

apqi ASIA
POWER
QUALITY
INITIATIVE

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代电能质量技术丛书

现代电能质量测量技术

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
陶顺 徐永海 齐林海 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电能质量技术丛书

现代电能质量测量技术

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
陶顺 徐永海 齐林海 编著



内 容 提 要

本书主要介绍现代电能质量测量方法和电能质量监测系统的相关内容。其中现代电能质量测量方法以介绍国际标准 IEC 61000-4-30 的内容为主, 辅以其他比较受公众关注的测量技术; 电能质量监测系统的内容包括其构成与功能、数据格式与信息模型等。

本书适合从事电力工程和电力系统分析, 电能质量测试与分析、治理、标准制定的技术人员和企业管理者使用, 也可作为高等院校师生的参考书和电力职业院校的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电能质量测量技术 / 陶顺, 徐永海, 齐林海编著; 亚洲电能质量联盟中国合作组组编. —北京: 中国电力出版社, 2015.12

(现代电能质量技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8065-3

I. ①现… II. ①陶… ②徐… ③齐… ④亚… III. ①电能测量-测量技术 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 163403 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 16.5 印张 216 千字

印数 0001—3000 册 定价 68.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
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



丛书前言

电能质量问题近年来受到更多的关注。究其缘由，想来有三：第一，大量的非线性和冲击性负荷的广泛应用，对供电系统电能质量造成了严重的污染，恶化了电气设备的电磁环境；第二，以微电子控制技术为核心的高度自动化和智能化设备极其敏感，抗扰度能力不足，对电能质量的要求越来越高；第三，伴随行业的发展，相关组织和单位举办了各类交流会议以及展览，吸引大量媒体关注报道电能质量。在这样的大背景下，电能质量问题从冷门慢慢热了起来。

行业的健康发展，离不开理论的指导和技术经验的交流分享。但是，国内关于电能质量的书籍不是很多，系列丛书更是没有。基于这样的现状，亚洲电能质量联盟中国合作组（简称合作组）发起编写“现代电能质量技术丛书”，这个倡议当时获得了业内很多专家学者的支持。大家共同推选了林海雪教授担当丛书的牵头人，中国电力出版社也欣然应允出版这套丛书，并作为重点图书报送国家新闻出版总署（现为国家新闻出版广电总局），获批列入“‘十二五’国家重点图书出版规划项目”。原计划两年内完成的这套丛书，因多位作者身体抱恙，直至今天才最终陆续付梓，真是好事多磨。

姗姗来迟的这套丛书，从不同的维度介绍了电能质量，以及相应的

测量与控制技术。以基本理论与方法为主的，有《电力系统中电磁现象和电能质量标准》和《电能质量数学分析方法》；以介绍现代测量与实用控制为主的，有《现代电能质量测量技术》和《电能质量实用控制技术》；还有以热点或新问题为主的，有《电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术》、《分布式电源接入电网的电能质量》、《电网中电压暂降和短时间中断》、《电力系统直流干扰》及《交流配电系统的接地方式及过电压保护》。

这套丛书整体适合从事电能质量工作的工程师和管理人员作为理论和实践的指引，也适宜对于电能质量问题感兴趣的相关人士阅读，从不同的侧面了解电能质量问题及其影响。希望我们编著的这套丛书可以更好地促进电能质量知识及技能的传播，使读者有所收获，这也是合作组与作者最希望达到的效果。另外，丛书也将成为由合作组作为主办方之一，并由国家人力资源和社会保障部教育培训中心考核认证的“高级电能质量工程师”培训的指定参考书。

最后特别感谢美国国际铜专业协会对于亚洲电能质量联盟中国合作组编著丛书的大力支持，感谢牵头人林海雪教授多年来的辛勤工作，感谢所有丛书作者的认真与执著，感谢编辑们的耐心与信任，感谢丛书审稿专家们提出的建设性的意见和建议。亚洲电能质量联盟将继续努力耕耘，为读者带来更多的接地气的电能质量专著。

亚洲电能质量联盟秘书长 黄炜



本书前言

在当代电力系统中，电能质量干扰源和敏感负荷的比重都在增加，劣质电能的产生及其影响日益严重，电力扰动给电网和受影响的电力用户带来了巨大的经济损失。在分析和解决电能质量问题过程中，当解决电力企业和电力用户的相关争议或执行特殊供电质量要求协议时，电能质量测量是基础，而统一的测量方法更是前提。

在早期的电能质量测量装置中，测量方法没有统一，从而难以实现不同测量结果的对比分析。国际电工委员会在 2003 年颁布了 IEC 61000-4-30 *Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 4-30: Testing and measurement techniques-Power quality measurement methods*，逐步引导一个国际化的电能质量测量标准。随着测量技术的发展和电能质量参数测量认识的深入，该组织于 2008 年重新颁布了该标准的第二版；中国国家标准化管理委员会以 GB/T 17626.30—2012《电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法》等同采用了该标准。作为学习、培训类教材，本书详细地介绍了该标准推荐的电能质量测量方法，并补充一些其他比较受公众关注的测量技术。其中第 1 章和第 2 章分别为电能质量测量概论和测量基础，第 3~9 章分别是频率偏差、电压偏差、谐波和间谐波、电压波动与闪变、三相电压不平衡、电压暂降与短时中断以及

过电压的测量方法。

由于电能质量干扰源产生的随机性，类似电压暂降与短时中断等电能质量扰动需要长期在线监测与捕捉，促使电能质量在线监测技术与监测系统逐渐发展起来。本书也在第 10、11 章详细介绍了电能质量监测系统的组成、框架与功能，以及相关的标准数据交换格式等。

本书在编写过程中得到了肖湘宁教授的悉心指导，以及马素霞、林天华、苏斌、吴玫蓉、林永朋、李科、魏天彩、温剑锋、陈聪和陈罡等的帮助，在此深表感谢。

由于编者知识水平的不足，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 1 月

目 录

丛书前言

本书前言

1	电能质量测量概论	1
1.1	电能质量现象	2
1.2	电能质量测量	19
1.3	电能质量评估	25
2	电能质量测量基础	31
2.1	测量及测量误差	31
2.2	测量不确定度	37
2.3	数字测量方法	42
2.4	测量窗与测量时标	43
3	频率偏差的测量	49
3.1	频率偏差的概念与定义	49
3.2	频率偏差的评价指标	50
3.3	频率偏差测量的基本方法	52
3.4	频率偏差的评估	56
4	电压偏差的测量	60
4.1	电压偏差的概念与定义	60
4.2	电压偏差的测量方法	60

4.3	电网对电压合格率的监测	68
5	谐波和间谐波的测量	72
5.1	傅里叶变换与波形的数学分析方法	72
5.2	谐波和间谐波的定義与相关术语	81
5.3	基于 IEC 61000-4-7 的谐波与间谐波测量方法	86
5.4	基于 IEC 61000-4-30 的谐波与间谐波测量方法	102
5.5	国家标准限值	105
5.6	非正弦电路的功率和功率因数	106
5.7	实例分析	107
6	电压波动与闪变的测量	112
6.1	电压波动与闪变的定义与概念	112
6.2	电压波动	120
6.3	闪变测量方法	126
6.4	电压波动与闪变预测方法	139
7	三相电压不平衡的测量	144
7.1	三相对称与三相不平衡的概念	144
7.2	三相不平衡度的计算公式	145
7.3	基于 IEC 61000-4-30 的三相不平衡度测量方法	147
7.4	基于国家标准的三相不平衡测量方法	149
7.5	测量实例分析	150
8	电压暂降与短时间中断的测量	153
8.1	电压暂降与短时间中断的概念	153
8.2	基于小波变换的检测方法	160
8.3	基于 IEC 61000-4-30 的测量方法	163
8.4	其他电压暂降检测方法	165
8.5	电压暂降与短时间中断的统计与评估	172

9	暂时过电压和瞬态过电压测量	176
9.1	暂时过电压和瞬态过电压的概念和定义	176
9.2	暂时过电压和瞬态过电压的基本测量方法	180
10	电能质量监测系统	188
10.1	电能质量监测系统概述	188
10.2	电能质量监测系统功能	201
10.3	电能质量监测装置	210
10.4	电能质量数据中心	218
10.5	电能质量监测系统发展趋势	227
11	电能质量监测系统数据格式与信息模型	231
11.1	PQDIF 数据格式简介	231
11.2	IEC 61850/61970 标准简介	240
	参考文献	250

现代社会中,电能是一种使用最为广泛的能源,其应用程度已成为一个国家发展水平的主要标志之一。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,又是一种由电力企业向电力用户提供,并由供、用双方共同保证质量的特殊产品。在满足工业生产、社会和人民生活对电能需求量的同时,提高对供应或使用电能的质量要求是一个国家国民经济发展、科技水平提高、社会文明程度进步的重要表现,是信息时代和信息社会发展的必然结果,是增强用电效率、节能降耗、改善电气环境、提高国民经济的总体效益以及实施可持续发展战略的技术保证。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,检测、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^[1]。

在我国当代电力系统,随着规模化与分布式新能源、电动汽车充电站、直流输电等新技术越来越多的应用,电网结构正在或将要发生很大的变化;同时,各种非线性与敏感性用电设备在电网中也呈增加趋势。电网结构与用电设备的变化,既带来了新的电能质量扰动问题,又对电能质量的提高提出了新的要求;随着社会进步,广大电力用电的高质量用电需求意识也在不断提升。在此情况下,迫切需要深入了解和认知可能对电网运行、生产、生活带来较大影响的电能质量扰动,这就对电能质量的监测提出了较高要求;只有正确恰当地进行了各种电能质量扰动指标的测量,掌握真实、客观的数据,才能更好地分析劣质电能质量对供用电系统运行的危害与影响,对社会经济的作用和影响,进而采取有效措施提升电能质量水平,

保障优质的供用电环境。因此，进行电能质量扰动的正确测量，已成为当代社会发展的重要需求，应引起包括电网运行部门、电能质量监测设备制造商、监管部门以及广大电力用电的高度重视。

1.1 电能质量现象

1.1.1 电能质量的定义

从普遍意义上讲，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，人们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。长期以来，电能质量概念和电力供应可靠性几乎是等同的。电力企业可能把电能质量定义为电压与频率的合格率以及连续供电的年小时数，并用统计数字（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，在对于供电中断的持续时间等问题上供受双方意见就不一致，对这种故障事件应当归于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将电能质量定义为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（系统与负荷）双方的相互作用和影响，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和定义方法是：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]：

（1）电压质量。给出实际电压与理想电压之间的偏差，以反映供电企业向用户分配的电能是否合格。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。技术含义指电压质量和供电可靠性；非技术含义指服务质量，它包括供电企业对用户投诉与抱怨的响应速度和服务价格的透明度等。

(4) 用电质量。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双方的相互作用与影响以及责任和义务。虽然其含义很工程化，但对我们理解和认识电能质量是很有实用价值的。

目前，国内外虽然对使用电能质量这一术语及其内涵基本达成了共识，但是对电能质量确切的定义尚未形成一致的意见。使用比较广泛的几个定义如下^[1]：

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并连续供电。

应当看到，电能质量问题终究是由电力用户的生产与生活需求驱动的，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、短时或暂态过电压、波形畸变、电压暂降与短时中断以及供电连续性等。

1.1.2 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并采取针对性的解决办法，将电能质量进行分类并给出相应的定义是很重要的。

1.1.2.1 变化型和事件型分类

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为两类。

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大小、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 1-1、图 1-2 所示为供电电压幅值日变化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。

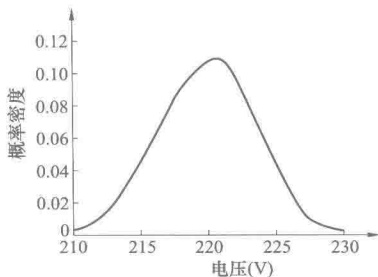


图 1-1 电压幅值日变化的概率密度函数曲线

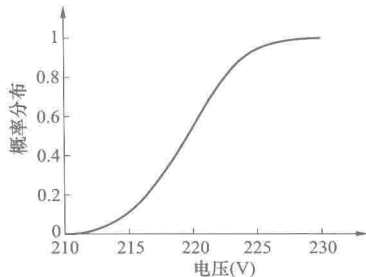


图 1-2 电压幅值日变化的概率分布函数曲线

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与电压短时间中断、暂态过电压、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、事件持续时间的长短以及发生的频次等来描述，并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时便开始记录，待事件结束时停止记录。

1.1.2.2 稳态型和暂态型分类

按照电能质量扰动的时间特性来分，电力系统中各种扰动引起的电能质量问题主要可分为稳态和暂态两大类。

(1) 稳态电能质量扰动。稳态电能质量扰动主要包括频率偏差、电压偏差、三相不平衡、闪变、波形畸变以及噪声等。

(2) 暂态电能质量扰动。暂态电能质量问题可分为短时电压变动和电磁暂态两大类。短时电压变动包括暂态过电压、电压暂降、电压暂升以及供电短时间中断问题。电磁暂态包括脉冲暂态和振荡暂态。

1.1.2.3 IEC 分类方法

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，引出了广义的电磁干扰的基本现象分类，如表 1-1 所示。

表 1-1 IEC 关于引起电磁扰动的基本现象分类

分类	范 例	分类	范 例
低频传导现象	谐波、间谐波	低频辐射现象	电场
			磁场
	信号系统（电力线载波）	高频辐射现象	电场
	电压波动		磁场
	电压暂降（骤降）和中断		电磁场
	电压不平衡		瞬变
工频变化	连续波		

续表

分类	范 例	分类	范 例
低频传导现象	感应低频电压	静电放电现象 (ESD)	—
	交流电网中的直流分量	核电磁脉冲 (NEMP)	—
高频传导现象	感应连续波电压或电流		
	单方向瞬变		
	振荡性瞬变		

1.1.2.4 IEEE 分类方法

表 1-2 给出了 IEEE 关于电能质量领域电磁现象的具体分类方法。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：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：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。

表 1-2 IEEE 电力系统电磁现象的特性参数及分类

类 别		典型频谱	典型持续时间	典型参数	
瞬变现象	冲击脉冲	纳秒级	5ns 上升	<50ns	
		微秒级	1 μ s 上升	50ns~1ms	
		毫秒级	0.1ms 上升	>1ms	
	振荡	低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4p.u.
		中频	5~500kHz	20 μ s	0~8p.u.
		高频	0.5~5MHz	5 μ s	0~4p.u.
短时间方均根值变动	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.

续表

类别		典型频谱	典型持续时间	典型参数
短时间方均根值变动	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.
长时间方均根值变动	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.
	电流过载		>1min	
不平衡	电压不平衡		稳态	0.5%~2%
	电流不平衡		稳态	10%~30%
波形畸变	直流偏置		稳态	0~0.1%
	谐波	0~9kHz	稳态	0~20%
	间谐波	0~9kHz	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% (0.2~2) P _{st}
频率偏差			<10s	±10Hz

电能质量的分类不仅为电能质量的测量和分析提供了基础,同时也促进了电能质量标准的制定和实施,进而为测量数据提供统一的、规范的、科学的平台。但需要指出的是,迄今为止对电能质量的分类仍存在着由于定义不同而引起的类别区分界线模糊和由于分类方法不同而产生的技术名词不统一等问题。

1.1.3 电能质量现象描述

1.1.3.1 瞬变现象

在电力系统运行分析中早已使用了“瞬变”这一名词。它表示电力系统运行中一种并不希望而事实上又瞬时出现的事件。由于RLC电路的存在,在大多数电力工程技术人员的概念里瞬变现象自然是指阻尼振