



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

DIANNENG ZHILIANG FENXI YU KONGZHI

电能质量 分析与控制

肖湘宁 等 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育

及规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

DIANNENG ZHILIANG FENXI YU KONGZHI

电能质量 分析与控制

编著 肖湘宁 韩民晓 徐永海
文俊 徐明荣 陶顺等
主审 于坤山 孙树勤 林海雪



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书全面讲述了电能质量的分析、评定、监测与控制的理论和方法，并阐述了电能质量的国际标准和国家标准。本书主要内容包括：电能质量概论，电能质量分析与控制中的数学方法，传统电能质量分析与改善措施，电压波动与闪变的概念、评估方法及测量，电压暂降与短时间中断分析，波形畸变与电力谐波分析，现代电能质量控制技术的原理与应用，电能质量评估指标和方法。每章的后面附有思考题与习题。本书的附录 A 将作者收集到的部分电能质量常用中英文技术术语及其解释汇总在一起；附录 B 简要介绍了与电能质量密切相关的电磁兼容的基本知识；附录 C 提供了部分标准或导则中的电能质量指标汇总。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化相关专业教材，也可供本专业研究生及电力工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电能质量分析与控制/肖湘宁等编著. —北京：中国电力出版社，2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-9805-1

I. ①电… II. ①肖… III. ①电能-质量分析-高等学校-教材②电能-质量控制-高等学校-教材 IV. ①TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 217552 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 483 千字

定价 31.60 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

前 言

本书是在 2004 年出版的同名教材的基础上修改而成。原《电能质量分析与控制》教材自 2004 年出版以来,在一些高校的专业课程中得到采用,并且也引起国内电能质量领域专业技术人员的关注和肯定,在此向广大读者深表感谢。

2004 年,我国在电力系统电能质量问题研究上的基础还比较薄弱,急切需要一本适合电气工程专业的电能质量教材,同时亦需要满足这一领域科技人员的工作需求,为此,作者通过广泛阅读国内外的文献资料,总结他人与自己在这方面的科研成果,并结合在供用电技术、电力电子技术等方面多年积累的教学经验,完成了这本较全面论述电力系统电能质量知识的书稿。作为国内第一本关于电能质量的高教教材,本书第一章概括性地论述了日益引起人们关注的电能质量问题,并且从电能质量的概念、定义、术语和分类等基本知识入手,通过介绍 IEC 和 IEEE 关于电磁干扰现象的特性类别,详细描述了各种电能质量现象,并且对电能质量国家标准作了简要介绍。第二章作为学习电能质量的数学知识补充,有选择地介绍了经常用于电能质量分析与控制中的数学方法,其中包括经典的傅里叶变换、新兴起的小波变换、矢量变换以及瞬时无功功率理论等,并且结合电能质量的实际问题给出了应用实例介绍。第三章是读者比较熟悉的传统电能质量问题及其改善措施的内容。本章将长期应用于电力系统中考核电能质量的基本指标——电压偏差、频率偏差、三相不平衡度结合工程实际作了较深入的分析,并对各种常规采用的、行之有效的传统电能质量改善措施作了概括性介绍。第四章简要介绍了电压变动现象的概念和细划分类,重点描述波动负荷对电压特性的影响和由此带来的电压波动现象及其特征,并且结合对电压波动影响最大的电弧炉负荷的用电特性分析,给出了非线性时变电弧阻抗数学模型。第五章就近年来日益引起供电界关注的电压暂降与短时中断展开了分析与讨论。第六章从电流质量谈起,阐述了波形畸变的基本概念,重点介绍了整流装置等典型谐波源的特性,讨论了电力系统谐波对变压器、电机、通信、电能计量等的影响和危害,并详细分析了谐波谐振与放大和电容器、串联电抗器的电压与电流,最后简要介绍了电力系统谐波的限值要求。第七章重点介绍国内外研究或已经采用的现代电能质量控制技术。在本书的最后,以附录 A 的形式将作者收集到的部分电能质量常用中英文技术术语及其解释汇总在一起,以便读者在学习和阅读科技文献时参考。考虑到许多读者在有限时间里掌握多学科知识确有困难,在附录 B 中还简要介绍了与电能质量密切相关的电磁兼容的基本知识和 IEC 电磁兼容国际标准。书中内容除了第一章和第二章作为本教材的基础知识应先安排学习外,其他各章内容相对独立完整,学习时可按照教学要求适当调整。该书的出版填补了我国在这一学科方向教材的空白。

2004 年出版的《电能质量分析与控制》教材使用已逾五年时间,随着对电能质量知识的普及和对电能质量问题的深入认识,有必要为适应实际需求对教材做一次修改。但由于修改时间有限,在征得各方面意见后认为,原书体系合理,章节新颖充实,层次分明,适合教学或自学使用,可保留原书的基本内容,并在此基础上做适当补充和修正。具体调整如下:

(1) 作为电能质量不断丰富知识体系,电能质量指标的评估应当成为不可缺少的重要

组成部分,在本版中增加了第八章关于电能质量评估指标和方法。该章较详细地介绍了国内外普遍采用的电能质量的各种评估方式与应用,并结合相关国际标准或国家标准,阐述了电能质量的评估流程和主要评估方法,重点介绍了日益引起关注的谐波电压评估指标和电压暂降评估指标。

(2) 考虑到供用电双方对电力谐波认识的共性问题,在第六章中增加了本书编著者近年来取得的研究成果——系统谐波阻抗及其实用估计方法,尽管在这方面还会出现其他新的方法,但作为系统谐波阻抗的知识引导,仍提供给读者学习和参考。

(3) 2008年,全国电压电流等级和频率标准化技术委员会陆续修订并颁布实施了以下新的电能质量标准:

GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差

GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差

GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡

GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动与闪变

GB/T 24337—2009 电能质量 公用电网间谐波(报批,待发布)

根据新标准对部分指标的限值修正,更新了教材中的相应内容。

(4) 为查阅方便,增加了附录C——部分标准或导则中的电能质量指标汇总。

2004年出版的《电能质量分析与控制》教材共分七章。肖湘宁教授拟订了本书的大纲,并编写了第一章、第四章和附录部分。第五章和第六章由徐永海教授编写,第七章由韩民晓教授编写,第三章由文俊副教授编写,第二章由徐明荣讲师编写。全书由肖湘宁教授修改并统稿,由清华大学孙树勤教授担任主审。多年来,孙教授一直关心和指导我们的科研和教学工作,而且对本书进行了极为细致的审阅,提出了许多宝贵的意见,在此一并表示衷心感谢。华北电力大学硕士研究生郭锦艳、刘雪原同学认真细致地承担了本书的插图绘制和文字编校工作,她们的聪明才智和付出的辛劳加快了书稿的完成,在此深表谢意。作者还要对书中所列参考文献的作者表示深深的谢意。

本版教材增补的第八章及附录C由陶顺博士编写,第六章由徐永海教授补充编写了系统谐波阻抗一节,全书修订统稿由肖湘宁教授完成。

本版教材由中国电力科学研究院于坤山教授级高工和林海雪教授级高工进行了详细审阅,并提出了许多宝贵意见,作者在此深表谢意。

编写国内第一本关于电能质量的高教教材是一项艰巨的任务,书中不妥和疏漏之处在所难免,作者真诚地希望广大读者对本书的各个方面给以批评指正。

编 者

华北电力大学

北京德胜门外朱辛庄

二〇〇九年十一月

目 录

前言

第一章 电能质量概论	1
第一节 概述	1
第二节 电能质量概念、定义及分类	7
第三节 电能质量现象描述	11
第四节 电能质量标准简介	18
思考题与习题	21
第二章 电能质量的数学分析方法	22
第一节 概述	22
第二节 傅里叶变换与波形的数学分析方法	22
第三节 小波变换与电能质量扰动识别	32
第四节 矢量变换与瞬时无功功率理论	41
思考题与习题	49
第三章 传统电能质量分析与改善措施	51
第一节 概述	51
第二节 供电电压偏差	51
第三节 电力系统频率偏差	64
第四节 三相电压不平衡	69
第五节 供电中断与供电可靠性	76
思考题与习题	80
第四章 电压波动与闪变	81
第一节 基本概念	81
第二节 电压波动	84
第三节 闪变	89
第四节 闪变的评估方法	94
第五节 电弧炉用电特性分析	104
第六节 电压波动和闪变的测量	112
思考题与习题	116
第五章 电压暂降与短时间中断	118
第一节 概述	118
第二节 电压暂降与中断的起因	119
第三节 短时间电压中断的监测与随机预估	122
第四节 电压暂降对敏感用电设备的影响	125
第五节 电压暂降幅值、临界距离与凹陷域	131

第六节 三相不平衡电压暂降..... 135

第七节 感应电机启动引起的电压暂降..... 146

第八节 电压暂降特征量检测方法..... 146

思考题与习题..... 154

第六章 波形畸变与电力谐波..... 156

第一节 概述..... 156

第二节 波形畸变的基本概念..... 157

第三节 供电系统典型谐波源..... 162

第四节 谐波的影响和危害..... 175

第五节 谐波谐振与放大..... 180

第六节 电容器与串联电抗器的电压和电流..... 185

第七节 系统谐波阻抗..... 187

第八节 谐波电压限值与电流允许值..... 191

思考题与习题..... 194

第七章 电能质量控制技术..... 195

第一节 概述..... 195

第二节 电力谐波抑制技术..... 197

第三节 电压波动与闪变的抑制技术..... 214

第四节 电压暂降和短时间中断的抑制技术..... 223

思考题与习题..... 241

第八章 电能质量评估指标和方法..... 243

第一节 概述..... 243

第二节 电能质量评估方式..... 243

第三节 评估流程及方法..... 250

第四节 电能质量评估指标..... 258

思考题与习题..... 282

附录 A 常用的电能质量术语..... 284

附录 B 电磁兼容及其标准简介..... 292

附录 C 部分标准或导则中的电能质量指标汇总..... 295

参考文献..... 306

第一章 电能质量概论

电能既是一种经济实用、清洁方便且容易传输、控制和转换的能源形式,又是一种由电厂发电、电力部门向电力用户提供,并由发、供、用三方共同保证质量的特殊产品。如今,电能作为走进市场的商品,与其他商品一样,无疑也应讲求质量。本章概括地论述了日益引起人们关注的电能质量领域的诸多问题,并且从对电能质量现象的认识和发展历程,电能质量的概念、定义、常用术语及其分类方法等基本知识入手,通过对国际电工委员会(IEC)和国际电气与电子工程师协会(IEEE)有关文件中所列的关于电磁干扰现象的特性分析和描述,使读者对现代电能质量问题有一个整体认识。

第一节 概述

由于供电电源的电能质量下降而影响电气设备正常工作的问题,早在电力供应一开始就引起了供用电双方的关注。人们首先把电力系统运行中电压和频率偏离标称值的多少作为检验电能质量的主要指标。之后,随着工业规模的扩大和科学技术的发展,国民经济各部门的用电量不断增加,电气化程度越来越高,新工艺、新技术广泛应用于工业生产和人民生活的各个方面,越来越多的用户采用了性能好、效率高但对电源特性变化敏感的高科技设备,电力用户对电能质量的要求在不断提高。与此同时,许多新型的电气设备在其运行中会向电力系统注入各种电磁干扰,对电力系统的安全运行和用电设备的正常工作造成的危害与影响不断增加,电能质量问题日益突出,引起了供电部门和广大电力用户的普遍重视。据国际会议报告介绍,在美国每年由于电能质量下降所引起的经济损失高达数百亿美元。劣质电能引发电网大面积停电,造成用户生产力下降,其社会影响和经济损失是相当严重的。人们已经开始认识到,电力部门只要将电能“如数”地传输给电力用户,并且保证一定的供电连续性即可满足需求的想法是很不完善的,电力系统运行和工业生产过程对电能质量的要求正在逐步扩大和深化,提高电能质量已经成为保证供用电系统安全稳定运行的基本要求。

另外,我们还看到,随着经济的发展和社会的进步,计算机及其网络技术已经渗透到各个领域,现代工业生产和产品的多样性与个性化发展趋势已经逐渐形成,工业管理体制也正在发生重大的变化。近年来随着电力行业深化改革,发电与输配电体制分离、电能按质按量论价、电网逐步实行商业化运营与市场交易已经是大势所趋。可以说,最大限度地满足用户对用电量的需求和对不同电能形态变换的需要已成为工业发达地区电力系统面临的新问题。这些变化大大推动了电能质量标准化的进程和对供电质量的监督与管理。尽管在现代电能质量的一些定义和解释上还有待深入探讨,在电能质量问题的起因上仍存在分歧,但供电部门和电力用户对电能质量的关心程度却与日俱增。20世纪90年代中期以来,工业发达国家普遍认为,当代电力系统除了保证电网安全稳定运行的基本要求外,还应把质量控制、经济运行和高效能量管理作为评估电力系统运行水平的重要内容。

如何深入理解现代电能质量问题, 如何把提高电能质量与增强竞争意识、扩大电力市场占有率联系起来, 如何从技术、经济和运行管理等方面加大力度, 保证优质供电, 以最小程度减少对现代工业企业和重要电力用户的影响, 既是电力用户需求和电力系统运行给我们提出的新任务, 也是信息时代给我们提出的新挑战。可以认为, 当代电力系统的发展赋予了电能质量新的内涵和意义。近十多年来, 电力科技工作者根据当代电力系统的特点, 对各种各样电能质量现象进行了分类整理和研究, 不断地深入分析和探索尚待认识的电磁干扰问题, 并且在此基础上部分地制定出了科学的符合生产实际的和可操作的考核电能质量的技术经济指标及评估方法, 推动了电能质量先进控制技术的实施。所有这些工作都为最终构成一个全面电能质量监督管理体系, 真正实现电网的安全稳定和优质经济运行, 向用户供给合格的电能和满意的服务提供了理论上和技术上的保证。

一、供电系统运行与电能质量的关系

1. 电能质量的基本要求

众所周知, 电能是一种具有广泛适用性的能源, 可转换成其他能源形式, 亦可转换成在许多领域和场合所需要的各种电能形态。例如, 电能可直接转换为热能、光能、机械能被消耗, 亦可转换成非工频、非正弦的电能形态作为现代工业、现代通信、计算机技术和日常生活的基本动力源。

为保证电能安全经济地输送、分配和使用, 理想供电系统的运行应具有如下基本特性:

(1) 以单一恒定的电网标称频率 (50Hz 或 60Hz, 我国采用 50Hz)、规定的若干电压等级 (如配电系统一般为 110kV, 35kV, 10kV, 380V/220V) 和以正弦函数波形变化的交流电向用户供电, 并且这些运行参数不受用电负荷特性的影响。

(2) 始终保持三相交流电压和负荷电流的平衡。用电设备汲取电能应当保证最大传输效率, 即达到单位功率因数, 同时各用电负荷之间互不干扰。

(3) 电能的供应充足, 即向电力用户的供电不中断, 始终保证电气设备的正常工作与运转, 并且每时每刻系统中的功率供需都是平衡的。

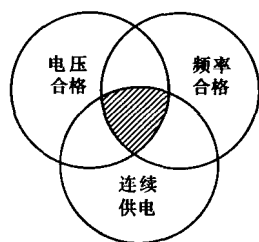


图 1-1 供电系统电能质量的基本要求

上述理想供电系统的基本特性构成了供电运行对电能质量的基本要求, 如果将其概括描述可如图 1-1 所示。图中三个基本集合的交集之内确定了合格电能质量的指标要求, 是我们将要阐述的供电系统电能质量的三个基本要素。图 1-1 示意性地表明, 这三项质量指标相互间存在着紧密的依存和制约关系。在以后的各章学习中我们将会知道, 由于用电负荷的变化、负荷特性的差异和随机性以及电网的各种故障等多种因素, 往往导致实际供电系统运行偏离理想状态, 供电系统的频率和电压幅值不再保持恒定不变, 三相电压出现不平衡, 正弦波形发生畸变。为保证用电设备的正常工作和电力

系统的安全稳定运行, 并且考虑到供用电设备的电气设计额定值和供电电压的高低变化对电气设备的技術、经济指标的影响等因素, 国家电能质量标准制定出了具体规定。例如, 不同电压等级下的电压偏差允许值一般不得超过额定电压的 $\pm 5\%$, 电网正常频率偏差允许值为 $\pm 0.2\text{Hz}$, 三相电压不平衡度允许值一般为 2% , 按不同电压等级规定, 低压系统电压总畸变率极限值为 5% 等, 并且传统上采用供电可靠性统计评价指标——用户供电可靠率 (如 $RS-1 > 99.96\%$) 等来考核对用户连续供电的承诺。

2. 电能质量的特征

电能,或称之为电产品,除了具有其他工业产品的基本特征(如可以对产品的质量指标分级、检测和预估,可以确定相应的质量标准和实施必要的质量控制)之外,由于其产品形式单一,而且其生产、输送与消耗的全过程独具特色,因此在引起电能质量问题的原因上、在劣质电能的影响与评价等方面与一般产品的质量问题的不同,具有以下显著特点:

(1) 电力系统的电能质量始终处在动态变化中。电能从发电生产到用户消耗是一个整体,电能量的流动始终处于动态平衡之中,并且随着电网结构的改变和负荷的变化,不同时刻、不同公共连接点,电能质量现象和指标往往是不同的,也就是说整个电力系统的电能质量状态始终处在动态变化中。

(2) 电力系统是一个整体,其电能质量状况相互影响。电能不易储存,其生产、输送、分配和转换直至消耗几乎是同时进行的。很显然,在电力系统运行过程中劣质电能是不可能更换的。电气连接将供用电双方构筑成一个整体,不论哪个环节引起电能质量问题,质量一旦达不到标准要求,都会对相关配电网络与设备以及电力用户的安全正常运行构成威胁。许多情况下,电力系统中的某一实体往往表现为既是电能质量的破坏者,同时也是劣质电能的受害者。

(3) 电能质量扰动具有潜在危害性与广泛传播性。虽然电产品的基本形式简单,但其质量扰动的现象却是多种多样的,事故的诱发条件比较复杂,电能质量下降造成的对电力系统和用电设备的损害有时并不立即显现,其危害与影响具有潜在性。另一方面,由于输电线路为扰动提供了最好的传导途径,且传播速度快,电气环境污染波及面大,影响域广,其结果可能会大大降低与其相连接的其他系统或设备的电气性能,甚至使设备遭到损坏,可见劣质电能的危害与影响具有快速传播性。

(4) 有些情况下用户是保证电能质量的主体部分。当电网传输的电能作用于用电设备时,很有可能会受到来自于用户反作用的影响。因此,在某些质量问题的起因上,电能质量的下降更多的是受到使用者的影响,而不在于电力生产者或供应者。例如,用户设备汲取的供电电流大小和电流波形是由用户根据自己的生产需要设定的,而这些设备往往就是畸变电流的发生源。在这种情况下,电力用户成为保证电能质量的主体部分。

(5) 对电力系统的电能质量指标进行综合评估非常困难。一般而言,当电力系统在运行过程中电能质量的各项指标接近系统规定值时,就可以认为电能是达到标准要求的。但是当电能质量的多个指标共同作用在一个系统中时,其不同的组合结果对电力系统运行的不利影响和对电气设备性能的降低,甚至损坏都是十分复杂的问题,加之不同电气设备在不同条件下对电压干扰的敏感度不同。因此如何给出综合的技术与经济评价仍然是非常困难的,目前尚无一个准确的和普遍认可的定量综合评估计算方法。

(6) 控制和管理电力系统电能质量是一项系统工程。从整个电力系统来讲,保证优质电力生产和用户安全使用还要靠多方共同努力。因此要求设备制造厂商、电力部门、电力用户、标准制定部门、监督管理部门等协同合作,达成共识,制定统一的和可操作的适度质量标准或单独的供电质量协议,按照电力用户对电能质量的不同要求实行分级控制和质量达标。只有这样才能实现技术与经济的综合优化,做到电能质量的责任与义务清晰,保护共享的电气环境,共同获得最大的生产效率和经济效益。可以说,如何认识、控制和管理电能质

量是一项系统工程。

二、当代电力系统对电能质量的要求

随着时代进步与科技的飞速发展,现代电网与负荷构成出现了新的变化趋势,由此带来的电能质量问题越来越引起电力部门和电力用户的高度重视。电网与负荷构成出现的变化趋势主要表现在:

(1) 电力系统扩张与联网逐渐形成,系统运行的安全性和可靠性要求不断提高。

(2) 在保证电力系统一定的自然垄断特性条件下,引进竞争机制,实施电力市场化营运,强化环境保护意识与提高信息管理水平已经势在必行。

(3) 当代电力系统与计算机技术和通信技术的结合更加紧密,采用高新技术(如 TC-SC、FACTS、HVDC、Cus-Pow)以提高电力传输能力和实现配电自动化的趋势方兴未艾。

(4) 电力用户为满足其对产品的个性化、多样性生产的需求,从最大经济利益出发,在大功率冲击性、非线性负荷容量迅速增长的同时,更大规模地采用科技含量高的器件、设备与技术。越来越多的电力用户采用了微电子技术、计算机技术、电力电子技术、数字控制的自动化生产线等,大批新兴产业迅速崛起。

除此之外,我们通过以下的具体分析可以看到,强化电能质量概念,提高对电能质量重要性的认识已经成为当代电力系统的需要。

长期以来,人们习惯地把电能质量与供电可靠性几乎等同看待。这是因为以往的电力负荷多为线性的和对电磁干扰低敏感的负荷,如照明、加热和电动机等,而数量和功率有限的电子设备可以忽略不计。传统负荷设备对短时间的电压变化基本没有反映,只在供电电压中断时才不能正常工作,而且各设备之间、各工业生产过程之间又很少相互关联。因此,以往在涉及到供电质量水平问题时,往往多用供电可靠率(用指标 RS-1 评价)和每户年均停电次数等主要指标来评价计算即可满足要求。

近年来,电力科技工作者通过对电网中各种电力干扰现象的实时监测与识别,对引起用电设备异常运行、故障或停电以至于造成生产过程紊乱的起因分析认为,社会与科技的进步已经赋予了电能质量更多更新的内容。在当代电力系统中,电能质量与供电可靠性之间既有联系又有区别,传统定义上的供电可靠性仅限于计及长时间(一般只考虑持续时间 5min 以上,有的国家规定为 1min 以上)电源中断和平均故障时间的概率问题,虽然供电的连续性是供电质量的重要标志之一,但以往在电能质量问题的认识上和管理上不够全面,在供电中断的程度与起因等方面没有同现代电能质量概念和用户需求联系起来,传统的 N-1 可靠性原则已不能满足新兴企业供电质量的要求。有专家指出,电力供应可靠与否应当以电力系统和电力用户的生产过程保持连续正常工作而不会受到干扰为准则,因此它包括许多相关内容,需要提供包含电能质量这一重要组成部分在内的广泛意义上的供电可靠性评价报告。人们对电能质量和供电可靠性的认识正在不断深入。

当代电力系统的负荷结构发生了很大的变化,用电设备和生产工艺对电能质量的要求比传统设备高。许多新设备和装置都带有基于微处理机的数字控制器或功率电子器件,它们对各种电磁干扰都极为敏感,原本微不足道和不甚关心的电压扰动或特性变化可能影响到其电子控制系统的正常工作,甚至导致掉闸或生产停顿。

所谓负荷敏感度是指负荷对电能质量问题的敏感程度,即提供给负荷的电能质量不良时

负荷能承受干扰仍正常工作的能力。这种能力越低，敏感度也就越高。根据负荷敏感度以及在经济上的损失、社会和政治上的影响等因素，一般可将负荷分为三类，即普通负荷（Common Load）、敏感负荷（Sensitive Load）和重要（要求严格的）负荷（Critical Load）。

因此，面对当代负荷的特点，要保证其正常工作仅靠保证传统定义上的供电可靠性是不够的。例如，某半导体制造厂，从来没有发生过停电事故，供电可靠性计算指标很高。但一次持续时间极短（几十毫秒）不易觉察的电压暂降就造成了其生产线工作紊乱、产品报废，使该厂蒙受了数百万美元的损失。这些敏感设备相互连接在一个大电力系统中，或一系列自动化过程中，意味着整个系统与最敏感设备对电能质量异常有相同的敏感度。另一方面，为了提高电力运营总效率，供电系统中出现了许多新型的用电设备。例如，交流电机变速驱动装置、大容量并联电容补偿装置，以及大量的非线性、功率冲击性和波动性负荷等。但这些设备又会导致电力系统谐波污染和电能质量下降（更广义的称为电气环境污染），使供电电压干扰水平加重，给电力系统安全运行带来直接的或潜在的危害。

电能作为商品进入市场后，电能质量问题更加突出，电力企业之间的市场竞争理念得到加强，与此同时也极大地促进了电力用户开始关注和认识各种电能质量现象。越来越多的电力用户根据自身需要向电力部门提出了高质量供电的要求，甚至有选择地通过签定供用电合同和质量协议加以保证。供用电双方在达成电力买卖后，用电方受到的任何电力干扰而影响其正常生产都可以通过经济或者法律的手段来解决。电力用户的需求正在由原来的电量需求向高可靠性、优质供电和合理电价的需求转变。

电力系统的各个部分都是相互联系的，供用电双方的相互影响越来越紧密。因此，综合协调处理电能质量问题至关重要。任何一个局部的故障或事件都有可能造成大面积的影响，甚至是重大损失。这就迫使供电部门在保证向用户提供充足和优质电能的同时，还需极力避免遭受来自用电设备的电力干扰，维护全电力系统的安全运行。

另外需要注意到，由于看问题的角度不同，在导致电能质量下降的原因与责任上，供用电双方往往存在很大的分歧。例如，在配电系统经常遇到的电容器投切操作，有可能引起瞬态过电压而损坏用户设备，也可能由此造成用户设备掉电，此时用电方会简单地抱怨供电质量太差，以至于投诉。又如，当电力系统某处发生短路故障，很可能在一些负荷公共连接点出现不同程度的短时间电压暂降，其结果造成某工厂的变频驱动装置掉电。由于目前电力部门还缺少对类似现象的监测记录与统计，可能会认为对该工厂的电力供应是正常的。再如，由于用户电气设备的硬件老化、软件不成熟或者控制系统不可预知的错误动作等等，可能最终引起故障而使电能质量受到影响。有文献报道，美国乔治动力公司曾组织和实施了一项对电力部门和电力用户关于电能质量问题起因的调查，其结果如图 1-2 所示。据资料分析，虽然对电力市场的质量调查还存在分类方法上的不同，但是调查报告清楚地表明，电力公司和电力用户对引发电能质量问题的原因的看法往往有很大的分歧，尽管双方都把 2/3 的事件起因归咎于自然因素（如雷电等），但用户仍然认为电力部门在这方面的责任要比自我测评结果大得多。通过上面例子也可以看到，引起电能质量问题的原因有时是来自电力系统内部的，有时来自于外部连接设备的，甚至是共同作用的结果。

综上所述，现代电力系统结构与负荷构成的变化是工业生产不断发展的必然结果，有利于电力用户提高生产率和获得更大的经济效益；同时通过采用高效的电力负荷设备，大量节

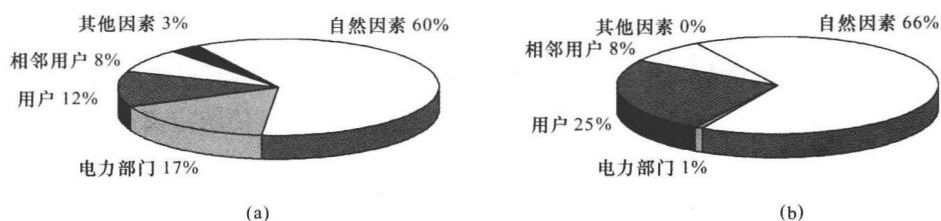


图 1-2 关于电能质量的电力市场调查结果
(a) 对用户的调查结果；(b) 对电力部门的调查结果

约电能和延缓用电的需求，从而节省电力建设所需的大量投资。因此，提高质量意识、满足生产发展的需求已经成为供用电双方共同的愿望。另外，也可以看到，引起电能质量问题的原因有时是多方面的，因此不能简单地把某一事件只同一种特殊的起因联系起来。深入分析和研究电能质量问题，探寻在一定条件下发生电磁干扰的因果关系，明确责任和义务，是电力工业适应市场竞争和可持续发展所必须的。

三、改善电能质量的意义

电能作为人们广泛使用的能源，其应用程度是一个国家发展水平和综合国力的主要标志之一。在满足工业生产、社会和人民生活对电能需求量的同时，提高对电能质量的要求是一个国家工业生产发达、科技水平提高、社会文明程度进步的表现，是信息时代和信息社会发展的必然结果，是增强用电效率、节能降损、改善电气环境、提高国民经济的总体效益以及工业生产可持续发展的技术保证。时至今日，电力工业面向市场经济，引进竞争机制，以求最小成本与最大效益，电能质量的优劣已经成为电力系统运行与管理水平高低的重要标志，控制和改善电能质量也是保证电力系统自身可持续发展的必要条件。

虽然电能质量问题在电能输送分配和使用的一开始就已经提出，但随着时代的进步和科技的发展，当代电力系统已经赋予了它新的概念和内容。现代工业的工艺制造和设备要求、高科技作用的实现，以及生产力和产品竞争力的提高越来越依赖高质量的电力供应。电能质量问题已不仅仅是电力系统中电压和频率等的基本技术问题，已经被提升为关系到整个电力系统及设备的安全、稳定、经济、可靠运行，关系到电气环境工程保护，关系到整个国民经济的总体效益和发展战略的高度来认识了。

随着电能质量标准的制定和实施，电能质量的监督管理法规体系将逐步建立。这必将大大促进设备制造厂商提高其生产设备和对电力系统的兼容性，促使电力用户在提高产品生产率、使用高性能设备的同时，严格限制自身对电力系统和其他设备的电磁干扰，保障各行各业的正常用电秩序，进一步促进供电部门加强对电能质量的技术监督和对电力系统的运行管理，推动电能质量先进控制技术的研发和应用，提高控制和驾驭的能力，保证配电系统安全经济运行和向用户提供合格的电能和优质的服务，为千家万户提供信得过的电能产品。

不难看出，在当代电力系统，深入了解和认识电能质量，高度重视电能质量下降对供用电系统运行的危害与影响，甚至对社会经济的作用和影响，实现全面电能质量管理具有极其重要的社会意义和经济意义。

第二节 电能质量概念、定义及分类

一、电能质量术语

在现代电力系统中,电能质量这一技术名词涵盖着多种电磁干扰现象。但是由于工业领域的各个行业对电能质量认识上的不同和使用名词上的不统一,长期以来人们在描述各种各样电压和电流干扰电力供应及电气设备正常工作的电磁现象时,在所提出的专业名词的含义上很不准确,使用很不规范,严重地影响了电能质量工作的开展。例如,“电能质量”这一用词长久以来就比较混乱,在英文用词方面有人使用“Electric Power Systems Quality”(直译为电力系统质量),有人使用“Quality of Power Supply”(供电质量)等。对其含义也各有解释。直到1968年,一篇关于美国海军电子设备用电源规范要求的研究论文最先规范使用了“Power Quality”(电能质量)这一专业术语。与此同时,前苏联等国家也开始使用“Voltage Quality”(电压质量),用来反映电压幅值的缓慢变动和电源实际频率与理想频率的偏差。此后,越来越多的研究者表现出对电能质量或电压质量的关心,电气工程界在关于电能质量问题应采用规范的技术名词上逐渐趋向一致。国际电气电子工程师协会(IEEE)标准化协调委员会已正式通过采用“Power Quality”(电能质量)术语的决定。我国国家标准中已正式更名采用国际通用的英文名词。由此不难看到,采用统一的专用名词精练地描述诸多电能质量现象和问题,科学和准确地给出电能质量专业名词的定义和解释是十分必要的。随着人们对电能质量现象认识的不断提高和科学技术的广泛交流,电能质量领域的技术术语正在不断充实和完善。为了便于读者参考学习和使用,作者将收集到的部分国际上普遍采用的电能质量相关名词与术语列于本书附录A中。

二、基本概念与定义

什么是电能质量?从普遍意义讲,电能质量是指优质供电。但是由于人们看问题的角度不同,所以迄今为止,对电能质量的技术含义仍存在着不同的认识,还不可能给出一个准确统一的定义。如前所述,长期以来,电能质量概念和电力供应可靠性几乎是等同的。电力部门可能把电能质量定义为电压、频率的合格率以及连续供电的年小时数,并且用统计数字(以“9s”表示,如99.9%等)来说明电力系统是安全可靠运行的。电力用户则可能把电能质量简单定义为是否向设备提供了电力。因此,在像供电中断的持续时间等问题上供用电双方意见就不相一致,对这种故障事件应当归输配电工程问题还是电能质量问题说法不一。而设备制造厂家则可能定义电能质量就是指电源特性应当完全满足电气设备的正常工作需要。但实际上,不同的厂家和不同的设备对电源的特性要求可能相去甚远。

另外,如何描述供电与用电(电力系统与负荷)双方的互相作用和影响,并且给出相应的技术定义仍是人们不断探索的问题。一种普遍接受和采用的技术名词与定义方法是:从工程实用角度出发,将电能质量概念进一步具体分解并给出解释。其内容如下:

(1) 电压质量。给出实际电压与理想电压间的偏差,以反映供电部门向用户分配的电力是否合格。电压质量通常包括电压偏差、电压频率偏差、电压不平衡、电压瞬变现象、电压波动与闪变、电压暂降(暂升)与中断、电压谐波、电压陷波、欠电压、过电压等。

(2) 电流质量。电流质量与电压质量密切相关。为了提高电能的传输效率,除了要求用

户汲取的电流是单一频率正弦波形外，还应尽量保持该电流波形与供电电压同相位。电流质量通常包括电流谐波、间谐波或次谐波、电流相位超前与滞后、噪声等。

(3) 供电质量。它包括技术含义和非技术含义两部分。技术含义有电压质量和供电可靠性；非技术含义是指服务质量，它包括供电部门对用户投诉与抱怨的反应速度和电力价目的透明度等。

(4) 用电质量。它包括电流质量和非技术含义等，如用户是否按时、如数缴纳电费等。

上述关于电能质量的定义与解释反映了供用电双方的相互作用和影响以及责任和义务。虽然其含义很工程化，但对理解和认识电能质量是很有实用价值的。

在此需要提及的是，国际电工委员会（IEC）提出并使用了电磁兼容（EMC）的概念，给出了干扰允许值、抗扰阈值和兼容值的定义，并在此基础上，制定出了一系列电磁兼容标准。电磁兼容强调的是设备与设备相互之间的电磁作用和影响，以及电源与设备相互之间的电磁作用和影响。在 IEC 提出的电磁兼容标准中，有许多与电能质量相关联的内容。例如，EMC 标准采用发射（Emission）来表示由设备产生的电磁污染，在电能质量领域它反映出电流质量问题。再如，EMC 标准采用抗扰（Immunity）来表示设备免除电磁污染的能力，而在电能质量领域它与电压质量相联系。电磁兼容术语与电能质量术语有很大的相容性，在它们中间有许多的同义词。电能质量和电磁兼容是两种不同性质的概念和不同范畴的标准体系，两者既有联系也有区别。考虑到电能质量知识的完整性，本书把与电能质量有关的电磁兼容知识简介放在附录 B 中，供读者学习参考。

综上所述，迄今关于电能质量的定义概括起来主要有以下三种：

定义 1：合格电能质量是指，提供给敏感设备的电力和为其设置的接地系统均适合于该设备正常工作。

定义 2：造成用电设备故障或误动作的任何电力问题都是电能质量问题，其表现为电压、电流或频率的偏差。

定义 3：电能质量就是电压质量，合格的电能质量应当是恒定频率和恒定幅值的正弦波形电压与连续供电。

应当看到，电能质量问题终究是由电力用户的生产需求驱动的，所以用户的衡量标准应占有优先的位置。

因此电能质量可以定义为：导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差，其内容包括频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、暂时或瞬态过电压、波形畸变、电压暂降与短时间中断以及供电连续性等。

三、电能质量的分类

为了系统地分析和研究电能质量现象，并能够对其测量结果进行分选识别，从中找出引起电能质量问题的原因和采取针对性的解决办法，因此将电能质量进行分类和给出相应的定义是很重要的。

1. 电能质量的基本分类

对于电能质量现象可以根据不同基础来分类。以下介绍了近几年国际上在电能质量现象分类和特性描述等方面取得的研究成果。其中，在国际电工界有影响的 IEC 以电磁现象及相互干扰的途径和频率特性为基础，引出了广义的电磁扰动的基本现象分类，见表 1-1。

表 1-1 IEC 关于引起电磁扰动的基本现象分类

现 象	分 类	现 象	分 类
传导型低频现象	谐波, 间谐波	辐射型低频现象	工频电磁场
	信号系统 (电力线载波)	辐射型高频现象	磁场
	电压波动		电场
	电压暂降和中断		电磁场
	电压不平衡		连续波
	工频变化		瞬变
	感应低频电压	静电放电现象 (ESD)	
	交流电网中的直流成分	核电电磁脉冲 (NEMP)	
传导型高频现象	感应连续波电压或电流		
	单方向瞬变		
	振荡性瞬变		

表 1-2 给出了 IEEE 制定的电力系统电磁现象的特性参数及分类。对于表中列出的各种现象, 我们可进一步用其属性和特征加以描述。对于稳态现象, 可利用以下属性来描述, 即幅值、频率、频谱、调制、电源阻抗、下降深度、下降面积; 对于非稳态现象, 还可能需要一些其他特征来描述, 即上升率、幅值、相位移、持续时间、频谱、频率、发生率、能量强度、电源阻抗等。可以说, 表 1-2 为我们提供了一个清晰描述电能质量及电磁干扰现象的实用工具。

表 1-2 IEEE 制定的电力系统电磁干扰现象的特性参数及分类

类别		典型频谱	典型持续时间	典型电压幅值
瞬变现象	冲击脉冲	纳秒级	5ns 上升	<50ns
		微秒级	1 μs 上升	50ns~1ms
		毫秒级	0.1ms 上升	>1ms
	振荡	低频	<5kHz	0.3~50ms
		中频	5~500kHz	20 μs
		高频	0.5~5MHz	5 μs
短时间电压变动	瞬时	暂降	0.5~30 周波	0.1~0.9p. u.
		暂升	0.5~30 周波	1.1~1.8p. u.
	暂时	中断	0.5 周波~3s	<0.1p. u.
		暂降	30 周波~3s	0.1~0.9p. u.
		暂升	30 周波~3s	1.1~1.4p. u.
	短时	中断	3s~1min	<0.1p. u.
		暂降	3s~1min	0.1~0.9p. u.
		暂升	3s~1min	1.1~1.2p. u.
长时间电压变动	持续中断		>1min	0.0p. u.
	欠电压		>1min	0.8~0.9p. u.
	过电压		>1min	1.1~1.2p. u.
电压不平衡			稳态	0.5%~2%

续表

类别		典型频谱	典型持续时间	典型电压幅值
波形畸变	直流偏置		稳态	0~0.1%
	谐波	0~100th	稳态	0~20%
	间谐波	0~6kHz	稳态	0~2%
	陷波		稳态	
	噪声	宽带	稳态	0~1%
电压波动		<25Hz	间歇	0.1%~7%
工频变化			<10s	

2. 变化型和事件型分类

电能质量问题还有一种分类方法，即按照电能质量扰动现象的两个重要表现特征——变化的连续性和事件的突发性为基础分成两类。这种分类是比较实用的。

所谓变化型是指连续出现的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流的幅值、频率、相位差等在时间轴上的任一时刻总是在发生着小的变化。例如，系统频率不可能一成不变地等于 50Hz（或 60Hz），系统电压也不可能每时每刻恒等于其额定值，与理想值的偏差始终存在。这一类现象包括前述的电压幅值变化、频率变化、电压与电流间相位变化、电压不平衡、电压波动、谐波电压和电流畸变、电压陷波、主网载波信号干扰等。由于电力系统中的电能质量现象多为随机现象，在对变化型电压和电流进行质量评估时，往往采用概率统计方法来处理，即采用概率密度函数给出相应变量在某一确定点的概率值，并且用概率分布函数反映该变量处在某一确定范围内的可能性有多大。图 1-3、图 1-4 所示为供电电压幅值的概率密度函数曲线和概率分布函数曲线。根据变化型电能质量的特征，当测量变化型电压和电流时要求连续记录它们的变化值。

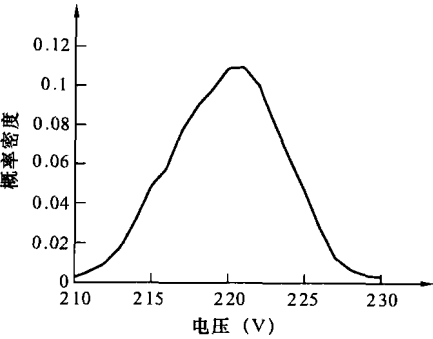


图 1-3 电压幅值的概率密度函数曲线

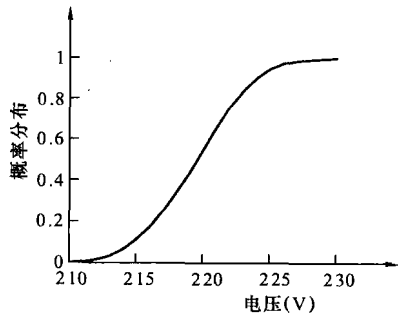


图 1-4 电压幅值的概率分布函数曲线

所谓事件型是指突然发生的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流短时严重偏离其额定值或理想波形。这一类现象包括电压暂降和电压短时间中断、欠电压、瞬态过电压、阶梯形电压变化、相位跳变等。在事件型电压和电流评估时，通常采用其特征量，如用幅值偏离量的多少、事件持续时间长短以及发生的频次等来描述，并且用概率论和数理统计方法以及可靠性计算来处理。监测事件型电压和电流时，要求有一个事件启动信号，如电压方均根值低于某一预定的阈值便开始记录，待事件结束时停止记录。