

Handbook of Power Quality

# 电能质量手册

[意]Angelo Baggini 主编

肖湘宁 陶顺 徐永海 译



 **WILEY**  
Publishers Since 1807



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

Handbook of Power Quality

# 电能质量手册

[意]Angelo Baggini 主编

肖湘宁 陶顺 徐永海 译



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是全面阐述现代电能质量所覆盖的诸多不同主题的综合知识性书籍。它平衡与融合了科学研究和实践知识,通过背景理论、测量过程指导和解决问题的方法等进行了电能质量各类扰动现象全方位的分析;从提高供电可靠性的角度,阐述了如何合理选择配电网结构、低压电力调节器,以及应急与备用电源等,并且讨论了电能质量与电力系统运行控制、接地系统和分布式发电系统的关系;基于大量的实际调查评估,介绍了劣质电能成本、缓解措施经济投资分析方法,以及电力市场下的电能质量与电能的合理利用,形成了综合性的面向工程实际的电能质量手册。

本书适合于从事电气工程运行控制与设计、电能质量分析、诊断与解决实际问题的技术人员、工程师和企业管理者使用,也适合于高等学校电气类专业的教师和学生阅读学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

电能质量手册/(意)帕基尼(Baggini, A.)主编;肖湘宁,陶顺,徐永海译.—北京:中国电力出版社,2010

书名原文:Handbook of Power Quality

ISBN 978-7-5083-9876-1

I. ①电… II. ①帕…②肖…③陶…④徐… III. ①电能—质量分析—手册 IV. ①TM60-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第230562号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010年3月第一版 2010年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 27.75印张 647千字

印数0001—3000册 定价58.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

原 版 编 著 者

**Hermína ALBERT**

Institute for Studies and Power  
Engineering  
Lacul Tei Blvd1-3  
Bucharest 020371  
Romania

**Alan ASCOLARI**

ECD Engineering Consulting  
and Design  
via Maffi 21  
27100 Pavia  
Italy

**Angelo BAGGINI**

Dipartimento di Ingegneria  
Industriale  
Università degli Studi di Bergamo  
Via Marconi 5  
24044 Dalmine (BG)  
Italy

**Araceli HERNÁNDEZ BAYO**

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Politécnica de Madrid  
Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros Industriales  
C/José Gutiérrez Abascal, 2  
28006 Madrid  
Spain

**Joan BERGAS-JANÉ**

CITCEA  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Av. Diagonal, 647. Planta 2  
08028 Barcelona  
Spain

**Janusz BROŻEK**

AGH-University of Science  
and Technology  
30-059 Kraków  
Al. Mickiewicza 30  
Poland

**Franco BUA**

ECD Engineering Consulting  
and Design  
via Maffi 21  
27100 Pavia  
Italy

**Francesco BURATTI**

ECD Engineering Consulting  
and Design  
via Maffi 21  
27100 Pavia  
Italy

**Maurizio CACIOTTA**

Università degli Studi  
Facoltà INGEGNERIA  
Dipartimento Ingegneria Elettronica  
via della Vasca Navale, 84  
00146 Roma  
Italy

**David CHAPMAN**

Copper Development Association  
5 Grovelands Business centre  
Boundary Way  
Hemel Hempstead  
HP2 7TE  
UK

**Mircea CHINDRIS**

Technical University of Cluj-Napoca  
Power Systems Dept.  
15, C. Daicoviciu St.  
400020 Cluj-Napoca  
Romania

**Johan DRIESEN**

Katholieke Universiteit Leuven  
Dept. Electrical Engineering (ESAT),  
Div. ELECTA  
Kasteelpark Arenberg 10, bus 2445  
3001 Heverlee  
Belgium

**Stefan FASSBINDER**

Beratung elektrotechnische  
Anwendungen  
Deutsches Kupferinstitut  
Am Bonnheshof 5  
D-40474 Düsseldorf  
Germany

**Andrzej FIRLIT**

AGH-University of Science  
and Technology  
30-059 Kraków  
Al. Mickiewicza 30  
Poland

**Samuel GALCERAN-ARELLANO**  
CITCEA

Universitat Politècnica de Catalunya  
Av. Diagonal, 647. Planta 2  
08028 Barcelona  
Spain

**Nicolae GOLOVANOV**

Institute for Studies and Power  
Engineering  
Lacul Tei Blvd1-3  
Bucharest 020371  
Romania

**Krish GOMATOM**

EPRI  
942 Corridor Park Blvd  
Knoxville  
TN 37932  
USA

**Zbigniew HANZELKA**

AGH-University of Science  
and Technology  
30-059 Kraków  
Al. Mickiewicza 30  
Poland

**Andrzej KANICKI**

Technical University of Lodz  
Institute of Electrical Power  
Engineering  
18/22 Stefanowskiego Str.  
90-924 Lodz  
Poland

**Antoni KLAJN**

Wroclaw University of Technology  
Institute of Electrical Power Engineering  
ul. Wyb. Wyspianskiego  
27 50-370 Wroclaw  
Poland

**Aleksander KOT**

AGH-University of Science  
and Technology  
30-059 Kraków  
Al. Mickiewicza 30  
Poland

**Jonathan MANSON**

JEL Consulting Limited  
6 Staveley Road  
Chiswick  
London  
W4 3ES  
UK

**Johan RENS**

School for Electrical Engineering  
North-West University  
Potchefstroom Campus  
Potchefstroom  
South Africa

**Tom SHORT**

EPRI  
1462 Erie Blvd  
Schenectady  
NY 12305  
USA

**Antoni SUDRIÀ-ANDREU**

CITCEA  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Av. Diagonal, 647. Planta 2  
08028 Barcelona  
Spain

**Andreas SUMPER**

CITCEA  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Av. Diagonal, 647. Planta 2  
08028 Barcelona  
Spain

**Piet SWART**

School for Electrical Engineering  
North-West University  
Potchefstroom Campus  
Potchefstroom  
South Africa

**Roman TARGOSZ**

Polish Copper Promotional Centre  
Plac Jana Pawla II 1-2  
50-136 Wrocław  
Poland

**Vu Van THONG**

Katholieke Universiteit Leuven  
Dept. Electrical Engineering (ESAT),  
Div. ELECTA  
Kasteelpark Arenberg 10, bus 2445  
3001 Heverlee  
Belgium

**Pieter VERMEYEN**

Katholieke Universiteit Leuven  
Dept. Electrical Engineering (ESAT),  
Div. ELECTA  
Kasteelpark Arenberg 10, bus 2445  
3001 Heverlee  
Belgium

**Roberto VILLAFÁFILA-ROBLES**

CITCEA  
Universitat Politècnica de Catalunya  
Av. Diagonal, 647. Planta 2  
08028 Barcelona  
Spain

**Irena WASIAK**

Technical University of Lodz  
Institute of Electrical Power Engineering  
18/22 Stefanowskiego Str.  
90-924 Lodz  
Poland

## 译者前言

当代电力系统的电源类型与特性、电网结构与负荷构成正在发生着深刻变化，加之电气设备的敏感性不断增强，电力系统问题也变得愈加复杂。其中，电能质量已经成为当今电网运行过程中十分关注的重要问题。为此，近年来国内外在这方面已经有许多专题著作出版。但是，人们也认识到，现代电能质量涉及范围广，是一个覆盖诸多不同主题的复杂学术领域，电力科技工作人员非常需要得到一本帮助他们解决棘手的电能质量实际问题的综合知识书籍。

2000年，由欧盟委员会发起成立的LPQI（莱昂纳多电能质量工作组）汇集欧洲电力科技的专家教授开展了历时多年的针对电能质量相关问题的多项子课题研究，并且在此基础上，组成了由欧洲电气标准化委员会成员、贝加莫大学电气工程教授 Angelo Baggini 任主编，32位编著者参加的写作组。2005年，写作组开始筹划编写知识面广、内容系统全面和便于工程技术人员使用的《电能质量手册》，其英文版于2008年正式由 John Wiley & Sons 出版。

《电能质量手册》通过背景理论、测量过程指导和解决问题的方法等全方位观察分析了电能质量扰动现象。书中综合供电方和用电方的观点，借助专家们在电能质量各个方面所作出的贡献，提供了既注重科学又结合实际的知识，其中包括：

频率变化；

电压电流特性，其中有电压暂降、波动与闪变、不平衡、谐波与过电压等；

供电连续性和可靠性、配电网结构、电器与设备；

电能质量和电力系统运行控制、接地系统以及分布式发电的关系；

电能质量监测与劣质电能成本；

电力市场与电能的合理利用。

作者利用信息化手段，在该书中附有可查阅的相关网站，内容包括合作者主办的个案研究、实务演示说明、事件识别与分析和如何解决工程实际问题等诸多方面。通过这样的方式可继续丰富和更新读者的知识信息。

这本综合性的手册用可实际操作的方式讲解了电能质量方法学，并提供了大量调查统计数据对于所有从事实际工作的电力工程师和研究者都是必不可少的。同时，这本手册对于面临电能质量问题又进而希望在这方面获得知识的电气工程师和管理人员将发挥重要作用。

出于国内在电能质量工作方面的需要，在中国电力出版社的大力支持下，译者花费约一年时间，组织翻译了这本书，供我国电力工业和电气工程界科技者参考使用。

前不久，译者与原著主编 Angelo Baggini 教授进行了交流，就书中存在的部分错误和问题提出了修正意见。在征得同意后，译者在中文出版稿中加入了部分译者注，有些则作了直接修改。

本书的翻译计划得到了“十一五”国家科技支撑计划——电力电子关键器件及重大装备

研制项目（2007BAA12B03）的资助。在翻译和图文处理过程中，王哲、张豪、雷霄、吴冰冰、孙哲、邸亚静、张志强、肖潇、张丹、李伟等同学做了大量工作，对他们付出的辛劳和智慧，表示衷心感谢。另外，欧盟—亚洲电能质量项目（APQI）中国合作组对翻译工作给予了积极支持和帮助，在此表示感谢。

由于时间紧迫，译者水平所限，书中难免有错误和不妥之处，请读者批评指正。

译者联系方式：taoshun@ncepu.edu.cn。

译 者

2009年11月于北京

华北电力大学



## 原 版 前 言

几年前电能质量还只是变电站和电弧炉工程师所关心的问题，而近年来，在这方面却发生了很大的变化，电能质量对公用电网特别是对用户电气设备造成的影响引起了电气工程技术人员广泛关注，他们几乎每天都要面对电能质量带来的各种问题，不得不对所遇到电力扰动现象进行分析、诊断和处理，并且要提出可行的解决方法。但遗憾的是，他们中的多数人缺少在这方面的培训和教育。

解决好电能质量问题的确不是一件容易的事情，况且解决的方法也多种多样。对于某一类电能质量问题的最佳解决方案通常要同特定的条件相结合。因此，如何正确识别电能质量引起的异常状况和提出不同的治理方案，并从中获得切合实际的治理措施是十分重要的。这对于那些没有接受过电能质量知识培训的技术人员来说，选择出恰当有效的缓解方法是十分困难的。

评价所提出的治理方案是否妥当就是看它是否能有效地解决实际电能质量问题，但需要注意的是，经济性往往是最终选择治理方案更为重要的因素。有些好的解决方案需要高投资，需要得到企业负责人的批准。而实际上，由于许多主管经理人常常缺少这方面的基本知识，他们很难对此作出合理的评价和判断。可见开展电能质量技术培训十分必要。

事实上，电能质量是一个覆盖诸多技术领域的复杂问题，可以说，几乎每个电能质量主题都可以写成一本专业著作，但要想编写出一本适用于专业技术培训的电能质量综合知识书籍是有难度的，为此所花的写作时间也是可想而知的。

处于以上种种考虑，2000年一个由学者和工业界人士组成的小组开始了一项培训计划。它由欧洲各专业委员会共同创立，并且专门致力于电能质量问题研究，不但从供电方，而且从用户方的观点全面开展了项目的实施研究。7年后，该计划已经遍布世界各国的100个合作单位，与此同时，开展了许多针对电能质量相关问题的子课题研究。其中一项工作就是启动LQPIves项目（即莱昂纳多职业教育系统），也就是在2005年4月的LPQI柏林会议上，我们产生了编著此书的想法。

LPQIves项目基本目标是开发一个包括内容、方法以及在有些国家的专家认证书上得到承认和可标注的培训系统。参加该项目的成员为此达成了如下共识，即这本著作应当由电能质量各相关部分构成一个整体，使之成为培训课程参加者方便使用的手册，也可用作教师和学生们在普通大学课程中授课与学习的参考书，还可作为读者研究和解决实际电能质量问题的综合信息指南。

这本著作的特色之一，就是在科学研究与实践知识之间形成了平衡与融合，特别注意利用测量数据和应用案例的分析来阐述各章的内容，它十分适用于那些只具备电气工程基础知识的技术人员的工作需要。

正是这种多用途的培训模式使得本书内容非常宽泛、面向实际，它能吸引各方面的读者：科技工作者可将他们的专业知识和电能质量问题联系起来；工程师可找到分析、识别和

解决电能质量问题的方法及相关信息；企业管理者亦可了解为解决电能质量问题怎样作出经济投资的分析；它还适用于那些需要知道电能质量的定义与解释，以及包罗电能质量各方面知识的综合手册的学生们。

为了照顾到读者对电能质量各方面知识的需求，这本著作由五个部分组成。第一部分集中在电力系统问题上；第二部分对电能质量的物理本质、参数、测量、干扰源和缓解方法等进行了全面论述；后三部分则重点放在实际中的电能质量现象、电能质量问题和电能质量的经济性等方面。每一章中的案例研究和专题内容也可通过相应合作伙伴网站获得。

最后，在你有兴趣阅读本书之前，请允许我提到的是，虽然在 2005 年柏林会议时我还很年轻，但在开始协调由世界各国富有创造性的作者们所组成的团队开展工作之前，我已经被选定为本书的主编了。

Angelo Baghini Pavia, Italy

原版编著者

译者前言

原版前言

|          |                           |    |
|----------|---------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>频率变化</b> .....         | 1  |
| 1.1      | 频率质量指标 .....              | 2  |
| 1.2      | 频率测量 .....                | 3  |
| 1.3      | 负荷—频率特性 .....             | 4  |
| 1.3.1    | 电动机负荷 .....               | 4  |
| 1.3.2    | 电容器组和谐波滤波器 .....          | 5  |
| 1.3.3    | 电网中的变压器和线圈 .....          | 5  |
| 1.4      | 频率对用户设备的影响 .....          | 5  |
| 1.4.1    | 频率变化对异步电动机的影响 .....       | 6  |
| 1.4.2    | 频率变化对电抗器的影响 .....         | 8  |
| 1.5      | 汽轮机转速控制 .....             | 8  |
| 1.6      | 电力系统中的频率控制.....           | 11 |
| 1.6.1    | 综合负荷.....                 | 11 |
| 1.6.2    | 发电机特性曲线.....              | 12 |
| 1.6.3    | 系统特性与控制原理.....            | 13 |
| 1.6.4    | 孤岛电网和互联系统的频率控制.....       | 15 |
| 1.6.5    | 频率控制：一次调频、二次调频、三次调频.....  | 15 |
| 1.6.6    | 负荷—频率控制在技术和组织结构方面的要求..... | 18 |
|          | 参考文献 .....                | 19 |
| <b>2</b> | <b>供电连续性</b> .....        | 20 |
| 2.1      | 配电可靠性.....                | 20 |
| 2.1.1    | 基于用户的指标.....              | 21 |
| 2.1.2    | 基于负荷的指标.....              | 22 |
| 2.1.3    | 电力公司指标的变化.....            | 22 |
| 2.2      | 供电质量.....                 | 23 |
| 2.2.1    | 用户服务质量.....               | 23 |
| 2.2.2    | 供电连续性.....                | 24 |
| 2.2.3    | 电压质量.....                 | 24 |

|       |                     |    |
|-------|---------------------|----|
| 2.3   | 影响可靠性指标的因素          | 26 |
| 2.3.1 | 可靠性指标报告             | 27 |
| 2.3.2 | 不同供电类型的差别           | 28 |
| 2.4   | 提高可靠性               | 29 |
| 2.4.1 | 电力公司的改进方案           | 29 |
| 2.4.2 | 定制电力设备              | 31 |
| 2.5   | 可靠性的成本、市场和价值        | 32 |
| 2.5.1 | 终端用户负荷容量和停电持续时间影响成本 | 32 |
| 2.5.2 | 可靠性市场               | 33 |
| 2.5.3 | 可靠性价值：宏观描绘          | 33 |
| 2.5.4 | 可靠性事件对终端用户生产力的影响    | 35 |
| 2.5.5 | 终端用户设备运行时间与可靠性对比    | 36 |
|       | 参考文献                | 37 |

### **3 配电系统电压控制** ..... 38

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 3.1   | 现象描述           | 38 |
| 3.2   | 扰动源            | 39 |
| 3.3   | 扰动的影响          | 40 |
| 3.3.1 | 负荷模型           | 40 |
| 3.3.2 | 电压降落           | 40 |
| 3.3.3 | 电压稳定性          | 41 |
| 3.4   | 消除影响的方法        | 44 |
| 3.4.1 | 发电机励磁控制        | 44 |
| 3.4.2 | 变压器变比调节        | 45 |
| 3.4.3 | 改变无功潮流调压       | 46 |
| 3.4.4 | 改变网络阻抗调压       | 48 |
| 3.4.5 | 节点电压优化         | 49 |
| 3.5   | 标准             | 49 |
| 3.5.1 | 电网正常运行条件下电压标准  | 49 |
| 3.5.2 | 电网受干扰运行条件下电压标准 | 49 |
| 3.5.3 | 中低压配电网电压标准     | 49 |
|       | 参考文献           | 49 |

### **4 电压暂降与短时间停电** ..... 51

|       |          |    |
|-------|----------|----|
| 4.1   | 现象描述     | 51 |
| 4.2   | 特征       | 54 |
| 4.2.1 | 电压暂降持续时间 | 54 |
| 4.2.2 | 电压暂降幅值   | 54 |
| 4.3   | 起因       | 56 |

|       |              |    |
|-------|--------------|----|
| 4.3.1 | 电压暂降的起因      | 56 |
| 4.3.2 | 短时间停电的起因     | 58 |
| 4.4   | 影响           | 58 |
| 4.4.1 | IT 设备及控制系统   | 59 |
| 4.4.2 | 接触器与继电器      | 60 |
| 4.4.3 | 感应电动机        | 61 |
| 4.4.4 | 同步电动机        | 61 |
| 4.4.5 | 可调速驱动装置      | 61 |
| 4.4.6 | 高压气体放电灯泡     | 62 |
| 4.5   | 缓解措施         | 62 |
| 4.5.1 | 减少故障次数       | 62 |
| 4.5.2 | 减小故障清除时间     | 62 |
| 4.5.3 | 改变供电系统配置     | 63 |
| 4.5.4 | 电压稳定器        | 64 |
| 4.5.5 | 提高设备免疫力      | 64 |
| 4.6   | 测量           | 66 |
| 4.6.1 | 测量原理         | 66 |
| 4.6.2 | 统计分析方法       | 74 |
| 4.6.3 | 凹陷域          | 75 |
| 4.7   | 合同           | 76 |
| 4.7.1 | 测量时间         | 77 |
| 4.7.2 | 电压参考值        | 77 |
| 4.7.3 | 测量仪器的连接方式和位置 | 77 |
| 4.7.4 | 测量仪器的技术规格    | 78 |
| 4.7.5 | 扰动检测的阈值      | 78 |
| 4.7.6 | 测量结果的报告方法    | 78 |
| 4.7.7 | 测量结果的集合算法    | 78 |
| 4.8   | 标准           | 81 |
| 4.9   | 电压暂降指标选择     | 83 |
| 4.9.1 | 基于电压变动的指标    | 83 |
| 4.9.2 | 暂降能量指标       | 84 |
| 4.9.3 | 其他           | 85 |
|       | 参考文献         | 87 |

## **5** 电压波动与闪变 ..... 90

|       |              |    |
|-------|--------------|----|
| 5.1   | 现象描述         | 90 |
| 5.1.1 | 电压变动、电压波动与闪变 | 90 |
| 5.1.2 | 闪变感受生理学      | 91 |
| 5.2   | 特征参数         | 92 |

|          |                  |     |
|----------|------------------|-----|
| 5.3      | 测量               | 92  |
| 5.3.1    | IEC 闪变仪          | 93  |
| 5.3.2    | 闪变仪的使用           | 97  |
| 5.3.3    | $P_{st}$ 评估的简化方法 | 98  |
| 5.4      | 干扰源              | 100 |
| 5.4.1    | 工业负荷             | 101 |
| 5.4.2    | 低压网络供电的电气设备      | 102 |
| 5.4.3    | 风力发电系统           | 103 |
| 5.5      | 影响               | 103 |
| 5.6      | 缓解措施             | 104 |
| 5.6.1    | 降低无功功率变动的装置      | 104 |
| 5.6.2    | 面向增大短路容量的方法      | 106 |
| 5.6.3    | 缓解闪变的其他办法        | 106 |
|          | 参考文献             | 107 |
| <b>6</b> | <b>电压和电流不平衡</b>  | 109 |
| 6.1      | 现象描述             | 109 |
| 6.2      | 电流和电压的对称分量       | 110 |
| 6.3      | 特征参数             | 114 |
| 6.4      | 测量               | 115 |
| 6.5      | 起因               | 116 |
| 6.6      | 作用和影响            | 116 |
| 6.6.1    | 异步电动机            | 117 |
| 6.6.2    | 同步发电机            | 117 |
| 6.6.3    | 换流器              | 117 |
| 6.6.4    | 其他负荷             | 117 |
| 6.7      | 缓解措施             | 118 |
| 6.7.1    | 平衡的原则            | 118 |
| 6.7.2    | 静止补偿器            | 119 |
| 6.8      | 标准               | 121 |
| 6.8.1    | 限值               | 121 |
| 6.8.2    | 评估的准则            | 122 |
|          | 参考文献             | 123 |
| <b>7</b> | <b>电压与电流谐波</b>   | 125 |
| 7.1      | 谐波现象描述           | 125 |
| 7.1.1    | 畸变波形的组成          | 125 |
| 7.1.2    | 畸变波形的分解          | 126 |
| 7.1.3    | 谐波和对称分量          | 127 |

|        |                       |     |
|--------|-----------------------|-----|
| 7.1.4  | 畸变分量的分类 .....         | 128 |
| 7.1.5  | 电压与电流畸变量的描述 .....     | 128 |
| 7.2    | 特征参数 .....            | 130 |
| 7.3    | 测量 .....              | 131 |
| 7.4    | 谐波源 .....             | 134 |
| 7.4.1  | 变压器 .....             | 134 |
| 7.4.2  | 电动机和发电机 .....         | 135 |
| 7.4.3  | 电弧炉 .....             | 136 |
| 7.4.4  | 荧光灯 .....             | 137 |
| 7.4.5  | 电子设备和电力电子设备 .....     | 137 |
| 7.4.6  | 特定负荷的谐波电流含量 .....     | 139 |
| 7.5    | 电压和电流谐波案例 .....       | 141 |
| 7.6    | 影响 .....              | 144 |
| 7.6.1  | 功率因数 .....            | 144 |
| 7.6.2  | 相线和中性线 .....          | 145 |
| 7.6.3  | 集肤效应 .....            | 147 |
| 7.6.4  | 电动机和发电机 .....         | 148 |
| 7.6.5  | 变压器 .....             | 149 |
| 7.6.6  | 电容器 .....             | 151 |
| 7.6.7  | 照明 .....              | 152 |
| 7.6.8  | 断路器 .....             | 153 |
| 7.6.9  | 接地故障电流 .....          | 153 |
| 7.6.10 | 换流器和电子设备 .....        | 153 |
| 7.6.11 | 测量装置 .....            | 155 |
| 7.6.12 | 继电器和接触器保护系统 .....     | 156 |
| 7.6.13 | 电信干扰 .....            | 157 |
| 7.7    | 缓解措施 .....            | 157 |
| 7.7.1  | 减小电压畸变的方法 .....       | 157 |
| 7.7.2  | 减少谐波发射 .....          | 158 |
| 7.7.3  | 降低敏感负荷与谐波源之间的耦合 ..... | 165 |
| 7.7.4  | 降低负荷对扰动的敏感性 .....     | 166 |
| 7.8    | 标准 .....              | 169 |
|        | 参考文献 .....            | 172 |

**8 过电压** .....

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 8.1   | 现象描述 .....      | 174 |
| 8.1.1 | 持续（工频）过电压 ..... | 174 |
| 8.1.2 | 暂时过电压 .....     | 175 |
| 8.1.3 | 瞬态过电压 .....     | 175 |

|          |                          |            |
|----------|--------------------------|------------|
| 8.1.4    | 合成过电压                    | 175        |
| 8.1.5    | 过电压传播                    | 175        |
| 8.2      | 特征参数                     | 178        |
| 8.2.1    | 避雷器的雷电冲击保护水平             | 178        |
| 8.2.2    | 避雷器的操作冲击保护水平             | 178        |
| 8.3      | 发生源                      | 179        |
| 8.3.1    | 内部过电压                    | 179        |
| 8.3.2    | 外部过电压                    | 187        |
| 8.4      | 作用和影响                    | 189        |
| 8.4.1    | 故障后果                     | 189        |
| 8.4.2    | 降低过电压风险与水平               | 190        |
| 8.5      | 缓解措施                     | 190        |
| 8.5.1    | 保护的原则                    | 190        |
| 8.5.2    | 绝缘配合与耐受电压                | 191        |
| 8.5.3    | 过电压保护装置                  | 193        |
| 8.6      | 标准                       | 196        |
|          | 参考文献                     | 198        |
| <b>9</b> | <b>现代电力系统波形分析</b>        | <b>199</b> |
| 9.1      | 非正弦波形的频率分析               | 199        |
| 9.2      | 模拟—数字转换                  | 200        |
| 9.2.1    | 信噪比                      | 200        |
| 9.2.2    | 频谱泄漏和频谱混叠                | 200        |
| 9.2.3    | 频谱泄漏和频谱窗                 | 200        |
| 9.2.4    | 测量系统特性                   | 201        |
| 9.2.5    | 非同步采样的谐波功率测量             | 201        |
| 9.3      | 序分量分析                    | 204        |
| 9.3.1    | 对非正弦电路重新定义的 Fortesque 变换 | 204        |
| 9.3.2    | 三相三线制电力系统分析              | 205        |
| 9.3.3    | 四线制电力系统分析                | 210        |
| 9.4      | IEEE 1459: 现代电力系统功率定义    | 213        |
| 9.4.1    | 非正弦不平衡条件下的电压量和电流量        | 213        |
| 9.4.2    | 视在功率定义                   | 215        |
| 9.4.3    | 算术视在功率                   | 215        |
| 9.4.4    | 矢量视在功率                   | 215        |
| 9.4.5    | 有效视在功率                   | 216        |
| 9.4.6    | 谐波污染及不平衡                 | 216        |
| 9.4.7    | 基频有功功率和无功功率              | 217        |
| 9.4.8    | 功率因数定义                   | 217        |



|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 9.5 现代电力系统中波形畸变源定位 .....     | 217        |
| 参考文献 .....                   | 218        |
| <b>10 接地技术 .....</b>         | <b>221</b> |
| 10.1 典型接地系统 .....            | 221        |
| 10.2 土壤电阻率 .....             | 222        |
| 10.3 接地极电气特性 .....           | 223        |
| 10.3.1 接地电阻和阻抗 .....         | 224        |
| 10.3.2 接地电压和表面电位分布 .....     | 225        |
| 10.3.3 雷电流时的接地极特性 .....      | 226        |
| 10.4 典型接地极结构 .....           | 227        |
| 10.4.1 单一水平接地极 .....         | 228        |
| 10.4.2 单一圆棒垂直接地极 .....       | 230        |
| 10.4.3 简单复合接地极 .....         | 232        |
| 10.4.4 网状接地极 .....           | 233        |
| 10.4.5 基础接地极 .....           | 234        |
| 10.4.6 带接地效果的电缆 .....        | 236        |
| 10.5 电击防护接地系统 .....          | 236        |
| 10.5.1 低压电网中接地设施作为保护元件 ..... | 237        |
| 10.5.2 高压电网中接地设施作为保护元件 ..... | 238        |
| 10.6 电子和通信系统中的接地作用 .....     | 240        |
| 10.6.1 保护接地和功能接地 .....       | 241        |
| 10.6.2 联合接地系统 .....          | 241        |
| 10.6.3 安全方面 .....            | 241        |
| 10.6.4 功能方面 .....            | 244        |
| 10.6.5 扰动和耦合器 .....          | 244        |
| 10.6.6 低噪声等电位连接 .....        | 245        |
| 10.7 接地设施的使用期限 .....         | 246        |
| 10.7.1 化学腐蚀 .....            | 246        |
| 10.7.2 杂散(直流)电流引起的腐蚀 .....   | 247        |
| 10.7.3 电偶(电化学)腐蚀 .....       | 248        |
| 10.8 接地设施的测量 .....           | 249        |
| 10.8.1 土壤电阻率的测量方法 .....      | 250        |
| 10.8.2 接地极接地电阻的测量 .....      | 250        |
| 参考文献 .....                   | 253        |
| <b>11 供电可靠性: 配电网结构 .....</b> | <b>255</b> |
| 11.1 配电网的基本结构 .....          | 255        |
| 11.1.1 单一辐射型结构 .....         | 256        |