

学校编码: 10384
学号: 19920101152716

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

无变压器并联混合型有源滤波器研究

The Research of Transformerless Shunt Hybrid Active
Power Filter

郑佳坤

指导教师姓名: 洪永强 教授

专 业 名 称: 机械电子工程

论文提交日期: 2013 年 月

论文答辩时间: 2013 年 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着电力电子技术的发展,越来越多的非线性负载被应用到工业生产中,电网谐波污染日益加重。混合型有源电力滤波器(hybrid active power filter, HAPF)结合了无源滤波器(passive filter, PF)和有源电力滤波器(active power filter, APF)的优点,既能有效的抑制负载谐波电流又能提供大容量无功补偿,因此得到广泛关注。

本文在总结分析并联混合型有源滤波器的发展现状及研究热点的基础上,对一种新颖的无变压器并联混合型有源电力滤波器(transformerless shunt hybrid active power filter, TLS-HAPF)进行了研究,推导了其滤波原理、研究了其控制算法、并搭建了有源滤波器样机。

对无变压器并联混合型有源滤波器的拓扑结构进行研究,描述系统的结构组成,分析其应用场合及优缺点。在对其进行理论研究及仿真设计的基础上,完成关键元器件参数选型。同时,完成了 TLS-HAPF 受控系统的硬件实现,包括主功率电路以及 IPM 驱动电路。

对无变压器并联混合型有源滤波器的控制系统进行研究,分析了控制系统的控制原理,包括谐波电流提取、电流跟踪等有源滤波器控制算法,通过仿真研究,采用基于五次谐波电流反馈的电流双闭环控制算法。

设计了有源滤波器控制系统的实现环节,主要包括控制硬件设计和控制软件编写。硬件设计包括信号采集和处理电路、硬件保护电路、人机通讯与 I/O 接口电路。控制软件实现则在基于 DSP/BIOS 系统的基础上,编写控制系统软件,实现对有源滤波器系统的控制。

论文基于三相不控整流负载搭建了谐波实验平台,并在搭建的实验平台上对有源滤波器样机进行调试,实验结果验证了相关研究的正确性。

关键词: 谐波治理; 混合型有源滤波器; 五次谐波电流反馈

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

With the development of power electronics technology, more and more non-linear load is applied to the industrial production, which makes the harmonic pollution rising in the grid. The hybrid active power filter (HAPF) combined the advantage of passive filter (PF) and active power filter (APF), which can effectively inhibit the harmonic current and can provide reactive power compensation also. So the HAPF attracted widespread attention.

This paper researched a novel transformerless shunt hybrid active power filter (TLS-HAPF) through the in-depth analysis of developments and trends of HAPF. Including the derivation of the filtering principle, the control algorithm, and finally build an active filter prototype. Specific research contents are as follows:

Through the analysis of the filter principle, this paper researches the topology of the TLS-HAPF, describes the system structure and composition, and analyzes the applications and the advantages and disadvantages of TLS-HAPF. Based on the theoretical studies and simulation design, this paper finish the selection of key components parameter, and implement the power circuit of the TLS-HAPF.

Through the research of the control system, this paper analyzes the theory of the control system, including harmonic the harmonic current extraction, current tracking control algorithm in the active filter. This paper adopts the fifth harmonic current feedback control algorithm through simulation.

Design the implementation of the active power filter control system, including hardware and software design of the control system. The hardware design includes signal acquisition and processing circuit, protection circuit, communication and I/O interface circuit. The control software design includes the program of the control algorithm based on the DSP / BIOS system.

Finally this paper builds a three-phase uncontrolled rectifier load experimental platform as the harmonic source of the system. The active filter is designed and connected to the experiment system. Experimental results verify the correctness of the

research.

Keywords: Harmonic Control; Hybrid Active Power Filter; Fifth Harmonic Current Feedback

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 电网谐波问题及其治理.....	1
1.2 有源滤波器发展现状.....	3
1.2.1 谐波电流检测.....	4
1.2.2 电流控制算法.....	5
1.3 混合有源滤波器发展现状.....	6
1.4 本文主要研究内容与章节安排.....	9
第二章 工作原理与系统参数设计	11
2.1 基本滤波原理.....	11
2.2 TLS-HAPF 滤波原理分析.....	13
2.3 TLS-HAPF 功率电路实现.....	17
2.3.1 LC 无源滤波器设计.....	18
2.3.2 变流器逆变桥及其驱动电路设计.....	20
2.3.2 其它相关参数选型设计.....	23
2.4 本章小结.....	24
第三章 无变压器并联混合型有源滤波器控制策略.....	27
3.1 控制系统结构.....	27
3.2 瞬时无功功率检测理论.....	28
3.3 控制策略.....	31
3.3.1 电流采集点对控制策略的影响.....	32
3.3.2 基于五次谐波电流反馈的电流双闭环控制.....	35
3.3.3 直流侧电压控制.....	37
3.4 本章小结.....	39
第四章 控制系统设计实现	41
4.1 控制系统硬件部分.....	41
4.1.1 A/D 采集调理电路.....	42
4.1.2 保护电路.....	45
4.1.3 通信电路.....	51
4.1.4 DSP 主控电路.....	52
4.1.5 I/O 电路.....	53

4.2 控制系统软件部分	54
4.3 本章小结	58
第五章 实验与调试	59
5.1 实验平台搭建	59
5.2 调试与实验结果	62
5.3 本章小结	66
第六章 总结与展望	67
6.1 工作总结	67
6.2 展望	68
参考文献	69
攻读硕士学位期间取得的科研成果	73
致 谢.....	75

Abstract.....	III
1 Introduction.....	1
1.1 Harmonic Polution of Power Grid.....	1
1.2 Developments and Trends of APF.....	3
1.2.1 Harmonic Current Detection.....	4
1.2.2 Control Strategy.....	5
1.3 Developments and Trends of HAPF.....	6
1.4 Main Research and Chapter Arrangement.....	9
2 Working Principle and Parameter Design.....	11
2.1 Filtering Theory.....	11
2.2 The Filtering Theory of TLS-HAPF.....	13
2.3 The Power Circuit Implementation of TLS-HAPF.....	17
2.3.1 LC Passive Filter Design.....	18
2.3.2 Inverter Bridge and IPM Driver Design.....	20
2.3.2 Other Relevant Parameters Design.....	23
2.4 Summary.....	24
3 The Control Strategy of TLS-HAPF.....	27
3.1 The Structure of Control System.....	27
3.2 Instantaneous Reactive Power Theory.....	28
3.3 Control Strategy.....	31
3.3.1 The Impact of Current Detection Point.....	32
3.3.2 Control Strategy Based on the Fifth Harmonic Current Feedback.....	35
3.3.3 DC Voltage Control.....	37
3.4 Summary.....	39
4 The Implementation of Control System.....	41
4.1 Hardware Desgin.....	41
4.1.1 A/D Acquisition and Processing Circuit.....	42
4.1.2 Protection Circuit.....	45
4.1.3 Communication Circuit.....	51
4.1.4 DSP Control Circuit.....	52
4.1.5 I/O Circuit.....	53
4.2 Software Desgin.....	54
4.3 Summary.....	58

5 Experiment Verification	59
5.1 Experiment Platform Design.....	59
5.2 Experiment Results	62
5.3 Summary	66
6 Conclusion and Outlook.....	67
6.1 Conclusion.....	67
6.2 Prospect for Future Work.....	68
References	69
Publications and Rewards.....	73
Acknowledgement.....	75

第一章 绪论

1.1 电网谐波问题及其治理

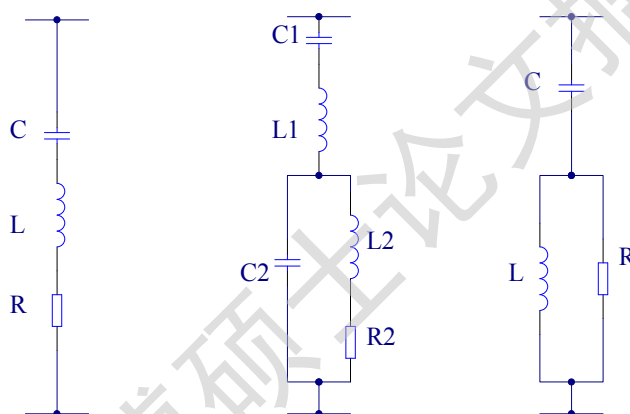
自从第二次工业革命以来,电能已经成为人类社会生产、生活必不可少的能源,由于电能具有生产使用方便、经济,易于输送、转换等优点,电能被广泛应用于动力、照明、工业生产、通信、家居等社会活动的各个领域,成为国民经济以及科学技术发展的关键因素^[1-3]。电力系统由发电、变电、输配电以及用电等环节组成,完成电能的生产、传输、分配和消费。在电力系统发展初期,电网中的负载大多由线性负载组成,电能质量性能指标较高。随着现代电力电子技术高速发展,越来越多的非线性负载应用到电力电子系统当中,这些非线性负载的引入,一方面使得电力电子技术在各方面性能取得了突破,同时由于负载非线性的特点,电网中电压和电流的波形产生了相应的畸变^[4-7]。

理想情况下,公用电网以恒定频率、规定幅值的电压和完整的正弦变化规律向用户供电。电网谐波问题就是电网电压或者电流的畸变,是目前电能质量中较为常见的问题。谐波概念原本来源于函数傅里叶变换中的一个数学概念,对于实际物理系统中的波形而言,通过将波形分解为不同频次正弦波或者余弦波的叠加,频率为基波频率的整数倍的部分分量就是谐波。对于电网而言,理想的电压电流波形就是基波波形,实际电网中畸变的波形就是基波和谐波的叠加。电网谐波问题由来已久,早在 20 世纪 40 年代, J.C.Read 就在论文中提到关于变流器谐波问题。电网谐波的产生主要由变压器以及各类非线性负载等产生^[8]。

电网谐波的出现会带来很多副作用,主要包括使电网元件产生附加谐波损耗,降低电能的生产、传输和使用效率;影响各电气设备的正常工作,降低元件及设备的寿命;引起继电保护装置的误动作,造成仪表测量不准确,甚至出现停电等事故;另外谐波还会影响系统通信设备,产生干扰,降低通信质量^[5]。电网谐波问题不仅影响电能系统的正常工作状态、产生额外的损耗、加大了电力系统的运行成本,有时候还会出现故障而引发事故,因此电网谐波是一个受广泛关注和研究的问题。随着科学技术的发展,一方面现代电气设备、用户等对供电系统的电能质量要求愈来愈高;另一方面随着 UPS、开关电源、变频器、逆变器等

非线性负载广泛地应用到工业、社会生产生活中,电网受到的谐波污染日益加重,因此电网谐波治理受到越来越多的重视和研究。

为保障电力系统稳定健康地运行,确保用电设备的安全和正常工作,需要有效治理谐波将电网谐波限制在一定范围以内,各国和地区都有相应的电网谐波治理标准^[9]。目前,工业生产中主要通过各类电力滤波装置来吸收电网中的谐波成分,这些电力滤波装置包括无源滤波器、有源滤波器以及混合型滤波器。无源滤波器又称之为 LC 滤波器,是目前应用最为广泛、成本最低、技术最为成熟的滤波方式之一,其原理是利用电感、电力电容和电阻的调谐特性组成的滤波电路,并联



(a) 单调谐滤波器; (b) 双调谐滤波器; (c) 二阶高通滤波器;

图 1.1 用无源滤波器结构

于系统中,对某一频率或某几次频率的谐波起到滤除的作用。如图 1.1 所示常用的无源滤波器有单调谐滤波器、双调谐滤波器以及二阶高通滤波器,无源滤波器的特点如表 1.1 所示。

表 1.1 无源滤波器的优缺点

优点	缺点
<ul style="list-style-type: none"> ● 设计简单、成本低 ● 技术成熟 ● 安装和维护便利 	<ul style="list-style-type: none"> ● 只能滤除特定次数谐波 ● 对负载变化敏感,无法实现动态滤波 ● 对电网的各类参数敏感(如电网频率、阻抗等) ● 可能产生谐振、放大谐波 ● 无源滤波元件容易老化 ● 体积大

1.2 有源滤波器发展现状

有源滤波器是一种动态滤除谐波的设备，通过实时监测，向电网中注入一组和谐波电流大小相等方向相反的电流以实现谐波滤除。有源滤波器能够克服无源滤波器的缺陷，实现对谐波的动态滤除，同时还可以实现谐波、无功以及负序电流的动态补偿。

有源滤波器的基本概念首先由 H.Sasaki 等人在 19 世纪 70 年代提出^[10]，1976 年 L.Gyuig 等人提出了基于 PWM 逆变器结构的有源滤波方案，探讨了有源滤波器的控制和实现方法^[11]，从而正式确立了有源滤波器的概念。1983 年 H.Akagi 等人提出了瞬时无功功率理论，该理论的提出为电力系统中谐波和无功电流的瞬时检测提供了理论依据，极大地推进了有源滤波器的发展^[12]。以该理论为基础的谐波和无功电流检测方法普遍应用到有源滤波器的控制算法中，奠定了有源滤波器控制算法的基础。随着电力电子技术的发展，有源滤波器的一系列关键技术也得到了迅速的发展，GTR、GTO、IGBT 等新型快速大容量功率开关器件的相继研制成功，以及 PWM 技术、微机控制技术、数字信号处理技术的发展，都进一步促进了有源滤波技术的发展。

有源滤波器按照装置与电网的连接方式可以分为串联型有源滤波器以及并联型有源滤波器。如图 1.2 a 所示，在串联型有源滤波器拓扑中，主电路串联在电网和谐波负载之间，此时的有源滤波器相当于一个受控电压源，用以消除负载产生的谐波电压，使电网电压接近正弦波。该拓扑适用于电压源型的谐波源，如电容滤波整流电路。

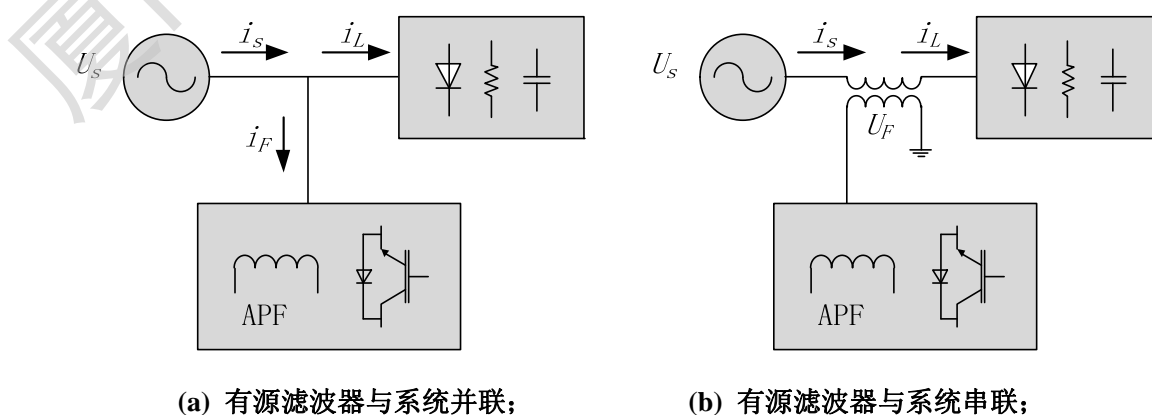


图 1.2 常见有源滤波器结构

并联型有源电力滤波器的拓扑结构如图 1.2 b 所示, 该拓扑的主电路与负载并联接入电网, 此时的有源滤波器相当于一个受控电流源, 通过适当的控制可以实现对谐波电流、无功功率、以及三相不平衡负载的补偿^[13]。通过并联型有源滤波器的控制, 使之产生与负载谐波电流大小相等、方向相反的谐波, 从而抵消电网中的谐波, 使得电网中的电流接近正弦波。该拓扑结构中的交流基波电压直接加在有源滤波器上, 因此对滤波电容容量要求较大, 对变流桥开关元件的耐压值要求也较高。该拓扑适用于电流源型的谐波源, 如阻感性负载组成的整流电路。

目前应用较为广泛的是并联型有源电力滤波器, 对并联型有源滤波器的研究主要集中在对并联型有源滤波器控制算法的研究以及滤波器拓扑结构的研究。

1.2.1 谐波电流检测

有源滤波器的补偿特性要求系统能够实时检测电网中的谐波电流, 这对谐波电流检测提出了很高的要求。谐波电流的检测是有源滤波器控制中最为重要的一个环节, 它决定了电流跟踪的目标曲线, 直接影响有源滤波器的补偿效果。谐波电流检测的目的是从畸变电流中把基波电流和谐波电流分离, 取电流中的谐波成分用于后续实现电流跟踪。为了快速检测电流波形中的谐波成分, 国内外学者提出了多种谐波的快速检测方法。从早期的模拟滤波器法, 发展到快速傅里叶变换, 以及后来提出的基于瞬时无功功率理论的检测方法, 近年也出现一些新的算法诸如广义积分法、小波变换法等^[14, 15]。这些算法中, 比较成熟的算法包括基于快速傅里叶变换的算法以及基于瞬时无功功率理论的检测方法。

基于快速傅里叶变换的检测方法原理是把一个周期的谐波信号利用 FFT 分解, 可以得到各次谐波的幅值和相位, 它是一种频域分析方法, 通过在频域内将谐波与基波分离。这种算法可以精确地计算出信号的频谱, 但是由于需要采集一个周期的数据, 所以延时较大, 实时性较差。另外, 该方法需要严格的同步采样, 否则会产生频谱泄漏、频率分辨能力不足、栅栏效应及频谱泄漏等问题, 引起较大的误差, 因此当谐波电流在一个周期里有突变时(加载、去载)会引起较大的检测误差^[16-18]。

基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法是基于日本学者 H. Akagi 提出的三相电路瞬时无功功率理论的一种快速检测谐波的方法^[12]。最初的算法是以瞬时

有功功率 p 和瞬时无功功率 q 为基础的 pq 法,但是 pq 算法会受到畸变电压的影响。经过一系列的发展,发展为以瞬时有功电流 i_p 和瞬时无功电流 i_q 的 $ip-iq$ 法。因为只取电压信号的频率和相位信息, $ip-iq$ 法在检测过程中不受电压波形畸变的影响^[5]。常用的基于瞬时无功功率理论的检测方法为 $ip-iq$ 法,基本思想是通过坐标变换,将畸变波形中的基波转变为直流分量,谐波转变为交流分量,通过低通滤波器和一系列的处理得到谐波电流分量,实现谐波电流的提取。由于瞬时无功功率理论实时性好,因此广泛应用于目前的有源滤波器中。该方法的延时主要由检测谐波过程中的数字滤波器造成的,因此数字滤波器的设计是该方法的关键因素。

除了上述两种常见的谐波电流检测算法之外,还有一些其它算法用以检测电流谐波,包括小波变换法、广义积分器法、神经网络算法等。

1.2.2 电流控制算法

有源滤波器的主要控制过程包括谐波电流提取,通过电流跟踪形成指令电流,并最终生成 PWM 波形以驱动硬件实现补偿电流输出至电网,完成谐波补偿。

运用较为普遍的有源滤波器控制策略是比例积分 (Proportion integral, PI) 控制,其基本原理是通过比较检测电流和参考电流,对它们之间的误差进行 PI 校正,然后输出控制量。该方法的原理简单、易于实现。但是 PI 控制无法实现无净差控制,因此有许多对 PI 控制的改进,有学者提出了比例积分控制器的电流解耦控制策略,以使滤波器输出电流更好地跟踪参考电流。

文献[19, 20]对滑模控制算法做了相关研究,滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)又称为变结构控制(variable structure),是由前苏联学者在 20 世纪 50 年代提出的,具有鲁棒性好,对参数变化不敏感,响应快速、动态品质好等优点^[21-24]。有源电力滤波器的滑模控制是指通过设计滑模函数,依靠开关管的通断将系统的闭环相轨迹引导到一个滑动面上,并在进入滑模面后就被约束在限定空间做小幅度、高频率的滑模运动。近来,有学者将重复控制算法运用于有源滤波器控制。重复控制是一种基于内模原理的控制思想,根据内模原理,如果某一信号可以看做自治系统的输出,那么将此信号的模型置于稳定的闭环系统中,反馈系统就可以对该信号实现完全跟踪^[25-27]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库