

一种电压源型有源电力滤波器的新型控制方法

张秀平¹, 钟 奇²

(1. 河海大学 计算机及信息工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 江苏广播电视大学 武进学院, 江苏 常州 213161)

摘要: 研究了电压源型有源电力滤波器、电源及非线性负载三者之间的能量交换机理, 分析了变流器直流侧电容电压的稳定问题, 提出了维持直流侧电容电压稳定的新方法。在此基础上提出了一种电压源型有源电力滤波器的新型控制方法, 详细推导了控制方程。该方法无需检测三相负载电流和三相输入电压, 无需计算参考电流、无功电流和谐波电流; 只需检测两相电源电流和直流侧电容电压, 通过简单运算就可直接求出每个开关周期内各开关的占空比, 实现滤波器的控制。仿真研究结果表明新型控制方法能有效补偿谐波电流和无功电流, 抑制负载不对称。

关键词: 直流侧电容; 三相三线制; 有源电力滤波器; 控制方法

中图分类号: TM 76; TN 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0042-04

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、补偿无功的新型电力电子装置, 它能对大小和频率变化的谐波和无功电流进行补偿^[1-3]。目前, APF 的工作原理一般为检测谐波电流, 对电流进行跟踪控制, 再驱动主电路逆变器。决定补偿性能好坏的关键因素是准确、实时地检测有害电流, 如频域法中的快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform algorithm)、时域法中的基于瞬时无功功率的 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法、同步检测法和空间矢量法^[4-7]。由于这些方法均需要有一定的变换, 需要快速、实时运算, 计算量较大, 因此必须使用高速的数字微处理器和高性能 A/D 转换器, 这不但加大了系统成本, 而且电路结构复杂, 降低了系统的稳定性。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、边带控制方法等, 但相比还不够成熟^[8-16]。

笔者以 APF 内部能量交换的机理为基础, 提出了一种新型的数字化控制方法。理论和仿真结果表明该方法控制的三相三线有源滤波器能有效补偿谐波和无功电流, 抑制负载不对称。

1 电压型 APF 的能量交换机理

APF 的作用是使电源侧电流与电源电压同相并保持或接近正弦波形。在稳态下, 对于一个无损耗的有源电力滤波系统, 电源提供的功率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, 则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有功功率; 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。图 1 为电压型 APF 框图。

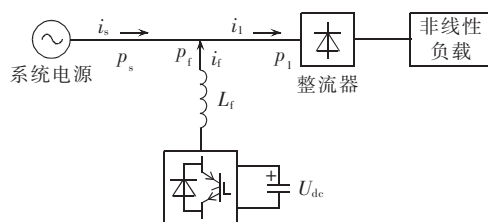


图 1 电压型有源电力滤波器

Fig.1 Voltage source active power filter

如图 1 所示, 若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 , APF 传输的瞬时有功功率为 p_f , 忽略 APF 本身的损耗, 则根据瞬时能量守恒, 存在如下等式关系:

$$p_f = C U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} \quad (1)$$

式中 C 为直流侧电容; U_{dc} 为直流侧电容电压。

由式(1)可计算瞬时有功功率平均值 P_f :

$$P_f = \frac{1}{T} \int_0^T p_f dt = \frac{1}{2T} C [U_{dc}^2(T) - U_{dc}^2(0)] = \frac{C \Delta U_{dc}^2}{2T} \quad (2)$$

式中 T 代表一个开关周期; ΔU_{dc}^2 是一个开关周期

内直流侧电容电压变化值的平方差。

根据图 1 中能量的交换机理和式(2)可得:

$$P_1 = C \Delta U_{dc}^2 / (2T) = P_1 - P_s \quad (3)$$

又因为电源侧平均功率为

$$P_s = U_s I_s / 2 \quad (4)$$

式中 U_s 、 I_s 分别是系统电源侧电压、电流的幅值。

综合式(3)和式(4),得到 I_s 和 ΔU_{dc}^2 的表达式:

$$I_s = \frac{2}{U_s} \left(P_1 - \frac{C}{2T} \Delta U_{dc}^2 \right) \quad (5)$$

$$\Delta U_{dc}^2 = \frac{U_s T}{C} \left(\frac{2P_1}{U_s} - I_s \right)$$

式(5)表明, I_s 可以由直流侧电容电压 U_{dc} 的变化量 ΔU_{dc} 确定。另外,为使 APF 正常工作,达到所要求的补偿效果,必须使直流侧电容电压 U_{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 U_{dc} 将产生衰减或很大的波动,变流器不能正常运行。根据式(5),采用 PI 控制器将直流侧电容电压维持在要求的水平,将电容电压 U_{dc} 与设定的电压参考值 U_{ref} 比较,结果 ΔU_{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 。所以可得:

$$I_s = \text{PI}(U_{dc} - U_{ref}) = \text{PI}(\Delta U_{dc}) \quad (6)$$

式中 PI 代表比例积分运算。

2 三相三线制中控制方程推导

APF 结构如图 2 所示,主体是三相电压源型变流器,在其直流侧以电容作为储能元件来维持直流电压 U_{dc} 的恒定,对三相三线制系统进行补偿。

设系统三相电压对称,开关频率远大于系统频率 50 Hz;将直流侧电容分为 2 个等值电容,其中 O' 点设为直流电压参考点,每个电容承受的压降均为 $U_{dc}/2$ 。在一个开关周期内用 V.s 平衡法, A' 、 B' 、 C' 3 点对

逆变桥 O' 点的电压可以表示为

$$\begin{aligned} u_{A'O'} &= (1-d_{an})U_{dc}/2 + d_{an}(-U_{dc}/2) \\ u_{B'O'} &= (1-d_{bn})U_{dc}/2 + d_{bn}(-U_{dc}/2) \\ u_{C'O'} &= (1-d_{cn})U_{dc}/2 + d_{cn}(-U_{dc}/2) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 d_{an} 、 d_{bn} 、 d_{cn} 分别为第 n 个开关周期内与变流器下桥臂对应的各个开关的占空比。

由电路的对称性可知,当系统稳态时 $u_{O'O'}=0$,此时电压矢量的平衡方程为

$$\begin{aligned} u_{A'O'} &= u_a - j\omega L_f i_{fa} \\ u_{B'O'} &= u_b - j\omega L_f i_{fb} \\ u_{C'O'} &= u_c - j\omega L_f i_{fc} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 L_f 为有源滤波器的接入电感(假设三相接入电感值相等); i_{fa} 、 i_{fb} 、 i_{fc} 分别是 a、b、c 三相流过接入电感的电流。

因电感处于高频电路中,接入的电感值可取得非常小,在 50 Hz 工频系统中,电感压降远小于相电压,因此可以忽略不计。所以,式(8)可近似为

$$u_{A'O'} \approx u_a, \quad u_{B'O'} \approx u_b, \quad u_{C'O'} \approx u_c \quad (9)$$

若不考虑电容电压波动,综合式(7)和式(9)得:

$$\begin{aligned} d_{an} &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2u_a}{U_{dc}} \right) \\ d_{bn} &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2u_b}{U_{dc}} \right) \\ d_{cn} &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2u_c}{U_{dc}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

APF 的控制目标是使补偿后的电源侧电流波形为正弦且与电源侧电压同相位,这样非线性负载和 APF 合在一起就等效为一纯阻性负载 R_s ,即满足

$$u_a = R_s i_a, \quad u_b = R_s i_b, \quad u_c = R_s i_c \quad (11)$$

补偿后的电源侧电流幅值 I_s 与电源电压幅值 U_s 存在如下关系:

$$U_s = R_s I_s \quad (12)$$

由于稳定的直流侧电容电压 U_{dc} 与电源电压幅值 U_s 满足如下关系:

$$U_{dc} = K U_s \quad (13)$$

式中 K 为比例系数,需根据补偿的要求选取合适值。

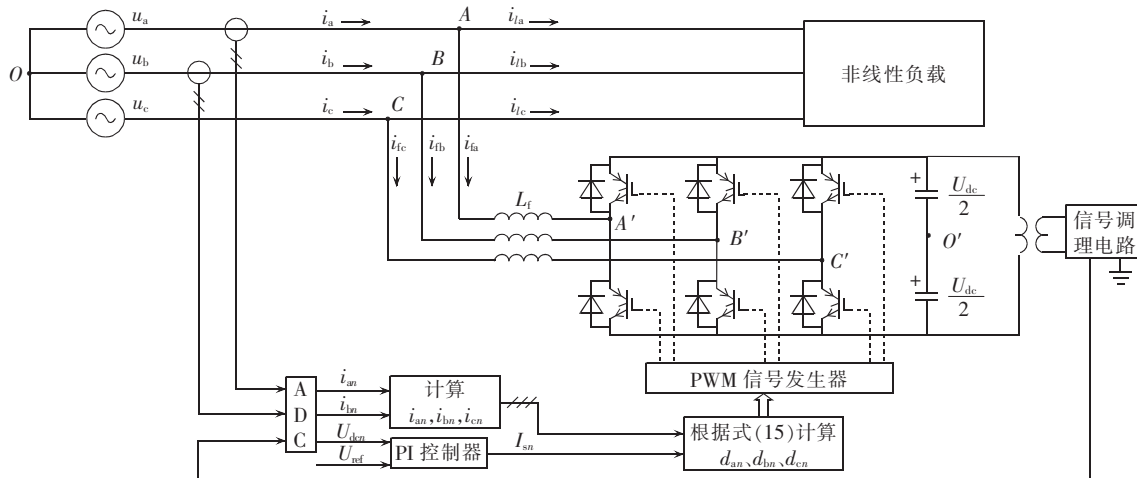


图 2 三相三线制的 APF

Fig.2 3-phase 3-wire APF

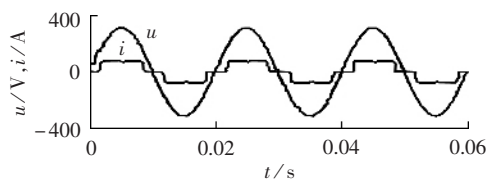
综合式(10)(11)(12)和式(13)可得:

$$\begin{aligned} d_{an} &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2i_{an}}{KI_{sn}} \right) \\ d_{bn} &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2i_{bn}}{KI_{sn}} \right) \\ d_{cn} &\approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2i_{cn}}{KI_{sn}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

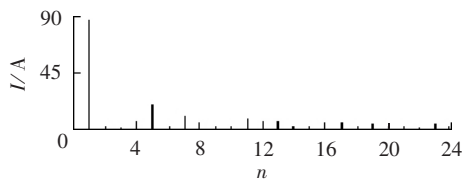
再综合式(6)和式(14)可得:

$$\begin{aligned} d_{an} &\approx \frac{1}{2} \left[1 - \frac{2i_{an}}{K \cdot PI(U_{dcn} - U_{ref})} \right] \\ d_{bn} &\approx \frac{1}{2} \left[1 - \frac{2i_{bn}}{K \cdot PI(U_{dcn} - U_{ref})} \right] \\ d_{cn} &\approx \frac{1}{2} \left[1 - \frac{2i_{cn}}{K \cdot PI(U_{dcn} - U_{ref})} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

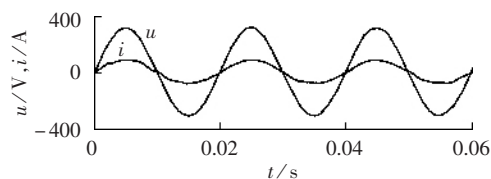
式中 i_{an}, i_{bn} 为第 n 个开关周期内系统电源侧电流的采样值, 因为 $i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0$, 所以 i_{cn} 可以由 i_{an}, i_{bn} 计算所得; U_{dcn} 为第 n 个开关周期内直流侧电容电压采样值; U_{ref} 为直流侧电容电压给定的参考值。



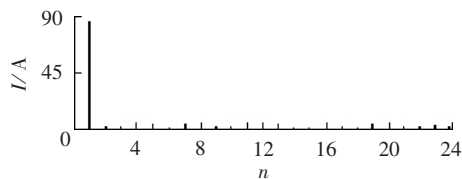
(a) 补偿前电网侧电压和电流波形



(c) 补偿前电网侧电流谐波分析



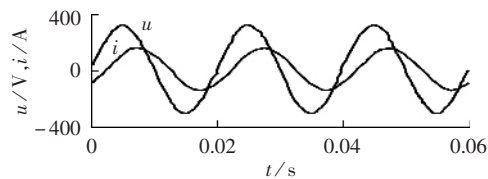
(b) 补偿后电网侧电压和电流波形



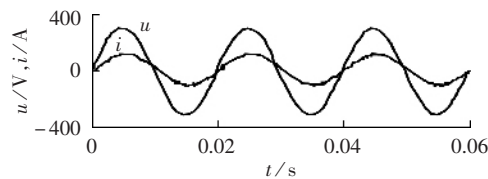
(d) 补偿后电网侧电流谐波分析

图 3 谐波抑制的仿真结果

Fig.3 Simulation results of harmonic suppression



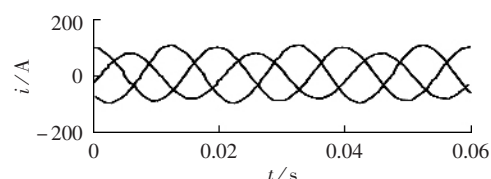
(a) 补偿前电网侧电压和电流波形



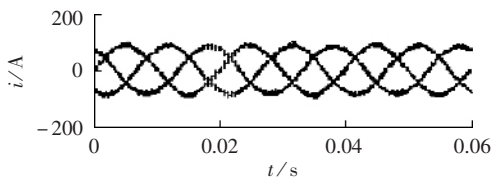
(b) 补偿后电网侧电压和电流波形

图 4 无功补偿的仿真结果

Fig.4 Simulation results of reactive power compensation



(a) 补偿前电网侧电流波形



(b) 补偿后电网侧电流波形

图 5 补偿负荷不对称的仿真结果

Fig.5 Simulation results of load unbalance compensation

式(15)即为采用该方法的三相三线 APF 的控制方程。

3 仿真结果

为了检验采用该控制方法的三相三线 APF 在谐波抑制、无功补偿和抑制负载不对称等方面的效果, 对其进行了计算机仿真, 仿真结果分别如图 3、4、5 所示(图 3(c)(d)横坐标 n 为谐波次数)。

图 3 给出了非线性负载为带阻感性负载的三相二极管整流桥时 APF 的工作情况。电网侧电流补偿前的 THD 为 27.65%, 补偿后为 7.12%。

图 4 给出了负载为三相对称的阻感性负载时 APF 的工作情况。电源侧系统补偿前的功率因数为 0.6579, 补偿后为 0.9999, 系统达到了单位功率因数的目标。

图 5 给出了负载为三相不对称阻感负载时 APF 的工作情况。由图可见, APF 能够有效地抑制负载不对称。

4 结论

目前, 探索性能更好的控制方法是有源电力滤波器研究的一个重要方向。所提出的控制方法只需

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, 采用该方法的

三相三线制电压型有源电力滤波器能够有效对谐波、无功和负载不对称进行补偿,具有很好的研究和实用价值。不足之处在于PI参数的调节比较麻烦,实际应用中有一定困难。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] HABROUK M E,DARWISH M K,MEHA P. Active power filters: a review[J]. IEE Proc Elect Power Appl,2000,147(5):403-413.
- [3] 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(2):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(2):126-132.
- [4] ZHOU Luo-wei,LI Zi-cheng. A novel active power filter based on the least compensation current control method[J]. IEEE Trans 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(8):28-32.
DAI Chao-bo,LIN Hai-xue,LEI Lin-xu. Simulation and analysis of single phase shunt active power filter[J]. Power System Technology,2001,25(8):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 K M,ZHOU Luo-wei,QIAO Chong-ming. Unified constant-frequency integration control of active power filter steady state and dynamics[J]. IEEE Trans 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] 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.
- [11] 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.
- [12] 付小强,刘凯,刘崇新. 基于神经网络的单相有源滤波器[J]. 电气与传动,2004,23(4):66-68.
FU Xiao-qiang,LIU Kai,LIU Chong-xin. Neural network-based single phase active filter[J]. Electrical Transmission,2004,23(4):66-68.
- [13] AKAGI H. The state of the art of power electronics in Japan[J]. IEEE Trans Power Electronics,1998,13(2):345-356.
- [14] 王跃,杨君,王兆安,等. 采用负载电流检测控制方式的单相并联混合型有源电力滤波器[J]. 电工电能新技术,2002,21(4):29-32.
WANG Yue,YANG Jun,WANG Zhao-an,et al. Single-phase parallel hybrid active power filter adopting novel control approach of load current detection[J]. Adv Tech of Elec Eng & Energy,2002,21(4):29-32.
- [15] 卓放,王跃,何益宏,等. 全数字化控制实现的三相四线制有源电力滤波器[J]. 电工电能新技术,2001,20(3):1-4.
ZHUO Fang,WANG Yue,HE Yi-hong,et al. Active power filter controlled by high-speed data processing chip for three-phase four-wire system[J]. Adv Tech of Elec Eng & Energy,2001,20(3):1-4.
- [16] AREDES M,HAFNER J,HEUMANN K. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies[J]. IEEE Trans on Power Electronics,1997,12(2):311-318.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

张秀平(1972-),女,内蒙古通辽人,讲师,研究方向为通讯理论及其在电力系统中的应用(E-mail:runnermhw@163.com);

钟奇(1980-),女,江苏常州人,助教,研究方向为通讯理论及其在电力系统中的应用。

Control method for voltage source active power filters

ZHANG Xiu-ping¹,ZHONG Qi²

(1. Hohai University,Changzhou 213022,China;

2. Wujin Branch of Jiangsu TV University,Changzhou 213161,China)

Abstract: The principle of energy commutation among voltage-source APF(Active Power Filter), source and nonlinear load is studied,the stability of DC bus capacitor voltage is analyzed and a method maintaining the stability of DC bus capacitor voltage is presented,based on which,a control method for voltage source APFs is introduced with the deduction of its control equations. The measurements of three-phase load currents and three-phase input voltages and the calculations of reference current,harmonic current and reactive current are eliminated. The duty ratios of switches in each switching cycle for APF control can be directly obtained by the simple calculation with two phase source currents and DC bus capacitor voltage. Simulation results verify that this control method can effectively compensate harmonic current and reactive current,and restrain load dissymmetry.

Key words: DC bus capacitor; three-phase three-wire; active power filter; control method