

工业企业电能 质量控制



陈建业 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM6/2

2008

工业企业 电能质量控制

陈建业 等编著

2

机械工业出版社

随着电力电子技术的大规模应用,和以计算机为代表的各种数字电子设备和通信设备等电磁骚扰敏感设备应用的日益广泛,电能质量问题受到越来越广泛的重视与关注。本书从应用的角度出发,跟踪国内外电能质量问题研究的最新进展,并结合作者自身的研究成果,深入浅出地介绍了电能质量问题的基本理论、分析方法和相关标准,特别是结合实例,对各种类型电能质量控制装置的结构、原理进行了深入的分析与探讨。本书的特点是注重理论和实际的紧密结合,并侧重于应用技术和实际电路的分析与计算。

本书可供电力系统和电力用户中从事电能质量控制的专业技术人员 and 电能质量控制和监测设备的制造商,在选择、设计、制造、安装和调试各种电能质量控制装置时作为参考书,也可供高等院校相关专业的本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业企业电能质量控制/陈建业等编著. —北京:机械工业出版社, 2007.11

ISBN 978-7-111-22412-9

I. 工… II. 陈… III. 工业企业-电能-质量控制 IV. TM60

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第147978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:孙流芳

责任编辑:孙流芳 付承桂 版式设计:霍永明

责任校对:刘志文 封面设计:王奕文

责任印制:邓博

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·29印张·718千字

0 001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-22412-9

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面防伪标均为盗版

前 言

电能的大规模应用是现代文明的一个主要支柱，而通过各种电力电子变换技术，向不同的用电设备提供满足其最佳工况所需要的高效、清洁的电能，则是 20 世纪 80 年代以来电能应用领域的一个重大变革。但是随着变换器的大规模应用，电力电子装置本身作为电网的非线性负荷，其开关过程所带来的电磁骚扰的负面效应也日益明显。而随着以计算机为代表的数字监控设备和信息电子设备被大量地应用于科研、生产和社会生活的各个领域，这些设备对于暂态干扰的敏感性和脆弱性使得电力系统的电磁兼容问题日益显现，成为电力系统供用电双方、电气设备供应商和国际与国内标准化组织的科研、设计、运行等各个部门日益广泛的关注。

所谓电能质量问题，实际上就是电力系统的电磁兼容问题。过去由于电压等级较低，同时用电设备主要是照明和电动机等电气设备，二次设备的结构也比较简单，因此该问题，除了可靠性问题以外，主要表现为低频传导形式的干扰，即人们所熟知的谐波、闪变和不平衡等稳态现象，并没有受到特别的关注。而现代电力系统由于容量和电压等级都大幅度地提高，再加上基于电子技术的二次设备的大量应用，使暂态干扰和高频辐射干扰问题日益突出，从而使电压暂升、暂降、瞬间停电等过去不被重视，但对敏感设备具有重大影响的暂态扰动问题日益突出。而电能质量问题（包括可靠性在内）的发生，轻则造成电能损耗的增加和产品质量的下降，重则造成工商企业生产的中断和停顿，甚至如美加大停电那样，破坏经济、社会和人民的正常秩序，造成重大的经济损失和深远的社会影响。因此，如何在社会整体成本最小的条件下，通过深入研究、制定标准、采取措施，把电能质量控制在允许的范围之内，从而最大程度地保证供用电双方的技术经济利益和电力工业的健康发展，就成为当前亟待解决的问题。

近 20 年来，国内外对于电能质量问题的研究，包括各种常规的和基于电力电子技术的控制方式的理论和应用，均已经得到日益广泛的重视和长足的发展；但是作为一种新技术，它的基本原理和适用范围还不为广大读者所知。尽管讨论电能质量问题的文章和书籍近年来出现爆炸性的增长，而各种检索工具的出现为文献研究提供了巨大的方便，但对于读者来说，从如此巨大的信息量中寻找自己所真正需要的资料仍然如大海捞针，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研究领域研究的经验和成果，通过分析和整理，为读者提供一个涵盖从定义、标准，到常规和基于电力电子技术的控制方法等电能质量各个领域的信息源，以期通过对工业（包括商业）企业中电能质量问题的现状和解决方法的介绍，来推动该技术在我国得到进一步的推广和发展。

由于本书的对象主要是从事工业企业电能质量控制和管理的专业技术人员和大专院校相关专业的高年级学生和研究生，并假定读者对于电力电子技术的基本理论已经有所了解，因

IV

此书中尽可能避免复杂的理论推导，而以定性的方法从物理概念入手，结合实例对电能质量问题，特别是基于电力电子技术的电能质量控制方法的原理、结构进行介绍。本书注重理论与实际的结合，将侧重点放在对于应用技术和实际电路的分析与计算上面，以期为从事电能质量控制的读者提供一个实用的参考。此外，为了使读者对整个电能质量问题有一个尽可能全面和深入的了解，在可能的地方都会尽可能对过去的经验和现在的发展加以适当的介绍。因此，从根本上说，本书并非一本理论书籍，而是对迅速发展的电能质量问题的历史、现状和未来的一个综述。

本书从最初的命题到今天的完稿完全是在孙流芳编审的积极支持和大力推动下进行的，在此特别对孙老师和付承桂编辑以及出版社其他有关人员对本书出版付出的辛勤劳动表示感谢。

参与本书编写工作的还有刘秀成副教授、朱桂萍讲师和万庆祝博士、王科博士等。由于作者的水平有限，书中难免存在一些错误和不当之处，欢迎读者提出批评指正。

作 者

2007年4月于清华园

目 录

前言

第1章 电能质量	1
1.1 电能质量的定义和内容	1
1.2 电能质量的相关三方	3
1.3 电能质量标准	6
1.4 电力电子技术在配电系统中的应用	7
1.5 本书的组织	10
参考文献	11

第2章 电能质量问题1——供电系统的 可靠性

2.1 引言	12
2.2 电能质量现象的分类	13
2.3 配电系统可靠性的现状和意义	14
2.3.1 配电系统可靠性原理	14
2.3.2 配电系统停电的原因	16
2.3.3 停电损失与可靠率	18
2.4 配电系统可靠性指标	22
2.5 提高供电可靠性的措施	26
2.6 经济分析	30
参考文献	34

第3章 电能质量问题2——电压质量

3.1 电压质量和电磁兼容	35
3.2 瞬变现象	39
3.2.1 脉冲瞬变	42
3.2.2 振荡瞬变	46
3.3 电压变动	51
3.3.1 电压变动及其对设备的影响	51
3.3.2 长时间电压变动	53
3.3.3 短时间电压变动	67
3.3.4 闪变	86
3.4 电压波形失真	101
3.4.1 三相电压不平衡	101
3.4.2 谐波	116

3.4.3 波形缺口	162
3.5 电能质量标准	164
参考文献	172

第4章 电能质量控制器的原理与结构

4.1 电力电子技术在电力系统中的应用	176
4.2 电力电子变流器的基本原理	180
4.2.1 相控型变流器	180
4.2.2 自换相型变流器	186
4.3 谐波抑制与多重化结构	192
4.3.1 脉宽调制技术	192
4.3.2 阶梯波	198
4.4 大功率电力电子装置的结构	213
4.4.1 开关器件阀	213
4.4.2 冷却系统	224
4.5 瞬时无功与DFACTS装置控制	235
4.5.1 瞬时无功理论	235
4.5.2 基于瞬时功率理论的补偿算法	239
4.6 补偿器的主电路结构	243
4.6.1 补偿器的分类	243
4.6.2 并联型补偿器的原理和功能	245
4.6.3 串联型补偿器的原理与功能	246
参考文献	247

第5章 用户电力技术

5.1 网络重构设备	251
5.1.1 固态断路器	251
5.1.2 限流器	264
5.1.3 固态转换开关	285
5.2 电能质量补偿设备	292
5.2.1 电力有源滤波器	292
5.2.2 配电系统并联补偿	343
5.2.3 配电系统串联补偿	422
参考文献	453

第1章 电能质量

1.1 电能质量的定义和内容

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。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，特别是为了节能及提高电力系统的运行效率，供电部门鼓励用户使用更快、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，又如随着计算机、数字电子设备、网络通信设备和包括电视机与空调在内的家用电器日益进入人们的工作与生活，为其提供电能的各种变流器得到了空前广泛的应用；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骚扰问题已取代传统的，如谐波、闪变、不平衡和停电等稳态电磁骚扰问题成为用户关注的焦点。

另一方面，随着计算机、微处理器控制的精密电子和电气设备在包括电力公司在内的用户中的大量使用，这些设备对电力系统中暂态电磁骚扰（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。比如大型的集成芯片生产厂，几个工频周波的供电中断，就会造成大量在制芯片被毁，因此由于电力系统电磁骚扰问题所带来的成本也变得越来越高。

使问题变得更为复杂的是越来越多的新型电子设备往往具有双重性：一方面，它对电力系统中的电磁骚扰十分敏感；另一方面，由于采用电能变换器等原因，它自身也是骚扰源，会对周围设备带来危害。所以在一定程度上可以说，电力电子技术是造成现代电力系统电磁兼容问题的主要原因。

需要指出的是，上述电力系统的电磁兼容问题实际上就是所谓的电能质量问题；换句话说，电能质量问题就是用电设备在电力系统的电磁环境下能够正常工作，并且不对该环境中任何事物构成不能承受的干扰的能力。因此，对传统的主要建立在稳态性能指标上的电能质量的概念进行进一步的分析与扩展，以及对电能质量补偿的概念、方法和措施进行深入的研究和改进受到越来越广泛的关注。

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。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。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。

对作为供电方的电力公司而言，电能质量从一开始就被看作是服务的质量，并且可以通过是否能按用户的需要（主要是对电压和频率的性能要求）和按其希望的方式提供电能的能力来进行评估。电力公司更为关心的是随着电力电子装置应用的日益普及，这类强非线性

的、时变负荷除了自身会产生谐波等各种电能质量问题之外，同时又对接入点的电力扰动十分敏感，如何在新条件下保证服务质量成为一个很大的挑战。此外，适当的供电质量实际上是一个动态的、不断发展的概念，它会随着新型用户设备的推出及用户要求的变化而不断改变。

终端用户对电能质量的定义也同样关注于能否以他们希望的方式取得和使用能量的能力，但所涉及的问题则更为具体，如传统上，用户对电力系统的基本要求主要是能够高可靠性地提供电能，而这意味着供电的连续性是电能质量中最重要的因素；但随着对电能质量敏感的电子设备的应用日益广泛，用户在希望电力公司所提供的电能除了具有高可靠性之外，同时也是清洁的。

归根结底，所谓“电能质量”就是为用户提供满足其最终用途目的的电能。而在目前对广大电力用户而言，所接受的狭义的定义则是：

- 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；
- 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，该能力是主要的，但不是唯一的，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所有在电气上位于所考察的供电点上游的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，所以可以将两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。美国电气电子工程师学会（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。

电能质量问题是一个难以量化的问题，所以目前没有一个被普遍接受的电能质量标准，对于电压和其他技术条件具有可以测量的标准，但电能质量的最终测量取决于最终用户设备的性能和生产率，如果提供的电能不能满足上述要求，则质量仍是欠缺的。但一般均认为所谓电能质量问题主要包括如下内容：1) 稳态电压的幅值和频率；2) 电压暂降与暂升；3) 短时或长时停电；4) 接地；5) 谐波；6) 电压波动；7) 电压闪变；8) 三相不平衡；9) 电能质量的监视与测量。

其中，由于电源频率作为一个全局的量超出本书所讨论的配电系统控制的范畴，所以本书不拟进行讨论。在引起电能质量的所有其他问题中，电压暂降和短时断电是发生概率最大，从而影响面也最广的问题，因此也是最迫切需要解决的问题。供电点的电压暂降和断电既可能是由于输电系统发生的电压暂降和中断引起的，也可能是配电系统本身的故障所引起的。前者会对其下游配电系统的所有用户带来影响；而后者的影响通常只局限在相应的系统中，而对其他配电系统不产生影响。但是传统的、利用诸如过电流继电器或熔断器切除故障所带来的时延，则可能会导致长达 1s 以上的电压跌落，该电压扰动将会沿输电线路传播，

进而对邻近配电系统带来影响。电网作为高度互连的大系统和专用供电馈线的集合，前者保证了供电的高可靠性，同时互连系统之间的相互作用也带来越来越多的严重的电压暂降；后者虽然具有较低的可靠性，但相应地电压暂降的发生概率也较小。以本书关心的配电系统为例，容量的增大虽然可以提高效率和可靠性，但相应地也增加了用户之间的相互作用，所以如何对电网进行合理配置是导致电能质量问题解决复杂化的一个重要原因。

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，但目前在我国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，电压闪变、频率偏移、三相不平衡等稳态电能质量问题同样会对用户设备的正常运行带来巨大的负面影响，这也是本书将特别关注的电能质量问题。

1.2 电能质量的相关三方

应当注意的是，尽管电能质量的最终结果均体现为用户的电力设备不能正常运行，但许多电能质量特性实际上是不仅取决于供电系统，也取决于终端用户设备的特性，所以系统和设备两者的兼容性是电能质量问题研究中必须加以考虑的问题。而设备本身又牵涉到用户和设备制造商。因此电力公司、电力用户和电力设备制造商构成了在电能质量问题上的三个利益相关方。

所以，对于电能质量问题通常就会根据各自的立场不同，从三个不同角度来进行考虑。从用户角度来说，关心的是由用户侧表计测出的对设备有害的电力系统扰动。而对敏感设备制造商而言，关心的则是从用户侧表计的测量结果来了解设备承受到扰动的严重程度和发生频率，进而能够确定特定设备为正常工作应当具有的合理的容限。除了供用电双方外，电气和电子设备的供应商是电能质量问题的第三个利益相关者，因为其产品的电磁兼容性，即抗扰度同样成为影响用户设备能否在一定的电磁骚扰条件下可以正常运行，并不对其他负荷造成干扰的能力。而从作为供电方的电力公司而言，它更加关注的是系统和用户两侧表计所给出的扰动。即他们不仅要关心源自电力系统的扰动是如何对用户设备造成影响的，同时也要

关心由某个用户造成的扰动是如何影响其他用户或/和电力系统自身的设备的。由于各自立场的不同，对于电能质量问题的原因的看法就存在很大的分歧。比如，Dugan 在一个对美国某电力公司电能质量问题的调查报告中指出，9 个月内，用户提出发生跳闸事故 30 次，而电力公司变电所则仅有 5 次跳闸的记录。应当指出，许多造成用户设备故障的问题在电力公司的记录中从不显示。比如电力系统中经常出现的电容器投切问题所引起的暂态过电压可能会造成用户设备的损坏，但对于电力公司而言这是一种正常的运行状态。又如系统中某个地方的瞬间故障所引起的电压跌落会引起用户变速传动设备的停机或计算机等数字设备的误动，而除非接有电能质量监测系统，电力公司将没有任何记录。而用户非线性负荷，如电力机车、电弧炉运行所造成的闪变、谐波、三相不平衡同样会随电网传播对电力系统的供电质量和安全可靠，以及邻近用户造成影响。所以作为一个难以量化的问题，电能质量问题及其责任方和解决方法目前并没有一个被普遍接受的标准。

电力公司作为商品的供应方，理所当然地有责任保证其基础设施能够满足向用户供应合格的电能的要求。但实际上，希望电力公司能够提供理想的电能是一种不切实际的想法，对造成电能质量问题的一些原因，比如造成供电设备停电的主要原因之一的雷击，加以控制就远远超出电力公司的能力范围。不仅如此，相当一部分电能质量问题，比如谐波干扰，是由于某些用户设备，比如计算机等电子设备的开关电源，电动机调速设备的逆变器等电力电子装置的运行而引起的，它不仅造成电能质量的下降，并且会对包括电力公司在内的其他用户设备造成影响。所以工业企业的电能质量问题不仅是电力系统一家的责任，电子设备和敏感设备的用户和制造商同样需要在解决该问题上发挥作用。关键问题在于，电力公司应当通过提高可靠性，将电能质量问题限制在一定的范围内，使其对用户的影响最小化。

其次，电能作为 21 世纪最重要的商品之一，按质论价是市场经济的一个重要法则，也就是说，供电的质量和供电的价格是紧密相关的。因此需要从经济上优化可靠性和电能质量水平，分析与电能质量相关的真实合理的价格，并以该价格作为优化电能质量问题的基础和用户需求的函数。这需要电力公司和电力用户一起解决上述问题。对电能质量变化在经济上带来的影响和不同改进方案所需投资之间进行评估，最终目的是在电力公司、制造商和用户之间进行协调，达到整体社会成本最小的目的。实际上，往往最优的解决方案可能是使特定的电能敏感设备对电能质量的变化变得不敏感，换句话说，对供电质量的要求应当是使一个特定的用户设备工作在一个适当的水平上。

作为用户方，电力和电子设备制造商应当在设计阶段就考虑一方面提高设备的抗扰度，即电磁兼容（EMC），使得设备能够经受得住合理水平的电能扰动；另一方面考虑采取措施，比如采用高功率因数的前端变流器等以降低设备自身所产生的电磁干扰。而对于敏感设备的用户，则应采用两种方式来提高设备的电能质量环境：一是改进供电电路的设计，比如采用独立供电，或将精密和敏感的设备安装在特殊的电能质量工业园区；另一是对关键设备，如医院的手术室、生命支持系统、公用服务系统，如供电、供水、消防和空中交通管制系统等利用外置的电能质量调节设备，比如不间断电源（UPS）、有源电力滤波器（APF）和动态电压恢复器（DVR）等以确保设备在供电系统故障条件下仍能正常工作。

由于实际中电能质量问题可以归结为电网向电力敏感设备提供的电能和敏感设备可靠运行所需的电能之间存在差别。因此解决方法包括：

- 1) 通过采用更好的电网结构，以降低电力系统骚扰对用户供电电压扰动的影响；这是

最为常用且方便的措施，但往往投资大，且效率低。

2) 提高用电设备对电能变化的耐受性。

3) 在电源和敏感电子设备之间插入接口设备，如各种电能控制设备，以隔离相互之间的影响。

实际方案的选择往往取决于可行性和经济性两方面的考虑，比如往往你可能根本找不到可以满足特殊条件下电磁兼容问题的设备。

电能质量问题由于涉及到许多不同的物理现象，这些现象的发生往往具有不同的原因，相应地针对不同现象的电能质量解决方法也大相径庭。图 1-1 给出了一个电能质量问题的评估方法。在评估中，首先需要确定的是所评估的是既有系统的电能质量问题，还是由于新的系统设计或结构变化引起的问题。对于既有系统的电能质量问题而言，测量和数据采集是确定问题的类别、特征和可能原因的相关性的关键一环。而对于拟议中的系统或方案用计算机建模与仿真则成为一个不可或缺的手段。

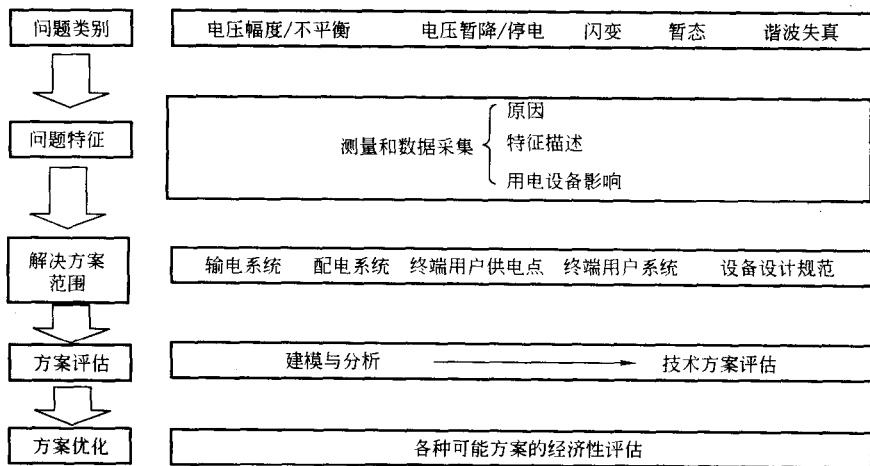


图 1-1 电能质量问题的基本评估步骤

对于电能质量控制方法的评估，需从经济和技术两个方面及从电力系统到受影响的终端用户设备的各个层面上进行，首先进行的是对各个层次的不同控制方案的技术可行性进行分析，随后对可行的技术方案进行经济性的对比。最优的解决方案取决于包括问题的类型、受影响的用户设备的数量和控制设备的类型在内的多种因素的综合平衡。

这里以敏感负荷在面对电能质量问题中发生频率最高、影响最大的电压暂降时的生存状况为例加以说明。电压暂降实际上是一个两维的函数，即是残余电压和持续时间的函数。这里对于一定的故障而言，残余电压是固定的，它根据观测点、短路点和电源位置的不同可能涵盖由零伏到标称供电电压的整个范围。而持续时间则在很大程度上取决于故障清除的速度，和随之而引起的取决于短路位置的电压暂降和短时断电的持续时间。因此，实践中最重要的是，对可能受到电压暂降和暂时断电影响的设备的抗扰度和补偿设备的性能加以分析。

就跌落的幅度和持续时间均适度的电压暂降而言，有些敏感设备由于自身具有惯性或储能单元，因此呈现一定程度的固有的抗扰度。而对短时断电或严重的电压跌落而言，由于此时涉及到短时间能量的完全转移或严重消失，所以不可能在没有电源的情况下持续运行。此

时设备的抗扰性将取决于它能否从一个备用的电源得到快速恢复所需的能量，或按预定的补救措施来适应上述过程，这些措施包括：

1) 利用自身的储能单元或补偿装置（如 UPS）在一定的时间内提供原来由电源提供的能量，从而可以补偿任何程度的电压暂降，以致短时间断电。设备耐受一定时间电压跌落和断电的能力，取决于所存储的能量和设备运行所需的有功功率之间的关系。通常需要将一定时间的响应时间（通常为毫秒级）考虑在内。由于储能单元十分昂贵，所以这种保护方式通常用于特别敏感的部件。

2) 不含储能单元的补救措施对于断电而言是无效的，但往往可以对残余电压在 50% 以上的电压跌落进行补偿。此类装置对电压跌落的耐受能力取决于残余电压的水平。此类装置的一个明显优点是对电压跌落的持续时间不敏感，此外，由于没有储能单元，因此它的价格也明显降低。

此外，各种类型的补偿装置，如用户电力系统控制器，则可以从外部对电网电压的变化、谐波和电压暂降与瞬间断电进行控制。利用无源或有源的补偿装置进行就地补偿是关注的焦点。快速的局部补偿可以在线路电压下降时从系统提取更大的电流，从而使负荷呈现恒功特性，但这又可能导致未补偿用户端电压的进一步下降，大规模采用补偿装置有可能带来的副作用就是电压稳定问题。

1.3 电能质量标准

电磁干扰（EMI）问题，早在 19 世纪电气和电子工业发展初期，就引起了工程界的重视。但过去的机电设备，如白炽灯、电动机等，对于电磁骚扰（如传导和辐射电磁骚扰）通常不敏感，所以也很少关心其电磁兼容问题。而电子设备对此类骚扰，特别是其中的高频和暂态现象十分敏感，随着此类设备的大量应用，由于电气和电磁骚扰引起的误动和损坏日益增多。因此电力公司、设备制造商和用户之间的协调和标准化就成为一个重要的任务。实际上，国际电工委员会（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的电磁兼容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磁兼容性基础标准——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，这些标准直接涉及到电能的生产、输送、使用和设备实际制造行业的生产、管理和电能质量。比如，其中 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，测试和评估方法。实际上，作为电力系统的电磁兼容问题，电能质量问题的可行的解决方法就是在骚扰发射和抗扰度限值之间进行协调。这意味着，一方面需要防止设备产生的电磁骚扰超过一定的水平；另一方面则使受到骚扰影响的设备具有适当的抗扰度，即在一定的骚扰环境下可以正常运行。现有的标准和导则主要是对电磁骚扰的水平进行控制，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。这些标准的制定实际上就是在利益相关各方的权利和利益平衡的基础上，为相关各方提供一个共同的平台，进而在整个社会成本最小的条件下，通过各方的合作，在终端用户设备和电力公司供电质量之间实现最大限度的兼容。换句话说，所制定的标准应当符合两个要求，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。比如电磁兼容标准 IEC 61000 中第 4 部分“试验和测量技术”就涵盖了对电气设备在电磁环境中的抗扰度进行试验和测量的各种规范。其中，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。面向电力系统的电能质量标准，如 IEEE 1159《电能质量测量推荐方法》，IEC 61000 中第二部分“电磁兼容”标准等大量标准和导则也一直在不断地发展之中。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国际半导体设备和材料组织（Semiconductor Equipment and Material International, Inc SEMI）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磁兼容标准。这种方式对其他在谋求提高生产率和与供电系统的兼容性的工业而言，同样是重要的。此类标准的大规模的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的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，就是对电力系统的各种电磁骚扰加以明确的定义、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，从而最大程度地保证供用电双方的技术经济利益和电力工业的健康发展。

1.4 电力电子技术在配电系统中的应用

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，也称定制电力技术。

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工商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, FRIENDS) 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磁骚扰的影响。图 1-2 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^[10]。

表 1-1 电能质量与用户要求

电能质量分类	A 级质量	B 级质量	C 级质量	标准质量
供电质量的特征	无瞬间停电, 对电压波形进行补偿	瞬时停电时间在 15ms 以下	停电时间在 1min 之内	现状
主要对象	计算机、半导体制造设备、通信设备和医疗	个人计算机、半导体制造设备和传动设备、高压放电灯	重要照明设备、换气扇、泵、工业传动系统	其他设备
暂降	补偿	补偿	不补偿	不补偿
停电	补偿	补偿	限制停电时间在 1min 以内	不补偿
备用电源工作时间	可以保证设备安全停机	200ms 以上 (暂降剩余电压 80%)	停电时间 1min 以内	不补偿
其他	可以利用直流电源供电	可以利用直流电源供电	—	—

而随着能源紧缺和环境污染问题的日益突出, 各国政府对供电问题的关注逐渐由单纯的经济问题转变到发展政策的层面上, 对各种可再生能源的应用采取了政策上鼓励、经济上补偿的方针, 以此为契机, 分布式发电 (Distributed Generation, DG) 系统的研究和应用也得到了迅速的发展。分布式电源由于邻近电力用户, 所以当电网发生扰动时, 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。但是分布式发电系统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 (包括正面的和负面的) 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 1-3 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与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。

美国 Business Communications Company, Inc., 在 2004 年的一个报告^[9]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 1-4 所示。

但极具讽刺意味的是, 实际的市场与上述预测之间存在非常大的差距。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的确存在市场, 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

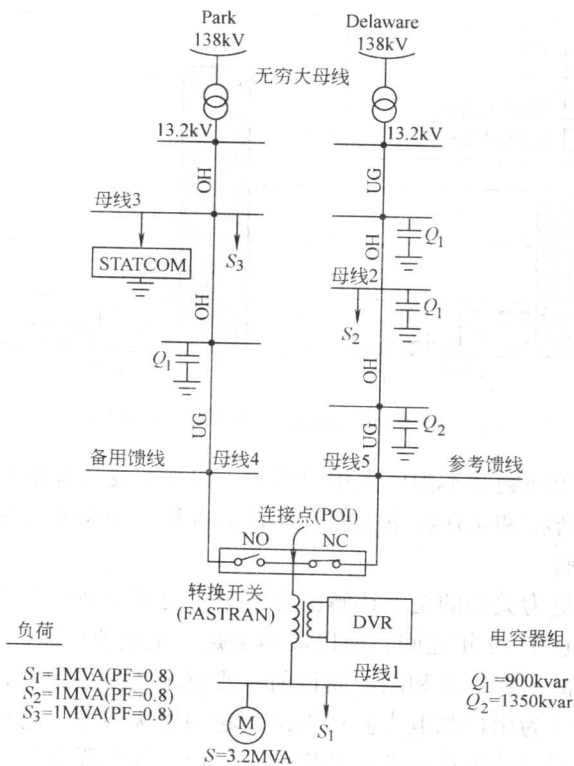


图 1-2 俄亥俄州 Delaware (特拉华) 优质电能园区接线
OH: 架空线路 (Over Head) UG: 地下电缆 (Under Ground)

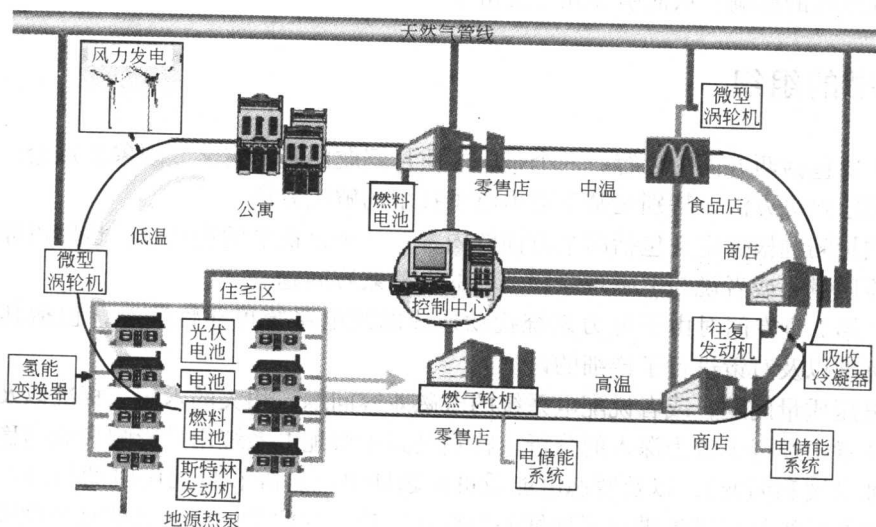


图 1-3 Brownfield 用户电力园区与分布式发电系统

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

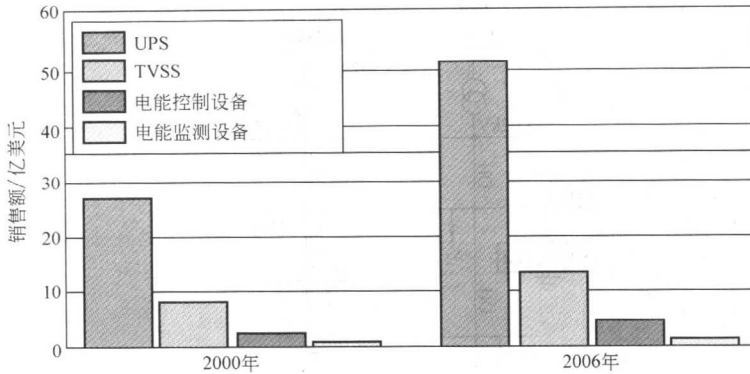


图 1-4 美国市场电能质量相关设备的销售额^[9]

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；

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。

电能质量控制设备的研究人员和制造商目前需要解决的核心问题是由用户发生的电能质量问题找到其特性；并且为用户和电力公司提出问题的解决方案。这种解决方案应当包括电力供应的可靠性、电能质量的可选择性和环境的友好性。他们需要通过宣传使用户认识到什么是电能质量问题以及解决该问题的重要性和可行性；应当向用户明确解决电能质量问题对于他们最为关心的节能降耗，以及提高设备生产率和利用率方面的作用，比如无功功率补偿对电弧炉等运行的影响，从而引导和开发市场。

1.5 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；另一个是电能质量问题解决方法，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，或者说与电磁现象相关联的电磁兼容问题。

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，或者说配电系统的电磁兼容问题、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的分析。特别是其中对配电系统用户影响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即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 章是对基于电力电子技术的配电系统电能质量补偿装置——用户电力技术中主要控制器的结构、工作原理、适用性等进行较为深入的讨论。力图从装置的角度，为从事用户电

力系统的研究和开发的人员提供一个较为全面和实用的变流器的选择、分析和设计的方法。

最后,第5章则是按照用户电力技术的应用场合分为网络重构型(即有源开关设备)和网络补偿型两部分进行讨论;而后者则又根据接入系统的方式不同,以有源滤波器作为原型机,分为串联、并联和串并联方式进行了详细的分析和讨论。第4、5两章的主要目的是通过对国际和国内在用户电力技术研究与应用的发展和最新电能质量控制技术的介绍,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实际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较为广泛的知识,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到供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,本书从本质上并非专门的理论书籍,而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,目的是提高本书对读者的价值,并促进读者将书中的知识应用到实际的生产与科研中。

参 考 文 献

- [1] Ghosh A, Ledwich G. Power Quality Enhancement Using Custom Power Device [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [2] Dugan RC, McGranaghan MF, et al. Electrical Power Systems Quality [M]. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2002.
- [3] 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.
- [4] 電力品質調整用パワ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.
- [5] ARRILLAGA J, BOLLEN M, WATSON NR. Power Quality Following Deregulation [J]. proceedings of the IEEE, 2000, 88 (2): 246-261.
- [6] Kazibwe WE, Sendaula MH. Electric Power Quality Control Techniques [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [7] 肖湘宁等. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] 程浩忠, 艾芊, 等. 电能质量 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [9] Dedad J. Four key Steps in Applying Power Conditioning Equipment [J]. Electrical Construction and Maintenance, 2004, 103 (3): 18-22.
- [10] 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.