

电网专业技术监督丛书

电能质量专业

主编 卜劲松 副主编 郭江涛 史立红



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网专业技术监督丛书

电能质量专业

主编 卜劲松 副主编 郭江涛 史立红

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《电网专业技术监督丛书》共有绝缘、继电保护、电测量、化学、电能质量、调度自动化、电力通信、环境保护及热工专业九个分册，系统地介绍了国家电网技术监督规定中要求的各项技术监督工作的目的、依据、监督项目、管理内容及相关基础知识。本丛书可作为从事电网工作的技术人员和管理人员的工作参考书，也可作为电网专业技术监督培训用书。

本书是电能质量专业分册，主要包括电能质量技术监督管理、电能质量监督基础知识、公用电网谐波的测量与评估、传统电能质量分析与改善、谐波抑制和无功功率补偿等内容。

图书在版编目 (CIP) 数据

电网专业技术监督丛书. 电能质量专业/卜劲松主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 10

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2171 - 7

I. ①电… II. ①卜… III. ①电网—技术监督②电能—质量控制—技术监督 IV. ①TM7②TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 202929 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)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 10 月第一版 2011 年 10 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 6.5 印张 164 千字

印数 0001—2000 册 定价 17.00 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

电网专业技术监督丛书 编委会

丛书主编：卜劲松

丛书副主编：郭江涛 史立红

丛书编委：陈永辉 李 罡 周迎秋 刘志福 李凤波
王化柱 魏宝林 刘勇军 于国良 肖荣国
张 力 张伯良 金镇山 朱学成 兰公煜

本册编写人员：吕飞孔

本册审核人员：徐冰亮

前 言

电网专业技术监督对输变电设备和电网的安全运行发挥着巨大作用。随着电网规模的扩大和电压等级的不断提高，特别是近年来随着输变电设备状态检修和隐患排查工作的开展和特高压设备的投入运行，电气设备监督工作的重要程度被提升到了一个新的高度。为使从事各专业的技术人员能够及时掌握输变电设备发展动态，掌握本专业法律法规及相关要求，提高监督管理和检测的水平，增强分析和判断的能力，黑龙江省电力有限公司抽调技术监督专业人员组成了“电网专业技术监督丛书编写小组”。在本丛书编写过程中，小组分别召开了十二次专题会议，统一思想，要求各分册既要突出本专业的特点，又要体现丛书的共同点；并邀请中国电力出版社及一些大专院校的老师多次进行培训，对法定计量单位，教材编写的格式，人名、地名、专有名词，图表及序号的编排等进行了规范的讲解。相关编写人员多次深入现场，使丛书的编写真正满足生产现场的实际需求。

本丛书分为绝缘、继电保护、电测量、化学、电能质量、调度自动化、电力通信、环境保护及热工专业九个分册。内容包括：“三级监督网络”的建设和作用，基建阶段、正常生产过程中、异常事件处理过程中的技术监督；电网设备状态检修、隐患排查过程中的技术监督及典型案例；对技术监督关口前移、闭环管理的原则进行案例分析；列出技术监督的标准、管理制度、必要的档案及记录并加以诠释；对技术监督的人员及资质、报表及总结格式及需制定的技术监督动态考核内容给出范例；对各专

业基层监督人员应知应会的基础知识、电气设备测试技术的要点及注意事项、输变电设备状态评价及隐患排查内容进行讲解。本丛书可作为从事电网工作的技术人员和管理人员的工作参考书，也可作为电网技术监督培训用书。

本书是《电网专业技术监督丛书》电能质量专业分册。主要对电网电能质量技术监督的内容及工具进行了阐述；对电能质量监督基础知识作了简单介绍；详细介绍了公用电网谐波的测量与评估；对传统电能质量分析与改善措施作了论述；介绍了谐波抑制和无功功率补偿原理、方法和案例。

在本书编写过程中，编者查阅了大量资料和文献，参考了许多专家的科研成果、公开发表的文章、正式出版的书籍和非正式出版的资料，引用了吴竞昌、肖湘宁、徐遐、王兆安、常焕俊、吕润馥等前辈的研究成果、试验数据和对某些重要问题的分析，谨在此向他们表示衷心的感谢！

本书由吕飞孔编写，徐冰亮审核。由于编者水平有限，编写时间仓促，疏漏和不当之处敬请广大读者同仁批评指正，编者将十分感谢！

目 录

前言

第一章 电能质量技术监督管理	1
第一节 电能质量技术监督概述	1
第二节 电能质量技术监督管理内容	13
第三节 电能质量技术监督管理工具	25
第二章 电能质量监督基础知识	32
第一节 电能质量的数学分析方法	32
第二节 波形畸变与电力谐波	47
第三节 电压波动与闪变	68
第三章 公用电网谐波的测量与评估	84
第一节 公用电网谐波的测量及其监测设备	84
第二节 公用电网谐波发生源的查找	94
第三节 非线性负荷接入公用电网的评估方法	98
第四节 风电场电能质量评估	110
第四章 传统电能质量分析与改善	119
第一节 供电电压偏差	119
第二节 电力系统频率偏差	138
第三节 电压三相不平衡	146
第五章 谐波抑制和无功功率补偿	154
第一节 无功补偿电容器和 LC 滤波器	156
第二节 静止无功补偿装置	179

第三节	静止同步补偿器 (STATCOM)	183
第四节	有源电力滤波器	189
参考文献	198

电能质量技术监督管理

第一节 电能质量技术监督概述

电能是一种具有广泛适用性的能源，可转换成其他能源形式，也可转换成在许多领域和场合所需要的各种电能形态。例如，电能可直接转换为热能、光能、机械能被消耗，也可先转换成非工频、非正弦的电能形态作为现代工业、现代通信、计算机技术和日常生活的基本动力源。

电能是一种经济实用、清洁方便且容易传输、控制和转换的能源形式。电能质量的好坏对电力系统的安全与经济运行，对保证产品质量和电气设备的安全运行与使用寿命有着重要的影响。同时，电是一种特殊商品，在发电、输电、配电、用电过程中同时完成，需要发电、供电、用电等环节共同保证质量。超出一定范围的频率或电压的偏差或波形的畸变，都会给电网的安全、经济运行等带来不良的影响。因此，电网运行中要将这些参数的偏差限制在允许的范围内，这样才能保证电能质量符合用户的需要。

一、电能质量技术监督的定义

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、三相不平衡、波形畸变、电压波动与闪变。

电能质量技术监督就是通过对电力系统有关管理部门和运行工况实施技术监督，督促有关部门和单位加强技术和运行管理，及时调整有关运行方式和采取相应措施，防止电气设备在运行期间由于电能质量下降而引发各类事故，保证各级电能质量符合各

项有关规定。因此，电能质量技术监督是保障电网安全、优质、经济运行，向用户提供优质的电能和维持全社会的正常用电秩序的一项重要措施。

二、供电系统运行与电能质量的关系

(一) 电能质量的基本要求

为保证电能安全经济地输送、分配和使用，理想供电系统的运行应具有如下基本特性：

(1) 以单一恒定的电网标称频率（我国采用 50Hz）、规定的若干电压等级（如配电系统一般为 220kV、66kV、10kV、380V/220V）和以正弦函数波形变化的交流电向用户供电，并且这些运行参数不受用电负荷特性的影响。

(2) 始终保持三相交流电压和三相负荷电流的平衡。用电设备汲取电能应当保证最大传输效率，即达到单位功率因数，同时各用电负荷之间互不干扰。

(3) 电能的供应充足，即向电力用户的供电不中断，始终保证电气设备的正常工作与运转，并且每时每刻系统中的功率供需都是平衡的。

上述理想供电系统的基本特性构成了供电运行对电能质量的基本要求，电能质量的基本要素是电压合格、频率合格和连续供电，如图 1-1 所示。

电压合格、频率合格和连续供电这三项质量指标相互间存在着紧密的依存和制约关系。由于用电负荷的变化、负荷特性的差异和随机性及电网的各种故障等多种因素，往往导致实际供电系统运行偏离理想状态，供电系统的频率和电压幅值不再保持恒定不变，三相电压出现不平衡，正弦波形发生畸变。为保证用电设备的正常工作和电力系统的安全

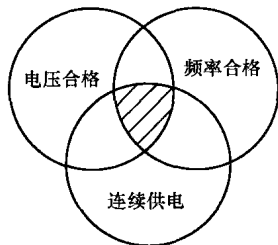


图 1-1 电能质量的基本要素

设备的正常工作和电力系统的安全

稳定运行，并考虑到供用电设备的电气设计额定值和供电电压的高低变化对电气设备的技术、经济指标的影响等因素，国家制订了相关电能质量标准。

(二) 电能质量的特征

(1) 电力系统的电能质量始终处在动态变化中。电能从发电生产到用户消耗是一个整体，电能量的流动始终处于动态平衡之中，并且随着电网结构的改变和负荷的变化，不同时刻、不同公共连接点，电能质量现象和指标往往是不同的，也就是说，整个电力系统的电能质量状态始终处在动态变化中。

(2) 电力系统是一个整体，其电能质量状况相互影响。电能不易储存，其生产、输送、分配和转换直至消耗几乎是同时进行的。很显然，在电力系统运行过程中，劣质电能是不可能更换的。电气连接将发、供、用电方构筑成一个整体，不论哪个环节引起电能质量问题，质量一旦达不到标准要求，都会对相关设备的安全运行构成威胁。许多情况下，电力系统中的某一实体往往表现为既是电能质量的破坏者，同时也是劣质电能的受害者。例如：2000年10月，神朔电气化铁路开通，电气化铁路运行经济、控制灵活、运力大、环境污染低。由于电铁牵引负荷是单相非线性的冲击负荷，它对电网电能质量污染严重，其大功率整流装置的非线性，产生很大的高次谐波，使电网电压波形产生严重畸变。单相供电牵引产生巨大的负序电流，引起三相供电的不平衡，供电大功率和冲击性，引起供电电压的波动和闪变；机车运行需大量的无功补偿及其不稳定性，造成无功补偿困难，电压偏移加大了运行经济性差。在神木330kV变电站投运前，向神朔电气化铁路供电的神木变电站110kV侧的负序电流、电压偏移及高次谐波都严重超标，2000年11~12月，神木发电公司两台发电机组被迫停运，损失发电量超过1亿kWh。

(3) 电能质量扰动具有潜在危险性与广泛传播性。虽然电能的基本形式简单，但其质量扰动的现象却是多种多样的，事故的诱发条件比较复杂，电能质量下降造成的对电力系统和用电设备

的损失有时并不立即显现，其危害与影响具有潜在性。另外，由于电力线为扰动提供了最好的传导途径，且传播速度快，电气环境污染波及面广，影响域广，其结果可能会大大降低与其相连接的其他系统或设备的电气性能，甚至使设备遭到损坏。可见，劣质电能的危害与影响具有快速传播性。

(4) 有些情况下用户是保证电能质量的主体部分。当电网输电电能作用于用电设备时，很可能会受到来自于用户作用的影响。因此，在某些问题的起因上，电能质量的下降是使用者影响的，而不是电力生产者或供应者。

(5) 控制和管理电力系统电能质量是一项系统工程。从整个电力系统来讲，保证优质电力生产和用户安全使用还要靠多方共同努力。因此要求设备制造厂商、电力部门、电力用户、标准制定部门、监督管理部门等协同合作，达成共识，制定统一的和可操作的适度质量标准，做到电能质量的责任与义务清晰，保护共享的电气环境，共同获得最大的生产效率和经济效益。

三、电能质量技术监督的目的

加强电网电能质量技术监督管理，目的是保证电力系统向用户提供符合国家电能质量标准的电能，对电力系统内影响电能质量的各个环节进行全过程的技术监督。

电能质量技术监督要贯彻“安全第一、预防为主”和超前防范的方针，按照依法监督、分级管理、行业归口的原则，对电网电能质量实施全过程、全方位的技术监督。保证电网安全、经济运行和电能质量，维护电气设备的安全使用环境，保护发、供、用各方的合法权益。电网电能质量技术监督是为了保证电网向用户提供不间断且符合国家电能质量标准的电力，对电网内影响电能质量的发电、供电、用电各环节进行必要的技术监督。因公用电网、并网发电企业或用户用电原因引起的电能质量不符合国家标准时，应按“谁污染，谁治理”的原则及时处理，并应贯穿于公用电网、并网发电企业及用电设施设计、建设和生产的全过程。

四、电能质量技术指标

(一) 频率偏差指标

根据 GB/T 15945《电能质量 电力系统频率偏差》，电力系统正常频率偏差允许值为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。当系统容量较小时，偏差值可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。用户冲击负荷引起的系统频率变动不得超过 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，根据冲击负荷性质和大小及系统的条件也可适当变动限值，但应保证近区电力网、发电机组和用户的安全、稳定运行和正常供电。

(二) 电压偏差指标

SD 325—1989《电力系统电压和无功电力技术导则》规定，电压允许偏差为：

(1) 发电厂和变电站的 500kV 母线：正常方式时，最高运行电压不得超过系统额定电压的 $+10\%$ ，最低运行电压不应影响电力系统同步稳定、电压稳定、厂用电的正常使用及下一级电压的调节。向空载线路充电，在暂态过程衰减后线路末端电压不应超过系统额定电压的 1.15 倍，持续时间不应大于 20min。

(2) 发电厂和 500kV 变电站的 220kV 母线：正常运行方式时，电压允许偏差为系统额定电压的 $0\sim+10\%$ ；事故运行方式时为系统额定电压的 $-5\%\sim+10\%$ 。

(3) 发电厂和 220kV 变电站的 110~35kV 母线；正常运行方式时，为相应系统额定电压的 $-3\%\sim+7\%$ ；事故后为系统额定电压的 $+10\%$ 。

(4) 35kV 及以上用户的电压变动幅度，应不大于系统额定电压的 $\pm 10\%$ ，其电压允许偏差值，应在系统额定用压的 $90\%\sim 110\%$ 范围内。

(5) 10kV 用户的电压允许偏差值为系统额定电压的 $\pm 7\%$ 。

(6) 380V 电力用户的电压允许偏差为系统额定的 $\pm 7\%$ 。220V 用户的电压允许偏差为系统额定电压的 $-5\%\sim+10\%$ 。

(三) 三相电压不平衡指标

根据 GB/T 15543—2008《电能质量三相电压不平衡》三相

电压允许不平衡度为：

(1) 电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为 2%，短时不得超过 4%。电气设备额定工况的电压允许不平衡度和负序电流允许值仍由各自标准规定，如旋转电机按 GB 755《旋转电机基本技术要求》规定。

(2) 接于公共接点的每个用户引起该点正常电压不平衡度允许值一般为 1.3%，根据连接点的负荷状况，邻近发电机、继电保护和自动装置安全运行要求，可作适当变动，但必须满足第 (1) 条规定。

(四) 电压波动和闪变允许值指标

1. 电压波动限值

GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》规定，任何一个波动负荷用户在电力系统公共连接点产生的电压波动限值和频度、电压等级有关，见表 1-1。

表 1-1 电压波动限值

r (次/h)	d (%)	
	LV、MV	HV
$r \leq 1$	4	3
$1 < r \leq 10$	3*	2.5*
$10 < r \leq 100$	2	1.5
$100 < r \leq 1000$	1.25	1

注 1. 很少的变动频度（每日少于 1 次），电压变动限值 d 还可以放宽，但不在此规定。

2. 对于随机性不规则的电压波动，如电弧炉负荷引起的电压波动，表中标有“*”的值为其限值。

3. 参照 GB/T 156—2007，系统标称电压 U_N 等级按以下划分：

低压 (LV)	$U_N \leq 1\text{kV}$
中压 (MV)	$1\text{kV} < U_N \leq 35\text{kV}$
高压 (HV)	$35\text{kV} < U_N \leq 220\text{kV}$

对于 220kV 以上超高压 (EHV) 系统的电压波动限值可参照高压 (HV) 系统执行。

2. 电压闪变限值

电力系统公共连接点，在系统正常运行的较小方式下，以一周（168h）为测量周期，所有长时间闪变 P_{lt} 都应满足表 1-2 的要求。

表 1-2 闪 变 限 值

P_{lt}	
$\leq 110\text{kV}$	$> 110\text{kV}$
1	0.8

(五) 公用电网谐波指标

(1) 公用电网谐波电压（相电压）限值见表 1-3。

表 1-3 公用电网谐波电压（相电压）限值

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率 (%)	
		奇次谐波	偶次谐波
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

(2) 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）不应超过表 1-4 中规定的允许值。当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时，表 1-4 中的谐波电流允许值应进行换算。

表 1-4 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (A)											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24

续表

标准电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (A)											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7

标准电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (A)											
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1

标准电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (A)											
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
35	250	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

注 220kV 基准短路容量取 2000MVA。

五、电能质量技术监督指标

(一) 频率指标监督

1. 规划、设计、基建监督

(1) 在电力系统规划、设计中，有功电源安排和电力电量平衡执行原电力部颁 SD 131《电力系统技术导则》和电力系统规划、设计的有关技术规定。规划、设计的电力系统应具备有功功率的备用容量，总备用容量不得低于系统最大用电负荷的 20%。

(2) 新建、扩建变电所工程及更改工程的设计中，应配置自

动低频减负荷装置。

(3) 在发电厂的规划、设计和建设中，必须按上级有关 AGC 的规定设计机组的 AGC 功能，并做到与发电机组同步投产。

(4) 发电机的高低频率允许值，必须与电网的低频减载配置相协调。

2. 运行监督

(1) 电网频率标准是 50Hz。连续运行统计数（年、季、月）内电网频率合格率应不低于 99.5%。

(2) 地调监视并负责按省调下达的用电曲线控制用电。事故状况按《电力系统调度规程》执行。

(3) 调度机构编制的电网年、月、日运行方式中，应包括负荷预测和电力电量的平衡，并安排适当的旋转备用容量。

(4) 调度部门必须掌握相当数量的超计划用电和事故限电序位表，超计划用电和事故限电序位表的负荷总量，应满足电网安全运行的需要。超计划用电和事故限电不能重复。

(5) 各地调应根据省调要求并结合本地区的情况，编制本地区的低频减载方案。

(6) 调度机构在编制低频减载方案时，应严格执行原电力部颁《电力系统自动低频减负荷技术规定》中的有关规定。

(7) 各地调应对本地区的各级自动低频减负荷装置实际控制负荷数量、自动低频减负荷装置数量及其实际投运情况进行统计和分析，并将每月典型日统计分析报表按要求的格式上报。

(二) 电压质量监督

1. 规划、设计、基建监督

(1) 电力系统的规划、设计、基建及技改，都必须按《电力系统电压和无功电力管理条例》和《电力系统电压和无功电力技术导则》的要求执行。

(2) 在电力系统的规划、设计时必须包括无功电源及无功补