

开放市场下 的电能质量指标

Power Quality Indices in
Liberalized Markets

【意】Pierluigi Caramia Guido Carpinelli Paola Verde 编著
肖湘宁 陶 顺 汪 建 徐永海 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

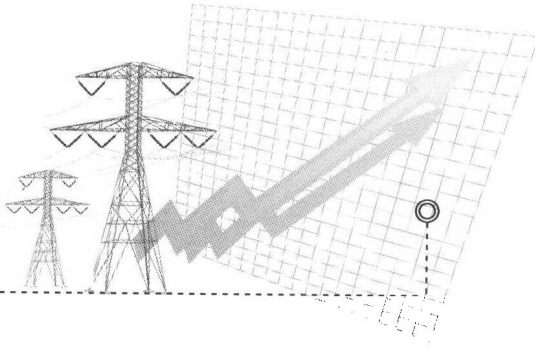
开放市场下 的电能质量指标

Power Quality Indices in
Liberalized Markets

肖湘宁 陶 顺 汪 建 徐永海 译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



译者前言

开放市场下的电能质量指标

电能质量指标可用于快速量化电能质量扰动水平,同时也是描述电气扰动对设备的负面影响、实现标准化评价以及提出有效改善与治理建议的数据基础。随着我国经济的快速发展和科技的不断进步,对电能质量指标的研究及其应用已越来越受到重视和关注。但仍需看到,由于我国在电能质量领域的研究历程较短,电力部门和电力用户对电能质量指标及其体系还缺少全面的认识,而工业生产中出现和遇到的电能质量扰动问题已越加突出。正是基于以上实际需要,译者选择了这本有代表性的电能质量指标专著介绍给大家,以供开展研究和工作实践的读者借鉴使用。该书的主要特点表现在:

(1) 为了系统量化电能质量扰动,本书较全面地收集和整理了现在国际上广泛使用的传统电能质量指标和面对分布式电源接入配电系统以及引入新理论后可能出现的新指标。

(2) 深入阐述了获得电能质量指标信息的先进方法及其实际应用,紧扣复杂现象,关注计算的简易程度和在数学与物理上的有效性,并辅以电能质量指标计算使用案例。

(3) 通过分析电能质量的扰动源和扰动源定位,基于电能质量的不同分类与指标,详细给出了用户和供电部门应如何评定和分担扰动责任的方法。文中不乏许多尚待研究的新课题。

(4) 调查统计了世界范围内的电能质量目标值,并结合经济学原理,分析了电能质量经济成本,介绍了基于金融处罚与激励的经济机制,将开放市场下的电能质量扰动与其经济性影响有机地联系起来。

难能可贵的是,该书作者花费了很大精力对世界主要国家和重要标准化委员会的标准体系、主要研究文献中的电能质量指标研究成果作了较完整的收集和整理,其中也包括对中国的标准的概要性介绍。这一工作为我们掌握和认识电能质量指标提供了极大的方便,扩大了读者的视野,加深了读者的理解。顺便要提醒的是,我国的电能质量标准已在2008年进行了较全面的修订,为了避免误解,书中所引用的与我国新标准不同之处,译者添加了适当补充与说明。

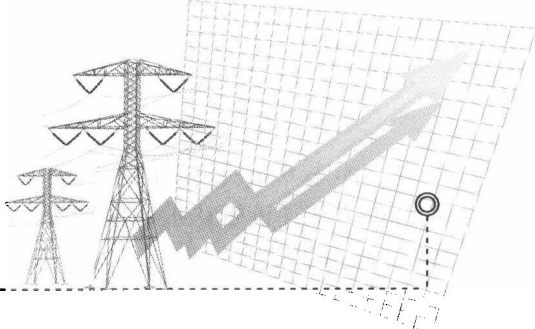
译者认为,该书对于开展我国电力系统电能质量、供电可靠性研究和改进我国的电能质量指标体系与工程实践,是一本重要的参考书籍。同时,它对电气工程师和管理人员在新的开放市场下解决实际工作中的电能质量问题具有指导意义。

本书各章由肖湘宁、陶顺、汪建、徐永海翻译完成,全书由肖湘宁教授负责最终的统筹定稿。在翻译过程中,刘颖英、郭静、张丹等参与了文字、公式和图表等的校对整理工作,对他们付出的辛勤劳动表示感谢。

由于时间紧迫和限于译者水平,书中难免有错误和不妥之处,请读者批评指正。

译者

2011年1月



原书前言

开放市场下的电能质量指标

近年来,随着干扰负荷的增加和设备对电能质量扰动更加敏感,电能质量已经成为电力系统中一个亟待关注的问题。显而易见,在一个新的具有竞争的开放市场下,由于用户可以选择任一家电力公司为其供电,因此电力扰动不但会给用户造成相当大的经济损失,也会给电力公司带来严重的经济影响。实际上,世界各地的开放电力市场正在改变着对电能质量指标体系的认识和讨论,而对于所有电力系统经营者来说,电能质量的目标制定就越加显得重要。

特殊情况下,本书所涉及的电能质量指标是快速量化电能质量扰动的有力工具。这些指标可以作为阐明电力扰动对电力系统元件负面影响的基础,并且可用于在某一给定的框架限制下依照标准和推荐规程的要求进行评价。本书中提到的指标包括现在使用的传统指标,以及未来可能采用的新指标;并且,这些指标表现出在以下三个主要特点之间作出权衡:捕捉复杂现象的能力、计算的简易程度和在数学与物理概念上的有效性。供电中断问题在一些书籍和出版物中已有广泛论述,故本书并不涉及。

第1章以介绍电能质量扰动分类、起因和影响的背景知识为起点,并且注意到电磁兼容与电能质量扰动之间的联系。随后,介绍了传统指标,即在国际标准和推荐规程或相关文献中频繁使用的指标。

第2章阐述了用于评估供电公司或用户是否要为电能质量扰动承担责任的新指标。对确定与电能质量扰动源有关的问题进行了分析,这包括电能质量扰动源的定位、扰动责任的分担和主扰动源的识别,或者说,需要对哪一方(供电公司或用户)在电能质量扰动水平的作用更大上作出评定。

第3章分析了非平稳波形的指标,这一主题特别重要。因为对于非平稳波形从对其谱分量的分析中不可能轻易得到所需的信息,而且它们在时间轴上的定位也必须了解。本章介绍的一些先进方法可以克服在分析电力系统波形中遇到的困难是很有用的,如谱泄漏问题等。特别指出,本章的着手点在于介绍这些方法的理论背景和在电能质量指标计算与建议的应用上。

第4章介绍综合指标。综合指标的目的在于仅用1个或最多2个指标对某一监测点的整个供电电压质量进行量化。本章概要论述的综合指标是基于实际电压和理想电压的对比,以及对传统指标和电能质量扰动给用户造成的经济影响的适当处理。

第5章论述了在有分散式发电(DG)的配电系统中如何对电能质量作出恰当的定义。在本章中特别阐述了考虑到分散式发电的电能质量扰动水平变化的概率型指标。

最后,第6章介绍了电能质量扰动的经济影响。首先,重点讨论了电能质量扰动相关的成本问题以及那些便于评估质量成本的敏感指标;然后,讨论了基于经济处罚与激励办法的经济机制,或两者兼用的电能质量规范管理机制。

将本书 6 章所涉及的主题全面覆盖需要很大的篇幅。为了简明起见，作者试图以尽可能简练的方式使读者认识各种问题。读者也可通过对各章结尾所列参考文献的学习获得该领域更为全面的知识。

本书是对数年来发表的大量的有关电能质量指标的论文进行分析和综合的结果。作者鼓励和欢迎本书读者提供反馈信息，并且希望读者指出错误，提出建议或疑问，以澄清存在的问题。

Pierluigi Caramia, Guido Carpinelli, Paola Verde

目 录

开放市场下的电能质量指标

译者前言

原书前言

第 1 章 传统电能质量指标	1
1.1 导言	1
1.2 背景概念	1
1.3 电能质量扰动指标和目标值	10
1.4 小结	41
参考文献	41
第 2 章 用户与电力部门之间的责任评定	45
2.1 导言	45
2.2 波形畸变与电压不平衡：基于单个测量点的指标	45
2.3 波形畸变与电压不平衡：基于分布式测量系统的指标	78
2.4 电压波动	82
2.5 电压暂降	90
2.6 电压暂态问题	94
2.7 小结	96
参考文献	96
第 3 章 先进方法和非平稳波形	102
3.1 导言	102
3.2 离散时间波形和加窗	103
3.3 短时傅里叶变换	109
3.4 小波变换	111
3.5 参数法	115
3.6 时—频分布	123
3.7 瞬时波形畸变（突发性指标）	129
3.8 小结	132
参考文献	132
第 4 章 供电电压质量的总体量化	136
4.1 导言	136
4.2 理想电压和实际电压对比综合指标	136
4.3 传统指标处理后的综合指标	141
4.4 基于对用户经济影响的综合指标	152

4.5 综合指标对比	152
4.6 小结	154
参考文献.....	154
第5章 含分散式发电的配电系统	155
5.1 导言	155
5.2 电能质量变化量指标	157
5.3 影响系统指标	163
5.4 小结	164
参考文献.....	164
第6章 电能质量扰动的经济学分析	166
6.1 导言	166
6.2 电能质量扰动的经济影响	166
6.3 提高电能质量水平的经济机制	177
6.4 小结	187
参考文献.....	187

传统电能质量指标

1.1 导 言

当提及“电能质量”时，我们应该考虑到电力系统各个方面的运行状况。电力系统的基本任务是保证向负荷提供经济的、有足够连续性和质量水平的电能。通常，连续性是指供电服务不能中断，而电能质量是关注电力系统出现的各种各样的电力扰动和对波形特性的影响。本书通篇采纳了电能质量的最近定义^[1]，概述如下：

(1) 电力系统不干扰或影响负荷运行的能力——这一性质主要涉及用户与公用电网之间的公共连接点处的电压质量。

(2) 负荷不干扰或降低电力系统运行效率的能力——这一性质主要是但不只局限于涉及负荷的电流波形质量。

在以上的定义框架下，电能质量问题包含了持续时间从几周波到数秒钟的短期事件及瞬变，和呈现在波形上的长时间（有时为连续的）的扰动。

本书着重论述电压质量和电流质量的量化指标，而不讨论电力中断及可靠性问题^①，因为后者已有相关的书籍或论文出版。本章将详细介绍传统的电能质量指标，包括被国际标准或导则大量采用的监测指标、频繁用于电力系统分析或制定电能质量扰动下的电气元件的相关标准，以及系统指标。虽然系统指标在标准或导则中尚未做出相关规定，但是新的开放电力市场框架下，系统指标已经引起了公众的兴趣，因为它可作为不同配电系统或同一系统内不同区域的对比评估的基准指标^②。

本章首先介绍电能质量扰动的分类、起因和影响等相关背景概念，然后回顾电磁兼容的基本定义，并讨论电磁兼容与电能质量扰动的关系。本章针对各种扰动类型，最后介绍现有的监测点指标、系统指标和需遵守的目标值。

众所周知，全面详尽地叙述所有传统指标和目标值是一项艰巨的任务，如果这样会远远超出本书的范围。

1.2 背 景 概 念

电压或电流偏离理想波形的变动通常称作电能质量扰动。三相电力系统的理想波形是以

① 一般而言，可靠性用于衡量一个系统完成其预期功能的综合能力^[2,3]。

② 监测点指标是用户和公用电网的公共连接点的指标，系统指标是配电系统的某个局域或整个系统的指标。

振幅和频率均为合适和恒定的正弦波形, 每相幅值相同, 并且相位角互差 $2\pi/3$ 。

本章 1.2.1 节将介绍电能质量扰动分类, 并概要地回顾扰动的起因和它们的影响。

电能质量扰动的出现将有损于电力系统的电气特性, 并降低连接在系统上运行的设备性能。研究在同一条件下引起扰动的负荷与设备运行性能之间的相互影响属于电磁兼容的范畴。1.2.2 节将阐述电能质量扰动和电磁兼容水平之间的联系及其限值, 还将介绍许多基本概念, 如兼容水平和电压特性等。这些概念对评估传统的监测点指标和系统指标都非常重要(详见 1.3 节)。

1.2.1 电能质量扰动

电能质量扰动的类型很多, 被广泛采纳的两种分类方法在 IEC 的电磁兼容系列标准和 IEEE 1159—1995 中有所描述。

IEC 电磁兼容系列标准按环境现象分类, 包括低频现象 ($\leq 9\text{kHz}$)、高频现象、静电放电现象和核电电磁脉冲。

低频和高频现象按传播媒介可分为辐射型干扰和传导型干扰。辐射型干扰以设备的周围空间为媒介, 而传导型干扰则以各种金属性材料为导体。

传导型低频现象可以分为谐波、间谐波、电网传输的信号电压、电压波动、电压暂降、长时和短时电压中断、三相电压不平衡、频率变动以及在交流电网中感应的低频电压和直流分量等。传导型高频现象包括感应连续波形的电压或电流、单方向瞬变和振荡瞬变。

辐射型低频和高频现象包括磁场、电场、电磁场、连续波形和瞬变。

静电放电是指不同静电电位的导体间发生的电荷突然转移现象^[4]。

核电电磁脉冲是由高海拔的核爆引起的^[5,6]。在核电电磁脉冲干扰的区域内, 任何导体都相当于天线传感电磁脉冲。核电电磁脉冲的低频效果是在长距离通信和电话线上感应大电流和高电压, 而高频成分则会影响电子和仪器中电路的工作。

尽管这些电磁现象是否都是电能质量问题仍在争议中, 但是公众一般都会认为传导型低频现象是电能质量扰动。因此, 大多数属于传导型的扰动将在本节中特别加以分析。

IEEE 1159—1995 将扰动分为七类, 即瞬变、短时变动、长时变动、三相电压不平衡、波形畸变、电压波动和频率变动。在每一类别中, 按照扰动现象的频谱、持续时间和大小, 又进一步给出分类^[7]。短时变动包括短时电压中断、电压暂降和电压暂升(与电压暂降相反的现象)。长时变动中加入了美国 ANSI C84.1—1989 的限值^[8], 分为长时间电压中断、低电压和过电压三类。波形畸变的分类除了谐波、间谐波和交流电网的直流现象与 IEC 分类一致外, 还增加了陷波和感应宽带现象的噪声。

第三种实用又简单的电能质量扰动分类方法在参考文献 [9, 10] 中描述, 即分为事件型和变化型。事件型是指偶然的电压和电流波形大幅度偏离理想或标准波形的现象。变化型是指电压和电流小幅度偏离理想或标准波形的变动现象, 往往以时间轴上每一时刻的值, 或者在相当长一段时间内的处理值为特征, 因此需要连续监测。这种分类方法与有些文献中描述的离散型扰动和连续型扰动分类很相似。

为了简化分析主要的电能质量扰动特性, 本节中采用了“事件型”和“变化型”分类名词。

1.2.1.1 事件型

事件型电能质量扰动有电压中断、电压暂降、电压暂升、快速电压变动、暂时过电压和

相位跳变。

一、电压中断

尽管电压中断在本书中并未深入谈及，但是为了事件型电能质量扰动分类的完整性，此处给予了简要介绍。

供电电压中断是指在供电终端的电压值低于预先设定的中断阈值的现象。EN 50160—2000 的电压中断阈值取宣称供电电压^①的 1%^[11]；IEEE 1159—1995 的中断阈值取标称电压的 10%；IEC 文件没有给出固定的中断阈值。IEC 61000-4-30—2003 推荐：为了评估电压中断，用户需要将电能质量监测仪设置一个合适的电压中断阈值^[12]。

EN 50160—2000 将电压中断现象分为：

(1) 预安排（计划）停电，用户可事先收到停电通知。

(2) 事故（非计划）停电，即由永久性或瞬时故障引起的电压中断，大多数与外部事件、设备故障或受扰有关。事故停电可进一步分为由永久性故障引起的长时间停电（>3min）和瞬时故障引起的短时停电（≤3min）。

IEEE 文件引入了瞬时、暂时、短时和持续停电的术语，并且不同文件给出了不同的定义。一方面，IEEE 1159—1995 定义了 0.5 周波~3s 的暂时停电、3s~1min 的短时停电，以及大于 1min 电压为零的持续停电；另一方面，IEEE 1250—1995 又区分为 0.5~30 周波的瞬时停电、30 周波~2s 的暂时停电、2s~2min 的短时停电，以及大于 2min 的持续停电^[13]。

IEC 61000-2-8—2002 定义的短时电压中断是指所有相电压突然降低到指定的电压中断阈值以下，然后在短时间间隔内得到恢复的现象^[14]。持续时间不大于 1min（或者在重合闸配合条件下，不大于 3min）的电压中断往往属于短时停电。

二、电压暂降

电压暂降是指电力系统中某节点的电压低于某一阈值，并经过一段短时间后又恢复的现象。电压暂降阈值不仅与电压中断阈值不同，而且在 EN 50160—2000 和 IEC 61000-2-8—2002 中往往设定为 90% 的宣称供电电压，而 IEEE 1159—1995 中规定为 90% 的标称电压。电压暂降术语在 IEEE 1159—1995 中采用名词“sag”，而在 IEC 中采用名词“dip”。IEEE 1159—1995 还推荐将电压暂降划分为瞬时（0.5~30 周波）、暂时（30 周波~3s）和短时（3s~1min）三类。需引起注意的是，在 IEEE 1159—1995 中还定义，电压幅值在标称电压的 80%~90% 之间且持续时间大于 1min 的现象属于低电压。

通常，电压暂降的特征用一对数据，即残余电压（或称为暂降深度）和持续时间来表示。残余电压（也称电压暂降幅值）是事件过程中的最低电压值。暂降深度是参考电压（宣称供电电压，或者如果取暂降前的电压为参考电压时，则称滑动参考电压）和剩余电压的差值。持续时间是电压方均根值（RMS）低于阈值的保持时间，一般在 10ms~1min 之间。

电压暂降可能是由于短路故障及其随后的保护装置清除故障动作引起的，也可能是由于负荷的突然变动引起的，如电动机的起动。如果是短路引起的电压暂降，其持续时间则由保

① 宣称供电电压 U 。一般取系统的标称电压。标称电压是设计系统的标志性电压，反映系统运行的某些特征。根据供用电双方的协议，如果供电终端协商的运行电压不是标称电压，则该电压称为宣称供电电压 U_c 。

护系统来决定。

影响电压暂降严重性的因素有很多，如电弧特性、接地阻抗、馈线 R/X 比值以及电动机和负荷的特性。

由单相接地故障引起的一个电压暂降的示例如图 1.1 和图 1.2 所示。图 1.1 中给出了电压波形，图 1.2 是电压方均根值随时间变化的曲线，方均根值是采用沿波形移动的 10ms（半个周波）矩形窗测量得到的。

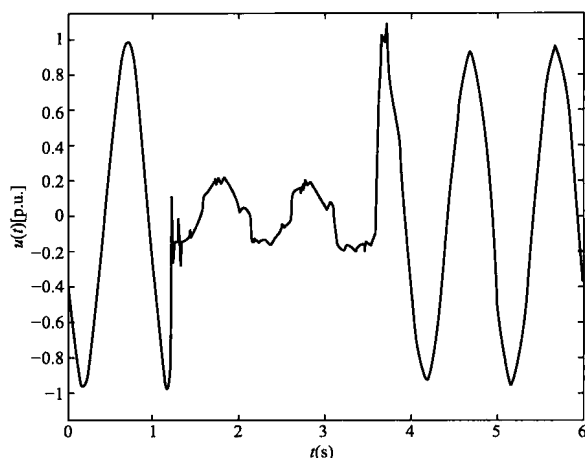


图 1.1 单相故障引起的电压暂降：电压波形图

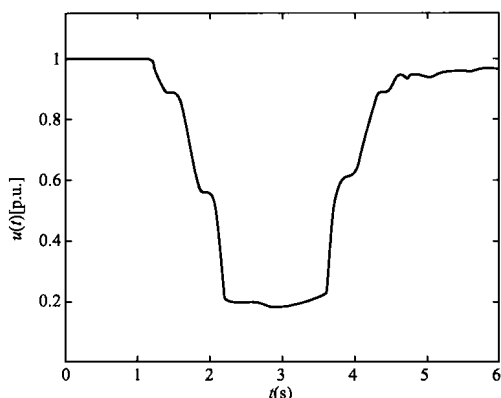


图 1.2 单相故障引起的电压暂降：电压 RMS 值

电压暂降之所以引起大家关注是因为它给许多类型设备带来了影响。与电压暂降最密切相关的问题是设备停运。许多工厂装备了关键性的流程类负荷，电压暂降可能会造成生产流程中断，而生产过程的重启动往往要花费数小时时间。对电压暂降最敏感的负荷主要有，用于计算机和 PLC 等电子类设备前端的开关式电源、交流变速驱动器、继电器、接触器和直接接入的感应电动机等。

三、电压暂升

电压暂升是指供电电压的方均根值增大到宣称供电电压 110%~180% 之间，并持续短时间后又恢复的现象，一般持续时间在 10ms~1min 之间。IEEE 1159—1995 将电压暂升分为瞬时（持续时间 0.5~30 周波，幅值 110%~180%）、暂时（持续时间 30 周波~3s，幅值 110%~140%）和短时（持续时间 3s~1min，幅值 110%~120%）三种类型。值得注意的是，IEEE 1159—1995 将电压幅值在标称电压的 110%~120% 之间且持续时间大于 1min 的现象归于过电压。

系统故障可能会引起电压暂升，例如，当三相系统发生单相短路时，非故障相就可能出现电压暂升，但是电压暂升现象并没有电压暂降那么常见。变压器、开关设备、电缆、旋转电机、电压互感器和电流互感器等承受电压暂升后可能会降低设备的使用寿命。另外，电压的短时增大也可能会导致一些保护类的继电器受到非期望的干扰。

四、快速电压变动

快速电压变动是在两个稳态条件下的电压方均根值的快速过渡。在快速电压变动过程中，电压值不应超过暂降和/或暂升的阈值，否则就归于电压暂降或电压暂升。另外，电压

逐渐变化的前后应该以标称电压为基准来表示（典型值在标称电压的 90%~110% 之间）。

引起快速电压变动现象的主要原因有变压器的分接头调压、负荷的突然增加或减少（有时也与故障清除相关）、电动机的冲击电流或电力系统内的倒闸操作等。快速电压变动主要导致对视觉的干扰，一般不会引起电气设备的损坏或非正常运行（然而，这是一个需要进一步开展研究的领域）。

五、暂时过电压

暂时过电压是指暂时振荡或非振荡过电压，一般被快速阻尼，其持续时间只有几微秒或更短时间。

暂时过电压分为瞬变冲击和瞬变振荡。瞬变冲击的特征是单极性，由正向或反向雷击、电弧或绝缘击穿等引起。图 1.3 (a) 展示了一个电压波形出现瞬变冲击的例子，其冲击极值达到电压波形峰值的数倍之高，特征以上升时间、衰减时间和极值来描述，如图 1.3 (b) 所示。上升时间 T_1 是指上升沿从 10% 极值到 90% 极值之间的时间，一般以冲击从 30% 极值上升到 90% 极值的时间乘以 1.67 倍而计算得到。衰减时间 T_2 是指冲击波形开始时间到波尾衰减到一半极值的时间之差。因此，如图 1.3 (b) 所示的冲击波形又被称作 T_1/T_2 波形图，其中 T_1 和 T_2 的单位为微秒。

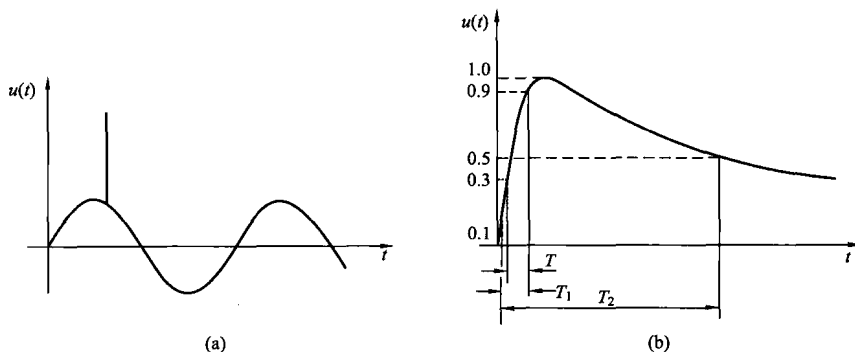


图 1.3 瞬变冲击过电压示例

(a) 电压波形；(b) 瞬变冲击特性

瞬变振荡过电压是指相对于电压波形出现正负极性的振荡现象，其振荡频率非常高，主要由倒闸操作引起，以极值电压、主频率和衰减时间（持续时间）来描述其特征。

瞬变振荡的特征参数对量化评估瞬变对电力系统设备的影响非常有用。当评估电气设备绝缘击穿时，电压绝对极值很重要，它取决于瞬变幅值和瞬变发生在基波电压波形上的位置。然而，许多设备或绝缘方式也对电压或电流的变化速率敏感。结合瞬变极值，可用主频率来评估其变化速率。

根据 IEEE 1159—1995 的电能质量分类，瞬变振荡按主频率频谱可进一步划分为低频、中频和高频三类。

倒闸操作事件经常引起低频瞬变（主频率小于 5kHz，持续时间为 0.3~50ms）。最常见的就是电容器组充能，其主频率在 300~900Hz 之间，其极值是 50/60Hz 波形峰值的 1.3~1.5 倍，由系统阻尼决定。铁磁谐振和变压器充能引起的瞬变振荡的主频率也在此范围内。图 1.4 给出了一个例子，展示了投切电容器组引起的瞬变振荡过电压的事件波形。

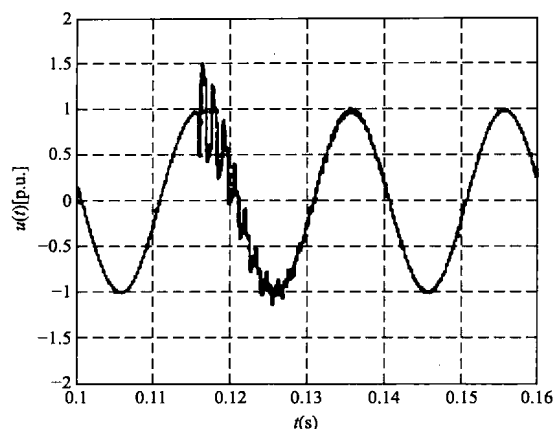


图 1.4 投切电容器组引起的瞬变振荡过电压

六、相位跳变

类似短路等电力系统的变化将引起电压的变动。电压是个复相量，包括幅值和相位角两个特征。有时，电力系统状态的变化引起的电压变动不仅体现在幅值上，还表现在相位角的变化上。相位跳变由瞬时电压过零点的改变来表现。采用相位角信息确定触发时间的电力电子换流器将会受到此类扰动的影响。

1.2.1.2 变化型

变化型电能质量包括波形畸变（谐波和间谐波）、缓慢电压变动、不平衡、电压波动、电网传输信号的电压、系统频率变动、电压陷波和噪声。

一、波形畸变

波形畸变（可作为谐波和间谐波的简称）一般是讨论谐波和间谐波成分，也就是在原始波形上进行傅里叶分析后得到的正弦波形^①。严格来讲，谐波是频率为基波频率的整数倍正弦波形，其中基波频率为系统标称频率（50Hz 或 60Hz）。间谐波是指频率不是基波频率的整数倍的正弦波形。谐波（以及间谐波）频率与基波频率的比值称作谐波（以及间谐波）次数。例如，当基波频率为 50Hz 时，5 次谐波的频率就是 250Hz，1.2 次间谐波的频率就是 60Hz。

作为一个波形畸变的例子，图 1.5 给

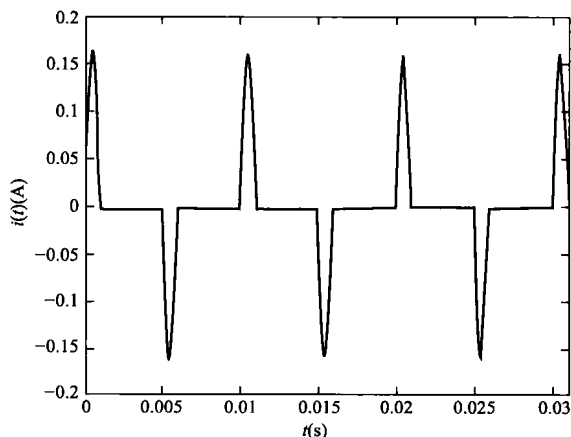


图 1.5 个人电脑汲取的电流波形

① 当一组电容器处于运行状态，另一个邻近的电容器组充能时，已充能的电容器组将未充能的电容器组当作一个低值阻抗，会导致两个电容器组之间的电流瞬变振荡。这样的振荡可能持续数十微秒，由电容器组的容量及其之间的阻尼（电阻损耗）来决定。

② 关于傅里叶分析及其相关问题详见本章 1.3.1 节和第 3 章的 3.2 节。

出了一台个人电脑汲取的电流波形。

波形畸变发生源有铁芯饱和变压器、静止功率换流器，以及其他非线性负荷和时变负荷（如电弧炉等）。

谐波对电力系统元件造成了不希望的后果，例如，感应电动机绕组发热，会加速电动机绝缘老化，降低其使用年限。在三相四线制系统中，三相电流之和是通过中性线回流的，而谐波会引起中性线过负荷。实际上，在中性点处，正序和负序分量的合成为零值，但零序分量是相加的。中性线上的零序分量之和将引起导线过负荷，其后果是折损元件寿命，产生可能的故障风险^①。

变压器和电容器也受到谐波的影响。电容器是受电压波形的影响，其原因为电容器的阻抗与频率成反比，谐波电压在电容器里会产生附加的谐波电流。再者，当电容器满足谐振频率条件、电力系统容抗和感抗组合起来形成一个非常大的阻抗时，也会造成过大的谐波电压降。在此情况下，较小的谐振频率电流也会引起非常高的不希望出现的谐波电压。另外，谐波会降低仪器的测量准确度；许多设备的运行条件取决于精确的电压波形，当出现谐波时，这些设备会出现不正常运行；电灯的调光器和微机控制的负荷也会受到谐波影响。

除了谐波造成的典型影响外，例如过温和寿命降低，间谐波还会产生一些新的问题，如次同步振荡、灯光闪烁，甚至造成电压水平降低。

二、缓慢电压变动

在额定运行条件下，母线电压幅值会在标称电压值附近的较小范围内变动。缓慢电压变动是由负荷需求随时间变动等原因引起的电压幅值的增大或减小的现象，其变化特征以日、周和季度为时间周期。

三、不平衡

不平衡是指多相系统（主要指三相系统）中基波线电压方均根值不相等，和/或顺序的线电压相位角差不等于 $2\pi/3$ 。大型单相负荷，如铁路牵引系统、电弧炉和未换相的架空线等是输电系统不平衡的主要原因。配电系统馈线不平衡、馈线上混合着单相、两相或三相负荷的接入，也会出现不平衡。

电压不平衡会导致电机损耗增大，而且静转矩和转速会降低，会造成转矩脉动或产生听觉噪声。对于电力电子换流器，其触发角是由电压波形过零点得出的，不平衡现象会引起直流侧和交流侧产生非特征谐波。非特征谐波是指半导体换流器在正常运行条件下不会产生的谐波。

图 1.6 所示为配电系统内某母线上的三相不平衡电压波形。

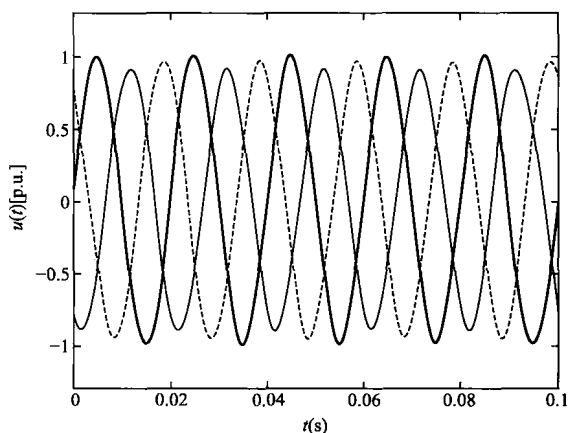


图 1.6 配电系统内某母线上的三相电压不平衡电压波形

^① 在三相不平衡系统中，谐波次数 $h=3、6、9\cdots$ 是零序性谐波； $h=4、7、10\cdots$ 是正序性谐波； $h=2、5、8\cdots$ 是负序性谐波。理论上在不平衡系统中，所有三相谐波电流（电压）都能分解为正序分量、负序分量和零序分量。

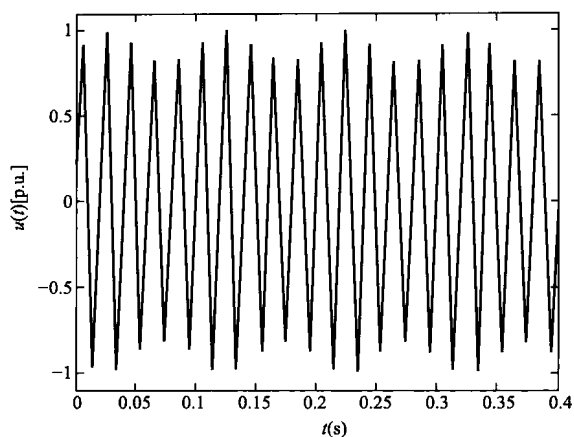


图 1.7 电压波动示例

很显然，多相系统中电流也可能出现不平衡现象。

四、电压波动

电压一系列变动或电压方均根值连续的变化称为电压波动（如图 1.7 所示）。如果电压波动出现在某固有频率范围内，会改变电灯的光照度，从而产生视觉上称作“闪变”的现象。当波动大于某特定阈值时，闪变将会使人非常烦躁，并且这种烦躁会随着波动幅度的变化而快速增长。在特定波动频率下，即使很低幅值的波动也会让人烦恼。

造成严重电压波动的主要原因是工业负荷，尤其是那些大量使用电弧炉、轧钢机和多组电焊机的钢铁企业。在许多情况下，类似矿井绞车等大型波动性电动机负荷也会引起电压波动问题。重复投切型的家用负荷也是潜在的闪变源，如烹饪炉盘、电热淋浴器、加热泵和空调机等，但是由于这类家用负荷在容量和投切频率上有强制法令性的产品设计约束，因此，这类负荷引起的问题得到了抑制。

我们应该注意到，电压波动和间谐波有着内在的关系。如果电压波形上存在间谐波，则波形幅值是波动的；反之，电压波动也会引起间谐波的发生。经验告诉我们，即使只有少量的间谐波也会导致白炽灯和日光灯的闪烁。

除了灯光闪烁之外，电压波动还会使直接接入系统的电动机增速或减速。

五、电网传输信号的电压

许多电力公司专门在供电电压上叠加发送信号，以实现在公用配电系统与用户之间的信息传输。公用配电系统的信号可以分为三类：

- (1) 纹波控制信号。叠加的正弦电压信号频率范围是 0.11~3kHz。
- (2) 电力线载波信号。叠加的正弦电压信号频率范围是 3~148.5kHz。
- (3) 主标记信号。在电压波形的若干选定点上制造的短时间变化（瞬变）信号。

六、系统频率变动

系统频率变动是指偏离系统标称频率 50/60Hz 的频率变动现象。系统频率变动与系统内发电机旋转速度的变动直接相关。由于负荷和发电功率之间的不平衡会造成轻微的频率变动，而这些轻微的频率变动会引起发电机和涡轮机转轴的扭转力矩增大，进而导致转轴的严重损坏。另外，互联系统的解列也会引起工频的轻微变动，这是由于电力系统是一个依赖于同步运行的紧密联系的整体。实际上严重的系统频率变动在现代互联电力系统中是很少出现的。

七、电压陷波

电压陷波是指在每个周波内出现的周期性的瞬变现象，主要是 AC-DC 换流器在切换过程中相间短路导致的结果（如图 1.8 所示）。陷波是周期性的，其特征表现在电压波形的谐波频谱上，且主要是高次谐波。电压陷波引起的主要问题仅限于用户自己的设备上。实际

上,不由电力公司控制的陷波高频成分被供电接入点的电力变压器过滤了。描述电压陷波的参数是下陷深度、持续时间以及正弦波形上的缺口起始点。

八、噪声

在 IEEE 1159—1995 中,噪声是一种附加的电能质量扰动,它叠加在系统相线的电压或电流波形上,或出现在中心线和信号线上、带宽小于 200kHz 的非期望的电信号。本质上,噪声是由不希望出现的畸变量组成的,但又不能将其归类于波形畸变或瞬变。电力系统的接地不恰当往往会加重噪声问题。

1.2.2 电能质量扰动和电磁兼容

研究运行在相同环境下的负荷干扰发射与设备性能之间的相互作用属于电磁兼容范畴。

电磁兼容的定义是,一个设备或系统在其所属的电磁环境下能够正常运行,且不对其他设备造成不能忍受的电磁干扰的能力^[15]。电磁兼容的原理可用运行在相同环境下的两个设备来诠释:一个设备产生扰动(干扰负荷)和另一个设备受到扰动的影响(敏感负荷);如果敏感负荷的运行性能因受干扰负荷发射的扰动而降低时,则出现了电磁兼容问题。

要达到相互电磁兼容,既要限制干扰负荷向电磁环境发射的干扰水平,使其不降低运行在相同环境下的其他设备的性能,同时也需要运行在电磁环境中的敏感设备对现有的所有干扰水平有足够的耐受能力^[46]。

电磁干扰发射水平是指允许一个设备产生电磁干扰量的最大值。

电磁干扰免疫水平是指一个设备能够承受电磁干扰的最低水平。考虑到设备对扰动的不同敏感性,引入了设备耐受水平的概率密度函数(pdf)。对于所施加的干扰,pdf 曲线可以给出该设备非正常工作或损坏的概率值。实际上,鉴于设备耐受水平的 pdf 曲线和允许设备的敏感性小概率(典型为 5%)水平,往往选择该设备的耐受水平等于干扰值^①。

为了协调干扰性负荷的扰动发射和运行在同一环境下的敏感负荷的耐受能力,则引入电

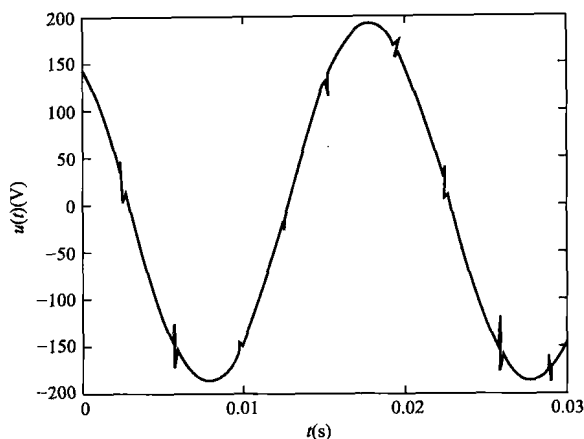


图 1.8 换流器运行造成的电压陷波现象

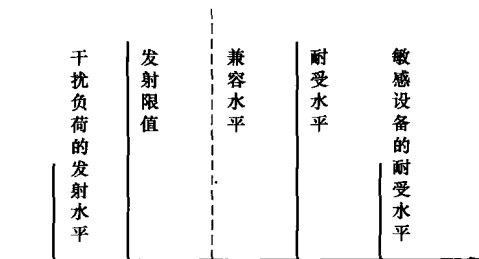


图 1.9 电磁兼容水平与限值

磁兼容水平的概念。为了确保整个系统的电磁兼容,耐受水平必须等于或高于兼容水平,发射水平必须等于或小于兼容水平(如图 1.9 所示)。利用电磁干扰在时间上和空间上的分布关系,兼容水平一般取全系统不超过 95% 概率大值。

结合兼容水平的概念,一些标准和导则还给出了其他干扰水平的目标值,这些目标值对于整个电气系统在规划水平和电压特性等方面实现电磁兼容是非常有用的。

① 敏感性是指一台装置、一台设备或一个系统不能耐受电磁干扰的能力。它表示设备或系统缺乏耐受能力。

规划水平可用于以规划为目的,评价所有用户对供电系统的影响水平。规划水平是由电力公司规定的,它作为电力部门内部的质量控制目标;另外,规划水平还可用来定义准备接入系统的大型负荷或设备的发射限值。尽管规划水平主要用于评估大型负荷和设备,但其他主要扰动源也需要考虑,由低压供电的大量低功率设备也值得注意。为了确保电磁兼容,往往选择规划水平等于或低于兼容水平。

电压特性是指在正常运行条件下配电系统用户供电终端的电压主要特性。电压特性是覆盖电力系统任一节点的电压质量承诺限值,因此它等于或稍大于兼容水平。

1.3 电能质量扰动指标和目标值

兼容水平、规划水平、电压特性以及发射限值等在各种标准、导则和指南中用一个或多个参数表示。实际上,为了更加紧凑和实用,电能质量指标代表了用于描述电能质量扰动特性的最快而又最有效的方法,而且该指标要便于将复杂的时域和频域的波形现象精简为单一数值。许多国际性标准、导则和指南,以及一些在刊物上发表的文献,一般都建议用指标来表示电能质量的特性,尤其是电压质量和电流质量。

在本节中采用的一种电能质量指标的重要分类,是基于系统分块和归类的指标。我们尤其将监测点指标和系统指标区别开来,监测点指标是面向公共连接点的单一用户的,系统指标是面向配电系统的局域网或更广泛的整个供电系统的。

当处理监测点指标时,需要收集监测点在时间轴上的不同观测结果。当处理系统指标时,需要收集不同监测点的数据,通常,采取研究系统中有代表性的一组监测点的信息进行观察。当考虑到没有被监测的站点和不同监测点在系统中的各自重要性时,需要引入加权因子。例如,加权因子可以是基于变电站/用户的数量,或者是基于每个监测点的额定功率。显然,系统指标没有给出适用于每个用户的电能质量的详尽描述,但是正如在 1.1 节中所说明的,系统指标仅作为一种度量标准,在新的开放的市场框架下会引起特别的关注。

监测点指标和系统指标需要与目标值进行对比。这些目标值可在电力供应商和电力用户之间的双边协议中作出规定,它可以作为网络运营商自愿接受的质量目标,也可以由监管机构来设定。一般而言,在标准或推荐导则中要给出监测点指标的目标值。

本节概括性地给出了以下主要类别的传统监测点指标和系统指标及其目标值^[7~56]。

- (1) 波形畸变。
- (2) 缓慢电压变动。
- (3) 不平衡。
- (4) 电压波动。
- (5) 电网传输的信号电压。
- (6) 电压暂降。
- (7) 暂时过电压。
- (8) 快速电压变动。

对于相位跳变或陷波,本节没有给出类似的分析,这是因为就我们所知,到目前为止还没有这两种电能质量扰动类型定量的和可令人接受的监测点指标或系统指标。对于电压暂升,可用电压暂降的一些监测点指标和系统指标做适当修正也是适用的,因此它包含在本节