

**电能
质量**
POWER
QUALITY

从无源到有源

谐波与无功控制

蒋正荣 陈建业 编著

- ✓ 电能质量问题及标准全解析
- ✓ 无源滤波器、调谐滤波器、有源滤波器深度分析
- ✓ TSC、TCR、SVC、STATCOM原理与设计详尽呈现



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

从无源到有源

——电能质量谐波与无功控制

蒋正荣 陈建业 编著



机械工业出版社

电能质量控制中，无功补偿和谐波抑制是其重要的组成部分。本书共 6 章，分别对电能质量的定义及标准、无功补偿与谐波治理的原理及设计方法、无源装置与有源装置的原理与结构，以及电力电子在电能质量中的应用特点做了详细描述，分析了几种重要的无功补偿与谐波抑制装置的静态和动态性能，特别是对典型复杂的电力负载如电弧炉的电能质量控制进行了详细分析。

本书适用于从事电能质量控制研究，电力系统规划、设计，电气设备的原理分析和应用的工程技术人员，以及高年级本科生和研究生参考。

图书在版编目（CIP）数据

从无源到有源：电能质量谐波与无功控制 / 蒋正荣，陈建业编著. —北京：机械工业出版社，2014.12

ISBN 978-7-111-48590-2

I. ①从… II. ①蒋… ②陈… III. ①电能—质量控制—谐波 ②电能—质量控制—无功补偿 IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 267244 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：付承桂 责任编辑：付承桂 张沪光

责任校对：张玉琴 责任印制：李洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17 印张·354 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-48590-2

定价：49.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：（010）88361066

读者购书热线：（010）68326294

（010）88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工微博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

前 言

电能质量问题从认知到重视并采取相应的技术措施以应对有一个发展过程。过去由于电压等级较低,电能质量问题主要表现为可靠性问题以及低频传导形式的干扰,如谐波、闪变和不平衡等稳态现象,并没有受到特别的关注。而随着现代电力系统因容量和电压等级的大幅度提高,电力电子技术开始大规模应用,使得电压暂升、波形畸变以及功率因数下降等电能质量问题日益突出,带来的影响和损失也不容忽视,其轻则造成电能损耗的增加和产品质量的下降,重则造成工业企业的生产中断甚至停顿,如美加大停电,造成了重大的经济损失和深远的社会影响。因此,如何在控制合理成本的条件下,通过深入研究、制定标准、采取措施,把电能质量控制允许的范围内,以保证供用电双方的利益,促进电力工业的健康发展,就成为了当前亟待解决的课题。

近 20 年来,国内外对于电能质量问题的研究,包括各种常规的基于电力电子技术的控制方式的理论和应用,均已得到日益广泛的重视和长足的发展;但作为一种新技术,它的基本原理和适用范围还不为广大读者所熟知。在今天,各种电能质量控制的文章和书籍浩如烟海、呈现爆炸式涌现的大背景下,读者要精准获取所需资料,往往会有大海捞针之感,信息的甄别与整理需要花费大量的时间和精力。本书力图根据作者多年来在电能质量方面的研究,以及从事谐波抑制与无功功率补偿方面的现场经验和成果,对电能质量问题摘其精要,阐述其标准、定义,对谐波和无功控制所涉及策略和技术装置,从无源到有源,条分缕析,庶易晓畅,以省读者心力。

本书主要面向从事电能质量控制以及谐波与无功控制研究方向的技术人员和管理人员,以及工科院校相关专业的高年级本科生和研究生,并假定读者对于电力电子技术的基本理论已有所了解;这样书中避免了花大量篇幅于深入复杂的理论推导,而是从相关概念入手,结合实例对电能质量及其谐波和无功问题进行原理讲解和控制结构的介绍。

参与本书整理与校对工作的还有佟子昂、孟少伟、尤然、刘鹤松、赵彤以及李晓丹等同志,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,加之材料尚不够成熟,书中难免出现缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编著者
2014 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 电能质量定义和标准	1
1.1 电能质量定义和内容.....	2
1.2 电能质量标准.....	3
1.3 电力电子技术对电能质量的影响.....	4
1.4 本书的组织.....	7
参考文献.....	8
第 2 章 电能质量中的可靠性问题	10
2.1 电能质量现象分类.....	11
2.2 配电系统可靠性.....	11
2.2.1 配电系统可靠性原理.....	11
2.2.2 配电系统停电的原因.....	14
2.3 配电系统可靠性指标.....	15
2.4 提高可靠性的措施.....	18
参考文献.....	22
第 3 章 电能质量中的电压问题	24
3.1 电压质量.....	25
3.2 电压瞬变.....	27
3.2.1 脉冲瞬变.....	29
3.2.2 振荡瞬变.....	33
3.3 电压变动.....	38
3.3.1 电压变动及其对设备的影响.....	38
3.3.2 长时间电压变动.....	41
3.3.3 短时间电压变动.....	51
3.3.4 电压闪变.....	58
3.4 电压波形失真.....	64
3.4.1 三相电压不平衡.....	64

3.4.2 波形缺口	81
3.5 电能质量标准	84
参考文献	92
第 4 章 电能质量中的谐波抑制	94
4.1 谐波定义及危害	95
4.1.1 谐波定义	95
4.1.2 谐波源与其危害	97
4.1.3 谐波标准	103
4.2 谐波抑制及无源滤波装置	108
4.2.1 谐波源治理	109
4.2.2 滤波器的设计方法	117
4.2.3 偏谐振式滤波器及滤波器组	126
4.3 有源电力滤波器	133
4.3.1 纯有源滤波器	134
4.3.2 混合滤波器	157
参考文献	163
第 5 章 电能质量中的无功补偿	165
5.1 变阻抗型静止无功补偿器	166
5.1.1 晶闸管控制电抗器 (TCR)	166
5.1.2 晶闸管投切电容器 (TSC)	171
5.1.3 静止无功补偿器 (SVC)	175
5.2 瞬时无功与 DFACTS 装置	183
5.2.1 瞬时无功理论	183
5.2.2 基于瞬时功率理论的补偿算法	187
5.2.3 变流补偿器的主电路结构	192
5.3 STATCOM	198
5.3.1 STATCOM 并联补偿控制策略	202
5.3.2 STATCOM 典型应用	211
参考文献	218
第 6 章 电能质量控制中的电力电子技术	221
6.1 FACTS 技术的结构及应用	222
6.2 电力电子变流器	227

VI 从无源到有源——电能质量谐波与无功控制

6.2.1 相控型变流器	227
6.2.2 自换相型变流器	233
6.3 PWM 技术与多重化结构	241
6.3.1 脉宽调制 (PWM) 技术	241
6.3.2 阶梯波	248
参考文献	266

第 1 章 电能质量定义和标准

引言

电能作为现代文明的支柱，是现代社会中最为广泛使用的能源，其应用程度成为一个国家发展水平的主要标志之一。而随着数字化时代的到来，在用电方面也随之产生了以下两个方面的问题。

一方面，用电负荷日趋复杂化和多样化，使得用户越来越多地使用更快、更高效的生产设备，比如工业系统中各种调速设备正取代传统的电动机直接驱动方式成为传动系统的主流，而这些基于电力电子的电能变换设备早已替代白炽灯、电动机、加热器等成为主要的用电负荷，相应地，其所带来的各种暂态电磁干扰问题成为用户关注的焦点。

另一方面，计算机、微处理器控制的精密电子和电气设备被大量使用，这些设备对电力系统中暂态问题（如电压的暂升、暂降和瞬间停电）的敏感程度和对供电可靠性的依赖程度也变得越来越高。比如大型的集成电路生产厂中，几个工频周波的供电中断，就会造成大量在制芯片被毁，因此由于电能质量问题所带来的成本也变得越来越高。

随着电能作为一种商品进入市场，其质量问题也就成为作为供应商的电力公司和作为顾客的电力用户双方共同关注的问题。

1.1 电能质量定义和内容

由于供用电双方的角度不同，术语“电能质量”对双方也就有不同的含义。一般而言，电能质量表现为电压、电流或频率的偏差。广义上说，电能质量问题实际上就是服务质量问题，它通常包括供电可靠性、供电质量和提供与前两项相应的信息三项内容。

而在目前对广大电力用户而言，所接受的狭义的定义则如下：

1) 电力系统可以通过提供电能维持负荷正常运行，而不对负荷造成干扰或损坏的能力；该能力主要以接入点电压的质量作为标志；

2) 负荷可以在不对电力系统造成扰动或降低电力系统效率条件下运行的能力，该能力主要（但不唯一）以电流波形的质量进行衡量。

这里需要指出的是，由于所谓电压质量通常是在电气上位于所考察的供电点上游的所有电源的综合作用的结果，而电流质量则是电气上位于供电点下游的所有负荷的综合作用的结果，所以增加了问题的复杂性。实际上，这两个问题是紧密相关的，是一个问题的两个方面，它们通过系统和负荷阻抗相互联系，很难将两者截然划分。实践中，由于电力系统中电流的畸变均是非线性负荷作用的结果，所以可以将二者统一归结为电压质量问题，因此本书中所谓的电能质量问题即是电压质量问题。

还应当指出的是，目前并没有一个统一的电能质量定义。国际电工委员会(IEC)标准对电能质量的定义：电能质量指的是保证在正常工作条件下向用户所提供的电能的连续性和电压的合格性（包括对称、频率、幅值和波形）等一系列参数。美国电气与电子工程师协会(IEEE)关于电能质量的定义，则是指对于敏感设备的供电和接地是否满足设备运行的需要。欧洲标准中 EN50160 则强调供电电压的特性。

电能质量包括电压质量和电流质量，进一步分类，电压质量包括电压偏差、电压频率偏差、电压不平衡、瞬变现象、波动与闪变、暂降（暂升）与间断、电压谐波、电压陷波、欠电压和过电压等。电流质量包括电流谐波、间谐波、次谐波、相位超前与滞后、噪声等。

谐波问题是电能质量问题的又一个重要领域，从电力系统中提取非正弦电流的非线性负荷通常被分为“确定性谐波产生负荷”和“非确定性负荷”两类。所谓“确定性”(Identified)指的是电力公司通常对用户安装在配电系统的大功率非线性负荷需要逐一加以确认，大功率的整流器、周波变流器和电弧炉等产生大量谐波电流的非线性负荷属于典型的确定性负荷。此时电力公司就可以确定大功率非线性负荷用户的供电点，以及各个用户所产生的谐波电流数量。

单个小功率的电子设备，如电视机、计算机之类的前端变流器作为电网和设备之间的接口所产生的谐波电流对于电力系统而言，是完全可以忽略的。但由于此类

装置的数量巨大，以及应用的同时性强，所以已经取代工业设备成为配电系统中谐波的主要来源。而此类设备通常就可以认为是非确定性谐波产生负荷。虽然 2000 年版的 IEC 61000-3-2 中特别将此类负荷列为 D 类，并作出了较为严格的规定，但目前在国内还没有得到足够的重视。

谐波放大问题是另一个与谐波相关的问题。日本的测试结果表明，市中心区 6.6kV 配电系统的电压在夜间轻负荷条件下的 5 次谐波含量高达 7%。而这在很大程度上是由于线路阻抗和功率因数校正电容（包括无源滤波器）之间的串并联谐振造成的。这说明对于谐波治理问题，除了需要对谐波电流进行补偿之外，还需要考虑对谐波在配电系统中的传播进行阻尼。

此外，无功问题是影响电能质量的另一个重要内容，其与电压闪变、频率偏移、三相不平衡等稳态电能质量问题密切相关，同样会对用户设备的正常运行造成巨大的负面影响。本书将着重关注电能质量中的谐波与无功问题。

1.2 电能质量标准

实际上，国际电工技术委员会（IEC）于 1977 年成立了 TC77 专委会，专门对连接到电网的各种半导体设备引起的电能质量问题进行研究和制定标准，并自 1990 年开始制定一套完整的电能质量基础标准——IEC 61000。我国近年来也相继针对电压、电流、频率和电能质量共发布了 10 项标准，这些标准直接涉及电能的生产、输送、使用和设备实际制造行业的生产、管理和电能质量。如 GB 12326-2000《电能质量 电压波动与闪变》中，就规定了电压波动与闪变的限值计算、测试、评估方法。实际上，电能质量问题可行的解决方法就是在电力设备的干扰发射和抗扰度限值之间进行协调。现有的标准和导则主要是对干扰源的水平进行控制，制定这些标准的主要目的是保证电网安全经济运行，保护电气环境，保障电力用户正常使用电能。这些标准的制定应当符合两个要求，即终端用户的设备可以正常运行，同时对于电力系统而言又具有现实的可行性。比如以谐波标准为例，它就将限制谐波的责任在供用电双方之间进行了划分。终端用户需要对限制注入系统的谐波电流承担责任，而电力公司则主要负责限制供电线路上电压的畸变。

具体而言，首先工业界需要建立一个统一且完整的电能质量测量标准，这样不同时间和地点测量的数据才具有可比性，并且为争议的解决提供基础。比如 IEC 61000-4-11 就是对“电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验”的推荐技术。这些标准为电力公司提供了一个可以接受的电能质量水平的下限。

面向设备制造商的电能质量标准是另一个需要进行大量研究的问题；让制造商了解既有系统的电能质量水平并相应地设计设备，比要求制造商提高电能质量水平要经济得多。比如美国半导体制造商和电力公司合作研究后制定了一个 SEMI（Semiconductor Equipment and Material International, Inc）性能曲线，要求处理设

备可以承受最大电压跌落为 50%，而持续时间不超过 200ms 的电压跌落，从而形成了半导体工业自己的电能质量标准。这种方式对其他同样在谋求提高生产率和与供电系统的兼容性的工业而言也是重要的。此类标准的大规模应用将最终弱化电能质量问题，进而可以在包括利益相关三方协调的基础上，从系统的规模上来分析和研究不同措施对提高电能质量的经济性，进而提出一个社会总体成本最低的解决方案。当然除了依靠制造商本身的主动性外，各级标准化组织也需要对设备对于电压暂降和短时中断的抗扰度提出相应的要求。

制定标准的目的，就是对电力系统中影响电能质量的各种因素予以明确的定义、分类并规定（或推荐）限值，以在社会整体成本最小的条件下，把电能质量控制在允许的范围之内，从而最大程度的保证供用电双方的技术经济利益和电力工业的健康发展。

1.3 电力电子技术对电能质量的影响

如前所述，电力电子装置是造成电能质量问题的主要原因，但由于其具有响应速度快、控制灵活的特点，当被应用于补偿时，相同的装置只需对控制算法进行少许修改后，就可以对终端用户整体电能质量的改善起到同等重要的作用。它可以通过有效地对系统参数进行迅速调节，来提高供电系统的可靠性和供电质量，满足终端用户设备的需要，典型的应用包括有源谐波滤波器、并联静止补偿器、动态电压恢复器和不间断电源。这种应用于配电系统、面向改善用户负荷运行条件的电力电子技术就被称为用户电力（Custom Power, CP）技术，也称定制电子技术。

通过将电能质量控制器嵌入配电系统，用户电力技术为电力公司和终端用户所面临的各种电能质量问题提供了一个综合的解决方法。通过上述技术的应用，从负荷侧看，可以有效地减少供电系统停电和电压波动对负荷的影响，提高设备运行的可靠性和用户资产的利用率。该技术的成功应用可以为企业用户和城乡居民带来巨大的经济和社会效益。从电网侧看，它又可以抑制用户非线性设备对供电系统和邻近用户产生的影响，从而提高对敏感用户供电的质量和附加值。

为了适应电力系统高端用户和普通用户之间对电能质量的不同要求，近年来建立“用户电力园区（Custom Power Park）”也称为“优质电能园区（Premium Power Park, PPP）”或所谓高可靠性、柔性智能供电系统（Flexible, Reliable, Intelligent, Electric Energy Delivery Systems, FRIEEDS）的概念得到越来越广泛的关注。根据优质优价的原则，电力公司通过采用各种电能质量控制技术来保证园区的供电质量，而园区内的用户则根据自己的需要（见表 1-1），通过缴纳额外的使用费来获得相应的高质量电能供应，从而可以保证其敏感设备能够免受各种电能质量问题的影响。图 1-1 给出了位于美国俄亥俄州特拉华工业园区的世界第一个优质电能园区（PPP）简化接线图^[1]。

以电网发生扰动时，分布式电源在相关控制策略下可以在尽可能短的时间内投入使用，从而可以有效地提高电能质量，尽可能减少故障，对电能质量的改善具有潜在的优势。但是分布式发电的引入也会给系统的控制和保护带来许多不确定性：分布式发电单元输出的急速变化可能带来的电压闪变；变流器的应用所引入的大量谐波，又会对电能质量带来负面影响。分布式发电系统的广泛应用将显著地改变配电系统的性质，并带来一系列潜在的（包括正面和负面）电能质量问题。相应地采用用户电力技术来解决上述新问题也成为电能质量问题研究的一个重要领域。图 1-2 所示为位于美国芝加哥采用分布式发电系统的电力园区示意图。园区中，对各种新型发电设备和可再生能源的应用和相互联系均进行了研究，目前还正在研究进一步增加示范工程。

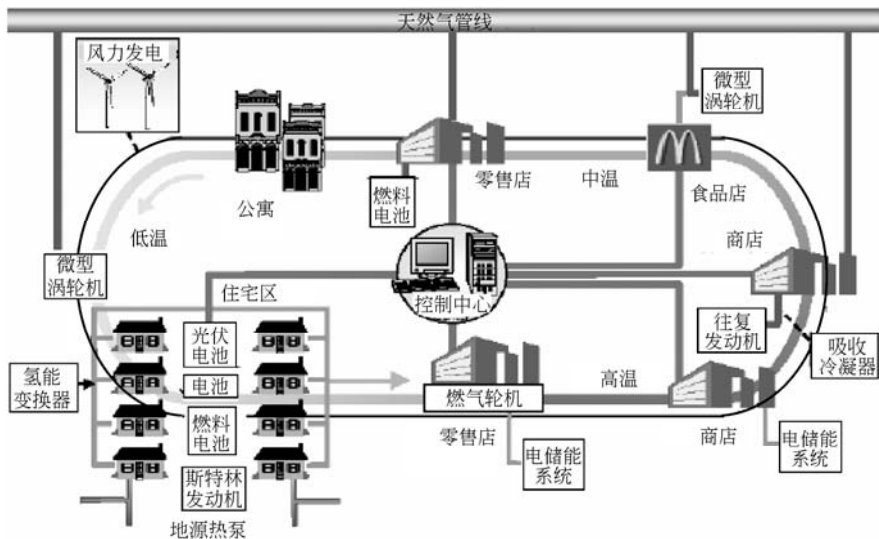


图 1-2 Brownfield 用户电力园区与分布式发电系统

美国 Business Communications Company, Inc.，在 2004 年的一个报告^[2]中曾经乐观地估计，美国与电能质量相关的产品市场价值的年平均增长率大体为 11%，2006 年从 2000 年的 38 亿美元将激增到 71 亿美元，如图 1-3 所示。

一个值得注意的现象是，尽管在美国一年由于电能质量问题带来的损失高达 800 亿美元，说明电能质量控制器确实存在市场，同时也不断有实用的产品问世，但实际中电力用户对于所谓电能质量问题往往并不关心，或者直到出现问题时才关心。在我国，这个问题更为突出。问题在于：

首先，用户对于电能质量问题及其造成的影响并不了解，比如电压波动可能引起的造纸企业纸张的厚度不均匀等问题并不为广大用户所知，也没有受到他们足够的关心；

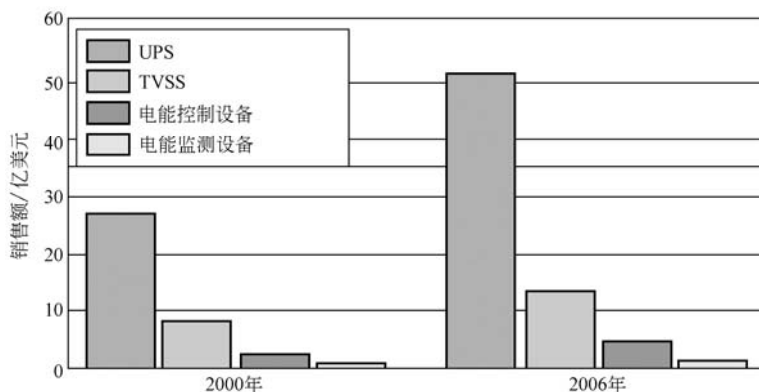


图 1-3 美国市场电能质量相关设备的销售额

其次，对于应用工程师和企业决策人而言，目前各种工业企业电能质量问题解决方案过于深奥，缺乏必要的了解；

再加上企业领导人更为关心的是上述解决方案对于提高企业生产力的作用，以及回收时间，一般希望投资回收在 1~2 年之间，所以成本也是一个重要因素。

因此，有必要从用户最为关心的节能降耗问题，以及提高设备生产率和利用率等方面着手，比如无功功率补偿对电弧炉等运行的影响，来引导和开发用户电力技术的市场。

1.4 本书的组织

本书主要包括两方面的内容：一个是电能质量问题的基本定义、现象和理论；另一个是改善电能质量所应用的技术，包括谐波抑制和无功功率补偿技术，以及其他用户电力技术，特别是基于电力电子技术的解决方法。

电能质量问题根据定义包括两个方面的内容：一个是供电的连续性，也即可靠性；另一方面是电压质量。

因此，第 2 章专门对由于电力系统扰动造成的配电系统可靠性问题，包括其原因、危害、相关标准以及对策进行了详细的讨论。

对于电压质量问题，以及配电系统中相关的术语、标准以及常规的对策，在第 3 章中进行了较为深入地分析。特别是，对其中影响配电系统用户最大的稳态电能质量问题（如谐波和闪变），以及暂态电能质量问题，如电压暂降和瞬间停电的机理、分析和计算方法，以及传统补偿措施进行了详细的分析和讨论。这两章的主要目的是帮助读者识别配电系统中潜在的问题，对电力公司和用户设备及其设计人员造成的电能质量问题加以区分，并且对如何满足敏感设备的电压质量要求提出相应的建议。

第 4 章介绍的是影响电能质量的谐波问题及其控制方法，对改善谐波源的 PWM

技术和多重化技术进行了分析,接着对各种无源滤波器分别进行了描述,介绍了其设计方法,最后由瞬时功率理论引出了有源滤波器工作原理与设计方法。

第5章介绍了各种静止无功补偿器及STATCOM原理及装置。详细分析了各种TCR、TSC、SVC的工作原理和控制方法,并由电压源逆变器的原理介绍引出了STATCOM的工作特点分析。

第6章介绍了电力电子技术在电能质量控制中的应用。详细描述了电力电子变流器的基本原理,并着重介绍了大功率的开关器件阀和几种常用的网络重构设备,旨在为从事用户电力技术控制器的研究开发人员和从事配电系统电能质量规划和工程实施的人员提供实用的参考。

本书的目的是为工科学生和业内人士提供一本关于配电系统电能质量控制问题的简明而有效的参考。作者力图用尽可能充分的信息来覆盖电能质量控制领域中的常用知识,所以书中的内容既包括了传统的解决方法,又介绍了最新的控制进展,并且基于作者多年来从事电能质量控制领域的研究和开发工作的经验,书中对于实际的应用给予了特别的关注。

由于电能质量问题涉及供用电双方和设备制造商,因此,本书的内容除了尽可能在配电工程师和电力设备用户之间达到平衡外,还希望能帮助电气和电子设备以及计算机等的设计人员了解其设备的使用环境和用户所面临的困难,进而为相关三方发现其共同点,一起合作解决电能质量问题提供帮助。

总之,本书是作者对迅速发展的电能质量领域基本理论和实用技术的一个较为详细的说明,目的是帮助读者理清电能质量的相关内容和标准,并将电能质量控制的有关知识更好地应用于实际的生产和科研之中。

参考文献

- [1] Domijan A, Montenegro A, Keri AJF. Simulation Study of the World's First Distributed Premium Power Quality Park [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1483-1492.
- [2] Dedad J. Four key Steps in Applying Power Conditioning Equipment [J], Electrical Construction and Maintenance, 2004, 103 (3): 18-22.
- [3] Ghosh A, Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Device [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] Dugan R C, McGranaghan M F, et al. Electrical Power Systems Quality [M]. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.
- [5] 工場・ビル構内電源品質確保調査委員会. 工場・ビルのにける電源品質確保現状対策 [J]. 電気學會技術報告第581号, 1996.
- [6] 電力品質調整用パワーエレクトロニクス應用機器適用技術調査専門委員会. 電力品質調整用パワーエレクトロニクスの適用技術動向 [J]. 電気學會技術報告978号, 2004.

- [7] ARRILLAGA J, BOLLEN M, WATSON NR. Power Quality Following Deregulation [J], proceedings of the IEEE, 2000, 88 (2): 246-261.
- [8] Kazibwe W E., Sendaula M H. Electric Power Quality Control Techniques [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [9] 肖湘宁, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 程浩忠, 艾芊, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

第 2 章 电能质量中的可靠性问题

引言

所谓电能质量问题,涉及的就是电力系统中存在的各种各样的电磁现象。它通常被用来描述电力系统在特定场所、特定时间下的电压和电流的特性。

本章的目的是通过对电能质量问题的内容、意义、术语和标准的说明,为从事该领域研究和设计的技术人员提供一个实用的参考,从而对该领域国内外研究的现状与发展有进一步的了解。本章根据我国近年来颁布的一系列电能质量标准,和 IEC 及 IEEE 相关的标准^[1]对电能质量现象的内容、意义和术语进行必要的技术说明,并通过讨论一些常见的能引发电能质量问题的原因,以加深读者对电能质量问题的理解。