

单相电压源型有源滤波器的新型数字控制方法

钟奇¹,梅红伟²

(1. 江苏广播电视大学武进学院,江苏 常州 213000; 2. 河海大学计算机及信息工程学院,江苏 常州 213000)

摘要: 有源电力滤波器主电路结构的研究已经比较成熟,其性能的提高主要依赖于所采用的控制方法。该文研究了单相有源电力滤波器、电源及非线性负载之间能量交换机理;在此基础上对变流器直流侧电容电压的稳定问题进行了理论分析,并提出了一种简单的应用于单相电压源型有源电力滤波器的数字化控制方法。该方法检测量少、算法简单、开关频率恒定、易于数字化实现,仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 有源电力滤波器; 直流侧电容; 数字化控制

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)22-0053-04

0 引言

电力有源滤波器(APF)是颇受关注的用于谐波及无功功率补偿的装置。APF的补偿性能取决于主电路的拓扑结构和控制方式,APF主电路结构的研究已经比较成熟,目前实际应用的有源电力滤波器都是采用 PWM 变流器作为主电路,因此电力有源滤波器的性能依赖于所采用的控制方法。三相有源滤波技术得到了学者的普遍关注,提出了许多控制策略,但电力系统中存在着大量的单相负荷(如电气化铁道),这些负荷会造成电网的三相严重不平衡^[1]。目前单相有源滤波器的控制方法与三相有源滤波器的控制方法相比还不成熟。现有文献中单相有源滤波器的控制方法大都要进行谐波电流检测^[2~6],然后根据谐波电流产生控制指令来控制主电路的开关动作,因此需要高精度的模拟乘法器或高速 A/D、D/A 以及 DSP,电路结构复杂,参数灵敏度高;虽然也有一些不需要检测谐波电流和智能的控制方法相继提出,如单开关周期控制方法^[7]、边带控制方法^[8]、神经网络控制方法^[9]等,但相比还不够成熟。

在数字控制技术获得广泛应用的今天,减少检测量、简化算法和实现易于数字化控制成为有源电力滤波器发展的方向。本文研究了单相有源电力滤波器、电源及非线性负载三者之间的能量交换机理,在此基础上得出了直流侧电容电压稳定调节的方法;提出了一种单相电压型有源滤波器的数字控制方法。该方法只需检测电源侧电流和变流器直流侧电容电压,据此实时计算各开关在每个开关周期内的占空比,形成开关的控制信号。计算机仿真结果验证了该方法的可行性。

1 直流侧电容电压的稳定调节

有源电力滤波器的作用就是使电源侧电流与电源电压同相并保持或接近正弦波形。在稳态情况下,对于一个无损的有源电力滤波系统,系统电源提供的能量必须等于负载消耗的功率,因此,变流器直流电容的平均电压将保持为一个定值。当功率不平衡时,如负载发生变化,变流器的直流电容将提供系统电源与负载间的功率差,这将导致直流电容平均电压的变化。如果系统电源提供的功率低于负载需要的功率,那么直流电容的平均电压将降低,此时,需要提高系统电流的幅值以增加系统电源提供的实功率;反之,直流电容平均电压将升高,此时,需要减小系统电流的幅值以降低系统提供的功率。直流侧电容平均电压的变化能够反映出主电路与负载间功率的转换情况。因此,期望的电源侧电流幅值可以通过直流侧电容电压调整获得^[11]。

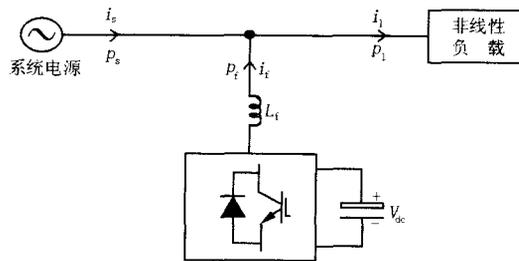


图 1 电压型有源电力滤波器

Fig 1 Voltage source active power filter

如图 1 所示,定义电网中电源传输的瞬时有功功率为 P_s ,负载侧传输的瞬时有功功率为 P_L ,有源滤波器传输的瞬时有功功率为 P_f 。则在电源、负载和有源电力滤波器的公共交点处,电网中瞬时能量传输关系满足:

$$P_s = P_1 - P_f \quad (1)$$

因此,它们的平均值 P_s 、 P_1 和 P_f 之间同样满足如下关系:

$$P_s = P_1 - P_f \quad (2)$$

如果忽略有源电力滤波器本身的损耗,那么根据瞬时能量守恒,存在如下等式关系:

$$P_f = C \cdot V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3)$$

这里 C 为直流侧电容。由式 (3) 可计算有源滤波器传输的瞬时有功功率平均值 P_f :

$$P_f = \frac{1}{T} \int_0^T P_f dt = \frac{1}{2T} C [V_{dc}^2(T) - V_{dc}^2(0)] = \frac{C}{2T} \cdot V_{dc}^2 \quad (4)$$

式中: T 代表一个开关周期; $V_{dc}(0)$ 、 $V_{dc}(T)$ 分别是 0 时刻和 T 时刻的直流侧电压; V_{dc}^2 是 0 时刻和 T 时刻的直流侧电压的平方差。

综合式 (2) 和式 (4), 有:

$$P_f = \frac{C}{2T} \cdot V_{dc}^2 = P_1 - P_s \quad (5)$$

又因为电源侧平均功率为:

$$P_s = \frac{1}{2} V_s I_s \quad (6)$$

式中: V_s 、 I_s 分别是系统电源侧电压、电流的幅值。

综合式 (5) 和式 (6), 得到 I_s 的表达式:

$$I_s = \frac{2}{V_s} \left[P_1 - \frac{C}{2T} \cdot V_{dc}^2 \right] \quad (7)$$

式 (7) 说明, 如果 I_s 不同于 $2/V_s \cdot P_1$ 时, 直流侧电容电压将会有波动; I_s 可以由直流侧电容电压 V_{dc} 的变化量 V_{dc} 确定。

另外, 为使有源电力滤波器正常工作, 达到所要求的补偿效果, 必须使直流侧电容电压 V_{dc} 维持足够高并且稳定, 以保证在进行动态补偿的任何瞬间能根据控制要求输出所需的补偿电流; 但由于补偿电流的时变性和变流器的自身损耗, 如不采取适当的控制措施, 直流侧电容电压 V_{dc} 将产生衰减或很大的波动, 变流器不能正常运行。根据式 (7), 我们采用 P 控制器将直流侧电容电压维持在要求的水平, 将电容电压 V_{dc} 与设定的电压参考值 V_{ref} 相比较, 并将比较的结果 V_{dc} 送入 PI 控制器, PI 控制器的输出就是电源侧电流期望的幅值 I_s , 也即负载侧电流基波有功分量的幅值。

2 新型的数字控制方法

如图 2 所示, 单相电压型有源滤波器直流侧

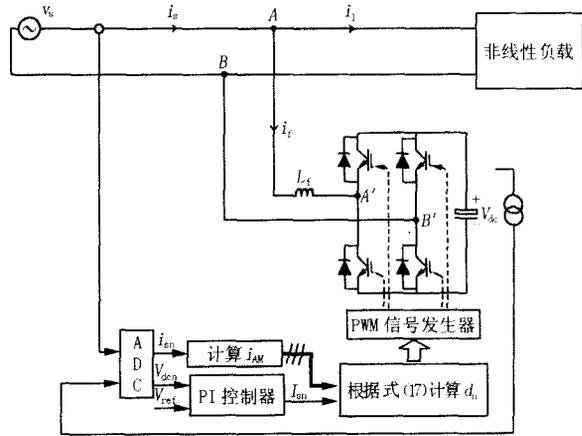


图 2 单相电压型有源滤波器结构图

Fig 2 Structure of single-phase voltage source active power filter

以电容作为储能元件来维持直流电压 V_{dc} 恒定。设开关周期恒定为 T , 第 n 个开关周期内占空比为 d_n , 则这个开关周期内两对开关管分别导通的时间为 $d_n \cdot T$ 和 $(1 - d_n) \cdot T$, 从而分别可以得到两个电压平衡方程:

$$v_1 = L_f \frac{di_f}{dt} = v_{AA} = v_s - V_{dc} \quad (8)$$

$$v_1 = L_f \frac{di_f}{dt} = v_{AA} = v_s + V_{dc} \quad (9)$$

在稳定情况下, 一个开关周期内电感上储存和释放的能量相等, 即电感上的电流在第 n 个开关周期始末没变, 所以:

$$i_f(nT) - i_f((n-1)T) = 0 \quad (10)$$

$$\text{即: } \int_{(n-1)T}^{nT} \frac{v_1}{L_f} dt = \frac{1}{L_f} \int_{(n-1)T}^{nT} (v_s - V_{dc}) dt + \frac{1}{L_f} \int_{(n-1+d_n)T}^{nT} (v_s + V_{dc}) dt = 0 \quad (11)$$

只要采样和开关的速度足够快, 在一个开关周期内, 我们可以认为 v_s 、 V_{dc} 恒定, 则式 (11) 可以化解为:

$$d_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_s}{V_{dc}} \right) \quad (12)$$

有源电力滤波器控制目标是使补偿后的电源侧电流为正弦且与电源电压同相, 这样非线性负载和有源电力滤波器等效为一纯阻性负载 R_s , 即满足:

$$v_s = R_s \cdot i_s \quad (13)$$

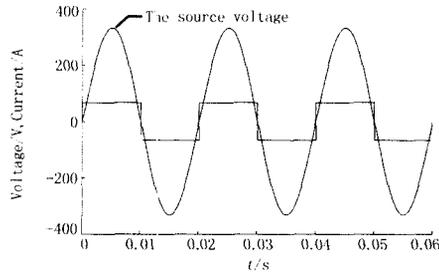
那么补偿后的电源侧电流幅值 I_s 与电源电压幅值 V_s 存在如下关系:

$$V_s = R_s \cdot I_s \quad (14)$$

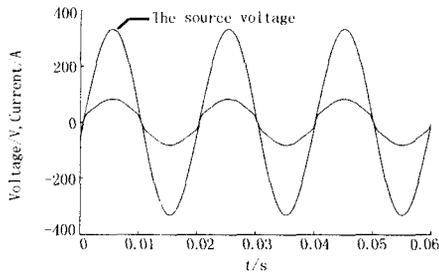
稳定的直流侧电容 V_{dc} 电压与电源电压幅值 V_s 满足:

$$V_{dc} = K \cdot V_s \quad (15)$$

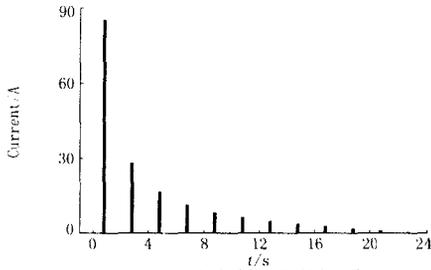
式中: K 为比例系数,需根据补偿的要求选取合适的值(与电感、电容的参数也有关)。



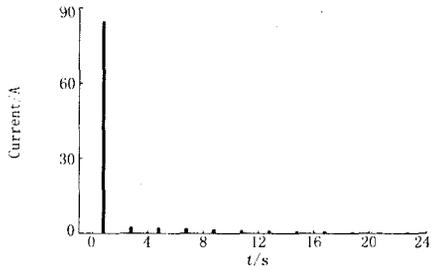
(a) 补偿前电源侧电压和电流波形



(b) 补偿后电源侧电压和电流波形



(c) 负载侧电流谐波分析



(d) 电源侧电流谐波分析

图3 谐波抑制仿真结果

Fig 3 Simulation results of harmonic suppression

将式(13)、(14)、(15)代入式(12)得到:

$$d_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{i_s}{K \cdot I_s} \right) \quad (16)$$

同样,只要采样和开关的速度足够快, i_s 、 I_s 在一个开关周期内可以近似认为是恒定的。则将式(16)离散化可得:

$$d_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{i_{sn}}{K \cdot I_{sn}} \right) \quad (17)$$

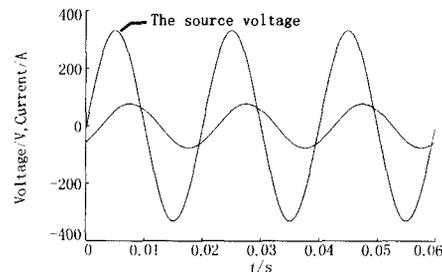
式中: d_n 为第 n 个开关周期的变流器的占空比; i_{sn} 为第 n 个开关周期系统电源侧电流的采样值; I_{sn} 为第 n 个开关周期的 P 控制器输出值。

基于式(17)可以实现有源滤波器的数字化控制,其基本结构如图2所示,在一个开关周期内控制器首先采样系统电流 i_s 和直流侧电容电压 V_{dc} , 经 AD 转换器转化为数字量 i_{sn} 、 V_{dcn} , 而 V_{dcn} 与直流电压 V_{ref} 参考值经过数字 PI 调节器生成 I_{sn} , 然后利用式(17)计算出桥臂开关的占空比 d_n 送入 PWM 发生器,经驱动电路控制开关的动作。

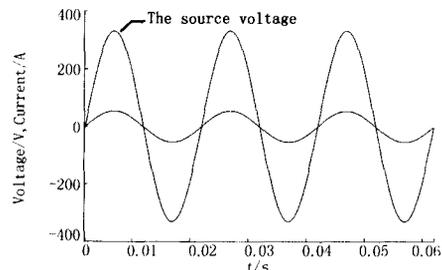
3 仿真结果

图3给出了负载为非线性负载(带阻感负载的二极管整流桥)时,有源电力滤波器的工作情况。图3(a)是补偿前电源侧电压和电流波形,图3(c)是此时电流的谐波分析,3、5、7、11、13、15等次谐波很大;图3(b)是补偿后电源侧电压和电流波形,图3(d)是此时电流的谐波分析,3、5、7、11、13、15等次谐波得到明显的抑制。负载侧电流的 THD 为 48.31%,电网侧电流的 THD 为 6.52%。

图4给出了负载为阻感负载时,有源电力滤波器的工作情况。图4(a)是补偿前电源侧电压和电流波形,图4(b)是补偿后电源侧电压和电流波形。补偿前电源侧系统的功率因数为 0.6908,补偿后的功率因数为 0.9988,实现了系统无功补偿和改善功率因数的目标。



(a) 补偿前电源侧电压和电流波形



(b) 补偿后电源侧电压和电流波形

图4 无功补偿仿真结果

Fig 4 Simulation results of reactive power compensation

4 结论

目前探索性能更好的新控制方法是有源电力滤波器研究的一个重要方向。本文提出的数字控制方法只需检测电源侧电流和变流器直流侧电容电压,据此实时计算各开关在每个开关周期内的占空比,形成开关的控制信号。该方法检测量少、算法简单、开关频率恒定、易于数字化实现。仿真结果表明,应用该方法的单相电压型有源电力滤波器能够有效地抑制谐波和补偿无功。不足之处在于PI参数的调节过于灵敏,实际应用中还有一定困难。

参考文献:

- [1] Habrouk M E, Dawish M K, Meha P. Active Power Filters: a Review [J]. IEE Proc Elect Power Appl, 2000, 147 (5): 403-413
- [2] 顾建军,徐殿国,刘汉奎,等. 有源滤波技术现状及其发展 [J]. 电机与控制学报, 2003, (7): 126-132
GU Jian-jun, XU Dian-guo, LIU Han-kui, et al Active Power Filter Technology and Its Development [J]. Electric Machines and Control, 2003, (7): 126-132
- [3] 刘进军,王兆安. 串联混合型单相电力有源滤波器稳态特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17 (4): 248-253
LIU Jin-jun, WANG Zhao-an Steady State Characteristics of a Hybrid Type Series Active Power Filter Used in Single-phase Circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17 (4): 248-253
- [4] ZHOU Luo-wei, LI Zi-cheng A Novel Active Power Filter Based on the Least Compensation Current Control Method [J]. IEEE Trans on Power Electron, 2000, 15 (4): 655-659
- [5] 戴朝波,林海雪,雷林绪. 单相并联型电力有源滤波器的仿真分析 [J]. 电网技术, 2001, 25 (20): 28-32
DAI Chao-bo, LI Hai-xue, LEI Lin-xu Simulation and Analysis of Single Phase Shunt Active Power Filter [J]. Power System Technology, 2001, 25 (20): 28-32
- [6] 任永峰,李含善,贺纲,等. 两种单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测方法分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (1): 95-98
REN Yong-feng, LI Han-shan, HE Gang, et al The Analysis of Two Real-time Detecting Approaches of Instantaneous Harmonic and Reactive Current in Single-phase Circuit [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15 (1): 95-98
- [7] Smedly KM, ZHOU Luo-wei, QIAO Chong-ming Unified Constant-frequency Integration Control of Active Power Filter-steady State and Dynamics [J]. IEEE Trans on Power Electron, 2001, 16 (3): 428-436
- [8] 周林,沈小莉,周维维,等. 单周控制技术在有源电力滤波器中的应用 [J]. 电力电子技术, 2004, 38 (4): 11-13
ZHOU Lin, SHEN Xiao-li, ZHOU Luo-wei, et al Application of One-cycle Control Method to Active Power Filter [J]. Power Electronics, 2004, 38 (4): 11-13
- [9] 李卫国,曾国宏,郝荣泰. 基于状态优化的单相有源滤波器边带控制方案 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (10): 36-40
LI Wei-guo, ZENG Guo-hong, HAO Rong-tai A Novel Hysteresis Control Strategy for Single-phase Active Power Filter Based on State-optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (10): 36-40
- [10] 付小强,刘凯,刘崇新. 基于神经网络的单相有源滤波器 [J]. 自动化技术与应用, 2004, 23 (4): 66-68
FU Xiao-qiang, LIU Kai, LIU Chong-xin Neural Network-based Single Phase Active Filter [J]. Techniques of Automation and Applications, 2004, 23 (4): 66-68
- [11] Wu J C. Simplified Control Method for the Single-phase Active Power Filter [J]. Proceedings of IEE-Electrical Power Application, 1996, 143 (3): 219-224

收稿日期: 2005-03-14; 修回日期: 2005-04-12

作者简介:

钟奇 (1980 -), 女, 助教, 研究方向为通讯理论及其在电力系统中的应用; E-mail: runnemhw@163.com

梅红伟 (1979 -), 男, 助教, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用。

A novel simplified digital control method for single-phase voltage source active power filters

ZHONG Qi¹, MEI Hong-wei²

(1. Wujin Branch, Jiangsu TV University, Changzhou 213000, China;

2 College of Computer & Information Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China)

Abstract: For the matured study of main circuit configuration, the development of APF mainly depends on its control method. Based on the research of energy commutation among APF, source and nonlinear load, this paper analyzes the stability of DC bus capacitor voltage theoretically and presents a novel simplified digital control method for voltage source single-phase active power filters. This method is few in the amount of sensors, simple in algorithm, fixed in switching frequency, and easy in digital control realization. Its validity is proved by simulation results.

Key words: active power filter; DC bus capacitor; digital control