异	102
3.4.3	多重事件	103
3.5	对设备的影响	104
3.5.1	异步电动机	105
3.5.2	同步电动机	105
3.5.3	变速驱动器	105
3.5.4	电子设备	105
3.6	单相跳闸	105
3.6.1	故障过程中的电压	106

3.6.2	故障后电压	107
3.6.3	故障过程中的电流	111
3.7	短时中断的随机预测	112
第4章	电压暂降特征描述	115
4.1	引言	115
4.2	电压暂降幅值	116
4.2.1	监测	116
4.2.2	理论计算	121
4.2.3	暂降幅值计算算例	126
4.2.4	非辐射型系统的暂降幅值	128
4.2.5	网状系统的电压计算	135
4.3	电压暂降持续时间	138
4.3.1	故障清除时间	138
4.3.2	幅值-持续时间图	138
4.3.3	暂降持续时间的测量	139
4.4	三相不对称	142
4.4.1	单相故障	143
4.4.2	相间故障	148
4.4.3	两相接地故障	150
4.4.4	七类三相不对称暂降	151
4.5	相位跳变	161
4.5.1	监测	162
4.5.2	理论计算	163
4.6	三相不对称暂降的幅值与相位跳变	168
4.6.1	幅值与相位跳变的定义	168
4.6.2	相间故障	170
4.6.3	单相故障	175
4.6.4	两相对地故障	180
4.6.5	高阻抗故障	184
4.6.6	网状系统	186
4.7	电压暂降的其他特征	187
4.7.1	波形点特征	187
4.7.2	损失电压	189
4.8	负荷对电压暂降的影响	192
4.8.1	异步电动机和三相故障	192
4.8.2	异步电动机和不对称故障	194
4.8.3	电力电子负荷	200
4.9	异步电动机启动引起的暂降	200

第5章 电压暂降——设备性能	203
5.1 引言	203
5.1.1 电压耐受能力和电压耐受曲线	203
5.1.2 电压耐受能力测试	205
5.2 计算机与家用电子产品	205
5.2.1 典型电源结构	206
5.2.2 计算机电压耐受能力评估	206
5.2.3 个人计算机电压耐受能力测量	209
5.2.4 电压耐受能力的要求: CBEMA 和 ITIC 曲线	211
5.2.5 过程控制设备	211
5.3 交流变速驱动器	212
5.3.1 交流驱动器的运行	213
5.3.2 驱动器测试结果	214
5.3.3 平衡暂降	217
5.3.4 三相不平衡暂降对应的直流电压	220
5.3.5 电流不平衡	228
5.3.6 不平衡电动机电压	231
5.3.7 电动机减速	234
5.3.8 自动重启	237
5.3.9 交流驱动器抑制方法概述	239
5.4 直流变速驱动器	240
5.4.1 直流驱动器的运行	240
5.4.2 平衡暂降	243
5.4.3 不平衡暂降	246
5.4.4 相位跳变	249
5.4.5 换相失败	251
5.4.6 直流驱动器限制方法综述	252
5.5 其他敏感负荷	253
5.5.1 直馈异步电动机	253
5.5.2 直馈同步电动机	254
5.5.3 接触器	255
5.5.4 照明灯具	256
第6章 电压暂降随机估计	257
6.1 用电设备与供电网之间的兼容性	257
6.2 结果描述: 暂降配合图	259
6.2.1 散点图	259
6.2.2 暂降密度表	260
6.2.3 累计表	261

6.2.4	电压暂降配合图	262
6.2.5	电压暂降配合图使用举例	264
6.2.6	非矩形暂降	265
6.2.7	其他暂降特征	266
6.3	电能质量监测	269
6.3.1	电能质量调查	269
6.3.2	单个节点	281
6.4	故障点法	283
6.4.1	随机预测法	283
6.4.2	故障点法基础	284
6.4.3	故障点选择	286
6.4.4	故障点法的算例	289
6.5	临界距离法	295
6.5.1	基本理论	295
6.5.2	算例: 三相故障	296
6.5.3	基本理论: 更精确的表达式	296
6.5.4	中间表达式	298
6.5.5	三相不平衡	299
6.5.6	发电厂	304
6.5.7	相位跳变	304
6.5.8	并行馈线	305
6.5.9	与故障点法的比较	305
第7章	电压暂降与中断抑制	307
7.1	抑制方法概述	307
7.1.1	故障引起的跳闸	307
7.1.2	减少故障次数	308
7.1.3	缩短故障清除时间	309
7.1.4	系统改造	310
7.1.5	装设抑制设备	311
7.1.6	提高设备免疫力	311
7.1.7	不同事件和抑制方法	312
7.2	电力系统规划——通过切换实现冗余	313
7.2.1	冗余的类型	313
7.2.2	自动重合闸	314
7.2.3	常开节点	314
7.2.4	负荷转移	315
7.3	电力系统设计——通过并联运行形成冗余	320
7.3.1	并联和环网系统	320

7.3.2	本地网络	323
7.3.3	电力系统设计——本地发电机	327
7.4	系统与设备间的接口	330
7.4.1	电压源型换流器	330
7.4.2	串联电压控制器——DVR	331
7.4.3	并联电压控制器——StatCom（静止同步补偿器）	339
7.4.4	并串联组合控制器	344
7.4.5	备用电源——超导储能系统（SMES）与电池储能系统（BESS）	347
7.4.6	级联电压控制器——不间断电源（UPS）	348
7.4.7	其他解决方案	350
7.4.8	能量储存	353
第 8 章	归纳与总结	360
8.1	电能质量	360
8.1.1	电能质量的前景	360
8.1.2	电能质量领域的教育问题	361
8.1.3	测量数据	361
8.2	标准	361
8.2.1	未来的发展	361
8.2.2	双边合同	362
8.3	中断	362
8.4	可靠性	363
8.4.1	举证	363
8.4.2	理论发展	363
8.5	电压暂降的特征	363
8.5.1	暂降特征的定义和提取	364
8.5.2	负荷影响	364
8.6	暂降引起的设备性能	364
8.6.1	设备测试	365
8.6.2	设备的改进	365
8.7	电压暂降随机估计	365
8.7.1	其他暂降特性	366
8.7.2	随机预测技术	366
8.7.3	电能质量调查	366
8.7.4	监测或预测	367
8.8	抑制方法	367
8.9	最后评论	367
	参考文献	369
附录 A	电磁兼容性（EMC）标准总论	384

附录 B IEEE 关于电能质量的标准386

附录 C 电能质量的定义和术语.....388

附录 D 图索引406

附录 E 表索引422

索引.....425