

SVPWM 在并联有源电力滤波中的应用研究及仿真

田治礼^{1,2}, 张家胜¹

(1. 中国石油大学 信控学院, 山东 东营 257091; 2. 东营职业学院, 山东 东营 257091)

摘要: 针对典型的三相整流电路对电网产生的影响, 研究易于数字化的 SVPWM 与无差拍算法, 将其应用于并联有源电力滤波器内层跟踪控制中, 给出一种补偿功能较为完善的并联有源电力滤波器及其控制方法。仿真结果表明: SVPWM 调制与无差拍控制技术用于并联有源滤波控制可以明显改进补偿的动态性能, 提高滤波效果。

关键词: 矢量脉宽调制; 无差拍控制; 并联有源滤波器; 跟踪控制

中图分类号: TM401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4679(2007)02-0061-04

The applied research and simulation of SVPWM in parallel APF

TIAN Zhi-li^{1,2}, ZHANG Jia-sheng¹

(1. Information and Control College, China University of Petroleum, Dong ying 257091, China; 2. Dongying Profession College, Dongying 257091, China)

Abstract: In view of a typical three-phase rectifier circuit to the power grid, the study focused on the digital SVPWM with no easy deadbeat. Parallel APF will be applied to inner tracking control. Compensation gave a relatively perfect parallel APF and its control method. Simulation results show SVPWM with no deadbeat control technologies for Parallel Active Filter compensation control can markedly improve the dynamic performance and the filtering effect.

Key words: SVPWM; deadbeat control; parallel active filter; tracking control

随着当前 DSP 技术的快速发展, 数字化已成为电力电子装置的发展趋势, 为适应当前数字化的需要, 电压空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)受到人们的关注。SVPWM 与传统的 SPWM 相比, 具有电流畸变率小, 直流电压利用率高, 尤其是它非常适合数字化实现和实时控制, 因此, SVPWM 在交流传动领域得到了广泛应用, 并逐渐开始扩展到其他电力电子领域。

1 SVPWM 与无差拍控制技术在并联有源电力滤波器跟踪控制中的应用

1.1 并联有源电力滤波器控制系统简介

并联有源滤波器的控制系统, 可分为内外两层, 内层直接面向电力电子主回路实现指令电流的跟踪, 通常采用脉宽调制技术(SPWM)和滞环控制两种方法。外层控制包含谐波检测、指令电压生成和

直流电容电压控制, 检测电路与串联型基本相同。由于它是并联在电网中, 可以控制其直接从电网中吸收基波电流, 因此, 直流电容电压控制不像串联型那样复杂, 指令电流运算电路如图 1 所示。

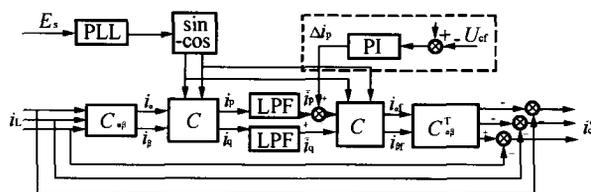


图 1 指令电流运算电路

图 1 中虚线框内为直流侧电压控制部分。正、余弦信号 $\sin \omega t$ 、 $-\cos \omega t$, 由锁相环 PLL 和正余弦发生电路得到, 其中 $\sin \omega t$ 与 A 相电源电压 E_a 同相; U_α 是 U_c 的给定值, U_α 是 U_c 的反馈值, 二者之差经 PI 调节器后得调节信号 Δi_p , 它叠加到瞬时有功电流的直流分量上, 经运算在指令信号 i_c^* 中包含一定的基波有功电流, 使有源电力滤波器直流侧与交流侧交换能量, 从而将 U_c 调整到给定值。调

整过程的关键在于有源电力滤波器直流侧和交流侧如何进行能量交换。

1.2 无差拍控制简介

无差拍控制是数字系统特有的一种控制方式,它突出的优点是响应速度快,可大大提高 PWM 逆变器的动态响应性能,对主要由非线性负载引起的逆变电源输出电压波形失真具有较强的抑制能力。

无差拍(deadbeat)又称“无过冲”,指的是在每一个采样点上系统的输出都与其指令完全一致,没有任何相位滞后和幅值偏差。从其定义即可看出,无差拍控制是数字系统特有的控制方式。它与最少拍控制有相似之处,表现在二者都具有有限调节时间的特性。

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

则下一拍的输出量可以表示为

$$y(k+1) = Cx(k+1) = CAx(k) + CBu(k). \quad (2)$$

如果将式(2)左端替换为下一拍的指令 $r(k+1)$,即得

$$r(k+1) = CAx(k) + CBu(k). \quad (3)$$

如果按照使等式(2)成立的要求来选择施加于控制对象的控制量 $u(k+1)$,则由式(2)、(3)可知

$$y(k) = r(k), \forall k. \quad (4)$$

表明系统的输出在每一拍都与指令相等,这就是无差拍控制效果。

2 并联有源电力滤波器跟踪控制算法分析

电力系统中运行的大部分有源滤波器都是并联型,并联有源滤波器参考指令是电流值,而不是电压值,因此,如何用 SVPWM 来跟踪补偿电流参考值是研究的重点所在。补偿参考值需要进行大量矩阵运算,不但占用大量 DSP 系统资源,而且会造成计算延时,导致谐波重新注入电网。如何补偿计算延时是本研究课题需要解决的一大问题。

在考虑到既要实现有源滤波器数字化的同时,又要保证控制的实时性,因此,谐波电流的跟踪算法考虑使用无差拍控制来实现,并使用空间矢量 PWM 调制算法跟踪补偿电流参考值,其补偿结构如图 2 所示。

此处参考电流运算,使用同步旋转 dq 坐标系进行分析,方法如图 3 所示。

首先将采样所得的三相负载电流 i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 经

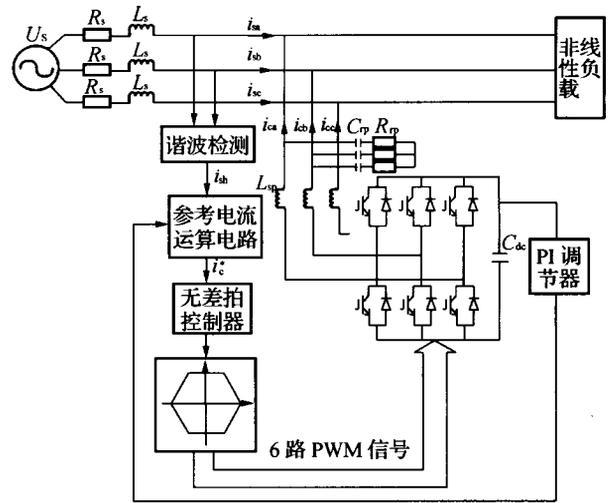


图 2 并联型 APF 补偿结构图

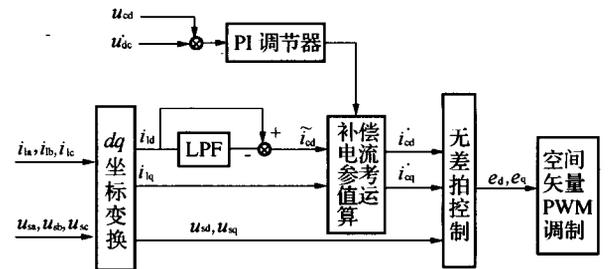


图 3 跟踪控制框图

过 dq 变换为 i_{ld}, i_{lq} , 其中 i_{ld} 与电源电压同相, 为有功电流; i_{lq} 与电源电压垂直, 为无功电流。补偿的目的是使电源电流 i_s 不含谐波分量, 也不含无功分量。因此, 补偿电流的参考值应为

$$\begin{cases} i_{cd}^* = -i_{ld} + i_{dc}, \\ i_{cq}^* = -i_{lq}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_{cd}^* 为 d 轴补偿电流参考值, 等于电容电压补偿分量与谐波分量之和, i_{cq}^* 为 q 轴补偿电流参考值, 为无功电流值, i_{ld} 为 d 轴负载电流交流分量, 代表谐波部分, i_{dc} 为 d 轴直流分量, 代表有功基波部分, i_{lq} 代表无功部分。

三相等效电路如图 4 所示。

从图 4 可得到

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_c}{L_c} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_c} \begin{bmatrix} u_{sa} - e_a \\ u_{sb} - e_b \\ u_{sc} - e_c \end{bmatrix}. \quad (6)$$

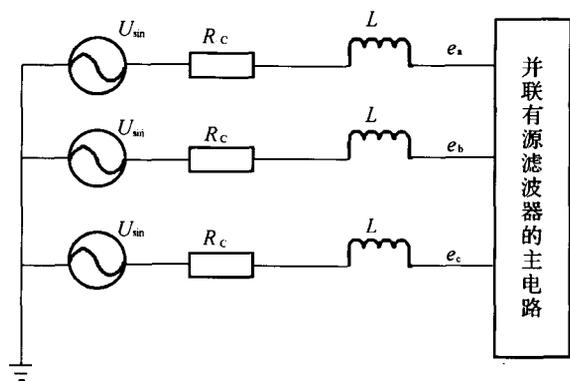


图 4 三相等效电路图

将其变换到 $d-q$ 坐标下,那么式(6)变为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega \\ \omega & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_c} \begin{bmatrix} u_{sd} - e_d \\ u_{sq} - e_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

将其写成状态空间形式为

$$\dot{X} = AX + BU \quad (8)$$

其中: $X = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u_{sd} - e_d \\ u_{sq} - e_q \end{bmatrix}$,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_c}{L_c} & \omega \\ \omega & -\frac{R_c}{L_c} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_c} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_c} \end{bmatrix}$$

将式(8)离散化得到

$$\begin{bmatrix} i_{cd}(k+1) \\ i_{cq}(k+1) \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} i_{cd}(k) \\ i_{cq}(k) \end{bmatrix} + H \begin{bmatrix} u_{sd}(k) - e_d(k) \\ u_{sq}(k) - e_q(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

进一步得到

$$\begin{bmatrix} e_d(k) \\ e_q(k) \end{bmatrix} = H^{-1}G \begin{bmatrix} i_{cd}(k) \\ i_{cq}(k) \end{bmatrix} + H^{-1} \begin{bmatrix} i_{cd}(k+1) \\ i_{cq}(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd}(k) \\ u_{sq}(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

从式(10)可看出本周期负载电流可以通过自适应、神经元等一些方法来预测,但是采用这些方法难以保证系统实时性。考虑到电力系统谐波电流和无功电流具有周期性的特点,为简化控制方法,可采用前一周期纪录的负载电流值来实现负载电流的预测,表达为

$$\begin{cases} i_{cd}^*(n, k) = -i_{id}(n-1, k+1), \\ i_{cq}^*(n, k) = -i_{iq}(n-1, k+1). \end{cases} \quad (11)$$

这样就可以得到补偿电压参考值 $[e_d(k), e_q(k)]^T$,

并可利用 SVPWM 进行跟踪。

3 并联型有源电力滤波器的仿真与分析

3.1 并联型有源电力滤波器仿真模型

并联有源滤波器的仿真结构、谐波检测方法均与串联型相似,在此只将无差拍算法的实现模型给出,如图 5 所示。

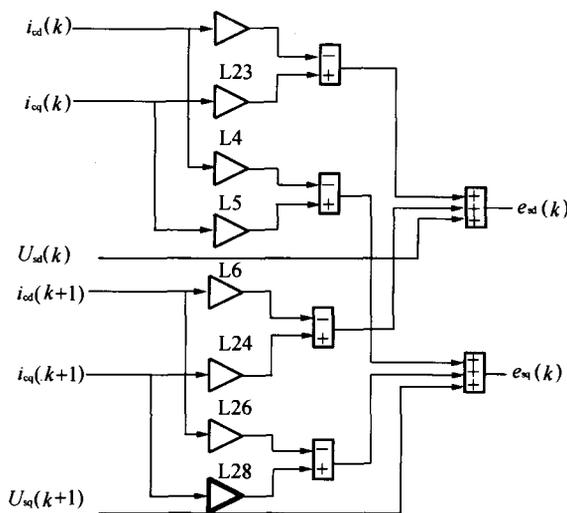


图 5 无差拍算法仿真模型

3.2 仿真结果与分析

采用无差拍与 SVPWM 跟踪并联补偿后电源电流波形及频谱分析如图 6,7 所示。

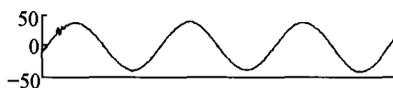


图 6 并联型补偿后 A 相电源电流波形

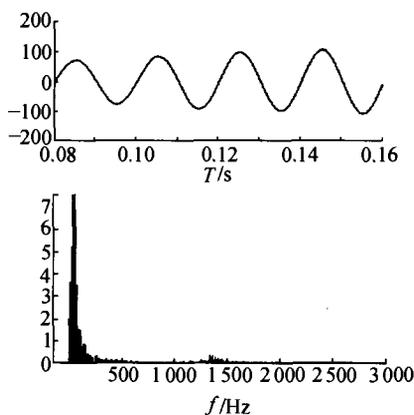


图 7 并联型补偿后电源电流频谱分析 (A 相)

从频谱分析图中可看出,几乎所有的谐波均降到了 1% 以下,主要谐波中 5 次谐波降为 0.56%, 7

次谐波降为 0.39%, 13 次谐波降为 0.19%, 总谐波畸变率仅为 1.96%, 谐波得到很好的抑制。在开关频率附近仍有一些高次谐波, 但与滞环跟踪控制补偿后波形相比, 其含量已大大降低。并且由于采用了无差拍控制, 计算延时得到一定的补偿, 重新注入电网的谐波大大降低。

4 结 论

理论分析和仿真结果表明: SVPWM 与无差拍控制技术应用于有源电力滤波器跟踪控制中, 不但具有易于数字化的优点, 而且可以改进补偿的动态性能, 降低直流电容值, 减小装置体积。综合以上方面, 采用 SVPWM 与无差拍控制方法要优于传统方法。这种补偿方法在三相整流电路及有非线性负载的电力系统中有较好的谐波抑制能力, 应用前景广阔。

参 考 文 献

- [1] 董晓鹏, 王兆安. 三相电压型单位功率因数 PWM 整流器的研究[J]. 电力电子技术, 1997(4).
- [2] 杨君, 王兆安. 并联型电力有源滤波器控制方式的研究[J]. 西安交通大学学报, 1995(3).
- [3] 颜晓庆, 杨君, 王兆安. 并联型电力有源滤波器的数模型和稳定性分析[J]. 电工技术学报, 1998(1).
- [4] Arrillaga J, Medina A, Lisboa M L V, et al. The harmonic domain: a frame of reference for power system harmonic analysis[J]. IEEE Trans Power Syst, 1995, 10(1): 433 - 440.
- [5] Grady W M, Samotyj, Noyola A H Survey of active power line conditioning methodologies[J]. IEEE, Trans Power Delivery, 1990, 5(3): 1536 - 1542.
- [6] Juan Dixon. A Series Active Power Filter Based on a Sinusoidal Current Controlled Voltage Source Inverter[C]. Proceedings of the 1995 IEEE IECON. 21st International Conference, 1995 (1): 639 - 641.
- [7] Changjiang Zhan. Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage-space-vector PWM Control[J]. IEEE Trans on Ind, 2001, 37(6): 1855 - 1862.
- [8] Kelley A, Yadusky W F. Rectifier design for Minimum line-current and maximum power factor[J]. IEEE Trans Power Electron, 1992, 8(2): 511 - 517.
- [9] Rice D E. A detailed analysis of six - pulse converter harmonic currents[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1994, 30(2): 294 - 304.

[责任编辑: 郝丽英]