

供电网典型非线性负载谐波特性分析

费益军¹,徐卫文²,陈兵¹,金丽莉³,王宝安³

(1. 江苏电力试验研究院有限公司, 江苏南京 211103; 2. 江苏扬州供电公司, 江苏扬州 225009; 3. 东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096)

摘要:近年,供电网谐波污染问题逐步成为关注的焦点。介绍了工业、商业和市政服务领域的典型非线性负载的谐波特性,建立电路模型,分析其工作原理,并利用仿真软件给出各种非线性负载输入侧电流波形及其频谱分析。结合现场调研测试,总结评估了典型非线性负载的谐波特性,并给出谐波治理的有效方案。

关键词:电能质量;非线性负载;谐波特性;谐波治理

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2011)01-0001-04

近年来,电力电子技术的广泛应用,推动了近代电力系统的发展,但同时给电力系统带来了严重的谐波污染问题。非线性负荷作为电网谐波主要污染源,在工矿企业、商业以及市政服务领域中大量应用,给电网造成了谐波污染,谐波电流注入电网,会引起电网闪变、频率变化、三相不平衡等电能质量问题^[1]。电监会颁布的《供电监管办法》明确指出,供电企业应该审核用电设施产生谐波、冲击负荷的情况,按照国家有关规定拒绝不符合规定的用电设施接入电网。用电设施产生谐波、冲击负荷影响供电质量或者干扰电力系统安全运行的,供电企业应当及时告知用户采取有效措施予以消除;用户不采取措施或者采取措施不力,产生的谐波、冲击负荷仍超过国家标准的,供电企业可以按照国家有关规定拒绝其接入电网或者中止供电。因此,必须对用户进行电能质量评估。评估的依据为国家标准《电能质量-公用电网谐波(GB/T 14549-1993)》。根据国家标准中给出的各个电压等级的基准短路容量,和全部用户注入公共连接点的各次谐波电流的允许值,按照用户的实际报装数据和供电方案,来核算单个用户实际的谐波电流注入允许值。文中针对工业、商业和市政服务领域的典型非线性负载的谐波特性进行全面的分析研究,建立其仿真模型,分析其工作原理,并利用仿真软件给出各种非线性负载的电流波形及其频谱分析。结合现场调研测试,对典型非线性负载的谐波特性作出总结评估,并给出谐波治理的有效方案。

1 工业领域典型非线性负载

工业领域的非线性负载主要包括电弧炉、中频炉、电焊机、油田抽油机、单晶炉等。近年来,太阳能光伏发电发展迅速,在全球范围内掀起了太阳能开

发利用的“绿色能源热”,单晶硅电池作为太阳能光伏发电的基本元件,有着巨大的市场和广阔的发展空间,出现了许多以生产单晶硅为主的新兴企业。因此,对单晶炉谐波特性的研究具有重要的意义。

1.1 单晶炉直流电源的基本原理及建模

单晶炉直流电源主要为单晶硅生产加热炉提供稳定的直流电源,其典型电路模型如图1所示^[2,3],主要包括整流变压器、整流部分、平衡电抗器、滤波电容等部分。其中整流部分采用的是12脉波可控硅整流电路,利用变压器一次绕组接法的不同,使2组三相交流电源间相位错开30°,从而使输出整流电压在每个交流电源周期中脉动12次,通过大电容滤波得到稳定的直流电源,供单晶炉加热。

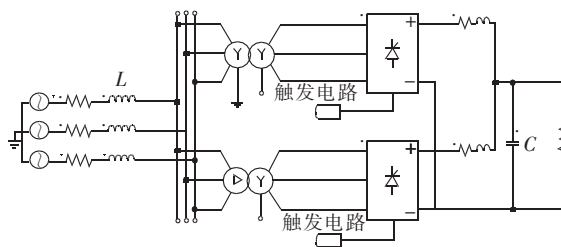
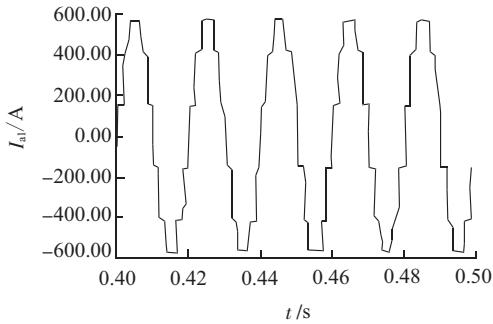


图1 单晶炉直流电源的电路模型

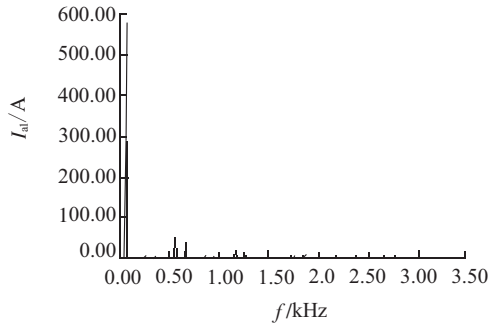
图2为该单晶炉直流电源输入电流波形及其频谱分析。可见,输入电流谐波次数为 $12k \pm 1$ ($k=1,2,3,\dots$),且11次和13次为主要谐波。较之6脉波整流电路,虽然基本消除了5次和7次谐波,但仍然有不少11次及以上谐波会注入到电网中。

因此,实际应用中,一般采用12脉波整流+无源LC滤波器的结构,即在输入侧加装无源滤波器,来吸收谐波和提高功率因数。无源滤波器电路如图3所示。由滤波电感和滤波电容组成谐振滤波电路,分别对11次和13次谐波呈低阻抗特性。

图4为加装谐波滤波器后输入电流波形及其频谱分析图。可见,当技术参数设计得当时,可有效抑制11次和13次谐波,但存在高次谐波。



(a) 仿真波形



(b) 频谱分析

图2 单晶炉直流电源输入电流仿真波形及其频谱分析

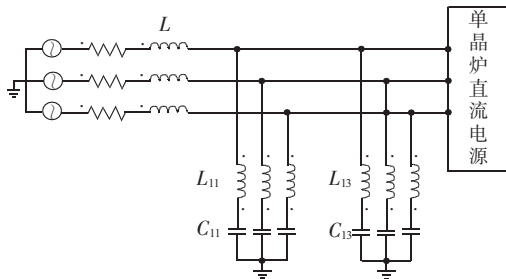
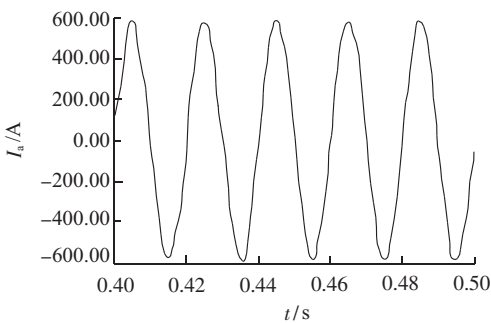
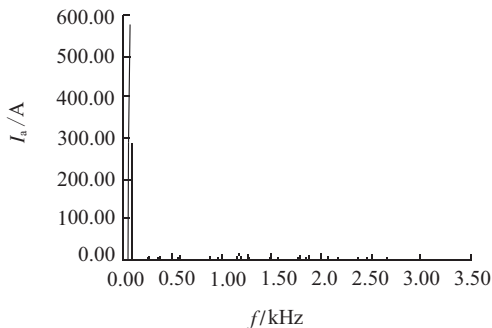


图3 无源滤波器电路



(a) 仿真波形

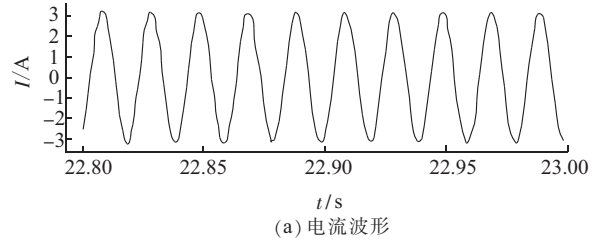


(b) 频谱分析

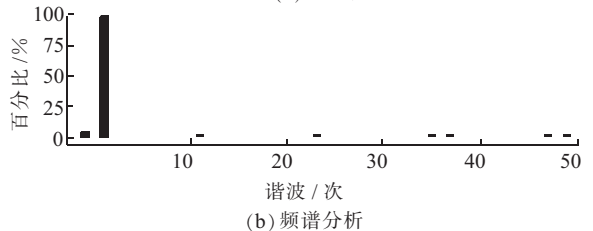
图4 加装无源滤波器后的输入侧电流仿真波形及其频谱分析

1.2 单晶炉直流电源现场测试

对某半导体公司的单晶炉直流电源进行现场测试，其使用的单晶炉直流电源为杰英电气有限公司生产的12脉波谐波治理型单晶炉直流电源，采用图1所示的电路结构，输入侧设计了一套滤波装置，可消除11次和13次谐波，并提高了功率因数。采用PV440谐波监测仪器对设备进行谐波测试，并使用Dran-View6软件对结果进行分析。图5为实际测得的输入侧电流波形及其频谱分析，与图4仿真分析结果一致。输入侧电流总畸变率为3.10%。



(a) 电流波形



(b) 频谱分析

图5 某单晶炉直流电源输入侧电流波形及其频谱分析

2 商业领域典型非线性负载

随着商业现代化和电气化以及信息、控制等诸多新技术的应用，商业建筑中用电负荷必须进行谐波评估。在商业领域(如商场、写字楼、宾馆等)中大部分用电负荷都是属于非线性负载，主要分为3类：电子电源模块、节能灯和应用在大功率鼓风机和空压机的交流调速驱动装置。它们大都使用晶闸管、小功率的整流装置等电力电子元件，虽然单个容量小，但数量较多且分布很广，产生的高次谐波也会对电力系统造成影响，加重电网的谐波污染。

2.1 节能灯的基本原理及建模

在照明用电中，绝大部分采用电感式镇流器的日光灯，但其存在许多缺点。以高频电子技术为代表的电子镇流器的应用，克服了传统的电感式镇流器的缺点。电子镇流器的工作原理是经二极管整流电路进行整流，再通过大电容滤波，变成平滑的直流电压，经高频逆变电路将低频交流电转化成高频交流电。高频交流电加到与灯连接的LC串联谐振电路，加热灯丝，同时在电容器上产生谐振高压，加在灯管两端，使灯管“放电”变成“导通”状态，再进入发光状态，此时高频电感起限制电流增大的作用，保证灯管获得正常工作所需的灯电压和灯电流^[4]。

节能灯模型包括EMI滤波电路、整流电路、PFC电路、逆变电路、节能灯模块。节能灯仿真模型

如图 6 所示^[5], 选择参数: $V_{AC} = 220\text{ V}$, $R_{\text{lamp}} = 289\ \Omega$, $L_1 = 2.2\text{ mH}$, $C_1 = C_2 = 0.01\text{ mF}$, $C_4 = 0.01\ \mu\text{F}$, $C_5 = C_6 = 0.1\ \mu\text{F}$, 运行时的工作频率 $f_{\text{sm}} = 30\text{ kHz}$ 。仿真结果如图 7 所示。图 7 表明, 节能灯输入侧电流主要含有 3 次、5 次、7 次、9 次等奇次谐波, 谐波电流总畸变率高达 36.3%。

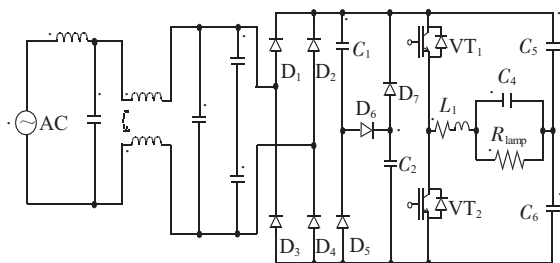
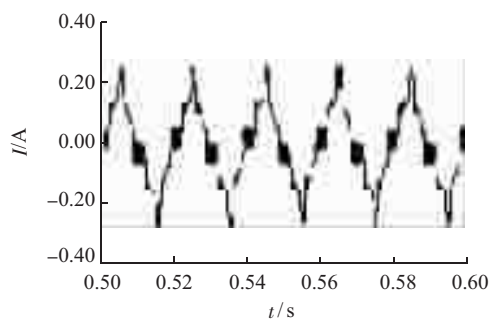
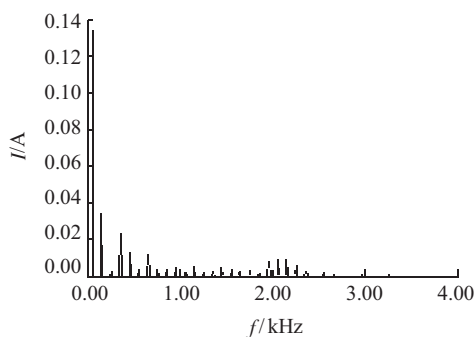


图 6 节能灯仿真模型



(a) 仿真波形

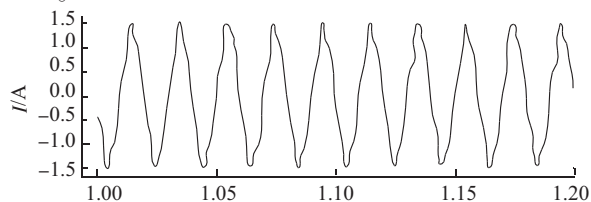


(b) 频谱分析

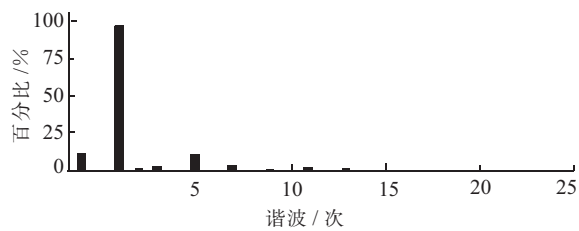
图 7 节能灯输入侧电流仿真波形及其频谱分析

2.2 现场测试

对某商场进行谐波调查, 该商场为综合性负载, 主要负荷设备是照明、空调、计算机等, 负荷波动小, 且较为稳定。在商场电源进线端二次侧测得的电流波形及其频谱分析如图 8 所示。从图 8 可以看出, 电流中含有 3 次、5 次、7 次等奇次谐波, 其中 5 次谐波的含量最高, 与节能灯、空调等负荷特性相一致。



(a) 电流波形



(b) 频谱分析

图 8 某商场电源进线侧电流波形及其频谱分析

3 市政服务领域典型非线性负载

非线性负载在通信、自来水公司、医院、路灯管理处等市政服务领域应用广泛, 如计算机、医疗仪器和设备、开关电源等, 它们产生的谐波电流也会对电力系统造成影响, 加重电网的谐波污染。以移动通信公司为例, 对市政服务领域的非线性负荷进行研究。

3.1 高频开关电源的基本原理及建模

通常, 大型通信设备和计算机等专用设备采用直流供电, 对通信电源的要求越来越高, 传统的相控稳压电源已不能满足现代通信对通信质量的要求, 而逐渐被性能更优良的高频开关电源取代。通信电源系统大多采用弱电直流(48 V)供电。

高频开关电源的仿真电路如图 9 所示^[6,7], 三相交流输入电源经三相全桥整流、滤波变换成直流, 全桥变换电路再将直流电变换成高频交流电, 然后经高频变压器变压隔离, 经整流器整流, 滤波后转换成稳定的 48 V 直流输出。

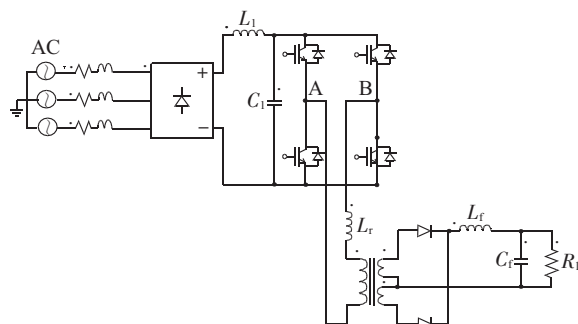
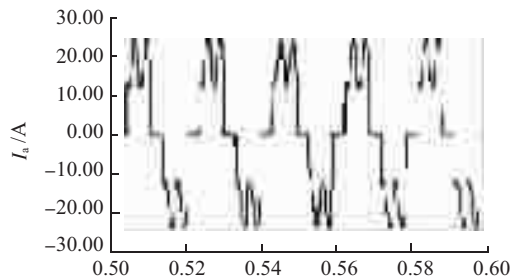


图 9 高频开关电源仿真模型

高频开关电源输入侧电流波形及 FFT 分析如图 10 所示, 存在 5 次、7 次、11 次等奇次谐波。

3.2 高频开关电源现场测试

对某市移动通信配电房的高频开关电源输入侧



(a) 仿真波形

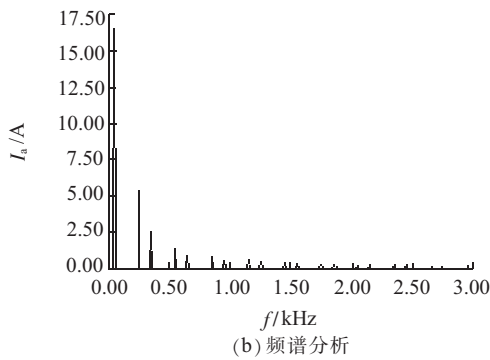


图 10 高频开关电源输入侧电流仿真波形及其频谱分析

进行谐波测试,测试结果如图 11 所示。由图可以看出,实际波形与仿真结果接近,以 5 次、7 次、11 次谐波为主,总电流畸变率达到 36.23%。

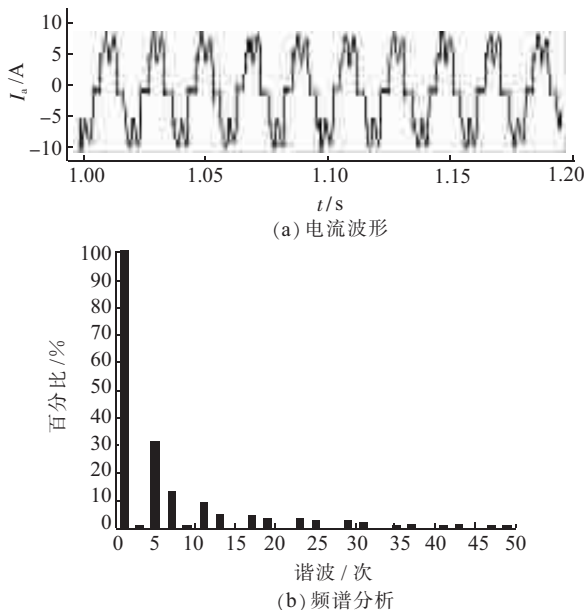


图 11 某高频开关电源输入侧电流波形及其频谱分析

4 结束语

文中对 3 种供电网中典型非线性负载用电特性进行分析,涵盖了工业、商业和市政服务领域。建立了仿真模型,研究其谐波电流的特征,并进行现场调研。仿真分析和测试结果表明,供电网中非线性负载

的电流谐波含量较高,谐波电流不仅污染电网,影响其他用电设备的正常运行,而会导致输入电源的输入功率因数下降,无功功耗增大,降低电能的可利用效率,阻碍电网的安全、高效运行。可采用有源电力滤波装置对供电网谐波进行治理。对需要进行无功补偿的用户,可采用动态消谐补偿综合电力装置,装置包括有源电力滤波装置 APF 动态治理谐波和电容柜补偿基波无功两部分。此外,对非线性负载的电路模型进行改善,也是降低谐波电流含量的有效方法。

参考文献:

- [1] 陈晨. 电力系统非线性负载谐波特征分析的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [2] 吕润余,段晓波. 多脉动整流电路谐波统一分析——Y/Y 或 Δ/Δ 和 Y/ Δ 等六脉动整流单元谐波分析[J]. 河北电力技术,2003,22(5):1-3.
- [3] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [4] 江兆根. 电子镇流器控制方法仿真平台[D]. 上海:同济大学,2007.
- [5] 郝胜玉,王松,徐化龙. 电子镇流器无源功率因数校正的仿真研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2008,22(2):96-99.
- [6] 丁海艳. 基于 DSP 的高频开关电源的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [7] 张敏娟. 48 V/25 A 通信用高频开关电源的研究与开发[D]. 南京:河海大学,2005.

作者简介:

- 费益军(1978-),男,江苏无锡人,工程师,从事高电压、电能质量及科研管理工作;
- 徐卫文(1962-),男,江苏扬州人,工程师,从事电力运行管理方面的工作;
- 陈兵(1978-),男,江苏南京人,工程师,从事电能质量方面的工作;
- 金丽莉(1986-),女,江苏扬州人,硕士研究生,从事电能质量方面的研究工作;
- 王宝安(1978-),男,江苏扬州人,讲师,从事电能质量方面的研究工作。

Analysis and Evaluation of the Electrical Characteristics of Typical Nonlinear Loads in Power Supply Network

FEI Yi-jun¹, XU Wei-wen², CHEN Bing¹, JIN Li-li³, WANG Bao-an³

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. Jiangsu Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In recent years, harmonic pollution issues gradually become the focus of attention in power supply network. The harmonic characteristics of the typical nonlinear loads in industrial, commercial and municipal service fields are introduced. This paper establishes the circuit models and analyzes the working principles of nonlinear loads in detail. The input current waveforms of various nonlinear loads and their spectrum analysis are also given using the simulation software. Based on the site investigation and testing, summary and evaluation of the harmonic characteristics of typical nonlinear loads, and the effective solutions of harmonic elimination are presented.

Key words: power quality; nonlinear loads; harmonic characteristic; harmonic elimination