

DOI: 10.7667/PSPC171873

有源电力滤波器的研究现状与展望

王雪¹, 高云广^{1,2}, 吝伶俐¹, 宋建成¹, 吕世轩¹

(1. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;
2. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是一种具备动态谐波抑制和无功补偿功能的新型电力电子装置, 其性能优劣与所采用的拓扑结构、谐波电流检测技术和电流跟踪控制方法等密切相关。为了推广在高压大容量下 APF 的控制技术, 拓宽其应用范围, 综述了国内外 APF 研究现状, 分类整理了 APF 拓扑结构。归纳总结了 APF 的谐波检测方法和电流跟踪控制技术, 综合对比了各种方法的优缺点, 并从多个角度阐述了当前所存在的问题。最后展望了 APF 相关技术的研究方向。

关键词: 有源电力滤波器; 高压大容量; 拓扑结构; 电流跟踪; 谐波检测

Research status and prospect of active power filter

WANG Xue¹, GAO Yunguang^{1,2}, LIN Lingyan¹, SONG Jiancheng¹, LÜ Shixuan¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Active Power Filter (APF) is a novel power electronic device, which can dynamically accomplish harmonic suppression and reactive compensation. The performance of APF is influenced greatly by the topologies, the harmonic current detection technique and the current tracking control method. To promote and develop the application of APF under high voltage and large capacity, the current researches about APF at home and abroad are reviewed, the topologies of APF are classified and sorted. At the same time, the harmonic current detection and current tracking methods of APF are summarized, and their advantages and disadvantages are comprehensively evaluated. Furthermore, the existing problems are described from the various perspectives. The research directions of APF's techniques are prospected finally.

This work is supported by Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province (2015).

Key words: active power filter; high-voltage and large-capacity; topologies; current tracking; harmonic current detection

0 引言

随着电力电子器件在电力系统中的广泛应用, 电网产生大量的谐波和无功, 造成严重的污染, 而谐波和无功是衡量电网质量的两个重要指标, 因此抑制谐波是当前需要解决的重要问题^[1-2]。目前, 无源电力滤波器(Passive Power Filter, PPF)是应用最为广泛的谐波抑制装置。但是, PPF 滤波特性受系统参数影响大, 易与电网阻抗发生谐振, 只能消除特定次谐波以及动态补偿效果不理想; 而作为新型谐

波抑制和无功补偿装置的有源电力滤波器(Active Power Filter, APF), 避免了 PPF 的缺点, 可以实时准确地抑制谐波及补偿无功, 同时防止与电网阻抗发生谐振^[3-4], 所以在抑制谐波、补偿无功和提高电能质量方面, PPF 逐步被具有发展前景的 APF 取代。

近年来, 国内外学者对 APF 越来越关注, 利用 APF 来提高电能质量具有巨大的市场应用价值。APF 治理谐波由谐波电流检测精度和电流跟踪控制性能共同决定。谐波电流检测实质是通过某种方法获得电网中的谐波电流, APF 的补偿效果依赖于检测的谐波电流分量, 这是 APF 设计过程中的关键技术之一; 在准确检测出谐波电流后, APF 能否快速

基金项目: 山西省留学归国人员择优资助重点项目资助(2015)

追踪谐波电流, 是 APF 的另一个关键技术。因此, 电流控制需要综合动态响应性能和稳态精度。

本文首先综述了 APF 的国内外研究现状, 分类整理了 APF 拓扑结构, 阐述了 APF 的关键性技术, 并从拓扑结构、谐波检测方法及电流跟踪控制方法出发, 分析并给出目前存在的问题和解决办法, 最后展望了 APF 的发展方向, 以期 APF 日后的研究提供参考。

1 国内外研究现状

1969 年 B.M.Bird 等人首次提出 APF 的思想^[5]; 1971 年日本学者 H.Sasaki 和 T.Machida 说明了 APF 的基本原理及模型^[6]; 1973 年美国学者 L.Gyugyi 等提出利用大功率晶体管组成的 PWM 逆变器应用于 APF 以消除电网谐波; 1983 年, H.Akagi 提出用于 APF 的瞬时无功功率理论^[7], 推进了 APF 的发展; 随后串联混合型 APF 和并联混合型 APF 的提出促进了电压等级的提高; 至 20 世纪 90 年代, 拓扑结构逐渐发展成熟, 研究重心集中到控制方法, 国外学者和企业不断将先进的控制策略应用于大功率电力电子器件, 进行高电压大容量谐波治理的研究, 其功率范围从 50 kVA 逐步提升, 单机装置的容量也逐步提高。西门子、施耐德等公司长期致力于谐波综合治理解决方案研究和产品开发, 动态补偿谐波与无功功率, 提高电网功率因数。

我国对于谐波问题的研究较晚, 20 世纪 90 年代才逐渐对谐波治理重视, 因此有源电力滤波装置研究也起步较晚。相关高校和企业陆续对 APF 开展研究, 如西安交通大学、清华大学、台达、麦克斯韦电气等都相继取得了阶段性成果, 逐渐缩短了与国外对 APF 研究的距离。例如: 清华大学率先提出一种基于数字控制器的 APF 补偿方法; 西安交通大学针对 APF 做了大量研究, 对瞬时无功功率理论进行优化, 提出了改进型 d-q 法谐波检测理论; 麦克斯韦电气作为较早从事谐波治理的研究工作的公司, METAPF 系列谐波治理产品, 单台有源电力滤波柜谐波治理能力可达 200 A, 单套设备最大谐波治理能力能够实现 1 200 A, 达到国际最先进的技术水平; 中德合资的北京英博电气股份有限公司在电能质量提升方面进行了大量的研制工作, 其生产的新型高压有源滤波补偿装置, 即电能质量有源恢复系统(Mains Active Restoring System, MARS), 单机最大容量可达1 450 kVA, 现已经在天津大沽化工有限责任公司、晋城煤业集团等地成功应用。

2 拓扑结构分类方法

图 1 为 APF 的不同分类。

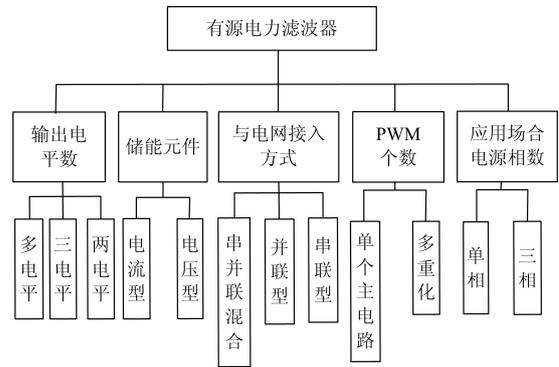


图 1 APF 的分类

Fig. 1 Classification of active power filter

2.1 根据应用场合电源相数分类

根据应用场合电源相数可分为: 单相 APF 和三相 APF。三相包括: 三相三线和三相四线制。其中, 单相系统应用在低功率场合, 即 100 kVA 以下; 而三相系统则应用在中、高功率(100 kVA 以上)。麦克斯韦电气公司的 APF 产品就是采用的三相四线制, 适用于三相不平衡或谐波电流大或功率因数低的场合。

2.2 根据主电路中变流器个数分类

根据主电路中变流器的数目可分为单重化 APF 和多重化 APF。其中图 2 所示的双重化拓扑是把两个 PWM 变流器相并联, 从而达到使用开关频率和容量较小的开关器件实现大容量、高效率变流器的目的。此外, 为了有效提高 APF 功率等级和稳定性, 采用多重化结构是一个有效的解决方案^[8]; 但是 PWM 使用同一个直流侧电容, 会使得各模块之间形成环流, 功率不能平均分配, 对系统的性能造成影响。

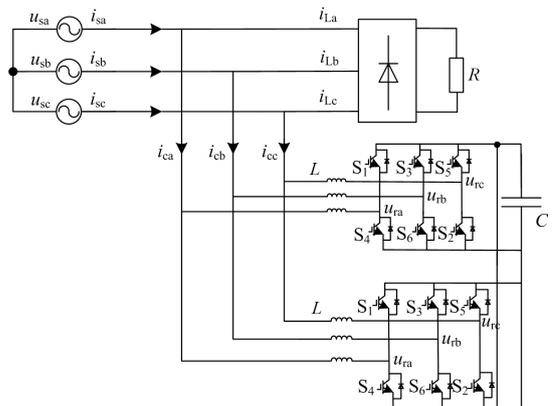


图 2 双重化 APF 拓扑结构

Fig. 2 Topology of dual active power filter

2.3 根据逆变电路的储能元件分类

按照逆变电路直流侧储能元件, 分为电压型 APF 和电流型 APF。如今, 电力系统应用装置中绝大多数是电压型 APF, 其直流侧储能元件为电容,

具有独立的模块结构, 可以作为多电平的单元结构, 级联不同数目的单元可以产生不同的电平数, 效率很高、损耗较低。电流型 APF 的储能元件为电感, 对开关频率要求高, 目前还不能扩展到多电平结构, 因此并不适用于高电压大容量场合。

2.4 根据与电网连接方式

根据与电网连接方式, 分为并联型 APF、串联型 APF 及串并联混合型 APF。

2.4.1 并联型 APF

图 3 所示的并联型 APF 针对电流谐波在技术上已经非常成熟、应用相当广泛, 但是兼顾动态响应速度和稳态精度依然是并联型 APF 的研究难点。其中, 在 L 型 APF 的基础上, 为降低系统成本和体积, 提高对高频纹波的抑制性能, 滤波特性更好的 LCL 型^[8]被大量研究, 成为当前主流输出滤波器, 但需要采用有源或无源阻尼的方法来阻止谐振的产生。

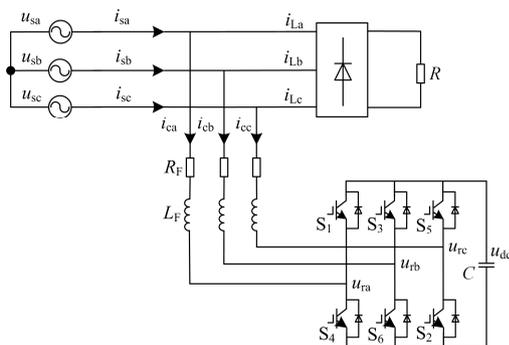


图 3 并联型滤波器结构图

Fig. 3 Structure diagram of shunt power filter

为进一步抑制纹波流入电网及减小体积和成本, 文献[9]提出一种新型 LCCL 高阶滤波器, 通过并联一个小电容在电网侧电感支路, 从而使网侧电感与并联电容在开关频率处发生并联谐振, 即滤波器网侧支路在开关频率处呈现无穷大的阻抗, 更好地抑制开关频率附近电网电流纹波, 设计基于电容电流反馈有源阻尼的控制器相对容易; 文献[10]提出了一种三相新型高阶 LTCL 滤波器, 即电感-陷波-电容-电感, 多个 LC 陷波滤波器并联在传统的 LCL 滤波器中的电容支路, 在选定的频率下组成多个串联谐振电路, 更好地抑制开关频率附近纹波进入电网, 但支路数增多, 设计参数难度加大。

图 4 是 APF 和 PPF 直接串联组成, 直流侧电压明显降低, PPF 采用单调谐串联谐振电路, 一般谐振频率设为 5 次或 7 次, 旨在消除该次谐波电流并且有源部分起到谐波隔离的作用, 不需要耦合变压器, 有效降低成本和体积, 是一种有发展前景的拓扑结构^[11]; 文献[12]指出单调谐 PPF 部分承担系统

基波电压, 对负载中最主要的谐波分量进行补偿, 有效降低 APF 功率等级。APF 优化了 PPF 部分的滤波性能, 同时避免 PPF 部分与电路负载发生谐振, 结构简单; 文献[13]指出 PPF 调谐于主要次谐波处, 可以达到滤波的效果, 但不能获得最小的 APF 容量, 提出基于 APF 容量最小的原则, 对 PPF 参数进行设计。

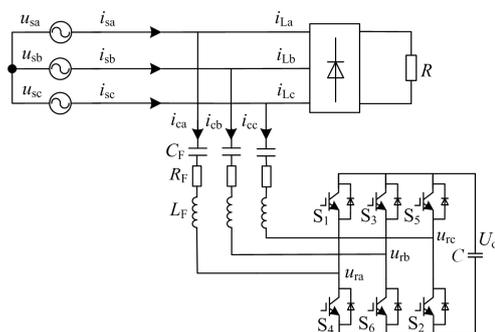


图 4 单调谐并联混合滤波器

Fig. 4 Single tuned shunt hybrid power filter

图 5 所示的注入式混合有源滤波器 (Hybrid Active Power Filter, HAPF) 注入支路有效地降低了直流侧电容的容量, 成为适用于中高压电力系统的新型谐波治理装置, 但谐波注入能力取决于注入电容, 而较大的注入电容会无功过补。后续有文献对该方式进行了优化, 其中文献[14]提出一种改进注入支路的并联 HAPF, 即谐波注入支路上不再存在阻抗对补偿谐波电流注入电网的影响, 提高补偿能力, 改善注入支路对谐波注入电流的衰减影响; 文献[15]提出双谐振注入型 HAPF, 增加双谐振注入支路, 有效降低有源部分承受电压, 有源容量更小, 适用于更高电压等级, 提高了注入式混合 APF 应用范围, 并通过应用于 6 kV 配电网的实验样机, 验证了双谐振注入式 HAPF 的补偿特性。

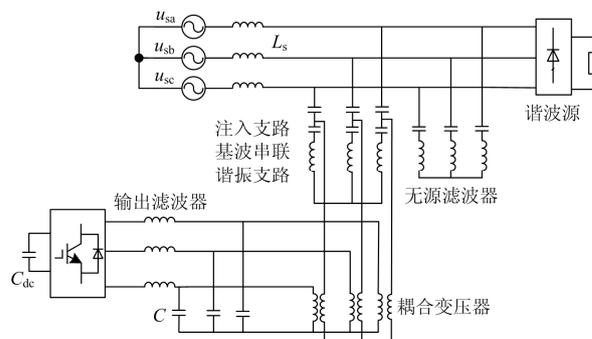


图 5 注入式混合滤波器的拓扑结构

Fig. 5 Topology of injection hybrid power filter

2.4.2 串联型 APF

图 6 所示的串联型 HAPF 是将逆变器控制为基

波电流源,使得串联变压器对谐波分量呈现高阻抗,基波分量呈现低阻抗,但是由于电路体积以及损耗均较大,实际应用受到限制。文献[16]指出对串联变压器参数的选取与分析是基于变压器基波磁通补偿原理(Fundamental Magnetic Flux Compensation, FMFC)的 SHAPF 应用于高压大容量时的关键内容,滤波效果取决于串联变压器的参数的选择。并设计了一台应用于 10 kV/1 MVA 电力负荷的工程样机,APF 采用 PI 控制,有源部分串接在高压侧,并且串联变压器则不需要承受基波电压,有利于扩展应用于更高电压等级的电力系统中。

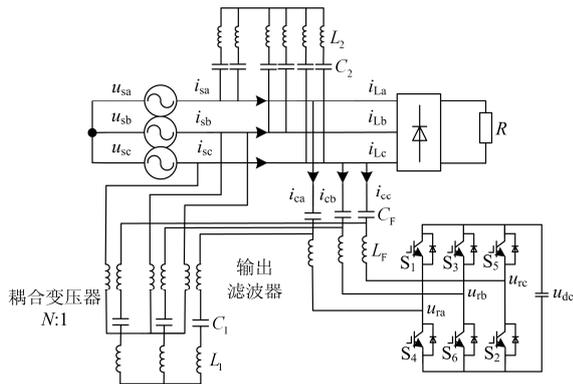


图 6 串联滤波器拓扑结构
Fig. 6 Topology of series power filter

2.4.3 串并联混合型 APF

统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)如图 7 所示,对各种谐波负载均适用,还可以抑制电网三相交流电压不平衡。其中,单相系统主要是无功电流和电流谐波,三相三线系统还需要另外考虑电流不平衡,三相四线系统则需要额外的中性电流补偿回路。此外,UPQC 系统的有效性取决于其控制算法。通过控制策略确定参考信号(电流和电压)来决定逆变器开关的开关状态,从而达到所需的性能。现有文献中,已经有控制策略成功应用于 UPQC 系统,诸如:基于快速傅立叶变换器(FFT)的频域方法、时域 pq 及 dq 理论^[17]。UPQC 系统相关技术现在已经实际应用,然而这种系统的总体成本和复杂性仍然存在一些限制。文献[18]在分析五电平 MMC-UPQC 主电路拓扑及工作原理的基础上,建立 dq0 数学及欧拉拉格朗日模型,串联 APF 外环通过 PI 控制得到内环期望电流,并联 APF 外环由 PI 控制稳定直流侧电压,阻尼注入法设计的无源滤波器,能快速准确补偿电压、负载电流谐波分量及无功,但此文中只针对相电压为 220 V 进行了仿真验证,而没有实验验证。

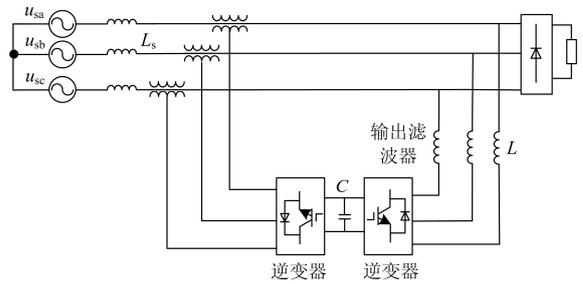


图 7 统一电能质量调节器拓扑结构
Fig. 7 Topology of UPQC

2.5 根据输出电平数分类

受功率器件限制,传统的 APF 结构无法在高压大容量场合应用,而逆变器作为 APF 的核心组成部分,决定了 APF 的滤波效果,因此研究逆变器在 APF 应用中的拓扑也是相当重要的。目前,二电平及三电平已经达到实际应用阶段,国内亚派、盛弘等公司 APF 产品都采用的是三电平结构。

2.5.1 二电平

图 8 所示的传统两电平 APF 开关器件少、控制方法简单、易于实现,但输出电流纹波较大。在小功率范围的场合,仍被普遍应用;在中高电压大功率领域,由于谐波畸变率高、开关管承受电压应力大和效率低,实际应用受到限制。

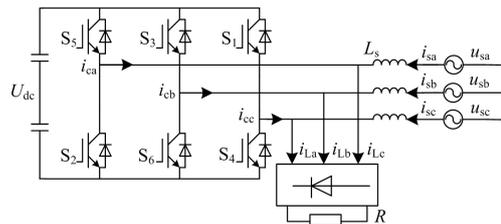


图 8 两电平变流器拓扑
Fig. 8 Topology of two-level converter

2.5.2 三电平

三电平技术具有较低的开关频率和损耗,并且有效减小 APF 的体积,目前应用范围越来越广,有效地提高了 APF 的电压等级而且降低了谐波含量。三电平包括级联型、飞跨电容型和二极管钳位型。

图 9 所示的二极管中点钳位型克服了当前开关器件耐压不够的问题,开关损耗较小、动态响应速度快,是一种较为成熟的 APF 拓扑结构。但是,直流侧两个电容的存在使得分压不均,从而造成的中点电位不平衡是当前三电平 APF 需解决的关键性问题及难点,国内外学者进行了大量的研究,其中文献[19]为改善三电平直流侧中点电位不平衡,考虑三电平 APF 的大矢量、中矢量、小矢量及零矢量对直流侧电容中点电位的影响,提出一种基于平衡

因子的中点电位平衡控制策略, 原理简单且计算量小。

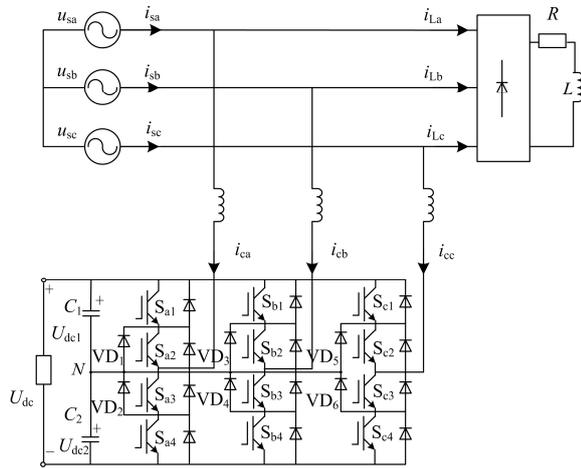


图 9 二极管钳位型三电平滤波器

Fig. 9 Diode clamp three-level power filter

图 10 所示的飞跨电容型三电平拓扑具有灵活的开关矢量, 能够依据实际情况择优选择, 但是飞跨电容增加了系统的成本和体积, 实际应用受到限制^[20]。

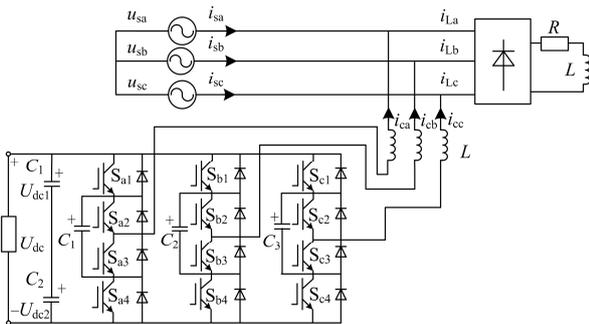


图 10 飞跨电容型三电平拓扑

Fig. 10 Flying-capacitor-clamp three-level topology

图 11 所示的级联型 APF 不需要钳位二极管或

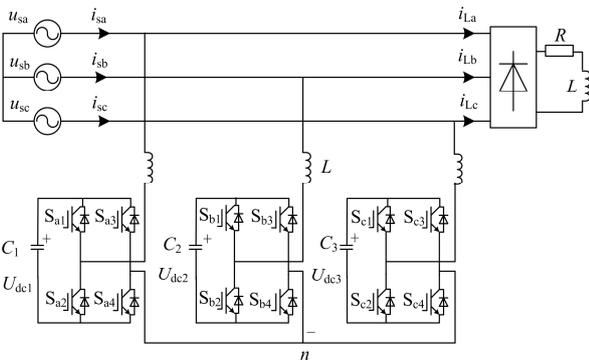


图 11 级联型 APF 主电路

Fig. 11 APF based on cascaded H-bridge converter

电容, 结构设计简单, 容易实现模块化, 当开关频率不变时, 通过增加级联单元数目可降低电网电流谐波含量和输出滤波器的纹波压力, 是当前高压大功率 APF 的主流拓扑结构^[21], 然而每个单元均需要隔离的直流电源, 不容易实现制动能量的回馈。如今, 国内外学者对级联 APF 研究越来越重视, 主要在补偿性能和主电路的控制技术两方面, 而且对稳态性能研究占大多数^[22], 已经成为三电平领域的研究重点。

2.5.3 多电平

多电平基于三电平发展而来, 近年来, 作为一种新型的拓扑结构的模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter, MMC)的 APF, 具有高度模块化、多电平输出和方便提高电压等级的优势^[23], 见图 12, 但是 MMC 在电能质量治理方面的研究刚刚起步, 研究工作集中在在无功补偿和负序治理, 对于谐波补偿的研究只处于理论分析阶段。

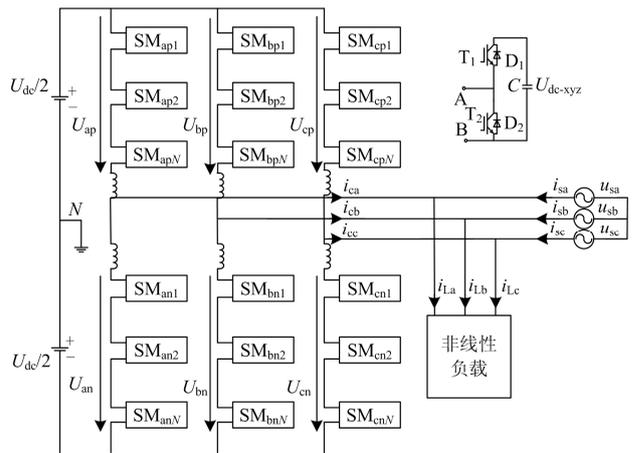


图 12 三相 MMC-APF 拓扑

Fig. 12 Topology of three-phase MMC-APF

如今, 三相不平衡交流电网使得 MMC 三相桥臂能量分布不均衡, 内部环流是需要解决的重要问题, 也是在高压直流输电系统实际应用中, 限制 MMC 往高电平方向发展的因素。已经有大量研究环流问题的文献, 文献[24]首先阐述环流的内部模型和产生机理, 得到环流不能完全消除的结论, 只能通过减小电压控制分量的幅值来达到抑制环流的目的。

3 APF 的关键性技术

3.1 谐波电流检测方法

3.1.1 基于瞬时无功功率理论检测法

目前应用最广泛的方法仍为 H.Akagi 提出的基于瞬时无功理论的谐波电流检测及其相关改进的方法, 包括 p-q 法、 i_p - i_q 法和 d-q 法。其中 d-q 法大大

减小了计算量且适用于不对称及有畸变的电网检测,是当前最实用的谐波电流检测法。文献[25]针对检测精度和动态响应的矛盾,提出了一种数字实时检测算法,适用于三相对称性负载,同时适应于三相不对称性负载。

3.1.2 FFT 的数字化分析法

FFT 算法纯频域的分析能够选择任意需消除的谐波次数。但是,计算复杂、存在时间延迟、实时性差以及受电网电压波形畸变或频率波动的影响。现有文献指出了在修正幅值时利用靠近被测频点的一根最高谱线幅值进行插值能够提高检测精度。文献[26]就谐波检测问题,提出一种新型谐波检测方法,即采用短时 FFT 的谱峭度对采样信号进行时域分解,根据识别结果从频谱矩阵中提取出相应的谐波分量,准确定位暂态谐波的开始与停止时间,检测精度高且鲁棒性好。

3.1.3 自适应检测法

基于自适应干扰抵消原理的自适应检测法,适用于单相和三相系统,检测精度高、对电网电压畸变及电网参数变化不敏感,但动态响应速度慢。目前,传统定步长 LMS 算法不能同时实现快速的收敛速度及较高的稳态精度,国内外研究学者提出了多种改进的方法。文献[27]提出了一种基于改进增益型自适应谐波电流的检测方法,将误差信号经过数学转换成一个反映系统跟踪误差的信号,作为自适应滤波器权系数迭代的反馈量,同时得到良好的收敛速度与稳态误差,减少了计算量。

3.2 电流跟踪控制方法

文献[28]在详细阐述控制器延迟对系统稳定性影响后,指出通过优化电流内环设计来解决延迟所带来的问题。常用的电流跟踪控制方法如下。

3.2.1 PI 控制

方法简单、参数容易设计及理论成熟,PI 控制已经被广泛应用,能够对直流信号实现无静差跟踪,而需要跟踪 APF 的信号是由很多不同频率的谐波电流组成的交流信号,单独使用 PI 控制,系统稳态补偿精度受到影响,因此通常将 PI 控制与其他方法相结合使用。文献[29]将 PI 控制与谐振控制相结合,PI 控制的目标是调节基波电流,谐振控制是抑制谐波电流,在补偿高次谐波电流时具有很好的鲁棒性,通过 7 kVA 实验样机的实验结果验证了算法的可行性及有效性。

3.2.2 PR 比例谐振控制

基于内模原理的 PR 比例谐振控制在指令频率处能够得到高控制增益,很好地追踪周期参考信号,实现无静差控制,得到广泛应用。但是 PR 控制只

能选择性地补偿谐波,当需要补偿较多的谐波信号时,控制算法会复杂。文献[30]针对四桥臂 APF,提出一种改进型 PR 控制补偿电流的方案,在阐明 PR 控制器各参数对性能指标的影响之后,设计 PR 控制器参数,改善了频率波动对电流跟踪效果变差的问题,搭建 20 kVA 的实验平台进行验证,实验结果显示所提出的改进 PR 控制方法对四桥臂 APF 系统有良好的补偿性能,并对负载突变和频率波动都有较好的适应性,从而满足系统对稳态和动态性能的要求。

3.2.3 重复控制

基于内模原理的重复控制适用于周期性谐波信号补偿,在较宽的频段内能够达到谐波信号的高精度控制,但是重复控制系统前向通道上设有延迟环节,会降低动态响应速度。因此,通常将重复控制与具有快速动态响应性能的控制方法相结合,以提高系统的动态性能。为进一步提高重复控制系统鲁棒性及稳定性,文献[31]提出一种基于 PI 和重复控制的复合控制策略,设计了 50 kVA/380 V 的三电平 APF 实验样机,网侧电流的谐波畸变率 THD 由 PI 补偿后的 8.4% 下降到复合控制的 3.4%,仿真和实验结果表明复合控制后的 APF 输出电流能较好地跟踪谐波指令电流信号,有效地提高稳态误差。重复控制稳态精度高但是动态响应慢,为提高动态响应速度,国内外学者先后提出改进的重复控制方法,文献[32]采用六分之一的电网电压周期 T_0 作为延迟周期,在静止坐标系下实现对 $6n \pm 1$ 次谐波($n=1/2/3$ 等)的抑制,并且动态响应速度是传统重复控制响应速度的六倍。除此之外,由于电网频率的时变性,传统的重复控制实际应用效果不理想,相关自适应技术被大量研究,国内周克亮、陈东等人针对非平衡系统下及 N_0 为非整数的情况下,改进了重复控制内模结构,很好地解决了电网频率波动对重复控制器设计的影响,提高谐波抑制性能。

3.2.4 滑模变结构控制

滑模变结构是非线性控制,即使模型不确定,仍能保证系统的快速性与稳定性,在 APF 的研究与应用广泛^[33],但是滑模控制对开关频率的要求高,在谐波电压情况下,随之产生的抖振的问题是滑模控制应用的难点,会增加系统的不稳定性。相关论文根据抖振问题提出改进方案,文献[34]提出了一种变趋近律的滑模控制方法,对在一个控制周期的滑模面采取分解控制,从而让最大偏差在短时间内校正,但不产生较大的抖振。通过对比一般变结构和变趋近律控制方法的仿真结果,5、7 次谐波幅值由 1.384 1% 和 1.282 8% 都降低到 0.7% 以下,能够说

明变趋近律控制方法有效地抑制谐波, 从而提高 APF 电流跟踪性能。通过搭建 APF 实验平台, 验证了本文所提的方法较好地减小了抖振, 具有良好的实用价值; 文献[35]采用滑模控制设计电流内环, 产生串联型有源电力滤波器所需要的占空比, 从而产生补偿电压, 使状态控制变量的轨迹总是朝向相邻且受限的带宽区域倾斜, 沿着控制结构的边界滑动, 最终达到平衡点; 文献[36]针对 LCL 滤波器的单相并网 VSI, 提出滑模多比例谐振控制, 在 5 kVA 单相并网 VSI 样机上的实验结果说明: 相比于滑模控制、积分滑模控制, 多比例谐振滑模控制具有更强的鲁棒性, 更小的跟踪误差和更低的电网电流 THD(仅为 0.76%)。

3.2.5 预测控制

预测控制在电网、负载波动以及外界干扰时,

仍具有良好的控制性能。基于自适应滤波的预测控制是根据自身传输特性对参数不断的调整, 从而实现最优滤波。预测控制近年来被广泛应用于实时控制, 可以实现良好的动态响应, 消除计算延迟引起的不利影响。已经有相关文献针对预测控制分析了滤波电感和系统稳定性的关系, 然而没有提出解决措施。文献[37]在对电感大小与系统延迟关系进行阐述后, 提出了预测电流控制方法, 即对电网电压和 APF 输出电流采取超前一拍预测, 搭建模块化并联型 APF 样机进行验证, 实验结果显示: 所提出的控制策略在负载突变的第二个周期后, 系统达到稳态, 动态响应速度快, 从而说明该控制方法减小了控制器延迟问题, 有效地提高系统补偿性能和鲁棒性。

表 1 对以上电流追踪控制策略的稳定性、鲁棒性、动态性能及优缺点进行了汇总。

表 1 控制方法对比

Table 1 Comparison of control methods

控制方法	稳定性	鲁棒性	动态响应	优点	缺点
PI 控制	好	一般	一般	方法简单、参数容易设计	固定的开关频率, 不能对交流信号实现无静差追踪
多比例谐振	好	好	慢	容易对周期谐波信号实现无静差追踪	选择性谐波补偿, 实现复杂
重复控制	好	好	慢	对周期性扰动有良好的控制效果	延迟环节使得动态响应慢
滑模控制	好	好	快	响应速度快、受电网参数及扰动影响小	抖振问题
预测控制	差	好	快	快速动态响应及高精度	参数变化造成系统不稳定
复合控制	好	好	快	综合不同控制方法的优点, 提高系统静态及动态特性	进一步深入研究与应用

4 展望

由前文对 APF 研究现状的总结可知, APF 在谐波抑制及无功补偿方面起着至关重要的作用, 近年来国内外学者对 APF 的研究日渐成熟, 为今后 APF 的发展提供了强大的理论依据。然而, 随着 APF 的应用场合日益广泛, 其容量及电压等级要求也越来越高, 且在实际应用中所需要考虑的因素也有所不同, APF 的拓扑结构及控制策略也随之变化。

1) 根据实际应用场合的要求, 研究 APF 的拓扑结构, 可以为 APF 的实际应用提供更为切实有力的理论依据。如今, 并联型 APF 技术的研究主要集中于输出滤波器的改进。为满足高电压下的谐波补偿, 国内外学者提出多种 HAPF 拓扑结构, 降低了 APF 直流侧电容的容量及成本且有利于实现电压等级的提高, 其中无变压器型 HAPF 克服了成本和体积问题, 具有很大的实际应用价值。为进一步降低 APF 的体积及成本, 四开关双臂的拓扑结构在 2007 年被提出, 通过减少一相逆变器桥臂并连接到直流侧负极上, 可靠性高、降低了系统成本及复杂性。近年来, 减少 APF 拓扑中的开关数量已成为 APF 拓扑

结构的主要研究趋势。

2) 对于 APF 在高压大容量场合中的应用, 多电平和多重化结构成为有效的解决方案, 大幅提高 APF 功率等级和稳定性。此外, 随着电平数目的增加, 输出电压等级得到提高, 还有效地降低开关频率及谐波含量。各国学者对多电平变流器进行深入研究, 理论上输出的电平数是不受限制的, 但仅处于实验室研究阶段^[38]。而在实际应用中, 仍以二电平及三电平为主, 多电平技术在中高压配网谐波治理方面的应用仍需大力推进。级联型克服了环流的问题且容易实现模块化, 已经成为多电平领域的研究重点, 但研究主要在补偿性能和主电路的控制技术两方面, 动态性能方面的文献仍屈指可数, 这将成为 APF 日后研究的重要方向之一。作为一种新型的 MMC 拓扑结构, 三相不平衡交流电网使得 MMC 三相桥臂能量分布不均衡, 内部环流是需要解决的重要问题, 是在高压直流输电系统实际应用中, 限制 MMC 往高压方向发展的重要因素。MMC 在高压大功率场合具有良好的应用前景, 对该类装置的研究是 APF 的一个研究热点。

3) 总结近几年各国的相关研究可知, 由于电网频率的时变性, 对锁相环造成误差, 从而降低了检测精度, 此外 LPF 的延迟环节也会影响检测精度, 这是基于瞬时无功功率检测法需要解决的问题。传统定步长 LMS 算法无法兼顾收敛速度和稳态精度, 国内外研究学者已经提出了多种改进的方法。在实际应用主要集中在基于瞬时无功功率理论检测法及改进法上, 越来越多的学者开始关注自适应等先进的算法在谐波与无功电流的检测领域的应用, 成为今后的研究热点之一。

4) 国内外学者对各种典型电流跟踪控制方法已经进行了多年的研究, 形成了较为成熟的理论体系。但是在控制策略的优化研究方面, 实际应用产品主要是 PI 控制优化改进。同时, 各国学者仍在探究将先进控制技术与传统方法结合或者直接采用完全新领域的控制方法来改进系统的控制效果。综合考虑 APF 的性能, 采用电流跟踪复合控制法逐渐是以后的研究趋势, 目前已经有 PI 重复控制、多比例谐振滑模等复合控制方法见诸于文献, 不同程度地改善了当前 APF 的稳态及动态性能, 将先进的控制算法应用到 APF 上, 具有良好的发展前景。

5 总结

本文分析了国内外 APF 研究的最新进展, 从拓扑结构、谐波电流检测技术及电流跟踪控制技术的角度讨论了目前 APF 研究中存在的问题及解决办法, 得到了以下结论:

1) APF 与 PPF 相结合的 HAPF 是目前实际应用下的热门。迄今为止, 市场上已有大量成熟且大容量的 APF 产品。

2) 高压和大容量应用中, 多电平电路和多重化结构可有效降低 APF 成本及体积, 而将模块化多电平电路应用于谐波抑制、直流侧电容电压平衡控制是当前的难题。

3) 检测精度和实时性是衡量谐波检测方法的重要标准, 优化谐波检测是提高 APF 的关键。仅仅对单一的谐波电流检测法进行研究并不能全面地反映 APF 的检测精度和实时性。

4) 由于单闭环控制抗扰能力不强, 结合先进的电流跟踪算法, 采用双闭环控制已成为主流控制方法。

参考文献

- [1] AKAGI H, ISOZAKI K. A hybrid active filter for a three-phase 12-pulse diode rectifier used as the front end of a medium-voltage motor drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(1): 69-77.
- [2] 杜少通. 谐波抑制与无功补偿关键技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
DU Shaotong. Study on the key technologies for harmonic suppression and reactive power compensation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [3] RAHMANI S, HAMADI A, AL-HADDAD K. A Lyapunov-function-based control for a three-phase shunt hybrid active filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(3): 1418-1429.
- [4] 李博, 李欣. 并联有源电力滤波器解耦控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 164-170.
LI Bo, LI Xin. A survey on shunt active power filter decoupling control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 164-170.
- [5] BIRD B M, MARSH J F, MCLELLAN P R. Harmonic reduction in multiplex convertors by triple-frequency current injection[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1969, 116(10): 1730-1734.
- [6] SASAKI H, MACHIDA T. A new method to eliminate AC harmonic currents by magnetic flux compensation-considerations on basic design[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1971, PAS-90(5): 2009-2019.
- [7] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, IA-20(3): 625-630.
- [8] 武健, 刘瑜超, 徐殿国. 基于模块多电平变换器的并联有源滤波器控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 52-59.
WU Jian, LIU Yuchao, XU Dianguo. Control strategy of shunt active power filter based on modular[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 52-59.
- [9] 方旌扬, 肖国春, 郑力夫, 等. 一种 LCCL 滤波器及其在半桥电力有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 125-136.
FANG Jingyang, XIAO Guochun, ZHENG Lifu, et al. An LCCL filter for a half-bridge active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 125-136.
- [10] XU Jinbang, YANG Jun, YE Jie, et al. An LTCL filter for three-phase grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4322-4338.
- [11] RAHMANI S, HAMADI A, MENDELEK N, et al. A new control technique for three-phase shunt hybrid power filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009,

- 56(8): 2904-2915.
- [12] 薛花, 范月, 王育飞. 基于李雅普诺夫函数的并联型混合有源电力滤波器非线性控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 133-141.
XUE Hua, FAN Yue, WANG Yufei. Nonlinear control strategy based on Lyapunov function for shunt hybrid active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 133-141.
- [13] 何娜, 徐殿国, 武健. 一种新型混合有源滤波器及其复合控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 45-49.
HE Na, XU Dianguo, WU Jian. A novel design method and compound control strategy for shunt hybrid power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 45-49.
- [14] 周柯, 王凯, 刘路, 等. 一种改进型并联混合有源电力滤波器及其控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 67-72.
ZHOU Ke, WANG Kai, LIU Lu, et al. An improved shunt-hybrid-type active power filter and its control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 67-72.
- [15] 孟金岭, 赵伟, 林国营, 等. 双谐振注入混合型有源电力滤波器特性[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 32-38.
MENG Jinling, ZHAO Wei, LIN Guoying, et al. Characteristics of double resonance injection type hybrid active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 32-38.
- [16] 刘健桦, 陈乔夫, 代少君, 等. 高压大容量串联混合型有源电力滤波器的关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 1-9.
LIU Jianben, CHEN Qiaofu, DAI Shaojun, et al. Key techniques of high-voltage and large-capacity series hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 1-9.
- [17] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [18] 祝贺, 王久和, 郑成才, 等. 五电平 MMC-UPQC 的无源控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 2): 172-178.
ZHU He, WANG Jiuhe, ZHENG Chengcai, et al. Passivity based control of five-level MMC-UPQC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 172-178.
- [19] 周京华, 柴小丰, 祝天岳, 等. 三电平有源电力滤波器谐波电流及中点电位平衡控制[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2012-2019.
ZHOU Jinghua, CHAI Xiaofeng, ZHU Tianyue, et al. Control of harmonic current and neutral-point potential balance for three-level active power filter[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2012-2019.
- [20] SHEN Jie, SCHRÖDER S, RÖSNER R, et al. A comprehensive study of neutral-point self-balancing effect in neutral-point-clamped three-level inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3084-3095.
- [21] CHEN Zhong, XU Yaming, WANG Zhihui, et al. Modulation and control of a high performance hybrid cascade H-bridge seven-level active power filter with star configuration[C] // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 15-19, 2015, Charlotte, NC, USA: 2141-2147.
- [22] 陈仲, 王志辉, 陈淼. 一种高动态性能的级联型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 147-154.
CHEN Zhong, WANG Zhihui, CHEN Miao. A cascade H-bridge active power filter with high dynamic performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 147-154.
- [23] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [24] 杨晓峰, 王晓鹏, 范文宝, 等. 模块组合多电平变换器的环流模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 21-27.
YANG Xiaofeng, WANG Xiaopeng, FAN Wenbao, et al. Circulating current model of modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 21-27.
- [25] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 185-192.
HE Yingjie, LIU Jinjun, WANG Zhaoan, et al. A digital method for detecting harmonic currents based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 185-192.
- [26] 黄建明, 李晓明. 结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 43-50.
HUANG Jianming, LI Xiaoming. Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 43-50.
- [27] 王洪诚, 王蕾, 沈霞, 等. 基于改进增益型自适应 LMS 算法的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 42-46.
WANG Hongcheng, WANG Lei, SHEN Xia, et al. New

- harmonic detection method based on LMS algorithm of improved adaptive gain[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 42-46.
- [28] 邹常跃, 刘邦银, 段善旭, 等. 并网逆变器中数字控制延时对系统稳定性的影响及其优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 411-417.
ZOU Changyue, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Influence of delay on system stability and its optimization in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 411-417.
- [29] LASCU C, ASIMINOAEI L, BOLDEA I, et al. Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 337-347.
- [30] 周娟, 张勇, 耿乙文, 等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 113-120.
ZHOU Juan, ZHANG Yong, GENG Yiwen, et al. An improved proportional resonant control strategy in the static coordinate for four-leg active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 113-120.
- [31] 付瑞清. 基于复合控制的三电平 APF 的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 105-112.
FU Ruiqing. Research on three-level active power filter based on composite control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 105-112.
- [32] ESCOBAR G, HERNANDEZ-BRIONES P G, MARTINEZ P R, et al. A repetitive-based controller for the compensation of 61 ± 1 harmonic components[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 3150-3158.
- [33] GHAMRI A, BENCHOUIAM T, GOLEA A. Sliding-mode control based three-phase shunt active power filter: simulation and experimentation[J]. Electric Machines & Power Systems, 2012, 40(4): 383-398.
- [34] 周卫平, 吴正国, 刘大明, 等. 有源电力滤波器变趋近律滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 91-94.
ZHOU Weiping, WU Zhengguo, LIU Daming, et al. The variable reaching law sliding mode control strategy for three-phase three-wire active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 91-94.
- [35] JAVADI A, HAMADI A, WOODWARD L, et al. Experimental investigation on a hybrid series active power compensator to improve power quality of typical households[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 4849-4859.
- [36] HAO Xiang, YANG Xu, LIU Tao, et al. A sliding-mode controller with multiresonant sliding surface for single-phase grid-connected VSI with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2259-2268.
- [37] 王皓, 罗安, 徐千鸣, 等. 有源电力滤波器采样滤波电路的优化设计及鲁棒控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 107-113.
WANG Hao, LUO An, XU Qianming, et al. Optimization design and robust control of sampling filter circuit in active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 107-113.
- [38] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-05-30

作者简介:

王雪(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器谐波抑制及无功补偿; E-mail: 18406550093@163.com

高云广(1979—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为有源电力滤波器; E-mail: gyguangcn@aliyun.com

吝伶俐(1969—), 女, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为智能电气技术。E-mail: 1985804112@qq.com

(编辑 周金梅)