

三电平有源电力滤波器死区效应分析与补偿

黄海宏, 江念涛, 黄楠楠, 王海欣

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对有源电力滤波器(APF)的死区效应问题,在三电平 APF 等效开关电路的基础上,从死区效应生成原理出发,结合三电平开关状态方程,推导出死区时间与电流跟踪误差之间的线性关系,阐释了死区时间带来的影响。提出了一种死区补偿方法,给出了补偿方法的控制原理图,并从控制系统的闭环特性角度分析了系统的性能。对比了无死区系统与死区补偿系统的性能,发现后者具有更好的稳态性能。通过仿真和实验结果表明所提方法能有效抑制死区效应。

关键词: 三电平有源电力滤波器; 死区效应; 状态方程; 跟踪误差; 闭环特性; 有源滤波器

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.016

0 引言

随着现代社会的飞速发展,电能质量问题日益凸显。作为改善电能质量最有效的治理方式,有源电力滤波器(APF)的市场需求越来越大。由于 APF 主电路的开关器件不是理想器件,为防止同一桥臂功率管直通,必须在互补的 2 个驱动信号中设置一段死区时间,以保证互补开关管的先关断后导通。在死区时间内,输出波形不受逻辑信号的控制,同时在较高的开关频率下,APF 的补偿性能^[1-5]会严重降低。死区效应^[6-7]使得脉冲宽度调制(PWM)信号不能实时准确地施加到开关管的控制端,进而导致 APF 输出电流与期望值偏差较大。偏差中含有大量需要补偿的谐波成分,这导致 APF 输出的谐波电流的幅值与相位都有很大偏差,从而影响谐波补偿效果。

消除死区的方法有很多,如死区解耦控制方法、基于电流预测的死区补偿方法及基于单周控制的死区补偿方法^[7-10]。文献[8-9]提出基于电流预测的死区补偿方法,但由于高频噪声及电磁干扰的存在,增加了对电流极性的判断难度。若电流检测不准或滞后时间过长则会导致补偿不准,进而可能会使死区效应的影响加重。尤其对于具有较强电磁干扰的三电平 APF 而言,其补偿效应更不佳。现有文献中对死区效应补偿控制的研究比较多,文献[10]提出一种不直接判断电流极性的新方法,该方法根据谐振控制器锁相环的网侧电压观测值间接实现对电流方向的准确判断,进而实现死区补偿,但由于三电平系统中存在严重的电磁干扰同样会对网侧电压采样造成影响,补偿效果仍不佳。文献[11]提出一种新型的自适应死区补偿控制方法,该控制方法无需检测电流极性,在同步旋转坐标系下,通过 PI 控制器调节

扰动观测器观测出的 q 轴扰动电压,获得死区补偿时间,进而基于空间矢量脉宽调制(SVPWM)实现死区补偿。但该控制策略建立了自适应观测器,系统结构复杂度变高,加大了控制难度,且三电平 SVPWM 有 27 个矢量,控制上会更加复杂。

为此,本文深度研究了死区效应对 APF 电流跟踪的影响。从三电平 APF 的状态方程出发,推导出电流跟踪误差与死区时间的数学关系,同时结合死区效应产生原理,阐释了死区时间会导致电流跟踪误差增大的原因。在此基础上,提出了 PI 与重复控制^[12-16]相结合的死区补偿方法,该方法引入超前矫正环节对死区进行补偿,在保证补偿前系统具有快速性能的同时,大幅降低了死区效应给 APF 带来的影响。

1 死区效应分析及补偿控制

本文基于 LCL 三电平 APF 的拓扑对死区效应开展讨论分析,结合开关状态方程与死区效应原理图,推导出由于死区带来的电流跟踪误差与死区时间之间的代数关系。图 1 给出了三电平 APF 等效开关电路图。

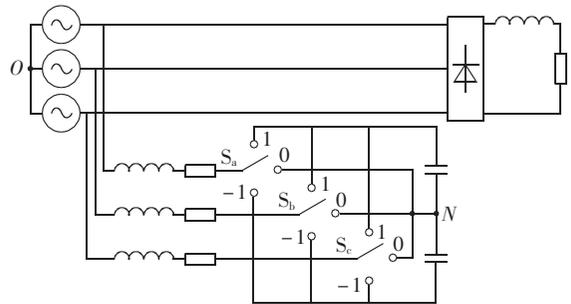


图 1 三电平 APF 等效开关电路图

Fig.1 Equivalent circuit schematic diagram of three-level APF

1.1 死区时间影响分析

根据图 1 所示的三电平 APF 等效开关电路,以单电感滤波为例进行讨论,定义开关函数如下:

收稿日期:2016-08-02;修回日期:2017-07-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177037)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177037)

$$S_{ij}(i=-1,0,1;j=a,b,c)=\begin{cases} 1 & \text{导通} \\ 0 & \text{关断} \end{cases} \quad (1)$$

设节点 N 与 O 间的电压为 u_{NO} , 根据三电平 APF 数学模型得到 a 相的开关状态方程如下所示(为方便分析,忽略线路等效阻抗)。

$$L_S \frac{di_a}{dt} = e_a - u_{aN} - u_{NO} \quad (2)$$

$$u_{aN} = U_{dk1} S_{-1a} + U_{dk2} S_{1a} \quad (3)$$

$$u_{NO} = \frac{1}{3} U_{dk1} (S_{-1a} + S_{-1b} + S_{-1c}) + \frac{1}{3} U_{dk2} (S_{1a} + S_{1b} + S_{1c}) \quad (4)$$

其中, L_S 为 APF 输出侧滤波电感; i_a 为 APF 输出侧 a 相电流; e_a 为网侧 a 相电压; u_{aN} 为 APF 输出侧 a 相对直流侧中点电位的电压; U_{dk1} 为直流侧正极对中点电位的电压; U_{dk2} 为直流侧中点电位对负极的电压。

图 2 给出了死区效应原理图。定义流入 APF 的电流方向为正, $i > 0$ 时只考虑输出电平在 1 电平与 0 电平之间切换的阶段, 故只给出 a 相 1、2 管的驱动信号 G_1 和 G_2 ; $i < 0$ 时只考虑输出电平在 -1 电平与 0 电平之间切换的阶段, 故只给出 a 相 3、4 管的驱动信号 G_3 和 G_4 。从图中可明显看出, 死区时间的加入引起了实际电流跟踪误差变大。

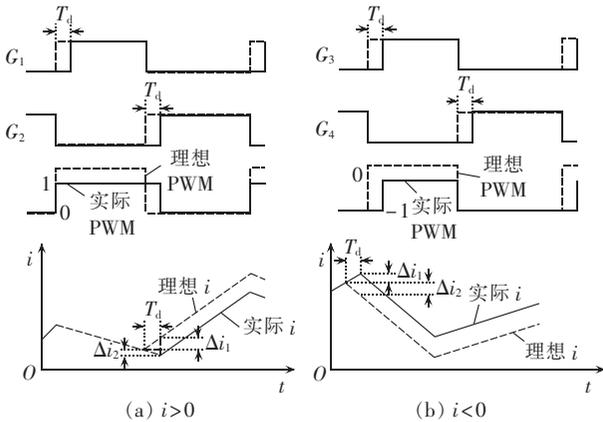


图 2 死区生成原理

Fig.2 Dead time generation principle

$i > 0$ 时, 不考虑直流侧上下电容电压的偏差, 且认为这个过程中其他两相开关状态及电网电压不变。

当 $S_{1a}=0$ 时, 有:

$$L_S \frac{di_a}{dt} = e_a + \frac{1}{3} U_{dk1} (S_{-1b} + S_{-1c}) + \frac{1}{3} U_{dk2} (S_{1b} + S_{1c}) \quad (5)$$

当 $S_{1a}=1$ 时, 有:

$$L_S \frac{di_a}{dt} = e_a + \frac{1}{3} U_{dk1} (S_{-1b} + S_{-1c}) + \frac{1}{3} U_{dk2} (S_{1b} + S_{1c}) - \frac{1}{3} U_{dc} \quad (6)$$

其中, U_{dc} 为直流侧电压。

T_d 期间, a 相 1、2 管的驱动均为低电平, 电流经 1、2 管的反并联二极管续流使 PWM 输出为高电平。加入死区前, 若 G_1 为高电平, 则 PWM 输出与 G_1 一致为高电平; 若 G_1 为低电平, 在 T_d 阶段开关函数值由

加入死区前 0 变成加入死区后 1, 故有 PWM 输出比 G_1 多 T_d 时长的 1 电平。根据死区原理图可得出实际电流与理论电流之间的偏差, 推导如下。

$$L_S \frac{di_2}{dt} = e_a + \frac{1}{3} U_{dk1} (S_{-1b} + S_{-1c}) + \frac{1}{3} U_{dk2} (S_{1b} + S_{1c}) \quad (7)$$

$$L_S \frac{di_1}{dt} = e_a + \frac{1}{3} U_{dk1} (S_{-1b} + S_{-1c}) + \frac{1}{3} U_{dk2} (S_{1b} + S_{1c}) - \frac{1}{3} U_{dc} \quad (8)$$

由式(8)减去式(7)得:

$$\Delta i = \Delta i_1 - \Delta i_2 = -\frac{1}{3} \frac{U_{dc}}{L_S} T_d \quad (9)$$

综上, $i > 0$ 时, 加入死区后, 实际电流输出值减小, 即电流幅值减小。

$i < 0$ 时, T_d 期间, a 相 3、4 管驱动均为低电平, 电流经 3、4 管反并联二极管续流使 PWM 输出为 -1 电平。加入死区前, 若 G_3 为高电平, 则 PWM 输出为 0 电平; 若 G_3 为低电平, 而 PWM 输出为 -1 电平, 故有 PWM 输出比 G_3 多 T_d 时长的 -1 电平。同理可得 $i < 0$ 时的实际电流与理想电流之间的偏差:

$$\Delta i = \frac{1}{3} \frac{U_{dc}}{L_S} T_d \quad (10)$$

同理可分析死区时间 T_d 对其他两相 PWM 输出脉宽的变化, 同样可推导得出与式(9)、(10)相同的结果。

综上所述, 由于 APF 正常工作时, 直流电压是近似不变的, 故电流跟踪误差与死区时间成正比。死区时间越大, 电流跟踪误差就越大; 死区时间越小, 电流跟踪误差就越小。

1.2 死区补偿控制

根据上述分析可知, 死区效应加大了电流跟踪误差, 从而使得网侧电流畸变严重, 补偿效果不佳。本文从电流控制设计角度出发对死区效应进行补偿控制。图 3 给出了未加死区补偿控制时的电流环运算模型。图中, i^* 为指定电流; K_p 为比例系数; $u_i(s)$ 为输入电流; $u_c(s)$ 为 LCL 滤波器的电容电压; L_1 为网侧电感; L_2 为桥臂侧电感; $i_1(s)$ 为网侧电感电流; $i_2(s)$ 为桥臂侧电感电流; $i_c(s)$ 为 LCL 滤波器的电容电流; R 和 C 分别为 LCL 滤波器的电阻和电容; $P(s)$ 为被控对象。

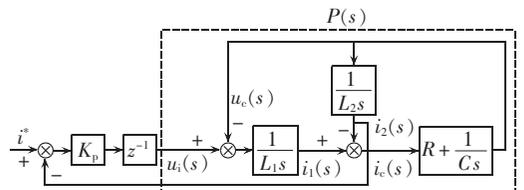


图 3 电流环运算模型

Fig.3 Operational model of current loop

上述电流环模型并没有考虑死区效应这一干扰信号对电流环控制带来的影响, 因此采用常规控制

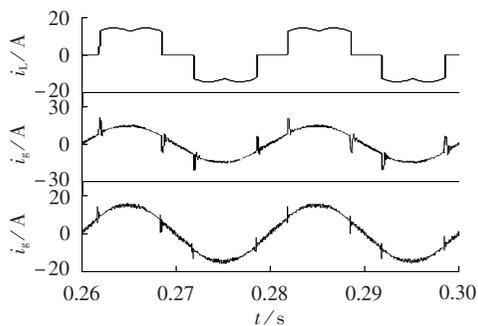


图 6 网侧电流与负载电流波形

Fig.6 Waveforms of grid-side current and load current

图 7 给出了无死区补偿的电流环波特图。从图中可以看出,系统在 LCL 谐振频率(3.11 kHz)处闭环增益为 2.14 dB,增益较大,不能对谐振峰进行有效的衰减。图 8 给出了加入死区效应补偿后的电流环波特图。从图中可以看出,在谐振频率及以上频率处闭环增益均在 0 以下,说明系统可以对谐振峰及高频谐波进行有效的衰减,且保持原系统足够大的带宽,以保证系统响应的快速性。

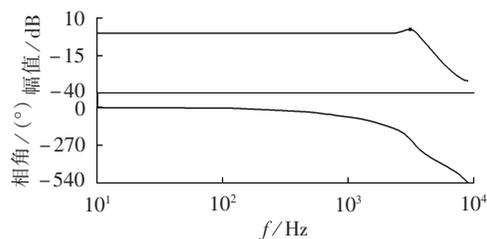


图 7 无死区补偿的电流环 Bode 图

Fig.7 Bode diagram of current loop without dead-time compensation

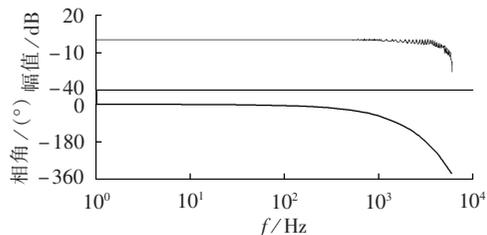


图 8 带死区补偿的电流环 Bode 图

Fig.8 Bode diagram of current loop with dead-time compensation

综上所述,通过对比仿真结果,可以得出结论:死区效应加大了跟踪误差,较未加死区系统,加大了网侧电流畸变率;本文采用的死区补偿控制消除了死区带来的影响,使得实际电流接近零误差跟踪指令电流;加入死区补偿控制后系统依然具有补偿前系统的响应带宽,保证了系统响应的快速性。

3 实验结果分析

为验证上述死区补偿控制在实际工程中的有效性,搭建 10 kW 二极管箝位型三电平并联型 APF 实验平台,控制芯片选用 DSP TMS320F2812。采用

LCL 滤波器,设置 $L_1 = 1 \text{ mH}$, $L_2 = 0.2 \text{ mH}$, $C = 20 \text{ } \mu\text{F}$, 直流侧电压为 730 V。电路主拓扑如图 9 所示。图 10 给出了死区补偿前后 a 相网侧电压 u_g 、网侧电流 i_g 的波形。

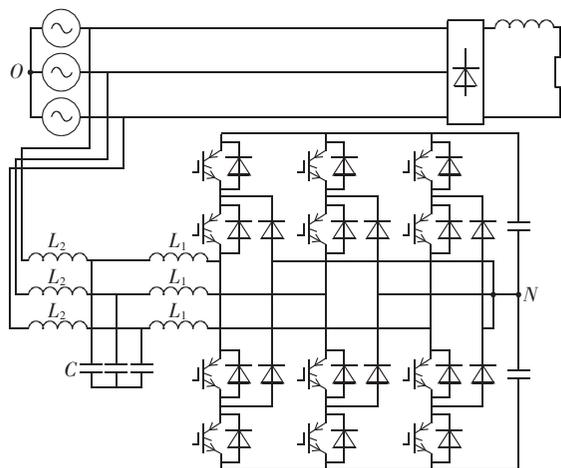
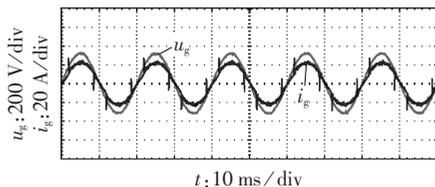
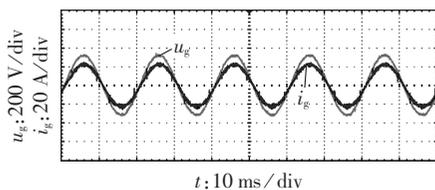


图 9 LCL 三电平并联型 APF 主电路拓扑

Fig.9 Main circuitry topology of LCL three-level APF



(a) 补偿前网侧电压、电流波形



(b) 补偿后网侧电压、电流波形

图 10 死区补偿前后网侧电压、电流波形

Fig.10 Waveform of grid side current and voltage with and without dead-time compensation

从图 10 可以看出,补偿后的波形具有很小的电流畸变率。在电流尖峰处,补偿前由于死区效应等因素导致输出波形在电平跳变处有很大的尖峰值,跟踪误差较大;而补偿后该现象得到极大的改善,尖峰值显著降低。

4 结论

根据 APF 的工作特性,本文详细讨论了死区效应生成原理,从三电平 APF 开关状态方程出发,推导出电流跟踪误差与死区时间之间的代数关系,阐释了死区时间对 APF 的补偿性能的影响。在此基础上提出了基于 PI 与重复控制相结合的补偿方式,给出了控制环节设计并分析了其作用。通过仿真对比,显示了具有死区补偿性能的系统兼备快速性与较好的稳态性。最后给出了补偿后的电流仿真波形与实

验波形,结果显示所提方法能很好地抑制死区效应带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 魏学良,戴珂,方昕,等. 三相并联型有源电力滤波器补偿电流性能分析与改进[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):113-119.
WEI Xueliang,DAI Ke,FANG Xin,et al. Analysis and improvement of current performance of three phase shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(28):113-119.
- [2] 陈国柱,吕征宇,钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):17-21.
CHEN Guozhu,LÜ Zhengyu,QIAN Zhaoming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(9):17-21.
- [3] 张东江,仇志凌,李玉玲. 基于 LCL 滤波器的高稳态性能并联有源电力滤波器[J]. 电工技术学报,2011,26(6):137-143.
ZHANG Dongjiang,CHOU Zhiling,LI Yuling. High performance parallel active power filter based on LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(6):137-143.
- [4] 王正仕,陈辉明. 具有无功和谐波补偿功能的并网逆变器设计[J]. 电力系统自动化,2007,31(13):67-71.
WANG Zhengshi,CHEN Huiming. Design of grid-tied inverters with the functions of reactive and harmonic compensation[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(13):67-71.
- [5] MATTAVELLI P. A closed-loop selective harmonic compensation for active filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001,37(2):81-89.
- [6] 吴茂刚,赵荣祥,汤新舟. 正弦和空间矢量 PWM 逆变器死区效应分析与补偿[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):101-105.
WU Maogang,ZHAO Rongxiang,TANG Xinzhou. Dead-time effect analysis and compensation of SPWM and SVPWM inverter [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):101-105.
- [7] URASAKI N,SENJYU T,UEZATO K. Adaptive dead-time compensation strategy for permanent magnet synchronous motor drive [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(2):271-280.
- [8] 刘亮,邓明高,欧阳红林,等. 基于预测电流控制的 PWM 逆变器死区补偿方法研究[J]. 电工技术学报,2005,20(8):78-83.
LIU Liang,DENG Minggao,OUYANG Honglin,et al. A method to compensate the dead time of PWM inverter based on predictive current control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(8):78-83.
- [9] 张冲,王鹿军,金利祥,等. 基于电流预测的三电平死区补偿方法[J]. 太阳能学报,2014,35(9):1581-1585.
ZHANG Chong,WANG Lujun,JIN Lixiang,et al. A method to three-level dead-time compensation based on current prediction [J]. Acta Energaie Solaris Sinica,2014,35(9):1581-1585.
- [10] 赵鲁,李耀华,葛琼璇,等. 单相 PWM 整流器死区补偿方法[J]. 电机与控制学报,2015,19(6):6-14.
ZHAO Lu,LI Yaohua,GE Qiongxuan,et al. Dead time compensation method of single-phase PWM rectifier [J]. Electric Machines and Control,2015,19(6):6-14.
- [11] 周华伟,温旭辉,赵峰,等. 一种新颖的电压源逆变器自适应死区补偿策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(24):26-32.
ZHOU Huawei,WEN Xuhui,ZHAO Feng,et al. A novel adaptive dead-time compensation strategy for VSI[J]. Proceedings of the CESS,2011,31(24):26-32.
- [12] 于晶荣,粟梅,孙尧. 有源电力滤波器的改进重复控制其优化设计[J]. 电工技术学报,2012,27(2):236-241.
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):236-241.
- [13] 武健,何娜,徐殿国. 重复控制在并联有源滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):66-71.
WU Jian,HE Na,XU Dianguo. Application of repetitive control technique in shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(18):66-71.
- [14] 王成智,邹旭东,许赞,等. 采用改进重复控制的大功率电力电子负载[J]. 中国电机工程学报,2009,29(12):1-9.
WANG Chengzhi,ZOU Xudong,XU Yun,et al. Improved repetitive control scheme for power electronic load[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(12):1-9.
- [15] 王果,周末,常文寰. 适用于高速铁路的三相四开关型滤波器的电流重复控制设计[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):71-77.
WANG Guo,ZHOU Mo,CHANG Wenhuan. Repetitive current control of three-phase four-switch APF for high-speed railway [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):71-77.
- [16] 黄海宏,王钰,许若冰,等. 双环重复控制三相四线制有源电力滤波器[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):40-44.
HUANG Haihong,WANG Yu,XU Ruobing,et al. Three-phase four-wire active power filter with dual-loop repetitive control [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):40-44.

作者简介:



黄海宏

黄海宏(1973—),男,江西清江人,教授,博士,主要研究方向为电力电子技术(E-mail: hhh@ipp.ac.cn);

江念涛(1991—),男,河南信阳人,硕士,主要研究方向为有源电力滤波器;

黄楠楠(1993—),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术;

王海欣(1976—),女,河南南阳人,高级实验师,主要研究方向为 DSP 应用技术。

Analysis and compensation of dead-time effect of three-level active power filter

HUANG Haihong,JIANG Niantao,HUANG Nannan,WANG Haixin

(School of Electrical Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China)

Abstract: In view of the dead-time effect of APF(Active Power Filter),the generation principle of the dead-time effect is analyzed on the basis of three-level switching state equations and three-level APF equivalent switching circuit. The linear relationship between the dead-time and the current tracking error is derived,and the effect of dead-time is illustrated. A dead-time compensation approach is proposed,and its control principle diagram is given. The performance of the system is analyzed in aspects of closed-loop characteristics. Comparisons between the system with and without dead-time compensation indicate that with dead-time compensation,the system has better steady state performance. Simulative and experimental results demonstrate that the proposed method can effectively suppress the dead-time effect.

Key words: three-level active power filter; dead-time effect; state equation; tracking error; closed-loop characteristic; active filters