

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



DIANNENG ZHILIANG GAILUN

电能质量概论

程浩忠 主编
艾 芊 张志刚 朱子述 编写
肖湘宁 陈章潮 董新洲 主审



中国电力出版社

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

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



TM92/26

2008

DIANNENG ZHILIANG GAILUN
电能质量概论

主 编 程浩忠
编 写 艾 芊 张志刚 朱子述
主 审 肖湘宁 陈章潮 董新洲



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”规划教材。全书主要论述有关电能质量的问题，共分9章，包括电能质量的基本概念、电力系统电压偏差、电力系统频率偏差、电力系统谐波、电压波动和闪变、电力系统三相不平衡、暂时过电压和瞬态过电压、电压暂降、配电系统可靠性。本书具有内容翔实，语言精练，理论与实际并重等特点。

本书可作为电气信息类专业高年级本科生及研究生教材，也可作为相关领域从事电能质量工作的工程技术人员和技术管理人员的参考、培训用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电能质量概论/程浩忠主编. —北京：中国电力出版社，
2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 6989 - 1

I. 电… II. 程… III. 电能—质量分析—高等学校—教材
IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 043464 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年4月第一版 2008年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.25印张 422千字

定价 27.60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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

随着科学技术及工业的发展,许多自动化程度很高的工业用户,对电能质量的要求越来越高。任何电能质量问题都将导致产品质量的下降,甚至导致工程作业停顿,给用户造成不可估计的损失。信息科技的发展也对电能质量及供电可靠性提出了更高的要求。信息电力供应应具有高可靠性、高动态恒定特性、互不干扰性、控制灵活性、应用方便性等特点,因此,如何提供方便优质的电能,使之更好地为知识化、信息化社会服务,成为当今电力工作者面临的新机遇、新挑战。同时,现代电力系统中,电力电子设备的应用越来越广泛,各种非线性、冲击性、波动性负载也大量增加,使电力系统所遭受的电能质量污染也日趋严重。可见,电能质量直接关系到国民经济的总体效益,对电能质量进行深入研究有着非常重要的意义。为培养掌握电能质量知识的人才,国外许多著名大学的电气工程专业都开设了这方面的课程。

随着电力系统的发展和电力工业体制改革和市场化的不断深入,电力用户对电能质量提出了更高的要求,因此电能质量监管工作必须要有超前的眼光和先进的理论方法作指导。本课程的开设和教材的编写正顺应了这一潮流。电能质量的国内外标准存在一定差异,且各个国家电能质量问题的侧重点不一样。发达国家的电能质量问题以电压突降为主,而我国目前把主要问题放在谐波方面。

编写本书目的在于推进电能质量研究工作,满足大学生、研究生和工程技术人员对电能质量系统认知的需要。希望通过对本书系统的学习能使更多的工程技术人员掌握电能质量知识,以适应当前形势发展的需求。

本书编著过程中将理论与实用方法相结合。编者在电能质量方面有着相当丰富的研究经历和扎实的研究基础,是一支具备相当实力的科研团队且已从事电能质量研究工作十余年;完成了30多项来自国家863,华东电网公司,上海市电力公司,上海市区、市东、市南供电公司等单位有关电能质量方面的课题;在电能质量及相关领域已发表论文200余篇。本书依托以上项目的报告和论文为背景,结合相关理论和基础工作,对作者在电能质量方面的工作和成果进行总结。书中内容经过多届本科生、研究生的教学试用,能使读者较快地进入这一领域的前沿,对电能质量问题有一个全面的了解。

本书由程浩忠、艾芊、张志刚、朱子述编写,其中,第1~4章、第9章由程浩忠教授编写,第5章由张志刚副教授编写,第6、8章由艾芊副教授编写,第7章由朱子述教授编写。全书由程浩忠教授统稿。华北电力大学肖湘宁教授、上海交通大学陈章潮教授担任本书主审,清华大学董新洲教授审阅了本书大纲,并都提出了不少宝贵意见。钟明明、葛长宏、

熊以旺、徐俊、姜翠珍等进行了电脑排版的中文文字处理。本书能够完成获益于许多老师及其研究生的辛勤工作，许多领导、专家和编者的同事、朋友、家人也为本书编写创造了条件并给予了关心，在此一并向他们致以衷心的感谢。

鉴于目前国内外有关电能质量方面内容全面且深入的书籍较少，涉及应用、能适合时代发展迫切需要的书籍更少；电能质量这一领域又有许多问题尚在研究和探讨之中；又因作者水平有限，本身也有不少缺点和不足之处。因此，书中存在不完善、不正确的地方在所难免，恳望读者见谅，并请予以批评指正为盼！

编者

2007年10月于上海交通大学

目 录

前言

第 1 章 电能质量的基本概念	1
1.1 电能质量的主要内容	1
1.2 中国电能质量标准与主要内容	2
1.3 关于电能质量的一些概念	8
1.4 动态电能质量	10
1.5 IEEE 电压容限曲线及分类	11
第 2 章 电力系统电压偏差	13
2.1 电压偏差的国家标准	13
2.2 电压偏差超标的危害	14
2.3 电力系统电压调整	25
2.4 电力系统无功补偿	36
2.5 无功和电压管理	43
第 3 章 电力系统频率偏差	48
3.1 电力系统频率概念	48
3.2 频率偏差对电力系统的影响	54
3.3 电力系统频率的检测与评价	64
3.4 电力系统频率偏差的标准和规定	66
3.5 电力系统频率调整	70
第 4 章 电力系统谐波	76
4.1 电力系统谐波的基本概念	76
4.2 电力系统非正弦波形的分析方法	82
4.3 电力系统谐波的来源	94
4.4 电力系统谐波潮流计算	103
4.5 电力系统谐波测量技术	108
4.6 谐波对电网的影响和危害	124
4.7 电力系统谐波的抑制	134
4.8 交流滤波装置	145
4.9 电力系统谐波的标准及其管理	154
第 5 章 电压波动和闪变	163
5.1 电压波动和闪变的基本概念	163
5.2 电压波动和闪变的标准	168
5.3 电压波动和闪变的测量	170
5.4 电压波动和闪变的产生和抑制	175

第 6 章 电力系统三相不平衡	184
6.1 三相不平衡的概念及计算	184
6.2 三相不平衡的国家标准	190
6.3 三相不平衡的危害及改善措施	192
第 7 章 暂时过电压和瞬态过电压	198
7.1 暂时过电压和瞬态过电压的概念.....	198
7.2 工频过电压的机理与限制	203
7.3 谐振过电压的机理与限制	207
7.4 操作过电压的机理与限制	219
7.5 雷电压的保护.....	223
第 8 章 电压暂降	224
8.1 电压暂降的概念	224
8.2 电压暂降的危害性	225
8.3 电压暂降的标准	230
8.4 电压暂降值的测量和计算	231
8.5 抑制电压暂降的措施	234
第 9 章 配电系统可靠性	240
9.1 概述	240
9.2 配电系统可靠性准则	246
9.3 我国城市电力网可靠性的规定	248
9.4 配电系统可靠性预测方法	251
9.5 配电系统缺电和停电损失的计算.....	258
9.6 配电系统可靠性经济评价	259
9.7 提高配电系统可靠性的措施	260
9.8 提高配电系统可靠性措施的效果分析	264
参考文献	266

第1章 电能质量的基本概念

电能质量 (Power Quality) 描述的内容是, 通过公用电网供给用户端的交流电能的品质。理想状态的公用电网应以恒定的频率、正弦波形和标准电压对用户供电。在三相交流系统中, 还要求各相电压和电流的幅值应大小相等、相位对称且互差 120° 。但由于系统中的发电机、变压器、输电线路和各种用电设备的非线性或不对称性, 以及运行操作、外来干扰和各种故障等原因, 这种理想状态并不存在, 因此在电网运行、电力设备和供用电环节中出现了各种问题, 从而产生了电能质量的概念。围绕电能质量的含义, 从不同角度去理解, 通常包括如下几方面:

(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电能质量问题, 但不包括频率造成的电能质量问题, 也不包括用电设备对电网电能质量的影响和污染。

(2) 电流质量。反映了与电压质量有密切关系的电流的变化, 电力用户除对交流电源有恒定频率、正弦波形的要求外, 有些用户还要求电流波形与供电电压同相位以保证高功率因数运行。这个定义有助于电网电能质量的改善和线损的降低, 但不能概括大多数因电压原因造成的电能质量问题。

(3) 供电质量。其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, 包括供电企业对用户投诉的反应速度以及电价组成的合理性、透明度等。

(4) 用电质量。包括电流质量, 还包括反映供用电双方相互作用和影响中的内容, 如用电方的权利、责任和义务, 电力用户是否按期、如数交纳电费等。

国内外对电能质量确切的定义至今尚没有形成统一的共识。

国际电工委员会 (IEC) 标准 (IEC 1000-2-2/4) 将电能质量定义为: 供电装置正常工作情况下不中断和干扰用户使用电力的物理特性。

国际电气电子工程师协会 (IEEE) 协调委员会对电能质量的技术定义: 合格的电能质量是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统均是适合该设备正常工作的^[6,7]。

参考文献 [2] 对电能质量的定义: 电能质量一般是指电压或电流的幅值、频率、波形等参量距规定值的偏差。

目前大多数专家认为, 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。

不论如何表达, 电能质量的概念中都应包括电能供应过程中所要考虑的一切方面。

1.1 电能质量的主要内容

衡量电能质量的指标除了包括额定电压、额定频率和正弦波形外, 还包括所有电压瞬变现象 (如冲击脉冲、电压下跌、瞬时间断等)。上述电能质量定义概括了它的成因和后果, 当然其中所述偏差应作广义的理解, 它还包括供电可靠性。

IEEE 对于电能质量主要内容的定义以及分类, 如表 1-1 所示。

表 1-1 IEEE 对于电能质量主要内容的定义与分类

种 类		频谱成分	持续时间	电压幅值	
电 磁 瞬 态	冲击	上升沿 5ns	<50ns	—	
		上升沿 1 μ s	50ns~1ms	—	
		上升沿 0.1ms	>1ms	—	
	振荡	低频	<5kHz	0.3~5ms	0~4(p. u.)
		中频	5~500kHz	20 μ s	0~8(p. u.)
		高频	0.5~5MHz	5 μ s	0~4(p. u.)
短 时 电 压 变 动	瞬 时	中断	—	0.5~30 周波	<0.1(p. u.)
		跌落	—	0.5~30 周波	0.1~0.9(p. u.)
		升高	—	0.5~30 周波	1.1~1.8(p. u.)
	暂 时	中断	—	30 周波~3s	<0.1(p. u.)
		跌落	—	30 周波~3s	0.1~0.9(p. u.)
		升高	—	30 周波~3s	1.1~1.4(p. u.)
	短 时	中断	—	3s~1min	<0.1(p. u.)
		跌落	—	3s~1min	0.1~0.9(p. u.)
		升高	—	3s~1min	1.1~1.4(p. u.)
长 期 电 压 变 动	持续中断	—	>1ms	0.0(p. u.)	
	欠电压	—	>1ms	0.8~0.9(p. u.)	
	过电压	—	>1ms	1.1~1.2(p. u.)	
电压不平衡		—	稳态	0.5%~2%	
波 形 畸 变	直流偏移	—	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	—	

1.2 中国电能质量标准与主要内容

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。从 20 世纪 60~70 年代开始, 世界各国几乎都制定了有关供电频率和电压允许偏差的计划指标, 部分国家还制定了限制谐波、电流畸变、电压波动等的推荐导则。近十几年来, 许多发达国家已经制定、颁布、实施了更加完备的电能质量系列标准。随着经济国

际化,世界各国制定的电力系统电能质量标准正在与国际权威专业委员会推荐标准及相应的试验条件等一系列规定接轨,逐步实现标准的完整与统一。

1988年,我国曾颁布执行了《电网电能质量技术监督管理规定》,提出了“谁干扰,谁污染,谁治理”的原则,并指出:为保证电力系统安全、稳定、经济、优质运行,全面保障电能质量是电力企业和用户共同的责任和义务。迄今为止,我国已经制定并颁布的电能质量国家标准有:GB 12325—1990《电能质量 供电电压允许偏差》、GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》、GB/T 15543—1995《电能质量 三相电压允许不平衡度》、GB/T 15945—1995《电能质量 电力系统频率允许偏差》、GB 12326—2000《电能质量 电压波动和闪变》和GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》,共6项国家标准。

1.2.1 电能质量标准化

为了保证电网安全、经济运行,保证对用户连续、可靠地供应电能,保障输配电设备、用电设备与装置正常使用,必须以科学技术和运行经验的综合成果为基础,按照标准化的原则对电气产品制定并发布统一的、适度的基本指标规定,并以统一的质量检验方法指导实施,这一工作被称为电能质量标准化。开展电能质量标准化的工作主要有以下4方面内容。

一、规定标称环境

由于生产和运行的实际状况在不断变化,供电频率和电压不可避免地偏离理想标称值。因此,在规定电能质量指标时必须考虑,在一定时期内可能的环境条件和给定的标称值下,允许某指标有一定的变化范围。例如,理想的供电系统应以恒定的工业频率(在我国标称频率为50Hz)和某一规定电压水平(如标称电压220V)向用户供应电能。实际上在给出标称频率和电压的同时,还应给出允许的偏差范围。例如标称频率50Hz,允许频率偏差值为 $\pm 0.2\text{Hz}$;电压允许的典型偏差范围为90%~107%。

二、定义技术名词

在制定电能质量标准时给出电能质量现象的准确定义和描述,应尽可能地统一专用术语。因为只有这样,电力供应方、电力使用方和设备制造方之间进行技术与信息交流时才会有通用的规范语言,各方在相互的技术要求上有了多方面兼顾和统一规范的标准,电能质量的测量与评估结果才会有可比性。例如,对暂时断电的定义是电压均方根值小于10%额定电压,且持续时间大于3s并小于1min的现象。

三、量化电能质量指标

量化是制定电能质量标准工作的核心内容,涉及到对电能质量问题发生原因和干扰传播机理的认识,对用电设备承受干扰能力的分析和测试,以及对抑制扰动和质量达标等技术的保证。在制定电能质量技术指标时应注意到,不是质量标准越高越好,其指标量化的目的是将电力系统整体的安全、经济与基本保证用电的可靠性联系起来,进行综合优化协调,制定出适度的和可能达到的技术指标。从上述的电能质量特殊性质已经知道,电能质量标准的量化不同于一般工业产品的质量问题的,应据其特点作出规定,如需考虑到以下3方面:

(1) 保证电能质量并非供电部门单方面的责任。实际上,某些电能质量指标的下降是由电力消费者的电磁干扰造成的,全面的电能质量管理是由供用电双方共同保证的。因此,在制定电能质量标准时,除了给出保证供电电压质量的扰动限制值外,还要给出用户设备注入电力系统的电磁扰动的允许值。

(2) 不同的供用电点和不同的供用电时间, 电能质量指标往往是不同的。由于电能质量在时间和空间上均处于动态变化之中, 因此在考核电能质量指标时往往采用概率统计结果来衡量。最典型的例子是取 95% 概率大值作为衡量依据。

(3) 量化的电能质量标准应兼顾到电力供、用两方面的技术经济效益, 因此强调电磁兼容性。

四、推荐统一的测量与评估方法

在制定电能质量计划指标的同时, 也要制定出统计指标。因此, 对电能质量的测量方法、仪器和评估方法, 给出一定的要求和规定是十分必要的。采取统一的测量与评估方法的目的在于统一技术规范, 使实际检测到的电能质量数据真实可信, 使电能质量的考核与检验规范化, 以便做到各仪器生产厂家生产的电能质量测量仪器和评估方法科学、合理, 测量结果具有可比性, 测试功能具有灵活性和可操作性。

虽然随着科技水平的提高和工业生产的发展, 供电、用电和设备制造三方对电能质量的认知和要求在不断深化, 但制订出共同遵守的、综合优化的适度指标, 并根据不同生产过程和用户的不同质量要求给出不同等级的质量标准, 仍是一项长期的和需要不断探索的研究工作。

1.2.2 电能质量国家标准简介

从 1990 年至 2001 年, 11 年间我国陆续制定和颁布的 6 项电能质量国家标准, 其摘要如表 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 12325—1990	电能质量供电电压允许偏差	(1) 35kV 及以上, 正负偏差绝对值之和不超过 10% (2) 10kV 及以下三相供电为 ±7% (3) 220V 单相供电为 +7%, -10%	衡量点为供电产权分界或电能计量点																				
GB 12326—2000	电能质量电压波动和闪变	电压变动 d 的限值和变动频率 r 有关: 当 $r \leq 1000\text{h}^{-1}$ 时, 对于低压 (LV) 和中压 (MV), $d=1.25\% \sim 4\%$; 对于高压 (HV), $d=1.0\% \sim 3\%$; 当随机不规则的变动时, 对于 LV 和 MV, $d=2\%$; 对于 HV, $d=1.5\%$ 闪变限值 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>系统电压等级</th> <th>LV</th> <th>MV</th> <th>HV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>短时间闪变值 p_{st}</td> <td>1.0</td> <td>0.9(1.0)</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>长时间闪变值 P_{lt}</td> <td>0.8</td> <td>0.7(0.8)</td> <td>0.6</td> </tr> </tbody> </table> <p>注 括号中的值仅适用于所有用户为同电压等级场合。</p>	系统电压等级	LV	MV	HV	短时间闪变值 p_{st}	1.0	0.9(1.0)	0.8	长时间闪变值 P_{lt}	0.8	0.7(0.8)	0.6	(1) 衡量点为公共连接点 (PCC) (2) p_{st} 的测量周期为 10min, 取实测 95% 概率大值; P_{lt} 的测量周期 2h, 不得超标 (3) 限值分三级处理原则 (4) 提供预测计算方法, 规定测量仪器并给出典型分析实例								
系统电压等级	LV	MV	HV																				
短时间闪变值 p_{st}	1.0	0.9(1.0)	0.8																				
长时间闪变值 P_{lt}	0.8	0.7(0.8)	0.6																				
GB/T 14549—1993	电能质量公用电网谐波	各级电网谐波电压限值 (%) <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>电压 (kV)</th> <th>THD</th> <th>奇次</th> <th>偶次</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.38</td> <td>5</td> <td>4.0</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>6、10</td> <td>4</td> <td>3.2</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>35、66</td> <td>3</td> <td>2.4</td> <td>1.2</td> </tr> <tr> <td>110</td> <td>2</td> <td>1.6</td> <td>0.8</td> </tr> </tbody> </table> <p>注 1 220kV 电网参照 110kV 执行。 2 THD 为总谐波畸变。</p>	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	(1) 衡量点为 PCC, 取实测 95% 概率大值 (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作出规定 (4) 对同次谐波随机性合成提供算法
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																				

续表

标准编号	标准名称	允许限值	说明																								
GB/T 15543—1995	电能质量三相电压允许不平衡度	(1) 正常允许2%，短时不超过4% (2) 每个用户一般不得超过1.3%	(1) 各级电压要求一样 (2) 衡量点为PCC，取实测95%概率值或日累计超标不许超过72min，且每30min中超标不许超过5min (3) 对测量方法和测量仪器做出基本规定 (4) 提供不平衡度算法																								
GB/T 15945—1995	电能质量电力系统频率允许偏差	(1) 正常允许偏差±0.2Hz，根据系统容量（界限为3000MW）可以放宽到±0.5Hz (2) 用户冲击引起的频率变动一般不得超过±0.2Hz	对测量仪器提出基本要求																								
GB/T 18481—2001	电能质量暂时过电压和瞬态过电压	<p>(1) 系统工频过电压限值</p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">系统工频过电压限值</th> </tr> <tr> <th>电压等级 (kV)</th> <th>过电压限值 (p. u. *)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$U_m > 252(I)$</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>$U_m > 252(II)$</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>110 及 220</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>35~66</td> <td>$\sqrt{3}$</td> </tr> <tr> <td>3~10</td> <td>$1.1\sqrt{3}$</td> </tr> </tbody> </table> <p>1 U_m 指工频峰值电压。 2 I 和 II 分别指线路断路器两侧变电站的线路电压。 * 标么值。</p> <p>(2) 操作过电压限值，包括空载线路合闸、单相重合闸、成功的三相重合闸、非对称故障分闸及振荡解列过电压限值</p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">操作过电压限值</th> </tr> <tr> <th>电压等级 (kV)</th> <th>过电压限值 (p. u.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500</td> <td>2.0*</td> </tr> <tr> <td>330</td> <td>2.2*</td> </tr> <tr> <td>110~252</td> <td>3.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 表示该过电压为相对地统计操作过电压。</p>	系统工频过电压限值		电压等级 (kV)	过电压限值 (p. u. *)	$U_m > 252(I)$	1.3	$U_m > 252(II)$	1.4	110 及 220	1.3	35~66	$\sqrt{3}$	3~10	$1.1\sqrt{3}$	操作过电压限值		电压等级 (kV)	过电压限值 (p. u.)	500	2.0*	330	2.2*	110~252	3.0	<p>(1) 暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压。瞬态过电压包括操作过电压和雷击过电压 (2) 工频过电压 $1.0(p.u.) = U_m/\sqrt{3}$。谐振过电压和操作过电压 $1.0(p.u.) = \sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$ (3) 除统计过电压（不小于该值的概率为0.02）外，凡未说明的操作过电压限值均为最大操作过电压（不小于该值的概率为0.0014） (4) 瞬态过电压还对空载线路分闸过电压、断路器开断并联补偿装置及变压器等过电压限值做出了规定</p>
系统工频过电压限值																											
电压等级 (kV)	过电压限值 (p. u. *)																										
$U_m > 252(I)$	1.3																										
$U_m > 252(II)$	1.4																										
110 及 220	1.3																										
35~66	$\sqrt{3}$																										
3~10	$1.1\sqrt{3}$																										
操作过电压限值																											
电压等级 (kV)	过电压限值 (p. u.)																										
500	2.0*																										
330	2.2*																										
110~252	3.0																										

需要指出的是，从现有的国家标准可看出，我国的电能质量标准体系还很不完善。例如，有些指标已经是工业生产中急需提出的，但目前仍没有做出相关规定，缺少相应的有关检测推荐方法和测量精度等规定；有些指标的科学性和可操作性差，而且还缺少完整的技术指导、行业规程和导则。因此，建立完善的电能质量标准体系仍有大量的工作需要开展。

1.2.3 电力系统频率偏差

国家标准 GB/T 15945—1995《电能质量 电力系统频率允许偏差》规定以 50Hz 作为我国电力系统的标准频率（工频），并规定电力系统正常的频率标准为 $50\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ ，当系统容量较小时，可放宽到 $50\text{Hz} \pm 0.5\text{Hz}$ 。但 GB/T 15945—1995 中并没有说明系统容量大小的界限。全国供用电规则中规定了供电局供电频率的允许偏差：电网容量在 3000MW 及以

上者为 0.2Hz；电网容量在 3000MW 以下者为 0.5Hz。实际运行中，我国各跨省电力系统频率的允许偏差都保持在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 的范围内，因此电网频率目前在电能质量中最有保障。

1.2.4 供电电压允许偏差

供电电压允许偏差是指电力系统各处的电压允许偏离其额定值的百分比。GB 12325—1990《电能质量 供电电压允许偏差》中规定：35kV 及以上供电电压正负偏差的绝对值之和不大于额定电压的 10%；10kV 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ；220V 单相供电为额定电压的 $+7\% \sim -10\%$ 。

由于电网各点的电压调节不像频率调节那样由电网统一进行，又由于电网各点电压主要反映了该点无功功率的供需关系，因此电压调节一般采取按无功就地平衡原则进行无功功率补偿，并及时调整无功功率补偿量，以从源头上解决问题。也有采取调整同步发电机励磁电流的方式，以产生超前或滞后的无功功率，从而达到改善网络负荷的功率因数和调整电压偏差的目的。还有利用有载调压变压器，采取对电压偏差及时调整的方式。从总体上考虑，无功负荷只宜将功率因数补偿到 0.90~0.95，此时仍然有一部分变化无功负荷要电网供给，从而产生电压偏差，所以需要分区采取一些有效的技术手段，有载调压变压器就是有效、经济的调压措施之一。

1.2.5 三相电压不平衡度

三相电压不平衡度是指三相系统中三相电压不平衡程度，用电压或电流负序分量与正序分量的均方根百分比表示。三相电压不平衡（即存在负序分量）会引起继电保护误动、电机附加振动力矩和发热。工作于额定转矩的电动机，如长期在负序电压含量 4% 的状态下运行，由于发热，电动机绝缘寿命将会减半；若某相电压高于额定电压，其运行寿命将减短的更加严重。

GB/T 15543—1995《电能质量 三相电压允许不平衡度》规定电力系统公共连接点正常对电压不平衡度允许值为 2%，短时不平衡度不得超过 4%，其中短时允许值是指任何时刻均不能超过的限制值，以保证继电保护和自动装置正确动作。对接入公共连接点的每个用户，规定其引起该点正常电压不平衡度允许值一般为 1.3%。

1.2.6 电压波动和闪变

电压波动是指电压幅值在一定范围内有规则变动时，电压变动或工频电压包络线内的周期性变化；或电压幅值不超过 0.9~1.1(p. u.) 的一系列随机变化。电压波动值为电压方均根最大值与最小值之差相对额定电压的百分比。电压波动引起照明灯的照度波动。

闪变用于说明对不同频率电压波动引起灯闪的敏感程度及引起闪变刺激性程度的电压波动值，其定义是：人眼对照度波动的一种主观感觉。对用户负荷引起的闪变限值，是根据用户负荷的大小、协议用电容量占供电容量的比例及系统电压等级规定的。

按冲击负荷产生的电压波动允许值的百分数不同，电力系统公共供电点可分为 3 级，并作不同的规定和限制。

- (1) 10kV 及以下为 2.5；
- (2) 35~110kV 为 2.0；
- (3) 220kV 及以上为 1.6。

GB 12326—2000《电能质量 电压允许波动和闪变》特别规定了各级电压下闪变限值，适用于由波动负荷引起的公共连接点电压的快速变动及由此可能造成人对灯闪明显感觉

的场合。

1.2.7 公用电网谐波

为了减少谐波对公用电网的污染,国家有关部门有必要对电力系统谐波畸变允许值和谐波源注入供电点的谐波电流值作出规定,对谐波源和供电点电压或电流的谐波含量或畸变值进行监测,对新接入的谐波源负荷进行必要的验算和管理,以保证电能质量以及电力系统和用户设备的安全和正常运行;另一方面,电力用户为保证自身设备的安全运行,也应当把自己的用电设备产生的谐波畸变保持在规定的限度以内。因为对电力系统的污染必须由产生谐波污染的用户采取措施(如装设滤波器等),将其设备产生的谐波限制在规定的限度以下。所以,除了要求现有的谐波源用户采取措施外,对新接入系统的大谐波源负荷必须经供电部门进行验算,确定其允许值和是否需要采取措施。供电部门在确定新接入用户的谐波含量和畸变允许值时,除考虑系统中原有的谐波含量外,还应留有适当裕度,为今后接入系统的新用户考虑。

目前许多国家已颁布限制注入电网的谐波电流分量的规定,CIGRE(国际大电网委员会)和IEC还成立了专门的工作小组,拟定电力系统和电工产品的谐波限制标准。各国制定谐波规定的共同原则如下:

(1) 限制谐波源注入电网的谐波电流及其在电网连接点产生的谐波电压,防止其对电力系统的干扰,特别要防止高压配电网发生谐振或谐波放大,保证电网的安全运行。

(2) 把电力系统中的谐波含量控制在允许范围内,保证电网供给波形合格的交流电能,使接入电网的各种用电设备工作正常,免受谐波干扰。

(3) 限制谐波的标准要有利于国际技术经济合作,多数国家的标准都比较接近,如对谐波电压畸变率的规定,110~132kV电网各国均为1.5%;特别是各国的家用和低压电器谐波标准,相互接近尤为明显,欧洲一些国家,美国、澳大利亚等国和IEC都引用了英国标准。英国是制订执行电力系统谐波规定较早的国家,其颁发的限制谐波规定G5/3在国际上很有影响。

我国公用电网谐波的管理始于20世纪80年代,1984年原水利电力部颁发了《电力系统谐波管理暂行规定》,编号为SD126—1984。经过近十年的实践,我国电网在谐波管理上前进了一大步,1993年7月31日国家技术监督局颁布了国家标准GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》,并于1994年3月1日实施。该标准规定了公用电网谐波的允许值及其测试方法,适用于交流额定频率为50Hz,标准电压110kV及以下的公用电网(标准电压为220kV的公用电网可参照110kV执行);不适用于暂态现象和短时间谐波。

1.2.8 暂时过电压和瞬态过电压

暂时过电压是指在电网给定点上持续时间较长的不衰减和弱衰减的(以工频或其一定的倍数或分数的频率)振荡过电压。

瞬态过电压是指持续时间数毫秒或更短,通常带有强阻尼的振荡或非振荡的过电压。它可以叠加于暂时过电压上。

暂时过电压和瞬态过电压是由于电力系统运行操作、受雷击、发生故障等原因引起的,是供电特性之一。国家标准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的要求、电气设备的绝缘水平及过电压保护方法,并对过电压的相关术语、定义做了比较详尽的论述。

1.3 关于电能质量的一些概念

一、间谐波

间谐波是指非工频频率整数倍的谐波,往往由较大的电压波动或冲击性非线性负荷所引起。所有非线性的波动负荷,如电弧炉、电焊机、各种变频调速装置、同步串级调速装置及感应电动机等均为间谐波源。电力载波信号也是一种间谐波。

间谐波源的特点是放大电压闪变和音频干扰,影响电视机画面及增大收音机噪声,造成感应电动机振动及异常。对于由电容、电感和电阻构成的无源滤波器电路,间谐波可能会被放大,严重时会使滤波器因谐波过载而不能正常运行,甚至造成损坏。间谐波的影响和危害等同整数次谐波电压,IEC 61000-3-6对间谐波的发射水平做出了明确的说明,如间谐波电压水平应低于邻近谐波水平,并规定为 $(0.5\% \sim 1\%)U_N$ 。我国目前还没有制定相应的国家标准。

二、电压暂降

电压暂降(也称电压跌落)是指由于系统故障或干扰,造成用户电压下降到额定电压的 $10\% \sim 90\%$ [即幅值为 $0.1 \sim 0.9(\text{p. u.})$],并持续 0.5 周波 ~ 30 个周波,然后又恢复到正常水平的现象,此期间内系统频率仍为标称值。国际上普遍认为,电压幅值低于 $0.1(\text{p. u.})$ 且大于 0.5 个周波的供电中断对敏感用户和严格用户而言都属于断电故障。电压暂降可能造成某些用户的生产停顿或次品率增加,而供电恢复时间取决于自动重合闸或自动功能转换装置的动作时间,因此传统的机械式断路器已不能满足对敏感和严格用电负荷的需求。目前恢复供电时采取的主要措施有:利用高速固态切换开关(Solid-State Transfer Switch, SSTS),利用动态电压恢复器(DVR)或不间断电源(UPS)作后备电源并配合固态电子开关等。

三、电压突升

电压突升是指电压的有效值升至额定值的 110% 以上,持续时间为 0.5 周波 $\sim 1\text{min}$,典型值为额定值的 $110\% \sim 180\%$,即幅值为 $1.1 \sim 1.8(\text{p. u.})$,此期间系统频率仍为标称值。

四、断电

断电是指由于供电系统发生故障,如供电线路遭受雷击、对地闪络,或是系统线路遭受外力破坏致使保护动作等,造成用户在一定时间内一相或多相失去电压 [低于 $0.1(\text{p. u.})$]。断电按持续时间分为3类: $0.5 \sim 3\text{s}$ 称为瞬时断电; $3 \sim 60\text{s}$ 称为暂时断电;大于 1min 称为持续断电,也称电压中断。

五、电压瞬变

电压瞬变又称为瞬时脉冲,是指在一定时间间隔内,两个连续稳态电压之间在极短时间内发生的一种突变现象或数量变化。

这种瞬时脉冲可以是任一极性的单方向脉冲;也可以是第一个峰值为任意极性的衰减振荡波,即发生在任一极性阻尼振荡波的第一个尖峰。

六、过电压

过电压是指相对地电压峰值超过 $\sqrt{\frac{2}{3}}U_m$ 或相间电压峰值超过 $\sqrt{2}U_m$ 的电压, U_m 为系统最高运行电压。

七、欠电压

欠电压是指电压幅值低于额定电压,且持续时间大于 1min 。欠电压的幅值范围为 $0.1 \sim$

0.9(p. u.)。

八、电压切痕

电压切痕(也称电压缺口)是指一种持续时间小于0.5周波的周期性电压扰动。电压切痕主要是由于电力电子装置在发生相间短路时,电流从一相转换到另一相而产生的。电压切痕的频率非常高,用常规的谐波分析仪器很难测量出电压切痕,这也是直到最近此项电压扰动内容才被IEEE列入的主要原因。

九、稳态电压扰动

稳态电压扰动是指以电源电压波形畸变为特征而引起的各种稳态电能质量问题。其主要内容包括:

- (1) 谐波,其特征指标是谐波频谱电压和谐波频谱电流的波形;
- (2) 陷波,其特征指标是陷波的持续时间及幅值大小;
- (3) 电压闪变,其特征指标是波动幅值、调制频率等;
- (4) 三相电压不对称,其特征指标是不平衡因子,其产生的主要原因是三相负载不平衡。

十、暂态电压扰动

暂态(瞬态)电压扰动是指,电源电压的正弦波形受到暂态(瞬态)电压扰动,发生畸变而引起电能质量污染的各种问题。暂态电能质量问题是以频谱和暂态持续时间为特征的,一般分为脉冲暂态和振荡暂态两种类型。暂态电压扰动主要包括以下3个方面:

(1) 暂态谐振,其特征指标是波形、峰值和持续时间,产生原因是由于线路、负载和电容器组的投切,造成的后果是破坏运行设备的绝缘、损坏电子设备等。

(2) 暂态脉冲,其特征指标是电压上升时间、峰值和持续时间,产生原因是线路遭受雷击或感性电路分合等,造成的后果是破坏运行设备的绝缘。

(3) 瞬时电压上升或暂降,其特征指标是幅值、持续时间、瞬时值/时间,产生原因通常是大容量电动机起动、负荷瞬变、电力系统切换操作或远端发生故障等。这是电力用户投诉最多的一种电压扰动,因为瞬时电压上升或暂降可能造成用电设备发生运行故障、敏感负载不能正常运行等后果。

十一、直流分量

交流电网中的直流分量是指在交流电网中由于非全相整流负荷等原因引起的直流成分。直流分量会使电力变压器发生偏磁,从而引发一系列影响和干扰。例如,当500kV直流输电线路单极接地时,会引起变电站主变压器的运行噪声和机械振动急剧增加。

十二、电压偏差

电压偏差的数学表达式为

$$\text{电压偏差}(\%) = \frac{\text{实测电压} - \text{额定电压}}{\text{额定电压}} \times 100\%$$

十三、电压合格率

电压合格率的数学表达式为

$$\text{电压合格率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{电压超限时间}}{\text{电压监测总时间}}\right) \times 100\%$$

$$\text{电压超限率}(\%) = \frac{\text{电压超限时间}}{\text{电压监测总时间}} \times 100\%$$

$$V_i(\text{主网 } i \text{ 节点电压合格率}) = \left[1 - \frac{\text{月电压超限时间总和}(\text{min})}{\text{月电压监测总时间}(\text{min})} \right] \times 100\%$$

$$V_{\text{网}}(\text{主网电压合格率}) = \frac{\sum_{i=1}^n V_i(\text{主网节点电压合格率})}{n}$$

1.4 动态电能质量

IEEE 将电磁系统中典型的暂态现象进行了特征分类, 主要列出了各种暂态和瞬态扰动现象。同时, IEEE 根据扰动的频谱特征、持续时间、幅值变化等, 将其分为瞬时、短时和长期的电压变动 3 大类。在此基础上又细分出 18 个子类, 其中, 短时电压变动, 尤其是持续断电和电压暂降已成为国际上共同关注的问题。这些问题对于具有较强惯性的传统电机设备也许没有明显的影响, 但对敏感和严格的用电负荷 (如集成电路芯片制造和微电子控制的生产流水线等) 将可能造成极大的危害。已成为现代电能质量的重要问题, 从而使电能质量的内涵也发生了较大的变化:

- (1) 传统的电能质量问题 (如谐波、三相不对称等) 继续存在, 而且严重性正在增加;
- (2) 随着供电可靠性的不断提高, 目前人们已逐步将注意力转向新的动态电能质量问题, 如持续时间为毫秒级的动态电压升高、脉冲、电压跌落和瞬时供电中断等。

常见的几种动态电能质量问题的波形示意图和波形图如图 1-1 所示。电能质量问题的性质、产生原因及解决方法见表 1-3。

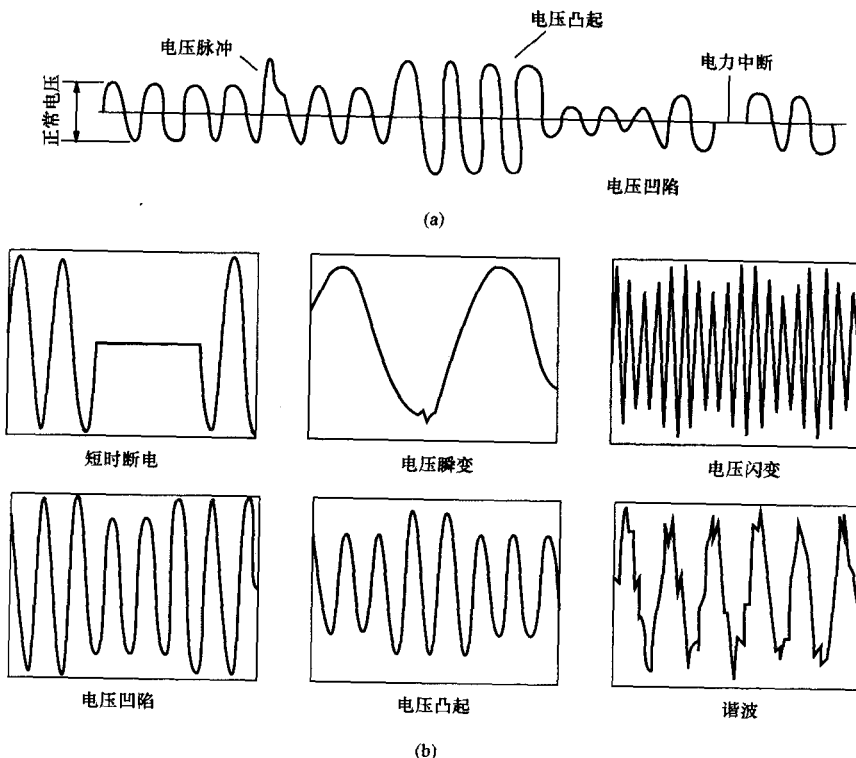


图 1-1 常见的几种动态电能质量问题的波形示意图和波形图

(a) 波形示意图; (b) 波形图