

基于单周控制的三相四线制 APF 直流侧 电压控制的分析与研究

梅 军, 郑建勇, 胡敏强, 丁祖军, 陈 娟

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 由于电网中各种非线性负载的增加, 谐波问题日益严重。有源电力滤波器(APF)是目前进行谐波抑制的一种有效方法, 而直流侧电容电压的稳定是 APF 控制中一个非常重要的环节, 直接影响其补偿性能。传统直流侧电压控制方法是 PI 比例调节法, 其中 PI 的参数难以实时确定。提出一种新的直流侧电压控制方法, 即利用单周控制策略控制三相四桥臂换流电路来给 APF 直流侧提供电压支撑。该方法不但控制电路简单, 而且换流电路实现单位功率因数运行, 不会对电网带来附加的谐波危害。最后通过 MATLAB/SIMULINK 仿真软件建立了系统仿真模型, 设计了试验样机。通过仿真与试验验证了该方法的稳定性与可靠性。

关键词: 有源电力滤波器; 直流侧电压; PWM 整流; 单周控制

Analysis and research of DC voltage control of three-phase four-leg APF based on one-cycle control method

MEI Jun, ZHENG Jian-yong, HU Min-qiang, DING Zu-jun, CHEN Juan

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Because of various nonlinear network load increases, harmonic problems become more serious. Active power filter (APF) is an effective method for the harmonic suppression, and the DC side voltage stability control is an important link of APF control, which has a direct impact on compensation performance. Traditional DC side voltage control method is PI method, where the PI parameters are difficult to ascertain. A new DC side voltage control method is proposed in this paper, providing the power supply for the APF DC side by controlling three-phase four-leg rectifier with one-cycle control strategy. Not only is the control circuit very simple, but also the rectifier operates in the way as unity power factor, and it will not bring about additional harmonics in the network. Finally, the system simulation is made by MATLAB/SIMULINK software. Stability and reliability of the given method is verified by simulation and experiment.

Key words: active power filter; DC side voltage; PWM rectifier; one-cycle control

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)13-0021-05

0 引言

随着电力电子器件在电网中的广泛应用, 电网中的谐波问题日益严重。目前, 进行谐波抑制的有效措施是采用有源电力滤波器(APF), 图 1 是并联型 APF 的结构, 通过检测系统电源的电流 i_s 和负载电流 i_l 经过计算采用合适的 PWM 控制方法使 APF 产生和谐波相反的电流来抵消, 从而补偿谐波。它是一个复杂的非线性动态补偿系统^[1], APF 要有效地对系统谐波电流进行补偿, 根据 PWM 控制规律, 必须维持逆变器的直流侧电容电压为一恒定的值^[2-4], 如果直流侧

电容电压有很大的波动, 就会影响 APF 的补偿性能, 出现过补偿或者欠补偿。因此, 直流侧电压的稳定是有源电力滤波器进行谐波补偿时一个重要的环节。

目前直流侧电容电压的控制方法主要有两种, 一种是利用调压器或者二极管整流器给直流侧提供电源, 其不足是直流侧电压不一定能够稳定在电压参考值; 另一种方法是通过适当的控制, 利用装置自身来完成升压过程, 现行的一般方法是利用 PI 比例积分调节, 将电容电压值调节到参考值处。PI 参数整定方法有很多种, 如自适应 PID、模糊逻辑、神经网络以及非线性控制方法^[5,6]等, 但这些理论方

法不容易实现, PI 参数的确定也比较复杂, 难以进行实时整定, 并且单纯靠 PI 比例调节来使电压达到稳定具有一定难度。另外, 在大电流冲击时, 直流侧电压会出现大幅的波动, 这将直接影响 APF 的补偿性能。

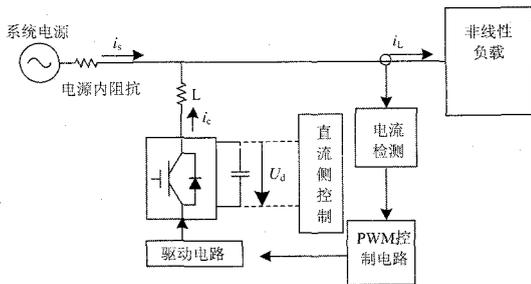


图1 并联有源滤波器结构

Fig.1 Schematic diagram of APF

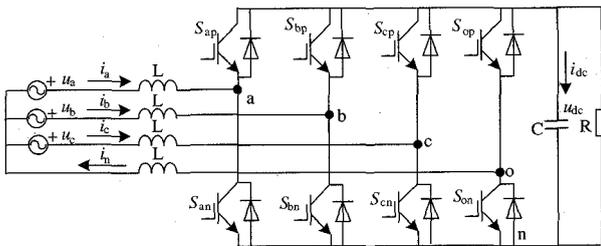


图2 三相四桥臂电压型 PWM 换流电路结构图

Fig.2 Three-phase four-leg voltage source PWM rectifier

本文在深入分析三相四桥臂变流电路拓扑结构的基础上, 提出一种新的用于 APF 直流侧电压的控制方法, 即利用单周控制策略实现三相四桥臂的 PWM 整流, 为 APF 直流侧提供电压, 从而有源滤波器主电路进行逆变得到系统所需要的补偿电流。该方法由于使得直流侧电压控制问题从 APF 的补偿控制中分离出来, 大大提高了系统的稳定性与可靠性, 确保了装置的补偿性能。

1 单周控制策略的理论分析研究

单周控制作为一种非线性控制, 最早由美国学者 Keyue M.Smedley 和 Slobodan Cuk 提出^[7], 其基本思想是通过控制开关的导通与关断信号的占空比, 使每个周期内开关变量的平均值与控制参考信号相等或成一定比例, 从而消除稳态和瞬态误差。单周控制最初主要应用于有源电力滤波器^[8-10], 本文借助其基本控制思想, 将其应用于三相四桥臂的整流电路之中。与传统 PWM 整流控制方法相比, 不仅是一种全新的思路, 而且它开关频率恒定, 控制电路简单, 不需要使用复杂的空间矢量变换算法, 具有快速消除开关变量平均值和控制参考信号之间

的稳态及动态误差的优点。

现有 PWM 整流电路的研究主要针对于单相系统和三相三线制系统^[11,12], 本文给出了一种新型的三相四桥臂 PWM 换流电路, 其主电路采用四桥臂结构, 每个桥臂的通断均由一个 IGBT 功率开关和一个反并联的二极管来实现, 具体电路结构如图 2 所示。为了方便考虑, 假设三相电感及中线电感值均为相等值 L, 并且假设整流电路工作于连续导电模式, 三相系统对称且开关频率远高于系统工频。四个桥臂的每对开关以互补的方式运行, 例如开关 S_{ap} 、 S_{an} 的占空比分别是 $1-d_{an}$ 、 d_{an} , 其余桥臂的开关情况以此类推。节点 a、b、c、o 相对于节点 n 的平均电压可以写为:

$$\begin{aligned} u_{an} &= (1-d_{an})u_{dc}, & u_{bn} &= (1-d_{bn})u_{dc}, \\ u_{cn} &= (1-d_{cn})u_{dc}, & u_{on} &= (1-d_{on})u_{dc} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: d_{an} 、 d_{bn} 、 d_{cn} 和 d_{on} 分别是开关 S_{an} 、 S_{bn} 、 S_{cn} 和 S_{on} 的占空比, u_{dc} 是直流侧的电容器电压。

由式(1)可以得到:

$$\begin{aligned} u_{ao} &= (d_{on} - d_{an})u_{dc}, & u_{bo} &= (d_{on} - d_{bn})u_{dc}, \\ u_{co} &= (d_{on} - d_{cn})u_{dc} \end{aligned} \quad (2)$$

另外, 由图 2 可以列出电压方程:

$$\begin{cases} u_{ao} = u_a - j\omega Li_a - j\omega Li_n \\ u_{bo} = u_b - j\omega Li_b - j\omega Li_n \\ u_{co} = u_c - j\omega Li_c - j\omega Li_n \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{和} \begin{cases} u_a \approx u_{ao} = (d_{on} - d_{an})u_{dc} \\ u_b \approx u_{bo} = (d_{on} - d_{bn})u_{dc} \\ u_c \approx u_{co} = (d_{on} - d_{cn})u_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

其中方程 (4) 是因为整流电路中的电感 L 较小; 又因为三相系统对称, 有 $u_a + u_b + u_c = 0$, 因此由式(4)可以得到:

$$d_{on} = \frac{1}{3}(d_{an} + d_{bn} + d_{cn}) \quad (5)$$

所以将式 (5) 代入方程 (4) 得到:

$$\begin{pmatrix} -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{an} \\ d_{bn} \\ d_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{u_{dc}} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (6)$$

方程(6)给出了开关占空比和三相电压之间的关系,其中系数矩阵是奇异的,它没有唯一解,假设一种解的形式如下^[14]:

$$\begin{aligned} d_{an} &= k_1 + k_2 \frac{u_a}{u_{dc}}, & d_{bn} &= k_1 + k_2 \frac{u_b}{u_{dc}}, \\ d_{cn} &= k_1 + k_2 \frac{u_c}{u_{dc}} \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可以求得 $k_2 = -1$, k_1 可以取任何值。但因为开关占空比必须为小于 1 的非负数,故 k_1 受到如下条件的限制:

$$\frac{u_a}{u_{dc}} \leq k_1 \leq 1 + \frac{u_a}{u_{dc}} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7)有:

$$\begin{aligned} \frac{u_a}{u_{dc} \cdot k_1} &= 1 - \frac{d_{an}}{k_1}, & \frac{u_b}{u_{dc} \cdot k_1} &= 1 - \frac{d_{bn}}{k_1}, \\ \frac{u_c}{u_{dc} \cdot k_1} &= 1 - \frac{d_{cn}}{k_1} \end{aligned} \quad (9)$$

为了实现单位功率因数整流,必须使得系统侧的三相电流呈正弦对称波形,且每相系统电流须与电压保持同相位,另外由于本文研究的是三相四线制系统,理想情况下应使得中线电流为零。从系统电源侧看,三相负载可以看成三相平衡的纯电阻负载。

因此,系统的控制目标为:

$$u_a = R_e \cdot i_a, \quad u_b = R_e \cdot i_b, \quad u_c = R_e \cdot i_c, \quad i_n = 0 \quad (10)$$

其中: R_e 是系统补偿后从电源侧看负载的等效电阻。所以综合方程(5)、(9)和(10)可得:

$$\begin{aligned} u_m \left(1 - \frac{d_{an}}{k_1} \right) &= R_s \cdot i_a, & u_m \left(1 - \frac{d_{bn}}{k_1} \right) &= R_s \cdot i_b, \\ u_m \left(1 - \frac{d_{cn}}{k_1} \right) &= R_s \cdot i_c, & u_m \left(1 - \frac{d_{on}}{k_1} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $u_m = \frac{k_1 u_{dc} R_s}{R_e}$, R_s 是系统交流侧输入电流测

量电阻。由方程(11)可以看出三相电流及中线电流、四个桥臂的开关占空比和电压调节器输出电压之间的关系,也是本文实现单周控制三相四桥臂整流电路的依据。该控制式可以用带复位的积分器、脉冲发生器、比较器和触发器等模拟器件来实现。

2 仿真结果及分析

为了验证上述提出的直流侧电容电压控制方法

的有效性和可靠性,本文借助于 Simulink 仿真平台,建立了如图1所示的三相四桥臂的 PWM 整流电路模型,控制方法采用上述的单周控制策略。系统仿真参数如下:系统三相电压有效值 220 V,工频 50 Hz;开关频率 10 kHz;交流侧电感 0.004 H;直流侧输出电压 700 V,输出滤波电容 2200e-6 F;负载电阻为 50 Ω 。

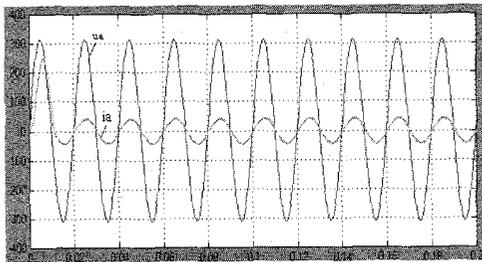
图 3 是系统带稳态负载时,经过单周控制之后的电流、电压波形及直流侧电容电压波形,其中电压单位为 V,电流单位为 A。由图 3 可知,相电流能够很好地跟踪相电压,三相电流正弦对称,中线电流几乎为 0。另外经过检测,系统交流侧输入功率因数为 0.99,实现了单位功率因数整流,可以看出直流侧电容电压能够快速稳定在指定电压值处,超调量较小。

为了验证系统的动态性能,同时进行了负载突变时的动态响应仿真。当负载发生阶跃性变化时,系统能否快速跟踪到负载的变化并实时准确地实现整流是衡量单周控制策略优劣的一个重要指标。在 0.15 s 时系统负载由原来的 50 Ω 突变为 25 Ω ,其动态性能仿真效果如图 4 所示,其中电压单位为 V,电流单位为 A。从图 4 中可以看出,系统在负载发生突变之后,相电流仍然能够很好地快速跟踪相电压,三相电流正弦对称,中线电流近似为 0。经检测,系统交流侧输入功率因数也达到了 0.99。图 4 (c)是直流侧电容电压波形,在负载发生突变以后,系统能够快速响应并调制使直流侧电容电压稳定在参考电压值处,超调量也比较小。因此可以看出,采用该控制策略,系统的动态性能良好。

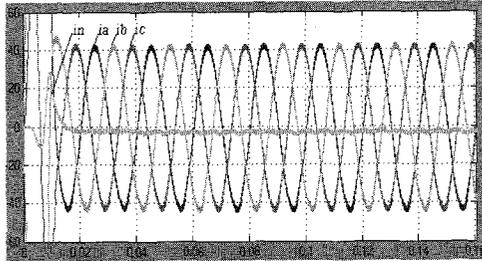
3 试验效果与分析

将本文设计单周控制的整流电路应用到有源滤波器样机的直流侧电压控制中,试验条件为交流电源电压 220 V、频率为 50 Hz,APF 的耦合电感 L 为 5 mH,直流侧电容为 5000 μ F,负载端为三相不可控整流器,整流器直流侧串联一个 2.5 Ω 的电阻和一个 35 mH 的电感,传感器采用霍尔传感器。APF 均采用电流滞环控制。如不采取谐波抑制措施会使交流电源系统侧将受到谐波污染。图 5A 为直流侧电容的电压流波形,图 5B 为检测谐波和无功电流谐波后经过 APF 补偿后的系统侧 A 相的电流波形,畸变率为 4.8%,从试验结果可以看出由于采用新型的单周控制的整流电路,可以保证在 APF 系统对谐波和无功进行补偿时直流侧电容电压稳定在参考电压值处,超调量也比较小,比较稳定,从而

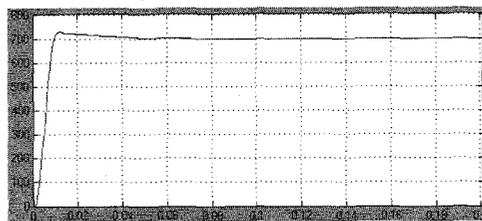
提高了补偿的效果。



(a) a相电压和电流波形



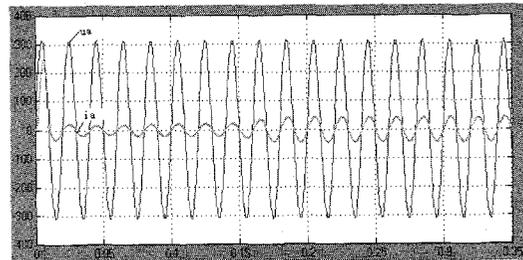
(b) 三相及中线电流波形



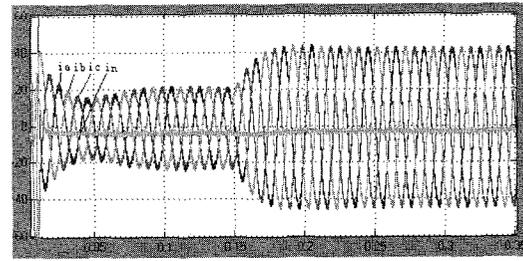
(c) 直流侧电容电压波形

图3 带稳态负载时电压及电流波形

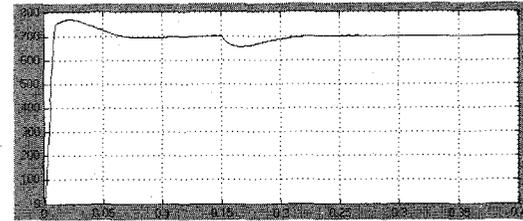
Fig.3 Voltages and currents with steady load



(a) a相电压和电流波形



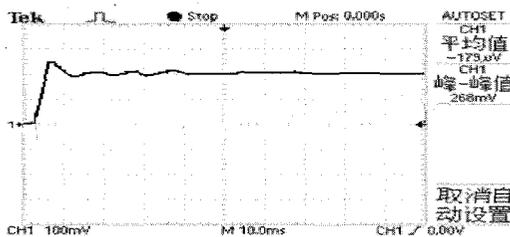
(b) 三相及中线电流波形



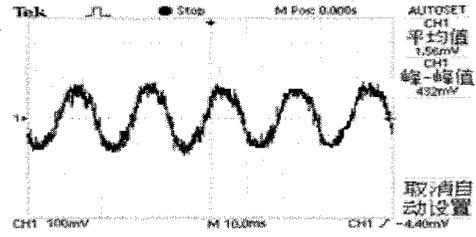
(c) 直流侧电压波形电容

图4 带动态负载时电压及电流波形

Fig.4 Voltages and currents with dynamic load



(a) 直流侧电容电压



(b) 补偿后系统电流波形

图5 采用单周法控制直流侧电压的APF试验波形

Fig.5 The waveform of APF experiment

4 结论

本文提出了一种新的三相四桥臂 PWM 整流电路结构,通过单周控制对直流侧电容电压进行调制,使得该电容电压为一恒定值,从而为有源电力滤波器的直流侧提供电源,进而通过 APF 主电路进行逆变后得到系统所需要的补偿电流。该控制方法不但能使直流电压在一定范围内稳定可调,而且交流输

入侧能得到较高的功率因数,不会对电网带来附加的谐波危害。另外,该方法将直流侧电压控制从 APF 的补偿性能中分离出来,确保了 APF 补偿装置的稳定可靠运行。仿真效果验证了该方法的稳定性与可靠性,这对于 APF 直流侧电容电压稳定环节具有现实而重要的意义。

参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制与无功功率补偿[M].北

- 京:机械工业出版社,1998.
- WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 杨君,王兆安,邱关源.并联型电力有源滤波器直流侧电压的控制[J].电力电子技术,1996,(4):48-50, 89.
- YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan. DC-side Voltage Control of Shunt Active Power Filter [J]. Power Electronics, 1996,(4):48-50, 89.
- [3] 常鹏飞,曾继伦,王彤,等.三相四线有源电力滤波器直流侧电压控制方法[J].电力系统自动化,2005, 29(8): 75-78.
- CHANG Peng-fei, ZENG Ji-lun, WANG Tong, et al. Research on DC-side Voltage Control Methods of Three-phase Four-wire Active Power Filters [J]. Automation of Electric Power Systems,2005, 29(8): 75-78.
- [4] 丁凯,陈允平,王晓峰,等.并联型有源电力滤波器直流侧电压的相关问题探讨[J].电工技术杂志,2002,(10):27-29.
- DING Kai, CHEN Yun-ping, WANG Xiao-feng, et al. Investigation on Relevant Problems for DC Side Voltage of Parallel Active Power Filter[J]. Electrotechnical Journal, 2002,(10):27-29.
- [5] 赵振波,李和明.PWM 整流器 PI 设计[J].华北电力大学学报,2003,30(4):34-37.
- ZHAO Zhen-bo, LI He-ming. PI Regulator and Parameter Design of PWM Rectifier[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(4):34-37.
- [6] 曾雨竹,张仲超,曾继伦,等.改善有源电力滤波器系统动态性能的电压控制策略[J].电力系统自动化,2006,30(13):43-46, 63.
- ZENG Yu-zhu, ZHANG Zhong-chao, ZENG Ji-lun, et al. Novel Voltage Control Strategy to Improve the Dynamic Performances of Active Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13):43-46, 63.
- [7] Smedley K M, Cuk S. One-cycle Control of Switching Converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(6):625-633.
- [8] LI Cheng, ZOU Yun-ping. One-cycle Control Active Power Filter for Three-phase Four-wire Systems[J]. Power Electronics Systems and Applications, 2004:61-65.
- [9] QIAO Chong-ming, Smedley K M, Maddaleno F. A Signal-phase Active Power with One Cycle Control Under Unipolar Operation[J].IEEE Trans,2004,51(8): 1623-1630.
- [10] 余凤兵,梁冠安.单极调制单周控制有源电力滤波器[J].电力自动化设备,2006,26(2):43-46.
- YU Feng-bing, LIANG Guan-an. Unipolar Modulation Active Power Filter with One-cycle Control[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(2):43-46.
- [11] 朱永亮,马惠,张宗廉.三相大功率因数PWM整流器双闭环控制系统设计[J].电力自动化设备,2006,26(11):87-91.
- ZHU Yong-liang, MA Hui, ZHANG Zong-lian. Dual Closed-loop Control for Three-phase High-power-factor PWM Rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006,26(11): 87-91.
- [12] 罗悦华,伍小杰,王晶鑫.三相PWM整流器及其控制策略的现状 & 展望[J].电气传动,2006,36(5):3-8.
- LUO Yue-hua, WU Xiao-jie, WANG Jing-xin. Current Situation and Prospect of the Topological Structure and Control Strategy for Three-phase PWM Rectifiers[J]. Electric Drive, 2006, 36(5):3-8.

收稿日期: 2007-11-16

作者简介:

梅军(1971-),男,讲师,博士,研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: mei_jun@seu.edu.cn

郑建勇(1966-),男,教授,研究方向为电力电子与电力传动;

丁祖军(1978-),男,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

《电力系统保护与控制》(原刊名《继电器》)杂志社网站全新改版升级

《电力系统保护与控制》杂志社网站于2008年全新改版全新升级,建立远程稿件采编系统,是集读者、作者、审稿专家和编辑于一体的网络化期刊工作平台。

本刊原则上不受理电子邮件投稿,所有稿件均需作者登录我们的网站 <http://www.dlbh.net> 注册,取得用户名和设定密码后,由“作者登录”处进入投稿,并可由此随时查询稿件处理状态和处理意见;审稿专家也凭编辑部提供的用户名和密码由“审稿登录”处进入在线审稿;编辑的稿件处理工作全部在网上进行,在收到初稿、提交审稿意见时,将通过电子邮件通知注册作者。

有任何问题,请随时与本编辑部联系。联系电话:0374-3212254, 0374-3212234。