

空间矢量控制在有源滤波器中的应用

姜俊峰, 刘会金

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在分析电压空间矢量调制(SVPWM)基本原理的基础上,对空间矢量控制的实现方式进行了讨论,对矢量作用时间的计算方法进行了简化。与常规SPWM相比,该方法提高了控制精度,减少了开关损耗,直流电压利用率高。介绍了有源滤波器的结构和基本原理,并将该方法引入到有源滤波器中,考虑到DSP的快速数据处理能力,采用DSP作为主控单元。实验结果证明该控制策略能满足有源滤波器的实时要求,滤波性能非常理想。

关键词: 有源滤波器; 空间矢量控制; 开关损耗

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)09-0027-04

0 引言

近年来,有源电力滤波器(APF)作为滤除电网谐波的新型电力电子装置,得到了快速的发展。APF较无源滤波器有更好的适应能力,通过改变其控制策略,能满足不同谐波源的治理要求。APF的关键技术是谐波电流检测和逆变器的PWM控制技术。目前APF常用的PWM技术有:调制法,包括自然采样法和规则采样法;跟踪控制法,包括滞环比较方式和三角波比较方式,属于闭环控制。

80年代中期,国外学者在交流电机调速中提出了磁链轨迹控制的思想,进而发展产生了电压空间矢量(space vector)的概念。其物理概念清晰,算法简单且适合数字化方案,故一经提出即受到关注^[1]。磁链轨迹控制法不同于传统的SPWM法,它从交流电机角度出发控制开关,形成PWM波,使电机中产生的实际磁链矢量逼近跟踪定子磁链的给定轨迹——理想磁链圆。此方法在电压利用率、电流谐波和过调制等方面具有优势,而对零矢量的合理控制可以明显地降低逆变器的开关损耗。SVPWM目前也已经得到广泛应用。但是,传统空间电压矢量PWM算法复杂,运算时间长,占用了大量的系统控制时间。本文在分析空间矢量方法的基础上,对其算法进行了简化,有效地提高了SVPWM的计算速度,并使控制精度大大提高。

1 电压空间矢量的基本原理^[2]

三相逆变器中每个桥臂的上下两开关器件的驱动信号都是互补的,其开关状态可用下面的开关函数表示:

$$S_k = \begin{cases} 1 & k \text{ 相上桥臂导通} \\ 0 & k \text{ 相下桥臂导通} \end{cases}$$

则各桥臂输出端电压为:

$$U_k = S_k U_d \quad (k = a, b, c) \quad (1)$$

式中: U_d 为直流侧电压。

将式(1)代入按下式定义的电压空间矢量

$$U_r = \frac{2}{3} (u_a + u_b e^{j2/3} + u_c e^{-j2/3}) \quad (2)$$

则得到图1所示的基本电压空间矢量图,包括6个有效矢量($U_1 \sim U_6$, 模长等于 $2U_d/3$)和两个零矢量(U_0, U_7),将复平面分成6个扇区。SVPWM的基本原理就是控制这些基本电压矢量的组合来逼近任意给定的电压矢量,在一个扇区中的合成矢量越多,则实际输出电压越接近正弦。

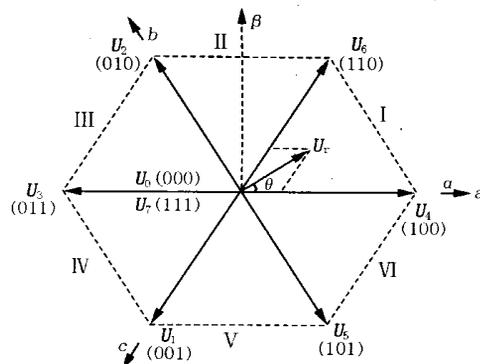


图1 电压矢量的复平面分布及扇区划分

Fig. 1 Distribution of voltage space vector in complex plane

任意空间矢量 U_r 都可用其所在扇区边界的两个相邻的特定矢量 U_x 和 U_y 来合成,由平行四边形法则和PWM面积等效原理可求出与之相应的存在时间为:

$$\begin{cases} T_x = \sqrt{3} |U_r| T_s \sin(\theta / 3 - \dots) / U_d \\ T_y = \sqrt{3} |U_r| T_s \sin \dots / U_d \\ T_0 = T_s - T_x - T_y \end{cases} \quad (3)$$

式中： θ 为参考电压矢量与顺时针方向最近的基本矢量之间的夹角， T_s 为采样周期，若 T_x 、 T_y 不足则插入零矢量补足，其存在时间为 T_0 。

为保证式(3)的有效性，应满足 $T_x + T_y \leq T_s$ ，该条件保证了输出波形无畸变，也决定了 SVPWM 的最大输出限定。可以证明，采用空间矢量最大可能输出的相电压幅值为 $U_d/\sqrt{3}$ 。

2 SVPWM 的快速实现方式

为得到一定的输出电压，在一个采样周期 T_s 中，无论 3 种开关状态的切换顺序如何，只要其存在时间的分配关系满足式(3)就可以了，因此 SVPWM 的实现方式有很多，按其输出 PWM 波形，可分为对称型与非对称型；按一个开关周期中使用零矢量的个数，可分为单零矢量型与双零矢量型。纵观各种实现方法，其直流侧的电压利用率都相同，但从桥臂开关频率和谐波成分综合考虑，单零矢量对称型方式最优^[3]。

表 1 各扇区开关状态变换顺序及电压矢量存在时间

Tab. 1 Vector sequence and operating time in each sector						
扇区						
开关状态及矢量	46764	62026	23732	31013	15751	54045
状态 a	11111	10001	00100	00000	01110	11011
状态 b	01110	11011	11111	10001	00100	00000
状态 c	00100	00000	01110	11011	11111	10001
不变的状态	a=1	c=0	b=1	a=0	c=1	b=0
$T_x \cdot U_d / T_s$	$u_a - u_b$	$u_a - u_c$	$u_b - u_c$	$u_b - u_a$	$u_c - u_a$	$u_c - u_b$
$T_y \cdot U_d / T_s$	$u_b - u_c$	$u_b - u_a$	$u_c - u_a$	$u_c - u_b$	$u_a - u_b$	$u_a - u_c$

如果在合成矢量时，一个扇区内始终取某一固定的零矢量，保证有一个桥臂的开关状态不变，这样一个调制周期内，每个桥臂有 1/3 的时间状态不变。以扇区 I 为例，矢量作用顺序为 $U_4 \ U_6 \ U_7 \ U_7 \ U_6 \ U_4$ ，PWM 波形如图 2 所示。其它各扇区中的开关状态变换顺序见表 1。

注意图 1 中的 U_4 和 U_3 构成直线 $u_b - u_c = 0$ ，将复平面一分为二，分别为 $u_b > u_c$ 部分(包括扇区 I、II、III)和 $u_b < u_c$ 部分(包括扇区 IV、V、VI)；同理， U_2 和 U_5 构成直线 $u_c - u_a = 0$ ， U_1 和 U_6 构成直线 $u_c - u_a = 0$ ，上述 3 条直线将复平面划分为 6 个扇区。故参考电压矢量所在扇区可通过判别相电压的大小关

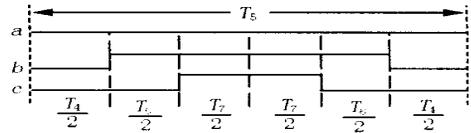


图 2 扇区 I 中 PWM 波形

Fig. 2 PWM waveform in sector I

系来确定，例如：若 $u_a > u_b > u_c$ ，则在扇区 I；若 $u_b > u_c > u_a$ ，则在扇区 II。此外，当扇区确定后，矢量作用时间也可由相电压直接计算，具体见表 1。因此，在使用 SVPWM 控制时，可以不必进行式(2)的坐标变换，也无需用到反三角函数，计算精度高，计算量与传统的 SPWM 法相差无几。

文献[1]指出，SVPWM 和传统 SPWM 不是两种孤立的调制方式，它们之间有着内在联系，典型的 SVPWM 实质是一种对在三相正弦波中注入了零序分量的调制波进行规则采样的一种变型 SPWM。本文用到的 SVPWM 实现方式对应的三相调制波为：

$$\begin{cases} u_{a,b,c}^{**} = u_{a,b,c}^* + u_z^* \\ u_z^* = (-1)^{k-1} \cdot \frac{1+(-1)^{k-1}}{2} \max(u_a^*, u_b^*, u_c^*) - \frac{1-(-1)^{k-1}}{2} \min(u_a^*, u_b^*, u_c^*) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

式中： $u_{a,b,c}^*$ 和 $u_{a,b,c}^{**}$ 分别为加零序分量前后的三相调制波，并以 $0.5 U_d$ 为基准作归一化处理。

由图 3 可见， u_z^* 的基频是 3，但不仅仅是三次谐波。而且若负载为感性，电流滞后 30° 相位角，当每一相流经最大电流时其桥臂上开关器件不进行动作，这样就可以避免最大开关损耗。与传统 PWM 方法相比，最小开关损耗能减少近 50%^[4]。

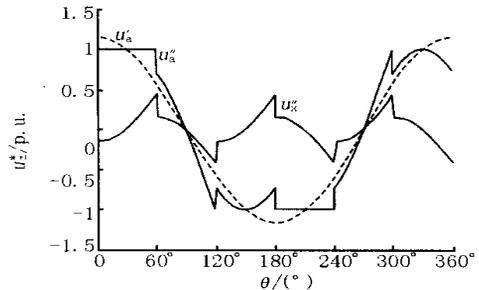


图 3 a 相调制波和零序分量波形

Fig. 3 Waveform of a-phase modulation functions and zero-sequence components

3 APF 的基本原理及其主控单元

一个典型的基于电压源逆变器的并联 APF 如

图 4 所示。它检测负荷电流中待补偿的谐波成分形成指令电流,再将其与 APF 的实际输出电流相比较,求出偏差电流,通过比例积分环节生成指令电压,最后形成 PWM 波形。设逆变器端电压 u 经过 R 、 L 元件与系统电压 e 相连接,输出电流为 i ,则其电路方程为:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u - e \quad (5)$$

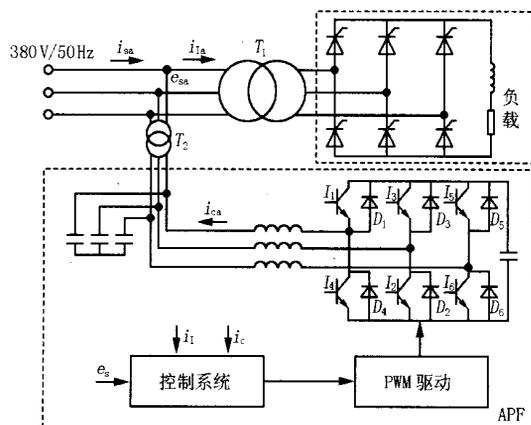


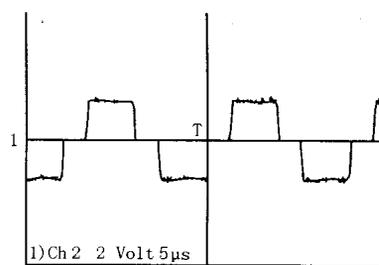
图 4 APF 原理图

Fig. 4 Circuit diagram of APF

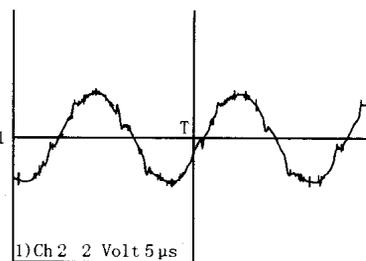
考虑到 DSP 具有快速数据处理能力,控制系统采用 TMS320LF2407A 作为主控单元。F2407A 是美国 TI 公司专为电机数字化控制而推出的一款低成本、低功耗、高性能的 16 位定点 DSP 芯片,其内部 EV 模块包括非对称 3 对称 PWM 发生器、可编程的死区单元及空间矢量 PWM 状态机,并具有功率驱动保护中断自封锁脉冲功能,是实现 SVPWM 控制的首选。F2407A 的指令周期为 25 ns。

4 实验结果及分析

为了验证空间矢量控制法的正确性和可行性,对本文提出的控制方法进行了实验研究,实验主回路如图 4 所示,负载为典型的三相整流桥,降压变压器 T_2 的变比为 1.2.5。实验结果通过一台 Tektronix TDS210 数字存储示波器观察并记录,电流传感器的传输比为 5A/3.5V。从图 5 可见,补偿后的系统电流波形仍为较理想的正弦波,说明该有源滤波器可以对实际电流中的谐波进行较好的补偿。当谐波电流较小时,由式(5)可知,逆变器实际发出的电压主要是正弦波,三相指令电压合成的空间矢量的运动轨迹基本上是一个圆,仅在扇区交界处略有不同,如



(a) 补偿前波形



(b) 补偿后波形

图 5 补偿前后的系统电流波形

Fig. 5 System current waveforms with and without compensation

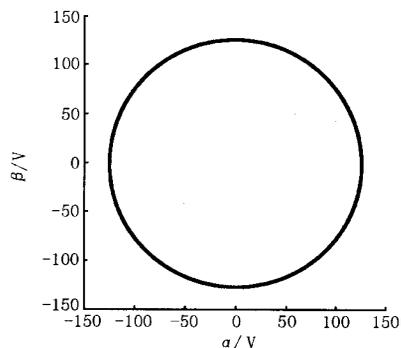


图 6 合成空间矢量的运动轨迹

Fig. 6 Voltage resultant space vector trajectory

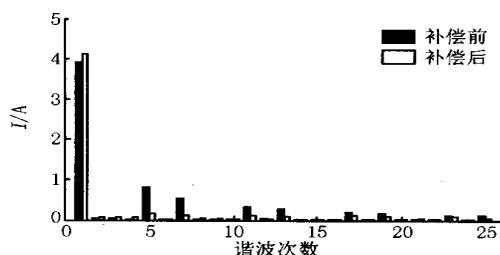


图 7 补偿前后系统电流频谱图

Fig. 7 Spectra of system current with and without compensation

图 6 所示,这对突出 SVPWM 控制的优势是十分有利的,图中星号代表采样点,采样频率 10 kHz。将补偿前后系统电流频谱进行对比可以发现,实际发出的

补偿电流基本上抵消了负荷电流中的主要谐波。图7中基波分量补偿后增大,是因为在指令电流中加入了有功成分以补偿 APF 的运行损耗,维持直流侧电压恒定不变。

另外,由于采用降压变压器连接并使用 SVPWM 控制,该方法的直流电压只需 280 V,而传统方法的直流电压需 800 V,因此,使用新方法后 APF 的综合性能有明显提高。

5 结论

基于空间矢量方法的 PWM 技术,使 APF 在任意时刻要跟踪的矢量均可由两个基本矢量和零矢量合成,控制精度较高;在一个控制周期通过开关 2 次动作即可将参考矢量输出,因而 APF 的损耗较少,效率高;其矢量作用时间由相电压直接计算,计算简单;该方法直流电压利用率高,其最大输出电压较 SPWM 高约 15.47%。本文中的三相三线制 APF 非常适用于中高压配电网,而且随着电压等级的提高,直流电压降低得越多,系统的绝缘水平要求也随之降低,可大大提高系统的经济性和可靠性。SVPWM 控制能满足有源滤波器的实时要求,滤波特性非常理想。以微控制器为核心的数字化控制系统是发展趋势,所以 SVPWM 应是优先的选择。

Application of SVPWM strategy in active power filter

JIANG Jurfeng, LIU Hui-jin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on analyzing the basic principle of voltage space vector pulse width modulation (SVPWM), the realization of SVPWM is discussed and a simplified method to calculate the operating time of each vector is offered. Compared with conventional SPWM, this one can improve the precision of the active power filter, reduce the switching losses and improve the utilization of DC voltage. The configuration and basic operation principle of active power filter (APF) are introduced, and the SVPWM control strategy is introduced into APF. Considering the fast processing ability of digital signal process (DSP), the DSP is used as main control unit. At last, some experimental results are obtained, and the results show that the control strategy can meet real-time requirement of APF and the compensation properties of APF are excellent.

Key words: active power filter (APF); SVPWM; switching losses

(上接第 11 页 continued from page 11)

(1. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Cost allocation and pricing of transmission service are important issues in the transmission open access. Though pure marginal cost pricing method in economics can offer the useful economic information, the scale economic benefits of transmission network cant make the transmission income based on marginal cost pricing satisfy the revenue reconciliation of transmission investment by far. In the perspective of the project, combining with the economic concepts, this paper introduces the transmission cost allocation method which based on power flow decomposition, and presents the improved transmission cost allocation method for the study and calculation of pricing problem after taking the improved measures. It also analyses and compares the results of the calculation cases.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 000397).

Key words: cost allocation; transmission pricing; power flow decomposition

参考文献:

- [1] 熊健,康勇,张凯,等 (XIONG Jian, KANG Yong, ZHANG Kai, et al). 电压空间矢量调制与常规 SPWM 的比较研究 (Comparison Study of Voltage Vector PWM and Conventional SPWM) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics Technology), 1999, 33(1): 25-28.
- [2] 陈坚 (CHEN Jian). 电力电子学 (Power Electronics) [M]. 北京:高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2002.
- [3] 张纯江,刘彦民,邬伟扬,等 (ZHANG Chun-jiang, LIU Yamin, WU Wei-yang, et al). 软开关 AC/DC 变流器中 SVPWM 波形的优化选择 (Optimal Choice of SVPWM Waves for Soft-switched AC/DC Rectifier) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(6): 35-38.
- [4] Trzynadlowski A M, Kirlin R L, Legowaki S F. Space Vector PWM Technique with Minimum Switching Losses and Variable Pulse Rate [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997, 44(2): 173-181.

收稿日期: 2003-07-25; 修回日期: 2003-11-24

作者简介:

姜俊峰 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为灵活电力系统;

刘会金 (1952 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量分析与控制方面的研究及补偿装置的研制与开发。