



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics

能源革命与绿色发展丛书

统一电能质量调节器 及其无源控制

TONGYI DIANNENG
ZHILIANG TIAOJIEQI
JIQI WUYUAN KONGZHI

◎王久和 孙凯 张巧杰 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电力电子新技术系列图书

能源革命与绿色发展丛书

统一电能质量调节器及其 无源控制

王久和 孙 凯 张巧杰 编著

机械工业出版社

本书系统地论述了统一电能质量调节器（UPQC）的结构、原理及无源控制策略。

本书分为6章。第1章介绍了电能质量的概念、标准及控制技术；第2章论述了UPQC的分类、拓扑结构、工作原理及其功率流动特性；第3章论述了UPQC补偿量检测原理及检测方法；第4章论述了UPQC两电平、三电平、九开关及模块化多电平逆变器的PWM算法；第5章首先论述了UPQC控制策略概况、无源控制基础，之后基于EL或PCHD模型研究了两电平、三电平及模块化多电平UPQC无源控制策略；第6章首先建立了基于傅里叶级数的UPQC数学模型，之后进行了UPQC多频无源控制理论与实验研究。

本书可供从事电能质量控制、电力电子、非线性控制理论应用的科研和工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业研究生、教师的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

统一电能质量调节器及其无源控制/王久和，孙凯，张巧杰编著. —北京：机械工业出版社，2018.9

（电力电子新技术系列图书 能源革命与绿色发展丛书）

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-60425-9

I. ①统… II. ①王… ②孙… ③张… III. ①电能-质量控制-研究
②电能-自动控制-研究 IV. ①TM60

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第156144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：罗莉 责任编辑：罗莉 韩静

责任校对：陈越 封面设计：马精明

责任印制：张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·15.25印张·306千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-60425-9

定价：79.00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

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

第2届
电力电子新技术系列图书
编辑委员会

主任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康 勇 李崇坚 杨 耕

委员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬 陈 坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭 宏 郭世明 康 勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨 耕 杨 旭

查晓明 张 波 张 兴 张承慧 张卫平

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周 波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨 旭 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义，电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用，以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术，几乎应用于科技、生产、生活各个领域：电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪，电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用，它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用已从用电扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来，也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，电力半导体器件性能不断提高，并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件，新的技术和应用不断涌现，其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应，从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套“电力电子技术丛书”，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际，以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

随着现代工业的进步,各种新能源(如光伏、风电等)的利用、电力电子装置的应用、电力系统的电力电子化等都会对电能质量产生不同程度的影响,同时也会对电网、电力用户产生影响,严重时还会影响用户电气设备的性能及电网运行的安全性。因此,电能质量控制一直是国内外学者研究的热点。1996年,日本学者H. Akagi提出了统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)的概念,将串联逆变器(补偿器)和并联逆变器(补偿器)组合在一起形成UPQC。虽然UPQC具有高成本、复杂的结构与控制,但其能够几乎全部抑制电能质量问题,成为改进电能质量(Power Quality, PQ)的最具吸引力的方案。决定UPQC性能的因素包括:开关器件、拓扑结构、PWM调制及控制策略。开关器件及拓扑结构属于UPQC硬件范畴,PWM调制及控制策略属于软件范畴。因此,在开关器件及拓扑结构一定的情况下,PWM调制策略决定了UPQC的波形质量及工作效率,控制策略决定了UPQC的稳态与动态性能。

从运行角度看,工业上更注意UPQC的稳态与动态性能指标。因此,UPQC控制策略研究是提高UPQC性能指标的重要途径。

UPQC控制策略传统上采用基于线性模型的PI控制器,控制结构为多环级联结构。由于PI控制器难以保证UPQC具有优秀的动态性能以及大范围工作的稳定性,为此,针对UPQC的非线性特点,国内外学者采用非线性控制理论研究UPQC的控制问题,期待提高UPQC的性能,如反馈线性化、重复控制、单周期控制、滑模变结构理论等。上述UPQC非线性控制策略都是从不同角度提高UPQC的性能,没有从根本上解决UPQC控制的实质问题,存在一些不足,如反馈线性化控制策略需要全状态可测量及精确抵消动态,引入控制器奇异性,对参数的依赖性大,控制律复杂;滑模变结构控制策略存在抖振问题,需解决好到达滑动模态之前的趋近率。对此,Ortega等学者将无源控制理论引入电力电子技术装置控制中。无源控制理论是从系统的能量属性研究系统的控制问题,寻求与被控制量相关的能量函数,设计的无源控制器可使能量函数按期望的能量函数分布,从而达到控制目的;因此,无源控制属于被控系统的实质控制。UPQC无源控制的优点是在保证稳定的前

前提下，研究 UPQC 的控制性能。利用无源控制理论设计的系统控制器可实现系统的全局稳定性，无奇异点问题，对系统参数变化及外来扰动有较强的鲁棒性，是一种本质上的非线性控制方法。因此，无源控制理论在 UPQC 控制中的应用有着良好的前景。

由于 UPQC 的数学模型可表示欧拉-拉格朗日 (Euler-Lagrange, EL) 或端口受控的耗散哈密顿 (Port Controlled Hamiltonian with Dissipation, PCHD) 模型，并具有无源性，则可进行 UPQC 无源控制器设计，已成为提高 UPQC 的稳态与动态性能指标的有效途径。为促进无源控制理论在 UPQC 控制中的应用，作者根据对无源控制理论的理解及其在 UPQC 控制中的应用研究，结合国内外专家学者的研究成果，尝试编写了本书。希望本书能够达到抛砖引玉、提升国内广大学者对无源控制理论在 UPQC 控制中应用的兴趣，进一步拓宽无源控制理论的应用领域。

本书分为 6 章。第 1 章介绍了电能质量的概念、标准及控制技术；第 2 章论述了 UPQC 的分类、拓扑结构、工作原理及其功率特性；第 3 章论述了 UPQC 补偿量检测原理及检测方法；第 4 章论述了 UPQC 两电平、三电平、九开关及模块化多电平逆变器的 PWM 算法；第 5 章首先论述了 UPQC 控制策略概况、无源控制基础，之后基于 EL 或 PCHD 模型研究了两电平、三电平及模块化多电平 UPQC 无源控制策略；第 6 章首先建立了基于傅里叶级数的 UPQC 数学模型，之后进行了 UPQC 多频无源控制理论与实验研究。本书第 1、2、5、6 章由王久和编写，第 3 章由孙凯编写，第 4 章由张巧杰编写，全书由王久和统稿。

在本书编写过程中，哈尔滨工业大学徐殿国教授、北京交通大学郑琼林教授、武汉大学查晓明教授、华中科技大学段善旭教授提出许多有益的建议，使本书的内容编写和选取更加合理，保证了本书的质量和科学性。本书的出版得到了北京市自然科学基金重点项目 (KZ201511232035) 和国家自然科学基金项目 (51477011) 的支持和资助。

本书除选用了部分国内外学者的统一电能质量调节器的研究成果外，还选用了研究生慕小斌、郑成才和祝贺的研究成果，在此表示衷心的感谢。

由于本人的写作能力和学术水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者给予批评指正。

王久和

2018 年 7 月于北京

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电能质量	1
1.1.1 电能质量及其分类	1
1.1.2 电能质量标准	4
1.1.3 引起电能质量变化的原因	9
1.2 电能质量控制技术	11
1.2.1 无功补偿器	12
1.2.2 动态电压恢复器	14
1.2.3 有源电力滤波器	15
1.3 统一电能质量调节器	16
1.3.1 UPQC 的基本拓扑结构	16
1.3.2 UPQC 的基本原理	17
第 2 章 UPQC 拓扑结构与工作原理	19
2.1 UPQC 分类	19
2.1.1 按逆变器类型分类	19
2.1.2 按电源系统分类	19
2.1.3 按逆变器位置分类	19
2.1.4 按补偿方式分类	20
2.2 UPQC 拓扑结构	21
2.2.1 单相 UPQC 拓扑结构	21
2.2.2 三相 UPQC 拓扑结构	23
2.2.3 不同系统结构的 UPQC	25
2.3 UPQC 工作原理	34
2.3.1 UPQC-P 的工作原理	35

2.3.2	UPQC-Q 的工作原理	35
2.3.3	UPQC-VA _{min} 的工作原理	36
2.3.4	UPQC-S 的工作原理	36
2.4	UPQC 功率特性	37
2.4.1	UPQC 功率描述	37
2.4.2	UPQC 功率流动分析	38
2.5	其他类型 UPQC 拓扑结构及工作原理	41
2.5.1	九开关 UPQC 拓扑结构及工作原理	41
2.5.2	十开关 UPQC 拓扑结构及工作原理	43
2.5.3	无串联变压器 UPQC 拓扑结构及工作原理	45
第3章	UPQC 补偿量检测方法	49
3.1	补偿量检测研究概述	49
3.1.1	补偿量检测方法	49
3.1.2	基于瞬时无功功率理论的补偿量检测方法	50
3.2	补偿量检测原理	52
3.2.1	基于瞬时无功功率理论的补偿量检测原理	52
3.2.2	i_p - i_q 检测法原理	54
3.2.3	dq0 检测法原理	55
3.3	常用补偿量检测方法	58
3.3.1	自适应检测方法	58
3.3.2	基于神经网络的检测方法	66
3.3.3	基于小波变换的检测方法	69
3.3.4	基于 FBD 的检测方法	70
3.3.5	SRF 谐波检测法	74
3.4	其他补偿量检测方法	76
3.4.1	三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测	76
3.4.2	电压畸变和不平衡状态下无锁相环检测方法	78
3.4.3	基于空间矢量的基波正负序及谐波分量实时检测方法	84
第4章	UPQC 逆变器 PWM 算法	90
4.1	三相两电平电压型 PWM 逆变器 SVPWM 算法	90
4.1.1	电压型 PWM 逆变器空间矢量描述	90
4.1.2	电压型 PWM 逆变器 SVPWM 算法	91
4.2	三相三电平电压型 PWM 逆变器 SVPWM 算法	95
4.2.1	三电平 T-NPC 型电压型 PWM 逆变器工作原理	95
4.2.2	三电平 T-NPC 型电压型 PWM 逆变器 SVPWM 算法	98
4.3	九开关逆变器运行模式及调制算法	110

4.3.1	九开关逆变器运行模式	110
4.3.2	九开关逆变器调制算法	111
4.4	模块化多电平逆变器 PWM 算法	114
4.4.1	模块化多电平逆变器 PWM 算法概述	114
4.4.2	模块化多电平逆变器 CPS-PWM 算法	116
4.4.3	模块化多电平逆变器 LSC-PWM 算法	117
第 5 章	UPQC 时域无源控制	119
5.1	UPQC 控制概述	119
5.1.1	间接控制	119
5.1.2	直接控制	123
5.1.3	UPQC 控制策略分析	124
5.1.4	UPQC 控制策略研究趋势	126
5.2	无源控制基础	127
5.2.1	稳定性概念	127
5.2.2	系统的无源性	128
5.2.3	基于 EL 模型的系统无源控制器	132
5.2.4	基于 PCHD 模型的系统无源控制器	134
5.3	两电平 UPQC 无源混合控制	139
5.3.1	UPQC 基本数学模型	139
5.3.2	基于 EL 模型的 UPQC 无源混合控制	142
5.3.3	基于 PCHD 模型的 UPQC 无源混合控制	151
5.4	三电平 UPQC 无源混合控制	153
5.4.1	三电平 UPQC 基本数学模型	153
5.4.2	基于 EL 模型的三电平 UPQC 无源混合控制	159
5.4.3	基于 PCHD 模型的三电平 UPQC 无源混合控制	166
5.5	五电平 MMI-UPQC 无源控制	168
5.5.1	五电平 MMI-UPQC 拓扑结构	168
5.5.2	五电平 MMI-UPQC 数学模型	169
5.5.3	五电平 MMI-UPQC 无源混合控制	170
5.6	带有光伏储能的 MMI-UPQC 无源控制	175
5.6.1	带 PV 储能型 MMI-UPQC 的拓扑结构	175
5.6.2	基于 PCHD 模型的带 PV 储能型 MMI-UPQC 的无源控制	176
5.6.3	基于中断补偿及子模块预充电控制	177
5.6.4	仿真研究	179
第 6 章	UPQC 多频无源控制	183
6.1	基于傅里叶级数的 UPQC 数学模型	183

6.1.1 傅里叶级数	183
6.1.2 UPQC 数学模型	185
6.2 UPQC 多频无源控制	190
6.2.1 并联逆变器的多频无源控制器	190
6.2.2 串联逆变器的多频无源控制器	198
6.3 UPQC 多频无源控制实验研究	202
6.3.1 UPQC 实验平台及参数	202
6.3.2 并联逆变器实验研究	205
6.3.3 串联逆变器实验研究	210
6.3.4 UPQC 综合实验	215
参考文献	223

第1章

绪 论

1.1 电能质量

1.1.1 电能质量及其分类

1.1.1.1 电能质量的概念

电能质量 (Power Quality, PQ) 涵盖了电磁干扰现象, 一般意义上是指优质的电能; 从工程实用角度看, PQ 主要包括电压质量和电流质量。

(1) 电压质量

电压质量为实际电压与理想电压之间的偏差, 它可以反映供电部门向用户分配的电力是否合格。电压质量包括电压偏差、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

电流质量为实际电流与理想电流之间的偏差, 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。

电能质量要满足电力用户的需求, 则电力用户对电能质量的衡量标准来说占有优先的位置。因此, 电能质量可定义为: 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, 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^[1]。

1.1.1.2 电能质量的分类

对于电能质量可按电磁现象及相互干扰的途径和频率特性分类, 国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 关于引起电磁扰动的基本现象分类见表 1.1.1。

电能质量也可按电磁现象的特性参数分类, 电气和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 按电磁干扰现象的特性参数对电能质

量分类见表 1.1.2。

表 1.1.1 IEC 按电磁扰动的基本现象对电能质量分类

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)		磁场
	电压波动	辐射型高频现象	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	
	交流电网中的直流成分	核电磁脉冲	
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 1.1.2 IEEE 按电磁干扰现象的特性参数对电能质量分类

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	1μs 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	20μs	0~8p.u.
		高频	0.5~5MHz	5μs	0~4p.u.
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%		
波形畸变	直流偏置		稳态	0~0.1%	
	谐波	0~100th	稳态	0~20%	

(续)

类别	典型频谱	典型持续时间	典型电压幅值	
波形畸变	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		

表 1.1.2 中有关类别说明如下:

① 冲击性瞬变现象: 冲击性瞬变是某一稳态条件下, 电压、电流非工频的、单极性的突然变化现象。通常用上升和衰减时间表示, 也可通过其频谱成分表示。

② 振荡瞬变现象: 振荡瞬变是在稳态条件下, 电压、电流的非工频、有正负极性的突然变化现象。对于迅速改变瞬时极性的电压和电流振荡问题, 常用其频谱成分(主频率)、持续时间和幅值大小描述其特性。

③ 短时间电压变动: 短时间电压变动包括电压暂降(sags)、暂升(swell)和电压中断现象。电压暂降是指工频条件下电压方均根值减少到 0.1~0.9p. u. 之间, 持续时间为 0.5 周波~1min 的短时间电压变动现象。电压暂升是指工频条件下电压方均根值上升到 1.1~1.8p. u. 之间, 持续时间为 0.5 周波~1min 的短时间电压变动现象。电压中断是供电电压降低到 0.1p. u. 以下, 持续时间不超过 1min 时, 可认为出现了短时电压中断现象。

④ 长时间电压变动: 长时间电压变动是指在工频条件下电压方均根值偏离额定值, 持续时间超过 1min 的电压变动现象。持续中断是指供电电压迅速下降到 0, 持续时间超过 1min。欠电压是指工频条件下交流电压方均根值降低, 小于额定值的 90%, 持续时间超过 1min 的电压变动现象。过电压是指工频条件下交流电压方均根值升高, 超过额定值的 10%, 持续时间超过 1min 的电压变动现象。

⑤ 电压不平衡: 电压不平衡定义为三相电压(或电流)的平均值的最大偏差, 用该偏差与平均值的百分比表示。

⑥ 波形畸变: 波形畸变是指电压或电流波形偏离稳态工频正弦波形的现象, 包括直流偏置、谐波、间谐波、陷波及噪声。直流偏置是指交流系统中出现的直流电压或电流。谐波是指频率为供电系统设计运行频率(如工频 50Hz)整数倍的电压或电流, 可用总谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)表示。间谐波频率为供电系统设计运行频率(如工频 50Hz)非整数倍的电压或电流, 表现为离散频谱或宽带频谱。陷波是指电力电子装置在正常工作情况下, 交流输入电流从一相切换到另一相时产生的周期性电压扰动, 在 GB/T 10236—2006 标准中用“缺口”表示。噪声是指带有低于 200kHz 宽带频谱, 混叠在电力系统的相线、中性线或信号线中的有害干扰信号。

⑦ 电压波动：电压波动是指电压包络线有规则的变化或一系列随机电压波动，其幅值不超过有关标准规定值。

⑧ 工频变化：工频变化是指电力系统基波频率偏离正常值的现象。

1.1.2 电能质量标准

电能质量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技术规范，是实施电能质量管理、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。为此，国内外制定并颁布了一系列电能质量标准，如国家标准 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》、GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》、GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》、GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》、GB/T 12326—2008《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》。

最主要有 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》、GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》、GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》、GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率偏差》、GB/T 30137—2013《电能质量 电压暂降与短时中断》、GB/T 24337—2009《电能质量 公用电网间谐波》这六大电能质量标准。

1.1.2.1 供电电压偏差标准

(1) 术语与定义

① 系统标称电压：用以标志或识别系统电压的给定值。

② 供电点：供电部门配电系统与用户电气系统的连接点。

③ 供电电压：供电点处的线电压或相电压。

④ 电压偏差：实际运行电压对系统标称电压的偏差相对值，以百分数表示，即

$$\text{电压偏差}(\%) = \frac{\text{电压测量值} - \text{系统标称电压}}{\text{系统标称电压}} \times 100\% \quad (1.1.1)$$

(2) GB/T 12325—2008 规定的供电电压偏差

GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》^[2]适用于交流 50Hz 的电力系统在正常运行条件下供电电压对系统标称电压的偏差。35kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%，20kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ ，220V 单相供电电压偏差为标称电压的 $+7\%$ 、 -10% 。

1.1.2.2 公共电网谐波标准

(1) 术语与定义

① 基波分量：对周期性交流量进行傅里叶级数分解，得到频率与工频相同的分量。

② 谐波分量：对周期性交流量进行傅里叶级数分解，得到频率为基波频率大

于 1 整数倍的分量。

③ 谐波次数：谐波频率与基波频率的整数比。

④ 谐波含量：从周期性交流量中减去基波分量后所得的量。谐波电压含量 U_H 为

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (1.1.2)$$

谐波电流含量 I_H 为

$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1.1.3)$$

⑤ 谐波含有率 (Harmonic Ratio, HR)：周期性交流量中含有的第 n 次谐波分量的方均根值与基波分量的方均根值之比，用百分数表示。

第 n 次谐波电压含有率用 HRU_n 表示，即

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (1.1.4)$$

式中， U_n 为第 n 次谐波电压方均根值； U_1 为基波电压方均根值。

第 n 次谐波电流含有率用 HRI_n 表示，即

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (1.1.5)$$

式中， I_n 为第 n 次谐波电流方均根值， I_1 为基波电流方均根值。

⑥ 总谐波畸变率 THD ：周期性交流量中的谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比，用百分数表示；电压总谐波畸变率用 THD_u 表示，即

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (1.1.6)$$

电流总谐波畸变率用 THD_i 表示，即

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (1.1.7)$$

⑦ 谐波源：向公用电网注入谐波电流或在公用电网中产生谐波电压的电气设备。

⑧ 短时间谐波：冲击持续的时间不超过 2s，且两次冲击之间的间隔时间不小于 30s 的电流所含有的谐波及其引起的谐波电压。

(2) GB/T 14549—1993 规定的公用电网谐波

GB/T 14549—1993 《电能质量 公用电网谐波》^[3] 适用于交流额定频率为 50Hz、标称电压为 110kV 及以下的公用电网。公用电网谐波电压（相电压）限值见表 1.1.3，公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）限值见表 1.1.4。