

有源滤波器的低损耗滞环电流控制方法

曾江, 刘艳, 叶小军, 余涛

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

A Novel Hysteresis Current Control Method for Active Power Filter With Low Switching Loss

ZENG Jiang, LIU Yan, YE Xiao-jun, YU Tao

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: A novel hysteresis current control method for active power filter (APF) with low switching loss is proposed. By use of the feature of APF that its output current is mainly composed of harmonic currents, thus the sum of absolute value of three-phase current greatly fluctuates within a cycle, the controller adjusts the switching frequency according to the value of output current of APF to reduce the switching loss effectively with the same control precision. The relation between optimal switching frequency and fluctuation range of current-norm is derived theoretically, and a new hysteresis current controller is designed. Simulation results show that the proposed method can hold the overall control precision while the total switching loss is reduced effectively.

KEY WORDS: active power filter (APF); hysteresis current control; switching loss; harmonic elimination; hysteresis band

摘要: 提出一种新的用于有源滤波器的低损耗滞环电流控制方法。利用有源滤波器的输出电流主要是谐波电流, 因此在一个周期内总的三相电流绝对值大小波动幅度很大的特点, 根据电流大小调节相应的开关次数, 从而在保持相同控制精度的同时, 大幅降低有源滤波器的开关损耗。在理论上推导了最优开关频率和电流范数波动幅度的关系, 设计了一个新的滞环电流控制器。仿真结果表明, 采用所提出的方法可在保持总的控制精度的同时有效降低总的开关损耗。

关键词: 有源滤波器; 滞环电流控制; 开关损耗; 谐波治理; 滞环宽度

0 引言

有源滤波器是治理电力系统谐波污染的有效手段^[1-5], 与无源滤波器相比, 有源滤波器的滤波效果不受系统阻抗影响, 响应速度快, 控制精度高, 对包括非特征谐波、暂态谐波在内的所有谐波均具

有良好的滤波效果^[6]。随着电力电子技术的发展, 有源滤波器获得了日益广泛的工业应用。但是, 有源滤波器也存在损耗较高等缺点, 影响了其性价比的提升, 因此, 降低有源滤波器的开关损耗是当前研究重点。

在有源滤波器的主回路及控制对象均已确定的情况下, 其输出电流的控制方法是决定有源滤波器性能和效率的关键环节, 同样也对有源滤波器的开关损耗产生很大影响。当前有源滤波器的电流控制方法主要有滞环电流控制方法^[7-17]和三角波控制方法^[18]以及单周控制方法^[19-21]等。对于滞环控制方法, 以往的研究多集中于提高有源滤波器电流控制方法的控制效果, 使得在更低的开关频率下达到同样的控制效果, 以降低开关频率, 从而降低开关损耗。利用双滞环实现最优电压矢量下的滞环电流控制这一思想^[8-9]提出以来, 相关研究逐步深入并取得了很大进展^[10-16]。这些研究的主要目的是在相同的开关频率下提高控制效果, 以达到在同样控制效果下降低开关频率、减少开关损耗的目的。

本文对滞环电流控制方法进行了改进, 在保证控制效果的同时, 通过优化开关次数的分布规律, 减小开关动作时的开关电流平均值从而降低开关损耗, 而不是一味地追求降低开关频率。根据这一思路, 本文首先在理论上分析有源滤波器的最优开关频率和电流范数波动幅度之间的关系, 并根据分析结论, 提出一种根据有源滤波器的输出参考电流绝对值范数, 调整三相滞环宽度, 在保持控制精度的同时调整开关次数, 从而降低开关损耗的新的滞环电流控制方法。用电磁暂态程序进行的计算机仿真结果表明, 本方法可在控制精度相同、不明显增加总的开关频率的情况下, 有效降低有源滤波器的开关损耗。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50707010).

1 有源滤波器开关损耗分析

文献[22]对电力半导体器件和装置的功率损耗进行了深入研究, 分析了影响器件损耗的诸多因素, 可认为流过绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的电流、IGBT 集射极之间的电压是影响器件开关损耗的主要因素。在文献[22]的基础上可以得出, 对于有源电力滤波器, 由于其直流侧电压基本不变, 恒温下可近似认为其开关损耗与开关电流成线性关系。

有源滤波器的损耗主要由器件在工作过程中的损耗组成, 包括以下 4 部分: 断态损耗(由漏电流引起) P_1 、通态损耗 P_2 、开通损耗 P_{on} 和关断损耗 P_{off} 。则器件的总损耗为

$$P = P_1 + P_2 + P_{on} + P_{off}$$

其中断态损耗可以忽略, 通态损耗基本固定不变。若假定在开关过程中器件的电压和电流按线性规律变化, 同时在计算时忽略通态压降和漏电流, 则器件每次开通和关断的损耗分别近似为

$$E_{onloss} = \frac{1}{6} U I t_{on}, \quad E_{offloss} = \frac{1}{6} U I t_{off}$$

式中: t_{on} 为开关开通的时间; t_{off} 为开关关断的时间; U 、 I 分别为开通或关断时间内的平均电压和平均电流。

需要指出的是, 有源滤波器每相输出电流是一个交变的电流, 因此, 如果有源滤波器开关动作三相平衡, 且开关次数在时间轴上平均分布, 假定在单位时间 T 内每相开关动作 N 次, 则每相的开关损耗功率可表示为

$$P_{on} = E_{on} / T = \sum_{k=1}^N E_{onloss}(k) / T = \sum_{k=1}^N U(k) i(k) t_{on} / 6T \quad (1)$$

式中: E_{on} 为单位时间内总的开通损耗; $U(k)$ 为逆变器直流侧电压, 基本不变, 其值为 U , 因此式(1)可简化为

$$P_{on} = \frac{1}{6T} \sum_{k=1}^N U(k) i(k) t_{on} = \frac{N}{6T} U t_{on} i_{av} \quad (2)$$

式中: $i(k)$ 为第 k 次的开关电流; $i_{av} = \sum_{k=1}^N i(k) / N$, 可称为开关平均电流。由此可见, 逆变器的开关损耗主要与单位时间内的开关次数、直流侧电压、开关时间及开关平均电流 i_{av} 有关。需要指出的是, 开关平均电流不等同于平均电流, 它与开关动作在时间轴上的分配比例相关: 如果开关动作在时间轴上完全平均分配, 则开关平均电流等于平均电流; 如果

开关动作集中在 i 较小时, 则开关平均电流小于平均电流; 相反, 如果开关动作集中在 i 较大的时候, 则开关平均电流大于平均电流。同理可推导出关断时的开关损耗。

图 1 和表 1 显示了 3 种开关分布规律下的开关损耗对比情况, 以开关均匀分布的情况为基准, 使用标么值。图 1(a)是电流较小时、开关频率为平均开关频率的 1.5 倍, 电流较大时、开关频率为平均开关频率的 0.5 倍时的情况(情况 1), 开关损耗明显

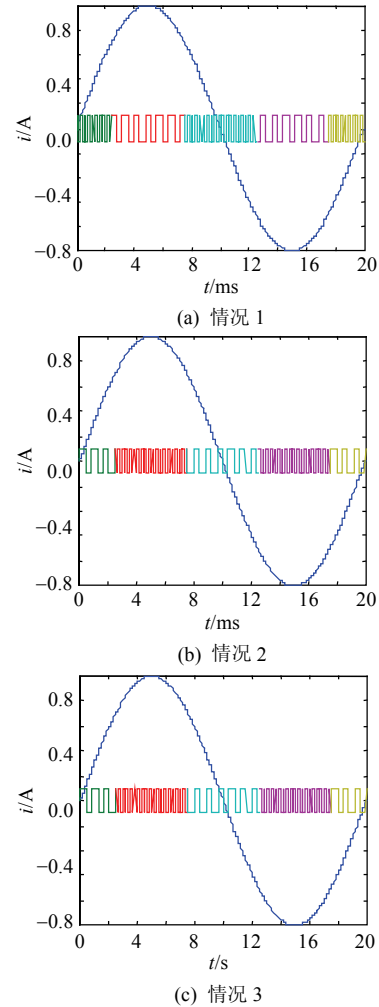


图 1 开关次数对应于电流大小的不同分配方式

Fig. 1 Different distribution modes of switching number corresponding to current magnitude

表 1 开关损耗比较

Tab. 1 Comparison of switching losses

| 比较项目 | 图 1(a) | 图 1(b) | 图 1(c) |
|------------------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|
| 对应开关次数分布 | 小电流时开关频率为 1.5 倍, 大电流时开关频率为 0.5 倍 | 开关频率始终均匀不变 | 大电流时开关频率为 1.5 倍, 小电流时开关频率为 0.5 倍 |
| 以图 1(b)为基准对应的开关平均电流/pu | 1.207 | 1.000 | 0.793 |
| 以图 1(b)为基准对应的开关损耗/pu | 1.207 | 1.000 | 0.793 |

降低, 为 0.793 pu; 图 1(b)是开关频率始终均匀的情况(情况 2), 开关损耗为 1.000 pu; 图 1(c)是电流较小时、开关频率为平均开关频率的 0.5 倍, 电流较大时、开关频率为平均开关频率的 1.5 倍时的情况(情况 3), 开关损耗为 1.207 pu, 3 种情况下的平均开关频率完全相等。可见, 根据电流大小改变开关频率能有效降低或增加开关损耗。

2 滞环宽度调整下的误差电流和开关损耗分析

2.1 滞环宽度和开关频率及控制精度的关系

根据文献[7]的分析可知, 开关周期 T 和滞环宽度 h 成正比, 而滞环宽度 h 和误差电流 i 的大小成正比。也就是说 $1/f \propto h \propto i$, 3 者间基本是线性关系。为提高控制精度, 也就是减小误差电流, 常常需要提高开关频率。

在三相系统中, 开关频率、滞环宽度和误差电流大小的关系与单相系统类似。

2.2 有源滤波器三相输出电流的绝对值范数

三相系统中, 假设三相开关次数均匀分布, 则开关损耗除了与三相的平均开关频率相关外, 与三相电流的绝对值之和成比例关系, 即与 $\|I\| = |i_a| + |i_b| + |i_c|$ 成比例关系, 三相电流的绝对值之和 $\|I\|$ 即定义为三相电流的绝对值范数。

在电机驱动、无功补偿等应用场合, 三相输出电流是正弦电流, 其范数在一个周期内波动不大, 但在有源滤波器的应用中, 补偿电流富含高次谐波电流, 导致总的电流范数波动很大, 图 2 是一个典型的有源滤波器三相输出电流范数波动图, 可见其电流范数的波动幅度超过 66%, 最大值达到最小值的 5 倍。

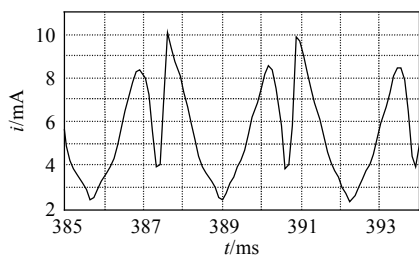


图 2 电流范数波动曲线

Fig. 2 Current-norm fluctuation curve

2.3 滞环宽度不固定时的误差电流和开关损耗

根据前面的分析可知, 根据不同的电流大小, 调节相应的开关频率可以减少开关损耗。开关频率的调节是通过调节滞环宽度实现的, 因此在一个周

期内, 电流误差不再位于一个固定的边界内变化, 而是随着滞环宽度的变化而变化, 这种情况下, 一个周期内电流误差的有效值将增大。

将电流的平均值、开关频率、误差电流设为基准值, 则正常情况下的标么值均为 1。假设电流波动值为 x , 在 50% 的时间内电流为 $1-x$, 50% 的时间内电流为 $1+x$, 为了减少开关损耗, 相应的开关频率分别调整为 $1+y$ 和 $1-y$ (总的开关频率不变), 因此, 总的开关损耗变为

$$P_{\text{loss}} = 0.5(1+x)(1-y) + 0.5(1-x)(1+y) = 1 - xy \quad (3)$$

在这种控制策略下, 在 $1+y$ 的开关频率下, 滞环宽度减少为 $1/(1+y)$, 误差电流变为 $1/(1+y)$; 相应的, 在 $1-y$ 的开关频率下, 误差电流变为 $1/(1-y)$ 。因此, 误差电流有效值变为

$$i = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{(1+y)^2} + \frac{1}{(1-y)^2} \right]} = \frac{\sqrt{1+y^2}}{1-y^2} \quad (4)$$

为了保持同样的控制精度, 总体的平均开关频率将相应提高到同样的比例, 在这种情况下, 总的开关损耗相应提高 $\sqrt{1+y^2}/(1-y^2)$ 倍, 变为

$$P_{\text{loss}} = (1-xy) \sqrt{1+y^2} / (1-y^2) \quad (5)$$

2.4 最优开关频率调整幅度和电流波动幅度分析

当电流波动幅度为 0.5 pu 时, 总开关损耗和开关频率调整幅度 y 的关系如图 3 所示。

由图 3 可见, 在保持控制精度不变的情况下, 总的开关损耗的变化类似抛物线, 开关频率必须调整在最佳点上才能有效降低总的开关损耗, 若调整不恰当, 反而会增加损耗。图 3 中最佳开关频率调整幅度应为 0.181 1 pu, 如保持原来的平均开关频率, 开关损耗降为 0.909 5 pu, 误差电流增大为 1.0507 pu。在提高开关频率、保持原有的控制精度后, 总的开关损耗为 0.955 6 pu。如开关频率调整为 0.5 pu, 则开关损耗虽然下降为 0.75 pu, 但误差电流

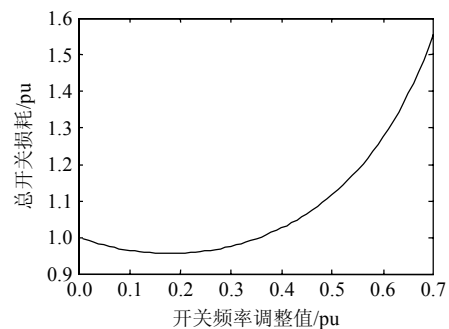


图 3 不同开关频率调整度对应的损耗

Fig. 3 The losses under different switching frequency modulation degree

增大为 1.490 7 pu, 得不偿失。

根据不同的电流波动幅度 x , 可计算出相应的最优开关频率调整幅度 y , 表 2 为计算结果。

表 2 不同电流波动幅度下的开关损耗变化
Tab. 2 The switching losses change under different current fluctuation magnitude

| 当前电流波动幅度/pu | 最优开关频率变化调整幅度/pu | 开关损耗变化/pu | 误差电流大小/pu | 保持误差电流相同时开关损耗变化/pu |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|--------------------|
| 0.0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0.1 | 0.033 4 | 0.997 | 1.002 | 0.998 |
| 0.2 | 0.067 0 | 0.987 | 1.007 | 0.993 |
| 0.3 | 0.103 0 | 0.969 | 1.016 | 0.985 |
| 0.4 | 0.140 0 | 0.944 | 1.030 | 0.972 |
| 0.5 | 0.181 0 | 0.909 | 1.049 | 0.956 |
| 0.6 | 0.227 0 | 0.864 | 1.081 | 0.934 |
| 0.7 | 0.281 0 | 0.803 | 1.128 | 0.906 |
| 0.8 | 0.351 0 | 0.719 | 1.208 | 0.869 |
| 0.9 | 0.455 0 | 0.591 | 1.385 | 0.818 |

可以看出, 当电流变化很小时, 总开关损耗的下降较小; 但是当电流波动较大时, 总开关损耗的下降十分明显。

电流波动的幅度和最优开关频率调整幅度的对应关系十分复杂, 属于超越方程, 实际应用时, 经数值计算, 其关系如图 4 所示, 采用数值拟合的方法, 可得出如下方程:

$$y=0.383 2x-0.007 \quad (6)$$

可以看出, 如果电流波动幅度不是太大, 采用线性拟合已经足够精确, 电流波动幅度与对应的最优开关频率调整幅度接近于 0.3832 的比例关系, 非常简单。

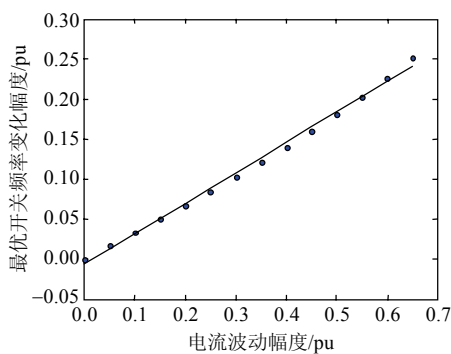
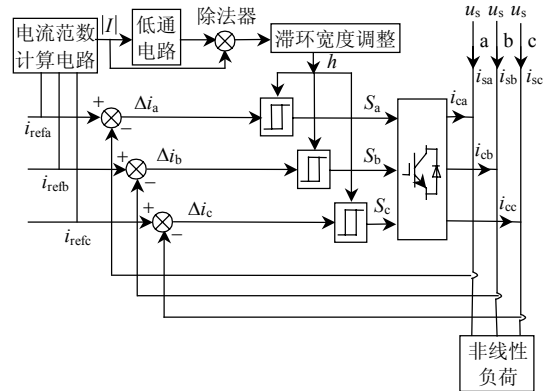


图 4 不同电流波动幅度对应的最优开关频率
Fig. 4 The optimal switching frequency under different current fluctuation magnitude

3 新的有源滤波器滞环电流控制方法

根据上面的分析, 本文提出一种新的滞环控制方法, 其原理框图如图 5 所示。与传统方法相同, 系统实际三相电流与各相参考电流进行比较得出各相电流误差 Δi_a 、 Δi_b 、 Δi_c , 将电流误差送入滞环



u_s —系统电压; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} —系统三相电流; i_{refa} 、 i_{refb} 、 i_{refc} —参考电流; Δi_a 、 Δi_b 、 Δi_c —误差电流。

图 5 新的滞环控制方法框图

Fig. 5 Block diagram of the novel hysteresis current control method

比较器后得出开关函数 S_a 、 S_b 、 S_c , 生成脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 信号驱动开关器件动作, 产生补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 。滞环比较器的宽度 h 可以修改, 其宽度由滞环宽度调整电路决定。各相参考电流输入调整电路后, 计算出三相电流绝对值之和, 用低通滤波器计算出平均电流大小, 当前电流与平均电流进行比较后, 根据波动幅度, 得出滞环比较器滞环宽度的调整幅度。

4 仿真试验

利用电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC^[23]对图 6 中的有源滤波器系统进行仿真计算, 其中有源滤波器用来补偿直流电动机运行时产生的谐波电流。图中各参数如下: 线电压 U_s 为 380 V, L_L 为 0.003 H, L 为 0.1 H, R_d 为 50 Ω , L_s 为 12.5 mH, U_c 为 800 V。传统滞环电流控制的仿真结果如图 7 所示, 新滞环控制方法的仿真结果如图 8 所示。2 种滞环控制方法的性能比较如表 3 所示。

可见, 在开关频率、控制精度都基本相同的情况下, 新的滞环控制方法的开关损耗仅为原方法的 89.9%, 非常有效。

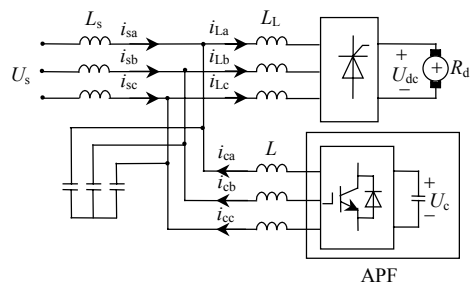


图 6 有源滤波器系统

Fig. 6 System diagram of active power filter

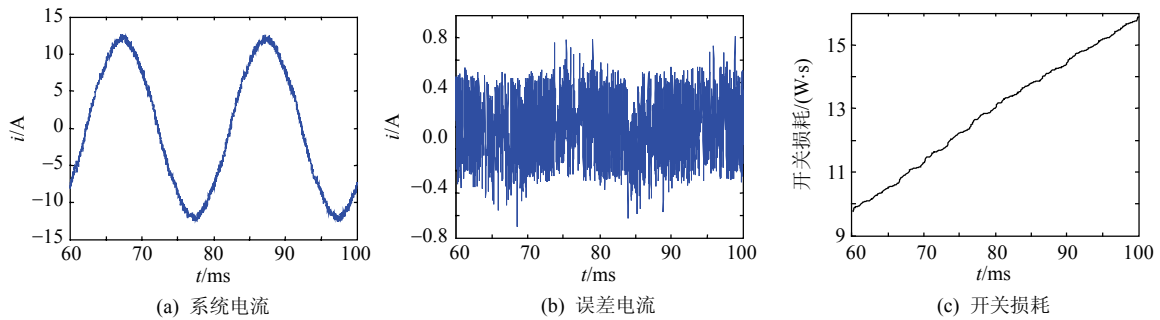


图7 传统滞环控制方法的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the conventional hysteresis control method

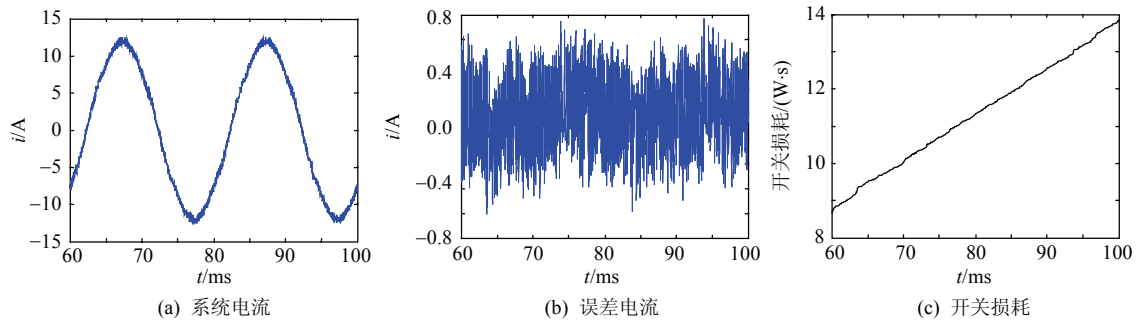


图8 新滞环控制方法的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the novel hysteresis control method

表3 2种控制方法的性能比较

Tab. 3 Performance comparison of the two control methods

| 控制方法 | 开关频率/kHz | 开关损耗/W | 误差电流有效值/A |
|----------|----------|--------|-----------|
| 传统滞环控制方法 | 5.0 | 151.5 | 0.269 2 |
| 新滞环控制方法 | 5.0 | 136.6 | 0.267 4 |

5 结论

本文提出了一种新的滞环电流控制方法。利用开关损耗和开关电流、开关次数线性相关，开关次数与滞环宽度成反比的原理，通过调整滞环宽度，在控制精度和开关频率基本不变的情况下，有效降低有源滤波器的开关损耗。本文提出的开关平均电流的概念，通过减少开关平均电流来降低开关损耗，是一种新的思路，还可应用在其他滞环控制及无差拍控制中。

参考文献

[1] 吴隆辉, 卓放, 张鹏博, 等. 并联混合型有源电力滤波器稳定性及控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 54-60.
Wu Longhui, Zhuo Fang, Zhang Pengbo, et al. Stability analysis and controller design of hybrid parallel active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 54-60(in Chinese).

[2] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 16-20.
Wang Qun, Yao Weizheng, Liu Jinjun, et al. Harmonic source and compensation characteristics of active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 16-20(in Chinese).

[3] 张大禹, 谭光慧, 纪延超. 级联型有源电力滤波器的新型控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 70-74.

Zhang Dayu, Tan Guanghui, Ji Yanchao. A novel control strategy for cascaded active power filters[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 70-74(in Chinese).

[4] 杨华云, 任士焱. 一种实用的串并联混合有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 32-36.
Yang Huayun, Ren Shiyan. A practical series-parallel hybrid active power filter[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 32-36(in Chinese).

[5] 唐欣, 曾启明, 陈伟乐. 有源电力滤波器的双闭环串级控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 59-63.
Tang Xin, Tsang K M, Chan W L. Double closed-loop cascade control for active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 59-63(in Chinese).

[6] 李战鹰, 任震, 杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 40-43.
Li Zhanying, Ren Zhen, Yang Zeming. Survey on power filter devices and their application study[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 40-43(in Chinese).

[7] Marei M I, El-Saadany E F, Salama M M A. New contribution into performance of active power filter utilizing SVM based HCC technique[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, 2002.

[8] 曾江, 焦连伟, 倪以信, 等. 基于优化电压矢量的有源滤波器定频滞环电流控制新方法[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 1-8.
Zeng Jiang, Jiao Lianwei, Ni Yixin, et al. A new current control method for active power filters with constant switch frequency [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 1-8(in Chinese).

[9] Zeng J, Ni Y, Diao Q, et al. Current controller for active power filter based on optimal voltage space vector[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 111-116.

[10] 曾江, 倪以信, 陈寿孙, 等. 有源滤波器电流控制新方法[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(4): 27-32.
Zeng Jiang, Ni Yixin, Chen Shousun, et al. A new control method for active power filter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering

- and Energy, 2000, 19(4): 27-32(in Chinese).
- [11] 范小波, 张代润, 孙茜, 等. 三相三线有源电力滤波器滞环电流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 57-61.
Fan Xiaobo, Zhang Dairun, Sun Qian, et al. Hysteresis current control strategy for three-phase three-wire active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 57-61(in Chinese).
- [12] 郭自勇, 周有庆, 刘宏超, 等. 一种基于电压空间矢量的有源滤波器滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 112-117.
Guo Ziyong, Zhou Youqing, Liu Hongchao, et al. A novel hysteresis current control method for active power filter based on voltage space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 112-117(in Chinese).
- [13] 杨苹, 陶以彬, 钟国基, 等. 基于复合控制的有源滤波器电流控制新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 51-56.
Yang Ping, Tao Yibin, Zhong Guoji, et al. Novel current control method for active power filter based on compound control [J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation, 2008, 20(4): 51-56(in Chinese).
- [14] 谈龙成, 陈永刚, 常国洁, 等. 有源电力滤波器的电流控制新方法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 62-65.
Tan Longcheng, Chen Yonggang, Chang Guojie, et al. A novel current control method for active power filter[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 62-65(in Chinese).
- [15] Pan Ching-Tsai, Huang Yi-Shuo, Jong Tai-Lang. A constant hysteresis-band current controller with fixed switching frequency industrial electronics[C]. 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, L'Aquila, Italy, 2002.
- [16] Wuest D, Jenni F. Space vector based current control schemes for voltage source inverters[C]. Power Electronics Specialists Conference of 24th Annual IEEE, Washington, USA, 1993.
- [17] 乐健, 姜齐荣, 韩英铎. 基于统一数学模型的三相四线有源电力滤波器的电流滞环控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 85-91.
Le Jian, Jiang Qirong, Han Yingduo. The analysis of hysteresis current control strategy of three-phase four-wire APF based on the unified mathematic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 85-91(in Chinese).
- [18] 陈增禄, 任记达, 毛惠丰, 等. 新型双重 D 调制电流跟踪控制方法的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 62-65.
Chen Zenglu, Ren Jida, Mao Huifeng, et al. A novel method of double delta modulation for current tracing control[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 62-65(in Chinese).
- [19] 侯世英, 郑含博, 周维维, 等. 基于单周控制的三相直侧串联型有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 52-56.
Hou Shiying, Zheng Hanbo, Zhou Luowei, et al. A novel three-phase DC side series active power filter with one cycle control[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 52-56(in Chinese).
- [20] Zhou Luowei, Du Xiong, Hou Shiying. A comprehensive analysis of one cycle controlled single-phase DC side active power filter [C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, Hong Kong, China, 2005.
- [21] 徐明, 周林, 王伟, 等. 单相有源电力滤波器的单周控制策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 81-86.
Xu Ming, Zhou Lin, Wang Wei, et al. A survey on one-cycle control strategy for single-phase active power filter[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 81-86(in Chinese).
- [22] 许德伟, 朱东起, 黄立培, 等. 电力半导体器件和装置的功率损耗研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(3): 5-8.
Xu Dewei, Zhu Dongqi, Huang Lipei, et al. Power loss analysis of power semiconductor devices and power converters[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(3): 5-8(in Chinese).
- [23] Nayak O, Irwim G, Neufeld A. Enhances electromagnetic transients simulation tools[J]. IEEE Computer Application in Power, 1995, 8(1): 17-22.



曾江

收稿日期: 2009-11-03。

作者简介:

曾江(1972—), 男, 博士, 主要研究方向为配电网自动化、电能质量分析与控制, E-mail: zengxy@scut.edu.cn。

(责任编辑 沈杰)