

谐波的产生及其抑制

汤华涛

(无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘 要: 由于大功率电力电子设备和工业电弧炉的广泛应用, 产生大量的谐波, 使电力系统电压、电流波形畸变越来越严重。本设计对谐波的概念作了基本的介绍, 然后将谐波对电力系统及电网用户电气设备造成的危害进行了简要的分析, 并通过电力系统专业的软件 ETAP 软件对一个简单的配电系统谐波作了仿真分析, 分析了谐波对配电系统和用户的影响。最后简单介绍了单调谐滤波器的基本原理, 并利用它滤除系统中出现的第 5 次谐波。

关键词: 谐波; 配电系统; ETAP

0 引言

随着电力电子设备的应用日益广泛, 电力系统对电压质量的要求越来越高, 人们对谐波的问题也越来越重视。电力系统受到谐波污染后, 轻则影响系统的运行效率, 重则损坏设备以至危害电力系统的安全运行。以前, 电力系统考核电能质量的主要指标是电压的幅值和频率, 现在世界各国都把电网电压谐波畸变率作为电能质量考核指标之一, 正确认识谐波已成为电力工作者的重要任务之一。

1 谐波和谐波分析

1.1 谐波的产生

1.1.1 谐波的定义

在理想状况下, 电力系统中三相交流发电机发出的电压, 可认为波形是正弦波, 但由于电力系统中存在大量的非线性阻抗特性的供用电设备, 使得实际的电压波形偏离正弦波, 这种现象称为电压正弦波形畸变, 通常用谐波来表示。

1.1.2 谐波产生的途径

谐波的产生来自于 3 个方面: ①发电源质量不高引起谐波; ②输配电系统产生的谐波; ③用电设备产生的谐波。

用电设备中产生的谐波最多, 列举如下: (1) 相控晶闸管整流设备; (2) 变频装置; (3) 电弧炉; (4) 荧光灯等气体放电类光源及家用电器。

1.2 谐波的概念

1882 年, 法国数学家傅里叶指出, 任意一个函数都可以分解为无穷多个不同频率正弦信号的和。据此, IEEE 定义“谐波是周期性波形或周期性正弦

分量, 其频率为基频的整数倍”。谐波次数 n 为“以谐波频率和基波频率之比表示的整数”。目前一个普遍接受的谐波定义为: “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”。

理想电力系统所提供的电压和电流是具有工频正弦波形。以电压为例, 可表示为

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中: U 为电压有效值; α 为初相位; ω 为角频率。

1.3 公共电网的谐波电压和谐波电流限值

目前很多国家都相继制定并颁发了限制电力系统谐波的标准, 或者由有关权威机构制定了限制谐波的规定或导则。我国国家技术监督局于 1993 年 7 月 31 日颁发了国家标准 GB/T14595-94《电能质量 公用电网谐波》, 并于 1994 年 3 月 1 日起实施。其主要内容如下:

(1) 低压配电系统电压总谐波畸变率允许值

低压配电系统电压总谐波畸变率允许值, 是确定中压、高压各级电力系统电压总谐波畸变率的基础。根据国外经验和我国电力系统中谐波影响的具体情况, 低压 0.38kV 配电系统的电压总谐波畸变率允许值为 5%。

(2) 各级电网谐波电压含有率允许值

当低压配电系统电压总谐波畸变率为 5% 时, 随着配电系统电压等级的升高, 各级高压配电系统电压谐波总畸变率逐渐降低。通过对我国实际配电系统情况的分析研究, 并考虑到奇次谐波占主导地位, 谐波国家标准中规定的公用配电系统谐波电压(相电压)允许值如表 1 所示。

表 1 公用电网谐波电压限值

配电系统标称 电压/kV	配电系统电压总 谐波畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6/10	4.0	3	1.6
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

2 谐波的危害

2.1 谐波对电网的影响

谐波电流在电网中的流动会在线路上产生有功功率损耗，它是电网线路损耗的一部分。

对于采用电缆的输电系统，谐波除了引起附加损耗外，还可能使电压波形出现尖峰，从而加速电缆绝缘的老化，引起浸渍绝缘的局部放电，也使介质损耗增加和温升提高，缩短了电缆的使用寿命。

对于架空线路来说，电晕的产生和电压峰值有关，虽然电压基波未超过规定值，但由于谐波的存在，其电压峰值可能超过允许值而产生电晕，引起电晕损耗。

谐波对电网的危害除造成线路损耗外，更重要的是使电网波形受到污染，供电质量下降，危及各种用电设备的正常运行。

2.2 谐波对电力设备的影响

2.2.1 对变压器的影响

变压器用于把所需功率传送给它所连接的不同电压等级的负荷。负荷电流含有谐波时，将在三个方面引起变压器发热的增加：(1) 均方根值；(2) 涡流损耗；(3) 铁芯损耗。

上述损耗会导致变压器发热及相应的寿命损失。这给我们的结论是，有谐波存在时变压器应当降低其额定值。ANSI/IEEE 标准 C57.12.00-1987《对油浸式配电、电力和调节变压器的基本要求》中对运行于谐波环境下的变压器提出了下列限制：

(1) 电流总谐波畸变率不超过 5%。

(2) 空载时，稳态电压有效值不超过额定值的 110%；额定负载时，稳态电压有效值不超过额定值的 105%。

2.2.2 对电机的影响

电机受谐波电压畸变的影响较大，电机末端的谐波电压畸变，在电机里表现为谐波磁链。谐波磁链对电机转矩没有太大影响，但是它以与转子同步频率不同频率的旋转，在转子中感应出高频电流，其影响类似于基波负序电流的影响。谐波电压畸变

将引起电机的效率下降、发热、震动和高频噪声。

2.2.3 对断路器的危害

对于配电用断路器来说，全电磁型的断路器易受谐波电流的影响使铁耗增大而发热，同时由于对电磁铁的影响与涡流影响使脱扣困难，且谐波次数越高影响越大；热磁型的断路器，由于导体的集肤效应与铁耗增加而引起发热，使得额定电流降低与脱扣电流降低；电子型的断路器，谐波也要使其额定电流降低，尤其是检测峰值的电子断路器，额定电流降低得更多。由此可知，上述三种配电断路器都可能因谐波产生。

2.3 谐波对系统运行的影响

由于谐波的存在，通过电气传导、电磁感应等方式影响电网、继电保护及自动装置、计量系统和通讯远动系统正常工作。

(1) 谐波电流通过电网会在线路上产生有功功率损耗。有的断路器的磁吹线圈在谐波电流严重的情况下不能正常工作，从而使断路器无法断开以致损坏。

(2) 电力系统中的谐波会改变保护继电器的性能，引起各类保护和自动装置的误动或拒动，尤其是对各种以负序过滤器为起动元件的保护的干扰最大，这类保护按负序基波量整定，整定值小，灵敏度高，在电气铁路、电弧炉等谐波源又是负序源的干扰下，很容易发生误动，严重威胁电网安全运行。

(3) 随着谐波率的增大，电能表误差向负方向增大，即实际计量的电能越来越少。

(4) 高次谐波的存在对附近的通信设备和线路产生信号干扰，影响通信网络正常的通信载波工作。如电频率范围内。

3 谐波仿真分析

3.1 ETAP 软件简介

ETAP PowerStation 是美国 OTI 公司从 1996 年开始发行的第一个真正 32 位的 Windows 环境下电力系统分析计算应用程序，具有潮流计算、短路计算、电机起动、暂态稳定、最优潮流、谐波分析、可靠性分析、直流系统分析、地下电缆系统、变电站接地、用户自定义动态模型和继电保护配合等分析计算功能。

ETAP 的计算分析设计模块种类繁多，功能强大。其中针对电力电气系统设计和保护部分的模块有：潮流计算，短路计算（ANST 和 IEC 标准），

继电保护配合，弧闪分析，谐波分析（谐波潮流、频率扫描和滤波器自动设计），电机参数估计，变压器容量自动选择，地下电缆管道系统的设计与分析，电缆拉力分析（多重电缆和三维立体视图），接地网设计，低压配电系统的设计。

针对直流系统的模块有：直流系统潮流计算，直流系统短路计算，直流系统蓄电池容量估计，交直流控制系统接线图设计。

针对暂态及稳定分析的模块有：电机启动（动态及静态加速），发电机启动，暂态稳定分析，用户自定义动态模块设计。针对输电及配电系统的模块有：优化潮流，不平衡潮流，可靠性分析，补偿电容器最佳位置选择，传输线的弧垂、张力以及容量计算。

3.2 系统的仿真分析

3.2.1 搭建网络模型

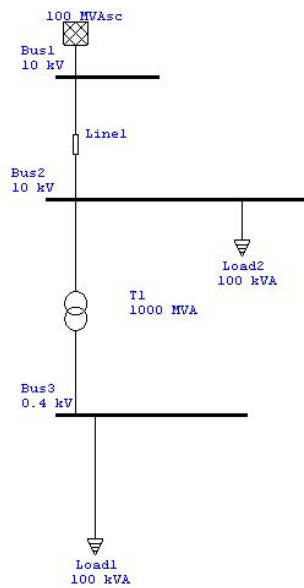


图 1 配电系统网络模型

配电系统网络模型见图 1。并对该系统的各组成进行合理的参数设置：

高压电网：电压为 10kV；短路容量 Sc=100MVA，X/R=50。

变压器 T1：电压等级为 10/0.4kV；额定容量为 10MVA；阻抗：Z（%）=6.75；X/R=10。

负荷 1：电压为 0.4kV；有功功率 100kW；无功功率 10kvar。

负荷 2：电压为 10kV；有功功率 100kW；无功功率 10kvar。

3.2.2 注入谐波源

工程实际中，谐波电流源为主要的谐波源。谐

波电流在电网中流动，由于供电系统有内阻抗，谐波负荷电流在线路的阻抗上产生了谐波压降，导致电源的供电质量下降，电压有较明显的畸变。其电压畸变率大大超过国家标准时，将对电网形成污染。因此，为了更贴近实际，本设计谐波仿真的谐波源采用一个六脉冲的谐波电流源。在网络模型中，将整流装置的谐波设置成一个六脉冲的谐波电流源，谐波频谱图如图 2、3 所示，其中 5 次谐波的含量较多。

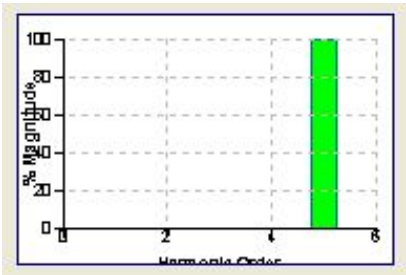


图 2 六脉冲谐波电流源频谱扫描

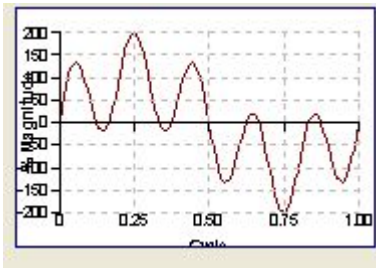


图 3 谐波源的波形图

3.2.3 谐波仿真分析

将研究整流负荷占不同比例时，谐波对企业内部和公用电网的影响。将母线 Bus5 作为研究谐波对企业内部影响的仿真观测点，母线 Bus3 和 Bus2 作为研究谐波对公用电网影响的仿真观测点，分析谐波源在母线上的响应输出图形和数据，判断母线的电压畸变率是否在公用电网限制值以内。

(1) 仿真数据输出

数据输出结果见表 2。

表 2 抑制前得电压畸变率

Bus		Voltage Distortion				
ID	kV	Fund. %	RMS %	ASUM %	THD %	TIF
Bus2	10.000	100.00	100.00	100.54	0.53	1.30
*#Bus3	10.000	99.68	99.83	105.19	5.53	12.43
*#Bus5	0.400	99.68	99.83	105.19	5.53	12.44

(2) 仿真输出图形

母线 Bus5 的谐波分析仿真图形见图 4、5。母

线 Bus3 的谐波分析仿真图形见图 6、7。母线 Bus2 的谐波分析仿真图形见图 8、9。

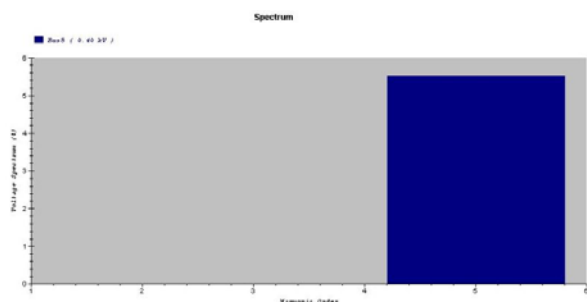


图 4 Bus5 的谐波频谱扫描

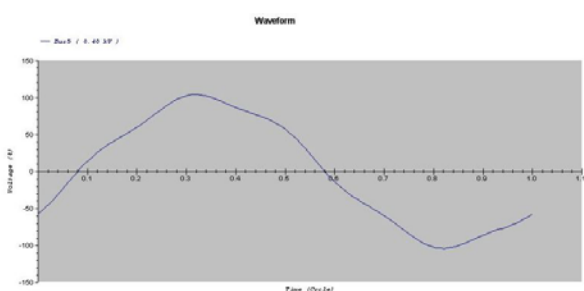


图 5 Bus5 的谐波波形图

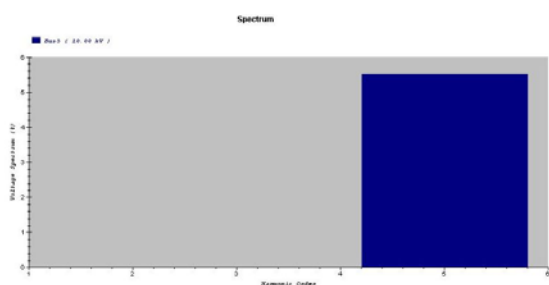


图 6 Bus3 的谐波频谱扫描

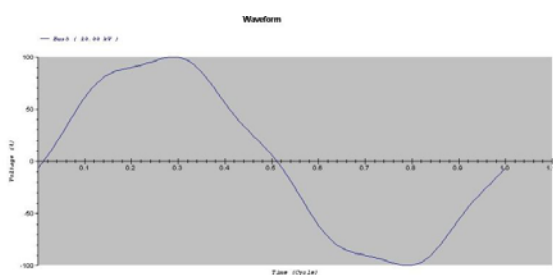


图 7 Bus3 的谐波波形图

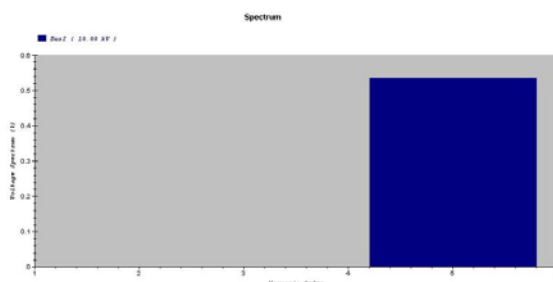


图 8 Bus2 的谐波频谱扫描

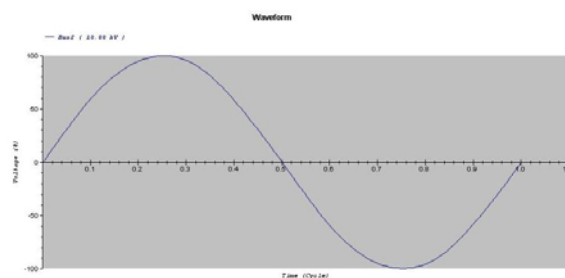


图 9 Bus2 的谐波波形图

(3) 仿真结果分析

仿真时在负荷 1 中添加的是一个六脉冲的谐波电流源，由图 2 可知 5 次谐波所占的比例较高，因此工程应用中，设计系统时可适当控制调整负荷所占比例，比例小到可以不用考虑谐波对电网的影响，使系统更加安全经济的运行。但是，当母线谐波电压超过公用电网谐波电压限值时，为了保证系统的稳定运行，需采取有效的措施抑制谐波。

4 谐波的抑制

4.1 引言

电力谐波的抑制或减缓措施通常可分为预防性和补偿性两种。预防性措施包括：(1) 供电设备在设计、制造、配置等方面采取减少谐波的措施；(2) 通过增加整流器的脉动数或采用可控整流来限制电力谐波的主要来源——整流器的谐波。补偿性措施包括：(1) 改变馈线参数；(2) 采用滤波器。

4.1 有源滤波器

有源滤波器(APF)，是一种电力电子装置，它从补偿对象中检测出谐波电流，由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流，从而使电网电流只含有基波分量。APF 滤波特性不受系统阻抗影响，可消除与系统阻抗发生谐振的危险。

4.2 无源滤波器

无源滤波器通常采用电力电容器、电抗器和电阻器按功能要求适当组合，在系统中为谐波提供并联低阻通路起滤波作用，也提供负载所需要的无功功率。无源滤波器的优点是投资少、效率高、结构简单、运行可靠及维护方便，因此无源滤波是目前广泛采用的抑制谐波及进行无功补偿的主要手段。

4.3 ETAP 仿真分析

用 ETAP 进行谐波仿真分析，同样以母线 Bus5 和母线 Bus3 以及 Bus2 作为观测点。

谐波仿真输出结果数据见表 3。

表 3 抑制后得电压畸变率

Bus		Voltage Distortion				
ID	kV	Fund. %	RMS %	ASUM %	THD %	TIF
Bus2	10.000	100.00	100.00	100.10	0.10	0.55
Bus3	10.000	99.76	99.76	100.82	1.07	2.46
Bus5	0.400	99.76	99.76	100.82	1.07	2.46

(1) 母线 Bus5 的谐波分析仿真图形

母线 Bus5 的谐波分析仿真图形见图 10、11。

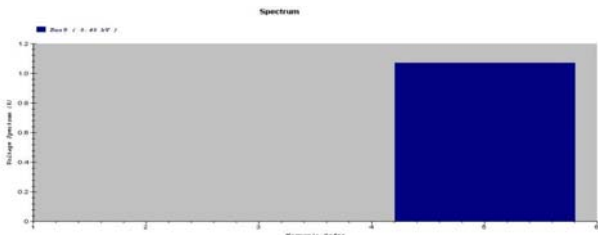


图 10 Bus5 的谐波频谱扫描

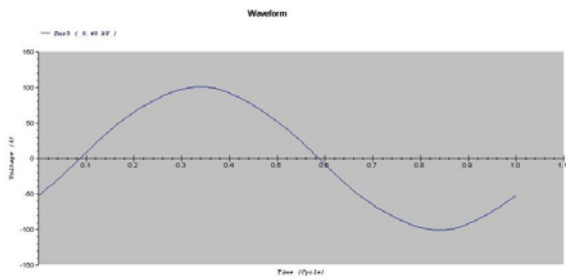


图 11 Bus5 的谐波波形图

(2) 母线 Bus3 的谐波分析仿真图形

母线 Bus3 的谐波分析仿真图形见图 12、13。

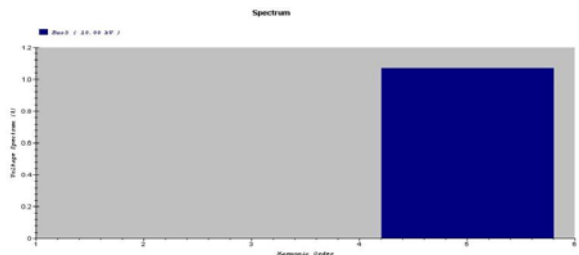


图 12 Bus3 的谐波频谱扫描

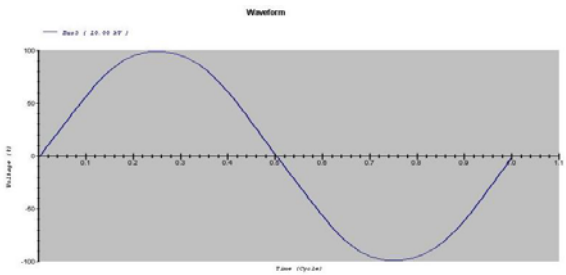


图 13 Bus3 的谐波波形图

(3) 母线 Bus2 的谐波分析仿真图形

母线 Bus2 的谐波分析仿真图形见图 14、15。

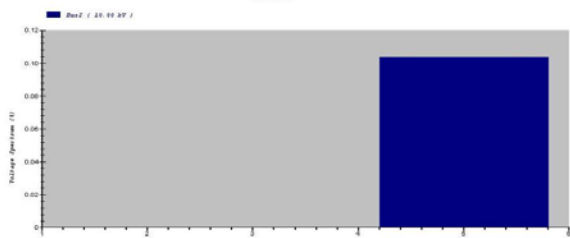


图 14 Bus2 的谐波频谱扫描

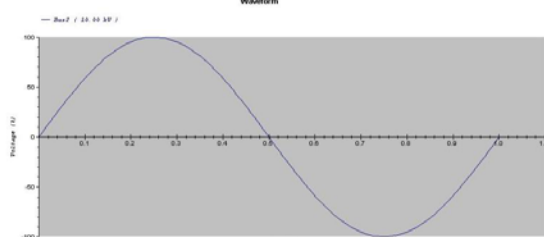


图 15 Bus2 的谐波波形图

由设计第 3 部分可知，母线 Bus5 和母线 Bus3 电压畸变率超过公用电网谐波电压限值，即负荷装置中的谐波源对企业内部和公用电网都造成一定的影响。通过本章的上述仿真测试，在模型的负荷侧母线 Bus5 处加装单调谐滤波器，可以有效地抑制整流装置中的谐波，使母线的电压畸变率在公用电网谐波电压限值以内，减小谐波的污染，提高系统电能的质量。

5 结论

在工业生产中出于生产和节能的需要，大量地应用了非线性负载，尤其是电力电子装置和变频装置，使谐波电流大量注入电网，导致了电力系统谐波污染的日益严重。引起电网电压波动、频率变化、三相电路不平衡和谐振，影响了电能质量、输电效率和设备的安全运行与正常使用。几乎在整流装置普及应用的同时，对它所造成的谐波问题也越来越引起人们的广泛关注。

本设计将负荷装置作为最主要的谐波源，主要完成了对一个 10/0.4kV 小型的配电系统的谐波仿真分析。通过仿真输出的图形和数据验证了当负荷占不同比例时，谐波对企业内部和公用电网的影响也将不同。而负荷所占比例很小时，谐波对配电系统的影响可以忽略不计，将不会引起母线电压的畸变。然而，当整流负荷占的比例不断上升，谐波的影响也将不断放大。

在本设计中，母线电压发生严重畸变，系统出现是高次谐波中以第 5 次谐波的含量最高，因此为

了提高系统的电能质量,保证它的正常安全的运行,在负荷侧装设了单调谐滤波器,对谐波进行有效地抑制。设计的第四部分验证了这一方案的可行性,仿真的数据结果显示母线的电压畸变率都回到公用电网谐波电压限制值以内,有效地减小谐波量。

另外,随着功率电子器件和 PWM 技术的发展,基于瞬时无功功率理论的谐波电流瞬时检测法的提出,使有源滤波器得到迅速发展。有源电力滤波器具有很高的响应速度和自适应能力,能跟踪电网频率的变化并补偿无功,滤波特性不受电网特性的影响,可以做到一机多用。对于负荷装置整流后产生的高次谐波对电网产生的谐波污染问题,若采用有效的抑制措施,通过综合治理,必能使电能质量符合国家标准要求,取得较好的社会效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 容健纲,张文亮.电力系统谐波[J].高电压技术,1994(04).
- [2] 廖瑞金,胡志伟,孙才新,等.电力系统谐波在线监测的原理及设计[J].高压电器,1998(02):10-13.
- [3] 刘江南.浅谈谐波对电力系统的危害[J].石河子科技,2004(04).

- [4] 杨斌文,刘丽英,王文虎.电力系统中谐波的危害与产生[J].电气时代,2002(02).
- [5] 蔡江.电力系统中的谐波污染与防治[J].油气田地面工程,2004(05).
- [6] 林海雪.电力系统中的谐波问题[J].电网技术,1989(01).
- [7] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [8] 王兆安,黄俊.电力电子技术(第 4 版)[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [9] 邱关源.电路[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [10] 于永源,杨绮雯.电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [11] 中国电机工程学会.常用供用电电气标准指南[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [12] (George J. Wakileh) 乔治(奥地利).电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政(译).北京:机械工业出版社,2003.

作者简介:

汤华涛(1986—)男,江苏无锡人,中级工,无锡供电公司东亭供电所营业班班员, E-mail: tht1986@sina.com。