

# 现代电能质量监测、 分析与控制技术

翁国庆 等编著

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 现代电能质量监测、分析与控制技术

翁国庆 黄飞腾 谢路耀 张有兵 编著



机械工业出版社

本书较全面地介绍了电能质量监测、分析和控制相关的理论、方法、技术以及应用和发展。本书主要内容包括电能质量指标及其检测方法、电能质量分析的先进方法、电能质量综合评价及应用、电能质量扰动源的定位诊断、电能质量监测设备和系统以及现代电能质量治理与控制技术等。各主要章节均结合仿真案例、设计方案和实际应用进行了详细阐述。

本书适合电气工程、自动化及其他相关专业的高年级本科生和研究生阅读,也可供从事电气工程领域,特别是电能质量问题研究的工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代电能质量监测、分析与控制技术 / 翁国庆等编著.

—北京:机械工业出版社,2016.12

ISBN 978-7-111-55639-8

I. ①现… II. ①翁… III. ①电能—质量—研究  
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 302743 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:朱 历 责任编辑:陈大立 版式设计:付海明

责任校对:杨得润 封面设计:付海明 责任印制:陈大立

北京宝昌彩色印刷有限公司

2016 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15 印张·323 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55639-8

0 001—1 000 册

定价:30.00 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

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 前 言

随着经济和社会的迅猛发展、工业自动化水平的快速提高及电力市场化进程的不断推进，电能质量问题变得越来越突出，受到越来越多的关注。与此同时，信息技术、电力电子技术、智能计算与智能控制技术的飞速发展，各种先进的现代电能质量监测、分析和控制技术也蓬勃发展。电能质量在实现了在线监测、实时分析的基础上，正朝着网络化、信息化、标准化和智能化的方向发展完善。

本书内容丰富，涵盖了电能质量重要指标的概念以及常用的传统、现代检测和分析方法以及综合评价、扰动源自动定位等智能分析和诊断技术，还包括经典的现代治理和控制技术。各主要章节安排了典型的开发或应用示例，以利于读者更好地理解 and 参考应用。通过本书的学习，读者可以了解现代电能质量监测、分析和控制的主要内容、原理、技术和方法，具备从事电能质量相关研究和应用的基本知识和能力。

全书共 7 章，主要内容包括：电能质量概论、电能质量指标及其检测、电能质量分析的先进方法、电能质量综合评价及应用、电能质量扰动源的定位诊断、电能质量监测设备和系统以及电能质量治理与控制。本书的第 1 章、第 4 章和第 5 章由翁国庆编写，第 2 章、第 6 章由黄飞腾编写，第 3 章由翁国庆和张有兵共同编写，第 7 章由谢路耀编写，最后由翁国庆统稿。

本书得到了国家自然科学基金、浙江省“电力电子与电力传动”省重点学科以及省、校专业建设项目的共同资助，在此深表感谢！在本书的撰写过程中，得到王晶副教授、硕士生王强的大力支持和协助，同时有许多成果来自团队研究生的研究工作，在此谨致谢忱！由于篇幅限制，参考文献中主要收录了各部分具有代表性的中文书籍、论文以及作者近年发表的相关论文。

由于电能质量相关领域正快速发展中，且作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，尚祈广大读者不吝指正。

翁国庆

2016 年 8 月于杭州

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章</b>	<b>电能质量概论</b> .....	1
1.1	电能质量的定义 .....	1
1.2	电能质量特点和研究意义 .....	2
1.3	电能质量的评价指标 .....	2
1.4	电能质量扰动分类 .....	4
1.5	电能质量标准 .....	5
1.6	电能质量监测意义、现状和趋势 .....	7
1.7	电能质量的管理和控制 .....	10
<b>第 2 章</b>	<b>电能质量指标及其检测</b> .....	12
2.1	概述 .....	12
2.2	频率偏差 .....	12
2.2.1	频率偏差的相关概念 .....	12
2.2.2	频率偏差产生的原因及危害 .....	13
2.2.3	频率偏差检测 .....	15
2.3	电压偏差 .....	18
2.3.1	电压偏差的相关概念 .....	18
2.3.2	电压偏差产生的原因及危害 .....	18
2.3.3	电压偏差检测 .....	19
2.4	波形畸变与谐波 .....	21
2.4.1	波形畸变的相关概念 .....	21
2.4.2	谐波产生的原因及危害 .....	23
2.4.3	波形畸变与谐波的检测 .....	23
2.5	三相不平衡 .....	25
2.5.1	三相不平衡的相关概念 .....	25
2.5.2	三相不平衡产生的原因及危害 .....	27
2.5.3	三相不平衡的检测 .....	28
2.6	电压波动和闪变 .....	32
2.6.1	电压波动和闪变的相关概念 .....	32
2.6.2	电压波动和闪变产生的原因及危害 .....	35

2.6.3	电压波动和闪变的检测	36
2.7	暂态电能质量扰动	40
2.7.1	暂态电能质量扰动的相关概念	40
2.7.2	暂态电能质量扰动产生的原因及危害	42
2.7.3	暂态电能质量扰动的检测	43
2.8	供电中断与可靠性	46
2.8.1	供电中断与可靠性的相关概念	46
2.8.2	供电可靠性的评价和计算	48
<b>第 3 章</b>	<b>电能质量分析的先进方法</b>	<b>51</b>
3.1	概述	51
3.2	先进数学变换理论	52
3.2.1	傅里叶变换法	52
3.2.2	小波变换	56
3.2.3	广义 S 变换	59
3.2.4	Prony 法	61
3.3	人工智能法	65
3.3.1	神经网络	65
3.3.2	支持向量机	68
3.4	应用算例	71
3.4.1	基于小波变换的 PQD 时间定位	71
3.4.2	基于 Prony 法的电压闪变检测	74
3.4.3	基于 GST 及 SVM 的动态电能质量 (DPQ) 智能辨识	79
3.4.4	基于小波熵和自组织神经网络的电压暂降源智能辨识	86
<b>第 4 章</b>	<b>电能质量综合评价及应用</b>	<b>92</b>
4.1	概述	92
4.2	综合评价理论	93
4.3	基于可拓理论的电能质量综合评价体系	95
4.3.1	物元分析法和可拓学理论	95
4.3.2	层次分析法	96
4.3.3	基于可拓理论的质量综合评价步骤	98
4.4	电能质量多指标体系及其等级划分	101
4.4.1	多指标体系构建	101
4.4.2	等级界线的确定	102
4.5	指标权重的确定	106
4.5.1	基于改进型 AHP 的主观赋权法	106



4.5.2	基于关联矩阵的时变客观赋权法 .....	110
4.5.3	基于综合权重的电能质量可拓综合评价 .....	112
4.6	电能质量综合评价示例 .....	112
<b>第 5 章</b>	<b>电能质量扰动源的定位诊断 .....</b>	<b>120</b>
5.1	概述 .....	120
5.2	电能质量扰动源方向判定 .....	121
5.2.1	扰动源方向判别意义及原理 .....	121
5.2.2	常用扰动源方向判别方法 .....	122
5.3	电能质量扰动源的自动定位 .....	125
5.3.1	自动定位算法基本流程 .....	125
5.3.2	系统拓扑及 PQM 布置信息表征 .....	126
5.3.3	基于矩阵算法的 II 级定位 .....	129
5.3.4	基于虚拟 PQM 的事件源 III 级精确定位 .....	133
5.3.5	基于链表的扰动馈线子区域快速预判 .....	135
5.3.6	算例分析 .....	136
5.4	计及方向信度的扰动源容错性定位 .....	141
5.4.1	PQM 方向误判分析 .....	141
5.4.2	计及监测信度的扰动源容错性自动定位 .....	142
5.4.3	算例分析 .....	145
<b>第 6 章</b>	<b>电能质量监测设备和系统 .....</b>	<b>149</b>
6.1	概述 .....	149
6.2	电能质量监测设备 .....	149
6.2.1	电能质量监测设备的基本要求 .....	149
6.2.2	常见电能质量监测设备 .....	151
6.2.3	电能质量监测装置设计实例 .....	158
6.3	网络化电能质量监测系统 .....	170
6.3.1	网络化电能质量监测系统的意义 .....	170
6.3.2	网络化 PQMS 的基本结构 .....	171
6.3.3	网络化 PQMS 的主要功能 .....	173
6.3.4	监测点的选择与优化 .....	176
6.4	电能质量数据格式、压缩和共享 .....	180
6.4.1	PQDIF 规范 .....	180
6.4.2	电能质量数据压缩 .....	181
6.4.3	电能质量数据共享 .....	183
6.5	浙江省电能质量在线监测网实例 .....	186

第 7 章 电能质量治理与控制 .....	191
7.1 概述 .....	191
7.2 电能质量治理设备 .....	192
7.2.1 无源滤波器 .....	192
7.2.2 有源滤波器 .....	197
7.2.3 动态电压恢复器 .....	202
7.2.4 电能质量统一控制器 .....	207
7.3 分布式发电系统中的电能质量治理 .....	209
7.3.1 DG 并网对电能质量的影响 .....	209
7.3.2 含 DG 微电网的电能质量特点 .....	211
7.3.3 DG 系统中电能质量治理方法 .....	212
7.4 电能质量治理装置开发与应用 .....	215
7.4.1 三相三线制电力 APF 样机的研制 .....	215
7.4.2 浙江省湖州市某区域电网的电能质量治理实例 .....	222
参考文献 .....	227



# 第 1 章 电能质量概论

## 1.1 电能质量的定义

电能是一种具有广泛适用性的能源，其应用程度的高低是一个国家发展水平和综合国力的反映。电能质量描述的是通过公用电网供给用户端的交流电能的品质。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、科技水平提高的表现，是信息时代和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、提高国民经济总体效益以及工业生产可持续发展的技术保证。

什么是电能质量？迄今为止，用什么样的词语来描述供电与用电（系统与负荷）双方的相互作用和影响还没有完全统一，人们还不能给出一个准确统一的定义。尽管如此，大多数专家认为，电能质量的定义应理解为：导致用户电力设备不能正常工作的电压、电流或频率偏差，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。

围绕电能质量的含义，从不同角度理解通常包括以下几个方面：

(1) 电压质量。指实际电压与理想电压的偏差，反映供电企业向用户供应的电能是否合格。这个定义包括大多数（但不包括频率造成的）电能质量问题，以及用电设备对电网电能质量的影响和污染。

(2) 电流质量。为提高电能传输效率，电力用户除了对交流电源有恒定频率、正弦波形要求外，还要求能尽量保持电流波形与供电电压的同相位，以保证高功率因数运行。

(3) 供电质量。包括技术含义和非技术含义两部分：技术含义是指电压质量和供电可靠性；非技术含义是指服务质量，包括供电部门对用户投诉的反应速度以及电价组成的合理性、透明性。

(4) 用电质量。包括电流质量，以及反映供用电双方相互作用和影响中的用电方的权利、责任和义务等非技术含义。

美国电气电子工程师学会（IEEE）标准化协调委员会给出的电能质量技术定义：合格电能质量的概念，是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统是均适合于该设备正常工作的，并正式采用“power quality（电能质量）”这一术语。但是国际电工委员会（IEC）并没有采用这一术语，而是提出了使用“EMC（电磁

兼容)”术语。不过，采用“power quality”这一术语来描述供电与用电双方的相互作用和影响已经普遍得到接受，统一到该术语已是一种基本趋势。

## 1.2 电能质量特点和研究意义

电能作为一种特殊的产品，其生产、输送和消耗的过程均独具特点。因此，与一般产品质量相比，电能质量具有如下特点：

- 电能质量的动态性。
- 电能质量的相关性。
- 电能质量的传播性。
- 电能质量的潜在性。
- 电能质量的复杂性。
- 电能质量的整体性。

随着经济和社会的迅猛发展、工业自动化水平的快速提高及电力市场化进程的不断推进，电能质量问题变得越来越突出，受到越来越多的关注：

(1) 随着大规模电力电子装置（节能装置、变频设备等）、大功率的电力拖动设备和电气化快速交通工具的大量使用等，电力负荷组成中非线性负荷和冲击性负荷的比例大大增加，电网中被注入大量的非正弦波形电流，从而造成电网的电压、电流波形畸变严重。

(2) 随着工业自动化水平提高，计算机、微处理器等精密电子设备的普及应用，系统中敏感负荷的比重不断增加，对电能质量的要求也更加苛刻。

(3) 电力行业的深入改革和电力市场化进程的不断推进，电能将作为一种特殊的商品走进市场，建立基于电力质量的价格体系已成为电力发展趋势；同时，人们对电能质量问题引起损失的责任确定提出了强烈的诉求。

(4) 分布式发电（Distributed Generation, DG）系统得到了广泛的推广和应用，对其电能质量进行有效考察，是判断可否允许其并网运行的技术准入条件之一。

(5) 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。一方面，这必将大大促进设备制造厂商提高其生产设备对电力系统的兼容性；另一方面，进一步促进供电管理部门加强对电能质量的技术监督和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。

## 1.3 电能质量的评价指标

电能质量是一个综合性概念，受很多因素影响。现代电能质量技术性评价指标主要有：

(1) 供电可靠性 (power supply reliability)。是指供电系统持续供电的能力, 可用如下一系列指标加以衡量——供电可靠率、用户平均停电时间、用户平均停电次数和系统停电等效小时数等。

(2) 频率偏差 (frequency deviation)。系统电压或电流对额定频率的偏离。

(3) 电压偏差 (voltage deviation)。电压缓慢变化时, 实际电压与系统标称电压之差, 一般以百分数表示。

(4) 电压波动 (voltage fluctuations) 与闪变 (flicker)。电压波动是指电压包络线有规则的变化, 或是电压幅值通常不超过 0.9~1.1 pu 范围内的一系列电压随机变化; 闪变是指负荷电流的大小呈现快速变化时可能引起电压的变动, 来自电压波动对照明的视觉影响。

(5) 谐波 (harmonics)。含有工频基波整倍数频率的正弦波电压或电流。

(6) 间谐波 (interharmonics)。含有工频基波非整倍数频率的电压或电流周期性分量。

(7) 三相不平衡度 (three-phase unbalance factor)。指与三相电压 (或电流) 的平均值的最大偏差, 并且用该偏差与平均值的百分比表示; 也经常可利用对称分量法来定义, 即用负序或零序分量与正序分量的百分比加以衡量。

(8) 短时电压中断 (interruption): 持续时间 < 1 min 的单相或多相完全失去电压 (小于 0.1 pu) 的电压短期变动。

(9) 电压暂降 (sags)。工频电压的方均根值下降到 0.1~0.9 pu 范围内、持续时间为 0.5 个工频周期至 1 min 的电压短期下降。

(10) 电压暂升 (swells)。工频电压的方均根值上升到 1.1~1.8 pu 范围内、持续时间为 0.5 个工频周期至 1 min 的电压短期上升。

(11) 过电压 (over voltages)。电压幅值 > 额定电压 (通常在 1.1~1.2 pu 之间) 且持续时间 > 1 min 的长期电压扰动。

(12) 欠电压 (under voltages)。电压幅值 < 额定电压 (通常在 0.8~0.9 pu 之间) 且持续时间 > 1 min 的长期电压扰动。

(13) 电压瞬变 (transients)。在两个连续稳态电压之间的一种持续时间极短的数量变化现象。按照电压波形的不同又分为两类: 电压瞬时脉冲 (impulsive transient): 加在稳态电压上的任一单方向变动的电压非工频分量; 电压瞬时振荡 (oscillatory transient): 叠加在稳态电压上的同时包括两个方向变动的电压非工频分量。

需要说明的是, 上述 13 项指标并非电能质量所有技术性评价指标的全部项, 且随着社会需求和电力工业本身的发展, 电能质量评价指标可能将会包含越来越多的内涵。

## 1.4 电能质量扰动分类

为了能够系统地分析和研究电能质量现象,实现对其有效的分选识别,进而找出各种电能质量现象对应的原因以及针对性的解决措施,可以根据不同的原则,对电能质量扰动事件进行分类。

(1) 按照电能质量扰动变化的连续性和事件的突发性特征,可以分为变化型电能质量扰动和事件型电能质量扰动。

变化型电能质量扰动,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、频率和相位差等在时间轴上的任一时刻总是在发生着小的变化。这类现象包括电压幅值变化、频率变化、电压和电流间的相位变化、电压不平衡、电压波动、电压和电流畸变以及电压缺口等。

事件型电能质量扰动,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。这类现象包括电压暂降、电压短时间中断、欠电压、瞬态过电压以及相位跳变等。

(2) 按照电能质量扰动的时特性,可以分为稳态和暂态两大类。

稳态电能质量扰动,主要包括频率偏差以及波形畸变特征问题,如电压偏差、三相不平衡、闪变以及波形畸变等。

暂态电能质量扰动,通常是以频谱和暂态持续时间为特征,又可以细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、电压骤降、电压骤升以及供电瞬时中断;电磁暂态包括脉冲暂态和振荡暂态。

(3) IEEE 针对引起电能质量劣化的电磁干扰的基本现象进行了分类。

表 1-1 给出了 IEEE 关于电能质量领域电磁现象的具体分类。对于稳态现象,可利用幅值、频率、频谱、调制、陷波深度和面积等描述特征;对于非稳态现象,可用上升率、幅值、相位移、持续时间、频谱、频率、发生率和能量强度等描述特征。

表 1-1 IEEE 关于电能质量领域现象的具体分类

类别		频谱成分	电压幅值	持续时间	
瞬变	脉冲	纳秒级	5 ns 上升	—	<50 ns
		微秒级	1 μs 上升	—	50 ns~1 ms
		毫秒级	0.1 ms 上升	—	>1 ms
	振荡	低频	<5 kHz	0~4 pu	0.3~50 ms
		中频	5~500 kHz	0~8 pu	20 μs
		高频	0.5~5 MHz	0~4 pu	5 μs

(续)

类别		频谱成分	电压幅值	持续时间	
短时变动	瞬时	断电	—	<0.1 pu	0.5~30 周波
		电压骤降	—	0.1~0.9 pu	0.5~30 周波
		电压骤升	—	1.1~1.8 pu	0.5~30 周波
	暂时	断电	—	<0.1 pu	30 周波~3 s
		电压骤降	—	0.1~0.9 pu	30 周波~3 s
		电压骤升	—	1.1~1.4 pu	30 周波~3 s
	短时	断电	—	<0.1 pu	3 s~1 min
		电压骤降	—	0.1~0.9 pu	3 s~1 min
		电压骤升	—	1.1~1.2 pu	3 s~1 min
长期变动	持续断电		—	0.0 pu	>1 min
	欠电压		—	0.8~0.9 pu	>1 min
	过电压		—	1.1~1.2 pu	>1 min
电压不平衡		—	0.5%~2%	稳态	
波形畸变	直流偏移		—	0~0.1%	稳态
	谐波		0~100 次	0~20%	稳态
	间谐波		0~6 kHz	0~2%	稳态
	陷波		高频	—	稳态
	噪声		宽带	0~1%	稳态
电压波动		<25 Hz	0.1%~7%	间歇	
工频变化		—	—	<10 s	

## 1.5 电能质量标准

电能质量标准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的基本技术规范,是实施电能质量监督、推广电能质量控制技术、维护供用电双方合法权益的法律依据。目前,世界上工业发达国家都已经制定和颁布实施了符合本国情况的国家标准。为了统一各国的电气标准和规范,IEC 于 1973 年建立了第 77 技术委员会。随着全球经济一体化的发展,各国所制定的电能质量标准正在向 IEC 推荐的标准靠拢,并且随着国际贸易的发展和各国间技术交流的需要逐步走向国际化。

从 20 世纪 80 年代初开始,我国国家质量监督检验检疫总局(原国家技术监督局)将制定国家电能质量系列标准列为重点项目。为加强电力系统电能质量管

理工作,我国原电力工业部于1998年颁布的《电网电能质量技术监督管理规定》(电综[1998]第211号),提出了“谁干扰,谁污染,谁治理”的原则。迄今为止,我国IEC/TC1采用国际先进标准,先后制定并颁布了电能质量的6项国家标准,各项电能质量国家标准的摘要如表1-2所示。

表1-2 6项电能质量国家标准摘要

标准编号	标准名称	允许限值	说明				
GB/T 12325—2008	电能质量 供电电压偏差	1. 35 kV 及以上为正负偏差绝对值之和不超过 10% 2. 20 kV 及以下为三相供电为 $\pm 7\%$ 3. 220 V 单相供电为 $+7\%$ , $-10\%$	1. 衡量点为供电产权分界处或电能计量点 2. 对供电电压偏差的测量做出基本规定				
GB/T 12326—2008	电能质量 电压波动和闪变	电压波动					
		次/h	d(%)		次/h	d(%)	
		$r \leq 1$	LV、MV	HV		LV、MV	HV
		$1 \leq r$	4	3	$10 \leq r \leq 100$	2	1.5
		$1 \leq r \leq 10$	3	2.5	$100 \leq r \leq 1000$	1.25	2
		闪变					
		$P_{Lr}$					
		$\leq 100$ kV			$> 110$ kV		
1.0			0.8				
说明: LV 时, $U_N \leq 1$ kV MV 时, $1$ kV $< U_N \leq 35$ kV HV 时, $35$ kV $< U_N \leq 220$ kV $P_{Lr}$ 表示以一周 (168 h) 为测量周期的长时时间闪变值							
GB/T 15945—2008	电能质量 电力系统频率偏差	1. 正常允许 $\pm 0.2$ Hz, 根据系统容量可以放宽到 $\pm 0.5$ Hz 2. 用户冲击引起的频率变动一般不得超过 $\pm 0.2$ Hz				1. 给出了频率合格率的统计方法 2. 对测量仪器提出了基本要求 3. 测量准确度不超过 $\pm 0.01$ Hz	
		各级电网谐波电压限值 (%)					
GB/T 14549—1993	电能质量 公用电网谐波	电压/kV	THD	奇次	偶次		
		0.38	5	4.0	2.0		
		6、10	4	3.2	1.6		
		35、66	3	2.4	1.2		
		110	2	1.6	0.8		
说明: 220 kV 电网参照 110 kV 执行							
1. 衡量点为 PCC, 取实测 95% 概率值 2. 对用户允许产生的谐波电流, 提供计算方法 3. 对测量方法和测量仪器做出基本规定							

(续)

标准编号	标准名称	允许限值	说明
GB/T 15543—2008	电能质量三相电压不平衡	1. 公共连接点负序电压不平衡度正常允许2%，短时不超过4%，低压系统零序电压限值未做规定 2. 每个用户一般不得超过1.3%，短时不超过2.6%	1. 瞬时和暂时的不平衡问题不适用于本标准 2. 对波动负荷引起的不平衡，测量时间规定为24 h，每个不平衡度的测量间隔调整为1 min；而对系统的公共连接点，测量时间调整为1周，每个不平衡度的测量间隔为1 min的整数倍 3. 对测量方法和测量仪器做出基本规定
GB/T 18481—2001	电能质量暂时过电压和瞬态过电压	规定了作用于电气设备的暂时过电压和瞬态过电压要求、电气设备应达到的绝缘水平及交流电气装置的过电压保护方法	1. 暂时过电压，包括工频过电压和谐振过电压 2. 瞬态过电压，包括操作过电压和雷电过电压

## 1.6 电能质量监测意义、现状和趋势

电能质量监测是对电网中电能质量数据的采集、分析并将其解释为有用信息的过程。实现电能质量的有效监测，是人们对电能质量进行性能考察、原因查明、责任明确、扰动源排除、合理解决方案的提出和科学管理的前提和基础，是电力企业和电力用户的共同需求。

实现电能质量的有效监测，对于系统中不同对象均具有非常重要的意义。

(1) 对于电力企业，可对整个所辖区域的电能质量状况进行考察，出现严重扰动事件后可实现改善方案的快速实施及责任的客观判定，保证系统运行的可靠性和供电质量。

(2) 对于敏感性电力用户，可对其供电电源的电能质量状况进行全面了解，特别是对其设备敏感的指标进行重点考察，作为判断其设备运行是否会受影响的依据。

(3) 对于普通电力用户，在电力市场环境下，对不同供电企业电能质量综合性能的比较结果可用于供电单位选择及按质论价签订供电合同的依据。

对于电能质量监测的研究现状和趋势，可从三个方面进行分析和阐述。

### 1. 监测方案

实施电能质量监测的主体可能是电力企业，也可能是敏感电力用户。目前，我国主要采用以下三种电能质量监测方式：

(1) 连续监测。适用于重要的公共供电点，由于资金、技术等限制，一般仅



对网络中少量的重要线路和重点负荷进行监测。

(2) 定期或不定期监测。适用于无需或不能进行连续监测,但又需要按一定时间周期或不定期地对其进行考察的场合。

(3) 专项监测。主要用于某种敏感设备接入电网前电能质量状况的考察、大型干扰源设备接入电网前后的电能质量对比以及专业电能质量治理措施实施的效果验证等。

尽管以上三种监测方式的实施过程和适用情况各不相同,但存在一个共性,即均采用单测点监测方案。单测点监测方案虽简便、经济以及适用性强,但只能进行单点的测量,无法获取整个网络全局性的电能质量信息,无法以整个区域为目标进行各种统计分析、智能诊断及网络化信息服务等,具有无法克服的缺陷。随着电网规模越来越大,敏感用户越来越普及,电网中电能质量监测点将越来越多,单点监测方案已无法适应现代电力系统的需要。

嵌入式系统和通信网络技术的快速发展为网络化电能质量监测系统的研究、应用和推广提供了机遇。将基于嵌入式平台的电能质量监测终端布置于配电网各监测点,建立可靠的通信网络,采用远程传输的方式将区域中所有监测终端采集、分析所得的有用信息汇集到布置于变电站监控室或电网监控中心的电能质量工作站中。网络化电能质量监测系统可对电网中不同监测点进行多点、连续的在线监测,基于丰富的全局性信息,还可提供各种统计分析、智能诊断和便捷的 Web 服务等功能,具有单点监测方案无法比拟的许多优点。

## 2. 监测内容

国内在电能质量监测领域研究的基础较差、起步较晚。20 世纪 90 年代才开始参照 IEEE Std 1159—1995 标准,陆续制定和颁布了电压偏差、谐波、三相不平衡度、频率偏差、波动与闪变及暂时/瞬态过电压这 6 个方面的国家标准。与之相对应,电能质量的监测内容也主要集中在上述 6 个方面国标对应的稳态指标及少量的暂态指标上。而对诸如电压暂降、电压短时中断、脉冲暂态、陷波、电压尖峰和振荡暂态等暂态电能质量问题,缺乏足够的研究和重视。

除 IEEE Std 1159—1995 标准定义的各种稳态、暂态电能质量指标外,国外研究者还制定了 CBEMA 标准,定义了 CBEMA 和 ITIC 两种电压容限曲线,作为电能质量的重要监测内容。CBEMA 为“计算机商业设备制造商协会”的缩写,CBEMA 曲线是一组测量电气设备和电源特性的曲线。ITIC 曲线是在 CBEMA 曲线的基础上发展起来的,是在大量试验数据的支持下,根据计算机等信息工业设备对暂态电能质量(主要是电压跌落、上升和短时中断)的抗扰度水平形成的。ITIC 曲线是目前评估暂态电能质量事件影响的一个重要依据,被 IEEE 引用为美国标准(IEEE 446)。这两种曲线综合考虑了电压扰动幅值大小及持续时间两种因素,考察用电设备在当前电能质量状况下运行的安全、可靠性。

随着社会信息化程度不断提高,电力系统中电能质量敏感负荷的比重不断增加,暂态电能质量问题日益严重。可以预见的是,暂态电能质量问题必将成为人们关注的热点和电能质量监测的重要内容。另外,随着网络化电能质量监测系统的应用和推广,为了使人们能够获得关于电能质量的更为准确的趋势、分布、综合性能、扰动原因等有用信息,诸如事件趋势统计、概率性统计、电能质量综合评价等级、扰动事件起因辨识及事件源定位等智能诊断功能也必将成为未来电能质量监测的核心内容。

### 3. 监测装置

一般而言,电能质量监测装置应能实现(或部分实现)如下基本功能:

(1) 电网基本状态量的测量,如频率、电压、电流有效值、有功/无功功率和功率因数等。

(2) 电能质量各单项指标的测量,包括稳态指标及部分暂态指标等。

(3) 基本的用户图形界面(Graphic User Interface, GUI)功能,如数值、表格、图形和报表等形式的显示、输出及声光报警等。

(4) 扰动事件记录,主要记录扰动事件的类型、起止时间、持续时间、扰动幅值平均值和最值等。

(5) 事件的触发录波及存储,将扰动事件发生前后一段时间的实时采样数据以波形的形式记录下来并存储,用于进一步的分析与诊断。

目前,国内采用的电能质量监测装置主要分为3种形式:

(1) 传统监测仪器。如万用表、示波器、频谱分析仪和谐波分析仪等设备,存在功能单一,实时性差,精度低等缺陷,只能对单测点电能质量进行临时性的简单测量。

(2) 基于PC的监测仪器。利用PC强大的硬件平台,配置基于VC、LabVIEW等软件开发平台开发的电能质量监测软件和A-D采集卡,具有计算速度快,显示方便,数据存储量大等优点,但存在价格高,携带不方便,安装不灵活等缺点。

(3) 嵌入式监测仪器。采用单片机、DSP和ARM等嵌入式微处理器,配置信号调理、A-D采样和显示屏等外围电路模块,实现电能质量数据的采集、计算、分析与显示等功能,测量精度高、功能综合性强且可进行在线实时测量,是今后的发展趋势。

欧美国家长期以来对电能质量都很重视,加上其自身积累的技术优势,已研制出不少性能良好的电能质量监测仪,如美国福禄克公司(FULKE)公司生产的F43手持式电力质量分析仪、瑞典联合电力公司(Unipower AB)的UP-221系列在线式电能质量监测装置和以色列Elspec公司的G4000电能质量监控装置等。这些电能质量监测装置都具有检测指标齐全、检测精度高等特点。其中部分高端产品已经集高精度电能计量、电能质量分析、保护与监控、智能逻辑控制、记录与