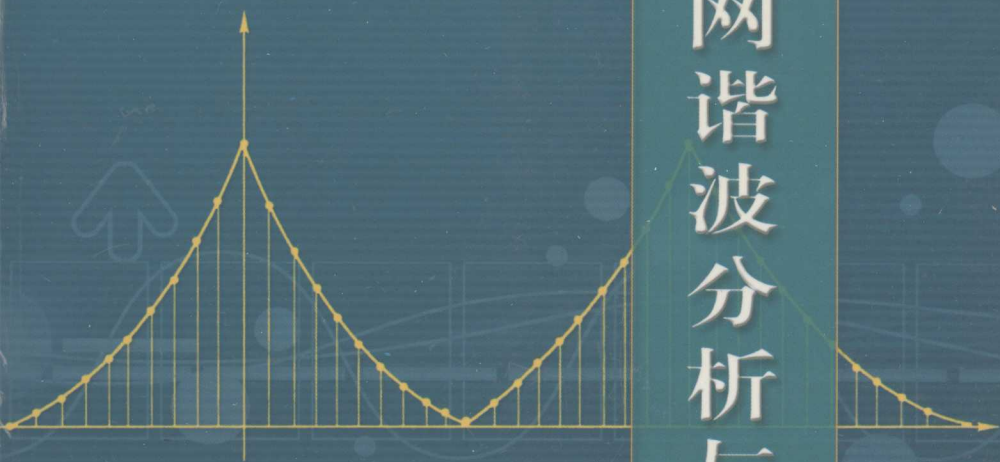


任子暉 著

煤矿电网谐波分析与治理

中国矿业大学出版社



煤矿电网谐波分析与治理

任子晖 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是论述有关煤矿电网谐波问题的专著,介绍了谐波的基本概念和畸变波形的分析方法,论述了谐波对电网中供用电设备和通信系统造成的危害,详细介绍 DXF—Ⅱ型谐波测量仪的组成与原理以及煤矿电网谐波的测量方法,通过实例讨论了用于抑制提升机变频器谐波的无源滤波器的设计步骤、方法和应注意的问题,最后介绍了有源电力滤波器的原理和三相电路的瞬时功率理论。

本书可作为大专院校相关专业的教学用书,亦可供煤矿供用电部门的专业技术人员参考。

图 书 在 版 编 目 (C I P) 数 据

煤矿电网谐波分析与治理/任子晖著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2003. 11

ISBN 7 - 81070 - 801 - 5

I. 煤… II. 任… III. 煤矿—电力系统—
谐波—研究 IV. TD. 61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 098912 号

书 名 煤矿电网谐波分析与治理

著 者 任子晖

责任编辑 何 戈

责任校对 崔永春

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 5.125 字数 130 千字

版次印次 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

定 价 15.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

随着电力电子技术的飞速发展,各类电力电子装置在工矿企业和家用电器中的应用日益广泛,取得了巨大的社会效益和经济效益。但与此同时,电力电子技术和装置的应用也造成了电力系统的谐波污染,并且日趋严重。电力系统受到谐波污染后,轻则增加能耗,重则损害设备或引发严重的供用电事故。

我国煤矿电网谐波问题是随着 20 世纪 80 年代初引进国外大功率变流器供电提升机的使用与推广,对煤矿电网中的供用电设备造成了不良影响而产生并受到关注的。1988 年原煤炭工业部委托中国矿业大学吴震春教授领导的电网谐波研究室对煤矿电网谐波问题进行分析、研究,先后承担并完成了部重点项目、煤炭基金项目等。

作者很荣幸地能在吴震春教授的指导下,从 1988 年开始从事煤矿电网谐波的研究工作。十多年来我们所做的主要工作包括:

——对全国十多个矿务局近三十个煤矿的电网进行了测试与分析,通过分析测试基本掌握了我国煤矿电网谐波的状况。煤矿电网中最主要的谐波源是为直流提升机供电的晶闸管变流装置,是谐波治理的主要对象。

——研制了适合于煤矿现场使用的 DXF—I 型便携式谐波分析仪和 DXF—II 型多功能谐波分析仪,并在煤矿中得到了应用。

——举办了 3 期煤矿电网谐波分析、测试和治理专业知识培训班,为在煤矿供用电部门从事相关工作的专业技术人员和管理人员中普及谐波专业知识发挥了积极的作用。

——在谐波问题较严重的矿井实施了谐波治理,为其提升设备设计、安装了谐波滤波器,有效地改善了这些矿井电网的运行状况和供电质量,使其达到了国家标准的要求。

上述工作对我国煤矿电网谐波的分析、测试与治理等方面的研究工作起到了一定的推动作用,并使煤矿的有关领导和工程技术人员对谐波的产生、危害等有了较全面的认识。

本书共分六章,第1章绪论,介绍谐波的基本概念;第2章电网谐波的分析方法;第3章谐波的危害;第4章煤矿电网谐波测量仪器和方法;第5章无源电力滤波器设计 and 应用实例;第6章有源电力滤波器。

作者衷心感谢吴震春教授多年来的指导和帮助,也非常感谢原来的同事、现在东华大学工作的仇润鹤教授,我们曾一起愉快地合作了十几年,很多工作都是我们一起完成的。

虽然本书是作者在从事煤矿电网谐波问题研究的基础上完成的,由于作者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

任子晖

2003年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 谐波问题的提出	1
1.2 谐波的基本概念	2
1.2.1 谐波	2
1.2.2 特征谐波和非特征谐波	3
1.3 我国煤矿电网谐波问题	3
1.4 研究谐波的意义	4
1.5 抑制电网谐波的方法	7
2 电网谐波的分析方法	10
2.1 非正弦周期量的频谱分析	10
2.1.1 非正弦周期函数分解为傅立叶级数	10
2.1.2 根据波形对称所做的简化	13
2.1.3 非正弦周期函数的频谱	15
2.1.4 傅立叶级数的指数形式	17
2.2 非正弦周期信号的采样和离散傅立叶变换	18
2.2.1 非正弦周期信号的采样	18
2.2.2 离散傅立叶级数的指数形式	21
2.2.3 快速傅立叶变换(FFT)	24
2.3 畸变波形的数字特征	29
2.3.1 非正弦周期量的有效值	29
2.3.2 谐波含有率和总谐波畸变率	30

2.3.3 非正弦电路的功率和功率因数	32
2.4 小波分析法	34
2.4.1 小波变换及性质	35
2.4.2 多分辨分析	36
2.4.3 小波变换谐波检测的特点	37
3 谐波的危害	38
3.1 谐波谐振	39
3.1.1 并联谐振	39
3.1.2 串联谐振	40
3.2 谐波对旋转电机的危害	41
3.2.1 谐波损耗	41
3.2.2 谐波转矩	44
3.3 谐波对静止电力设备的危害	45
3.3.1 输电线	45
3.3.2 电力电缆	45
3.3.3 电力变压器	46
3.3.4 电力电容器	46
3.4 谐波对测量仪表的影响	47
3.4.1 电压表	48
3.4.2 电流表	49
3.4.3 谐波对功率测量的影响	50
3.5 谐波对继电保护装置的影响	51
3.5.1 电磁型继电器	51
3.5.2 感应型继电器	52
3.5.3 整流型继电器	52
3.5.4 晶体管继电器	52
3.6 谐波对用电设备的影响	54

3.6.1	对电视机的影响	54
3.6.2	对计算机的影响	54
3.6.3	对变流装置的影响	54
3.7	电力谐波对通信的干扰	55
3.7.1	电话线路模型	56
3.7.2	影响干扰的因素	57
3.7.3	电力系统对通信线路的耦合	57
3.8	通信回路对干扰信号的敏感度	60
3.8.1	噪声加权评价制	61
3.8.2	C 信息加权评价制	63
3.8.3	$I \cdot T$ 乘积和 $kV \cdot T$ 乘积	63
3.8.4	电话线路的对地平衡	65
3.8.5	屏蔽	65
4	煤矿电网谐波测量仪器和方法	67
4.1	DXF—Ⅰ型多功能电网谐波分析仪的组成与原理	67
4.1.1	工作原理	67
4.1.2	多功能电网谐波分析仪的硬件电路	68
4.2	DXF—Ⅰ型多功能电网谐波分析仪的软件设计	76
4.2.1	程序流程	76
4.2.2	系统初始化和自检程序	76
4.2.3	数据采集程序	78
4.2.4	波形显示程序	79
4.2.5	数据处理程序	80
4.2.6	快速傅立叶变换程序	81
4.2.7	数据分析计算程序	84
4.2.8	输出数据打印程序	84

4.3	仪器的抗干扰措施	85
4.3.1	硬件电路的抗干扰措施	85
4.3.2	软件设计上的抗干扰措施	86
4.4	DXF—Ⅱ型多功能电网谐波分析仪的误差分析	87
4.4.1	输入通道的误差	87
4.4.2	采样对被测信号周期的截断误差	87
4.4.3	采样周期变动引入的误差	89
4.4.4	采样保持器的误差	90
4.4.5	A/D的量化误差	91
4.5	煤矿电网谐波测量	92
4.5.1	煤矿电网谐波变化的特点	92
4.5.2	煤矿电网谐波测量的目的	92
4.5.3	煤矿电网谐波测量仪器	93
4.5.4	对谐波测量仪器的要求	94
4.5.5	测量方法及数据处理	96
4.5.6	测试实例	98
5	无源电力滤波器设计及应用实例	101
5.1	增加换流装置的脉动数	101
5.2	无源型滤波装置的构成	102
5.2.1	单调谐滤波器的结构和特点	103
5.2.2	高通滤波器的结构和特点	104
5.2.3	双调谐滤波器的结构和特点	104
5.3	滤波器设计的要求和步骤	105
5.3.1	滤波器设计的要求	105
5.3.2	滤波装置设计的一般步骤	106
5.4	供用电设备的谐波等值电路	108
5.4.1	下井电缆	108

5.4.2	变压器	109
5.4.3	一般用电负荷	109
5.4.4	供电线路	110
5.5	滤波器参数设计与仿真	111
5.5.1	单调谐滤波器设计	111
5.5.2	高通滤波器设计	113
5.5.3	滤波装置的计算机仿真分析与设计	116
5.6	滤波装置设计实例	116
5.6.1	谐波测试	118
5.6.2	系统仿真模型的建立	119
5.6.3	阻抗特性分析和滤波器参数确定	121
5.6.4	应用效果	124
5.6.5	滤波器设计和运行时应注意的问题	125
6	有源电力滤波器	126
6.1	有源电力滤波器的基本原理和特点	126
6.2	有源电力滤波器的电路形式	130
6.2.1	并联型有源电力滤波器	131
6.2.2	串联型有源电力滤波器	133
6.3	瞬时无功功率理论	135
6.4	谐波和无功电流的检测	141
6.4.1	$p-q$ 运算方式	142
6.4.2	采用低通滤波器的 i_p-i_q 检测方法	143
6.4.3	采用高通滤波器的 i_p-i_p 检测方法	145
6.5	有源电力滤波器的发展方向	146
	参考文献	148

1 绪 论

1.1 谐波问题的提出

一个理想的电力系统应该以单一恒定频率和规定幅值的稳定电压向用户供电。但在实际系统中,这两个条件却很难满足,因此,以往各国对电能质量都是用频率和电压两个指标来衡量的。因为在交流电的早期,电力系统只经受一些非持续的由于开关的切换、负荷的变化、放电和设备故障等因素引起的暂态干扰,以及由于变压器的非线性所带来的影响,电网中电压和电流波形畸变总的来说很小,带跳跃的波形很少见。在电力系统的运行中,人们都不去考虑波形的因素,注意力主要放在供电电压、频率及系统稳定和故障防治上。但是仅用这两个指标来表征电能的质量是很不完善的,波形畸变也是影响电能质量的重要因素之一。

电力系统中的波形畸变并不是一个新问题。早在 1920~1930 年间,德国就已对由于使用汞弧整流器造成的波形畸变进行观察和分析。到 20 世纪 50~60 年代,由于高压直流输电技术的发展,对变流器谐波问题的研究有大量论文发表。

电力系统谐波产生的根本原因是一些具有非线性伏安特性的输配电和用电设备,这些设备,即使是施加正弦波电压,其电流波形也会发生畸变。

20 世纪 60 年代以后,主要由于下列原因,谐波问题逐步引起了人们的重视:

(1) 随着半导体技术和电力电子技术的发展,特别是大功率

晶闸管的出现,由于其具有价格低廉、运行可靠、维护方便、效率高等一系列优点,立即在很多大型企业,如轧钢、直流输电、电解、电镀、矿井提升、电气化铁道等获得了广泛的应用,并逐步取代水银整流器,具有非线性特性的整流负荷逐渐成为很多电网的主要负荷。

(2) 大型晶闸管整流负荷在运行过程中会消耗大量无功功率,引起电网电压的波动,为了提高电网功率因数和进行电压调整,广泛采用并联电容器进行无功补偿,导致电容器与系统产生并联谐振,放大了流入系统的某些次谐波电流,加重了谐波对电网的污染。

(3) 设备设计思想的改变。过去倾向于采用在额定情况以下工作或余量较大的设计,现在为了竞争,对电工设备倾向于采用在临界情况下的设计。例如,有些设计为节省材料使磁性材料工作在磁化曲线的深饱和区段,在此区段内运行会导致激磁电流波形严重畸变。

由于波形畸变严重危害电力系统的安全运行,因而世界各国都对谐波问题予以充分的关注。国际电工委员会(IEC)、电气和电子工程师协会(IEEE)等国际学术机构,成立了专门的电力系统谐波工作组。国际上多次召开了有关谐波问题的学术研讨会,不少国家和学术组织都制定了限制电力系统谐波和用电设备谐波的标准和规定。

1.2 谐波的基本概念

1.2.1 谐波

国际公认的谐波定义为:谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍。

谐波次数的定义为:以谐波频率和基波频率之比表达的整数。一般用 h 表示。

上述定义说明谐波频率与该周期量频率之比应为正整数,如我国电力系统的额定频率为 50 Hz,则基波频率为 50 Hz,二次谐波频率为 100 Hz,三次谐波频率为 150 Hz。

应注意谐波现象和其他类似物理现象的区别。如在某些场合,供电系统中存在一些频率不是基波频率整数倍的正弦分量,这些分量的频率与基波频率之比,有些是分数,如 $1/2$ 、 $1/3$ 等,称之为分数谐波。另外要区分谐波和暂态现象。根据傅立叶级数理论,被分解的周期量必须是周期性重复的。实际供用电系统的负载总是变化的,因此其电压和电流波形也是不断变化的。在工程分析中,只要被分析的波形能持续一段时间,就可以应用傅立叶级数分解。而暂态现象是属于非周期性变化的,从理论上讲,是不能用傅立叶级数表示它的。

1.2.2 特征谐波和非特征谐波

电力系统中某些设备或器件在工频正弦电压供电时,必然要产生的谐波称为该设备或器件的特征谐波(Characteristic Harmonics),而把在电压不平衡、相位或触发不对称时,以及其他非正常工作条件下产生的谐波称为该设备或器件的非特征谐波(Uncharacteristic Harmonics)。例如,三相 12 脉动桥式变流器特征谐波次数为 $h=12k\pm 1(k=1,2,\dots)$,则 11 次和 13 次谐波为其特征谐波,如果电源电压波形畸变或触发角不对称,则还会产生 5 次和 7 次非特征谐波。

1.3 我国煤矿电网谐波问题

我国煤矿电网谐波问题是在 20 世纪 80 年代随着大量引进和

使用进口的晶闸管供电的直流提升机而出现的。由于直流拖动系统具有良好的调速特性,我国煤矿提升曾大量采用交流电动机—直流发电机—直流电动机(也称 G—D 机组)模式,这种方式用电效率很低,造成电能的大量浪费。随着矿井生产能力的增加,对矿井提升的能力也提出了更高的要求。因此,20 世纪 80 年代初,我国开始引进国外生产的晶闸管供电的直流提升机。由于对谐波问题认识不足和资金等多方面的原因,多数引进的直流提升机未配备谐波滤波装置。这些设备运行时对其他的用电设备产生了一些不良影响,一些严重的甚至使其他设备不能正常地工作。此外,露天煤矿的电机车、机修厂的电弧炉等也是煤矿电网的主要谐波源。

鉴于谐波问题在煤矿电网中日趋严重,1988 年原煤炭部委托中国矿业大学电网谐波研究室对煤矿电网谐波问题进行研究,十多年来所做的主要工作包括:

(1) 通过对全国十多个矿务局近 30 个煤矿的电网进行测试与分析,基本掌握了我国煤矿电网谐波的状况。煤矿电网最主要的谐波源是为直流提升机供电的晶闸管变流装置,是谐波治理的主要对象。

(2) 研制了适合于现场应用的谐波测试仪器。

(3) 在谐波问题较严重的矿井实施了谐波治理,为其提升设备设计、安装了谐波滤波器,有效地改善了这些矿井电网的运行状况和供电质量,使其达到了国家标准的要求。

(4) 吴震春教授和清华大学的唐统一、孙树勤两位教授合作翻译出版了 J. Arrilaga 的《电力系统谐波》。

1.4 研究谐波的意义

研究谐波问题的意义在于谐波会对电力系统和通信系统产生十分严重的危害。

谐波对电力设备安全运行的主要影响有：

(1) 对电容器的影响。电容器的投入运行，一方面恶化了电网的谐波状况，另一方面自身的安全运行也因此受到严重威胁。由于电容器容抗与频率成反比，它对谐波电压最为敏感，谐波电压会加速介质老化，容易发生故障和缩短使用寿命，过大的谐波电流会使电容器过负荷和出现不允许的温升，在发生谐振时，谐波可使电容器成倍地过负荷，出现异常声响、熔丝熔断、“鼓肚”等现象，有时电容器根本不能投入运行。

在有些情况下，由于电容器的存在引起严重的谐波放大现象，致使其他设备无法正常运行，不得不将电容器组断开，电网被迫在低的功率因数下运行。

(2) 对电机的影响。谐波电流不仅会产生附加损耗，使电机过热，还会使电机产生振动，同步发电机由于转子铁心过热将使出力受到限制，在感应(异步)电动机中，较大的谐波电流将降低额定转速下的有效转矩，并在较低转速下引起寄生转矩，这种寄生转矩可能使异步电动机在启动后无法达到它的额定转速。

(3) 对继电保护自动装置和控制设备的影响。由于各种继电保护装置都是按工频条件设计的，谐波的存在将引起它们的误动作，特别是当存在较大负序谐波时，对系统的负序保护更具有不良影响。谐波电流能影响甚至破坏利用电力线路作为联系通道的远动装置的动作。母线电压的畸变，还能引起整流设备触发脉冲控制装置的触发周期不稳定，使晶闸管阀的触发角或触发时间间隔不相等，影响整流设备的正常运行。

除此以外，谐波还能使架空线路产生过电压，加速电缆线路的老化，使变压器功耗增大，引起局部过热，增大计量仪表的误差。

电网中出现持续谐波干扰后会对通信系统产生严重影响，这是因为谐波对邻近的电话线路产生了静电感应和电磁感应。

由于我国在晶闸管变流装置的应用上发展很快，电气铁道大

量发展,煤炭、冶金、化工等工业部门大量应用电力整流和换流技术,如煤矿提升用的晶闸管供电的直流绞车和冶金行业的电弧炉、轧钢机等。谐波问题在有些电力系统中已非常严重,对电力系统和用电设备已产生严重危害和不利影响。因此,国家技术监督局于1993年颁布了谐波管理的国家标准《电能质量 公用电网谐波》,并从1994年3月起执行。制订和执行国家标准主要是为了达到以下两个目的:

(1) 限制系统电压、电流的正弦波形畸变程度或谐波分量的大小,以保证电力系统(包括用户)安全、经济运行,特别是容易受谐波危害和干扰的设备的正常运行;也要使其他系统(如通信)避免受到严重干扰。

(2) 保证电力系统的电能质量,使系统工频电压源的电压波形保持在合格范围内,满足各种用电设备的正常供电要求。

国家标准中明确规定了用户注入电网的谐波电流的允许值和电网公共连接点处产生的电压畸变值。当超过标准时,必须采取相应的抑制措施,从根本上解决谐波污染问题。

电力电子装置所产生的谐波污染已成为阻碍电力电子技术发展的重大障碍,它迫使电力电子领域的研究人员必须对谐波问题进行研究。

总之,对电力系统谐波污染的治理已成为电工科学技术界所必须解决的问题。

有关谐波问题的研究可以划分为以下三个方面:

- (1) 谐波分析以及谐波影响和危害的分析;
- (2) 谐波补偿和抑制;
- (3) 与谐波有关的测量问题和限制谐波标准的研究。

1.5 抑制电网谐波的方法

由于谐波对通信和电网中几乎所有设备都会带来不良影响,因此,消除谐波是目前急需解决的问题,各国都在大力开展研究,基本思路有以下两种:

(1) 对电力电子装置本身进行改进,使其不产生谐波或者少产生谐波,如增加变流装置的脉动数。

增加变流装置一个周期的脉动数,可以有效地消除幅值很大的低次特征谐波。理想情况下,对于 P 个脉动的变流器,它产生的特征次谐波为 $h=KP\pm 1$ (K 为正整数), h 次谐波电流与基波电流之比为 $1/h$,所以增加装置的脉动数可以使最低次谐波次数升高,幅值减小。例如对于 6 脉动变流装置,最低次特征谐波为 5 次,5 次谐波电流与基波电流之比为 $1/5$;当脉动数增为 12 时,最低次特征谐波为 11 次,与基波电流之比为 $1/11$ 。在有些情况下,只需要通过改变变压器的连接方式,就可增加装置的脉动数,因而比较方便和经济。如用两组 6 脉动变流器组成一个 12 脉动变流器。但在有些情况下,却需要购置新的设备。普遍认为,当脉动数增加到 24 以上时,与采用滤波器相比并不经济,且同样存在补偿无功和高次谐波的问题。

(2) 装设谐波补偿装置来补偿谐波,这对各种谐波源都是适用的。主要有下列三种做法:

① 在并联电容器组中串联电抗器。这样做能够避免在某个特征频率上与感性系统发生并联谐振,不仅能在基波时输出部分无功,还能限制合闸冲击电流和抑制电容器对外部短路的放电电流。

这种方法的不足之处是仍有可能在低次谐波上发生并联谐振;对于并不完全呈感性的系统,在其他次谐波上也有可能发生并联谐振;对于高次谐波,由于电容—电抗器回路谐波阻抗很大,大