

DOI: 10.7667/PSPC161308

# 并联有源电力滤波器解耦控制研究综述

李博<sup>1</sup>, 李欣<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学, 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为解决并联型有源电力滤波器三相电流之间和有功无功电流之间的强耦合问题, 以达到改善负载补偿效果的目的, 总结了近年来相关学者对有源电力滤波器解耦控制的研究工作。首先, 分析了并联有源电力滤波器的结构和特点。然后, 从搭建模型的不同类型出发, 对比分析了三相三线制、三相四线制及混合型并联有源电力滤波器的结构特点和控制方法, 研究了近年来有源电力滤波器各种解耦控制方法的研究进展及相互的联系。最后, 结合近年来新兴的控制方法, 对有源电力滤波器解耦控制的研究做了展望。

**关键词:** 并联有源电力滤波器; 非线性系统; 解耦控制; 谐波抑制

## A survey on shunt active power filter decoupling control

LI Bo<sup>1</sup>, LI Xin<sup>2</sup>

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control, Lanzhou Jiaotong University, Ministry of Education, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to solve the strong coupling problems between three-phase currents and between reactive current and active current of shunt active power filter (SAPF) and then achieve the goal of improving load compensation effect, this paper summarizes the research work on the decoupling control of active power filters by relevant scholars in recent years. Firstly, the structure and characteristics of SAPF are analyzed. Then based on different types of built models, the structure characteristics and control method of three-phase three-wire SAPF, three-phase four-wire SAPF and SHAPF are analyzed comparatively, and the research process and mutual relation of various decoupling control strategies of active power filter in recent years are studied. Finally, the development of SAPF decoupling control is prospected combined with the recent rising control method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61165006).

**Key words:** shunt active power filter; nonlinear system; decoupled control; harmonic suppression

## 0 引言

现代工业技术高度发达的今天, 电力系统中非线性负荷大量增加, 电力系统中电子装置向电网中注入了大量的谐波和无功。有源电力滤波器是一种新型谐波抑制和无功补偿装置, 和传统的 LC 滤波器相比, 有源电力滤波器具有可以对谐波、无功及

负序电流实现实时准确的补偿, 可以补偿各次谐波且不会和电力系统产生谐振的优点<sup>[1]</sup>。因此, 用有源电力滤波器来抑制和补偿谐波, 提高电能质量已经成为现代电力系统安全经济运行的迫切要求。

早在 1938 年 Scott 研究出 RC 选频放大器, 这是最早的有源 RC 滤波器的雏形。19 世纪 60 年代, 集成电路技术开始迅速发展起来, 1966 年 Posehenneder 等人提出开关电容电路可以用于选频滤波的问题。到了 70 年代后期, 单片集成有源 SC 滤波器相继问世, 使得有源 SC 滤波器的研究又有了飞速的发展。1982 年, 世界首台 APF 在日本诞生并用于生产, 此后, 更多的 APF 被应用到生产之

**基金项目:** 国家自然科学基金(61165006); 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室开放基金课题(SKLLDJ 022016015); 甘肃省自然科学基金(145RJZA182); 高等学校基本科研业务费项目(214144)

中。如今,有源电力滤波器已经成为用于谐波抑制和无功补偿的主要装置。

本文首先介绍了并联型有源电力滤波器的基本工作原理及特点,然后对比分析了三相三线制、三相四线制及混合型并联有源电力滤波器的解耦控制方法,最后对并联型电力滤波器解耦控制研究发展做了展望。

## 1 并联有源电力滤波器基本工作原理及特点

有源电力滤波器由两大部分组成,即指令电流运算电路和补偿电流发生电路(由电流跟踪控制电路,驱动电路和主电路三部分组成)。

并联型有源电力滤波器的基本工作原理是:通过检测对象的电压和电流,经指令电流运算电路计算出补偿电流的指令信号,该信号经补偿放大电路,得出补偿电流,补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流抵消,最终补偿得到期望电源电流。并联有源电力滤波器在主电路中相当于受控电流源,主要用于吸收补偿负荷的无功和有功功率、电流谐波<sup>[2]</sup>。有源电力滤波器在结构上采用了具有自动换流能力的绝缘栅双极晶体管(Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT)组成的高频逆变器,能够将直流电流变为交流电流<sup>[3]</sup>。

有源电力滤波器是由直流电抗或电容构成的储能直流电源,经逆变器把存储在电抗(或电容)中的电能转换为所需频率和波形的交流电流,再由变压器注入到供电线路。脉冲宽度调制逆变器同时兼有向直流电抗器(或电容器)提供电能的功能,这个过程直接受其控制电路的控制。根据前面对有源电力滤波器工作原理的分析,有源电力滤波器有如下几个特点<sup>[3]</sup>:

- 1) 有源电力滤波器对各次谐波和分数谐波均能有效地抑制,并且可提高功率因数。
- 2) 当系统阻抗和频率发生波动时,有源电力滤波器不会影响补偿效果。
- 3) 有源电力滤波器不会产生谐振现象,并能抑制由于外电路的谐振产生的谐波电流。
- 4) 用一台有源电力滤波器装置就可以实现对各次谐波和基波无功功率的补偿。
- 5) 不存在过载问题,即当系统中谐波较大时,有源电力滤波器装置仍可运行,无需断开。

然而,并联电力滤波器三相电流之间有强耦合非线性关系,使得实际补偿的电流(或功率)与指令信号产生误差,负载补偿效果受到严重影响,严重时甚至无法达到补偿效果,使负载不能正常工作。所以,实现对有源电力滤波器的线性化解耦控制已

成为当今研究的热点。

如今传统的有源电力滤波器解耦控制模型分为电流补偿和功率补偿两种,大部分采用电流补偿策略,电流补偿策略按电网侧的不同类型又分为单相制、三相三线制和三相四线制有源电力滤波器。另外,也有学者在传统有源电力滤波器的基础上研究了并联混合型有源电力滤波器的解耦控制。下面将按上述分类详细综述近年来并联型有源电力滤波器的解耦方法及相应控制器设计。

## 2 三相三线制并联有源电力滤波器解耦控制

### 2.1 三相三线制有源电力滤波器电流解耦控制

三相三线制并联有源电力滤波器的基本工作思路就是:通过谐波检测装置检测出负载电流的谐波,然后通过有源滤波器使其提供等值反相位的补偿电流(或功率)来消除非线性负载造成的谐波污染,从而达到使网测电流正弦的目的,其模型如图1所示。图中电感L不仅可以耦合电网和逆变装置,还可以起到滤波的作用,APF的关键器件是大功率IGBT,它的作用是通过控制其开关通断将直流电转换成存在一定相位差的交流电。直流侧电容C作为储能元件为APF提供电压支撑<sup>[4]</sup>。

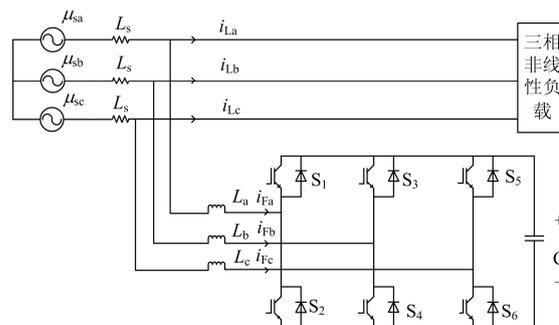


图1 三相三线制并联有源电力滤波器模型图

Fig. 1 Decoupling control model for 3-phase-3-wire SAPF

目前三相三线制并联有源电力滤波器电流解耦的基本方法是用反馈线性方程法实现,也有学者使用基于特定谐波解耦的选择性谐波电流控制法和前馈控制法实现解耦。在这三种基本方法下,二次型最优控制法、系统平均理论法和离散化解耦法得以应用到有源电力滤波器的解耦控制中去。近年来随着人工智能的发展,神经网络等智能方法也开始应用到了有源电力滤波器的解耦中去。

解耦是为了简化控制器的设计,最早的解耦控制器是开环PI控制器,但开环系统的稳定性很难得到保证,近年来多数解耦控制器设计的是双闭环PI控制器,外环PI控制主要解决直流侧电压与谐波电

流之间的耦合关系,内环 PI 主要解决补偿电流之间的耦合关系,有学者在此基础上加入校正器,也有学者设计新型 ZN-PI 控制器,或是在建立滑模函数的基础上设计滑模控制器等新型控制器来改善解耦控制效果。

三相三线制有源电力滤波器电流解耦控制最早是由文献[5]提出的利用非线性变换和非线性反馈理论实现滤波器有功电流和无功电流的解耦<sup>[5]</sup>。在此基础上,文献[6]设计了精确解耦的开环控制器,使得解耦控制得以应用于实际。但是文献[6]没有考虑负载变化时的应对方法,也没对直流侧电压进行稳定调控,文献[7]则解决了这些问题,提出了当负载发生变化或存在迟滞时的动态补偿方法,该方法可以较好地补偿谐波,改善功率因数,提高电网的利用率,控制器的选择也对文献[6]进行改进,采用双闭环控制,外环是用传统 PI 控制,内环控制是一校正器和 PI 控制器的组合,减少了传递函数对零点线性化的影响,并解决了高延时问题。

随着解耦控制器的改进,解耦效果明显改善。通过对文献[7]的传统双闭环 PI 控制器的改进,文献[8]提出了一种新型的控制器,额外增加一个 PI 控制器对指令电流进行跟踪,通过电压环的一个 PI 控制器对直流侧电压进行稳定控制。文献[9]更是提出另一种创新设计的改进型 ZN-PI 控制器以提高有源滤波器的动态解耦性能以及电流补偿精度。文献[10]将智能算法引入控制器的设计,建立自适应模糊逻辑控制器,它令控制器先模糊化,再规则执行,去模糊化,最后适应并整个解耦系统,智能算法的引入将更好地实现解耦。

随着最优控制技术的发展,最优理论也应用到解耦中去。在 2008 年的中国电工技术学会电力电子学会第十一届学术年会上,石峰等人提出运用二次型最优控制理论推导得到了线性系统的最优控制解,此方法可以做到系统的精确线性化<sup>[11]</sup>。2010 年,乐江源等人在此基础上总结了三相三线制有源电力滤波器系统可精确线性化的条件<sup>[12]</sup>。文献[13]基于系统平均理论对解耦模型进行理论分析并设计双闭环控制系统,计算量相对非线性变换法明显减少,这无疑是 APF 解耦控制研究的又一进步。

总的来说,以上方法都是建立在非线性仿射系统模型的基础上进行解耦控制研究,这种模型的特点是:对状态向量是非线性的,但对于控制向量却是线性的。实质上是通过把耦合量进行坐标变换达到解耦目的,没有解决电流间强耦合的问题。也有学者采用基于谐波解耦的选择性谐波检测方法实现直流侧电压与谐波电流解耦<sup>[14]</sup>,此方法基于瞬时无

功率理论<sup>[15]</sup>实现了无差拍跟踪解耦,并通过在反变换中加入补偿相角来补偿解耦相位检测误差。此方法需要对各次谐波进行解耦补偿,而且需要至少 10 个控制器,显然十分麻烦,而且造价较高,调试不方便,在非理想电网电压下不能准确地检测无功电流。文献[16]改进了此弊端,介绍一种解耦控制与预测控制相结合的控制算法,为克服解耦控制和预测控制谐波电流回路受电感参数变换的影响,还提出了一种基于合成矢量的无电感参数的矢量解耦控制器以增强解耦系统的抗干扰性。此方法减少了控制器的数量,可用于非理想电网环境下的解耦,但依然无法减少控制器的设计难度。

近年来基于神经网络的智能方法广泛应用于各行各业,杨辰星和刘国海等人在第 32 届中国控制会议上提出一种神经网络逆解耦的控制方法<sup>[17]</sup>,通过静态网络逆控制将三相并联型有源电力滤波器解耦成两个独立的一阶线性子系统,大大简化了有源滤波器线性闭环控制器的设计,再分别设计线性闭环控制器对两个补偿电流分量进行控制,保证了系统良好的动静态性能。成功地将智能控制领域引入了滤波器解耦控制当中。逆系统的引入达到了 APF 的精确解耦,而且控制器只是针对一阶解耦后的线性子系统,因此控制器的设计只需常规的 PI 控制器就可以起到很好的效果。

三相三线制有源电力滤波器是一个强耦合非线性系统,而滑模控制最大的优点就是能够克服非线性系统的不确定性,而且算法简单,响应速度快<sup>[18]</sup>。此特点正好可以应用到滤波器解耦控制中去,文献[19]正是采用渐近率的方法设计建立滑模函数得到解耦的滑模并联有源滤波器模型,采用 PI 调节器来控制直流侧电压,补偿有源滤波器滑模解耦控制的电流量。但此方法控制器的输出有高频抖动性问题有待解决。

目前并联有源电力滤波器解耦控制基本围绕  $d-q$  旋转坐标进行研究,且未考虑中性点电压的影响,文献[20]考虑到这一点,该方法基于  $\alpha-\beta$  变换<sup>[21]</sup>,建立  $\alpha-\beta$  坐标系下的三相三线制并联型 APF 离散型数学模型,推导了中性点电压对电流控制的影响,在  $\alpha-\beta$  域中采用两个电流控制器实现了解耦控制,并有效消除了中性点电压对电流解耦的影响。

也有学者提出新的滤波器拓扑结构以改善解耦效果,文献[22]提出新的三相多级并联(Cascaded H-bridge, CHB)有源滤波器解耦策略,改进了传统并联有源电力滤波器的结构,采用新的 CHB 基本结构。三个 CHB 两两并联,三相三线电网每相由两个 CHB 并联来补偿无功功率和谐波电流实现解

耦。但每个 CHB 结构之间会存在并联谐振,这一问题有待解决。

在实际解耦中,得到与电网同频同向的相角信号才能更准确地实现电力滤波器的解耦控制。对此文献[23]在对谐波和无功产生原因进行分析的基础上,针对有源滤波器改善电能质量的有效性进行阐述,提出了将鲁棒性更好地基于双同步坐标系的解耦软件锁相环代替传统锁相环并应用在并联滤波器中使其有较强的电网适应性。文献[24]则采用虚拟磁链的定向方法来得到与电网电压同频同向的相角信号。通过在低通滤波器的输出输入端设置交叉补偿环节避免积分器饱和现象出现,提高磁链观测的准确性,采用电压前馈的方法实现解耦控制,避免了电网电压扰动影响,采用准谐振控制器有针对性地特征次数谐波进行补偿。

## 2.2 三相三线制有源电力滤波器功率补偿解耦控制

三相三线制有源电力滤波器功率补偿与电流补偿的不同之处是它对三相负载补偿的是功率信号而不是传统的电流信号。文献[25]基于瞬时功率理论,实现逆变器有功功率和无功功率的解耦,提出有源滤波器恒功率解耦控制,采用空间矢量调制算法对无功功率进行补偿。文献[26]提出用虚拟磁链进行定向,将虚拟磁链的直接功率控制策略应用于有源滤波器的解耦控制中,省去常规电压定向所用的电压传感器,利用矢量调节环发出的驱动脉冲实现恒频解耦控制。

与传统的电流补偿解耦法相比,功率补偿解耦控制省去了坐标反变换环节,简化了控制系统结构,减少了中间系统响应延迟,提高了系统的响应速度。但与电流解耦控制相比,也存在补偿精度上的差距。

## 3 三相四线制并联有源电力滤波器电流解耦

三相四线制有源电力滤波器比三相三线制有源电力滤波器多了一个零序桥臂,此桥臂专门用于对零线电流进行补偿,整个系统可以看做一个四相电流跟踪控制系统,其模型如图2所示。理想情况下,根据指令信号产生补偿电流,此补偿电流与负载电流中的谐波、基波负序分量和零序分量之和大小相等、方向相反,相互抵消<sup>[27]</sup>。

三相四线制电力滤波器一般使用的解耦方法是基于谐波解耦的选择性谐波电流控制法,也有外国学者用 CPT 法实现解耦。控制器的选择上主要采用双闭环 PI 控制器。

三相四线制电力滤波器的特点是多了零序桥臂。针对这个零序桥臂,文献[28]在搭建三相四线有源滤波器模型的基础上,采用泰勒级数法解耦,

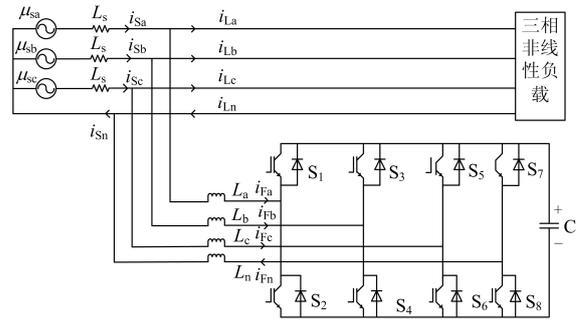


图2 三相四线制有源电力滤波器结构图

Fig. 2 Decoupling control model for 3-phase-4-wire SAPF

利用矢量脉宽调制技术(3D-svpwm)对解耦后的电流进行跟踪。但此方法把谐波展开成泰勒级数的形式,忽略了对高次谐波的补偿,无法实现精确线性解耦。另外,也有学者采用无差拍控制实现对谐波及无功的综合解耦补偿<sup>[29]</sup>,但无差拍控制运算复杂,且此方法在非理想电网电压下将无法达到准确解耦的目的,这是此方法的一点瑕疵。外国学者 Fernando Pinhabel Marafao 等人基于 CPT(Conservative Power Theory)理论也研究了一种三相四线制滤波器的解耦策略<sup>[30]</sup>,主要通过对公共耦合点电流进行正交分解得到解耦的电流量以达到解耦。本质上与文献[29]无异。

与三相三线制有源电力滤波器相比,三相四线制并联电力滤波器中线电流接近零,无论负载对称或不对称都适用,四桥臂变流器用于补偿不平衡负载的效果更为显著。

## 4 并联混合有源电力滤波器解耦控制

混合型有源电力滤波器(SHAPF)模型由有源滤波器(APF)和一组单调无源滤波器(PPF)串联后接入电网,其模型如图3所示。PPF承担基波电压,APF仅提供与谐波电流对应的谐波电压,因此,与传统APF相比,有源部分的容量明显降低<sup>[31]</sup>,可将此模型用于较大功率场合下的谐波治理。

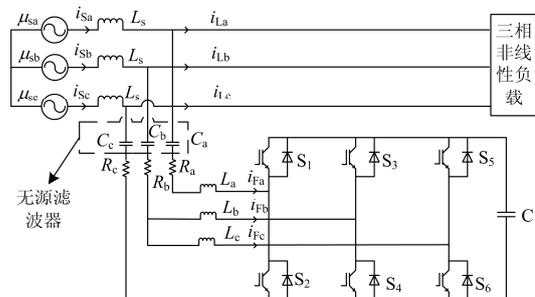


图3 混合型并联有源电力滤波器结构图

Fig. 3 Decoupling control model for SHAPF

混合型有源电力滤波器解耦的基本方法是建立反馈线性方程实现解耦,在此基础上,逆系统法和模糊分频解耦等智能化方法也得以应用。控制器的设计上主要采用双闭环 PI 控制器。

现在常用的三相混合型电流滤波器模型来源于单相混合型有源电力滤波器,文献[32]搭建单相无源和有源滤波器串联与负载并联的解耦模型,鲁伟和李春文等人在单相混合滤波器模型的基础上搭建了三相并联混合有源滤波器(SHAPF)模型,用逆系统的方法生成一阶逆系统,进而构造出解耦的伪线性系统<sup>[33]</sup>。逆系统法可以实现系统的精确解耦,且控制器易于设计,该方法虽然可以完成系统线性化解耦,但实际应用中,原系统的逆系统一般都很困难构造,所以很难用逆系统的方法对复杂系统线性化解耦,且子系统存在开环稳定问题。

马伏军等人针对模糊广义积分控制器对谐波调节的交叉耦合现象,提出了一种改进模糊分频解耦控制方法,有效结合模糊控制与分频控制的优点来真正实现分别对特定谐波的分频模糊 PI 控制,有效抑制了各次谐波调节之间的交叉耦合现象且提高滤波器的补偿效果与动态性能<sup>[34]</sup>。但上述控制器设计都没对控制器延时做出补偿,而且为了对各次谐波补偿,势必会用多个控制器,加大了延时效对控制器的影响。文献[35]在此基础上采用一种延时预估补偿的方法设计控制器,减小了延时误差,此方法还有很大的发展空间。

总的来说,SHAPF 结合了 APF 和 PPF 的优点,在降低成本的同时能够获得更好的滤波效果,但目前此模型应用较少,如果将一些智能解耦控制策略应用到此模型中将有更大的实用价值。

## 5 并联型有源电力滤波器解耦控制研究展望

根据此前的分析,未来有源电力滤波器解耦方法趋于智能化及多种智能方法的交叉融合及复合控制,也可以通过提出新的多电平技术以及并联有源电力滤波器拓扑结构改善解耦控制效果。

近年来,随着智能控制的迅猛发展,智能控制技术已经应用到有源电力滤波器的解耦控制中去,智能控制技术包含模糊控制、人工神经网络控制、遗传算法及自适应控制、支持向量机等技术。未来有源电力滤波器解耦控制策略将趋于多种智能控制技术的交叉融合。例如,在广义逆解耦的基础上设计新的支持向量机广义逆解耦,通过支持向量机来辨识原系统的广义逆系统,该方法结合了支持向量机在小样本上具有的非线性泛化能力,又可以对解耦后的子系统进行合理的极点配置,既有良好的静

态解耦能力,又对于外界扰动有很强的鲁棒性,使解耦效果更佳<sup>[36]</sup>。又如神经网络逆解耦的基础上改进形成神经网络左右逆协同解耦,利用右逆实现线性化解耦,左逆实现不可测变量的获取,然后将左逆软测量与右逆控制相结合,构造左右逆协同控制器,得到预期的解耦控制,使解耦效果更佳<sup>[37]</sup>。另外,H 无穷控制与 PI(比例积分)和重复控制构成的复合控制,模糊自适应 PI 控制和重复控制的复合控制,三维空间矢量与滑模变结构控制的复合控制等复合控制都将可能应用到未来有源电力滤波器的解耦控制中去。

另外,搭建新的有源电力滤波器拓扑结构也是解耦控制研究的热点。未来有源电力滤波器将在大功率高电压的场合工作,采用低漏抗变压器可以使低压滤波器实现高电压条件下的解耦补偿<sup>[38]</sup>。采用多电平逆变技术以及多电平级联技术可以达到改善解耦系统输出波形质量、减小开关损耗和增强器件适应力的效果<sup>[39]</sup>。采用 H-桥级联形式的有源电力滤波器结构<sup>[40]</sup>,每个桥开关器件只承受直流侧总电压的  $1/N$ ( $N$  为每相级联 H 桥个数),可以实现低压器件对高压系统的解耦控制。也可以尝试将磁悬浮电容逆变器 FCLM 以及二极管箝位逆变器多电平结构用于滤波器解耦控制当中。现阶段对这些拓扑结构的研究还并不够深入,实际应用也不多,主要停留于理论仿真研究,在未来会有广阔的发展空间。

总之,有源电力滤波器的解耦控制技术将变得越来越数字化、智能化和多功能化。通过解耦控制策略的应用,有源电力滤波器将能更精确地补偿谐波电流及无功电流,极大地改善滤波效果,还具备对电压闪变等突发情况的综合补偿能力,从而更好地改善电网质量。

## 参考文献

- [1] 曹磊,刘翀,杜航.有源电力滤波器和无源电力滤波器的原理、应用及比较[J].电工文摘,2009(2):50-54.  
CAO Lei, LIU Chong, DU Hang. The principle application and compare of active power filter and positive power filter[J]. Electrical Digest, 2009(2): 50-54.
- [2] 赵影,王雅静.有源电力滤波器的应用及发展前景[J].农村电气化,2010(4):55-56.  
ZHAO Ying, WANG Yajing. The application and development of active power filter[J]. Rural Electrification, 2010(4): 55-56.
- [3] 李祖喜.并联型有源滤波器的基本工作原理[J].孝感报,2010(6):44-45.  
LI Zuxi. The principle of shunt active power filter[J]. Xiaogan Newspaper, 2010(6): 44-45.
- [4] 韩晓新,邢绍邦,王大志.三相三线制有源电力滤波器谐波检测方法[J].测试技术学报,2012,26(1):35-41.

- HAN Xiaoxin, XING Shaobang, WANG Dazhi. Three-phase three-wire active power filter harmonic detection method[J]. Test and Measurement Technology, 2012, 26(1): 35-41.
- [5] 邹祖冰, 蔡丽娟, 甘辉霞. 有源电力滤波器非线性解耦控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 37-40.
- ZOU Zubing, CAI Lijuan, GAN Huixia. Active power filter nonlinear decoupling control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 37-40.
- [6] SHI Feng. Modeling and simulation of nonlinear decoupled control of three-phase active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 30-35.
- [7] 王一军, 吴伟标. 一种新型的并联有源滤波器非线性解耦控制方法的研究[J]. 现代电力, 2012, 29(1): 37-41.
- WANG Yijun, WU BiaoWei. Research on a novel shunt power filter nonlinear decoupling control method[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(1): 37-41.
- [8] 许彦, 冯宇, 张晓. 有源电力滤波器的前馈解耦控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(9): 14-17.
- XU Yan, FENG Yu, ZHANG Xiao. Strategy feedforward decoupling control of active power filter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(9): 14-17.
- [9] 罗伟, 张莹. 基于电流解耦的电力滤波器控制[J]. 轻工科技, 2014(8): 42-43, 68.
- LUO Wei, ZHANG Ying. Power filter based on current decouple control[J]. Light Technology, 2014(8): 42-43, 68.
- [10] BENCHOUIA M T, GHADBANEA I, GOLEAA A, et al. Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter[J]. Applied Soft Computing Journal, 2015, 28: 125-131.
- [11] 石峰, 查晓明. 应用微分几何理论的三相并联型有源电力滤波器解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 92-97.
- SHI Feng, ZHA Xiaoming. Decoupled control of the shunt three-phase active power filter applying differential geometry theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 92-97.
- [12] 乐江源, 谢运祥, 张志. 有源电力滤波器状态反馈精确线性化控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 81-85.
- LE Jiangyuan, XIE Yunxiang, ZHANG Zhi. Active filter control state feedback exact linearization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 81-85.
- [13] ABOULOIFAA A, GIRIB F. Cascade non-linear control of shunt active power filters with average performance analysis[J]. Control Engineering Practice, 2014, 26: 211-221.
- [14] 饶云堂, 卓放, 王先为, 等. 基于谐波解耦的有源电力滤波器控制方法[J]. 电力电子技术, 2008, 42(7): 19-20, 23.
- RAO Yuntang, ZHUO Fang, WANG Xianwei, et al. A method based on active power filter harmonic decoupling control[J]. Power Electronics Technology, 2008, 42(7): 19-20, 23.
- [15] 王兆安, 杨君. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 75-76.
- [16] 鲍禄山, 王毅非, 黎燕. 基于矢量解耦与预测电流控制相结合的 APF 的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 88-93.
- BAO Lushan, WANG Yifei, LI Yan. Research on APF based on vector decoupling control and predictive current control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 88-93.
- [17] 刘国海, 杨辰星, 陈兆岭. 有源电力滤波器神经网络逆解耦控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 23-29.
- LIU Guohang, YANG Chenxing, CHEN Zhaoling. Active power filter neural network inverse decoupling control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 23-29.
- [18] 王贞艳, 张井岗, 陈志梅. 神经网络滑模变结构控制研究综述[J]. 信息与控制, 2005, 34(4): 451-456.
- WANG Zhenyan, ZHANG Jinggang, CHEN Zhimei. Survey of neural network sliding mode control review[J]. Information and Control, 2005, 34(4): 451-456.
- [19] 胡志坤, 姜斌, 李哲彬. 三相有源电力滤波器滑模解耦控制方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(9): 87-92.
- HU Zhikun, JIANG Bin, LI Zhebin. Study on phase-APF sliding mode decoupling control method[J]. Motor and Control, 2014, 18(9): 87-92.
- [20] 王辉, 段玉兵, 龚宇雷. 一种用于并联型有源电力滤波器的离散解耦控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 48-54.
- WANG Hui, DUAN Yubing, GONG Yulei. A discrete decoupling control method for parallel active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 48-54.
- [21] 田铭兴, 励庆孚, 王曙鸿. 交流电机坐标变换理论的研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(6): 568-571.
- TIAN Mingxing, LI Qingfu, WANG Shuhong. Study AC motor coordinate transformation theory[J]. Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(6): 568-571.
- [22] LIU Xing, YANG Han. Selective compensation strategies for the 3-phase cascaded active power filter using ANF-based sequence decoupling scheme[J]. Electronics and Electrical Engineering, 2010(2): 98-99.
- [23] 姚成泽, 张有兵, 谢路耀, 等. 基于双同步坐标系的解耦锁相环在并联型 APF 中的应用[J]. 机电工程, 2015, 32(5): 712-716.
- YAO Chengze, ZHANG Youbing, XIE Luyao, et al. Decoupling phase-locked loop based on dual synchronous coordinate system in parallel APF application[J]. Mechatronics Engineering, 2015, 32(5): 712-716.
- [24] 史丽萍, 蔡儒军, 李天玉, 等. 基于虚拟磁链的 APF 准谐振控制研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 95-99, 106.
- SHI Liping, CAI Rujun, LI Tianyu, et al. APF quasi-resonant control study based on virtual flux[J]. Electrical

- Measurement & Instrumentation, 2014, 51(11): 95-99.
- [25] 赵焕, 王艺颖. 基于瞬时无功理论的并联型有源滤波器恒功率控制[J]. 电气传动自动化, 2012, 35(5): 37-41.  
ZHAO Huan, WANG Yiyang. Constant power control for shunt active filter based on instantaneous reactive theory[J]. Electric Drive Automation, 2012, 35(5): 37-41.
- [26] 孙宁. 三相并联型有源滤波器控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(12): 56-59.  
SUN Ning. Research on control method of three-phase shunt active filter type[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(12): 56-59.
- [27] 罗萍, 李肇基, 陈光. 三相四线制系统下电流谐波和无功功率的检测与补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2003, 17(1): 62-66.  
LUO Ping, LI Zhaoji, CHEN Guang. Detection and compensation under phase four-wire system of harmonic currents and reactive power[J]. Electronic Measurement and Instrument, 2003, 17(1): 62-66.
- [28] 邵竹星, 张国荣. 三相四线制有源电力滤波器的研究及仿真[J]. 低压电器, 2012(3): 37-41.  
SHAO Zhuxing, ZHANG Guorong. Research and simulation of the three-phase four-wire active power filter[J]. Low-voltage Electrical Appliances, 2012(3): 37-41.
- [29] 刘保连, 丁祖军. 三相四线制有源电力滤波器谐波及无功电流综合补偿算法[J]. 现代电力, 2013, 30(6): 56-61.  
LIU Baolian, DING Zujun. The compensation algorithm Phase four-wire active power filter harmonic and reactive current integrated[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(6): 56-61.
- [30] MARAFAO F P, BRANDAO D L, GONCALVES F A S. Decoupled reference generator for shunt active filters using the conservative power theory[J]. Control Autom Electric System, 2013, 24: 522-534.
- [31] 鞠建永, 徐德鸿. 混合型有源电力滤波器有源部分容量比较[C] // 浙江省电源学会. 浙江省电源学会第九届学术年会论文集, 浙江省省电源学会组织, 2004: 7.  
JU Jianyong, XU Dehong. Comparison of hybrid active power filter active capacity relatively[C] // Power Institute of Zhejiang Province Proceedings, Zhejiang Power Supply Society, 2004: 7.
- [32] HAN Mei, FENG Jinfeng, CHEN Chen. Single-phase dynamically decoupled active power filter for system integrated application[J]. Electronic Measure Instrument, 2012, 11: 25-28.
- [33] 鲁伟, 李春文, 徐长波. 并联混合有源滤波器逆系统解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(9): 1145-1152.  
LU Wei, LI Chunwen, XU Changbo. Parallel hybrid active filter inverse decoupling control[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(9): 1145-1152.
- [34] 马伏军, 罗安, 帅智康. 混合型有源电力滤波器的改进解耦型分频控制[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 44-49.  
MA Fujun, LUO An, SHUAI Zhikang. Hybrid active power filter improvement decoupling divide control[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 44-49.
- [35] 赵辉, 吕亚新, 王红君. 基于复合控制策略的混合有源电力滤波器谐波治理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 60-66.  
ZHAO Hui, LÜ Yaxin, WANG Hongjun. Study on control strategy based on compound control for hybrid active power filter harmonic governance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 60-66.
- [36] 刘国海, 张锦, 赵文祥. 两电机变频系统的支持向量机广义逆内模解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 85-91.  
LIU Guohai, ZHANG Jin, ZHAO Wenxiang. Internal model control based on support vector machines generalized inverse for variable frequency system applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 85-91.
- [37] 于霜, 丁力, 吴洪涛. 永磁同步电机的神经网络左右逆协同解耦控制[C] // 中国自动化学会过程控制专业委员会. 第 26 届中国过程控制会议论文集. 中国自动化学会过程控制专业委员会, 2015: 1.  
YU Shuang, DING Li, WU Hongtao. Cooperative left and right ANN inversions decoupling control for permanent magnet synchronous motor[C] // Chinese Association of Automation Process Control Professional Committee. The 26th China Process Control Conference, 2015.
- [38] 吉兴全, 陈贺, 瞿振宁. 低压有源电力滤波器在高电压等级下的仿真和工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 141-146.  
JI Xingquan, CHEN He, ZI Zhenning. Low-voltage active power filter simulation and engineering application at high voltage levels[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 141-146.
- [39] 杨文博, 宋强. 模块化多电平换流器的直流内电势解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 648-655.  
YANG Wenbo, SONG Qiang. Decoupled control of inner DC electric potential of modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 648-655.
- [40] FARVAR G, HREDZAK B, AGELIDIS V. Decoupled control system for cascaded H-bridge multilevel converter based STATCOMA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 322-331.

收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2017-02-24

作者简介:

李博(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子及滤波器解耦控制科研工作; E-mail: 972650432@qq.com

李欣(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子与智能控制等方面的教学与科研工作。

(编辑 葛艳娜)