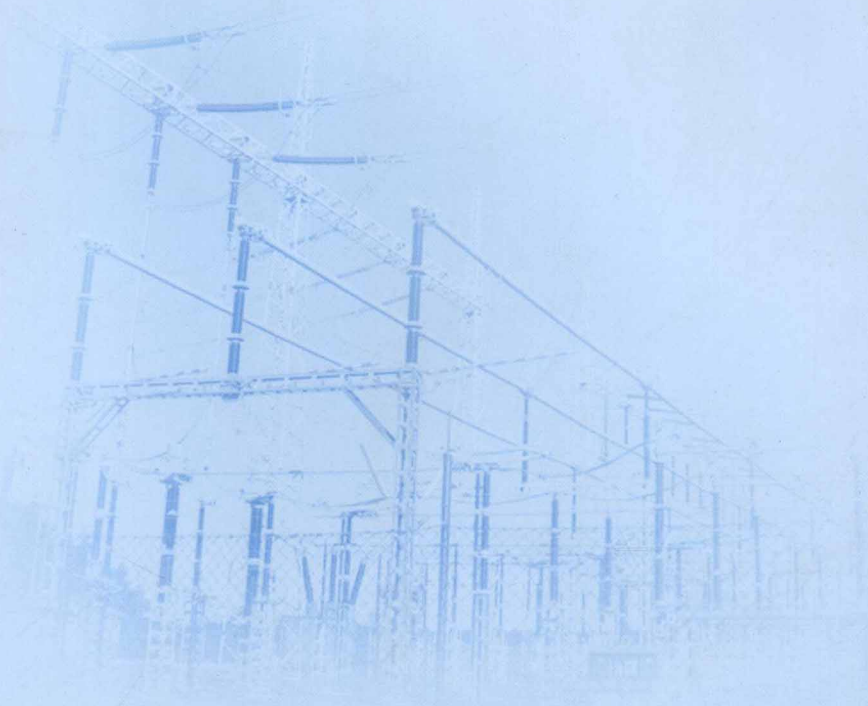




电能质量监测与分析

程浩忠 吕干云 周荔丹 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

电能质量监测与分析

程浩忠 吕千云 周荔丹 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述了电能质量监测与分析中电能质量的研究现状、传统电能质量、动态电能质量、电能质量检测、电能质量自动识别、暂态电能质量分析、电能质量综合评估、电能质量诊断、电能质量在线监测系统、电能质量治理概述、无源滤波器、有源滤波器、动态电压恢复器、静止式动态无功功率补偿器、电能质量监测系统、高速磁悬浮列车的电能质量分析和综合补偿、电压波动和闪变的产生和抑制范例。

本书可供各级电力系统及电力电子等相关领域从事电能质量教学、研究、开发和管理的工程技术人员学习和参考,还可作为电气工程、电力系统等专业的研究生及高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量监测与分析/程浩忠,吕干云,周荔丹著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034995-8

I. ①电… II. ①程…②吕…③周… III. ①电能-质量分析
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 134205 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:朱光兰
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

装 订 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 27 3/4

字数: 559 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着科学技术及工业的发展,许多自动化程度很高的工业用户对电能质量越来越敏感,任何电能质量问题都将导致产品质量的下降,甚至工程作业的停顿,给用户造成不可估量的损失。信息科技的发展对电能质量及供电可靠性提出更高的要求。信息电力供应区别于传统电力供应的主要特征在于:除了人们熟知的稳态电压质量问题、谐波问题和电能的可靠性问题之外,还包括未为人们所熟知的动态电能质量问题。信息电力供应是指以信息技术为先导的知识经济时代所需求的电力供应,它应该具有高可靠、高动态恒定、互不干扰、控制灵活、应用方便等特点。如何提供方便及优质的电能,使之更好地为信息化社会服务,是当今智能电网发展背景下电力工作者面临的新机遇和新挑战。同时,现代电力系统中,电力电子设备的应用越来越广泛,各种非线性、冲击性、波动性负载也大量增加,使电力系统所遭受的电能质量污染也日趋严重。国家《节能中长期专项规划》、《国家“十一五”规划纲要》和《能源发展“十一五”规划》等规划和纲要明确了节能环保的具体要求,推进了我国向新型节能型国家迈进的步伐。电能质量直接关系到国民经济的总体经济效益和环境效益,因此对电能质量进行深入研究有着非常重要的意义。

本书论述了有关电能质量监测与分析问题。全书内容分为四篇,共 17 章。四篇内容分别论述了电能质量概况、电能质量评估与监测、电能质量治理对策、电能质量问题解决方案实例。其中第一篇(第 1~6 章)分别论述了电能质量的研究现状、传统电能质量(涉及电力系统电压偏差、频率偏差、谐波、电压波动和闪变、三相不平衡、间谐波)、动态电能质量、电能质量检测、电能质量自动识别、暂态电能质量分析;第二篇(第 7~9 章)论述了电能质量监测和分析概况、电能质量指标的综合评估、电能质量诊断、电能质量在线监测系统;第三篇(第 10~14 章)介绍了电能质量治理概况、无源滤波器、有源滤波器、动态电压恢复器、静止式动态无功功率补偿器;第四篇(第 15~17 章)介绍了某供电公司电能质量监测系统、高速磁悬浮列车的电能质量分析和综合补偿、电压波动和闪变的产生和抑制范例。

作者在电能质量方面有着很长时间的 research 经历和扎实的研究基础,所在团队从事电能质量相关研究十余年,完成 60 多项有关电能质量方面的课题。作者在电能质量等领域已发表论文 100 余篇。“城市电网电灾防治关键技术与应用”获得国家科技进步二等奖,“电力系统安全保障技术”获上海市科学技术一等奖,“电能质量分析模型及其应用”获上海市科技进步二等奖,有些研究成果已达到国际先进水平;有三项涉及电能质量的专利已经获得国家专利授权。本书以上述项目的报告

和论文为背景,对作者及其团队在电能质量方面的工作和成果进行总结,以期推动电能质量的理论、方法和应用工作。

本书第1、3、9~11、13、15~17章由上海交通大学程浩忠教授执笔,第2、4~8章由浙江师范大学吕干云副教授执笔,第12、14章由上海交通大学周荔丹副研究员执笔。本书兼顾理论与实用方法的结合,能使读者较快地进入这一领域,并对电能质量问题的前沿与最新进展有一个全面的了解。本书的许多工作先后获得了国家自然科学基金、国家863计划、国家科技支撑计划、上海市科学技术委员会、上海市教育委员会、国家电网公司华东电网有限公司、上海市电力公司、上海市区供电公司、上海市东供电公司、上海市南供电公司、上海电气集团的资助,并将研究成果用在以上单位的工程实践中,反映了最新的学术思想和潮流。本书内容的范围着重于电能质量新技术,体系结构比较完整,写作过程充分考虑理论与实践的结合、实用技术和最新学术成果的结合、理论和方法的应用及其取得的成果。同时有许多成果来自作者指导的一些博士研究生和硕士研究生的研究工作。例如,书中引用了博士研究生吕干云、丁屹峰、许仪勋、占勇、田书欣、张立波,以及硕士研究生陈海昆、孙毅斌、王海群、陈家良、周江昕、袁静蔚、葛乃成、贺玉婷、胡丹、王霄桦、钟明明、葛长宏、徐俊、熊以旺、曹祥、何吉彪、龚小雪、马洲俊、阎鼎的研究成果。汤承江副教授和洪绍云博士研究生仔细通读了书稿,进行了相应的校核工作。上海交通大学电子电工中心的张志刚副教授也为该书的撰写提供了许多资料。在此对他们表示感谢!

本书一些基础的内容参考在作者在清华大学出版社出版的《电能质量》和在中国电力出版社出版的《电能质量概论》。

由于目前国内外电能质量这一领域还在发展中,加之作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

作 者

2012年3月于上海交通大学

目 录

前言

第一篇 电能质量概况

第 1 章 绪论	3
1.1 引言	3
1.2 电能质量的定义	3
1.3 电能质量的特点	4
1.4 电能质量的主要分析方法	5
1.4.1 时域仿真法	5
1.4.2 频域分析法	6
1.4.3 基于变换的方法	6
1.5 电能质量的研究现状	8
1.5.1 电能质量分析的研究现状	8
1.5.2 电能质量监测的研究现状	12
1.5.3 电能质量评估的研究现状	14
1.5.4 电能质量控制的研究现状	14
第 2 章 传统电能质量	18
2.1 电力系统电压偏差	18
2.1.1 电力系统电压偏差的基本概念	18
2.1.2 电力系统电压偏差的影响	18
2.1.3 电力系统电压偏差的标准	21
2.2 电力系统频率偏差	22
2.2.1 电力系统频率偏差的基本概念	22
2.2.2 电力系统频率偏差的影响	24
2.2.3 电力系统频率偏差的标准	26
2.3 电力系统谐波	28
2.3.1 电力系统谐波的基本概念	28
2.3.2 电力系统谐波的分析方法	31
2.3.3 电力系统谐波的来源及影响	32
2.3.4 电力系统谐波的标准	33

2.4	电压波动和闪变	36
2.4.1	电压波动和闪变的基本概念	36
2.4.2	电压波动和闪变的产生原因及危害	41
2.4.3	电压波动和闪变的标准	41
2.5	电力系统三相不平衡	42
2.5.1	电力系统三相不平衡的基本概念	42
2.5.2	电力系统三相不平衡的危害	44
2.5.3	电力系统三相不平衡的标准	45
2.6	电力系统间谐波	46
2.6.1	电力系统间谐波的基本概念	46
2.6.2	电力系统间谐波的来源及危害	47
2.6.3	电力系统间谐波的标准	48
2.7	本章小结	49
第3章	动态电能质量	50
3.1	暂时过电压和瞬态过电压	50
3.1.1	暂时过电压和瞬态过电压的概念	50
3.1.2	工频过电压的机理与限制	51
3.1.3	谐振过电压的机理与限制	56
3.1.4	操作过电压的机理与限制	69
3.1.5	雷电压的保护	72
3.1.6	过电压限值和要求	72
3.2	电压暂降	76
3.2.1	电压暂降的概念	76
3.2.2	电压暂降的来源	77
3.2.3	电压暂降的危害	77
3.2.4	电压暂降的标准	79
3.2.5	电压暂降值的测量和计算	80
3.2.6	抑制电压暂降的措施	85
3.3	本章小结	89
第4章	电能质量检测	90
4.1	基于改进锁相环的电能质量检测	90
4.1.1	基本原理	90
4.1.2	检测仿真	91
4.1.3	改进及其仿真	98
4.2	基于移相的无延时电能质量检测	99

4.2.1 基本原理	99
4.2.2 检测仿真	101
4.3 基于 S 变换的电能质量检测	104
4.3.1 基本原理	104
4.3.2 检测仿真	105
4.4 本章小结	110
第 5 章 电能质量自动识别	112
5.1 引言	112
5.2 基于集成神经网络的电能质量自动识别	112
5.2.1 集成神经网络	112
5.2.2 最小二乘加权融合集成神经网络	113
5.2.3 加权集成神经网络的电能质量自动识别	115
5.3 基于改进灰色关联分析的电能质量自动识别	119
5.3.1 灰色关联分析	119
5.3.2 改进的灰色关联分析	119
5.3.3 改进灰色关联分析在电能质量识别中的应用	122
5.4 基于支持向量机的电能质量自动识别	126
5.4.1 支持向量机	126
5.4.2 基于改进锁相环和支持向量机的电能质量自动识别	130
5.4.3 基于移相检测和 $N-1$ 支持向量机分类器的电能质量自动识别	133
5.4.4 讨论	138
5.5 基于关联向量机和 S 变换的电能质量自动识别	139
5.5.1 关联向量机	139
5.5.2 利用关联向量机进行的电能质量扰动识别	140
5.6 本章小结	145
第 6 章 暂态电能质量分析	147
6.1 引言	147
6.1.1 暂态电能质量概述	147
6.1.2 短时电压变动	148
6.1.3 电磁暂态	149
6.2 Prony 算法分析	150
6.2.1 Prony 算法的建模	150
6.2.2 Prony 算法的求解	150
6.3 间谐波模型的 Prony 谱估计	151
6.3.1 间谐波分析基础	152

6.3.2 谐波和间谐波信号的 Prony 建模	152
6.4 电能质量去噪模型的 Prony 谱估计	153
6.4.1 小波变换原理	153
6.4.2 白噪声的小波变换特性	155
6.4.3 软阈值去噪原理	156
6.5 电压暂降分析	157
6.5.1 基于 S 变换的电压暂降特征分析	157
6.5.2 基于改进锁相环的电压暂降特征分析	162
6.6 基于旋转向量法的暂态电能质量分析	167
6.6.1 基本原理	167
6.6.2 仿真及结果分析	169
6.7 本章小结	173

第二篇 电能质量评估与监测

第 7 章 电能质量综合评估	177
7.1 引言	177
7.2 电能质量综合评估体系	178
7.3 基于熵权的模糊电能质量综合评估	180
7.3.1 模糊熵基本原理	180
7.3.2 基于熵权的模糊综合评估模型	181
7.3.3 算例分析	183
7.4 本章小结	184
第 8 章 电能质量诊断	185
8.1 引言	185
8.2 谐波源定位与诊断	186
8.2.1 基于等效电路模型的定位法	186
8.2.2 基于谐波状态估计的定位法	188
8.3 电压暂降源定位与诊断	189
8.3.1 已有的四种电压暂降源定位法	189
8.3.2 基于分类的电压暂降源定位法	193
8.3.3 基于三点法的电压暂降源定位法	198
8.4 本章小结	203
第 9 章 电能质量在线监测系统	205
9.1 引言	205
9.2 系统总体架构	206

9.3 软件设计	206
9.3.1 软件功能模块	206
9.3.2 实时分析流程图	207
9.3.3 功能模块算法设计	209
9.4 系统验证	216
9.5 本章小结	220

第三篇 电能质量治理对策

第10章 电能质量治理概述	225
10.1 无源滤波器	225
10.2 有源滤波器	226
10.3 动态电压恢复器	228
10.4 统一电能质量调节器	230
10.5 静止式动态无功功率补偿器	231
10.6 本章小结	233
第11章 无源滤波器	235
11.1 滤波装置接线方式和滤波方案	235
11.1.1 接线方式	235
11.1.2 滤波方案	236
11.2 滤波器的滤波效益	236
11.3 单调谐滤波器	238
11.3.1 阻抗特性	238
11.3.2 等效频率偏差	239
11.3.3 品质因数及其对滤波效益、滤波容量的影响	240
11.3.4 等效频率偏差与滤波效益	241
11.4 高通滤波器	242
11.4.1 阻抗和等值电路	243
11.4.2 品质因数	243
11.4.3 阻抗频率特性	244
11.4.4 高通滤波器损耗	245
11.5 滤波装置参数选择	246
11.6 单调谐滤波器的参数选择	247
11.6.1 单调谐滤波器主参数选择的原则	247
11.6.2 单调谐滤波器容量的确定	250
11.6.3 单调谐滤波器其他参数的确定	253

11.7 高通滤波器的参数选择	253
11.7.1 高通滤波器基波容量的确定	253
11.7.2 高通滤波器电容、电感、电阻的确定	254
11.7.3 高通滤波器的校验和电容器电压的确定	256
11.8 本章小结	256
第12章 有源滤波器	258
12.1 APF 的基本原理	258
12.2 谐波电流检测技术	259
12.3 APF 的电流跟踪控制技术	262
12.4 不同拓扑结构的 APF	265
12.4.1 三相全桥并联 APF	266
12.4.2 单相全桥结构并联 APF	282
12.5 APF 的应用	289
12.6 本章小结	292
第13章 动态电压恢复器	293
13.1 引言	293
13.1.1 用户电力技术的提出	293
13.1.2 电压暂降	294
13.2 DVR 装置工作原理及系统组成	294
13.2.1 DVR 装置的结构及系统组成	294
13.2.2 DVR 装置的工作原理	297
13.2.3 各类型 DVR 电路结构比较	299
13.3 DVR 的检测算法	302
13.3.1 常用检测方法简介	303
13.3.2 基于广义无功理论进行改进的检测方法	304
13.3.3 软件锁相环在检测算法中的应用	306
13.4 DVR 的整流与逆变控制	308
13.4.1 控制原理	308
13.4.2 仿真实验	309
13.5 本章小结	317
第14章 静止式动态无功功率补偿器	320
14.1 概述	320
14.2 系统电压平衡时 STATCOM 的稳态运行分析	322
14.3 STATCOM 的基本控制策略	325
14.3.1 电流控制方法	325

14.3.2 STATCOM 接入系统控制策略	328
14.4 三相全桥结构 STATCOM	332
14.4.1 系统对称情况	332
14.4.2 系统不对称情况	332
14.4.3 控制方法	333
14.4.4 仿真分析	334
14.5 STATCOM 的应用	344
14.6 本章小结	346

第四篇 电能质量问题解决方案实例

第 15 章 某供电公司电能质量监测系统	351
15.1 引言	351
15.2 电能质量数据格式与数据压缩	351
15.2.1 PQDIF 规范	352
15.2.2 PQDIF 的数据对象建模	353
15.2.3 电能质量数据压缩	354
15.3 基于 Web 技术的电能质量监测与分析系统	355
15.3.1 电能质量监测系统架构设计	355
15.3.2 基于 Web 技术的 B/S 模型三层体系结构	356
15.4 电能质量监测与分析系统的软件开发	358
15.5 电能质量监测与分析系统的应用	362
15.6 本章小结	367
第 16 章 高速磁悬浮列车的电能质量分析和综合补偿	368
16.1 国内外研究概况	368
16.1.1 谐波问题	368
16.1.2 其他问题	369
16.2 高速磁悬浮列车系统与电网谐波	370
16.2.1 牵引供电系统组成	370
16.2.2 电路模型	371
16.2.3 谐波分析	372
16.3 高速磁悬浮列车系统与电压波动	376
16.3.1 电压波动测量	376
16.3.2 电压波动计算	378
16.4 高速磁悬浮列车系统的电能质量综合补偿	379
16.4.1 高速磁悬浮列车系统电能质量补偿的特点	379

16.4.2 列车系统现有的电能质量补偿措施及存在问题	380
16.4.3 电能质量补偿措施的改进	380
16.5 本章小结	388
第 17 章 电压波动和闪变的产生和抑制范例	389
17.1 电压波动的产生	389
17.2 闪变信号的产生	390
17.3 风力发电引起的电压波动与闪变	391
17.3.1 机理分析	391
17.3.2 研究成果	393
17.3.3 影响因素	393
17.3.4 发展展望	394
17.3.5 某风电场电压闪变测试	395
17.4 电弧炉引起的电压波动与闪变	398
17.4.1 电弧炉的供电回路	398
17.4.2 电弧炉的电气特性	399
17.4.3 电弧炉的运行特性	400
17.4.4 电弧炉的电力调整与电压闪变	401
17.4.5 影响电弧炉闪变的因素	402
17.4.6 电弧炉三相非线性时变电弧阻抗模型	402
17.4.7 炼钢电弧炉电压波动的计算分析	404
17.4.8 炼钢电弧炉电压波动的抑制对策	406
17.4.9 无功冲击负荷引起电网电压波动值和 SVC 补偿容量的计算	407
17.4.10 闪变改善率的测量方法	410
17.4.11 用新型静止无功发生器抑制由电弧炉引起的闪变	411
17.5 电压波动的主要抑制措施	414
17.6 本章小结	415
参考文献	417

第一篇 电能质量概况

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

电能是一种最为广泛使用的二次能源,其应用程度已成为一个国家发展水平的主要标志之一。电能是一种经济、实用、清洁且容易控制和转换的能源形态,是由电力部门向电力用户提供,并由发、供、用三方共同保证质量的一种特殊产品,它同样具有产品的若干特征。电能作为走进市场的商品,与其他商品一样,无疑应讲求质量。随着科学技术和国民经济的发展,不仅对电能的需求量日益增加,同时对电能质量的要求也越来越高。

自 20 世纪 80 年代以来,随着新型电力负荷迅速发展以及它们对电能质量的要求不断提高,电能质量才逐渐成为电力企业和用户共同关心的问题。改善电能质量对于电网和电气设备的安全、经济运行、产品质量和科学实验以及人民生活 and 生产的正常运行等均有重要意义。据美国电力科学研究院估计^[1],电能质量相关的问题在美国每年造成的损失高达 260 亿美元。

随着大量精密仪器和电子装置的使用,电力用户已提高了对电能质量的认识,越来越多的用户向电力部门提出了高质量供电的要求。提高电能质量、满足生产发展需求已经成为供用电双方共同的愿望。深入分析和研究电能质量问题,探寻在一定条件下发生电磁干扰的因果关系,明确责任和义务,是适应市场竞争和可持续发展所必需的。

1.2 电能质量的定义

目前并没有一个统一的电能质量定义。IEEE 协调委员会对电能质量(power quality)的技术定义^[2]为:合格的电能质量是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统均是适合该设备正常工作的。IEC 标准对电能质量的定义为: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^[3]。最严重的电能质量问题是电压跌落和电压完全中断。

针对这种情况,IEEE 第 22 标准协调委员会和其他国际委员会最新采用 11 种指标来衡量电能质量,它们可以分为三大类:

1) 电压幅值

(1) 断电(interruption)。在一定时间内,一相或多相完全失去电压(低于

0.1p. u.)。按持续时间长短分为:

瞬时断电 0.5T~3s(T 为 1 个周期)

暂时断电 3~60s

持续断电 60s 以上

(2) 电压暂降或称电压下跌(voltage sag)。电压持续时间 0.5T~1min,幅值 0.1~0.9p. u.。系统频率为标称值。

(3) 电压上升(voltage swell)。电压持续时间为 0.5T~1min,幅值为 1.1~1.8p. u.。

(4) 瞬时脉冲(transient impulse)。在两个连续稳态之间的一种在极短时间内发生的电压(电流)变化,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振荡波的第一个尖峰。

(5) 电压波动与闪变(voltage fluctuation and flicker)。电压波动是在包络线内电压的有规则变动,或是幅值不超出 0.9~1.1p. u. 范围的一系列随机变化。闪变则是指电压波动对照明灯的视觉影响。

(6) 电压切痕(voltage notch)。电压切痕是一种持续时间小于 0.5T 的周期性电压扰动。

(7) 过电压(overvoltage)。电压或电流持续时间大于 1min,幅值为 1.1~1.2p. u.。

(8) 欠电压(undervoltage)。电压或电流持续时间大于 1min,幅值为 0.8~0.9p. u.。

2) 电压波形

(1) 谐波(harmonic)。含有基波整数倍频率的正弦电压。

(2) 间谐波(inter-harmonic)。含有基波非整数倍频率的正弦电压,也包括小于基波频率的分数次谐波。

3) 频率偏差(frequency deviation)

频率偏差是指系统频率的实际值和标称值之差。

在我国,目前电能质量问题主要包括:供电电压偏差、频率偏差、公用电网谐波、间谐波、电压波动和闪变、电压三相不平衡,对此都有相应的国标。

1.3 电能质量的特点

电能质量的研究,不仅仅是对数学模型的精确描述,由于电能的特殊性,它有以下几个特点:

(1) 电能质量的动态性。电能从发电生产到用户消耗是一个整体,其流动始终处于动态平衡中,并且随着电网结构和负荷的改变而不断变化。在整个电力系