

APF 逆变器中死区效应研究

范瑞祥,周腊吾,肖红霞

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)作为一种输出谐波的电力电子装置,其主电路中功率器件死区的存在将对整体的滤波补偿效果产生消极影响。从幅值和相位上分别对死区效应在谐波电流输出中的影响进行了分析,提出了死区补偿方法。通过对输出电流方向的判断,在一种新的改进规则采样法基础上进行脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation),以抵消死区效应对输出产生的消极影响,仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 有源电力滤波器; 死区补偿; 脉宽调制逆变器

中图分类号: TM 13;TM 76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)02-0037-03

0 引言

有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)是一种用于动态抑制谐波的新型电力电子装置,其基本工作原理是检测出补偿对象的谐波电流后,通过控制作为主电路的脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)逆变器发出大小相同方向相反的谐波进行补偿。由于 PWM 逆变器主电路中的功率开关元件不是理想开关,为防止逆变器发生直通故障,必须在其驱动信号中设置一段死区时间 t_d ,以保证同一桥臂上、下两功率管能先关断后开通。

本文分析了死区效应对 APF 中主电路逆变器谐波输出的影响,提出一种补偿死区效应的方法^[1-4],仿真结果表明,文中提出的方法是有效的。

1 APF 主电路中死区效应分析

本文分析中假定主开关器件是理想器件,即不考虑开关器件固有的开关死区效应,只讨论控制信号中设置的死区产生的控制死区效应。如图 1 所示(图中 V_{T1}, V_{T2} 为 IGBT),以 a 相桥臂为例对 APF 中的逆变电路死区效应进行分析。设定死区时间为 t_d ,欲关断的 IGBT 与理想波形同时关断,而欲开通的 IGBT 延迟 t_d 开通。在死区时间内, V_{T1} 和 V_{T2} 都不导通,电流通过快速恢复二极管 V_{D1} 和 V_{D2} 续流。设电流由逆变器向外流出时 i_a 为正,电流流进逆变器时 i_a 为负,则在死区时间内输出电压的大小与电流 i_a 的方向有关。 i_a 为正时通过 V_{D2}

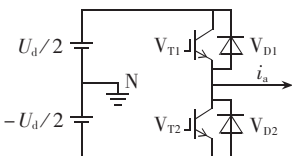


图 1 PWM 逆变器 a 相桥臂
Fig.1 The phase a bridge of PWM inverter

续流,输出电压为 $-U_d/2$; i_a 为负时通过 V_{D1} 续流,输出电压为 $U_d/2$ 。

如图 2 所示,给出了 a 相桥臂理想输出电压 u_{a0} 的波形(不含死区)和实际输出电压 u_a 的波形,给出了电流的方向以及 a 相误差电压 u_i 的输出。

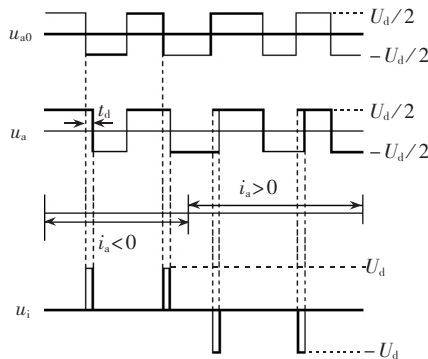


图 2 死区效应波形示意图

Fig.2 The sketch diagram of dead-time effect

由图 2 可知:

$$u_i = u_a - u_{a0} \quad (1)$$

作为实际电压输出和理想电压输出之间的差值,若忽略脉冲上升与下降的时间, u_i 可看作是矩形波,其脉冲宽度是确定不变的,即死区时间 t_d ,而幅值与电流的方向有关。当电流 i_a 为负时,幅值为 U_d ;当电流 i_a 为正时,幅值为 $-U_d$ 。为进一步有效分析由控制死区引起的误差电压存在对 APF 装置中逆变器输出的影响,作如下假设:

- a. 载波比足够高;
- b. 误差电压脉冲呈等间距分布。

在以上情况下,误差电压脉冲可用均值衡量,在时间轴上呈方波 ΔU 分布。

如图 3 所示,逆变器输出的谐波补偿电流 i_a 是 5 次和 7 次谐波的叠加,且仍以基波周期 T 为最小正周期,基波频率为 50Hz。

$$i_a = 3 \sin 5 \omega t + 6 \sin 7 \omega t \quad (2)$$

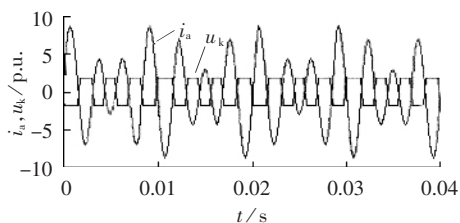


图 3 逆变器输出等效误差电压
与输出电流的关系

Fig.3 The relationship between output
equivalent error voltage and output
current of inverter

死区效应引起的等效误差方波是与谐波补偿电流反相的,其幅值 U_k 的大小可表示为

$$U_k = \frac{(t_k/T) N t_d U_d}{t_k} = \frac{N}{T} t_d U_d = f_c t_d U_d \quad (3)$$

式中 t_k 表示 i_a 为正或负的时间值; N 为一个基波周期 T 内的开关次数; f_c 为载波频率。

由式(3)可知,方波的幅值与逆变器输出电压和电流的大小无关,而与载波频率和死区时间成正比。对方波进行傅里叶分析,得到如图 4 所示的幅频谱图。

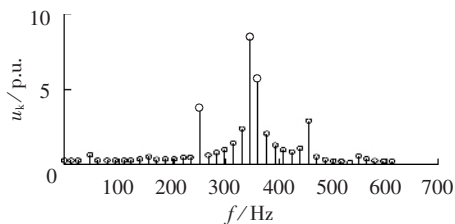


图 4 误差方波幅频谱图

Fig.4 The spectrum diagram of error square wave

由图 4 可以看出,误差方波中 5 次和 7 次谐波附近的幅值较大,这不可避免地会对逆变器的谐波输出产生一定的影响,同时,其他频率谐波的存在也将影响 APF 的补偿效果。

从相位分析,以 5 次谐波为例,若逆变器 5 次谐波输出的电压和电流的相角差为 ϕ , 可得如图 5 所示向量图。图中 U_{50}, I_{50} 和 U_5, I_5 分别表示理想和实际输出的 5 次谐波电压和电流。显然,死区效应对 APF 逆变器谐波输出的影响不仅体现在幅值上,而且也体现在相位上。

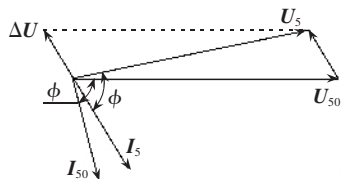


图 5 5 次谐波输出向量图

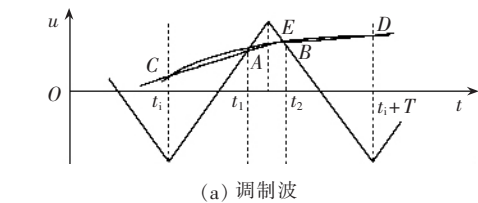
Fig.5 The vector diagram of output
five-order harmonic

综上分析可知,死区效应产生的误差电压中含有大量理想输出谐波补偿电流中主要存在的谐波成分,将对 APF 逆变器输出谐波电流的幅值和相位都会产生消极影响,从而降低 APF 装置的谐波补偿效果。

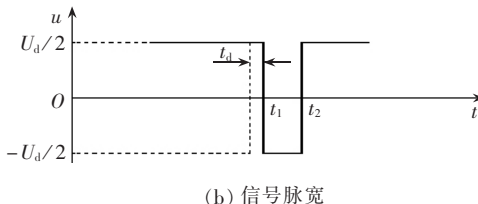
2 APF 主电路中死区效应补偿研究

APF 作为动态的谐波抑制装置,其主电路中 IGBT 死区的存在会恶化 APF 的输出,在载波频率 f_c 和死区时间 t_d 较大的情况下,死区效应对谐波抑制产生的影响将不可忽略,需要进行一定的补偿以保证 APF 的整体效果。

根据 APF 的基本工作原理,首先检测出补偿对象中存在的谐波电流,由具体控制算法得出调制信号送入逆变电路进行 PWM 调制。参考图 2 所示死区效应波形示意图,以逆变器 a 相桥臂为例,在 $i_a < 0$ 的情况下,死区效应的影响相当于上桥臂关断和下桥臂开通时间按理想时间滞后 t_d ,显然,在考虑死区效应的情况下要使输出为理想波形只需将调制得到的上桥臂关断时间点提前 t_d 即可。同样,在 $i_a > 0$ 的情况下,也只需将调制得到的下桥臂关断时间点提前 t_d 即可。采用如图 6(a)所示的改进规则采样法进行 PWM 调制,以进一步提高调制精度,改善 APF 装置谐波抑制的效果。



(a) 调制波



(b) 信号脉宽

图 6 PWM 调制 ($i_a < 0$)

Fig.6 Pulse width modulation ($i_a < 0$)

如图 6(a),设三角波的周期为 T ,峰值为 H ,在相邻两个三角波负峰时刻 t_i 和 $t_i + T$ 对调制信号采样而得到 C 点和 D 点,对三角波正峰时刻 $t_i + T/2$ 采样得到 E 点,设调制信号在 C, D 和 E 点的值分别为 S_1, S_2 和 S_3 。过 C 点和 E 点作一直线和三角波交于 A ,对应时刻为 t_1 ,过 D 点和 E 点作一直线和三角波交于 B ,对应时刻为 t_2 。分别作直线 CE, ED 和三角波两腰的方程,可得以下方程组:

$$\begin{aligned} \frac{t_1 - t_i}{S - S_1} &= \frac{T/2}{S_3 - S_1} \\ \frac{t_1 - t_i}{S + H} &= \frac{T/2}{2H} \\ \frac{t_2 - (t_i + T)}{S - S_2} &= \frac{-T/2}{S_3 - S_2} \\ \frac{t_2 - (t_i + T)}{S + H} &= \frac{-T/2}{2H} \end{aligned} \quad (4)$$

求解可得:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{T(H+S_1)}{4H-2(S_3-S_1)} + t_i \\ t_2 &= \frac{T(3H+S_2-2S_3)}{4H+2(S_2-S_3)} + t_i \end{aligned} \tag{5}$$

这样,在 $i_a < 0$ 的情况下,如图 6(b)所示,实际得到的 PWM 控制信号的脉宽数据应分别为

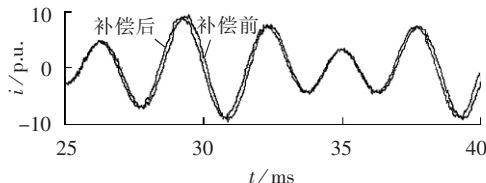
$$t_{10} = t_1 - t_d, \quad t_{20} = t_2 \tag{6}$$

同理,在 $i_a > 0$ 的情况下,实际得到的 PWM 控制信号的脉宽数据应分别为

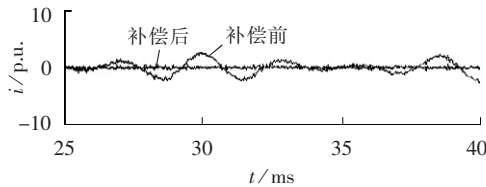
$$t_{10} = t_1, \quad t_{20} = t_2 - t_d \tag{7}$$

显然,在进行 PWM 调制时不仅需要在三角波正峰和负峰时刻对调制信号进行采样,同样也需要在三角波正峰时刻对输出谐波 i_a 进行采样,以判断正负从而确定脉宽数据 t_{10} 和 t_{20} 。

在开环情况下进行仿真,设输出电流为式(2)所示的 i_a ,得到如图 7 所示死区补偿前后的对比波形。



(a) 死区补偿前后输出电流



(b) 死区补偿前后输出电流与理想输出的差值

图 7 死区补偿前后波形对比

Fig.7 The contrast of waves before and after dead-time effect compensation

显然,通过上述思路对死区进行补偿使得输出谐波电流更接近理想状况。

3 结论

APF 主电路中 IGBT 死区的存在对输出谐波的影响主要体现在幅值和相位上,在载波频率较高而

输出谐波电流较小的情况下,死区效应对输出产生较大的影响,降低 APF 的谐波补偿效果。在采用改进规则采样法进行 PWM 调制过程中,可通过输出电流的正负判断对死区进行补偿,仿真表明该方法能够有效消除死区效应对输出产生的消极影响。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨 君,刘进军. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] JEONG S G,PARK M H. The analysis and compensation of dead-time effects in PWM inverters [J]. **IEEE Trans. Ind. Electron.**,1991,38(4):108-114.
- [3] LIU Y H,CHEN C L. Novel dead time compensation method for induction motor drives using space vector modulation [J]. **IEE Proceeding Electric Power Applications**,1998,45(4):387-392.
- [4] 薛向党,李国民,夏长亮,等. PWM 逆变器死区解耦控制方法的研究[J]. 电力电子技术,1998,(2):21-24. XUE Xiang-dang,LI Guo-min,XIA Chang-liang,et al. Research on the method of dead-time decoupling control for PWM inverters [J]. **Power Electronics**,1998,(2):21-24.
- [5] 姚天任,江太辉. 数字信号处理[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2000.
- [6] 邹 鲲,袁俊泉,龚享铤. Matlab 6.X 信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [7] 谢运祥,唐中琦. 电力有源滤波器及其应用技术的发展[J]. 电工技术杂志,2000,19(4):1-3. XIE Yun-xiang,TANG Zhong-qi. Active power filter and development of its technology [J]. **Electrotechnical Journal**,2000,19(4):1-3.
- [8] 舒欣梅,张代润. 一种消除有源电力滤波器系统震荡的控制方法[J]. 电源技术应用,2003,6(5):34-36. SHU Xin-mei,ZHANG Dai-run. A controlling method to eliminate resonance of APF system[J]. **Power Technology**,2003,6(5):34-36.

(责任编辑:戴绪云)

作者简介:

范瑞祥(1977-),男,湖南湘潭人,博士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制和无功补偿(E-mail:ricefan@sina.com);周腊吾(1965-),男,湖南浏阳人,副教授,博士研究生,主要从事电力系统自动化方面的教学和科研工作。

Research on dead-time effect of inverter in APF

FAN Rui-xiang,ZHOU La-wu,XIAO Hong-xia

(Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract: APF(Active Power Filter) is a kind of power electronic device with harmonic output, while the existence of dead-time in its main circuitry causes negative effect on overall compensation results. The dead-time effect is analyzed from both magnitude and phase and an improved approach against it is presented. With the direction judgment of the output current,a new way of PWM(Pulse Width Modulation) is brought forward to eliminate the negative effect of the dead-time. The simulation verifies its effectiveness.

Key words: active power filter; dead-time effect compensation; PWM inverter