

文章编号:1000-582X(2008)07-0740-04

直流侧串联型有源电力滤波器的单周控制方法

侯世英, 郑含博, 林茂, 江泽佳

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要:单周控制(one cycle control, OCC)因其控制结构简单, 控制精度高, 响应速度快等优点, 已被广泛用于有源电力滤波器(active power filter, APF)的控制。目前单周控制技术主要集中在并联型 APF 的控制中, 而对单周控制应用于串联型 APF 仍需要进一步研究。文中将单周控制理论应用于直流侧串联型 APF, 通过对其主电路工作原理的分析, 导出了用于 DC(direct current)侧串联型 APF 的单周控制数学关系, 并建立了控制方程。仿真结果验证该理论的正确性与可靠性。

关键词:单周控制; 有源滤波器; 直流侧; 控制方程

中图分类号: TM461

文献标志码: A

Direct current side series active power filter with one cycle control

HOU Shi-ying, ZHENG Han-bo, LIN Mao, JIANG Ze-jia

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: One cycle control has been widely used for active power filters (APF) because it has a simple structure, high precision, and fast response. One cycle control techniques mainly concentrate on parallel APF at present, but its application in series APF needs to be explored further. We introduced the one cycle control method to a direct current (DC) side series APF. By analyzing its working principle, mathematical models based on one cycle control theory were derived for the DC side series APF, and the control equations were established. Simulation results verify the correctness and reliability of the method proposed.

Key words: one cycle control; active power filter(APF); direct current(DC) side; control equations

有源电力滤波器(active power filter, APF)是治理电网谐波的一种行之有效的方法, 能对频率和幅值都变化的谐波进行跟踪补偿, 且补偿效果不受电网阻抗的影响, 因而成为谐波抑制的一项关键技术。目前, 有源滤波器的研究主要集中在并联型的 APF, 而对串联型 APF 的研究相对很少, 但由于谐波源特性的影响, 并联型滤波器只适用补偿电流型谐波源^[1-3], 而对电压型(典型电路有直流侧电容滤波的整流器、不间断电源等)谐波源, 更适合用串联

型的 APF 来补偿^[3-4], 因此, 串联型 APF 的研究和应用也显得越来越重要。

对整流桥输入端进行谐波治理的有源电力滤波器, 目前的研究还仅局限于直流(direct current, DC)侧并联型 APF^[5-8], 而对 DC 侧串联型 APF 的研究尚未展开, 因此针对电压型谐波源负载, 笔者研究其对偶拓扑结构, 即 DC 侧串联型 APF。文献^[8-9]提出了一种单周控制^[9-12]有源滤波器, 不需要检测和计算谐波和无功电流, 主要用一个带复位

收稿日期: 2008-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50507020); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2005BA6017)

作者简介: 侯世英(1962-), 女, 重庆大学副教授, 主要从事电力电子技术应用, 控制理论应用等方向研究,

(Tel)023-65111304; (E-mail)houshiying@163.com。

的积分器作为核心控制器件,控制逆变器提供给负载所需的谐波和无功功率,电路结构简单,补偿性能好,动态性能优良^[13-16]。将单周控制引入到 DC 侧串联型 APF,详细介绍了 DC 侧串联型 APF 的工作原理及其单周控制实现策略,推导出相应的控制实现方程,具有控制电路简单,易于实现,补偿效果好等优点。最后通过仿真研究验证了理论分析的正确性与有效性。

1 直流侧串联型 APF 的工作原理

DC 侧串联型 APF 的主电路如图 1 所示,其主拓扑结构包括:二极管 D_1 、 D_2 , 2 个有源开关 S_1 、 S_2 , 储能电容 C , 平波电感 L 。APF 串联在整流桥直流侧与电压型谐波源(直流侧电容滤波的整流器)负载之间。

在主电路中,有源开关 S_1 为低频开关, S_2 为高频开关, S_2 导通的时间为占空比 D 对应的的时间。为了分析方便,假定高频开关 S_2 开关频率远高于电源工频,在理想情况下,电源电压 u_s 为正弦波;APF 的储能电容 C 很大,使 U_C 在稳态时近似为恒值。

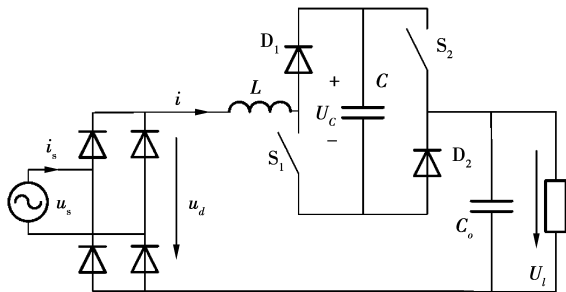


图 1 DC 侧串联型 APF 的主电路

下面分 2 个区间 1、2 对该有源电力滤波器工作原理进行分析:

区间 1,当直流侧输入电压小于输出电压时,即 $u_d < U_L$ 时,低频开关 S_1 导通,其等效电路如图 2(a) 所示。

在 $0 < t < DT_s$ 期间,高频开关 S_2 导通,二极管 D_2 关断,等效电路如图 2(b) 所示,设 $u_e = u_d - U_L$ 。

$$u_L = u_e + U_C, \quad (1)$$

在 $DT_s < t < T_s$ 期间,开关 S_2 关断, D_2 续流导通,等效电路如图 2(c) 所示,则

$$u_L = u_e, \quad (2)$$

稳态时,电感电流在一个高频开关周期中基本不变。因此,电感上的电压满足伏秒平衡,有

$$(u_e + U_C)D + u_e(1 - D) = 0, \quad (3)$$

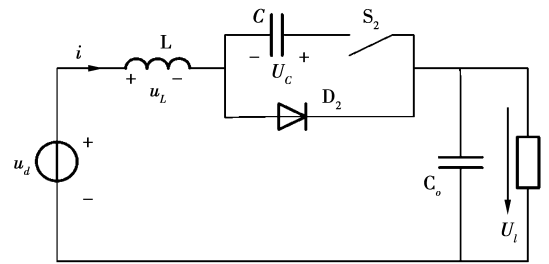
对上式整理可得

$$U_C = -\frac{u_e}{D}, \quad (4)$$

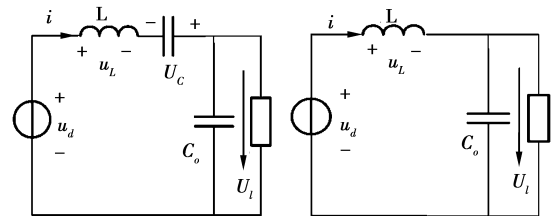
区间 2,当直流侧输入电压大于输出电压时,即 $u_d > U_L$ 时,低频开关 S_1 关断,同理分析可得 U_C 与

u_e 的关系为

$$U_C = \frac{u_e}{1 - D}. \quad (5)$$



(a) 区间 1 时等效电路图



(b) $0 < t < DT_s$

(c) $DT_s < t < T_s$

图 2 区间 1 时等效电路

2 直流侧串联型 APF 的单周控制实现

对主电路进行控制的目的是通过控制 APF 迫使交流输入电流与输入电压同频同相,即从直流侧输入端向负载端看去,整个电路呈现纯电阻性特征,设其等效电阻为 R_e ,有

$$u_d = R_e \cdot i, \quad (6)$$

对区间 1,将控制目标式(6)代入式(4),整理可得 DC 侧串联型 APF 的控制方程为

$$DU_C = U_L - R_e i, \quad (7)$$

设电流 i 的取样电阻为 R_s ,对等式(7)两边同乘以 R_s ,变形得到

$$R_s i = k(U_L - DU_C), \quad (8)$$

其中 $k = R_s / R_e$,在一个高频开关周期 T_s 中,可认为 i 、 k 、 U_C 和 U_L 的值不变,对式(8)两端进行积分,得实现方程为

$$R_s i = k \left(U_L - \frac{1}{T_s} \int_0^t U_C dt \right), \quad (9)$$

于是控制目标就转化为实现方程式(9),在每个开关周期 T_s 中,如果控制占空比 D ,使其满足控制式(9),则控制目标式(6)就得到满足。

同理对区间 2,可得其实现方程为

$$R_s i = k \left[U_L - \left(\frac{1}{T_s} \int_0^t U_C dt - U_C \right) \right], \quad (10)$$

式(9)和式(10)用单周控制实现,其单周控制 APF 主电路和控制电路分别如图 3、4 所示。

由图 3 所示的主电路,通过对直流侧输入电压 u_d 和负载输出电压 U_L 进行采样,采样值经过比较

器,当直流侧输入电压小于输出电压时,即 $u_d < U_i$ 时,产生低频驱动脉冲,驱动低频开关 S_1 导通,反之关断。

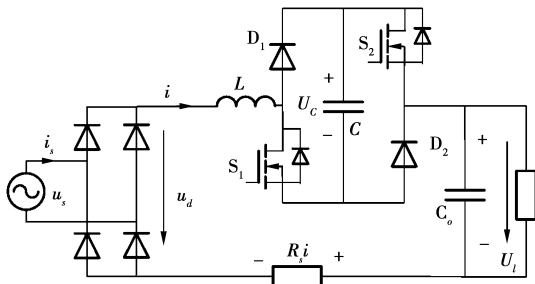


图 3 DC 侧串联型 APF 单周控制主电路

高频开关 S_2 的控制方程式(9)、(10)可用图 4 所示的单周控制电路实现。控制电路的工作过程如下:每个周期 T_s 中,当时钟脉冲到来时,积分器开始对 U_c 进行积分,同时 U_i 分别与 U_c 的积分值、 U_c 和 U_c 的积分值之和相减,然后依此通过乘法器与系数 k 相乘,其输出值 V_1 、 V_2 与参考值 $R_s i$ 进行比较。当 V_1 、 V_2 值下降到与参考值 $R_s i$ 相等时,比较器输出高电平,RS 触发器翻转,经过选择器后产生高频驱动脉冲,驱动高频开关 S_2 导通,同时实现积分器的复位。在每个开关周期中,都重复同样的过程,因此在每个开关周期中都满足了单周控制方程式(9)、(10)。

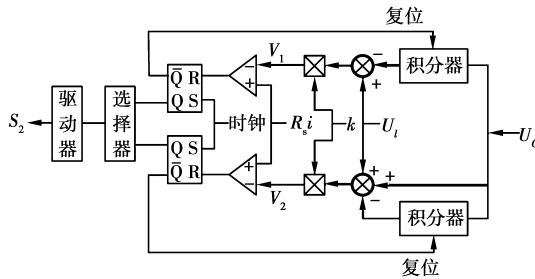


图 4 DC 侧串联型 APF 单周控制电路

3 仿真验证

为证明该单周控制实现电路的正确性与有效性,对其控制模型进行了仿真研究。仿真研究中,交流输入电压的有效值设定为 220 V,频率为 50 Hz。串联滤波器滤波电感 L 设定为 1 mH,储能电容 C 设定为 2 000 μ F,负载中电阻额定值设为 20 Ω ,电路的时钟频率设为 25 kHz,电路为典型的电压型谐波源负载,直流侧电容滤波的整流器。

由控制电路图 4、图 5 给出了在某一区间内,输出值 V_1 、 V_2 对参考值 $R_s i$ 的跟踪波形图,可以看出

文中采用的单周控制方式具有良好的控制跟踪性能。

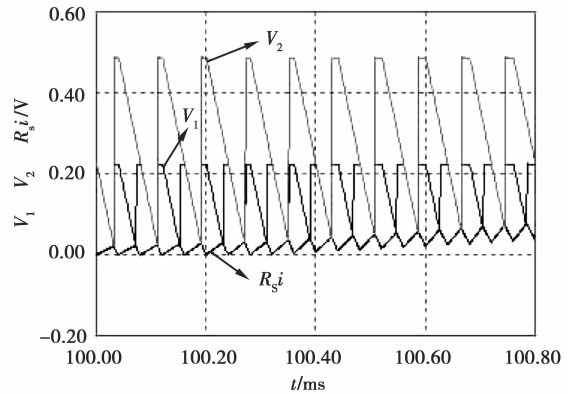


图 5 单周控制跟踪波形

在加入 APF 前,电源电流波形如图 6 所示,交流侧电源电流 i_s 存在明显的畸变, $\lambda=0.71$,总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)为 88.30%;在加入 APF 后,谐波电流得到有效的抑制,电源电流与电源电压同频同相,基本上为正弦波,电路的功率因数为 $\lambda=0.997$,总谐波畸变率 THD 为 1.75%,如图 7 所示。仿真结果与理论分析一致,很好地实现了 DC 侧串联型 APF 的补偿目的,从而证明了文中提出的单周控制直流侧串联型有滤波器的正确性与有效性。

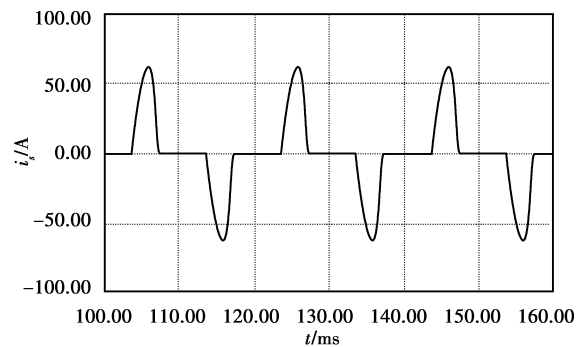
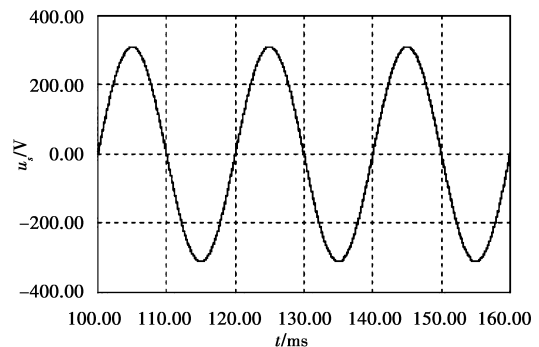


图 6 补偿前电源电流波形



(a) 补偿后电源电压波形

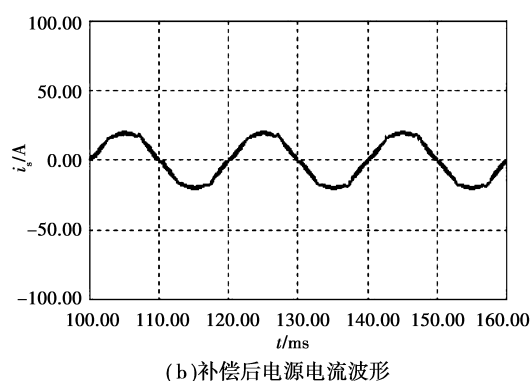


图7 补偿后电源电压电流波形

4 结 论

将单周控制技术应用于DC侧串联型APF,具有主电路拓扑新颖,控制结构简单,补偿性能好等优点。文中分析该DC侧串联型APF的工作原理,导出了其单周控制实现方程,该控制方式易于实现,控制效果好。通过仿真可以看出在加入APF后,电源电流谐波得到有效抑制,波形得到改善,很好地验证了理论分析的可行性与正确性。

参考文献

- [1] 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.
CHEN GUO-ZHU, LV ZHENG-YU, QIAN ZHAO-MING. The general principle of active power filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(9): 17-21.
- [2] 王群,姚为正,刘进军,等. 电压型谐波源与串联型有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化, 2000,24(7): 30-35.
WANG QUN, YAO WEI-ZHENG, LIU JIN-JUN, et al. Voltage type harmonic source and series active power filter[J]. Automation of Power Systems, 2000, 24(7):30-35.
- [3] 王群,姚为正,刘进军,等. 谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(2): 16-20.
WANG QUN, YAO WEI-ZHENG, LIU JIN-JUN, et al. Harmonic source and compensation characteristics of active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(2): 16-20.
- [4] SMEDLY K M, ZHOU L W, QIAO C M. Unified constant-frequency integration control of active power filters-steady-state and dynamics [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2001,16(3): 428-436.
- [5] 谢品芳,杜雄,周雒维. 单周控制直流侧单相有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2003,18(4):51-55.
XIE PIN-FANG, DU XIONG, ZHOU LUO-WEI. One cycle controlled DC side single phase active power filter [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2003,18(4): 51-55.
- [6] 杜雄,周雒维,谢品芳. 直流侧 APF 主电路参数与补偿性能的关系[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(11): 39-42.
- DU XIONG, ZHOU LUO-WEI, XIE PIN-FANG. The relationship between compensation performance and main circuit parameter of DC side APF[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(11): 39-42.
- [7] 钱挺,吕征宇,胡进,等. 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.
QIAN TING, LV ZHENG-YU, HU JIN, et al. Dualloop pscheme for unified constant-frequency integration control of active power filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3):34-37.
- [8] 钱挺,吕征宇. 新型有源滤波器的双向互补控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003,23(9):44-47.
QIAN TING, LV ZHENG-YU. Novel double-direction compensation control scheme for UCI-APF [J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(9):44-47.
- [9] QIAO C M, SMEDLY 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] ZHOU L W, SMEDLY K M. Unified constant-frequency integration control of active power filter [C]. New Orleans: APEC, 2000:406-412.
- [11] 余凤兵,梁冠安,钟龙翔,等. 基于单周控制的基波磁通补偿串联混合型有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(19):81-85.
YU FENG-BING, LIANG GUAN-AN, ZHONG LONG-XIANG, et al. A series hybrid active power filter based on the fundamental magnetic flux compensation with one cycle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(19):81-85.
- [12] 张东,周雒维,杜雄. 基于功率平衡的单相串联型有源电力滤波器[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2005,28(4):32-35.
ZHANG DONG, ZHOU LUO-WEI, DU XIONG. Novel single-phase series active power filter with power equilibrium [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005,28(4):32-35.
- [13] QIANG C M, JIN T T, SMEDLY K M. One-cycle control of three-phase active power filter with vector operation[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2004, 51(2): 455-463.
- [14] CHEN G Z, SMEDLY K M. Steady-state and dynamic study of one-cycle controlled three-phase power-factor correction[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2005,52(2): 355-362.
- [15] HIRVE S, CHATTERJEE K, FEMANDES B G, et al. PLL-Less Active power filter based on one-cycle control for compensating unbalanced loads in three-phase four-wire system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2457-2465.
- [16] CHEN Y, SMEDLY K M. Parallel operation of one-cycle controlled three-phase PFC rectifiers[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2007,54(6):3217-3224.

(编辑 陈移峰)