

三电平模块化智能电能质量补偿装置研究

梁光耀<sup>1</sup>, 徐嘉隆<sup>2</sup>, 王 勇<sup>2</sup>

(1. 上海宝准电源科技有限公司, 上海 200233;  
2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:**谐波、无功以及三相不平衡是电力系统中常见的电能质量问题。本文研究了基于三相四线制二极管钳位型三电平拓扑的模块化智能电能质量补偿装置,它可以实现指定次谐波补偿、无功功率和三相不平衡补偿。本文基于瞬时无功功率理论提取三相不平衡及无功补偿指令电流,并结合基于离散傅里叶变换的谐波提取算法,将负载电流中的基波负序电流、零序电流、无功电流和特定次谐波电流分离提取,通过PI控制器和重复控制器的并联,实现在静止三相ABC坐标系下指令电流的直接控制。经实验验证,本文所提的三相四线制模块化三电平智能电能质量补偿装置不仅可以动态补偿系统的无功、不平衡以及谐波电流,而且可以实现不同种类补偿容量的动态设置。

**关键词:**模块化设计;智能电能质量补偿装置;三电平拓扑;瞬时无功功率理论;重复控制

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1801036      **文章编号:** 1003-3076(2018)05-0045-06      **中图分类号:** TM464

1 引言

随着现代电力电子装置的广泛应用,大量的谐波电流和无功电流注入电网,单相负荷的增加也会引起系统的三相不平衡,最终导致电网的电能质量变差<sup>[1]</sup>。

谐波、无功以及不平衡电流已经成为电力系统中常见的电能质量问题。并联型有源电力滤波器作为一个受控电流源,通过在连接点注入与负载谐波电流大小相等、相位相反的补偿电流来治理电网中的谐波<sup>[2-4]</sup>。而无功功率是否平衡严重影响着电力系统的运行电压水平,静止无功发生器能够提供连续变化的感性或容性无功功率,提高功率因数,改善电能质量<sup>[5]</sup>。近年来也有专门针对三相不平衡的产品推出,它通过补偿系统的零序和负序分量使得三相平衡<sup>[6]</sup>。

相比于两电平拓扑逆变器,三电平逆变器具有直流电压高、输出电流纹波小、硬件结构紧凑等优势,具有更广阔的应用前景<sup>[7]</sup>。本文分析三电平逆变器拓扑对于无功、谐波以及不平衡补偿的适应性,并提出一种模块化的三电平智能电能质量补偿装置

(Smart Power quality Correction device, SPC),并研究了其指令电流设置、控制器设计等关键问题<sup>[8]</sup>。

2 主电路与电流提取算法

单台三电平 SPC 的主电路如图 1 所示。本文采用的主电路拓扑是三相四线制二极管钳位型三电平拓扑,该拓扑结构中的 N 线为零序电流通路,因此该拓扑结构既可以补偿三相不平衡中的零序电流,又可以补偿三相不平衡中的负序电流。

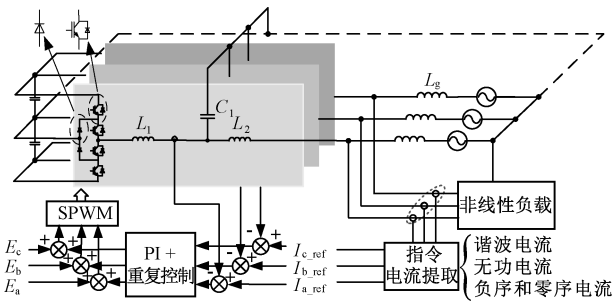


图1 三电平 SPC 主电路  
Fig. 1 General structure of three-level SPC

SPC 的控制核心是如何实现对于谐波、无功以

收稿日期: 2018-01-11  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51577118)  
作者简介: 梁光耀(1971-), 男, 上海籍, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动;  
徐嘉隆(1993-), 男, 河南籍, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

及不平衡电流的提取和综合以及分配。常见的基于瞬时无功功率理论的提取算法框图如图2所示,其中 Clark 和 Park 变换及其反变换矩阵如式(1)~式(4)所示。

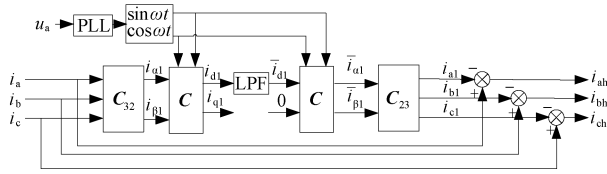


图2 基于瞬时无功功率理论的谐波、无功检测算法

Fig.2 Harmonic detection strategy based on instantaneous reactive power theory

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha 1} \\ \bar{i}_{\beta 1} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \bar{i}_{d1} \\ \bar{i}_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{d1} \\ \bar{i}_{q1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha 1} \\ \bar{i}_{\beta 1} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha 1} \\ \bar{i}_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

需要解释的是,图2中将  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  经过 Clark 变换,可以得到:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha 1} \\ i_{\beta 1} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n})] \\ \sqrt{3} \sum_n [-I_{1n} \cos(n\omega t + \varphi_{1n}) + I_{2n} \cos(n\omega t + \varphi_{2n})] \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,下标 1、2 分别代表相应的正序和负序分量;  $n=1,2,\dots$ 。

由式(5)可知,  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  经过 Clark 变换后不再含有零序分量,只含正序电流和负序电流分量。所以,基于瞬时无功功率理论的指令电流提取算法不

受零序电流的影响,不需要剔除零序电流,在三相四线制系统中可以直接用于检测基波正序、负序和零序分量电流以及所有谐波电流。

根据瞬时无功功率理论,三相负载电流  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  经过 Clark 和 Park 变换可以得到其在正序旋转 dq 坐标系下的有功电流分量  $i_{d1}$  和无功电流分量  $i_{q1}$ 。将  $i_{d1}$  作为低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)的输入信号,可以得到负载基波正序有功电流在正序旋转 dq 坐标系下的直流量  $\bar{i}_{d1}$ ,再通过 Clark 和 Park 反变换可以得到负载电流在静止三相 ABC 坐标系下的基波正序有功电流  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$  和  $i_{c1}$ 。当三相负载电流平衡时,将三相负载电流分别减去其基波正序有功电流  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$  和  $i_{c1}$  即可得到负载电流的所有谐波电流成分与无功电流之和  $i_{ah}$ 、 $i_{bh}$  和  $i_{ch}$ ,从而可以实现谐波电流和无功电流的全补偿,但是不能实现谐波、无功的分离提取和补偿。而当三相负载电流不平衡时,根据对称分量法,可以将三相负载电流  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  分解为零序分量、正序分量和负序分量,如式(6)所示:

$$\begin{cases} i_a = i_{a1} + i_{a2} + i_{a0} = \sqrt{2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n}) + I_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n})] \\ i_b = i_{b1} + i_{b2} + i_{b0} = \sqrt{2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n} - \frac{2\pi}{3}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n} + \frac{2\pi}{3}) + I_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n})] \\ i_c = i_{c1} + i_{c2} + i_{c0} = \sqrt{2} \sum_n [I_{1n} \sin(n\omega t + \varphi_{1n} + \frac{2\pi}{3}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \varphi_{2n} - \frac{2\pi}{3}) + I_{0n} \sin(n\omega t + \varphi_{0n})] \end{cases} \quad (6)$$

式中,下标 0 代表零序分量。通过图2的提取过程可以提取出基波正序分量  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$  和  $i_{c1}$ 。如果此时再用三相负载电流分别减去其基波正序有功电流得到的电流  $i_{ah}$ 、 $i_{bh}$  和  $i_{ch}$  则包含了所有谐波电流分量(包含零序、正序、负序)、基波无功电流分量以及基波零序、负序分量。所以,虽然图2逻辑简单,但所得到的指令电流  $i_{ah}$ 、 $i_{bh}$  和  $i_{ch}$  却包含了所有谐波、无功以及三相不平衡成分,如果将它作为 SPC 指令电流则无法实现谐波、无功以及不平衡的补偿容量设定以及特定次谐波补偿。

模块化 SPC 控制框图如图3所示。本文将  $i_{ah}$ 、 $i_{bh}$  和  $i_{ch}$  的谐波、无功及不平衡三个部分分离出来,采用基于离散傅里叶变换的谐波提取算法进行指定

次谐波的检测,具体方法可以参考文献[9],而三相不平衡和无功成分则基于瞬时无功功率理论进行提取。其中三相不平衡电流对应零序和基波负序电流分量,而无功对应基波正序无功电流分量。

### 3 电流跟踪控制策略

由图3可知,本文采用的电流跟踪控制策略是在静止三相ABC坐标系下的直接电流控制,指令电流包含谐波、无功和三相不平衡电流。图3中, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_1$ 、 $L_g$ 分别表示逆变器侧电感、网侧电感、滤波

器电容和电网阻抗, $I_{ref}(s)$ 为指令电流, $u_g(s)$ 为电网电压, $E(s)$ 为电网电压前馈,控制器采用PI控制器和重复控制器并联结构。对重复控制来说,当指令电流的波形与SPC的输出电流波形不一致时,控制量(即PWM调制信号)幅度会逐周期、无限制地增长。因此,在稳定系统中,SPC的输出电流与指令电流重合,既没有幅值偏差,也没有相位滞后。只要给定的谐波电流指令足够实时和精确,SPC就能实现理想的谐波、无功和三相不平衡补偿。

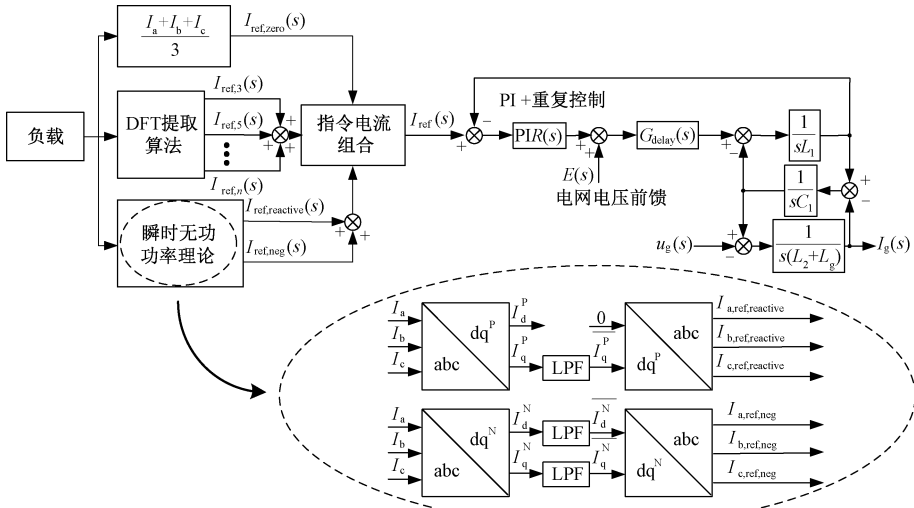


图3 模块化SPC控制框图

Fig. 3 Control diagram of modular SPC

PI + 重复控制的算法框图如图4所示。其中, $z^{-N}$ 为控制部分的周期延迟环节; $C(z)$ 为补偿器,其作用是给被控对象提供幅值补偿和相位补偿,在保证系统稳定的基础上,再对控制效果进行改善和校正; $G_f(z)$ 为系统的延迟函数,包含PWM延迟和采样延迟等;通常取 $Q(z)$ 为低通滤波器或略小于1的常数,其实质是将误差的积分环节变成“准积分”,提高系统的稳定性; $u_g$ 为电网电压; $i_c(z)$ 为SPC输出电流。

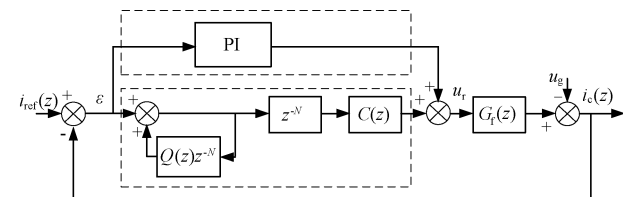


图4 PI + 重复控制算法框图

Fig. 4 Block diagram of PI + repetitive control algorithm

由PI + 重复控制算法框图可得系统闭环传递函数为:

$$\frac{i_c(z)}{i_{ref}(z)} = \frac{\{1 - z^{-N}[Q(z)G_{pi}(z) - C(z)]\}P(z)}{1 - z^{-N}[Q(z) - C(z)P(z)]} \quad (7)$$

式中

$$P(z) = \frac{G_f(z)}{1 + G_f(z)G_{pi}(z)}$$

其中, $G_f(z)$ 和 $G_{pi}(z)$ 分别为系统延迟函数和PI控制器的离散形式。

根据系统闭环传递函数,可得到系统稳定的必要条件为:

$$|Q(z) - C(z)P(z)| < 1 \quad (8)$$

由式(8)可知,控制器的稳定性只与重复控制器的参数有关,通过选取适当的控制器参数,可以获得较好的系统稳定性。

### 4 三电平模块化智能电能质量补偿装置的基本结构

模块化 SPC 并联系统结构如图 5 所示。每台模块化 SPC 通过滤波器与公共连接点(Point of Common Coupling,PCC)连接,在公共连接点处拓展,可以得到模块化 SPC 并联系统结构。每台模块化 SPC 都有独立的控制器、直流侧支撑电容和滤波器。

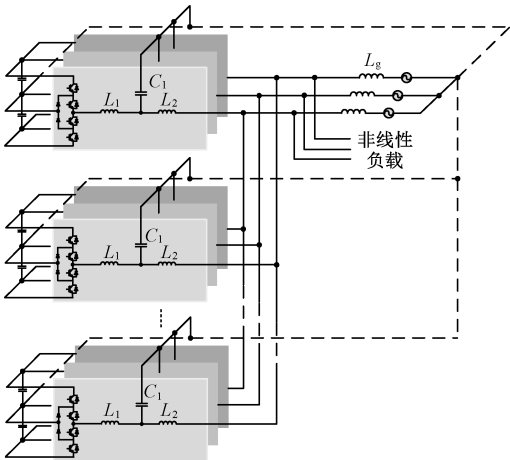


图 5 模块化 SPC 并联系统结构

Fig. 5 General structure of modular SPC parallel system

### 5 实验分析

为了验证本文的指令电流提取算法和电流跟踪控制算法的可靠性,进行了实验验证,实验中单 SPC 模块各参数如表 1 所示,图 6 为三台并联模块化 SPC 样机。

表 1 实验样机参数

Tab.1 Parameters of prototype	
参数	数值
直流母线电压/V	800
SPC 侧电感/ $\mu\text{H}$	200
滤波电容/ $\mu\text{F}$	10
网侧电感/ $\mu\text{H}$	75
开关频率/kHz	20
电网频率/Hz	50
电网相电压/V	230

三相四线制 SPC 的开机指令由手机端的 APP 发出,通过 Wi-Fi 进行通讯,人机交互界面如图 7 所示。DSP 控制芯片根据用户在人机交互界面输入的读写指令或者状态指令生成相应的控制指令。

#### 5.1 谐波补偿实验(工况 1)

补偿前后电网电流波形如图 8 所示。实验所用

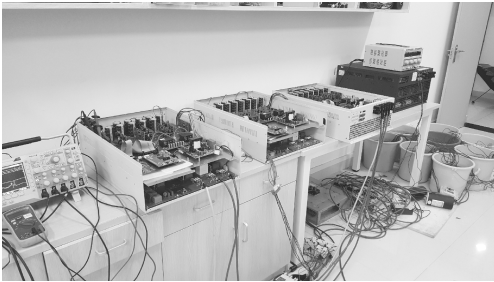


图 6 三台模块化 SPC 系统

Fig. 6 Three modular SPC prototype



图 7 人机交互界面

Fig. 7 Human-machine interaction interface

的谐波负载为三相不控整流桥带电阻负载,补偿之前的电网电流 THD 为 28% 左右,补偿之后的电网电流 THD 为 5% 以下。实验结果表明,基于离散傅里叶变换的谐波提取算法能够准确提取出系统中的谐波,并且所设计的电流跟踪控制器能够有效地跟踪谐波电流指令。

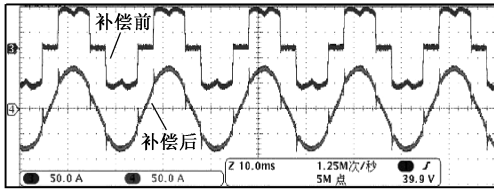


图 8 谐波补偿实验结果(工况 1)

Fig. 8 Experimental result of harmonic compensation (example 1)

#### 5.2 三相不平衡补偿实验(工况 2)

补偿前后电网电流波形分别如图 9 和图 10 所示。实验所用的三相不平衡负载为纯电阻负载,补偿之前的 ABC 三相电网电流有效值分别为 18.2A、71.6A 和 97.6A,补偿之后的 ABC 三相电网电流分别

为 63.1 A、64.2 A 和 63.5 A,其中负序电流不平衡度由 36.9%减小到 4.29%,零序电流不平衡度由 36.7%降低到 2.47%。实验结果表明,基于瞬时无功功率理论的指令电流提取算法能够准确提取出系统中的基波负序和零序电流,并且所设计的电流跟踪控制器能够有效地跟踪基波负序和零序电流指令。

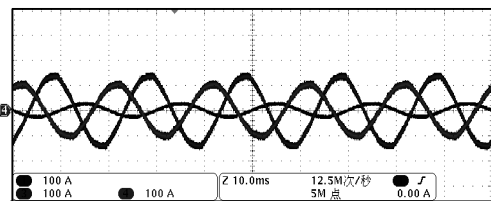


图 9 补偿前电网电流(工况 2)

Fig. 9 Grid current before compensation (example 2)

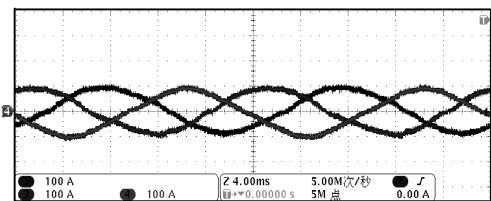


图 10 补偿后电网电流(工况 2)

Fig. 10 Grid current after compensation (example 2)

### 5.3 谐波、无功和三相不平衡综合补偿实验(工况 3)

补偿前后电网电流波形分别如图 11 和图 12 所示。实验所用的负载由三组单相晶闸管可控整流桥带电阻负载构成,补偿之前的三相电网电流中有大量的谐波、无功、零序以及负序电流,SPC 投入运行后,电网中的谐波含量、无功功率以及负序、零序电流不平衡度大幅度减小,效果明显。

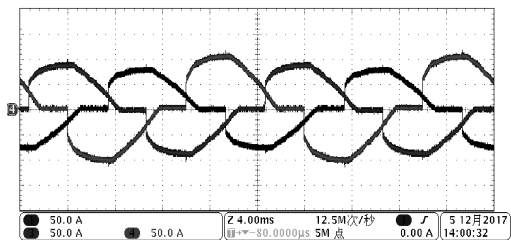


图 11 补偿前电网电流(工况 3)

Fig. 11 Grid current before compensation (example 3)

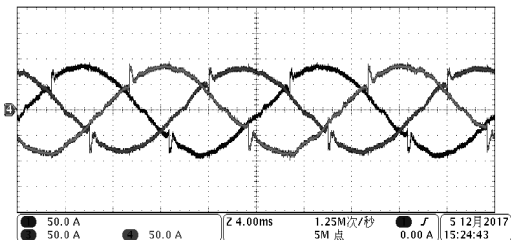


图 12 补偿后电网电流(工况 3)

Fig. 12 Grid current after compensation (example 3)

## 6 结论

本文研究了模块化三电平智能电能质量补偿装置,在此基础上,提出了基于瞬时无功功率理论的谐波、无功以及不平衡综合指令电流提取算法,并结合基于离散傅里叶变换的谐波提取算法,通过 PI 控制器和重复控制器的并联,可实现在静止三相 ABC 坐标系下指令电流的直接控制。通过不同工况下的实验验证,可知本文的三相四线制模块化三电平智能电能质量补偿装置不仅可以动态补偿系统的无功、不平衡以及谐波电流,而且可以实现不同种类补偿容量的动态设置,具有较高的实际应用价值。

## 参考文献 (References):

- [1] 宁玉宝 (Ning Yubao). 大型冲击性负载对电网影响及治理关键技术研究 (Study on influence and key technology of large capacity surge load on the power grid) [D]. 南京: 东南大学 (Nanjing: Southeast University), 2016.
- [2] Yi H, Zhuo F, Zhang Y, et al. A source-current-detected shunt active power filter control scheme based on vector resonant controller [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50 (3): 1953-1965.
- [3] Rahmani S, Mendalek N, Al-Haddad K. Experimental design of a nonlinear control technique for three-phase shunt active power filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (10): 3364-3375.
- [4] 陈国柱, 吕征宇 (Chen Guozhu, Lv Zhengyu). 有源电力滤波器的一般原理及应用 (The general principle of active filter and its application) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20 (9): 17-21.
- [5] 王松, 李耀华 (Wang Song, Li Yaohua). 电网不平衡下链式 STATCOM 补偿与控制策略 (Compensation and control strategy of cascade STATCOM under unbalanced grid condition) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (1): 1-9.
- [6] 王维权 (Wang Wei-quan). 电能质量校正装置在低压配电网中的应用研究 (Application research on power quality corrective device in low voltage distribution network) [J]. 能源与环境 (China Energy and Environmental Protection), 2017, 39 (9): 70-76.
- [7] 黄智昊 (Huang Zhihao). 三电平有源滤波器控制策略研究 (Research on control strategy of three-level active power filter) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 (Harbin: Harbin Institute of Technology), 2013.

[ 8 ] 李兰芳, 曾志武, 王映品, 等 (Li Lanfang, Zeng Zhiwu, Wang Yingpin, et al. ). 基于时域的谐波和无功检测技术的对比研究 (Comparative study of harmonic and reactive power detections based on time domain) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (11): 79-88.

[ 9 ] Feng L, Yao W, Wang Y. A novel DFT algorithm used in active power filter under frequency distortion [ A ]. 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia. [ C ]. 2017. 1375-1379.

Research on three-level modular smart power quality correction device

LIANG Guang-yao<sup>1</sup>, XU Jia-long<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>

- (1. Shanghai Bao Zhun Power Technology Co. Ltd. , Shanghai 200233 , China ;
2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 , China)

**Abstract:** Harmonics, reactive power and three-phase unbalanced current have become common power quality problems in power systems. This paper researches on a modular smart power quality correction device based on the three-phase four wire diode clamped three-level topology, which can achieve harmonic suppression, reactive power compensation and three-phase unbalanced management. This paper presents the instruction current extraction algorithm based on instantaneous reactive power theory, and combined with the harmonic extraction algorithm based on discrete Fourier transform, fundamental negative sequence current and zero sequence current, reactive current and harmonic are tracked, and by the use of PI controller paralleled with repetitive controller, the direct control of the instruction current in static three phase ABC coordinate system is carried out. It is verified by experiments that the three-phase four wire modular three-level smart power quality correction device designed in this paper can not only dynamically compensate the reactive power, unbalanced and harmonic currents of the system, but also achieve dynamic setting of different kinds of compensation capacity.

**Key words:** modular design; smart power quality correction device; three-level topology; instantaneous reactive power theory; repetitive control