

一种新型的并联混合型有源电力滤波器

张长征, 陈乔夫, 赵尤斌, 陈煜达, 谢冰若

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Research on a Novel Shunt Hybrid Active Power Filter

ZHANG Chang-zheng, CHEN Qiao-fu, ZHAO You-bin, CHEN Yu-da, XIE Bing-ruo

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: A novel shunt hybrid active power filter based on controllable impedance is proposed. The secondary winding of a linear transformer with air gap is injected a compensation current produced by a voltage source inverter. According to the transformer's voltage equations, when certain compensation condition is satisfied, the transformer can really exhibit nearly zero impedance to harmonic current and continuously adjustable reactance to fundamental current. Thus, the proposed active power filter together with passive power filter can not only suppress harmonic current but also compensate reactive power. A new reference current operation method is also put forward. Active power filters implemented this principle can be used in high voltage alternate power systems. The validity of the new principle is verified by the experiment results.

KEY WORDS: active power filter; transformer; controllable impedance; high voltage

摘要: 提出一种新型的基于阻抗可控的并联混合型有源电力滤波器。通过对带气隙的线性变压器的电压方程分析得知, 当变压器二次侧注入的补偿电流和一次侧的电流满足一定的补偿条件时, 变压器对谐波电流呈现近似为零的低阻抗, 对基波电流呈现连续无极可调的电抗。从而不仅能够有效地抑制谐波, 与无源电力滤波器相结合, 还能够实时补偿无功功率。针对该原理提出一种新型的指令电流运算方法。此新原理在高压交流电力系统柔性输电装置中将有广阔的应用前景。实验结果证明此有源电力滤波器新原理的正确性。

关键词: 有源电力滤波器; 变压器; 阻抗可控; 高压

0 引言

随着大容量电力电子装置在高压交流电力系

统中日益广泛的应用, 谐波和无功等问题严重地威胁着系统自身的安全稳定运行^[1]。针对 10~35kV 高压交流电力系统, 国内外目前主要采用无源电力滤波器来抑制谐波并补偿无功功率。无源电力滤波器具有诸多的缺陷, 难以达到理想的性能。受功率半导体开关器件的约束, 有源电力滤波器常规方案的应用限制在低压交流电力系统^[2-3]。因此, 级联多电平拓扑结构的方案^[4-6]、利用无源电力滤波器来降低有源电力滤波器所承受的基波电压的方案^[7-12]应运而生, 但目前这些方案的研究都还不成熟。

为了滤除电网中的谐波并实时补偿无功, 电力系统中需要对基波和谐波呈现可调阻抗的装置^[13]。文献[14-15]提出一种基于基波磁通补偿的串联型有源电力滤波器新原理, 通过电力电子变换器的控制, 使串联变压器对基波呈现很小的一次侧漏阻抗, 对谐波呈现很大的励磁阻抗。文献[16-17]提出一种基于磁通可控的可调电抗器新原理。通过电力电子变换器的控制, 变压器一次侧呈现连续无极可调的电抗。这 2 种原理都得到了良好的应用。

借鉴基波磁通补偿理论及磁通可控的可调电抗器原理, 根据串并联的对偶特性, 本文提出一种新型的基于阻抗可控的并联混合型有源电力滤波器。在电力电子变换器的控制下, 变压器对谐波电流呈现近似为零的低阻抗, 从而输电电力系统中的谐波电流, 同时对基波电流呈现连续无极可调的电抗, 与无源电力滤波器相结合, 实时补偿系统的无功功率。通过变压器隔离降压, 确保该滤波器安全、可靠、稳定地工作。这种新原理在高压交流电力系统柔性输电装置中将有广阔的应用前景。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477047)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50477047).

1 工作原理

1.1 变压器的结构

变压器的结构如图 1 所示。其一次侧AX与二次侧ax的匝数分别为 W_1 、 W_2 ，变比 $k=W_1/W_2$ ，一次侧与二次侧的互感为 M 。一次侧绕组的电阻为 r_1 ，自感为 L_{11} 。变压器采用非晶态合金铁心，为了确保变压器工作在B-H曲线的线性区，铁心开有气隙。利用电压型逆变器向变压器二次侧绕组中注入补偿电流 i_2 且满足

$$i_2 = -\alpha \cdot \sum i_1^{(n)} - \beta \cdot i_1^{(1)} \quad (1)$$

式中： α 为谐波补偿系数； $\sum i_1^{(n)}$ 为实时检测的变压器一次侧谐波电流； β 为基波补偿系数； $i_1^{(1)}$ 为实时检测的变压器一次侧基波电流。

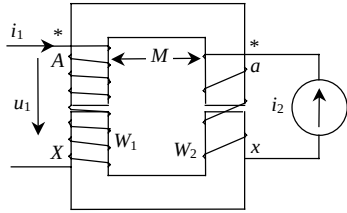


图 1 变压器结构图

Fig.1 Configuration of the transformer

1.2 谐波抑制原理

从AX端看，变压器 n 次谐波电压方程为

$$\dot{U}_1^{(n)} = (r_1 + j\omega_n L_{11})\dot{I}_1^{(n)} + j\omega_n M\dot{I}_2^{(n)} \quad (2)$$

若 α 满足谐波补偿条件

$$\alpha = L_{11} / M \quad (3)$$

则从AX端看，变压器对谐波电流的等效阻抗为

$$Z_{AX}^{(n)} = \dot{U}_1^{(n)} / \dot{I}_1^{(n)} = r_1 \quad (4)$$

通常 r_1 可忽略，因此，在满足谐波补偿条件时，变压器对谐波电流呈现近似为零的低阻抗。谐波等效电路如图 2 所示。

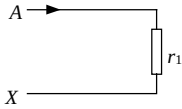


图 2 变压器谐波等效电路

Fig.2 The transformer's harmonic equivalent circuit

高压交流电力系统的系统阻抗相对较大，由于变压器在电力电子变换器的控制下能够对谐波电流呈现近似为零的低阻抗，因而对高压交流电力系统的谐波电流具有很好的抑制能力。

1.3 无功功率补偿原理

从AX端看，变压器基波电压方程为

$$\dot{U}_1^{(1)} = (r_1 + j\omega_1 L_{11})\dot{I}_1^{(1)} + j\omega_1 M\dot{I}_2^{(1)} \quad (5)$$

由于 r_1 可忽略，从AX端看，变压器对基波电流

的等效电抗为

$$X_{AX}^{(1)} = U_1^{(1)} / I_1^{(1)} = \omega_1 (L_{11} - \beta M) \quad (6)$$

变压器对基波电流的等效电抗与基波补偿系数 β 的关系如图 3 所示。

由图 3 可见，通过实时调节基波补偿系数 β 的大小，可以使得变压器对基波电流呈现连续无极可调的电抗，与无源电力滤波器相结合，能够实时地补偿高压交流电力系统的无功功率。

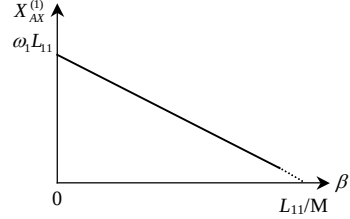


图 3 基波等效电抗与 β 的关系

Fig.3 Relationship between fundamental equivalent reactance and β

2 实验电路结构

2.1 主电路结构

图 4 为基于阻抗可控的并联混合型有源电力滤波器的实验电路结构图。主电路中， U_s 为系统电压， Z_s 为系统阻抗。 T 为线性变压器，与谐波源及无源电力滤波器相并联。 L_f 为逆变器输出电感，在变压器漏感较大的情况下， L_f 可省去。为了确保逆变器对指令电流的实时跟踪，采用IGBT作为功率半导体开关器件。 U_d 为逆变器直流母线电压。 L 与 C 为无源电力滤波器的电感与电容，无源电力滤波器主要功能为补偿容性无功电流，兼滤除部分谐波电流。谐波源为带阻感负载的二极管全桥不控整流器。

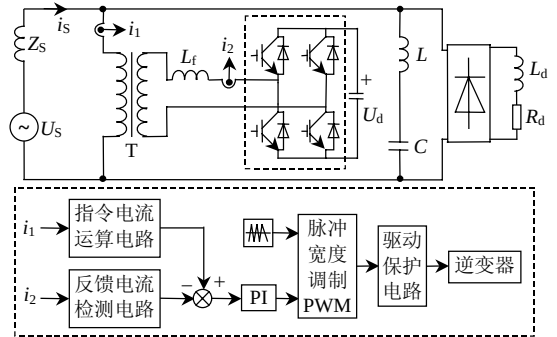


图 4 滤波器结构图

Fig.4 Block diagram of the proposed active power filter

2.2 控制电路结构

控制电路包括指令电流运算和补偿电流控制 2 部分。指令电流运算单元实时检测变压器一次侧的

电流,根据电力系统无功功率补偿的要求,得到变压器二次侧补偿电流的指令信号。补偿电流控制单元将指令电流信号与反馈电流信号相比较,其误差通过PI调节器,再与三角载波信号比较,得到PWM信号,驱动逆变器中的IGBT开关。借鉴文献[18],提出一种指令电流运算方法如图5所示。

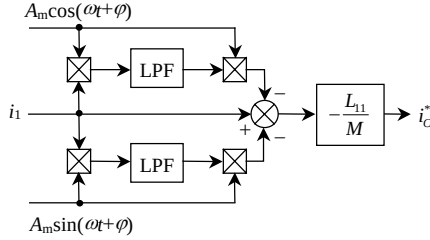


图5 指令电流运算电路

Fig.5 Reference current operation circuit

其中, $i_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$, (low-pass filter,

LPF)为低通滤波器,用于提取信号的直流分量, $A_m \sin(\omega t + \varphi)$ 与 $A_m \cos(\omega t + \varphi)$ 为控制电路产生的幅值实时调节、与电网同频率、相位任意的正弦弦, i_c^* 为补偿电流的指令信号。

一次侧电流与余弦信号相乘,得到

$$i_1(t) \cdot A_m \cos(\omega t + \varphi) = \frac{A_m}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \{ \cos[(n+1)\omega t + \varphi + \varphi_n] + \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n - \varphi] \} \quad (7)$$

经过LPF得到直流分量 $(A_m/2)I_1 \cos(\varphi_1 - \varphi)$, 再与余弦信号相乘,得到 i'_{1p}

$$(A_m^2/2)I_1 \cos(\omega t + \varphi) \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi) = (A_m^2/4)I_1 \cdot [\cos(\omega t + \varphi_1) + \cos(\omega t + 2\varphi - \varphi_1)] \quad (8)$$

一次侧电流与正弦信号相乘,得到

$$i_1(t) \cdot A_m \sin(\omega t + \varphi) = (A_m/2) \sum_{n=1}^{\infty} I_n \{ \sin[(n+1)\omega t + \varphi + \varphi_n] - \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n - \varphi] \} \quad (9)$$

经过LPF得到直流分量 $(-A_m/2)I_1 \sin(\varphi_1 - \varphi)$, 再与正弦信号相乘,得到 i'_{1q}

$$(-A_m^2/2)I_1 \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi) = (A_m^2/4)I_1 \cdot [\cos(\omega t + \varphi_1) - \cos(\omega t + 2\varphi - \varphi_1)] \quad (10)$$

由式(8)与(10)可以得到指令电流

$$i_c^* = -\frac{L_{11}}{M}(i_1 - i'_{1p} - i'_{1q}) = -\frac{L_{11}}{M}[(1 - \frac{A_m^2}{2})I_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n)] = -\frac{L_{11}}{M}[\sum_{n=1}^{\infty} i_1^{(n)} + (1 - \frac{A_m^2}{2})i_1^{(1)}] \quad (11)$$

比较式(1)、(3)与(11)可知,指令电流满足谐波补偿条件。通过实时调节正弦信号的幅值 A_m ,可实时改变基波补偿系数 β 的大小。 A_m 与 β 的关系为

$$A_m = \sqrt{2(1 - \beta/\alpha)} \quad (12)$$

3 实验与结果分析

为了证明上述理论分析的正确性,根据图4所示的系统结构图,设计了一套实验装置。系统电压为110V,系统侧串联5mH的电感。变压器的变比为1:1,一次侧绕组的自感为92mH,一次侧绕组与二次侧绕组的互感为91.69mH,二次侧绕组的自感为92mH,谐波补偿系数 $\alpha=1.0033$ 。无源电力滤波器参数为 $L=14.11\text{mH}$, $C=240\mu\text{F}$ 。半导体开关器件为SEMIKRON公司的NPN型IGBT SKM300GB 123D。采用TDS2002型数字示波器记录了实验波形,并采用了2533E型交流数字功率计测量了各种工况下实验数据。

实验分6种工况进行。

(1) 工况1。不加任何滤波器,此时系统电压电流的波形如图6所示。

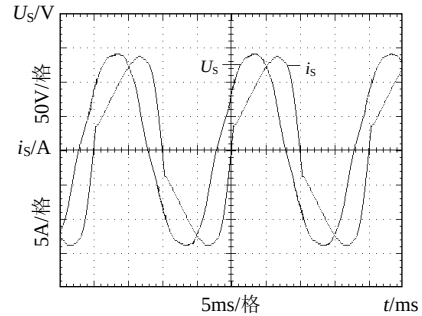


图6 不加任何滤波器时系统电压电流波形

Fig.6 Source voltage and source current waveforms when no filter is added

(2) 工况2。为了验证谐波抑制原理的正确性,只加有源电力滤波器,基波补偿系数 $\beta=0$,此时系统电压电流的波形如图7所示。

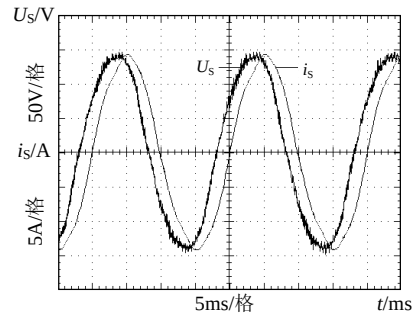


图7 只加有源电力滤波器时系统电压电流波形($\beta=0$)

Fig.7 Source voltage and source current waveforms when only active power filter is added($\beta=0$)

(3) 工况 3。只加无源电力滤波器，此时系统电压电流的波形如图 8 所示。

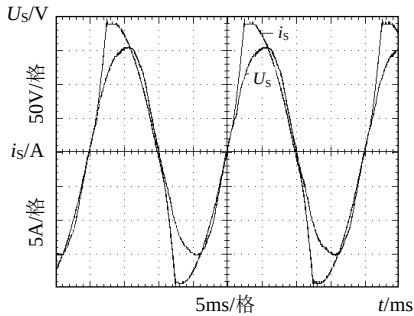


图 8 只加无源电力滤波器时系统电压电流波形
Fig.8 Source voltage and source current waveforms when only passive power filter is added

(4) 工况 4。同时加无源和有源电力滤波器，基波补偿系数 $\beta=0$ ，此时系统电压电流的波形如图 9(a)所示。

(5) 工况 5。同时加无源和有源电力滤波器，基波补偿系数 $\beta=0.51$ ，此时系统电压电流的波形如图 9(b)所示。

(6) 工况 6。为了更加明显地验证无功功率补偿原理的有效性，同时加无源和有源电力滤波器，将基波补偿系数 β 提高到 0.75，此时系统电压电流的波形如图 9(c)所示。对以上 6 种工况下的系统电流波形进行了傅里叶分析。6 种工况下的系统电流总谐波畸变率和系统功率因数如表 1 所示。从以上分析可见，该滤波器不仅能够有效地抑制谐波，通过调节基波补偿系数，还能够补偿无功功率。实验结果与理论分析相一致。

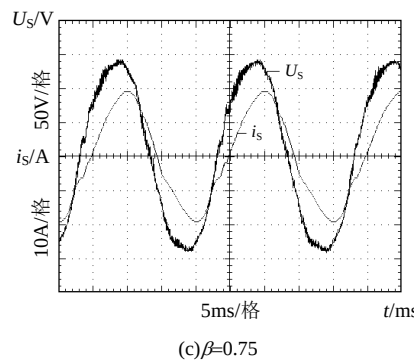
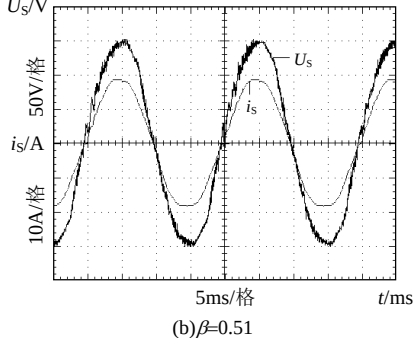
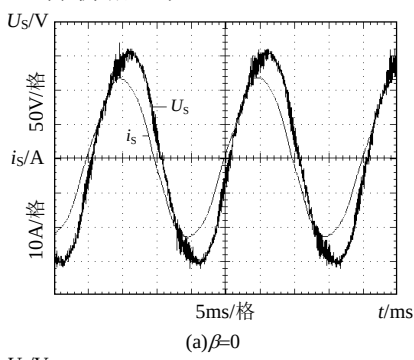


图 9 无源加有源滤波时系统电压电流波形
Fig. 9 Source voltage and source current waveforms when both passive and active power filters are added

表 1 6 种工况下系统功率因数及电流总谐波畸变率
Tab. 1 Total harmonic distortion of the source current and power factor of the system in six cases

工况	总谐波畸变率 THD/%	功率因数(PF)
不加任何滤波器	19.47	0.687
只加有源电力滤波器($\beta=0$)	5.40	0.820
只加无源电力滤波器	13.08	0.967(容性)
无源加有源电力滤波 ($\beta=0$)	4.52	0.926(容性)
无源加有源电力滤波($\beta=0.51$)	4.55	0.980
无源加有源电力滤波($\beta=0.75$)	8.22	0.905

此原理用于三相交流电力系统时，为了适用于负载不平衡等复杂的工况(如：27.5kV 铁道牵引系统)，借鉴参考文献[15]，可采用 3 个独立的单相变压器和单相逆变器的电路结构；用于高压交流电力系统时，由于系统的容量很大，为了提高有源电力滤波器的容量，借鉴参考文献[15,17]，变压器需采用二次侧多补偿绕组的结构。

4 结论

为了适用于高压交流电力系统，本文提出一种基于线性变压器阻抗可控的并联混合型有源电力滤波器。通过变压器二次侧电力电子变换器的控制，可使得变压器对谐波电流呈现近似为零的低阻抗，对基波电流呈现连续无极可调的电抗。因此该滤波器不仅能够有效地抑制谐波，与无源电力滤波器相结合，还能够实时补偿无功功率。

通过对变压器一次侧电压的分析，详细推导了该滤波器的工作原理，采用简单的三角载波电流控制方案，针对该原理，提出一种新型的指令电流运算方法，实验取得了与理论分析相一致的结果。

此原理用于三相电力系统时，可采用 3 个独立的单相变压器和单相逆变器的拓扑结构，用于高压交流电力系统时，变压器需采用二次侧多补偿绕组的结构。

参考文献

- [1] 吴竟昌, 孙树勤, 宋文南, 等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] Akagi H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on IA, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [3] Peng F Z. Harmonic sources and filtering approaches[J]. IEEE Industrial Applications Magazine, 2001, 7(4): 18-25.
- [4] Lopez M G, Moran L T, Espinoza J C, et al. Performance analysis of a hybrid asymmetric multilevel inverter for high voltage active power filter applications[C]. IEEE IECON, Roanoke, VA, USA, 2003, 29(2): 1050-1055.
- [5] 丁洪发, 段献忠, 朱庆春. 基于不对称级联逆变器的串联混合有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 63-67.
- Ding Hongfa, Duan Xianzhong, Zhu Qingchun. Series active power filter based on asymmetry cascade inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 63-67(in Chinese).
- [6] 孙建军, 张振环, 刘会金, 等. 基于级联型逆变器的中压有源电力滤波器滞环电流矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 86-90.
- Sun Jianjun, Zhang Zhenhuan, Liu Huijin, et al. A hysteresis current vector control for medium voltage active power filter based on cascade multilevel inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 86-90(in Chinese).
- [7] Hafner J, Aredes M, Heumann K. A shunt active power filter applied to high voltage distribution lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 1(12): 266-272.
- [8] 唐卓尧, 任震. 并联型混合滤波器及其滤波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 25-29.
- Tang Zhuoyao, Ren Zhen. Hybrid filter connected in series APF with PF and compensating characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 25-29(in Chinese).
- [9] 唐敏, 李群湛, 贺建闽. 牵引变电所无功谐波综合补偿方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 47-52.
- Tang Min, Li Qunzhan, He Jianmin. Structure of hybrid power filter for reactive power and harmonic current in traction substation[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 47-52(in Chinese).
- [10] 罗安, 付青, 王丽娜, 等. 变电站谐波抑制与无功补偿的大功率混合型电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 115-123.
- Luo An, Fu Qing, Wang Lina, et al. High-capacity hybrid power filter for harmonic suppression and reactive power compensation in the power substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 115-123(in Chinese).
- [11] 刘飞, 邹云屏, 李辉. C型混合有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 75-80.
- Liu Fei, Zou Yunping, Li Hui. The C type hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 75-80(in Chinese).
- [12] Inzunza R, Akagi H. A 6. 6-kV transformerless shunt hybrid active filter for installation on a power distribution system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(4): 893-900.
- [13] Sheng Jianke, Chen Qiaofu, Ke Jianxing, et al. A novel principle of magnetic flux compensation and its application in power systems[J]. International Journal of Electronics, 2003, 90(6): 707-720.
- [14] Li Dayi, Chen Qiaofu, Jia Zhengchun, et al. A novel active power filter with fundamental magnetic flux compensation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 799-805.
- [15] 陈乔夫, 李达义, 熊娅俐, 等. 一种大容量的串联型有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 73-76.
- Chen Qiaofu, Li Dayi, Xiong Yali, et al. A series active power filter with large capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 73-76(in Chinese).
- [16] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.
- Li Dayi, Chen Qiaofu, Jia Zhengchun. A novel principle of adjustable reactor based on magnetic flux controllable[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 116-120(in Chinese).
- [17] 盛建科, 陈乔夫, 熊娅俐, 等. 基于磁通可控的新型自动调谐消弧线圈[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 88-93.
- Sheng Jianke, Chen Qiaofu, Xiong Yali, et al. A new type automatic resonant arc-suppressing coil based on controllable magnetic flux[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 88-93(in Chinese).
- [18] 蒋斌, 颜钢锋, 赵光宙. 一种单相电流检测法的研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 65-69.
- Jiang Bin, Yan Gangfeng, Zhao Guangzhou. Study on a detecting method for harmonic currents in single-phase circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 15(6): 65-69(in Chinese).

收稿日期: 2007-01-23.

作者简介:

张长征(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术、电力系统谐波抑制, longmarch_zhang@sohu.com;

陈乔夫(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 全国变压器标准化技术委员会委员, 电力行业变压器标准化技术委员会委员, 中国电机工程学会变压器分专委会委员, 主要研究方向为电力系统谐波抑制、FACTS技术、变压器理论;

赵尤斌(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术、电力系统谐波抑制。

(责任编辑 韩 蕾)