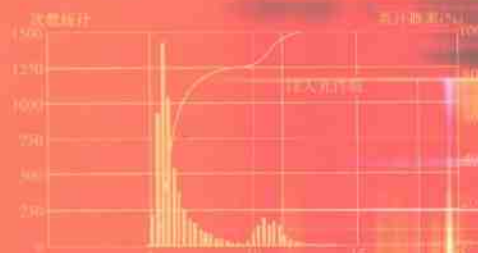
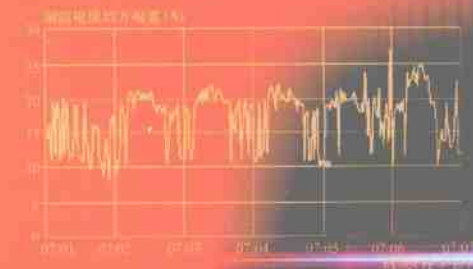


许遐 编著

公用电网谐波 的评估和调控



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

公用电网谐波

的评估和调控

ISBN 978-7-5083-7351-5



9 787508 373515 >

定价：25.00 元

销售分类建议：电力工程 / 供用电

公用电网谐波 的评估和调控

许遐 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是在国家标准《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549 和国外有关标准的基础上编写的,书中一方面阐述电能质量的定义及有关电能质量公用电网谐波标准和限值的意义和应用,指出电能质量标准和限值与电磁兼容性标准和限值的联系及区别;另一方面,为保证公用电网的安全经济运行,维护全体客户和供电公司的共同利益,重点阐明在电能质量管理中,供电公司和用电客户必须认真承担的基本责任和权利。本书共分为 15 章,主要包括公用电网谐波管理的基本职责和限值,有关公用电网谐波管理的国家标准和法规,公用电网谐波的测量及其监测设备、高次谐波发生源的查找,各类非线性负荷接入公用电网时高次谐波的评估方法,电力系统使用非线性设备的谐波评估,公用电网高次谐波的抑制及电力滤波器的设计,电能质量复合调控装置以及公用电网滤波补偿设备的经济效益分析等。

本书适合于供电公司的用电策划、供电设计、生产运行、用电营销等部门和各类用电客户的供用电部门的工作人员阅读;也适合于高等院校有关专业的师生及滤波补偿设备制造业的工程技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

公用电网谐波的评估和调控 / 许遵编著. —北京: 中国电力出版社, 2008
ISBN 978 - 7 - 5083 - 7351 - 5

I. 公… II. 许… III. 电力系统 - 谐波 - 研究 IV. TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 082086 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 9 月第一版 2008 年 9 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 11 印张 290 千字

印数 0001—3000 册 定价 25.00 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

随着国民经济各行业现代化的发展,以各种各样电力电子设备为主的大量非线性负荷的投入运用,公用电网的谐波畸变将日益增高,严重影响到电网的电能质量。公用电网谐波是电能质量的一项重要指标。国家标准《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549 自颁布以来,为公用电网的谐波管理提供了共同遵守的法则,成为各部门、各地区进行公用电网谐波管理的基础和依据。为了保证公用电网的电能质量,防止高次谐波的超标对供用电双方电气设备所产生的危害,必须加强对高次谐波产生源的监督管理,对非线性负荷的接入进行评估。评估就是根据供电系统的运行方式和结构参数,以及非线性负荷本身的谐波特性,采取科学正确的方法,来评估其接入系统后对电能质量的影响,计算出其注入的谐波电流是否超过按国家标准核定的允许值,同时校核系统谐振的条件,以及是否需采用滤波调控措施等。谐波评估所包含的问题通常与供电公司和用电客户密切相关,是一个需要供用电双方互相合作才能完成的任务,有时还需要产生谐波的设备制造商的协作。

要保证评估结论的准确性,一般需要准确无误地建立系统组成元件的数学模型。由于在电力系统和客户用电设备中,可能存在各种不同的运行方式和非理想的运行条件,因而要准确评估也有一定的难度。评估工作人员经常遇到的困难,往往在于得不到准确完整的评估所需的背景资料,有些参数总是不能在实际测量中取得,而客户和电网公司的有关人员需要对需要协助提供何种评估的基础资料有时也不得要领。有些客户和相关人

员对有关电能质量国家标准规定的谐波管控限值的认识还存在一些差距,以及如何选择调控措施和滤波器的设计原则等,有关此类实际工作中遇到的问题,本书尽力从实践中举例进行分析探讨。

本书的第1章和第2章,主要阐述有关谐波限值指标的意义和应用,包括公用电网高次谐波管理的基本职责和限值、有关国家标准和法规,说明电能质量国家标准和电磁兼容性国家标准及它们规定限值的区别和联系;第3章和第4章主要介绍公用电网高次谐波的测量及其监测设备和高次谐波发生源的查找;第5章至第10章主要叙述各种非线性负荷接入公用电网时高次谐波的评估方法;第11章主要叙述电网高次谐波的预防和各种调控措施;第12章和第13章主要叙述电力滤波器的设计技术原则和工程实例;第14章简要介绍新型电能质量复合调控装置的工作原理和设计要素;第15章叙述公用电网滤波补偿装置经济效益的分析方法。

本书作者长期从事电能质量的研究和管理工作。在电力系统高次谐波的测试分析和补偿治理中,成功研制了系列化的监测分析仪器和设备,设计和开发了多种类型的高次谐波滤波补偿成套装置;多次主持分析电网中出现的电能质量问题;参加有关电能质量监督管理规定和国家标准的制订;先后完成了电力工业部、国家电网公司等下达的华北地区各铁路线电铁牵引站及各类大型非线性负荷,接入电网的谐波评估及治理措施的设计或论证过百例。曾应邀到各省市讲课,普及和推广电能质量有关的专业技术和管理知识,交流电能质量管理工作和应用调控措施的经验。本书是作者多年工作经验和讲稿的汇集。为了增强可读性和实效性,在各章节中,尽量避开一些繁琐的数学表达方式。本书适合于电网公司和用电客户的电能管理、专业技术工程师和电能质量调控设备工程设计工程师,以及有关

专业的大专学校学生阅读参考。

借本书出版的机会，作者在此谨向我国电网谐波管理工作的开拓者，原电力工业部生产司吴竞昌、曲涛等老一代工程技术专家，对我国电网谐波管理工作的认真负责和作出的努力，表示崇高的敬意！

书中错误之处，请批评指正。

编 著 者

2008 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 公用电网高次谐波管理的基本职责和限值	1
1.1 电网高次谐波的产生	1
1.2 谐波管理的基本职责	2
1.3 谐波管理的限值	5
1.4 小结	11
第 2 章 公用电网谐波的国家标准和法规	12
2.1 电能质量标准与电磁兼容性标准	14
2.2 对公用电网进行电能质量管理的主要根据是电能 质量标准	20
2.3 小结	24
第 3 章 公用电网谐波的测量及其监测设备	25
3.1 电网谐波测量的主要参数	25
3.2 谐波测量技术	31
3.3 谐波测量仪器的种类及主要技术性能	42
3.4 现场谐波测量要注意的几个问题	47
第 4 章 公用电网谐波发生源的查找	52
4.1 公用电网谐波发生源的查找方法	52
4.2 谐波功率流的分析和谐波功率流向的监测	54
4.3 电网谐波源的侦查及谐波功率流方向的连续监测	65
4.4 谐波功率流向计的特点及其技术性能	67
4.5 小结	68
第 5 章 非线性负荷接入公用电网时高次谐波的评估方法	69
5.1 评估的一般程序	71
5.2 不同性质负荷的评估	76

5.3	评估中要注意的问题	77
第6章	大型工业设备接入系统的谐波评估	82
6.1	准备评估所需的背景资料	83
6.2	计算国家标准规定的谐波电流注入允许值和谐波电压限值	88
6.3	计算客户在 PCC 上注入的谐波电流及公共母线电压谐波畸变率	89
6.4	谐波滤波和无功补偿措施	91
6.5	几种重要类型负荷的谐波特征	94
第7章	电铁牵引站接入供电系统时的谐波评估	99
7.1	评估所需的背景数据及有关资料	100
7.2	电气化铁道谐波的计算	102
7.3	评估报告的主要内容及工程实例	111
第8章	商业用电负荷接入供电系统的谐波评估	117
8.1	商业设备中的主要电力负荷类型	118
8.2	典型商业建筑中供电线路的谐波电流	122
第9章	居民住宅区用电负荷接入系统的谐波评估	133
9.1	住宅负荷的谐波特性及评估标准	134
9.2	单一低压电气设备的谐波电流限值	135
9.3	离散谐波源的相互抵消	138
9.4	主要住宅设备的谐波特性	141
9.5	实例——某居民区供热中心变电所接入系统电能质量评估	145
第10章	电力系统中的非线性设备的谐波评估	155
10.1	电力系统中的非线性设备的谐波评估	157
10.2	静止无功补偿器 (SVC) 的应用	158
10.3	可控串联补偿装置 (TCSC) 的应用	161
10.4	高压直流输电换流器 (HVDC) 的应用	165
第11章	公用电网高次谐波的调控	169
11.1	常用电力设备的谐波调控措施	170

11.2	无源电力滤波器 (PPF)	175
11.3	无源电力滤波器的简化设计流程	179
11.4	有源电力滤波器 (APF)	182
第 12 章	电力滤波器 (PPF) 的设计	214
12.1	电力滤波器的设计条件	215
12.2	电力滤波器的安装位置	222
12.3	电力滤波器的接线形式	226
12.4	已有电容器组的利用	227
12.5	电力滤波器的性能指标及其各元件的选择	227
12.6	电力滤波器的操作控制	241
12.7	电力滤波器的保护	243
12.8	电力滤波器的设计步骤	248
第 13 章	电力滤波器 (PPF) 的应用实例	258
13.1	电弧炉滤波器	258
13.2	电弧炉滤波器的设计实例	260
13.3	轧钢机滤波器	279
13.4	轧钢机滤波器的设计实例	279
第 14 章	电能质量复合调控装置	302
14.1	静止无功发生器 (SVG)	303
14.2	动态电压调节器 (DVR)	305
14.3	有源电力滤波器 (APF)	306
14.4	电流质量复合调控装置	310
14.5	电流质量复合调控装置的仿真运行	320
14.6	电流质量复合调控装置的运行特性	321
14.7	装置的调试	323
第 15 章	公用电网滤波补偿装置经济效益的分析	325
15.1	谐波调控及用电收费	325
15.2	滤波补偿装置经济效益的分析	327
15.3	工程实例计算	332
参考文献		340

第1章

公用电网高次谐波管理的基本职责和限值

公用电网谐波是电能质量的一项重要指标,它反映了电力系统中谐波污染的程度,直接影响到电网和用户电气设备的正常安全运行。接入电网的各种整流设备和其他谐波源设备所产生的谐波电流注入电网,是使供电电压正弦波形产生畸变、电能质量下降的主要原因。为保证广大用户的电能质量,确保电网的安全经济运行,保障供用电双方的合法权益,用电客户、供电公司的管理干部和技术人员必须明确自身所应担负的谐波管理基本职责及国家标准规定的有关管控限值。

1.1 电网高次谐波的产生

谐波是一个周期量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍。谐波的幅值大小和谐波相对于基波的相位关系都是影响这个周期量的重要因数。在声学中,各种谐波有规则的相加可以构成一首动听的乐曲和声;在电力系统中,电压谐波的幅值大小和谐波相对于基波的相位关系都是影响供电系统电压正弦波形畸变程度的主要因数。

电力系统中发电机、变压器及输电线路在正常稳态运行时,是不会产生显著的谐波电流的,因此,它们本身不会造成电网中供电电压的畸变。电网中主要的谐波产生源可分为两大类:

(1) 含有半导体非线性元件的设备,如各类整流设备、交

直流换流设备、变流器、逆变器、变频器、晶闸管控制器等。

(2) 含有电弧和铁磁非线性元件的设备, 如电弧炉、电焊机、荧光灯、铁磁谐振设备等。

产生电力谐波的行业和主要的非线性设备有:

1) 钢铁、冶金行业: 电弧炉、精炼炉、直流炉、轧机、中频炉、高频炉、各种电力电子设备。

2) 机械、石油、化工、轻工行业: 轧制机械、变频调速装置、电解槽、整流器、换流设备、电焊机、感应加热炉。

3) 铁道、矿山、水厂行业: 牵引机车、升降机、调速拖动装置、变频调速装置、直流充电机、消磁机、变频驱动装置。

4) 车站、机场、码头、电信、广播行业: 照明调光设备、直流电源、不间断电源、交直流逆变器、射频发射机、通信交换机、变频电源。

5) 商业建筑及居民区: 照明调光设备、直流电源、不间断电源、变频电源及家用电器。

1.2 谐波管理的基本职责

电网是统一的整体, 所有并网的发、送、供电设备和用电设备都是紧密地结合在一起, 各供电(电力)公司及所有并网的发电厂、用电客户都有谐波管理的责任和权利。

公用电网谐波的管理, 对供电公司和用电客户来说, 其承担的责任和权利应该是对等的。供电公司的权利是根据国家及主管部门颁发的有关条例、标准和规定, 监督各种谐波源设备(包括电网和客户的电力设备)的接入和注入电网的谐波电流, 管理和防治产生谐波污染的电气设备对电能质量的破坏和干扰, 使电网的电压谐波和总畸变率总是处在国家标准允许的范围内, 以保证电网和用电设备的安全经济运行。供电公司的责任是保证向用电客户提供优质的电能, 其供电电压所含各次谐波分量和总畸变率总是不超出国家标准规定的限值, 以满足用电客户

在生产和生活各方面的用电要求。

对用电客户来说,任何一个用电客户都有权利来监督供电公司在公共连接点的供电电压所含各次谐波分量和总畸变率是否符合国家标准规定的限值要求,以及电能质量的其他指标是否合格,以保证用电客户自身的合法利益。当然,任何一个用电客户都有责任保证对于接入谐波源性质的用电设备,应同时采取滤波补偿措施或降低谐波电流注入的设计,以使在公共连接点处注入的谐波电流总是不超出国家标准规定的注入允许值。

1.2.1 供电公司基本职责

公用电网是向多个客户输送和分配电能的系统。供电公司应遵照国家的要求,负责在运行条件下认真控制系统的骚扰电平。供电公司基本职责是要对公共连接点上的电压谐波及总畸变率负责。对于大多数系统,不同电压等级有不同的要求,对0.38kV及以下的电压等级,电压总畸变率应小于5%;对6~10kV的电压等级,电压总畸变率应小于4%;对35~66kV的电压等级,电压总畸变率应小于3%;对110kV及以上的电压等级,电压总畸变率应小于2.0%。这就是说,供电公司必须和客户一起,根据国家标准来确定系统可以接受的电压畸变水平的共同条件,使所有客户都满足注入谐波电流允许值的要求。因此,供电公司在核定用电客户报装供电方案的同时,应根据电网的最小方式下短路容量和用户的报装协议容量,下达用电客户在公共连接点处注入谐波电流允许值通知书,提醒用电客户进行谐波评估或采取滤波补偿措施。用电客户谐波源新设备投入时应同步投入治理措施,并进行背景谐波测试及谐波实测复核。

对已有用电客户谐波源的管理,应逐步建立健全技术档案,并每年进行核查,内容应包括:

(1) 用电设备的容量及型式;

(2) 供电系统资料,包括主接线图,相关的变压器、电容器(或滤波器)组参数,短路容量等;

- (3) 设备的谐波电流设计值和实测值；
- (4) 公共连接点的谐波电压和电流实测值；
- (5) 该设备是否采取了滤波措施以及滤波效果分析。

以上资料由谐波源设备的所属用电客户负责提供。

当用电客户谐波源的谐波电流注入量超过标准时，应按照国家产生污染谁治理和就地治理的原则，签定谐波治理协议，限期逐步解决。协议中应明确谐波超标引起的电网或其他客户的事故由谐波源设备所属单位负责赔偿。对于限期不解决者，必要时采取限电措施。

在做电网扩建和改建设计时或电网的运行方式发生变化时，电力设计和运行部门应考虑谐波问题，防止产生谐波谐振或严重放大。在设计电容器组时，要进行谐波项目审查，即应根据连接点的电网参数，核算谐波谐振和放大的可能性，必要时通过实测背景谐波电压和谐波阻抗，进行详细核算，防止系统谐波谐振和放大。

1.2.2 客户基本职责

每一个用电客户都有权利得到合格的电能质量，故应对供电公司的供电电压质量进行监督；同时，都拥有在公共连接点处注入一定量的谐波电流的权利。GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》规定了客户在公共连接点处注入谐波电流允许值。规定的允许值是基于公共连接点处在不同电压等级的基准短路容量，当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时，还必须按照实际短路容量的大小进行换算；当同一公共连接点处有多个客户时，还要按照每个客户所报装的协议容量与其公共连接点处的供电设备容量之比进行分配。即每一个客户注入电网的谐波电流允许值按该客户供电协议书中的协议容量与电网公共连接点处的供电设备总容量之比来分配。这是因为客户的协议容量是与其对电力系统投资的份额有联系的。由此可见，客户谐波电流允许值的分配计算存在一种经济关系，这种允许值限定对于每一个客户来说都是比较合理的。试想一下，如果

不管客户大小，不考虑按总负荷容量的分配，对每一个客户都给予同样的权利，同样的谐波电流允许值，那么，对客户来说，就限制过严，分配不公。

客户注入公共连接点处的谐波电流允许值是根据电网谐波电压限值指标推算和制定的。但是，为什么对客户不能采用谐波电压限值来表示其权利呢？因为电网的谐波电压是由谐波源客户注入的谐波电流在系统谐波阻抗上产生的压降形成的，如果电力系统在公共连接点处的最小短路容量比较大，也就是说，电力系统结构上供电能力较强，其相应的系统谐波阻抗 Z_h 就比较小，要形成同一谐波电压值 U_h 所需注入的谐波电流 I_h 就较大，因而对这里的客户就有利得多，其关系式： $U_h = (\sqrt{3} \times Z_h \times I_h) / (10 \times U_n)$ （式中， U_n 为电网标称电压）。相反地，如果电力系统在公共连接点处的最小短路容量比较小，要形成同一谐波电压值 U_h 所需注入的谐波电流 I_h 就小得多，那么，对接入这里的客户就不利。还有，如果对客户采用谐波电压限值来表示其权利，那么就只有对早期接入电网的客户有利，随着公共连接点处谐波电压值的升高，后期才接入电网的新客户，可能要增加投资巨大的滤波补偿设备才能达到允许入网的要求。这将形成一种“先上先得利”的局面，显然是不公平的。尤其我国是发展中国家，各部门各行业发展快、变化大，用电需求量日新月异，如采用谐波电压限值来表示用电客户的权利，就有失公平和合理。

用电客户在拥有自身权利的同时，为保证公用电网的安全经济运行，维护其他客户和供电公司的共同利益，有责任保持在公共连接点处的谐波电流注入值低于供电部门规定的允许值；用电客户有责任选择减少谐波电流注入值的最佳方法和设计，并且与供电接入方案同步实施。

1.3 谐波管理的限值

由于现代工业的发展，接入电力系统的非线性负荷的容量

和数量迅速增长,因谐波引出的事故增多,根据大多数事后经验的总结,世界各国都先后制定了公用电网谐波的管理标准,或是导则、推荐书等。各个国家根据本地电网的结构和负荷分布情况,以及工业水平,制定各自国家的谐波管理的限值。谐波管理的限值至少要满足三方面的要求:

(1) 电力系统本身所构成的设备和连接部件要求把谐波限制在可以兼容的水平,否则,如无功补偿电容器、系统中的载波信号控制设备及使用波形点切换的继电保护装置等,将会首先受到破坏。

(2) 接入系统的广大客户要求供电公司提供的电源电压波形能够满足他们的特定要求。

(3) 保证电力系统的运行不会影响或骚扰其他系统,如电话网、通信网运行的要求。

GB/T 14549《电能质量 公用电网谐波》颁布以后,我们有一个限值和—个允许值,即谐波电压限值和谐波电流允许值。“限值”是对供电公司的要求,“允许值”是对用电客户的要求。这对谐波电压限值和谐波电流允许值,是我国目前进行公用电网谐波管理的唯一标准和依据。GB/Z 17652.4—2000《中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》“电磁兼容”指导性技术文件中,参照国际电工委员会(IEC)的一个第3类技术报告 IEC61000-3-6,从电磁兼容学出发,提出和定义了不同类型谐波限值的概念和名称,把谐波限值分成兼容值、规划值和注入值等不同的类型,本节主要从工程实际来说明这几个不同类型的谐波限值的具体内容和特征。

1.3.1 兼容值 (Compatibility Levels)

兼容值,就是兼容电平。谐波兼容值是用来协调组成供电网络的设备或由供电网络供电的设备本身发射谐波和抵抗谐波干扰能力的参考值,它是预期施加在指定条件下能正常运行的装置、设备或系统上最大的电压谐波畸变率。兼容值能很好地兼顾整个电网及所连设备发射谐波和抵抗谐波干扰两个方面的

特性,实现两者的统一。如果电网电压谐波畸变率超过相应的兼容值,大量的工程实践已经显示,电网中设备的事故将会突然增加,客户投诉也会突然上升。对用电设备进行抗扰度试验时,就以相应电压等级的兼容值为试验值的底值。

对于公用电网谐波的兼容值,国际电工委员会 IEC61000-2-2 和 IEC61000-2-12 分别规定了低压(400V)和中压(6.6~33kV)供电系统的电压谐波兼容值,其中电压总畸变率(THD)兼容值如表 1-1 所示。对于更高电压等级(66kV 及以上)供电系统的电压谐波兼容值,国际上还没有国际标准来规定。

表 1-1 IEC61000-2-2 和 61000-2-12 中电网
电压总畸变率(THD)兼容值

供电系统电压	400V	≤36.5kV
THD 兼容值(%)	8	8

2001 年英国电力协会在工程推荐书(Engineering Recommendation) G5/4 的附录中,用表格列出了 66kV 及以上电压等级供电系统的电压谐波兼容值,其中电压总畸变率(THD)兼容值如表 1-2 所示。

表 1-2 英国工程推荐书 G5/4 中电网电压
总畸变率(THD)兼容值

供电系统电压(kV)	400V	≤36.5	66~132	275~400
THD 兼容值(%)	8	8	5	3.5

兼容值是用时间和空间的概率分布来表示的,在空间上以整个供电系统的 95% 概率值为基础,在时间上以监测周期的 95% 概率值为基础。在确定一个系统或设备的兼容值时,不仅要考虑谐波在导体中的传导,而且还要考虑谐波在空间的辐射及耦合等途径。由于供电公司不可能在所有的时间中对电网的