

# 电力谐波研究现状及综合治理方法综述

李圣清, 罗 飞

(湖南工业大学 电气系, 湖南 株洲 412008)

**摘 要:** 对电力系统谐波研究的现状、成果、发展方向及其危害进行了深入分析, 在此基础上, 从改造谐波源本身和加装谐波抑制装置两个方面, 阐述了综合治理电力系统谐波的基本方法, 对谐波抑制装置进行了分类, 分析和总结出了它们的优点和缺点。

**关键词:** 谐波; 研究现状; 综述

**中图分类号:** TM71

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-2611(2007)01-0074-05

## The Overview of Current Situation Research and Comprehensive Treatment for Electric Dynamic Harmonic

Li Shengqing, Luo Fei

(Electrician Department, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** At the base of a profound analysis on dynamic harmonic research of electric system from its current situation, achievement, development direction and harmness, it elaborate the basic methods for dealing with dynamic harmonic comprehesively and classificate the harmonic suppression, fourthermore, and it analyzes and summarizes their advantages and disadvantages from two aspects of harmonic source changing and harmonic suppression device.

**Key words:** dynamic harmonic; present condition research; overview

电能质量, 特别是谐波问题, 早在 20 世纪 20 年代和 30 年代就引起了人们的注意。当时在德国, 由于使用静止汞弧变流器而造成了电流波形畸变。1945 年 J.C.Read 发表了有关变流器谐波的论文, 是早期谐波研究比较有影响的论文<sup>[1]</sup>。到了 20 世纪 50 年代和 60 年代, 由于高压直流输电技术的发展, 使得谐波污染加剧, 人们对其研究的力度加大, 发表了一些有学术价值的研究电力系统谐波的论文<sup>[2]</sup>。近年来, 各种非线性负载, 特别是新型电力电子器件在电力系统、工业各部门和家用电器产品中的日益广泛应用, 使得谐波电流和无功电流大量流入电网。在日本, 换流装置在 2000 年的普及率和增长率为 1987 年的 2.5 倍, 谐波电流和电力系统容量的比例上升到 1990 年的 2 倍左右<sup>[3]</sup>; 在美国, 电力电子装置 1999 年上升到 1992 年的 4~5 倍

左右, 电力谐波上升到 1992 年的 2.5 倍左右<sup>[3]</sup>。随着我国改革开放政策的实施, 国民经济的高速发展, 直流输电和柔性交流输电技术的采用, 电气化铁道的快速发展, 化工、冶金和煤炭等工业部门中大量应用电力电子设备, 以及节能工作中电力电子技术的应用等, 因而谐波污染源的使用数量不断增加, 电网电压畸变率不断上升, 使得电力系统的谐波问题日益严重。总之, 现在世界各地的谐波污染问题呈逐渐上升趋势。

## 1 谐波研究现状及其危害

### 1.1 谐波研究现状

正是由于电力电子技术的飞速发展, 各种电力电子装置的日益广泛应用, 谐波污染的日趋严重, 谐波

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 湖南省教育厅基金资助项目(05C513), 湖南省科技厅基金资助项目(05GK3022), 中国包装总公司基金资助项目(05ZBKJA014), 株洲市科学技术委员会基金资助项目(2006-25)

作者简介: 李圣清(1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统谐波的分析与治理, 电力电子技术及新型输变电技术的研究。

问题已在世界范围内得到了广泛的关注。1982年,国际电工委员会第一次制定了通用电器设备产生谐波的限制标准——IEC-55,并且在以后的执行过程中不断地进行了修订和完善,是一部最早的最具权威的谐波限制标准,在欧美等发达国家已被强制执行<sup>[4]</sup>。1993年,美国电气和电子工程师学会在以上标准的基础上进行了修改和补充,制定了IEEE-519谐波限制标准<sup>[5]</sup>。另外,国际大电网会议、国际供电会议等国际性学术组织,也相继成立了专门的电力系统谐波工作组,并已制定出了限制电力系统谐波的相关标准<sup>[2]</sup>。国际国内召开了多次有关谐波问题的学术会议,探讨和交流谐波治理的方法和经验。奥地利George J.Wakileh 2001年出版的《Power Systems Harmonics》是国外谐波治理的代表作。我国也将谐波的管理、监测和治理等摆到了十分重要的位置,也先后于1984年和1993年分别制定了限制电力谐波的规定和国家标准<sup>[5-7]</sup>。吴竞昌等人1988年出版的《电力系统谐波》,夏道止等人1994年出版的《高压直流输电系统的谐波分析及滤波》,王兆安等人1998年出版的《谐波抑制和无功功率补偿》是我国近年来在谐波治理方面发表的具有较大影响的著作。

新的谐波检测方法层出不穷,如Akagi H等学者提出的基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法<sup>[3]</sup>,该方法具有较好的实时性,而且既能治理谐波又能补偿无功功率;又如基于傅立叶变换的谐波检测方法<sup>[3]</sup>,该方法具有检测精度较高、实现简单、功能多和使用方便等诸多优点,因而在频谱分析和谐波检测两个方面均得到了比较广泛的应用。针对现有的各种谐波电流检测方法都存在延时问题,近年来提出了一些新型谐波电流预测方法,如基于加权一阶局域理论的谐波电流预测方法<sup>[6]</sup>,该方法在 $t$ 时刻预测出 $t+2$ 时刻的谐波电流与其理想值的偏差值,通过选择 $t+1$ 时刻的控制策略,利用加权最小二乘法使得在 $t+2$ 时刻该偏差值为最小,从而实现了2步预测的无差拍控制。将中心点的空间距离作为一个拟合参数引入预测过程,提高了预测精度和消噪能力,它具有原理简单和实时性好等特点。这些成果的取得无疑促进了有源电力滤波技术的发展,特别是进入80年代以后,由于新型电力半导体开关器件的出现,PWM控制技术的发展,以及新型谐波电流检测方法的提出,有源电力滤波技术(Active Power Filter 简称APF)得以迅速发展<sup>[7-18]</sup>。国外有源电力滤波器的研究以日本为代表,1982年第一台实用的有源电力滤波器装置投入实际运行,现已步入实用化阶段。尽管如此,由于APF初期投入大,补偿容量难以做大等原因,使得APF未能普及应用。因此,目前在理论和应用两方面都存在许多问题,需要进一步研究和解决。

近10多年来,对电力谐波问题的研究已经大大超

过了电力系统自身的研究范围,渗透到电工理论、非线性系统理论、数字信号处理、电力电子等学科领域,对电力谐波的研究已取得了前所未有的进展,并有了许多重要发展。谐波问题逐渐被认识和了解,对其产生的原因,计算方法的分析,危害与影响的机理,测量与评估标准的制定,以及研究综合治理措施等方面的探索也在不断深入。但由于谐波问题复杂,涉及领域宽,目前仍有大量问题需要解决。谐波研究工作概括起来可以划分为4个方面<sup>[8]</sup>。

- 1) 谐波功率理论研究;
- 2) 谐波及其危害和影响的分析,制定限制谐波的标准;
- 3) 谐波有关的测量问题;
- 4) 谐波的补偿和抑制。

## 1.2 谐波危害

供用电系统中的谐波危害具体表现在以下几个方面<sup>[3, 4]</sup>:

- 1) 增加了发、输、供和用电设备的附加损耗,使设备过热,降低设备的效率和利用率。由于谐波电流的频率为基波频率的整数倍,高频电流流过导体时,因集肤效应的作用,使导体对谐波电流的有效电阻增加,从而增加了设备的功率和电能损耗,使导体的发热加剧。
- 2) 影响继电保护和自动控制装置的工作可靠性。谐波对电力系统中以基波负序量为基础的继电保护和自动装置的影响十分严重,会引起发电机负序电流保护装置误动作、变电站主变的复合电压启动过电流保护装置负序电压元件误动作,母线差动保护的负序电压闭锁元件误动作等,严重威胁电力系统的安全运行。
- 3) 使测量和计量仪器的指示和计量不准确。由于电力计量装置都是按50 Hz标准的正弦波设计的,当供电电压或负荷电流中有谐波成分时,会影响感应式电能表的正常工作。在有谐波源的情况下,谐波源用户处的电能表记录了该用户吸收的基波电能并扣除一小部分谐波电能,从而谐波源不仅污染了电网,而且还少交了电费;而与此同时,在线性负荷用户处,电能表记录的是该用户吸收的基波电能及部分的谐波电能,这部分谐波电能不但使线性负荷性能变坏,而且还要多交电费。
- 4) 干扰通信系统的工作。电力线路上流过的3、5、7和11次等幅值较大的奇次低频谐波电流通过磁场耦合,在邻近电力线路的通信线路中产生干扰电压,干扰通信系统的工作,影响通信线路通话的清晰度,甚至在极端情况下,还会威胁通信设备和人员的安全。另外,高压直流换流站换相过程中产生的电磁噪声会干扰电力载波通信的正常工作,并使利用载波工作的闭锁和继电保护装置误动作。
- 5) 对用电设备的影响。谐波会使电视机和计算机

的图形畸变,画面亮度发生波动变化,并使机内的元件出现过热,使计算机及数据处理系统出现错误。对于带有启动用的镇流器和提高功率因数用电容器的荧光灯及汞灯来说,会因为在一定参数的配合下,形成某次谐波频率下的谐振,使镇流器或电容器因过热而损坏。对于采用晶闸管的变速装置,谐波可能使晶闸管误动作,或使控制回路误触发。

日本电气学会1997年发表了一项有关谐波危害的报告<sup>[9]</sup>,该报告指出:进入90年代以后,每年由谐波引起的电网故障率比90年代之前要高得多。在被调查的363次事故中,引起设备烧毁的故障次数最多,有124次,是总数的34.3%,其次是引起设备工作异常的故障有89次,是总数的24.6%。我国的情况大体与此类似<sup>[2]</sup>。

## 2 治理谐波的基本方法

解决电力谐波污染问题,目前主要有2种途径:一种是对谐波源本身进行改造<sup>[9]</sup>,使其不产生谐波也不消耗无功,在产品的设计时就考虑减少和抑制谐波措施,这就是所谓的“防病”方法;另外一种途径就是在电力系统或负载加装滤波装置<sup>[2,9,10]</sup>,抑制谐波和补偿无功功率,这就是所谓的“治病”方法。

### 2.1 对谐波源本身进行改造方法

对谐波源本身进行改造的方法较多,归纳起来有以下几种措施<sup>[2,8]</sup>:

#### 1) 多相整流技术

对于大功率相控整流器,一般是采用增加整流相数,通过采用适当的控制方法,可以大大减少相控整流器产生的谐波。但由于相控整流方式中增加整流相数会受到许多限制,另外,也不可能无限地增加相数,因而采用多相整流技术不能从根本上解决谐波问题,必须考虑另外的治理谐波措施加以解决。

#### 2) 脉宽调制整流技术

对于中等容量的变流器,可采用自关断器件构成的PWM整流器。对于电流型PWM整流器,可直接控制整流桥中的电力电子半导体器件,使其输入电流为接近正弦波且与电源电压同相的PWM波形,从而得到接近于1的功率因数。对于电压型整流器,需要将整流器通过电感与电源相连,通过控制电感中的电流,使整流器的输入成为与输入电压相同的正弦波。

#### 3) 功率因数校正器

近年来,随着彩电、个人计算机以及大量办公设备的广泛使用,每一个这样的负载都是一个小功率的谐波源,大量小功率谐波源对电力系统也构成了严重的谐波污染,而且这种谐波源由于分布很广而很难集中治理。目前一般采用在整流二极管与滤波电容之间插入一个电流整形器或叫做功率因数校正器。

以上讨论的“防病”方法仅仅是对自身性能的改

进,可以减少谐波源对电网的污染。但由于电力系统的庞大和复杂,电力电子器件的开关工作状态,因而电力系统本身存在较大的谐波污染。因此,必须采用另外一种途径,即加装滤波装置。

### 2.2 加装滤波装置方法

电力系统的滤波器多种多样,常用的有以下几种。

#### 2.2.1 无源电力滤波器

在电力系统中,采用无源电力滤波器(Passive Power Filter,缩写为PPF)一直是传统补偿谐波和无功功率的主要手段。无源滤波器是由电容、电感和电阻适当组合而成的,通常由5次、7次和高通滤波器组成。其突出的优点是结构简单、运行可靠性高、运行费用低。但是无源滤波器对电网频率的变化是极其敏感的,电网频率稍微偏离额定频率点,无源滤波器的滤波性能将大幅度下降。此外,电网阻抗的变化、滤波器元件的生产误差、老化或其它原因引起的参数偏离理想的设计值,也将导致无源滤波器滤波性能的下降。并且,安装LC无源滤波器很有可能在系统中形成串并联谐振回路<sup>[2,4]</sup>,导致电网谐波电流的传播和放大,造成电网电压波形的畸变。为了避免在主要谐波频率处发生串、并联谐振,无源滤波器的调谐频率往往设计成稍微偏离主要的谐波频率,而这又将影响无源滤波器的滤波性能。此外,由于无源滤波器由大容量的电抗器和电容器组成,整机体积庞大,因此,无源电力滤波器必将被效率高、动态补偿特性好的有源电力滤波器所取代。

#### 2.2.2 有源电力滤波器

有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波和补偿无功功率的新型电力电子装置,其基本工作原理是从补偿对象即谐波源中检测出需要补偿的分量,如谐波电流或无功电流分量,由APF产生一个与补偿分量大小相等方向或极性相反的补偿分量,以使被补偿分量和APF产生的补偿分量相互抵消,从而使电网电流只含基波分量,重新成为正弦电流<sup>[10-18]</sup>。有关APF的思想早在上个世纪六七十年代就已有学者提出<sup>[17,18]</sup>。Bird B M和Marsh J F等人在1969年发表的论文中,描述了向交流电网注入3次谐波电流来减少电源电流中的谐波成分,从而改善其波形的新方法,这实际上是APF思想的萌芽。1971年Sasaki H和Machida T的论文最先较为完整地描述了APF的基本工作原理。由于当时在APF中采用线性放大器来产生补偿电流,因而损耗较大,成本较高,使APF没有能够被实用化。1976年,在Gyugyi L等人提出了采用脉宽调制(Pulse Width Modulation,缩写为PWM)控制变流器构成的APF后,才确立了APF较为完整的概念和主电路的拓扑结构。

APF可分为串联型APF和并联型APF。在串联型和并联型APF中,又可根据有源电力滤波器与补偿对

象的连接关系, 分成单独使用的串联型 APF、单独使用的并联型 APF 和混合型 APF 等多种形式, 其系统构成如图 1 所示。单独使用的串联型 APF 和并联型 APF 如图 2 所示。

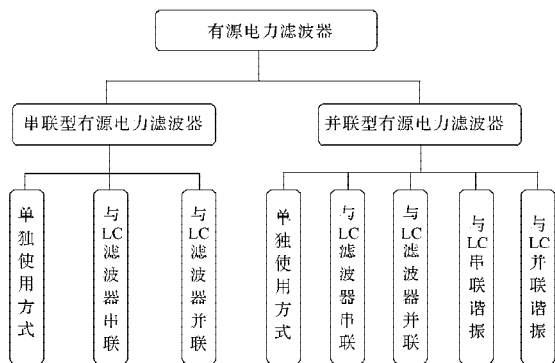
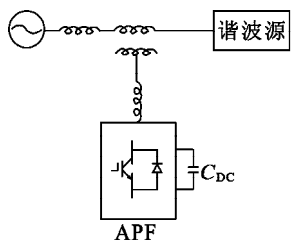


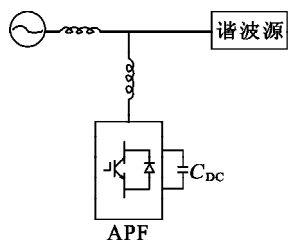
图 1 APF 的分类

Fig. 1 Classification of APF

串联型 APF 主要用于补偿电源电压畸变, 保证负荷用电质量, 提高系统稳定性, 适用于对电压型谐波源负载进行补偿。构成的系统具有有源滤波装置容量小、运行效率高等优点, 但却存在要求绝缘强度高、难以适应线路故障条件等缺点。



a) 串联型 APF



b) 并联型 APF

图 2 单独使用的 APF  
Fig. 2 Single-using APF

并联型 APF 主要用于补偿电网电流谐波、负载无功和提高电网功率因数, 适用于对电流型谐波源负载进行补偿, 其补偿特性不受电网阻抗变化的影响, 是一种较为理想的补偿装置。目前投运的绝大部分是并联型 APF, 但是并联型 APF 由于有源滤波装置, 容量相对较大, 存在初期投资大和运行效率低的缺点。它与无源电力滤波器相比, 具有明显的优势<sup>[2, 4, 8]</sup> :

- 1) 跟踪补偿频率和幅值都变化的谐波以及变化的无功, 对补偿对象的变化响应快;
- 2) 实现对谐波和无功功率同时补偿, 且补偿无功功率的程度连续可调;
- 3) 补偿无功功率时理论上不需储能元件, 补偿谐波时储能元件的容量也不必太大;
- 4) 可跟踪电网频率的变化, 故补偿性能不受电网频率变化的影响;
- 5) 补偿特性基本上不受电网阻抗的影响, 不易与电网阻抗发生谐振;

6) 即使补偿对象电流过大, 也不会发生过载, 并能正常发挥补偿作用;

7) 既可对一个谐波源单独补偿, 也可对多个谐波源集中补偿。

由 PPF 和小容量 APF 共同组成的混合型有源电力滤波器 (Hybrid Active Power Filter, 简称 HAPF), 它具有成本低和滤波效果好等诸多优点, 越来越受到人们的重视。它主要由无源滤波器抑制谐波和进行无功功率补偿, 有源滤波器则只用来改善无源滤波器的滤波效果, 这是目前 APF 应用研究的一个重点。现有的混合式补偿方式主要有以下几种<sup>[2, 8]</sup> :

1) APF 与 PPF 直接并联使用

将 APF 与 PPF 直接并联使用, 图 3 给出了串联型 APF 与 PPF 混合使用的结构图。无源滤波器补偿系统中大部分比较固定的低阶谐波分量, APF 补偿变化的高阶谐波分量, 这样合理分担补偿需求, 可以使 APF 的容量大幅度减小。但这种补偿方案中, 由于并联的 LC 滤波器的影响, 负载的等效谐波阻抗将变小。当不满足负载谐波阻抗远大于电网谐波阻抗的条件时, APF 的补偿性能将受电网阻抗变化的影响, 而且 APF 的补偿电流还可能注入无源 LC 电路中。

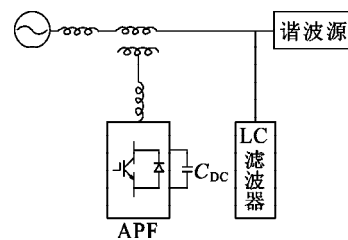


图 3 APF 与 PPF 直接并联使用  
Fig. 3 Shunt APF and PPF

2) APF 与 PPF 直接串联使用

将 APF 与 PPF 直接串联使用, 图 4 给出了并联型 APF 与 PPF 串联的结构图。使 LC 无源滤波器承受基波电压, 而 APF 只承受谐波电压, 也可以显著降低 APF 的容量。这种方法的缺点是, LC 无源滤波器的特性对 APF 工作特性的影响较大。

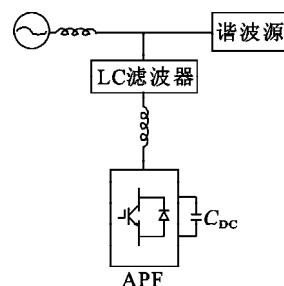


图 4 APF 与 PPF 直接串联使用  
Fig. 4 Series APF and PPF

3) 注入式补偿电路

将 LC 电路作为逆变器的注入电路, 利用电感和电容的谐振特性, 使 APF 不承受或只承受较小的基波电压, 从而减小逆变器容量, 降低成本。串联谐振注入式补偿电路如图 5 所示, 通过选择

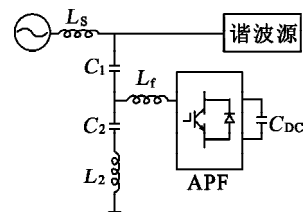


图 5 串联谐振注入式补偿电路  
Fig. 5 Series resonance injecting compensation circuit

$C_2$  和  $L_2$  的值使其对电网基波频率产生串联谐振, 系统电压由  $C_1$  承担。这样, 在理想情况下, APF 仅承担谐波电压。

并联谐振注入式补偿电路图6所示, 同样通过选择  $L_1$  和  $C_1$  的值, 使其对电网基波产生并联谐振, 从而使  $C_2$  的电压即 APF 承受的电压不包含基波电压, 达到减小 APF 容量要求的目的。

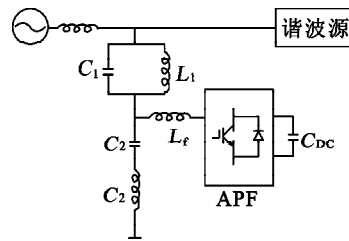


图6 并联谐振注入式补偿电路  
Fig.6 Parallel resonance injecting compensation circuit

#### 4) 通用电能质量调节器

通用电能质量调节器 (Universal Power Quality Conditioner, 缩写为 UPQC) 是一种新型的综合电能质量控制装置, 如图7所示。它综合有2个变流器单元, 二者共用一个直流环节, 其中一个变流器通过变压器串联接入电网, 实际上是一个串联型有源电力滤波器, 另一个变流器则是直接并联接入电网, 实际上是一个并联型有源电力滤波器。既能补偿负载侧引起的谐波和无功电流等电能质量问题, 也能补偿来自电网侧的电压谐波, 同时还能改善电压幅度不稳以及电压短时中断等电能质量问题。不仅能提高电网的供电电压质量, 还能消除负载产生的各种电能质量扰动及其损害。通用电能质量调节器可以在单相、三相三线制或三相四线制系统中使用, 既可以用于指定负载, 也可用于配电系统公共连接点。但还是因补偿效果、费用和技术不够成熟等原因, 未能普及应用。因此, 其补偿特性、控制方法和实用性有待于进一步的研究。

#### 5) 双并联型有源电力滤波器

双并联型有源电力滤波器是解决高压、大功率谐波补偿问题的一种比较好的方法, 其原理结构图与图7相似, 只要将图7中的串联型有源电力滤波器换成并联型有源电力滤波器即可。总的谐波补偿任务由多个有源电力滤波器单元分担, 或者不同频次或频段的谐波由不同的有源电力滤波器单元补偿。但是, 其缺点是其控制系统比较复杂, 而且成本较高。

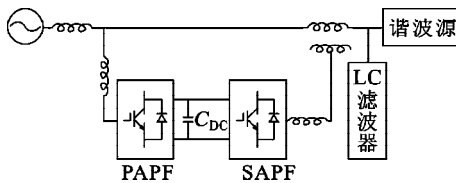


图7 UPQC原理图  
Fig.7 Principle figure of UPQC

### 3 结论

近年来, 世界各地的谐波污染问题呈逐渐上升趋势, 对其进行综合治理已迫在眉睫。本文深入分析了

电力系统谐波的研究现状、研究成果和发展方向, 阐述了谐波对电力系统和各种负载的危害。在此基础上, 从改造谐波源本身和加装谐波抑制装置两个方面, 论述了综合治理电力系统谐波的基本方法, 即所谓的“防病”和“治病”方法, 对谐波抑制装置进行了科学分类, 分析和总结出了它们各自的优点和缺点。

#### 参考文献:

- [1] Read J.C. The calculation of rectifier and converter performance characteristics[J]. Journal IEE, 1945, 92 ( II ): 495-590.
- [2] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制功率和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 李圣清. 有源电力滤波器滤波技术及其补偿特性的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [4] 王莉娜. 厂矿企业配电网谐波治理控制策略和工程应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
- [5] 水利电力部. 电力系统谐波管理暂行规定(SD126-84)[Z]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [6] Christopher K.D. Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power system[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1989, 25(6):1025-1034.
- [7] GB/T1459-93, 电能质量公用电网谐波[S].
- [8] 周维维. 有源电力滤波器谐波电流检测和控制新方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [9] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于瞬时无功功率理论的四相输电谐波电流检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):12-17.
- [10] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2):16-20.
- [11] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于加权一阶局域理论的谐波电流预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6):19-23.
- [12] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 并联型有源电力滤波器对电动机和电容器谐波源补偿特性的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2):83-87.
- [13] 周卫平, 吴正国, 夏立. 基波相位和频率的高精度检测及在有源滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4):91-96.
- [14] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 电网谐波检测方法的综述[J]. 高电压技术, 2004, 30(3):39-42.
- [15] 王群, 谢品芳, 吴宁, 等. 模拟电路实现的神经元自适应谐波电流检测方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6):42-46.
- [16] 李圣清, 彭玉楼, 周有庆. 一种改进型自适应谐波电流检测方法的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12):3-5.
- [17] Akagi H. Trend in active power line conditioners[J]. IEEE Trans on P.E., 1994, 9(3):263-268.
- [18] Akagi H, Atoh S, Nabae A. Compensation characteristic of active power filter using multi-series voltage-source PWM converters[J]. Elect. Eng.jpn., 1986, 106(5):28-36.