

DIANNENG ZHILIANG
FENXI FANGFA

电能质量

分析方法

刘军成 著



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANNENG ZHILIANG
FENXI FANGFA

电能质量

分析方法

刘军成 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

该书以实际工程案例为线索,从工程实用的角度介绍了电能质量问题的分析方法及其步骤。全书共分九章:第一章介绍了电能质量问题及其发展动态;第二章详细介绍了非线性负荷及其用电特性;第三章介绍了分析电能质量干扰响应特性的一种工程方法——等效冲击电流分析法;第四章介绍了贯穿源特性与系统响应特性的电能质量监测及其数据评估方法;第五章介绍了电能质量问题分析的基本步骤及难点;在上述几章介绍的基础上,第六、七、八章分别以不同的实际工程为背景,介绍了非线性负荷接入电网的危害性评估及对策,电能质量事故分析及其控制方案设计以及暂态电能质量控制等内容;第九章分析了瞬态电能质量及其控制。

本书可供从事电能质量分析、研究、工程设计及实施等方面的专业技术人员和相关管理人员参考,也可作为相关专业本科生、研究生的辅助教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电能质量分析方法/刘军成著. —北京:中国电力出版社, 2011. 10

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2164 - 9

I. ①电… II. ①刘… III. ①电能—质量分析—分析方法
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 202927 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 273 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 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

序

在电力系统中，理想的电压波形是三相对称、周期性的正弦波，其频率和有效值都等于相应的额定值。与这一理想波形的任何差别都可能在不同程度上影响到电力用户和电力系统本身的正常运行，乃至发生事故。为了定性和定量地表征这些差别，出现了电压和频率的偏差、三相不平衡度、谐波和次谐波、电压暂升和暂降、短时中断以及波形凹陷等电能质量的分类和指标。

长期以来，电能质量的恶化和污染主要来源于用户，而输电和供电环节是污染的传播和扩散途径，对其严重程度产生影响。近年来，随着大规模风力发电和太阳能发电的并网以及分布式发电的出现和发展，电能质量问题呈现出新的特点，电力生产环节也成为不可忽视的污染源，需要对其进行检测和控制。

电能质量问题就其污染源本身来看，属于低频传导干扰；但是从电力系统公共连接点来看，它又表现为商品所具有的基本特点即“质量”这一属性。因此，对电能质量如何检测、分析、评估和控制是一个与技术经济密切相关的问题。在工程实践中采取何种方式来分析电能质量，也是一个值得深入思考的问题。

本书的编写侧重于实践性和应用性，其主要内容来自作者长期的工程实践经验，具有良好的阅读性与实用性。它既适合于从事电能质量技术工作的一线人员，也适合于从事电能质量监管工作的管理人员阅读。

本书介绍了电能质量问题的现状及其发展动态；详细阐述了电能质量干扰的源特性，并介绍了一种分析电能质量干扰响应特性的工程方法——等效冲击电流分析法，阐述了电能质量监测数据的分析评估方法。书中结合大量的实际工程案例介绍了电能质量工程的实施步骤、技术难点，非线性负荷接入电网的分析评估方法，事故分析方法，电能质量控制方案论证设计等内容；另外还介绍了瞬态电能质量问题及其控制方法。

该书对从事电能质量实际工作的一线技术人员、管理人员以及高等学校的本科生和研究生来说，是一本很好的参考书。

夏道止

2011年5月

前言

自从电力工业出现以来，电能质量问题就一直存在。随着工业化进程及互联电力系统的不断发展，目前的电能问题比以往任何时候都更加突出。工业生产过程的信息化、自动化、精细化，电力系统的智能化，家用及办公电气的人性化等都与电能质量的有效控制存在着密切的关系。

作为在生产的同时就被消耗的特殊商品，电能质量的控制过程与常规意义的有形产品存在着较大的差别。但是不管怎样，电能生产存在生产环节、流通环节，而且也存在付费使用环节，因此，已经具备了商品所应有的基本特征。也正因为如此，电能作为商品的概念逐步被大多数国家所接受。而且随着电力市场化的逐步深入，这种认识将会更加深入。基于这种认识，电能质量这个名词逐步得到应用。

电能的质量有其系列衡量指标，这点与传统商品没有区别。但是，这些指标的合格与否需要进行实时检测与评估，因为下一时刻的质量可能与这一时刻的质量完全不同，而且引起的后果也可能完全不一样，这点与传统的商品存在本质的区别。同时，不合格的电能质量需要供用电双方共同采取措施进行控制，这点也是电能区别于常规产品的另外一个原因。可见，电能质量的控制过程是有其自身特点的。

目前，对电能质量的监测、控制手段多有论述，主要面对专业的技术人员，偏重理论性的叙述。作为长期从事电能质量检测、控制实际工程的技术人员，笔者通过亲身体会及与广大客户的交流，感觉到市场缺少可以直接应用到实际工程的、经验性简便性较强的电能质量分析方法方面的书籍。笔者基于 20 余年从事电能质量检测、控制、分析评估的实践经验，概括了作者面对实际电能质量问题时所采取的分析方法，希望本书的出版能够对电能质量一线的技术、管理工作人员有所助益。

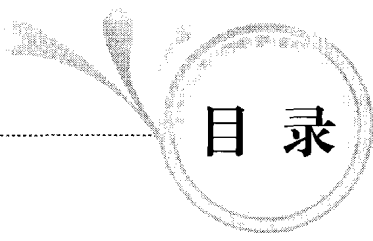
本书第一章简单分析回顾了目前电能质量行业发展的基本动态；其后各章贯穿了电能质量问题由“源”特性到“传播”特性、检测评估方法、控制方法这样一个线索，涉及稳态、暂态、瞬态电能质量相关内容。第二章分析了非线性负荷的用电特性及其相关敏感负荷的用电特性，便于读者把握电能质量问题与负荷之间的相互联系。第三章介绍了一种电能质量传播特性的等效冲击电流分析法，该方法在工程实践中比较实用。第四章介绍了电能质量监测及其数据的分析评估方法，论述了海量数据评估过程中应注意的问题。第五章在介绍分析电能质量问题基本步骤的基础上，结合目前电能质量领域的现状，着重分析了在具体分析过程中遇到的难点问题，起到抛砖引玉的作用。第六章结合实际的电气化铁道负荷工程，介绍了非线性负荷接入电网的评估过程及其对应的稳态电能质量问题的主要解决措施。第七章结合具体事故案例介绍了电能质量事故的分析方法、无源滤波器的设计步骤及其过程。第八章结合实际的高新技术企业负荷特点，介绍了暂态电能质量控制措施的论证过程及其控制方案。第九章介绍了低压供电系统瞬态电能质

量及其控制方法。

本书所涉及的主要内容均来自于作者的工作实践。个别经验性公式是作者日常交流过程中所得到的，但其出处并未考证，因此，在阅读过程中请读者注意批判性吸收。

本书承蒙西安交通大学夏道止教授通篇审稿并作序，并得到了李世林研究员的大力协助。在此深表感谢！

由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。



目录

序 前言

第一章 电能质量问题及其发展动态	1
第一节 电能质量问题.....	1
第二节 电能质量问题发展动态.....	6
第二章 非线性负荷及其用电特性	18
第一节 非线性负荷	18
第二节 交流电弧炉	19
第三节 直流电弧炉	21
第四节 中频感应炉	22
第五节 电石炉	25
第六节 铁合金电炉	25
第七节 电气化铁道负荷	27
第八节 电化工业大型整流负荷	31
第九节 节能电器及变频设备	34
第十节 敏感负荷及其用电特性	37
第三章 等效冲击电流分析法	42
第一节 供电网络谐波固有特性分析	42
第二节 干扰源传播特性分析	49
第三节 电能质量等效冲击电流法的统一建模思路	55
第四章 电能质量监测及其数据评估方法	56
第一节 电能质量指标的监测方法	56
第二节 电能质量监测系统的选择	66
第三节 电能质量监测数据的评估方法	72
第五章 电能质量问题分析的基本步骤及难点	81
第一节 电能质量问题分析的基本步骤	81
第二节 电能质量指标危害的量化评估	82
第三节 电能质量控制的实时响应特性	88
第六章 非线性负荷接入电网的危害性评估及对策	93
第一节 背景及原始资料	93
第二节 电气化铁路负荷的电能质量危害定性分析	96

第三节	电气化机车运行产生的谐波污染定量分析	98
第四节	三相不平衡度危害分析	112
第五节	电能质量问题的主要对策	114
第七章	电能质量事故分析及其控制方案设计	130
第一节	事故及其分析	130
第二节	110kV 控制目标下滤波器方案的论证	141
第三节	10kV 控制目标下滤波器方案	147
第四节	滤波装置测量保护要求	150
第五节	主设备原理接线及平面布置	151
第八章	暂态电能质量控制	154
第一节	某芯片封装企业电压暂降抑制方案论证分析	154
第二节	某化工企业暂态电能质量抑制方案	160
第九章	瞬态电能质量及其控制	165
第一节	瞬态电能质量问题	165
第二节	瞬态电能质量的危害	167
第三节	瞬态电能质量环境分析	169
第四节	瞬态电能质量控制	177

电能质量问题及其发展动态

电能质量问题是工业自动化水平发展到一定程度必然会出现的问题；反过来，工业信息化程度的提高又会带来更加复杂的新的电能质量现象。目前广泛热议的智能电网概念、节能技术、清洁能源发展等均涉及电能质量技术经济思考，因为这些技术进步必将涉及电力能源的多次转换，转换即存在效率、重新加工的问题，当然也存在转换本身引起的能源“污染”。因此，面对纷繁复杂的负荷用电特性，要求完全净化的电能供应是不现实的，应该在技术、经济双重制约下寻求一种平衡。

第一节 电能质量问题

一、电能质量及其主要技术指标

目前，电能质量术语还没有一个被普遍接受的定义。一般可以这样认为：电能质量是与电力系统安全经济运行相关的、能够对用户正常生产工艺过程及产品质量产生影响的电力供应的综合技术指标描述，它涉及电压电流波形形状、幅值及其频率三大基本要素。电能质量指标的下降是继发电环节以后，理想电能经输配供用这一延续环节中被“污染”造成的，相当于在理想电能载体上所依附的其他“坏”信息，其主要影响因素包括电网结构、电气设备电磁兼容抗扰度水平、继电保护设置、环境气候、供电设备用电特性、负荷用电特性、系统管理维护等。

关于电能质量，IEC 以前主要以电磁兼容的低频传导干扰（小于 9kHz）描述（即 IEC TC77 的 IEC 61000 系列标准），目前，电能质量议题划归为 IEC TC8（全称为 systems aspects for electrical energy supply）。

主要的电磁兼容低频传导现象见表 1-1，其稳态及非稳态情况下的特征指标见表 1-2。EMC 范畴中所涉及的众多低频传导干扰指标限值主要从发射水平、规划水平、兼容水平三个角度给出，一般情况下发射水平 ≤ 规划水平 ≤ 兼容水平。

表 1-1 IEC 低频传导现象^[1]

序号	现象	序号	现象	序号	现象
1	谐波、间谐波	4	电压暂降、短时中断	7	低频感应电压
2	电力传输线传输的信号电压	5	电压不平衡度	8	直流分量
3	电压波动	6	频率变化		

表 1-2 低频传导现象的特征指标^[1]

序号	稳态描述指标	非稳态描述指标	序号	稳态描述指标	非稳态描述指标
1	幅值	上升率	5	源阻抗	频率
2	频率	幅值	6	波形凹痕深度	发生率
3	频谱	持续时间	7	波形凹痕面积	能量
4	调制	频谱	8	—	源阻抗

美国电气电子工程师协会 IEEE 采用“power quality”这一术语描述电能质量，定义为：合格电能质量的概念是指给敏感设备提供的电力和设备的接地系统是均适合于该设备正常工作的^[2]。IEEE Std 1159—2009^[3]指出：电能质量是描述电力系统给定点、给定时间由电磁现象引起的电压电流特征。该标准描述的电能质量现象描述见表 1-3。

2002 年 IEEE 成立了专门的电能质量分委会（Power Quality Subcommittee），工作组包括：谐波工作组、电压质量工作组、电力系统谐波监测工作组、电能质量治理工作组、电能质量管理培训工作组。

表 1-3 IEEE 对电能质量的现象描述^[3]

种 类		典型频谱	典型持续时间	典型幅值	
瞬态	脉冲	纳秒级	5ns 上升	<50ns	
		微秒级	1 μ s 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	20ms	0~8p. u.
		高频	0.5~5 MHz	5ms	0~4p. u.
短时变化	瞬时	电压暂降	—	0.5~30cycles	0.1p. u. ~0.9p. u.
		电压暂升	—	0.5~30cycles	1.1p. u. ~1.8p. u.
	暂时	电压中断	—	0.5cycles~3s	<0.1p. u.
		电压暂降	—	30cycles~3s	0.1p. u. ~0.9p. u.
		电压暂升	—	30cycles~3s	1.1p. u. ~1.4p. u.
	短时	电压中断	—	3s~1min	<0.1p. u.
		电压暂降	—	3s~1min	0.1p. u. ~0.9p. u.
电压暂升		—	3s~1min	1.1p. u. ~1.2p. u.	
长时间电压变化	停电	—	>1min	0	
	电压负偏差	—	>1min	0.8p. u. ~0.9p. u.	
	电压正偏差	—	>1min	1.1p. u. ~1.2p. u.	
电压不平衡		—	稳态	0.5%~2%	
波形畸变	直流	—	稳态	0~0.1%	
	谐波	0~100 次	稳态	0~20%	
	间谐波	0~6kHz	稳态	0~2%	
	波形凹痕	—	—	—	
	噪声	宽频带	稳态	0~1%	
电压波动		<25Hz	断续的	0.1%~7%	
频率偏差		<10s	—	—	

欧洲广泛以电压特征描述电能质量,其定义为:公共电网中表征电力系统干扰水平的一系列指标^[4],限值标准涉及低压、中压系统。

中国电能质量相关国家标准由全国电压电流等级和频率标准化技术委员会负责起草,主要内容涉及限值标准、监测评估标准(相关评估的内容分散包含在限值标准中)、控制设备系列标准,暂缺乏技术监督管理标准(规范)。目前已颁布实施的6项电能质量限值国家标准颁布实施、1项电能质量监测设备国家标准及2项电能质量控制产品(SVC功能特性、SVC现场试验)。主要标准如下:

- GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差
- GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差
- GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 24337—2009 电能质量 公用电网间谐波
- GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变
- GB/T 19862—2005 电能质量监测设备通用要求
- GB/T 20297—2006 静止无功补偿装置(SVC)现场试验
- GB/T 20298—2006 静止无功补偿装置(SVC)功能特性

一般来说,描述电能质量的技术参数应该具有明确的物理意义,要能够进行监测、评判,并能够根据相关理论研制出有效的控制产品。目前的电能质量问题以电网运行方式的不同可以粗分为稳态电能质量问题及暂态电能质量问题,但这两类问题在许多方面又相互交织,因此应正确对待。稳态电能质量参数表征电力系统稳态运行方式下的运行状态,主要参数包括电压偏差、频率偏差、三相不平衡度、谐波电压电流、电压波动闪变5类电能质量指标。暂态电能质量即电力系统暂态事件或局部暂态事件所引起的运行参数的变化,以有效值为出发点的主要技术参数有电压暂降、电压暂升、电压短时中断等。目前,过电压指标已纳入电能质量的技术参数范畴,可称为瞬态电能质量问题。图1-1为一系列电能质量现象示意图。

二、电能质量问题的基本特征

电能质量问题的基本特征主要表现在以下几个方面:

(1) 技术经济性。就具体的某一电能质量现象而言,其定义的描述、监测算法、控制方法等是一个纯技术问题;但是,描述这一现象的参数限值指标确定及其评估方法又表现出强烈的经济属性。要从实际出发,从供用双方的利益、电网运行及用户生产工艺的常态、产品的设计及电网管理的技术进步等方面出发,宏观把握,微观调整。

(2) 参数时变性。电力系统是一个动态时变的非线性系统,用户生产工艺过程也是千差万别的,其负荷用电特性及负荷模型描述历来就是一个难以准确把握的问题。因此,任何电能质量指标均不同于常规商品意义上的质量指标,需要采用长期在线的监测及合理的统计算法加以衡量。

(3) 需求多样性。千变万化的负荷用电特性使得其对电能质量的需求各异。仅从用户生产工艺过程的连续性角度考虑,其对电能质量的需求一般可简单地分为常规负荷、敏感负荷两大类。如何结合负荷特性控制电能质量指标是一个值得思考的细分问题。

(4) 非单方面控制性。电能质量的特殊性在于只有在使用过程中才能表现出其质量

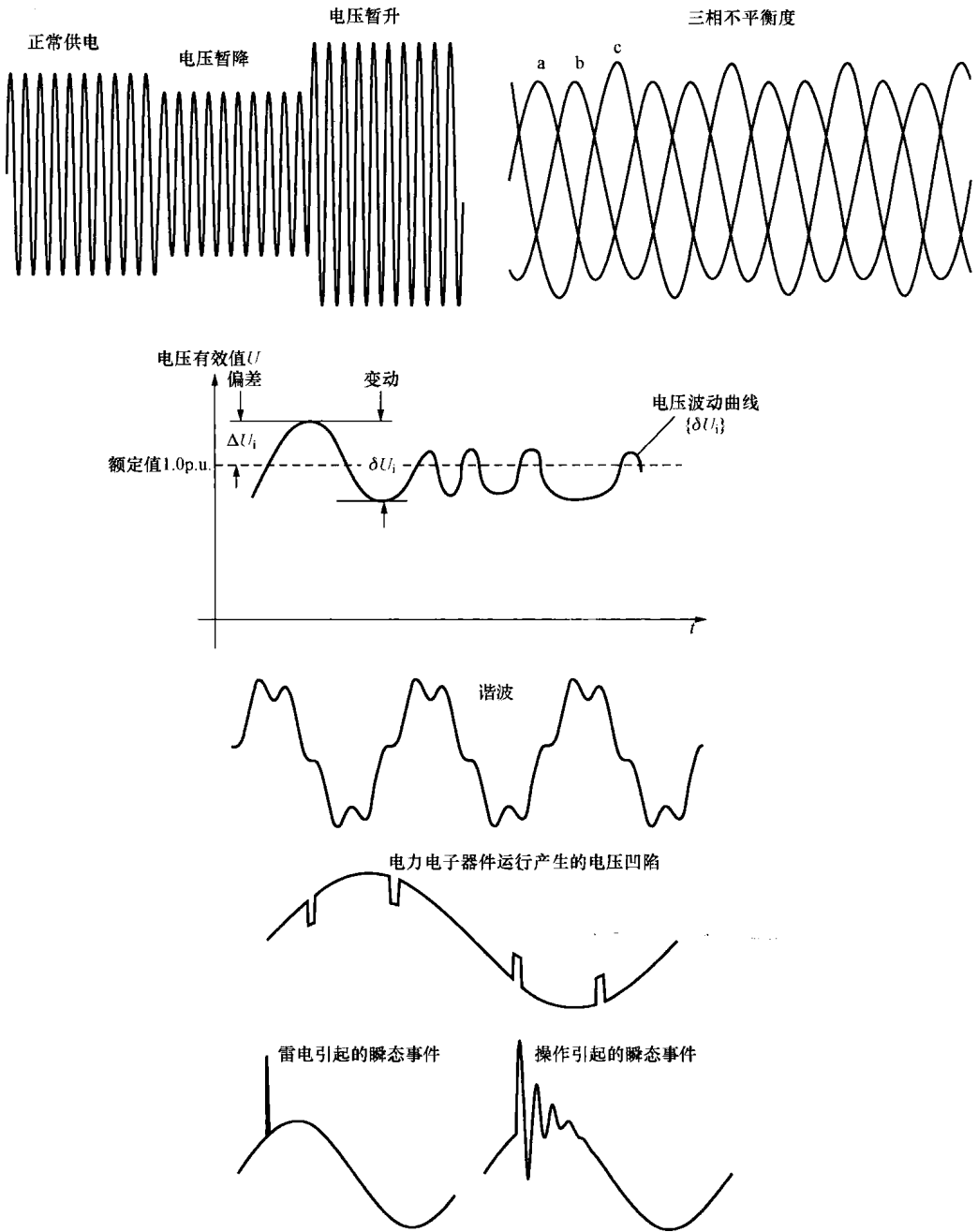


图 1-1 电能质量现象示意图

特征。因此，它不仅仅受电力生产传输系统控制，更深受电力用户的影响，同时也受用电设备 EMC 抗扰度水平的影响。

(5) 传导性。电能质量“污染”就像空气污染一样表现为强烈的流动性。一个地方的结果其原因可能在其他地方。

(6) 不断发展性。随着科技的进步，电能质量现象也是不断变化的。以重合闸事件为例，它是一个经历不到 1s 的电力中断事件，精细工业例如计算机配置了 UPS 电源，就能顺利地渡过这一短暂过程。对计算机而言，也就不存在由这一电能质量事件导致的问

题。再如随着节能灯、LED灯的普及使用,闪变问题将逐渐淡出或可能逐步退出电能质量指标范畴等。

传统的观点认为发电环节一般不存在电能质量污染,但是随着国家能源政策的调整,随着风力发电、光伏发电的大规模发展,发电环节本身将出现不可忽视的电能质量问题。

三、电能质量问题与电磁兼容问题的关系^[5]

长期以来,人们一直将电能质量问题等同为电磁兼容问题。直到2003年,IEC将电能质量问题划归TC8分委会。目前TC8发布了电能质量相关第一部标准:IEC/TR 62510技术报告,阐述了电能质量的基本内容及其与电磁兼容的相互关系。

IEC/TR 62510指出:电能质量问题首先表现为供电的连续性,在此基础上,需要保证电网标称电压、频率与所连设备额定电压、频率的协调,进而考虑影响供用电双方的电能质量指标问题。从用户角度,保护其生产工艺流程及预期功能的连续性,同时要保证电网的安全稳定运行。实际上,这一过程包括了三个利益实体:电力公司、用户、设备提供商。

而电磁兼容的主要关注点在于设备的设计及其制造是否合理,其定义为:在规定的电磁环境中保证其自身功能完善且不给本环境中其他设备带来不可容忍的电磁干扰的能力。可见,电磁兼容评价首先需要定义一个环境,在此环境里设备自身及其他设备均能够正常工作。但是电力系统公共连接点的负荷呈现出强烈的时变性与不可控性,即使所有用电设备在其测试的电磁环境中合格,也不能保证公共连接点电能质量指标一定在可接受的范围内。

可见,电能质量与电磁兼容是两个不同的量值控制体系,但是又互相联系:电磁兼容是电能质量控制的一个方面,设备的发射水平控制在合理的范围,有助于电能质量综合指标的改善与控制;公用电网电能质量水平的控制,又有利于给电气设备创造一个良好的用电环境。

四、电能质量与供电可靠性的关系

2004年,美国能源部就专门进行分析、调研,在此基础上提出电能质量问题就是电力可靠性问题,特别是在信息工业高速发展的情况下,电力可靠性指标必须考虑电能质量指标^[6]。

南非电监局(NER)2002年发布南非电能质量管理导则,明确提出每年度公布电能质量年度统计报告和各电力公司电能质量的数据信息。澳大利亚1999年就成立了电能质量与供电可靠性中心(The Power Quality & Reliability Centre),主要研究分析电能质量与电力可靠性的关系^[7]。

电力系统可靠性即电力系统长期运行的满意程度,它描述电力系统长期运行条件下向用户提供持续的、稳定的、充足的电力服务的能力。可靠性指标是电力系统设计、运行管理的总体追求目标。

依据传统的思路及传统的电力系统可靠性概念,只要给用户提供连续的电力供应,其供电可靠性就是满足用户要求的,用户就是满意的。但是,随着高新技术产业特别是电子类设备的大规模应用,此类负荷对电能质量指标诸如电压暂降、暂升、谐波、三相不平衡度等非常敏感,虽然出现电能质量问题时并没有引起传统的供电中断,也没有引

起传统意义的电力可靠性指标恶化,但是这些电能质量问题却可能引起重大的用户损失或引起重大的电力事故,进而引起电力可靠性问题,此时的供电质量问题成为重要的电力可靠性指标。因此新形势下任何电力可靠性问题的讨论应该涉及电能质量问题^[6]。

例如某生产硅晶片的企业,任何持续时间超过 10ms、电压降超过 10% 的电压跌落对企业而言相当于一次供电中断,损失超过上百万美元,但这样的电压暂降事件电力系统根本无法感知,更不可能影响电力可靠性指标。

再例如,20 年前重合闸功能被认为是提高系统供电可靠性的有力手段,对于非永久性故障,重合闸后能够持续地向用户提供电力供应,没有哪一个用户会关注如此短时间的电力中断问题;但是,随着大量计算机及电子设备的应用,一次成功的重合闸就已经是一次电力中断事故了,因为在不到 1s 的时间里,电子钟停止了走动、计算机重新启动等已经引起了很大的损失。

一般来说,电能质量与供电系统可靠性存在下述关系:

(1) 以往供电可靠性是系统运行的终极目标,而当今世界,合格电能质量的电力供应才是系统运行的终极目标。也就是说,电能质量问题本身就是电力可靠性问题,是传统可靠性概念的进一步延伸。

(2) 传统的电力可靠性能清楚地描述明显的电力中断事件,但电能质量事件常常发生在半个周波至几十毫秒内,这些事件系统几乎无法感知;然而对用户而言,可能是一次严重的电力中断,因此需要用电能质量的观点去描述这样的电力可靠性事件。

(3) 传统的电力可靠性的目标是不随时间而改变的,即提供持续不断的电力供应;但是电能质量指标却可以随着技术的进步而变化。

第二节 电能质量问题发展动态

目前,随着国家产业化政策的调整以及科技的进步,电能质量领域出现了一系列新的变化。新形势下需要进一步把握电能质量问题的变化及其发展,更好地从技术、经济两方面实现电能质量综合治理。

一、新能源及分布式发电引起的电能质量问题^[8]

目前,风力发电及光伏发电装机容量迅速增加。由此带来的一系列问题诸如并网问题、低电压穿越问题、电能质量问题、分布电源稳定运行问题、系统备用及调节问题等引起了业界的广泛关注与研究。就电能质量问题而言,无论是风力发电还是光伏发电,其影响主要表现在:

- 1) 产生谐波:励磁回路或主回路的整流、逆变电路的引入。
- 2) 功率波动:风速、日光的波动引起。
- 3) 电压冲击:感应发电机的启动产生。
- 4) 电压偏差。

以下就两种新能源分别介绍。

1. 风力发电对电能质量的影响

风力资源的不确定性和风电机组本身的运行特性使风电机组的输出功率呈波动趋势,风电场接入电网后,在向电网提供清洁能源的同时,可能会影响电网的电能质量,对电

力系统的安全稳定运行也会产生不利的影晌。

对风力发电这类波动性动力而言,很难采用同步发电机与系统直接并网。当采用同步机时,通常与逆变器联合才能实现控制和联网。将同步发电机发出的功率经整流、逆变,通过变压器与交流系统连接,如图 1-2 所示。因此,其并网方式决定了发电过程中会产生谐波污染。

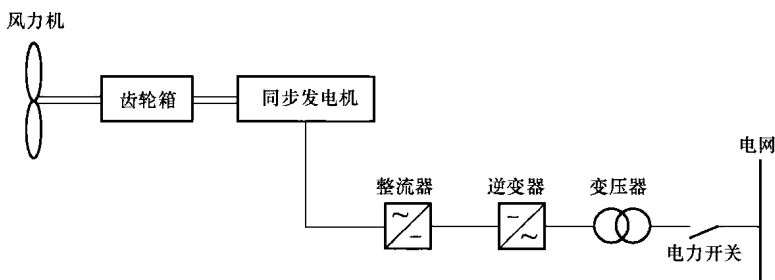


图 1-2 同步发电机风力发电通过逆变器实现并网

为了降低谐波污染,有时采用双馈发电机模式。其结构与绕线式感应电动机类似,定子绕组直接接入电网,转子绕组由一台频率、电压可调的低频电源供给三相励磁电流,如图 1-3 所示。当转子绕组通过三相低频电流时,在转子中形成一个低速旋转磁场,这个磁场的转速与转子的机械转速相叠加,使其等于定子的同步转速,从而在发电机定子绕组中感应出相应于同步转速的工频电压。当风速变化时,机械转速随之变化,这时,改变转子电流的频率和旋转磁场的速度,以补偿电机速度的变化,保持输出频率恒定。由于双馈发电系统所用的电力电子变换装置容量小、控制灵活,因此,并网冲击小,谐波水平可通过变换装置的合理设计降低。

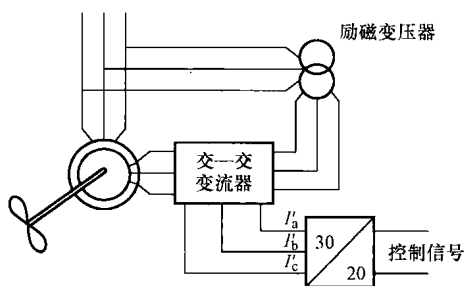


图 1-3 双馈风力发电机组的并网

目前,基于风力资源的特点,大多数风力发电采用异步发电机方式,其主要问题是并网冲击大、无功损耗大等。当采用异步方式时,为抑制电压变动,一般设置静止无功补偿器(SVC)、MCR 等补偿方式。

2. 光伏发电对电能质量的影响

不论是独立使用还是并网发电,光伏发电系统都主要由太阳能电池板、控制器、蓄电池和逆变器几部分组成。以太阳能电池板接收太阳光并产生电能,将产生的电能储存在蓄电池里,再经过逆变器将直流电转换为交流电,给交流电器供电或直接进入电网。

大规模并网太阳能光伏电站的作用类似于大型风力发电场,其电能质量、稳定性和规律性略优于风力发电,但由于太阳能光伏发电属于能量密度低、稳定差,调节能力差的能源,发电量受天气及地域的影响较大,而且太阳光的日夜交替变化,导致光伏并网发电装置只能间歇工作,太阳能光伏发电并网发电后会对电网的安全稳定、经济运行以及电网的供电质量会造成一定影响。其并网方式如图 1-4 所示。

(1) 工频变压器方式:光伏输出经过平波、逆变滤波后,通过工频变压器与系统连接。采用工频隔离,避免了直流偏磁。

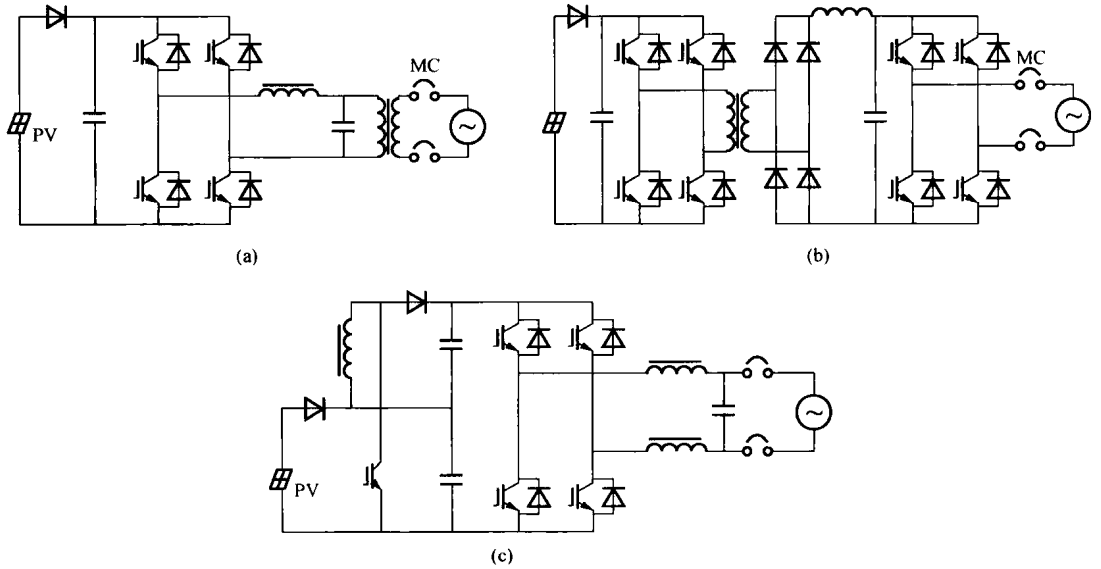


图 1-4 太阳能光伏发电并网方式

(a) 工频变压器方式；(b) 高频连接方式；

(c) 无变压器方式

(2) 高频连接方式：高频逆变后，通过变压器隔离，再经过整流逆变与系统相连。这种电路设有隔离变压器，直流分量不会流入主电网，避免了直流偏磁，滤波器也易于设计，谐波水平低。

(3) 无变压器方式：这种方式通过升压斩波器、逆变器和滤波器直接与电力系统相连，造价适中，但存在直流分量流入系统的可能性。要特别关注直流问题。

二、高速列车、动车组引起的电能质量问题变化^[9]

目前，高速铁路已进入大规模建设和使用阶段，为克服交直型电力机车的缺点，高速列车均采用交直交型电力机车。其工作原理如图 1-5 所示。

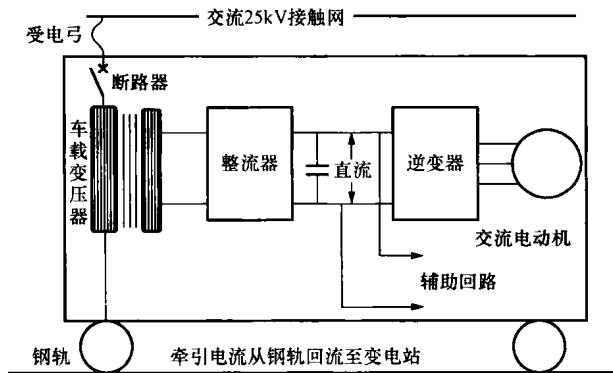


图 1-5 交直交型电力机车工作原理图

不同于传统的直流机车，交直交机车采用四象限整流，通过 GTO 或 IGBT 控制导通和关断角来控制机车的功率，可分别控制导通和关断机车主变压器的若干个低压绕组，使电流波形逼近正弦波，且电流与电压的相位基本同步。所以，交直交型电力机车与传统的交直型机车相比，具有下述特点：

(1) 谐波含量减小, 但谐波频谱更加复杂, 谐波频谱可表示为

$$n\omega_c \pm k\omega_r (n = 1, 3, 5, \dots \text{时}, k = 0, 2, 4, \dots; n = 2, 4, 6, \dots \text{时}, k = 1, 3, 5, \dots)$$

式中: ω_c 为载波频率 (开关频率); ω_r 为调制波频率。

(2) 功率因数高, 理论上可以达到 1。

(3) 由于其容量较大, 而且多采用单相变压器供电模式, 因此三相不平衡度问题比较严重。

某城际高速列车谐波电压实测频谱图如图 1-6 所示。

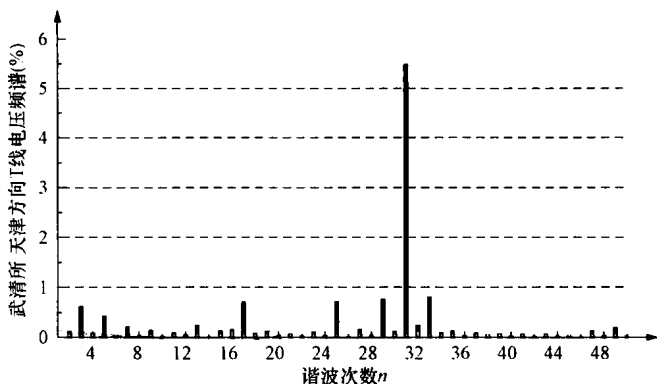


图 1-6 某城际高速列车谐波电压实测频谱图

三、各种节能型电气设备的研制与运行

随着建设节约型社会概念的逐步推广, 各类节能型家用电器及工业电器大量出现。

节能型电器设备的基本特点在于一般均经过电力电子装置的能量转换, 与传统型晶闸管为主的电力电子器件相比, 节能电气设备中全控型器件采用了新的控制方式 (例如 WPM 整流逆变), 因此带来了一系列新的电能质量问题, 主要表现在:

(1) 高频谐波现象, 主要由开关频率决定;

(2) 高频切换带来的浪涌问题 (详细参阅第九章)。

当然, 传统电力电子装置控制过程中出现的换相瞬时短路现象还将带来新的电能质量问题——电压凹陷 (norch), 需要进一步关注, 如图 1-7 所示。



图 1-7 电压凹陷示意图

四、电能质量监测

目前, 电能质量监测还仅仅停留在评判某一点指标超标与否的阶段, 缺乏深层次的数据挖掘应用分析。其总体发展方向表现为:

(1) 系统层面的评估方法的研究;

(2) 海量检测数据的进一步挖掘应用;

(3) 基于 WAMS 的电能质量检测系统的建立及其在智能电网建设中的应用。

五、定制电力技术

定制电力 (Custom Power) 概念是美国电力研究院 (EPRI) N. G. Hingorani 博士于 1988 年首先提出的。1993 年, IEEE 成立了专门的 IEEE 1409 工作组, 研究配网系统定