

文章编号:1000-582X(2008)04-0408-05

单相串联型直流侧有源电力滤波器

侯世英^{a,b}, 郑含博^{a,b}, 刘庚^a, 江泽佳^a

(重庆大学 a. 电气工程学院; b. 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:提出了一种单相串联型直流侧有源电力滤波器。与传统的单相有源电力滤波器相比,有源开关的数量减少了一半,简化了电路结构,降低了成本。串联型直流侧有源电力滤波器采用双环控制,电流控制跟踪电源电压变化,电压控制调整有源电力滤波器的能量流向。通过改变有源电力滤波器上储能电容电压极性,实现对电感电流的连续可控,提供负载所需要的谐波电压,使电源电流成为与电源电压同频同相的正弦波,从而实现谐波治理。这种控制方法具有结构简单、补偿效果好等优点。仿真结果验证了所提出理论的正确性。

关键词:串联型;直流侧;有源滤波器;不对称半桥

中图分类号:TM 461

文献标志码:A

A series type direct current side active power filter on single phase

HOU Shi-ying^{a,b}, ZHENG Han-bo^{a,b}, LIU Geng^a, JIANG Ze-jia^a

(a. College of Electrical Engineering; b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: A single-phase series direct current (DC) side active power filter (APF) was proposed. Compared with a traditional active power filter, the APF has fewer active switches, which simplifies filter current structure and reduces its cost. APF of DC was controlled by dual cycles. Thus, the current control could track power supply changes. The APF power flow was regulated by voltage control. By changing the polarity of the storage capacitor voltage, the inductor current could be controlled continuously. This provided the required harmonic voltage which aligned the frequency and phase of the supply current sine wave with the supply voltage, and achieved harmonic governance. This method has many advantages including a simple structure and good compensation. The proposed theory was verified by simulation results.

Key words: series type; direct current side; active filters; asymmetric half-bridge

由于现代电力电子装置的广泛应用,产生了大量的电力谐波,谐波造成的危害日益严重,各国开始对谐波治理问题给予十分的重视^[1-4]。谐波抑制也逐渐由无源抑制方法向有源抑制方法转变。有源抑制方法主要分为功率因数校正技术和有源电力滤波技术(active power filter, APF)。由于现在很多造

成谐波污染的用电设备已经投入使用,不能从用户端来进行谐波治理,所以使用 APF 进行谐波治理被认为是相当有效的和发展前途的谐波治理新方法。文献[5-6]提出了一种单周控制直流(direct current, DC)侧有源电力滤波器的概念,通过控制 H 型逆变器提供负载所需的谐波以及无功功率,使电

收稿日期:2007-12-118

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(2005BA6017)

作者简介:侯世英(1962-),女,重庆大学副教授,博士研究生,主要从事电力电子技术应用,控制理论应用研究,
(Tel)023-65111304;(E-mail)houshiying@163.com。

路结构大大简化。文献[7]在此基础上提出了一种 DC 侧并联型 APF,将有源功率开关数量减少了一半,改善了补偿效果。

但是并联型 APF 的性能受系统负载阻抗的影响较大,有时其补偿效果并不十分理想,而串联型 APF 正好克服了这一缺点,其补偿性能更优越^[8-9]。针对此问题,提出一种串联型直流侧有源电力滤波器,串联在整流桥的直流侧,能够实现整流负载的谐波治理,由于电路结构简单,成本低等优点,具有很好的技术优势和市场前景。仿真结果证明了理论分析的正确性。

1 DC 侧串联型 APF 的工作原理

由于传统的串联型交流侧 APF 的能量需要四象限流动,主电路结构一般为全桥或半桥结构。笔者提出的 DC 侧 APF 的能量只需要二象限流动,所以可将传统的四相 H 型逆变桥简化为一个不对称半桥,从而减少了有源开关数量^[10]。串联型直流侧 APF 的功率级电路如图 1 所示,其中 S_1 、 S_2 、 D_1 、 D_2 、 C 构成不对称半桥,提供负载所需的谐波和无功电流。

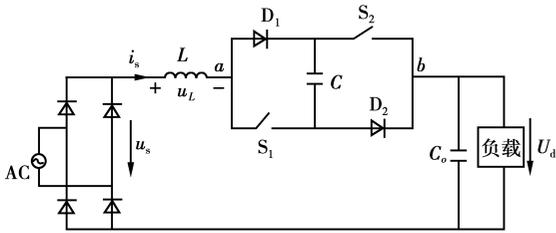


图 1 串联型直流侧 APF 主电路

为了说明直流侧串联型 APF 的工作原理,笔者针对电容滤波的电压型谐波源负载,给出了图 2 所示进行谐波电压补偿的等效电路。其中: u_s 为整流桥直流侧输入电压; u_h 为电路等效谐波分量; 串联型 APF 相当于一个受控电压源,提供补偿电压 u_{APF} 。对主电路进行控制的目标就是通过控制 APF,使 $u_{APF} = u_h$,且方向相反,抵消等效谐波分量,使整个电路从直流侧向负载端看去呈现纯电阻性。即通过控制 APF 迫使交流输入电流与输入电压同频同相。

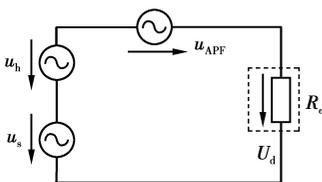


图 2 直流侧串联型 APF 等效电路

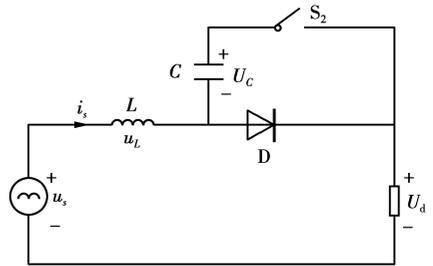
1) APF 的储能电容 C 很大,其电容电压 U_C 近似为恒定。

2) S_2 开关频率远高于电源电压频率和非线性负载电流的频率。

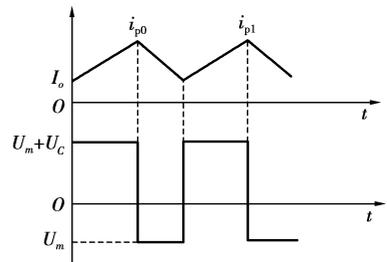
3) 电网电压为理想的正弦波。

在理想情况下,输入电压 u_s 为正弦半波,输出电压 U_d 为恒定直流,因此 APF 两端电压为二象限。而流过 APF 的电流为单象限,因此需要控制电容 C 的电压来保证电流的连续可控。

当整流桥直流侧输入电压小于输出电压时,即 $u_s < U_d$ 时,开关 S_1 导通,设为区间 I,其等效电路与区间电感电流如图 3(a)(b)所示。根据假设 2),可认为输入电压在 S_2 的一个开关周期 T_s 内基本不变,设开关 S_2 的占空比为 D 。



(a) 区间 I 内等效电路



(b) 电感电流和电感电压

图 3 区间 I 内等效电路及电感电压和电感电流波形

在 $0 < t < DT_s$ 期间,开关 S_2 导通,二极管 D 关断,设定 $U_m = u_s - U_d$,则电感上的电压、电流为

$$u_L = U_m + U_C,$$

$$i_L = \frac{U_m + U_C}{L} \cdot t + i_0.$$

在 $DT_s < t < T_s$ 期间,开关 S_2 关断,二极管 D 导通,电感上的电压、电流为

$$u_L = U_m,$$

$$i_L = \frac{U_m}{L} \cdot t + i_{p0}.$$

稳态时在一个开关周期内电感满足伏秒平衡原

为了简化分析,作如下假设:

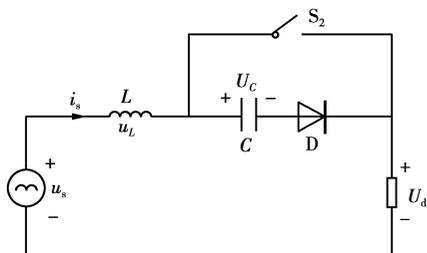
理,得到

$$(U_m + U_C) \cdot D + U_m \cdot (1 - D) = 0。$$

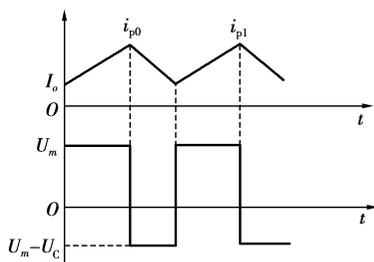
推导出

$$U_m = DU_C。 \quad (1)$$

当输入电压大于输出电压时,即 $u_s > U_d$ 时,开关 S_1 关断,设为区间 II,其等效电路和区间电感电流如图 4(a)(b)所示。



(a) 区间 II 内等效电路



(b) 电感电流和电感电压

图 4 区间 II 内等效电路及电感电流和电感电压波形

由以上分析可得

$$U_m \cdot D + (U_m - U_C) \cdot (1 - D) = 0。$$

推导出

$$U_m = (1 - D)U_C。 \quad (2)$$

控制 APF 中各开关器件的目的是使 APF 产生的补偿电压能够实时跟踪非线性负载电压中的谐波和无功的变化,并提供大小相同、方向相反的补偿电压,使电网向负载提供正弦电流。当有源电力滤波器正常工作,补偿了系统谐波和无功部分后,电源输出电流应该与电源的输出电压同频、同相(只要电源电压满足假设 3),此时的电源电流自然不含有谐波成分),也就是说从整流桥直流侧向输出端看,有源电力滤波器与负载可以被合看成一个等效的电阻 R_e ,则有

$$u_s = i_s R_e \quad (3)$$

当等式满足时,就能够保证直流侧串联型 APF 对谐波和无功的补偿。其中: u_s 为整流桥直流侧输出电压; i_s 为整流桥直流侧输出电流。

设 $u_x = \begin{cases} 1 & \text{当开关 } S_x \text{ 导通} \\ 0 & \text{当开关 } S_x \text{ 关断} \end{cases}$, 其中 $x=1,2$ 。

因此,可以表示不对称半桥两端电压为

$$u_{ba} = (u_1 + u_2 - 1)u_C。$$

为了保证输入电流的连续,需要通过控制开关 S_1 使得不对称半桥的输出电压 u_{ab} 极性随着输入电压的变化而变化,即

$$u_1 = \frac{1 - \text{sgn}(U_m)}{2}, \quad (4)$$

其中 $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$

根据等效电阻的思想,控制 APF 使得输入电流跟踪输入电压有

$$i_s = \frac{u_s}{R_e} = i_L,$$

$$\text{则 } \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [U_m + (u_1 + u_2 - 1)u_C] = \frac{1}{R_e} \cdot \frac{du_s}{dt}。$$

整理可得

$$u_2 = \frac{L}{U_C R_e} \cdot \frac{du_s}{dt} - \frac{U_m}{U_C} + \frac{1 + \text{sgn}(U_m)}{2}。 \quad (5)$$

等式(4)、(5)分别为直流侧串联 APF 开关 S_1 、 S_2 的控制方程。只要保证 APF 的控制分别满足式(4)、(5),也就是满足了等式(3),从而也就使得电网输出电流保持为正弦波。

由以上分析得知,串联型 DC 侧 APF 采用双环控制,控制电路包括两个控制回路,分别控制有源开关 S_1 和 S_2 。其中低频控制回路控制开关 S_1 ,而高频控制回路控制开关 S_2 。低频控制回路由一个脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)比较器构成,当输入电压小于输出电压时,低频开关 S_1 导通,电容 C 向负载输出能量。反之,低频开关 S_1 关断,电容 C 储存能量。高频控制回路采用了滞环电流 PWM 控制法,其控制电路如图 5 所示。

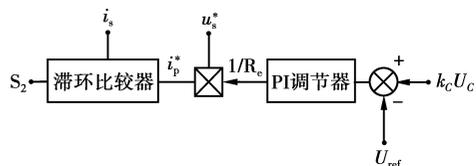


图 5 滞环控制电路结构

由该控制电路可以看出,直流侧串联型 APF 需要检测的信号是有源电力滤波器中逆变器电容电压 U_C 、整流桥直流侧电压 u_s 以及直流侧电流 i_s ,然后由控制电路产生的控制信号去控制 APF 上开关 S_2 的动作。通过检测有源电力滤波器上电容电压得到 $k_c U_C$,与参考值 U_{ref} 比较之后通过比例积分(proportional integral, PI)调节器获得等效电阻 $1/R_e$ 。检测出整流桥直流侧输入电压 u_s^* ,经过一个乘法器获得

参考电流信号 i_p^* 。将比较参考电流信号 i_p^* 与电感电流 i_s 相比较,误差值送入滞环比较器,产生开关管 S_2 的 PWM 驱动信号,控制电感电流跟踪输入电压变化。

2 仿真验证

根据提出的单相串联型直流侧有源电力滤波器的电路结构,进行了仿真验证。仿真电路的参数为:交流输入电压的有效值设定为 220 V;频率为 50 Hz;滤波电感 L 设定为 1.5 mH;储能电容 C 设定为 2 000 μF ;负载电阻额定值设定为 20 Ω 。

图 6(a)、(b)分别为加入 APF 补偿前后的电压电

流波形。其中 u 、 i 分别为电源电压和电流。可见加入 APF 前电源输出电流带有大量谐波,其功率因数 (power factor, PF) $\text{PF}=0.683$,其总的谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) $\text{THD}=108.5\%$ 。而直流侧串联型有源电力滤波器的补偿效果非常理想,补偿后,电源输出电流谐波得到有效抑制,其功率因数 $\text{PF}=0.995$,总的谐波畸变率 $\text{THD}=2.8\%$ 。图 6(c)给出了 APF 储能电容电压 U_c 和负载输出电压 U_d 的波形,其波动幅度均能控制在一定范围内,没有出现严重不平衡现象。仿真结果与理论分析一致,很好地实现了串联型直流侧 APF 的补偿目的,从而证明了提出的串联型直流侧 APF 的正确性与有效性。

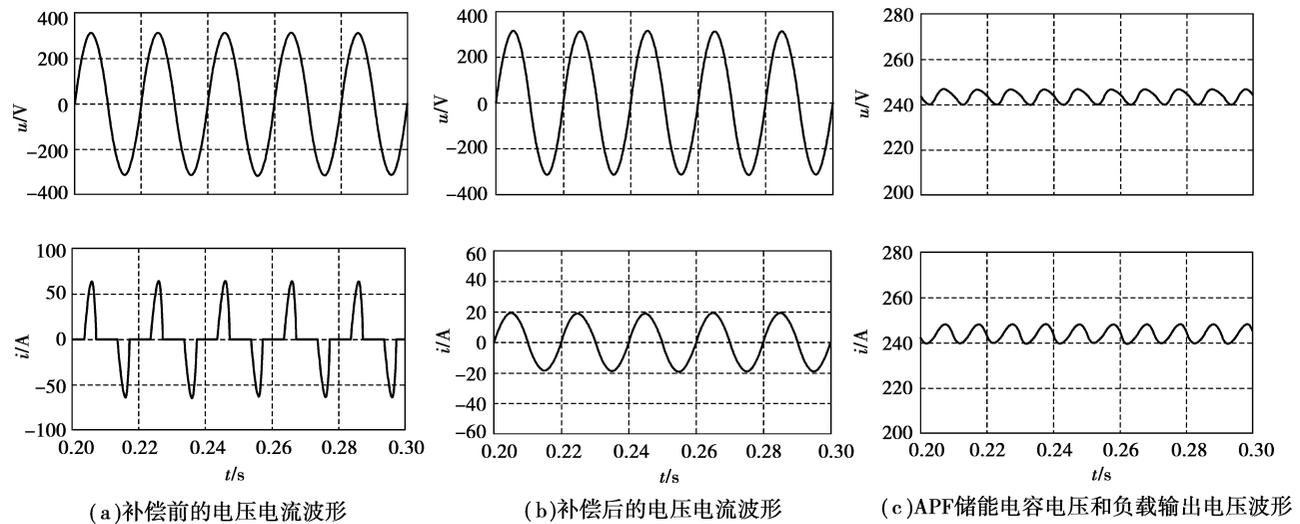


图 6 串联型直流侧 APF 仿真结果

3 结语

提出了一种串联型直流侧有源滤波器,具有主电路结构新颖简单,补偿效果良好等优点。其主电路串联在整流桥电路的直流侧,采用不对称半桥结构,只用 2 个有源开关。与全桥结构的 APF 相比少用 2 个开关,且开关电压应力减小。提出的双环控制方法,分别对跟踪谐波和 APF 能量流向进行控制,有利于提高补偿效果。仿真结果验证了文中理论分析的正确性。

参考文献:

[1] 刘进军, 刘波, 王兆安. 基于瞬时无功功率理论的串联混合型单相电力有源滤波器 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 37-41.

LIU JIN-JUN, LIU BO, WANG ZHAO-AN. Hybrid type series active power filter used in single-phase circuit based on instantaneous reactive power theory [J].

Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 37-41.

[2] 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.

[3] 李战鹰, 任震, 杨泽明. 有源滤波装置及其应用研究综述 [J]. 电网技术, 2004, 28(22): 40-43.

LI ZHAN-YING, REN ZHEN, YANG ZE-MING. Survey on active power filter devices and their application study [J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 40-43.

[4] 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 compensa-

- tion with one cycle control [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 81-85.
- [5] ZHOU LUO-WEI, SMEDLY K M. Unified constant-frequency integration control of active power filters [C]. New Orleans: APEC, 2000: 406-412.
- [6] SMEDLY K M, ZHOU LUO-WEI, QIAO CHONG-MING. Unified constant-frequency integration control of active power filters: steady-state and dynamics [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2001, 16(3): 428-436.
- [7] 谢品芳, 杜雄, 周维维. 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.
- [8] 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.
- [9] 游小杰, 李永东, VALONCH V, 等. 并联型有源电力滤波器在非理想电源电压下的控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 55-60.
YOU XIAO-JIE, LI YONG-DONG, VALONCH V, et al. SAF control strategy under the condition of non-ideal source voltages [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 55-60.
- [10] ERTL H, KOLAR J W. A constant output current three-phase diode bridge rectifier employing a novel "electronic smoothing inductor" [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2005, 52(2): 454-461.

(编辑 李胜春)

(上接第 396 页)

参考文献:

- [1] 孟令启, 胡尚峰. 中厚板轧机压力数学模型研究 [J]. 郑州大学学报, 2000, 66(2): 60-64.
MENG LING-QI, HU SHANG-FENG. Mathematical model of rolling pressure for middle-thicken plate mill [J]. Journal of Zhengzhou University, 2000, 66(2): 60-64.
- [2] 孟令启. 基于 BP 神经网络的中厚板轧机轧制力模型 [J]. 钢铁研究学报, 2006, 69(11): 100-108.
MENG LING-QI. Rolling force model of plate rolling mill based on BP neural network [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 69(11): 100-108.
- [3] 孟令启. 中厚板轧机宽展的神经网络预测 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(18): 112-115.
MENG LING-QI. Width variable prediction in medium plate mill by means of neural network [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(18): 112-115.
- [4] 李光耀, 谭长平. 基于遗传算法的变压边力模型及其在回弹控制中的应用 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(2): 1-5.
LI GUANG-YAO, TAN CHANG-PING. A variable blankholder force model based on genetic algorithm and its application in springback analysis [J]. Journal of Huan University: Natural Sciences, 2005, 32(2): 1-5.
- [5] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 187-194.
- [6] 邹家祥. 轧钢机械 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 151-175.
- [7] 孙占刚. 轧机闭式机架的有限元分析及优化设计 [J]. 冶金设备, 2004(3): 8-11.
SUN ZHAN-GANG. Finite element analysis and optimization design of close-top mill housing [J]. Metallurgical Equipment, 2004(3): 8-11.
- [8] 陆松年. 4200 四辊轧机机架辊接轴受力的实验分析和改进意见 [J]. 舞钢技术, 1987, 13(5): 1-12.
LU SONG-NIAN. Breast roller spadle's experimental analysis and improvement suggestion of 4200 four-high mill [J]. Wugang Technology, 1987, 13(5): 1-12.
- [9] 铁摩辛柯. 工程中的振动问题 [M]. 北京: 人民铁道出版社, 1978: 135-182.
- [10] 顾绳谷. 电机及拖动基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 53-154.

(编辑 陈移峰)