

# 低压有源电力滤波器在高电压等级下的仿真和工程应用

吉兴全<sup>1</sup>, 陈贺<sup>1</sup>, 訾振宁<sup>2</sup>, 贲宝强<sup>2</sup>, 刘志鹏<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中电普瑞科技有限公司, 北京 100192;  
3. 海南电网公司电力调度控制中心, 海南 海口 570203)

**摘要:** 提出一种利用低漏抗变压器和并联型低压有源电力滤波器实现对高电压等级补偿的新方法。针对现场工况情况, 考虑到变压器的移相特性, 采用一种新型数字锁相环技术对原有控制策略进行改进, 实现了通过低压有源滤波器对高电压母线的谐波治理和无功补偿。在不改变低压有源滤波器内部结构的前提下, 可以替代高压有源电力滤波器完成补偿任务, 降低设备投资。低压有源滤波器电压等级较低, 可以降低设备运维难度, 并能提高运维人员的安全系数。通过 PSCAD/EMTDC 数字仿真和现场实物试验, 验证了相关设计的有效性和可行性。

**关键词:** 有源电力滤波器; 变压器; 电能质量; 高压谐波治理; 无功补偿

## Low-voltage active power filter simulation and engineering application at high voltage levels

Ji Xingquan<sup>1</sup>, CHEN He<sup>1</sup>, ZI Zhenning<sup>2</sup>, BEN Baoqiang<sup>2</sup>, LIU Zhipeng<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China;  
3. Dispatching and Control Center of Hainan Power Grid Corporation, Haikou 570203, China)

**Abstract:** This paper presents a new method which applies low leakage reactance transformer and low voltage shunt active power filter to compensate for the side of high voltage. According to the field condition and the phase-shift characteristic of transformer, the original control strategy is improved by using a new type of digital phase-locked loop technology. The harmonic suppression and reactive power compensation of high voltage bus are realized by low voltage active power filter. Without changing the internal structure of low voltage active power filter, it can accomplish some compensation tasks of high voltage power filter, thereby reducing equipment investment. Due to the low voltage grade of filter, the difficulty of equipment maintenance is reduced, and the safety of the operators is also improved. The PSCAD/EMTDC simulation tool and field test are adopted to verify the effectiveness and feasibility of the proposed approach.

**Key words:** active power filter; transformer; power quality; high voltage harmonic control; reactive power compensation

中图分类号: TM727.2

文章编号: 1674-3415(2015)22-0141-06

## 0 引言

最近几年大量电力电子设备和非线性负载接入电网, 产生大量谐波, 降低了电网功率因数<sup>[1]</sup>。谐波污染会极大恶化电气设备周围电气环境, 功率因数降低会拉低系统的整体电压水平, 而用户也常因功率因数不达标而受到经济处罚。现在一些工商用电设备也对电能质量提出了更高的要求, 一般会采用装设电力滤波器的方式来达到滤除谐波和实现无功补偿的目标<sup>[2]</sup>。滤波装置主要分为无源电力滤波器(Passive Filter, PF)<sup>[3]</sup>和有源电力滤波器(Active

Power Filter, APF)<sup>[4]</sup>两种, 其中前者已得到了广泛使用, 也取得了比较好的治理效果。但是无源电力滤波器有其难以克服的缺点: 不能适应复杂工况下的实时补偿, 在一定情况下有可能会产生谐振现象, 滤除谐波次数范围也有很大局限性。随着控制和通信水平的提高, 人们提出了有源电力滤波器方案, 可以在很大程度上弥补无源电力滤波器存在的缺陷<sup>[5]</sup>。

目前由于一些特殊负荷, 比如钢铁厂、电解铝厂等用电电压等级较高, 产生的谐波对高压电网的污染严重, 而目前高压有源电力滤波器技术尚不成熟、运维难度大、投资成本高<sup>[6]</sup>, 针对这一现状,

本文提出了一种把低压有源电力滤波器通过 YD11 连接组别变压器应用于 10 kV 母线的办法, 提出了相应的控制策略, 并通过 PSCAD/ EMTDC 数字仿真方法<sup>[7]</sup>和实际工况下装置试验方法进行了验证, 取得了良好的谐波抑制和无功补偿效果。结论是小容量低电压有源电力滤波器在通过变压器多台并联使用的情况下可以满足高压母线补偿的要求。

## 1 主电路拓扑结构和控制原理

### 1.1 主电路拓扑结构

本文采用 IGBT 作为关断器件、高速 DSP 为控制核心、可滤除 2~17 次谐波的注入式有源电力滤波器, 其拓扑结构如图 1 所示。有源电力滤波器通过升压变压器与高压侧连接。变压器额定电压为 0.4 kV/10 kV, 为减小变压器的等值电抗, 提高 APF 的滤波效果, 此处选用低漏抗变压器<sup>[6]</sup>。检测电路通过电流互感器与高压侧相连。该拓扑结构用一定容量的负载作为谐波源, 其在工作过程中一方面消耗无功功率, 另一方面向电网注入一定含量的谐波电流; 电网电压为  $u_s$ 。整体上 APF 可划分为检测电路和补偿电路两部分, 而后者又包括主电路部分、驱动电路部分和电流跟踪与控制部分。此处以 IGBT 变换器作为补偿主电路<sup>[8]</sup>。 $i_s$  为电网侧电流,  $i_c$  为 APF 的输出补偿电流,  $i_l$  为负载电流,  $i_{cl}$  是 APF 计算出的指令电流。由于  $i_s = i_l + i_c$ , 显然若负载电流  $i_l$  中的谐波分量  $i_l^h$  恰好被 APF 通过升压变压器输出的补偿电流  $i_c$  所抵消时, 负载不会对高压电网造成谐波污染, 从而达到滤波和补偿的目的。

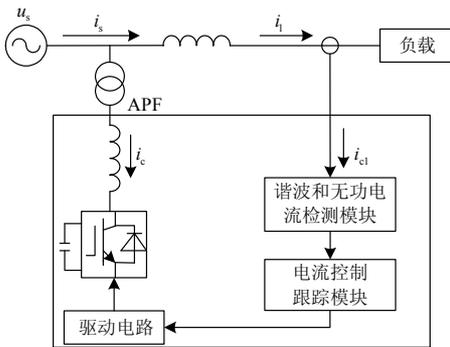


图 1 低压有源电力滤波器的拓扑结构  
Fig. 1 Topology of low active power filter

### 1.2 控制原理

#### 1.2.1 有源电力滤波器控制原理

有关 APF 的控制策略在诸多文献<sup>[9-11]</sup>中已经有详细介绍, 在此只做简单阐述, 如图 2 所示, 此次仿真和应用的有源电力滤波器控制方法包括电流内

环控制和电压外环控制, 电流内环控制首先在  $d/q$  旋转坐标系下对原始三相电流进行投影, 然后通过滤波将投影后的电流高次谐波滤除, 得到直流分量, 最后通过  $d/q$  反变换即可得到基波电流成分, 从而求得三相基波有功功率, 在此基础上经过简单运算即可分别得到无功电流成分和谐波电流成分<sup>[12]</sup>。电压外环控制采用比例积分调节, 其输出量作为内环控制参考值。功率单元根据计算出的指令电流发出触发脉冲, 控制 IGBT 发出反向谐波电流和无功电流, 可以消除谐波和补充无功。

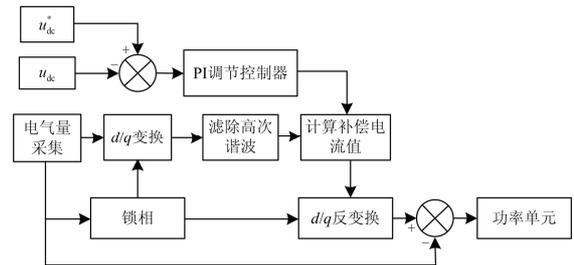


图 2 有源电力滤波器控制实现框图  
Fig. 2 Block diagram of active power filter

#### 1.2.2 变压器两侧的相位关系

由于 APF 是一种通过对电流调制, 发出补偿电流来改善电能质量的电力电子设备, 若不考虑变压器两侧电气量的相位差, APF 发出补偿电流经过变压器改变之后可能会失去补偿意义。本文中, 采用变比为 25: 1 的降压变压器, 变压器接线方式是 YD11。将变压器低压侧接入有源电力滤波器输出端, 作为升压变压器使用。变压器接线原理图和矢量图如图 3 所示。图中,  $\dot{E}_{UV}$  和  $\dot{E}_{uv}$  分别为高压侧和低压侧的线电压。

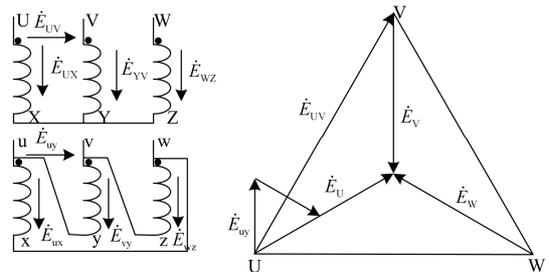


图 3 变压器接线方式与电压矢量图  
Fig. 3 Transformer wiring and voltage vector

通过矢量图可以看出二次侧线电压超前一次侧线电压  $30^\circ$ 。高低压电流相量关系类似, 设  $\dot{i}_U$  和  $\dot{i}_u$  分别为高压侧和低压侧的电流相量。如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{E}_{UV} = 25\dot{E}_{uv} \angle -30^\circ \\ \dot{i}_U = 1/25\dot{i}_u \angle -30^\circ \end{cases} \quad (1)$$

可以得出变压器高压侧电流、电压在相位上分别滞后于低压侧电流和电压  $30^\circ$ ，所以 APF 发出的补偿电流经过变压器输出到高压母线之后会产生角度偏差，这样会造成补偿错误，不但不会起到改善电能质量的作用，还会导致当前电能质量进一步恶化。

### 1.2.3 改进型有源电力滤波器控制方法

变压器造成这种不利影响是由变压器本身的电气结构决定的。为了消除变压器对补偿电流造成的不良影响，本文从控制策略锁相环<sup>[13-14]</sup>入手对其作出适应性改进。锁相环是一个输出信号和输入信号同步的闭环自动控制系统。锁相环的基本组成结构如图4所示。它由鉴相器(PD)、环路滤波器(LF)、压控振荡器(VCO)三个基本的部分构成。

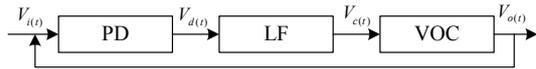


图 4 锁相环原理框图

Fig. 4 Schematic diagram of the phase locked loop

基本的工作原理是鉴相器将电网电压信号和内部控制系统信号的相位差转化成电压信号，通过环路滤波器滤波后控制压控振荡器，调节系统内部同步信号的频率和相位，使之与输入电压信号同步。本文根据锁相环原理，在锁相环节上外加一个移相环节，在不改变频率同步前提下使系统内部信号超前或滞后于电网信号。设三相电压相量分别为  $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、和  $\dot{U}_c$ 。按式(2)对该三相电压进行移相处理， $\alpha$  为移相角。

$$\begin{cases} \dot{U}_{a1} = \dot{U}_a \cdot 1\angle\alpha \\ \dot{U}_{b1} = \dot{U}_b \cdot 1\angle\alpha \\ \dot{U}_{c1} = \dot{U}_c \cdot 1\angle\alpha \end{cases} \quad (2)$$

在数字锁相环<sup>[15-16]</sup>中加入一个移相环节之后，可以使 APF 控制信号与 DY11 接法变压器高压侧保持同步。改进后的控制策略框图如图 5 所示。

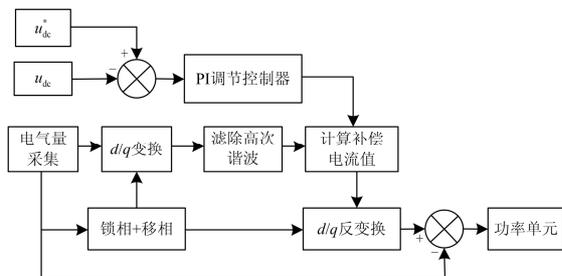


图 5 改进后的控制策略框图

Fig. 5 A block diagram of the improved control strategy

### 1.2.4 多机并联运行控制方法

因为高压负载的容量一般都比较大，所需要的

补偿容量相对于低压负载来说也要大得多。为解决这个问题，本文采用了多机并联的投入方案<sup>[17]</sup>。多机并联方案分为集中式的控制模式和冗余控制模式。集中式控制模式是指多台有源电力滤波器采用同一套采样和控制程序同时发出补偿电流，这些谐波电流合成以后共同抵消负载电流中的谐波成分，去除流向电源侧的谐波电流。集中控制的优点是响应更加快速、各 APF 之间不会产生相互干扰、运行同步、节省检测和控制系统的投入；缺点是在补偿容量较小时会造成资源浪费。集中模式运行图如图 6 所示。

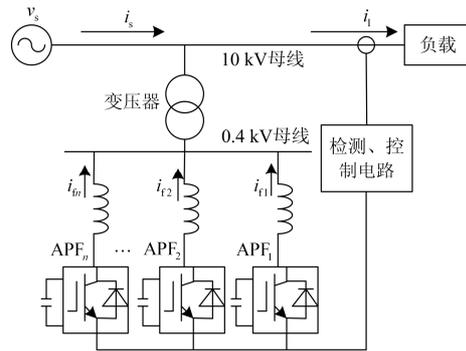


图 6 多机集中控制模式图

Fig. 6 Centralized control mode

冗余控制模式如图7所示。这是现代工业中常用的一种补偿方案，尤其是对于具有电流源性质的设备。在这种连接方式下要建立多机通信机制，以便反应各个 APF 的工作状态和协调单台 APF 的出力情况。这种连接方式下 APF 采样控制和补偿都是独立完成的，都具有独立主电路和控制回路。这种方式优点就是各个 APF 之间相互独立，其中一个出现

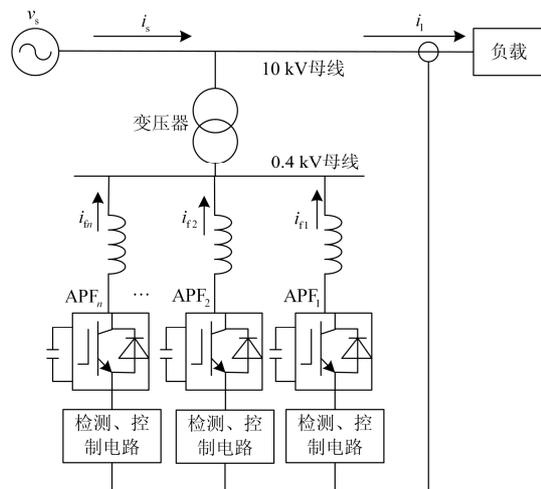


图 7 多机冗余控制模式图

Fig. 7 Redundant control mode

问题时不会影响其他 APF 正常工作。当现场工况变化时，可以灵活地对单台 APF 进行投切操作；缺点是多机通信机制复杂，故障率相对较高，经济投入相对较大。

由于现场有一些大功率实验设备，这些设备不属于长期稳定负荷，投切比较灵活。针对此特点，本文选择多机冗余控制方式应用于本次工程实践。

## 2 仿真研究

在实际工程应用之前，本文对所提出的主电路和控制方法进行了基于 PSCAD/EMTDC 的数字仿真，以验证工程应用的可行性。根据现场工况和线路布局情况搭建仿真模型，如图 8 所示。

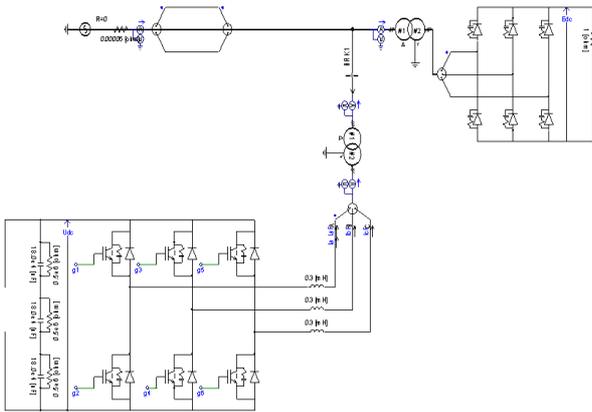


图 8 PSCAD/EMTDC 仿真模型

Fig. 8 Simulation model in PSCAD/EMTDC

在仿真中，使用一个整流电路作为谐波源。APF 的采样模块采用了多目标电流检测方法。在 APF 固有控制策略基础上增加了消除变压器相差影响的移相模块，如图 9 所示。在仿真的过程中重点观察和记录了 APF 投入前后 10 kV 母线的功率因数和谐波变化情况。

APF 在仿真开始 0.2 s 后投入，10 kV 母线谐波含量仿真结果如图 10 所示。波形横轴是时间(s)，纵轴为总谐波含量百分比。通过观察波形图可以发现，APF 投入之前谐波电流总含量达到了 25% 以上，APF 投入后经过有限的振荡周期谐波含量降到了 0.7% 以下。可见该控制策略行之有效，给 APF 实际工程应用奠定了基础。

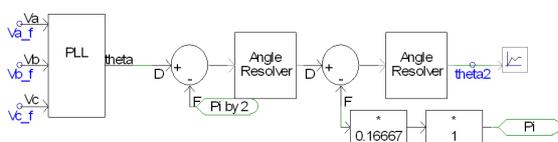


图 9 锁相环仿真模块

Fig. 9 Phase-locked loop module

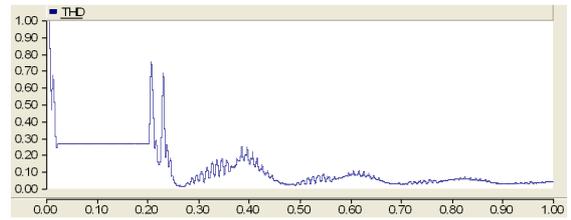


图 10 10 kV 母线侧谐波电流含量波形

Fig. 10 Waveform of harmonic current at 10 kV bus

## 3 工程应用及现场运行情况

某一个企业试验基地经常需要做一些高压装置试验，整流和变频设备作为谐波源挂载在 10 kV 母线上。由于试验装置都是大容量电力电子设备，造成 10 kV 母线长期功率因数较低、谐波污染严重，每个月都会收到电力公司数万元罚单。为了降低谐波污染，提高功率因数，减少输电线路的损耗，改善现场电气运行环境，针对现场具体工况和考虑到经费和运行状况，设计安装了三台低压 APF 通过变压器连接在 10 kV 母线上，进行无功功率补偿和谐波抑制。现场 APF 连线方式如图 11 所示。

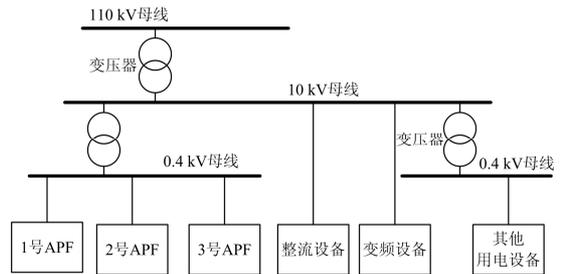


图 11 APF 现场安装示意图

Fig. 11 APF installation diagram

试验现场的 10 kV 母线通过容量为 2 MW 的变压器与 110 kV 高压母线相连。两套整流装置额定容量为 1 000 kVA，变频设备容量是 200 kVA。APF 投运前工况为：整流装置投运两台，输出电流 10 A，输出电压 2 000 V，还有各种照明和空调设备。功率因数低至 0.7 左右，10 kV 母线上的 3 次、6 次、11 次和 13 次谐波含量严重超标。

根据现场具体工况，此次选用 APF 参数如表 1 所示。三台 APF 采用多机冗余模式接线，并采用基于 DSP 的锁相环程序实现相位控制。现场运行图如图 12 所示。APF 升压变压器接线方式为 YD11、容量为 100 kVA、变比为 1: 25。

三台 APF 投运到现场以后，将治理谐波污染和无功补偿结合起来，避免了设备的重复投资。选用多级冗余的方式接线，具有很好的工作灵活性，能

表 1 APF 的参数  
Table 1 APF parameters

参数	数值
额定电压/kV	0.4
额定电流/A	150
额定容量/kvar	104
补偿谐波范围	2~17
阶跃响应速度	小于 20 ms



图 12 现场运行图

Fig. 12 APF in operation

够更好地适应现场工况变化。经测试该方案使现场功率因数达到了 0.95 以上,各次谐波含量控制在国家标准以内。

当现场负荷较大时,三台 APF 全部投入运行。图 13 和图 14 给出了补偿前后 10 kV 母线上测得的电流频谱图和电流波形。从图 13 中可以看出,APF 投入后 10 kV 母线各次电流谐波含量都明显降低。图 14 中可以看出 APF 可以跟踪模拟负载电流波形,并且对系统电流起到补偿作用。在抑制谐波电流的同时 APF 又有一定的无功电流输出能力,将功率因数由 0.7 以下提高到了 0.95 以上。APF 现场运行数据为: APF 投入之前母线上 2 次、3 次、7 次、11 次、13 次谐波畸变量分别是 5.32%、11.31%、2.48%、2.06%。投入 APF 后,各次谐波含量降至 0.92%、

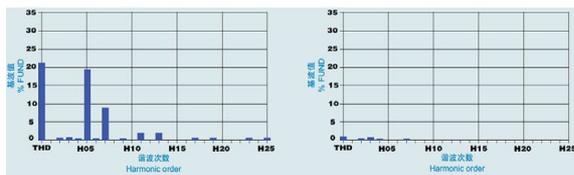


图 13 补偿前后谐波含量图

Fig. 13 Harmonic content before and after compensation

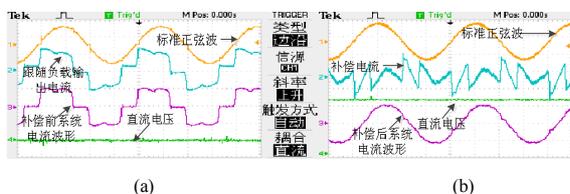


图 14 补偿前后的电流波形

Fig. 14 Current waveform before and after compensation

2.01%、0.54%、0.74%。现场实际工程应用结果表明将低压 APF 应用在高压母线上能够有效抑制高压母线谐波,输出无功电流提高功率因数,从而证明了本文设计的改进方法可行有效。

## 4 结论

通过理论分析和数字仿真表明 0.4 kV APF 通过变压器并入 10 kV 母线,对不同频次谐波都可取得较好的抑制效果,同时对无功也起到了明显的补偿作用,提高了功率因数,改善了电气运行环境。

APF 现场运行结果表明该方法可以有效解决大功率高压下的谐波和无功问题。综合治理后各项电能质量都达到了国标要求,低压 APF 在一定的工况下并联多机使用起到了高压 APF 的作用。保障了电网安全、稳定、经济运行,从根源上解决了企业电能质量问题。为企业安全运营起到了很好的辅助作用,展现出了良好的工程效果。我国当前大功率高压有源电力滤波器工程上应用较少,此种方案可以给其他相似工况下 APF 的应用起到一定的借鉴作用。

## 参考文献

- [1] 何世恩, 郑伟, 智勇, 等. 大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 41(2): 39-44.  
HE Shien, ZHENG Wei, ZHI Yong, et al. Power quality issues of large-scale cluster wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 41(2): 39-44.
- [2] 刘健彝, 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 filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 1-9.
- [3] 谢化安, 王凯亮, 曾江, 等. 基于三点工况下的无源滤波器组优化设计[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1713-1718.  
XIE Huaan, WANG Kailiang, ZENG Jiang, et al. Optimal design of passive filter groups based on three kinds of operation modes[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1713-1718.
- [4] 杨晓利, 葛宝明, 姜新建. 并联型多重化三相四线有源电力滤波器综合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 103-113.  
YANG Xiaoli, GE Baoming, JIANG Xinjian. Integrated control strategy of three-phase four-wire shunt active

- power filter using multiple converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 103-113.
- [5] 高东辉, 杜少武, 张长征. 改进型混合级联多电平有源电力滤波器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 40-26.  
GAO Donghui, DU Shaowu, ZHANG Changzheng. Research on an improved hybrid cascade multilevel active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 40-26.
- [6] 李达义, 孙玉鸿, 熊博, 等. 一种并联型有源电力滤波器的新型控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 112-116.  
LI Dayi, SUN Yuhong, XIONG Bo, et al. New control method for parallel active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 112-116.
- [7] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [8] BRIZ F, GARCIA P, DEGENER M W, et al. Dynamic behavior of current controllers for selective harmonic compensation in three-phase active power filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1411-1420
- [9] 梁营玉, 刘建政, 许杏桃, 等. 基于电源电流和负载电流检测的前馈加反馈的三相四线制 APF 控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 94-100.  
LIANG Yingyu, LIU Jianzheng, XU Xingtao, et al. Feedforward-feedback control strategy based on detection of power current and load current for three-phase four-wire APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 94-100.
- [10] 于晶荣, 粟梅, 孙尧. 有源电力滤波器的改进重复控制及其优化设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 235-242.  
YU Jingrong, SU Mei, SUN Yao. Improved repetitive control and its optimization for active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 235-242.
- [11] ANGULO M, RUIZ-CABALLERO D A, LAGO J, et al. Active power filter control strategy with implicit closed-loop current control and resonant controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2721-2730.
- [12] 辛业春, 李国庆, 王尧, 等. 基于双 dq 坐标变换的三相电压锁相环的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 115-118.  
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Yao, et al. Study of three-phase voltage phase locked loop based on double dq transformation synchronous reference frame[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 115-118.
- [13] 曹武, 江楠, 刘康礼, 等. 改进谐波分次检测结合集中电流环的 APF 谐波独立控制实现[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 387-396.  
CAO Wu, JIANG Nan, LIU Kangli, et al. An improved control structure consisting of selective harmonic detection and centralized current loop for the independent harmonic control and implementation of APF[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 387-396.
- [14] 刘扬, 谭国俊. 基于改进型自适应锁相环的特定次谐波补偿算法在 APF 中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 259-264.  
LIU Yang, TAN Guojun. Specific harmonic compensation algorithm based on self-adaptive reinforced phase lock loop for APF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 259-264.
- [15] QASIM M, KANJIYA P, KHADKIKAR V. Artificial-neural-network based phase-locking scheme for active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(8): 3857-3866.
- [16] WANG Yifei, LI Yunwei. Three-phase cascaded delayed signal cancellation PLL for fast selective harmonic detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1452-1463.
- [17] 徐长波, 鲁伟, 李春文. 大容量并联有源电力滤波器的模块化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 117-122.  
XU Changbo, LU Wei, LI Chunwen. A control strategy for multi-modular shunt active power filters applied to high-power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 117-122.

收稿日期: 2015-01-29; 修回日期: 2015-04-04

作者简介:

吉兴全(1970-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网技术; E-mail: xqji@163.com

陈贺(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 葛艳娜)