

# 基于单周控制的四桥臂三相四线制有源电力滤波器的研究

庄华<sup>1</sup>, 周林<sup>2</sup>, 张代红<sup>3</sup>

(1. 常州工学院, 江苏 常州 213002; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400030;  
3. 恒创电力设计院有限公司, 浙江 嘉兴 314033)

**摘要:** 为了将单周控制方法用于三相四线制系统, 本文提出将四桥臂三相四线制有源电力滤波器的主电路分为三相桥和N相半桥两个独立的子电路, 并分别对其采用单周控制。三相桥的单周控制方程及控制电路与三相三线系统相同; 通过对电路的分析着重推出了N相半桥电路的单周控制方程和控制电路。最后进行了整体电路的仿真研究。仿真结果表明: 采用该方法电路简单, 不仅可以有效地补偿系统的三相谐波电流, 还可以补偿中线电流, 在三相四线制系统中有一定的应用前景。

**关键词:** 有源电力滤波器; 单周控制; 三相四线制; 子电路; N相半桥

## Study on one-cycle controlled three-phase four-wire active power filter with four-leg

ZHUANG Hua<sup>1</sup>, ZHOU Lin<sup>2</sup>, ZHANG Dai-hong<sup>3</sup>

(1.Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China; 2.Chongqing University, Chongqing 400030,China;  
3.Hengchuang Electric Power Design Institute Ltd, Jiaxing 314033,China)

**Abstract:** In order to use one-cycle control method in three-phase four-wire power system, this paper partitions the main circuit of three-phase four-wire APF with four-leg into two sub-circuits, including three-phase bridge circuit and N-phase half-bridge circuit which are based on one-cycle control independently. The one-cycle control equation and control circuit in three-phase bridge is similar to the three-phase three-wire system, the control equation and control circuit in N-phase half-bridge is mainly set up through analysis to the circuit. After that, the simulation of overall circuit is used to validate the scheme. The simulation results verify the control circuit is very simple, and can compensate the neutral current as well as three-phase harmonic and reactive currents effectively. So this control method should have a good application in three-phase four-wire systems.

**Key words:** active power filter; one-cycle control; three-phase four-wire; sub-circuit; N-phase half-bridge circuit

中图分类号: TM76; TN713 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)24-0036-04

## 0 引言

由于三相四线制系统在工厂供电、民用住宅等电力系统中广为应用, 其中的谐波和三相不平衡问题越来越引起人们的重视, 所以对三相四线制系统中的谐波和三相不平衡进行研究具有重要的意义<sup>[1]</sup>。有源电力滤波器(APF)是一种可动态地补偿谐波和无功电流的电力电子装置, 四桥臂三相四线制 APF 可用于三相四线系统的谐波和无功电流的补偿。单周控制(OCC)是一种非线性控制方式, 通过控制开关占空比, 在每个周期内使开关变量的平均值与控制参考值相等或成一定比例, 从而消除稳态和瞬态误差。OCC 方法已经在单相和三相 APF 上得到了成功的应用, 采用该方法不需要检测谐波和无功电流量, 控制电路相对简单, 补偿效果良好, 且有较好

的实时性<sup>[2,3]</sup>。

本文提出将单周控制运用于四桥臂三相四线制 APF, 并对 APF 主电路中的三相桥和 N 相半桥分别控制: 三相桥采用已成熟的以 APF 直流侧电压为参考的单周控制方法; N 相半桥则采用以电流为参考的单周控制方式。通过仿真研究来证明该方案的有效性。

## 1 单周控制的四桥臂三相四线制有源电力滤波器

图 1 中, 符号  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$  和  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  代表三相电源电压和电源电流, 电压平衡且无畸变;  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$  是三相负载电流;  $i_{so}$ 、 $i_{Lo}$  分别代表电源侧中线电流和负载侧中线电流;  $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$  和  $i_{co}$  分

别代表有源电力滤波器产生的三相及中线补偿电流,  $v_{dc}$  是直流侧电容电压。控制器的输出  $Q_{ap}$ 、 $Q_{an}$ 、 $Q_{bp}$ 、 $Q_{bn}$ 、 $Q_{cp}$ 、 $Q_{cn}$ 、 $Q_{np}$ 、 $Q_{nn}$  分别是主电路开关  $S_{ap}$ 、 $S_{an}$ 、 $S_{bp}$ 、 $S_{bn}$ 、 $S_{cp}$ 、 $S_{cn}$ 、 $S_{np}$ 、 $S_{nn}$  的控制信号。

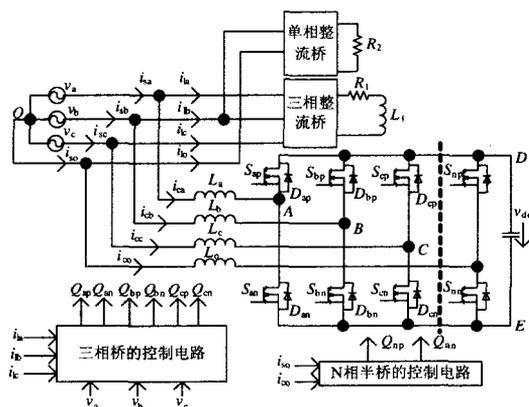


图 1 单周控制的四桥臂三相四线制 APF 的原理图

Fig.1 Schematic diagram of three-phase four-wire APF with four-leg based on OCC

APF 的主电路是一个四桥臂三相变换器, 与非线性负载(整流桥)并联接入电网中, 可以看作一个四相补偿装置, 用于产生对三相四线制系统进行补偿的电流。因为能量在交流电源和 APF 直流侧电容间双向流动, 变流器工作在四象限状态。四桥臂三相四线制 APF 中专门用一对桥臂提供系统中线电流的补偿, 可以把图中滤波器的主电路看成两个子回路: 三相桥式电路(A、B、C 相); 半桥电路(N 相), 它们有共同的直流端。

三相桥的任务是强迫电源电流  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  跟踪电源电压  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$ , 在三相四线制系统的调节下产生谐波和无功电流。三个桥臂上的每一对全控型开关互补, 例如  $S_{ap}$ 、 $S_{an}$  的占空比分别为  $1-d_{an}$  和  $d_{an}$ 。

N 相半桥电路在控制电路的作用下可单独提供三相四线制系统的中线电流。它的任务如下:

1) 提供中线电流以补偿由单相负载和三相不平衡负载所产生的电流分量, 该电流通常由配电系统通过一条长距离中线提供。

2) 消除由开关负载所导致的共模电流, 从而减小共模电压。

中线电流补偿的优点有可以消除过多的不同频率的中线电流、对共模分量快速响应等。N 相半桥

上的两个开关可以同时关断, 但不能同时导通, 以避免出现短路。

可以看出, 三相桥和 N 相半桥都是有源电力滤波器的功能模块, 而且都可以单独使用, 例如, 当采用三相三线制负载或无需抑制共模电流时只用三相桥就可以了; 不存在三相桥时, N 相半桥变换器可用于限制电源侧中线电流。

## 2 三相桥的单周控制方法

三相桥的单周控制方法和三相三线制 APF 的单周控制方法完全相同。设定三相电源电流跟踪三相电源电压, 即电源电流与电源电压同频同相, 由文献[3]可知控制方程为

$$\begin{cases} R_s \cdot i_{sa} = v_m - v_m \cdot \frac{d_{an}}{K_1} \\ R_s \cdot i_{sb} = v_m - v_m \cdot \frac{d_{bn}}{K_1} \\ R_s \cdot i_{sc} = v_m - v_m \cdot \frac{d_{cn}}{K_1} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中设定

$$v_m = \frac{v_{dc} \cdot R_s \cdot K_1}{R_c}$$

这里  $R_s$  是交流侧电源电流测量阻抗,  $R_c$  是补偿后 APF 和负载的总等效电阻。式(1)描述了电源电流、开关占空比和电压调节器输出三个量之间的关系, 只要通过控制有源电力滤波器主电路三相桥上的开关, 使得开关占空比  $d$ 、电压调节器输出  $v_m$  和电源电流  $i_s$  满足式(1), 就能实现三相电源电流的有效补偿。根据控制方程可以得到图 2 所示的控制电路, 控制电路由可复位积分器和一些逻辑元件如触发器、比较器和时钟来实现。积分器的时间常数可设为  $\tau = K_1 \cdot T_s$ ,  $T_s$  是开关周期。和一般的 PWM 控制方法相比, 单周控制方法不需要指令电流运算电路, 也就不需要使用乘法器, 结构较为简单。

控制电路如图 2 所示。CLK 是时钟脉冲信号, 频率为 50 kHz, 每个时钟周期开始时, 积分器开始对逆变器直流侧电容电压的误差信号开始积分, 积分到  $R_s i_{sa}$  等于  $v_m (1-t/\tau)$  时, 比较器的输出翻转并产生复位信号, 积分器被复位, 输出保持不变, 等到下一周期时钟脉冲到时, 又重复上一周期的动作。

三相桥单周控制器的控制波形如图 3 所示, 从仿真波形中可以看出, 控制器的控制过程与前面的

分析一致。

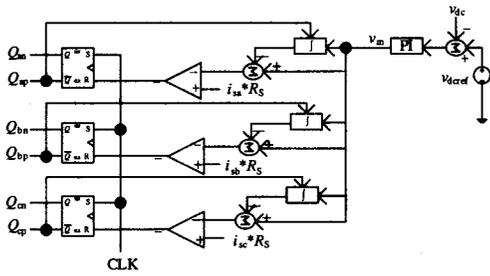


图 2 三相变换器的单周控制器

Fig.2 OCC controller for three-phase converter

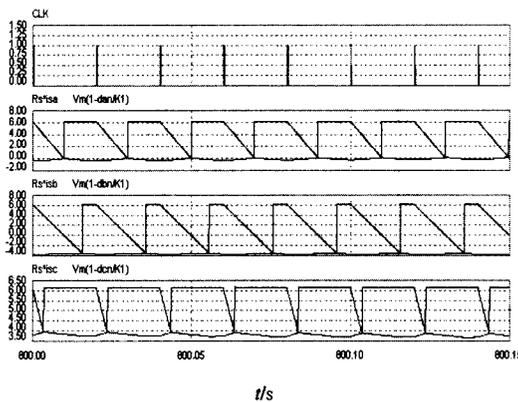


图 3 单周控制器的控制波形

Fig.3 Control waveforms of the OCC controller

### 3 N 相半桥的单周控制方法

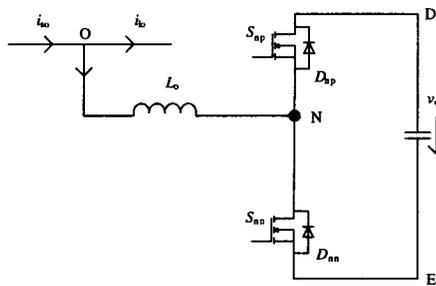


图 4 N 相变换器的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit for the N-phase converter

N 相变换器的等效电路如图 4 所示，它的控制目标是用这个 N 相变换器提供电网负载侧的中线电流，即  $i_{co} = -i_{Lo}$ ，等效于

$$i_{so} = i_{co} + i_{Lo} = 0 \quad (2)$$

通过使电源侧中线电流最小化可以实现这一目标。将  $i_{so}$  反向放大后作为单周控制所跟踪的参考值，即

$$v_{refn} = -h \cdot i_{so} \quad (3)$$

因而，N 相半桥将产生一个数值与  $i_{Lo}$  相近、大小相反的补偿电流  $i_{co}$ ，以减小流向电源中线的电流。如果没有 N 相半桥， $i_{Lo}$  将流向电源，导致系统不平衡。

稳态时，单周控制方程设定为

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{d_{nn} T_s} i_{co} dt = d_{nn} \overline{i_{co}} = -h \cdot i_{so} \quad (4)$$

$d_{nn}$  为开关  $S_{nn}$  的占空比， $\overline{i_{co}}$  为每个开关周期内 N 相变换器的平均补偿电流。从上式可以看出：增益  $h$  足够大时，电源侧的中线电流接近于零，也就是说，负载侧的中线电流仅由 APF 的 N 相半桥提供，而非由电源提供，因此也就实现控制了目标方程。

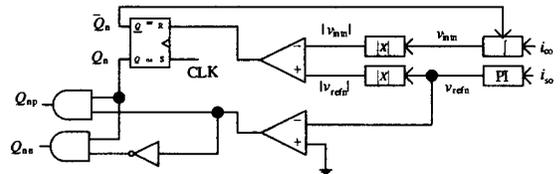


图 5 N 相变换器的单周控制器

Fig.5 OCC controller for N-phase converter

图 5 为 N 相半桥单周控制器的结构图，它包括一个可复位积分器，一个 RS 触发器，一个比较器，以及一些线形和逻辑元件。为了保证能用一套积分器和触发器实现双极输出，还使用了两个绝对值电路和逻辑分配电路，图 5 中的输入和输出信号的定义与图 1 相同，CLK 的频率为 50 kHz，输出控制信号  $Q_{np}$ 、 $Q_{nn}$  经触发器后作用于主电路开关  $S_{np}$ 、 $S_{nn}$ 。

当参考信号  $v_{refn}$  为正时，信号  $Q_{np}$  保持“0”， $Q_{nn}$  的状态取决于触发器的输出  $Q_n$ 。在每一时钟周期的开始，时钟脉冲到，信号  $Q_{nn}$  为“1”，变换器的补偿电流  $i_{co}$  从初始值开始上升，积分器开始对  $i_{co}$  从零开始积分，当积分结果  $|v_{intn}|$  等于  $|v_{refn}|$  时，比较器的输出翻转， $\overline{Q_n}$  产生复位信号，积分器复

位, 信号  $Q_{nn}$  为“0”。等到下一周期时钟脉冲到时, 又重复上一周期的动作。当  $v_{refn}$  为负时, 过程与此相似。

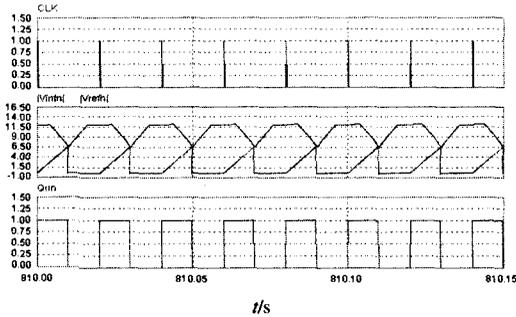


图 6 N 相变换器的单周控制器控制波形

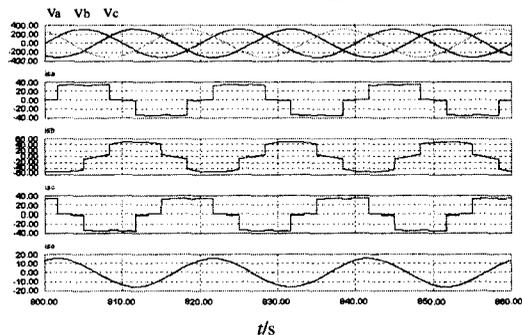
Fig.6 Control waveforms of N-phase converter's OCC controller

图 6 的仿真波形反映了可复位积分器和比较器的作用过程。可以看出单周控制通过调节开关占空比, 在每个周期内使逆变器开关变量的平均值与控制参考信号相等, 瞬态响应快, 前一周期的误差不会带到下一周期。

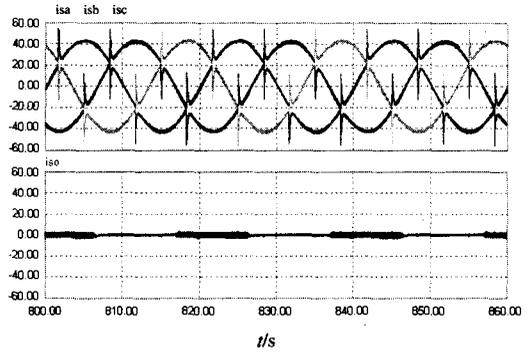
#### 4 仿真研究

为验证理论分析的结果, 建立总体的电路模型并进行仿真研究。三相电压的相电压有效值为 220 V。采用的非线性负载为整流桥, 如图 1 所示: a、b、c 三相接一个三相二极管整流桥(电感滤波,  $R_1=15 \Omega$ ,  $L_1=15 \text{ mH}$ ), 同时 b 相还接一个单相整流桥( $R_2=20 \Omega$ )。开关频率为 50 kHz。仿真波形如图 7 所示。

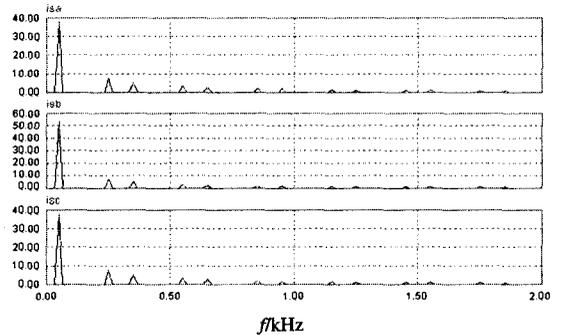
图 7(a)为补偿前三相电源电流及电源侧中线电流, 图 7(b)为补偿后三相电源电流及中线电流。可以看出, 补偿前三相电源电流波形畸变严重, 近似为方波且存在不平衡, 中线电流也很大。补偿后三相电源电流有了很大改善, 波形对称且近似为正弦波, 畸变很小, 且中线电流幅值大大降低。



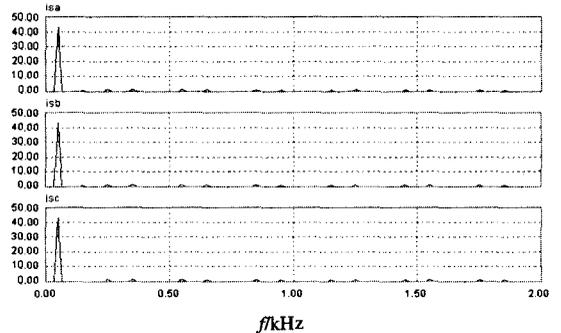
(a) 补偿前电源电压和电源电流



(b) 补偿后电源电流和中线电流



(c) 补偿前电源电流频谱



(d) 补偿后电源电流频谱

图 7 仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms

补偿前, 三相电源电流谐波畸变率(THD)分别为 30.9%、21.9%、31.0%, 补偿后 THD 值分别降为 7.67%、7.65%、7.66%。图 7(d)为补偿前的电源电流频谱, 图 7(e)为补偿后的电源电流频谱。从图中可以看出, 经过 APF 滤波后, 三相电源电流谐波幅值有所减小。

#### 5 总结

论文在对四桥臂三相四线制有源电力滤波器主电路进行分析的基础上, 将单周控制分别运用于主电路中的三相桥和 N 相半桥的控制, 提出在 N 相半 (下转第 25 页 continued on page 25)

出基于潮流计算数据的跟踪戴维南等值参数, IEEE 118 系统算例表明了该方法的可行性和有效性。

随着广域测量系统(WAMS)的推广与发展,在负荷节点跟踪戴维南等值参数的数据源可以采用更具有同步性的动态数据,得到更加接近真实状况的电压稳定信息。

### 参考文献

- [1] 王漪, 柳焯. 电力系统紧急无功补偿调控模式[J]. 电力系统自动化, 2000, 8(10): 45-48.  
WANG Yi, LIU Zhuo. Emergent Reactive Power Compensation in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 20(2): 19-23.
- [2] 徐冰凉, 柳焯, 王永刚, 等. 电网负荷节点临界阻抗模的性质及意义[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4): 91-95.  
XU Bing-liang, LIU Zhuo, WANG Yong-gang, et al. The Nature and Connotation of the Critical Impedance Module of the Load Bus in Power Network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999, 31(4): 91-95.
- [3] 王漪, 柳焯. 基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 28-30.  
WANG Yi, LIU Zhuo. Tracking and Estimation of System Parameter Using Thevenin's Equivalency[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 28-30.
- [4] 王芝茗, 王漪, 徐敬友, 等. 关键负荷节点集合电网侧戴维南参数预估[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 16-20.  
WANG Zhi-ming, WANG Yi, XU Jing-you, et al. Prediction of Thevenin's Equivalent Parameters on Electrical Power Network Side for the Muster of Key Load Nodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1):

16-20.

- [5] 李娟, 刘修宽, 曹国臣, 等. 一种面向节点的电网等值参数跟踪估计方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 30-33.  
LI Juan, LIU Xiu-kuan, CAO Guo-chen, et al. A Tracking Estimation Method for Network Equivalent Parameters of Facing the Node[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 30-33.
- [6] 李来福, 于继来, 柳焯. 戴维南等值跟踪的参数漂移问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 1-5.  
LI Lai-fu, YU Ji-lai, LIU Zhuo. Research on Parameters Drift Problem in Tracking Thevenin Equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 1-5.
- [7] Begovic V K. Use of Local Measurement to Estimate Voltage-Stability Margin[J]. IEEE Trans on PWRS, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [8] Ajarapu V, Christy C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [9] Fusco G, Losi A, Russo M. Constrained Least Squares Method for Parameter Tracking of Power System Steady-State Equivalent Circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1073-1080.

收稿日期: 2007-06-06; 修回日期: 2007-06-27

作者简介:

安天瑜 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析和控制、电力系统风险评估等; E-mail: antianyu2001@yahoo.com.cn

周苏荃 (1958-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统状态估计等。

(上接第 39 页 continued from page 39)

桥中以电流作为控制参考, 并进行了控制方程的推导和建模。采用该控制方法的四桥臂三相四线制有源电力滤波器不需要谐波检测电路, 控制电路简单可靠, 仿真结果证明了该方法是有效的, 且更具实用性。

### 参考文献

- [1] 卓放, 杨君, 胡君飞, 等. 三相四线制有源电力滤波器主电路的结构形式与控制[J]. 电工电能新技术, 2002, (2): 1-6.  
ZHOU Fang, YANG Jun, HU Jun-fei, et al. Main circuit Structure and Control of the Active Power Filter for Three-phase Four-wire System[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, (2): 1-6.
- [2] Smith K M, Lai Z. A New PWM Controller with One

Cycle Response[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(1): 142-150.

- [3] QIAO Chong-ming, Smedley K M. Three-phase Active Power Filter with Unified Constant-frequency Integration Control[A]. In: PIEMC[C]. 2000.698-705.

收稿日期: 2007-03-05; 修回日期: 2007-07-17

作者简介:

庄华 (1980-) 女, 硕士, 主要从事电力系统谐波的研究和治理; E-mail: huahuacq@sohu.com

周林 (1961-) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量的研究;

张代红 (1979-), 女, 硕士, 主要从事变电站的设计工作。