

基于预测直接电流控制的 APF 死区效应补偿

张波¹, 唐昆明², 周小平¹, 王江¹

(1. 重庆新世纪电气公司, 重庆 400041; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030)

摘要: 在研究了有源电力滤波器(APF)滞环控制死区效应对补偿效果影响的基础上, 分析了目前死区效应补偿的现状, 并结合 Matlab 仿真波形和样机的实验数据, 明确了死区效应影响产生的原因以及与之相关的控制变量。针对三相三线制系统, 将交流电机控制领域所采用的预测直接电流空间矢量控制算法, 用于有源电力滤波器逆变单元的控制, 并实际应用于 33 kVA 有源滤波器样机, 实验结果验证了控制算法能有效地降低死区效应的影响, 提高 APF 跟踪指令电流的控制精度和补偿效果。

关键词: APF; 死区效应; 无死区单边调制; 预测直接电流控制; 电压空间矢量

Dead-time effect compensation of APF based on predictive direct current control

ZHANG Bo¹, TANG Kun-ming², ZHOU Xiao-ping¹, WANG Jiang¹

(1. Chongqing New Century Co., Ltd, Chongqing 400041, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: On the basis of analyzing the APF's dead-time effect with hysteresis current control, this paper describes the current status of dead-time effect compensation. With simulation analysis and experimental data, the reason of dead-time effect as well as control variables associated are confirmed. For the three-phase three-wire system, voltage vector control algorithm based on predictive direct current in the APF's inverter control is used in AC motor control field. Furthermore, the algorithm is applied to the 33 kVA APF prototype. The experimental result and data analysis verify that the method is feasible and effectual in reducing the dead-time effect and can enhance the control precision and compensation effect of APF when tracking control current.

Key words: APF; dead-time effect; single side modulation without dead-time; predictive direct current control; voltage vector control

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0054-05

0 引言

近年来有源电力滤波器(APF)作为一种用于电力系统动态谐波治理、补偿无功功率、抑制闪变的新型电力电子装置, 对于提高电能质量, 促进电网安全、稳定运行具有重要作用。传统的 APF 逆变单元控制通常采用电流型控制算法, 主要有三角载波调制和滞环控制两种方式, 对于这类电流型控制算法, 为防止同一桥臂开关管直通, 必须设置死区时间, 死区时间的加入对补偿效果的影响尤为突出, 极大地降低了电流补偿精度, 影响最终的补偿效果, 为减小死区效应的影响, 不同文献均提出了解决方法^[1-4], APF 死区效应补偿主要分为电流反馈型补偿和无死区补偿, 电流反馈型补偿是通过设置死区补偿电路对控制器输出脉冲宽度进行调节, 从而改善

死区效应的影响, 而无死区补偿是根据逆变电路的工作特性, 通过对同一桥臂上、下开关管的单独控制, 来改变 APF 的输出电流大小, 实现无死区控制, 但是由于 APF 输出电流的特殊性, 在电流过零点附近需要加入一个带死区工作区域, 否则会造成 IGBT 频繁穿越过零点, 工作频率太高。

电压空间矢量控制由于零电压矢量的存在, 控制更灵活, 具有优良的控制特性, 但是传统的电压空间矢量控制由于其计算过程较为复杂, 对 APF 这种实时性要求高的领域, 工程应用较少。因此必须对传统电压空间矢量进行改进, 各种基于电压空间矢量消除死区效应的算法被提出^[5-8], 也取得了很好的效果, 能够有效的消除死区效应的影响, 提高控制精度, 预测电流控制^[9-10]直接将参考信号和实际信号之间的误差作为控制信号, 在交流电机控制领

域取得了良好的电流控制精度和较低的 IGBT 开关频率,比传统电压空间矢量控制,扇区选择更简单,计算量小,适合在 APF 这种实时性要求高的领域应用,由于 APF 输出滤波电感可等效于三相电机绕组,所以预测电流控制算法同样适用于 APF 的控制。

本文在分析了死区效应对 APF 补偿效果影响的基础上,介绍了目前 APF 死区效应补偿的控制算法和现状,并且将用于交流电机控制的预测直接电流控制算法引入 APF 的控制,通过将控制算法在 33 kVA 工程样机上的使用,试验数据验证了该算法能够有效提高补偿精度,减小死区时间的影响,提高了 APF 补偿效果。

1 死区效应影响分析

三相三线制 APF 典型主电路结构如图 1 所示,主电路采用传统的 IGBT 三相桥,直流侧大电容储能,输出端接滤波电感 L_F 、 R_F 为滤波电感等效串联阻抗,逆变单元控制算法通常采用滞环电流控制,这种控制算法动态响应快速、负载适应性好、实现方式简单、易于工程实现。

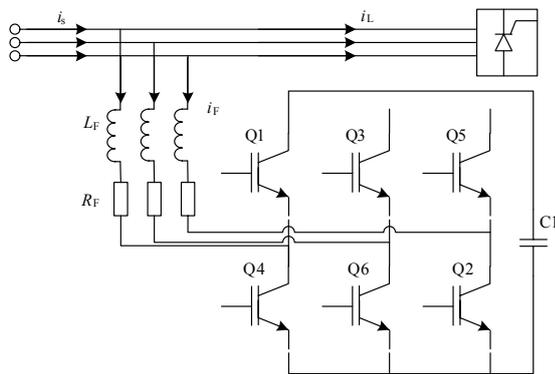


图 1 三相三线制 APF 主电路结构

Fig.1 Main circuit of three-phase four-line APF

图 2 为三相三线制系统 APF 样机试验数据,主电路结构如图 1 中电路,APF 逆变单元采用传统的滞环电流控制算法,实验相关参数见第 3 节。

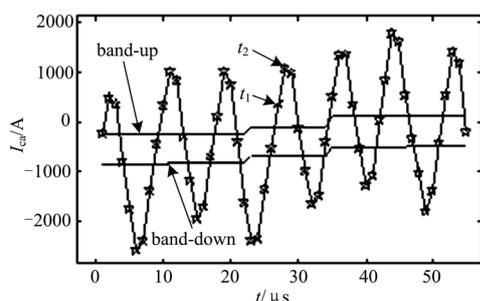


图 2 补偿电流采样波形

Fig.2 Waveforms of sampling compensation current

图 2 为 CCS3.1 采样得到的补偿电流数据,星号表示采样点,在 t_1 时刻,APF 补偿电流已经超过滞环带宽上边界,此时应该控制电流减小,但是由于死区时间的存在,DSP 在发出控制指令后,补偿电流不能够立即减小, t_2 采样点电流仍然在上升,经过 $5.12 \mu\text{s}$ 死区时间才开始真正降低,实际的补偿电流已经超出滞环带宽上边界很多,尽管 DSP 采样频率为 150 kHz,可以很快检测到补偿电流超出带宽,但是补偿电流仍然会超出带宽 2 个采样点。尤其是在直流侧电压较高,并且输出滤波电感 L_F 电感量较小的情况下,会造成 APF 在死区时间内,输出补偿电流迅速上升,远远超过限定的滞环带宽,使得 APF 补偿电流与参考值的误差增大,对于小容量 APF,补偿电流基数小,导致相对误差大,补偿效果受影响比较明显。

对 IGBT 三相桥电路,其中任意一相建立回路方程可得:

$$L_F \frac{di_F}{dt} = V_s + V_F - i_F \cdot R_F \quad (1)$$

其中: V_s 为电网电压; i_F 为 APF 输出电流; V_F 为 APF 输出电压; L_F 为 APF 输出滤波电感。

由式 (1) 可以看出,在直流侧电压一定的情况下,死区期间, V_F 为零,输出电流变化率的快慢完全依靠输出滤波电感 L_F 来抑制,电感量的大小直接决定了补偿电流超出参考值的范围大小,实际上传统滞环控制的误差带宽限值作用已经失效。死区时间的存在直接导致了 APF 跟踪参考电流值精度的降低,极大地降低了补偿效果,因此必须对死区效应的影响进行补偿。

2 预测直接电流控制

传统的滞环电流控制、三角载波调制等电流型控制方式是基于三相电流单独控制,每一个 IGBT 桥臂控制一路电流,上下管始终处于互补工作状态,为防止上下管直通,必须设置安全死区时间,因此死区效应的影响在所难免。预测直接电流控制是基于电压空间矢量,把整个 IGBT 三相桥作为一个整体来控制,同时还增加了零电压的输出,通过零矢量 (111)、(000) 的灵活选择能够起到很好的调节作用,并且有效的降低死区效应的影响,电压空间矢量在正交坐标系的分布见图 3。

那么令 $T_{on}=T_s$ 。

通过 Matlab 对上述控制算法进行仿真分析,控制逻辑的实现使用 Matlab 自带 C-MEX 函数编写,APF 非线性负载为三相整流桥带阻感负载,设计容量 33 kVA,仿真波形如图 5。

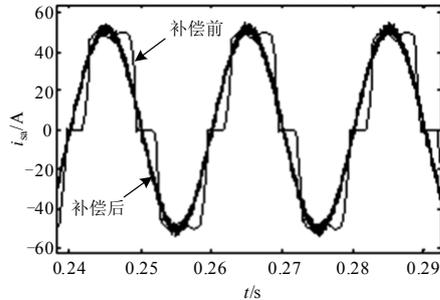


图 5 电网电流补偿前后波形

Fig.5 Source current waveforms before and after compensation

图 5 为补偿前后电网电流波形对比,可以看到,补偿后电网电流正弦性好,相位和波形同时都得到了很好补偿。

图 6 是对电网电流 FFT 分析图,补偿后,各次谐波基本消除,电网电流畸变率 $THD_i = 0.58\%$ 。

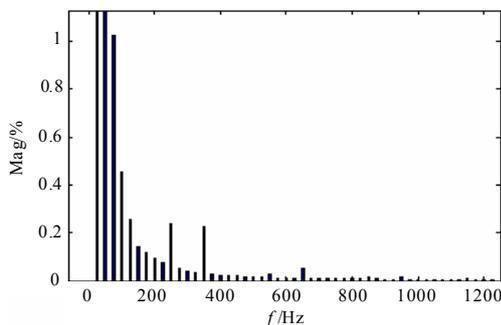


图 6 电网电流波形 FFT 分析

Fig.6 FFT analysis of source current

图 7 为采用滞环控制情况下实际电流与参考电流误差值,可以看到在加入死区后,电流误差范围超过设定的滞环带宽 3 A,在同等情况下,图 8 为采用预测电流控制后的电流误差值,电流误差值在

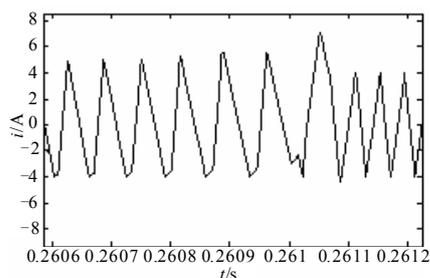


图 7 滞环控制电流误差

Fig.7 Current error of hysteresis control

2 A 左右波动,可见通过预测电流控制算法能很好的补偿死区效应的影响,提高 APF 补偿电流跟随参考信号的精度,优化 APF 补偿效果。

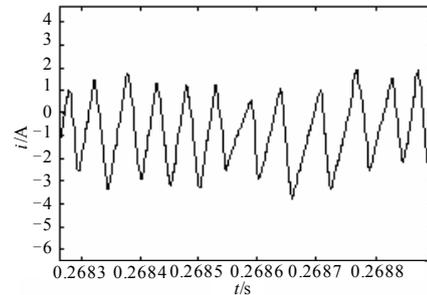


图 8 预测电流控制电流误差

Fig.8 Current error of predictive current control

3 实验结果

试验工程样机容量 33 kVA,控制系统采用双 DSP2812,功率单元采用三菱 IGBT 模块 CM150DY-34A,滞环带宽 2 A,对应 DSP 转换后数字量 300,输出滤波电感 1 mH,直流侧电压 750 V,直流侧电容 12 000 μ F,采样频率 150 K,死区时间 5.12 μ F。

图 9 为预测电流空间矢量控制补偿后电网电流波形。补偿后电流畸变率为 4.2%,采用传统滞环控制样机投入后电网电流畸变率通常在 5%~7%之间波动。

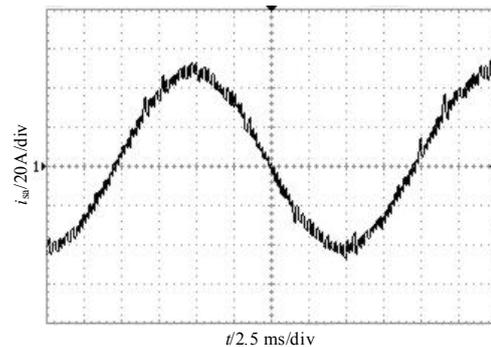


图 9 预测电流控制电网电流波形

Fig.9 Waveforms of source current with predictive current control

4 结语

本文通过分析 APF 电流型控制算法及死区效应对补偿效果所带来影响,针对三相三线制系统,引入基于预测电流控制的空间矢量算法用于 APF 逆变单元的控制,并通过仿真和实验波形验证了该算法的可行性和有效性,对消除 APF 系统死区效应

影响, 提高电流补偿具有很好的效果。

参考文献

[1] Choi Jung-Soo. A novel dead time minimization algorithm of the PWM inverter[J]. 34th IAS, 1999 (S): 2188-2193.

[2] 夏向阳, 罗安. 有源滤波器中逆变器的死区效应与补偿方法[J]. 高电压技术, 2006 (8): 73-75.
XIA Xiang-yang, LUO An. Dead-time effects and compensation strategy of inverters in active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2006 (8): 73-75.

[3] 余凤兵, 梁冠安, 钟龙翔. 并联型有源滤波器的死区效应及其补偿策略研究[J]. 通信电源技术, 2006 (5): 4-7.
YU Feng-bing, LIANG Guan-an. Study on dead-time effect of the parallel active power filter and its compensation strategies[J]. Telecom Power Technologies, 2006 (5): 4-7.

[4] 范瑞祥, 罗安. 并联型APF死区效应分析及对策[J]. 电机与控制学报, 2009 (1): 73-77.
FAN Rui-xiang, LUO An. Analysis and countermeasures of dead-time effect in shunt active power filter[J]. Electric Machines and Control, 2009 (1): 73-77.

[5] WU Mao-gang, ZHAO Rong-xiang, TANG Xin-zhou. Dead-time effects analysis and compensation of SPWM and SVPWM inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 101-105.

[6] Zitzelsberger J, Hofmann W. Space vector modulation with current based dead time compensation using

Kalman-filter[C].//IEEE industrial electronics. IECON 2006 - 32nd Annual Conference. 2006.1533-1538.

[7] 张少锋, 高艳霞, 徐妍萍. 一种基于空间矢量PWM的死区效应补偿策略研究[J]. 变频器世界, 2009(3): 44-47.
ZHANG Shao-feng, GAO Yan-xia, XU Yan-ping. Research on dead-time compensation strategy based on SVPWM[J]. The World of Inverters, 2009(3): 44-47.

[8] 荆涛, 范蟠果. 一种新颖的空间矢量死区补偿算法研究[J]. 电力电子技术, 2008(3): 84-86.
JING Tao, FAN Pan-guo. Research on a novel dead-time compensation method with SVPWM[J]. Power Electronics, 2008(3): 84-86.

[9] Summers T J, Betz R E. Dead-time issues in predictive current control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(3): 835-844.

[10] Ambrozic V, Fiser R, Nedeljkovic D. Direct control-A new current regulation principle[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003,18(1).

收稿日期: 2009-07-24; 修回日期: 2009-10-23

作者简介:

张波(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术; E-mail: zhangbos@126.com

唐昆明(1959-), 男, 副研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化。

(上接第 53 页 continued from page 53)

[6] 杜一, 张沛超, 郁惟镛, 等. 基于故障录波数据的分布式电网故障诊断系统[J]. 继电器, 2003, 31 (1): 26-29, 38.
DU Yi, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong, et al. A distributed power system fault diagnosis system based on recorded fault data[J]. Relay, 2003, 31 (1): 26-29, 38.

[7] 许仪勋, 陆拯, 郭志忠. 基于遗传算法的电力系统分层信息故障诊断方法[J]. 继电器, 2000, 28(10): 15-18.
XU Yi-xun, LU Zheng, GUO Zhi-zhong. Layered information fault diagnosis based on genetic algorithm[J]. Relay, 2000, 28 (10): 15-18.

[8] 丁剑, 白晓民, 王文平, 等. 电力系统中基于 PMU 同步数据的应用研究综述[J]. 继电器, 2006, 34 (6): 78-84.
DING Jian, BAI Xiao-min, WANG Wen-ping, et al. Overview of application researches based on synchronous data measured by PMUs in power system[J]. Relay, 2006, 34 (6): 78-84.

[9] 文福拴, 韩祯祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法, 第一部分: 模型与方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10 (3): 1-7.

WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, TIAN Lei, et al. An analytic model and genetic algorithm based methods for fault diagnosis in power systems, part 1: the model and method[J]. Proceeding of the EPSA, 1998, 10 (3): 1-7.

[10] 文福拴, 钱源平, 韩祯祥, 等. 利用保护和断路器信息的电力系统故障诊断与不可观测的保护的状态识别的模型与 Tabu 搜索方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13 (5): 1-8.
WEN Fu-shuan, QIAN Yuan-ping, HAN Zhen-xiang, et al. A tabu search based approach to fault section estimation and state identification of unobserved protective relays in power systems using information from protective relays and circuit breakers[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 1998, 13 (5): 1-8.

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-09-30

作者简介:

戴志辉(1980-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制;

李强(1980-), 男, 本科, 工程师, 从事电力系统变电一次、二次设计工作。