



北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

小波分析在电能质量检测中的应用研究

龚静 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

北京建筑大学学术著作出版基金资助出版

小波分析在电能质量 检测中的应用研究

龚 静 著



机械工业出版社

本书凝结了作者多年来的研究成果,深入论述了小波分析在电能质量扰动检测中的应用。本书介绍了小波分析的相关知识,特别是复小波、构造小波、第二代小波等;针对电能质量检测中的诸多难点问题进行了详细剖析,研究了如何应用小波模极大值原理检测暂态扰动、小波特性对检测效果造成的影响、如何充分利用复小波的相位信息提高检测精度和判别扰动类型,对比了小波与傅里叶变换在谐波检测中的优势,给出了尺度-频率的间谐波检测方法及二代小波的基频跟踪方法,进行了大量仿真实验证明正确可靠性。

本书可供从事电能质量、小波分析、电力系统等相关领域工作的科研人员研究使用,也可供高等院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

小波分析在电能质量检测中的应用研究/龚静著. —北京:
机械工业出版社, 2018. 3
北京建筑大学学术著作出版基金资助出版
ISBN 978-7-111-58563-3

I. ①小… II. ①龚… III. ①小波理论-应用-电能-
质量检验-研究 IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 291489 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:王欢 责任编辑:王欢

责任校对:陈越 封面设计:陈沛

责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·8.5 印张·206 千字

0001-2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-58563-3

定价:29.00 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

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com



前言

小波分析是近 20 年来发展起来的一门新兴数学分支,它是傅里叶分析划时代的发展成果,是 20 世纪数学研究成果的杰出代表之一。小波分析以其没有固定的核函数和可以提供一个可变的时-频窗而较传统的傅里叶变换体现出无比的优越性,从而成为电能质量扰动信号分析的有力工具。电能是由供、用双方共同保证质量的一种特殊商品。电能作为商品走进市场,与其他商品一样,无疑要讲求质量。电能质量问题也成为电力部门和终端用户需要共同面对的实际问题。如果电能质量出现问题,不仅很难保证用电装置和设备正常工作,而且会使设备寿命缩短、电网损耗增加,甚至还能引起系统发生谐波谐振、继电保护和自动装置误动作、仪表指示和测量不准及产生通信干扰等一系列问题;同时,电能质量的下降,也会影响人们的生活,造成了巨大经济损失。本书旨在将先进的小波分析应用到电能质量检测中。

如何做到小波的理论工程实际应用的有机结合,这是一个富有挑战性的难题,因为这不仅需要对小波理论有较深的理解,同时还必须有从事工程应用性课题的研究实践。本书正是作者多年来科研成果的结晶,相信有助于读者在小波技术方面建立起理论联系实际的桥梁,为读者更好地从事小波研究特别是将小波应用于工程实践奠定良好的基础。

本书共 10 章。第 1 章介绍了电能质量的定义和标准及各种电能质量扰动检测方法,对电能质量问题的研究现状进行了阐述。第 2 章介绍了傅里叶变换和小波变换,并对其时-频分析能力进行了比较,给出了常见小波的小波函数和尺度函数。第 3 章在深入研究小波的消失矩、支集、正则性等特性的基础上,给出了在暂态电能扰动信号检测中小波选取的原则。第 4 章分析了小波在信号奇异性检测中的原理,并提出了利用小波分解最细尺度的模极大值实现暂态电能质量扰动信号检测的实用判据。第 5 章在分析复小波变换及其相频特性的基础上,克服传统信息组合差异性和计算复杂性的不足,提出了基于复小波变换相位差值的扰动检测新方法。第 6 章以现有正交紧支 db4 实小波为基础,构造出相应的复数小波,给出了详细的高通、低通滤波器系数求解过程,实现了扰动检测。第 7 章对谐波检测中的关键问题——采样频率和小波分解尺度——进行了细致探讨,针对不同谐波模型进行了 FFT 和小波变换比较研究。第 8 章利用 Morlet 小波进行连续小波变换,提出了间谐波的尺度-频率检测新方法。第 9 章给出了基于提升多分辨率算法的基频跟踪原理,在确定采样频率后,选取 db5 小波进行提升,给出了详细的基频跟踪实用步骤。第 10 章对全书的内容进行了总结和展望。附录对稳态和暂态电能扰动给出了具体的信号模型和实例。

本书实现了作为数学工具的小波分析与电气工程的实际问题电能质量检测的有机结合;

为突破小波的数学障碍，本书没有过多的枯燥理论叙述，而代之以电能质量检测中诸多工程实际问题的分析，重点突出“应用”，由浅入深，利于读者掌握。本书对电能质量检测中的很多细节关键问题提出了新的观点，并进行了验证，这为电力部门进一步提高供电质量提供了很好的技术支撑。

本书旨在将理论应用于实践，突出“应用”，以克服人们对于小波变换深奥数学理论掌握的障碍；着力体现其作为一个强有力的新型数学分析工具在工程实际中的应用，以显现小波变换的实用价值；让更多的高校师生和企业的工程技术人员掌握这一技术，更好地解决电力工程的实际问题，使得小波在电力系统中的应用得到更多更快更好的发展。

由于作者水平有限，不妥之处恳请读者和同行专家批评指正。

龚 静

2017 年 9 月

目 录

前 言

第1章 电能质量的概念	1
1.1 引言	1
1.2 电能质量的定义与有关标准	2
1.2.1 电能质量的定义	2
1.2.2 IEEE 电能质量标准	2
1.2.3 IEC 电能质量标准	3
1.2.4 我国电能质量标准	3
1.3 电能质量问题的分类	4
1.3.1 稳态电能质量问题	4
1.3.2 暂态电能质量问题	6
1.4 电能质量扰动检测方法	6
1.4.1 时域分析方法	6
1.4.2 频域分析方法	7
1.4.3 时-频域分析方法	8
1.4.4 其他方法	9
1.5 电能质量问题研究现状	10
第2章 小波变换	12
2.1 傅里叶变换	12
2.1.1 连续傅里叶变换	12
2.1.2 离散傅里叶变换	13
2.1.3 窗口傅里叶变换	13
2.2 小波变换	14
2.2.1 小波定义及其特点	14
2.2.2 连续小波变换及其性质	15
2.2.3 离散小波变换	17

2.3 傅里叶变换与小波变换的比较	18
2.4 常见小波介绍	19

第3章 基于小波特性研究的小波选取原则 24

3.1 引言	24
3.2 小波模极大值原理	24
3.3 小波特性对暂态电能扰动信号检测的影响	26
3.3.1 正交性	26
3.3.2 消失矩	26
3.3.3 小波支集	27
3.3.4 正则性	28
3.3.5 对称性	29
3.3.6 常用小波的主要性质	29
3.4 小波选取原则及检测实验	30
3.4.1 暂态电能扰动信号检测中的小波选取原则	30
3.4.2 实验一	32
3.4.3 实验二	34
3.4.4 实验三	36
3.4.5 实验四	37
3.5 结论	38

第4章 基于模极大值原理的暂态电能扰动检测 39

4.1 引言	39
4.2 信号奇异性检测	39
4.2.1 信号奇异性与利普斯奇茨指数	39
4.2.2 信号奇异性与小波变换	41
4.3 几个关键问题的处理	42
4.4 检测实验	45
4.4.1 实验一	45
4.4.2 实验二	46
4.4.3 实验三	47
4.4.4 实验四	48
4.4.5 实验五	49
4.5 结语	50

第5章 基于复小波变换电能质量扰动信号检测的相位差值法 51

5.1 引言	51
5.2 复小波变换及其相频特性	52
5.2.1 复小波变换	52

5.2.2 复小波的相频特性	53
5.3 相位差值法的计算步骤和实用判据	54
5.3.1 Cgau 复小波	54
5.3.2 具体计算步骤和实用判据	55
5.4 Cgau 复小波扰动的检测实验	56
5.4.1 实验一	56
5.4.2 实验二	57
5.4.3 实验三	58
5.4.4 实验四	59
5.4.5 实验五	59
5.4.6 实验六	60
5.4.7 实验七	61
5.4.8 实验八	62
5.5 其他三种复数连续小波的检测实验	63
5.5.1 cmor1.5-2、shan1.5-2、fbasp1-1.5-2 复小波	63
5.5.2 振荡干扰检测实验	64
5.6 结论	66
第6章 构造复小波在电能质量扰动检测中的应用	67
6.1 引言	67
6.2 构造紧支正交小波的条件	67
6.2.1 必要条件分析	67
6.2.2 充分条件分析	68
6.3 db 正交复小波构造方法	69
6.4 扰动检测的具体步骤	71
6.4.1 构造正交紧支复小波的具体过程	71
6.4.2 扰动检测的实用判据	73
6.5 检测实验	74
6.5.1 实验一	74
6.5.2 实验二	74
6.5.3 实验三	75
6.5.4 实验四	77
6.5.5 实验五	78
6.6 结论	80
第7章 小波变换与傅里叶变换在谐波分析中的比较研究	81
7.1 引言	81
7.2 谐波来源及其治理方法	81
7.3 快速傅里叶变换算法	82

7.4	多分辨率分析	83
7.5	小波包分析	85
7.6	采样频率和分解尺度的选择	86
7.6.1	采样定理及采样频率的确定	86
7.6.2	小波分解尺度的选择	87
7.7	检测实验	88
7.7.1	实验一	88
7.7.2	实验二	89
7.7.3	实验三	90
7.8	结语	92
第8章	基于连续小波变换的间谐波尺度-频率检测新方法	93
8.1	引言	93
8.2	间谐波的来源及检测方法	93
8.3	间谐波尺度-频率检测基本原理	94
8.3.1	Morlet 小波及特征尺度的判断	94
8.3.2	间谐波尺度-频率检测的实用步骤	96
8.4	检测实验	97
8.4.1	实验一	97
8.4.2	实验二	99
8.5	结语	99
第9章	基于第二代小波的基频跟踪实现	101
9.1	引言	101
9.2	提升格式的理论分析	101
9.3	实现基频跟踪的提升多分辨率算法	103
9.3.1	Euclid 算法与滤波器的提升分解	103
9.3.2	实现基频跟踪的提升算法	105
9.4	基频跟踪的实用判据及具体步骤	106
9.5	检测实验	107
9.5.1	实验一	107
9.5.2	实验二	107
9.5.3	实验三	108
9.6	结语	110
第10章	总结和展望	111
10.1	总结	111
10.2	展望	112

附录	113
附录 A 稳态电能扰动信号模型及实例	113
附录 B 暂态电能扰动信号模型及实例	117
参考文献	121

第1章

电能质量的概念

1.1 引言

对电力系统运行的基本要求是“可靠、优质、经济、环保”。

电能以其经济、清洁、高效的特点,成为最为广泛使用的二次能源。它通过公用电网进行传输和分配,一方面电力部门控制和管理着电网的运行,另一方面电能又被用户所消费和使用。因此电能是由供、用双方共同保证质量的一种特殊商品。电能作为商品走进市场,与其他商品一样,无疑要讲求质量。电能质量问题也成为电力部门和终端用户需要共同面对的实际问题。

造成电能质量问题的原因是多样的,既有来自电力系统外在的干扰,也有内部故障和正常操作时产生的问题,同时新型设备的用电特性、使用情况也与之有关。一方面电网中大量非线性负荷的使用,如大功率的电力拖动设备、电气化铁道、炼钢电弧炉、电化工业设备、轧机、提升机、感应加热炉等;另一方面电网中还存在很多快速变化的冲击性负荷,如高层大楼的高速电梯、大型娱乐场的电飞车、汽车制造厂的电焊机、高速铁路、高速磁悬浮列车和地铁、港口的起重机等,这些负荷的投入使用使得供电电压不对称加剧、波动性也日趋严重。另外,随着人们节能环保意识的增强,用户越来越多地采用电力电子装置实现能量的转换,这些非线性负载的使用都不可避免地产生非正弦波形电流,向电网注入大量谐波,导致公共连接点的波形严重畸变,对电网运行、敏感电气设备的影响和危害更加明显,最终产生由电能质量不合格而导致电力事故。国内外由电能质量引起的事故屡见不鲜。1991年,在意大利阿尔卑斯山地区,由于当地20kV电网容量相对较小,谐波电流引起18%的电压畸变,在一个2MW直流驱动的双缆滑雪缆道工程验收测试时,发生电网瘫痪。电力系统故障短路、电容器组投切、线路开关操作等造成的电压瞬态骤降会引起计算机系统紊乱,调速设备跳闸、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)等机电设备故障及继电保护误动作等事故发生。一个计算中心失电2s就可能使得大量的数据丢失,导致巨大损失。1~2周波的电压暂降,就可能破坏半导体生产线,导致上百万美元产值损失。可见,电能质量出现问题不仅很难保证用电装置和设备正常工作,而且会使设备寿命缩短、电网损耗增加,甚至还能引起系统发生谐波谐振、继电保护和自动装置误动作、仪表指示和测量不准及产生通信干扰等一系列问题。同时,电能质量的下降,也会影响人们的生活,造成了巨大经济损失。

因此高质量的电能对于保证电网和电气设备安全、经济运行、提高产品质量和保障广大人民群众正常生活具有重要的意义,它直接关系到国民经济的整体效益,深入研究电能质量问题以满足新形势下用户对电能质量的新的要求至关重要。

1.2 电能质量的定义与有关标准

1.2.1 电能质量的定义

从普遍意义上讲,电能质量是指优质供电。人们对于电能质量的定义有着不同的看法,这是因角度不同导致的。例如,电力部门可能把电能质量定义为电压与频率的合格率,并且用统计数字来说明。电力用户则可能把电能质量简单定义为是否向负荷正常供电。因此,在如供电中断持续时间等问题上,供受双方意见就不相一致。这种故障事件应当归属输配电工程问题,还是电能质量问题,说法不一。而设备制造厂商则可能认为电能质量就是指电源特性应当完全满足电气设备的正常工作需要,但实际上不同厂商和不同设备对电源特性的要求可能相去甚远。另外,对电能质量的认识也与电力系统的发展水平相关,特别是用电负荷的性能和结构。迄今为止,关于电能质量的定义主要有以下几种。

电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)标准化协调委员会已正式采用电能质量(Power Quality)这一术语,并且给出了相应的定义:“合格电能质量的概念是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统是均适合于该设备正常工作的”。

国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)并没有采用电能质量这个概念,而是将之归入电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)之中。它主要强调设备与设备之间的相互作用和影响,以及电源与设备之间的相互作用和影响。IEC在此基础上制定了一系列相关的电磁兼容标准。IEC标准在电能质量方面的定义:电能质量是指供电装置在正常工作情况下不中断和干扰用户使用电力的物理特性。最严重的电能质量问题是电压跌落和电压完全中断。在IEC提出的电磁兼容标准中,有许多与电能质量相关的内容,这反映了电磁兼容和电能质量有很大的兼容性。

电能质量问题的研究是由电力用户的生产需求驱动的,用户的衡量标准应占优先位置。造成用户设备故障或错误动作的任何电力问题都是电能质量问题。根据这一定义,电能质量除了保证额定电压和额定频率下的正弦波形外,其内容除包括电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、频率偏差等,还包括所有的瞬变现象,如暂态或瞬态过电压、冲击脉冲、衰减振荡等。

1.2.2 IEEE 电能质量标准

电能质量标准是保证电网安全经济运行、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管理、维护供用电双方合法权益的法律依据。从二十世纪六七十年代开始,很多国家都制定了有关供电频率和电压允许偏差的计划指标。近几年来,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。

目前,国际上有两套主流电能质量标准:IEEE 电能质量标准和 IEC 电能质量标准。

美国的国家标准主要由美国国家标准学会 (American National Standards Institute, ANSI) 和 IEEE 制定。IEEE 电能质量分委会成立于 2002 年, 下设多个工作组, 分别负责谐波、电压质量、电能质量监测、电能质量分析和治理措施等标准化工作。下面给出了一些美国 IEEE 出版的主要电能质量标准:

IEEE 519-2005 《电力系统中谐波控制推荐规程和要求》。

IEEE 1100-2005 《电子设备供电和接地的推荐规程》。

IEEE 1159-2009 《电能质量监测推荐规程》。

IEEE 1250-2002 《对电压瞬时扰动敏感设备的服务导则》。

IEEE C57. 110-2004 《供非线性负荷电流时, 确定变压器容量的推荐规程》。

IEEE 1547-2003 《分布式电源和电力系统互联标准》。

IEEE 1585-2002 《用于中压 (1~35kV) 电压波动补偿的电子串联装置功能规范导则》。

1.2.3 IEC 电能质量标准

IEC 目前制定的电能质量标准主要有如下几部分:

IEC 61000-1 《总则》, 包括基本定义、术语和方法。

IEC 61000-2 《环境》, 包括环境描述、电磁环境分类、电磁兼容水平等, 如 61000-2-4 为工厂电磁兼容水平的标准。

IEC 61000-3 《限值》, 包括发射标准和导则及对发射水平的限制值, 如 61000-3-4 为谐波发射水平的限制值的标准。

IEC 61000-4 《试验和测量技术》, 包括各种干扰环境下的抗扰水平测量技术和试验技术, 如 61000-4-30 为电能质量测量技术的标准。

IEC 61000-5 《安装和抑制导则》, 包括安装导则, 外部电磁干扰水平的抑制方法和装置。

IEC 61000-5 《通用抗扰和发射标准》, 包括对民用、商用和轻工业用电设备等的抗扰和发射水平的标准。

1.2.4 我国电能质量标准

随着我国改革开放的深入, 电网的负荷结构也随之发生了很大变化, 进而电能质量问题也日渐突出, 至今由国内标准化委员会及相关行业标委会组织制定的电能质量方面的主要标准有如下一些:

GB/T 12325-2008 《电能质量 供电电压偏差》

GB/T 12326-2008 《电能质量 电压波动和闪变》

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 18481-2001 《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》

GB/T 24337-2009 《电能质量 公用电网间谐波》

GB/T 30137-2013 《电能质量 电压暂降与短时中断》

GB/T 32507-2016 《电能质量 术语》

电能质量测量国家标准有 1 项：

GB/T 19862-2016 《电能质量 电能质量监测设备通用要求》

电能质量治理设备（装置）国家标准 4 项：

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》

GB/T 20995-2007 《输配电系统的电力电子技术 静止无功补偿装置用晶闸管阀的试验》

GB/T 26868-2011 《高压滤波装置设计与应用导则》

随着智能电网、分布式电源的发展，与之相关的标准有以下：

GB/T 20320-2013 《风力发电机组 电能质量测量和评估方法》

GB/T 29316-2012 《电动汽车充换电设施电能质量技术要求》

NB/T 31005-2011 《风电场电能质量测试方法》

NB/T 32006-2013 《光伏电站电能质量检测技术规程》

另外，还有电能质量行业标准三十余项。

1.3 电能质量问题的分类

1.3.1 稳态电能质量问题

（1）电压偏差

电压偏差是指电气设备的实际端电压与其额定电压之差，通常以其对额定电压的百分值来表示，即

$$\Delta U\% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\%$$

式中， U 为电气设备的实际端电压； U_N 为额定电压。

引起电压偏差的主要原因是由于系统滞后的无功负荷的变化。

改善电压偏差的措施：采取合适的调压方式（中枢点调压逆调压、顺调压、常调压），合理选择变压器分接头，减小系统阻抗（减少系统的变压级数、增加导线截面，如采用扩径导线或分裂导线、以电缆取代架空等手段），对无功功率进行合理补偿，改善功率因数，尽量使三相负载平衡。

（2）频率偏差

频率偏差是指供电的实际频率与电网标准频率的差值。频率偏差与系统有功功率的变化密切相关。系统频率的允许偏差一般为额定频率 $\pm 0.2 \sim 0.5\text{Hz}$ 。

（3）谐波

谐波是指对周期性非正弦交流量进行傅里叶级数分解所得到的频率为基波频率的整数倍的各分量。这是由电力系统中的装置和负载的非线性特性引起的波形畸变。谐波会使电动机、变压器等电气设备产生附加损耗，引起发热，导致绝缘损坏；使电容器极易发生短路甚至造成短路；还会造成通信干扰和计量误差。一般来讲，奇数次谐波引起的危害比偶数次谐波大。这是因为在三相平衡系统中，对称关系的存在使得偶数次谐波被抵消，只包含奇数次谐波，尤其以 3、5、7 次谐波为主。

(4) 间谐波

电压和电流的频率不是基波频率的整数倍,包括小于基波频率的分数次谐波。间谐波主要由静止变频器、周波变频器、感应电机和电弧设备等产生。另外,电力载波也可以认为是一种间谐波。

(5) 电压波动和闪变

电压在短时间内的快速变动情况,通常以电压幅度波动值和波动频率来衡量电压波动的程度。实际工作中,当其变化速度等于或大于每秒0.2%时认为出现电压波动。

$$\Delta U\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\%$$

式中, $U_{\max}$ 为用电设备端电压的最大波动值; $U_{\min}$ 为用电设备端电压的最小波动值。

负荷急剧的波动造成供配电系统瞬时电压升高,照明装置发光强度会随之急剧变化,使人眼对灯闪感到不适,这种现象称为电压闪变。

导致电压波动和闪变的原因是系统的冲击性负荷。电弧炉、轧钢机、电弧焊机和高速磁悬浮列车系统等波动性负荷,在运行过程中有功、无功会随机或周期性大幅度变化,易引起系统的电压波动和闪变。

(6) 三相不平衡

三相不平衡是指三相电力系统中三相不对称的程度。电压负序分量与电压正序分量之比值称为电压的不对称度,电流负序分量与电流正序分量之比值称为电流的不对称度,均以百分数表示。造成系统三相不平衡的原因:一方面是容量不对称负荷的接入;另一方面是电网中的谐波造成的三相不平衡,也可能是由于电网中的单相负荷过重或者单相故障造成的。

(7) 过电压

过电压是指电压的有效值升高为额定值的1.1~1.2倍,即1.1~1.2pu(pu为标幺值),且持续时间大于1min。过电压主要有电网内因产生的过电压和环境外因产生的过电压。其中,电网内因过电压产生的原因包括空载线路开合闸、不对称线路单相接地故障、切空载线路时电弧自燃、电弧接地、线路重合闸、切空载变压器、谐波振荡等。环境外因过电压包括直击雷、感应雷、大风吹荡线路引起的过电压等。

(8) 欠电压

欠电压是指电压的有效值降低为额定值的0.8~0.9倍,即0.8~0.9pu,且持续时间大于1min。欠电压产生的原因主要有用户侧发生故障或是负荷丢失。

(9) 电压切痕

电压切痕又称为电压缺口,是指一种持续时间小于0.5周波的周期性电压扰动,反映为工频电压波形上周期性的出现缺口现象,以缺口的深度和持续时间为特征。电压切痕主要是由于电力电子装置由一相换到另一相时,参与换相的电路瞬时短路而造成的。与电压切痕相关的频率分量相当高。

(10) 直流偏移

交流电网中如果存在直流分量,则称为直流偏移。公用电网中,直流成分一般很小,可以忽略。但是,若接入某些非对称的可控负荷或利用大地作为直流输电线及由于地磁暴产生的电磁干扰,直流电流可能较大,造成危害,如引起变压器的直流偏磁从而产生附加损耗等。

1.3.2 暂态电能质量问题

(1) 电压暂降

电压暂降又称为电压凹陷、电压跌落,是指在工频情况下电压或电流的有效值降低至 $0.9 \sim 0.1\text{pu}$,且持续时间在 $0.01\text{s} \sim 1\text{min}$ 的一种电磁扰动现象。引起电压暂降的原因主要包括电力系统的短路故障、变压器的投运、感应电机的起动、起动电流较大的大型负荷的接入等。

(2) 电压暂升

电压暂升又称为电压凸起、电压骤升,是指在工频情况下电压或电流的有效值升高至 $1.1 \sim 1.8\text{pu}$,且持续时间为 $0.01\text{s} \sim 1\text{min}$ 的一种电磁扰动现象。引起电压暂升的原因主要包括配电网发生单相接地故障、大型负荷的切除、大容量电容器组的充电等。

(3) 电压中断

电压中断是指在一定时间内,一相或多相线路完全失去电压(即电压降至 0.1pu 以下),其中持续时间为 $0.01 \sim 3\text{s}$ 的称为瞬时中断,持续时间为 $3\text{s} \sim 1\text{min}$ 的称为暂时中断,持续时间为 1min 以上的称为持续中断。对于暂态来说,即指持续时间不超过 1min 。系统或设备故障、控制误动、电压暂降发展成为中断,都是引起电压中断的原因。

(4) 脉冲暂态

脉冲暂态又称为瞬时脉冲,它表示在两个连续稳态之间的一种在极短时间内发生的现象或数量变化。脉冲可以是任一极性的单方向脉冲,也可以是发生在任一极性的阻尼震荡波第一个尖峰。雷击、非良好接地、静电放电等都是引起脉冲暂态的原因。

(5) 振荡暂态

振荡暂态是指电压、电流或两者在稳态情况下突然发生非工频且正极性和负极性两方面的变化。

在暂态电能质量问题中,尤其是电压暂降和电压短时中断已经成为国际上共同关注的问题。这类问题对于具有较强耐受性的传统机电设备也许没有明显的影响,但对于日益增加的敏感用电负荷,如微电子控制的生产流程、集成电路芯片制造等则可能造成极大的危害。因此,近些年以来,对这类问题的研究已经成为业界热门。在实际电力系统中,由于电网拓扑结构的复杂性和负荷的多样性,电能质量扰动有时是复合的,即同时包含两种及其以上的扰动类型。

1.4 电能质量扰动检测方法

较之电能质量的定位与分类,电能质量扰动检测是提高电能质量的非常基本和重要的环节。正确发现扰动可以及时触发相应的功能模块,以便记录扰动期间的数据,便于后续的分析处理。判断是否存在电能质量扰动,并且计算扰动的起止时刻、持续时间是电能质量扰动检测的开始,也是实现后续处理的基础。

检测方法可以分为时域分析方法、频域分析方法、时-频域分析方法等。

1.4.1 时域分析方法

时域分析方法在电能质量分析中应用得非常广泛。其主要是指基于各种矢量变换和瞬时

无功功率理论的电能质量扰动分析方法, 以及利用一些时域仿真程序对各种暂态电能质量扰动进行研究。

矢量变换可以使电能质量扰动分析问题得到简化, 常用的矢量变换有 $\alpha\beta$ 变换、dq 变换、对称分量变换等。瞬时无功功率理论是在 $\alpha\beta$ 变换、dq 变换的基础上提出的。其原理是将三相电路的描述方式转换到 $\alpha\beta$ 两相正交的坐标系上进行研究, 并定义了三相电路瞬时有功功率、瞬时无功功率。

常用的时域仿真程序分为两大类: 一类是系统暂态仿真程序, 如 EMTF、EMTDC、NETOMAC、ATP 等, 另一类是电力电子仿真程序, 如 SPICE、PSPICE、SABER 等。由于电力系统主要由 R、L、C 等元件组成, 电力元件方程用微分方程表示。这些程序在求解方程时, 通常采用简单易行的变阶、变步长、隐式梯形积分法, 可保证求解过程中的数值稳定, 采用变阶、变步长技术也可缩短迭代计算的时间。另一方面, 仿真步长的选取决定了可模仿的最大频率范围, 因此暂态过程的频率覆盖范围必须事先已知, 这也是采用时域仿真计算方法的缺点。

利用仿真程序可以实现如下一些研究:

- 1) 计算并分析系统中出现的过电压及其对各种保护设备的影响。
- 2) 分析电力电子装置产生的电压缺口现象, 开发能改善电能质量的新型电力电子装置。
- 3) 分析电容器投切造成的暂态现象。
- 4) 分析电弧炉等电压波动引起的电压闪变现象。
- 5) 分析不正常接地引起的电能质量问题。
- 6) 分析电压暂降等电能质量问题对各种用电设备造成的影响。
- 7) 实现电力设备、元件的建模。
- 8) 实现电力系统的谐波分析。

1.4.2 频域分析方法

频域分析方法主要包括傅里叶分析、谱分析等。傅里叶变换是数字信号处理中的重要数学变换。1822 年法国数学家傅里叶首次提出并证明了将周期函数展开为正弦级数的原理, 从而奠定了傅里叶级数和傅里叶变换的理论基础。快速傅里叶变换的出现使得傅里叶变换在电能质量扰动检测中得到了飞速发展。应用计算机实现傅里叶变换只能采用离散傅里叶及其快速方法, 但具有时域加窗和频域采样特性, 会导致频谱泄漏和栅栏效应, 使得检测结果出现误差。

频域分析方法主要用于电力系统中的谐波分析, 包括频谱扫描、谐波潮流计算等。新型的混合谐波潮流计算方法, 考虑了非线性负载的动态特性, 对非线性负载用微分方程描述, 利用时域仿真对非线性负载进行计算, 求出各次谐波动态电流矢量, 得到动态谐波潮流解。其优点是可详细考虑非线性负载控制系统的作用, 因此可精确描述其动态特性。其缺点是计算量大, 求解过程复杂。

频域分析中还有一个常用的方法, 即对称分量法。它的优点是概念清晰、建模简单、算法成熟, 不足之处在于计算量大、耗时长。相对于暂态问题, 电能质量中稳态问题, 如谐波、电压波动和闪变、三相不平衡等, 具有变化相对较慢、持续时间较长等特点, 所以通常