

双桥逆变单周控制有源电力滤波器

徐龙权, 刘山凤

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 针对经典单周控制有源电力滤波器(APF)存在的问题,提出了单周控制 APF 的双桥逆变控制策略。新控制策略的采用使其在负半周具有了正半周同样的控制效果,从而解决了经典控制策略的不足。通过 Matlab/SimPowerSystem 建造模型,仿真结果显示,双桥逆变 APF 克服了经典单周控制 APF 的电流直流分量,有效地抑制了低频次谐波,增大了功率因数并实现了单周控制有源滤波器的全局稳定,同时保持了经典控制滤波器结构简单、响应迅速的特点。

关键词: 有源滤波器; 单周控制; 双桥逆变

中图分类号: TN713

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0096-06

One-cycle Controlled Active Power Filter with Double-bridge

XU Long-quan, LIU Shan-feng

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Aiming at some problems in one-cycle control of conventional active power filter (APF), a novel one-cycle controlled APF with double-bridge is proposed. Applying double-bridge structure, APF has the same control effect in the negative half cycle as it in the positive one. Consequently, the disadvantages of conventional APF control strategy are overcome. A model is built based on Matlab/Simulink, and the simulation results reveal that the novel APF suppresses the dc component in ac current, restrains low frequency harmonics effectively, increases power factor, and achieves stability in whole cycle. Moreover, the advantages of conventional APF's simple structure and rapid response are still held in the one-cycle controlled APF with double-bridge.

Key words: active power filter(APF); one-cycle control; double-bridge

0 引言

随着电力电子变换技术在工业、航空、交通、家用电器等领域的广泛应用,电网谐波污染日益严重。为此,各种功率因数校正技术和滤波技术应运而生。有源电力滤波器(APF)就是一种能消除谐波,提高电能质量的可行解决方法^[1-8]。近年来,有很多 APF 的报道,其中的单周控制 APF 被人们广泛地研究和学习。单周控制 APF 引入了一个可复位的积分器,无论变化多大,都能控制变量在一个周期内积分等于参考值,同时还能保证特定的开关频率和良好的稳定性。

随着对单周控制 APF 的不断深入研究,关于经典的单周控制 APF 的一些缺点和不足也逐渐显现出来了,如交流电流中出现的直流分量,低频次谐波

以及全局稳定性问题。最近有关单周控制 APF 的研究就将重点放在了控制策略的改进上,相关文献提到了单极性控制策略和互补控制策略,这些控制在解决了相关问题的同时也产生一些值得思考的问题,比如就相关电路的复杂性使得实用化难度加大,部分电路对电容质量要求过高,还有部分策略未能解决经典控制下存在的正负半周控制效果不一样的问题。

针对以上提出的问题,提出了一种新型的拓扑结构,双桥单周控制 APF 解决了经典单周控制 APF 所面临的问题,并得到了良好的控制效果,并通过 SIMULINK 仿真软件中对经典单周控制 APF 和双桥逆变单周控制 APF 分别进行了仿真分析^[9,10],其结果表明,双桥单周控制 APF 消除了直流分量,有效抑制了低频次谐波,并达到了全局稳定,是一种值得推广的有源滤波器。

收稿日期:2009-07-08

作者简介:徐龙权(1971),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电气测控与智能电器。

1 经典单周控制有源滤波器

经典单周控制 APF 的主电路和控制电路拓扑结构见图 1。图中, V_s 为交流侧输入电压, R_e 为直流侧电阻, i_s 为电源电流, R_s 为电流采样电阻, D 为管 M_2 、 M_3 的占空比。

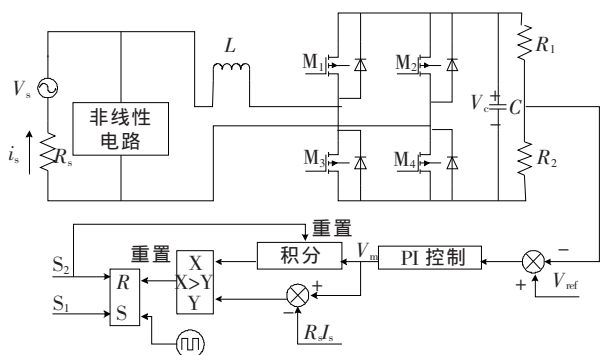


图 1 经典单周控制 APF 主控电路

控制目的是让有源滤波器补偿非线性负载的无功和谐波电流, 从而使非线性负载只汲取基波有功电流^[1-5]。也即是说在 APF 有效工作时, 整个系统应该等效为纯线性电阻性负载。那么 APF 的控制目标可表示为

$$i_s = \frac{V_s}{R_e} \quad (1)$$

为了简化分析, 特做如下两个假设: 开关频率 f_s 远远大于电网电压频率和非线性负载的电流频率; 储能电容 C 的容量足够大^[11]。

当 $0 < t < DT_s$ 时, 有

$$i_1 = \frac{V_s + V_c}{LC} \times t + I_0 \quad (2)$$

$$V_1 = V_s + V_c \quad (3)$$

当 $DT_s < t < T_s$ 时, 有

$$i_1 = \frac{V_s - V_c}{LC} \times t + I_0 \quad (4)$$

$$V_1 = V_s - V_c \quad (5)$$

根据第一条假设, 一个开关周期内负载电流几乎没有改变, 以及根据稳态时电感上单位开关周期内的伏秒数必须平衡的原则, 有

$$(V_s + V_c)D = (V_s - V_c)(1 - D) \quad (6)$$

整理得

$$V_c = \frac{V_s}{1 - 2D} \quad (7)$$

联系式(1)和式(7), 有

$$(1 - 2D)V_c = R_e i_s \quad (8)$$

$$\text{令: } V_m = \frac{R_s}{R_e} V_c \quad (9)$$

则控制方程变为

$$2DV_m = V_m - R_s i_s \quad (10)$$

基于第 1 条假设, 在每个开关周期内, 认为 I_s, V_m 近似不变, 设开关周期为 T_s , 选取定积分常数为 $T_i = T_s/2$, 原控制方程变为

$$V_m - R_s i_s = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_s} DV_m dt = \frac{1}{T_i} \int_0^t V_m dt \quad (11)$$

在每个周期内, 只要满足式(11), 则完成控制目标。引入 PI 调节器的目的是维持电容电压 V_c 的直流量为恒定值, 因为 PI 调节器为无静差调节器。 V_m 与电流采样值 $R_s i_s$ 之差通过比较器与 V_m 的积分值进行比较。每个周期开始时, RS 触发器的 Q 值输出高电平, 从而使积分器保持积分; 当二者相等时, 改变比较器的输出状态, 使 RS 触发器复位, 触发器强制积分器(带复位功能的积分器)复位, 积分器直到下个周期开始前一直保持为零, 下一个周期开始后复位信号改变才重新开始积分^[1, 2, 4]。这样就保持了每个开关周期内满足式(11), 即实现了控制目标。

2 双桥逆变单周控制有源滤波器

2.1 经典单周控制有源滤波器存在的问题

文献[1-4]指出, 经过多次实验论证, 经典的单周控制 APF 存在不可避免的缺陷: 产生直流分量且在电压负半周期时存在不稳定的因素。

直流分量的产生原因主要有两个方面: 一方面是由于经典的单周控制 APF 以峰值电流检测和比较的方法产生占空比信号, 采用一个比较器, 控制策略见图 2。实际电流在 T_{on} 期间始终保持上升, 当满足控制条件时, 在 T_{off} 期间又始终保持下降, 所以存在电流纹波。由于电流的峰值和输入电压波形一致, 纹波的存在将使平均电流低于标准正弦, 从而产生电流直流分量, 这种情况在轻载时尤为明显。另一方面, 采用图 1 所示电路来实现时, 控制目标的实现需要在 V_m 不变的情况下, 积分常数 $T_i = T_s/2$ 严格成立。但在实际中, 考虑到元器件参数的离散性、温漂和时漂等因素, 无法保证积分常数的严格成立, 从而导致积分结果偏差

$$2KDV_m = V_m - R_s i_s \quad (12)$$

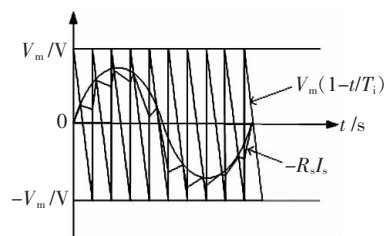


图 2 经典单周控制 APF 控制策略

当 $K < 1$ 时, 电流 i_s 在正半周变大, 在负半周变

小,产生正的直流分量;当 $K > 1$ 时,电流 i_s 在正半周变小,在负半周变大,产生负的直流分量。积分时间常数误差越大,产生的直流分量越大。

经典单周控制 APF 中各控制信号及开关切换时刻见图 3。由控制目标表达式决定开关切换时刻。

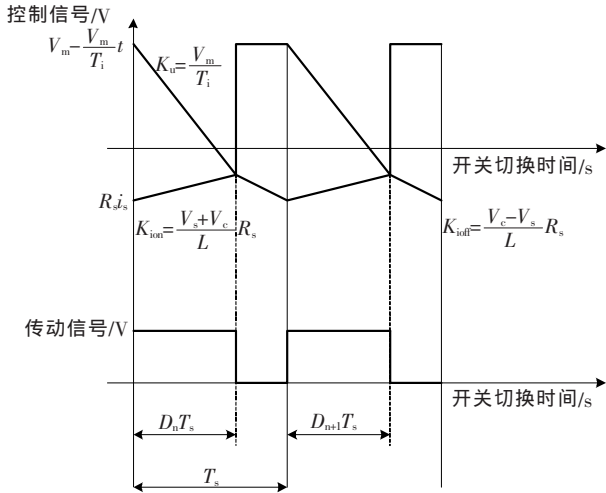


图 3 经典单周控制 APF 控制策略分析

若系统稳定,由各个周期占空比组成的数列 D_n 一定收敛。在稳态时,根据向量关系可以得到

$$K_u D_n T_s + K_{ioff} (1 - D_n) T_s = K_{ion} D_{n+1} T_s + K_u D_{n+1} T_s \quad (13)$$

式(13)中,下标 n 表示第 n 个周期,下标 $n+1$ 表示第 $n+1$ 个周期。其中

$$K_u = \frac{V_m}{T_i} \quad (14)$$

$$K_{ion} = \frac{V_s + V_c}{L} R_s \quad (15)$$

$$K_{ioff} = \frac{V_c - V_s}{L} R_s \quad (16)$$

由式(13)可以得到,第 n 个周期的占空比与第 $n+1$ 个周期占空比的关系为

$$D_{n+1} = \frac{K_{ioff}}{K_{ion} + K_u} - \frac{K_{ioff} - K_u}{K_{ion} + K_u} D_n \quad (17)$$

由式(17)可知,要使数列 D_n 收敛,系统稳定,必须满足

$$\left| \frac{K_{ioff} - K_u}{K_{ion} + K_u} \right| < 1 \quad (18)$$

将式(14)、(15)、(16)带入式(18),得到系统的稳定条件为

$$-V_s < \frac{V_m L}{R_s T_i} \quad (19)$$

显然,在电压正半周,总是满足条件,系统稳定;但是在负半周,可能出现不稳定,特别是当轻载时, R_s 很大, V_m 很小,很容易出现无法满足控制目标的不稳定现象,而在靠近线电压负半周峰值附近,系统极易出现不稳定现象^[1,2]。所以,应避免轻载运行,并

尽量提高 V_c 值,保证系统稳定。

2.2 双桥逆变单周控制有源滤波器

针对经典单周控制 APF 存在的缺点及其他控制策略的不足,提出了一种新型双桥逆变单周控制策略:在电源电压正半周,采用与经典单周控制完全相同的控制策略;在负半周,通过构建双桥结构,使直流侧电容的极性反转,得到与正半周相同的控制效果,从而在策略上消除了电流的谐波分量,也使得系统在整个周期内稳定。其控制策略见图 4。

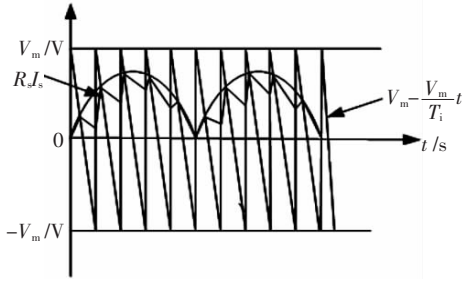


图 4 双桥逆变单周控制 APF 的电流控制策略

双桥逆变单周控制 APF 主控电路见图 5。设图 5 中左边的逆变桥为 1 桥,右边的逆变桥为 2 桥,两个逆变桥的各桥臂上下两开关管都必须互补导通,1 桥开关管的切换频率为经典周期控制中的开关频率 f_s ,2 桥因为作为正负半周的切换,故其开关管的切换频率与电源电压频率(50 Hz)相同。2 桥可以是全桥,也可以是半桥,考虑到开关管受压,笔者采用双全桥结构。

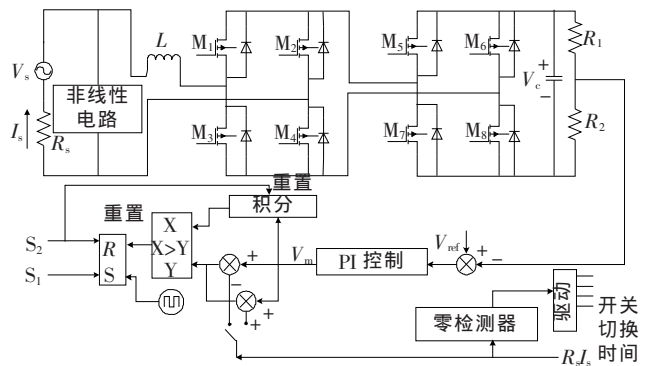


图 5 双桥逆变单周控制 APF 主控电路

在电源电压的正半周,始终开通 M_5 、 M_8 ,同时关断 M_6 、 M_7 ,设 D 为开关管 M_2 、 M_3 的占空比,控制电路按照经典的单周控制方法进行控制,其控制方程为

$$2DV_m = V_m - R_s i_s \quad (20)$$

负半周时,关断 M_5 、 M_8 ,同时开通 M_6 、 M_7 ,设 D 为开关管 M_2 、 M_3 的占空比,那么 M_1 、 M_4 的占空比为 $(1-D)$ 。此时,主电路在结构上与正半周一致,采用与正半周一样的控制时,可以得到

$$2(1-D)V_m = V_m - R_s i_s \quad (21)$$

整理得

$$2DV_m = V_m + R_s i_s \quad (22)$$

$$(1-2D)V_m = -R_s i_s \quad (23)$$

可见在负半周，只要在原有的控制电路上设法将 $R_s i_s$ 转换成 $-R_s i_s$ 即可。为此，需要在控制电路中增加一个切换开关，此开关的控制信号和电源电压频率一致，控制电路按式(23)进行控制，此时主电路与正半周一样，其控制方程实质也一致，故其控制效果与正半周一样。因此在策略上实现了良好的控制。

3 仿真实现及稳定性分析

经典单周控制 APF 的仿真模型见图 6、7，参数设置如下：电压源电压有效值为 220 V，系统等效电感为 0.005 H，负载接入 RC 负载，电阻 $R=220 \Omega$ ，电

容 $C=100 \mu\text{F}$ ，逆变器中，滤波电感 $L=1.2 \text{ mH}$ ，直流侧电容 $C=500 \mu\text{F}$ ；其上预设电压为 450 V，有源滤波器开关管的开关频率是 40 kHz，采样电阻 $R_s=1 \Omega$ 。双桥逆变单周控制 APF 的仿真模型见图 8、9，各参数设置与经典单周控制 APF 完全一致。

图 8 给出了未做任何补偿措施下的负载电流波形和电源电流波形，可以看出，此时的负载电流波形是一个个尖脉冲，给电网电流带来了很大的冲击，使得电网侧电流也表现为正负交替的尖脉冲，波形畸变非常厉害，电源电流含有大量的谐波。

单周控制下，仿真结果见图 11、12，从图中可以明显观察到，相对于未做任何补偿措施的情况下，此时的电流波形已经明显具有正弦波的趋势，只要经过适当的滤波便能得到很好的正弦波。只是在经典

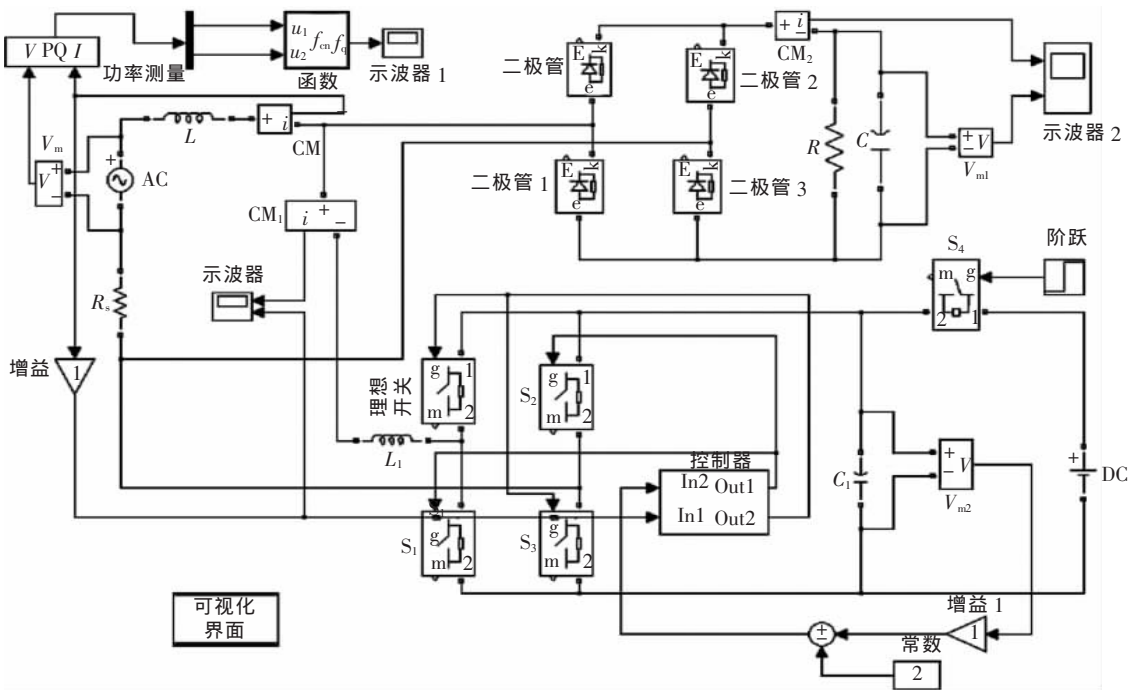


图 6 经典单周控制 APF 的主电路仿真模型

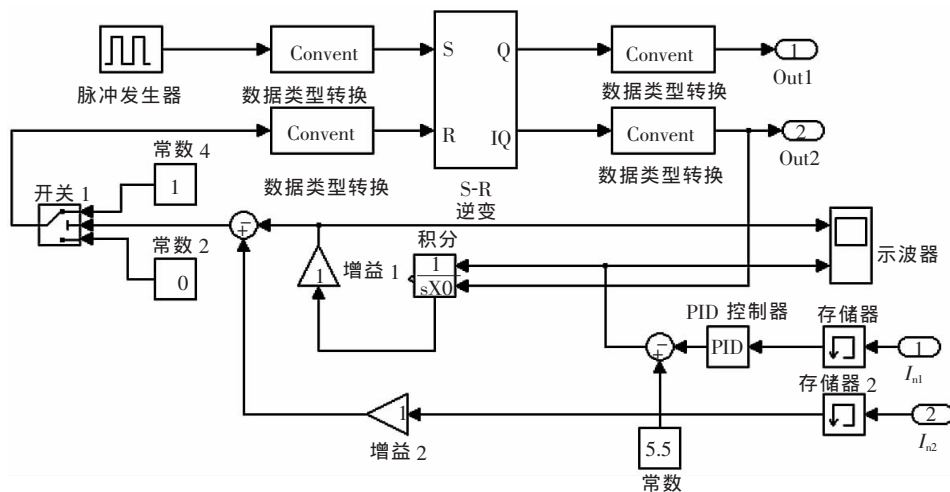


图 7 经典单周控制 APF 的控制电路仿真模型

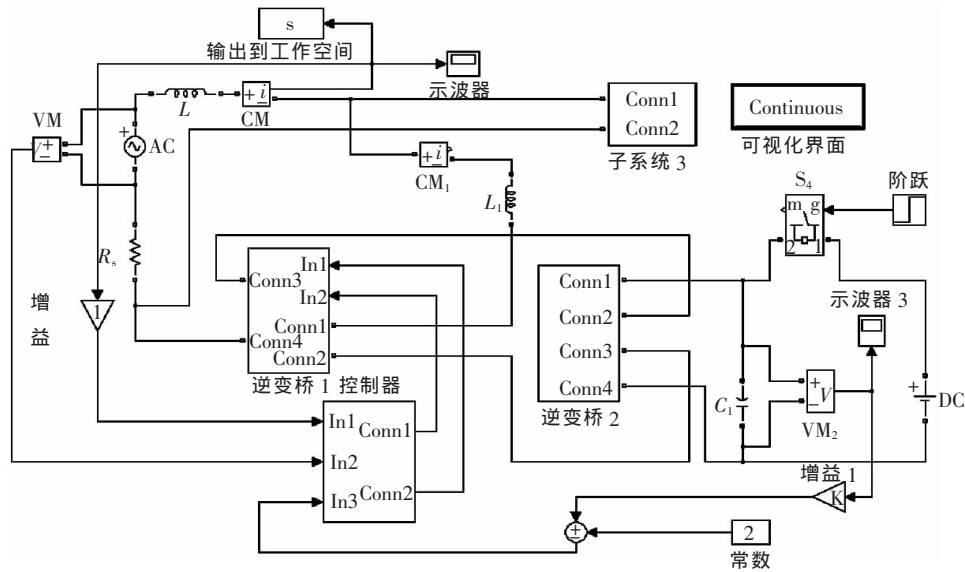


图 8 双桥逆变单周控制 APF 的主电路仿真模型

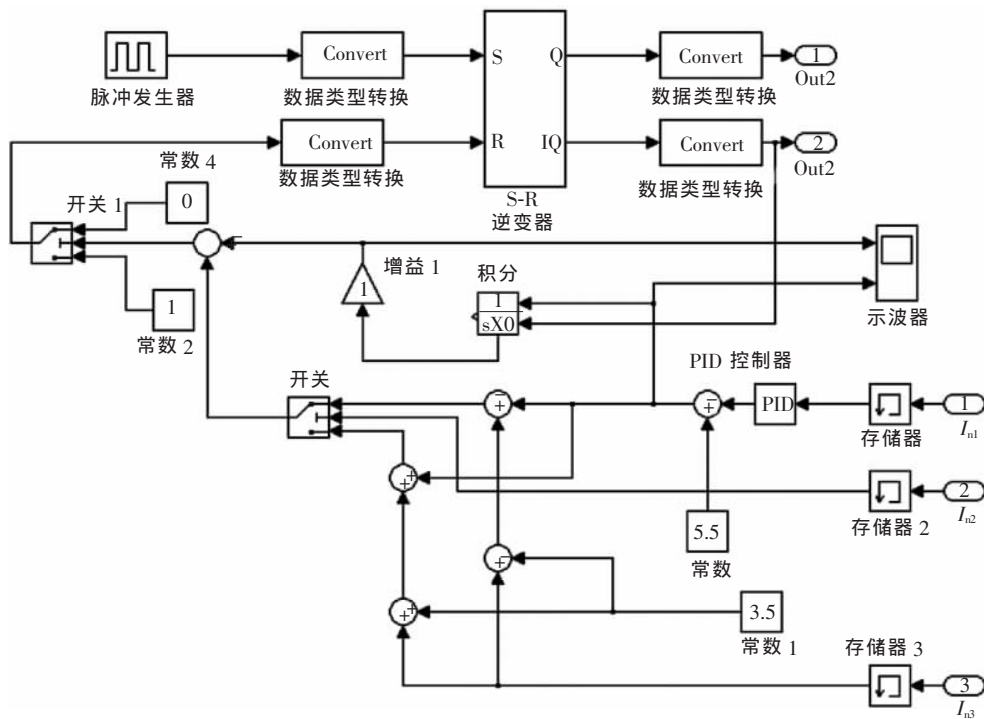
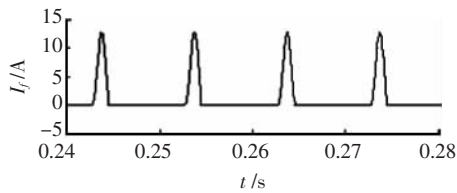
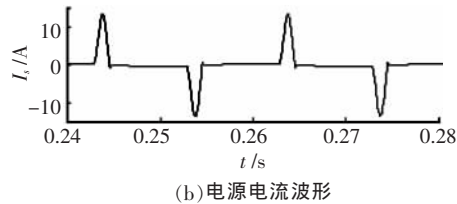


图 9 双桥逆变单周控制 APF 的控制电路仿真模型



(a) 未补偿前负载电流波形



(b) 电源电流波形

图 10 未补偿前负载电流波形和电源电流波形

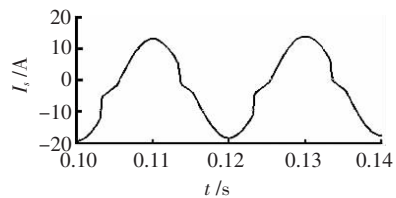


图 11 当 R 为 500 Ω 时经典单周控制 APF 的电源电流波形分析

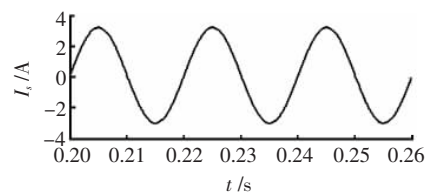


图 12 当 R 为 500 Ω 时双桥逆变单周控制 APF 的电源电流波形分析

控制下,系统具有较大的直流分量;同时,在电源电压负半周,电源电流波动很大,系统的控制效果明显不如正半周。而双桥单周控制明显改善了这些缺点。

两种不同控制策略下的仿真结果见表1,可以看出在经典单周控制策略下,电源电流的直流分量在15%~23%之间,THD值在10%~35%之间,功率因数在0.75~0.91之间,并且存在在负半周不稳定的

情况,特别是在轻载情况下,直流分量、谐波分量都大幅增加;在采用双桥控制后,经检测其THD在0.22%~0.28%之间,功率因数在0.995 8~0.996 5之间,直流分量在3.1%~3.4%之间,没有发生轻载时系统控制效果不良的情况,并且实现了正负半周的控制效果一致。同时保持了经典控制APF结构简单、响应迅速的特点。

表1 两种不同控制策略下的仿真结果

Style	R/ Ω	谐波畸变率 THD/(%)	直流分量/(%)	功率因数	次谐波分量/%					
					3rd	5th	7th	9th	11th	13th
经典单周控制 APF	80	28.47	19.37	0.777 8	24.07	9.04	7.95	5.28	4.25	3.61
双桥逆变单周控制 APF	500	11.02	16.88	0.900 5	6.98	5.68	4.02	3.09	1.85	1.29
双桥逆变单周控制 APF	80	0.26	3.17	0.996 0	0.32	0.14	0.12	0.09	0.07	0.05
双桥逆变单周控制 APF	500	0.27	3.28	0.996 1	0.30	0.15	0.11	0.09	0.07	0.06

4 结语

在经典单周控制有源电力滤波器的基础上,提出了双桥单周控制有源电力滤波器,有效地消除了电流直流分量,而且使单周控制有源滤波器达到了全局稳定,并有效地抑制了低频次谐波。在 Matlab/SimPowerSystem 中建立了模型,通过仿真对比与分析,验证了双桥单周控制策略的有效性。

参考文献:

- [1] 钱挺,吕征宇.基于单周控制的有源滤波器双环控制策略[J].中国电机工程学报,2003,23(3):34-37.
- [2] 杜雄,周维,谢品芳,等.一种改进的单周控制直流侧有源电力滤波器及其稳态和动态研究[J].中国电机工程学报,2003,23(7):12-17.
- [3] 陈国柱,吕征宇,钱照明.有源电力滤波器的一般原理及应用[J].中国电机工程学报,2000,20(9):17-21.
- [4] QIAO Chong-ming,KEYUE Ma SMEDLEY.Three-phase Bipolar

Mode Active Power Filter[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2002,38(1):149-158.

- [5] AKAGI H.Active Harmonic Filters[J].Proceedings of the IEEE.2005,93(12):2128-2141.
- [6] 许智榜,石晓英.Buck 变换器单周期控制分析[J].微计算机信息,2008(2):293-295.
- [7] 孟凡宇.基于数字滤波器的电力系统频率测量方法[J].微计算机信息,2008,3-1:28-29.
- [8] 范影乐,杨胜天,李铁.MATLAB 仿真应用详解[M].北京:人民邮电出版社,2001.
- [9] 郝瑞祥,程志光,游小杰.一种新型有源滤波器谐波提取方法和控制策略[J].电力系统自动化,2004,28(19):56-60.
- [10] CHENG P T,BHATTACHARYA S.Control of Square-wave Inverters in High Power Hybrid Active Filter Systems[J].IEEE Trans. on Ind. Application. 1998;34(1):458-472.
- [11] 徐万方,罗安,王丽娜,等.采用智能控制器的混合型有源电力滤波系统[J].电力系统自动化,2003,27(10):49-52.

(上接第95页)

能^[10]。此外,其人机界面友好,操作简单,交互能力强的特点也使系统的应用具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 刘亚芳.高压断路器事故调查[J].国际电力,1997,1(3):12-15.
- [2] HEISING C R,JANSSEN A L,LANZ W,et al.Summary of CIGRE 13.06 Working Group World Wide Reliability Data and Maintenance Cost Data on High Voltage Circuit Breakers Above 63 kV [C]//Industry Applications Society Annual Meeting.Conference Record of IEEE,1994.
- [3] 杜彦明,顾霓鸿.中国电力系统配电开关设备现状及事故情况[J].高压电器,2001,37(3):1-5.
- [4] IEEE Std. C37.10 -1995.IEEE Guide for Diagnostics and

Failure Investigation of Power Circuit Breakers[S].

- [5] 徐建源,朗福成,林华.高压断路器机械特性在线监测技术的现状与发展趋势[J].华通技术,2005(2):17-22.
- [6] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [7] 叶琦娅,戴文进,韩秀清,等.高压断路器机械性能的检测[J].江西电力,2001,25(1):9-11,26.
- [8] 孟永鹏,贾申利,荣命哲.真空断路器机械特征的在线监测方法[J].高压电器,2006,42(1):31-34.
- [9] 张蓬鹤,王殊,王宇,等.真空断路器的速度特性测量方法[J].低压电器,2005(3):55-57.
- [10] 谢勃,卫志农,陈斌.基于 LabVIEW DSP 模块的手持式电力谐波分析仪[J].电力自动化设备,2007,27(3):89-93.